Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Ambiental

TESIS

Desempeño hidráulico de la bomba de ariete hidráulico universal con tubería de suministro de PVC

Para obtener el título profesional de

Ingeniero Sanitario

Elaborado por

Fleming Erick Estrada Huayta

0009-0007-7684-9704

Asesor

Ing. Jorge Luis Olivarez Vega

0009-0000-4778-2749

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Estrada Huayta [1]
Referencia/Reference Estilo/Style: IEEE (2020)	[1] F. Estrada Huayta, "*Desempeño hidráulico de la bomba de ariete hidráulico universal con tubería de suministro de PVC*" [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.

Citar/How to cite	(Estrada, 2025)
Referencia/Reference Estilo/Style: APA (7ma ed.)	Estrada, F. (2025). *Desempeño hidráulico de la bomba de ariete hidráulico universal con tubería de suministro de PVC*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.

Agradecimientos

Con gratitud a mis padres, hermanos y hermanas, cuyo apoyo incondicional fue fundamental durante el desarrollo de esta tesis. Agradezco también a la Institución Educativa Libertador José de San Martín y a su personal administrativo por las facilidades brindadas para la realización del trabajo experimental. Expreso mi reconocimiento a mi asesor por sus valiosas orientaciones, las cuales hicieron posible la culminación de este proyecto.

Resumen

La tesis consiste en describir el comportamiento hidráulico de la bomba de ariete de PVC 1”, a partir de las variables independientes $h/H \in$ [2.3, 11] y L/D = {400, 500, 600}. Las hipótesis se plantearon sobre las relaciones adimensionales q/Q_T, Q/Q_T, nD/v_c y η. También se estudio el caudal de suministro relativo $Q_T/(v_c D^2)$. La investigación es experimental, para lo cual se construyó un banco de pruebas hidráulico para alturas de suministro de H = {1.4 m, 2 m, 3 m}.

Se encontró un caudal de descarga máximo de 5.79 l/min, cuando h/H = 2.3 y H = 3 m. La altura de descarga máxima h_{max} encontrada fue de 44.8 m a caudal cero (q = 0 l/min) cuando L/D = 600 y H = 3 m. La mayor altura de descarga a caudal mínimo estudiada fue de 33.08 m con un caudal de bombeo de q = 0.31 l/min, cuando h/H = 11. La eficiencia de Rankine alcanza sus valores más altos en el rango $h/H \in$ [4, 6], con un promedio de 44.3%.

El caudal de suministro necesario para el funcionamiento de la bomba de ariete se encuentra entre $Q_T \in$ [10.46 l/min, 26.68 l/min]. La relación $q/Q_T \in$ [0.015, 0.248] indica que el bombeo efectivo está entre el 1.5% y el 24.8% del caudal de suministro. Para una relación de alturas h/H = 5 el caudal relativo es q/Q_T = 0.10, es decir, el 10% del caudal de suministro es bombeado.

Palabras clave – Bomba de ariete hidráulico, PVC, golpe de ariete, válvula de impulso, eficiencia de Rankine.

Abstrac

The thesis consists of describing the hydraulic behavior of the 1” PVC ram pump, starting from the independent variables h/H = [2.3, 11] and L/D = {400, 500, 600}. Hypotheses were made on the dimensionless relationships q/Q_T, Q/Q_T, nD/v_c and η. The relative supply flow rate $Q_T/(v_cD^2)$ was also studied. The investigation is experimental, for which a hydraulic test rig was constructed for supply heads of H = [1.4 m, 2 m, 3 m}.

A maximum discharge flow rate of 5.79 l/min was found, when h/H = 2.3 and H = 3 m. The maximum discharge head h_{max} found was 44.8 m at zero flow rate (q = 0 l/min), when L/D = 600 and H = 3 m. The highest discharge head at minimum flow rate studied was 33.08 m at a pumping rate of q = 0.31 l/min, when h/H = 11. Rankine efficiency reached its highest values in the range h/H = [4, 6], with an average of 44.3%.

The supply flow rate required to operate the ram pump is between Q_T = [10.46 l/min, 26.68 l/min]. The ratio q/Q_T = [0.015, 0.248] indicates that the effective pumping is between 1.5% and 24.8% of the supply flow. For a head ratio h/H = 5 the relative flow rate is q/Q_T = 0.10, i.e., 10% of the supply flow is pumped.

Keywords – Hydraulic ram pump, PVC, water hammer, impulse valve, Rankine efficiency.

Tabla de Contenido

Resumen....iv

Abstrac....v

Introducción....xvi

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo....1

1.1 Generalidades....1

1.2 Planteamiento de la realidad problemática....1

1.2.1 La realidad problemática....1

1.2.2 Pregunta de investigación....3

1.2.3 Justificación e importancia....3

1.3 Objetivos....4

1.3.1 Objetivo General:....4

1.3.2 Objetivos Específicos:....4

1.4 Antecedentes de investigación....5

1.5 Alcance del estudio....9

1.6 Hipótesis....10

1.6.1 Hipótesis general....10

1.6.2 Hipótesis específicas....10

1.6.3 Variables....10

Capítulo II. Marco teórico, conceptual y legal....13

2.1 Marco teórico....13

2.1.1 La bomba de ariete hidráulico....13

2.1.2 Componentes, partes, elementos de la bomba de ariete hidráulico....18

2.2 Marco conceptual....32

2.2.1 Desempeño hidráulico de la bomba de ariete....32

2.2.2 Análisis teórico del funcionamiento de la bomba de ariete hidráulico....36

2.2.3 Variables involucradas en el funcionamiento de la bomba de ariete....46
2.3 Marco legal....49
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación....51
3.1 Metodología....51
3.1.1 Enfoque de investigación....51
3.1.2 Contexto general de la investigación....51
3.1.3 Diseño de investigación....51
3.1.4 Casos, universo y muestra....69
3.1.5 Procedimiento....69
3.1.6 Procesos de recolección de los datos....70
3.1.7 Análisis de datos....72
3.2 Resultados....74
3.2.1 Estadísticas generales....74
3.2.2 Estadísticas descriptivas e inferencial de observaciones....78
3.2.3 Modelación matemática....96
3.2.4 Prueba estadística de hipótesis planteadas....117
Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados....135
4.1 Explicación de la dispersión/variabilidad del experimento....135
4.1.1 Variables q/Q_T y Q/Q_T....135
4.1.2 Eficiencia de Rankine....137
4.1.3 Parámetro de la válvula de impulso....138
4.2 Prueba de hipótesis y rangos de operación aceptable....139
4.2.1 Rangos de la eficiencia....139
4.2.2 Punto de Bombeo Máximo....141
4.3 De la modelación matemática y curvas características....145
4.3.1 Tablas de datos comerciales....145
4.3.2 Curva característica de la bomba de ariete....148

4.3.3 Comparación de curvas características.....150
4.3.4 Curvas características utilizada por Hadzich (s/f).....153
4.3.5 Análisis de la altura de descarga *h*.....156
4.4 Análisis de las condiciones de funcionamiento de la bomba de ariete.....158
4.4.1 Variables independientes.....158
4.4.2 Velocidad crítica.....158
4.4.3 Temperatura del agua.....160
4.4.4 Variables consideradas por otros autores.....160
Conclusiones.....162
Recomendaciones.....167
Referencias bibliográficas.....170
Anexos.....178

Lista de Tablas

Tabla 1 Definición conceptual y operacional de variables independientes.....10

Tabla 2 Definición conceptual y operacional de variables dependientes.....11

Tabla 3 Relaciones adimensionales adicionales.....12

Tabla 4 Comparación entre bombas de ariete de PVC y de fabricación metálica.....17

Tabla 5 Efecto del ajuste de la válvula de impulso.....25

Tabla 6 Modelos de válvula de impulso.....27

Tabla 7 Rangos de longitud de tubería de suministro.....28

Tabla 8 Primer pico de sobre presión alcanzado en función de la rigidez calculada.....30

Tabla 9 Tipos de eficiencia de una bomba de ariete.....35

Tabla 10 Ecuaciones del modelo de Krol.....40

Tabla 11 Nomenclatura de símbolos utilizados por Tacke.....42

Tabla 12 Ecuaciones del ciclo teórico de Tacke.....43

Tabla 13 Relaciones adimensionales en la bomba de ariete hidráulico.....44

Tabla 14 Contexto general de la investigación.....51

Tabla 15 Instrumentos de medición de variables independientes.....54

Tabla 16 Instrumentos de medición de variables independientes.....54

Tabla 17 Tratamientos experimentales según niveles de las relaciones h/H y L/D.....61

Tabla 18 Parámetros fijados para cada unidad experimental.....62

Tabla 19 Selección de diámetro de instalación D y altura de suministro H.....62

Tabla 20 Relación h/H en función a la altura de descarga y la altura de suministro.....63

Tabla 21 Grupos de 25 pruebas para cada relación L/D.....65

Tabla 22 Pruebas para los primeros 4 grupos.....65

Tabla 23 Primera aleatorización “preferible” de grupos.....66

Tabla 24 Serie de aleatorizaciones preferibles.....67

Tabla 25 Elección de una aleatorización preferible.....67

Tabla 26 Aleatorización de pruebas dentro del grupo N°3.....68
Tabla 27 Procedimiento experimental.....69
Tabla 28 Plan de recolección de datos.....70
Tabla 29 Plan de recolección de datos II.....70
Tabla 30 Datos de calibración de instrumentos de medición.....71
Tabla 31 Cantidad de pruebas realizadas para cada L/D, según situación.....74
Tabla 32 Observaciones de pruebas adicionales, atípicas e inválidas.....75
Tabla 33 Condiciones del experimento.....76
Tabla 34 Rango de las relaciones adimensionales independientes.....76
Tabla 35 Rango de valores de las variables independientes simples.....77
Tabla 36 Rango de las variables dependientes simples.....77
Tabla 37 Relación q/Q_T en función de la altura de suministro H.....78
Tabla 38 Rango de la relación Q/Q_T en función de la altura de suministro H.....83
Tabla 39 Valores promedios del parámetro nD/v_c en función de L/D.....86
Tabla 40 Valores máximo y mínimos del parámetro nD/v_c.....86
Tabla 41 Rango de la eficiencia en función de la altura de suministro H.....90
Tabla 42 Rango de la relación Q_T / (v_cD^2) en función de la altura de suministro H.....93
Tabla 43 Modelo para el caudal de descarga relativo $y_1=q/Q_T$.....97
Tabla 44 Modelo para el caudal de funcionamiento relativo $y_2=Q/Q_T$.....97
Tabla 45 Modelo para parámetro de válvula de impulso $y_3=nD/v_c$.....98
Tabla 46 Modelo para la eficiencia $y_4= \eta$.....98
Tabla 47 Modelo para el caudal de descarga relativo $y_5 = Q_T$ / (v_cD^2).....99
Tabla 48 Modelo para el caudal de descarga relativo $y_1=q/Q_T$.....100
Tabla 49 Modelo para el caudal de funcionamiento relativo $y_2=Q/Q_T$.....101
Tabla 50 Modelo para parámetro de válvula de impulso $y_3=nD/v_c$.....101
Tabla 51 Modelo para la eficiencia $y_4= \eta$.....102
Tabla 52 Modelo para el caudal de descarga relativo $y_5 = Q_T$ / (v_cD^2).....103

Tabla 53 Errores para el límite de confianza del valor promedio y valor particular.....104
Tabla 54 Errores para el límite de confianza del valor promedio y valor particular.....106
Tabla 55 Errores para el límite de confianza del valor promedio y valor particular.....108
Tabla 56 Errores para el límite de confianza del valor promedio y valor particular.....110
Tabla 57 Errores para el límite de confianza del valor promedio y valor particular.....113
Tabla 58 Hipótesis estadística generales.....117
Tabla 59 Mejor desempeño de variables dependientes.....118
Tabla 60 Definición de hipótesis estadística específicas.....119
Tabla 61 Contraste T para Una Muestra.....120
Tabla 62 Estadísticos descriptivos del caudal de descarga máximo qmax.....120
Tabla 63 Contraste T para Una Muestra.....122
Tabla 64 Estadísticos Descriptivos.....122
Tabla 65 ANOVA - η.....123
Tabla 66 Contraste de Igualdad de Varianzas (de Levene).....123
Tabla 67 Comparación Pos-hoc de tratamientos uno a uno con valores p<0.05.....125
Tabla 68 Comparación de tratamientos uno a uno mediante valores p (p<0.05).....125
Tabla 69 ANOVA - η.....126
Tabla 70 Contraste de Igualdad de Varianzas (de Levene).....127
Tabla 71 Estadísticos Descriptivos.....127
Tabla 72 ANOVA - q/Q_T.....129
Tabla 73 Prueba Estándar (LSD) Comparaciones Post-hoc - Tratamientos.....129
Tabla 74 Estadísticos Descriptivos.....130
Tabla 75 Contraste de Igualdad de Varianzas (de Levene).....130
Tabla 76 ANOVA - nD/v_c.....132
Tabla 77 Comparación de combinaciones uno a uno mediante valores p.....132
Tabla 78 Estadísticos Descriptivos.....133
Tabla 79 Contraste de Igualdad de Varianzas (de Levene).....133

Tabla 80 Eficiencia promedio para h/H entre 4 y 6.....140

Tabla 81 Eficiencia de Rankine máxima y rango de h/H donde se presenta.....140

Tabla 82 Caudal de descarga máximo q_{max}.....141

Tabla 83 Condiciones del caudal máximo de descarga por autores.....142

Tabla 84 Selección de condiciones de operación de la bomba de ariete de PVC 1".....145

Tabla 85 Características operativas de la bomba de ariete de PVC.....146

Tabla 86 Curvas características y condiciones específicas.....149

Tabla 87 Variables del experimento.....158

Tabla 88 Variables experimentales de autores.....161

Lista de Figuras

Figura 1 Esquema típico de una instalación de bomba de ariete.....13

Figura 2 Momentos del funcionamiento de la bomba de ariete.....15

Figura 3 Modelo“Chapaleta” validado por JICA, y modelo “Ariete súper”.....16

Figura 4 Componentes de la bomba de ariete.....18

Figura 5 Esquema de una válvula de impulso.....20

Figura 6 Velocidad y cierre de válvula de impulso en el periodo de aceleración.....23

Figura 7 Curvas características de la bomba de ariete.....32

Figura 8 Efecto del tamaño del ariete en el desempeño.....33

Figura 9 Relación de caudales q/Q y alturas h/H.....34

Figura 10 Nomenclatura de la instalación de la bomba de ariete hidráulico.....34

Figura 11 Curvas de eficiencia en la bomba de ariete Blake Hydram No. 3 ½ (2 ½”).....36

Figura 12 Ciclo del pulso de presión en la bomba de ariete hidráulico.....37

Figura 13 Interpretación gráfica de la teoría de Krol.....39

Figura 14 Planteamiento del ciclo de operación por Tacke.....41

Figura 15 Efecto de la altura suministro (supply head) en la bomba de ariete.....43

Figura 16 Ecuaciones empíricas que describen el desempeño de la bomba de ariete.....45

Figura 17 Gráfico caudal de bombeo y altura de descarga.....46

Figura 18 Partes de la bomba de ariete.....57

Figura 19 Fotografía con las partes de la bomba de ariete construida.....57

Figura 20 Partes de la válvula de impulso.....58

Figura 21 Banco de pruebas experimentales.....59

Figura 22 Número de pruebas según situación y relación L/D.....75

Figura 23 Caudal de descarga relativo q/Q_T, en función de las variables h, H y L/D.....78

Figura 24 Dispersión de q/Q_T en función de H y h/H, para L/D = 600.....79

Figura 25 Dispersión del caudal de descarga relativo q/Q_T en función de h/H y L/D.....81

Figura 26 Dispersión del caudal de descarga relativo q/Q_T en función de h/H, H y L/D....82
Figura 27 Caudal de funcionamiento relativo Q/Q_T en función de h, H y L/D....84
Figura 28 Dispersión de datos de Q/Q_T en función de h/H y H para L/D = 600....84
Figura 29 Dispersión de Q/Q_T en función de h/H, H y L/D....85
Figura 30 Relación nD/v_c en función de h, H y relación L/D....87
Figura 31 Dispersión del parámetro nD/v_c en función de h/H, H y L/D....88
Figura 32 Dispersión del parámetro nD/v_c en función de Re, según L/D y H....89
Figura 33 Eficiencia promedio η en función de h, H y L/D....90
Figura 34 Eficiencia promedio η en función de h/H, H y L/D....91
Figura 35 Dispersión de la eficiencia η en función de h/H, L/D y variables H y v_c....92
Figura 36 Caudal de funcionamiento relativo Q_T / (v_cD^2) en función de h, H y L/D....94
Figura 37 Dispersión de la relación Q_T / (v_cD^2) en función de h/H y H para L/D = 600....94
Figura 38 Dispersión del ratio Q_T / (v_cD^2) en función de h/H, H y L/D....95
Figura 39 Límite de confianza del 95% en la predicción del valor promedio....105
Figura 40 Intervalos de confianza del 95% en la predicción del valor particular....105
Figura 41 Límite de confianza del 95% para la predicción del valor promedio....107
Figura 42 Intervalos de confianza del 95% para la predicción del valor particular....107
Figura 43 Valores promedios de nD/v_c y límites de predicción del valor promedio....109
Figura 44 Dispersión de valores de nD/v_c y límites de predicción del valor particular....109
Figura 45 Límite de confianza del valor particular del modelo $\hat{y}_4 = \eta$ para L/D = 400....111
Figura 46 Límite de confianza del valor particular del modelo $\hat{y}_4 = \eta$ para L/D = 500....111
Figura 47: Límite de confianza del valor particular del modelo $\hat{y}_4 = \eta$ para L/D = 600....112
Figura 48: Límite de confianza del valor particular del modelo $\hat{y}_5 = Q_T / v_cD^2$....113
Figura 49 Intervalo de predicción del valor promedio del modelo $\hat{y}_5 = Q_T / v_cD^2$....114
Figura 50 Caudal máximo de bombeo y límite esperado de 10 l/min....121
Figura 51: Gráfico descriptivo de la altura máxima y límite esperado de 50 m....122
Figura 52 Gráfico Q-Q, para verificación del supuesto de normalidad....124

Figura 53 Gráfico descriptivo.....124
Figura 54 Gráfico descriptivo.....126
Figura 55 Gráfico descriptivo.....126
Figura 56: Gráfico Q-Q, para verificación del supuesto de normalidad.....127
Figura 57 Gráfico descriptivo.....129
Figura 58 Gráfico Q-Q, para verificación del supuesto de normalidad.....130
Figura 59 Gráfico descriptivo.....132
Figura 60 Gráfico Q-Q, para verificación del supuesto de normalidad.....133
Figura 61 Efecto de la variable L/D y su interacción con la relación de alturas h/H.....135
Figura 62 Efecto del prototipo de válvula de impulso en el desempeño del ariete.....136
Figura 63 Efecto del prototipo de válvula de impulso en el desempeño del ariete.....137
Figura 64 Rangos de mejor eficiencia de Rankine.....139
Figura 65 Caudal de descarga q a valores mínimos de h/H.....141
Figura 66 Caudal de descarga máximo de descarga según autores.....142
Figura 67 Caudal de descarga q con caudales máximos diarios (MVCS, 2018).....143
Figura 68 Caudal de suministro Q_T, según modelo $y_5 = Q_T / (v_c D^2)$.....147
Figura 69 Curva característica para H = 3 m, L/D = 400.....148
Figura 70 Curva característica para H = 1.4 m, L/D = 400.....149
Figura 71 Curvas del caudal de descarga q vs h de diferentes autores.....150
Figura 72 Curvas del caudal de funcionamiento Q vs h por diferentes autores.....151
Figura 73 Comparación de curvas de q/Q_T vs h/H por diferentes autores.....151
Figura 74 Comparación de curvas de eficiencia de Rankine por diferentes autores.……152
Figura 75 Caudal de bombeo q en función de h/H y H, para L/D = 500.....154
Figura 76 Eficiencia η en función de h/H y H, para L/D = 500.....154
Figura 77 Batería de arietes en paralelo por Hadzich (s/f).....155
Figura 78 Valores de la relación $r = v_c/v_0$ en el experimento.....158
Figura 79 Condiciones de flujo del experimento.....159

Introducción

La bomba de ariete es una maquina hidráulica cuya principal función es el bombeo usando la energía potencial del agua y el fenómeno de golpe de ariete. La dificultad de su estudio reside en las múltiples variables que influyen en su funcionamiento. Con esto, muchas curvas características que relacionan variables simples se pueden encontrar para una misma de bomba de ariete. Dada las condiciones del presente estudio se pueden elaborar 9 curvas características de variables simples. Es preferible utilizar tablas comerciales o gráficas que relacionen las variables adimensionales h/H, L/D, q/Q_T, nD/v_c, η, $Q_T/(v_cD^2)$, dado que agrupan diferentes condiciones a la vez.

La construcción de la bomba de ariete incluye cuatro componentes clave, el cuerpo o caja de la válvula, la válvula de impulso, la válvula de descarga y la cámara de aire. La válvula de impulso es el componente de mayor complejidad. Su construcción debe ser cuidadosa de modo que se logre desarrollar las presiones más altas posibles, para esto un cierre hermético es primordial.

En la presente tesis, se estudia la bomba de ariete de PVC de 1”, cuya construcción se realiza con tubos y accesorios roscados de PVC – U. Lo que pretende el presente estudio es determinar los rangos de desempeño aceptables de la bomba de ariete de PVC. Por lo que el uso de material plástico es viable.

La tesis busca también ser una herramienta para la introducción técnica a esta máquina hidráulica por parte de estudiantes y profesionales del sector saneamiento. Los mayores desarrollos tecnológicos se han centrado en bombas de ariete de materiales metálicos (F°G° y acero), sin embargo, su aplicación no ha sido extendida. Por lo que, mayor investigación, desarrollo y validación de ésta tecnología son necesarios para su aplicabilidad en proyectos de inversión, así como su inclusión como solución no convencional en las normas del sector agua y saneamiento del país.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Generalidades

Continuamente se realizan varios estudios sobre la bomba de ariete. El reto se centra en encontrar modelos semiempíricos (B. W. Young, 1995) y empíricos (Fatahi-Alkouhi & Lashkar-Ara, 2019) que modelen el comportamiento de bombas de ariete de determinada fabricación, esto, con la finalidad de definir un procedimiento de diseño.

La presente tesis es un aporte al conocimiento de la bomba de ariete de PVC. Se proponen modelos empíricos y las condiciones para un desempeño aceptable. Así mismo, se plantean algunos ejemplos aplicativos de diseño.

Por último, se estudió también la válvula de impulso, determinando sus principales características hidráulicas y proponiendo método de optimización (experimentos preliminares).

1.2 Planteamiento de la realidad problemática.

1.2.1 La realidad problemática

Problemática general

El país se encuentra en proceso de consolidar los servicios de saneamiento sostenibles en el sector rural, según la World Health Organization & United Nations Children's Fund (2021) , al 2020 el acceso al agua potable y saneamiento básico en el sector rural del Perú es del 81% y 60% respectivamente.

Para esto, el estado a través del Programa Nacional de Saneamiento Rural (PNSR), ha implementado un modelo de intervención integral que comprende elementos de sostenibilidad institucional, económica, ambiental, social y técnica. En general, los proyectos emprendidos por el gobierno (local, regional y central), se orientan a atender a poblaciones rurales concentradas.

Por otro lado, organizaciones como el CEPIS, AIDIS, COSUDE, entre otros, han propuesto opciones técnicas para poblaciones dispersas, sin embargo, estas se han im-

plementado en proyectos específicos. Es el caso del Proyecto SABA PLUS de la Cooperación Suiza en el Perú (COSUDE) que desde 1996 realizaron intervenciones integrales directas en 14 regiones del Perú, entre centros poblados concentrados y dispersos (Agencia Suiza para el Desarrollo y la Coperación [COSUDE], s/f)

Problemática específica

En el sector rural disperso, en muchos casos se requiere realizar el bombeo del agua, dado que las fuentes de agua se encuentran en cotas inferiores o a distancias muy lejanas. Así, surge la necesidad de explorar e investigar más sobre las tecnologías de bombeo que puedan constituirse como “tecnologías apropiadas”

La discusión se centra en la selección de la tecnología de bombeo. La principal restricción es la fuente de energía, en ese sentido las fuentes de energía disponibles pueden ser convencionales (manual, combustibles fósiles, electricidad por red), o fuentes renovables como la energía solar, eólica, de biomasa e hidráulica.

Todas las tecnologías disponibles tienen ventajas y desventajas, en la presente tesis se estudia la bomba de ariete el cual utiliza la energía hidráulica para impulsar agua a niveles superiores. Este componente técnico es el aporte de la presente tesis a la problemática del abastecimiento de agua en el sector rural disperso del país.

Problemática técnica

Un aspecto para considerar es la limitada aplicación de la bomba de ariete en proyectos de inversión. Algunas causas probables son:

- Por no encontrarse como opción tecnológica en la normativa nacional.
- Por ser adecuado principalmente en poblaciones dispersas, donde las intervenciones públicas son limitadas.
- Por ser una tecnología hidráulica, que implica un dimensionamiento y construcción cuidadoso para asegurar los desempeños y rendimientos requeridos.

Un requerimiento frecuente es el menor costo de las tecnologías, es así que se plantea la necesidad de desarrollar un mayor conocimiento de las aplicaciones hidráulicas en materiales de menor costo y de mayor acceso.

Existe un conocimiento limitado sobre el desempeño hidráulico de la bomba de ariete de construcción en PVC y de material de tubería de suministro de PVC, lo cual es una barrera para su aplicación.

1.2.2 Pregunta de investigación

¿Cuál es el desempeño hidráulico de la bomba de ariete hidráulico universal con tubería de suministro de PVC?

1.2.3 Justificación e importancia

1.2.3.1 Conveniencia de la tesis

La presente tesis se plantea con la finalidad de detallar, ampliar y mejorar el conocimiento respecto a la bomba de ariete hidráulico con tubería de suministro de PVC. La bomba de ariete ha sido ampliamente estudiada en tuberías de alimentación en material metálico (acero, hierro galvanizado, cobre) dado que por su alta rigidez (alto módulo de elasticidad) generan una onda de presión más grande y por ende un mayor golpe de ariete. En la presente tesis se pretende estudiar la bomba de ariete con tubería de alimentación de PVC, evaluando el comportamiento hidráulico y los rangos de operación con rendimientos aceptables, para su conveniente aplicación cuando las alturas de impulsión sean relativamente bajas. Una ventaja es el menor costo del PVC frente a las tuberías metálicas, además de estar muy difundidas en todo el país.

1.2.3.2 Relevancia social

Según el Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI] (2017), existen en total 94 922 centros poblados en el país, de los cuales el 97.8% corresponde al ámbito rural, que representa el 20.7% de la población del país. Este sector de la población es la

beneficiaria, dado que la tesis permite tener un conocimiento de la bomba de ariete para su implementación en abastecimiento de agua para fines poblacionales y productivos.

Por otra parte, el conocimiento que se adquirirá servirá a las autoridades del sector saneamiento, como un soporte científico sobre la tecnología del ariete hidráulico; a los profesionales de ingeniería para tener un acercamiento a la tecnología y poder aplicarlos en los proyectos, y finalmente a la comunidad académica-científica como un antecedente de estudio y para nuevas posibilidades de investigación.

1.2.3.3 Implicancias prácticas y valor teórico

El trabajo tiene una aplicación práctica directa, ya que sirve como herramienta de dimensionamiento de las bombas de ariete hidráulico.

Por otro lado, el trabajo se considera una investigación aplicada del tipo correlacional - explicativa. La mayor parte de los conceptos, variables y tendencias de la bomba de ariete hidráulico se han estudiado, así, más allá de una confirmación de las tendencias, el valor teórico de la tesis radica en el conocimiento de la medición experimental del comportamiento y eficiencias de la bomba de ariete hidráulico estudiada, estableciendo así los rangos de operación aceptables para su aplicación.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General:

- Determinar el desempeño hidráulico de una bomba de ariete hidráulico universal con tubería de suministro de PVC.

1.3.2 Objetivos Específicos:

- Determinar el efecto de la relación longitud y diámetro de la tubería de suministro L/D, en las variables dependientes: caudal de bombeo relativo q/Q_T, caudal de funcionamiento relativo Q/Q_T, parámetro de la válvula de impulso nD/v_c y eficiencia η.

- Determinar el efecto de la relación de la altura de descarga y altura de suministro h/H, en las variables dependientes: caudal de bombeo relativo q/Q_T, caudal de funcionamiento relativo Q/Q_T, parámetro de la válvula de impulso nD/v_c y eficiencia η.

1.4 Antecedentes de investigación

Fatahi-Alkouhi y Lashkar-Ara (2019) analizan los efectos de los parámetros adimensionales en las curvas características de una bomba de ariete se evaluaron utilizando un modelo experimental. Para hacerlo, después de relacionar parámetros dependientes e independientes mediante el análisis dimensional, se examinó el efecto de cada parámetro independiente en el parámetro dependiente. Las observaciones experimentales mostraron que la descarga de bombeo relativa (q/Q_T), la descarga de desgaste relativa (Q/Q_T) y la eficiencia de la bomba (η) dependían de la relación entre la longitud y el diámetro de la tubería de suministro (L/D) y la relación de alturas de impulsión (h/h_m). El parámetro de válvula de impulso (nD/v_0) dependía de L/D, h/h_m y el número de Reynolds del flujo en el tubo de suministro. Se presentaron curvas características, para la bomba de ariete utilizada en este estudio, para estimar los parámetros dependientes, como la relación de las alturas de presión en función de varias relaciones de longitud a diámetro. Además, las ecuaciones características, de la bomba de ariete utilizada, se introdujeron utilizando la regresión no lineal. La evaluación de los resultados mostró que con las curvas y ecuaciones características puede diseñarse un sistema de bomba de ariete con alta precisión, y este método de diseño puede ser propuesto para cualquier tipo de bombas de ariete que se usen en propósitos de ingeniería.

Suarda et al. (2018) sobre la bomba de ariete mencionan que, es una bomba mecánica que funciona automáticamente sin el uso de energía eléctrica, pero utiliza el impulso del flujo de agua de conducción para bombear una fracción del agua a un depósito. Consta de dos partes móviles, son válvulas de desecho (o impulso) y de entrega. El me-

canismo de estas válvulas genera una alta presión de golpe de ariete que se usa en el ciclo de trabajo del ariete hidráulico. La válvula de desecho (o de impulso) es un componente clave del ariete hidráulico. Sin embargo, en la implementación de arietes hidráulicos, toman mucho tiempo para dimensionar y ajustar sus válvulas de desecho, porque no hay referencias suficientes para hacer el diseño de la válvula de desecho. Las características de la válvula de desecho se ven afectadas por parámetros como el diámetro del orificio de la válvula sentada, el diámetro del disco de la válvula, la longitud de la carrera y el peso de la válvula, así como la descarga y el jefe de suministro de agua para impulsar la bomba de ariete hidráulico. Además, todos estos parámetros se afectan entre sí. Por lo tanto, en este estudio se realizó un trabajo experimental sobre el modelo de bomba de ariete hidráulico con variación de todos los parámetros de la válvula de desecho. Los resultados muestran que todos los parámetros de diseño de la válvula de desecho, como el orificio de la válvula y el diámetro del disco, la masa de la válvula y la carrera de la válvula, influyen significativamente en el rendimiento del sistema de bomba de ariete hidráulico. Además, se proponen procedimientos para determinar el diámetro de la válvula de desecho y su carrera, y se propone una fórmula simple para estimar la masa óptima de la válvula de desecho que puede ofrecer el mejor rendimiento del ariete hidráulico.

Arapa Quispe (2016) realiza un estudio con el objetivo de evaluar el rendimiento de una bomba de ariete hidráulico de 1 1/2” (BAH-1 1/2), utilizando tubería de PVC 1 1/2” (40 mm), variando las longitudes en 1 m, 2 m y 3 m; y la carrera de la válvula de impulso en 3 mm, 6 mm y 9 mm. Los ensayos se realizaron para 1 m de caída de agua, y tubería de suministro de FG de 21 mm (1/2”), con 62 mm de diámetro de paso de válvula impulso del ariete y 1500 gramos de peso en el resorte del vástago de la válvula de cierre. Los resultados muestran una mejor eficiencia con tubería de 3 m de longitud y con carreras de válvula de impulso de 9 mm, con lo cual se logra alcanzar alturas de bombeo de 20 m, 25 m y 30 m con eficiencia de 64.16 %, 60.34 % y 59.11 % con caudales de bombeo de 1.26

l/min, 0.99 l/min y 0.80 l/min, consiguiendo un total de 1814.40 l/día, 1425.6 l/día y 1152 l/día.

Abate y Botrel (2002) desarrollaron un experimento para evaluar el rendimiento de un ariete hidráulico cuando es alimentado por una tubería de PVC y una tubería de acero galvanizado, bajo tres alturas de caída (2.1, 3.8 y 4.7 m). Se usó la ecuación de D'Aubussion para evaluar el rendimiento, calculado a partir de lecturas de altura de calor, flujo de escape, reflujo y altura de alimentación. Se puede lograr el máximo rendimiento con el ariete hidráulico utilizando tubería de PVC con hasta 4,2 m de desnivel; más allá de este valor, la tubería de acero galvanizado es más eficiente.

Krol (1951) realiza un análisis exhaustivo del ciclo teórico de funcionamiento del ariete hidráulico en términos de las dimensiones físicas y las propiedades de los materiales que componen el ariete. Enfatiza la importancia del ajuste correcto de la válvula de impulso. Se dan curvas de rendimiento para el ariete experimental, con H = 13 pies (4 metros), D = 2 pulgadas (5 cm), h variable, y las características variables de la válvula de impulso. Este es un documento técnico muy útil.

Después de describir el funcionamiento de una instalación típica de ariete hidráulico, el artículo revisa los fundamentos del ariete hidráulico como un prerrequisito para la comprensión adecuada de las limitaciones de esta máquina hidráulica. El desarrollo histórico se analiza con cierto detalle con el objetivo de determinar qué trabajo de investigación queda por hacer. El autor presenta su propia teoría basada en la aplicación de las leyes generales de la mecánica al estudio de un ariete hidráulico experimental especialmente diseñado. Mediante la teoría desarrollada, que concuerda satisfactoriamente con el experimento, es posible pronosticar el comportamiento de cualquier ariete hidráulico automático, siempre que las siguientes cuatro propiedades en una instalación dada se hayan determinado por separado mediante experimento: (a) pérdida de carga en el tubo de transmisión; (b) pérdida de carga debido a la válvula de impulso; (c) coeficiente de ar-

rastre de la válvula de impulso, y (d) pérdida de cabeza durante el período de retraso (Watt, 1975)

Tacke (1988) desarrolla un modelo matemático que describe las características esenciales de la operación del ariete hidráulico para aclarar las posibilidades y limitaciones del ariete en relación con su ubicación y sus ajustes. El modelo distingue tres períodos diferentes en el ciclo de bombeo de la bomba de ariete aceleración - retardo - retroceso. Haciendo uso de la teoría del flujo inestable en tuberías, para cada período, la relación entre la velocidad y el tiempo se deriva para el agua en la tubería de suministro de la instalación del ariete hidráulico.

En última instancia, a partir de estas relaciones se obtienen expresiones matemáticas para la tasa de tiempo de bombeo del ariete y para el flujo de suministro requerido para operar el ariete. Se muestra que el modelo es lo suficientemente preciso como para dar como mínimo una explicación cualitativa del efecto de los diversos parámetros que rigen el rendimiento del ariete hidráulico. Para fines de cálculo, el modelo matemático se modifica hasta cierto punto con el fin de mejorar la descripción del fenómeno que rige el movimiento del agua durante el período de retraso.

Se realizaron pruebas de laboratorio con doce arietes hidráulicos disponibles en el mercado para determinar sus características de rendimiento específicas. Para permitir la comparación mutua, los resultados se presentan parcialmente en una forma no dimensional.

Young (1996) menciona que las bombas de ariete hidráulico son actualmente de interés porque hacen uso de un recurso de energía renovable y son amigables con el medio ambiente. Las bombas de ariete son particularmente apropiadas para su uso en el mundo en desarrollo ya que su construcción es básica y robusta, y son baratas y fáciles de instalar y mantener. Numerosos intentos de analizar el comportamiento complejo de un sistema de bomba de ariete se han realizado en el pasado, pero pocos se han traducido con éxito en procedimientos de diseño simple y ninguno ha resultado en un método

general para una bomba de ariete de cualquier tamaño. El enfoque analítico adoptado en el presente documento supone una pérdida constante de fricción en el tubo de accionamiento durante la aceleración y se concentra en condiciones de retroceso cero en las que se produce un rendimiento óptimo de la bomba. Se derivan cuatro ecuaciones de diseño simple y general que incorporan suposiciones conservadoras para la velocidad crítica en el tubo de suministro y el efecto de las pérdidas del sistema. Se dan ejemplos de diseño y predicciones de diseño en comparación con resultados de pruebas nuevas y existentes. Se extraen conclusiones con respecto a la relevancia de la relación tradicional longitud del tubo de suministro - diámetro del tubo de suministro (L/D) y de la relación longitud del tubo de suministro y altura de suministro (L/H).

1.5 Alcance del estudio

El presente estudio es de carácter correlacional – explicativo. Correlacional, pues se trabaja sobre variables que han demostrado su influencia en el desempeño de la bomba de ariete, las cuales se relacionarán con variables dependientes, a través, de un modelo matemático que permita hacer predicciones; el estudio también es explicativo, pues se analiza factores que explican el funcionamiento óptimo de la válvula de impulso y bomba de ariete como prototipos particulares construidos, todo esto en el contexto donde se realiza la experimentación.

La bomba de ariete se ha estudiado por investigadores y fabricantes, los cuales han utilizado la tubería de suministro de material metálico (hierro galvanizado, acero, etc.), por ofrecer mejores rendimientos, relegando el material plástico para la tubería de descarga (Karp, 1975. p. 3)

Sin embargo, en proyectos como el del JICA en Nicaragua, Guía Agropecuaria, (2012) e investigaciones de Arapa Quispe (2016), Gouvea et al., (2013), Abate y Botrel (2002), viabilizan su uso dado su bajo coste y rendimientos aceptables.

1.6 Hipótesis

1.6.1 Hipótesis general

- El desempeño hidráulico de la bomba de ariete hidráulico universal con tubería de suministro de PVC proveerá caudales de hasta 10 l/min y alturas de bombeo de hasta 50 metros.

1.6.2 Hipótesis específicas

- La relación longitud y diámetro de la tubería de suministro $\boldsymbol{L/D}$ **= 500, es la que genera el mejor desempeño**, en las variables dependientes: caudal de bombeo relativo q/Q_T, caudal de funcionamiento relativo Q/Q_T, parámetro de la válvula de impulso nD/v_c y eficiencia η.
- La relación de la altura de descarga y altura de suministro $\boldsymbol{h/H}$ **= 5, es la que genera el mejor desempeño**, en las variables dependientes: caudal de bombeo relativo q/Q_T, caudal de funcionamiento relativo Q/Q_T, parámetro de la válvula de impulso nD/v_c y eficiencia η.

1.6.3 Variables

Del marco teórico, se conocen las variables con efecto significativo en el desempeño de la bomba de ariete. En la Tabla 1 y Tabla 2 se muestran la definición de las variables, tanto independientes (factores) como dependientes (respuestas).

Tabla 1

Definición conceptual y operacional de variables independientes.

Relación adimensional	Variable	Definición conceptual	Definición operacional
1. Relación de cargas o alturas, h/H	Altura de descarga, h	Altura desde el nivel de salida o escape del agua de la válvula de impulso hasta el nivel de descarga del agua (altura entregada o altura de bombeo)	Wincha con escala en metros, “m”. Manómetro con escala en Bar, conversión a unidades de energía (m).
	Altura de suministro, H	Altura desde en nivel de la fuente de agua hasta el nivel de salida del agua de la válvula de impulso.	Wincha con escala en metros, “m”.

Relación adimensional	Variable	Definición conceptual	Definición operacional
2. Relación longitud – diámetro del tubo de suministro, L/D	Longitud, L	Longitud de la tubería de suministro.	Wincha con escala en metros, “m”.
	Diámetro, D	Diámetro interno de la tubería de suministro.	Pie de rey (calibrador) con escala en milímetros, “mm”.

Se tienen cuatro variables dependientes que se expresan en relaciones adimensionales que representan los “efectos a estudiar” (variables dependientes). En la Tabla 2, se muestra estas relaciones adimensionales o efectos.

Tabla 2

Definición conceptual y operacional de variables dependientes.

Relación adimensional	Variable	Definición conceptual	Definición operacional
1. Caudal de bombeo relativo, q/Q_T	Caudal de bombeo, q	Caudal que fluye a través de la tubería de suministro. También caudal de descarga o caudal entregado.	Aforo indirecto a través de pesaje de volumen de agua recolectado en un tiempo dado, “litros/minuto”. $Caudal = Vol / t = (m/\rho)/t$*
	Caudal de suministro, Q_T	Caudal que fluye a través de la tubería de suministro.	Medición a través de: - Balanza gramera, pesaje de volumen de agua en kilogramos, “kg”. - Cronometro, medición del tiempo de prueba en segundos, “s”. - Termómetro, temperatura del agua con escala de centígrados “°C”
2. Caudal de funcionamiento relativo, Q/Q_T	Caudal de funcionamiento, Q	Caudal que se sale por la válvula de impulso. También caudal de desperdicio.	
3. Parámetro de la válvula de impulso, nD/v_c	Frecuencia de la válvula de impulso, n	Número de ondas de presión por unidad de tiempo, producido en la la válvula de impulso.	Contómetro, conteo de cantidad golpes de la válvula de impulso en un tiempo dado, “golpes / minuto”. $n = (golpes - 1) / t$ **
	Velocidad crítica, vc	Velocidad del flujo en el tubo de suministro, suficiente para causar el cierre de la válvula de impulso.	Método indirecto de aproximación del valor de la velocidad crítica.
4. Eficiencia, η	Eficiencia de la bomba.	Eficiencia de Rankine, definida como la relación de la energía potencial del agua impulsada y la energía neta utilizada por el ariete.	Se utiliza la fórmula de Rankine: $\eta = q \times (h - H) / (Q \times H)$

Nota. * Caudal es igual al volumen entre el tiempo, el volumen es la masa entre la densidad. **Al contar los golpes se mide uno demás por lo que se quita esta unidad.

En la Tabla 3, se ha considerado el número de Froude y el número de Reynolds, como variables que preliminarmente no generan efectos en el funcionamiento de la bomba de ariete, sin embargo, requieren seguimiento de su variación.

Tabla 3

Relaciones adimensionales adicionales.

Relación adimensional	Variable	Definición conceptual	Definición operacional
Número de Froude $F = \sqrt{(gH)} / v_c$	Gravedad estándar, g	La aceleración constante de un cuerpo en caída libre (H. D. Young & Freedman, 2009)	Aceleración estándar de la gravedad igual a 9.80665 m/s2 (valor exacto) (National Institute of Standards and Technology (NIST), s/f)
	Velocidad crítica, v_c	Velocidad del flujo en el tubo de suministro, suficiente para causar el cierre de la válvula de impulso.	Método indirecto de aproximación del valor de la velocidad crítica.
Número de Reynolds $R = v_c D/v$	Viscosidad cinemática, v	La viscosidad es la fricción interna en un fluido (H. D. Young & Freedman, 2009).	Termómetro, temperatura del agua, escala en centígrados, “°C”

Capítulo II. Marco teórico, conceptual y legal

2.1 Marco teórico

2.1.1 La bomba de ariete hidráulico

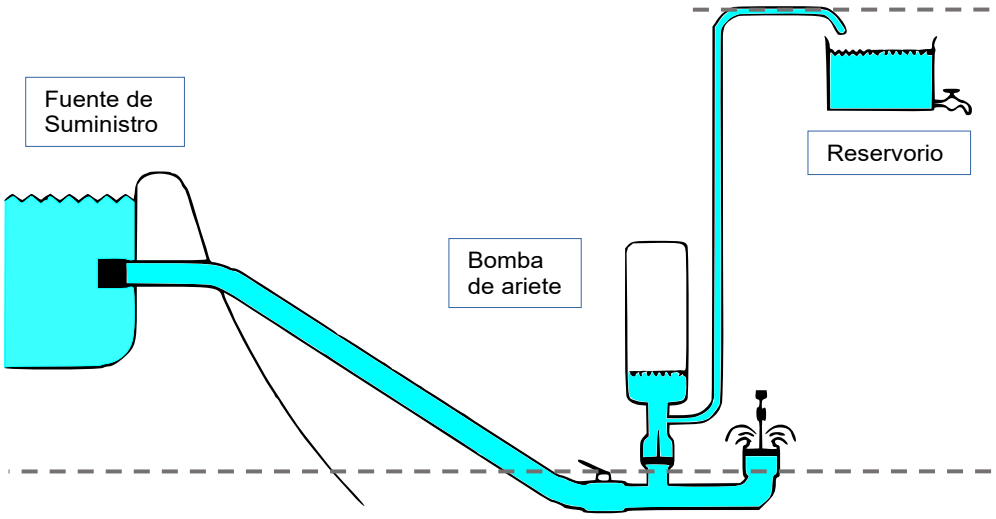
2.1.1.1 Descripción general

El ariete hidráulico es una máquina de elevación de agua que funciona por sí misma. En lugar de una fuente de energía externa (gasolina, electricidad, etc.) el ariete utiliza la energía contenida en un flujo de agua que lo atraviesa, para elevar un pequeño volumen a un nivel superior. El fenómeno involucrado es el de un aumento de presión que se desarrolla cuando una masa en movimiento de agua se detiene repentinamente (golpe de ariete) (Tacke, 1988, p. 1)

El ariete hidráulico automático se usa para bombear agua. Funciona bombeando una pequeña fracción del agua que fluye desde una fuente de suministro hasta un nivel que puede ser mucho más alto que el nivel de la fuente. El ariete solo se puede usar en lugares donde hay un suministro estable y confiable de agua, con una caída suficiente para operar el ariete (Watt, 1975, p. 1)

Figura 1

Esquema típico de una instalación de bomba de ariete.



Nota. Adaptado de Rivadeneira Carlosama y Silva Espinosa (2013)

2.1.1.2 Aplicaciones de la bomba de ariete

Según Hadzich (s/f), dada su seguridad, simplicidad y economía, las bombas de ariete hidráulico son de uso frecuente en pequeñas poblaciones que requieren de agua y en aquellos lugares cercanos a los ríos donde se dispone de manantiales y saltos de agua. Sus aplicaciones varían conforme a las instalaciones individuales, siendo las más frecuentes:

- Provisión de agua a casas y pequeñas poblaciones
- Elevación de agua a casas con niveles mayores a un piso y edificios
- Bebederos de ganado
- Riego
- Prevención de sequías
- Criaderos de peces
- Lombricultura (p. 6)

2.1.1.3 Funcionamiento de la bomba ariete hidráulico

La bomba de ariete funciona por la acción del agua desde una altura definida en una fuente de agua. En la Figura 2 se muestra los tres momentos del funcionamiento de la bomba de ariete, descritos de la siguiente manera Tacke, 1988)

a) *Desperdicio de agua*: El agua fluye por la tubería a una velocidad, cada vez creciente, hasta llegar a la bomba de ariete, ahí hay una primera válvula (válvula de impulso) por donde el agua empieza a salir.

b) *Golpe de ariete y bombeo de agua*: Llegado un momento la fuerza que ejerce el agua (fuerza de arrastre) superará el peso de la válvula de impulso y hace que se cierre repentinamente, lo cual provoca un golpe o aumento de presión (golpe de ariete), que viaja en forma de onda. Si el aumento de presión es lo suficientemente grande, hace que la segunda válvula (válvula de descarga) se abra y permite el paso de una cantidad de agua hacia el reservorio, lo que a su vez limita el aumento de presión en el cuerpo del ariete a un poco por encima de la presión de des-

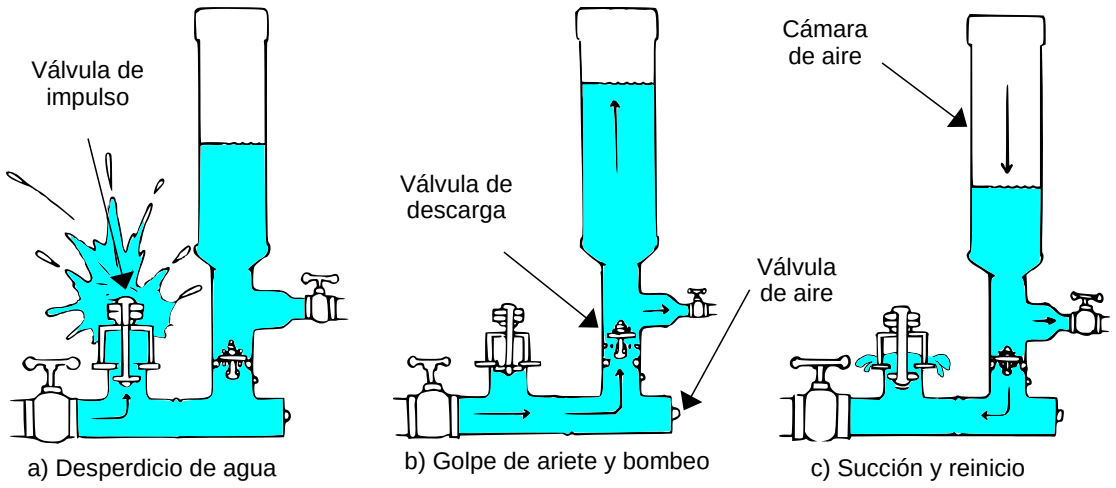
carga. La onda de presión realiza varios viajes de ida y venida por la tubería de suministro, agotando la energía cinética y manteniendo su valor. La cámara de aire amortigua el incremento de presión al comprimirse, a la vez que almacena temporalmente una pequeña cantidad de agua.

c) *Succión y reinicio*: Una vez agotada la energía cinética, la presión disminuye rápidamente, la presión más alta que ahora existe en la cámara de aire hace que la válvula de descarga se cierre. A la vez, se produce un "retroceso" del flujo hacía el tanque de suministro lo que genera una succión (presión negativa), esto hace posible que la válvula de impulso se abra y el agua vuelve a salir repitiéndose el ciclo. La descompresión de la cámara de aire mantiene el bombeo hacia la tubería de descarga.

Adicionalmente se suele utilizar una válvula de aire, para restituir el aire que se pierde en la cámara de aire, pues se mezcla con el fluido en cada ciclo. Otros utilizan materiales elásticos dentro de la cámara de aire (pelotas de tenis, cámara de neumáticos, etc.) para evitar la pérdida de aire. Un modelo interesante, la bomba de ariete de Breur, utiliza un material elástico en la propia cámara de aire, lo que anula la necesidad de aire.

Figura 2

Momentos del funcionamiento de la bomba de ariete.



Nota. Adaptado de Silver (1977)

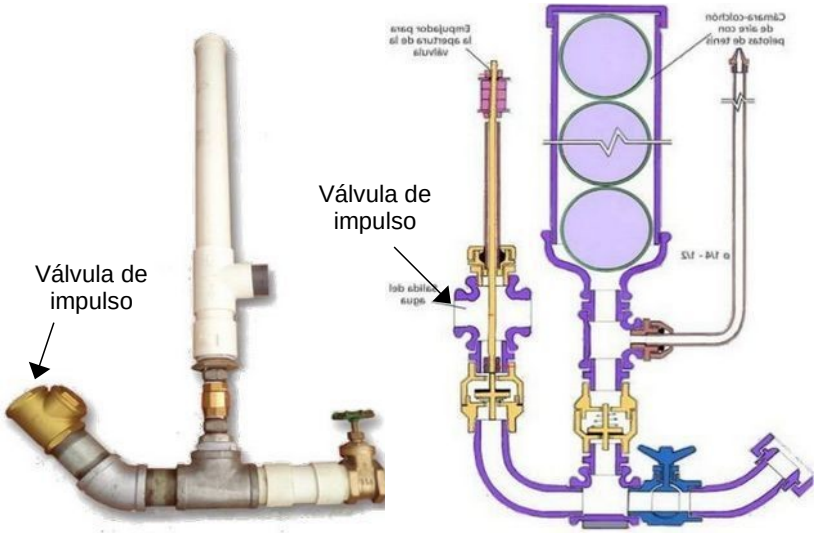
2.1.1.4 Bomba de ariete universal

Se denomina “bomba de ariete universal” a las construidas a partir de accesorios de tubería (tee, codo, niple, etc.), válvulas (esférica, check, etc.), entre otros. La unión entre piezas es en general roscada, aunque también se usa la soldadura en frío, etc.

En la Figura 3 se muestran dos modelos de bomba de ariete universal, en el lado izquierdo, se observa el modelo “Chapaleta”, en el cual, se ha variado la válvula de impulso respecto al “Ariete súper” de la figura derecha, en el primero se utilizó una válvula de retención tipo Swing y en el segundo una válvula de retención tipo York modificada.

Figura 3

Modelo“Chapaleta” validado por JICA, y modelo “Ariete súper”



Nota. Adaptado de Guía Agropecuaria (2012) y Jiménez (s/f)

En Guía Agropecuaria (2012) se menciona algunas características de la bomba de ariete universal:

Máquina que aprovecha como única fuente de energía la caída o desnivel del agua para operar. Cualquier lugar que tenga una caída de más de 1 m. de desnivel.

Cuida el ambiente, es barata, limpia y no contamina (no desprende calor: no necesita de electricidad, diésel gasolina).

Es ecológica: respeta el caudal ecológico (no acapara toda el agua tomando solamente parte del fluido para operar; respetando el agua de las fuentes de recarga, plantas y animales).

Es barata, rústica y durable (las piezas se consiguen en cualquier ferretería; la Bomba puede durar más de 10 años).

Es de fácil y rápida construcción, operación, traslado y mantenimiento.

Puede trabajar día y noche ininterrumpidamente.

No tiene costos de operación.

En la Tabla 4, se menciona algunas características de las bombas de ariete de PVC y metálica.

Tabla 4

Comparación entre bombas de ariete de PVC y de fabricación metálica.

Característica	Bomba de ariete de PVC	Bomba de ariete metálica
Acceso a insumos y materiales.	Todos los materiales se encuentran en cualquier ferretería de los mercados locales. Fácilmente ensamblable.	Necesita de un artesano metal mecánico, para su construcción.
Necesidad de insumos y materiales.	Se requiere accesorios de PVC y galvanizados. Pegamento (cemento), teflón y herramientas (llaves).	Se requiere cañería de acero galvanizado, un cilindro acero y equipo de soldadura. Para el mantenimiento, un juego de herramientas (llaves estilson, corona y tenaza).
Ensamblaje y/o fabricación.	No requiere conocimiento especializado	Requiere conocimiento especializado.
Rendimiento.	Un metro de tubo de entrada es capaz de levantar diez veces una columna de agua.	Un metro de tubo de entrada es capaz de levantar diez veces una columna de agua.
Operación y mantenimiento.	Fácil instalación, se requiere dos personas. La operación y mantenimiento se limita a mantener el flujo de agua y aire.	Mantener libre de obstrucciones y de arena el ingreso de agua. Requiere recambio de empaque de hule de la válvula de impulso cada seis meses
Costo	US$ 120.00	US$ 300 a US$ 600

Nota. Fuente Guía Agropecuaria (2012)

2.1.2 Componentes, partes, elementos de la bomba de ariete hidráulico

2.1.2.1 Componentes generales

El ariete hidráulico es una máquina que utiliza la energía cinética de una columna de agua en movimiento para elevar parte de esa agua a una altura mayor que la de la fuente de suministro (Lansford & Dugan, 1941).

En la Figura 4 se esquematiza una instalación típica de bomba de ariete y sus componentes, con la terminología usual de la bibliografía consultada; así también, la bomba de ariete tiene partes internas importantes como son:

a) La válvula de impulso, donde se produce el golpe de ariete.

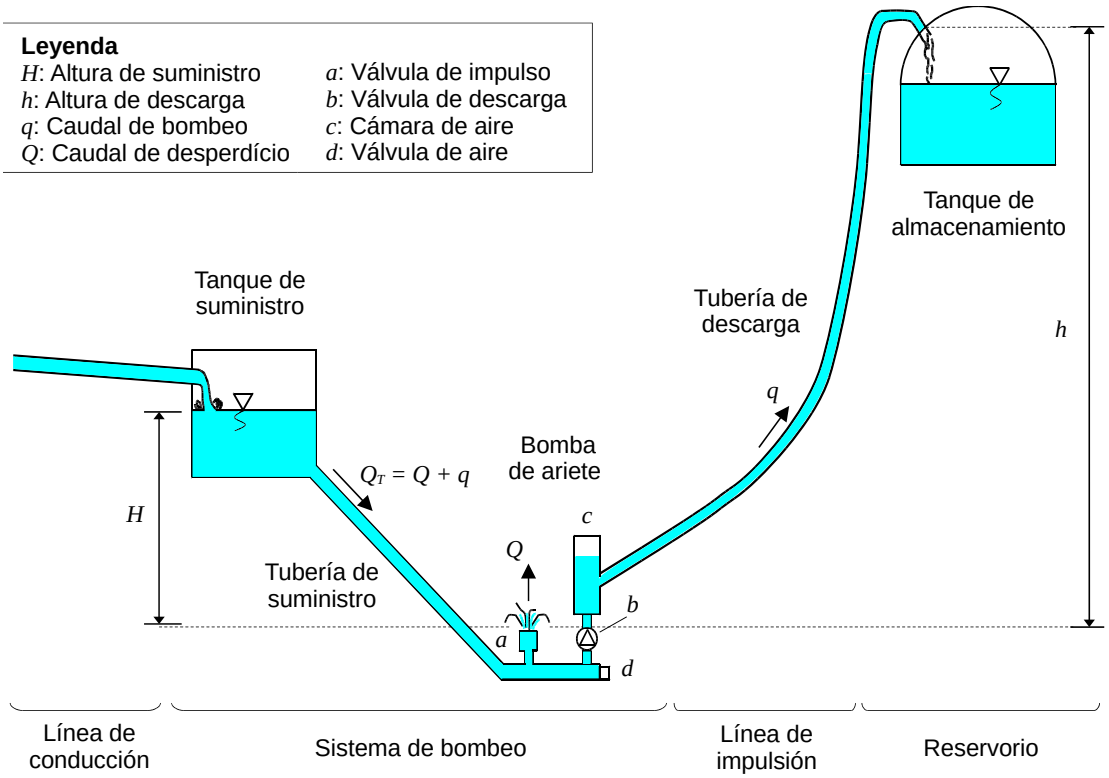
b) Válvula de descarga, que permite el paso del agua y evita su retorno.

c) Cámara de aire, amortigua el golpe de ariete y permite un bombeo continuo.

d) Válvula de aire, restituye aire a la cámara de aire (que se pierde en el flujo).

Figura 4

Componentes de la bomba de ariete.



Opcionalmente, se ha utilizado cámaras de neumáticos o pelotas de tenis en el interior de la cámara de aire; estos mantienen un volumen de aire casi permanente en el interior, por lo que no es necesario la válvula de aire (ver Figura 3).

En proyectos de ingeniería sanitaria suele nombrarse los componentes como se indica en la parte inferior de la Figura 4, al respecto es importante precisar lo siguiente:

- Se ha agrupado el tanque de suministro, la tubería de suministro y la bomba de ariete, como sistema de bombeo, ya que en realidad el bombeo es producto del funcionamiento conjunto de estos tres.
- La tubería de descarga es en sí la línea de impulsión, ya que conduce el agua presurizada hacia una cota superior debido al accionar de la bomba de ariete.

En adelante se describe a detalle los componentes más importantes de una instalación de bomba de ariete hidráulico.

2.1.2.2 Válvula de impulso

2.1.2.2.1 Generalidades

Es donde ocurre el golpe de ariete, debido al cierre de la válvula de impulso, determina la cantidad de agua de funcionamiento (que se desperdicia) y permite saber la cantidad de agua que es posible bombear en una instalación dada.

La válvula de impulso se abre y cierra periódicamente. Se cierra por acción del flujo de agua que viene desde la tubería de suministro y se abre por la depresión producida luego del cese del golpe de ariete (ver ítem 2.1.1.3)

De la Figura 5, considerando una instalación de bomba de ariete, el funcionamiento de la válvula de impulso dependerá de:

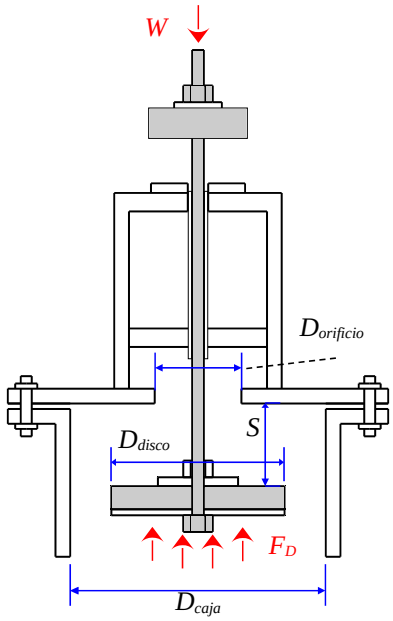
a) La abertura por donde pasará el agua, que incluye el diámetro de disco D_{disco}, diámetro de caja de válvula D_{caja} y diámetro del orificio $D_{orificio}$.

b) Del peso del eje móvil "W", que incluye peso del eje, disco, y pesas.

c) De la distancia vertical por donde se moviliza el disco de válvula, conocido como carrera de la válvula de impulso "S".

Figura 5

Esquema de una válvula de impulso.



Nota. Fuente adaptado de Suarda et al. (2018)

A estas dimensiones se les denomina parámetros de la válvula de impulso. Dos variables dependientes se miden en una válvula de impulso: la frecuencia de golpes y la velocidad crítica.

2.1.2.2.2 Teorías y modelos

En la Figura 5 se observa que el agua ejerce una fuerza de arrastre (F_D) que empuja el disco hacia arriba, por su parte el peso del eje móvil (W) se opone a esta fuerza.

A medida que aumenta la velocidad del flujo, la fuerza de arrastre se incrementa. En el momento que la fuerza de arrastre se iguala al peso del eje móvil ($F_D = W$), se inicia el cierre de la válvula de impulso. En ese momento, de la ecuación de la fuerza de arrastre, se tiene que $F_D=(1/2)\times\rho_{H2O}\times v_1^2\times K_d\times A_{disco}$, entonces:

$$v_1=\sqrt{\frac{W}{\rho_{H2O}\times K_d\times A_{disco}}} \quad (1)$$

Donde:

v_1 : Velocidad al inicio del cierre de la válvula de impulso, m/s

W : Peso del eje móvil de la válvula, N

ρ_{H2O} : Densidad del agua a cierta temperatura, kg/m³

K_d : Coeficiente de arrastre $K_d = f(S, D_{disco})$, [ ]

A_{disco} : Área del disco del eje móvil de la válvula, m²

S : Carrera de la válvula de impulso, mm

D_{disco} : Diámetro del disco, mm

2.1.2.2.2.1 Coeficiente de arrastre K_d

Es un coeficiente adimensional proveniente de la definición de la fuerza de arrastre o arrastre total. Su valor se puede determinar a partir de la ecuación de la fuerza de arrastre, utilizando valores teóricos o experimentales de las variables que en ella intervienen (Sotelo Ávila, 1997, p. 474).

Si conocemos la velocidad en el momento de inicio del cierre de la válvula de impulso v_1, a partir de la Ecuación 1 podemos reemplazar el coeficiente de arrastre mostrado en la Ecuación 2:

$$K_d = \frac{W}{\rho_{H2O} \times v_1^2 \times A_{disco}} \tag{2}$$

Por otra parte, si consideramos un peso constante del eje vertical móvil de la válvula de impulso, W = constante, y la densidad $\rho_{H2O} \approx$ constante, acomodando términos se obtiene la Ecuación 3:

$$K_d = \frac{W}{\rho_{H2O}} \times \frac{1}{v_1^2 \times A_{disco}} \tag{3}$$

Por otra parte, la velocidad v_1 depende del coeficiente de pérdidas locales k_{acc} y este a su vez, depende de la carrera S, entonces, la velocidad v_1 depende de la carrera S, es decir, $v_1 = F(S)$, donde F es una función arbitraria. El área se expresa en función del diámetro de disco. Por tanto se tiene la Ecuación 4:

$$K_d = constante \times \frac{1}{F(S; D_{disco})} \tag{4}$$

Por tanto, concluimos que el coeficiente de arrastre depende de la carrera S y el diámetro de disco D_{disco} de la válvula de impulso: $K_d = F(S; D_{disco})$

Se han encontrado expresiones empíricas para determinar el coeficiente de arrastre para válvulas de impulso de bombas de ariete de fabricación metálica:

Fatahi-Alkouhi y Lashkar-Ara (2019) determinaron las ecuaciones empíricas 5 y 6 del coeficiente de arrastre K_d y el coeficiente de resistencia local k_{acc} de la válvula de impulso:

$$K_d = 0.0453 \times \left(\frac{S}{D_{disco}} \right)^{-2.0381} \quad (5)$$

$R^2 = 0.99, RMSE = 0.08$

$$k_{acc} = 0.7312 \times \left(\frac{S}{D_{disco}} \right)^{-1.4141} \quad (6)$$

$R^2 = 0.99, RMSE = 0.83$

Donde:

k_{acc}, es el coeficiente de pérdidas de carga local o menor.

R^2, es el coeficiente de determinación del modelo.

$RMSE$, raíz del error cuadrático medio (Root Mean Square Error)

Krol (1951) encontró las ecuaciones empíricas 7 y 8, para ambos coeficientes adimensionales, donde S está en pulgadas.

$$K_d = \frac{0.345 - 0.275 \times S + 10^{0.52 - 6.85 \times S}}{S} \quad (7)$$

$$k_{acc} = \frac{2.43 - 1.06 \times S + 10^{0.95 - 13.30 \times S}}{S} \quad (8)$$

2.1.2.2.2.2 Velocidad crítica v_c y ratio de velocidad $r = v_c/v_0$

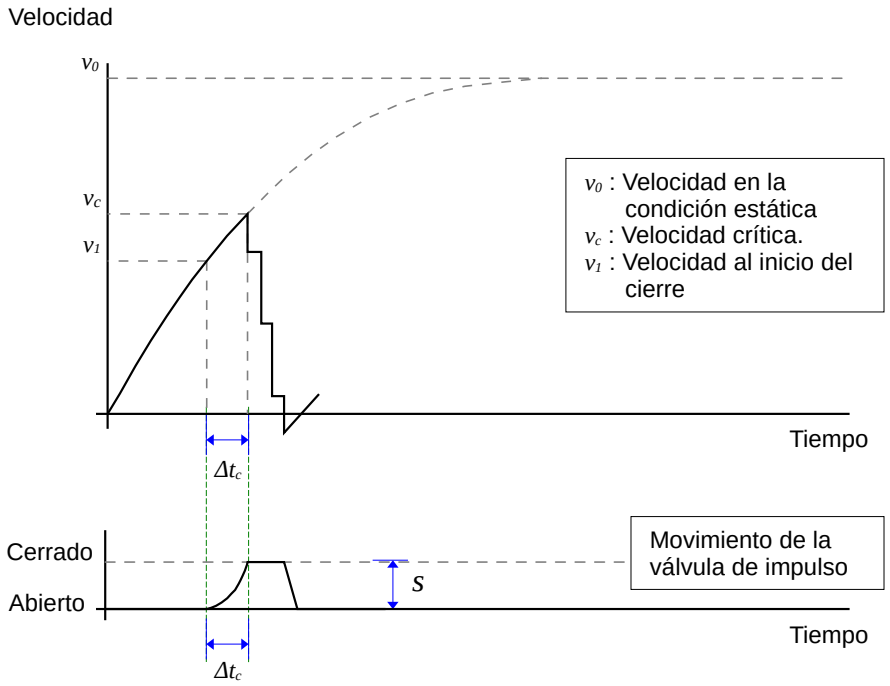
La velocidad crítica es la velocidad en la tubería de suministro en el instante en que la válvula de impuso está completamente cerrada (Tacke, 1988)

Se debe diferenciar de la velocidad al inicio del cierre de la válvula de impulso v_1, el cual se da en el momento en que la válvula de impulso empieza a cerrarse (Figura 6).

v_1 viene determinada por la forma de la válvula, el peso del eje móvil y/o la carga de resorte, así como la longitud de la carrera (Tacke, 1988); es decir, el ajuste de la carrera S o peso W de la válvula de impulso, se reflejará en el cambio de la velocidad v_1.

Figura 6

Velocidad y cierre de válvula de impulso en el periodo de aceleración.



Nota. Fuente adaptado de Tacke (1988)

Tacke (1988, pp. 60-61) desarrolla el concepto de la velocidad crítica v_c, considerando que es ligeramente mayor a la v_1; la ecuación 9 relaciona estas velocidades:

$$v_c = v_1 + \int_{t_1}^{t_1+\Delta t_c} \left(\frac{dv}{dt}\right) dt \tag{9}$$

Donde, $\Delta\, t_c$ = tiempo que toma la válvula de impulso en moverse desde la posición abierta a la cerrada, determinada por la longitud de la carrera de la válvula S y la velocidad de la válvula de impulso v_{valve} en la ecuación 10:

$$S = \int_{t_1}^{t_1+\Delta t_c} \left(v_{valve}\right) dt \tag{10}$$

Donde v_{valve}, a su vez, depende de la forma de la válvula y del movimiento del agua circundante.

Tacke (1988, p. 65), menciona que mejores resultados de bombeo son usualmente obtenidos para una velocidad crítica entre 0.60 a 0.80 de la velocidad en la condición estática v_0, donde este valor depende de la altura de suministro H.

Young (1995, p. 7), indica que la relación de velocidades v_c/v_0 es un parámetro crucial en el funcionamiento de una bomba de ariete hidráulico y está estrechamente relacionada con el valor de L/H. Si la relación de velocidad es la unidad, el ariete no puede funcionar porque la válvula de impulso no podrá cerrarse. Si la relación es cercana a la unidad, el ariete puede funcionar, pero su funcionamiento será lento. Para que el ariete funcione satisfactoriamente, se sugiere que: $v_c/v_0 < 0.8$ y que este requisito tenga implicaciones para los valores mínimos aceptables de la altura de suministro.

2.1.2.2.2.3 Frecuencia de la válvula de impulso n

Es la cantidad de golpes que da la válvula de impulso por unidad de tiempo, normalmente un minuto. Teóricamente, es la frecuencia de un ciclo de operación de la válvula de impulso (inversa del tiempo de duración del ciclo).

Kitani y Willardson (1984) describen que el ciclo se repite con una frecuencia de 30 a 100 por minuto, dependiendo de la construcción del ariete y los ajustes. Lansford & Dugan (1941) realizaron pruebas a frecuencias inferiores a 100 ciclos por minuto.

En pruebas realizadas, Watt (1975) encontró la mejor tasa de bombeo, realizando ajustes de la válvula de impulso hasta conseguir una frecuencia de 75 ciclos por minuto.

De Freitas J. y Sanchez H. (2002), indican que:

- Altas frecuencias producen disminución de golpe de ariete.
- La frecuencia está relacionada con la longitud de la carrera de válvula. Altas frecuencias se obtienen en cortas carreras de válvula de impulso.
- Altas frecuencias están directamente relacionadas con baja relación L/D.

2.1.2.2.2.4 Ajuste de la válvula de impulso

El ajuste de la válvula de impulso significa variar el peso del eje móvil, la carga del resorte, y/o la longitud de la carrera de la válvula (ver Figura 5), en la Tabla 5 se resume los efectos del ajuste de válvula de impulso, mencionado por distintos autores.

Tabla 5

Efecto del ajuste de la válvula de impulso

Ajuste	Efecto	Observación	Autor
Aumento del Peso (W) y Carrera (S)	Aumenta el caudal de funcionamiento Q lo que crea un potente golpe de ariete.	W y S, tienen el mismo efecto.	Watt (1975)
Aumento del Peso (W)	Aumenta la potencia y eficiencia, hasta cierto límite luego del cual tiende a cero.	Si $\uparrow S$, baja el peso necesario W.	Krol (1951)
	Aumenta el caudal de suministro $\uparrow Q_T$ y de bombeo $\uparrow q$, disminuye la frecuencia de golpes $\downarrow n$	W y S, tienen el mismo efecto.	Silver (1977)
	Aumenta la velocidad $\uparrow v_1$, por tanto, también la velocidad crítica $\uparrow v_c$ como consecuencia $\uparrow Q_T$, $\uparrow q$ y $\downarrow n$	Reducción de la frecuencia de golpes $\downarrow n$ puede reducir el desgaste de la válvula.	Tacke (1988)
Aumento de la Carrera (S)	Aumenta la velocidad crítica $\uparrow v_c$, entonces $\uparrow Q_T$, $\uparrow q$ y $\downarrow n$		
Reducción del Peso (W) y Carrera (S)	W y S se vencerán más rápidamente. Se tiene un aumento del caudal de bombeo $\uparrow q$ a bajas alturas de descarga h.	W y S, tienen el mismo efecto.	Watt (1975)
Reducción del Peso (W)	Disminuye el caudal de suministro $\downarrow Q_T$ y de bombeo $\downarrow q$, aumenta la frecuencia de golpes $\uparrow n$	W y S, tienen el mismo efecto.	Silver (1977)

Nota. W peso del eje móvil o carga del resorte, S longitud de la carrera de la válvula de impulso, Q caudal de funcionamiento, Q_T caudal de suministro, h altura de descarga, q caudal de bombeo, n frecuencia de golpeteos en la válvula de impulso, v_1 velocidad al inicio del cierre de la válvula, v_c velocidad crítica.

Según De Freitas J. y Sanchez H. (2002), el ajuste o calibración de la bomba de ariete busca optimizar los siguientes puntos:

- Punto de Bombeo Máximo: Cuando se dispone de suficiente agua de la fuente, la calibración para un mayor servicio es lo ideal. Esto coincide con una larga duración del ciclo de bombeo o una alta presión en la fuente, permitiendo una mayor velocidad del flujo de agua a través de la tubería de suministro y por ende una

mayor energía disponible para el servicio. Sin embargo, una mayor energía del fluido se traduce en un aumento de la probabilidad de falla de la bomba.

- Punto de Eficiencia Máxima: Cuando la cantidad de agua en la fuente es limitada, debe calibrarse en el punto de eficiencia máximo, para aprovechar toda la energía disponible de la fuente. El punto de eficiencia máximo se logra cuando se utiliza un mínimo del caudal y carga de suministro, para bombear la mayor cantidad posible de agua y a una mayor altura.
- Si se desea un buen caudal y no mucha altura:
    - La carrera de la válvula debe ser pequeña ($\downarrow S$)
    - La carga del resorte o peso del eje móvil deber ser menor ($\downarrow W$)
    - Se produce una reducción del tiempo del ciclo de bombeo (ciclos más rápidos)
- En el caso de requerir mayor altura de servicio:
    - La carrera de la válvula debe ser mayor ($\uparrow S$)
    - La compresión del resorte o peso del eje móvil de ser mayor ($\uparrow W$)
    - Se obtendrá un ciclo de golpes más lento.
    - Esto disminuye el caudal de bombeo, pero aumenta la altura de descarga.

2.1.2.2.2.5 Ajuste de la válvula de impulso II ($D_{orificio}$, D_{caja} y D_{disco})

Suarda et al. (2018), determinaron la relación óptima entre el diámetro de orificio $D_{orificio}$ y caja D_{caja} (ver Figura 5), concluyen que el diámetro óptimo del orificio de la válvula $D_{orificio}$ es 0.68 veces el diámetro del cuerpo de la bomba D_{caja}, o aproximadamente 1.35 veces el diámetro de la tubería de suministro D si el diámetro del cuerpo de la bomba es el doble del diámetro de la tubería de suministro.

Suarda et al. (2019), sobre el diámetro de orificio $D_{orificio}$ y de disco D_{disco} concluyen lo siguiente:

- Cuanto mayor es el diámetro del orificio y el disco de la válvula de desagüe (o de impulso) la velocidad del agua tiene cada vez más vórtice, por lo que la velocidad del flujo de agua en el cuerpo de la bomba también disminuye.

- Cuanto mayor es el diámetro del disco de la válvula de desecho, más corto es el intervalo de los movimientos de la válvula, por lo que aumenta la frecuencia del movimiento de la válvula n.
- Las descargas de bombeo q y la eficiencia η, también están influenciadas por el diámetro del disco, cuanto mayor es el diámetro del disco de la válvula de desecho, la descarga de bombeo q y la eficiencia η de la bomba de ariete hidráulico también aumentan.

2.1.2.2.3 Válvulas de impulso frecuentemente utilizadas

Se han construido y/o adaptado diversos modelos de válvula de impulso. En la Tabla 6 se muestra los modelos más frecuentes. Son adaptaciones de válvulas anti-retorno (check) y/o de construcción de accesorios.

Tabla 6

Modelos de válvula de impulso

Válvula comercial	Adaptación	Opciones de ajuste	Válvula comercial	Válvula adaptada
Válvula check modelo Swing o capleta.	No requiere modificación, instalación directa.	Pesas en el disco.	 Fuente: Propia	 Fuente: Propia
Válvula check tipo york.	Retiro de resorte, adaptación de perno y pesas.	Pesas en el eje vertical	 Fuente: sodimac.com.pe	 Fuente imagen: Ortega Nebra y González Cebollada (2013)

Válvula comercial	Adaptación	Opciones de ajuste	Válvula comercial	Válvula adaptada
Válvula de pie.	Retiro de resorte, adaptación de perno y resorte, o perno y pesas.	Pesas y/o resorte. Longitud de carrera de válvula.	 Fuente: Calhoun (2003)	 Fuente: Calhoun (2003)
Válvula check tipo Kent	Tee adicional, adaptación de perno y pesas.	Pesas. Longitud de carrera de válvula	 Fuente: BIMobject (2023)	 Fuente: Ortega Nebra y González Cebollada (2013)
Accesorios de tuberías y otros	Construcción de válvula a partir de accesorios	Pesas. Longitud de carrera de válvula	 Fuente: Briend Suministros Industriales SRL (2022)	 Fuente: agroterra.com

Nota. Fuente indicada en las imágenes.

2.1.2.3 Tubería de suministro

Se han establecido rangos para la selección de la longitud, diámetro y la altura de suministro. En la Tabla 7 se muestra las relaciones L/D y L/H adecuadas, según diferentes autores.

Tabla 7

Rangos de longitud de tubería de suministro.

Autor	Relación*	Rangos	Observación
Karp (1975) adaptado de Rife Hydraulic Engine Manufacturing Co, para el Hydram Blacke.	L/H	5.5 – 6.5	Para "H" entre 4 m - 5 m
		4.5 – 5.5	Para "H" entre 5 m - 6 m
		3.5 – 4.5	Para "H" entre 6.5 m - 10 m
		3.0 – 3.5	Para "H" entre 10 m - 13 m
		2.75 – 3.25	Para "H" entre 13 m - 20 m

Autor	Relación*	Rangos	Observación
Watt (1975)	L/D	150 – 1000	Aplicar L/D = 500, previo "D" elegido (como se cita en Calvert,1958)
Silver (1977)	L/H	6	Para "H" < 4.8 m
		4	Para "H" entre 4.8 m – 7.6 m
		3	Para "H" entre 7.6 m – 15 m
Juárez Vargas (1982)	L/H	3 – 5	-
	L/D	150 – 1000	L/D = 500 da buenos resultados.
Tacke (1988)	L/H	4 – 7	-
Hadzich (s/f)	L/H	4 – 10	L/H = 5, el valor más utilizado
Ortega Nebra y González Cebollada (2013)	L/H	2 – 4	Siempre $L \geq 6$ m. (como se cita en Jeffery et al., 1992)
De Jong (1988)	L/H	4 – 7	-
Young (1996)	L	$Lmin$	$Lmin = 5$
		$Lmax$	$Lmax = (2g/f)\times(0.64\times H-Hs)\times(D/vc^2)$
	L/H	$(L/H)min$	$(L/H)min = 5/H$
		$(L/H)max$	$(L/H)max = 12.5D/(f\ vc^2)$

Nota. L es la longitud del tubo de suministro, H altura de suministro, D diámetro del tubo de suministro, g aceleración de la gravedad, f factor de fricción longitudinal, Hs altura estática requerida para el cierre de la válvula de impulso, vc velocidad crítica.

Según Silver (1977), los tubos de suministro más largos no tienden a aumentar la eficiencia, sino que permiten que la bomba funcione a menos golpes por minuto, lo que a su vez significa un menor desgaste de la válvula y una vida útil más prolongada.

2.1.2.3.1 Material del tubo de suministro

Abate y Botrel (2002), comparan los rendimientos de arietes de PVC y acero galvanizado, obteniendo un mayor rendimiento del PVC hasta los 4.2 m de altura de suministro (H), más allá de este valor la tubería de acero galvanizado es más eficiente.

Ortega Nebra y González Cebollada (2013), menciona que la mayoría de los autores coinciden en que lo más recomendable es que la tubería de impulso (tubo de suministro) se proyecte para que sea de acero galvanizado.

La tubería de impulso es una parte clave en la instalación, siendo la responsable de transportar el agua desde la fuente de suministro al ariete hidráulico, proporcionándole (como consecuencia de la diferencia de cotas) una velocidad

capaz de hacer cerrar la válvula de impulso y de crear la sobre presión (golpe de ariete). Por ello, la tubería de impulso debe ser fabricada de un material rígido, fuerte y resistente. (pp. 72-73)

Provenzano et al. (2013) estudia el efecto del material de tubería en el golpe de ariete. Plantea un modelo transitorio para el golpe de ariete a partir de las leyes de conservación de masa y cantidad de movimiento, obteniendo una solución numérica por el método de las características y otra solución analítica.

Utiliza la rigidez a la flexión, para caracterizar distintos materiales de tubería y luego calcula el primer pico de presión del golpe de ariete.

Tabla 8

Primer pico de sobre presión alcanzado en función de la rigidez calculada.

Material	Rigidez* [kgf*cm2]	1er pico de sobre presión [m]
Polietileno baja densidad	0.01	25.63
Polietileno alta densidad	0.04	36.06
PVC	0.14	51.29
Fibrocemento	0.82	85.26
Hormigón sin armar	0.91	87.33
Aluminio	3.17	107.33
Fundición laminar	4.53	111.09
Cobre	5.54	112.79
Fundición dúctil	7.7	115.09
Acero	9.06	116.01

Nota. Fuente Provenzano et al. (2013)

2.1.2.4 Cámara de aire

La cámara de aire es necesaria para nivelar los drásticos cambios de presión en el ariete, lo que permite un flujo de agua más estable hacia el tanque colector. El aire en la cámara siempre está comprimido, necesita ser reemplazado constantemente ya que se mezcla con el agua y se pierde en el tanque de cabecera (Watt, 1975)

Según Krol (1951), los experimentos con la cámara de aire más grande demuestran que el tamaño de una cámara de aire afecta la cantidad de agua bombeada. Esto se

debe a la energía potencial adicional disponible para el bombeo, formada por el agua almacenada temporalmente en la cámara de aire durante el período de retardo.

Saito et al. (2011), trabajó con volúmenes de aire en la cámara de aire V_{aire} de 0 litros hasta 3.76 litros, encontrando que:

- Las curvas características (altura de descarga vs caudal) son más planas a niveles más altos de volumen de aire V_{aire} y más pronunciadas a niveles más bajos de V_{aire}. La eficiencia de la bomba "η" generalmente aumenta a medida que aumenta V_{aire}.
- Las presiones máximas en la cámara de válvulas y la cámara de aire varían según la altura de descarga h.
- La presión máxima en la cámara de válvulas y la presión máxima en la cámara de aire tienden a disminuir a medida que aumenta el volumen de aire en la cámara de aire. Las fluctuaciones son más significativas a alturas de descarga más bajos.
- El efecto del volumen de aire V_{aire} sobre el tiempo de sostenimiento de la presión Δt durante la operación de bombeo, en la cámara de la válvula, es más significativo en las alturas de descarga inferiores. Independientemente del volumen de aire, el valor de "Δt" permanece casi constante en alturas de descarga más altas.

Jeffery et al. (1992, como se cita en Rivadeneira Carlosama y Silva Espinosa, 2013) menciona que el volumen de agua contenida en la tubería de descarga debe ser igual al volumen de la cámara. Por otra parte, Silver (1977) indica que no hay límite máximo para el tamaño de la cámara de aire.

Según Rennie y Bunt (1990) las pruebas para investigar el efecto del volumen de la cámara de aire en el rendimiento general del ariete mostraron que las curvas de "q", "Q", "η" y golpes por minuto eran esencialmente planas en el rango de 1400-4500 mililitros.

2.2 Marco conceptual

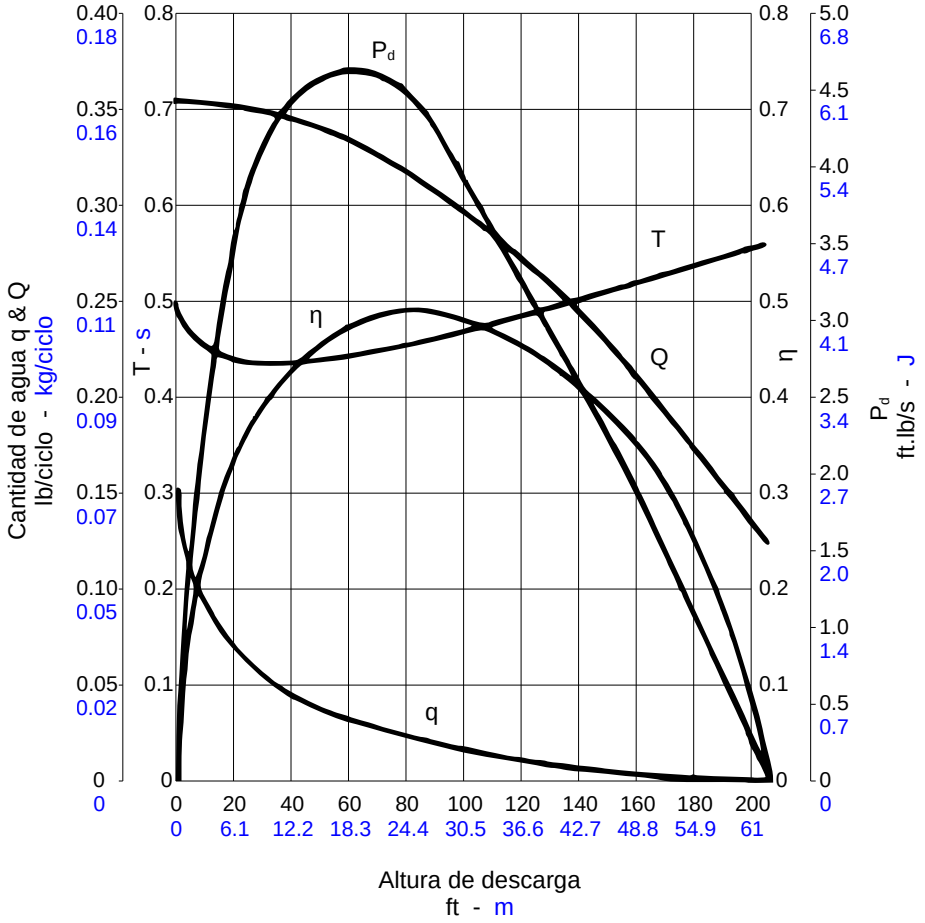
2.2.1 Desempeño hidráulico de la bomba de ariete

2.2.1.1 Curvas características

Krol (1951) menciona que, si todas las variables excepto la altura de descarga, son fijas, es posible expresar las variables dependientes en función de ésta. Entonces, el conjunto resultante de cinco curvas mostradas en la Figura 7, constituyen las curvas características de una bomba de ariete hidráulico".

Figura 7

Curvas características de la bomba de ariete.



Nota. Adaptado de Krol (1951), donde q cantidad de agua entregada por ciclo, Q cantidad de agua desperdiciada por ciclo, T duración del ciclo, η eficiencia, y Pd potencia desarrollada.

El cambio de variables independientes o ajuste de parámetros de la bomba de ariete implica una nueva curva característica.

2.2.1.2 Curvas de desempeño

Por otra parte, Tacke (1988, pp. 8-10), expresa curvas comparando los rendimientos de bombas de ariete comerciales para varios arreglos de altura de suministro H y altura de descarga h. Utiliza dos bombas de ariete comerciales de diferentes tamaños: Blake Hydram No. 2 (1 ½) y Blake Hydram No. 3 ½ (2 ½) (Figura 8).

Figura 8

Efecto del tamaño del ariete en el desempeño.

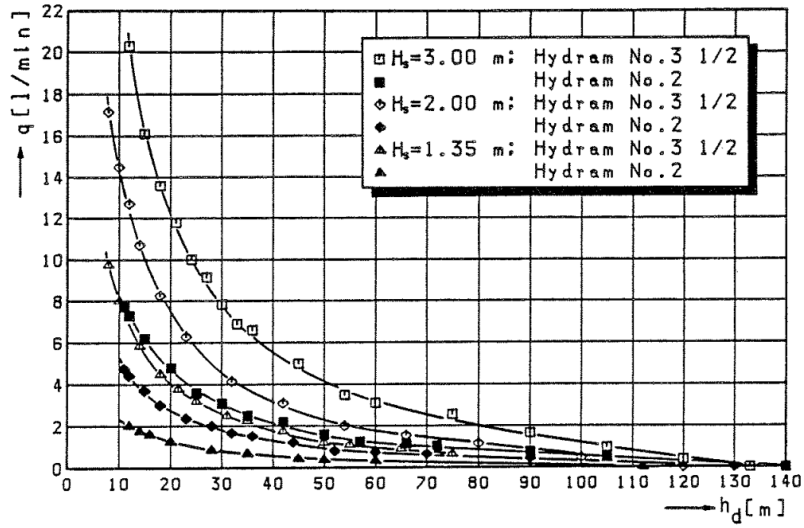


Fig. II-6 Effect of ram size on ram performance; Hydram No. 3 1/2: Q≈100 l/min, Hydram No. 2: Q ≈ 40 l/min.

Nota. Fuente Tacke (1988)

Es posible eliminar el efecto del tamaño del ariete al trazar la relación de flujo q/Q y la eliminación del efecto de la altura de suministro H conduce a una curva adimensional que representa la relación flujo-tiempo q/Q frente a la razón de alturas h/H.

El objeto de la Figura 9, es para determinar tendencias en lugar de valores absolutos. La figura ilustra que, para las alturas de suministro superiores, el desempeño adimensional de los arietes tiende a ser similares.

Se observa cierta divergencia para la altura de suministro inferior, en parte debido a la longitud del tubo de alimentación utilizado en la instalación de prueba (aproximadamente 12 m). El cual es algo grande para una altura de suministro H = 1.35 m (Tacke, 1988, p. 10)

Figura 9

Relación de caudales q/Q y alturas h/H.

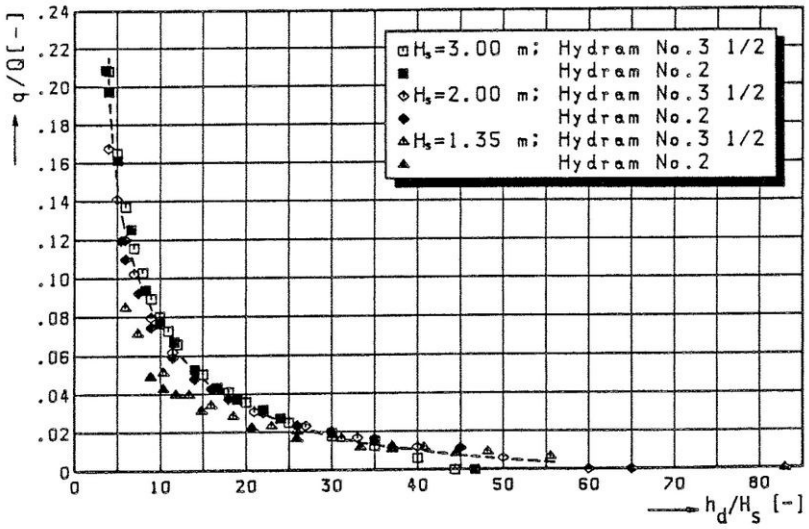


Fig. II-8 Flow ratio versus head ratio - Blake Hydram No. 2 and No. 3 1/2

Nota. Fuente Tacke (1988)

2.2.1.3 Eficiencia

Tacke (1988, p. 10-13) desarrolla conceptos de la eficiencia, en la Figura 10, se muestra una instalación típica de una bomba de ariete. Se observa el nivel (a) del tanque de suministro y el nivel (b) donde se ubica la válvula de impulso. A partir de estos niveles se definen la altura de suministro H y la altura de descarga h.

Figura 10

Nomenclatura de la instalación de la bomba de ariete hidráulico.

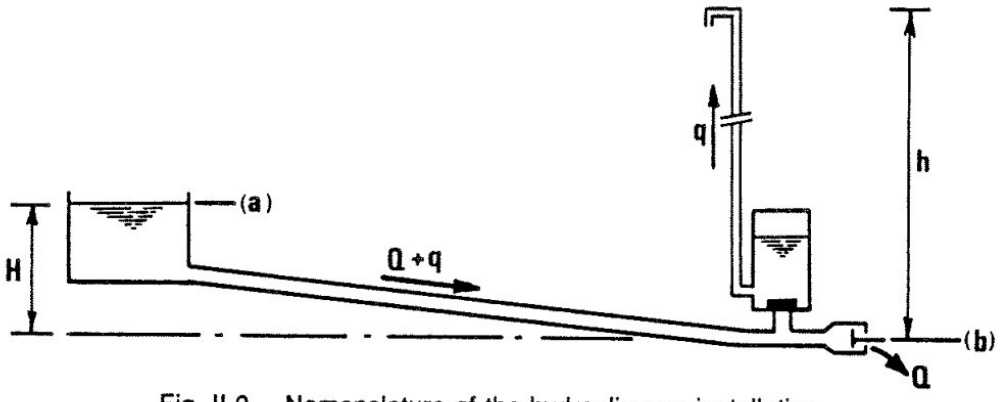


Fig. II-9 Nomenclature of the hydraulic ram installation.

Nota. Fuente Tacke (1988)

En la Tabla 9, se muestra las eficiencias de Rankine, D'Aubuisson y la expresión comercial. El valor de Rankine es siempre la más baja, mientras que la expresión comercial arroja valores algo más altos; especialmente en alturas de descarga bajas, la diferencia es significativa. Esto se ilustra en la Figura 11, donde se muestra las curvas de eficiencia compiladas a partir de mediciones tomadas en un Blake Hydram No. 3 ½ (Tacke, 1988)

Tabla 9

Tipos de eficiencia de una bomba de ariete.

Característica	Eficiencia de Rankine	Eficiencia de D'Aubuisson	Expresión comercial de la eficiencia
Unidad de análisis	Toda la instalación	Sólo el ariete	-
Nivel del agua*	(a)	(b)	-
Trabajo útil hecho por unidad de tiempo**	$\rho g q\,(h - H)$	$\rho g q h$	-
Energía total de referencia por unidad de tiempo.	Energía neta utilizada por el ariete: $\rho g Q H$	Energía suministrada al ariete: $\rho g\,(Q + q)\,H$	-
Fórmula de eficiencia	$\frac{q \times (h - H)}{(Q \times H)}$ (11)	$\frac{(q \times h)}{[(Q+q) \times H]}$ (12)	$\frac{(q \times h)}{(Q \times H)}$ (13)

Nota. ρ es la densidad del agua, g es la aceleración de la gravedad. * Nivel de agua de acuerdo a la Figura 10. Adaptada de Tacke (1988)

Según Tacke (1988) de las ecuaciones 11, 12 y 13 (Tabla 9), se prefiere la eficiencia de Rankine, ya que tanto la expresión D'Aubuisson y la expresión comercial admiten eficiencias cuando no hay una producción neta, superior a la elevación de superficie de la fuente de suministro, nivel (a). La curva de eficiencia es más importante cuando la fuente de suministro es limitada y el agua de desecho debe mantenerse al mínimo. En situaciones donde hay una abundancia de suministro, la eficiencia es una cuestión secundaria. Sin embargo, las cifras de eficiencia de máquinas son hidráulicamente bien diseñados, es decir, tienen vías (conductos) justas y lisas, y en consecuencia bajas pérdidas de energía.

Figura 11

Curvas de eficiencia en la bomba de ariete Blake Hydram No. 3 ½ (2 ½").

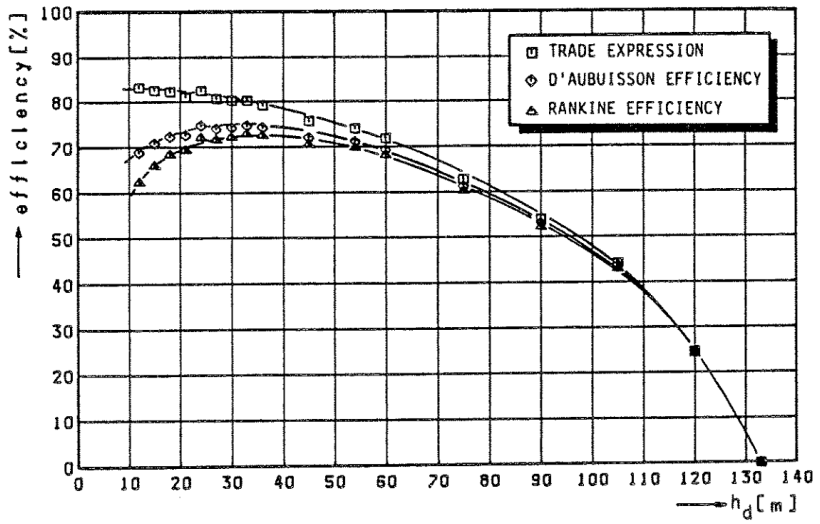


Fig. II-10 Efficiency curves - Blake Hydram No. 3 1/2 (2 1/2") (H_s = 3 m; Q ≈ 95 l/min).

Nota. Fuente Tacke (1988)

2.2.2 Análisis teórico del funcionamiento de la bomba de ariete hidráulico

2.2.2.1 Generalidades

Se evalúa el comportamiento de las variables velocidad, presión y tiempo. Para el caso de la bomba de ariete hidráulico, estas variables se pueden analizar en la tubería de suministro y válvula de impulso, que es donde se produce el golpe de ariete. Como el proceso se repite cíclicamente, es adecuado analizar lo que sucede en un ciclo de operación.

El análisis de operación del ariete hidráulico se ataca dividiendo el ciclo operativo en partes separadas (períodos) y tratando de obtener la relación entre la velocidad v y el tiempo t para la columna de agua en el tubo de alimentación durante cada parte del ciclo (Tacke, 1988)

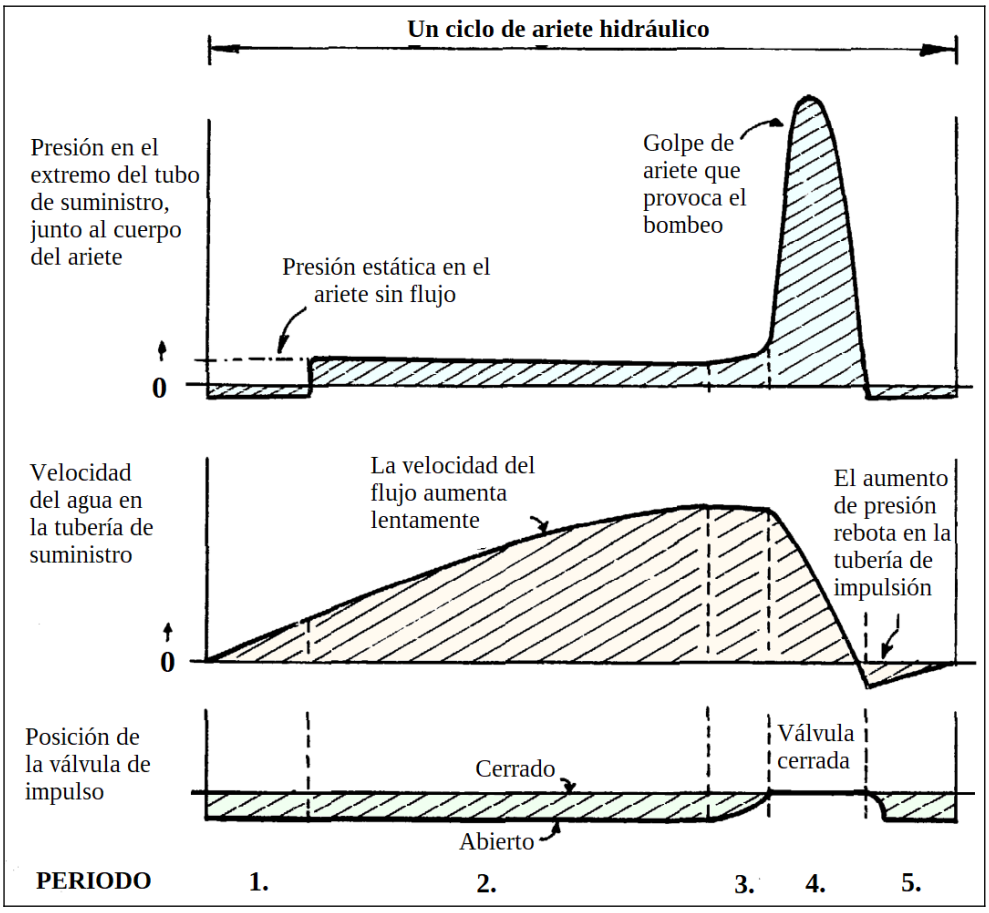
Los diagramas de la Figura 12, muestran en una forma muy simplificada e ideal la presión y la velocidad en el extremo del tubo impulsor (tubería de suministro), y la posición de la válvula de impulso durante un ciclo (Watt, 1975)

Watt (1975), divide el ciclo en cinco periodos, los cuales se pueden resumir de la siguiente manera:

- Período 1. Fin del ciclo anterior, la velocidad del agua a través del ariete comienza a aumentar a través de la válvula de impulso abierta; hay ligera presión negativa en el cuerpo del ariete.
- Período 2. El flujo aumenta al máximo a través de la válvula de impulso abierta.
- Período 3. La válvula de impulso comienza a cerrarse causando que se acumule presión dentro del ariete. La velocidad de flujo a través del ariete ha alcanzado un máximo, la velocidad máxima está controlada por el tamaño del ariete.

Figura 12

Ciclo del pulso de presión en la bomba de ariete hidráulico.



Nota. Fuente adaptado de Watt (1975)

- Período 4. La válvula de impulso se ha cerrado, haciendo que el pulso de presión o golpe bombee un poco de agua a través de la válvula de descarga. La velocidad del flujo a través del ariete disminuye rápidamente.
- Período 5. El pulso de presión rebota por la tubería de suministro, causando una ligera succión en el cuerpo del ariete. La válvula de impulso se abre bajo esta succión y su propio peso.

  El agua comienza a fluir nuevamente a través de la válvula de impulso, y el ciclo del ariete se repite.

2.2.2.2 Planteamiento del Krol (1951)

Krol (1951), plantea siete periodos (Figura 13) y realiza un análisis teórico de cada uno, plantea ecuaciones que relacionan las variables tiempo, velocidad y caudal con las variables independientes involucradas.

En la Tabla 10, se muestra las ecuaciones propuestas por Krol. Se puede resumir el modelo teórico de la siguiente manera:

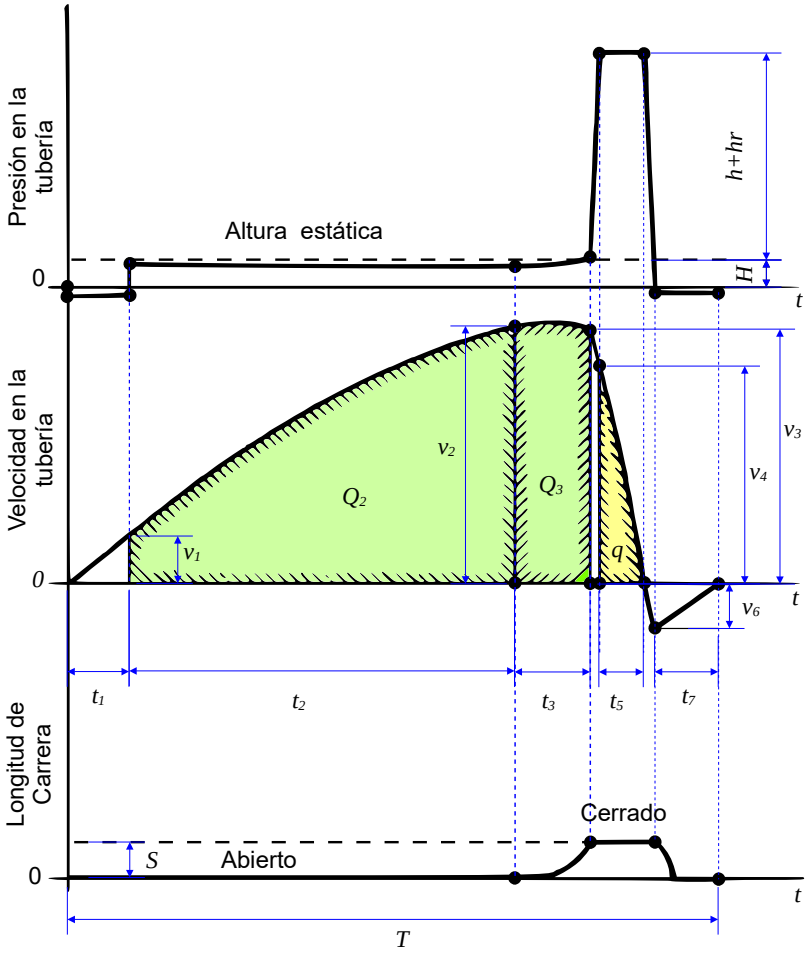
- Caudal de bombeo: q
- Caudal de funcionamiento: $Q = Q_2 + Q_3$
- Periodo del ciclo de funcionamiento: $T = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7$
- Eficiencia: $\eta = qh / QH$

  Algunas precisiones sobre el modelo:

- En el periodo 2, se cumple que $v_2 = \sqrt{Wg/A\ \gamma\ K_d}$
- En el periodo 3, Krol asume que $v_2 = v_3$
- En el periodo 4, se puede inferir que $v_4 = 0, hr = 0 \rightarrow h = h_{max} = cv_3/g = c/g\sqrt{Wg/A\ \gamma\ K_d}$

Figura 13

Interpretación gráfica de la teoría de Krol.



Nota. Fuente adaptado de Krol (1951)

Tabla 10

Ecuaciones del modelo de Krol.

Periodo	Observación
Caudal de bombeo (Periodo 5) $q=\frac{\pi D^2 L}{8(h+h_r)}\times\left[\frac{W}{AK_d}-\frac{\gamma g}{c^2}(h+h_R)^2\right]$	-
Caudal de funcionamiento: $Q = Q_2 + Q_3$ $Q=\frac{\gamma \pi D^2}{4}\left[\frac{L}{B+k_{val}}\times\ln\left(\frac{\frac{2gh}{B+k_{val}}-\frac{g}{c^2}(h+h_r)^2}{\frac{2gh}{B+k_{val}}-\frac{Wg}{A\gamma K_d}}\right)+\sqrt[3]{\frac{sL\left(\frac{Wg}{A\gamma K_d}\right)^2}{4g^2H\left[1-\frac{W(B+k_{valv})}{2AH\gamma K_d}\right]}}\right]$	Coeficiente $B = 1 + \sum kacc + f * L / D$ Velocidad de onda, $c=\sqrt{\frac{144g}{\left(\frac{1}{K}+\frac{D}{Et_p}\right)\gamma}}$ $\frac{1}{c}=\sqrt{\left(\frac{1}{K}+\frac{D}{Et_p}\right)\frac{\gamma}{144g}}$
Periodo total: $T = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7$ $T=\frac{L}{\sqrt{2gh(B+h_{valv})}}\times\ln\left[\frac{1+\sqrt{\frac{W(B+k_{valv})}{2AH\gamma K_d}}}{1-\sqrt{\frac{W(B+k_{valv})}{2AH\gamma K_d}}}\right]+\sqrt[3]{\frac{sL\sqrt{\frac{Wg}{A\gamma K_d}}}{4g^2H\left[1-\frac{W(B+k_{valv})}{2AH\gamma K_d}\right]}}$ $+\frac{L}{g(h+h_r)}\sqrt{\frac{Wg}{A\gamma K_d}}+L\left(\frac{h+h_r}{H}+3\right)\frac{1}{c}$	-
Altura de descarga máxima (Periodo 4) $v_4 = v_3 - (h + hr) g / c$ $v_4 = 0, hr = 0 \rightarrow h = h_{max} = c\, v_3/g = c/g\ \sqrt{Wg/A\gamma K_d}$	$v_2 = v_3$ (Periodo 3) $v_2 = \sqrt{Wg/A\gamma K_d}$ de la fuerza de arrastre (Periodo 2) $2gH/B = Wg/A\gamma K_d \rightarrow W = 2AH\gamma K_d/B$

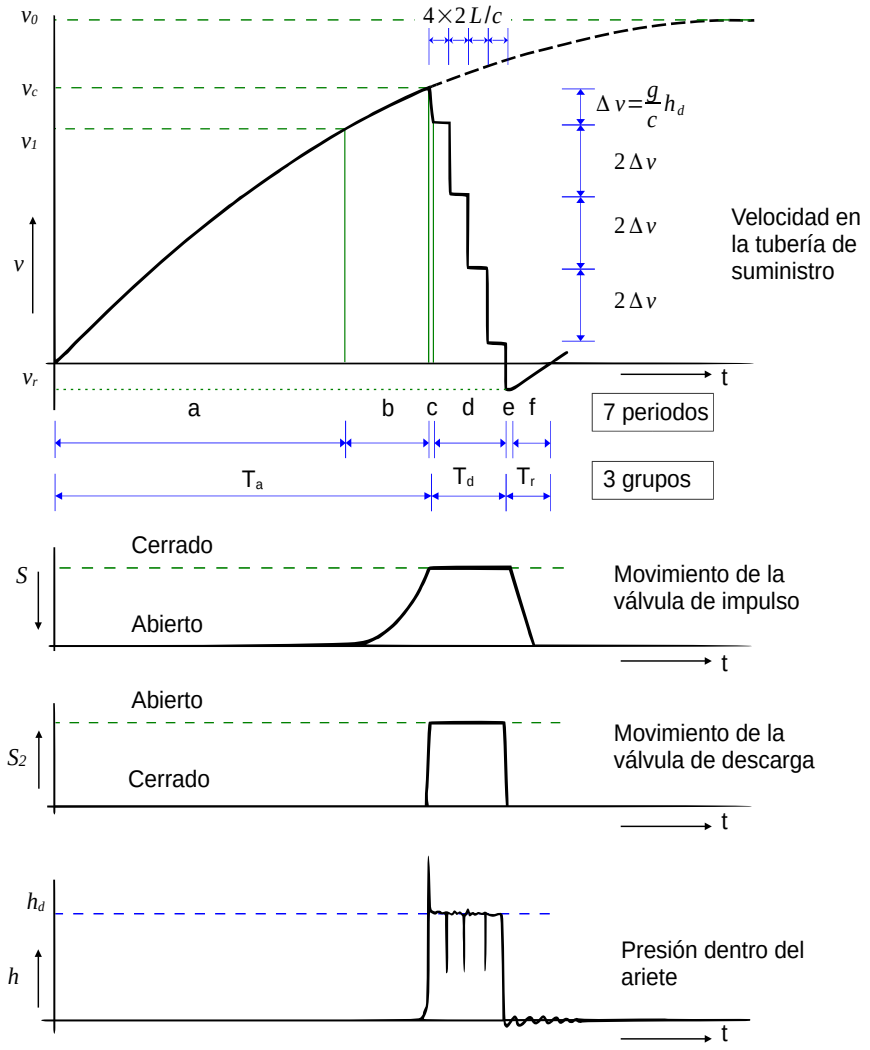
Nota. Adaptado de Krol (1951)

2.2.2.3 Planteamiento Tacke (1988)

Tacke (1988), divide el ciclo en seis periodos los cuales agrupa en tres: 1) periodo de aceleración, 2) periodo de retardación y 3) periodo de retroceso (Figura 14). Tacke plantea ecuaciones diferenciales para el análisis de cada periodo, a la vez realiza una interpretación gráfica.

Figura 14

Planteamiento del ciclo de operación por Tacke.



Nota. Adaptado de Tacke (1988)

Tacke (1988), expone ecuaciones, en cada uno de los tres periodos, que permiten determinar la duración del periodo T y el volumen de agua en el periodo V. Con estos es

posible determinar el caudal de bombeo q y el caudal de funcionamiento Q de la bomba de ariete.

Se puede resumir el modelo teórico de Tacke de la siguiente manera:

- Caudal de bombeo: $q = V_d / T$
- Caudal de funcionamiento: Q = V_{sale} / T con $V_{sale} = V_a + V_r$
- Periodo del ciclo de funcionamiento: $T = T_a + T_d + T_r$

En la Tabla 11 se muestra la nomenclatura utilizada por Tacke. En la Tabla 12 se resumen las expresiones que deduce Tacke, para cada variable mencionada.

Tabla 11

Nomenclatura de símbolos utilizados por Tacke

N°	Símb.	Descripción	N°	Símb.	Descripción
1	T	Periodo: de aceleración T_a, de retardación T_d y de retroceso T_r.	9	a, b, c, d, e y f	Periodos del ciclo de operación.
2	V	Volumen en el periodo: de aceleración V_a, de retardación V_d y de retroceso V_r.	10	N	Número de picos de presión.
3	L	Longitud del tubo de suministro.	11	c	Velocidad de la onda de presión.
4	D	Diámetro del tubo de suministro.	12	H	Altura de suministro.
5	v_o	Velocidad estática.	13	g	Aceleración de la gravedad.
6	v_c	Velocidad crítica.	14	h	Altura de descarga.
7	v_1	Velocidad al inicio del cierre.	15	Δv	Variación de la velocidad.
8	v_r	Velocidad de retroceso.	16	ξ	Coeficiente de pérdida local.

De la Tabla 12, se puede inferir que:

$$q = V_d / T = \frac{\pi D^2}{4} \times \frac{T_d}{T} \times (v_c - N \times \Delta v) \quad (14)$$

$$Q = V_{sale} / T = \frac{1}{T}(V_a + V_r) = \frac{1}{T} \times \frac{\pi D^2}{4} \times \left[\frac{2L}{\xi} \ln \cosh \left(\frac{v_0 \xi}{2L} T_a \right) - \frac{v_r^2 L}{2gH} \right] \quad (15)$$

Así mismo, Tacke (1988) muestra el efecto que tiene en el desempeño hidráulico, la altura descarga h, altura de suministro H, tamaño del ariete (diámetro de la tubería, D) y el ajuste de la válvula de impulso (peso W y longitud de carrera S). En la Figura 15, se observa el efecto del cambio de la altura de suministro de H_I a H_{II}. Manteniendo constantes otros factores (variables), a mayor altura de suministro, el periodo T disminuye con lo

cual se incrementa la frecuencia de golpeteo (más golpes por minuto), aumentando así la tasa de bombeo q. La velocidad critica para ambas alturas de suministro son prácticamente iguales. Sin embargo, Tacke menciona que, al aumentar la altura de suministro, la velocidad crítica aumenta ligeramente.

Tabla 12

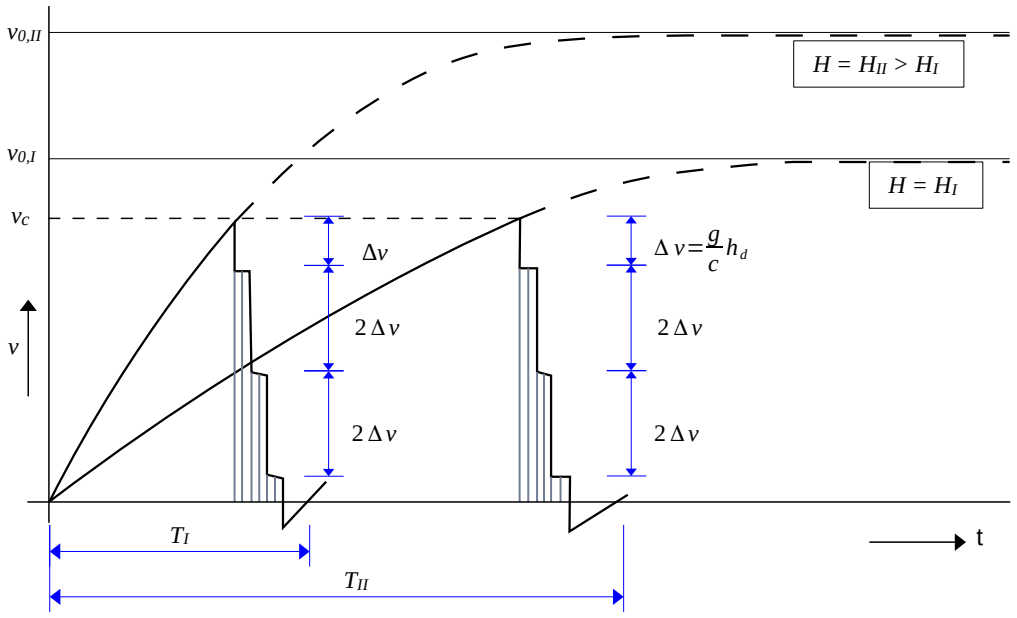
Ecuaciones del ciclo teórico de Tacke.

Periodo	Observaciones
Aceleración	
$T_a = \frac{L}{v_0\,\xi} \ln\left(\frac{v_0+v_c}{v_0-v_c}\right)$, $V_a = \frac{\pi D^2}{4} \times \frac{2L}{\xi} \ln\cosh\left(\frac{v_0\,\xi}{2L} T_a\right)$	Velocidad estática $v_0 = \sqrt{\frac{2gH}{\xi}}$, donde ξ es el coeficiente de pérdidas de carga.
Retardación	
$T_d = N \times \frac{2L}{c}$, $V_d = \frac{\pi D^2}{4} \times \frac{2L}{c} \times \sum_{i=1}^{N} v_i$	N número de picos de presión $N < \frac{v_c + \Delta v}{2\Delta v}$. $v_i = v_c - (2\,i - 1) \times \Delta v$, $\Delta v = g\,h / c$
Retroceso	
$T_r = -\frac{v_r L}{gH}$, $V_r = -\frac{\pi D^2}{4} \times \frac{v_r^2 L}{2gH}$	$v_r = vc - 2\,N \times \Delta v$ (Caso A) $v_r = 2\,N \times \Delta v - v_c$ (Caso B)

Nota. Adaptado de Tacke (1988) Leyenda de símbolos en la Tabla 11.

Figura 15

Efecto de la altura suministro (supply head) en la bomba de ariete.



Nota. Adaptado de Tacke (1988)

2.2.2.4 Análisis dimensional en el funcionamiento de la bomba de ariete

Para el análisis de fenómenos hidráulicos que involucran muchas variables, se suele utilizar la teoría del análisis dimensional. En la Tabla 13, se muestra relaciones adimensionales utilizadas con frecuencia para describir el comportamiento de la bomba de ariete hidráulico.

Tabla 13

Relaciones adimensionales en la bomba de ariete hidráulico.

Variables	Relaciones adimensionales entre variables
Fatahi-Alkouhi y Lashkar-Ara (2019) Variables independientes $H, h, D, c, v_c, g, v, f, L, Q_T, h_m$ Donde: H altura de suministro. h altura de descarga o entrega. D diámetro de la bomba de ariete. c velocidad de la onda de presión. vc velocidad crítica. g aceleración de la gravedad. v viscosidad cinemática del fluido. f coeficiente de fricción. L longitud del tubo de suministro. Q_T caudal total. h_m máxima altura entregada. Variables dependientes q, Q, n, η Donde q caudal de bombeo. Q caudal de funcionamiento. n frecuencia de la válvula de impulso. η eficiencia de la bomba.	a) Caudal de Bombeo Relativo $\frac{q}{Q_T}=\Phi_1\left(\frac{v_c D}{\nu},\frac{\sqrt{gH}}{v_c},\frac{v_c}{c},\frac{h}{h_m},\frac{L}{D},f\right)$ b) Caudal de funcionamiento $\frac{Q}{Q_T}=\Phi_2\left(\frac{v_c D}{\nu},\frac{\sqrt{gH}}{v_c},\frac{v_c}{c},\frac{h}{h_m},\frac{L}{D},f\right)$ c) Parámetro de la válvula de impulso $\frac{nD}{v_c}=\Phi_3\left(\frac{v_c D}{\nu},\frac{\sqrt{gH}}{v_c},\frac{v_c}{c},\frac{h}{h_m},\frac{L}{D},f\right)$ d) Eficiencia $\eta=\Phi_4\left(\frac{v_c D}{\nu},\frac{\sqrt{gH}}{v_c},\frac{v_c}{c},\frac{h}{h_m},\frac{L}{D},f\right)$ Donde: v_cD/v número de Reynolds (Re) $\sqrt{(gH)}/v_c$ número de Froude (F) v_c/c número de Mach (M) h/h_m relación de alturas L/D relación longitud y diámetro del tubo
Calvert (1957) Variables independientes $hs, hd, D, c, vc, g, v, f$ Donde: h_S altura de suministro. h_d altura de descarga o entrega. D diámetro de la bomba de ariete. c velocidad de la onda de presión. v_C velocidad crítica.	a) Caudal de bombeo Relativo $\frac{q_d}{w v_c D^2}=\phi_1\left(\frac{v_c D}{\nu},\frac{\sqrt{2gH}}{v_c},\frac{v_c}{c},\frac{h_d}{h_s},f\right)$ b) Caudal de funcionamiento $\frac{q_d}{w v_c D^2}=\phi_2\left(\frac{v_c D}{\nu},\frac{\sqrt{2gH}}{v_c},\frac{v_c}{c},\frac{h_d}{h_s},f\right)$ c) Parámetro de la válvula de impulso $\frac{q_d}{w v_c D^2}=\phi_3\left(\frac{v_c D}{\nu},\frac{\sqrt{2gH}}{v_c},\frac{v_c}{c},\frac{h_d}{h_s},f\right)$

Variables		Relaciones adimensionales entre variables	
g	aceleración de la gravedad.	Donde:	
v	viscosidad cinemática del fluido.	v_cD/v	número de Reynolds (Re)
f	coeficiente de fricción.	$\sqrt{(2gH)}/v_c$	número de Froude (F)
Variables dependientes		v_c/c	número de Mach (M)
q_d , Q_w, n		h_d/h_s	relación de alturas
Donde:			
q_d	caudal de bombeo.		
Q_w	caudal de funcionamiento.		
n	frecuencia de la válvula de impulso.		

Nota. Fuente la indicada.

Fatahi-Alkouhi y Lashkar-Ara (2019), indican el cambio del número de Reynols no afecta la cantidad relativa de bombeo q/Q_T, el caudal de funcionamiento Q/Q_T ni la eficiencia η. Sin embargo, tuvo un efecto en el parámetro de la válvula de impulso nD/v_c. Por otro lado, los cambios en los parámetros del número de Froude F, el número de Mach M y el coefiiciente de fricción f, no afectaron el rendimiento de la bomba de ariete y pudieron no ser tomados en cuenta.

Figura 16

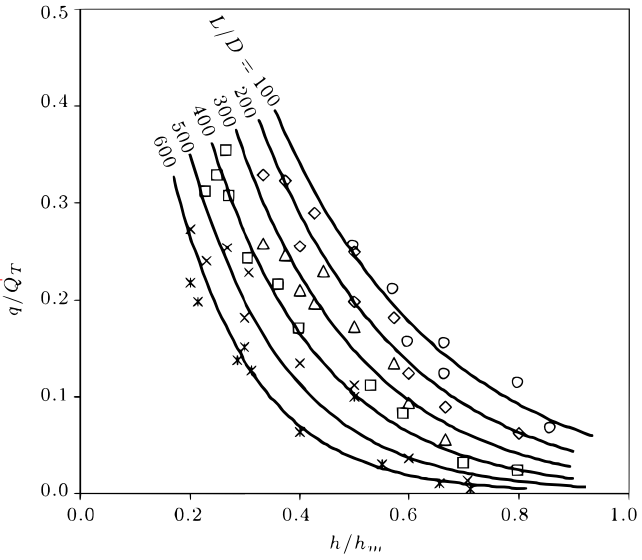
Ecuaciones empíricas que describen el desempeño de la bomba de ariete.

$$\frac{q}{Q_T} = \frac{0.1525 \times \left(\frac{L}{D}\right)^{-0.3971}}{0.0498 + \left(\frac{h}{h_m}\right)^{4.2051}}$$

$$\frac{Q}{Q_T} = 0.56 \left(\frac{L}{D}\right)^{0.1039} \left(\frac{h}{h_m}\right)^{0.2561}$$

$$\frac{nD}{v_0} = 0.000096 \times \left(\frac{L}{D}\right)^{-0.679} \times \left(\frac{h}{h_m}\right)^{0.33} \times \mathrm{Re}^{1.087}$$

$$\eta = -0.2688 + \left(\frac{L}{D}\right)^{-0.0479} - 0.4763 \left(\frac{h}{h_m}\right)^{1.2507}$$



Nota. Adaptado de Fatahi-Alkouhi y Lashkar-Ara (2019). Gráfico relación de caudales en función de relación de alturas y relación longitud-diámetro

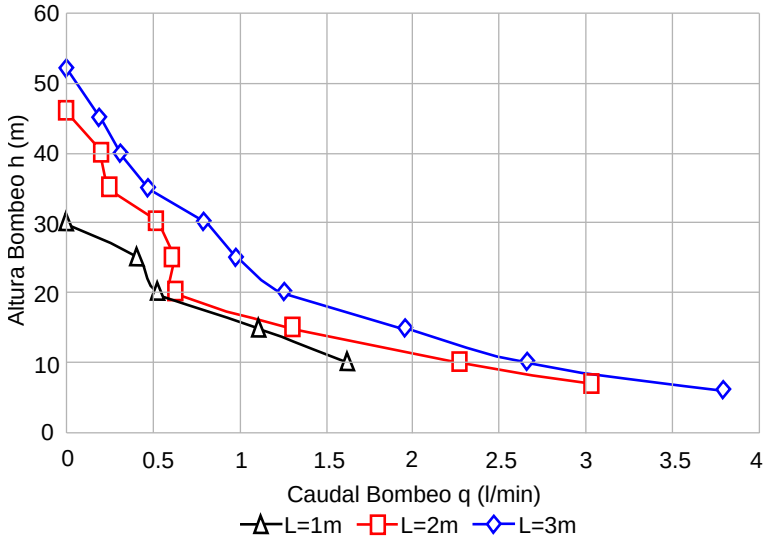
De los otros parámetros independientes del análisis dimensional, la relación de cabeza de presión h/h_m y la relación longitud-diámetro L/D del tubo de suministro, la evaluación experimental indicó que los cambios en las relaciones h/h_m y L/D tuvieron efectos significativos en el rendimiento de la bomba de ariete. Los resultados del comportamiento hidráulico a partir de números adimensionales se representan ecuaciones empíricas o en gráficos (ver Figura 16)

2.2.2.5 Relación directa de variables independientes y dependientes

Otros investigadores relacionar variables dependientes con variables independientes directamente. En la Figura 17, se observa la relación directa entre las variables caudal de bombeo (o caudal de descarga) y la altura de descarga.

Figura 17

Gráfico caudal de bombeo y altura de descarga.



Nota. Fuente Arapa Quispe (2016)

2.2.3 Variables involucradas en el funcionamiento de la bomba de ariete

De los antecedentes y de la teoría del golpe de ariete, se desprende una cantidad de variables, parámetros y constantes involucradas en el funcionamiento de la bomba de ariete.

Las variables independientes consideradas son once. Algunas variables independientes dependen a su vez de otras variables, como el caso de la velocidad crítica o de la velocidad de onda de presión, sin embargo, estas “otras variables” se pueden parametrizar, es decir, definir un valor a partir de la selección de materiales y ajuste de los mismos; estas variables se muestran en los ítems 2.2.3.1 y 2.2.3.3.

Otras variables independientes dependen de la ubicación geográfica o de las condiciones ambientales del lugar de estudio, como en el caso de la densidad y viscosidad del agua, en estos casos solo se hace seguimiento del cambio de estas variables en función de variables ambientales como la temperatura.

Por último, el factor de fricción “f”, es una variable independiente que depende de condiciones del material y del fluido, según (Fatahi-Alkouhi & Lashkar-Ara, 2019) esta variable no afecta el rendimiento de la bomba de ariete, aunque (Calvert, 1957), encontró un aumento marcado del caudal entregado cuando se disminuye “f”.

2.2.3.1 Las variables independientes

- h, Altura de descarga (m)
- H, Altura de suministro (m)
- D, Diámetro (m)
- L, Longitud (m)
- v_c, Velocidad crítica (m/s)
- c, Velocidad de onda de presión (m/s)
- f, Factor de fricción (adimensional)
- g, Gravedad (m/s²)
- v, Viscosidad cinemática (m²/s)
- ρ, Densidad (kg/m³)
- h_{max}, Altura de descarga máxima (m)

2.2.3.2 Las variables dependientes

- q, Caudal de descarga (l/min)

- Q, Caudal de funcionamiento (l/min)
- n, Frecuencia de la válvula de impulso (golpes/min)
- η, Eficiencia de la bomba (adimensional)

2.2.3.3 Parámetros de ajuste

Se han realizado estudios por Krol (1951), Watt (1975), Silver (1977), Tacke (1988), Rennie y Bunt (1990), De Freitas J. y Sanchez H. (2002), Saito et al. (2011), Suarda et al. (2018), Suarda et al. (2019), entre otros, donde se estudia la influencia del ajuste de las variables de la válvula de impulso, cámara de aire, etc., los cuales afectan el desempeño de la bomba de ariete.

Estas variables se pueden "parametrizar" en valores discretos para su ajuste, por lo que se consideran como "parámetros de ajuste" de la bomba de ariete.

2.2.3.3.1 Parámetros de ajuste de la válvula de impulso

- W, Masa del eje móvil (kg) o carga del resorte.
- S, Carrera de la válvula de impulso (mm)
- A_{disco}, Área del disco del eje móvil (m²)
- D_{disco}, Diámetro de disco del eje móvil (mm)
- D_{caja}, Diámetro de la caja (mm)
- $D_{orificio}$, Diámetro de orificio de salida (mm)

2.2.3.3.2 Parámetros de ajuste de la cámara de aire

- $V_{cámara}$, Volumen de la cámara de aire (l)
- V_{aire}, Volumen de aire en la cámara de aire (l)

2.2.3.3.3 Otros parámetros y constantes involucradas

De la mecánica de fluidos, en particular de la teoría de fuerza de arrastre y golpe de ariete, se incluyen constantes y coeficientes que dependen de los materiales utilizados y de sus dimensiones:

- K_d, Coeficiente de arrastre de válvula de impulso
- K, Módulo volumétrico de elasticidad del agua

- E_{mat}, Módulo de Young´s del material de tubería
- μ, Coeficiente de Poisson´s
- e, Espesor de tubería de suministro
- k_{acc}, Coeficiente de pérdidas locales de la válvula de impulso

2.3 Marco legal

La normativa legal no contempla la tecnología de bombeo por ariete hidráulico como opción tecnológica. Las dos normas técnicas de diseño disponibles son las siguientes:

La Resolución Ministerial N° 192-2018-VIVIENDA, que aprueba la “Norma Técnica de Diseño: Opciones Tecnológicas para Sistemas de Saneamiento en el Ámbito Rural”. De aplicación para la formulación y elaboración de los proyectos de los sistemas de saneamiento en el ámbito rural, en los centros poblados rurales que no sobrepasen de dos mil (2,000) habitantes. La norma técnica menciona que, para los casos en donde el ingeniero sanitario responsable del proyecto defina una opción tecnológica no incluida en el presente documento, deberá sustentarla técnica y económicamente tomando de referencia los criterios técnicos incluidos en para ser considerada (MVCS, 2018a).

Decreto Supremo N° 011-2006-VIVIENDA, que Aprueban 66 Normas Técnicas del Reglamento Nacional de Edificaciones – RNE, entre las que se encuentran la Norma OS.010 Captación y conducción de agua para consumo humano y Norma OS.040 Estaciones de bombeo de agua para consumo humano (MVCS, 2006). La Norma OS.10, fija requisitos mínimos que deben sujetarse los diseños de captación y conducción de agua para consumo humano, en localidades mayores a 2000 habitantes. Por otra parte, la Norma OS.040 señala requisitos mínimos que deben cumplir los sistemas hidráulicos y electromecánicos de bombeo de agua para consumo humano (MVCS, 2021)

A continuación, se menciona el marco normativo de carácter general donde se inscribe la presente tesis.

El Decreto Legislativo N.º 1280, Decreto Legislativo que aprueba la Ley del Servicio Universal de Agua Potable y Saneamiento. Es la norma que rige la prestación de los servicios de saneamiento a nivel nacional, en los ámbitos urbano y rural, con la finalidad de lograr el servicio universal, garantizando el acceso, la calidad, la equidad y la sostenibilidad del servicio; promoviendo la protección ambiental y la inclusión social, en beneficio de la población (Presidencia de la República del Perú, 2016)

Decreto Supremo N° 019-2017-VIVIENDA, Decreto Supremo que aprueba el Reglamento del Decreto Legislativo Nº 1280, Decreto Legislativo que aprueba la Ley del Servicio Universal de Agua Potable y Saneamiento (Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento (MVCS), 2017b)

Decreto Supremo N.º 007-2017-VIVIENDA, Decreto Supremo que aprueba la Política Nacional de Saneamiento. Instrumento de desarrollo del sector saneamiento, la cual tiene como objetivo principal alcanzar el acceso y la cobertura universal a los servicios de saneamiento de manera sostenible y con calidad, orientado al cierre de brechas y, como consecuencia de ello, alcanzar la cobertura universal y sostenible de los servicios de saneamiento en los ámbitos urbano y rural, teniendo como uno de sus Ejes de Política la optimización de las soluciones técnica (MVCS, 2017a)

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Metodología

3.1.1 Enfoque de investigación

El trabajo es de enfoque cuantitativo pues se realiza a través de medir y estimar magnitudes del fenómeno de golpe de ariete. Los datos recolectados son numéricos y se analizan por la teoría estadística. El fenómeno estudiado es una realidad externa al investigador (Hernández Sampieri et al., 2014)

3.1.2 Contexto general de la investigación

La parte experimental de la tesis se desarrollará en la ciudad de Oyón, distrito de Oyón, provincia de Oyón, región Lima.

Tabla 14

Contexto general de la investigación.

Aspecto	Descripción
Lugar	Colegio I.E. “Libertador José de San Martín” Oyón - Oyón – Lima. Coordenadas*: - UTM Zona 18L : E 306252, N 8820362, Altitud 3634 m.s.n.m. - Geográfica : 10°39'58.72"S , 76°46'16.71"O, Altitud 3634 m.s.n.m.
Tiempo**	Para los meses de **julio** y **setiembre** del 2022 se tienen los siguientes rangos de condiciones meteorológicas de la estación Oyón (10°40'3.69"S, 76°46'7.33"O, Altitud 3652 m.s.n.m.) Temperatura: 0.8 °C – 21.6 °C Precipitación: 0 mm – 10.8 mm
Acceso	Bus interprovincial desde la ciudad de Lima (210 Km), tiempo de viaje 5 horas.
Permisos	Se solicitó permiso de uso de instalaciones al director del colegio I.E. “Libertador José de San Martín”

Nota. *Google Earth.**Fuente sitio web Senamhi

3.1.3 Diseño de investigación

3.1.3.1 Objetivos del experimento

- Determinar el desempeño hidráulico de una bomba de ariete hidráulico universal con tubería de suministro de PVC.
- Determinar el efecto de la relación longitud y diámetro de la tubería de suministro L/D, en las variables dependientes: caudal de bombeo relativo q/Q_T, caudal de

funcionamiento relativo Q/Q_T, parámetro de la válvula de impulso nD/v_c y eficiencia η

- Determinar el efecto de la relación de la altura de descarga y altura de suministro h/H, en las variables dependientes: caudal de bombeo relativo q/Q_T, caudal de funcionamiento relativo Q/Q_T, parámetro de la válvula de impulso nD/v_c y eficiencia η

3.1.3.2 Elección de variables independientes y variables controlables

Las variables o factores para estudiar son las relaciones adimensionales que se han demostrado tienen efecto en el desempeño de la bomba de ariete:

- h/H, es la relación cargas o relación de la altura de descarga y la altura de suministro (adimensional)
- L/D, es la relación de la longitud y diámetro de la tubería de suministro

Las variables controlables son:

- v_c, es la velocidad crítica (m/s), se deduce a partir de las variables de la ecuación de la fuerza de arrastre.
- c, es la velocidad de onda de presión (m/s), se deduce a partir de las variables de la ecuación de celeridad del golpe de ariete.
- f, es el factor de fricción (adimensional) de la fórmula de Darcy - Weishbak
- g, es la gravedad (m/s²) o aceleración de la gravedad estándar (9.80665 m/s²)
- v, es la viscosidad cinemática del agua (m²/s), depende de la temperatura del agua.
- ρ, es la densidad del agua (kg/m³), depende de la temperatura del agua.
- h_{max}, es la altura de descarga máxima, se deduce de la fórmula básica del golpe de ariete (periodo de retardación)

3.1.3.3 Niveles de variables independientes

Las variables independientes son las relaciones "h/H" y "L/D", para las cuales seleccionamos los niveles de variación:

a. La relación de alturas "h/H" tiene un efecto importante en el desempeño de la bomba de ariete, por lo que se desea tener un mayor detalle en las respuestas (o variables dependientes). Los siguientes autores han trabajado con tubo de suministro de PVC en los rangos de h/H de:

- Abate y Botrel (2002), trabajó en el rango [1.2, 8.7]
- Arapa Quispe (2016), trabajó en el rango [6.0, 45]
- Saavedra Torres (2018), trabajó en el rango [2.9,15.6]
- Jiménez Vilcayauri (2019), trabajó en el rango [1.2, 9.0]

Los valores de la relación h/H para el experimento serán de h/H = {2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 ,11}.

Durante la experimentación se observó que, para h/H = 2, no se producía golpeteos o se producían con dificultad. Se consiguió golpeteos estables a partir de h/H = 2.3 (ver ítem 3.1.3.7.2).

b. En el caso de la relación "L/D", según lo resumido en la Tabla 16, se ha propuesto un valor medio de L/D = 500. Por otra parte, Fatahi-Alkouhi y Lashkar-Ara (2019) encontraron mejores rendimientos hasta L/D = 600. En el presente se trabajará con L/D = {400, 500, 600}

Por tanto, se considerarán un total de 10 niveles para la relación h/H y 3 niveles para la relación L/D.

3.1.3.4 Variables dependientes

Son las relaciones adimensionales siguientes.

- q/Q_T, es el caudal de bombeo relativo o relación caudal de descarga y caudal de suministro.
- Q/Q_T, es el caudal de funcionamiento relativo o relación caudal de funcionamiento y caudal de suministro.
- nD/v_c, es el parámetro de la válvula de impulso o relación frecuencia de la válvula de impulso, diámetro y velocidad crítica

- η, es la eficiencia de Rankine de la bomba de ariete.

Las variables se han definido en el 1.6.3

3.1.3.5 Instrumentos de medición

En la Tabla 1 y Tabla 2, se definió operacionalmente las variables, indicando los instrumentos de medición. En la Tabla 15 se indica las especificaciones técnicas requeridas para cada instrumento de medición:

Tabla 15

Instrumentos de medición de variables independientes.

Variable	Nombre	Descripción	Rango	Resolución
Altura de descarga, h	Manómetro	Manómetro analógico con escala en Bar	0 – 2 Bar	0.02 Bar
			0 – 4 Bar	0.04 Bar
			0 – 11 Bar	0.1 Bar
	Sensor	Sensor de presión de agua analógico SEN0257	0 – 1.6 MPa	± 0.5% FS*
		Sensor de presión de agua y gas HK3025	0 – 5.0 Mpa	± 1% FSO*
Altura de suministro, H Longitud, L	Wincha	Wincha con escala en metros.	0 – 5 m	0.001 m
			0 – 50 m	0.002 m
Diámetro, D	Calibre, vernier o pie de rey.	Calibre con escala en décimas de milímetro.	0 – 15 cm	0.0001 m

Nota. *Error de medición en % de fondo de escala.

Tabla 16

Instrumentos de medición de variables independientes.

Variable	Nombre	Descripción	Rango	Resolución
- Caudal de bombeo, q - Caudal de funcionamiento, Q - Caudal de suministro, Q_T ($Q_T = q + Q$)	Termómetro	Termómetro digital con escala en °C	0 – 100 °C	0.1 °C
	Balanza	Balanza gramera con escala en kg.	0 – 30 kg	1 g
	Cronometro	Cronómetro digital con escala en segundos, ms	-	-
- Frecuencia de la válvula de impulso, n.	Contómetro	Contómetro manual.	-	-
- Velocidad crítica, v_c.	Medición indirecta.	(Anexo 7)	-	-
- Eficiencia de la bomba, "η"	-	A partir de q, Q, h, y H	-	-

3.1.3.6 Unidad experimental

3.1.3.6.1 Factores de selección

La unidad experimental es la entidad física expuesta al tratamiento. Las unidades experimentales corresponden a la división más pequeña del material experimental que podría recibir tratamientos diferentes. Una vez expuesta al tratamiento, la unidad experimental constituye una repetición del tratamiento (Mandeville, 2012, p. 1).

La unidad experimental en nuestro caso es la bomba de ariete universal de PVC en el tipo de unión elegido (roscada o presión) y en la configuración de accesorios seleccionados.

La variabilidad en la construcción de la bomba de ariete: todos los componentes de la bomba de ariete (accesorios, válvulas, etc.) están fabricados según normas técnicas lo cual asegura un nivel de homogeneidad entre unidades experimentales (prototipos a construir). Sin embargo, existe variabilidad intrínseca en los materiales utilizados por:

- Las dimensiones de los accesorios (diferencias milimétricas) o en su composición química, esto según fabricante.
- La elección del tipo de unión entre accesorios (presión o roscada)
- Las diferentes configuraciones posibles entre tubos, accesorios y válvulas para construir un prototipo funcional de bomba de ariete.

Por tanto, se distingue tres factores de clasificación de la unidad experimental:

- Según fabricante de tubos, accesorios, válvulas.
- Según tipo de unión entre accesorios (unión SP o UR)
- Según la configuración de accesorios en la construcción de la bomba de ariete.

En la presente tesis se fijan estos factores:

- Accesorios con unión tipo roscada (UR), dado que facilitan el montaje y desmontaje de la bomba de ariete para actividades de operación y mantenimiento.

- La configuración de bomba de ariete. Existen diferentes configuraciones de bomba de ariete universal, según disposición de accesorios y construcción de elementos de la bomba de ariete (Cámara de aire, válvula de impulso, válvula de descarga), entonces los criterios para la selección de la configuración son:
  - Mínima cantidad de accesorios para la construcción.
  - Disminución de coeficiente de pérdida de carga local.
  - Accesorios disponibles en comercios locales.
  - Costo de la instalación.
- El tercer factor es el tipo de fabricante de tubos y accesorios, se escogió el fabricante PAVCO.

Finalmente, complementan al prototipo de bomba de ariete los componentes hidráulico, estructural, mecánico y eléctrico, que en su conjunto conforman el banco de pruebas hidráulicas.

3.1.3.6.2 Bomba de ariete universal

Consiste en una configuración definida de accesorios y válvulas de material PVC-U, exceptuando la válvula de descarga, la cual es de bronce.

Elementos o partes de la bomba de ariete:

- Cuerpo de la bomba de ariete de accesorios PVC.
- Válvula de impulso de accesorios PVC, perno y tuercas.
- Válvula de descarga de bronce tipo Swing.
- Cámara de aire de tubo y accesorios PVC.
- Válvulas de control de PVC
- Accesorios para instalación de los instrumentos de medición de presión.

Las Figuras 18, 19 y 20 se observa el detalle de construcción de la bomba de ariete y válvula de impulso. Adicionalmente, la Figura 20 muestra los principales parámetros de válvula de impulso (carrera S, peso W) y otras magnitudes.

Algunos aspectos constructivos de la válvula de impulso y la cámara de aire en el Anexo 15. Se pueden observar más vistas en el panel fotográfico del Anexo 16.

Figura 18

Partes de la bomba de ariete.

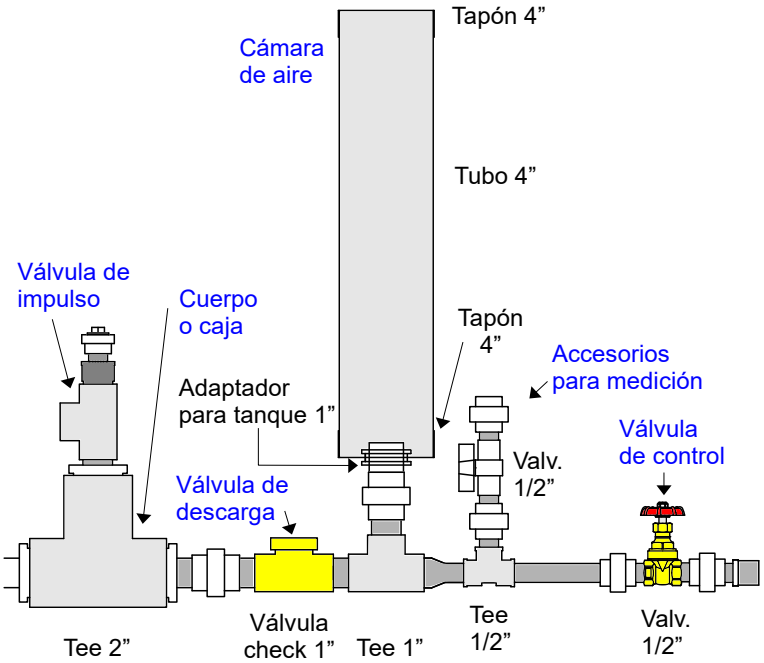


Figura 19

Fotografía con las partes de la bomba de ariete construida.

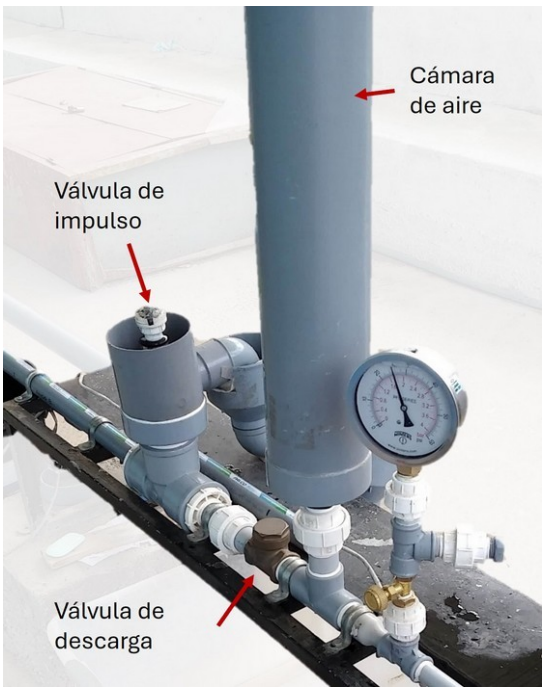
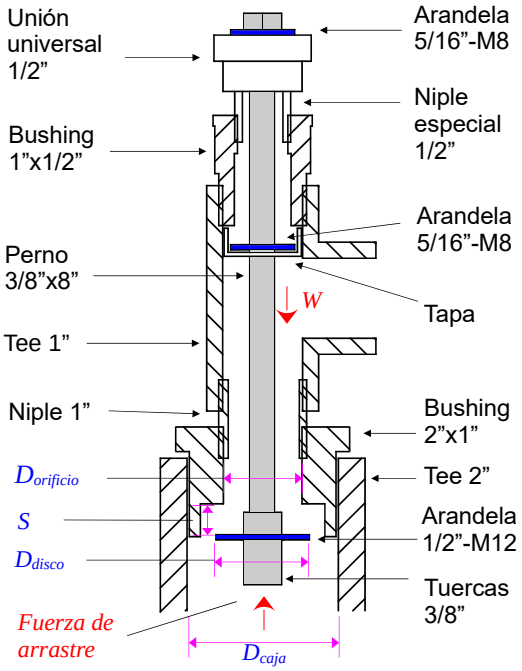


Figura 20

Partes de la válvula de impulso.



3.1.3.6.3 Componentes del banco de pruebas

Componentes que permiten el funcionamiento el banco de pruebas, se pueden diferenciar los siguientes:

- Componentes hidráulicos
- Componente estructural
- Instalaciones mecánico-eléctricas
- Instalaciones complementarias

En la Figura 21 se muestra el detalle de elementos del banco de pruebas. Este es un gráfico esquemático.

3.1.3.6.3.1 Componentes hidráulicos

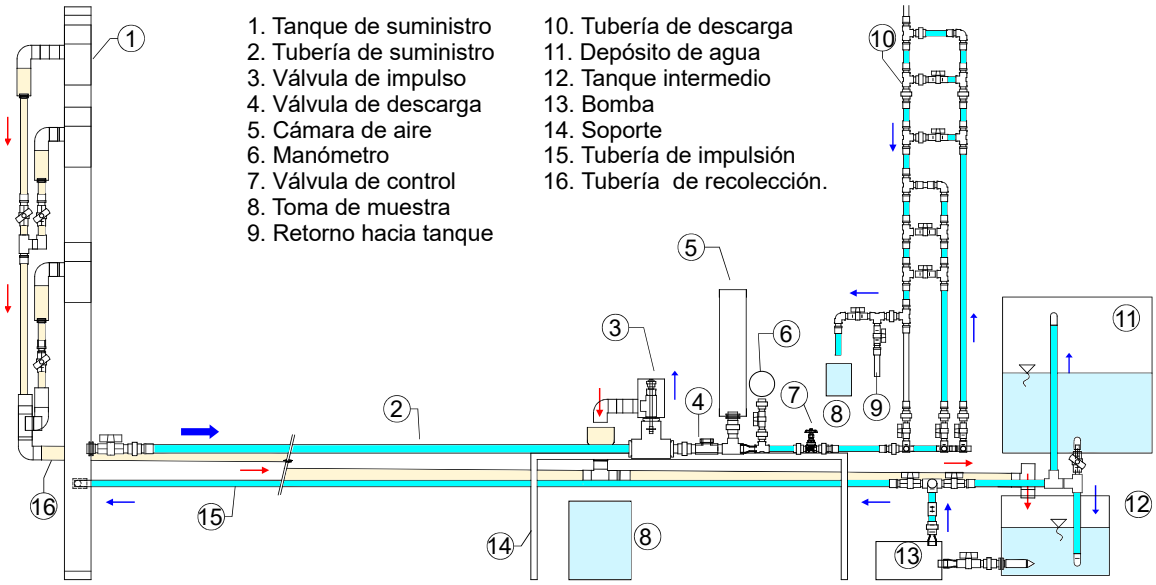
Consta de tuberías, accesorios y válvulas, por donde el agua circula durante las pruebas experimentales. Conducen el agua hacia la bomba de ariete y luego retorna mediante un sistema de recirculación por bombeo. A modo de explicación se ha divido en cuatro zonas:

- Zona de conducción (el tanque y tubería de suministro)

- Bomba de ariete (válvula de impulso, válvula de descarga, cámara de aire, etc.)
- Zona descarga (tubería de descarga)
- Sistema de recirculación (incluye el equipo de bombeo, tubería de impulsión, tanque y depósito, tubería de recolección)

Figura 21

Banco de pruebas experimentales.



3.1.3.6.3.2 Componente estructural

Sirve de soporte a las instalaciones hidráulicas, consiste en estructuras de fierro fundido soldado.

- Estructura para la bomba de ariete (mesa)
- Estructura para la zona de suministro.
- Estructura de soporte de la tubería de alimentación y el sistema de recirculación.

3.1.3.6.3.3 Instalaciones mecánico-eléctricas

Incluye la electrobomba y componentes eléctricos para su funcionamiento.

3.1.3.6.3.4 Instalaciones complementarias

Para el suministro de agua y suministro eléctrico.

3.1.3.6.4 Costo de la bomba de ariete

El banco de pruebas de la Figura 21 tiene un costo aproximado de S/ 20 000. La producción de una bomba de ariete de la Figura 18 tiene un costo aproximado de de S/. 2000. La producción en serie de más prototipos reduce el costo por unidad.

3.1.3.7 Selección del diseño de investigación

El trabajo de investigación le corresponde un “diseño experimental”, este consiste en la asignación aleatoria de unidades experimentales al grupo de observación (RG_1), la aplicación del tratamiento experimental (X), y medición de efectos (0_1) (Hernández Sampieri et al., 2014)

$$RG_1 \xrightarrow{X} 0_1$$

Donde:

R , Asignación al azar o aleatoria de sujetos o casos.

G_1 , Grupo de sujetos o casos.

X , Tratamiento experimental.

0_1 , medición de efectos en sujetos o casos de un grupo.

Se trabaja con un grupo (G_1) de casos o unidades experimentales.

3.1.3.7.1 Selección de unidades experimentales

La unidad experimental es la entidad física expuesta al tratamiento (Mandeville, 2012, p. 1). Para la presente tesis, según lo indicado en el ítem 3.1.3.6, la unidad experimental consiste en el prototipo de bomba de ariete a construir.

En este caso se trabaja con fabricantes de accesorios comúnmente utilizados y según disponibilidad de dichos accesorios en comercios locales.

Se elige tres unidades experimentales perteneciente a un grupo de investigación:

$G_1 = \{UE_1, UE_2, UE_3\}$

Donde:

G_1, grupo de unidades experimentales

UE_1 , unidad experimental N°1.

3.1.3.7.2 Tratamientos experimentales y variables individuales

Los tratamientos experimentales son una combinación adecuada de factores o niveles de las variables independientes, que se aplican a la unidad experimental.

En la presente tesis se tienen dos variables independientes o factores: la relación de alturas o cargas h/H y la relación longitud-diámetro del tubo de suministro L/D.

Se elige un arreglo factorial que permite obtener tratamientos como una combinación de los niveles de factores h/H y L/D.

Del ítem 3.1.3.3, se tiene 10 niveles para la relación de alturas h/H y 3 niveles para la relación longitud-diámetro L/D. Por tanto, de acuerdo a la Tabla 17, se tienen un total de 30 tratamientos de la forma $Xi(j; k)$ o $Xi(h/H; L/D)$.

Se inicia con h/H = 2.3 para L/D = 400, h/H = 2.4 para L/D = 500, h/H = 2.5 para L/D = 600. En estos valores de h/H se consiguió golpes estables.

La selección de variables individuales h, H, L, y D son en base a los valores usualmente utilizados por otros investigadores.

De la Tabla 88, sobre la altura de suministro H el rango usual por otros autores es de 0.5 m a 4.36 m. El diámetro de tubo de suministro de PVC usual entre 1/2" a 1 ½".

Tabla 17

Tratamientos experimentales según niveles de las relaciones h/H y L/D.

***h/H* (j)**	***L/D* (k)**		
	400	500	600
2	X1 (2.3; 400)	X11 (2.4; 500)	X21 (2.5; 600)
3	X2 (3; 400)	X12 (3; 500)	X22 (3; 600)
4	X3 (4; 400)	X13 (4; 500)	X23 (4; 600)
5	X4 (5; 400)	X14 (5; 500)	X24 (5; 600)
6	X5 (6; 400)	X15 (6; 500)	X25 (6; 600)
7	X6 (7; 400)	X16 (7; 500)	X26 (7; 600)
8	X7 (8; 400)	X17 (8; 500)	X27 (8; 600)
9	X8 (9; 400)	X18 (9; 500)	X28 (9; 600)
10	X9 (10; 400)	X19 (10; 500)	X29 (10; 600)
11	X10 (11; 400)	X20 (11; 500)	X30 (11; 600)

El valor de la altura de suministro mínima se puede determinar a partir del criterio de relación de velocidades $r=v_c/v_0$ < 0.8 (Tacke, 1988; B. W. Young, 1995). En el Anexo 1.2.4 se desarrolla este criterio y se elabora gráficas de selección. La relación de velocidades $r=v_c/v_0$, vincula la velocidad crítica con la velocidad estática, que es lo mismo, el ajuste de la carrera S con la altura de suministro H. Por otro lado, el cambio de la velocidad crítica Δv es la que se "transforma" en el pulso de presión durante el golpe de ariete a partir de la relación $\Delta h = (c/g) \times \Delta v$ (Anexo 8.3), una velocidad crítica mayor permitirá mayores presiones y caudales. Por ello, se prefirió una velocidad crítica alrededor de 1 m/s a la menor altura de suministro, del cálculo se encontró H = 1.4 m como la altura de suministro adecuada. La Tabla 18 resumen las tres condiciones operativas elegidas para las tres válvulas de impulso construidas.

Tabla 18

Parámetros fijados para cada unidad experimental.

H, m	S, mm	v_c, m/s	k_{valv}*	K_d	Observación
1.4	5.55	0.970	4.79	1.526	Unidad experimental 1
2	6.92	1.114	4.22	1.157	Unidad experimental 2
3	10.23	1.365	3.65	0.771	Unidad experimental 3

Nota. H altura de suministro, S carrera, v_c velocidad crítica, k_{valv} coeficiente de pérdidas locales de la válvula de impulso, K_d coeficiente de arrastre. Incertidumbres en la Tabla 140. *Mediante el modelo 1 (Anexo 2.1.5.4)

En la Tabla 19 se calcula los valores de la longitud de la tubería de suministro L, y altura de descarga h.

Tabla 19

Selección de diámetro de instalación D y altura de suministro H.

Variable	Cálculo de variables individuales
D = 0.0262 mm (PVC 1")	L = {10.48 m, 13.1 m, 15.72}
H = {1.4 m , 2 m, 3 m}	h (ver Tabla 20)

La Tabla 20, es de doble entrada, las dos primeras columnas representan la altura de descarga (en m y Bar); las tres siguientes corresponden a la relación de alturas h/H para los tres valores la altura de suministro H.

En la Tabla 20 se “asigna” una unidad experimental a cada altura de suministro, esto con la finalidad de fijar las condiciones experimentales de la Tabla 18.

En la Tabla 20, los datos de la columna H = 1.4 m, se trabajó en el rango de h/H de 3 a 10, esto pues, el golpe es intermitente e inestable para valores menores a 3, mientras que para h/H mayor a 10 se acerca al valor máximo de h/H.

Tabla 20

Relación h/H en función a la altura de descarga y la altura de suministro.

***h*, m**	***h*, bar**	***h/H***		
		UE1: H = 1.4 m	*UE2*: H = 2 m	*UE3*: H = 3 m
4.2	0.41	3		
4.6	0.45		2.3	
4.8	0.47		2.4	
5	0.49		2.5	
5.6	0.55	4		
6	0.59		3	
6.9	0.68			2.3
7	0.69	5		
7.2	0.71			2.4
7.5	0.74			2.5
8	0.78		4	
8.4	0.82	6		
9	0.88			3
9.8	0.96	7		
10	0.98		5	
11.2	1.1	8		
12	1.18		6	4
12.6	1.23	9		
14	1.37	10	7	
15	1.47			5
16	1.57		8	
18	1.76		9	6
20	1.96		10	
21	2.06			7
22	2.16		11	
24	2.35			8
27	2.65			9
30	2.94			10
33	3.23			11

Nota. Los espacios en blanco indican que no se trabajó a esa altura de descarga para la correspondiente altura de suministro.

En el caso de las columnas H = 2 m y H = 3 m, se trabajó a partir de h/H = 2.3 (L/D = 400), h/H = 2.4 (L/D = 500) y h/H = 2.5 (L/D = 600), en estos valores se consiguió golpes estables.

3.1.3.7.3 Réplicas y repeticiones

Mandeville (2012) menciona que la replicación es la asignación de más de una unidad experimental al mismo tratamiento, y es importante porque:

- Se obtiene una mejor estimación del error experimental, que es la unidad de medición básica para determinar si las diferencias observadas son en realidad estadísticamente diferentes.
- Se aumenta la precisión de las estimaciones del efecto.

La replicación hace referencia al número de unidades experimentales de cada tratamiento, no al número de observaciones (o repeticiones). Las repeticiones reducen la variación asociada con mediciones y/o errores muestrales, pero no proveen ninguna información relacionada con los errores experimentales (Melo Martínez et al., 2020)

Según Sampieri et al. (2014, p. 149), para lograr una mayor validez externa (de la investigación) es conveniente tener casos o grupos lo más parecidos posible a la mayoría de las personas o poblaciones a las cuales se desea generalizar, y repetir el experimento varias veces con diferentes grupos o en distintos ambientes (hasta donde el presupuesto y el tiempo lo permitan).

En base a lo indicado, en los ítems anteriores 3.1.3.7.1 y 3.1.3.7.2, se establece la utilización de tres réplicas, ya que se trata de unidades experimentales semejantes ($UE1$, $UE2$, $UE3$). Por otra parte, la cantidad de repeticiones de cada tratamiento se fija en 10 siendo este un número arbitrario.

3.1.3.8 Orden de experimentos: aleatorización

3.1.3.8.1 Descripción del proceso de aleatorización

El proceso de aleatorización está restringido por:

- La cantidad de pruebas a realizar por día.

- El cambio de variables que implican muchos recursos y tiempo.

Inicialmente, se consideró 25 pruebas a realizar por día, considerando 20 minutos por prueba (Fatahi-Alkouhi & Lashkar-Ara, 2019)

Cada una de las 25 pruebas a realizar por día, serán para una misma L/D, dado que, el cambio de la longitud de tubería de suministro L implica un tiempo de 30 minutos aproximadamente.

El procedimiento de aleatorización se realizó de la siguiente manera.

- **Total de pruebas a aleatorizar**: Se tiene en total 300 pruebas a aleatorizar, estas se pueden agrupar por cada L/D, teniendo 100 pruebas en cada grupo, pues L/D = {400, 500, 600}
- **Formación de grupos**: Para cada grupo de L/D se forman 4 subgrupos de 25 pruebas. Por tanto, se tienen 12 grupos en total (Tabla 21)

Tabla 21

Grupos de 25 pruebas para cada relación L/D.

L/D = 400	L/D = 500	L/D = 600
Grupo 1	Grupo 5	Grupo 9
Grupo 2	Grupo 6	Grupo 10
Grupo 3	Grupo 7	Grupo 11
Grupo 4	Grupo 8	Grupo 12

- **Pruebas por cada grupo**: Cada grupo debe contener todos los tratamientos. La cantidad de pruebas por tratamiento será de 3 y 2 alternadamente (Tabla 22).

Tabla 22

Pruebas para los primeros 4 grupos.

Grupo 1		Grupo 2		Grupo 3		Grupo 4	
Tratamientos	Pruebas	Tratamientos	Pruebas	Tratamientos	Pruebas	Tratamientos	Pruebas
(2.3, 400)	3	(2.3, 400)	3	(2.3, 400)	2	(2.3, 400)	2
(3, 400)	2	(3, 400)	2	(3, 400)	3	(3, 400)	3
(4, 400)	3	(4, 400)	3	(4, 400)	2	(4, 400)	2
(5, 400)	2	(5, 400)	2	(5, 400)	3	(5, 400)	3
(6, 400)	3	(6, 400)	3	(6, 400)	2	(6, 400)	2
(7, 400)	2	(7, 400)	2	(7, 400)	3	(7, 400)	3
(8, 400)	3	(8, 400)	3	(8, 400)	2	(8, 400)	2

Grupo 1		Grupo 2		Grupo 3		Grupo 4	
(9, 400)	2	(9, 400)	2	(9, 400)	3	(9, 400)	3
(10, 400)	3	(10, 400)	3	(10, 400)	2	(10, 400)	2
(11, 400)	2	(11, 400)	2	(11, 400)	3	(11, 400)	3

- **Proceso de aleatorización**: Primero se realizó la aleatorización de los grupos y luego la aleatorización de las pruebas dentro de cada grupo.
- **Aleatorización de grupos**:
    - Una restricción es que los grupos de una misma L/D no deben ser consecutivos, por tanto, seleccionamos primero varias aleatorizaciones preferibles y luego elegimos aleatoriamente una de estas.
    - La aleatorización consiste en colocar en una columna los grupos, luego en una columna contigua se colocan números generados aleatoriamente, se ordena esta segunda columna y se obtiene un orden aleatorio de grupos. Repetimos este proceso (teniendo en cuenta la restricción del párrafo anterior) hasta obtener varias “aleatorizaciones preferibles”. En la Tabla 23, se observa la primera aleatorización preferible encontrada y en la Tabla 24 las 6 aleatorizaciones preferibles.

Tabla 23

Primera aleatorización “preferible” de grupos.

Grupo	# Aleatorio	Orden
7	0.0126170610518875	1
9	0.194454355763494	2
1	0.218604210258186	3
12	0.254101052887004	4
6	0.275279854434416	5
4	0.370081443045352	6
10	0.409703966253657	7
2	0.468662009426255	8
11	0.523452299972507	9
8	0.606546466126651	10
5	0.753142403114533	11
3	0.864811025360818	12

Tabla 24

Serie de aleatorizaciones preferibles.

Orden	Aleatorización					
	N.º 1	**N.º 2**	**N.º 3**	**N.º 4**	**N.º 5**	**N.º 6**
1	7	12	3	10	7	7
2	9	7	6	8	1	12
3	1	4	10	2	6	3
4	12	6	5	5	10	5
5	6	3	2	9	4	8
6	4	8	7	1	5	9
7	10	10	9	12	12	6
8	2	1	1	3	2	4
9	11	9	8	7	9	11
10	8	5	11	4	8	2
11	5	2	4	6	3	1
12	3	11	12	11	11	10

- En una tabla aparte, se colocan estas 6 aleatorizaciones, y se ordenan a partir de nuevos números aleatorios (de forma similar a la Tabla 23), luego escogemos la aleatorización N°3 (Tabla 25)

Tabla 25

Elección de una aleatorización preferible

N.º Aleatorización	# Aleatorio	Orden
3	0.055394385691492	1
6	0.230348412132632	2
4	0.347280041590276	3
2	0.547596139229929	4
1	0.606965489654803	5
5	0.805738383040377	6

- **Aleatorización de pruebas**:
  - De forma similar a la aleatorización de grupos, dentro de cada grupo, ordenamos las 25 pruebas en una columna, luego colocamos números aleatorios en una columna contigua y ordenamos la tabla según estos números aleatorios.
  - Obtenemos un orden aleatorio de pruebas dentro de cada grupo. De la Tabla 25 y Tabla 24 se tiene el grupo N°3 el cual quedó en primer lugar, en la Tabla 26 se muestra el orden aleatorio de pruebas para este grupo.

- En la Tabla 26 se observa que algunas pruebas se repiten consecutivamente (N° 2 y N° 3), se realizó varias aleatorizaciones dentro de cada grupo hasta encontrar una que contengan la menor cantidad de repeticiones consecutivas.
- En el Anexo 19, se amplía la Tabla 26 con todos los demás grupos.

Tabla 26

Aleatorización de pruebas dentro del grupo N°3.

N.º	N.º grupo	Orden	N.º Tratamiento	Código	H	Repetición	Aleatorio
1	3	1	1	(2.3, 400)	2	7	0.21183850674424
2	3	1	6	(7, 400)	1.4	6	0.22447106509935
3	3	1	6	(7, 400)	2	5	0.22760081512388
4	3	1	10	(11, 400)	2	5	0.24016403348651
5	3	1	4	(5, 400)	2	5	0.24502603255678
6	3	1	7	(8, 400)	2	8	0.27505018759985
7	3	1	3	(4, 400)	3	7	0.27626438334119
8	3	1	5	(6, 400)	2	8	0.28009424090851
9	3	1	2	(3, 400)	1.4	6	0.28589558636304
10	3	1	10	(11, 400)	2	7	0.31311480456497
11	3	1	9	(10, 400)	3	7	0.33195040852297
12	3	1	10	(11, 400)	3	6	0.34691213082988
13	3	1	1	(2.3, 400)	3	8	0.42628516315017
14	3	1	8	(9, 400)	2	5	0.46718764409889
15	3	1	3	(4, 400)	2	8	0.51603480812628
16	3	1	5	(6, 400)	3	7	0.52055200247560
17	3	1	8	(9, 400)	1.4	6	0.67213762027677
18	3	1	4	(5, 400)	1.4	6	0.67868295393419
19	3	1	4	(5, 400)	3	7	0.68549077061471
20	3	1	7	(8, 400)	3	7	0.70505949168000
21	3	1	2	(3, 400)	2	5	0.71903835155536
22	3	1	9	(10, 400)	2	8	0.76528026780579
23	3	1	8	(9, 400)	3	7	0.81340900121722
24	3	1	2	(3, 400)	3	7	0.96019861346576
25	3	1	6	(7, 400)	3	7	0.98226887814235

Nota. N.ºgrupo hace referencia a la Tabla 21. N.º Tratamiento son los tratamientos aleatorizados dentro del grupo. Repetición: cada tratamiento tiene 10 repeticiones repartidas en todos los grupos.

3.1.4 Casos, universo y muestra

Unidad experimental: Lo constituye la bomba de ariete universal de PVC a construir en el tipo de unión elegido y en la configuración de accesorios seleccionado.

Universo: Lo constituye todas las bombas de ariete universal construidas del mismo material, configuración y tipo de unión. En ese sentido las variantes a encontrar son 1) según fabricante de tubos y accesorios, 2) diferencias de dimensiones de accesorios en un mismo fabricante.

Muestra: La unidad experimental definida tiene un alto grado de homogeneidad respecto a las otras unidades experimentales posibles dentro del universo, esto es, las diferencias entre ellas son a priori significativamente menores. Esto se sustenta en el hecho que los accesorios son construidos según normas técnicas. Por ende, establecer una muestra del universo no es necesario, dado la representatividad intrínseca de cada bomba a construir.

Sin embargo, a modo de conocer el error experimental de las pruebas, se hace necesario un número determinado de unidades experimentales que constituirán las “réplicas” de tratamientos a realizar.

Según lo indicado en los ítems 3.1.3.7.1 y 3.1.3.7.3, se establecen tres unidades experimentales en las pruebas a modo de verificar la variación en las respuesta o efectos de las variables dependientes.

3.1.5 Procedimiento

El procedimiento experimental para la recolección de datos se realizó según lo indicado en la Tabla 27. Este procedimiento se amplía en el Anexo 12.

Tabla 27

Procedimiento experimental.

N°	Procedimiento
1	Verificar condiciones de prueba según tratamiento X (i, j)
2	Adecuación del banco de pruebas
3	Pesaje inicial de recipientes.
4	Encendido de banco de pruebas

N°	Procedimiento
5	Medición de la presión máxima
6	Ajuste a la presión de trabajo requerida.
7	Medición de temperatura inicial de prueba
8	Medir la cantidad de golpes por minuto inicial.
9	Inicio de aforo del caudal de descarga
10	Inicio de aforo del caudal de funcionamiento
11	Medición y registro de datos.
12	Finalización de prueba

3.1.6 Procesos de recolección de los datos

3.1.6.1 Plan de recolección de datos

Se realiza el plan de recolección de datos (Tabla 28) según lo recomendado por Sampieri et al. (2014).

Tabla 28

Plan de recolección de datos

Ítem	Descripción
Fuentes de los datos	Bomba de ariete universal de PVC construida.
Localización de las fuentes	Banco de pruebas hidráulicas ubicado en las instalaciones del colegio Libertador José de San Martín – Oyón (ver ítem 3.1.2)
Método de recolección de datos	Registro mediante instrumentos de medición de variables físicas (presión, peso, temperatura, frecuencia, tiempo)
Forma de preparación de datos	Matriz de datos recolectados.

Así mismo, teniendo en cuenta los capítulos anteriores, tenemos la Tabla 29.

Tabla 29

Plan de recolección de datos II.

Ítem	Descripción
Variables a medir	Las variables de caudal de bombeo, caudal de funcionamiento, frecuencia de válvula de impulso, carga o altura de descarga.
Definiciones operacionales	En la Tabla 1 y Tabla 2, se define operacionalmente las variables.
La muestra	No se define muestra en la tesis, esto según lo indicado en el ítem 3.1.4 Casos, universo y muestra
Recursos disponibles	Se cuenta con los recursos y disponibilidad de tiempo para el financiamiento de la tesis.

3.1.6.2 Confiabilidad, validez y objetividad de los instrumentos de medición

En la presente tesis la confiabilidad está relacionada con la precisión, validez, y exactitud del instrumento de medición.

Los instrumentos de medición utilizados miden variables físicas que son de naturaleza objetiva pues sus principios de funcionamiento son independientes del sesgo del investigador.

Se mide la confiabilidad y validez de los instrumentos de medición, a través, del reporte de calibración. En el Anexo 17, se muestran estos resultados.

En la Tabla 30, se resume la información principal de los certificados de calibración de los instrumentos de medición indicados.

Tabla 30

Datos de calibración de instrumentos de medición.

N.º	Instrumento	Incertidumbre expandida	Certificado de calibración
1	Manómetro 2 Bar	Error Máximo Permitido: ±0.02 Bar. Máximo Error Absoluto de Indicación: 0.013 Bar Máximo Error Absoluto de Histéresis: 0.004 Bar Incertidumbre: [0.006 Bar, 0.008 Bar]	TC-09895-2021
2	Manómetro 30 psi.	Error Máximo Permitido: ±0.45 psi Máximo Error Absoluto de Indicación: 0.40 psi Máximo Error Absoluto de Histéresis: 0.06 psi Incertidumbre: [0.06 psi, 0.10 psi]	TC-16521-2023
3	Manómetro 4.12 Bar	Error Máximo Permitido: ±0.0412 Bar. Máximo Error Absoluto de Indicación: 0.035 Bar Máximo Error Absoluto de Histéresis: 0.004 Bar Incertidumbre: [0.012 Bar, 0.014 Bar]	TC-09894-2021
4	Manómetro 60 psi	Error Máximo Permitido: ±0.9 psi. Máximo Error Absoluto de Indicación: 0.17 psi Máximo Error Absoluto de Histéresis: 0.04 psi Incertidumbre: [0.12 psi, 0.13 psi]	TC-16522-2023
5	Manómetro 160 psi	Error Máximo Permitido: ±2.4 psi. Máximo Error Absoluto de Indicación: 0.2 psi Máximo Error Absoluto de Histéresis: 0.3 psi Incertidumbre: [0.6 psi, 0.7 psi]	TC-16666-2023
6	Pie de rey analógico*	Error Máximo Permitido: ±50 µm. Error de indicación para medición de exteriores: 33 µm. Error de cambio de escala de exteriores a interiores ($S_{E\text{-}I}$): 67 µm.	TC - 17812 - 2023

N.º	Instrumento	Incertidumbre expandida	Certificado de calibración
		Incertidumbre de medición $(81.53^2+0.01^2\times L^2)^{1/2}$	
7	Pie de rey digital*	Error Máximo Permitido: ±30 µm. Error de indicación para medición de exteriores: Rango [17 µm, 23 µm]. Error de cambio de escala de exteriores a interiores ($S_{E\text{-}I}$): 37 µm. Incertidumbre de medición: $(24.79^2+0.01^2\times L^2)^{1/2}$	TC - 17815 - 2023
8	Termómetro digital	Indicación y corrección: 3.9 °C (+0.13 °C); 11.9 °C (+0.20 °C); 19.9 (+0.12 °C) Incertidumbre: 0.11 °C	148-CT-T-2021
9	Balanza gramera 30 kg	Lectura corregida: $R+7.74\times10^{-4}\times R$ Incertidumbre de medición: $2\times\sqrt{5.82\times10^{-7}+1.49\times10^{-8}\times R^2}$	TC - 06798 - 2021

Nota. R lectura de la balanza en kg, L indicación del pie de rey en mm. *Error de indicación del pie de rey para medición de interiores = Error de indicación de exteriores + Error de cambio de escala de exteriores a interiores ($S_{E\text{-}I}$).

3.1.7 Análisis de datos

Sampieri et al. (2014), propone las siguientes fases para el análisis de datos:

- Fase 1: Seleccionar un software apropiado para analizar los datos.
- Fase 2: Ejecutar el programa:
- Fase 3 Explorar los datos: a) Analizar descriptivamente los datos por variable. b) Visualizar los datos por variable.
- Fase 4: Evaluar la confiabilidad y validez logradas por el o los instrumentos de medición.
- Fase 5: Analizar mediante pruebas estadísticas las hipótesis planteadas (análisis estadístico inferencial).
- Fase 6: Realizar análisis adicionales.
- Fase 7: Preparar los resultados para presentarlos (tablas, gráficas, figuras, cuadros, etcétera).

(Kumar, 2018), menciona la importancia de la edición de datos y la codificación de estos:

- Edición: La edición de datos implica el escrutinio (examen) de los instrumentos de investigación completados (matriz de datos rellenada) para identificar y minimizar, en la medida de lo posible, los errores en la integridad, la clasificación errónea y las lagunas en la información obtenida de los encuestados (en las observaciones).
- Codificación: El proceso de asignar valores numéricos a diferentes categorías de respuestas a una pregunta (con el fin de analizarlas).

El alcance de la tesis es de tipo correlacional y explicativo, para este fin se dispone de software estadístico para el análisis de datos. En este sentido prioriza software libre con capacidad para realizar estos análisis: R y Rstudio, JASP, Libreoffice Calc.

El análisis estadístico es descriptivo e inferencial:

- Descriptivo: medidas de tendencia central, medidas de variabilidad, gráficas.
- Inferencial: intervalos de confianza para muestras pequeñas, prueba de regresión lineal múltiple para la estimación de parámetros del modelo, prueba t-Student de muestras independientes y análisis de varianza (ANOVA) para la prueba de hipótesis.

3.2 Resultados

3.2.1 Estadísticas generales

A continuación, se muestra un resumen de las estadísticas del experimento. En el Anexo 1 se muestran más estadísticas y en Anexo 19 las tablas de datos y de análisis.

3.2.1.1 Estadísticas de la cantidad de pruebas

Podemos dividir las pruebas según su situación:

- Válidas, aquéllas que usaremos para el modelado.
- Inválidas, las pruebas descartadas por no cumplir requisitos de prueba.
- Adicional, realizadas para el cumplimiento del principio de normalidad, por extracción de valores inválidos, etc.

En la Tabla 31 y Figura 22, se muestran la cantidad de pruebas realizadas, agrupadas según relación L/D.

Tabla 31

Cantidad de pruebas realizadas para cada L/D, según situación.

Situación de las pruebas	Recuento			Total de pruebas	%
	L/D = 400	L/D = 500	L/D = 600		
Valida	100	100	100	**300**	77.5 %
Adicional	15	20	8	**43**	11.1 %
Invalida	20	16	8	**44**	11.4 %
TOTAL	**135**	**136**	**116**	**387**	100.0 %

Se realizaron en total 387 pruebas, de las cuales 300 (77.5 %) son válidas, 43 (11.1 %) son pruebas adicionales y 44 (11.4 %) son pruebas inválidas. Tanto las pruebas adicionales como las inválidas no se tomarán en cuenta en el modelado matemático.

Los motivos que llevaron a realizarse pruebas sobre las 300 planificadas inicialmente, se muestran en la Tabla 32.

El motivo más frecuente de invalidez fue por “golpes defectuosos”, es decir, la válvula de impulso golpetea de manera defectuosa generando presiones bajas periódicamente, lo cual lleva a un menor desempeño hidráulico.

Figura 22

Número de pruebas según situación y relación L/D.

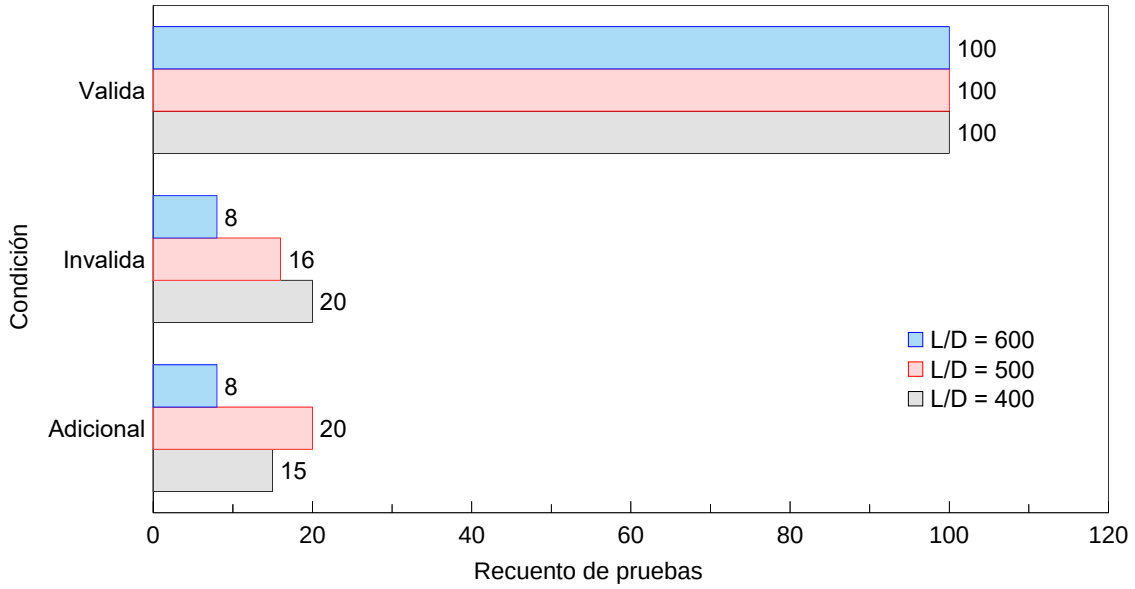


Tabla 32

Observaciones de pruebas adicionales, atípicas e inválidas.

Observaciones	Adicional	Inválida	Total
Datos duplicados.	-	4	4
Golpes defectuosos	-	19	19
No cumple requisitos de prueba. $\%\Delta P1$>5%	-	1	1
No cumple requisitos de prueba. $\%h$>3%	-	2	2
No cumple requisitos de prueba. $\%h$>5%	-	2	2
No se registró el cronómetro N°2	-	2	2
No se registró la masa "$m1$"	-	1	1
No se registró la masa "$m2$"	-	1	1
No se registró la presión inicial.	-	1	1
No se registró tiempo de muestra 2.	-	1	1
Presión de prueba errónea.	-	5	5
Registro erróneo de manómetro por deterioro.	-	1	1
Retención del eje vertical por la silicona.	-	3	3
Se cambio de h/H=2 a h/H=2.4	-	1	1
Se realizó prueba de ejemplo grabada.	1	-	1
Pruebas adicionales validadas.	16	-	16
Normalidad de Shapiro-wilk. Adicional.	19	-	19
Valor atípico según software estadístico.	7	-	7
Total	43	44	87

3.2.1.2 Estadísticas de las variables independientes y dependientes

En el Anexo 1, se desarrolla la estadística descriptiva/inferencial de las variables del experimento, en los ítems siguientes se muestra un resumen de estas.

3.2.1.2.1 Condiciones requeridas para la validez de las pruebas

Se verificaron las condiciones de variación de presión, temperatura y altura de descarga en comparación con los límites indicados por el Instituto Nacional de Calidad [INACAL] (2018) para micromedidores.

Tabla 33

Condiciones del experimento.

Variable	% de variación en el experimento	% límite INACAL (2018)
Variación de presión aguas arriba $\%\Delta P1$	≤ 4.72%	< 10%
Variación de temperatura $\Delta T°$	≤ 0.9 °C	< 5 °C
Variación de la altura de descarga (bombeo) $\%\Delta h$	≤ 2.47%	< 3%

3.2.1.2.2 Estadísticas de variables independientes

En el caso de las **variables independientes** la altura de suministro H. altura de descarga h. altura máxima h_{max}, etc., tienen una dispersión de datos dentro de cada tratamiento, esto debido a que el control de estas variables es parcial.

Por ejemplo, en el caso de la altura de descarga h, el control se da por estrangulación de las válvulas hasta llegar a la presión requerida. Este proceso dificulta la repetición exacta del experimento, por ende, se tiene una dispersión de datos.

En la Tabla 35 y Tabla 34 se muestran los rangos de las variables independientes, tanto de las relaciones adimensionales con de variables simples.

Tabla 34

Rango de las relaciones adimensionales independientes.

Variable	Rango valor nominal	Rango valor real
Relación de alturas h/H	2.3 – 11	2.272 – 11.083
Relación longitud – diámetro L/D	400, 500, 600	401.7, 502.3, 601.6

Tabla 35

Rango de valores de las variables independientes simples

Variable	Unidad	Valor nominal	Rango	Valor promedio
Altura de suministro H	m	1.4	1.43 – 1.45	$\bar{x}$ =1.44, $s/\bar{x}$ = 0.32%
		2	2.01 – 2.03	$\bar{x}$ =2.02, $s/\bar{x}$ = 0.27%
		3	3.02 – 3.04	$\bar{x}$ =2.03, $s/\bar{x}$ = 0.19%
Altura de descarga h	m	4.2 – 33	4.16 – 33.64	-
Altura máxima h_{max}	m	-	16.84 – 45.43	-
Diámetro de la tubería de suministro D	mm	26.2	26.103 – 26.222	$\bar{x}$ =26.163, $s/\bar{x}$ = 0.72%
Longitud de la tubería de suministro L	m	10.48	10.51	-
		13.10	13.14	-
		15.72	15.74	-
Temperatura media del agua T_{med}	°C	-	6.05 °C – 19.72 °C*	$\bar{x}$ =14.89, $s/\bar{x}$ = 20%

Nota. $s/\bar{x}$ es la desviación estándar entre el promedio.

3.2.1.2.3 Estadísticas de las variables dependientes

El conjunto de mediciones de las **variables dependientes** está sujetas a un error aleatorio, esto explica parte de la variabilidad del experimento. Estas mediciones conforman una dispersión, la cual es analizable con estadística descriptiva e inferencial.

En la Tabla 36, se muestran el rango de las variables dependientes simples. Las estadísticas de las variables dependientes adimensionales se desarrollan en el ítem 3.2.2

Tabla 36

Rango de las variables dependientes simples.

Variable	Rango medido
Caudal de descarga q	0.171 l/min – 5.915 l/min
Caudal de funcionamiento Q	10.289 l/min – 21.548 l/min
Caudal de suministro Q_T	10.460 l/min – 26.680 l/min
Frecuencia de la válvula de impulso n	22.93 golpes/min – 45.56 golpes/min

3.2.2 Estadísticas descriptivas e inferencial de observaciones

En el Anexo 19 se muestra las tablas de datos y análisis de todas las pruebas.

3.2.2.1 Relación de caudal de descarga y caudal total q/Q_T

En la Tabla 37 el rango de la relación q/Q_T observada, va desde 0.015 hasta 0.248, con un total de 300 pruebas contabilizadas.

Tabla 37

Relación q/Q_T en función de la altura de suministro H

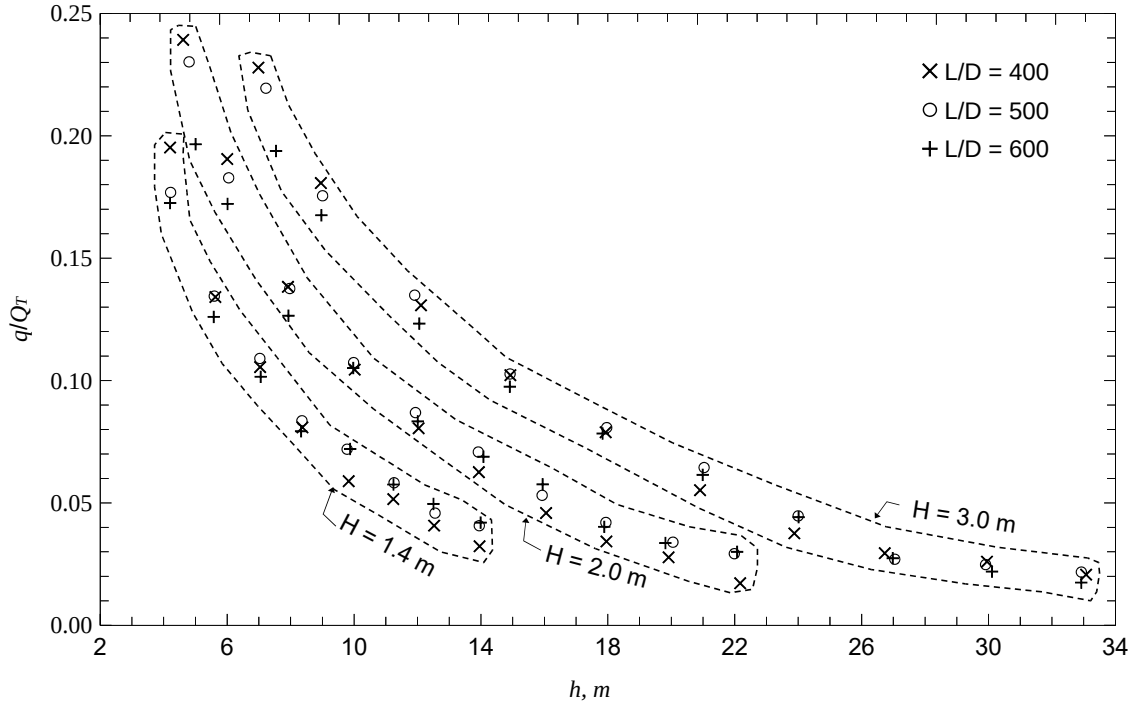
H, m	v_c, m/s	Relación q/Q_T observada		
		Máx	Mín	n
1.4	0.970	0.200	0.030	72
2	1.114	0.248	0.016	102
3	1.365	0.234	0.015	126
Total		0.248	0.015	300

Nota. Máx, valor máximo; Mín, valor mínimo; n, número de casos

En la Figura 23 se grafica los valores promedio de la relación de caudales q/Q_T. Se observa que, a mayor altura de suministro H mayor es el caudal relativo q/Q_T.

Figura 23

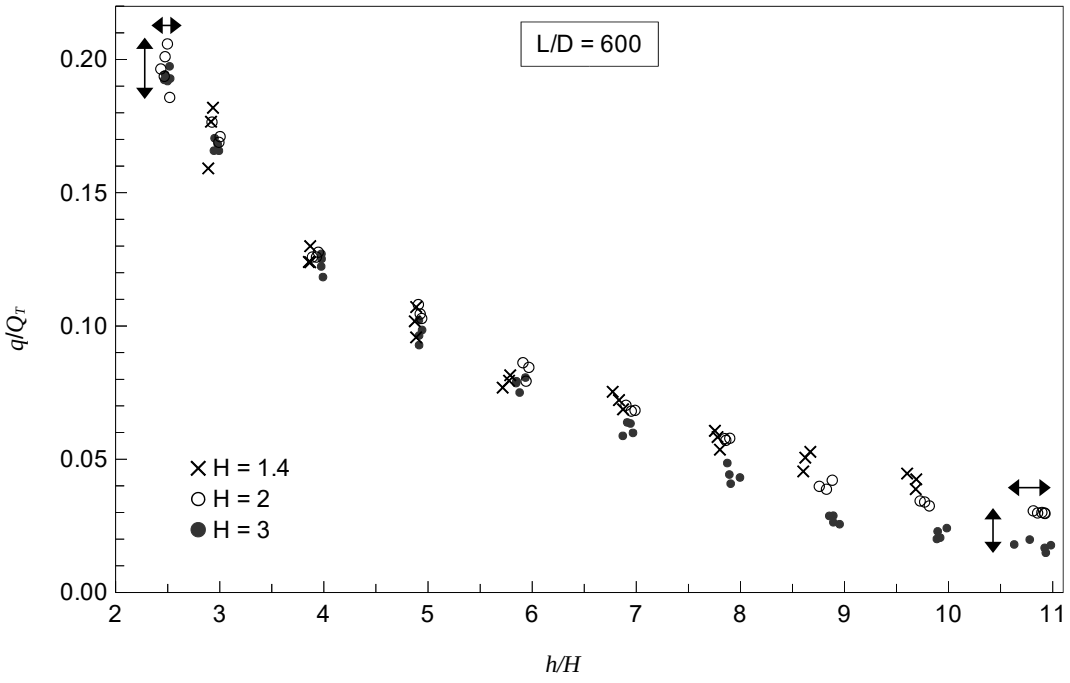
Caudal de descarga relativo q/Q_T, en función de las variables h, H y L/D



La Figura 24 muestra la gráfica de valores observados (dispersión) de q/Q_T en función a la relación de alturas h/H. Los datos del caudal relativo q/Q_T de diferentes alturas de suministro tienden a superponerse.

Figura 24

Dispersión de q/Q_T en función de H y h/H, para L/D = 600.



A partir de la Figura 24, podemos inferir lo siguiente:

- A mayor relación de alturas h/H disminuye el caudal relativo q/Q_T.
- En general, la dispersión del caudal relativo q/Q_T es similar a diferentes h/H, sin embargo, para h/H altos hay una separación según alturas de suministro H.
- Análisis para una misma altura de suministro H tenemos:
  - A baja h/H, la dispersión vertical de q/Q_T es alta, principalmente por golpes defectuosos.
  - A alta h/H, la dispersión vertical de q/Q_T es baja, dado que a presiones altas se presentan menos los golpes defectuosos.
- Análisis respecto a la dispersión de la variable independiente h/H:

- Para valores de h/H entre 2 y 3 la dispersión de h/H es baja, esto debido a que es más fácil regular la presión requerida.
- Para valores de h/H entre 10 y 11 la dispersión de h/H es alta, dado que es más difícil conseguir la presión requerida, mediante la regulación de válvulas.

Por tanto, en las zonas de presión alta se obtienen caudales con poca variación, pero con mayor incertidumbre de presión; en zonas de baja presión, se obtienen caudales más variables, pero con mejor precisión en la relación de alturas.

En la Figura 25 y Figura 26 se tiene gráficas de dispersión del total de observaciones de q/Q_T. Podemos dividir en cuatros sectores de análisis:

I. Rango $h/H \leq 2.5$: Se debe recordar que, para L/D = 400, las pruebas inician en h/H = 2.3; para L/D = 500 en h/H = 2.4 y para L/D = 600 en h/H = 2.5. Por ende, los primeros valores de q/Q_T se encuentran desplazados.

II. Rango $2.5 < h/H \leq 4$: La variable L/D genera valores ligeramente menores para L/D = 600, en los otros casos no se aprecia diferencia.

III. Rango $4 \leq h/H \leq 7$: La dispersión de q/Q_T es menor, es decir, las observaciones arrojan valores más precisos.

IV. Rango $h/H > 7$: Los valores de q/Q_T tienden a separarse según H. Para H = 3 m, se tienen valores de q/Q_T menores (Figura 26).

De estas primeras observaciones se deduce que hay una gradual influencia respecto a la altura de suministro H. Esto puede deberse a interacciones mutuas entre las variables h/H y L/D. O también a las diferentes condiciones entre cada prototipo.

Figura 25

Dispersión del caudal de descarga relativo q/Q_T en función de h/H y L/D.

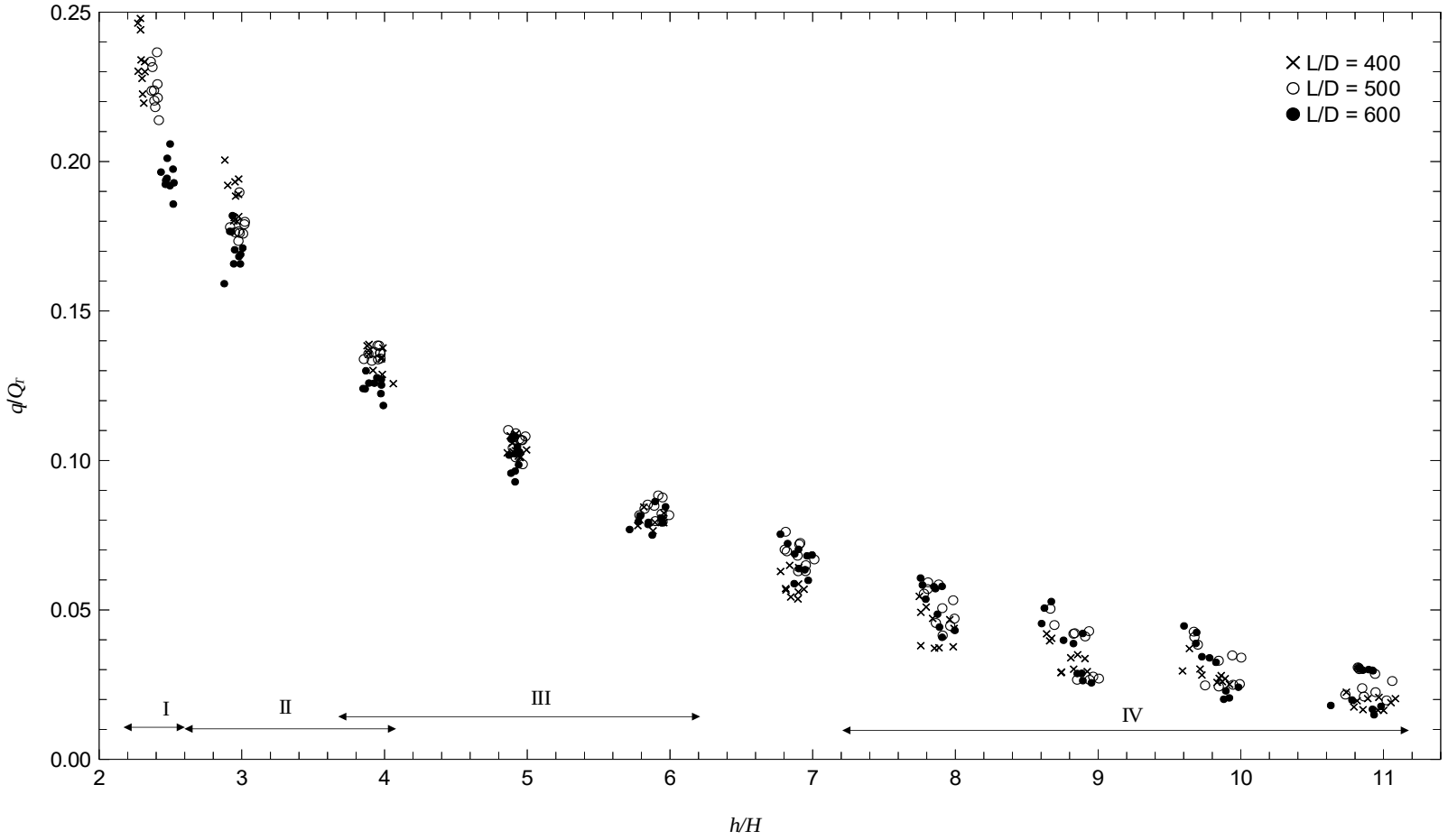
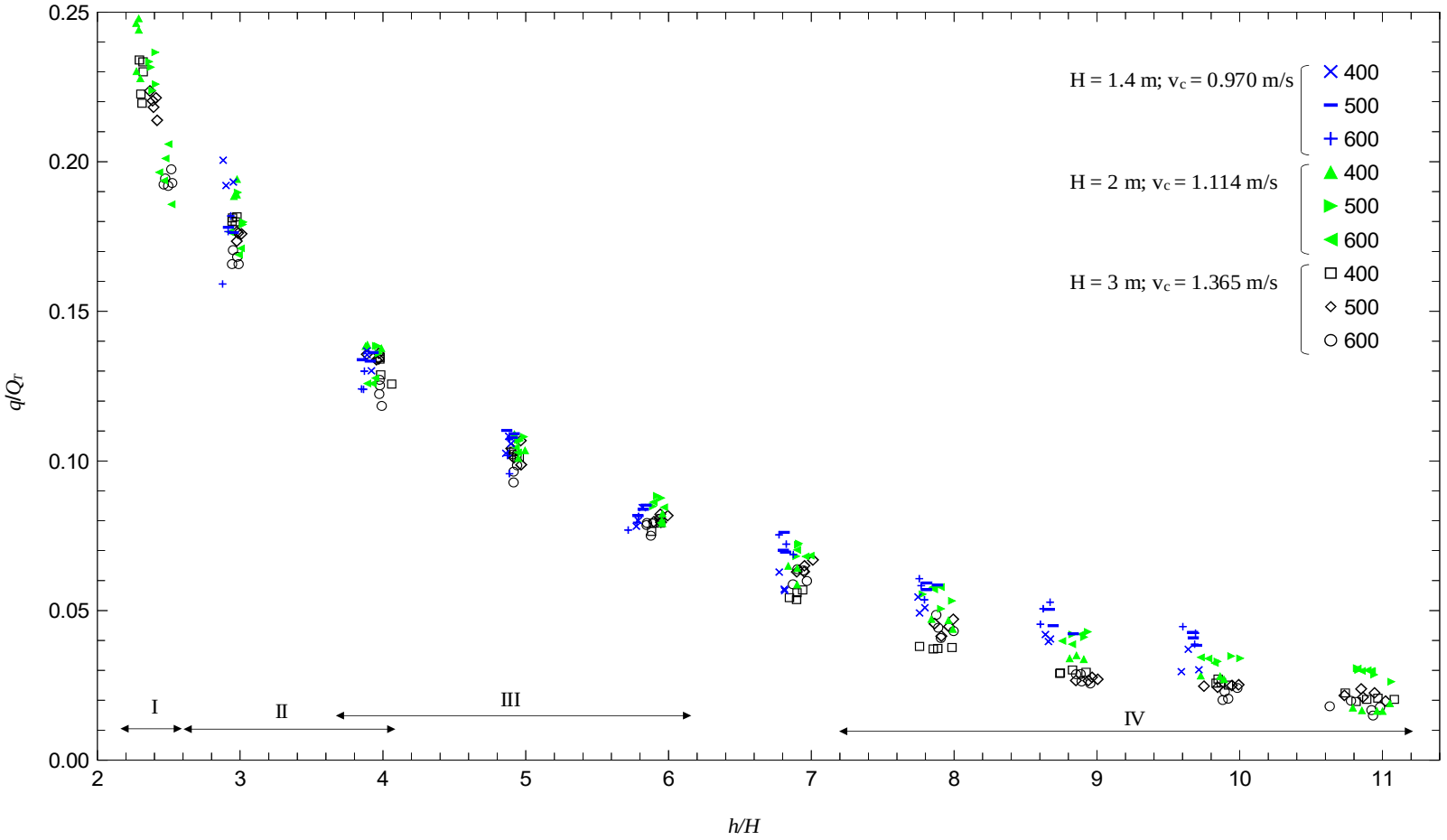


Figura 26

Dispersión del caudal de descarga relativo q/Q_T en función de h/H, H y L/D.



3.2.2.2 Relación del caudal de funcionamiento y el caudal total, Q/Q_T

En la Tabla 38 el rango de la relación Q/Q_T va desde 0.752 hasta 0.985, con un total de 300 pruebas contabilizadas.

Tabla 38

Rango de la relación Q/Q_T en función de la altura de suministro H

H, m	v_c, m/s	Relación Q/Q_T observada		
		Máx	Mín	n
1.4	0.970	0.970	0.800	72
2	1.114	0.984	0.752	102
3	1.365	0.985	0.766	126
Total		**0.985**	**0.752**	**300**

Nota. Máx, valor máximo; Mín, valor mínimo; n, número de casos.

En la Figura 27 se observa los valores promedio del caudal de funcionamiento relativo Q/Q_T. Manteniendo las demás variables constantes, se puede deducir lo siguiente:

- A mayor altura de suministro H menor es la relación Q/Q_T;
- La relación L/D genera cambios poco apreciables.
- El aumento de la altura de descarga h, implica aumento de la relación Q/Q_T.

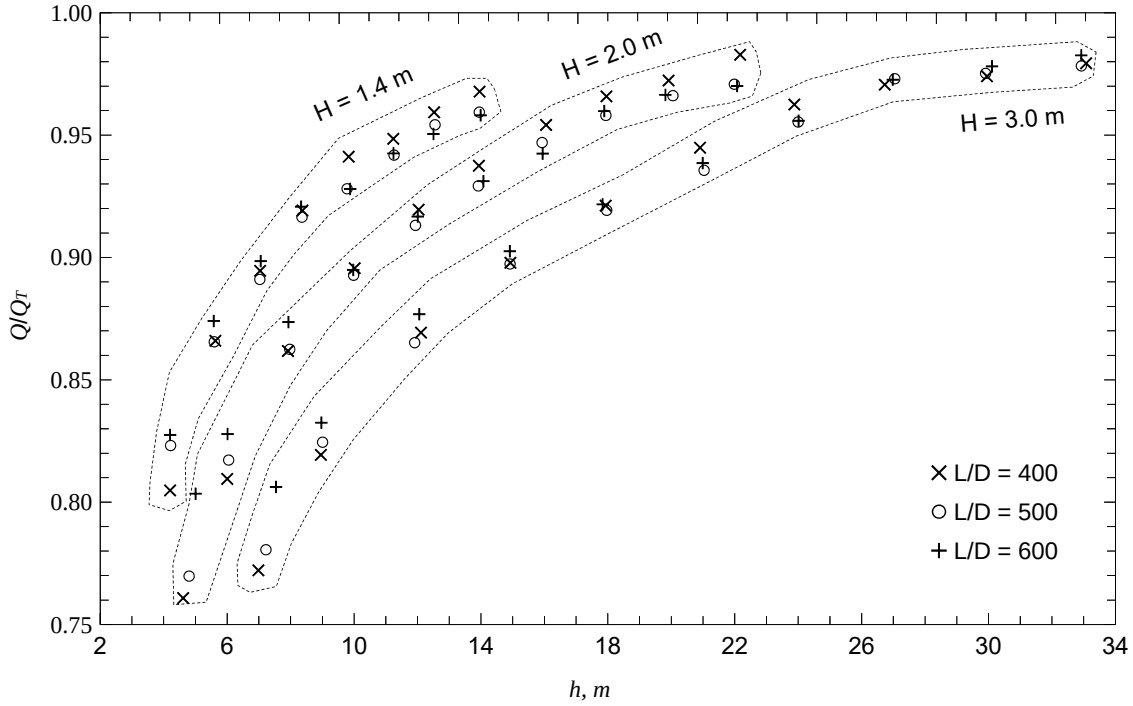
Al transformar el eje horizontal de la altura de descarga h hacia la relación de alturas h/H, los datos de las diferentes alturas de suministro H tienden a superponerse, como se muestra en la Figura 28 y Figura 29.

En la Figura 28 se observa una mayor dispersión de datos para $h/H > 7$. Se observa dispersiones verticales y horizontales. Dado que, la relación Q/Q_T y q/Q_T son complementarias (suman uno), las mismas deducciones inferidas para q/Q_T son aplicables para Q/Q_T

La Figura 29 muestra la dispersión de todas las pruebas válidas (300), el agrupamiento por altura de suministro H se aprecia fácilmente, relación L/D tiene efectos mínimos: a h/H altos los valores de Q/Q_T mas altos se dan a menor L/D, a h/H bajos los valores de Q/Q_T mas altos se dan a mayor L/D, esto indica una posible interacción de ambas variables independientes.

Figura 27

Caudal de funcionamiento relativo Q/Q_T en función de h, H y L/D.



Nota. Altura de descarga real h, la altura de suministro H, relación de la longitud y diámetro L/D.

Figura 28

Dispersión de datos de Q/Q_T en función de h/H y H para L/D = 600.

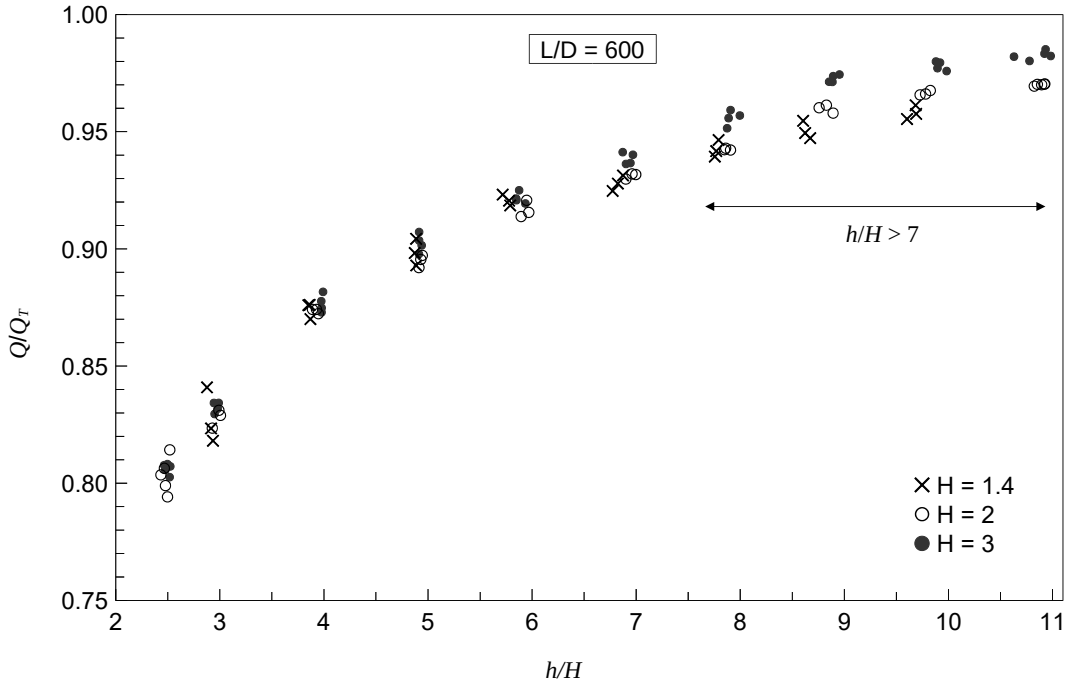
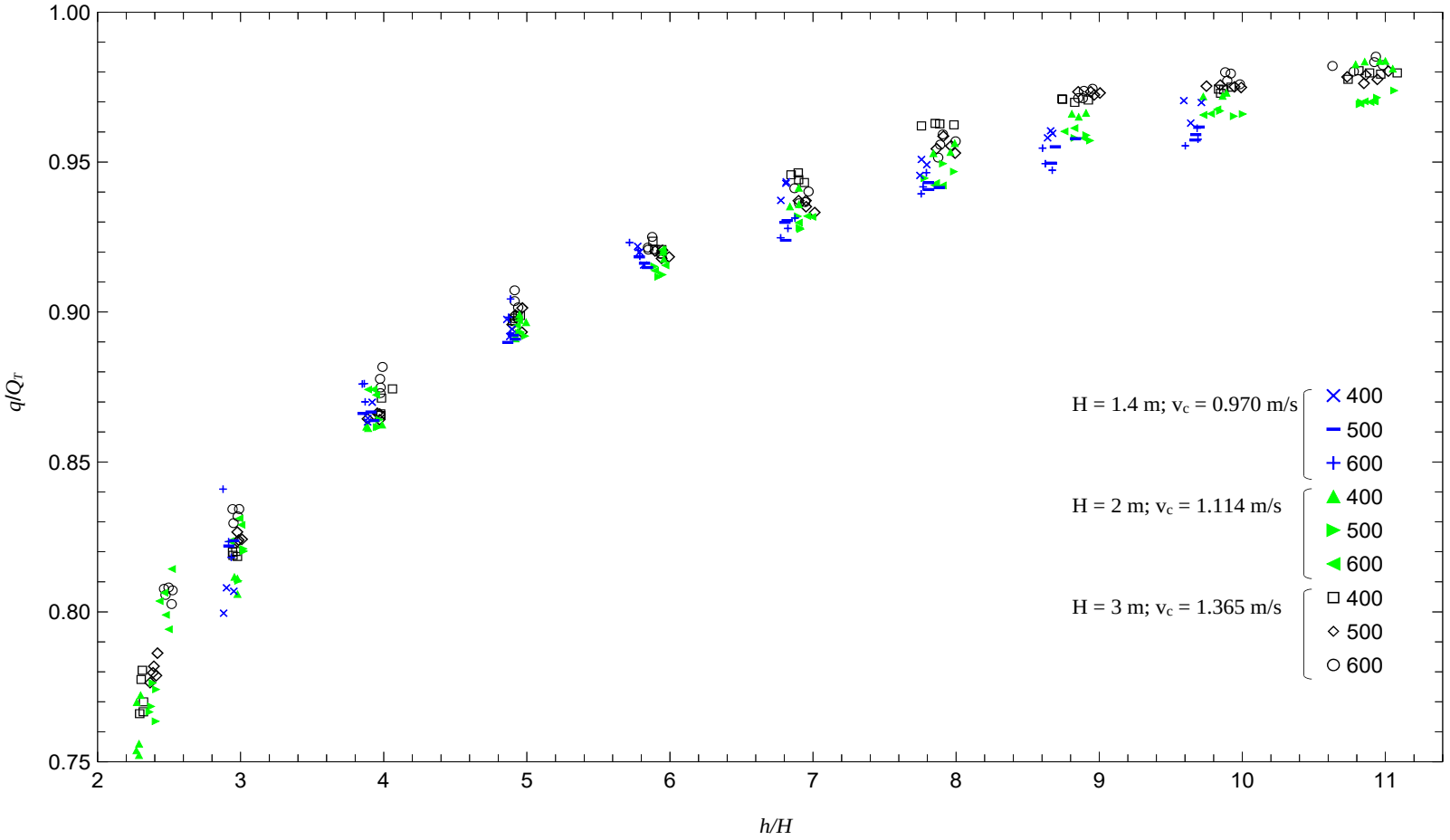


Figura 29

Dispersión de Q/Q_T en función de h/H, H y L/D.



3.2.2.3 Parámetro de la válvula de impulso nD/v_c

En la Tabla 39 y Tabla 40 se muestra estadísticas del valor observado, el cual corresponde al total de pruebas realizadas.

De la Tabla 39, los valores observados se encuentran poco dispersos con una desviación estándar relativa menor a 2.7%.

Tabla 39

Valores promedios del parámetro nD/v_c en función de L/D.

H, m	v_c, m/s	Relación nD/v_c observada					
		L/D = 400		L/D = 500		L/D = 600	
		$\bar{x}$, [ ]	$\bar{x}/s$	$\bar{x}$, [ ]	$\bar{x}/s$	$\bar{x}$, [ ]	$\bar{x}/s$
1.4	0.970	0.0154	1.7 %	0.0128	1.7 %	0.0108	2.2 %
2	1.114	0.0150	2.1 %	0.0127	2.2 %	0.0108	2.7 %
3	1.365	0.0141	2.5 %	0.0119	2.4 %	0.0100	3.4 %

Nota. $\bar{x}$ promedio de la relación nD/v_c; s desviación estándar.

El rango de la relación nD/v_c observada va desde 0.0094 hasta 0.0159, con un total de 300 pruebas contabilizadas (Tabla 40).

Tabla 40

Valores máximo y mínimos del parámetro nD/v_c.

H, m	v_c, m/s	Relación nD/v_c observada					
		L/D = 400		L/D = 500		L/D = 600	
		Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
1.4	0.970	0.0159	0.0148	0.0132	0.0123	0.0113	0.0103
2	1.114	0.0156	0.0143	0.0130	0.0121	0.0112	0.0102
3	1.365	0.0149	0.0132	0.0125	0.0112	0.0106	0.0094
Total		**0.0159**	**0.0132**	**0.0132**	**0.0112**	**0.0113**	**0.0094**

Nota. Máx, valor máximo, Mín, valor mínimo, *n*, número de casos

En la Figura 30 se observa que la relación nD/v_c tiene poca variación al cambiar la altura de descarga h.

En la Figura 31 al transformar el eje horizontal hacia la relación de alturas h/H, los datos tienden a alinearse según la relación h/H. La gráfica muestra una ligera ondulación de los valores del parámetro nD/v_c en relación con la variable h/H.

En la Figura 32 se muestra la dispersión de datos de la relación nD/v_c en función del número de Reynolds Re y la relación L/D. La dispersión respecto al número de Reynolds se explica por las temperaturas variables (ver Anexo 1.2.1).

De la Tabla 39 y Figuras 30, 31 y 32, manteniendo las demás variables constantes, se puede deducir lo siguiente:

- A mayor relación L/D menor es la relación nD/v_c;
- A mayor número de Reynolds Re, menor es la relación nD/v_c;
- El cambio de la altura de descarga h, genera variaciones mínimas en la relación nD/v_c

Por tanto, los factores más relevantes son la relación L/D, el número de Reynolds Re y en menor medida la relación de alturas h/H.

Figura 30

Relación nD/v_c en función de h, H y relación L/D.

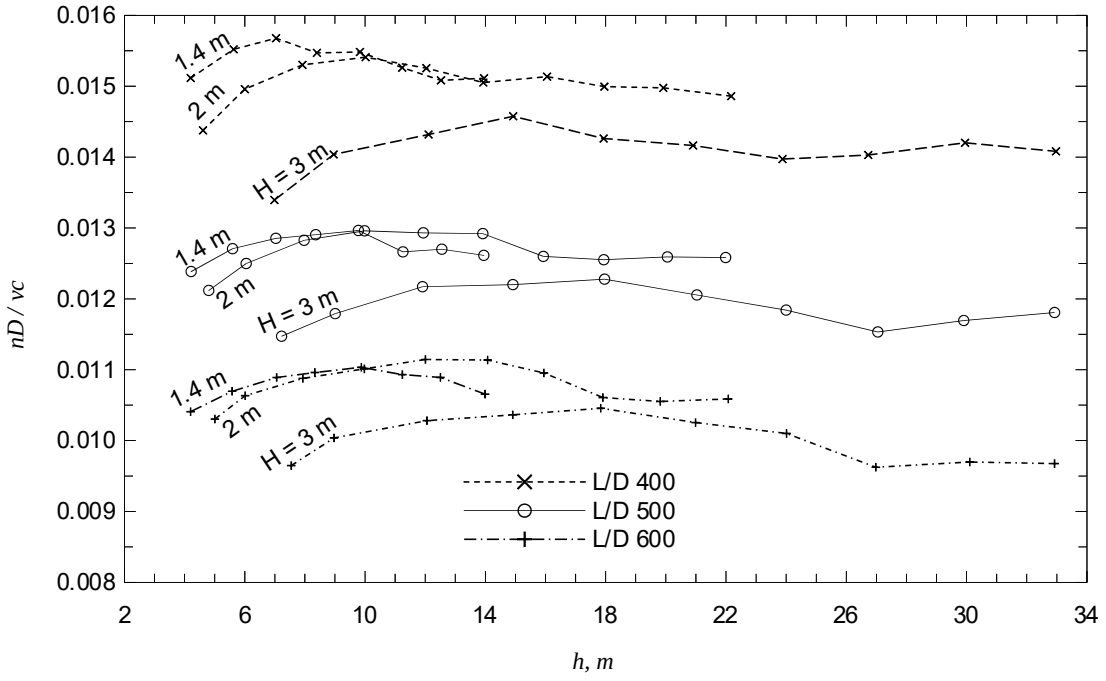


Figura 31

Dispersión del parámetro nD/vc en función de h/H, H y L/D.

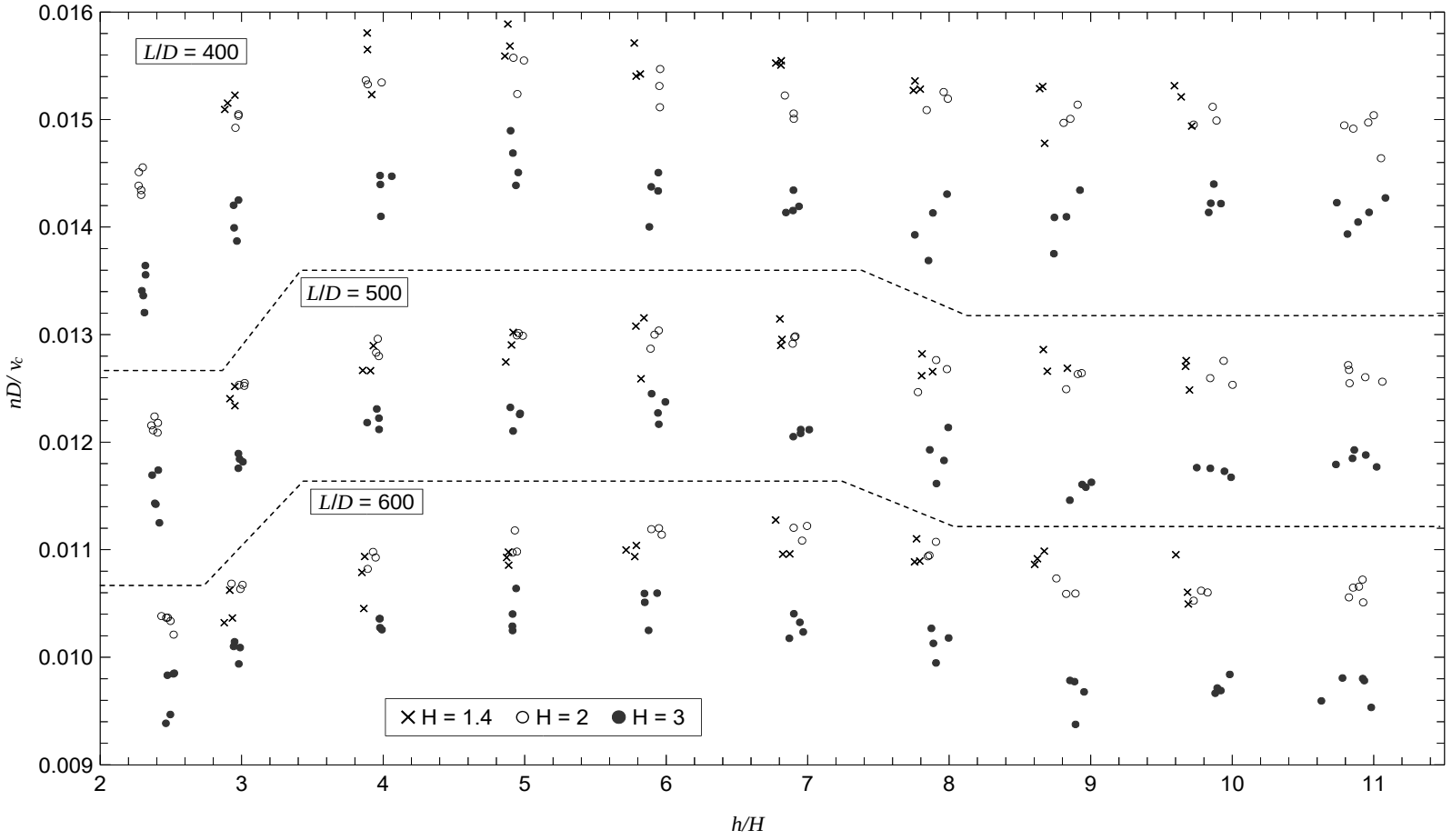
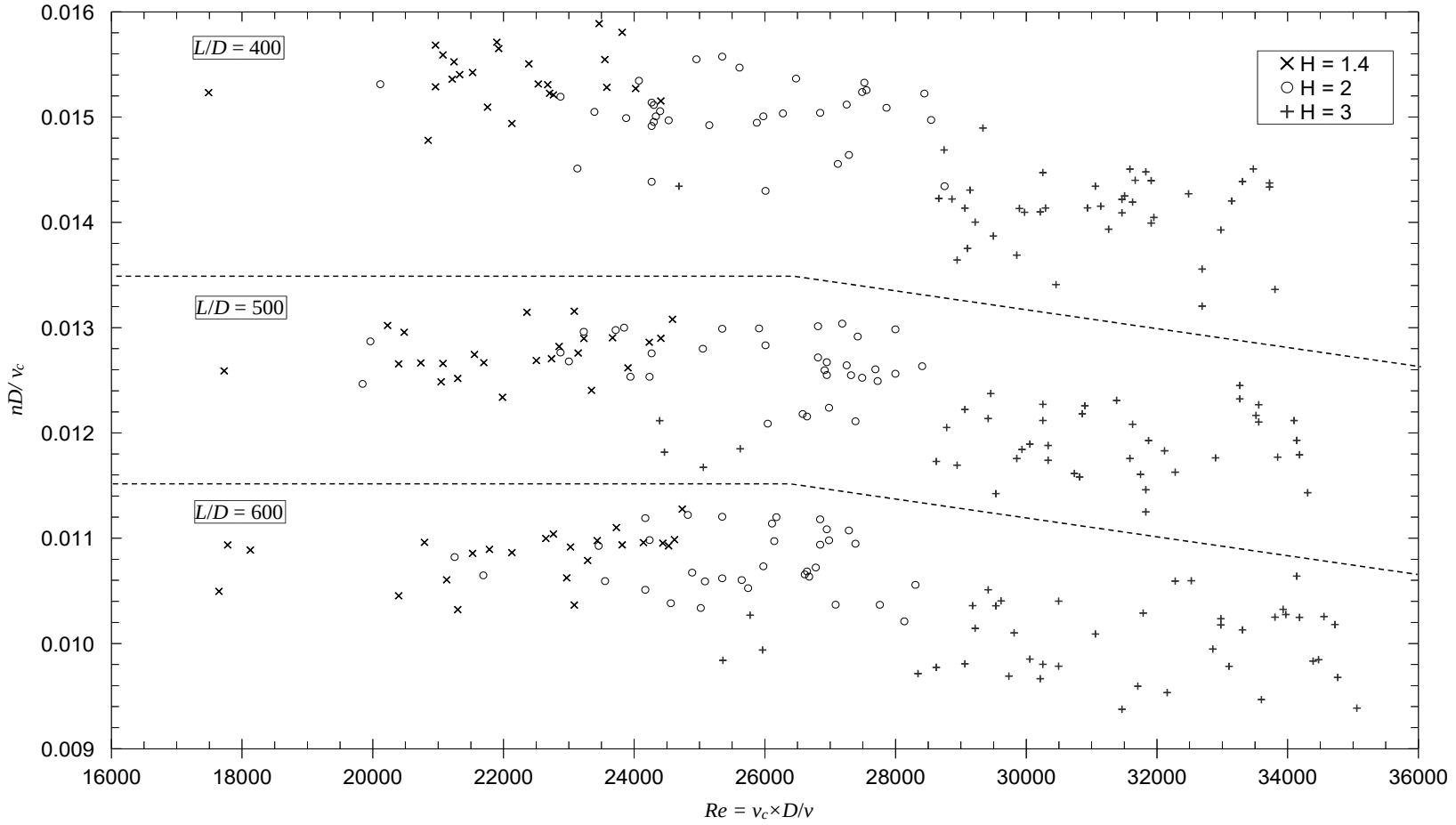


Figura 32

Dispersión del parámetro nD/vc en función de Re, según L/D y H.



3.2.2.4 Eficiencia η

En la Tabla 41 se muestra estadísticas del valor observado, el cual corresponde al total de pruebas realizadas. El rango de la eficiencia observada va desde 0.15 hasta 0.483, con un total de 300 pruebas contabilizadas.

Tabla 41

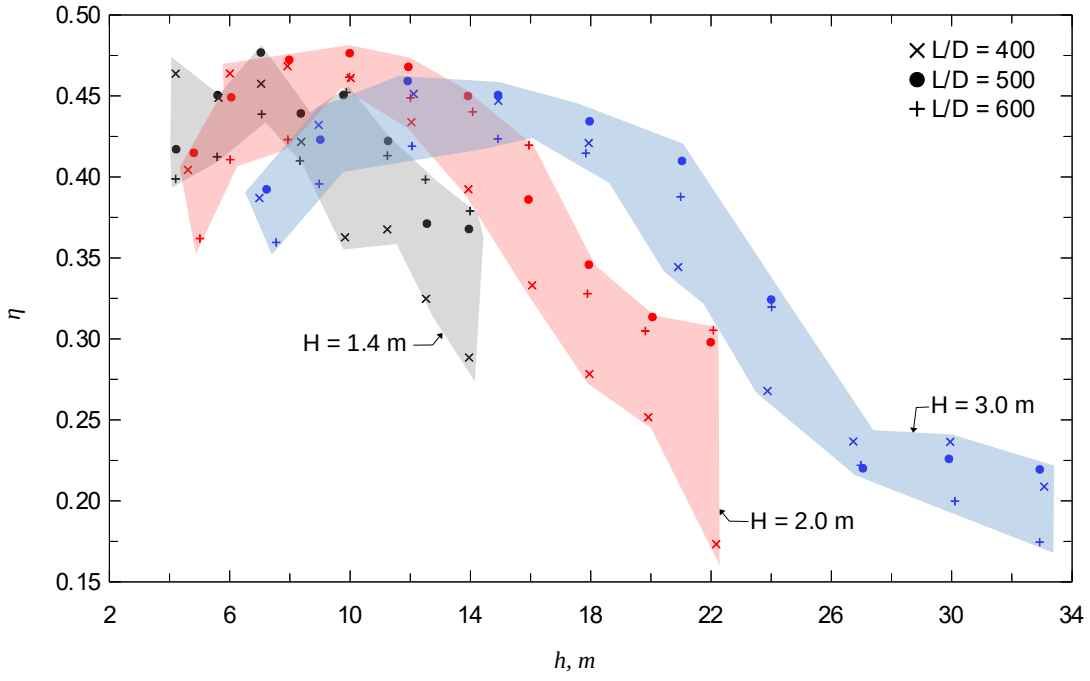
Rango de la eficiencia en función de la altura de suministro H.

H, m	v_c, m/s	Eficiencia de Rankine observada η		
		Máx, l/min	Mín, l/min	n
1.4	0.970	0.480	0.262	72
2	1.114	0.483	0.166	102
3	1.365	0.474	0.150	126
Total		0.483	0.150	300

Nota. Máx, valor máximo; Mín, valor mínimo; n, número de casos

Figura 33

Eficiencia promedio η en función de h, H y L/D.



De la Figura 33 se puede deducir lo siguiente:

- A menor relación L/D menor eficiencia η.
- A mayor altura de descarga h, disminuye la eficiencia η.

- La altura de suministro genera un efecto variado en la eficiencia η.
- Existe una zona donde se tiene mejores eficiencias para cada caso.

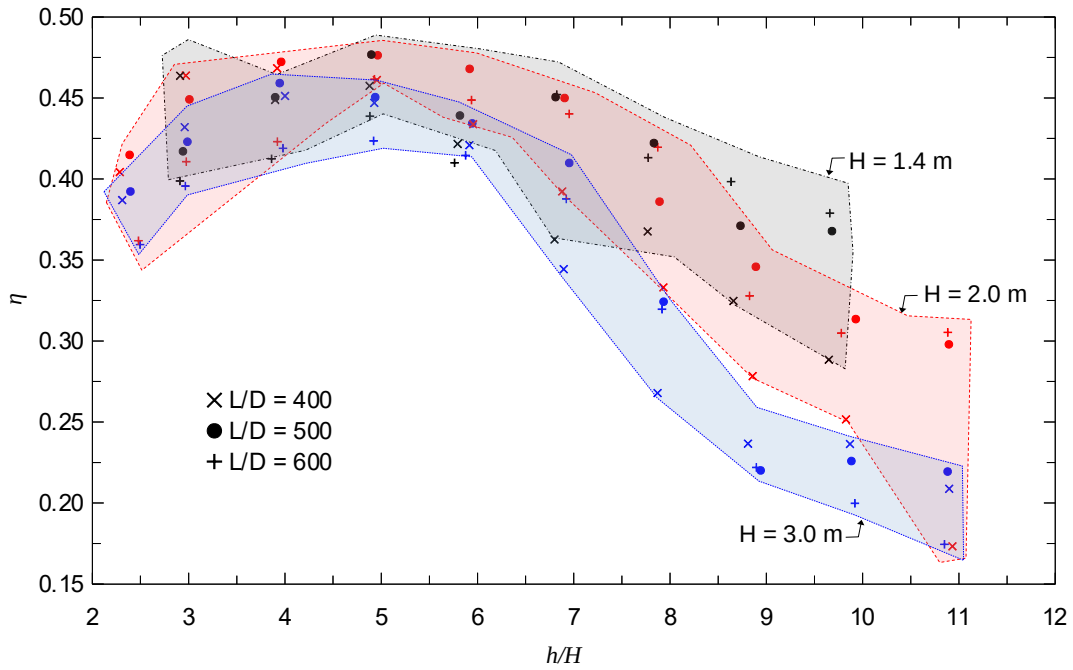
En la Figura 34, se muestra los valores promedio de la eficiencia η en función a la relación de alturas h/H, las mejores eficiencias se encuentran para h/H entre 4 a 6.

A h/H > 7 la eficiencia tiende a caer; una explicación se observa en la Figura 24 y Figura 26 del ítem 3.2.1.1, ahí se observó una alta variabilidad del caudal de bombeo relativo q/Q_T para altos valores de la relación de alturas h/H, dado que la eficiencia de Rankine es $n = q/Q\ (h/H - 1)$, entonces la eficiencia se ve fuertemente influenciado por el caudal relativo, esto explica la alta variabilidad de la eficiencia para $h/H > 7$.

En la Figura 35, se muestran la dispersión de observaciones de la eficiencia versus la relación de alturas real h/H, en general se observa una fuerte dispersión de la eficiencia de para $h/H > 7$.

Figura 34

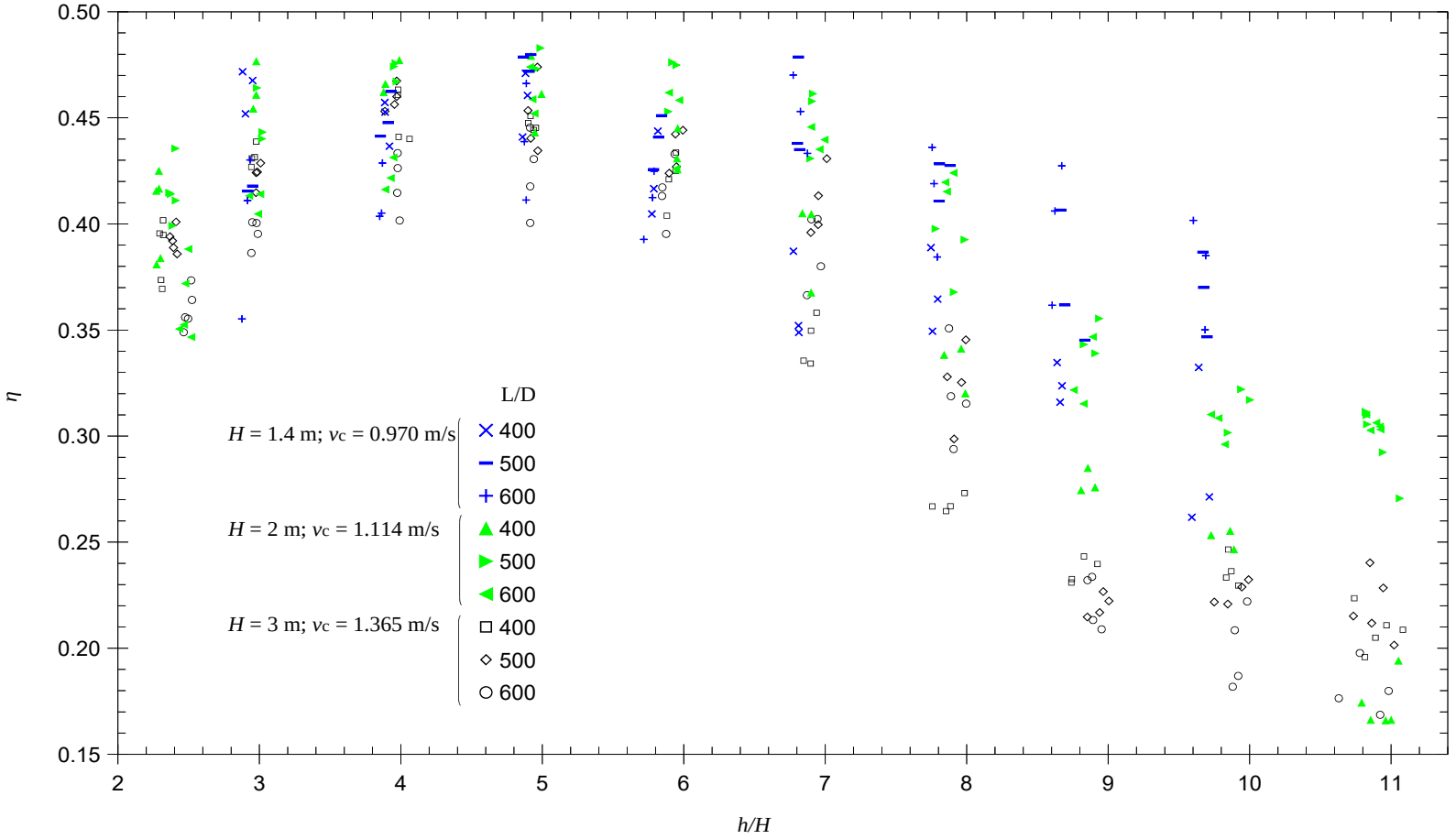
Eficiencia promedio η en función de h/H, H y L/D.



Nota. Valores promedios de una misma altura de suministro en una misma área sombreada.

Figura 35

Dispersión de la eficiencia η en función de h/H, L/D y variables H y v_c.



3.2.2.5 Ratio del caudal de suministro Q_T / ($v_c D^2$)

En la Tabla 42 el rango de la relación Q_T / ($v_c D^2$) va desde 0.228 hasta 0.475, con un total de 300 pruebas contabilizadas. Se observa rangos similares a diferentes alturas de suministro H.

Tabla 42

Rango de la relación Q_T / ($v_c D^2$) en función de la altura de suministro H

H, m	v_c, m/s	Relación $Q_T/(v_c D^2)$ observada		
		Máx	Mín	n
1.4	0.970	0.459	0.271	72
2	1.114	0.470	0.228	102
3	1.365	0.475	0.253	126
Total		0.475	0.228	**300**

Nota. Máx, valor máximo; Mín, valor mínimo; n, número de casos.

En la Figura 36 se observa valores promedio de la relación del caudal de suministro Q_T / ($v_c D^2$) en función de la altura de descarga h. El último tramo para H = 3 tiene una tendencia horizontal. Se debe tener en cuenta que cuando el caudal de descarga es cero (q = 0), se tiene un caudal de suministro igual al caudal de funcionamiento.

En la Figura 37, al transformar el eje horizontal de la altura de descarga h hacia la relación de alturas h/H, los datos de las diferentes alturas de suministro H tienden a superponerse, formando una relación aproximadamente lineal.

Manteniendo las demás variables constantes, se puede deducir lo siguiente:

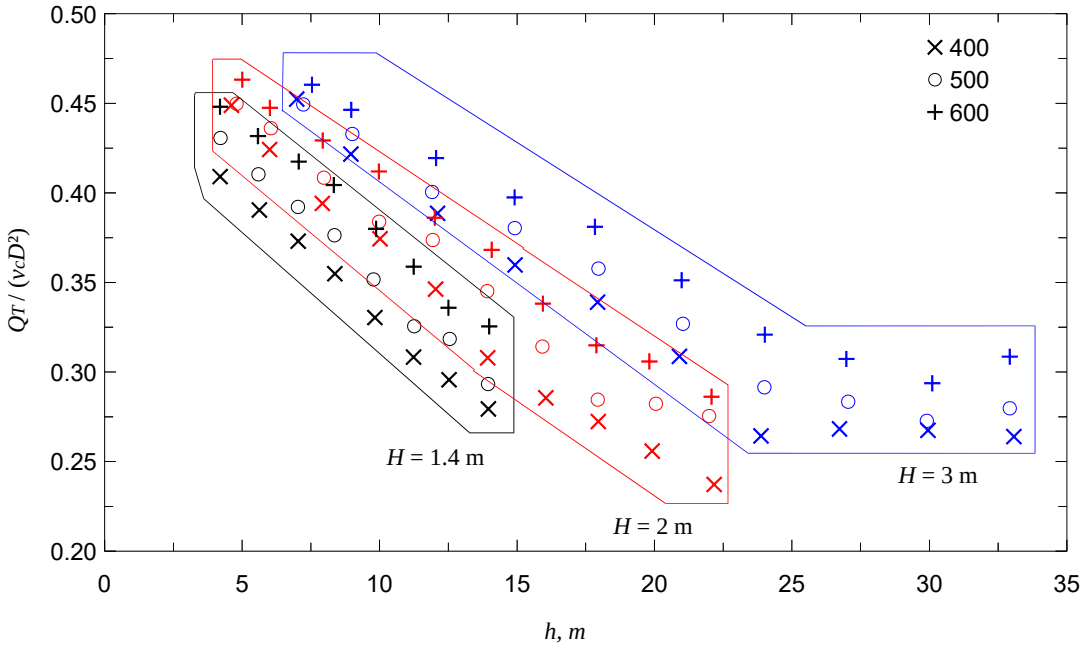
- A mayor altura de suministro H, la relación Q_T / ($v_c D^2$) disminuye levemente.
- A mayor relación L/D, la relación Q_T / ($v_c D^2$) se incrementa levemente
- A mayor altura de descarga h, disminuye de la relación Q_T / ($v_c D^2$).
- A mayor relación de alturas h/H, disminuye de la relación Q_T / ($v_c D^2$).

La Figura 29 muestra la dispersión de todas las pruebas válidas (300), el agrupamiento según L/D se aprecia fácilmente.

Finalmente, los factores más influyentes son la relación de altura h/H y la relación L/D.

Figura 36

Caudal de funcionamiento relativo $Q_T / (v_c D^2)$ en función de h, H y L/D.



Nota. Altura de descarga real h, la altura de suministro H, relación de la longitud y diámetro L/D.

Figura 37

Dispersión de la relación $Q_T / (v_c D^2)$ en función de h/H y H para L/D = 600.

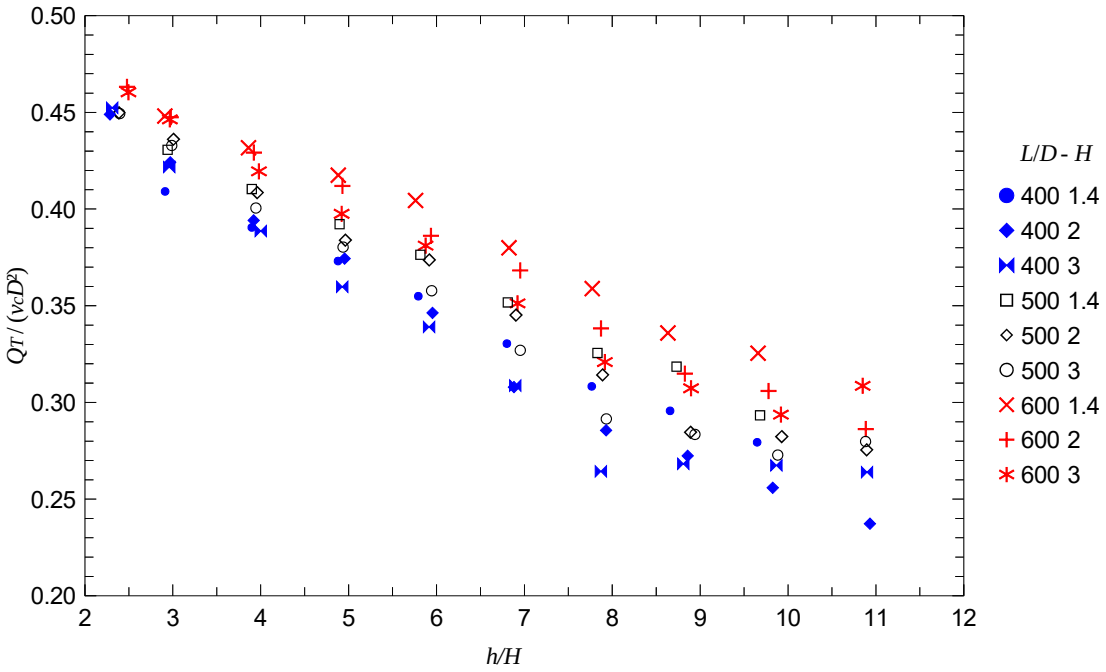
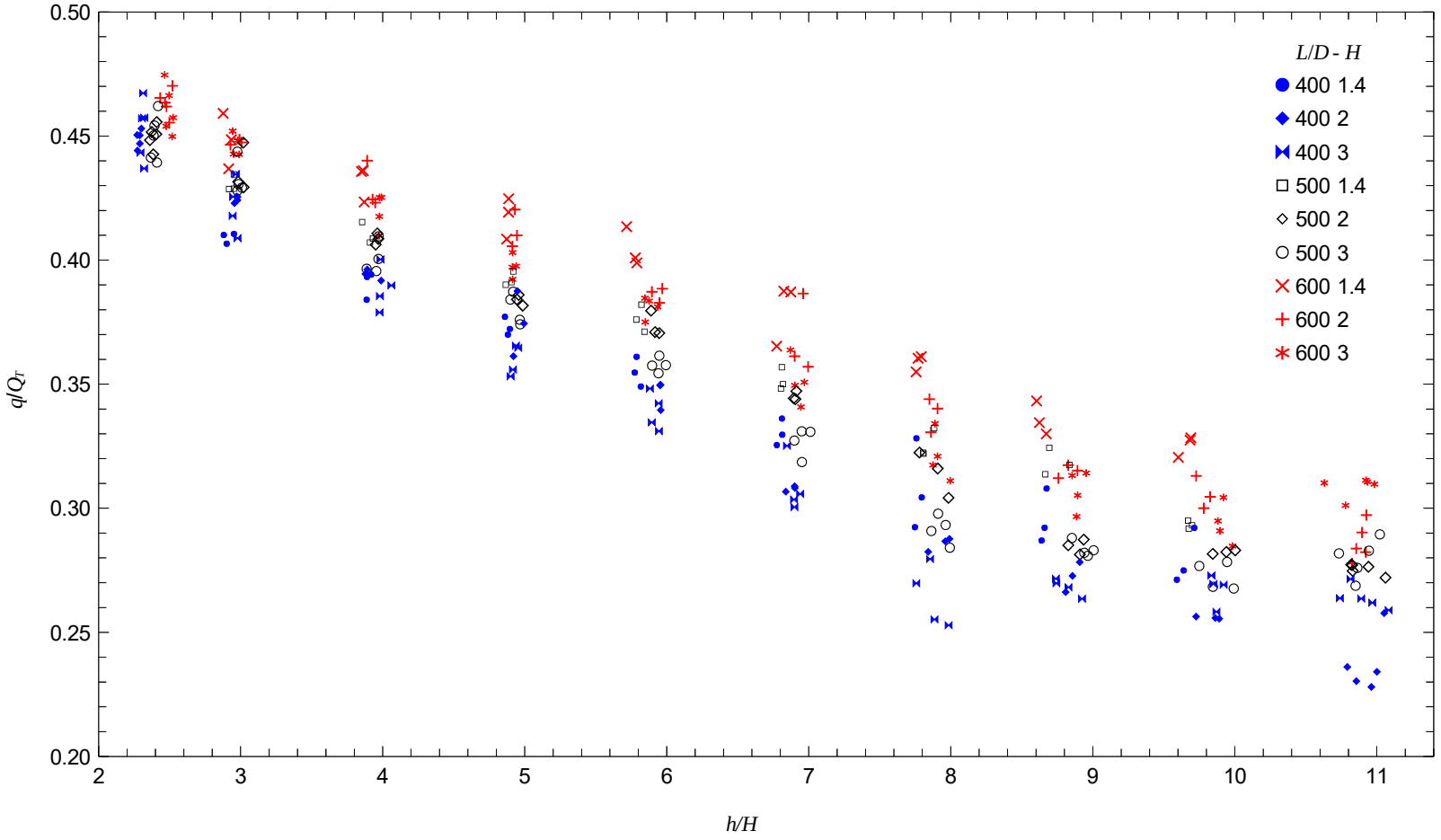


Figura 38

Dispersión del ratio $Q_T / (v_c D^2)$ en función de h/H, H y L/D.



3.2.3 Modelación matemática

En el Anexo 6.4 se desarrolla la notación utilizada para los modelos matemáticos presentados. Sean las variables x_1, x_2 y x_3 los factores que determinan la variable y. Entonces la Ecuación 17 o Ecuación 16 son el modelo lineal que expresa la relación de estas variables.

$$\hat{Y}_{ijk} = -\hat{\alpha} X_{1i} - \hat{\beta} X_{2j} - \hat{\gamma} X_{3k} + \hat{C} \quad (16)$$

$$F_1(\hat{y}_{ijk}) = -\hat{\alpha} G_1(x_{1i}) - \hat{\beta} G_2(x_{2j}) - \hat{\gamma} G_3(x_{3k}) + \hat{C} \quad (17)$$

Las funciones F_1, G_1, G_2 y G_3 son de transformación de variables, para este caso se usa la función potencial, entonces tenemos la Ecuación 18.

$$\frac{\hat{y}_{1ikj}^{-b+1}}{-b+1} = -\hat{\alpha}\left(\frac{x_{1i}^{-a+1}}{-a+1}\right) - \hat{\beta}\left(\frac{x_{2j}^{-c+1}}{-c+1}\right) + \hat{\gamma}\left(\frac{x_{3k}^{-f+1}}{-f+1}\right) + \hat{C} \quad (18)$$

Por el método de mínimos cuadrados determinamos los coeficientes $-\hat{\alpha}$, $-\hat{\beta}$ y $\hat{C}$, y los exponentes b, a, c, f.

Se detalla más sobre el modelo y su notación en el Anexo 6.4.

3.2.3.1 Modelos matemáticos seleccionados

3.2.3.1.1 Análisis y resumen de modelos

En la Tabla 43, 44, 45 y 46, se resume los modelos seleccionados para las cuatro relaciones adimensionales $y_1 = q/Q_T$, $y_2 = Q/Q_T$, $y_3 = nD/v_c$ y $y_4 = \eta$, respectivamente. Los estadísticos de regresión lineal se amplían en las Tablas 48, 49, 50 y 51,

Las variables independientes incluidas en cada modelo corresponden a las deducciones descriptivas observada en el ítem 3.2.2. En general se utilizó tres variables independientes $x_1 = h/H$, $x_2 = L/D$, $x_3 = Re$.

Un quinto modelo $y_5 = Q_T/(v_c D^2)$ se propone en la Tabla 47. Este modelo es referencial, sin embargo, es útil al momento de predecir valores específicos para Q_T.

En la Tabla 43 se muestra la ecuación 19 y 20 que representan dos modelos matemáticos para la variable $y_1 = q/Q_T$, el segundo no incluye el punto influyente N.º 83. Al haber sólo un cambio ligero de los coeficientes y estadísticos, se prefiere la Ecuación 19.

De forma similar, en la Tabla 44, se muestra las ecuaciones 21 y 22 para la variable $y_2=Q/Q_T$, donde la Ecuación 21 se prefiere. Dado que las variables $y_1 = q/Q_T$, y $y_2=Q/Q_T$ del modelo son complementarios, sus modelos respectivos son similares.

Tabla 43

Modelo para el caudal de descarga relativo $y_1=q/Q_T$

Modelo	Estadísticos	
Modelo 1:	R^2	: 0.9899
$\frac{q}{Q_T}=\left(0.9(\frac{h}{H})^{-0.44}+0.00131(\frac{L}{D})^{0.75}-0.00294(\frac{h}{H})^{-0.44}(\frac{L}{D})^{0.75}-0.326\right)$ (19)	$R^2ajust.$	: 0.9898
	$RMSE$	: 0.00641
	n	: 300
Modelo 2: sin punto influyente N°83	R^2	: 0.9900
$\frac{q}{Q_T}=\left(0.9067(\frac{h}{H})^{-0.43}+0.00135(\frac{L}{D})^{0.75}-0.002975(\frac{h}{H})^{-0.43}(\frac{L}{D})^{0.75}-0.3363\right)$ (20)	$R^2ajust.$	: 0.9899
	$RMSE$	: 0.00632
	n	: 299

Tabla 44

Modelo para el caudal de funcionamiento relativo $y_2=Q/Q_T$

Modelo	Estadísticos	
Modelo 1:	R^2	: 0.9899
$\frac{Q}{Q_T}=\left(-0.9(\frac{h}{H})^{-0.44}-0.00131(\frac{L}{D})^{0.75}+0.00294(\frac{h}{H})^{-0.44}(\frac{L}{D})^{0.75}+1.326\right)$ (21)	$R^2ajust.$	: 0.9897
	$RMSE$	: 0.00641
	n	: 300
Modelo 2: sin punto influyente N°83	R^2	: 0.9900
$\frac{Q}{Q_T}=\left(-0.9067(\frac{h}{H})^{-0.43}-0.001351(\frac{L}{D})^{0.75}+0.002975(\frac{h}{H})^{-0.43}(\frac{L}{D})^{0.75}+1.3363\right)$ (22)	$R^2ajust.$	: 0.9899
	$RMSE$	: 0.00632
	n	: 299

En la Tabla 45, al quitar el punto influyente N.º 269, mejora ligeramente los valores p de los supuestos de la regresión lineal en el modelo 2. Sin embargo, esta mejora y de los estadísticos del modelo 2 no son contundentes, por lo que la Ecuación 23 del modelo 1 se mantiene como modelo para la variable $y_3 = nD/v_c$.

Tabla 45

Modelo para parámetro de válvula de impulso y_3=nD/v_c

Modelo	Estadísticos
Modelo 1:	R^2 : 0.95508
$\frac{nD}{v_C}=\left(0.1763\left(\frac{L}{D}\right)^{-0.15}-0.0001124\left(\mathrm{Re}\right)^{0.39}-0.05105\right)$ (23)	$R^2ajust.$: 0.95478
	RMSE : 0.000387
Verificación de supuestos:	n : 300
- Normalidad : W = 0.98816, p-value = 0.01491	
Modelo 2: sin punto influyente N°269	R^2 : 0.95618
$\frac{nD}{v_C}=\left(0.000288\left(\frac{L}{D}\right)^{-0.15}-0.0001109\left(\mathrm{Re}\right)^{0.39}-0.05131\right)$ (24)	$R^2ajust.$: 0.95589
	RMSE : 0.000384
Verificación de supuestos:	n : 299
- Normalidad : W = 0.98826 , p-value = 0.01599	

Nota. Normalidad (Shapiro-Wilk).

La Tabla 46 muestra el modelo para la variable $y_4=\eta$ (eficiencia), en este caso el modelo incluye el término de interacción $X1*X2$ y el término cuadrático $X1\text{^}2$. La ecuación 25, alcanza un R^2 de 0.78, sin embargo, tiene un $RMSE$ 0.04.

Por otro lado, en la ecuación 26, se ha aplicado el modelo a los datos con $h/H \leq 7$ (n = 180), esto pues, para valores $h/H > 7$ se incrementa en gran medida la variabilidad de los datos. Para este caso el R^2 se reduce a 0.56 (empeora), sin embargo, el $RMSE$ disminuye a 0.024 lo cual indica que el modelo comete menos error.

Ambos modelos fallan en los supuestos de homocedasticidad y normalidad (valor p <0.05), esto es importante, porque afecta la eficiencia del método de mínimos cuadros en la estimación de los coeficientes y los intervalos de confianza. Dicho de otro modo, se limita la aplicabilidad de ambos modelos.

Tabla 46

Modelo para la eficiencia $y_4= \eta$

Modelo	Estadísticos
Modelo 1:	R^2 : 0.7822
$\eta=\left(47.32\left(\frac{h}{H}\right)^{0.11}+32.23\left(\frac{L}{D}\right)^{-0.1}-26.87\left(\frac{h}{H}\right)^{0.11}\left(\frac{L}{D}\right)^{-0.1}-14.026\left(\frac{h}{H}\right)^{0.22}-36.135\right)$ (25)	$R^2ajust.$: 0.7792
	RMSE : 0.0403
Verificación de supuestos	n : **300**
- Homocedasticidad : BP = 93.916, df = 4, p-value = 1.94E-19 (tipo rombo)	
- Normalidad : W = 0.97759 , p-value = 0.0001213	

Modelo	Estadísticos
Modelo 2: Pata $h/H \leq 7$	R^2 : 0.5619
$\eta = \left(0.36\left(\frac{h}{H}\right)^{0.5} - 0.0454\left(\frac{L}{D}\right)^{0.5} + 0.0202\left(\frac{h}{H}\right)^{0.5}\left(\frac{L}{D}\right)^{0.5} - 0.1904\left(\frac{h}{H}\right)^{1} + 0.6026\right)$ (26)	$R^2 ajust.$: 0.5519
	$RMSE$: 0.02353
	n : **180**
Verificación de supuestos	
- Homocedasticidad : BP = 28.09, df = 4 , p-value = 1.196e-05	
- Independencia : DW = 1.6248 , p-value = 0.005003	

Nota. Homocedasticidad: Breusch-Pagan Test, Independencia: Durbin-Watson test, Normalidad: Shapiro-Wilk

En la Tabla 47 se muestra el modelo del caudal de suministro relativo $Q_T/(v_c D^2)$ (Calvert, 1957). El modelo es lineal y no utiliza exponentes como en los modelos anteriores. La modelo 2 no considera dos puntos influyentes, con los cual los estadísticos mejoran levemente. Ambos modelos no cumplen el supuesto de homocedasticidad.

Se selecciona preliminarmente el modelo 1 (Ecuación 27), dado que en general tiene estadísticos similares a los del modelo 2. Si bien no se cumple la homocedasticidad, aún faltan más datos para un modelo definitivo que considerare el caudal de suministro mínimo.

Tabla 47

Modelo para el caudal de descarga relativo $y_5 = Q_T / (v_c D^2)$

Modelo	Estadísticos
Modelo 1:	R^2 : 0.9493
$\frac{Q_T}{v_c D^2} = -0.02176\left(\frac{h}{H}\right) + 0.000196\left(\frac{L}{D}\right) + 0.398$ (27)	$R^2 ajust.$: 0.9489
	$RMSE$: 0.01445
Verificación de supuestos	n : 300
- Homocedasticidad : BP = 20.394, df = 2, p-value = 3.727e-05	
- Normalidad : W = 0.99043, p-value = 0.04733	
Modelo 2: Sin punto influyente N°20 y N°107	R^2 : 0.9525
$\frac{Q_T}{v_c D^2} = -0.02169\left(\frac{h}{H}\right) + 0.000191\left(\frac{L}{D}\right) + 0.4$ (28)	$R^2 ajust.$: 0.9522
	$RMSE$: 0.01391
Verificación de supuestos	n : 298
- Homocedasticidad : BP = 20.018, df = 2, p-value = 4.499e-05	

Nota. Homocedasticidad: Breusch-Pagan Test, Normalidad: Shapiro-Wilk

3.2.3.1.2 Resultados del análisis de regresión lineal

En las siguientes tablas, se muestra en detalle de los estadísticos, parámetros y exponentes estimados a partir del método de mínimos cuadrados (regresión lineal). Así también los valores p de verificación de los supuestos. Los reportes de regresión lineal de los modelo seleccionados se encuentran en el Anexo 9.

Tabla 48

Modelo para el caudal de descarga relativo $y_1=q/Q_T$

Modelo	**Estadísticos**
Modelo 1:	R^2 : 0.9899
$\frac{q}{Q_T}=\left(0.9(\frac{h}{H})^{-0.44}+0.00131(\frac{L}{D})^{0.75}-0.00294(\frac{h}{H})^{-0.44}(\frac{L}{D})^{0.75}-0.326\right)$ (29)	$R^2ajust.$: 0.9898
	$RMSE$: 0.00641
	F : 9641
Verificación de supuestos	gl : 296
- Homocedasticidad : BP = 7.6579, df = 3, p-value = 0.05364	n : 300
- Independencia : DW = 1.8176 , p-value = 0.05013	Parámetros estimados:
- Normalidad : W = 0.99394 , p-value = 0.2743	$+\hat{C}$ = -0.32609
	$-\hat{\alpha}$ = -0.39609
Exponentes optimizados : b = 0, a = 1.44, c = 0.25	$-\hat{\beta}$ = 0.0009838
Punto influyente : N.º 83, error típico 3.686, distancia de Cook's 0.055	$-\hat{\gamma}$ = 0.0009704
Modelo 2: sin punto influyente N°83	R^2 : 0.9900
$\frac{q}{Q_T}=\left(0.9067(\frac{h}{H})^{-0.43}+0.00135(\frac{L}{D})^{0.75}-0.002975(\frac{h}{H})^{-0.43}(\frac{L}{D})^{0.75}-0.3363\right)$ (30)	$R^2ajust.$: 0.9899
	$RMSE$: 0.00632
	F : 9767.3
Verificación de supuestos	gl : 295
- Homocedasticidad : BP = 7.6025, df = 3, p-value = 0.05498	n : 299
- Independencia : DW = 1.8462 , p-value = 0.08164	Parámetros estimados:
- Normalidad : W = 0.99464 , p-value = 0.3801	$+\hat{C}$ = -0.33630
	$-\hat{\alpha}$ = -0.38987
Exponentes optimizados : b = 0, a = 1.43, c = 0.25	$-\hat{\beta}$ = 0.001013
	$-\hat{\gamma}$ = 0.0009594

Nota. Los "exponentes optimizados" son mediante función de optimización para obtener el R^2 máximo. Homocedasticidad (Breusch-Pagan Test), Independencia (Durbin-Watson test), Normalidad (Shapiro-Wilk).

Tabla 49

Modelo para el caudal de funcionamiento relativo $y_2=Q/Q_T$

Modelo		Estadísticos	
Modelo 1:		R^2	: 0.9899
$\frac{Q}{Q_T}=\left(-0.9\left(\frac{h}{H}\right)^{-0.44}-0.00131\left(\frac{L}{D}\right)^{0.75}+0.00294\left(\frac{h}{H}\right)^{-0.44}\left(\frac{L}{D}\right)^{0.75}+1.326\right)$ (31)		$R^2 ajust.$	: 0.9897
		$RMSE$	: 0.00641
		F	: 9641
Verificación de supuestos		gl	: 296
- Homocedasticidad	: BP = 7.6579, df = 3, p-value = 0.05364	n	: 300
- Independencia	: DW = 1.8176 , p-value = 0.05013	Parámetros estimados:	
- Normalidad	: W = 0.99394 , p-value = 0.2743	$+\hat{C}$	= 1.32609
Exponentes optimizados	: b = 0, a = 1.44, c = 0.25	$-\hat{\alpha}$	= 0.39609
Punto influyente	: N.º 83, error típico 3.686, distancia de Cook's 0.055	$-\hat{\beta}$	= -0.0009838
		$-\hat{\gamma}$	= -0.0009704
Modelo 2: sin punto influyente N°83		R^2	: 0.9900
$\frac{Q}{Q_T}=\left(-0.9067\left(\frac{h}{H}\right)^{-0.43}-0.001351\left(\frac{L}{D}\right)^{0.75}+0.002975\left(\frac{h}{H}\right)^{-0.43}\left(\frac{L}{D}\right)^{0.75}+1.3363\right)$ (32)		$R^2 ajust.$	: 0.9899
		$RMSE$	: 0.00632
		F	: 9767.3
Verificación de supuestos		gl	: 295
- Homocedasticidad	: BP = 7.6025, df = 3, p-value = 0.05498	n	: 299
- Independencia	: DW = 1.8462 , p-value = 0.08164	Parámetros estimados:	
- Normalidad	: W = 0.99464 , p-value = 0.3801	$+\hat{C}$	= 1.3363
		$-\hat{\alpha}$	= 0.3899
Exponentes optimizados	: b = 0, a = 1.43, c = 0.25	$-\hat{\beta}$	= -0.001013
		$-\hat{\gamma}$	= -0.0009594

Nota. Los "exponentes optimizados" son mediante función de optimización para obtener el R^2 máximo. Homocedasticidad (Breusch-Pagan Test), Independencia (Durbin-Watson test), Normalidad (Shapiro-Wilk).

Tabla 50

Modelo para parámetro de válvula de impulso $y_3=nD/v_c$

Modelo		Estadísticos	
Modelo 1:		R^2	: 0.95508
$\frac{nD}{v_C}=\left(0.1763\left(\frac{L}{D}\right)^{-0.15}-0.0001124\left(\mathrm{Re}\right)^{0.39}-0.05105\right)$ (33)		$R^2 ajust.$	: 0.95478
		$RMSE$	: 0.000387
Verificación de supuestos:		F	: 3157.7
- Homocedasticidad	: BP = 0.96628, df = 2, p-value = 0.6168	gl	: 297
- Independencia	: DW = 1.8917, p-value = 0.1608	n	: 300
- Normalidad	: W = 0.98816, p-value = 0.01491	Parámetros estimados:	
Exponentes optimizados	: b = 0, a = 1.15, c = 0.61	$+\hat{C}$	= -0.05105
Punto influyente:		$-\hat{\alpha}$	= -0.02645
- N.º 188, error típico -2.642, distancia de Cook's 0.0262		$-\hat{\beta}$	= -4.382×10^{-5}
- N.º 269, error típico -2.719, distancia de Cook's 0.0366			
Modelo 2: sin punto influyente N°269		R^2	: 0.95618

Modelo	Estadísticos
$\frac{nD}{v_C}=\left(0.000288\left(\frac{L}{D}\right)^{-0.15}-0.0001109\left(\mathrm{Re}\right)^{0.39}-0.05131\right)$ (34)	$R^2ajust.$: 0.95589 $RMSE$: 0.000384 F : 3229.7 gl : 296 n : 299
Verificación de supuestos:	Parámetros estimados:
- Homocedasticidad : BP = 0.38858, df = 2, p-value = 0.8234	
- Independencia : DW = 1.8333 , p-value = 0.0673	$+\hat{C}$ = -0.05131
- Normalidad : W = 0.98826 , p-value = 0.01599	$-\hat{\alpha}$ = -0.02652
Exponentes optimizados : b = 0, a = 1.15, c = 0.61	$-\hat{\beta}$ = -4.326×10^{-5}

Nota. Los "exponentes optimizados" son mediante función de optimización para obtener el R^2 máximo. Homocedasticidad (Breusch-Pagan Test), Independencia (Durbin-Watson test), Normalidad (Shapiro-Wilk).

Tabla 51

Modelo para la eficiencia y_4= η

Modelo	Estadísticos
Modelo 1:	R^2 : 0.7822
$\eta=\left(47.32\left(\frac{h}{H}\right)^{0.11}+32.23\left(\frac{L}{D}\right)^{-0.1}-26.87\left(\frac{h}{H}\right)^{0.11}\left(\frac{L}{D}\right)^{-0.1}-14.026\left(\frac{h}{H}\right)^{0.22}-36.135\right)$ (35)	$R^2ajust.$: 0.7792 $RMSE$: 0.0403 F : 264.8
Verificación de supuestos	gl : 295
- Homocedasticidad : BP = 93.916, df = 4, p-value = 1.94E-19 (tipo rombo)	n : **300**
- Independencia : DW = 1.8231 , p-value = 0.05528	Parámetros estimados:
- Normalidad : W = 0.97759 , p-value = 0.0001213	$+\hat{C}$ = -36.135
	$-\hat{\alpha}$ = 5.2052
Exponentes optimizados : b = 0, a = 0.89, c = 1.1	$-\hat{\beta}$ = -3.2227
Punto influyente : N.º 73, error típico -3.088, distancia de Cook's 0.028	$-\hat{\gamma}$ = 0.2955
N.º 248, error típico -3.039, distancia de Cook's 0.027	$-\hat{\delta}$ = -0.1697
Modelo 2: Pata $h/H \leq 7$	R^2 : 0.5619
$\eta=\left(0.36\left(\frac{h}{H}\right)^{0.5}-0.0454\left(\frac{L}{D}\right)^{0.5}+0.0202\left(\frac{h}{H}\right)^{0.5}\left(\frac{L}{D}\right)^{0.5}-0.1904\left(\frac{h}{H}\right)^{1}+0.6026\right)$ (36)	$R^2ajust.$: 0.5519 $RMSE$: 0.02353 F : 56.11
Verificación de supuestos	gl : 175
- Homocedasticidad : BP = 28.09, df = 4 , p-value = 1.196e-05	n : **180**
- Independencia : DW = 1.6248 , p-value = 0.005003	Parámetros estimados:
- Normalidad : W = 0.993 , p-value = 0.5443	$+\hat{C}$ = 0.6026
Exponentes optimizados : b = 0, a = 0.5, c = 0.5	$-\hat{\alpha}$ = 0.18
Punto influyente : N.º 130, error típico -3.02, distancia de Cook's 0.0453	$-\hat{\beta}$ = -0.02268
	$-\hat{\gamma}$ = 0.005045
	$-\hat{\delta}$ = -0.0476

Nota. Los "exponentes optimizados" son mediante función de optimización para obtener el R^2 máximo. Homocedasticidad (Breusch-Pagan Test), Independencia (Durbin-Watson test), Normalidad (Shapiro-Wilk).

Tabla 52

Modelo para el caudal de descarga relativo $y_5 = Q_T / (v_c D^2)$

Modelo		Estadísticos	
Modelo 1:		R^2	: 0.9493
$\frac{Q_T}{v_c D^2} = -0.02176(\frac{h}{H}) + 0.000196(\frac{L}{D}) + 0.398$ (37)		$R^2 ajust.$	: 0.9489
		$RMSE$	: 0.01445
		F	: 2779.3
Verificación de supuestos		gl	: 297
- Homocedasticidad	: BP = 20.394, df = 2, p-value = 3.727e-05	n	: 300
- Independencia	: DW = 1.9712, p-value = 0.379	Parámetros estimados:	
- Normalidad	: W = 0.99043, p-value = 0.04733	$+ \hat{C}$	= 0.39778
Punto influyente	: N.º 20, error típico -3.44, distancia de Cook's 0.0374	$- \hat{\alpha}$	= -0.02176
	N.º 107, error típico -3.43, distancia de Cook's 0.0367	$- \hat{\beta}$	= 0.0001959
Modelo 2: Sin punto influyente N°20 y N°107		R^2	: 0.9525
$\frac{Q_T}{v_c D^2} = -0.02169(\frac{h}{H}) + 0.000191(\frac{L}{D}) + 0.4$ (38)		$R^2 ajust.$	: 0.9522
		$RMSE$	: 0.01391
		F	: 2779.3
Verificación de supuestos		gl	: 295
- Homocedasticidad	: BP = 20.018, df = 2, p-value = 4.499e-05	n	: 298
- Independencia	: DW = 1.9618, p-value = 0.3486	Parámetros estimados:	
- Normalidad	: W = 0.99386, p-value = 0.2694	$+ \hat{C}$	= 0.4002
		$- \hat{\alpha}$	= -0.02169
		$- \hat{\beta}$	= 0.0001908

Nota. Homocedasticidad (Breusch-Pagan Test), Independencia (Durbin-Watson test), Normalidad (Shapiro-Wilk).

3.2.3.2 Predicción a partir de los modelos planteados

3.2.3.2.1 Modelo y predicción para la variable $y_1 = q/Q_T$

En la Tabla 43, Tabla 48 y el Anexo 9, se muestra el análisis estadístico de la regresión lineal para el modelo seleccionado $Y_1 \sim X_1 + X_2 + X_1{*}X_2$.

En la Tabla 53 se muestra los errores de los límites de confianza del valor promedio y del valor particular, de manera que puedan utilizarse en al momento de predecir con el modelo matemático propuesto. Por ejemplo, de la Ecuación 19, la predicción del valor particular sería:

$$\frac{q}{Q_T} = \left(0.9\left(\frac{h}{H}\right)^{-0.44} + 0.00131\left(\frac{L}{D}\right)^{0.75} - 0.00294\left(\frac{h}{H}\right)^{-0.44}\left(\frac{L}{D}\right)^{0.75} - 0.326\right) \pm (E_2) \qquad (39)$$

La Figura 39 y Figura 40 muestran el modelo $\hat{y}_1 = q/Q_T$ y sus límites de confianza al 95% para la predicción del valor promedio y de nuevas observaciones, respectivamente. La dispersión de datos corresponde a los valores promedio y observados de la variable q/Q_T (Figura 24).

En la Figura 39 para h/H > 7 los valores promedio se alejan de los límites de confianza del valor promedio. En la Figura 40 los intervalos de confianza del valor particular cubren de manera adecuada la mayoría de las observaciones con un error de ±0.013 (Tabla 53).

Tabla 53

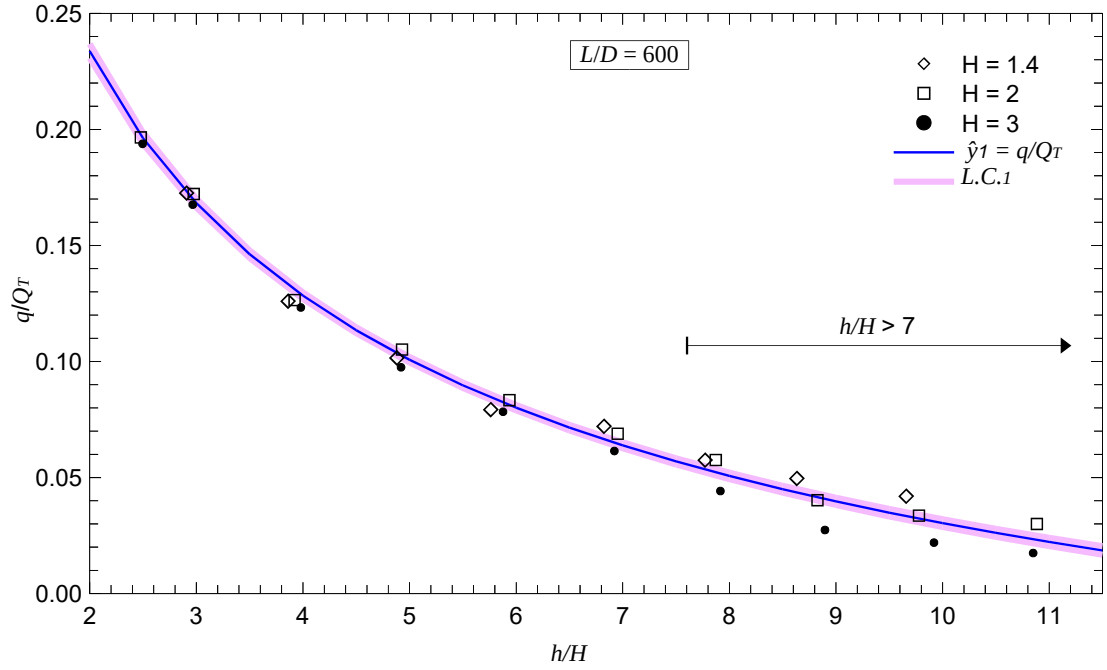
Errores para el límite de confianza del valor promedio y valor particular.

h/H	***L/D* = 400**		***L/D* = 500**		***L/D* = 600**	
	E_1	E_2	E_1	E_2	E_1	E_2
3	±0.0019	±0.013	±0.0012	±0.013	±0.0020	±0.013
4	±0.0014	±0.013	±0.0009	±0.013	±0.0014	±0.013
5	±0.0012	±0.013	±0.0007	±0.013	±0.0012	±0.013
6	±0.0012	±0.013	±0.0007	±0.013	±0.0012	±0.013
7	±0.0013	±0.013	±0.0008	±0.013	±0.0013	±0.013
8	±0.0014	±0.013	±0.0009	±0.013	±0.0014	±0.013
9	±0.0015	±0.013	±0.0010	±0.013	±0.0015	±0.013
10	±0.0017	±0.013	±0.0011	±0.013	±0.0017	±0.013
11	±0.0018	±0.013	±0.0011	±0.013	±0.0018	±0.013

Nota. E_1 es el error de estimación del valor promedio, E_2 es el error de estimación del valor particular.

Figura 39

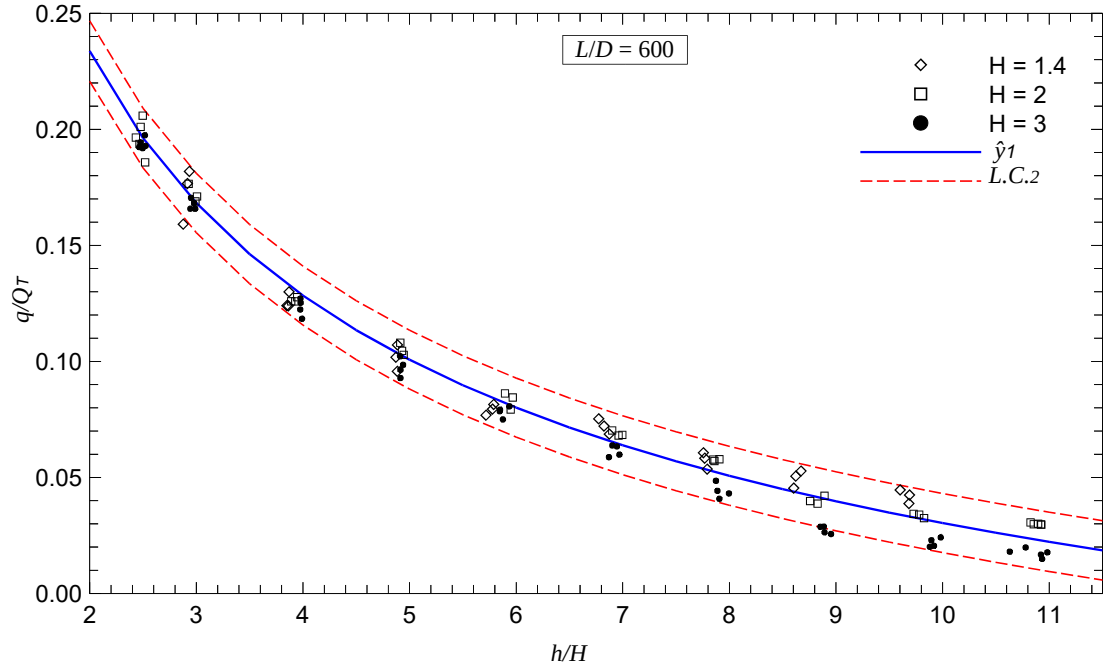
Límite de confianza del 95% en la predicción del valor promedio.



Nota. Los puntos son los valores promedios de q/Q_T. $L.C._1$ límite de confianza del valor promedio.

Figura 40

Intervalos de confianza del 95% en la predicción del valor particular



Nota. Los puntos son la dispersión de datos de q/Q_T. $L.C._2$ límite de confianza del valor particular.

3.2.3.2.2 Modelo y predicción para la variable $y_2 = Q/Q_T$

En la Tabla 44, Tabla 49 y el Anexo 9, se muestra el análisis estadístico de la regresión lineal para el modelo seleccionado $Y_2 \sim X_1 + X_2 + X_1{*}X_2$. El análisis es similar a la variable y_1 del ítem anterior (3.2.3.2.1) dado que ambas son complementarias, es decir, $y_1 + y_2 = 1$.

En la Tabla 54 se muestra los errores de los límites de confianza del valor promedio y del valor particular, de manera que puedan utilizarse en al momento de predecir con el modelo matemático propuesto.

Por ejemplo, de la Ecuación 21, la predicción del valor particular sería:

$$\frac{Q}{Q_T}=\left(-0.9\left(\frac{h}{H}\right)^{-0.44}-0.00131\left(\frac{L}{D}\right)^{0.75}+0.00294\left(\frac{h}{H}\right)^{-0.44}\left(\frac{L}{D}\right)^{0.75}+1.326\right)\pm(E_2) \qquad (40)$$

La Figura 41 y Figura 42 muestran el modelo $\hat{y}_2 = Q/Q_T$ y sus límites de confianza al 95% para la predicción del valor promedio y de nuevas observaciones, respectivamente. Así también, se grafican los valores promedio y observados de la variable Q/Q_T.

En la Figura 41 para $h/H > 7$ los valores promedio se alejan de los límites de confianza del valor promedio. En la Figura 42 los intervalos de confianza del valor particular cubren de manera adecuada la mayoría de las observaciones con un error de ±0.013 (Tabla 54).

Tabla 54

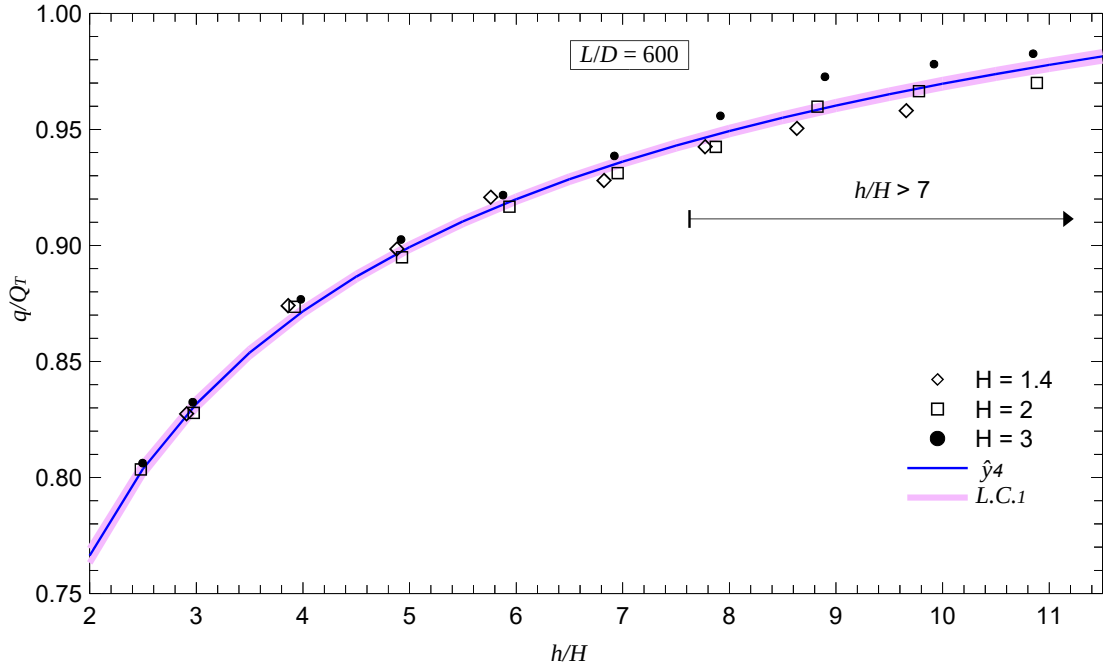
Errores para el límite de confianza del valor promedio y valor particular.

h/H	***L/D* = 400**		***L/D* = 500**		***L/D* = 600**	
	E_1	E_2	E_1	E_2	E_1	E_2
3	±0.0019	±0.013	±0.0012	±0.013	±0.0020	±0.013
4	±0.0014	±0.013	±0.0009	±0.013	±0.0014	±0.013
5	±0.0012	±0.013	±0.0007	±0.013	±0.0012	±0.013
6	±0.0012	±0.013	±0.0007	±0.013	±0.0012	±0.013
7	±0.0013	±0.013	±0.0008	±0.013	±0.0013	±0.013
8	±0.0014	±0.013	±0.0009	±0.013	±0.0014	±0.013
9	±0.0015	±0.013	±0.0010	±0.013	±0.0015	±0.013
10	±0.0017	±0.013	±0.0011	±0.013	±0.0017	±0.013
11	±0.0018	±0.013	±0.0011	±0.013	±0.0018	±0.013

Nota. E_1 es el error de estimación del valor promedio, E_2 es el error de estimación del valor particular.

Figura 41

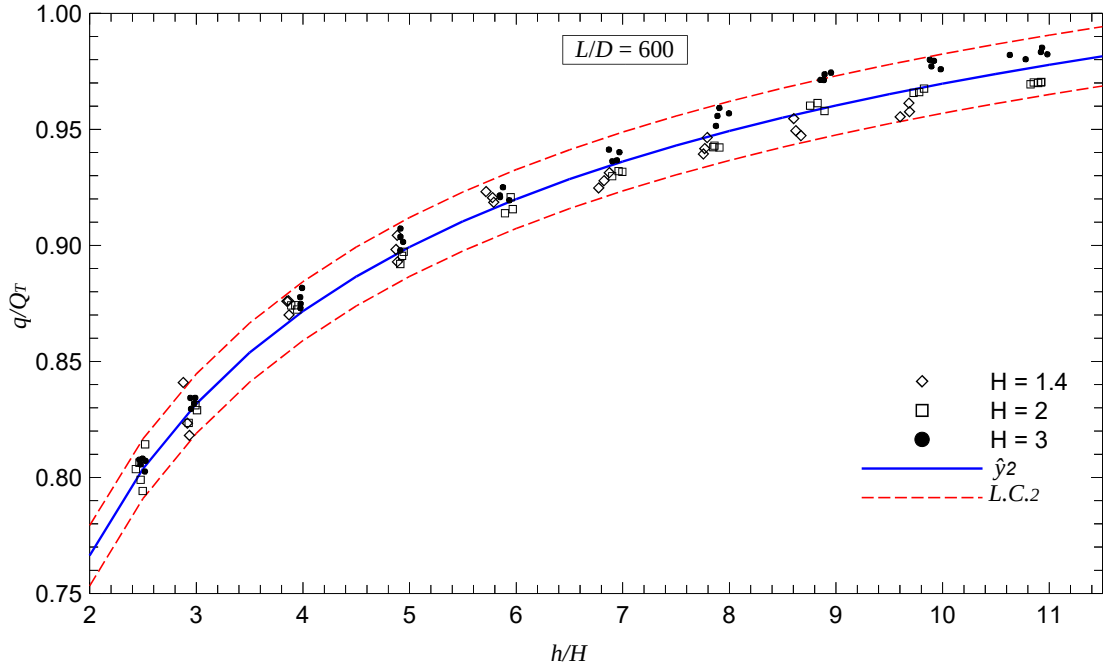
Límite de confianza del 95% para la predicción del valor promedio.



Nota. Los puntos son los valores promedios de q/Q_T. $L.C._1$ límite de confianza del 95% del valor promedio.

Figura 42

Intervalos de confianza del 95% para la predicción del valor particular.



Nota. Los puntos son la dispersión de datos de q/Q_T. $L.C._2$ límite de confianza del valor particular.

3.2.3.2.3 Modelo y predicción para la variable $y_3 = nD/v_c$

En la Tabla 45, Tabla 50 y el Anexo 9, se muestra el análisis estadístico de la regresión lineal para el modelo seleccionado $Y_3 \sim X_2 + X_3$.

En la Tabla 55 se muestra los errores de los límites de confianza del valor promedio y del valor particular, de manera que puedan utilizarse en al momento de predecir con el modelo matemático propuesto.

Por ejemplo, de la Ecuación 23, la predicción del valor particular sería:

$$\frac{nD}{v_C} = \left(0.1763\left(\frac{L}{D}\right)^{-0.15} - 0.0001124\left(\mathrm{Re}\right)^{0.39} - 0.05105\right) \pm \left(E_2\right) \tag{41}$$

La Figura 43 y Figura 44 muestran el modelo $\hat{y}_3 = nD/v_c$ y sus límites de confianza al 95% para la predicción del valor promedio y de nuevas observaciones (valor particular), respectivamente. Así también, se grafican los valores promedio y observados de la variable nD/v_c.

La Figura 43 muestra la curva $\hat{y}_3$ que modela los datos de la variable nD/v_c, en función de la relación L/D y el número de Reynolds $Re=v_c \times D/v$. Los valores promedios son de varias repeticiones de las pruebas, estos promedios agrupan valores de Re diferentes, debido a la variación de la temperaturas, lo cual se evidencia en comparación con a dispersión de datos de la Figura 44.

Tabla 55

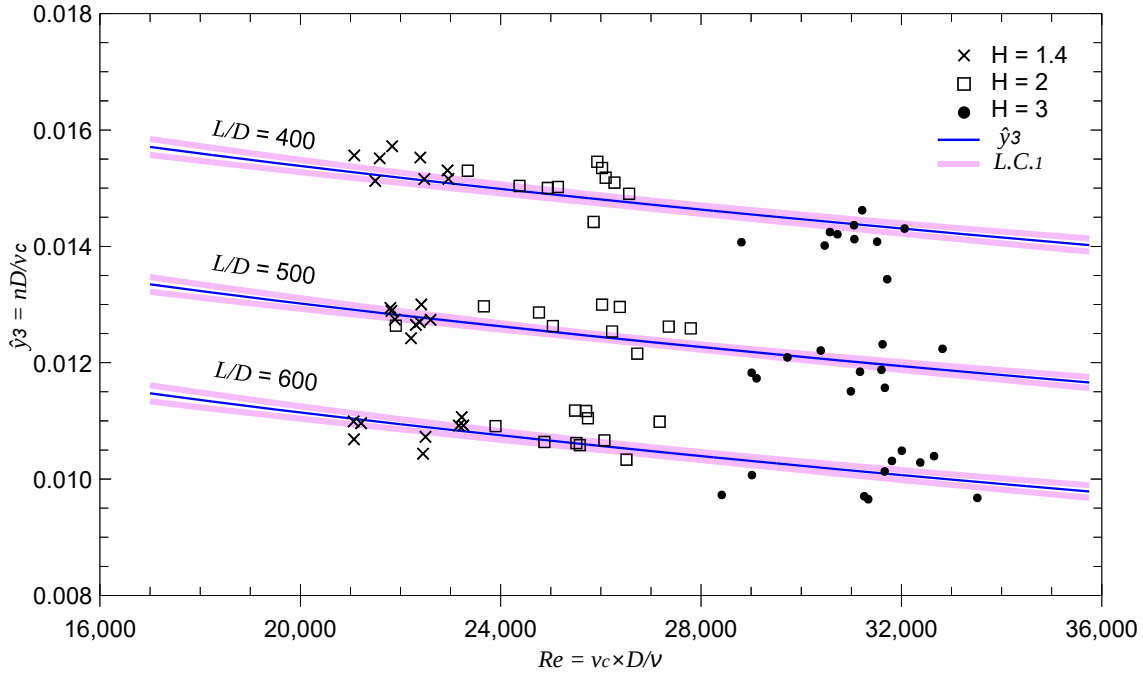
Errores para el límite de confianza del valor promedio y valor particular.

Re	***L/D* = 400**		***L/D* = 500**		***L/D* = 600**	
	E_1	E_2	E_1	E_2	E_1	E_2
17000	±0.00014	±0.00078	±0.00013	±0.00077	±0.00014	±0.00078
19500	±0.00011	±0.00077	±0.00010	±0.00077	±0.00011	±0.00077
22000	±0.00009	±0.00077	±0.00007	±0.00077	±0.00009	±0.00077
24500	±0.00008	±0.00077	±0.00005	±0.00077	±0.00007	±0.00077
27000	±0.00007	±0.00077	±0.00004	±0.00076	±0.00007	±0.00077
29500	±0.00008	±0.00077	±0.00005	±0.00077	±0.00007	±0.00077
32000	±0.00009	±0.00077	±0.00007	±0.00077	±0.00008	±0.00077
34500	±0.00010	±0.00077	±0.00009	±0.00077	±0.00010	±0.00077

Nota. E_1 es el error de estimación del valor promedio, E_2 es el error de estimación del valor particular.

Figura 43

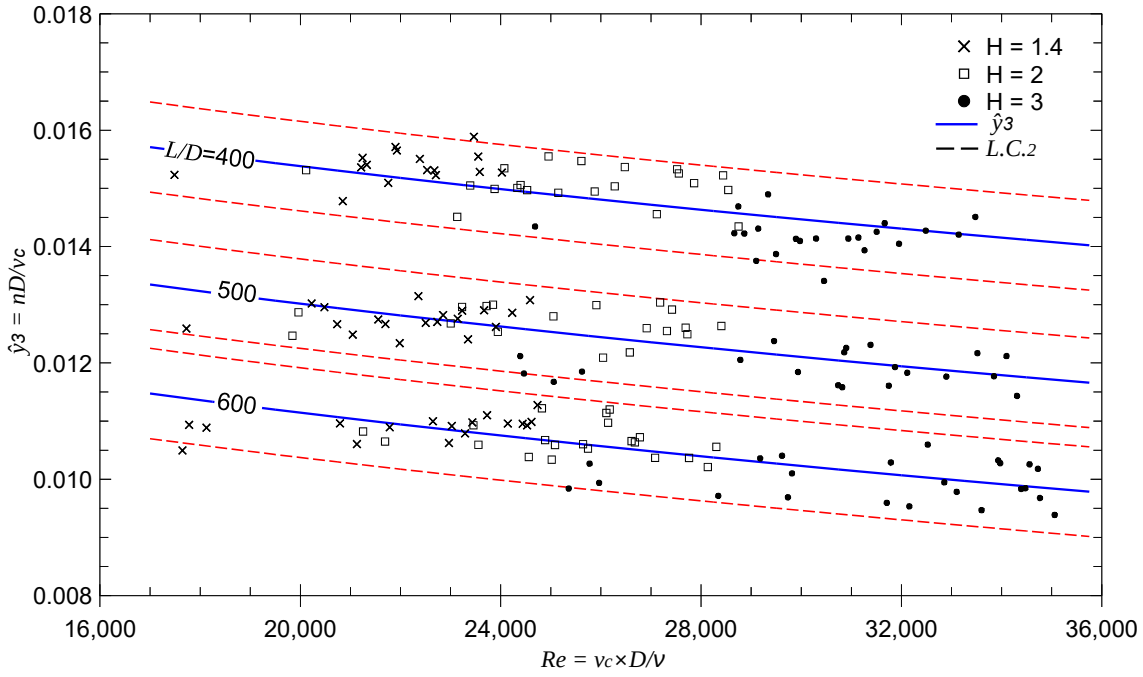
Valores promedios de nD/v_c y límites de predicción del valor promedio



Nota. $L.C._1$ límite de confianza del 95% para el valor promedio.

Figura 44

Dispersión de valores de nD/v_c y límites de predicción del valor particular



Nota. $L.C._2$ límite de confianza del 95% para el valor particular.

3.2.3.2.4 Modelo y predicción para la variable $y_4 = \eta$

En la Tabla 46, la Tabla 51 y el Anexo 9, se muestra el análisis estadístico de la regresión lineal para los modelo de $Y_4 \sim X_1 + X_2 + X_1{*}X_2 + X_1^2$. En las ecuaciones 42 y 43, se combina los modelos con el error de estimación del valor particular:

$$\eta = \left(47.32\left(\frac{h}{H}\right)^{0.11} + 32.23\left(\frac{L}{D}\right)^{-0.1} - 26.87\left(\frac{h}{H}\right)^{0.11}\left(\frac{L}{D}\right)^{-0.1} - 14.026\left(\frac{h}{H}\right)^{0.22} - 36.135\right) \pm (E_2) \quad (42)$$

$$\eta = \left(0.36\left(\frac{h}{H}\right)^{0.5} - 0.0454\left(\frac{L}{D}\right)^{0.5} + 0.0202\left(\frac{h}{H}\right)^{0.5}\left(\frac{L}{D}\right)^{0.5} - 0.1904\left(\frac{h}{H}\right)^{1} + 0.6026\right) \pm (E_2) \quad (43)$$

En la Tabla 56 se muestra los errores de los límites de confianza en la predicción mediante el modelo 2 (Ecuación 43).

En las figuras 45, 46 y 47, se muestran gráficos con límites de confianza al 95% de la predicción del valor particular (para nuevas observaciones). Se han graficado resultados a partir de las ecuaciones 25 y 26, donde la última sólo estima hasta $h/H \leq 7$. Se observa que el modelo 2 (Ecuación 26) tiene un intervalo de predicción menor al del modelo 1 (Ecuación 25), esto pues, tiene menor $RMSE$ (ver Tabla 46). Por otra parte, a valores mayores de $h/H > 7$, la variabilidad de η es mayor, por lo que el modelo 1 predice con intervalos de confianza amplios.

Tabla 56

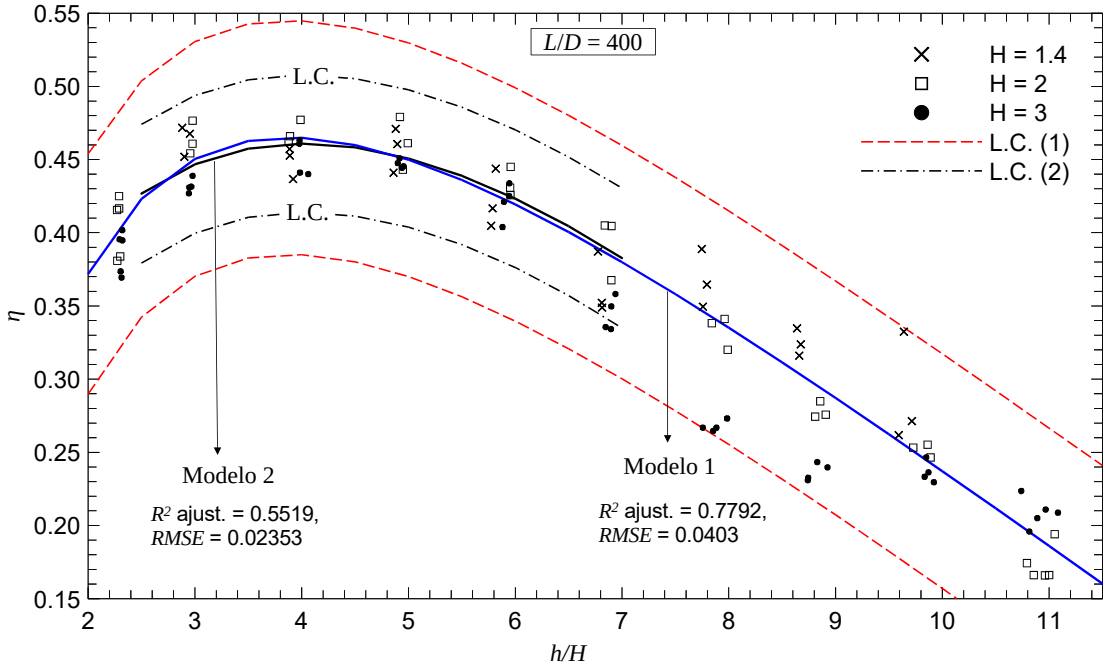
Errores para el límite de confianza del valor promedio y valor particular.

h/H	***L/D* = 400**		***L/D* = 500**		***L/D* = 600**	
	E_1	E_2	E_1	E_2	E_1	E_2
2	±0.014	±0.035	±0.012	±0.048	±0.015	±0.049
2.5	±0.009	±0.038	±0.007	±0.047	±0.010	±0.047
3	±0.008	±0.039	±0.005	±0.047	±0.008	±0.047
3.5	±0.007	±0.040	±0.005	±0.047	±0.007	±0.047
4	±0.007	±0.040	±0.005	±0.047	±0.007	±0.047
4.5	±0.007	±0.040	±0.006	±0.047	±0.007	±0.047
5	±0.007	±0.040	±0.005	±0.047	±0.007	±0.047
5.5	±0.007	±0.040	±0.005	±0.047	±0.007	±0.047
6	±0.008	±0.039	±0.005	±0.047	±0.008	±0.047
6.5	±0.009	±0.038	±0.006	±0.047	±0.009	±0.047
7	±0.011	±0.036	±0.008	±0.047	±0.011	±0.048

Nota. E_1 es el error de estimación del valor promedio, E_2 es el error de estimación del valor particular.

Figura 45

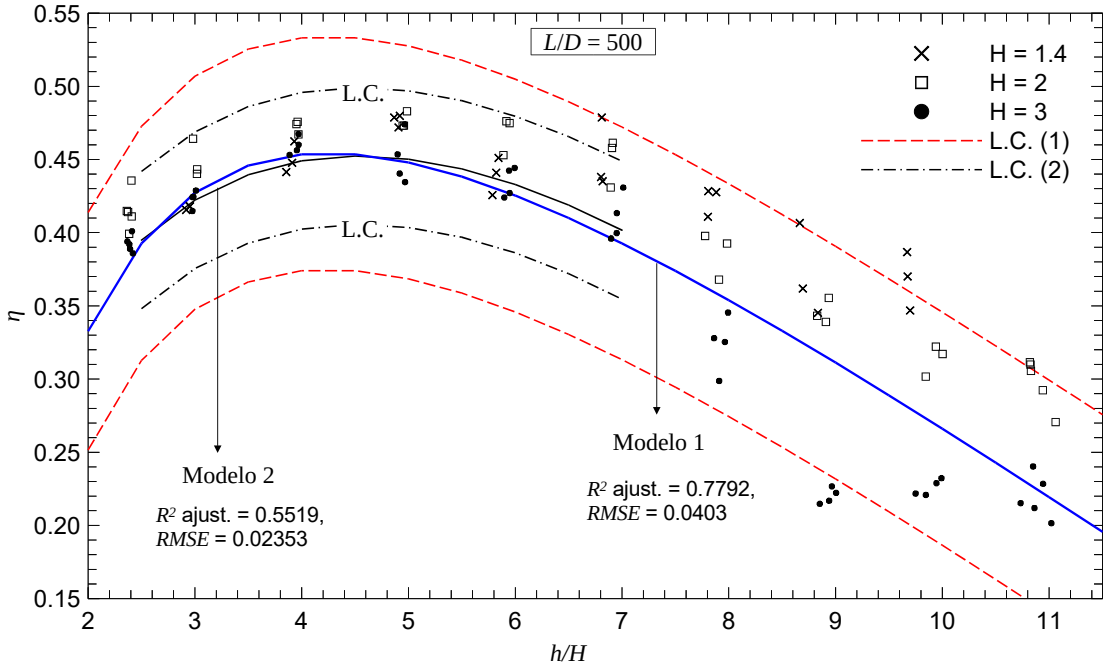
Límite de confianza del valor particular del modelo $\hat{y}_4 = \eta$ para L/D = 400



Nota. L.C. (1) límite de confianza del 95% para el modelo 1 y L.C. (2) para el modelo 2.(ver Tabla 46)

Figura 46

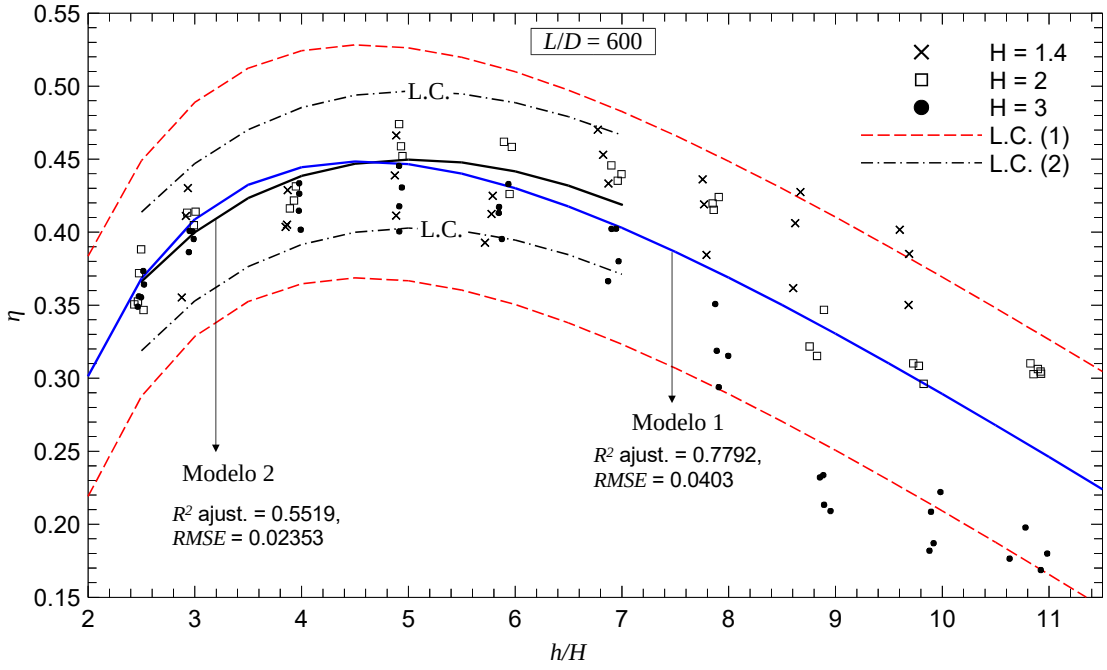
Límite de confianza del valor particular del modelo $\hat{y}_4 = \eta$ para L/D = 500



Nota. L.C. (1) límite de confianza del 95% para el modelo 1 y L.C. (2) para el modelo 2.(ver Tabla 46)

Figura 47:

Límite de confianza del valor particular del modelo $\hat{y}_4 = \eta$ para L/D = 600



Nota. L.C. (1) límite de confianza del 95% para el modelo 1 y L.C. (2) para el modelo 2.(ver Tabla 46)

3.2.3.2.5 Modelo y predicción para la variable $y_5 = Q_T / v_c D^2$

En la Tabla 47, Tabla 52 y el Anexo 9, se muestra el análisis estadístico de la regresión lineal para el modelo seleccionado $Y_5 \sim X_1 + X_2$.

En la Tabla 57 se muestra los errores de los límites de confianza del valor promedio y del valor particular, de manera que puedan utilizarse en al momento de predecir con el modelo matemático propuesto.

Por ejemplo, de la Ecuación 27, la predicción del valor particular sería:

$$\frac{Q_T}{v_c D^2} = -0.02176\left(\frac{h}{H}\right) + 0.000196\left(\frac{L}{D}\right) + 0.398 \pm (E_2) \qquad (44)$$

La Figura 49 y Figura 48 muestran el modelo $\hat{y}_5 = Q_T / v_c D^2$ y sus límites de confianza al 95% para la predicción del valor promedio y de nuevas observaciones, respectivamente. Así también, se grafican los valores promedio y observados de la variable $Q_T / v_c D^2$.

Tabla 57

Errores para el límite de confianza del valor promedio y valor particular.

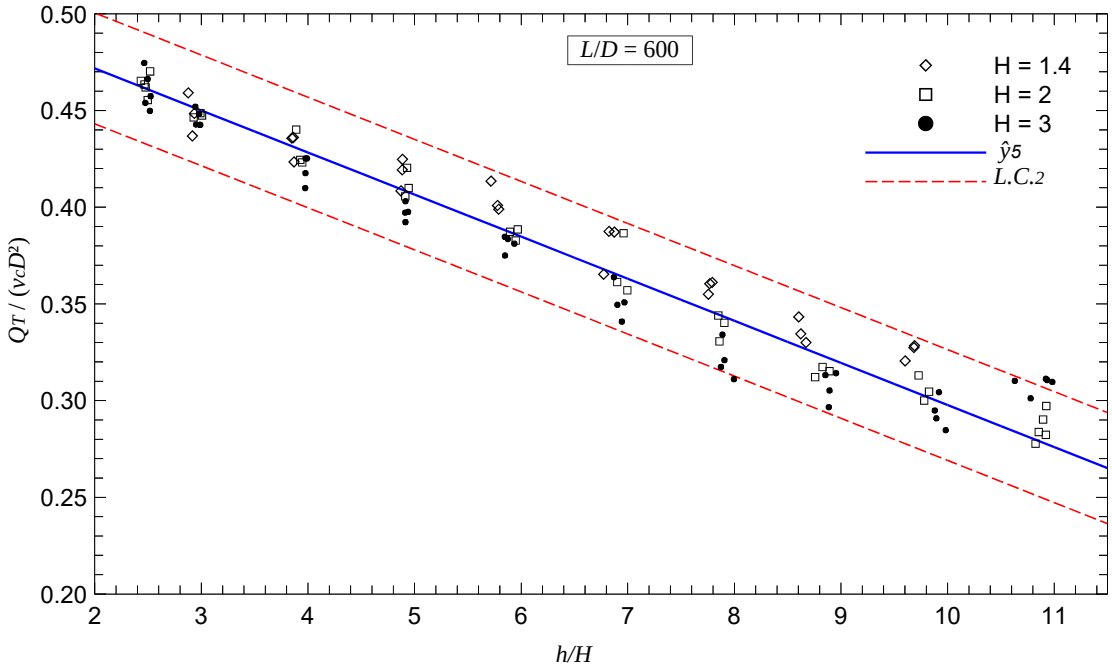
h/H	*L/D* = 400		*L/D* = 500		*L/D* = 600	
	E_1	E_2	E_1	E_2	E_1	E_2
3	±0.0033	±0.029	±0.0026	±0.029	±0.0033	±0.029
4	±0.0030	±0.029	±0.0022	±0.029	±0.0030	±0.029
5	±0.0027	±0.029	±0.0019	±0.029	±0.0027	±0.029
6	±0.0026	±0.029	±0.0017	±0.028	±0.0026	±0.029
7	±0.0026	±0.029	±0.0017	±0.028	±0.0026	±0.029
8	±0.0028	±0.029	±0.0019	±0.029	±0.0028	±0.029
9	±0.0030	±0.029	±0.0022	±0.029	±0.0030	±0.029
10	±0.0034	±0.029	±0.0027	±0.029	±0.0033	±0.029
11	±0.0038	±0.029	±0.0032	±0.029	±0.0038	±0.029

Nota. E_1 es el error de estimación del valor promedio, E_2 es el error de estimación del valor particular.

En la Figura 49 para $h/H > 7$ los valores promedio tienden a alejarse de los límites de confianza del valor promedio. En la Figura 48 los intervalos de confianza del valor particular cubren de manera adecuada la mayoría de las observaciones con un error de ±0.029, para L/D = 600 (Tabla 57).

Figura 48:

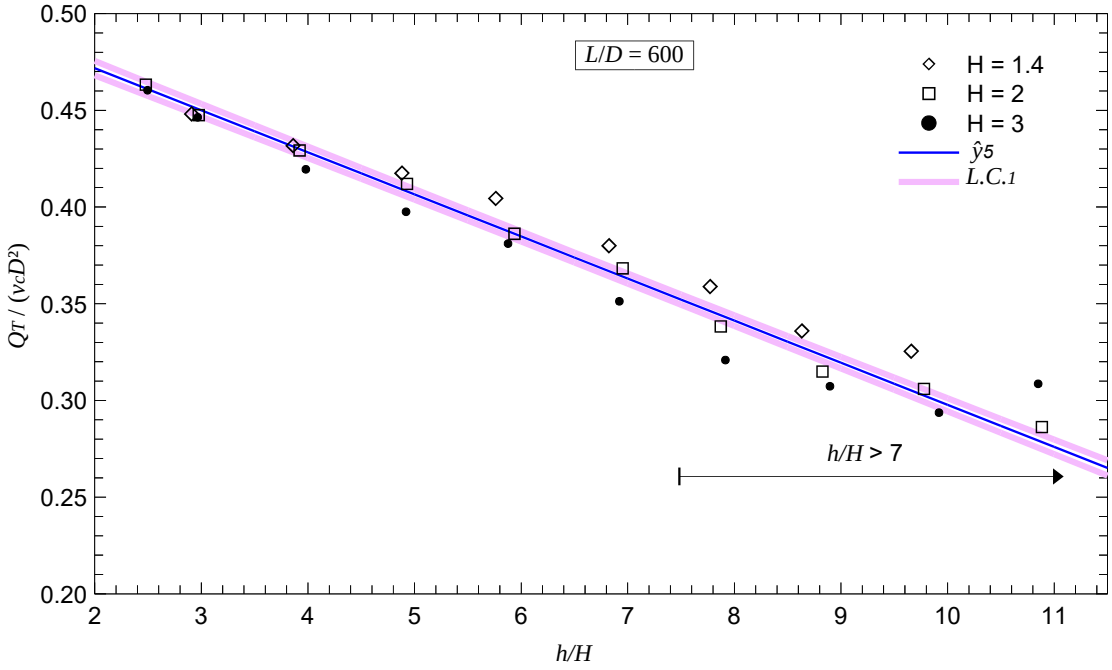
Límite de confianza del valor particular del modelo $\hat{y}_5 = Q_T / v_c D^2$.



Nota. $L.C._2$ límite de confianza del 95% para el valor particular.

Figura 49

Intervalo de predicción del valor promedio del modelo $\hat{y}_5 = Q_T / v_c D^2$.



Nota. $L.C._1$ límite de confianza del 95% para el valor promedio.

3.2.3.3 Conclusiones

- El caudal de descarga y el caudal de funcionamiento son complementarios, esto es, su suma resulta el caudal total del sistema. Por ello, se tiene la suma de los modelos matemáticos $\hat{y}_1 + \hat{y}_2 \approx 1$. De la Tabla 48 y Tabla 49:

$$\frac{q}{Q_T} = \left(0.9\left(\frac{h}{H}\right)^{-0.44} + 0.00131\left(\frac{L}{D}\right)^{0.75} - 0.00294\left(\frac{h}{H}\right)^{-0.44}\left(\frac{L}{D}\right)^{0.75} - 0.326\right)$$

R^2 ajustado= 0.9898, $RMSE$ = 0.00641

$$\frac{Q}{Q_T} = \left(-0.9\left(\frac{h}{H}\right)^{-0.44} - 0.00131\left(\frac{L}{D}\right)^{0.75} + 0.00294\left(\frac{h}{H}\right)^{-0.44}\left(\frac{L}{D}\right)^{0.75} + 1.326\right)$$

R^2 ajustado= 0.9897, $RMSE$ = 0.00641.

- La inclusión de la interacción $h/H^{*}L/D$ en los modelos, es a partir de las observaciones en las descriptivas indicadas en el ítem 3.2.2.

- El modelo de la variable $\hat{y}_3 = nD/v_c$, no incluye la variable h/H, dado que su influencia es baja. Los factores más influyentes son la relación L/D y el número de Reynolds $Re=v_c \times D/v$. De la Tabla 50:

$$\frac{nD}{v_C}=\left(0.1763\left(\frac{L}{D}\right)^{-0.15}-0.0001124\left(\mathrm{Re}\right)^{0.39}-0.05105\right)$$

R^2 ajustado= 0.95478, $RMSE$ = 0.000387.

- El modelo $\hat{y}_4 = \eta$ de la variable eficiencia η, en general, ajusta de manera adecuada los datos hasta $h/H \leq 7$, para otros valores, los datos presentan dispersión no muy clara, por lo que la selección del modelo es más complicada. El modelo final incluye interacciones de variables $h/H^{*}L/D$ y un polinomio de segundo grado en la variable h/H. Se graficó tres curvas de ajuste del modelo $\hat{y}_4$, se observó que, los intervalos de confianza del 95% de la predicción de nuevas observaciones logran cubrir la mayoría datos dispersos, sin embargo, estos son amplios en el caso del modelo 1. De la Tabla 51:

  Modelo 1

$$\eta=\left(47.32\left(\frac{h}{H}\right)^{0.11}+32.23\left(\frac{L}{D}\right)^{-0.1}-26.87\left(\frac{h}{H}\right)^{0.11}\left(\frac{L}{D}\right)^{-0.1}-14.026\left(\frac{h}{H}\right)^{0.22}-36.135\right)$$

  R^2 ajustado = 0.7792, $RMSE$ = 0.0403.

  Modelo 2

$$\eta=\left(0.36\left(\frac{h}{H}\right)^{0.5}-0.0454\left(\frac{L}{D}\right)^{0.5}+0.0202\left(\frac{h}{H}\right)^{0.5}\left(\frac{L}{D}\right)^{0.5}-0.1904\left(\frac{h}{H}\right)^{1}+0.6026\right)$$

  R^2 ajustado= 0.5519, $RMSE$ = 0.02353.

- Las gráficas de verificación de supuestos no evidencian transgresión del supuesto de varianza constante y normalidad en los modelos de las variables $y_1 = q/Q_T$, $y_2=Q/Q_T$ y $y_3=nD/v_c$.

- En el caso de la variable $y_4=\eta$, los modelos planteados no satisfacen el supuesto homocedasticidad de la regresión lineal, en este caso, esto afecta el procedimiento estadístico de estimación de coeficientes e intervalos de confianza, por lo que

su aplicación es limitada. Aun así es posible utilizar los modelos para una primera aproximación de la eficiencia, o en su defecto calcularse a partir de la definición de Rankine (ver ítem 2.2.1.3).

- El caudal de suministro Q_T, sigue una dependencia lineal decreciente respecto a las variables h/H y L/D. Se propone el modelo 1 para $\hat{y}_5 = Q_T / v_c D^2$ (Tabla 52), el cual explica adecuadamente esta tendencia, el modelo es válido para el rango de valores de h/H y L/D estudiado.

$$\frac{Q_T}{v_c D^2} = -0.02176\left(\frac{h}{H}\right) + 0.000196\left(\frac{L}{D}\right) + 0.398$$

R^2 ajustado= 0.9489, $RMSE$ = 0.01445.

Esta tendencia tiene un límite inferior donde el Q_T es mínimo. Por ejemplo, para la altura de suministro H = 3 m el caudal mínimo parece alcanzarse para $h/H \geq 8$ por la tendencia horizontal de los datos (ver Figuras 36 y 37). No se cuentan con más datos para una conclusión más contundente, por lo que se recomienda ampliar el estudio de los rangos de caudal de suministro mínimo y obtener modelos más completos.

3.2.4 Prueba estadística de hipótesis planteadas.

En el ítem 1.6, se planteó la hipótesis general y específicas. Ahora escribimos las hipótesis en su forma estadística para ponerlas a prueba.

3.2.4.1 Formulación de la hipótesis general

Del ítem 1.6.1, tenemos la siguiente hipótesis general:

"*El desempeño hidráulico de la bomba de ariete hidráulico universal con tubería de suministro de PVC, proveerá caudales de hasta 10 l/min y alturas de bombeo de hasta 50 metros*"

La hipótesis general contiene dos hipótesis, la primera respecto al caudal de bombeo máximo y la segunda respecto a la altura de descarga máxima. La Tabla 58 se expresa las hipótesis en su forma estadística.

Tabla 58

Hipótesis estadística generales

N.º	Hipótesis estadística	Descripción
1	$H_0 : q_{max} = 10$	El caudal de bombeo máximo es de 10 l/min.
	$H_1 : q_{max} < 10$	El caudal de bombeo máximo es menor de 10 l/min.
2	$H_0 : h_{max} = 50\ (q = 0)$	La altura de descarga máxima es de 50 m.
	$H_1 : h_{max} < 50\ (q = 0)$	La altura de descarga máxima es menor a 50 m.

Nota. H_0 Hipótesis nula, H_1 Hipótesis alternativa.

Estas hipótesis las probaremos mediante la prueba t de Student para una muestra pequeña de una población normal con desviación estándar σ desconocida.

3.2.4.2 Formulación de las hipótesis específicas

Del ítem 1.6.2, tenemos las siguientes hipótesis específicas:

- *"La relación longitud y diámetro de la tubería de suministro L/D = 500, es la que genera el mejor desempeño, en las variables dependientes: caudal de bombeo relativo q/Q_T, caudal de funcionamiento relativo Q/Q_T, parámetro de la válvula de impulso nD/v_c y eficiencia η"*

- *"La relación de la altura de descarga y altura de suministro h/H = 5, es la que genera el mejor desempeño, en las variables dependientes: caudal de bombeo relativo q/Q_T, caudal de funcionamiento relativo Q/Q_T, parámetro de la válvula de impulso nD/v_c y eficiencia η"*

Ambas hipótesis hacen referencia al mejor desempeño en niveles específicos de los factores estudiados: L/D = 500 y h/H = 5.

En el ítem 2.2.1.3, se mencionó que la eficiencia es secundaria cuando el suministro de agua es abundante. En la Tabla 59 se divide el análisis según este criterio.

En la Tabla 59 se muestra las condiciones de mejor desempeño de la bomba de ariete en términos de las variables dependientes.

Tabla 59

Mejor desempeño de variables dependientes.

Caudal de Suministro*	Variable dependiente	Descripción
Limitado	η_{max} [1]	Mejor desempeño cuando η es máximo.
Abundante	$q/Q_T \uparrow$ [2]	Mejor desempeño cuando q/Q_T o q es máximo. Ofrece mayores caudales de descarga.
	$Q/Q_T \downarrow$	Mejor desempeño cuando Q/Q_T es mínimo. El desperdicio relativo es menor.
	$nD/v_c \uparrow$	Mejor desempeño cuando el nD/v_c o n es máximo.

Nota. *El suministro hace referencia a la disponibilidad de agua. [1] punto de Eficiencia Máxima. [2] punto de Bombeo Máximo.

El análisis estadístico más conveniente en este caso es por tratamiento. Es decir, comparamos los tratamientos uno a uno para comparar las respuestas (o variable dependiente).

Los tratamientos se plantearon en el ítem 3.1.3.7.2. Sea el tratamiento $Xi(j;\ k)$ = $Xi(h/H_j;\ L/D_k)$ el que genera mejor desempeño en las variables dependientes de la Tabla 59, entonces la hipótesis estadística la podemos escribir como se indica en la Tabla 60.

La prueba de hipótesis, en este caso, consistirá en averiguar si existe diferencia significativa entre las medias poblacionales de los tratamientos.

Para probar las hipótesis, se puede utilizar es el análisis de varianza factorial (ANOVA factorial) para comparar medias poblacionales de niveles de los factores h/H, L/D y de la interacción $h/H^{*}L/D$.

Tabla 60

Definición de hipótesis estadística específicas

N.º	Hipótesis estadística	Descripción
1	H_0: (h/H_j; L/D_k) = (5; 500) (η_{max})	- En el tratamiento “(5; 500)” se da la máxima eficiencia.
	H_1: (h/H_j; L/D_k) ≠ (5; 500) (η_{max})	- La eficiencia máxima se da en un tratamiento diferente de “(5; 500)”.
2	H_0: (h/H_j; L/D_k) = (5; 500) (q/Q_T ↑)	- En el tratamiento “(5; 500)” se da el máximo q/Q_T
	H_1: (h/H_j; L/D_k) ≠ (5; 500) (q/Q_T ↑)	- El caudal de descarga relativo máximo (q/Q_T ↑) se da en un tratamiento diferente de “(5; 500)”.
3	H_0: (h/H_j; L/D_k) = (5; 500) (Q/Q_T ↓)	- En el tratamiento “(5; 500)” se da el mínimo Q/Q_T
	H_1: (h/H_j; L/D_k) ≠ (5; 500) (Q/Q_T ↓)	- El caudal de desperdicio relativo mínimo (Q/Q_T ↓) se da en un tratamiento diferente de “(5; 500)”.
4	H_0: (h/H_j; L/D_k) = (5; 500) (nD/v_c ↑)	- En el tratamiento “(5; 500)” se da el máximo nD/v_c
	H_1: (h/H_j; L/D_k) ≠ (5; 500) (nD/v_c ↑)	- El parámetro de la válvula de impuso máximo (q/Q_T ↑) se da en un tratamiento diferente de “(5; 500)”.

Nota. H_0 Hipótesis nula, H_1 Hipótesis alternativa.

3.2.4.3 Prueba de hipótesis estadísticas

3.2.4.3.1 Hipótesis general: Prueba t-Student.

3.2.4.3.1.1 Hipótesis general 1: Caudal de bombeo máximo q_{max}

El q_{max} alcanzado fue de 5.915 l/min (Anexo 1.4.1). Con esto, a priori, se rechaza la hipótesis nula. A manera de comprobación se realiza la prueba t-student:

- Hipótesis: H_0: q_{max} = 10, contra H_1: q_{max} < 10 (prueba cola izquierda Tabla 58)
- Media muestral y desviación estándar: $\bar{x}_{qmax}$ = 5.793 s = 0.0807
- Cantidad de observaciones: n = 5 (Para h/H = 2.3, L/D = 400, H = 3 m)
- Estadístico de prueba: $t=\frac{\bar{x}-\mu_0}{s/\sqrt{(n)}}=\frac{5.793-10}{0.0807/\sqrt{(5)}}=-116.5$
- t crítico para 4 grados de libertad y α = 0.05, $t_{(n-1,\,\alpha)}$ = - 2.132
- Intervalo de confianza (cola izquierda): $\bar{x}-t_{\alpha}\frac{s}{\sqrt{(n)}}=5.793-(-2.132)\frac{0.0807}{\sqrt{(5)}}=5.87$

Como el t experimental es mucho menor al t crítico (-2.132 > -116.6), entonces, se dice que cae en la región de rechazo de la prueba t cola izquierda. Con lo que se rechaza la hipótesis nula H_0: q_{max} = 10.

El intervalo de confianza nos dice que con un nivel de confianza del 95%, a lo más la media poblacional se encontraría en 5.87 l/min.

La prueba de hipótesis se puede hacer también sobre la base de diferencia de medias igual a cero H_0: $\bar{x} - u_0 = 0$, con u_0 = 10, considerando esto, las tablas 61 y 62 muestran resultados en el software estadístico JASP.

La Tabla 61 muestra el valor p de 1.6 × 10^{-8}, el cual se encuentra muy por debajo del nivel de significancia α = 0.05, con lo cual se rechaza la hipótesis nula de diferencia de medias igual a cero.

Tabla 61

Contraste T para Una Muestra

					IC del 95% para Diferencia de Medias	
	t	gl	p	Diferencia de Medias	Inferior	Superior
q	-116.54603	4	1.62524×10^{-8}	-4.20732	-∞	-4.13036

Nota. Contraste t de Student. Para el Contraste t de Student, la hipótesis alternativa indica que la media es menor que 10.

La Tabla 62 nos muestra estadísticos descriptivos de la muestra para el tratamiento seleccionado. Se observa que los datos cumplen el supuesto de normalidad con un p = 0.43 (p > 0.05) de la prueba de Shapiro-Wilk.

Tabla 62

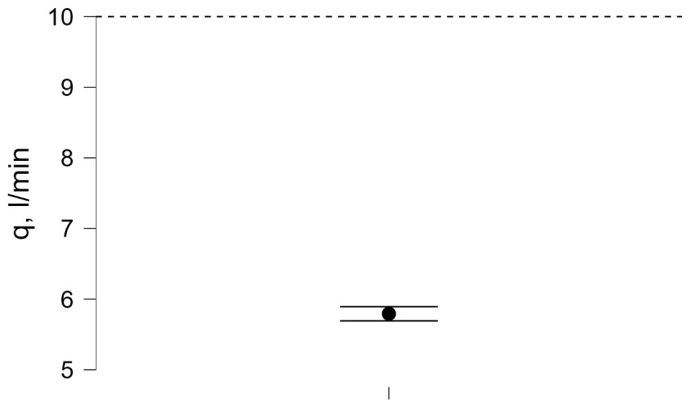
Estadísticos descriptivos del caudal de descarga máximo q_{max}

	Válido	Media	Error Típico de la Media	Desviación Típica	Coeficiente de variación	Shapiro-Wilk	Valor de p de Shapiro-Wilk
q	5	5.79268	0.03610	0.08072	0.01394	0.90338	0.42883

En la Figura 50 se observa una diferencia clara entre la media del tratamiento y el planteado en la hipótesis. Las dos barras corresponden al intervalo de confianza del 95% para la media.

Figura 50

Caudal máximo de bombeo y límite esperado de 10 l/min.



Nota. Tratamiento de mayor caudal para h/H = 2.3, L/D = 400, con un H = 3m

3.2.4.3.1.2 Hipótesis general 2: Altura de descarga máxima h_{max}

Las estadísticas descriptivas de la altura de descarga máxima (Anexo 1.3.1.4) nos muestran que el h_{max} alcanzado fue de 45.426 m para L/D = 600 y H = 3 m.

De la Tabla 58 tenemos la hipótesis nula H_0: h_{max} = 50, contra H_1: h_{max} < 50 (prueba cola izquierda)

Se puede realizar un análisis similar a la Hipótesis general 1 con la prueba t-student, sin embargo, resumimos el análisis considerando sólo los resultados del Software JASP.

En la Tabla 63, el valor p es de 1.11×10^{-11} ($p < 0.05$), y una diferencia de medias de -5.293, con lo cual se rechaza la hipótesis nula H_0: $\bar{x} - u_0 = 0$, con u_0 = 50.

El intervalo de confianza del 95% nos dice que la diferencia de medías puede reducirse hasta -5.046.

Tabla 63

Contraste T para Una Muestra

					IC del 95% para Diferencia de Medias	
	t	gl	p	Diferencia de Medias	Inferior	Superior
h	-39.29269	9	1.11355×10^{-11}	-5.29304	-∞	-5.04610

Nota. Contraste t de Student. Para el Contraste t de Student, la hipótesis alternativa indica que la media es menor que 10.

En la Tabla 64 se muestran estadísticos descriptivos de la altura de descarga máxima para L/D = 600 y H = 3 m. Los datos siguen una distribución normal con un valor p de 0.082 (p>0.05). En el Anexo 1.3.1.4 se amplia las estadísticas descriptivas de la altura máxima, el valor promedio difiere dado que aquí se tomó pruebas válidas (10).

Tabla 64

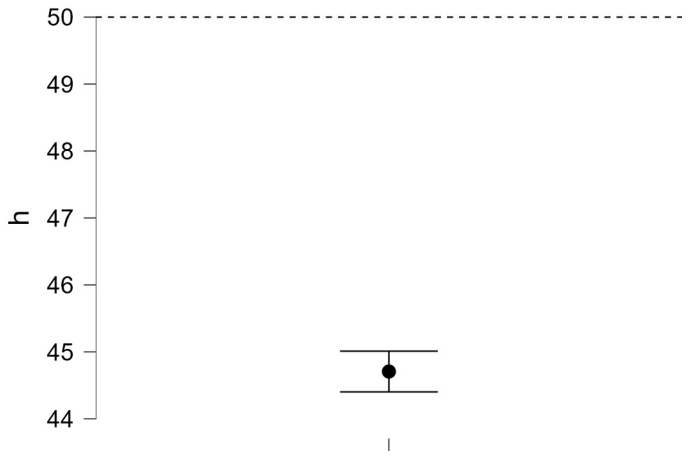
Estadísticos Descriptivos

	Válido	Media	Error Típico de la Media	Desviación Típica	Coeficiente de variación	Shapiro-Wilk	Valor de p de Shapiro-Wilk
h	10	44.70696	0.13471	0.42598	0.00953	0.86260	0.08188

En la Figura 51 se observa una diferencia clara de las medias $\bar{x} - u \neq 0$, con una diferencia de -5.293 según la Tabla 63.

Figura 51:

Gráfico descriptivo de la altura máxima y límite esperado de 50 m.



Nota. Se muestra el valor promedio y el intervalo de confianza del 95% para la media. Tomado para L/D = 600 y H = 3 m.

3.2.4.3.2 Hipótesis específicas - ANOVA factorial

3.2.4.3.2.1 Hipótesis específica 1: Eficiencia máxima η

De las estadísticas descriptivas tenemos que la eficiencia máxima se da en el rango de valores h/H = {3, 4, 5, 6} y L/D = {400, 500, 600} (ítem 3.2.2.4).

Realizamos el análisis de varianza (ANOVA) para estos valores y verificar las diferencias entre las medias de tratamientos.

La Tabla 65, es la tabla ANOVA de dos vías, en ésta se observa que los valores p de los efectos principales y de la interacción son menores al nivel de significancia de α = 0.05, por tanto, se rechaza la hipótesis nula del ANOVA que indica que las medias de los tratamientos son iguales. Esto significa que hay al menos una media diferente.

Tabla 65

ANOVA - η

Casos	Suma de Cuadrados	gl	Cuadrado Medio	F	p
h/H	0.01315	3	0.00438	14.80594	3.83855×10^{-8}
L/D	0.02103	2	0.01051	35.50959	1.40704×10^{-12}
$h/H * L/D$	0.00891	6	0.00149	5.01545	0.00014
Residuals	0.03198	108	0.00030		

Nota. Suma de Cuadrados Tipo III

Antes de nada, verificamos el cumplimientos de los supuestos del ANOVA. En la Tabla 66 se verifica el supuesto de homocedasticidad con un p = 0.36 (p > 0.05). En la Figura 52 se verifica el supuesto de normalidad de residuos, dado el comportamiento de los puntos.

Tabla 66

Contraste de Igualdad de Varianzas (de Levene)

F	gl1	gl2	p
1.11	11	108	0.36055

La gráfica de interacción (Figura 53) nos da una idea donde se podrían encontrar las diferencias. También nos permite ver que tratamiento ofrecen mejores eficiencias.

Figura 52

Gráfico Q-Q, para verificación del supuesto de normalidad.

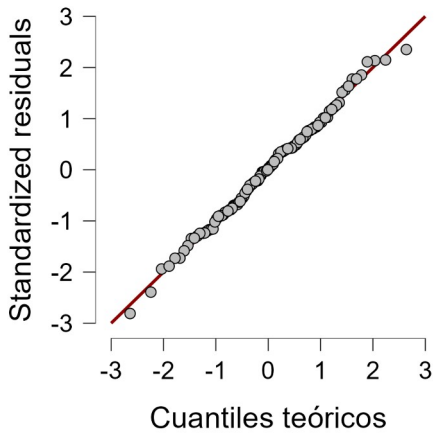
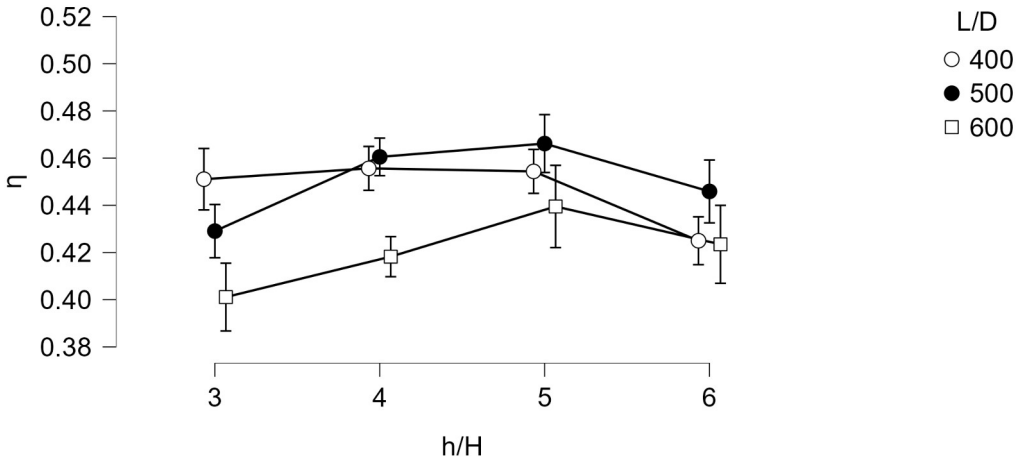


Figura 53

Gráfico descriptivo.



Nota. Las barras indican el intervalo de confianza del 95% para la media.

La verificación estadística la realizamos con la prueba Pos-hoc de Tukey, dado que existe interacción de las variables por el valor p = 0.00014 en la Tabla 65.

La Tabla 67 es un resumen de la prueba Pos-hoc de la interacción $h/H \ast L/D$. Sólo se ha considerado las comparaciones con diferencia significativa (p<0.05).

En la Tabla 67, los tratamientos “(3; 600)”, “(4; 600)”, “(6; 400)” y “(6; 600)”, son los que tienen mayor diferencia con otros tratamientos (p<0.05). De la Figura 53 se observa que estos cuatro tratamientos corresponden a los de eficiencia más baja.

Tabla 67

Comparación Pos-hoc de tratamientos uno a uno con valores p<0.05.

Tratamiento	Tratamiento							
	(3; 500)	**(3; 600)**	(4; 500)	**(4; 600)**	(5; 500)	(5; 600)	**(6; 400)**	**(6; 600)**
(3; 400)		1.734E-07		0.00243			0.04358	0.02418
(3; 500)		0.02092	0.00462		0.00029			
(3; 600)						0.00014		
(4; 400)	0.03603	9.670E-09		0.00024			0.00657	0.00328
(4; 500)		4.146E-10		0.00002				0.00029
(5; 400)		2.190E-08		0.00047			0.01152	0.00591
(5; 500)		9.895E-12		6.037E-07		0.03504		0.00001
(6; 400)			0.00064		0.00003			
(6; 500)		3.962E-06		0.02379				

Nota. Tratamiento: (h/H – L/D). Los espacios vacíos indican valores p > 0.05.

Si volvemos a realizar el análisis de varianza (ANOVA) sin considerar estos 4 tratamientos y seguimos el mismo procedimiento, obtenemos la Tabla 68 (Similar a la Tabla 67).

La Tabla 68 compara tratamiento a tratamiento con un p < 0.05 de la prueba Pos-hoc de la interacción h/H ✻ L/D. Se observa que, el tratamiento “(3; 500)” es diferente a los otro cuatro, mientras que los tratamientos “(5; 600)” y “(5; 500)” son mutuamente diferentes.

Tabla 68

Comparación de tratamientos uno a uno mediante valores p (p<0.05)

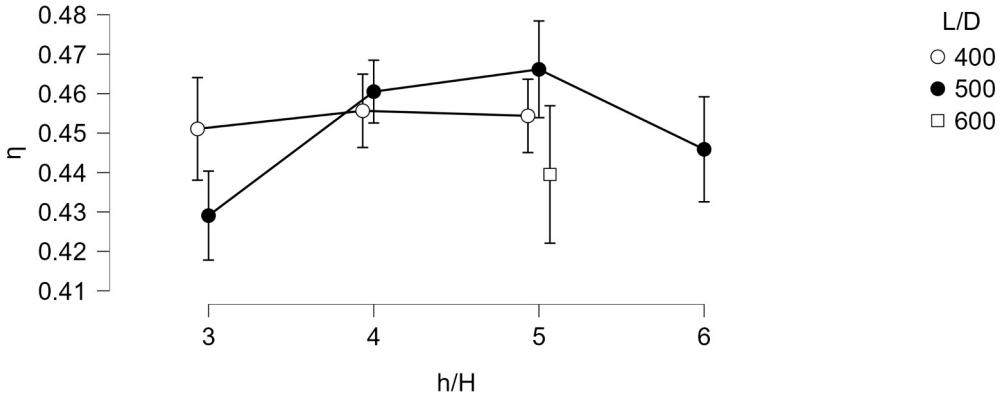
Tratamiento	Tratamiento		
	(3; 500)	(4; 500)	(5; 600)
(3; 500)		0.0021	
(4; 400)	0.0162		
(5; 400)	0.0265		
(5; 500)	0.0001		0.0157

Nota. Tratamiento: (h/H – L/D). Los espacios vacíos indican valores p > 0.05.

De la Figura 54, los tratamientos “(3-500)” y “(5-600)” son los menores, entonces los quitamos.

Figura 54

Gráfico descriptivo.



Finalmente realizamos el ANOVA con los tratamientos restantes, comprobando que no hay diferencia significativa entre ninguno p = 0.078 (Tabla 69).

Tabla 69

ANOVA - η

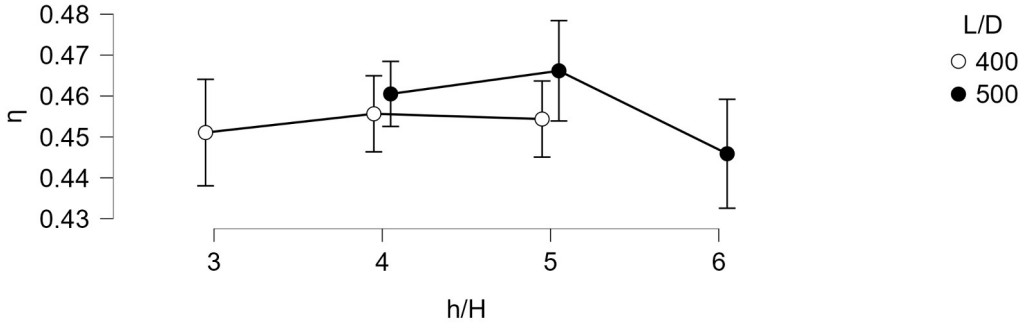
Casos	Suma de Cuadrados	gl	Cuadrado Medio	F	*p*
Tratamientos	0.00252	5	0.00050	2.11021	0.07817
Residuals	0.01291	54	0.00024		

Nota. Suma de Cuadrados Tipo III

La Figura 55 se observa los valores medios y el intervalo de confianza del 95% para la media de cada tratamiento. Se observa que los intervalos se traslapan.

Figura 55

Gráfico descriptivo.



Nota. Las barras indican el intervalo de confianza del 95% para la media.

En la Tabla 70 y Figura 56 se cumplen los supuestos de igualdad de varianzas y de normalidad de residuos del ANOVA final de la Tabla 69.

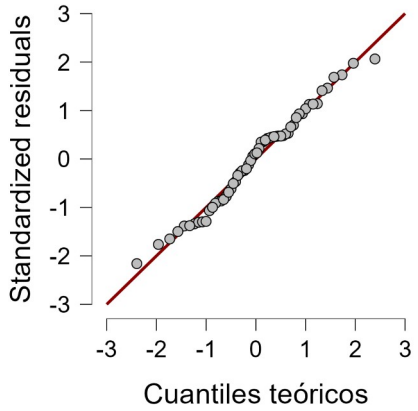
Tabla 70

Contraste de Igualdad de Varianzas (de Levene)

F	gl1	gl2	*p*
1.02695	5	54	0.41116

Figura 56:

Gráfico Q-Q, para verificación del supuesto de normalidad.



Finalmente, la Tabla 71 muestra los estadísticos de los 6 tratamientos finales.

Tabla 71

Estadísticos Descriptivos

Trata-miento	Válido	Media	Error Típico de la Media	Desviación Típica	Coeficiente de variación	Shapiro-Wilk	Valor de *p* de Shapiro-Wilk
(5; 400)	10	0.454	0.0041	0.0130	0.0286	0.88	0.15
(4; 400)	10	0.456	0.0041	0.0130	0.0285	0.94	0.54
(3; 400)	10	0.451	0.0058	0.0182	0.0403	0.92	0.38
(5; 500)	10	0.466	0.0054	0.0172	0.0368	0.81	0.02
(4; 500)	10	0.461	0.0035	0.0111	0.0242	0.97	0.89
(6; 500)	10	0.446	0.0059	0.0186	0.0418	0.90	0.23

Conclusiones de la hipótesis específica 1.

El tratamiento "(5; 500)" tiene el mayor valor promedio de eficiencia igual a 46.6% (Tabla 71), sin embargo, no tiene diferencia estadística significativa respecto a otros cinco tratamientos, con un p = 0.078 (Tabla 69) .

Por ende, no se rechaza la hipótesis nula inicial H_0: (h/H_i, L/D_j) = (5; 500) (η_{max}). de eficiencia máxima en el tratamiento "(5; 500)", sin embargo precisar que esta eficiencia máxima se obtiene también en los tratamientos: "(3; 400)", "(4; 400)", "(5; 400)", "(4; 500)" y "(6; 500)".

3.2.4.3.2.2 Hipótesis específica 2 y 3: Máximo q/Q_T y mínimo Q/Q_T (Tabla 60)

Ambas variables son complementarias, es decir $q + Q = Q_T$, o también $q/Q_T + Q/Q_T = 1$. Entonces el análisis de ambas hipótesis será similar:

H_0: (h/H_j; L/D_k) = (5; 500) ($q/Q_T \uparrow$)

H_0: (h/H_j; L/D_k) = (5; 500) ($Q/Q_T \downarrow$)

De las estadísticas descriptivas (ítem 3.2.2.1 y 3.2.2.2), se observa que la condición de máximo q/Q_T y mínimo Q/Q_T se da cuando h/H es mínimo.

En la Figura 26 y Figura 29, se observa que los valores más bajos de h/H se encuentran entre 2 y 3. En la Tabla 20 del ítem 3.1.3.7.2, se indicó que h/H = {2.3, 2.4, 2.5}, son los valores mínimos donde la bomba de ariete es estable para H = {2 m, 3 m}

Para fines de probar las hipótesis usaremos el valor de h/H = 3, dado que, es donde se tienen más mediciones para las alturas de suministro (ver Anexo 1.3.2.1).

Respecto a la hipótesis planteada, los valores medios de q/Q_T y Q/Q_T en el tratamiento (5; 500) se encuentran en 0.1 y 0.9 respectivamente (ver Figura 26 y 29), no siendo estos los de “mejor desempeño”. Entonces, a priori, descartamos la altura relativa h/H = 5, como factor donde se genera el mejor desempeño en las variables q/Q_T y Q/Q_T.

En el caso de la variable L/D = 500 su efecto es similar al de L/D = {400, 600}, por tanto, probaremos la hipótesis de igualdad de medias para los tratamientos: "(3; 400)", "(3; 500)" y "(3; 600)", mediante el análisis de varianza ANOVA.

La Tabla 72, es la tabla ANOVA, donde el valor p = 3.7×10^{-6} es menor al nivel de significancia α = 0.05, por lo tanto, al menos uno de los tratamientos es diferente.

Tabla 72

ANOVA - q/Q_T

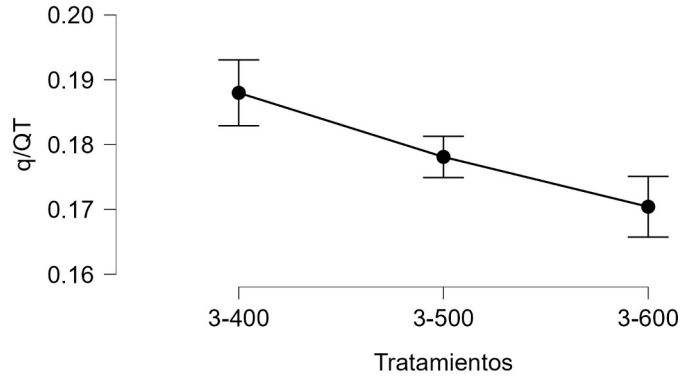
Casos	Suma de Cuadrados	gl	Cuadrado Medio	F	*p*
Tratamientos	0.00155	2	0.00078	20.60451	3.68592×10^{-6}
Residuals	0.00102	27	0.00004		

Nota. Suma de Cuadrados Tipo III

La Figura 57 se observa los valores medios y el intervalo de confianza del 95% para la media de cada tratamiento. Se observa que “(3; 400)” es aparentemente mayor.

Figura 57

Gráfico descriptivo.



Nota. Las barras indican el intervalo de confianza del 95% para la media.

Finalmente, la Tabla 73, es la prueba Post-hoc, donde se compara uno a uno cada tratamiento. Se observa que, en los tres casos encontramos diferencias significativas (p<0.05). Es decir, los tres tratamientos son mutuamente diferentes.

Tabla 73

Prueba Estándar (LSD) Comparaciones Post-hoc - Tratamientos

		Diferencia de Medias	ET	*t*	p_{Tukey}
(3; 400)	(3; 500)	0.00989	0.00274	3.60278	0.00347
	(3; 600)	0.01757	0.00274	6.40267	2.16347×10^{-6}
(3; 500)	(3; 600)	0.00768	0.00274	2.79988	0.02450

Nota. Valor p ajustado para comparar una familia de 3

En la Tabla 74 se muestra los estadísticos de las variables q/Q_T y Q/Q_T para los tres tratamientos "(3; 400)", "(3; 500)" y "(3; 600)". Se observa que los estadísticos para (3; 400) tienen mejores valores para ambas variables.

Tabla 74

Estadísticos Descriptivos

Variable	Tratamiento	Válido	Media	Error Típico de la Media	Desviación Típica	Coeficiente de variación	Shapiro-Wilk	Valor de p de Shapiro-Wilk
q/Q_T	3-400	10	0.18798	0.00224	0.00710	0.03775	0.90909	0.27478
	3-500	10	0.17810	0.00141	0.00444	0.02495	0.74263	0.00290
	3-600	10	0.17042	0.00207	0.00654	0.03840	0.97079	0.89807
Q/Q_T	3-400	10	0.81202	0.00224	0.00710	0.00874	0.90909	0.27478
	3-500	10	0.82190	0.00141	0.00444	0.00541	0.74263	0.00290
	3-600	10	0.82958	0.00207	0.00654	0.00789	0.97079	0.89807

En la Tabla 75 y Figura 58 se cumplen los supuestos de igualdad de varianzas y de normalidad de residuos del ANOVA.

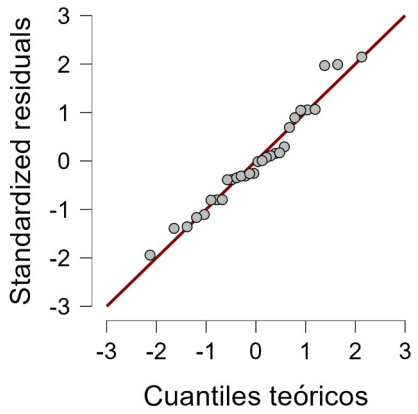
Tabla 75

Contraste de Igualdad de Varianzas (de Levene)

F	gl1	gl2	p
1.79045	2	27	0.18614

Figura 58

Gráfico Q-Q, para verificación del supuesto de normalidad.



Conclusiones de la hipótesis específica 2 y 3.

Por tanto, se concluye que el tratamiento “(3; 400)”, es el que da mejores desempeños de las variables q/Q_T y Q/Q_T.

Se rechaza la hipótesis nula específica 2 y 3 (Tabla 60) donde se indica que el mejor desempeño de ambas variables se da en el tratamiento “(5; 500)”.

3.2.4.3.2.3 Hipótesis específica 4: Máximo nD/v_c (Tabla 60)

En el ítem 3.2.2.3, se verificó que la variable nD/v_c, depende principalmente de las variables L/D y el número de Reynolds (Re). El factor h/H genera poco efecto.

En la Figura 32, se observa que L/D = 400 genera mayores valores en la variable nD/v_c. Por otra parte, menores valores de Re también tienen el mismo efecto.

Analizando la hipótesis planteada (Tabla 60):

H_0: (h/H_j; L/D_k) = (5; 500) (nD/v_c ↑)

H_1: (h/H_j; L/D_k) ≠ (5; 500) (nD/v_c ↑)

Primero, se descarta la variable h/H como determinante en el mejor desempeño de la variable h/H. Así mismo, la relación L/D = 500, no genera los mejores resultados en la variable nD/v_c (Figura 32).

Realizamos el análisis de varianza para verificar las diferencias entre las medias de la variable nD/v_c a partir de valores de L/D y Re. Dado que el número de Reynolds está muy disperso utilizamos la variable H, para representar el conjunto de datos (ver Anexo 1.4.4).

La Tabla 76 es la tabla ANOVA, se observa que existe diferencias significativas entre las variables (factores principales) con valores p < 0.05, así mismo, un efecto de interacción entre L/D y H con un valor p = 0.00052.

Tabla 76

ANOVA - nD/v_c

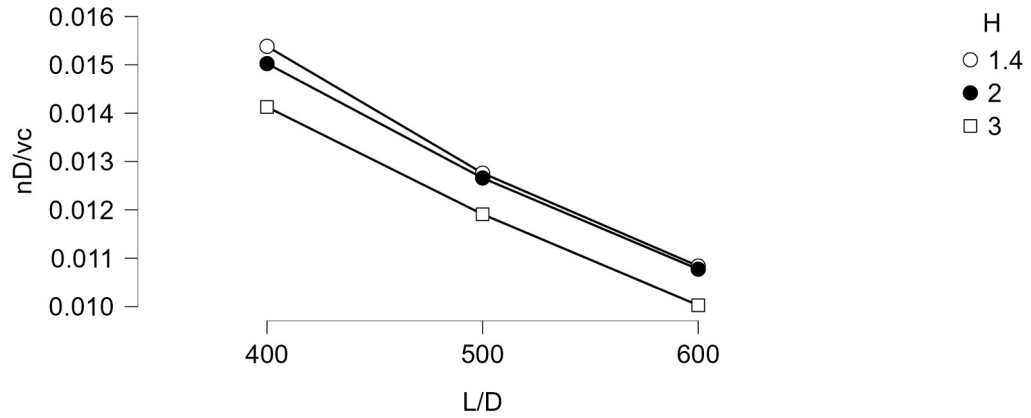
Casos	Suma de Cuadrados	gl	Cuadrado Medio	F	p
L/D	0.00088	2	0.00044	4914.38489	5.54757×10^{-225}
H	0.00006	2	0.00003	315.66018	1.27682×10^{-73}
L/D ✻ H	1.83891×10^{-6}	4	4.59728×10^{-7}	5.12996	0.00052
Residuals	0.00003	291	8.96163×10^{-8}		

Nota. Suma de Cuadrados Tipo III

La Figura 59, es la gráfica de interacción, se observa curvas con efectos evidentes de L/D y H. Para verificar la interacción realizamos la prueba Pos-hoc.

Figura 59

Gráfico descriptivo.



En la Tabla 77, resume los valores p>0.05 de la prueba Pos-hoc, donde confirma que sólo dos combinaciones tienen medias estadísticamente “no diferentes”, todas las demás combinaciones de tratamientos son diferentes (p<0.05).

Tabla 77

Comparación de combinaciones uno a uno mediante valores p

Tratamiento	Tratamiento	
	(500; 2)	(600; 2)
(500; 1.4)	**0.94136**	
(600; 1.4)		**0.9963**

En la Tabla 78 se resumen algunos estadísticos descriptivos para la combinación “(L/D; H)”, donde el tratamiento (400; 1.4) es el de mejor desempeño (máximo).

Tabla 78

Estadísticos Descriptivos

Trata-miento	Válido	Media	Error Típico de la Media	Desviación Típica	Coeficiente de variación	Shapiro-Wilk	Valor de p de Shapiro-Wilk
(400; 1.4)	24	0.01538	0.00005	0.00027	0.01730	0.98352	0.95080
(400; 2)	34	0.01503	0.00006	0.00032	0.02150	0.93201	0.03580
(400; 3)	42	0.01413	0.00005	0.00035	0.02468	0.95167	0.07412
(500; 1.4)	24	0.01276	0.00005	0.00022	0.01730	0.97663	0.82651
(500; 2)	34	0.01266	0.00005	0.00028	0.02186	0.92692	0.02547
(500; 3)	42	0.01191	0.00005	0.00029	0.02449	0.97462	0.46554
(600; 1.4)	24	0.01084	0.00005	0.00024	0.02202	0.89000	0.01329
(600; 2)	34	0.01077	0.00005	0.00029	0.02700	0.94663	0.09730
(600; 3)	42	0.01003	0.00005	0.00034	0.03406	0.96407	0.20616

En la Tabla 79 se verifica el supuesto de homocedasticidad con un p = 0.18 (p > 0.05) y en la Figura 60 se verifica el supuesto de normalidad de residuos del ANOVA.

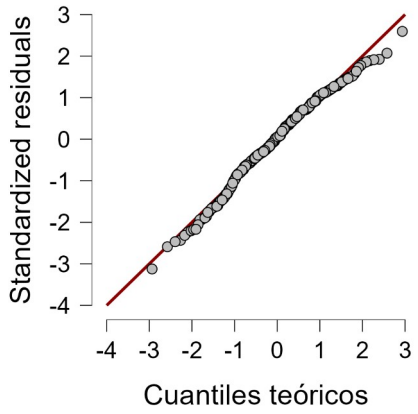
Tabla 79

Contraste de Igualdad de Varianzas (de Levene)

F	gl1	gl2	p
1.44078	8	291	0.17904

Figura 60

Gráfico Q-Q, para verificación del supuesto de normalidad.



Conclusiones de la hipótesis específica 4.

A partir de la Figura 59 y Tabla 77, se concluye que el valor de L/D = 400 para H = 1.4 m, es el que genera mejor desempeño de la variable nD/v_c. Por tanto, se rechaza la hipótesis nula inicial para L/D = 500.

La variable h/H no tiene efecto significativo en la variable nD/v_c o parámetro de la válvula de impulso.

3.2.4.4 Conclusiones de la prueba de hipótesis estadística

Hipótesis general

Se rechaza la hipótesis nula del caudal de bombeo máximo con un valor p = 1.6×10^{-8} (Tabla 61) y altura de descarga máxima con un valor p = 1.11×10^{-11} (Tabla 63). Se verifica que los valores alcanzados son menores a los indicados en la hipótesis. Los valores medios alcanzados son los siguientes:

- q_{max} = 5.79 l/min, para h/H = 2.3, L/D = 400, H = 3 m
- h_{max} = 44.7 m, cuando q = 0 l/min, para L/D = 600 y H = 3 m

Hipótesis específica

Hipótesis específica 1: No se rechaza la hipótesis nula para la eficiencia máxima en el tratamiento “(5; 500)”. Sin embargo, la eficiencia máxima se obtiene también en otros tratamientos: "(3; 400)", "(4; 400)", "(5; 400)", "(4; 500)" y "(6; 500)", todos estos no presentan diferencia significativa en la prueba ANOVA con un valor p = 0.078 (Tabla 69).

Hipótesis específica 2 y 3: Se rechaza la hipótesis nula de mejor desempeño en el tratamiento “(5; 500)”. Se concluye que el tratamiento “(3; 400)”, es el que da mejores valores de las variables q/Q_T y Q/Q_T (Figura 57 y Tabla 73).

Hipótesis específica 4: Se concluye que el valor de L/D = 400 y H = 1.4 m es el que genera mejor desempeño de la variable nD/v_c. Por tanto, se rechaza la hipótesis nula inicial para L/D = 500. También, la variable h/H no tiene efecto significativo en la variable nD/v_c o parámetro de la válvula de impulso (Figura 59 y Tabla 77).

Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

4.1 Explicación de la dispersión/variabilidad del experimento

En los ítems siguientes se analiza la variabilidad encontrada en cada variable dependiente.

4.1.1 Variables q/Q_T y Q/Q_T

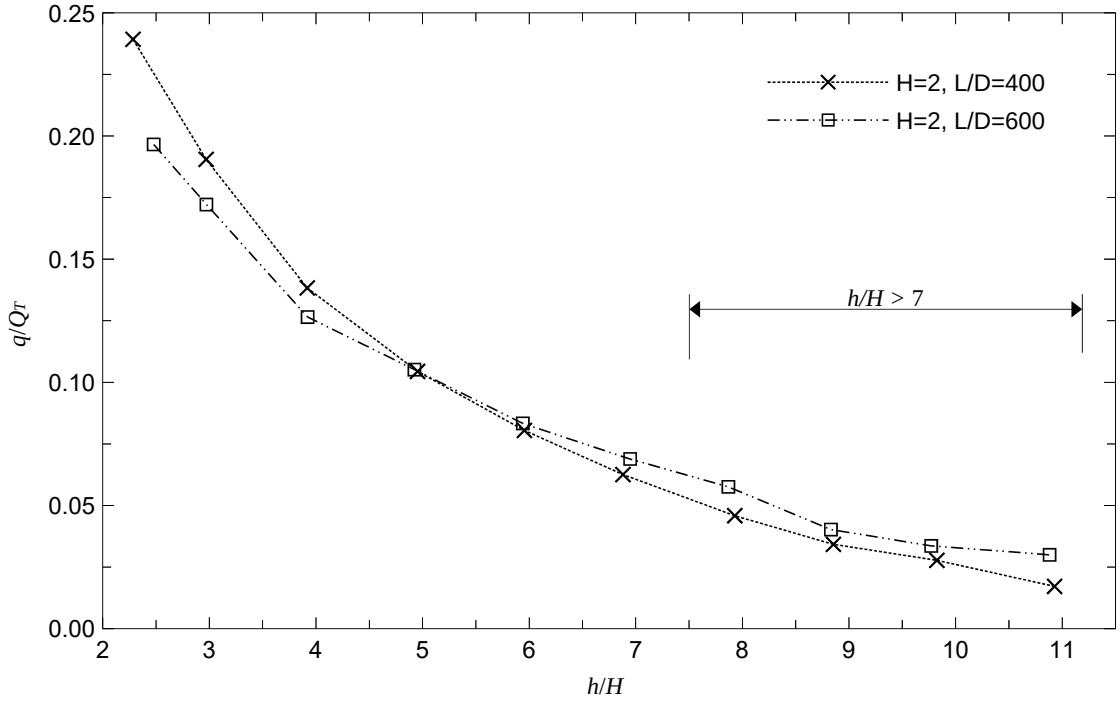
Como se mencionó en los ítems 3.2.2.2 y 3.2.3.3, las variables q/Q_T y Q/Q_T son complementarias, por ende, la variabilidad encontrada es similar para ambas.

La variabilidad puede explicarse por el cambio de la variable L/D, la interacción L/D * h/H, y por cada prototipo de válvula de impulso utilizada. A partir de ello, es posible aislar los efectos y conseguir curvas menos dispersas.

En la Figura 61 se observa que a mayor relación L/D, los datos tienden "girar" en torno a valores de h/H entre 5 y 6 (interacción).

Figura 61

Efecto de la variable L/D y su interacción con la relación de alturas h/H



En la Figura 24 del ítem 3.2.2, se analizó la dispersión vertical y horizontal de los datos. Según se indicó, la dispersión vertical de q/Q_T se da principalmente por la presencia de golpes defectuosos, los cuales aparecen a bajas h/H.

Por otro lado, un efecto de separación se aprecia cuando h/H > 7. En la Figura 62, se observa las curvas de q/Q_T para L/D = 600 donde se aprecia este efecto. Cada curva corresponde a un prototipo diferente. El efecto de separación se reduce a menor L/D entre prototipos (Figura 63).

Para el presente estudio, no está claro que variable influye decisivamente en esta variabilidad, por un lado, podría ser:

- por la altura de suministro aplicada,
- por el ajuste particular a cada válvula de impulso (cambio de la velocidad crítica)
- por las características constructivas de cada prototipo.

Se requiere estudios posteriores con el fin de esclarecer esta variabilidad.

Figura 62

Efecto del prototipo de válvula de impulso en el desempeño del ariete.

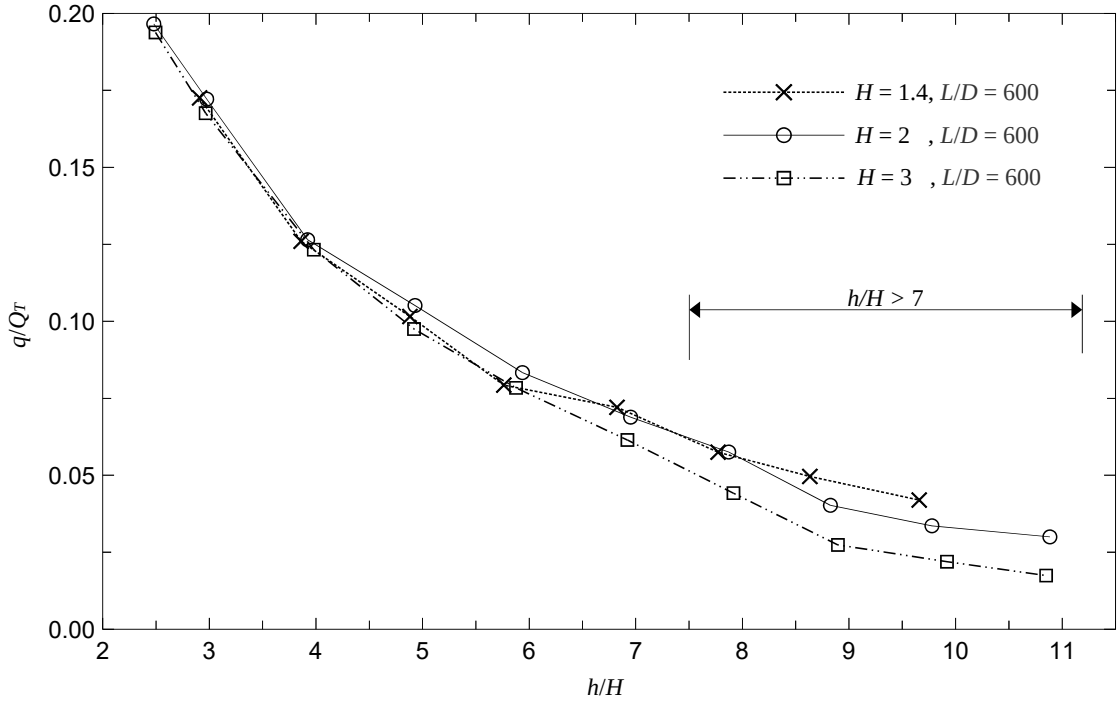
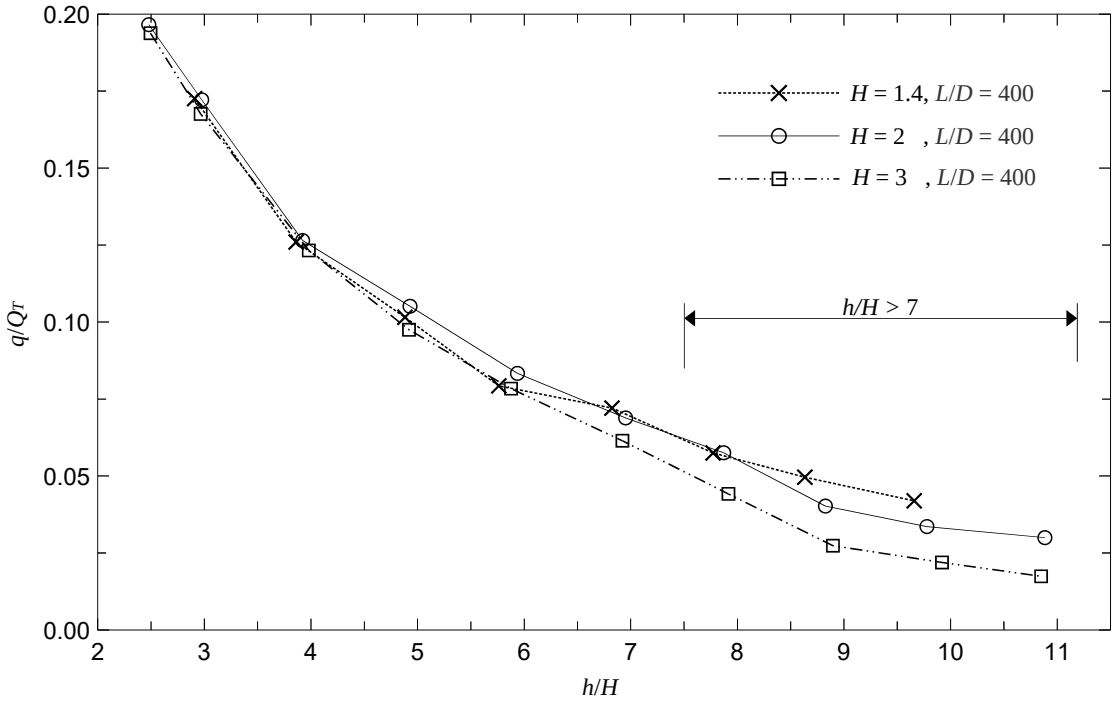


Figura 63

Efecto del prototipo de válvula de impulso en el desempeño del ariete.



4.1.2 Eficiencia de Rankine

En el ítem 2.2.1.3, se estudió las expresiones de eficiencia usualmente utilizadas. Al respecto Tacke (1988) menciona que es preferible utilizar la eficiencia de Rankine, dado que las otras expresiones “admiten eficiencias cuando no hay una producción neta superior a la elevación de superficie de la fuente de suministro”.

Podemos acomodar la expresión de eficiencia de Rankine de la siguiente manera (Ecuación 45):

$$\eta=\frac{q\times(h-H)}{Q\times H}\rightarrow \eta=\frac{q}{Q}\times\left(\frac{h}{H}-1\right) \tag{45}$$

Se observa la dependencia que la eficiencia de Rankine se puede calcular a partir de las variables q/Q y h/H, es decir, estas variables influyen en la eficiencia final del ariete, esta deducción puede parecer trivial, sin embargo, permite explicar la dispersión de la eficiencia para $h/H > 7$.

La alta dispersión de observaciones de la eficiencia (Figura 35) son debido, en principio, a la dispersión de valores de la respuesta q/Q_T cuando $h/H > 7$.

Por ejemplo, para $h/H = 11$ se tiene una eficiencia de $\eta = q/Q$ * (10), con $q/Q_T \in$ [0.015, 0.248] (Tabla 37), entonces la eficiencia varía entre un 15% y 24.8%, esto pues $q/Q \approx q/Q_T$.

Por tanto, para valores altos de h/H, el producto de q/Q y (h/H - 1), tiende a depender fuertemente de q/Q, por lo que la dispersión se explica por la dispersión de la variable q/Q_T.

4.1.3 Parámetro de la válvula de impulso

Los valores del parámetro tienen menor variabilidad y los factores que lo afectan son: L/D, Re y en menor grado h/H (ítem 3.2.2.3)

Si bien el número de Reynolds no se estableció como variable de estudio, se puede calcular, a través de la medición de la temperatura, velocidad crítica y diámetro de instalación. Por ende, se obtuvo una dispersión de datos (Figura 31), con los cuales se obtuvo modelo matemático para el parámetro de la válvula de impulso nD/v_c.

4.2 Prueba de hipótesis y rangos de operación aceptable

En la prueba de hipótesis se observó que las condiciones donde se generan mejor desempeño son diferentes para las cuatro variables dependientes estudiadas.

A partir de lo visto, podemos plantear rangos o intervalos, de variables independientes, donde el desempeño de la bomba de ariete es adecuado o aceptable.

4.2.1 Rangos de la eficiencia

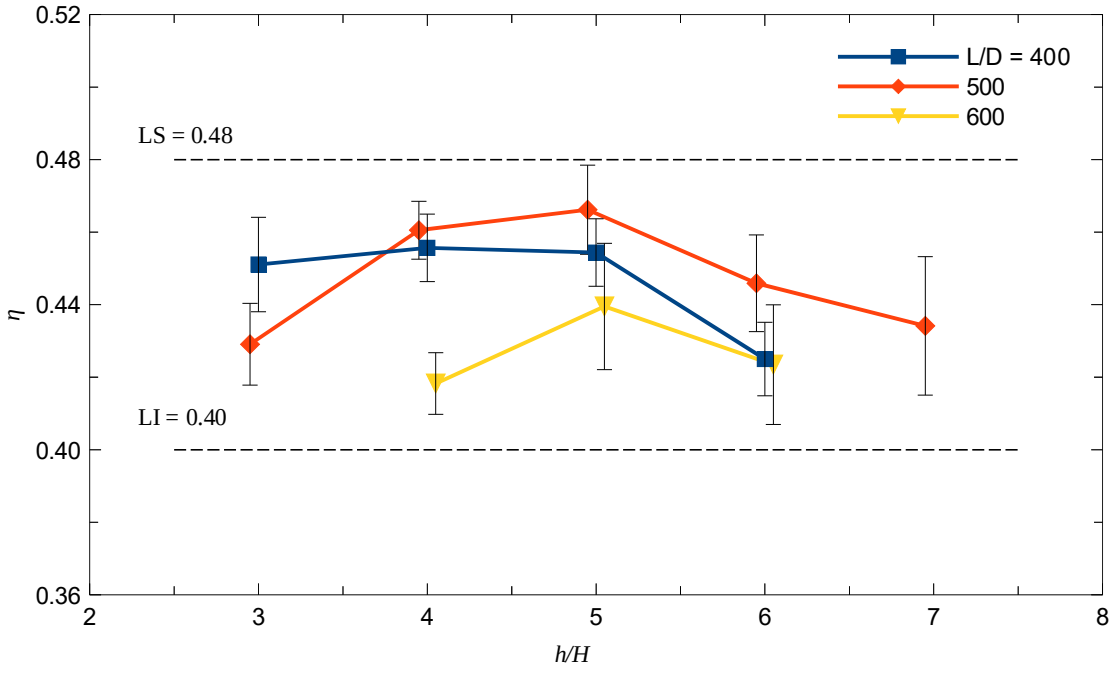
Como se mencionó la eficiencia es relevante cuando la fuente de suministro es limitada. En estas condiciones, es mejor trabajar en altas eficiencias.

Los valores más altos de eficiencia se dan en los tratamientos "(5; 500), (3; 400), (4; 400), (5; 400), (4; 500) y (6; 500)" (ítem 3.2.4.3.2.1).

Para condiciones similares de variables dependientes, el rango de eficiencias aceptables está entre 40% y 48% en el rango de h/H de 3 a 7 (ver Figura 64)

Figura 64

Rangos de mejor eficiencia de Rankine



Nota. Las barras de error son del intervalo de confianza del 95% de la media.

En la Figura 34 del ítem 3.2.2.4, se muestra la gráfica de eficiencia para otros valores de h/H, donde se observa valores de eficiencia más bajas.

Si se trabaja en el rango de h/H de 4 a 6, se puede tener un valor promedio de eficiencia de 44.3% (Tabla 80).

Tabla 80

Eficiencia promedio para h/H entre 4 y 6

h/H	Promedio, $\bar{\eta}$	Desviación típica, s	Recuento, n	$t_{0.025}$	$E = t_{0.025}\, s\, l\sqrt{n}$	Ls	Li	Valor de p de Shapiro-Wilk
4 - 6	0.443	0.023	90	1.987	0.006	0.449	0.438	0.0371

Nota. Ls límite superior $\bar{\eta}+E$, Li límite inferior $\bar{\eta}-E$.

Otros autores utilizan la eficiencia comercial η = $(qh)/(Q_T H)$, sin embargo, ésta acepta eficiencias cuando $h \leq H$, donde no hay bombeo neto real (ver ítem 2.2.1.3).

A modo de comparación, en la Tabla 81, se ha calculado las eficiencias de Rankine con valores reportados por otros autores.

En la Tabla 81, se observa que la eficiencia de Rankine se encuentra en el rango de 39.1 % a 64%. Estos valores son una referencia, dado que los estudios citados, muestran datos puntuales.

La relación óptima de h/H es variable y se encuentra entre 2.4 y 8, siendo el valor usual alrededor de h/H = 4. En el caso de Arapa Quispe (2016), el h/H óptimo difiere dado que las condiciones de válvula de impulso y tubo de suministro son diferentes.

Tabla 81

Eficiencia de Rankine máxima y rango de h/H donde se presenta.

Autor	Cuerpo de la bomba	Tubería de suministro	h/H	h/H óptimo		Eficiencia máxima*
				De	Hasta	
Trabajo actual	PVC 2”	PVC 1”	[2.3, 11]	4	6	44.3%
Saavedra Torres (2018)	Check 1”	PVC 1”	[2.9, 9.6]*	6	8	39%
Jiménez Vilcayauri (2019)	Check 1”	PVC 1”	[1.2, 4.2]*	3.5	-	59%**
Arapa Quispe (2016)	F°G° 3”	PVC 1 ½”	[6, 45]*	6	20	57%**
Cararo et al. (2007)	Check 1”	F°G° 2”	[1.15, 11.5]*	3.4	4.6	45%
Asvapoositkul et al. (2019)	Check 1”	PVC 1”	[2, 7.4]	2.4	3.4	54%**

Nota. *Calculado. **Pocos datos.

4.2.2 Punto de Bombeo Máximo

Si el suministro de agua es abundante, entonces la eficiencia es secundaria. En esta condición se prefiere obtener el mayor caudal posible.

Según lo visto en las hipótesis específicas 2 y 3 (ítem 3.2.4.3.2.2), el caudal relativo de descarga máximo se obtiene cuando la relación h/H es 3 (Tabla 82).

Se realizó pruebas a h/H = 2, pero la bomba de ariete no funciona adecuadamente (se detiene). Los valores mínimos de altura de suministro donde se encontró un funcionamiento estable se muestran en la Figura 65.

En la Figura 65, se observa que a mayor altura de suministro H, aumenta el caudal de descarga, esto pues aumenta la frecuencia de golpeteos.

Figura 65

Caudal de descarga q a valores mínimos de h/H.

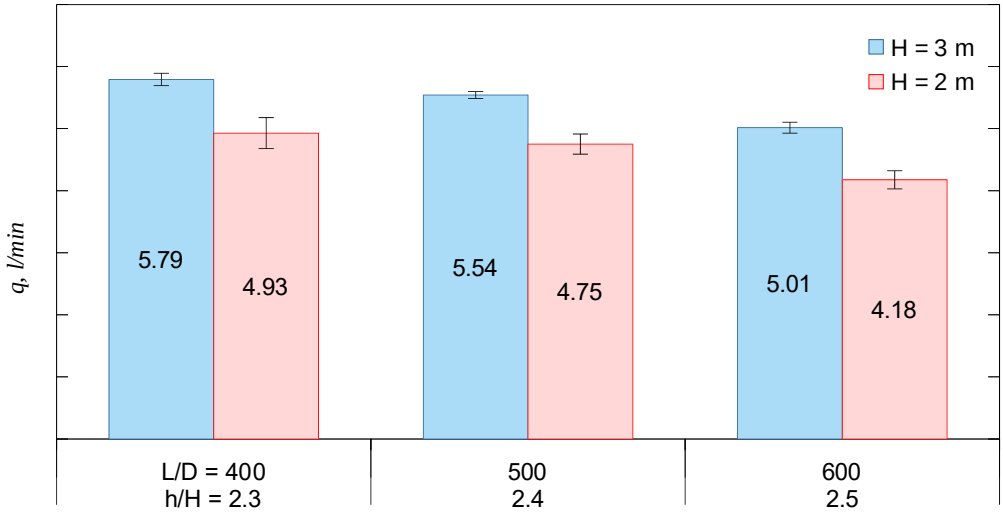


Tabla 82

Caudal de descarga máximo q_{max}

H	h/H	L/D*	Promedio, $\bar{q}$	Desviación típica, s	Recuento, n	$t_{0.025}$	$E = t_{0.025}\, s\, l\sqrt{n}$	Ls	Li	Valor de p de Shapiro-Wilk
1.4	3	-	3.107	0.116	9	2.306	0.089	3.196	3.017	0.83
2	3	-	3.633	0.107	9	2.306	0.082	3.715	3.551	0.75
3	3	-	4.253	0.073	12	2.201	0.046	4.299	4.206	0.69

Nota. Ls límite superior $\bar{q}+E$, Li límite inferior $\bar{q}-E$. *El promedio incluye valores de las tres L/D.

Finalmente, el punto de bombeo máximo del prototipo construido se da para h/H = 3 (Tabla 82) independiente de la relación L/D, pudiéndose conseguir más caudal reduciendo hasta h/H = 2.3 para L/D = 400 (Figura 65).

En la Tabla 83 y Figura 66 se compara los resultados con bombas de PVC de otros autores. Se observa que las bombas cubren diferentes necesidades según el requerimiento de altura de descarga y caudal.

Tabla 83

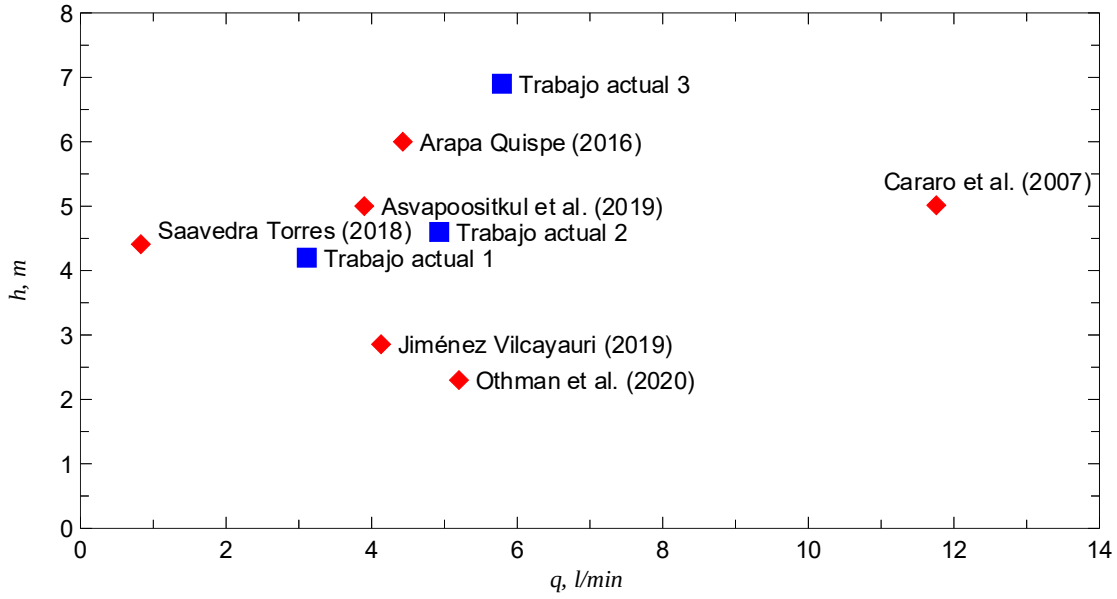
Condiciones del caudal máximo de descarga por autores.

Autor	Cuerpo de la bomba	Tubería de suministro	H, m	S, mm	L/D	h/H	q_{max}, l/min
Trabajo actual 1	PVC 2”	PVC 1”	1.4	5.6	-**	3	3.11
Trabajo actual 2	PVC 2”	PVC 1”	2	6.9	400	2.3	4.93
Trabajo actual 3	PVC 2”	PVC 1”	3	10.2	400	2.3	5.79
Saavedra Torres (2018)	Check 1”	PVC 1”	1.4	10	292	3.15	0.83*
Jiménez Vilcayauri (2019)	Check 1”	PVC 1”	1.7	-	226	1.68	4.13*
Asvapoositkul et al. (2019)	Check 1”	PVC 1”	2.5	-	140	2	3.9*
Arapa Quispe (2016)	F°G° 3”	PVC 1 ½”	1.0	6	75	6	4.43*
Cararo et al. (2007)	Check 1”	F°G° 2”	4.36	-	-	1.15	11.76*
Othman et al. (2020)	Check ½”	PVC ½”	1.0	-	-	2.3	5.2*

Nota. *Valores puntuales. **Corresponden a los tres valores de L/D.

Figura 66

Caudal de descarga máximo de descarga según autores



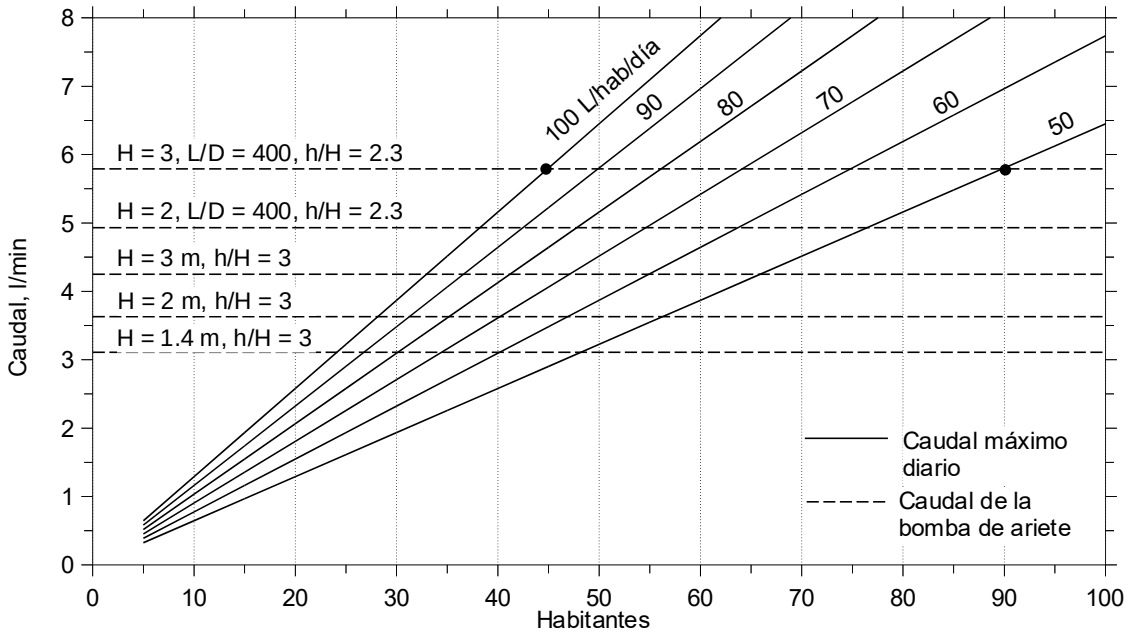
Se debe tener en cuenta que el caudal máximo se alcanza cuando la altura de descarga es mínima. Por tanto, la Figura 66, muestra la altura de descarga mínima a la que las bombas de ariete ofrecen caudal máximo.

Se debe precisar que las diferentes bombas indicadas en la Tabla 83 corresponden prototipos específicos construidos por los autores, especialmente en cuanto a la cámara de aire, válvula de impulso y tubería de suministro.

En la Figura 67, se compara los caudales máximos obtenidos frente a las dotaciones de la RM N°192-2018-VIVIENDA (MVCS, 2018). Se observa que se puede abastecer de suministro hasta 90 habitantes para una dotación de 50 L/hab/día (UBS-Compostera).

Figura 67

Caudal de descarga q con caudales máximos diarios (MVCS, 2018)



¿De qué manera se puede conseguir más caudal?

- **Aumentar la altura de suministro**. Como se vio en la Figura 65, aumentar la altura de suministro aumenta el caudal de descarga. Al aumentar la altura de suministro se debe tener en cuenta una altura máxima de H = 3 m. a mayores alturas el tubo de suministro se expone a ondas de presión por encima de la presión admisible (> 1 MPa), lo cual puede ocasionar pérdida de propiedades del tubo de

suministro, pudiendo fallar luego de un funcionamiento prolongado por fatiga (ver Anexo 8.4).

- **Ajustar la válvula de impulso**. A mayor carrera o peso de la válvula de impulso se obtendrá mayores tasas de bombeo, dado que, se incrementa la velocidad crítica. Este aumento, puede realizarse si la relación de velocidades v_c/v_0 es menor a 0.8 (Tacke, 1988, p. 65 y Young, 1995, p. 7). Para los prototipos construidos ya se encuentran en el límite de la relación (ver Anexo 1.2.4). Aumentar la carrera o el peso, conlleva a golpes más lentos, pero más fuertes, lo cual aumenta la probabilidad de falla de la bomba de ariete (De Freitas J. y Sanchez H., 2002, p. 44). Alternativamente, el aumento de la velocidad crítica puede utilizarse para entregar la cantidad original de caudal q a un nivel más alto (Tacke, 1988)
- **Aumentar el número de válvulas de impulso.** Otra opción, comúnmente utilizada es aumentar la cantidad de válvulas de impulso, con lo cual se incrementa la cantidad de energía disponible. Investigadores han usado entre 2 y 3 válvulas de impulso en serie (Jiménez Vilcayauri, 2019 y Saavedra Torres, 2018).
- **Bombas de ariete en paralelo.** Watt (1975, p. 8) y Silver (1977, p. 22) mencionan que, si el equipo instalado no es capaz de bombear la cantidad suficiente, se puede construir un equipo adicional (un duplicado) junto al que ya se tiene. Las tuberías de suministro a cada equipo deben ser independientes, pero se puede utilizar la misma tubería de descarga para sacar el agua bombeada por ambos equipos. Esta opción está limitada por la disponibilidad de fuente de suministro.
- **Aumentar el diámetro de la bomba de ariete.** Aumentar el diámetro de la instalación conlleva a un incremento general del caudal de bombeo y altura de descarga. Las bombas de ariete comerciales suelen indicar el rango de caudal de suministro necesario para la operación de cada ariete según su tamaño (Silver, 1977. p.12), en la Tabla 85 se muestra las condiciones operativas de la bomba de ariete de PVC 1” del presente trabajo.

4.3 De la modelación matemática y curvas características

Se describen las curvas características y tablas usualmente utilizadas.

4.3.1 Tablas de datos comerciales

Las bombas de ariete comerciales utilizan tablas de selección como la Tabla 84.

A partir de la altura de descarga h y altura de suministro H, se puede determinar el volumen relativo de agua bombeada en un día (Ecuación 46)

$$\frac{q}{Q_T} \times 1400 \left(\frac{l/día}{l/min} \right) \tag{46}$$

Las Tablas 84 y 85, corresponden a la bomba de ariete construida, elaborados a partir del modelo propuesto para q/Q_T (ver ítem 3.2.3.3)

Tabla 84

Selección de condiciones de operación de la bomba de ariete de PVC 1".

Caudal de descarga*: 1440 × q / Q_T (l/día por l/min), L/D = 500													
Altura de suministro H, m	**Altura de descarga** h, m												
	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
1.4	$^{(5)}$177	124	87	60	38								
1.5	$^{(7)}$191	136	98	70	48	30							
1.6	$^{(8)}$204	$^{(3)}$148	109	80	57	38							
1.7	$^{(9)}$217	$^{(4)}$159	119	89	66	47	31						
1.8	$^{(10)}$230	$^{(5)}$170	129	98	74	55	38						
1.9	$^{(11)}$242	$^{(6)}$181	139	107	83	62	46	31					
2.0	$^{(11)}$253	$^{(7)}$191	$^{(3)}$148	116	91	70	53	38	26				
2.1	$^{(12)}$265	$^{(7)}$201	$^{(4)}$157	124	98	77	60	45	32				
2.2	$^{(13)}$276	$^{(8)}$211	$^{(5)}$166	132	106	85	67	51	38	27			
2.3	$^{(14)}$287	$^{(9)}$220	$^{(5)}$175	140	113	92	73	58	44	33			
2.4	$^{(15)}$297	$^{(10)}$230	$^{(6)}$183	$^{(3)}$148	121	98	80	64	50	38	28		
2.5	$^{(16)}$307	$^{(10)}$239	$^{(7)}$191	$^{(4)}$156	128	105	86	70	56	44	33		
2.6	$^{(17)}$317	$^{(11)}$248	$^{(7)}$199	$^{(4)}$163	135	112	92	76	62	49	38	28	
2.7		$^{(12)}$256	$^{(8)}$207	$^{(5)}$170	$^{(3)}$141	118	98	82	67	55	43	33	
2.8		$^{(12)}$265	$^{(8)}$215	$^{(5)}$177	$^{(3)}$148	124	104	87	73	60	48	38	29
2.9		$^{(13)}$273	$^{(9)}$222	$^{(6)}$184	$^{(4)}$155	130	110	93	78	65	53	43	34
3.0		$^{(14)}$281	$^{(10)}$230	$^{(7)}$191	$^{(4)}$161	136	116	98	83	70	58	48	38

Nota. El índice izquierdo en $^{(5)}$177 son la corrección por L/D. En azul los valores válidos para L/D = {400, 500, 600). Error en la predicción de un valor particular E = (0.013*1440) = ±18.72 (ver ítem 3.2.3.2)

Tabla 85

Características operativas de la bomba de ariete de PVC

Tamaño de la bomba de ariete.	Caudal de suministro Q_T, l/min			Altura de descarga h, m		Caudal de descarga q, l/min	
	H, m	De	Hasta	De	Hasta*	De	Hasta
PVC 1"- D_{int} = 26.2 mm	1.4	10.8	18.3	4.2	22.4	3.1	0
	2	10.5	21.6	4.6	30.4	4.9	0
	3	14.2	26.7	6.9	44.8	5.8	0

Nota. *Altura máxima en L/D = 600 (ver Anexo 1.3.1.4)

Sobre la Tabla 84, se tiene las siguientes precisiones dado que se elaboró para L/D = 500.

- Rango $h/H \leq 5$: Los valores del caudal de bombeo q difieren según L/D. El índice en "$^{(5)}$177" indica la corrección por L/D:
  - L/D = 400 → "177 + 5"
  - L/D = 500 → "177"
  - L/D = 600 → "177 – 5"
- Rango $5 \leq h/H \leq 7$: El modelo es bueno para los tres valores de L/D = {400, 500, 600)
- Rango $h/H > 7$: En esta zona el modelo no es bueno. Los valores del caudal de bombeo q difieren según altura de suministro H. En este caso es mejor utilizar el error de predicción E = (0.013*1440) = ±18.72 (ítem 3.2.3.2.1). Para valores más extremos de h/H es preferible utilizar curvas como la Figura 23 para valores específicos de H = {1.4, 2, 3}

En la Tabla 85, se disponen de datos de funcionamiento general de la bomba de ariete de PVC 1" estudiada. Los caudales de suministro se pueden aproximar mediante el modelo $y_5 = Q_T / (v_c D^2)$ de la Tabla 47. En la Figura 68, se muestra los valores de Q_T de referencia para v_c = 1 m/s.

Ejemplo aplicativo.

Supongamos que tenemos las siguientes condiciones h = 19 m, H = 2.5 y se requiere determinar la cantidad de agua q que puede bombearse, considerando una fuente de suministro abundante.

Solución

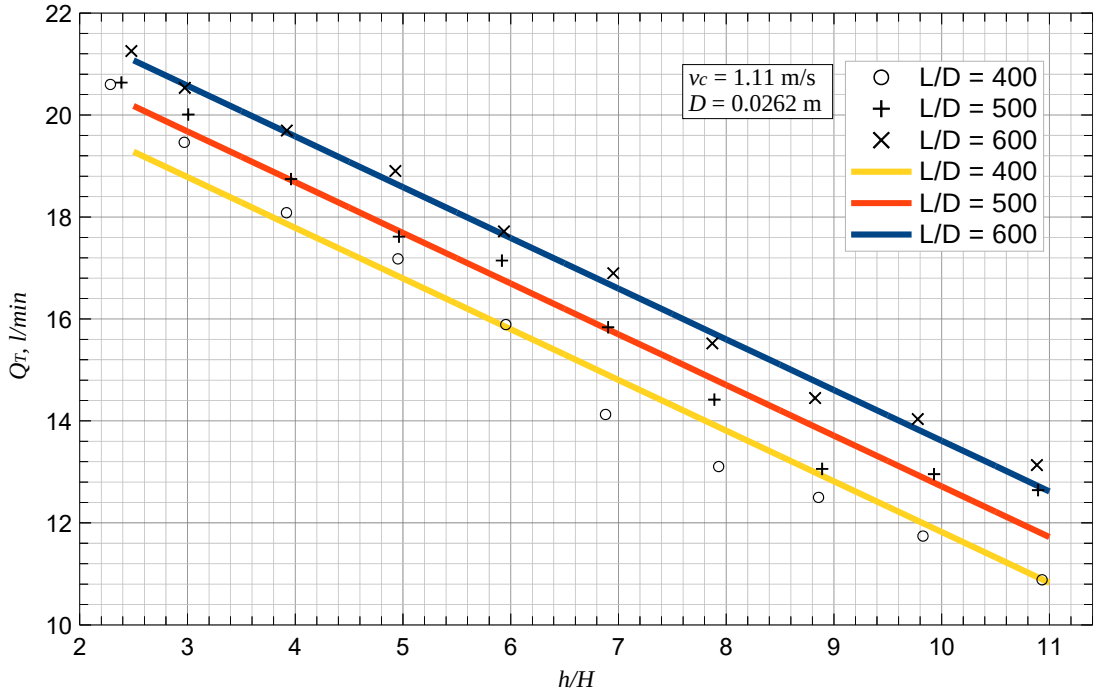
La relación de alturas sería h/H = 19/2.5 = 7.6, de la Figura 68 para L/D = 500, Q_T ≈ 15.2 l/min.

De la Tabla 84, tenemos un q/Q_T aproximado de 78 l/día por l/min (interpolación). Dado que cae en la región h/H > 7, tenemos un rango de 59 l/min a 97 l/min (E ≈ 19). Por tanto, se tendría un caudal de bombeo de q = 78 * 15.2 = 1186 l/día ± 290 l/día.

En la Figura 68 se observa los valores promedios del caudal de suministro Q_T para H = 2 m.

Figura 68

Caudal de suministro Q_T, según modelo $y_5 = Q_T / (v_c D^2)$



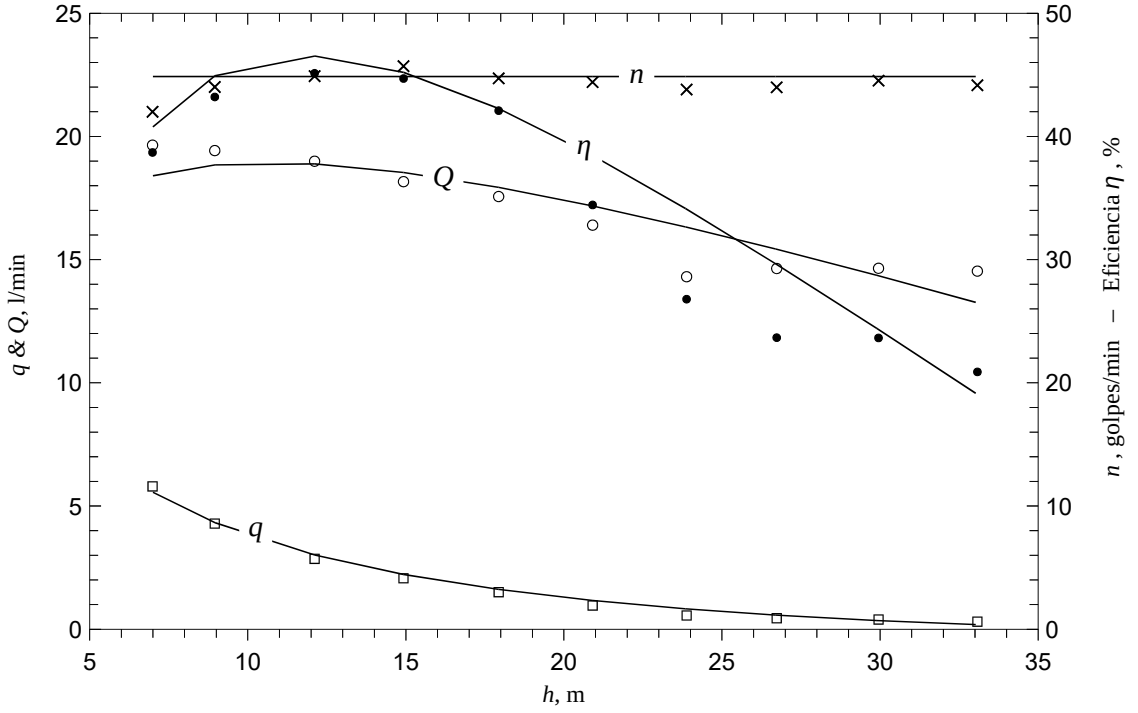
Nota. Elaborado a partir del modelo del caudal de suministro relativo (ítem 3.2.3.3).

4.3.2 Curva característica de la bomba de ariete

La Figura 69 muestra las curvas de las cuatro variables estudiadas q, Q, n y η, en función de la altura de descarga h.

Figura 69

Curva característica para H = 3 m, L/D = 400



Las curvas son una estimación mediante los modelos matemáticos planteados en el ítem 3.2.3.3 y representan el comportamiento propio del prototipo estudiado bajo condiciones específicas.

Para la curva característica mostrada, las variables consideradas son H = 3 m, L/D = 400, D = 26.2 mm, v_c = 1.365 m/s, v_c/v_0 = 0.727, T = 15 °C, Re = 31285.

Adicionalmente, el modelo para el caudal de suministro Q_T es necesario, este se presenta como la relación Q_T / $v_c D^2$ (ítem 3.2.3.3)

En el presente estudio, se pueden elaborar nueve conjuntos de curvas características dado los factores y/o variables estudiadas (Tabla 86)

Tabla 86

Curvas características y condiciones específicas.

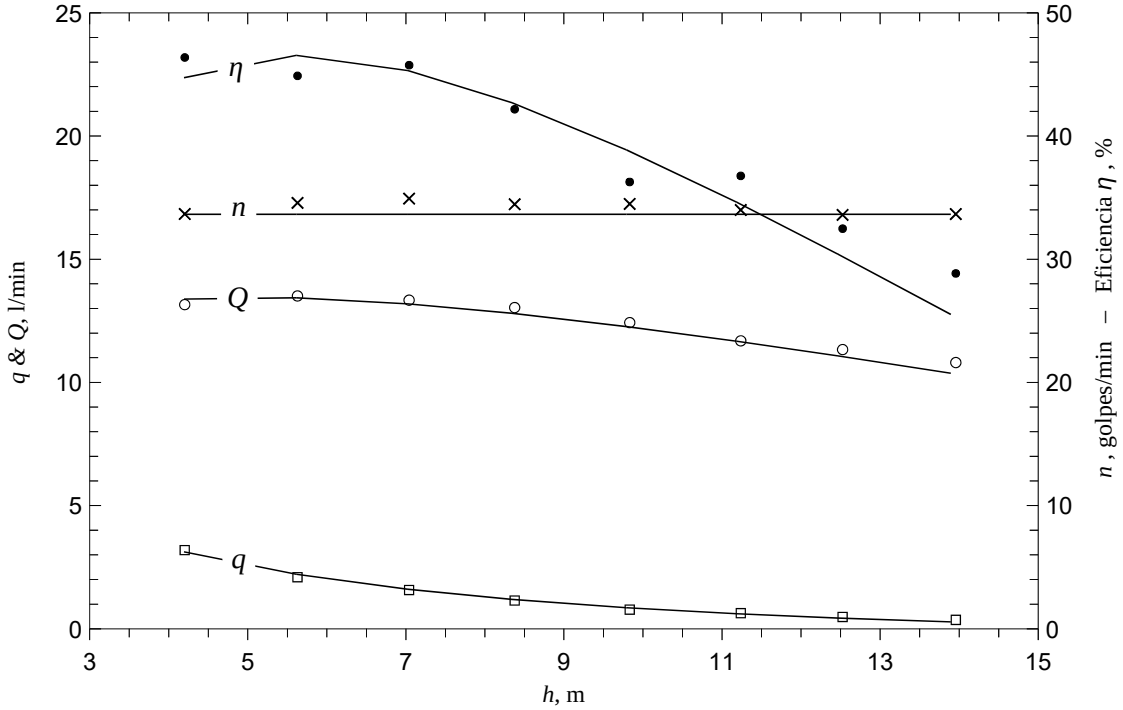
H, m	v_c, m/s	Re*	L/D	$r = v_c/v_0$**	Curva N°
1.4	0.970	22232	400	0.804	1
			500	0.858	2
			600	0.909	3
2	1.114	25533	400	0.750	4
			500	0.800	5
			600	0.848	6
3	1.365	31285	400	0.727	7
			500	0.776	8
			600	0.823	9

Nota. Adaptado de las Tablas 95 y Anexo 1.2. *Número de Reynolds Re para T = 15°C. **

La Figura 70, muestra otro conjunto de curvas características para H = 1.4 m, L/D = 400, D = 26.2 mm, v_c = 0.97 m/s, v_c/v_0 = 0.804, T = 15 °C, Re = 22232.

Figura 70

Curva característica para H = 1.4 m, L/D = 400

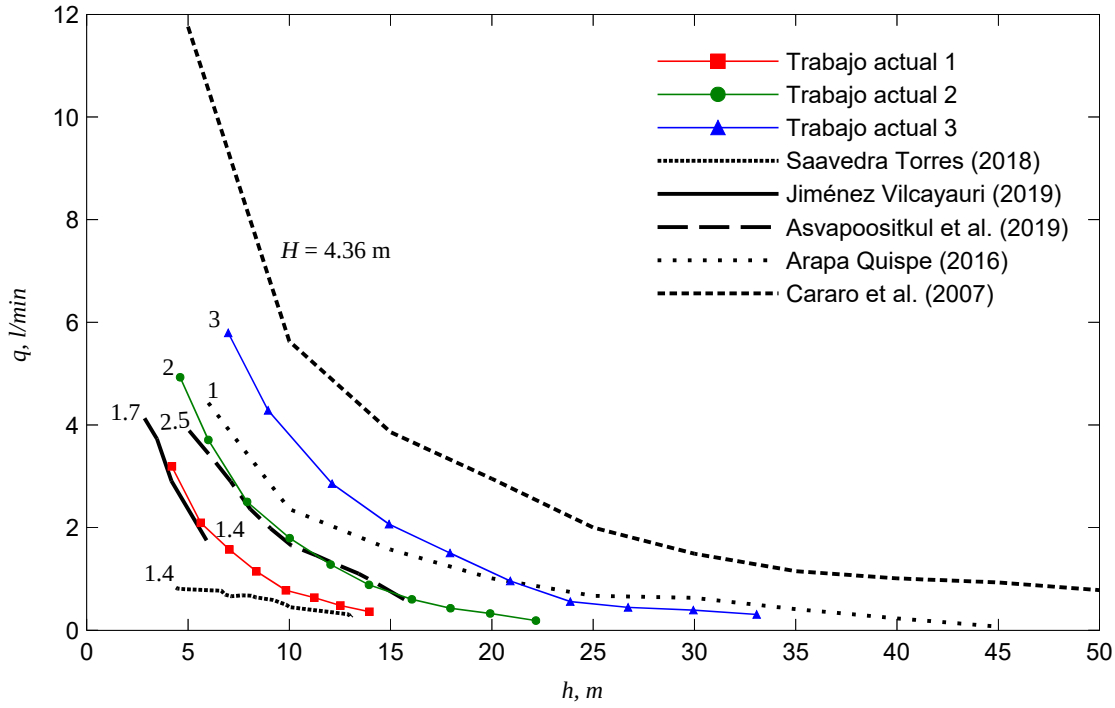


4.3.3 Comparación de curvas características.

En la Figura 71 y Figura 72 se muestra la comparación de curvas características frente a otros investigadores. Todas las curvas corresponden a bombas con una válvula de impulso. En la Tabla 83 se detalla las variables consideradas en cada curva.

Figura 71

Curvas del caudal de descarga q vs h de diferentes autores.



Nota. H es la altura de suministro para cada curva.

En general, se utilizan alturas de suministro desde 1.4 m. Arapa Quispe (2016) trabaja a H = 1 m, debido a la válvula de impulso de F°G° de 3” utilizada. Por otra parte, Cararo et al. (2007) trabaja a H = 4.36 m, lo cual es factible para el tubo de suministro de F°G° 2” utilizado.

En la Figura 72 se observa un mayor caudal de funcionamiento o desperdicio en las curvas reportadas por Cararo et al. (2007) y Arapa Quispe (2016).

La explicación es similar, en el primer caso se utiliza un tubo de suministro de F°G° 2” y en el segundo un tubo de PVC 1 ½” con una válvula de impulso de F°G° de 3”, con lo cual, más caudal de suministro es necesario.

Figura 72

Curvas del caudal de funcionamiento Q vs h por diferentes autores.

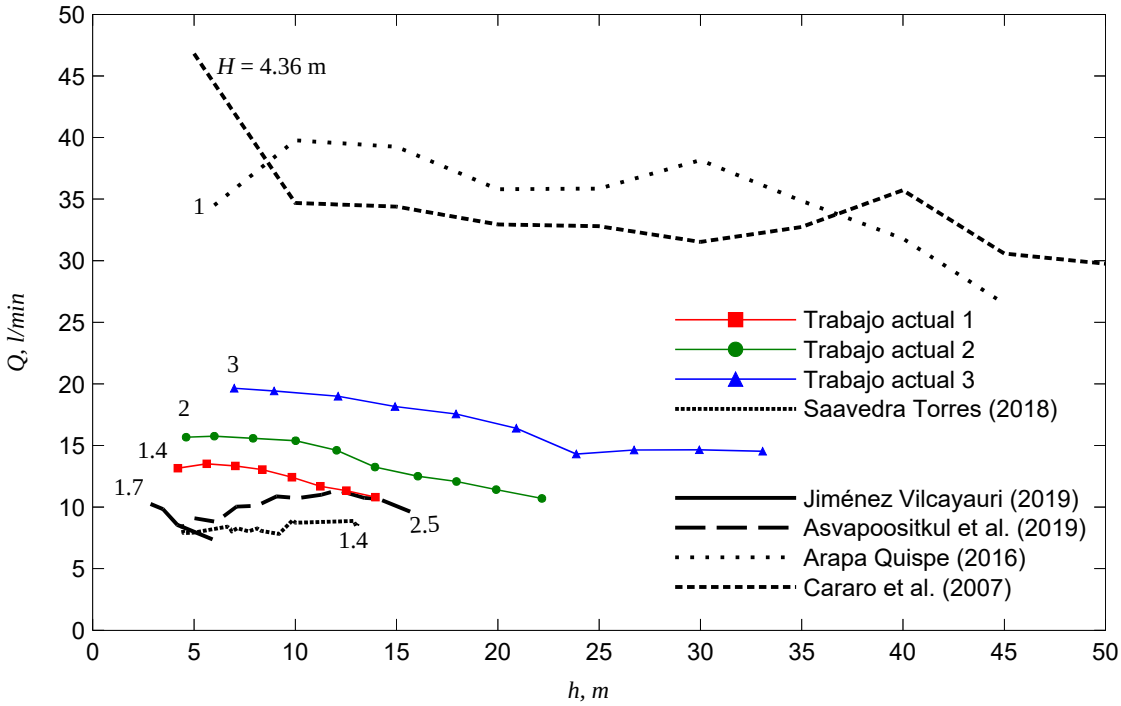
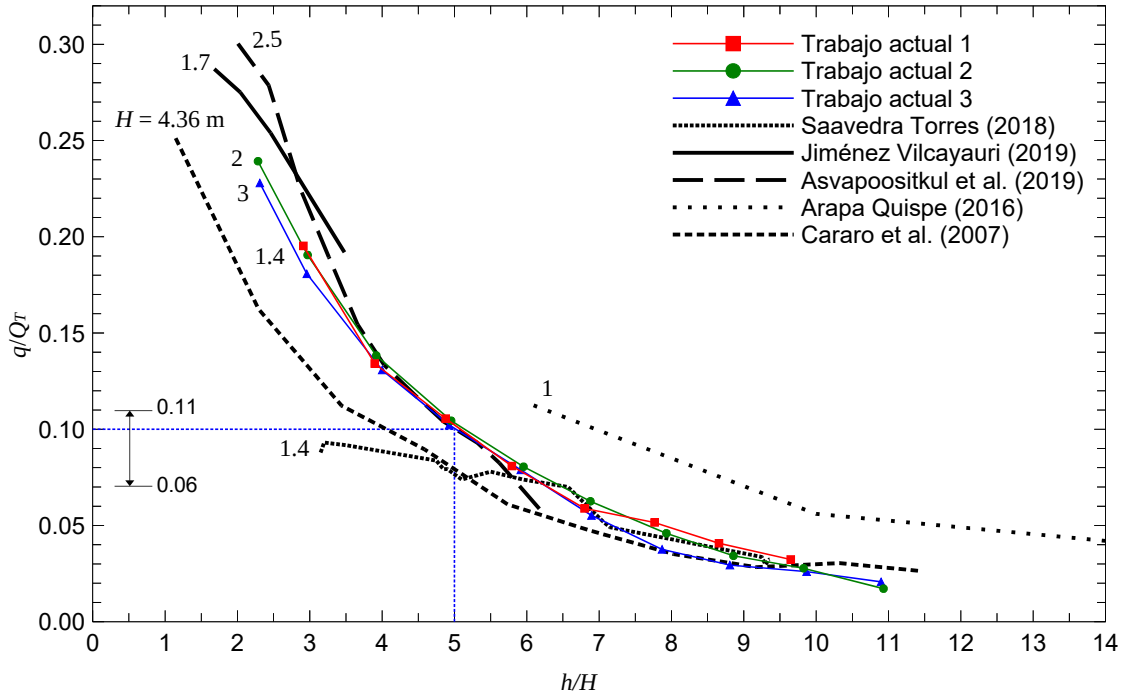


Figura 73

Comparación de curvas de q/Q_T vs h/H por diferentes autores.



La Figura 73, muestra que la relación de caudales q/Q_T < 0.30, es decir, a lo más el 30% del caudal de suministro Q_T puede ser aprovechado.

Por otro lado, la relación de altura h/H < 12, es decir, a lo más se puede bombear doces veces la altura de suministro H, esto a caudal de bombeo mínimo.

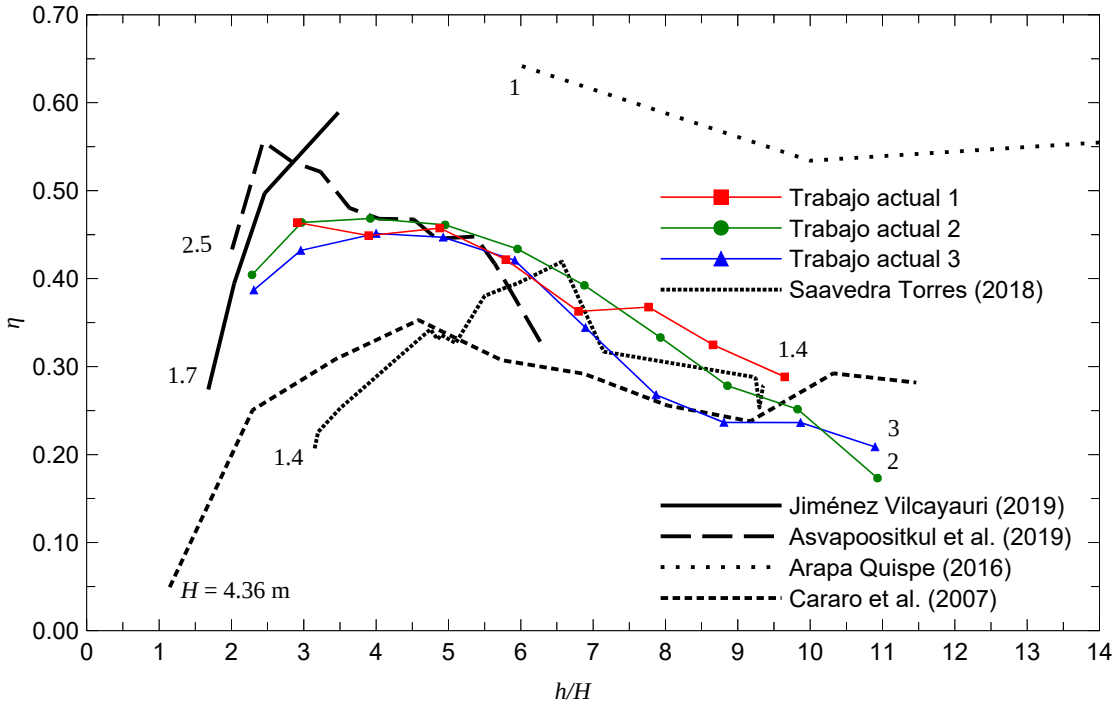
Si se desea una relación h/H = 5, alrededor de 6 a 11% del caudal de suministro puede ser bombeado.

En la Figura 74, se observa variabilidad en los valores de eficiencia. Estos dado que las eficiencias fueron calculadas a partir de los datos puntuales obtenidos por otros investigadores.

En general las mejores eficiencias se dan a diferentes valores de h/H. Una aproximación de rangos de mejor eficiencia se realizó en la Tabla 81. Para el trabajo actual el mejor desempeño se da en el rango de h/H de 4 a 6 (ver ítem 4.2.1). En la Tabla 83 se muestra las condiciones de las variables para cada curva.

Figura 74

Comparación de curvas de eficiencia de Rankine por diferentes autores.



4.3.4 Curvas características utilizada por Hadzich (s/f)

Hadzich (s/f), plantea curvas características útiles para la selección de bombas de ariete. Estas curvas relacionan la altura relativa h/H, el caudal de descarga q y la eficiencia η. En la Figura 75 y Figura 76 se observa una adaptación con los datos del experimento. Por conveniencia la eficiencia η se grafica en función de h/H (Figura 76).

En la práctica, los requerimientos son el caudal de bombeo q y la altura de descarga h, a partir de las curvas de las Figuras 75 y 76, podemos seleccionar la altura de suministro H que satisface h y q. Con el valor de h/H obtenemos el valor de la eficiencia en la segunda curva.

Luego, a partir de la eficiencia de Rankine podemos despejar y calcular el caudal de funcionamiento Q (Ecuación 47), con el cual, determinamos el requerimiento mínimo de caudal de suministro $Q_T = q + Q$.

$$\eta = \frac{q}{Q} \times \left(\frac{h}{H} - 1 \right) \rightarrow Q = \frac{q}{\eta} \times \left(\frac{h}{H} - 1 \right) \tag{47}$$

Las curvas de la Figuras 75 y 76, corresponden a una relación L/D = 500. Se puede obtener curvas características para las otras condiciones.

En los ítems 3.2.2.4 y 4.2.1, se observó que la eficiencia puede aproximarse a 44.3% en el rango de h/H de 4 a 6.

Si ese es el rango de trabajo, se puede simplificar el cálculo del caudal de suministro $Q_T = q + Q$. El caudal de funcionamiento Q puede calcularse con la Ecuación 48.

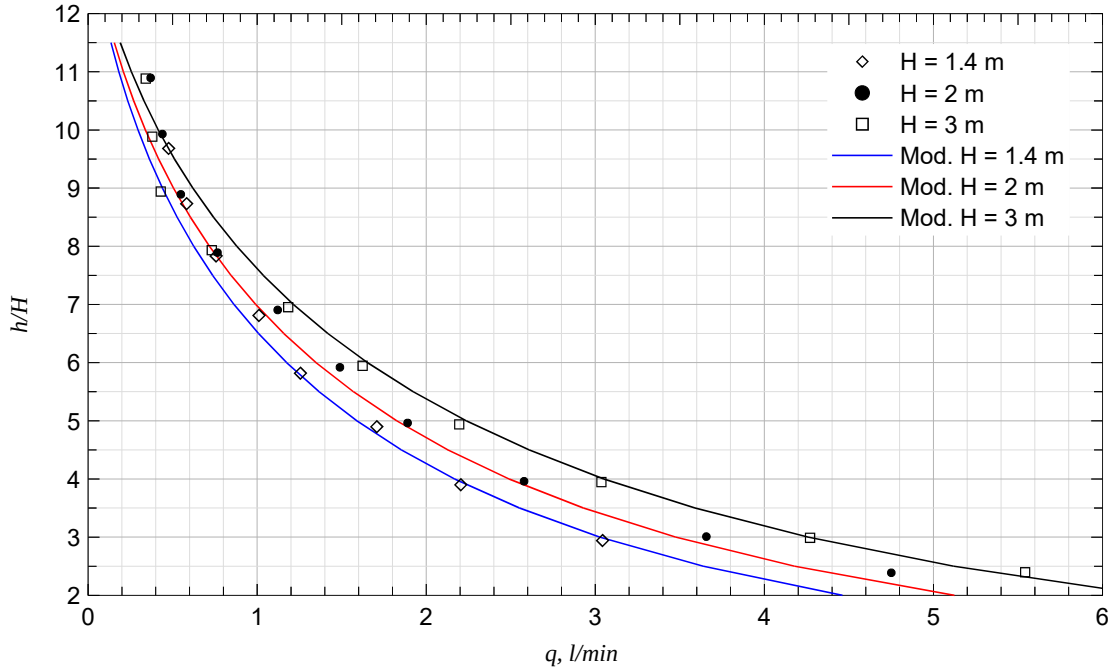
$$Q = \frac{q}{0.443} \times \left(\frac{h}{H} - 1 \right), \text{para } h/H = [4, 6] \tag{48}$$

Otra forma es utilizar el modelo del caudal de suministro Q_T del ítem 3.2.3.2.5. En este caso basta con reemplazar los valores de h/H y L/D en la Ecuación 49. De este modo la determinación de la eficiencia no es necesaria.

$$\frac{Q_T}{v_c D^2} = -0.02176 \left(\frac{h}{H} \right) + 0.000196 \left(\frac{L}{D} \right) + 0.398 \tag{49}$$

Figura 75

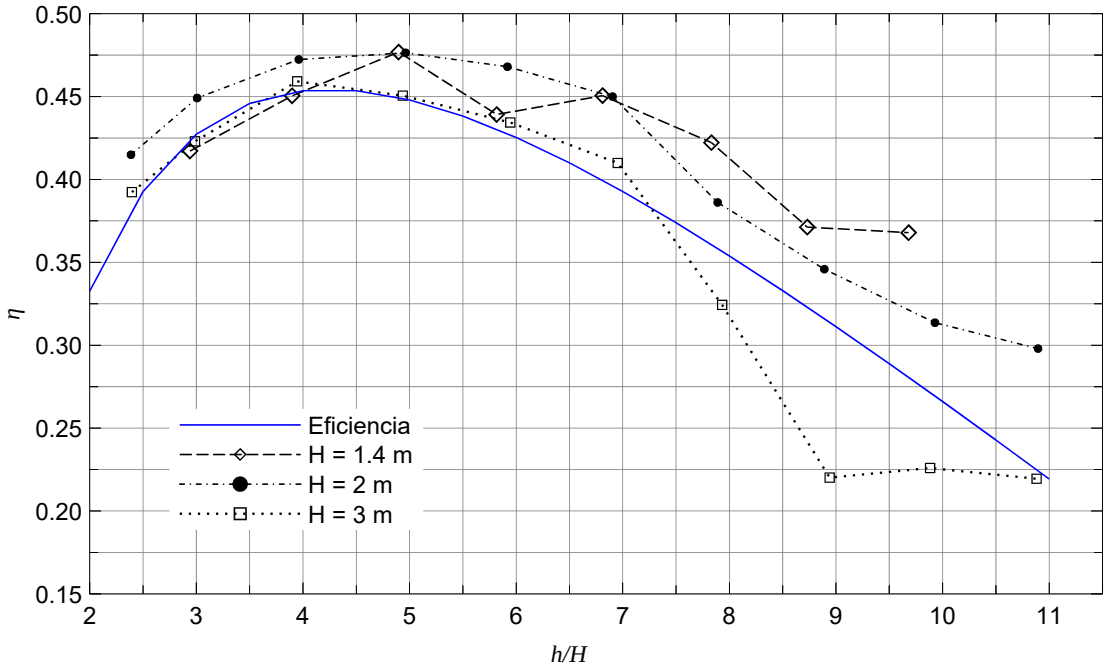
Caudal de bombeo q en función de h/H y H, para L/D = 500



Nota. Modelo calculado a partir de modelos $y_1 = q/Q_T$ y $y_5 = Q_T/v_c D^2$ (ítem 3.2.3.3)

Figura 76

Eficiencia η en función de h/H y H, para L/D = 500



Nota. La línea indica el modelo de la Eficiencia de la Ecuación 25 para L/D = 500 (ver Figura 46).

Ejemplo aplicativo: N.º 2 de Hadzich (s/f, p. 16):

Si quiero bombear q = 5 l/min (como un caño de agua) hasta una altura h de 20 m y dispongo de una altura H de caída de 2 m ¿Qué tamaño de bomba necesito y cuánto caudal de agua Q debo utilizar?

Solución

De la Figura 75 tenemos que para h/H = 20/2 = 10, tenemos un q = 0.3 l/min. Esto quiere decir que nuestra bomba de ariete de PVC 1”, no tiene suficiente capacidad para las condiciones requeridas.

En el cálculo realizado por Hadzich (s/f), se necesita una bomba de ariete de acero 2” (BAH 2”) y un Q = 3.33 l/s para cumplir estos requerimientos.

Por otra parte, si la altura de caída disponible fuese de 3 m, de la Figura 75, se tendría h/H = 20/3 = 6.6 y q = 1.3 l/min. Con 4 arietes en paralelo (batería) se podría cubrir este requerimiento, con lo que se tendría q = 1.3 × 4 = 5.2 l/min.

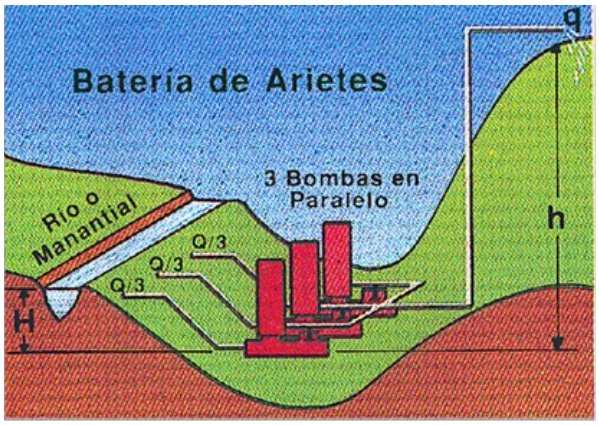
Para esta condición tenemos una eficiencia de 40% según la Figura 76. De la Ecuación 48, tendremos

$$Q=\frac{q}{\eta}\times\left(\frac{h}{H}-1\right) \rightarrow Q=\frac{1.3}{0.40}\times(6.6-1)=18.2 \text{ l/min}$$

Dado que son 4 arietes, tendríamos un caudal de suministro total Q_T de 18.2 × 4 + 5.2 = 77.8 l/min = 1.3 l/s.

Figura 77

Batería de arietes en paralelo por Hadzich (s/f)



4.3.5 Análisis de la altura de descarga h

Normalmente conocemos el valor de h, como el desnivel desde la bomba de ariete hasta el punto de bombeo (diferencia de cotas). Sin embargo, una altura adicional debe agregarse por las pérdidas menores y la fricción en la tubería de descarga.

Hadzich (s/f) considera un adicional igual al 10% de la longitud del tubo de descarga, es decir, la altura total $h = h_0 + 0.1 \times l$, donde h_0 es la diferencia de cotas.

En el Anexo 8.7 se analiza el gradiente hidráulico S de la Ecuación 50.

$$h = h_o + S \times l \quad (50)$$

Donde:

h, es la altura de descarga, m

h_o, es la diferencia de cotas desde válvula de impulso hasta el punto de descarga.

S, es el gradiente hidráulico promedio.

L, es la longitud de la tubería de descarga.

El valor de S es siempre menor al 2.8% en tuberías de PVC ½" (d_{int} = 17.4 mm) y menor a 4.2% en tuberías de PEAD ½" (d_{int} = 16 mm).

Dado que los caudales de descarga q usualmente se encuentran entre 0.2 l/min y 6 l/min (Anexo 1.4.1) el flujo se encuentra entre la zona laminar y turbulenta, por lo ello, el número de Reynolds se debe tener presente a la hora de determinar el coeficiente f de Darcy.

En el Anexo 8.7, se ven gráficas (Figuras 131, 132 y 133) que permiten determinar el valor de S para diferentes condiciones de caudal y temperatura.

Ejemplo aplicativo

Si tengo una altura de caída H = 2 m y un caudal Q_T de 20 l/min y deseo bombear hasta una distancia l = 100 m y una altura de h_0 = 12 m ¿Qué bomba de ariete debo usar y cuánto de agua bombeará?

Solución

Considerando una tubería de PEAD de ½" y de la Ecuación 50, el valor de la altura de descarga sería h = 12 + 4.2%*100 = 16.2 m.

La relación de aturas h/H = 16.2/2 = 8.1.

De la Figura 76, tenemos una eficiencia de 37%, entonces de la Ecuación 47 tenemos:

$$Q=\frac{q}{\eta}\times\left(\frac{h}{H}-1\right) \rightarrow 20=\frac{q}{0.37}\times(8.1-1) \rightarrow q = 1.04 \text{ l/min.}$$

De la Figura 75, para h/H = 8.1 y L/D = 500 tenemos un caudal de q = 0.7 l/min. Por tanto, no se utilizará todos los 20 l/min.

Verificamos en la Figura 68, que para h/H = 8.1 y L/D = 500, Q_T = 12.4 l/min.

Conclusión

Utilizando la bomba de ariete de PVC 1", se utiliza 12.4 l/min de la fuente de suministro para bombear 0.7 l/min, a una distancia de 100 m y desnivel de 12 m con tubería PEAD ½".

4.4 Análisis de las condiciones de funcionamiento de la bomba de ariete.

4.4.1 Variables independientes

Las variables independientes estudiadas son h/H y L/D (ítem 3.1.3.2). En la Tabla 87, se resume los niveles considerados para estas variables.

Tabla 87

Variables del experimento.

H^*, m	h/H^*	L/D^*
1.4	{3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10}	{400, 500, 600}
2	{2.3, 2.4, 2.5, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11}	{400, 500, 600}
3	{2.3, 2.4, 2.5, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11}	{400, 500, 600}

Nota. H altura de suministro. *Son valores nominales.

4.4.2 Velocidad crítica

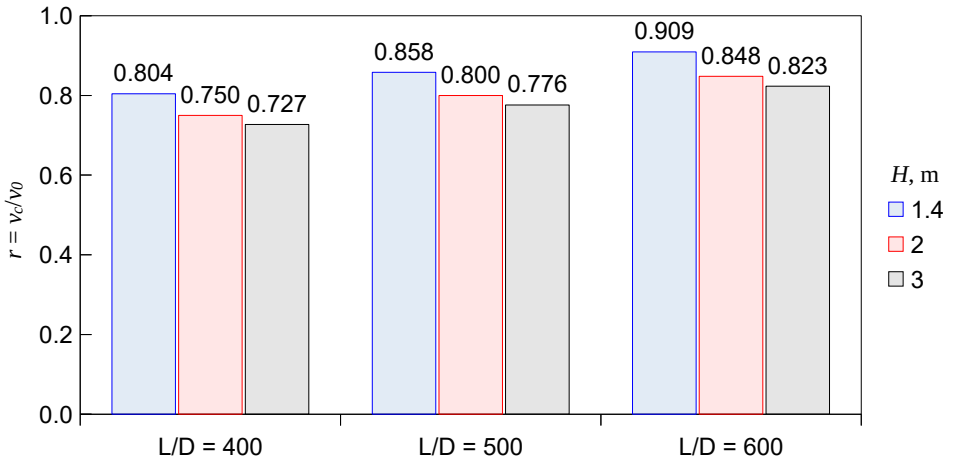
La velocidad crítica es una variable que representa el ajuste de la válvula de impulso. Su relación con la velocidad la estática es la relación $r = v_c/v_0$.

La relación de velocidad es un parámetro crucial en el funcionamiento de una bomba de ariete y está estrechamente relacionada con el valor de L/H (B. W. Young, 1995).

En el experimento el valor de r se encuentra entre 0.727 y 0.909 (Figura 78)

Figura 78

Valores de la relación $r = v_c/v_0$ en el experimento.



Nota. Elaborado a partir de los datos del Anexo 1.2.4.

Tacke (1988) recomienda valores de r entre 0.6 a 0.8. En el experimento, varios valores de $r = v_c/v_0$ se encuentra por encima de 0.8. Esto se refleja en un funcionamiento más lento de la bomba de ariete, con frecuencias por debajo de los 30 golpes por minuto para L/D = 600 (ver Anexo 1.4.4).

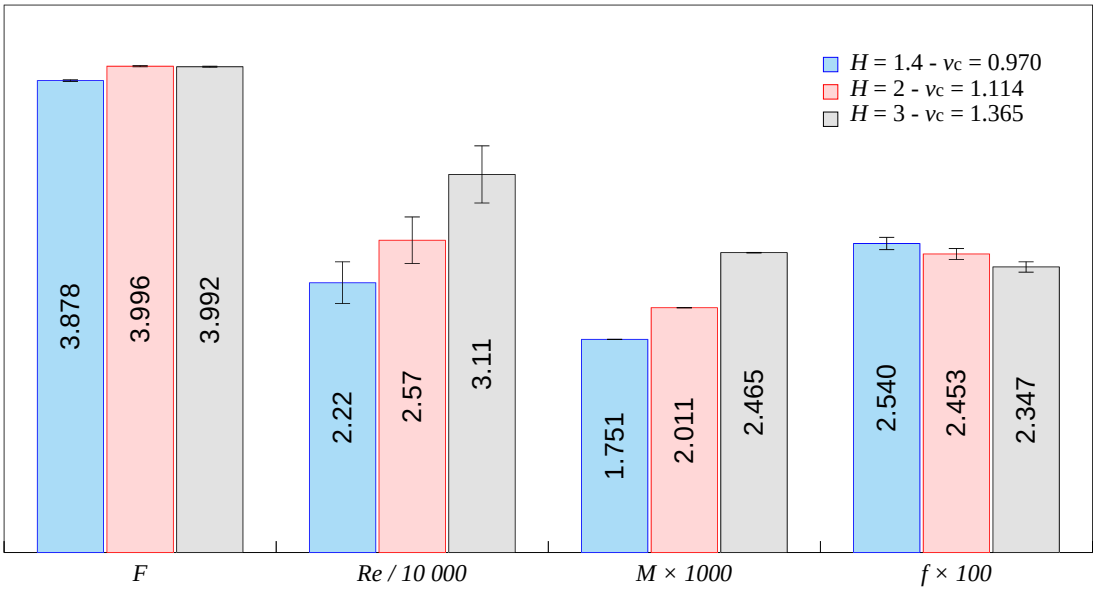
En el Anexo 1.2.4, se muestra el procedimiento de determinación de la velocidad crítica, a partir de la selección adecuada de una altura de suministro H y una relación S/D_{disc}.

La velocidad crítica afecta al número de Reynolds, número de Froude, número de Match y factor de fricción de Darcy (Figura 79)

Las condiciones de flujo (Figura 79) y la relación de velocidades (Figura 78) se indican parcialmente por los autores. Determinar estas condiciones implica el conocimiento del funcionamiento de la válvula de impulso diseñada y el valor de la velocidad crítica para la carrera S fijada.

Figura 79

Condiciones de flujo del experimento.



Nota. F número de Froude, Re número de Reynolds, M número de Mach, f factor de fricción. Se muestran las barras de error de la desviación estándar.

4.4.3 Temperatura del agua

En el caso de la temperatura media del agua, varía en un rango entre 6.05 °C y 19.72 °C, con una media de 14.89 °C y desviación estándar de 2.93 °C (ver ítem 3.2.1.2.2 y Anexo 1.3.1.6). esto afecta al número de Reynolds y a la densidad del agua.

4.4.4 Variables consideradas por otros autores

Los estudios anteriores respecto a la bomba de ariete de PVC, se ha enfocado en el desempeño del ariete respecto a la:

- Variación del volumen y tipo de cámara de aire.
- Variación de la longitud de la tubería de suministro.
- Variación de parámetros de la válvula de impulso.
- Cantidad de válvulas de impulso.

Estos factores influyen en el caudal de bombeo, caudal de suministro y frecuencia de golpes.

En la Tabla 88 se muestra los valores de las variables utilizadas por otros autores. En algunos casos, variables como la carrera de la válvula de impulso S y la longitud de la tubería de suministro L no se indican por los autores.

En general los valores de L/D utilizados son menores a 400. Según Azoury, et. al. (como se cita en B. W. Young, 1996a,), la longitud L mínima no depende del tamaño del ariete, y no debe ser menor a 5 m para evitar que la primera onda de presión regrese a la válvula de impulso antes de que esté completamente cerrada. En la Tabla 88, esto se cumple en algunos casos, en otros casos los investigadores han trabajado con longitudes de tuberías menores.

La relación de alturas h/H se encuentran en rangos similares hasta h/H = 12, las bombas de ariete de materiales metálicos suelen tener rangos mas altos de h/H = 28 (Hadzich, s/f), o hasta h/H = 40 (Tacke, 1988), entre otros.

Tabla 88

Variables experimentales de autores.

Autor	Cuerpo de la bomba	Tubería de suministro	H, m	S, mm	L	L/D	h/H
Trabajo actual	PVC 2”	PVC 1”	1.4, 2.0, 3.0	5.6, 6.9, 10.2	10.48, 13.10, 15.72	400, 500, 600	[2.3, 11]
Saavedra Torres (2018)	Check 1”	PVC 1”	1.4	10	4, 5, 6	152, 190, 292*	[2.93, 9.60]*
Jiménez Vilcayauri (2019)	Check 1”	PVC 1”	1.7	-	5, 7.5	191, 226*	[1.2, 4.2]*
Arapa Quispe (2016)	F°G° 3”	PVC 1 ½”	1	3, 6, 9	1, 2, 3	25, 50, 75*	[6, 45]*
Cararo et al. (2007)	Check 1”	F°G° 2”	4.36	-		-	[1.15, 11.5]*
Othman et al. (2020)	Check ½”	PVC ½”	0.5, 1.0	-		-	[2.3, 13.4]*
Asvapoositkul et al. (2019)	Check 1”	PVC 1”	2.0, 2.5	-	2.8*, 3.5*	110, 140*	[2, 7.4]
Hadzich (s/f)	Acero 2” – 12”	Acero 1 ½” – 10”	1 – 10	<10.5	-	-	[0, 28]

Nota. *Valores calculados.

Conclusiones

Respecto a la variabilidad del experimento (ítem 4.1)

- Las variables dependientes $y_1 = q/Q_T$, $y_2 = Q/Q_T$, $y_3 = nD/v_c$ y $y_4 = \eta$ presentan variabilidad aleatoria y variabilidad debida a los factores estudiados. Las variables que explican el comportamiento son la relación de alturas h/H, la relación L/D y el número de Reynolds.
- Para valores $h/H > 7$, las variables q/Q_T, Q/Q_T y η, presentan una mayor dispersión, esto debido a un efecto desconocido, debido probablemente a la altura de suministro, el ajuste de la válvula de impulso o al prototipo de válvula utilizado.

Respecto a la prueba de hipótesis (ítem 4.2)

- El caudal de descarga máximo promedio es de 5.79 l/min con un intervalo de confianza del 95% cola izquierda de hasta 5.87 l/min, inferior a 10 l/min planteado en la hipótesis general (ítem 3.2.4.3.1.1).
- La altura máxima (cuando el caudal de descarga $q = 0$) es de 44.7 m con un intervalo de confianza del 95% cola izquierda de hasta 44.95 l/min, inferior al valor de 50 m planteado en la hipótesis (Tabla 63).
- La eficiencia máxima de la bomba de ariete se encuentre entre 40 y 48%. En el rango de h/H de 4 y 6, se encuentran las eficiencias máximas, teniendo un promedio de 43.3% y un error de estimación de la media de ± 0.6% (Tabla 80).
- Los valores máximos del caudal de descarga relativo q/Q_T y caudal de funcionamiento relativo Q/Q_T, se dan cuando la altura relativa h/H es mínima. El tratamiento óptimo es $(h/H_j, L/D_k) = (3, 400)$ (Figura 57) con los valores: q/Q_T = 18.8%, $s/\sqrt{n}$ = 0.22% y Q/Q_T = 81.2%, $s/\sqrt{n}$ = 0.22% (Tabla 74)
- El parámetro de la válvula de impulso (nD/v_c) máximo se da cuando L/D = 400 y H = 1.4 m (Figura 59), con el valor de nD/v_c = 1.538%, $s/\sqrt{n}$ = 0.005% (Tabla 78). La relación de alturas h/H influyen mínimamente en ésta variable (Figura 31).

- El punto de bombeo máximo se da a h/H menores. Para efectos prácticos se toma el valor de h/H = 3 . Se puede lograr más caudal reduciendo hasta h/H = {2.3, 2.4, 2.5} dependiendo de la relación L/D, valores menores de h/H ocasionan el no funcionamiento de la bomba de ariete. Algunos valores encontrados:
  - q = 4.25 l/min (E= ±0.05) para h/H = 3, H = 3 (Tabla 82)
  - q = 5.79 l/min (E= ±0.10) para h/H = 2.3, H = 3, L/D = 400 (Figura 65)
- Se pueden conseguir mayores caudales o alturas de descarga, siempre en cuando se cuente con suficiente fuente de suministro. Si el suministro es escaso, es mejor trabajar en el rango de mejor eficiencia de la bomba de ariete (ítem 4.2.2)

Respecto a los modelos matemáticos

- Se proponen los siguientes modelos (ítem 3.2.3.3):

  Modelo $\hat{y}_1 = q/Q_T$, R^2 ajustado = 0.9898, $RMSE$ = 0.00641

  $$\frac{q}{Q_T}=\left(0.9\left(\frac{h}{H}\right)^{-0.44}+0.00131\left(\frac{L}{D}\right)^{0.75}-0.00294\left(\frac{h}{H}\right)^{-0.44}\left(\frac{L}{D}\right)^{0.75}-0.326\right)$$

  Modelo $\hat{y}_2 = Q/Q_T$, R^2 ajustado = 0.9897, $RMSE$ = 0.00641.

  $$\frac{Q}{Q_T}=\left(-0.9\left(\frac{h}{H}\right)^{-0.44}-0.00131\left(\frac{L}{D}\right)^{0.75}+0.00294\left(\frac{h}{H}\right)^{-0.44}\left(\frac{L}{D}\right)^{0.75}+1.326\right)$$

  Modelo $\hat{y}_3 = nD/v_c$, R^2 ajustado= 0.95478, $RMSE$ = 0.000387.

  $$\frac{nD}{v_C}=\left(0.1763\left(\frac{L}{D}\right)^{-0.15}-0.0001124\left(\mathrm{Re}\right)^{0.39}-0.05105\right)$$

  Modelo $\hat{y}_4 = \eta$, R^2 ajustado= 0.7792, $RMSE$ = 0.0403.

  $$\eta=\left(47.32\left(\frac{h}{H}\right)^{0.11}+32.23\left(\frac{L}{D}\right)^{-0.1}-26.87\left(\frac{h}{H}\right)^{0.11}\left(\frac{L}{D}\right)^{-0.1}-14.026\left(\frac{h}{H}\right)^{0.22}-36.135\right)$$

  Modelo $\hat{y}_5 = Q_T / v_c D^2$, R^2 ajustado= 0.9489, $RMSE$ = 0.01445.

  $$\frac{Q_T}{v_c D^2}=-0.02176\left(\frac{h}{H}\right)+0.000196\left(\frac{L}{D}\right)+0.398$$

- El modelo $\hat{y}_5 = Q_T / v_c D^2$ es adicional y se estableció para poder estimar el caudal de suministro Q_T. La relación adimensional se basó en Calvert (1957).

- Los modelos propuestos predicen dentro de los límites establecidos para las variables $h/H \in$ [2.3, 11], L/D = {400, 500, 600} y H = {1.4, 2, 3}. Se verificó que los modelos son buenos para un $h/H \leq 7$.
- A partir de $h/H > 7$, es recomendable estimar los intervalos de predicción del valor particular según lo indicado en el ítem 3.2.3.2, en casos de h/H extremos es mejor utilizar las curvas descriptivas del ítem 3.2.2 para los valores específicos de las variables H, L/D y h/H (ítem 3.1.3.7.2).
- Los modelos propuestos son útiles dado que permiten establecer diferentes condiciones de funcionamiento. A partir de los modelos se puede:
    - Elaborar tablas comerciales (Tabla 84)
    - Elaborar gráficas de selección (Figura 68, Figura 75, Figura 76)
    - Elaborar curvas características específicas (Figura 69, Figura 70)
    - Calcular directamente valores particulares de las variables dependientes del estudio (dentro de los límites de variables independientes).

Respecto a las curvas características

- Se pueden obtener curvas características para cada condición de variables independientes a partir de los modelos elaborados (ver ítem 4.3.2). Estas curvas son casos particulares de las curvas generales generadas por los modelos matemáticos propuestos (ver ítem 3.2.3.2)
- La bomba de ariete construida se encuentra dentro del rango de operación usual de bombas de ariete de PVC reportadas por otros investigadores (ver ítem 4.3.3).

Respecto a la aplicación práctica de los resultados

- A nivel práctico es usual los requerimientos de altura de descarga h, caudal de bombeo q y longitud de tubería de descarga l. Las restricciones usuales son la altura de suministro H, y el caudal de suministro Q_T. A partir de estos, es posible definir las condiciones de operación de la bomba de ariete de PVC 1”, para de satis-

facer estas necesidades específicas. Se plantearon ejemplos aplicativos en los ítems 4.3.1, 4.3.4y 4.3.5.

- El requerimiento de mayores caudales se puede resolver con las baterías de arietes (Figura 77).
- Requerimientos de mayores caudales q o alturas de descarga h, se satisfacen con el paso a material F°G° y cambio de diámetro (del tubo de suministro y/o de la caja del ariete). Un ejemplo de esto se observa en el ítem 4.3.3, donde Cararo et al. (2007) y Arapa Quispe (2016), obtienen mayores desempeños. Por otro lado, arietes comerciales como los de Hadzich (s/f), o los mostrados por Tacke (1988), satisfacen alturas de descarga de hasta 100 m o bombeo de 2 l/s.

Sobre las condiciones de funcionamiento

- Se trabajo en un rango de $r = v_c/v_0$ de 0.727 y 0.909, es decir, se trabajó con $r \geq 0.8$ en 6 de las 9 condiciones de L/D y H, esto coincide con un funcionamiento lento de la bomba de ariete con menos de 35 golpes por minuto en los 6 casos (Anexo 1.4.4). Si bien Tacke (1988) y Young (1995), sugieren $r < 0.8$, no se observó operación defectuosa del ariete (ítem 4.4.2)
- El experimento se realizó a 3652 m.s.n.m., la temperatura media del agua fue de 14.89 °C (ítems 3.1.2 y 4.4.3)

Sobre los experimentos preliminares

- Se encontró modelos empíricos para el coeficiente de pérdidas locales de la válvula de impulso k_{valv} (Anexo 2.1) y el coeficiente de arrastre K_d (Anexo 2.2), para la válvula de impulso construida en el presente estudio.

  Modelo k_{valv}, R^2 ajustado = 0.99 y $RMSE$ = 0.0622

  $$k_{valv} = 0.456\, H^{-3.1} + 0.085 \left(\frac{S}{D_{disc}}\right)^{-1.6} + 3.03$$

  Modelo K_d, R^2 ajustado = 0.998 y $RMSE$ = 0.01543

  $$\frac{1}{-1.19}\left(K_d\right)^{-1.19} = -4.842\left(\frac{S}{D_{disc}}\right) + 0.257$$

- Se encontró que la posición angular relativa de los accesorios (perno, tee, bushing) de la válvula de impulso afectan el funcionamiento óptimo de la válvula de impulso, medido por la presión máxima desarrollada a caudal cero (Anexo 2)
- Se analizó el comportamiento de las ondas de presión en el extremo inferior de la tubería de suministro, encontrando que para H = 3 se obtienen presiones picos mayores a 1 MPa, mientras que para H = 2 se encuentran presiones pico muy cercanas a 1 MPa (ver Anexo 8.4). Esto afecta negativamente al tubo de suministro de PVC el cual tiene una presión nominal de 10 Bar.

Recomendaciones

Análisis de la variabilidad para h/H > 7.

Estudiar las posibles causas de variabilidad de resultados a h/H > 7, considerando las siguientes variables:

- Altura de suministro aplicada,
- Ajuste particular a cada válvula de impulso (cambio de la velocidad crítica)
- Características constructivas de cada prototipo (optimización).

Probar hipótesis de bombas de ariete multipulsor

Probar hipótesis para el desempeño de la bomba de ariete de PVC multipulsor con la válvula de impulso desarrollada.

Desarrollo de nuevos modelos matemáticos

Desarrollar modelos semi empíricos como base en los trabajos de Young (1995, 1996a, 1996b, 1998) y/o Tacke (1988), que sean aplicables a la bomba de ariete de PVC y/o F°G°.

Trabajar en el rango de condiciones aceptables 0.6 < r < 0.8

Se trabajó en r > 0.8, en 6 de las 9 condiciones de funcionamiento, (ítem 4.4.2). Se sugiere realizar experimentos a 0.6 < r < 0.8 (ítem 2.1.2.2.2.2), esto abre la posibilidad a trabajar con alturas de suministro incluso mayores a H = 3, dado que, la velocidad crítica v_c es directamente proporcional a la altura de descarga máxima h_{max} por la relación $h_{max} = (c/g) \times v_c$ (Anexo 8.3).

Sobre los experimentos preliminares

- La optimización de la válvula de impulso es obligatoria. Una posición angular adecuadamente elegida de accesorios puede significar un incremento de hasta el 10% en la presión máxima (tee y bushing ajustados, ver Anexo 2.3.4), y de hasta 40% (perno ajustado, ver Anexos 2.3.2).

- Se sugiere no trabajar mas allá de H = 3 m, evitando valores extremos de la relación de alturas h/H, dado que las ondas de presión tienen picos que sobrepasan 1 MPa (ver Tabla 182).

Recomendaciones sobre nuevos estudios

- *"Altura de suministro máxima en una bomba de ariete de PVC"*
  - Hipótesis: La altura de suministro máxima permisible para el uso de PVC es de 3 m, de modo que se asegura la no falla de sus componentes (tubo de suministro, cámara de aire, etc.)
  - Hipótesis específica: El pico de presión máxima desarrollada, medida en el extremo inferior del tubo de suministro, es menor a 10 Bar.
  - Hipótesis específica: Es posible trabajar a alturas de suministro mayores a 3 m, para bajas alturas relativas h/H.
- *"Comportamiento del caudal de suministro a diferentes condiciones de altura relativa h/H y relación L/D en una bomba de ariete de PVC".*
  - Hipótesis: El caudal de suministro mínimo es de 7 l/min.
  - Hipótesis específica: El caudal de suministro mínimo se alcanza en h/H = 8.
  - Hipótesis específica: El caudal de suministro se comporta de manera lineal hasta cierto h/H, luego es horizontal hasta el h/H máximo.
- *Altura relativa h/H mínima en una bomba de ariete de PVC.*
  - Hipótesis: La altura relativa mínima donde el funcionamiento de la bomba de ariete es estable (no se detiene) es de h/H = 2.
  - Hipótesis específica: A mayor relación L/D, se incrementa la altura relativa mínima necesaria.
  - Hipótesis específica: Tiempo de cierre de la válvula de descarga es demasiado lento, esto no permite el reinicio del ciclo operativo de la bomba de ariete. La lentitud puede deberse a la mayor cantidad de caudal que lo atraviesa entre otros factores.

Recomendaciones sobre el control de procesos

Sobre la optimización de la válvula de impulso: Trabajar en el desarrollo de un mecanismo de cierre hermético entre el disco y base de la válvula de impulso, de modo que se genere mejores presiones máximas.

Sobre la estabilidad de la válvula de impulso: Trabajar en un dispositivo que permita la adecuada fijación de posición angular del perno de la válvula de impulso, de modo que no afecte su funcionamiento. Un efecto observado es la retención parcial del perno.

Sobre la estabilidad de la cámara de aire: Es recomendable utilizar tubos y accesorios de PVC C-10, u otro material adecuado. Los accesorios PVC 4" de norma NTP 399.172, fallaron cuando se probaban las alturas de descarga máxima h_{max}, para altura de suministro H = 3 m.

Sobre los límites de la bomba de ariete

Se recomienda realizar estudios de revisión sobre bombas de arietes comerciales de fabricación local y/o extranjera, de modo que se pueda tener una referencia sobre los límites de caudal y altura de descarga de esta tecnología. Referencialmente, se encontró que bombas de ariete de fabricación comercial, puede bombear hasta 150 m (328 m modelos pesados) y obtener caudales de bombeo de hasta 3 l/s (ver Anexo 13)

Referencias bibliográficas

Abate, C., & Botrel, T. A. (2002). Hydraulic ram pump perfomance with PVC and steel pipes. *Scientia Agricola*, *59*(1), 197–203. Scopus. https://doi.org/10.1590/S0103-90162002000100029

Agencia Suiza para el Desarrollo y la Coperación (COSUDE). (s/f). *La evolución del proyecto SABA EL ESCALAMIENTO*. https://proyectosaba.org.pe/el-escalamiento/

Arapa Quispe, J. B. (2016). Evaluación del rendimiento del Ariete Hidráulico BAH-1.1/2 variando la longitud de la tubería de alimentación y condiciones de operación de la válvula de impulso. *Anales Científicos*, *77*(2), 155–165. https://doi.org/10.21704/ac.v77i2.485

Asvapoositkul, W., Juruta, J., Tabtimhin, N., & Limpongsa, Y. (2019). Determination of Hydraulic Ram Pump Performance: Experimental Results. *Advances in Civil Engineering*, *2019*. Scopus. https://doi.org/10.1155/2019/9702183

Benites, L. (2021, septiembre 12). Criterio de información de Akaike: Definición, fórmulas. *Statologos*. https://statologos.com/criterio-de-informacion-de-akaikes/

BIMobject. (2023). *Válvula de retención Kent rosca H-H*. BIMobject. https://www.bimobject.com/es/standard_hidraulica/product/kent_hh

Briend Suministros Industriales SRL. (2022). *Accesorios de bronce*. Briend. https://briendsrl.com/productos/accesorios-de-bronce/

Calhoun, J. (2003). *Home Built Hydraulic Ram Pumps*. NW Independent Power Resources 2003. http://www.inthefieldministries.org/jscalhou/Home%20Built%20Hydraulic%20Ram%20Pumps.pdf

Calvert, N. G. (1957). The Hydraulic Ram. *The ENGINEER*, *203*(5282), 597–600.

Cararo, D. C., Damasceno, F. A., Griffante, G., & Alvarenga, L. A. (2007). Características construtivas de um carneiro hidraúlico com materiais alternativos. *Revista Brasilei-*

ra de Engenharia Agrícola e Ambiental, *11*, 349–354. https://doi.org/10.1590/S1415-43662007000400001

Centro Las Gaviotas. (2025). *Ariete Hidráulico Las Gaviotas*. https://centrolasgaviotas.org/ariete-hidr%C3%A1ulico-gaviota

Comité Conjunto de Guías en Metrología (JCGM). (2008). *Evaluación de datos de medición. Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida* (No. 100). http://www.cem.es/es/divulgacion/documentos/evaluacion-datos-medicion-guia-expresion-incertidumbre-medida-edicion

De Freitas, R. A., & Sanchez, S. A. (2002). *Diseño y construcción de un sistema de suministro de agua para una comunidad agrícola* [Tesis de pregrado, Universidad Central de Venezuela]. http://hdl.handle.net/10872/135

De Jong, P. (1988). *Hydraulic rams, a consumer guide*. Delft University of Technology - Centre for International Cooperation and Appropriate Technology (CICAT). https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Afd523e29-a723-4c92-853a-dbd725ad33d0

Fatahi-Alkouhi, R., & Lashkar-Ara, B. (2019). Experimental evaluation of effective parameters on characteristic curves of hydraulic ram pumps. *Scientia Iranica*, *26*(1), 283–294. https://doi.org/10.24200/sci.2017.4597

Giles, R. V. (1987). *Teoría y problemas de mecánica de los fluidos e hidráulica* (2ª ed.). McGraw-Hill. https://www.google.com.pe/books/edition/Teor%C3%ADa_y_problemas_de_-mec%C3%A1nica_de_los/L1hLPQAACAAJ?hl=es-419

Gouvea, C. A. K., Silva, D. da, Hurtado, A. L. B., & Macedo, M. (2013). Aumento de eficiência de um carneiro hidráulico para uso no meio rural. *Revista Espacios*, *34(6)*, 12. https://www.revistaespacios.com/a13v34n06/13340612.html

Green & Carter. (2025). *How a Ram pump works*. https://greenandcarter.com/products-and-services/how-a-ram-pump-works/

Guía Agropecuaria. (2012). *Estudio de Promoción y Difusión de Buenas Prácticas "Bomba de Ariete" del Proyecto Tawan Ingnika*. Agencia de Cooperación Internacional del Japón - JICA. https://www.jica.go.jp/nicaragua/espanol/office/others/c8h0vm000001q4bc-att/32_realizados_01.pdf

Hadzich, M. (s/f). *Manual de Construcción y Mantenimiento. Serie: "La casa ecológica"— Bomba de Ariete.* https://gruporural.pucp.edu.pe/

Hernández, F., & Mazo, M. (s/f). *Modelos de Regresión con R*. Recuperado el 5 de febrero de 2023, de https://fhernanb.github.io/libro_regresion/

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6a ed.). McGraw-Hill/Interamericana. https://www.google.com.pe/books?id=oLbjoQEACAAJ

Hines, W. W., & Montgomery, D. C. (1993). *Probabilidad y estadística para ingeniería y administración* (2a ed.). Compañia Editorial Continental, S.A. de C.V. https://books.google.com.pe/books?id=LbslPQAACAAJ

Instituto Nacional de Calidad. (2018). *Resolución Directoral N° 009-2018-INACAL/DM Aprueban el "PV-003: Procedimiento para la verificación de medidores de agua con diámetro nominal de 15 mm a 25 mm en laboratorio"*. https://www.gob.pe/institucion/inacal/normas-legales/1503735-009-2018-inacal-dm

Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2017). *Censos Nacionales 2017 – XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas*. https://censo2017.inei.gob.pe/

Jiménez Vilcayauri, M. F. (2019). *Evaluación de la eficiencia de la bomba de ariete hidráulico multi-impulsor utilizando botellas de plástico en la cámara de aire* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. http://hdl.handle.net/20.500.14076/18701

Juárez Vargas, J. L. (1982, mayo 31–junio 5). *Bombas hidráulicas*. Tecnologías apropiadas para elevación de agua en areas rurales: Memoria de un seminario realizado en Lima y Lunahuana, Perú. https://www.ircwash.org/node/28395

Karp, A. (1975). *Diseño y cálculos para abastecimiento de agua por medio de arietes hidráulicos (bombas auto-actuantes)*. CARE Guatemala.

Kitani, K., & Willardson, L. S. (1984). Hydraulic Ram Use for Sprinkle Irrigation. *Transactions of the ASAE*, *27*(6), 1788–1791. https://doi.org/10.13031/2013.33046

Krol, J. (1951). The Automatic Hydraulic Ram. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, *165*(1), 53–73. https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1951_165_011_02

Kumar, R. (2018). *Research Methodology: A Step-by-Step Guide for Beginners*. SAGE Publications. https://books.google.com.pe/books?id=J2J7DwAAQBAJ

Lansford, W. M., & Dugan, W. G. (1941). *An analytical and experimental study of the hydraulic ram* (Bulletin No. 326). University of Illinois. Engineering Experiment Station. https://hdl.handle.net/2142/4407

Larock, B. E., Jeppson, R. W., & Watters, G. Z. (1999). *Hydraulics of Pipeline Systems*. CRC Press. https://books.google.com.pe/books?id=RAMX5xuXSrUC

Mandeville, P. B. (2012). Tema 28: Diseños experimentales. *Ciencia Universidad Autónoma de Nuevo León*, *15*(57), 151–155. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3835444

Melo Martínez, O. O., López Pérez, L. A., & Melo Martínez, S. E. (2020). *Diseño de experimentos: Métodos y aplicaciones* (2a ed.). Universidad Nacional de Colombia. https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/79912

Mendenhall, W., Beaver, R. J., & Beaver, B. M. (2010). *Introduccion a la Probabilidad y Estadistica* (13a ed.). Cengage Learning. https://www.google.com.pe/books?id=IXtepwAACAAJ

Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento (MVCS). (2006). *Decreto Supremo Nº 011-2006-VIVIENDA. Aprueban 66 Normas Técnicas del Reglamento Nacional de*

Edificaciones—RNE. https://spij.minjus.gob.pe/spij-ext-web/#/detallenorma/H916405

Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento (MVCS). (2017a). *Decreto Supremo Nº 007-2017-VIVIENDA. Decreto Supremo que aprueba la Política Nacional de Saneamiento*. https://busquedas.elperuano.pe/dispositivo/NL/1503314-7

Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento (MVCS). (2017b). *Decreto Supremo Nº 019-2017-VIVIENDA. Decreto Supremo que aprueba el Reglamento del Decreto Legislativo Nº 1280, Decreto Legislativo que aprueba la Ley del Servicio Universal de Agua Potable y Saneamiento.* https://busquedas.elperuano.pe/dispositivo/NL/1537155-4

Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento (MVCS). (2018, mayo 13). *Resolución Ministerial N.° 192-2018-VIVIENDA, Norma Técnica de Diseño: Opciones Tecnológicas para Sistemas de Saneamiento en el Ámbito Rural*. https://www.gob.pe/institucion/vivienda/normas-legales/275920-192-2018-vivienda

Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento (MVCS). (2021, noviembre 4). *Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE)*. gob.pe. https://www.gob.pe/institucion/vivienda/informes-publicaciones/2309793-reglamento-nacional-de-edificaciones-rne

Najm, H. N., Azoury, P. H., & Piasecki, M. (1999). Hydraulic ram analysis: A new look at an old problem. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, *213*(2), 127–141. https://doi.org/10.1243/0957650991537491

National Institute of Standards and Technology (NIST). (s/f). *Fundamental Physical Constants*. Recuperado el 22 de enero de 2024, de https://www.nist.gov/pml/fundamental-physical-constants

Navidi, W. (2006). *Estadística para ingenieros y científicos* (1a ed.). McGraw-Hill/Interamericana.

https://www.google.com.pe/books/edition/Estad%C3%ADstica/JNehGQAACAAJ?hl=es

Ortega Nebra, J., & González Cebollada, C. (2013). *Construcción, caracterización hidráulica y estudio de aplicación de una bomba de ariete para el riego de una finca agrícola* [Proyecto Fin de Carrera, Universidad de Zaragoza]. https://zaguan.unizar.es/record/10487

Othman, M., Halimee, N. F. H. A., Sobri, M. N. M., Suif, Z., & Ahmad, N. (2020). Hydraulic Ram Pump: A Practical Solution for Green Energy. En H.-Y. Jeon (Ed.), *Sustainable Development of Water and Environment* (pp. 171–176). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-45263-6_16

Pashkov, N. N., & Dolqachev, F. M. (1985). *Hidráulica y máquinas hidráulicas*. Editorial Mir Moscú. https://www.catalogo.uni.edu.pe/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=4261

Pavco Wavin. (2023). *Manual técnico tubosistemas presión PVC*. https://pavcowavin.com.co/tuberia-pvc-presion-agua-fria

Presidencia de la República del Perú. (2016). *Decreto Legislativo Nº 1280. Decreto Legislativo que aprueba la Ley del Servicio Universal de Agua Potable y Saneamiento.* https://spij.minjus.gob.pe/spij-ext-web/#/detallenorma/H1170737

Provenzano, P. G., Garino, C. G. G., Mirasso, A. E., Storti, M. A., & Tornello, M. E. (2013). Influencia del Material de la Conducción en el Desarrollo del Golpe de Ariete. *Mecánica Computacional*, *32*(16), 1347–1361. https://cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/view/4424

Rennie, L. C., & Bunt, E. A. (1990). The automatic hydraulic ram—Experimental results. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, *204*(1), 23–31. https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1990_204_005_02

Rivadeneira Carlosama, S. X., & Silva Espinosa, L. F. (2013). *Diseño y construcción de una bomba de ariete hidráulico con el desarrollo de un software para su dimensio-*

namiento [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana]. http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/5989

Saavedra Torres, A. (2018). *Evaluación del rendimiento de la bomba de ariete hidráulico multi-impulsor de Breur* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. http://hdl.handle.net/20.500.14076/15708

Saito, S., Takahashi, M., & Nagata, Y. (2011). Effects of the Air Volume in the Air Chamber on the Performance of Water Hammer Pump System. *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, *4*(2), 255–261. https://doi.org/10.5293/IJFMS.2011.4.2.255

Saldarriaga, J. G. (1998). *Hidráuica de tuberías*. McGraw-Hill Interamericana. https://www.google.com.pe/books/edition/HIDRAULICA_DE_TUBERIAS/gLRRPwAACAAJ?hl=es-419

Silver, M. (1977). *Use of hydraulic rams in Nepal: A guide to manufacturing and installation*. UNICEF. https://www.ircwash.org/resources/use-hydraulic-rams-nepal-guide-manufacturing-and-installation

Sotelo Ávila, G. (1997). *Hidráulica General Vol.1*. Editorial Limusa Noriega. https://books.google.com.pe/books?id=V65MzwEACAAJ

Suarda, M., Ghurri, A., Sucipta, M., & Kusuma, I. G. B. W. (2018). Investigation on characterization of waste valve to optimize the hydraulic ram pump performance. *AIP Conference Proceedings*, *1984*(1), 020023. https://doi.org/10.1063/1.5046607

Suarda, M., Sucipta, M., & Dwijana, I. G. K. (2019). Investigation on flow pattern in a hydraulic ram pump at various design and setting of its waste valve. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *539*, 012008. https://doi.org/10.1088/1757-899X/539/1/012008

Tacke, J. H. P. M. (1988). *Hydraulic rams; a comparative investigation.* (Report No. 88-1). Delft University of Technology, Department of Civil Engineering. http://resolver.tudelft.nl/uuid:fcdc050d-4500-4565-9fdc-b5d8afc3064b

Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., & Ye, K. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias* (9a ed.). Pearson Educación de México. https://www.google.com.pe/books/edition/Probabilidad_y_estad%C3%ADstica_para_ingenie/NF3ZMgEACAAJ?hl=es

Watt, S. B. (1975). *A Manual On The Hydraulic Ram For Pumping Water*. Intermediate Technology Publications. https://archive.org/details/AManualOnTheHydraulicRamForPumpingWaterS.B.Watt/page/n7/mode/2up

World Health Organization & United Nations Children's Fund. (2021). *Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2020: Five years into the SDGs*. WHO/UNICEF Joint Monitoring Programme for Water Supply, Sanitation and Hygiene (JMP). https://www.who.int/publications/i/item/9789240030848

Wylie, E. B., & Streeter, V. L. (1978). *Fluid Transients*. McGraw-Hill International Book Company. https://books.google.com.pe/books?id=JvtRAAAAMAAJ

Young, B. W. (1995). Design of hydraulic ram pump systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, *209*(4), 313–322. https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1995_209_010_01

Young, B. W. (1996a). Simplified analysis and design of the hydraulic ram pump. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, *210*(4), 295–303. https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1996_210_048_02

Young, B. W. (1996b). Sizing ram pumps. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, *210*(3), 245–248. https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1996_210_038_02

Young, B. W. (1998). Generic design of ram pumps. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, *212*(2), 117–124. https://doi.org/10.1243/0957650981536646

Young, H. D., & Freedman, R. A. (2009). *Física Universitaria, Volumen 1* (12a ed., Vol. 1). Pearson Educación de México.

Anexos

Anexo 1: Estadísticas descriptivas de variables.....1

Anexo 2: Experimentos preliminares.....27

Anexo 3: Procedimiento de determinación del coeficiente de pérdidas locales.....91

Anexo 4: Estimación de la media poblacional μ.....98

Anexo 5: Modelo matemático I.....99

Anexo 6: Modelo matemático II.....101

Anexo 7: Método de estimación de la velocidad crítica.....107

Anexo 8: Estudio de la altura de descarga.....111

Anexo 9: Reporte estadístico de la regresión lineal de los modelos matemáticos.....127

Anexo 10: Velocidad de onda de presión.....136

Anexo 11: Predicción del coeficiente de pérdidas totales, ktotal.....137

Anexo 12: Procedimiento experimental de la prueba principal.....139

Anexo 13: Límites de rendimiento de la bomba de ariete.....143

Anexo 14: Incertidumbres de experimentos preliminares.....144

Anexo 15: Aspectos constructivos de la cámara de aire y válvula de impulso.....160

Anexo 16: Panel fotográfico.....162

Anexo 17: Certificados de calibración de instrumentos de medición.....166

Anexo 18: Tablas de los experimentos preliminares.....189

Anexo 19: Tablas del experimento principal.....231

Anexo 1: Estadísticas descriptivas de variables

1.1 Condiciones requeridas para la validez de las pruebas

1.1.1 Variación de presión aguas arriba $\%\Delta P_1$

Para el caso de pruebas hidráulicas en micromedidores la variación de presión $\%\Delta P_1$ debe ser menor al 10% (Instituto Nacional de Calidad [INACAL], 2018). Para el experimento se ha considerado este mismo límite. En la Figura 80 y Tabla 89, se observa que todas las pruebas (válidas y adicionales) tienen variación de presión por debajo del 5% (rango de 0 % a 4.72%).

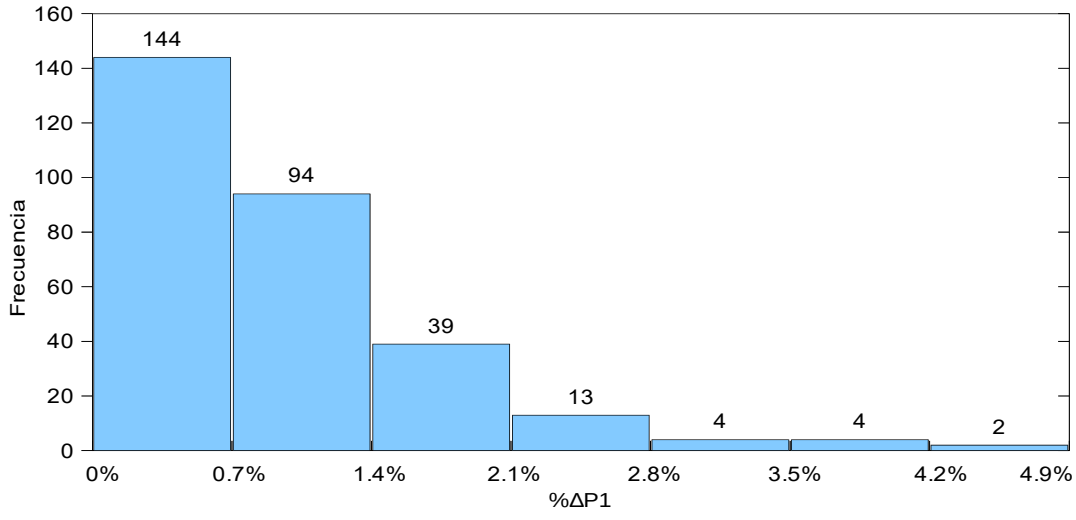
Tabla 89

Tabla de frecuencias de la variación de la altura de descarga $\%\Delta P1$

Intervalo $L_i - L_s$	Marca de clase x_i	Frecuencia absoluta f_i	Frecuencia relativa h_i	Frecuencia absoluta acumulada F_i	Frecuencia relativa acumulada H_i
[0% - 0.7%)	0.35	144	0.480	144	0.480
[0.7% - 1.4%)	1.05	94	0.313	238	0.793
[1.4% - 2.1%)	1.75	39	0.130	277	0.923
[2.1% - 2.8%)	2.45	13	0.043	290	0.967
[2.8% - 3.5%)	3.15	4	0.013	294	0.980
[3.5% - 4.2%)	3.85	4	0.013	298	0.993
[4.2% - 4.9%]	4.55	2	0.007	300	1.000
K=7		300	0.999		

Figura 80

Cantidad de pruebas, según variación de la presión ΔP_1.



1.1.2 Variación de temperatura $\Delta T°$

Según el INACAL (2018) la variación de la temperatura durante la prueba debe ser menor a 5°C. En la Figura 81 y Tabla 90, el 99.0% de pruebas (válidas y adicionales) tienen variación de temperatura menor igual a 0.5 °C.

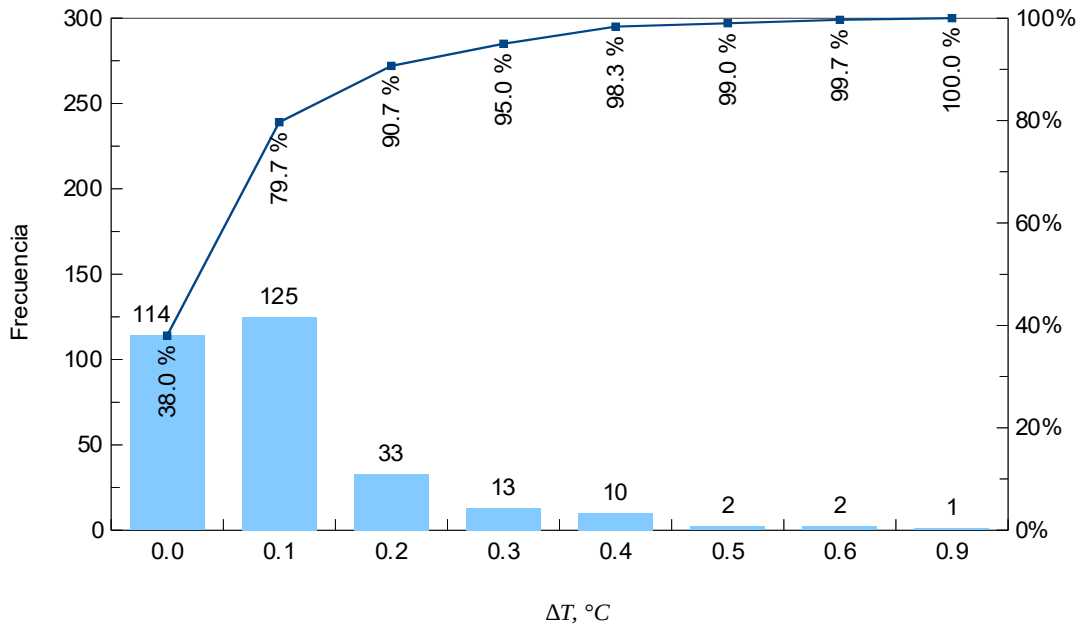
Tabla 90

Tabla de frecuencias de la variación de temperatura $\Delta T°$.

$\Delta T°$	Frecuencia absoluta f_i	Frecuencia relativa h_i	Frecuencia absoluta acumulada F_i	Frecuencia relativa acumulada H_i
0	114	0.38	114	0.380
0.1	125	0.42	239	0.797
0.2	33	0.11	272	0.907
0.3	13	0.04	285	0.950
0.4	10	0.03	295	0.983
0.5	2	0.01	297	0.990
0.6	2	0.01	299	0.997
0.9	1	0	300	1.000
Total	300	1		

Figura 81

Cantidad de pruebas, según variación de la temperatura $\Delta T°$.



Nota. La línea indica la frecuencia relativa acumulada.

1.1.3 Variación de la altura de descarga $\%\Delta h$

La variación de la altura de descarga real respecto a la altura de descarga requerida $\%\Delta h$ debe ser menor a 3 % (INACAL, 2018). Todas las pruebas (válidas y adicionales), cumplen esta condición. El 91.5% de pruebas tienen una variación menor a 1.5% (ver Tabla 91) con un rango de valores de 0% a 2.47%.

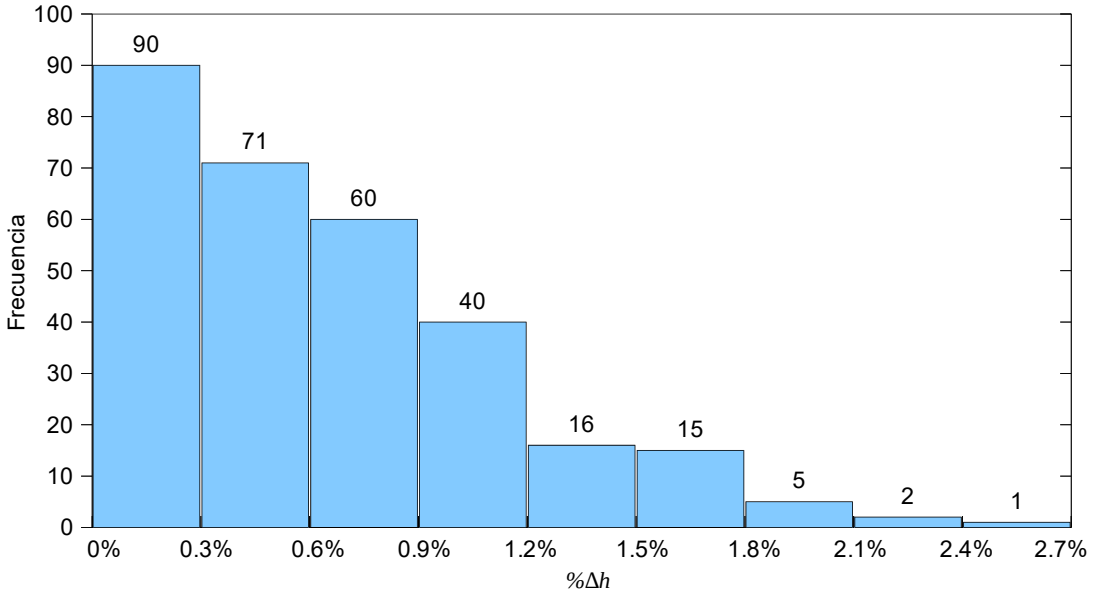
Tabla 91

Tabla de frecuencias de la variación de la altura de descarga $\%\Delta h$

Intervalo $L_i - L_s$	Marca de clase x_i	Frecuencia absoluta f_i	Frecuencia relativa h_i	Frecuencia absoluta acumulada F_i	Frecuencia relativa acumulada H_i
[0% - 0.3%)	0.15	90	0.300	90	0.300
[0.3% - 0.6%)	0.45	71	0.237	161	0.537
[0.6% - 0.9%)	0.75	60	0.200	221	0.737
[0.9% - 1.2%)	1.05	40	0.133	261	0.870
[1.2% - 1.5%)	1.35	16	0.053	277	0.923
[1.5% - 1.8%)	1.65	15	0.050	292	0.973
[1.8% - 2.1%)	1.95	5	0.017	297	0.990
[2.1% - 2.4%)	2.25	2	0.007	299	0.997
[2.4% - 2.7%]	2.55	1	0.003	300	1.000
K=9		300	1.00000		

Figura 82

Frecuencia de pruebas, según variación de la altura de descarga $\%\Delta h$



1.2 Condiciones de flujo

1.2.1 Número de Reynolds *Re*

El número de Reynolds se define por la Ecuación 51:

$$Re = v_c \times D/v \tag{51}$$

Donde:

v_c = velocidad crítica m/s

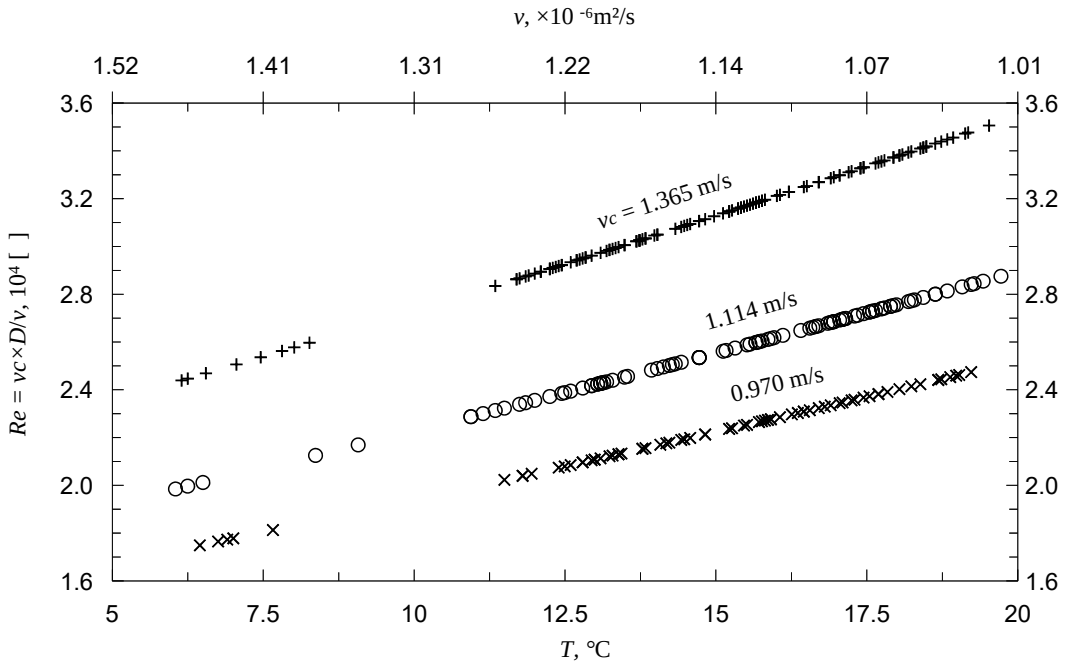
D = diámetro interior del tubo de suministro m

v = viscosidad cinemática m²/s

Los valores del número de Reynolds varían entre 17,489y 35,060. En la Figura 83 muestra la variación del número de Reynolds respecto a la temperatura del agua y la velocidad crítica.

Figura 83

Número de Reynolds Re vs viscosidad cinemática v y velocidad crítica v_c



El rango de la viscosidad cinemática va desde 1.0×10-6 m2/s hasta 1.5×10-6 m2/s aproximadamente. Por otra parte, se puede verificar que la relación h/H no afecta el número de Reynolds, lo mismo para la relación L/D.

1.2.2 Número de Froude

El número de Froude definido por la Ecuación 52:

$$F = \sqrt{(g \times H)} / v_c \tag{52}$$

donde:

g = aceleración estándar de la gravedad, m/s^2

H = altura de suministro, m

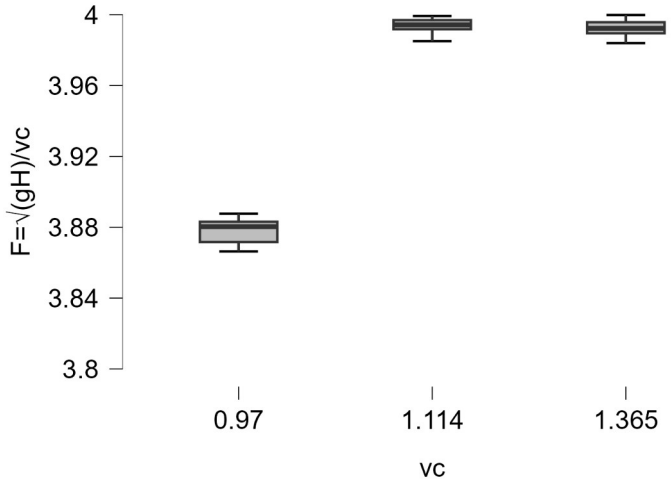
v_c = velocidad crítica, m/s

En general la variación del número de Froude es baja, la Figura 84 muestra las estadísticas en función de la velocidad crítica v_c.

La Figura 84, muestra el diagrama de caja, donde para v_c = 0.97 m/s se tiene un valor de F bajo. Esto se debe a que, v_c = 0.97, está asignada a la altura de suministro H = 1.4 m, en los otros casos las velocidades críticas 1.114 m/s y 1.365 m/s corresponden a alturas de suministro de 2 m y 3 m respectivamente.

Figura 84

Diagrama de caja del número de Froude y velocidad crítica



En las pruebas, se utilizaron tres prototipos de válvula de impulso. Cada uno trabajó en una altura suministro definida, al que se le asignó la una velocidad crítica.

1.2.3 Numero de Mach

Otra de las variables, es el número de Mach definido por la Ecuación 53:

$$M = v_c / c \tag{53}$$

Donde:

v_c = velocidad crítica, m/s

c = es la velocidad de la onda de presión, m/s

En la Tabla 92 determinamos el valor de la velocidad de onda c a partir de la Ecuación 115 (Ver Anexo 10).

Tabla 92

Estadísticas descriptivas de la velocidad de onda c.

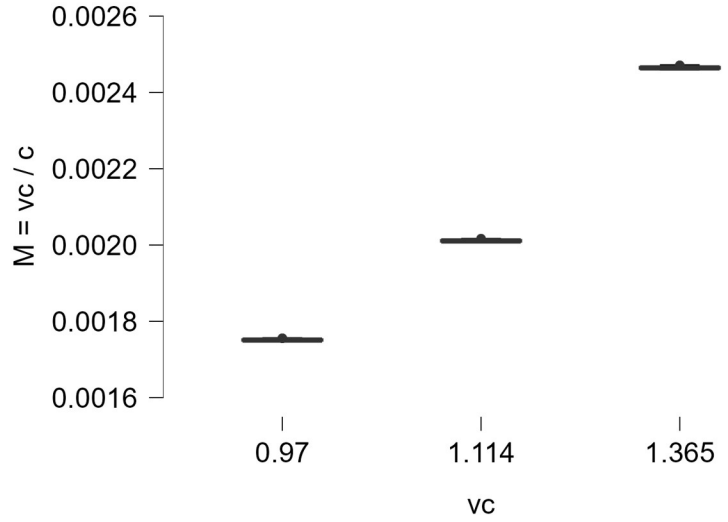
$\bar{x}_c$, m/s	s, m/s	Máx, m/s	Mín, m/s	n	$s/\bar{x}\times 100\%$
553.9	0.5	554.7	552.4	300	0.09%

Nota. $\bar{x}_c$, media de la velocidad de onda. Simbología en la Tabla 97.

Los valores del número de Mach se encuentran entre 0.00175 y 0.00247, con una variación porcentual baja (0.09%). El número de Mach prácticamente no varía, dado que la velocidad crítica se fija en cada prototipo (Figura 85).

Figura 85

Diagrama de caja del número de Mach vs velocidad crítica.



1.2.4 Velocidad crítica v_c y relación de velocidades $r = v_c/v_0$

En el Capítulo 2.1.2.2.2.2, se definió la velocidad crítica, y se mencionó que puede aproximarse como $v_c \approx v_1$, donde v_1 es la velocidad en el instante de inicio de cierre de la válvula de impulso. Del equilibrio de fuerzas tenemos la Ecuación 54:

$$v_1 = \sqrt{\frac{W}{\rho_{H2O} \times K_d \times A_{disco}}} \tag{54}$$

Donde:

W : Peso del eje móvil de la válvula, N

ρ_{H2O} : Densidad del agua a cierta temperatura, kg/m³

K_d : Coeficiente de arrastre $K_d = f(S, D_{disco})$, [ ]

A_{disco} : Área del disco del eje móvil de la válvula, m²

S : Carrera de la válvula de impulso, mm

D_{disco} : Diámetro del disco, mm

La selección de una velocidad crítica v_c implica la identificación de todas las variables que influyen como la carrera de la válvula de impulso S, el peso W, el diámetro de disco D_{disco}.

Normalmente la incógnita está dada en el coeficiente de arrastre K_d el cual depende de la carrera S y el diámetro D_{disc}.

En el Anexo 2.2, se realizó la determinación experimental del coeficiente de arrastre K_d y de variables involucradas como a carrera de la válvula de impulso S y altura de suministro H.

Se propuso el modelo matemático de la Ecuación 55, para $K_d = f(S/D_{disc})$, con un R^2 ajustado = 0.998 y $RMSE$ = 0.01543.

$$\frac{1}{-1.19}(K_d)^{-1.19} = -4.842\left(\frac{S}{D_{disc}}\right) + 0.257 \tag{55}$$

Por otra parte, se encontró qué para que inicie el golpeteo de la bomba de ariete es necesario una altura mínima H_{min}. La Tabla 93 muestra los valores promedio encontrado de diferentes variables.

Tabla 93

Velocidad crítica y coeficiente de arrastre

H_{min}, m	S mm	v_c m/s	K_d [ ]	S/D_{disc}
0.82	4.87	0.885	1.834	0.139
0.94	5.55	0.970	1.526	0.158
1.06	6.17	1.043	1.320	0.176
1.17	6.92	1.114	1.157	0.198
1.41	8.52	1.243	0.929	0.243
1.64	10.23	1.365	0.771	0.292
1.88	11.81	1.478	0.658	0.337

Nota. H_{min} altura de suministro mínima, S: carrera corregida, v_1 velocidad estática, K_d coeficiente de arrastre.

Por tanto, de la Tabla 93, la bomba de ariete funcionará cuando la altura de suministro H sea mayor $H > H_{min}$., para cierta carrera S y diámetro D_{disc} seleccionado.

Sin embargo, este punto de operación es mínimo, a parte, normalmente será mejor trabajar a mayores alturas de suministro como se observará en el Anexo 1.4.1.

Un criterio sugerido para la selección de la velocidad crítica es la relación $r = v_c/v_0$ que relaciona la velocidad crítica y la velocidad en la condición estática del flujo (ver Capítulo 2.1.2.2.2.2): $0.60 < v_c/v_0 < 0.80$

A partir de este criterio Young (1995, 1996) analiza los limites mínimos y/o máximos para la altura de suministro H y longitud del tubo de suministro L. Esto le permite evaluar el significado de las relaciones L/H y L/D.

La velocidad estática lo determinamos de la Ecuación 56:

$$v_0 = \sqrt{\frac{2gH}{1 + k_{acc} + k_{valv} + f \times \frac{L}{D}}} \tag{56}$$

Donde:

g = Aceleración estándar de la gravedad, 9.80665 m/s^2

H = Altura de suministro, m

f = Coeficiente de fricción de Darcy

L = Longitud del tubo de suministro, m

D = Diámetro del tubo de suministro, m

k_{val} = Coeficiente de perdidas menores debido a la válvula de impulso.

k_{acc} = Coeficiente de pérdidas menores por el ingreso, salida y otros.

El coeficiente k_{val}, depende de la carrera de la válvula de impulso S, diámetro del disco D_{disc} y la altura de suministro H.

En el Anexo 2.1.6 se determinó el modelo empírico para k_{val} de la Ecuación 57 con un R^2 ajustado de 0.99 y $RMSE$ de 0.062. En el Anexo 11 se define el coeficiente k_{acc}.

$$k_{valv} = 0.456\, H^{-3.1} + 0.085 \left(\frac{S}{D_{disc}}\right)^{-1.6} + 3.03 \tag{57}$$

A partir de los modelos, podemos calcular la relación $r = v_c/v_0$, según las diferentes condiciones de H y S/D_{disc}.

La Tabla 94 muestra valores de la relación $r = v_c/v_0$, para diferentes H y S/D_{disc}. Los valores resaltados indican que para una relación S/D_{disc} seleccionado, un rango de alturas H son factibles. Esto también se cumple en forma contraria.

Los valores de rojo oscuro indican la zona donde la bomba de ariete deja de funcionar.

Tabla 94

Rango de valores de la relación de velocidades $r = v_c/v_0$.

H, m	S/D_{disc}						
	0.140	**0.158**	**0.176**	**0.198**	**0.243**	**0.292**	**0.337**
0.8	1.019	-	-	-	-	-	-
0.9	0.950	1.031	-	-	-	-	-
1.0	0.894	0.970	1.036	1.099	-	-	-
1.2	0.807	0.875	0.935	0.992	-	-	-
1.4	0.742	0.804	0.859	0.911	1.007	-	-
1.6	0.688	0.746	0.797	0.845	0.934	1.019	-
1.8	0.646	0.700	0.748	0.793	0.876	0.956	1.032
2	0.611	0.662	0.707	0.750	0.828	0.904	0.975
2.2	0.579	0.628	0.670	0.711	0.786	0.857	0.925
2.4	0.553	0.600	0.640	0.679	0.750	0.818	0.883
2.6	0.530	0.575	0.613	0.651	0.719	0.784	0.846
2.8	0.510	0.553	0.590	0.625	0.691	0.754	0.813
3.0	0.491	0.533	0.568	0.603	0.666	0.727	0.784
3.2	0.475	0.515	0.549	0.583	0.644	0.702	0.757

Nota. La tabla se ha elaborado considerando L/D = 400, una T = 15°C.y D_{disc} = 35 mm.

Como es obvio, la selección de S/D_{disc}, implica que se utiliza una velocidad crítica aproximada según la Tabla 93.

Con los datos de la Tabla 94 se seleccionaron las carreras S y su correspondiente altura H para los tres prototipos utilizado en el experimento principal.

Inicialmente, no se previó que si se cambia de relación L/D, entonces la velocidad estática v_0 se reduce (por el aumento de longitud de tubería) con lo cual la relación $r = v_c/v_0$ se incrementa.

En la Tabla 95 se observan valores de la relación de velocidades $r = v_c/v_0$ adecuados cuando L/D = 400, sin embargo, para otras L/D se encuentran valores es mayores.

Tabla 95

Ratio de velocidades utilizados en el estudio principal

H*, m	v_c, m/s	S*, mm	L/D	$r = v_c/v_0$
1.4	0.970	5.6	400	0.804
			500	0.858
			600	0.909
2	1.114	6.9	400	0.750
			500	0.800
			600	0.848
3	1.365	10.2	400	0.727
			500	0.776
			600	0.823

Nota. *Valores aproximados.

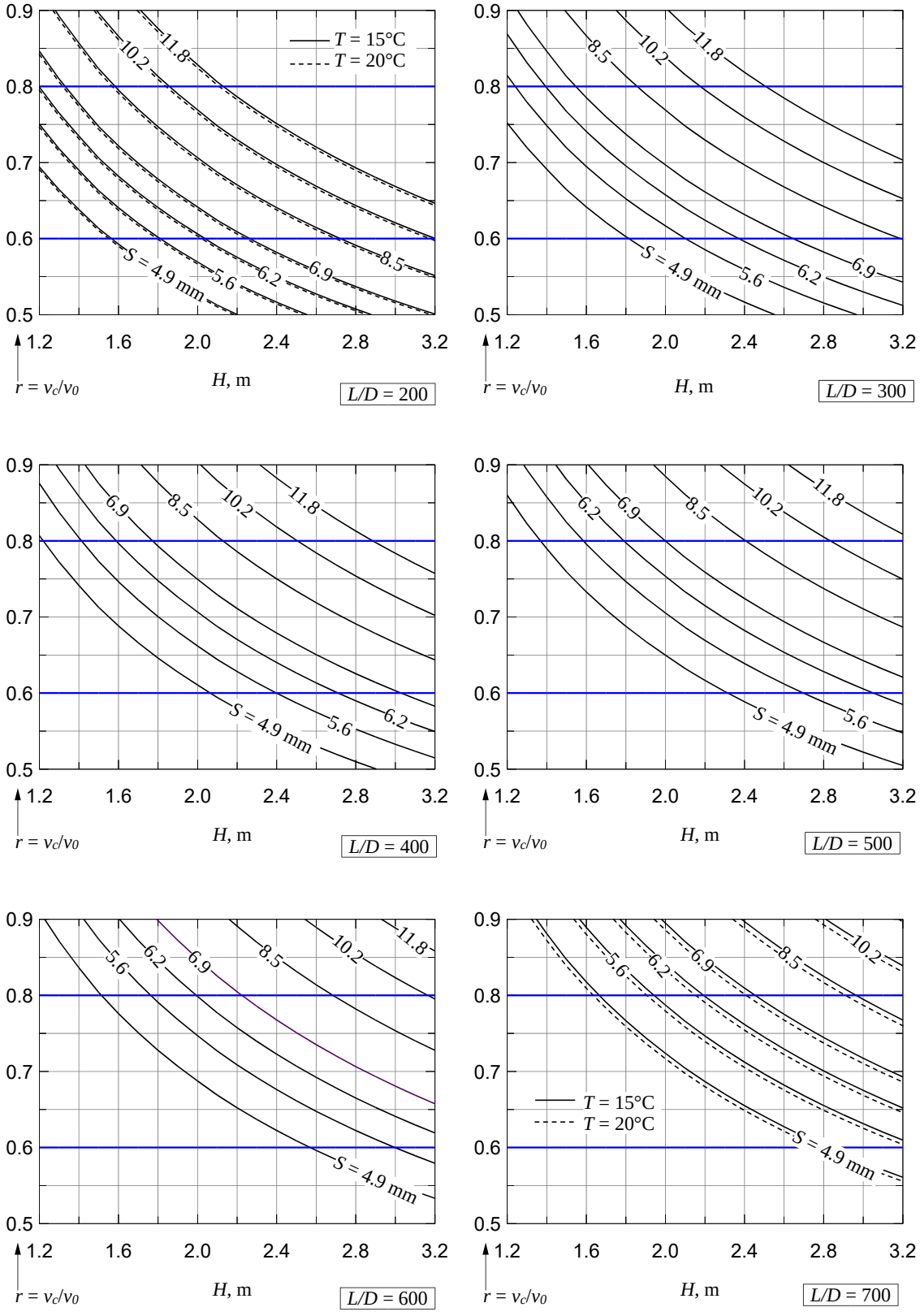
Se puede elaborar gráficos para diferentes L/D = {200, 300, 400, 500, 600, 700}. En la Figura 86 se expresa la relación $r = v_c/v_0$ en función de las variables H, S y relación L/D.

A partir de la Figura 86 se puede seleccionar una condición de operación de la bomba de ariete, seleccionando una carrera de válvula de impulso S adecuada, para la altura de suministro definida H.

En la Figura 86, los gráficos son para la temperatura media del experimento de T = 15°C. En el primer gráfico (L/D = 200) y último gráfico (L/D = 700), se muestra una línea segmentada con valores para una temperatura de T = 20°C.

Figura 86

Relación $r = v_c/v_0$ en función de H y S para diferentes L/D



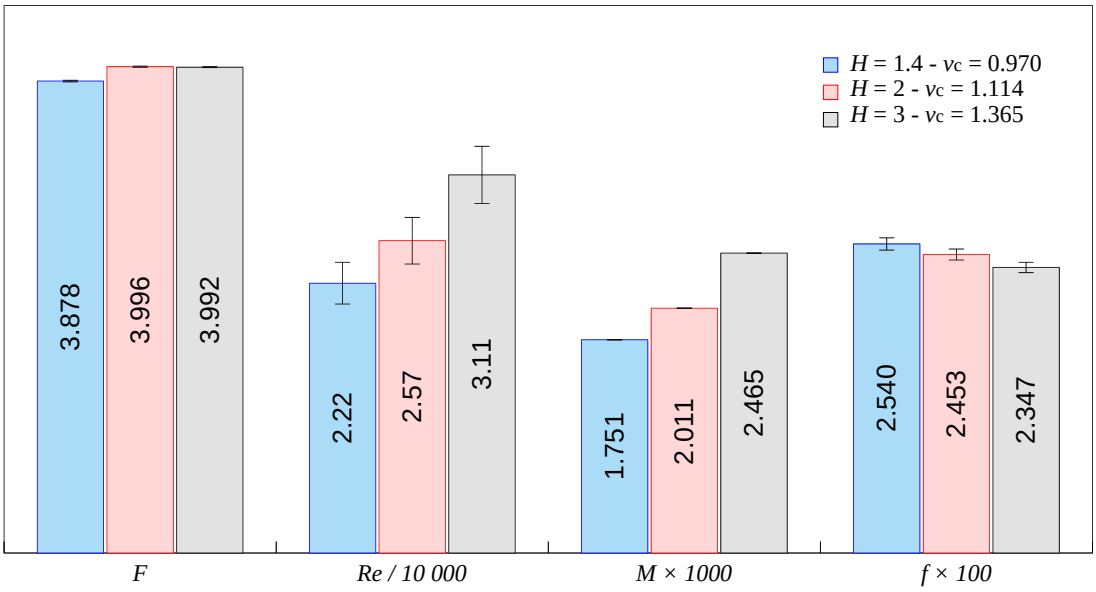
1.2.5 Resumen de condiciones generales de flujo

En la Figura 87 se muestra las condiciones de flujo del experimento principal realizado. Se observa los valores medios del número de Froude, número de Reynolds, número de Mach, y factor de fricción.

Cada condición "H - v_c" corresponde a un prototipo de válvula de impulso. Con estos tres prototipos se realizaron las pruebas experimentales.

Figura 87

Condiciones generales de flujo.



Nota. F número de Froude, Re número de Reynolds, M número de Mach, f factor de fricción. Se muestran las barras de error de la desviación estándar.

En el caso del factor de fricción, se determinó considerando una velocidad igual a la velocidad crítica (Tabla 96)

Tabla 96

Estadísticas descriptivas del coeficiente de fricción de Darcy f.

H, m	v_c, m/s	$\bar{x}_f$, m/s	s, m/s	Máx, m/s	Mín, m/s	n	$s/\bar{x}$×100%
1.4	0.970	0.0254	0.00050	0.0269	0.0247	72	1.97%
2	1.114	0.0245	0.00045	0.0261	0.0239	102	1.85%
3	1.365	0.0235	0.00043	0.0248	0.0228	126	1.82%

Nota. $\bar{x}_f$, media del coeficiente de fricción. Simbología en la Tabla 97.

1.3 Estadísticas de las variables independientes

1.3.1 Variables independientes simples

En la Tabla 97, se muestra los símbolos de estadísticas comunes aplicadas a las variables individuales. Corresponden a estadísticas descriptivas generales y estimación del intervalo de confianza.

Tabla 97

Símbolos comunes en las tablas estadísticas.

N.º	Símbolo	Descripción.
1	s	desviación estándar
2	Máx	registro de valor máximo
3	Mín	registro de valor mínimo
4	n	cantidad de observaciones
5	RSD	desviación estándar relativa $(s/\overline{x})\times 100\%$
6	$t_{\alpha/2}$	valor de t con, n–1 grados de libertad para un α = 0 05
7	E	es el valor del error máximo de estimación para un intervalo de confianza del $100(1-\alpha)\%$ con $E = t_{\alpha/2}\, s/\sqrt{n}$. A partir de este se elabora el, intervalo de confianza del 95% para la media poblacional μ donde $\overline{x} - E, < \mu < \overline{x} + E$ (Ver Anexo 4)
8	Valor p	del contraste de normalidad de Shapiro-Willk
9	$k^* u_c(y)$	k factor de cobertura, $u_c(v)$ es la incertidumbre típica combinada de la variable y (Comité Conjunto de Guías en Metrología [JCGM], 2008)

1.3.1.1 Longitud de la tubería de suministro L

Corresponde a la relación L/D dado un valor de diámetro interior D. Para el estudio presente el diámetro se ha definido en 26.2 mm (Anexo 1.3.1.5). La Tabla 98 muestra la longitud teórica (segunda columna) y la longitud real de la tubería de suministro.

Tabla 98

Longitud teórica y real de la tubería de suministro.

L/D	Longitud teórica, m	Longitud real total, m
400	10.48	10.51
500	13.10	13.14
600	15.72	15.74

Se realizó una sola medición en los tres casos, por ello no se cuenta con una dispersión de datos, sin embargo, el único valor es próximo a los valores teóricos. Por ende, se toma la longitud teórica para los cálculos siguientes.

1.3.1.2 Altura de suministro H

Se determinó a partir de la diferencia entre el nivel del agua que asciende en el tanque de suministro (tubo 4”) menos el nivel mínimo cuando el ariete no opera (ver ítem 3.2.1.2.2).

En la Tabla 99 se observa que la altura promedio de suministro $\bar{x}_H$ es ligeramente mayor a la altura de suministro H nominal, esto dado que el nivel del agua en el tanque de suministro (tubo 4”) es ligeramente superior.

La columna $(\bar{x}_H - H)/H$, indica el incremento porcentual de la altura de suministro real promedio $\bar{x}_H$ respecto a la altura de suministro H nominal. En general se tiene una diferencia menor al 5%.

La cantidad de registros es variable, esto pues, no se contempló realizarlo al inicio, por lo que no se midió en pruebas iniciales.

En las dos últimas columnas se estima el intervalo de confianza del 95% para la media poblacional μ donde $\bar{x} - E, < \mu < \bar{x} + E,$ (Ver Anexo 4). La mayoría de los subgrupos satisfacen el supuesto de normalidad (p > 0.05), por lo que los intervalos de confianza de la media poblacional son aplicables en esos casos.

Tabla 99

Estadísticas de la altura de suministro.

H, m	L/D	$\bar{x}_H$, cm	s, cm	Máx, cm	Mín, cm	n	$s/\bar{x}_H$	$(\bar{x}_H - H)/H$	$t_{0.025}$	E	Valor p
1.4	400	144.54	0.173	144.80	144.30	14	0.12 %	3.24 %	2.160	0.100	0.18
	500	143.69	0.219	144.13	143.43	14	0.15 %	2.64 %	2.160	0.127	0.19
	600	144.66	0.153	145.01	144.35	16	0.11 %	3.33 %	2.131	0.082	0.53
	Subtotal	**144.31**	**0.469**	**145.01**	**143.43**	**44**	0.32 %	**3.08 %**	**2.017**	**0.143**	**0**
2	400	202.38	0.374	203.02	201.72	21	0.18 %	1.19 %	2.017	0.143	0.87
	500	201.47	0.344	201.97	200.97	21	0.17 %	0.73 %	2.086	0.170	0.12
	600	202.41	0.365	202.95	201.64	32	0.18 %	1.20 %	2.086	0.156	0.22
	Subtotal	**202.13**	**0.553**	**203.02**	**200.97**	**74**	0.27 %	**1.07 %**	**2.040**	**0.132**	**0.02**
3	400	303.10	0.414	303.70	302.30	21	0.14 %	1.03 %	2.040	0.132	0.16
	500	302.27	0.367	302.66	301.61	22	0.12 %	0.76 %	1.993	0.128	0.01
	600	303.14	0.487	303.97	301.97	33	0.16 %	1.05 %	2.086	0.189	0.48
	Subtotal	**302.88**	**0.580**	**303.97**	**301.61**	**76**	0.19 %	**0.96 %**	**2.080**	**0.163**	**0.15**

Nota. $\bar{x}_{H,}$ media de la altura de suministro. Simbología en la Tabla 97.

1.3.1.3 Altura de descarga h

La altura de descarga (o de bombeo), se determinó a partir de las mediciones de presión a la salida de la bomba de ariete. La presión requerida se alcanzó mediante la estrangulación de válvulas de aguja. La Tabla 100 se muestra los resultados obtenidos.

La primera columna h indica la altura de descarga requerida (nominal) y la columna $\bar{x}_h$ el valor promedio de la altura de descarga real en pruebas con repetición.

Sólo dos grupos de datos (h=12 y h=18) no satisfacen el supuesto de normalidad (valor p > 0.05), en los demás casos la aplicación del intervalo de confianza es factible.

El número de observaciones es variable dado que corresponden a tratamientos diferentes bajo alturas de suministro diferentes.

Tabla 100

Estadísticas descriptivas de la altura de descarga real h

h, nominal	$\bar{x}_h$, m	s, m	Máx, m	Mín, m	n	$(\bar{x}-h)/h$	$t_{0.025}$	E	Valor p
4.2	4.21	0.037	4.26	4.16	9	0.18 %	2.306	0.029	0.377
4.6	4.61	0.023	4.65	4.59	5	0.30 %	2.776	0.029	0.424
4.8	4.80	0.045	4.85	4.75	5	0.07 %	2.776	0.056	0.404
5	5.01	0.062	5.08	4.92	5	0.15 %	2.776	0.077	0.937
5.6	5.60	0.038	5.66	5.54	9	0.03 %	2.306	0.029	0.965
6	6.02	0.053	6.08	5.92	9	0.37 %	2.306	0.041	0.313
6.9	6.99	0.033	7.02	6.94	5	1.26 %	2.776	0.041	0.570
7	7.05	0.027	7.07	6.99	9	0.65 %	2.306	0.021	0.054
7.2	7.23	0.061	7.30	7.14	5	0.36 %	2.776	0.076	0.903
7.5	7.54	0.080	7.63	7.44	5	0.58 %	2.776	0.099	0.554
8	7.94	0.072	8.06	7.83	9	-0.71 %	2.306	0.055	0.598
8.4	8.36	0.043	8.42	8.27	9	-0.51 %	2.306	0.033	0.535
9	8.98	0.054	9.08	8.90	12	-0.23 %	2.201	0.034	0.685
9.8	9.83	0.057	9.95	9.77	9	0.31 %	2.306	0.044	0.186
10	9.99	0.049	10.10	9.95	9	-0.06 %	2.306	0.037	0.070
11.2	11.25	0.038	11.32	11.21	9	0.42 %	2.306	0.030	0.082
12	12.01	0.103	12.30	11.74	21	0.12 %	2.086	0.047	0.005
12.6	12.53	0.076	12.71	12.45	9	-0.56 %	2.306	0.059	0.049
14	13.97	0.079	14.18	13.84	18	-0.21 %	2.110	0.039	0.321
15	14.92	0.069	15.01	14.80	12	-0.54 %	2.201	0.044	0.474
16	15.98	0.147	16.17	15.70	9	-0.15 %	2.306	0.113	0.750
18	17.92	0.107	18.11	17.75	21	-0.45 %	2.086	0.049	0.236
20	19.93	0.161	20.20	19.70	9	-0.35 %	2.306	0.124	0.951
21	20.98	0.132	21.21	20.76	12	-0.11 %	2.201	0.084	0.969
22	22.08	0.184	22.41	21.85	15	0.36 %	2.145	0.102	0.397
24	23.96	0.206	24.26	23.53	12	-0.15 %	2.201	0.131	0.606
27	26.92	0.229	27.26	26.53	12	-0.29 %	2.201	0.145	0.331
30	29.99	0.215	30.29	29.51	12	-0.04 %	2.201	0.137	0.705
33	32.98	0.368	33.64	32.25	15	-0.07 %	2.145	0.204	0.976
Total			33.64	4.16	300				

Nota. $\bar{x}_h$, media de la altura de descarga real, $t_{\alpha/2}$. Simbología en la Tabla 97.

1.3.1.4 Altura máxima h_{max} (q = 0)

La altura máxima se da cuando el caudal de descarga es cero (q = 0), esto se consigue cerrando la válvula de salida de la bomba de ariete.

La Tabla 101 y Figura 88, es en base al total de pruebas realizadas. Se observa que, a mayor altura de suministro H mayor es altura máxima. Esto se explica, por la mayor energía cinética disponible para el golpe de ariete (mayor velocidad crítica v_c).

Tabla 101

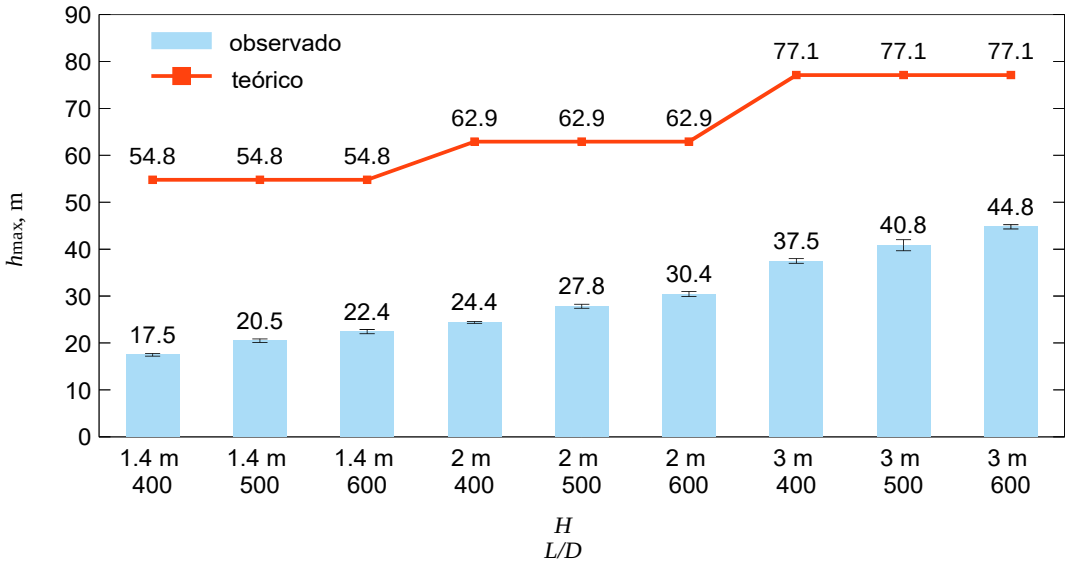
Estadísticas descriptivas de la altura máxima h_{max}.

H, m	v_c, m/s	L/D	$\bar{x}_{hmax,}$ m	s, m	Máx, m	Mín, m	n	$\bar{x}_{hmax}/H$	$t_{\alpha/2}$	E	Valor p
1.4	0.97	400	17.46	0.28	17.86	16.84	27	12.08	2.056	0.110	0.013
		500	20.50	0.36	21.04	19.80	28	14.27	2.052	0.141	0.102
		600	22.41	0.44	23.46	21.85	26	15.49	2.060	0.178	0.001
2	1.11	400	24.38	0.20	24.79	23.98	38	12.05	2.026	0.065	0.171
		500	27.83	0.43	28.96	27.04	38	13.81	2.026	0.141	0.237
		600	30.43	0.54	31.22	29.49	28	15.03	2.052	0.209	0.032
3	1.37	400	37.50	0.48	38.26	36.73	31	12.37	2.042	0.177	0.045
		500	40.85	1.18	43.14	38.97	25	13.51	2.064	0.486	0.011
		600	44.77	0.46	45.43	43.87	11	14.77	2.228	0.308	0.331
Total					45.426	16.842	252				

Nota. $\bar{x}_{hmax,}$ media de la altura máxima. En $\bar{x}_{hmax}/H$, H es la altura de suministro real. Simbología en la Tabla 97.

Figura 88

Altura máxima en función de la altura de suministro H y la relación L/D



1.3.1.5 Diámetro de la tubería de suministro D

La tubería seleccionada para el estudio tiene las siguientes características:

- Tubería para agua fría con rosca NTP 399.166, Diámetro nominal: 1”, Diámetro exterior real: 33.0 mm, Espesor: 3.4 mm.

Se tomó una sección del tubo de suministro y se midió el diámetro interior en diez posiciones angulares con dos repeticiones. En la Tabla 102, la última fila muestra la media general de los datos y su desviación estándar.

Tabla 102

Estadísticas descriptivas del diámetro de la tubería de suministro

Medición	$\bar{x}_D$, mm	s, mm	Máx, mm	Mín, mm	n
Total	26.1625	0.118	26.37	26.02	20

Nota. $\bar{x}_D$, valor medio de diámetro interior. Simbología en la Tabla 97.

Podemos determinar un intervalo de confianza del 100(1-α)% = 95% para la media poblacional de D.

Utilizamos las condiciones indicadas en el Anexo 4, entonces el intervalo de confianza será de la forma $\bar{x} - E, < \mu < \bar{x} + E$. En la Tabla 103 se muestra el cálculo realizado.

Tabla 103

Estadísticas del diámetro la tubería de suministro.

DN	$\bar{x}_D$ mm	s, mm	n	$t_{0.025}$	E	Intervalo de confianza			Valor p
1”	26.163	0.118	20	2.262	0.0598	26.103 <	μ	< 26.222	0.195

Nota. DN Diámetro Nominal, $\bar{x}_D$ media del diámetro interior. Simbología en la Tabla 97.

Se cumple el supuesto de normalidad con un valor p de 0.195, con lo cual es válido la aplicación del intervalo de confianza.

El diámetro interior del tubo de suministro según el catálogo es de 26.2 mm, el cual se encuentra dentro del intervalo de confianza. Para el estudio se utilizará la medida del catálogo como diámetro interior de la tubería de suministro.

1.3.1.6 Temperatura media del agua T_{med}

Se midió la temperatura al inicio y al final de cada prueba, en las tablas siguientes se muestra las estadísticas de la temperatura media. La temperatura media de 14.89 °C y desviación estándar de 2.93, la temperatura media máxima es 19.72 °C y la temperatura media mínima es de 6.05 °C. En la Tabla 104 y Figura 89 se observa que sólo 37 pruebas (12.3%) tienen temperatura media menor a 12 °C.

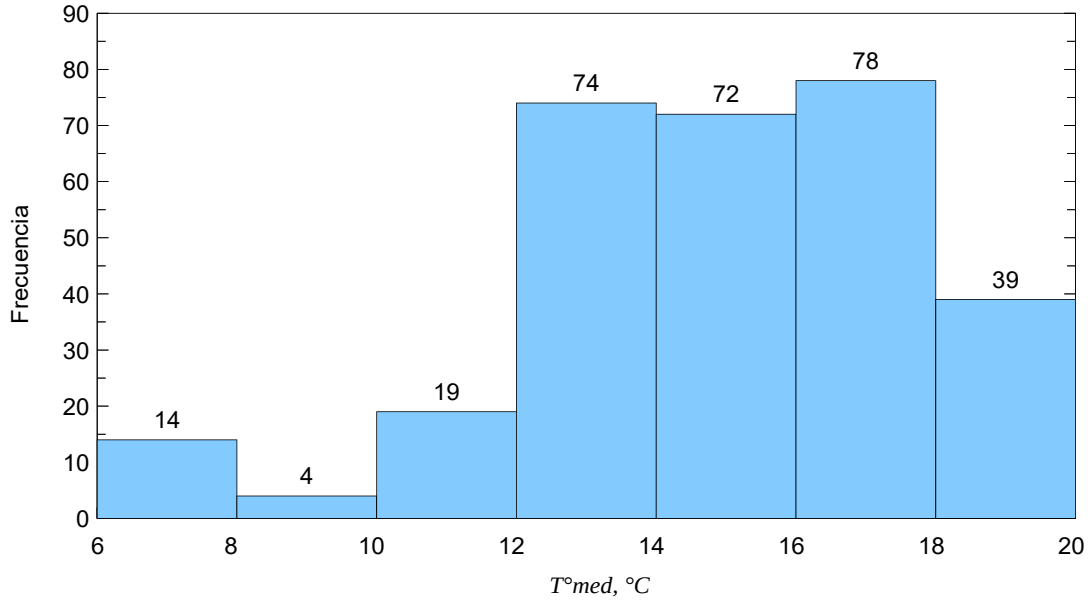
Tabla 104

Frecuencias absoluta y relativa de la temperatura media T_{med}

Intervalo $L_i - L_s$	**Marca de clase x_i**	**Frecuencia absoluta f_i**	**Frecuencia relativa h_i**	**Frecuencia absoluta acumulada F_i**	**Frecuencia relativa acumulada H_i**
[6 - 8)	7	14	0.047	14	0.047
[8 - 10)	9	4	0.013	18	0.060
[10 - 12)	11	19	0.063	37	0.123
[12 - 14)	13	74	0.247	111	0.370
[14 - 16)	15	72	0.240	183	0.610
[16 - 18)	17	78	0.260	261	0.870
[18 - 20]	19	39	0.130	300	1.000
K=7		300	1.000		

Figura 89

Tabla de frecuencias de la temperatura media T_{med}



1.3.1.7 Nivel mínimo N_{min}

Es el nivel del agua cuando no existe flujo en el sistema. Este nivel está dado por el nivel a la salida de la válvula de impulso.

Para su medición se colocó un piezómetro y una regleta en el tanque de suministro (tubo vertical de 4”).

En la Tabla 105, los valores de la altura mínima son numéricamente altos, dado que, la cinta métrica se colocó en sentido inverso. En la Tabla 105 se observa una desviación estándar baja en todos los casos. La cantidad de mediciones es baja dado que se midió sólo al inicio de una jornada de pruebas realizadas.

Tabla 105

Estadísticas descriptivas e inferencial de la altura mínima H_{min}.

H, m	L/D	$\bar{x}_{Hmin,}$ m	s, m	Máx, m	Mín, m	n	$t_{\alpha/2}$	E	Valor p
1.4	400	315.27	0.111	315.5	315.2	7	2.447	0.103	0.01
	500	314.93	0.096	315.0	314.8	4	3.182	0.152	0.27
	600	315.76	0.089	315.8	315.6	5	2.776	0.111	0.00
2	400	315.17	0.058	315.2	315.1	3	4.303	0.143	0.00
	500	314.82	0.075	314.9	314.7	6	2.571	0.079	0.21
	600	315.54	0.101	315.6	315.3	9	2.306	0.078	0.00
3	400	315.25	0.160	315.5	315.0	8	2.365	0.134	0.98
	500	314.96	0.106	315.1	314.8	8	2.365	0.089	0.37
	600	315.77	0.082	315.9	315.7	6	2.571	0.086	0.09
Total		315.286	0.341	315.9	314.7	56			

Nota. $\bar{x}_{Hmin,}$ media de la altura mínima. Simbología en la Tabla 97.

Cuatro grupos de datos no satisfacen el supuesto de normalidad (valor p < 0.05), en estos casos la aplicación del intervalo de confianza $\bar{x}_{Hmin} - E < \mu < \bar{x}_{Hmin} + E$ es limitado.

1.3.2 Relaciones adimensionales independientes

1.3.2.1 Relación de alturas h/H

Los valores nominales para la relación de alturas h/H, se determinaron en el diseño experimental a partir de valores nominales de h y H.

Con las mediciones reales de la altura de suministro y la altura de descarga se obtiene la relación de alturas real h/H. En la Tabla 106, se observa las estadísticas de la relación de alturas real.

En general los valores promedio $\overline{x}_{h/H}$ son menores al valor de h/H nominal, esto pues, la altura de suministro real es ligeramente mayor al valor nominal de H (ver Anexo 1.3.1.2). La dispersión de la media es baja ($s/\overline{x}_{h/H}$ < 2%).

Tabla 106

Comparación de h/H teórico y h/H real, en función de la relación L/D

***h/H* teórico**	***L/D* = 400**			***L/D* = 500**			***L/D* = 600**		
	$\overline{x}_{h/H}$	$(s/\overline{x}_{h/H})\times 100\%$	n	$\overline{x}_{h/H}$	$(s/\overline{x}_{h/H})\times 100\%$	n	$\overline{x}_{h/H}$	$(s/\overline{x}_{h/H})\ 100\%$	n
2.3	2.298	0.76 %	10	-	-	-	-	-	-
2.4	-	-	-	2.391	0.82 %	10	-	-	-
2.5	-	-	-	-	-	-	2.488	1.16 %	10
3	2.948	1.12 %	10	2.980	1.09 %	10	2.952	1.36 %	10
4	3.946	1.56 %	10	3.936	1.01 %	10	3.927	1.38 %	10
5	4.921	0.80 %	10	4.933	0.76 %	10	4.912	0.48 %	10
6	5.891	1.23 %	10	5.899	1.10 %	10	5.860	1.38 %	10
7	6.863	0.77 %	10	6.896	0.98 %	10	6.902	1.00 %	10
8	7.858	1.21 %	10	7.890	0.97 %	10	7.860	0.93 %	10
9	8.778	1.17 %	10	8.863	1.27 %	10	8.796	1.41 %	10
10	9.790	1.16 %	10	9.836	1.33 %	10	9.799	1.24 %	10
11	10.916	1.05 %	10	10.889	0.93 %	10	10.867	0.94 %	10

Nota. $\overline{x}_{h/H}$ media de la relación h/H real, s desviación estándar, n recuento.

En la Tabla 107 se observa los valores máximos y mínimos observado.

Tabla 107

Estadísticas de la altura de descarga h medido.

Máx, m	**Mín, m**	**n**
11.083	2.272	300

Nota. Máx, valor máximo, Mín, valor mínimo, *n*, número de casos

1.3.2.2 Relación longitud – diámetro L/D

Se realizó tres mediciones de la longitud de la tubería de suministro L para cada relación L/D, en el caso del diámetro D es igual a 0.0262 m (ver Anexo 1.3.1.5), por ende, en la Tabla 108, se tiene resultados puntuales. La relación longitud – diámetro L/D real se mantiene similar a L/D nominal con una variación porcentual menor al 1%.

Tabla 108

Comparación de la relación L/D nominal y la relación L/D real

L/D nominal	Longitud teórica L, m	Longitud real total L, m	D, mm	L/D	$\Delta\%$
400	10.52	10.51	26.1625	401.72	0.43 %
500	13.1	13.14	26.1625	502.25	0.45 %
600	15.72	15.74	26.1625	601.62	0.27 %

Nota. Δ%, variación porcentual las relaciones real y teórica ([L/D] -[L/D nominal]) / [L/D]×100%.

1.4 Estadísticas de las variables dependientes

En las tablas y figuras de los ítems siguientes se muestra estadísticas descriptivas de variables dependientes simples.

En éstas se distingue entre estadísticas del valor observado (dispersión) y el valor promedio; el primero corresponde al total de observaciones realizadas mientras que el segundo corresponde al promedio en observaciones repetidas.

Las variables analizadas son las siguientes:

- Caudal de bombeo q.
- Caudal de funcionamiento Q.
- Caudal de suministro Q_T.
- Frecuencia de la válvula de impulso n.

En el Capítulo 3.2.2, se muestran las estadísticas descriptivas de las relaciones adimensionales de las variables dependientes.

1.4.1 Caudal de bombeo q

En la Tabla 109, el rango del caudal de bombeo observado va desde 0.171 l/min hasta 5.915 l/min.

En la Figura 90, se muestra el caudal de bombeo q promedio en función a la altura de descarga h, la altura de suministro H y la relación de la longitud y diámetro de la tubería de suministro L/D. Se puede deducir que a mayor altura de suministro H mayor caudal de descarga q.

Tabla 109

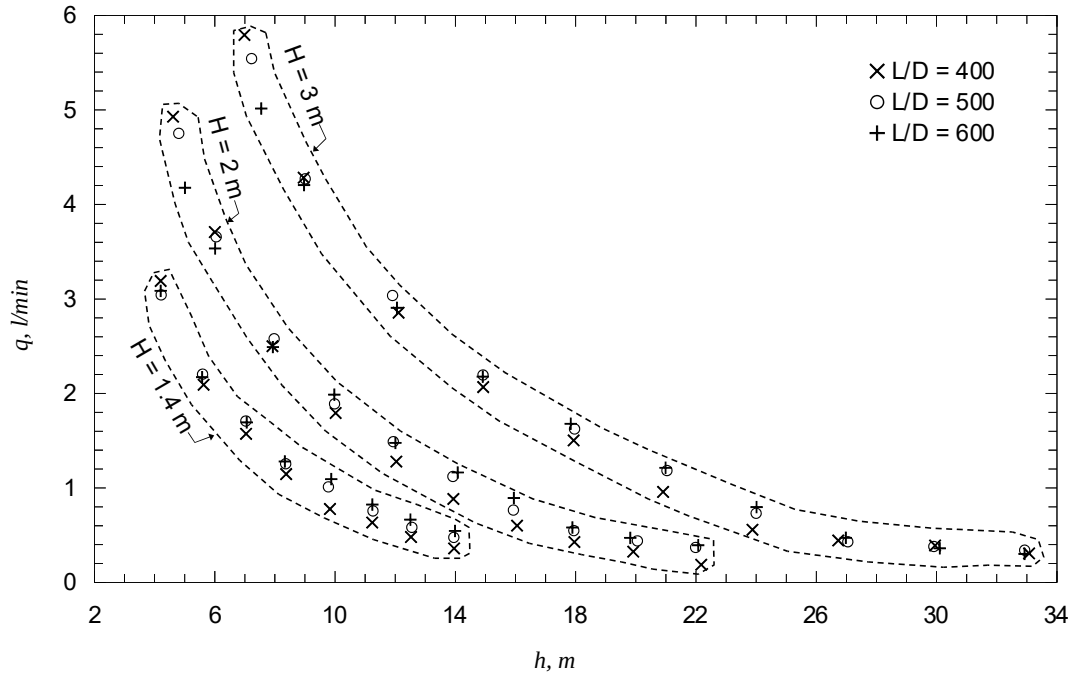
Estadísticas del caudal de descarga en función de H.

H, m	v_c, m/s	Caudal de descarga observado q		
		Máx, l/min	Mín, l/min	n
1.4	0.970	3.285	0.320	72
2	1.114	5.120	0.171	102
3	1.365	5.915	0.260	126
Total		5.915	0.171	**300**

Nota. Máx, valor máximo, Mín, valor mínimo, *n*, número de casos

Figura 90

Caudal de descarga q promedio en función de h, H y L/D



La Tabla 110 muestra las estadísticas del caudal de descarga y la altura de descarga real. El máximo caudal medio es de 5.79 l/min (L/D = 400, h/H = 2.3, H = 3) y la altura máxima fue de 33.08 m con un caudal de 0.31 l/min (L/D = 400, h/H = 11, H = 3).

Tabla 110

Estadísticas del caudal de descarga q en función de L/H, L/D y H.

		H = 1.4 m				H = 2 m				H = 3 m			
L/D	h/H	h_{real}	q	s	n	h_{real}	q	s	n	h_{real}	q	s	n
		m	l/min	l/min	[ ]	m	l/min	l/min	[ ]	m	l/min	l/min	[ ]
400	2.3					4.61	4.93	0.20	5	6.99	5.79	0.08	5
	3	4.20	3.19	0.09	3	6.00	3.71	0.07	3	8.96	4.28	0.10	4
	4	5.63	2.09	0.04	3	7.92	2.50	0.02	3	12.11	2.86	0.07	4
	5	7.04	1.57	0.03	3	10.02	1.79	0.01	3	14.93	2.07	0.02	4
	6	8.38	1.15	0.04	3	12.04	1.28	0.01	3	17.93	1.50	0.01	4
	7	9.83	0.78	0.04	3	13.93	0.88	0.05	3	20.91	0.96	0.03	4
	8	11.24	0.63	0.01	3	16.05	0.60	0.02	3	23.88	0.56	0.03	4
	9	12.53	0.48	0.02	3	17.96	0.43	0.01	3	26.73	0.44	0.01	4
	10	13.96	0.36	0.04	3	19.92	0.33	0.01	3	29.95	0.39	0.02	4
	11					22.17	0.19	0.02	5	33.08	0.31	0.02	5
500	2.4					4.80	4.75	0.13	5	7.23	5.54	0.05	5
	3	4.22	3.04	0.02	3	6.05	3.66	0.11	3	9.01	4.27	0.04	4
	4	5.60	2.20	0.03	3	7.98	2.58	0.03	3	11.91	3.04	0.05	4
	5	7.03	1.71	0.02	3	9.99	1.89	0.00	3	14.92	2.20	0.08	4
	6	8.36	1.26	0.03	3	11.94	1.49	0.01	3	17.96	1.62	0.02	4
	7	9.78	1.01	0.06	3	13.92	1.12	0.04	3	21.03	1.18	0.04	4
	8	11.26	0.76	0.02	3	15.93	0.77	0.05	3	24.00	0.73	0.03	4
	9	12.56	0.58	0.05	3	17.94	0.55	0.02	3	27.05	0.43	0.01	4
	10	13.95	0.48	0.03	3	20.05	0.44	0.01	3	29.91	0.38	0.01	4
	11					21.99	0.37	0.03	5	32.93	0.34	0.02	5
600	2.5					5.01	4.18	0.12	5	7.54	5.01	0.07	5
	3	4.20	3.09	0.17	3	6.01	3.53	0.07	3	8.97	4.20	0.06	4
	4	5.58	2.17	0.02	3	7.93	2.49	0.05	3	12.06	2.91	0.10	4
	5	7.06	1.69	0.11	3	9.98	1.99	0.05	3	14.91	2.18	0.08	4
	6	8.33	1.28	0.02	3	12.01	1.48	0.07	3	17.84	1.68	0.05	4
	7	9.88	1.09	0.03	3	14.08	1.16	0.04	3	20.99	1.21	0.03	4
	8	11.24	0.82	0.05	3	15.94	0.89	0.02	3	24.01	0.80	0.06	4
	9	12.51	0.66	0.04	3	17.89	0.58	0.02	3	26.98	0.47	0.03	4
	10	13.99	0.54	0.03	3	19.82	0.47	0.02	3	30.11	0.36	0.02	4
	11					22.08	0.39	0.01	5	32.93	0.30	0.03	5

1.4.2 Caudal de funcionamiento Q

En Tabla 111, el rango del caudal de funcionamiento va desde 10.289 l/min hasta 21.548 l/min.

En la Figura 91 se ha agrupado con líneas punteadas según la altura de suministro H. Se puede deducir que a mayor altura de suministro H mayor caudal de funcionamiento Q, a mayor relación L/D mayor caudal Q, mientras que a mayor altura de descarga h el caudal Q disminuye.

Tabla 111

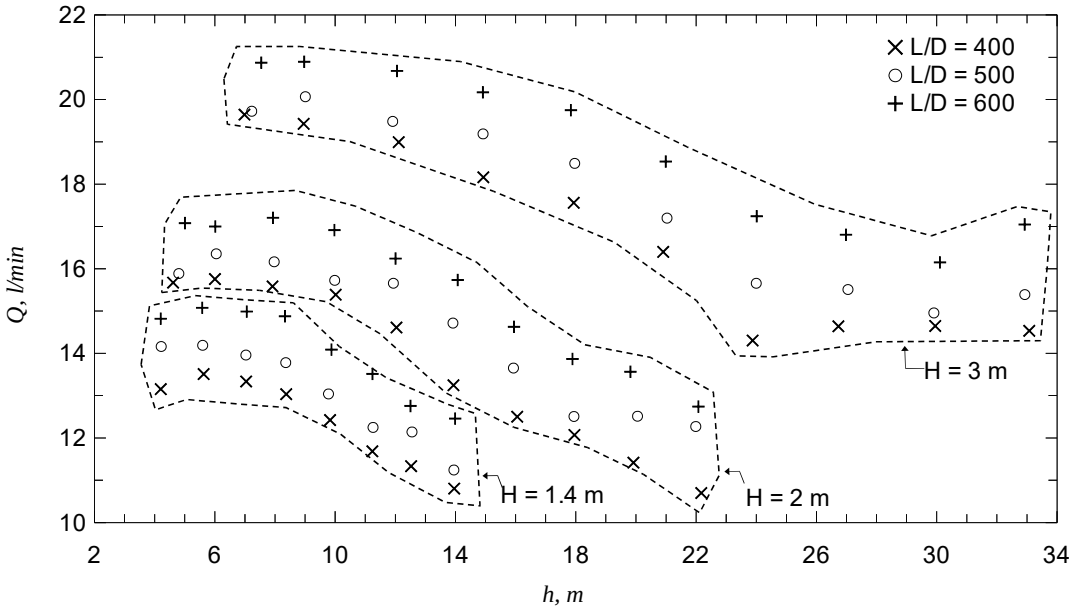
Rango del caudal de funcionamiento en función de H.

H m	v_c, m/s	Caudal de funcionamiento observado Q		
		Máx, l/min	Mín, l/min	n
1.4	0.970	15.424	10.514	72
2	1.114	17.651	10.289	102
3	1.365	21.548	13.681	126
Total		21.548	10.289	300

Nota. Máx valor máximo, Mín valor mínimo, *n* número de casos

Figura 91

Caudal de funcionamiento Q promedio en función de h, H y L/D



1.4.3 Caudal de suministro Q_T

En Tabla 112, el rango del caudal de suministro va desde 10.460 l/min hasta 26.680 l/min.

En la Figura 92, se ha agrupado con líneas punteadas según la altura de suministro H. Las deducciones son similares al del caudal de funcionamiento. El caudal de suministro se reduce en forma casi lineal respecto a h. En el último tramo para h/H = 3, tiende a estabilizarse y no depender de h.

Tabla 112

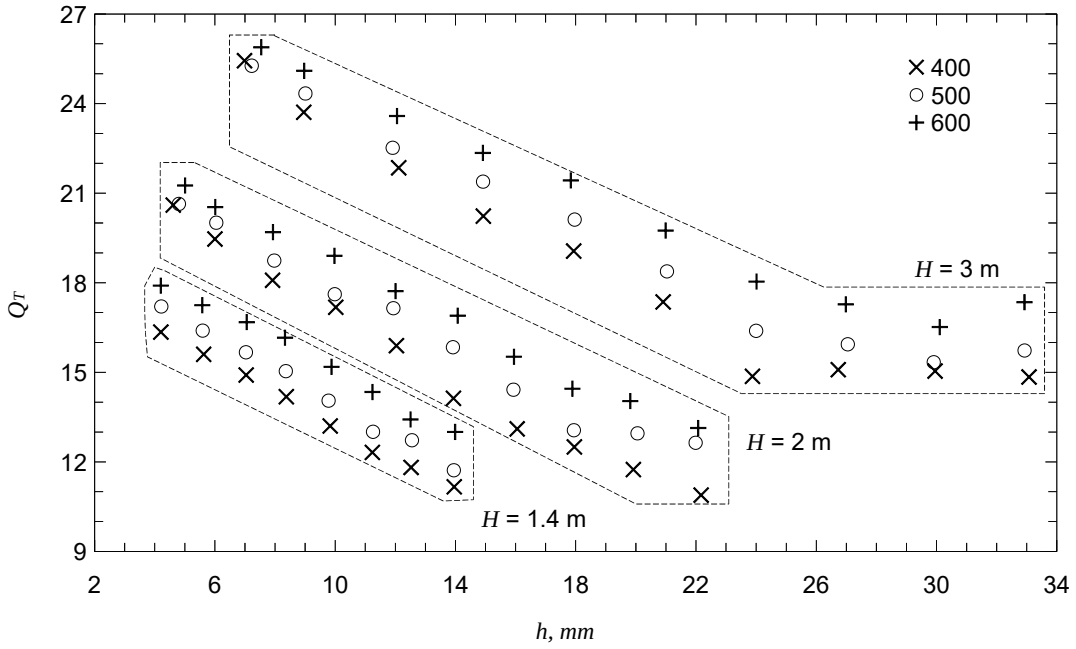
Rango del caudal de funcionamiento en función de H.

H m	v_c, m/s	Caudal de funcionamiento observado Q		
		Máx, l/min	Mín, l/min	n
1.4	0.970	18.342	10.835	72
2	1.114	21.573	10.460	102
3	1.365	26.680	14.216	126
Total		26.680	10.460	300

Nota. Máx valor máximo, Mín valor mínimo, n número de casos.

Figura 92

Caudal de suministro Q_T promedio en función de h, H y L/D



1.4.4 Frecuencia de la válvula de impulso n

En la Tabla 113, el rango de la frecuencia promedio va desde 22.93 l/min hasta 46.56 l/min. De la Figura 93 se puede deducir que a mayor altura de suministro H mayor frecuencia de golpes n , a mayor relación L/D menor frecuencia de golpes n. El cambio de la altura de descarga h genera una débil variación de la frecuencia n.

Tabla 113

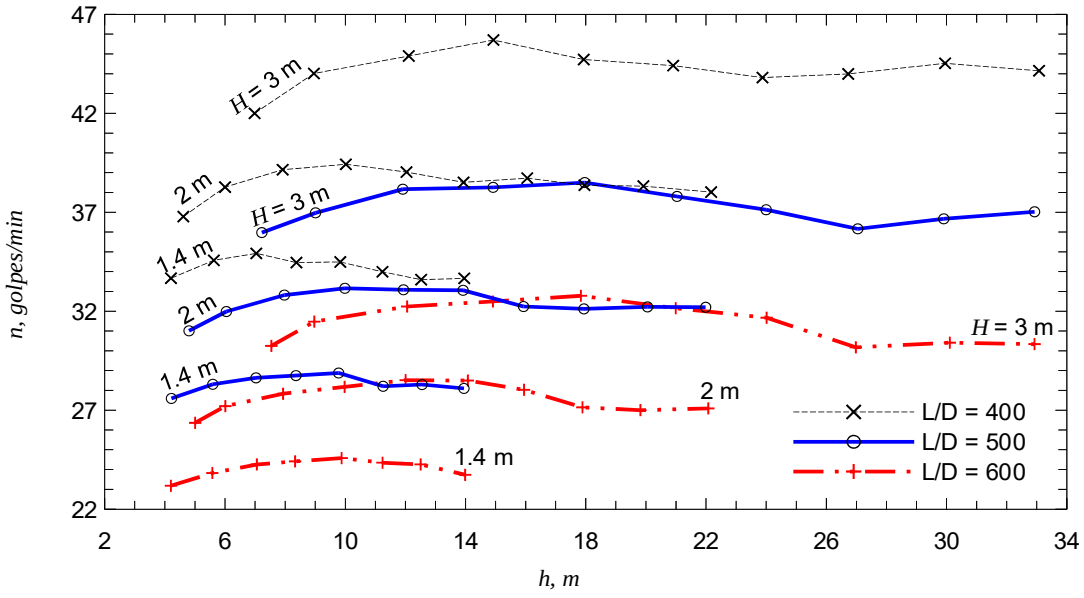
Rango de la frecuencia en función de H.

H, m	v_c, m/s	L/D	Frecuencia observada n			
			$\bar{x}_n$ golpes/min	Máx golpes/min	Mín golpes/min	n
1.4	0.970	400	34.17	35.29	32.83	24
		500	28.34	29.22	27.41	24
		600	24.07	25.05	22.93	24
2	1.114	400	38.33	39.73	36.48	34
		500	32.29	33.26	30.84	34
		600	27.48	28.63	26.05	34
3	1.365	400	44.16	46.56	41.28	42
		500	37.23	38.92	35.16	42
		600	31.34	33.26	29.31	42
Total				46.56	22.93	300

Nota. $\bar{x}_n$ Media de la frecuencia, Máx valor máximo, Mín valor mínimo, *n* número de casos

Figura 93

Frecuencia n promedio de la válvula de impulso en función h, H y L/D



Anexo 2: Experimentos preliminares

2.1 Coeficiente de pérdidas de carga de la válvula de impulso

2.1.1 Objetivo del experimento

Determinar el coeficiente de pérdidas de carga del sistema k_{sist}, del ariete k_{ariete} y de la válvula k_{valv}, para carreras de válvula de impulso de S = {4.5 mm, 6.0 mm, 7.5 mm, 9.0 mm, 10.50 mm, 12.0 mm}, y alturas de suministro de H = {1.4 m, 2 m, 3 m}

2.1.2 Muestra y población

La población viene representada por todas las bombas de ariete a construir. Estas se pueden clasificar por el tipo de fabricante (factor de bloqueo). Dentro de cada fabricante tenemos unidades muy homogéneas, por ende, utilizamos una unidad experimental en cada bloque. Se ha seleccionado el fabricante PAVCO para las pruebas sucesivas.

2.1.3 Diseño experimental:

El diseño es de tipo factorial a × b, con las siguientes consideraciones:

- Unidad experimental (UE) : 1 (bomba de ariete)
- Cantidad de réplicas (RE) : 1
- Cantidad de repeticiones (R) : 10 (elegido arbitrariamente)

En la Tabla 114, se muestra el total de pruebas para el experimento y en la Tabla 115, los tratamientos.

Tabla 114

Cantidad de variables, pruebas y tratamientos.

N.º	Variable	Niveles	Niveles	Tratamientos (Tr)	Total de pruebas , $P = Tr \times RE \times R$
1	Altura de suministro H (m)	1.4, 2, 3	3	18	180
2	Carrera S (mm)	4.5, 6, 7.5, 9, 10.5, 12	6		

Tabla 115

Desarrollo de tratamientos

N.º	Variable 2: S	Variable 1: H		
		1.4 m	2 m	3 m
1	4.5 mm	(1.4, 4.5)	(2, 4.5)	(3, 4.5)
2	6 mm	(1.4, 6)	(2, 6)	(3, 6)

N.º	Variable 2: S	Variable 1: H		
		1.4 m	2 m	3 m
3	7.5 mm	(1.4, 7.5)	(2, 7.5)	(3, 7.5)
4	9 mm	(1.4, 9)	(2, 9)	(3, 9)
5	10.5 mm	(1.4, 10.5)	(2, 10.5)	(3, 10.5)
6	12 mm	(1.4, 12)	(2, 12)	(3, 12)

Nota. Código de tratamiento, (variable1, variable2)

La aleatorización del orden de las pruebas se realizó en función a números aleatorios generados en una hoja de cálculo. Cada prueba se asocia con un número aleatorio luego se orden de menor a mayor obteniendo un orden aleatorio de pruebas. En el Anexo 2.1.7 se muestra la tabla de datos de pruebas aleatorizadas.

2.1.4 Procedimiento experimental

El procedimiento experimental es genérico para los experimentos preliminares de pérdidas de carga locales, este se muestra en el Anexo 3.

Del ensayo experimental es posible obtener, la velocidad media del flujo, y las cargas de presión en puntos específicos a través de piezómetros.

En la Figura 94 se esquematiza la instalación. En los puntos 2 y 3 se ubican los piezómetros. De la ecuación de continuidad y de energía en los puntos 1, 2, 3 y 4, se puede deducir fácilmente los coeficientes de pérdida local de energía a partir de las Ecuaciones 58,59, 60 y 61 de la Tabla 116.

Tabla 116

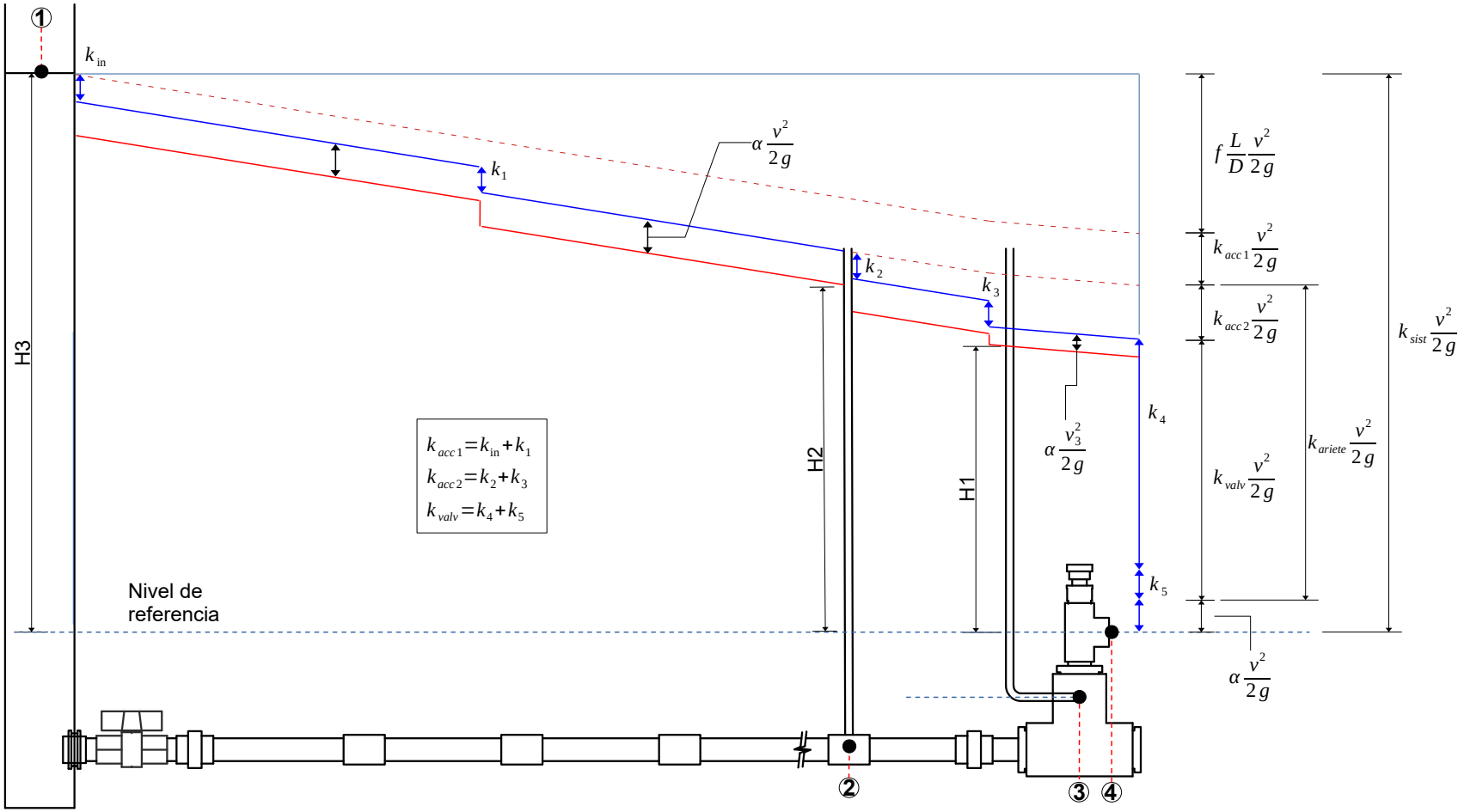
Coeficientes de pérdidas locales

Puntos de análisis	Ecuación para la velocidad		Observaciones
1 - 4	$v=\sqrt{\frac{2gH_3}{\alpha+k_{total}+f\frac{L_{1-4}}{D}}}$	(58)	$k_{sist}=\alpha+k_{total}+f\frac{L_{1-4}}{D}$ (59) k_{sist}, coeficiente de pérdidas totales del sistema. k_{total}, coeficiente de pérdidas locales del sistema.
2 - 4	$v=\sqrt{\frac{2gH_2}{k_{ariete}+f\frac{L_{2-4}}{D}}}$	(60)	$k_{tariete}$, coeficiente de pérdidas locales de la bomba de ariete.
3 - 4	$v=\sqrt{\frac{2gH_1}{\alpha+k_{valv}-\alpha(\frac{D}{D_3})^4}}$	(61)	k_{valv}, coeficiente de pérdidas locales de la válvula de impulso.

Nota. α es el coeficiente de Coriolis.

Figura 94

Esquema de instalación de pruebas experimentales.



2.1.5 Resultados

2.1.5.1 Análisis descriptivo de los datos

2.1.5.1.a Altura de suministro Real

La Tabla 117, muestra las estadísticas descriptiva e inferencial de la altura de suministro real de las pruebas. El valor es ligeramente mayor a los valores nominales, con baja dispersión de los datos (s, $\%\Delta 2$ y error E)

En los análisis realizados posteriormente, se trabaja con la altura de suministro real correspondiente a cada prueba realizada. Para efectos de presentación de los datos se sigue utilizando el valor de altura de suministro nominal H.

Tabla 117

Estadísticas descriptivas de la altura de suministro real H

Altura nominal H, m	$\bar{x}_H$, m	s, m	Máx, m	Mín, m	n	$\%\,\Delta 1$	$\%\,\Delta 2$	E	Valor p
1.4	1.441	0.0010	1.443	1.438	60	2.90 %	0.07 %	0.0003	0.278
2	2.017	0.0011	2.019	2.012	60	0.83 %	0.06 %	0.0003	0.002
3	3.012	0.0022	3.016	3.006	60	0.39 %	0.07 %	0.0006	0.159

Nota. $\bar{x}_H$ media de la altura de suministro, $\%\,\Delta 1 = (\bar{x}\text{-}H)/H\times 100\%$, $\%\,\Delta 2 = s/\bar{x}\times 100\%$. Simbología en la Tabla 97.

2.1.5.1.b Coeficientes de pérdidas del sistema k_{sist} y total k_{total}

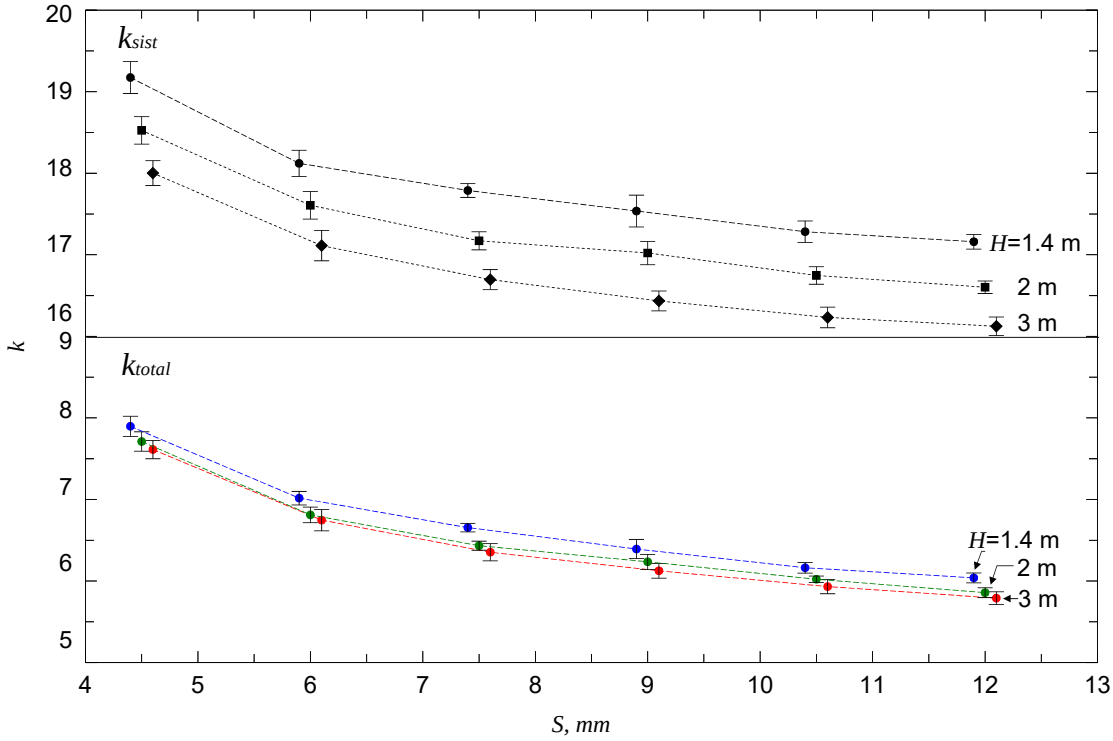
En la Figura 95 se muestra el valor promedio de los coeficientes k_{sist} y k_{total}. A mayor altura de suministro H o carrera de la válvula de impulso S, el coeficiente tiende a disminuir en ambos casos.

La diferencia entre los coeficientes k_{sist} y k_{total}, representa las pérdidas por fricción más el coeficiente α de coriolis como se mostró en la Ecuación 59.

Los valores del coeficiente k_{sist} se encuentran más dispersos y a la vez más alejados (respecto a la altura H). Esto se debe al efecto del factor f de Darcy en las pérdidas por fricción (L y D son constantes); el número de Reynolds $Re = vD/\nu$ se ve influenciado principalmente por la velocidad de flujo, el cual se incrementa con la altura H. Esto concluye con un factor de fricción menor. La dispersión de datos se debe, entre otros, a la temperatura, el cual varió desde 11.2 °C a 19.2 C° con un promedio de 15.5 °C.

Figura 95

Comparación de coeficientes de pérdidas locales k



Nota. Se muestran las barras de error de la desviación estándar

2.1.5.1.c Coeficiente de pérdidas del ariete y de la válvula de impulso

En la Figura 96 se muestran los valores medios de los coeficientes k_{total}, k_{ariete} y k_{valv}. Se puede observar que, a mayor altura de suministro el coeficiente de pérdidas locales promedio disminuye ligeramente.

En la Tabla 118 se muestran estadísticos para el coeficiente k_{ariete}.

Tabla 118

Estadísticos descriptivos de k_{ariete}

***S*, mm**	***H* = 1.4 m**			***H* = 2 m**			***H* = 3 m**		
	$\bar{x}$	s	n	$\bar{x}$	s	n	$\bar{x}$	s	n
4.5	6.981	0.123	10	6.909	0.118	10	6.845	0.149	10
6.0	6.138	0.094	10	5.995	0.097	10	5.958	0.080	10
7.5	5.720	0.070	10	5.631	0.045	10	5.541	0.055	10
9.0	5.491	0.083	10	5.398	0.056	10	5.320	0.043	10
10.5	5.306	0.071	10	5.197	0.045	10	5.108	0.057	10
12.0	5.158	0.072	10	5.039	0.037	10	4.992	0.050	10

Nota. $\bar{x}$ media del coeficiente del ariete, S carrera, H altura de suministro. Simbología en la Tabla 97.

La Tabla 119 muestra las estadísticas descriptivas del coeficiente k_{valv}. La carreras de 4.5 mm y 6 mm tienen datos con mayor desviación típica.

Tabla 119

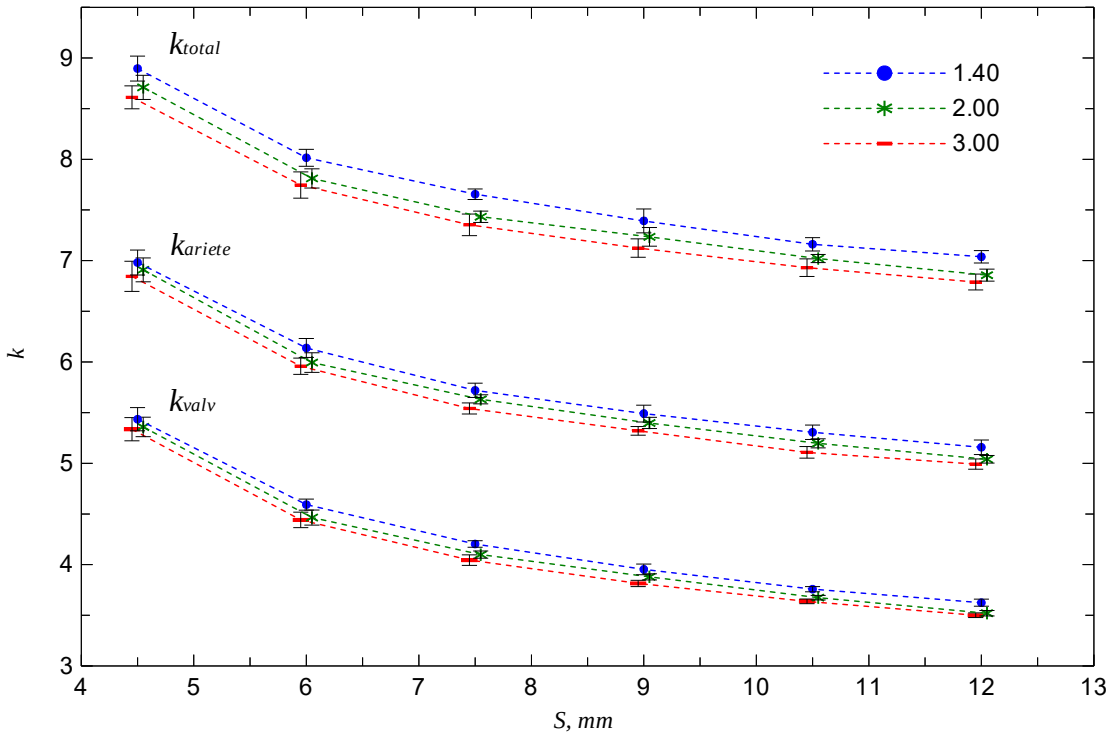
Estadísticos descriptivos de k_{valv}

S, mm	**H = 1.4 m**			**H = 2 m**			**H = 3 m**		
	$\bar{x}$	s	n	$\bar{x}$	s	n	$\bar{x}$	s	n
4.5	5.435	0.114	10	5.359	0.096	10	5.336	0.115	10
6.0	4.592	0.055	10	4.465	0.075	10	4.441	0.077	10
7.5	4.204	0.032	10	4.098	0.035	10	4.044	0.052	10
9.0	3.953	0.053	10	3.879	0.031	10	3.814	0.031	10
10.5	3.757	0.025	10	3.673	0.022	10	3.637	0.023	10
12.0	3.624	0.036	10	3.520	0.027	10	3.500	0.023	10

Nota. $\bar{x}$ media del coeficiente de la válvula, S carrera, H altura de suministro. Simbología en la Tabla 97.

Figura 96

Dispersión del coeficiente de pérdidas locales



Nota. Se muestran las barras de error de la desviación estándar

2.1.5.1.d Coeficiente de accesorios varios

En la Figura 94 se observó “otros” accesorios, que forman parte del sistema de prueba.

- El coeficiente k_{acc1} corresponde a pérdidas por accesorios desde el ingreso hasta el piezómetro 2. Se incluyen la resistencia por el ingreso, válvula y uniones.
- El coeficiente k_{acc2} corresponde a una unión roscada, unión universal roscada y el efecto de la tee (cuerpo del ariete) hasta antes del piezómetro en el punto 3.

En la Figura 96 la "distancia" entre coeficientes representa los coeficientes k_{acc1} y k_{acc2}. Es decir $k_{acc1} = k_{total} - k_{ariete}$; y $k_{acc2} = k_{ariete} - k_{valv}$.

En la Tabla 120, se muestra las estadísticas de ambos coeficientes de accesorios k_{acc1} y k_{acc2}, además del total. En la Figura 97 se observa la poca variación del k_{acc} con en el cambio de la carrera de válvula de impulso S.

Tabla 120

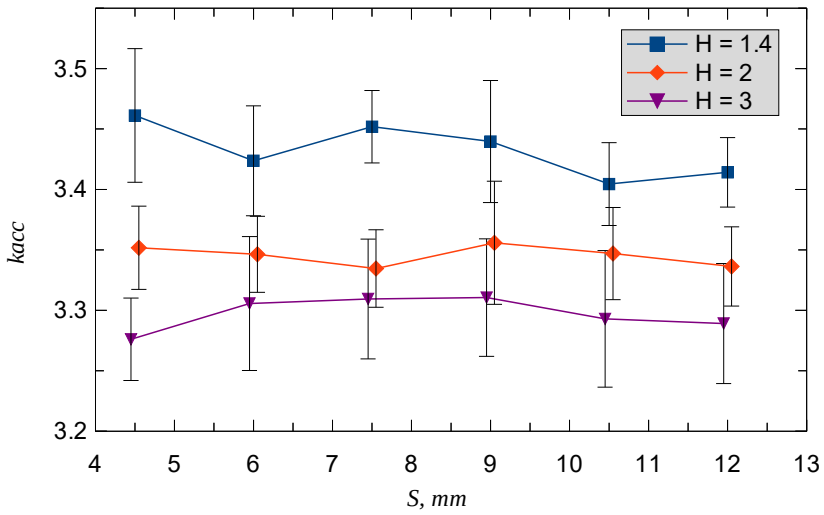
Coeficiente de pérdidas locales de otros accesorios k_{acc}

H, m	k_{acc1}			k_{acc2}			$k_{acc} = k_{acc1} + k_{acc2}$		
	$\bar{x}_{kacc1}$	s	n	$\bar{x}_{kacc2}$	s	n	$\bar{x}_{kacc}$	s	n
1.4	1.538	0.051	60	1.894	0.090	60	3.433	0.060	60
2	1.529	0.040	60	1.816	0.076	60	3.345	0.050	60
3	1.499	0.046	60	1.798	0.096	60	3.297	0.067	60
Total	1.522	0.049	180	1.836	0.097	180	3.358	0.082	180

Nota. $\bar{x}$ media del coeficiente de accesorios, H altura de suministro. Simbología en la Tabla 97.

Figura 97

Coeficiente de pérdidas locales de otros accesorios kacc.



Nota. Se muestra las barras de error $E = t_{\alpha/2}\, s/\sqrt{n}$, con $\alpha = 0.05$. Simbología en la Tabla 97.

2.1.5.2 Estimación de la media poblacional μ del coeficiente k_{valv}

Respecto a los datos tenemos las siguientes consideraciones previas:

- La muestra de datos es aleatoria, esto, del diseño experimental.
- La desviación estándar poblacional σ (o desviación típica) es desconocida.
- La población está distribuida aproximadamente normal (de la Tabla 117, Tabla 121 y Tabla 124 los valores p de Shapiro-Wilk > 0.05)

Por tanto, utilizamos la estadística T-Student para determinar intervalos de confianza, según lo indicado en Anexo 4

Para un nivel de confianza de $100(1-\alpha)\%$ = 95%, es decir α = 0.05, y v = 10-1=9 grados de libertad, tenemos un valor T-Student de $t_{0.025}$ = 2.262.

De la Tabla 119 calculamos los intervalos de confianza para la media poblacional *μ* al $100(1-\alpha)\%$ = 95%, donde H es la altura de suministro en metros y S es la carrera de la válvula de impulso en milímetros (ver Tabla 121)

Tabla 121

Intervalos de confianza del 100(1-α)% = 95% del k_{valv}

H, m	S, mm	$\bar{x}_{kval}$	s	n	$t_{0.025}$	E	Intervalo de confianza
1.4	4.50	5.435	0.114	10	2.260	0.082	5.353 < μ < 5.517
	6.00	4.592	0.055	10	2.262	0.039	4.553 < μ < 4.631
	7.50	4.204	0.032	10	2.262	0.023	4.181 < μ < 4.226
	9.00	3.953	0.053	10	2.262	0.038	3.915 < μ < 3.990
	10.50	3.757	0.025	10	2.262	0.018	3.739 < μ < 3.775
	12.00	3.624	0.036	10	2.262	0.025	3.598 < μ < 3.649
2	4.50	5.359	0.096	10	2.262	0.069	5.290 < μ < 5.428
	6.00	4.465	0.075	10	2.262	0.054	4.411 < μ < 4.518
	7.50	4.098	0.035	10	2.262	0.025	4.073 < μ < 4.124
	9.00	3.879	0.031	10	2.262	0.022	3.857 < μ < 3.900
	10.50	3.673	0.022	10	2.262	0.016	3.658 < μ < 3.689
	12.00	3.520	0.027	10	2.262	0.020	3.501 < μ < 3.540
3	4.50	5.336	0.115	10	2.262	0.082	5.254 < μ < 5.418
	6.00	4.441	0.077	10	2.262	0.055	4.386 < μ < 4.496
	7.50	4.044	0.052	10	2.262	0.037	4.006 < μ < 4.081
	9.00	3.814	0.031	10	2.262	0.022	3.791 < μ < 3.836
	10.50	3.637	0.023	10	2.262	0.016	3.621 < μ < 3.654
	12.00	3.500	0.023	10	2.262	0.016	3.484 < μ < 3.516

Nota. $\bar{x}_{kvalv}$ media del coeficiente de la válvula de impulso k_{valv}. Simbología en la Tabla 97.

También podemos escribir los resultados como una estimación puntual (Tabla 122):

Tabla 122

Estimación puntual de la media poblacional

S, mm	H = 1.4 m	H = 2 m	H = 3 m
4.5	5.435 ± 0.082	5.359 ± 0.069	5.336 ± 0.082
6.0	4.592 ± 0.039	4.465 ± 0.054	4.441 ± 0.055
7.5	4.204 ± 0.023	4.098 ± 0.025	4.044 ± 0.037
9.0	3.953 ± 0.038	3.879 ± 0.022	3.814 ± 0.022
10.5	3.757 ± 0.018	3.673 ± 0.016	3.637 ± 0.016
12.0	3.624 ± 0.025	3.52 ± 0.02	3.5 ± 0.016

De estos resultados se observa que:

- A mayor carrera de válvula de impulso S, menor coeficiente de pérdidas locales.
- En las carreras pequeñas (4.5 mm y 6 mm) el valor del error máximo de estimación ($E =, t_{0.025}\, s / \sqrt{n}$) es más grande que en las otras carreras.
- A mayor altura de suministro H, el valor promedio del coeficiente de pérdidas locales disminuye ligeramente.

2.1.5.3 Análisis de varianza de dos factores

Los factores son la carrera de la válvula de impulso S y la altura de suministro H, mientras que, la variable respuesta es el coeficiente de pérdidas locales k_{valv}.

Dado que no se verifica el supuesto de homogeneidad de varianzas, se realiza la transformación de datos de la variable k_{valv} a $G(k_{valv})$. La función potencia $G(y) = y^{-a+1}/-a+1$ con $y = k_{valv}$, homogeniza las varianzas. En la Tabla 123, se observa el contraste de igualdad de varianzas para valores del parámetro a.

Tabla 123

Verificación de Igualdad de Varianzas para valores del parámetro a

Parámetro a	Contraste de Igualdad de Varianzas (de Levene)			
	F	gl1	gl2	p
3.518	1.51	17	162	0.0969
4	1.59	17	162	0.07
4.242	1.686	17	162	0.05

Los valores aceptables del parámetro a se encuentran entre 3.518 y 4.242. Elegimos arbitrariamente $a = 4$ para la transformación de los datos. Los resultados del análisis de varianza se muestran en la Tabla 124.

Tabla 124

ANOVA - k_{valv}

Casos	Suma de Cuadrados	gl	Cuadrado Medio	F	*p*	η²
H, m	8.21659×10^{-6}	2	4.10830×10^{-6}	170.59896	1.34856×10^{-40}	0.01389
S, mm	0.00058	5	0.00012	4797.32478	5.02533×10^{-174}	0.97680
H, m ✻ *S*, mm	1.60327×10^{-6}	10	1.60327×10^{-7}	6.65765	1.27549×10^{-8}	0.00271
Residuals	3.90122×10^{-6}	162	2.40816×10^{-8}			

Nota. Suma de Cuadrados Tipo III. η² estimaciones de magnitud de efecto.

En la Tabla 124 se observa que la interacción $H*S$ es significativa. Por otro lado, la magnitud de efecto η² indica la mayor relevancia del factor S. En la Tabla 125 se verifica el supuesto de igualdad de varianzas, y en la Figura 98 el supuesto de normalidad.

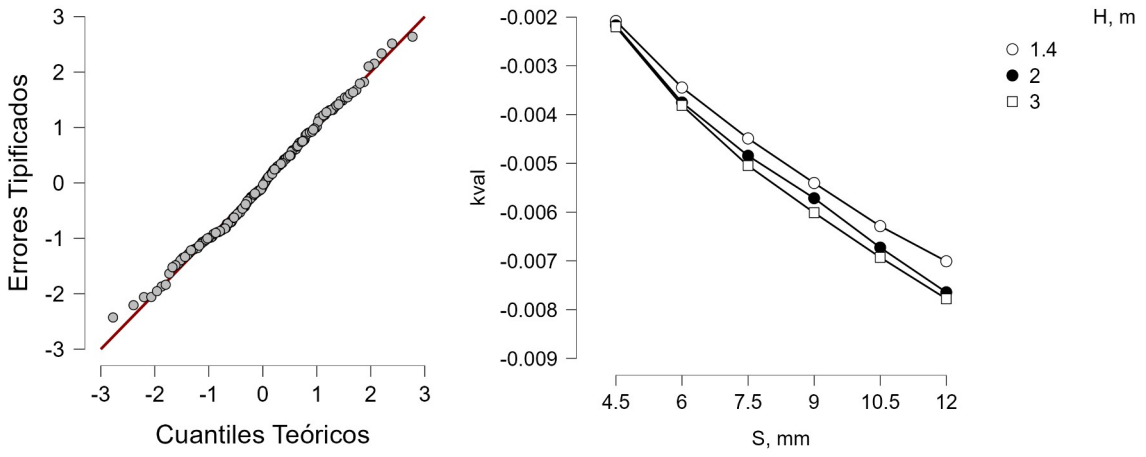
Tabla 125

Contraste de Igualdad de Varianzas (de Levene)

F	gl1	gl2	*p*
1.59	17	162	0.0721

Figura 98

Verificación de supuesto de normalidad y gráfico de interacción.



Nota. Izquierda: Gráfico Q-Q de errores tipificados (s. normalidad). Derecha: Gráfico de interacción S*H.

En la Tabla 126, Tabla 127 y Tabla 128 se muestra el análisis post hoc, para identificar donde se encuentran las diferencias de medias detectadas en la Tabla 124.

Tabla 126

Comparaciones Post-hoc - H, m

		Diferencia de Medias	ET	t	p Tukey
1.4	2	0.00036	0.00003	12.56728	1.08802×10-13
	3	0.00051	0.00003	18.00738	1.08358×10-13
2	3	0.00015	0.00003	5.44010	5.78051×10-7

Nota. Los resultados se promedian sobre los niveles de: S, mm. Valor p ajustado para comparar una familia de 3.

Tabla 127

Comparaciones Post-hoc - S, mm

		Diferencia de Medias	ET	t	p Tukey
4.5	6	0.00152	0.00004	37.90900	1.08358×10-13
	7.5	0.00264	0.00004	65.96070	1.08358×10-13
	9	0.00356	0.00004	88.84513	1.08358×10-13
	10.5	0.00450	0.00004	112.24126	1.08358×10-13
	12	0.00533	0.00004	132.93696	1.08358×10-13
6	7.5	0.00112	0.00004	28.05170	1.08358×10-13
	9	0.00204	0.00004	50.93614	1.08358×10-13
	10.5	0.00298	0.00004	74.33227	1.08358×10-13
	12	0.00381	0.00004	95.02796	1.08358×10-13
7.5	9	0.00092	0.00004	22.88444	1.08358×10-13
	10.5	0.00185	0.00004	46.28056	1.08358×10-13
	12	0.00268	0.00004	66.97626	1.08358×10-13
9	10.5	0.00094	0.00004	23.39613	1.08358×10-13
	12	0.00177	0.00004	44.09182	1.08358×10-13
10.5	12	0.00083	0.00004	20.69569	1.08358×10-13

Nota. Los resultados se promedian sobre los niveles de: H, m. Valor p ajustado para comparar una familia de 6

Tabla 128

Comparaciones Post-hoc - H, m ✲ S, mm (interacción)

N°	Uno a uno		Diferencia de Medias	ET	t	p Tukey	Observación
1	2 - 4.5	3 - 4.5	0.00003	0.00007	0.42962	**1.00000**	*Caso 1 y 2*
2	2 - 6	3 - 6	0.00006	0.00007	0.87222	**0.99999**	*Caso 1*
3	2 - 7.5	3 - 7.5	0.00020	0.00007	2.91339	**0.25728**	*Caso 1*
4	2 - 9	3 - 9	0.00030	0.00007	4.28562	**0.00394**	*Caso 4*
5	2 - 10.5	3 - 10.5	0.00020	0.00007	2.90017	**0.26455**	*Caso 1*
6	2 - 12	3 - 12	0.00013	0.00007	1.92444	**0.89818**	*Caso 1*

N°	Uno a uno		Diferencia de Medias	ET	*t*	*p* Tukey	Observación
7	1.4 - 4.5	2 - 4.5	0.00009	0.00007	1.27680	**0.99832**	*Caso 2*
8	1.4 - 4.5	3 - 4.5	0.00012	0.00007	1.70642	**0.96277**	*Caso 2*
9	3 - 10.5	1.4 - 12	0.00008	0.00007	1.15708	**0.99951**	*Caso 3*
10	1.4 - 6	2 - 6	0.00031	0.00007	4.41135	**0.00242**	*Caso 4*
11	1.4 - 7.5	2 - 7.5	0.00035	0.00007	5.11221	**0.00013**	*Caso 4*
12	1.4 - 9	2 - 9	0.00031	0.00007	4.49228	**0.00176**	*Caso 4*
13	2 - 10.5	1.4 - 12	0.00028	0.00007	4.05725	**0.00917**	*Caso 4*
14	3 - 7.5	1.4 - 9	0.00036	0.00007	5.14261	**0.00011**	*Caso 4*
15	3 - 9	1.4 - 10.5	0.00028	0.00007	3.96547	**0.01270**	*Caso 4*

Nota. Valor p ajustado para comparar una familia de 18. Sombrado con gris donde pTukey > 0.05.

Conclusiones del análisis de varianza (ANOVA)

- La gráfica de Q-Q de errores (Figura 98) y el contraste de Levene para la igualdad de varianzas (Tabla 125) muestran que se cumplen los supuestos del ANOVA.
- La gráfica de interacción (Figura 98) muestra un leve paralelismo entre las curvas. Del análisis Post-Hoc de Tukey, se observa que la comparación de medias entre los efectos del factor S y H presentan diferencias entre sí (Tabla 126 y Tabla 127).
- Respecto al efecto de la interacción S*H de un total de 153 registros de interacción, en ocho no hay evidencia de diferencia de medias con $p_{Tukey}>0.05$ (Tabla 128). Esto se traduce en que la mayoría de las interacciones entre tratamientos (comparación entre tratamientos de uno a uno) tienen diferencias estadísticas, salvo 8 casos sombreados en la Tabla 128.
- Se ha adicionado una columna de observaciones en la Tabla 128, clasificando según tipo de interacción:
  - *Caso 1*: No hay evidencia de diferencia de medias en cinco interacciones de igual carrera S, para alturas de suministro de H = 2 m y H = 3 m. Esto muestra que entre estas dos alturas no se encontró diferencias de las medias del coeficiente k_{valv} entre las correspondientes carreras S. El Caso 1 hace ver el por qué el estadístico t es pequeño en la pruebas post hoc 2 - 3 respecto a los otros dos efectos principales en la Tabla 126.

- *Caso 2*: Para la carrera S = 4.5 mm no se observa diferencias entre las medias en ninguna de las tres alturas. El Caso 2 evidencia la inexistente de diferencias para la carrera S = 4.5 mm observada en la Figura 98.
- *Caso 3*: No se aprecia diferencia entre interacciones de tratamientos de factores distintos. Es decir, a pesar de ser distintas carreras (pero cercanas), no tienen diferencia de medias significativa.
- *Caso 4*: Interacciones que manifiestan cierta diferencia entre sí aunque no contundente. Un caso particular es respecto a las carreras S = 6 mm, S = 9 mm.

- Se rechaza la hipótesis nula de la igualdad de medias del coeficiente de pérdidas locales k_{valv} por los factores carrera de la válvula de impulso S, altura de suministro H y su interacción $S*H$.
- El efecto del factor S es mas importante mientras que el del factor H y la interacción $S*H$ tienen un efecto leve en la variable respuesta k_{valv} (Tabla 124)

2.1.5.4 Regresión lineal y modelo matemático

Del análisis descriptivo observamos la dependencia del coeficiente k_{valv} con los factores altura de suministro H, carrera de la válvula de impulso S y la interacción $H*S$, por lo cual podemos plantear un modelo empírico.

2.1.5.4.a Modelación

El modelo lineal se puede expresar según la Ecuación 62 o Ecuación 63.

$$Y_1 = -\hat{\alpha} X_1 - \hat{\beta} X_2 + \hat{\gamma} X_1 X_2 + \hat{C} \tag{62}$$

$$F_1(\hat{y}_{1ij}) = -\hat{\alpha} G_1(x_{1i}) - \hat{\beta} G_2(x_{2j}) - \hat{\gamma} G_1(x_{1i}) G_2(x_{2j}) + \hat{C} \tag{63}$$

Las funciones F, G_1 y G_2 son de transformación de variables, para este caso se usa la función potencial, entonces tenemos la Ecuación 64.

$$\frac{\hat{y}_{1ij}^{-b+1}}{-b+1} = -\hat{\alpha}\left(\frac{x_{1i}^{-a+1}}{-a+1}\right) - \hat{\beta}\left(\frac{x_{2j}^{-c+1}}{-c+1}\right) + \hat{\gamma}\left(\frac{x_{1i}^{-a+1}}{-a+1}\frac{x_{2j}^{-c+1}}{-c+1}\right) + \hat{C} \tag{64}$$

Se detalla más sobre el modelo y su notación en el Anexo 6.4.

En la Tabla 129 se muestra las Ecuación 65, la cual no considera la interacción y la Ecuación 66 la cual incluye la interacción. Ambas ecuaciones se determinan a partir de la Ecuación 64 haciendo $\hat{y}_1 = k_{valv}$, $x_1 = H$ y $x_2 = S/D_{disc}$.

Tabla 129

Resultados del análisis por regresión lineal

Modelo				**Estadísticos**	
Modelo 1				R^2	: 0.99009
$k_{valv}=0.456\,H^{-3.1}+0.085\left(\frac{S}{D_{disc}}\right)^{-1.6}+3.03$ (65)				$R^2 ajust.$	: 0.98998
				$RMSE$	: 0.0622
Parámetros estimados:		Exponentes optimizados:		F	: 8840.9
$+\hat{C}$	= 3.03	b	= 0	gl	: 177
$-\hat{\alpha}$	= -1.413	a	= 4.1	n	: 180
$-\hat{\beta}$	= -0.136	c	= 2.6	MSE	: 0.00387
Verificación de supuestos:					
Homocedasticidad: BP = 46.903, df = 2, p-value = 6.534e-11					
Independencia: DW = 1.8999, p-value = 0.2508					
Normalidad: W = 0.98081, p-value = 0.01398					
Modelo 2				R^2	: 0.9924
$\frac{1}{-3}(k_{valv})^{-3}=\left(-0.00865(H)^{-2.91}-0.039\left(\frac{S}{D_{disc}}\right)^{0.2}+0.0139(H)^{-2.91}\left(\frac{S}{D_{disc}}\right)^{0.2}+0.0236\right)$ (66)				$R^2 ajust.$	: 0.9923
				$RMSE$	: 0.00016
Parámetros estimados:		Exponentes optimizados:		F	: 7701.7
$+\hat{C}$	= 0.02361	b	= 4	gl	: 176
$-\hat{\alpha}$	= -0.02518	a	= 3.91	n	: 180
$-\hat{\beta}$	= -0.007803	c	= 0.8	MSE	: 2.54×10^{-8}
$-\hat{\gamma}$	= 0.008087				
Verificación de supuestos:					
Homocedasticidad: BP = 4.2049, df = 3, p-value = 0.2402					
Independencia: DW = DW = 1.9747, p-value = 0.4318					
Normalidad: W = 0.99511, p-value = 0.8236					

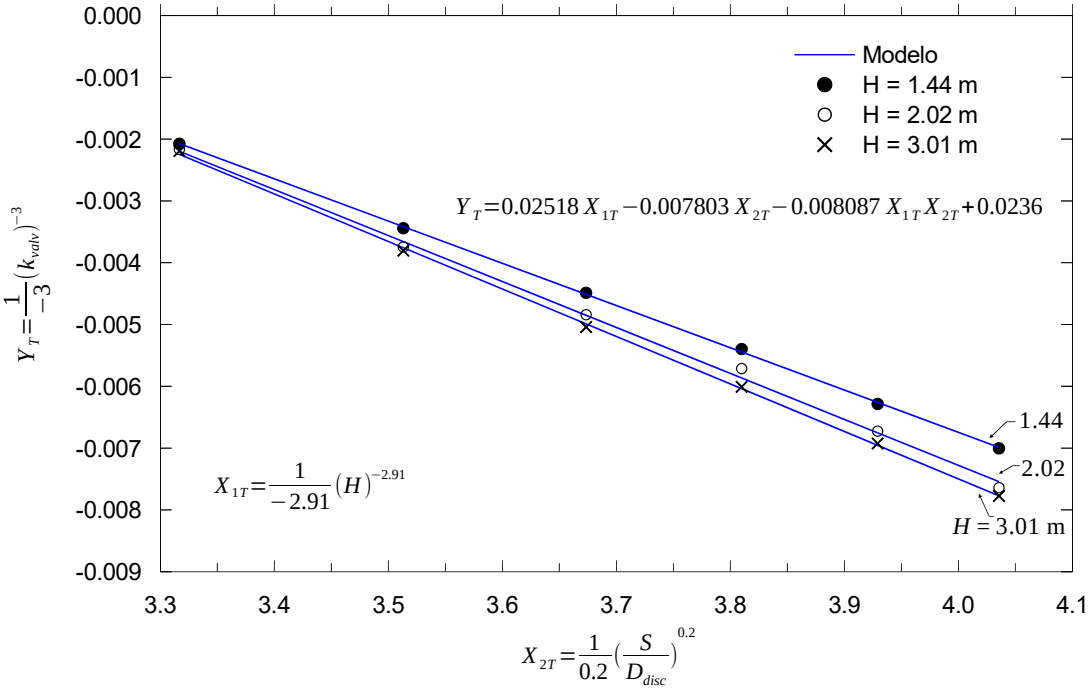
Nota. Verificación de supuestos de la regresión lineal: Homocedasticidad (Breusch-Pagan Test), Independencia (Durbin-Watson test), Normalidad (Shapiro-Wilk).

Si bien la Ecuación 65 es más simple, falla en el supuesto de homocedasticidad (varianza constante) y normalidad de residuos, por lo que la Ecuación 66 es preferible.

En la Figura 99, se ha graficado el modelo transformado Y_T de la Ecuación 66, en función de la variable X_{2T} para las tres alturas H = 1.44 m, H = 2.02 m y H = 3.01 m.

Figura 99

Modelo transformado y valores promedio de la variable Y_T.



2.1.5.4.b Predicciones a partir del modelo matemático

En la Figura 100 se muestra los límites de confianza del 95% para la predicción de nuevas observaciones (valor particular).

La Figura 100 se ha elaborado con el modelo 2 (Ecuación 66) y los datos para una altura real de $H = 1.44$ m. Se aprecia que los límites de predicción cobertura adecuadamente la dispersión y el valor promedio.

La Figura 101, de igual manera, se grafica el modelo 1 (Ecuación 65). Se observa que los intervalos de predicción son más amplios para mayores carreras S.

A manera de aplicación, en el Anexo 11, se utilizan los dos modelos encontrados en la Tabla 129, para predecir el coeficiente de pérdidas totales $k_{total} = k_{valv} + k_{acc}$.

Este mismo ejercicio se repite para predecir el coeficiente de pérdidas totales del experimento de coeficiente de arrastre del Anexo 2.2.

Figura 100

Modelo $\hat{y}_1 = k_{valv}$ (modelo 2) e intervalos de predicción del valor particular.

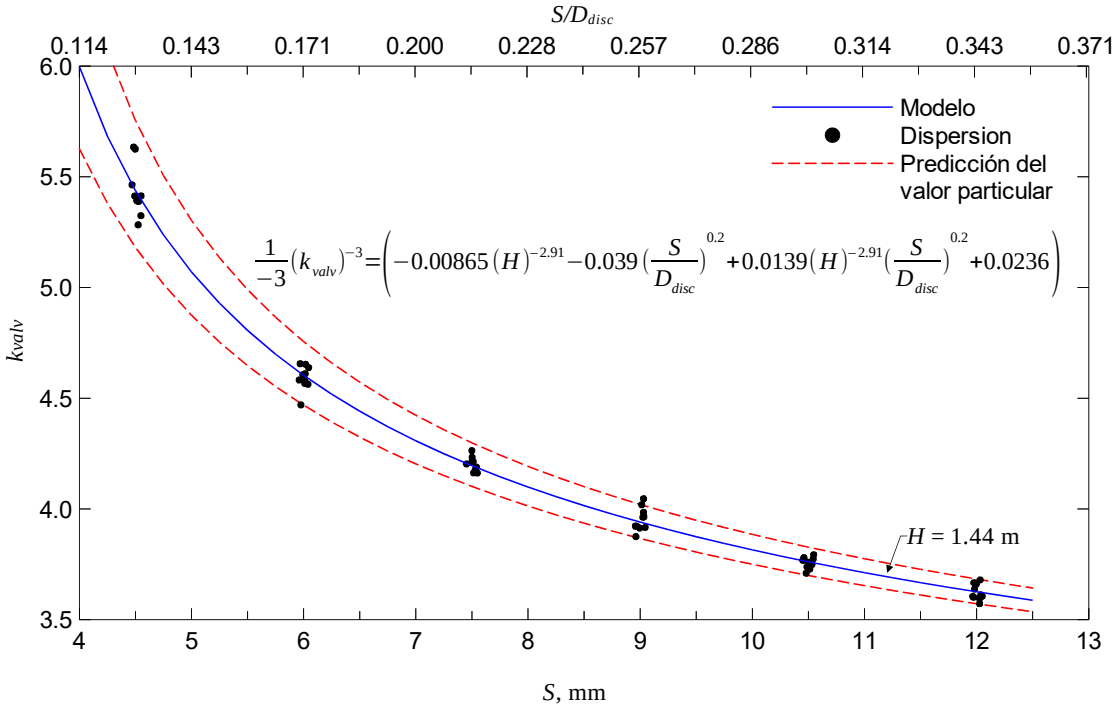
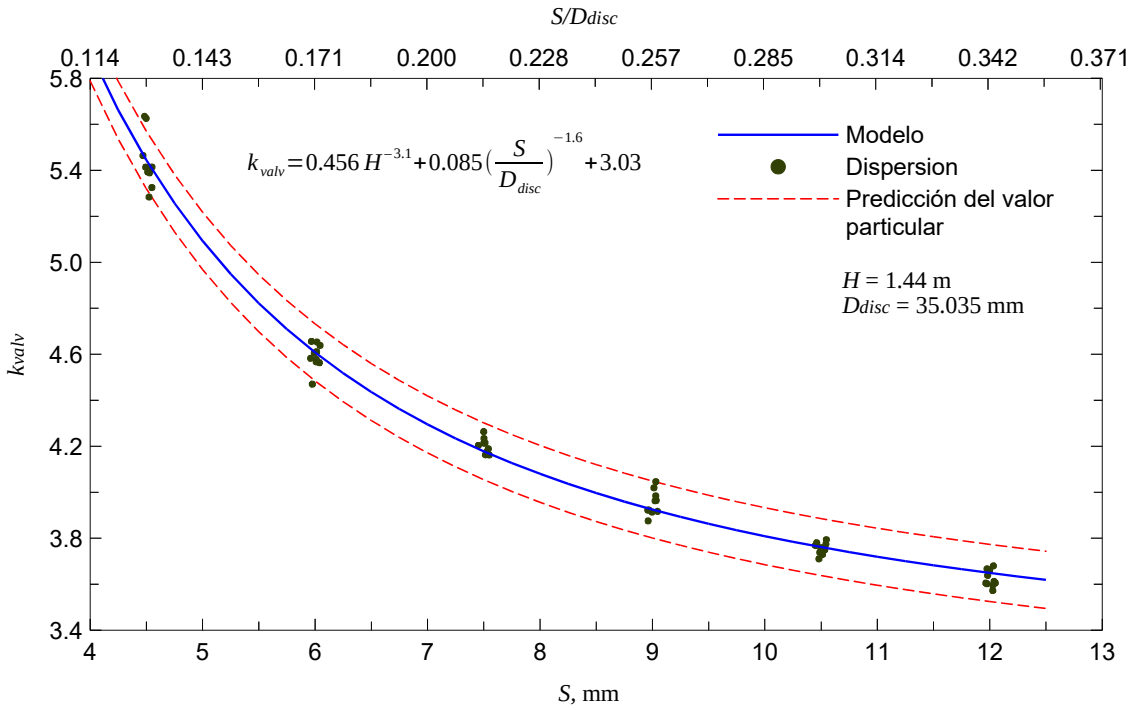


Figura 101

Modelo $\hat{y}_1 = k_{valv}$ (modelo 1) e intervalos de predicción del valor particular.



2.1.5.4.c Análisis estadístico del modelo

Las Tablas 130, 131 y 132 resumen de la estadística del procedimiento de regresión lineal del modelo 2 (Tabla 129), donde $Y_1 = F_1(k_{valv}) = X_1 = G_1(H)$ y $X_2 = G_2(S/D_{disc})$ de la Ecuación 63.

Tabla 130

Resumen del Modelo - Y_1

Modelo	R	R^2	R^2 Ajustado	RMSE	Durbin-Watson		
					Autocorrelación	Estadístico	*p*
H_0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00182	0.01276	1.96852	0.83183
H_1	0.99621	0.99244	0.99231	0.00016	0.00877	1.97469	0.86353

Tabla 131

Análisis de varianza de la regresión lineal, ANOVA

Modelo		Suma de Cuadrados	gl	Cuadrado Medio	F	*p*
H_1	Regresión	0.00059	3	0.00020	7701.74604	2.15522×10^{-186}
	Residuo	4.47051×10^{-6}	176	2.54006×10^{-8}		
	Total	0.00059	179			

Nota. El modelo de la constante se omite, ya que no se puede mostrar información importante.

Tabla 132

Coeficientes de la regresión lineal

Modelo		No tipificado	Error Típico	Tipificado	*t*	*p*	IC del 95%	
							Inf.	Sup.
H_0	(Constante)	-0.00507	0.00014		-37.45609	1.26783×10^{-86}	-0.00534	-0.00481
H_1	(Constante)	0.02361	0.00030		78.01908	1.87539×10^{-138}	0.02302	0.02421
	X1	0.02518	0.00411	0.61148	6.12474	5.77131×10^{-9}	0.01706	0.03329
	X2	-0.00780	0.00008	-1.05267	-95.93963	6.79546×10^{-154}	-0.00796	-0.00764
	X1*X2	-0.00809	0.00110	-0.73392	-7.32171	8.41618×10-12	-0.01027	-0.00591

Tabla 133

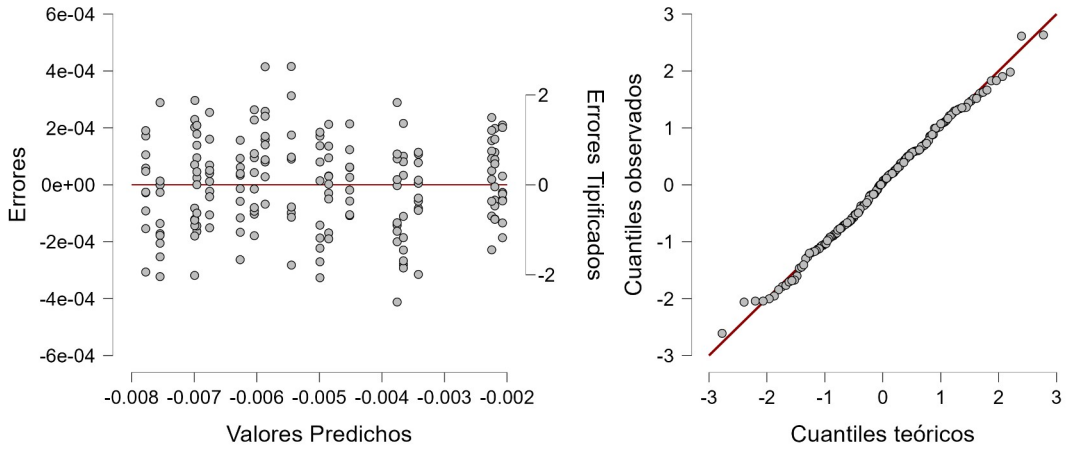
Casos influyentes

Case Number	Error Típico	YT	Valor Predicho	Error	Cook's Distance
96	2.63299	-0.00503	-0.00545	0.00042	0.03207
108	-2.61044	-0.00417	-0.00376	-0.00041	0.03305
160	2.61245	-0.00545	-0.00587	0.00041	0.01224

La Figura 102 muestra gráficos de verificación de supuestos de la regresión lineal.

Figura 102

Verificación de supuestos de la regresión lineal.



Nota. Izquierda: Errores vs predichos (Supuesto de varianza constante). Derecha: Gráfico Q-Q de errores tipificados (supuesto de normalidad)

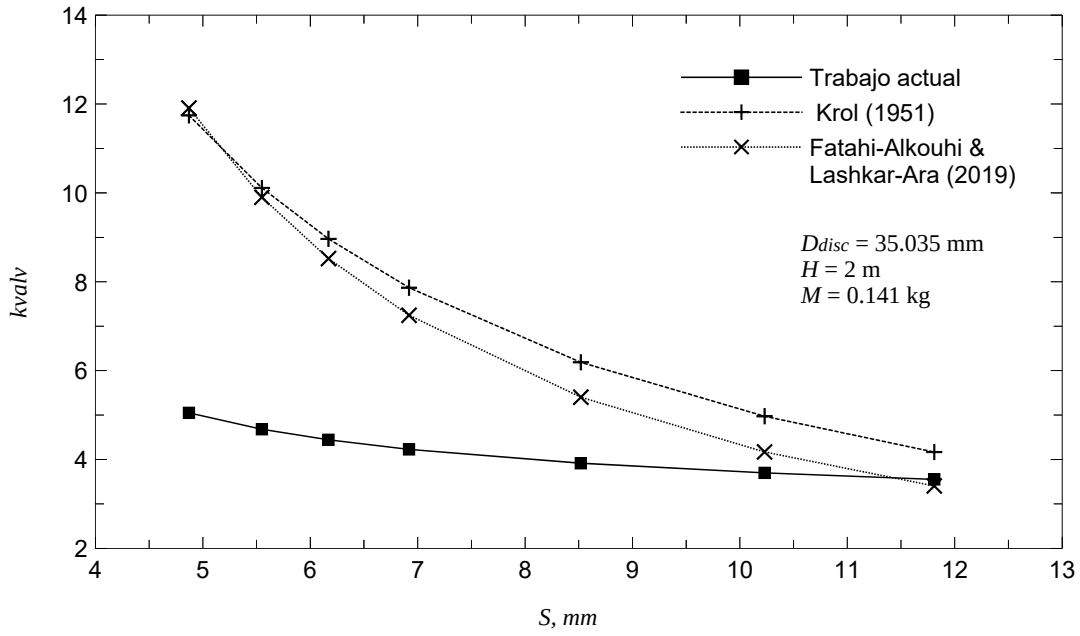
2.1.5.4.d Conclusiones del análisis de regresión lineal para el modelo seleccionado

- El modelo 2 tiene resultados adecuados de los supuestos de independencia de residuos, homocedasticidad de varianzas y normalidad de residuos. Mientras que el modelo 1, falla en la homocedasticidad de varianzas y normalidad de residuos (Tabla 129).
- El modelo 2 ajusta adecuadamente los datos obtenidos con un R^2 ajustado de 0.992 y un $RMSE$ de 0.000016. Se debe tener en cuenta que el modelo resulta de la transformación de las variables con la función potencial, por ende las unidades del estadístico $RMSE$ también están transformadas.
- Nuevos valores del coeficiente de pérdidas locales se pueden estimar a partir del modelo propuesto, considerando los intervalos de confianza de predicción.

- En comparación con otros modelos de k_{valv}, se observa que los valores encontrados se encuentran por debajo (Figura 103). Esto puede deberse a que el tipo de válvula construido es diferente y de menor diámetro que en los otros casos.
- En el Anexo 11 se ha utilizado el modelo para predecir el k_{total} de la bomba de ariete. Encontrándose mejores resultados con el modelo 1 que con el modelo 2, principalmente en alturas de suministro pequeñas H < 1 m (Figura 140 y 141). Esto sugiere que el modelo 1, compensa el error del coeficiente de accesorios k_{acc} a bajas H. Por ende, el modelo 1, se utilizó al momento de determinar la velocidad estática v_0 del Anexo 1.2.4.

Figura 103

Comparación de modelos del coeficiente k_{valv}.



2.1.6 Conclusiones

- A mayor carrera de válvula de impulso S, menor coeficiente de pérdidas locales (Figura 96).
- A mayor altura de suministro H, el valor promedio del coeficiente de pérdidas locales k_{valv} disminuye ligeramente (Tabla 121, Tabla 122).

- Se rechaza la hipótesis nula de la igualdad de medias del coeficiente de pérdidas locales k_{valv} debido a los factores carrera de la válvula de impulso S, altura de suministro H y su interacción $S*H$. El efecto del factor S es mas importante mientras que el del factor H y la interacción $S*H$ tienen un efecto leve en la variable respuesta k_{valv} (Tabla 124)
- Se propone el modelo 2 de la Ecuación 67 con un R^2 ajustado de 0.9923 y $RMSE$ de 0.00016, el cual cumple los supuestos de la regresión lineal (Tabla 129).

$$\frac{1}{-3}(k_{valv})^{-3}=\left(-0.00865(H)^{-2.91}-0.039\left(\frac{S}{D_{disc}}\right)^{0.2}+0.0139(H)^{-2.91}\left(\frac{S}{D_{disc}}\right)^{0.2}+0.0236\right) \quad (67)$$

donde:

H es la altura de suministro, m.

S/D_{disc} es la relación carrera y diámetro del disco de la válvula de impulso.

- Se utilizó el modelo 1 de la Ecuación 68 con un R^2 ajustado de 0.99 y $RMSE$ de 0.0622, para predecir la velocidad estática v_0 del Anexo 1.2.4, dado que predice mejor el k_{valv} para H < 1 m (Ver Anexo 11).

$$k_{valv}=0.456\,H^{-3.1}+0.085\left(\frac{S}{D_{disc}}\right)^{-1.6}+3.03 \quad (68)$$

- El coeficiente k_{valv} encontrado se encuentra por debajo de lo encontrado por otros autores, debido probablemente al tipo y dimensiones de la válvula construida.

2.1.7 Orden aleatorio de pruebas

La aleatorización del orden de las pruebas se realizó en función a números aleatorios generados en una hoja de cálculo. Cada prueba se asocia con un número aleatorio luego se orden de menor a mayor obteniendo un orden aleatorio de pruebas. En el Anexo 18, se muestra el orden de pruebas aleatorizadas.

La columna “código” hace referencia a: “(Variable 1, Variable 2) ; (repetición)”.

2.1.8 Tabla de datos y análisis

Ver Anexo 18.

2.2 Velocidad crítica v_c y coeficiente de arrastre K_d

2.2.1 Objetivo del experimento

Estimar la velocidad crítica v_c y el coeficiente de arrastre K_d, en función de la carrera de la válvula de impulso S.

2.2.2 Muestra y población

La población viene representada por todas las bombas de ariete a construir. Estas las clasificó por el tipo de fabricante (factor de bloqueo). Dentro de cada fabricante tenemos unidades muy homogéneas, por ende, utilizamos una unidad experimental en cada bloque. Se ha seleccionado el fabricante PAVCO para las pruebas sucesivas.

2.2.3 Diseño experimental:

El diseño es de tipo factorial a × b, con las siguientes consideraciones:

- Unidad experimental (UE) : 1 (bomba de ariete)
- Cantidad de réplicas (RE) : 1
- Cantidad de repeticiones (R) : 10 (elegido arbitrariamente)

El banco de pruebas tiene dimensiones físicas para cada altura de suministro mínima H_{min}. El nivel del agua es ligeramente mayor, dado que se evacua por rebose el agua sobrante, este nivel se mide en el piezómetro. En la Tabla 136 se muestra las estadísticas de la altura de suministro mínima H_{min} medida en el piezómetro instalado.

En la Tabla 134, se muestra el total de pruebas para el experimento y en la Tabla 135 los tratamientos.

Tabla 134

Cantidad de variables, pruebas y tratamientos.

N.º	Variable	Niveles	Niveles	Tratamientos (Tr)	Total de pruebas , $P = Tr \times RE \times R$
1	Altura de suministro mínima H_{min} , m	H_{min1}, H_{min2}, H_{min3}, H_{min4}, H_{min5}, H_{min6}, H_{min7}	7	7	70

Tabla 135

Desarrollo de tratamientos

N°	Variable 1	Tratamiento
1	H_{min1}	(H_{min1})
2	H_{min2}	(H_{min2})
3	H_{min3}	(H_{min3})
4	H_{min4}	(H_{min4})
5	H_{min5}	(H_{min5})
6	H_{min6}	(H_{min6})
7	H_{min7}	(H_{min7})

Nota. Código de tratamiento: (variable 1)

2.2.4 Procedimiento experimental

El procedimiento experimental se muestra en el Anexo 7.

2.2.5 Resultados

2.2.5.1 Estadística descriptiva e inferencial de variables

2.2.5.1.a Altura de suministro H

Se fijaron en siete valores de alturas de suministro mínima H_{min}, partiendo de 80 cm en adelante, en la Tabla 136 se muestra sus estadísticas. La dispersión de valores es baja (s, $s/\bar{x}$, E). El valor p del contraste de normalidad es bajo dado que se trata de mediciones con valores similares en varios casos. La última columna unidades de metros.

Tabla 136

Estadísticas de la altura de suministro mínima, H_{min}

Variable	$\bar{x}_{Hmin}$, cm	s, cm	Máx, cm	Mín, cm	n	$s/\bar{x}$ ×100%	E	Valor p	$\bar{x}_{Hmin}$, m
H_{min1}	82.16	0.09	82.25	82.00	10	0.11 %	0.06	0.122	0.82
H_{min2}	93.84	0.03	93.90	93.80	10	0.03 %	0.02	0.066	0.94
H_{min3}	105.53	0.03	105.60	105.50	10	0.03 %	0.02	0.014	1.06
H_{min4}	117.27	0.02	117.30	117.25	10	0.02 %	0.02	0.001	1.17
H_{min5}	140.80	0.03	140.85	140.75	10	0.02 %	0.02	0.004	1.41
H_{min6}	164.33	0.09	164.50	164.20	10	0.05 %	0.06	0.094	1.64
H_{min7}	187.72	0.08	187.90	187.60	10	0.04 %	0.06	0.004	1.88

Nota. $\bar{x}_{Hmin}$ media de la altura de suministro mínima. Simbología en la Tabla 97.

2.2.5.1.b Carrera S

La carrera de la válvula de impulso S se ajusta en cada prueba, disminuyendo su valor hasta el punto de golpe de ariete inminente. Para cada altura de suministro fijada H_{min} le corresponde una carrera S.

Se planteó el modelo de la Ecuación 69, donde se incluye la corrección y la incertidumbre de medición de la carrera S.

$$S = S_i + \text{corrección} + k \times u(S) \tag{69}$$

Donde:

- S, la carrera de válvula de impulso donde el golpe de ariete es inminente.
- S_i, la carrera que da un área de cilindro equivalente al área de tronco de cilindro por donde atraviesa el flujo de agua y en donde el golpe de ariete es inminente. $S_i = (S_{min}+S_{max})/2$
- $u(S)$, incertidumbre típica expandida de la carrera.

Las estadísticas de las carreras S se muestran en la Tabla 137. La variabilidad del experimento ($s/\bar{x}$) es menor al 2.2%. Los valores p indican que no se trasgrede el supuesto de normalidad de la prueba T para la estimación de la media poblacional.

El calculo de la incertidumbre típica expandida se desarrolla en el Anexo 14.1. La corrección de la carrera de la válvula de impulso se muestra en el Anexo 2.5.

Tabla 137

Estadísticas de carrera corregida S

Variable	$\bar{x}_S$, mm	s, mm	n	$s/\bar{x}$ ×100%	E	Valor p	$k*u_c(S)$
H_{min1}	4.87	0.10	10	2.2 %	0.07	0.35	0.14
H_{min2}	5.55	0.06	10	1.1 %	0.04	0.56	0.12
H_{min3}	6.17	0.05	10	0.9 %	0.04	0.97	0.12
H_{min4}	6.92	0.06	10	0.8 %	0.04	0.08	0.12
H_{min5}	8.52	0.10	10	1.2 %	0.07	0.23	0.14
H_{min6}	10.23	0.10	10	1.0 %	0.07	0.77	0.14
H_{min7}	11.81	0.12	10	1.0 %	0.09	0.96	0.14

Nota. $\bar{x}_S$ media de la carrera corregida. Simbología en la Tabla 97.

2.2.5.1.c Velocidad estática

Es la velocidad medida en la condición de golpe inminente (inicio de cierre de la válvula de impulso), esto, para cada altura de suministro mínima H_{min}. En la Tabla 138 se observa que la desviación estándar s y el error de estimación E son bajos, lo que implica **poca variabilidad en los datos**, teniendo un valor p del contraste de normalidad bueno.

Dado la condición $v_c \geq v_0$ (1Anexo 7:), tomamos los valores obtenidos **como una aproximación de la velocidad crítica** para cada carrera.

El calculo de la incertidumbre típica expandida se desarrolla en el Anexo 14.2

Tabla 138

Estadísticas descriptivas e inferencial de la velocidad estática v_0

Variable	$\bar{x}_{v0}$, m/s	s, m/s	Máx, m/s	Mín, m/s	n	$s/\bar{x}$ ×100%	E	Valor p	$k^*u_c(v)$
H_{min1}	0.885	0.003	0.888	0.879	10	0.33 %	0.002	0.43	0.006
H_{min2}	0.970	0.002	0.973	0.966	10	0.20 %	0.001	0.65	0.007
H_{min3}	1.043	0.003	1.047	1.039	10	0.27 %	0.002	0.65	0.007
H_{min4}	1.114	0.004	1.120	1.108	10	0.38 %	0.003	0.39	0.008
H_{min5}	1.243	0.003	1.249	1.240	10	0.22 %	0.002	0.07	0.009
H_{min6}	1.365	0.003	1.371	1.358	10	0.24 %	0.002	0.45	0.010
H_{min7}	1.478	0.002	1.480	1.475	10	0.13 %	0.001	0.17	0.010

Nota. $\bar{x}_{v0}$ media de la velocidad estática. Simbología en la Tabla 97.

2.2.5.1.d Coeficiente de arrastre

En el marco teórico (Capítulo 2.1.2.2.2.2) se encontró que la velocidad v_1 es muy próximo a la velocidad crítica v_c, ($v_1 \leq v_c$). La velocidad estática v_0 encontrada en este experimento es en realidad los valores experimentales de v_1, es decir, $v_1 \approx v_0$ (ver Anexo 7). Por tanto de la Ecuación 70, se puede determinar el coeficiente de arrastre K_d:

$$K_d = \frac{W}{\rho_{H2O} \times v_1^2 \times A_{disco}} \tag{70}$$

En la Tabla 139, se muestra la estadística de los valores calculados del coeficiente de arrastre K_d para las diferentes alturas de suministro. La desviación estándar s y el error máximo de estimación E son bajos, con valores p de la prueba de normalidad de Shapiro-Willk aceptables.

El calculo de la incertidumbre típica expandida se desarrolla en el Anexo 14.3.

Tabla 139

Estadísticas descriptivas e inferencial del coeficiente de arrastre K_d

Variable	$\bar{x}_{Kd}$, [ ]	s, [ ]	Máx, [ ]	Mín, [ ]	n	$s/\bar{x}$ ×100%	E	Valor p	$k^*u_c(K_d)$
H_{min1}	1.834	0.012	1.856	1.819	10	0.7 %	0.009	0.45	0.027
H_{min2}	1.526	0.006	1.539	1.517	10	0.4 %	0.004	0.60	0.022
H_{min3}	1.320	0.007	1.330	1.310	10	0.5 %	0.005	0.66	0.019
H_{min4}	1.157	0.009	1.169	1.145	10	0.7 %	0.006	0.43	0.017
H_{min5}	0.929	0.004	0.933	0.921	10	0.4 %	0.003	0.07	0.013
H_{min6}	0.771	0.004	0.778	0.764	10	0.5 %	0.003	0.44	0.011
H_{min7}	0.658	0.002	0.660	0.655	10	0.2 %	0.001	0.20	0.009

Nota., $\bar{x}_{Kd}$: media del coeficiente de arrastre. Simbología en la Tabla 97.

2.2.5.1.e Resumen de estadísticas

La Tabla 140 resume las estadísticas de las Tablas 137, 138 y 139.

Se muestran el valor promedio encontrado para cada variable y su incertidumbre típica expandida correspondiente. Los valores se han aproximado dos cifras significativas de la incertidumbre encontrada según la recomendación de la guía GUM (Comité Conjunto de Guías en Metrología [JCGM], 2008)

Tenemos la velocidad crítica v_c aproximada por la velocidad estática v_0 ($v_c \geq v_0$) y el coeficiente de arrastre K_d.

Tabla 140

Velocidad crítica y coeficiente de arrastre

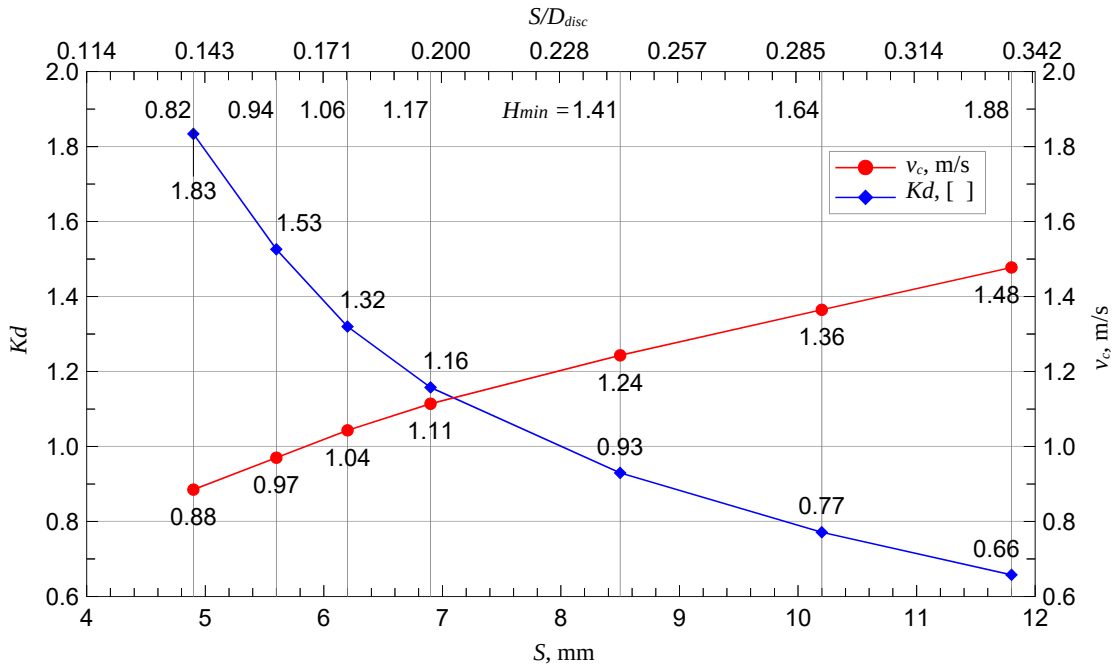
Variable	H_{min}, m	S, mm		v_c m/s		K_d [ ]	
		$\bar{x}_S$	$k^*u_c(S)$	$\bar{x}_{v0}$	$k^*u_c(v)$	$\bar{x}_{Kd}$	$k^*u_c(K_d)$
H_{min1}	0.82	4.87	0.14	0.885	0.006	1.834	0.027
H_{min2}	0.94	5.55	0.12	0.970	0.007	1.526	0.022
H_{min3}	1.06	6.17	0.12	1.043	0.007	1.320	0.019
H_{min4}	1.17	6.92	0.12	1.114	0.008	1.157	0.017
H_{min5}	1.41	8.52	0.14	1.243	0.009	0.929	0.013
H_{min6}	1.64	10.23	0.14	1.365	0.010	0.771	0.011
H_{min7}	1.88	11.81	0.14	1.478	0.010	0.658	0.009

Nota. H_{min} altura de suministro mínima, S carrera de la válvula de impulso, v_c velocidad crítica, K_d coeficiente de arrastre, $k^*u_c()$ incertidumbre típica expandida haciendo k = 2.

En la Figura 104, se grafica los datos de la Tabla 140 considerando un D_{disc} de 35.035 mm. Cada valor de carrera de válvula de impulso S, tiene su correspondiente velocidad crítica v_c, coeficiente de arrastre K_d y altura de suministro mínima H_{min}.

Figura 104

Coeficiente de arrastre y velocidad crítica



2.2.5.2 Modelo matemático para el coeficiente de arrastre

2.2.5.2.a Modelación

El modelo lineal se puede expresar según la Ecuación 71 o 72.

$$Y_1 = -\hat{\alpha} X_1 + \hat{C} \tag{71}$$

$$F_1(\hat{y}_{1i}) = -\hat{\alpha} G_1(x_{1i}) + \hat{C} \tag{72}$$

Las funciones F_1 y G_1 son de transformación de variables, para este caso se usa la función logarítmica y potencial, entonces tenemos la Ecuación 73 o 74.

$$\ln(\hat{y}_{1i}) = -\hat{\alpha}\frac{x_{1i}^{-a+1}}{-a+1} + \hat{C} \tag{73}$$

$$\frac{\hat{y}_{1i}^{-b+1}}{-b+1} = -\hat{\alpha}\frac{x_{1i}^{-a+1}}{-a+1} + \hat{C} \tag{74}$$

Se detalla más sobre el modelo y su notación en el Anexo 6.4.

Se puede obtener modelos a partir de la Ecuación 73 o 74, haciendo $\hat{y}_1 = K_d$, $x_1 = S/D_{disc}$, esto se muestra en la Tabla 141.

Tabla 141

Resultados del análisis por regresión lineal

Modelo	Estadísticos
Modelo 1:	R^2 : 0.9971
$\ln(K_d) = 1.358\left(\frac{S}{D_{disc}}\right)^{-0.43} - 2.576$ ..... (75)	$R^2 ajust.$: 0.9970
	$RMSE$: 0.01885
Exponentes optimizados : a = 1.43	F : 23115.3
Punto influyente : N.º 30, error típico -2.778, distancia de Cook's 0.21	gl : 68
Verificación de supuestos	n : 70
Homocedasticidad : BP = 8.0467, df = 1 , p-value = 0.004559	Parámetros estimados:
Independencia : DW = 1.6348 , p-value = 0.06028	$+ \hat{C}$ = -2.576
Normalidad : W = 0.97225 , p-value = 0.1221	$- \hat{\alpha}$ = -0.584
Modelo 2: Sin punto influyente N°30.	R^2 : 0.9973
$\ln(K_d) = 1.172\left(\frac{S}{D_{disc}}\right)^{-0.47} - 2.361$ ..... (76)	$R^2 ajust.$: 0.9973
	$RMSE$: 0.01781
Exponentes optimizados : a = 1.47	F : 25085.8
Punto influyente : N.º 30, error típico -2.778, distancia de Cook's 0.21	gl : 67
Verificación de supuestos	n : 69
Homocedasticidad : BP = 4.2297, df = 1 , p-value = 0.03972	Parámetros estimados:
Independencia : DW = 1.7167 , p-value = 0.115	$+ \hat{C}$ = -2.361
Normalidad : W = 0.96222 , p-value = 0.03526	$- \hat{\alpha}$ = -0.551
Modelo 3:	R^2 : 0.9979
$\frac{1}{-1.19}(K_d)^{-1.19} = -4.842\left(\frac{S}{D_{disc}}\right) + 0.257$ ..... (77)	$R^2 ajust.$: 0.9978
	$RMSE$: 0.01543
Exponentes optimizados : b = 2.19, a = 0	F : 31812.5
Punto influyente : N.º 40, error típico 2.83, distancia de Cook's 0.136	gl : 68
Verificación de supuestos	n : 70
Homocedasticidad : BP = 3.6592, df = 1 , p-value = 0.05576	Parámetros estimados:
Independencia : DW = 1.6568 , p-value = 0.07031	$+ \hat{C}$ = 0.257
Normalidad : W = 0.9816 , p-value = 0.3933	$- \hat{\alpha}$ = -4.842
Modelo 4: Sin punto influyente N°40.	R^2 : 0.9981
$\frac{1}{-1.2}(K_d)^{-1.2} = -4.854\left(\frac{S}{D_{disc}}\right) + 0.2655$ ..... (78)	$R^2 ajust.$: 0.9981
	$RMSE$: 0.01460
Exponentes optimizados : b = 2.2, a = 0	F : 35006.4
Verificación de supuestos	gl : 67
Homocedasticidad : BP = 2.9245, df = 1 , p-value = 0.08724	n : 69
Independencia : DW = 1.7027 , p-value = 0.1031	Parámetros estimados:
Normalidad : W = 0.97336 , p-value = 0.147	$+ \hat{C}$ = 0.2655
	$- \hat{\alpha}$ = -4.854

Nota. Los “exponentes optimizados” son mediante función de optimización para obtener el R^2 máximo. Homocedasticidad (Breusch-Pagan Test), Independencia (Durbin-Watson test), Normalidad (Shapiro-Wilk).

En la Tabla 141 se muestra cuatro modelos, los dos primeros utilizan la función logaritmo neperiano en la transformación de y, mientras que en los dos siguientes se utiliza la función potencial.

El punto influyente N°30 afecta el modelo 1, su efecto se aprecia en el modelo 2. Se observa una mejora leve del supuesto de homocedasticidad, sin embargo, en ninguno se llegan a cumplir los supuestos.

El punto influyente N°40 afecta el modelo 3, sin embargo, quitarlo afecta poco en los coeficientes como se ve en el modelo 4.

Se prefiere el modelo 3, el cual cumple los supuestos de la regresión lineal a comparación con los otros modelos.

2.2.5.2.b Modelo matemático y predicciones.

En la, Figura 105, se grafica el modelo matemático final con $y = Kd$ y $x_1 = S/D_{\text{disc}}$, y los valores promedio del coeficiente de arrastre K_d

En la Figura 105, la línea tenue alrededor de la función $f\,(K_d) = g(S/D_{\text{disc}})$, representa la zona del intervalo de confianza para la predicción del valor promedio.

La Figura 106 y Figura 107 muestran el intervalo de confianza para la predicción de nuevas observaciones, donde se ha graficado los intervalos de predicción de los modelos 1 y modelo 3.

Se observa que el modelo 1 cubre con mayor amplitud hacia la derecha, mientras que el modelo 3 es más preciso en esta zona (amplitud reducida). Hacia el lado izquierdo el modelo 1 es más preciso que el modelo 3.

Figura 105

Modelo de regresión lineal para el coeficiente de arrastre (modelo 3).

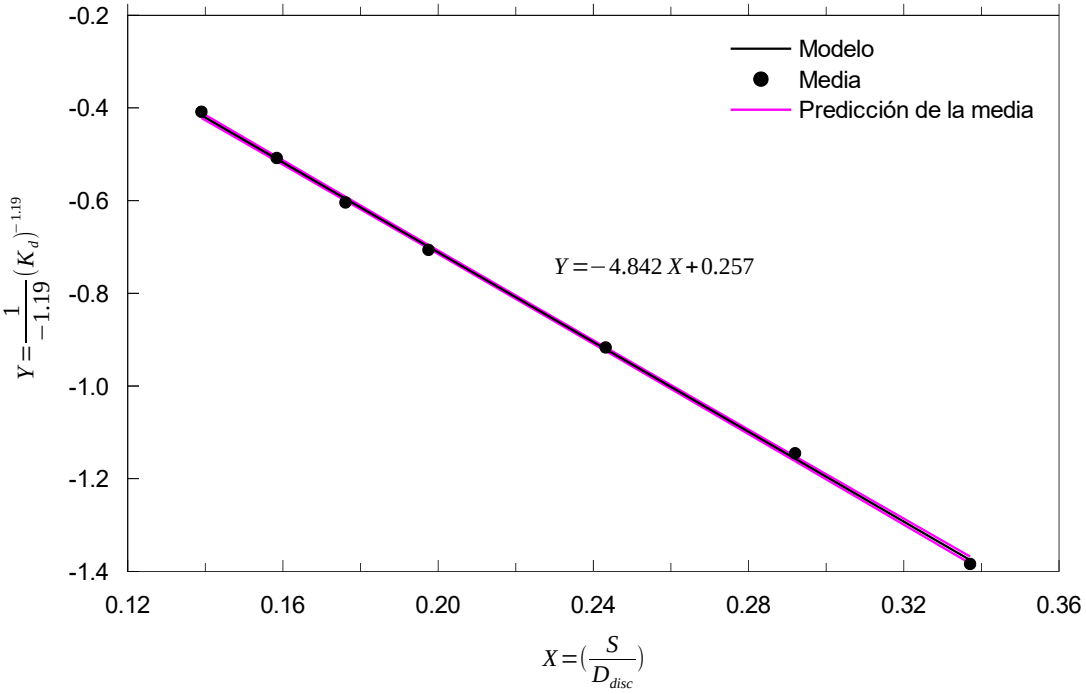


Figura 106

Dispersión e intervalo de predicción de nuevas observaciones (modelo 1)

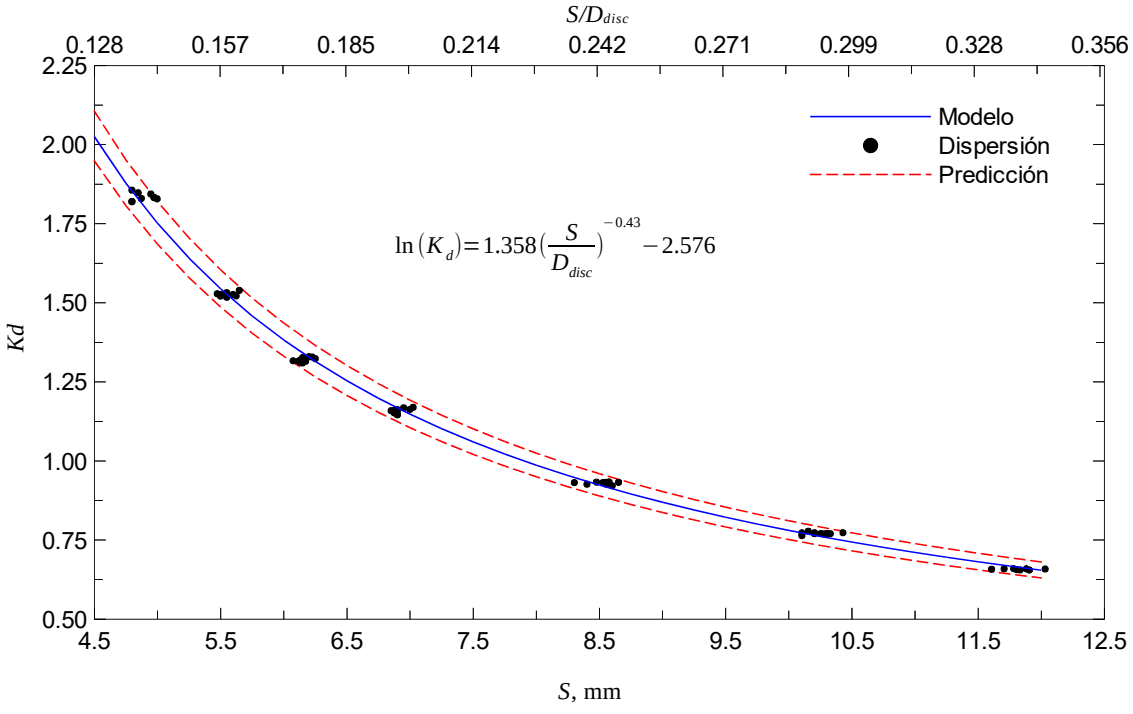
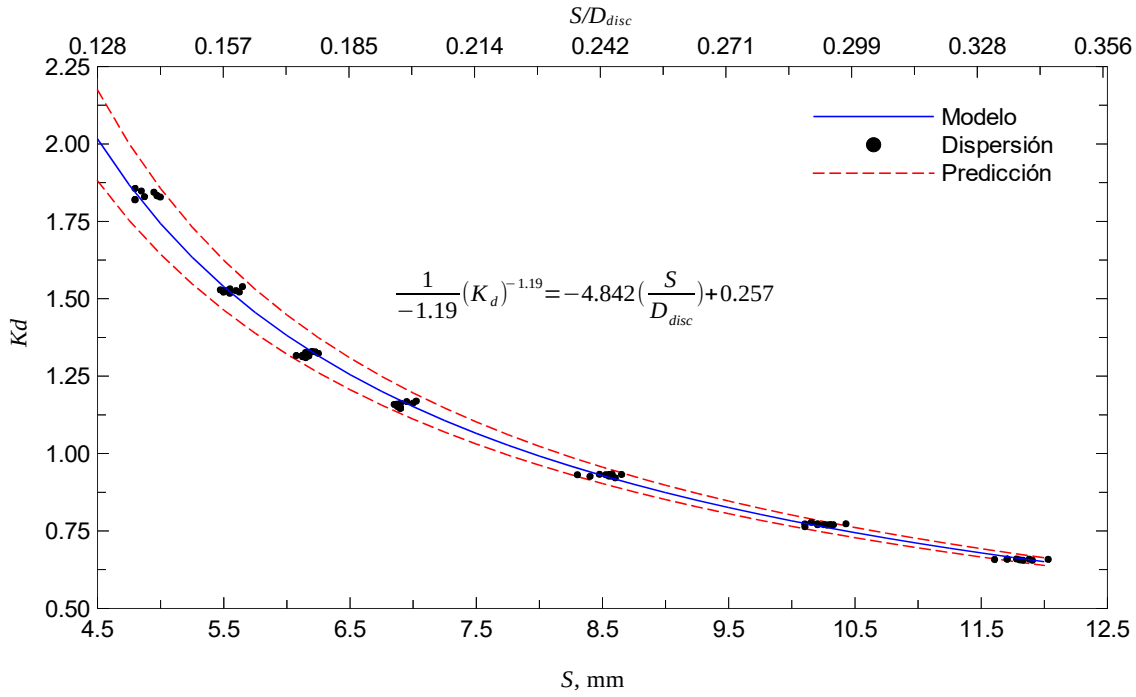


Figura 107

Dispersión e intervalo de predicción de nuevas observaciones (modelo 3)



2.2.5.2.c Análisis estadístico del modelo 3

En las Tablas 142, 143, 144 y 145 se resumen de la estadística del procedimiento de regresión lineal del modelo, donde $Y = F_1(\hat{K}_d)$ y $X = G_1(S/D_{disc})$ de la Ecuación 63.

Tabla 142

Resumen del Modelo - Y

Modelo	R	R²	R² Ajustado	RMSE	Durbin-Watson		
					Autocorrelación	Estadístico	*p*
H_0	0.00000	0.00000	0.00000	0.33162	0.11521	1.74331	0.27905
H_1	0.99893	0.99787	0.99784	0.01543	0.17130	1.65676	0.14063

Tabla 143

Análisis de varianza de la regresión lineal, ANOVA

Modelo		Suma de Cuadrados	gl	Cuadrado Medio	F	*p*
H_1	Regresión	7.57191	1	7.57191	31812.50198	1.47907×10^{-92}
	Residuo	0.01619	68	0.00024		
	Total	7.58810	69			

Nota. El modelo de la constante se omite, ya que no se puede mostrar información importante.

Tabla 144

Coeficientes de la regresión lineal

Modelo		No tipificado	Error Típico	Tipificado	*t*	*p*	IC del 95%	
							Inf.	Sup.
H_0	(Constante)	-0.81037	0.03964		-20.44526	5.41237×10^{-31}	-0.88945	-0.73130
H_1	(Constante)	0.25716	0.00626		41.06093	1.00167×10^{-49}	0.24466	0.26966
	X1	-4.84259	0.02715	-0.99893	-178.36060	1.47907×10-92	-4.89676	-4.78841

Tabla 145

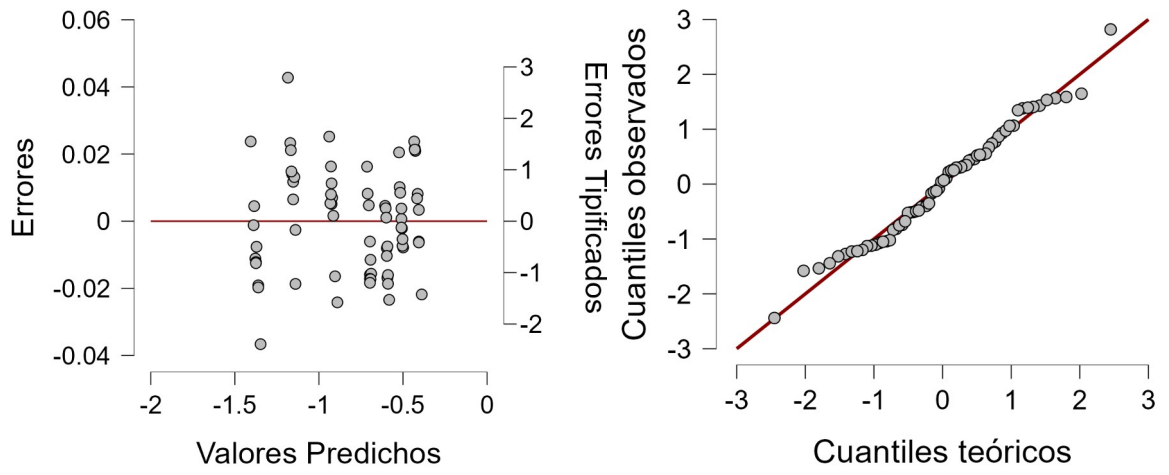
Casos influyentes

Case Number	Error Típico	YT	Valor Predicho	Error	Cook's Distance
29	-2.43958	-1.38368	-1.34704	-0.03664	0.16430
40	2.81808	-1.14159	-1.18435	0.04276	0.13447

La Figura 108 muestra gráficos de verificación de supuestos de la regresión lineal.

Figura 108

Verificación de supuestos de la regresión lineal.



Nota. Izquierda: Errores vs predichos (Supuesto de varianza constante). Derecha: Gráfico Q-Q de errores tipificados (supuesto de normalidad)

2.2.6 Conclusiones

- Se verifica la relación funcional entre el coeficiente de arrastre y la carrera de la válvula de impulso.

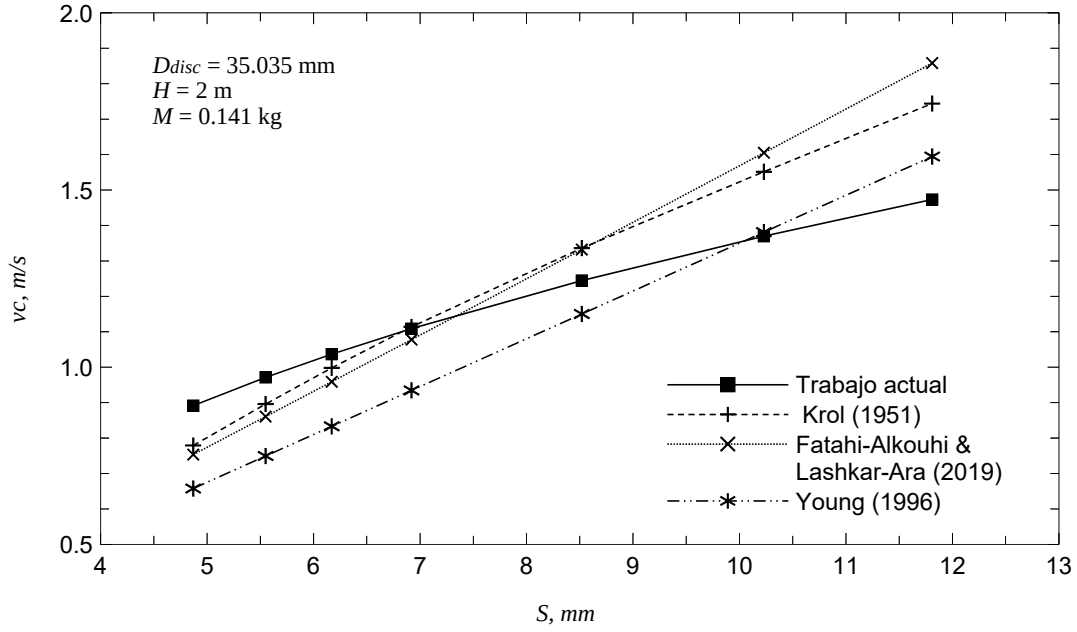
- El modelo 3 (Tabla 141) planteado como $F\ (K_d) = G\ (S/D_{\text{disc}})$, con F y G funciones de transformación de variable, explica adecuadamente la variabilidad del coeficiente de arrastre con un R^2 ajustado = 0.998, la variabilidad no explicada es baja con un $RMSE$ = 0.01543 (Ecuación 79).

$$\frac{1}{-1.19}(K_d)^{-1.19} = -4.842\left(\frac{S}{D_{disc}}\right) + 0.257 \tag{79}$$

- Las gráficas de verificación de supuestos (Figura 108) no evidencian transgresión de los supuestos de la regresión lineal, esto se comprueba con los estadísticos determinados en la Tabla 141.
- Los puntos influyentes N.º 29 y N°40 de la Tabla 145 no se extraen del modelo, dado que modifican levemente los coeficientes y estadísticos.
- Se aplicó varios modelos de coeficiente de arrastre para encontrar los valores de velocidad crítica v_c. Se observa que los valores difieren entre autores (Figura 109), los valores del trabajo actual tienen tendencia de crecimiento menor.

Figura 109

Comparación de la velocidad crítica teórica entre autores.



2.2.7 *Orden aleatorio de pruebas*

La aleatorización del orden de las pruebas se realizó en función a números aleatorios generados en una hoja de cálculo. Cada prueba se asocia con un número aleatorio luego se orden de menor a mayor obteniendo un orden aleatorio de pruebas. En el Anexo 18, se muestra el orden de pruebas aleatorizadas.

La columna “código” hace referencia al código asignado a cada prueba, en este caso el código tiene los componentes siguientes: “(Variable 1), (repetición)”.

2.2.8 Tabla de datos y análisis

Ver Anexo 18.

2.3 Optimización de válvula de impulso

2.3.1 Introducción

La verticalidad de la válvula de impulso es muy importante. Si el eje vertical de la válvula de impulso choca de manera adecuada con la base de la válvula, se genera altas presiones, de lo contrario, la presión se alivia reduciendo el desempeño de la bomba de ariete.

Esto significa que hay que tener especial cuidado al momento de seleccionar los materiales para la elaboración de la válvula de impulso. A pesar de que los materiales, como tuberías y accesorios, se encuentran normados en la práctica pequeñas diferencias se pueden encontrar, por ejemplo la profundidad de la rosca, horizontalidad de arandelas, verticalidad del perno, etc.

Todas estas diferencias pueden conllevar a una válvula de impulso defectuosa, que no alcanza las presiones esperadas, desperdiciando mucho caudal y con menor caudal de descarga (o bombeo).

Si los materiales encontrados son los adecuados, incluso así, todavía la mejor presión no se alcanza. Esto puede deberse a la suma de desviaciones que aporta cada material. Sin embargo, todavía podemos salvar esta situación con una configuración posicional adecuada de los materiales.

Experimentos preliminares

Se realizaron experimentos preliminares de elementos (materiales) que pueden generar un mejor desarrollo de la presión en la bomba de ariete. La Tabla 146, muestra los factores estudiados y los efectos encontrados.

Tabla 146

El efecto de los materiales en el desempeño de la bomba de ariete.

Tipo de factor	Factores	Efecto*
Factores respecto al cierre hermético entre disco (arandela 1/2”) y la base (bushing 2”x1”) de la válvula de impulso	Uso de dos arandelas 5/16” para verticalidad del perno.	Leve. Es recomendable fijar y centrar las arandelas.
	Uso de empaque complementario al disco.	Negativo. El empaque generó golpes defectuosos.

Tipo de factor	Factores	Efecto*
	Sellado de intersticios entre el perno, tuercas y disco de la válvula de impulso (por fugas de presión)	Leve. Se recomienda sellar los intersticios con pegamento especial.
Factores de calidad de materiales:	Perno 3/8”x8” recto.	Leve. Verificar durante el control de calidad de materiales.
	Disco (arandela) con imperfecciones en los bordes.	**Importante**. Las imperfecciones socavan la base de la válvula, sin embargo mejoran la presión, por sello hermético.
Factores de ubicación adecuada de partes de la válvula de impulso para verticalidad del eje móvil.	Centrado del disco de la válvula de impulso (arandela)	Leve. Se recomienda prestar atención a una correcto centrado.
	Posición angular de accesorios roscados (tee 1” y bushing 2”x1”)	**Importante**. Los ajustes en diferentes posiciones generan presiones diferentes.
	Posición angular del perno 3/8”x8”	**Importante**. Cada posición angular genera una presión diferente.

Nota. *Aclaración de términos: Leve, mejora leve de la presión. Negativo, disminución de presión. Importante, aumento considerable de la presión.

Todos los factores mostrados en la Tabla 155 son relevantes y se deben tener en consideración cuando se construye la válvula de impulso como la descrita en el Capítulo 3.1.3.6.2. Los factores importantes merecen especial atención y se denominan factores de optimización de la válvula de impulso:

- El experimento del **disco con imperfecciones en los bordes**, no se realiza dado que implica experimentación más detallada, sin embargo, se prevé como un factor importante dado que uno de los prototipos construidos con estas características ofreció presiones muy por encima de los otros prototipos sin esta característica (comparar Figura 110 y Figura 112)
- El efecto de la **posición angular del perno,** se estudió en los anexos 2.3.2 y 2.3.3.
- El experimento de **posición angular de accesorios roscados** se realizó a nivel pre experimental y se desarrolla en el Anexo 2.3.4.

Por otro lado, se observó ciertos efectos que merman el rendimiento de la bomba de ariete:

- Los golpes defectuosos, se presentan de manera intermitente y reducen considerablemente la presión.
- Efecto de fijador de posicional de perno, el cual en algunas situaciones puede retener el inicio del cierre de la válvula de impulso, ocasionando un mayor golpe de ariete, sin embargo, es una condición de difícil control por lo que se considera como una configuración no deseada. Los mismos efectos se pueden conseguir de una manera más controlada aumentando el peso del perno (eje vertical) o aumentando la carrera de la válvula de impulso.

Por último, se observó el comportamiento de la onda de presión o pulso del golpe de ariete, a través de mediciones con un sensor. Estos resultados preliminares se exponen en el Anexo 8.

2.3.2 Posición angular del perno

2.3.2.1 Objetivo del experimento

Describir el comportamiento hidráulico de la bomba de ariete a diferentes posiciones angulares del perno, de la válvula de impulso, en torno a su eje vertical.

2.3.2.2 Muestra y población

La población viene representada por todas las bombas de ariete a construir. Estas las clasificó por el tipo de fabricante (factor de bloqueo). Dentro de cada fabricante tenemos unidades muy homogéneas, por ende, utilizamos una unidad experimental en cada bloque. Se ha seleccionado el fabricante PAVCO para las pruebas sucesivas.

2.3.2.3 Diseño experimental

Se marca una posición referencial en el cuerpo de la válvula de impulso, así mismo marca la cabeza hexagonal del perno en 12 partes (ángulos de 30°). Las siguientes variables se han fijado:

- Carrera de la válvula de impulso S: 5.6 mm

- Altura de descarga nominal H: 1.4 m
- Longitud de tubo de suministro L: 10.52 m

La prueba consistirá en medir la presión máxima y caudal de desperdicio en cada posición angular del perno.

El diseño es de tipo factorial a × b, con las siguientes consideraciones:

- Unidad experimental (UE) : 1 (bomba de ariete)
- Cantidad de réplicas (RE) : 1
- Cantidad de repeticiones (R) : 5 (elegido arbitrariamente)

En la Tabla 147, se muestra el total de pruebas para el experimento y en la Tabla 148, los tratamientos.

Tabla 147

Cantidad de variables, pruebas y tratamientos.

N.º	Variable	Niveles	Niveles	Tratamientos (Tr)	Total de pruebas, $P = Tr \times RE \times R$
1	Altura de suministro H (m)	30° (1), 60° (2), 90° (3), 120° (4), 150° (5), 180° (6), 210° (7), 240° (8), 270° (9), 300° (10), 330° (11), 360° (12)	12	12	60

Nota. Se ha colocado números índice al lado de cada variable para su fácil codificación.

Tabla 148

Desarrollo de tratamientos

Variable 1	30° (1)	60° (2)	90° (3)	120° (4)	150° (5)	180° (6)	210° (7)	240° (8)	270° (9)	300° (10)	330° (11)	360° (12)
Tratamiento:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Nota. Código de tratamiento, (variable1)

2.3.2.4 Resultados y análisis

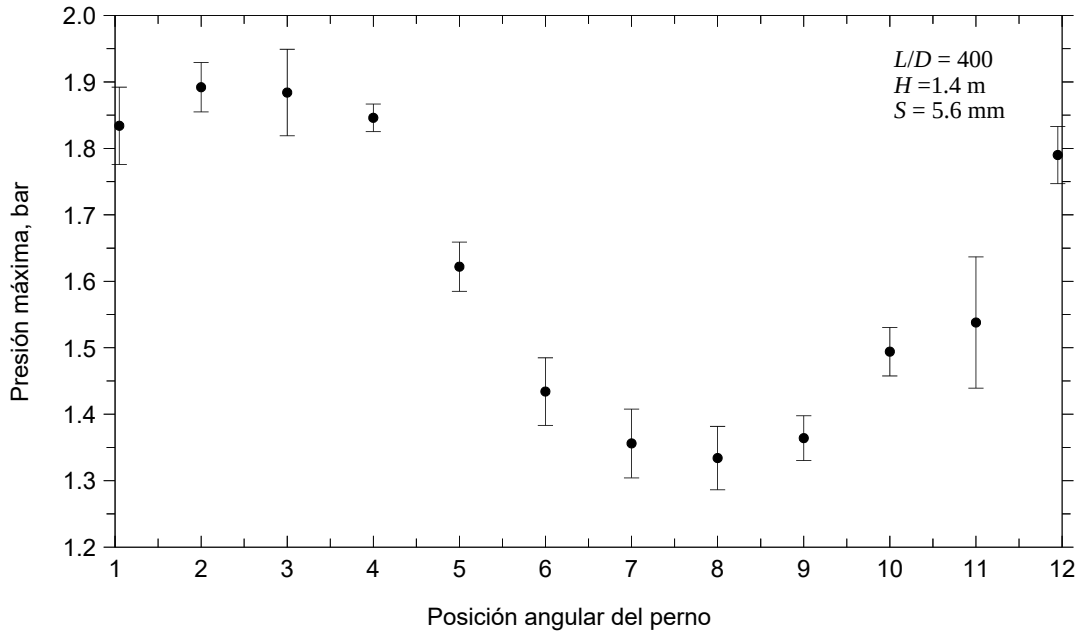
En la Figura 110 se observa la presión máxima promedio y barras de error (desviación estándar) en diferentes posiciones angulares.

El valor más alto de la presión máxima está alrededor de 1.9 Bar y se da entre las posiciones 2 y 3. Así mismo se observa que en otras posiciones la presión máxima disminuye hasta 1.35 Bar, esto, pues se tiene un golpe de ariete deficiente. Esto significa un incremento del 40% de la presión si se ajusta correctamente el eje vertical móvil.

Entre las posibles causas se tiene 1) la orientación angular relativa de los accesorios (tee, niple, bushing, etc.) desfavorece la verticalidad, 2) el disco de la válvula de impulso (arandela, tuercas y perno) no tiene horizontalidad estricta por la fabricación manual, entre otros factores.

Figura 110

Presión máxima a diferentes posiciones angulares.

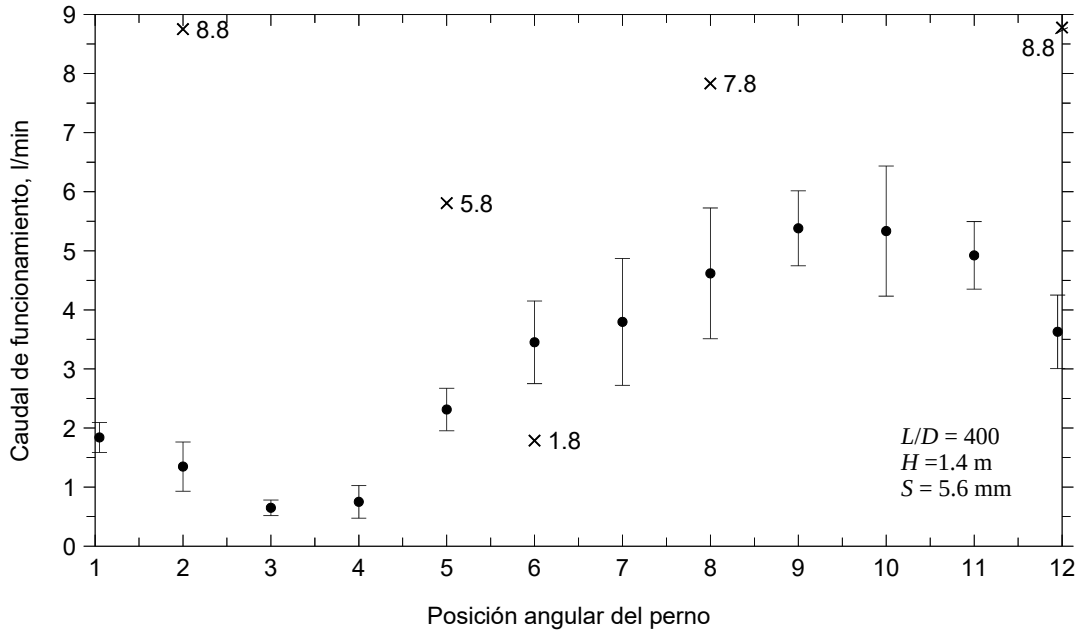


Se debe precisar que, en este caso, todas las posiciones angulares del perno logran generar el golpe de ariete y por ende un valor de presión; en otros casos la válvula de impulso deja de funcionar (el perno se detiene).

En la Figura 111, se observa los valores promedio del caudal de funcionamiento o de desperdicio, a las diferentes posiciones de la válvula de impulso. En general el caudal de funcionamiento es menor en las posiciones del 1 al 4, coincidente con lo observado para las presiones máximas.

Figura 111

Caudal de funcionamiento a diferentes posiciones angulares del perno.



La Tabla 149 y Tabla 150, se muestran las estadísticas descriptivas de los valores de la presión máxima y caudal de funcionamiento en diferentes posiciones angulares (variable 1).

En la Tabla 149 se tienen desviaciones estándar relativas bajas, por debajo del 5%, excepto en la posición angular 11. La cantidad de observaciones n es variable, debido que corresponden a pruebas adicionales realizadas por pruebas atípicas.

Tabla 149

Estadísticas descriptivas de los valores de la presión máxima P_{max}

Variable 1	$\bar{x}_{Pmax}$, bar	s, bar	Máx, bar	Mín, bar	n	$s/\bar{x}$ ×100%
1	1.834	0.058	1.88	1.74	5	3.2 %
2	1.903	0.043	1.96	1.85	6	2.3 %
3	1.884	0.065	1.98	1.8	5	3.5 %
4	1.846	0.021	1.87	1.82	5	1.1 %
5	1.628	0.037	1.67	1.58	6	2.2 %
6	1.442	0.049	1.49	1.38	6	3.4 %
7	1.356	0.052	1.4	1.3	5	3.8 %
8	1.342	0.047	1.39	1.27	6	3.5 %
9	1.364	0.034	1.4	1.32	5	2.5 %
10	1.494	0.036	1.54	1.44	5	2.4 %
11	1.538	0.099	1.65	1.43	5	6.4 %
12	1.787	0.039	1.85	1.74	6	2.2 %

Nota. $\bar{x}_{Pmax}$: media de la presión máxima. Simbología en la Tabla 97.

Para el caso de la Tabla 150, se tienen desviaciones relativas mayores por encima del 10%, esto indica mayor variabilidad en el caudal de funcionamiento. Una posible causa de la alta variabilidad es por mayor incidencia de golpes defectuosos en pruebas diferentes.

Tabla 150

Estadísticas descriptivas del caudal de funcionamiento

Variable 1	$\bar{x}$, l/min	s, l/min	Máx, l/min	Mín, l/min	n	$s/\bar{x}$ ×100%
1	1.84	0.25	2.12	1.49	5	13.8 %
2	1.35	0.42	1.89	0.82	5	30.9 %
3	0.65	0.13	0.82	0.49	5	20.4 %
4	0.75	0.28	1.02	0.37	5	36.8 %
5	2.31	0.36	2.80	1.91	5	15.5 %
6	3.45	0.70	3.86	2.20	5	20.3 %
7	3.80	1.07	4.76	2.45	5	28.3 %
8	4.62	1.11	5.89	3.55	5	24.0 %
9	5.38	0.63	6.21	4.43	5	11.8 %
10	5.33	1.10	6.96	4.14	5	20.6 %
11	4.92	0.57	5.61	4.22	5	11.6 %
12	3.63	0.62	4.30	3.04	5	17.2 %

Nota. $\bar{x}$ media del caudal de funcionamiento. Simbología en la Tabla 97.

2.3.2.5 Conclusiones

- La posición angular del perno en la válvula de impulso influye en el desempeño hidráulico de la bomba de ariete.
- Existe una posición o un rango de posiciones angulares en el cual se consigue el mayor valor para la presión máxima o altura de descarga máxima (h_{max}).
- En la posición de presión máxima, el caudal de funcionamiento o de desperdicio es mínimo.
- Ajustar el perno en la posición de presión máxima significa un incremento de hasta el 40% de la presión.
- Experimentos posteriores demostraron que en ciertas posiciones angulares no se genera golpe de ariete, es decir, no funciona la bomba de ariete. Esto depende de la fabricación y los materiales utilizados.

- Los golpes defectuosos podrían estar generando mayor variabilidad en el caudal de funcionamiento o desperdicio.

2.3.2.6 Orden aleatorio de pruebas

La aleatorización del orden de las pruebas, se realizó en función a números aleatorios generados en una hoja de cálculo. Cada prueba se asocia con un número aleatorio luego se orden de menor a mayor obteniendo un orden aleatorio de pruebas. En el Anexo 18 se muestra la tabla de datos de pruebas aleatorizadas.

Código de pruebas: (variable 1), (réplica, repetición)

2.3.2.7 Tabla de datos y análisis

Ver Anexo 18.

2.3.3 Posición angular del perno en las tres carreras seleccionadas.

2.3.3.1 Objetivo del experimento

Describir el comportamiento hidráulico de la bomba de ariete a diferentes posiciones angulares del perno de la válvula de impulso, en torno a su eje vertical. Aplicación para las tres carreras de la válvula de impulso en estudio.

2.3.3.2 Muestra y población

La población viene representada por todas las bombas de ariete a construir. Estas las clasificó por el tipo de fabricante (factor de bloqueo). Dentro de cada fabricante tenemos unidades muy homogéneas, por ende, utilizamos una unidad experimental en cada bloque. Se ha seleccionado el fabricante PAVCO para las pruebas sucesivas.

2.3.3.3 Diseño experimental

El experimento es similar al experimento del Anexo 2.3.2, en este caso se realiza la prueba experimental para tres condiciones de carrera de válvula de impulso S.

En el experimento anterior, se realizó la medición de presión en la doce posiciones angulares de 30° en torno a la cabeza del perno, esto con la finalidad de tener un panorama general del comportamiento de la presión. Sin embargo, para fines prácticos, un

menor rango de posiciones angulares es suficiente para encontrar los puntos de presión máxima.

Entonces se planteó el diseño teniendo las siguientes consideraciones:

- Se trabaja en tres unidades experimentales, es decir, tres prototipos de válvulas de impulso, por ende, el experimento constará de tres réplicas.
- Se trabajará con tres bloques, el factor de bloque es la carrera de válvula de impulso S. Las tres unidades experimentales se probarán en cada bloque.
- Se consideró cinco repeticiones en el primer bloque. Para el segundo y tercero se redujo a tres repeticiones.
- Inicialmente se trabajó con 5 niveles de la variable 1 (posición angular) en el bloque 1, luego, se redujo a 3 niveles en los dos bloques restante. Esto es suficiente para ubicar la presión máxima.

El diseño es de tipo factorial con las siguientes consideraciones:

- Unidad experimental (UE): 3 (válvulas de impulso)
- Cantidad de réplicas (RE): 3
- Cantidad de repeticiones (R): 5 y 3 (elegido arbitrariamente)

En la Tabla 151, se muestra el total de pruebas para el experimento y en la Tabla 152, los tratamientos.

Tabla 151

Cantidad de variables, pruebas y tratamientos.

N.º	Variable	Niveles	Tratamientos (Tr)	Repeticiones (R)	Total de pruebas , $P = Tr \times RE \times R$
1	Posición angular en grados sexagesimales (°)	B_1: 0° $^{(1)}$, 30° $^{(2)}$, 60° $^{(3)}$, 90° $^{(4)}$, 120° $^{(5)}$	5	5	75
		B_2: 0° $^{(1)}$, 30° $^{(2)}$, 60° $^{(3)}$	3	3	27
		B_3: 0° $^{(1)}$, 30° $^{(2)}$, 60° $^{(3)}$	3	3	27

Nota. B_1 Bloque 1: S = 5.6 mm; B_2 Bloque 2: S = 6.9 mm; B_3 Bloque 3: S = 10.2 mm

En la Tabla 151, se ha colocado números índice al lado derecho de cada nivel para su fácil codificación en la Tabla 152.

Tabla 152

Desarrollo de tratamientos

N.º	Bloque	Variable 1				
		1	2	3	4	5
1	1	(1, 1)	(1, 2)	(1, 3)	(1, 4)	(1, 5)
2	2	(2, 1)	(2, 2)	(2, 3)	-	-
3	3	(3, 1)	(3, 2)	(3, 3)	-	-

Nota. Código de tratamiento, (Bloque, variable 1)

2.3.3.4 Resultados

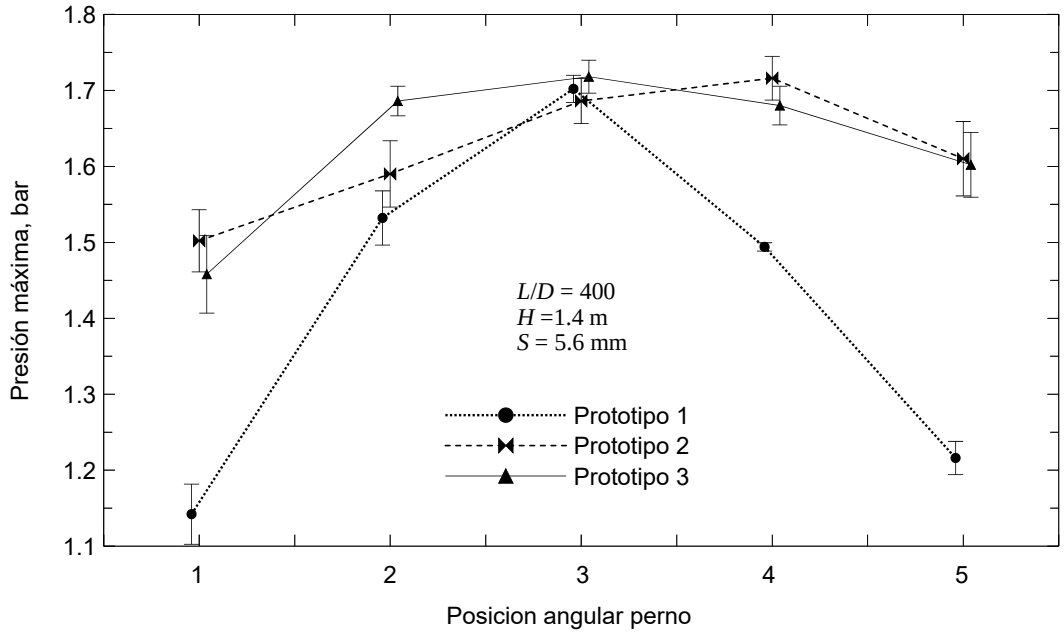
2.3.3.4.a Resultados para el Bloque 1

En la Figura 112 se observa las cinco posiciones angulares de perno y la presión máxima que se genera en cada posición. Cada tipo de marca representa el comportamiento de la presión máxima promedio en cada réplica o válvula de impulso estudiada.

El mayor valor de presión máxima se encuentra alrededor de 1.7 Bar para las tres réplicas, entre la posición 3 y 4.

Figura 112

Presión máxima para las tres réplicas (Bloque 1)



Nota. Las líneas de barras de error corresponden a la desviación estándar.

En el caso de la réplica 3 (prototipo 3) se tiene presiones más estables en posiciones angulares contiguas, mientras que en la réplica 1 un pequeño cambio de posición angular disminuye la presión en 0.17 Bar por lo menos.

En la Tabla 153, se muestra el detalle de estadísticas descriptivas para las tres réplicas. El valor promedio $\overline{x}_{Pmax}$ es el que se ha graficado en la Figura 112. La dispersión de datos % Δ es menor al 3.5% en todos los casos.

Tabla 153

Estadísticas descriptivas de la presión máxima P_{max} para el Bloque 1

Variable 1	**$\overline{x}_{Pmax}$, bar**	**s, bar**	**Máx, bar**	**Mín, bar**	**n**	**$s/\overline{x}$ ×100%**
Réplica 1						
1	1.142	0.040	1.21	1.11	5	3.5 %
2	1.532	0.036	1.58	1.48	5	2.3 %
3	1.702	0.018	1.73	1.68	5	1.1 %
4	1.494	0.005	1.50	1.49	5	0.4 %
5	1.216	0.022	1.24	1.18	5	1.8 %
Réplica 2						
1	1.502	0.041	1.57	1.47	5	2.7 %
2	1.590	0.044	1.66	1.54	5	2.7 %
3	1.686	0.030	1.72	1.64	5	1.8 %
4	1.716	0.029	1.75	1.68	5	1.7 %
5	1.610	0.049	1.67	1.54	5	3.0 %
Réplica, 3						
1	1.458	0.051	1.50	1.37	5	3.5 %
2	1.686	0.019	1.70	1.66	5	1.2 %
3	1.718	0.022	1.74	1.69	5	1.3 %
4	1.680	0.025	1.72	1.66	5	1.5 %
5	1.602	0.043	1.66	1.54	5	2.7 %

Nota. $\overline{x}_{Pmax}$ media de la presión máxima. Simbología en la Tabla 97.

2.3.3.4.b Resultados para el Bloque 2 y Bloque 3

La Figura 113 muestra los valores promedio de las presiones máximas alcanzadas para las tres posiciones del disco (perno) en los bloques 2 y 3. Dentro de cada bloque se probaron las tres válvulas de impulso (réplicas).

La diferencia entre bloques se debe a que corresponden a carreras de válvula de impulso distintas. La diferencia entre réplicas se debe a factores de construcción y mate-

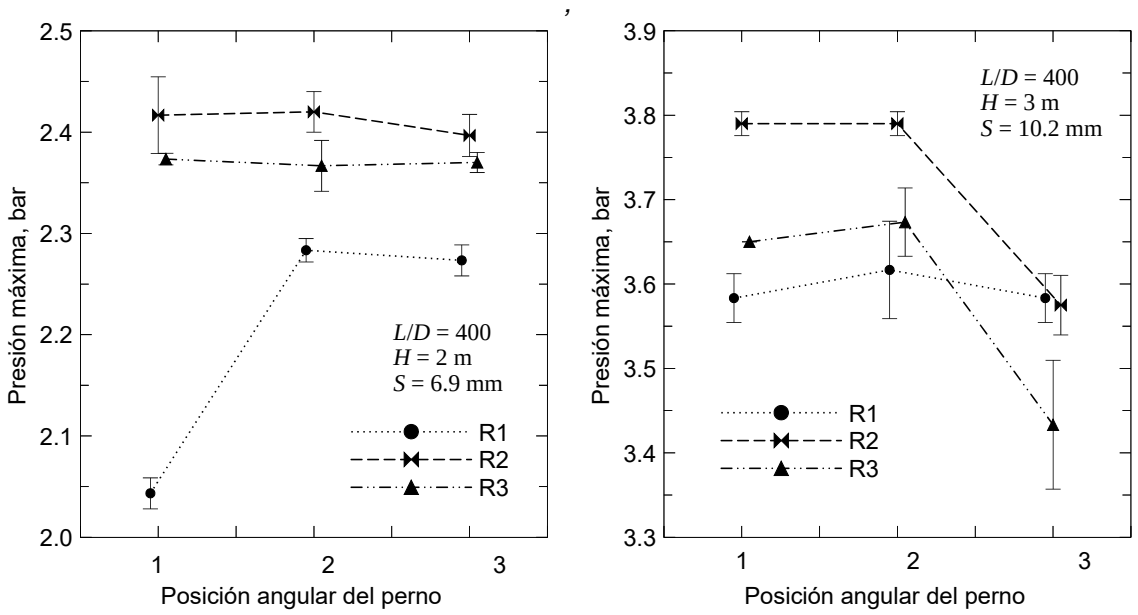
riales (disposición de los materiales y sus características, utilizados para cada válvula de impulso.

La réplica 2 (R2), desarrolla presiones máximas más altas en promedio. Mientras que la réplica 1 (R1) da valores menores.

En base a estos resultados, cada réplica puede trabajar para ciertas carreras donde obtiene mejores resultados. Por ejemplo, es más conveniente que la réplica 1 trabaja a la carrera del bloque 1, la réplica 2 puede trabajar con la carrera del bloque 3 y la réplica 3 con la carrera del bloque 2. Esto sirvió en el experimento principal de la presente tesis.

Figura 113

Presión máxima para los experimentos del bloque 2 y 3.



Nota. Izquierda: experimento del bloque 2, derecha: experimento del bloque 3.

En las tablas 154 y 155, se observan las estadísticas descriptivas de cada valor promedio utilizado en la Figura 113, La dispersión de los resultados está por debajo del 2.2%. Como se observa se trabajó con tres mediciones por cada punto.

Para el bloque 2 el mayor valor de presión máxima promedio se encuentra alrededor de 2.4 Bar (Tabla 154) y para el bloque 3 alrededor de 3.78 Bar (Tabla 155)

Tabla 154

Estadísticas descriptivas de la presión máxima para el Bloque 2

Variable 1	$\bar{x}_{Pmax}$, bar	s, bar	Máx, bar	Mín, bar	n	$s/\bar{x}$ ×100%
Réplica 1						
1	2.043	0.015	2.06	2.03	3	0.7 %
2	2.283	0.012	2.29	2.27	3	0.5 %
3	2.273	0.015	2.29	2.26	3	0.7 %
Réplica 2						
1	2.417	0.038	2.46	2.39	3	1.6 %
2	2.420	0.020	2.44	2.40	3	0.8 %
3	2.397	0.021	2.42	2.38	3	0.9 %
Réplica, 3						
1	2.373	0.006	2.38	2.37	3	0.2 %
2	2.367	0.025	2.39	2.34	3	1.1 %
3	2.370	0.010	2.38	2.36	3	0.4 %

Nota. $\bar{x}_{Pmax}$ media de la presión máxima. Simbología en la Tabla 97.

Tabla 155

Estadísticas descriptivas de la presión máxima para el Bloque 3

Variable 1	$\bar{x}_{Pmax}$, bar	s, bar	Máx, bar	Mín, bar	n	$s/\bar{x}$ ×100%
Réplica 1						
1	3.583	0.029	3.60	3.55	3	0.8 %
2	3.617	0.058	3.65	3.55	3	1.6 %
3	3.583	0.029	3.60	3.55	3	0.8 %
Réplica 2						
1	3.790	0.014	3.80	3.78	2	0.4 %
2	3.790	0.014	3.80	3.78	2	0.4 %
3	3.575	0.035	3.60	3.55	2	1.0 %
Réplica, 3						
1	3.650	0.000	3.65	3.65	3	0.0 %
2	3.673	0.040	3.72	3.65	3	1.1 %
3	3.433	0.076	3.50	3.35	3	2.2 %

Nota. $\bar{x}_{Pmax}$ media de la presión máxima. Simbología en la Tabla 97.

2.3.3.5 Conclusiones

Cada válvula de impulso fabricada tendrá su propia curva de presiones máximas, para el bloque 1 el mayor valor de presión máxima se encuentra alrededor de 1.7 Bar, sin embargo, según lo visto en el experimento del Anexo 2.3.2, es posible llegar inclusive hasta un valor promedio de 1.9 Bar. Esto implica la existencia de otros factores que mejoran la presión máxima, es decir optimizan la válvula de impulso.

La presión máxima es un indicador de la efectividad que alcanza cada válvula de impulso fabricada. Una misma válvula de impulso (réplica o prototipo) puede ser efectiva para diferentes carreras de válvula de impulso (diferentes bloques) o ser efectiva sólo para una determinada carrera.

La posición angular donde se obtiene el mayor valor de presión máxima se fija como parámetro de funcionamiento, es decir que en lo sucesivo las válvulas de impulso funcionan en estas posiciones angulares, con pequeñas variaciones alrededor de este valor.

Las posiciones angulares donde se generan las mejores presiones no son las mismas para una misma réplica, es decir la posición varía según el cambio de carrera de la válvula de impulso (cambio de bloque en el experimento).

La dispersión de los datos se encuentra por debajo del 3.5% respecto al valor de presión.

2.3.3.6 Orden aleatorio de pruebas

La aleatorización del orden de las pruebas se realizó en función a números aleatorios generados en una hoja de cálculo. Cada prueba se asocia con un número aleatorio luego se orden de menor a mayor obteniendo un orden aleatorio de pruebas. En el Anexo 18, se muestra la tabla de datos de pruebas aleatorizadas.

La columna “código” hace referencia al código asignado a cada prueba. El código tiene los componentes siguientes: “(Bloque, Variable 1), (Réplica, Repetición)”

2.3.3.7 Tabla de datos y de análisis

El experimento consiste en medir la presión máxima en cada prueba. Dado que no se pretende medir la velocidad del flujo, los requisitos de ensayo son prescindibles.

En las pruebas del bloque 3, correspondiente a las presiones más altas, experimentó problemas al final de la prueba por la excesiva presión generada, por lo cual tres pruebas quedaron sin datos.

En el Anexo 18, se muestra las tablas datos y de análisis.

2.3.4 Posición angular de los accesorios

2.3.4.1 Objetivo del experimento

Describir el comportamiento hidráulico de la bomba de ariete a diferentes posiciones angulares de los accesorios tee 1” y bushing 2”x1” de la válvula de impulso.

2.3.4.2 Muestra y población

La población viene representada por todas las bombas de ariete a construir. Estas las clasificó por el tipo de fabricante (factor de bloqueo). Dentro de cada fabricante tenemos unidades muy homogéneas, por ende, utilizamos una unidad experimental en cada bloque. Se ha seleccionado el fabricante PAVCO para las pruebas sucesivas.

2.3.4.3 Diseño experimental

La prueba consistirá en medir la presión máxima en cada combinación de posiciones angulares de la tee y el bushing.

La válvula de impulso es la **unidad experimental** sobre la que se modifica los niveles de la variable posición angular. Se marca ocho posiciones angulares (cada 45°) en el cuerpo de la válvula de impulso (niple u otro accesorio común), luego se realiza una marca en la base de la tee 1” y sobre el bushing 2”x1” de manera que sirva de indicación posicional respecto a las ocho posiciones angulares iniciales.

El **diseño experimental** es de tipo factorial con las siguientes consideraciones:

- Unidad experimental (UE) : 3 (válvula de impulso)
- Cantidad de réplicas (RE) : 1
- Cantidad de repeticiones (R) : 1

Se realizó un pre experimento para cada prototipo de válvula de impulso. En la Tabla 156, se calcula el total de pruebas de los pre experimentos y en la Tabla 157, los tratamientos.

Los niveles en la Tabla 156 son parciales, dado que, en otras posiciones el ajuste de accesorios no fija firmemente la conexión. Por otra parte, en los pre experimentos 2 y

3 se trabajó sólo con un grupo de 3 x 3 niveles a manera de exploración de la zona de mejor presión. Posteriormente, se verificó si era necesario ampliar los niveles.

Tabla 156

Cantidad de variables, pruebas y tratamientos.

N.º	Experimento	Variable (Posición angular)	Niveles	Niveles	Tratamientos (Tr)	Total de pruebas, $P = Tr \times RE \times R$
1	S = 10.1 mm, H = 3 m	tee 1”	1 (45°), 2 (90°), 3 (135°), 7 (315°), 8 (360°)	5	25	25
		bushing 2”x1”	1 (45°), 5 (225°), 6 (270°), 7 (315°), 8 (360°)	5		
2	S = 6.8 mm, H = 2 m	tee 1”	1 (45°), 2 (90°), 3 (135°)	3	9	9
		bushing 2”x1”	1 (45°), 2 (90°), 3 (135°)	3		
3	S = 5.4 mm, H = 1.4 m	tee 1”	1 (45°), 2 (90°), 3 (135°)	3	9	9
		bushing 2”x1”	1 (45°), 2 (90°), 3 (135°)	3		

Nota. Se ha colocado números índice al lado de cada variable para su fácil codificación.

Tabla 157

Desarrollo de tratamientos pre experimento 1

Variable 1	1	2	3	7	8
1	(1; 1)	(2; 1)	(3; 1)	(7; 1)	(8; 1)
5	(1; 5)	(2; 5)	(3; 5)	(7; 5)	(8; 5)
6	(1; 6)	(2; 6)	(3; 6)	(7; 6)	(8; 6)
7	(1; 7)	(2; 7)	(3; 7)	(7; 7)	(8; 7)
8	(1; 8)	(2; 8)	(3; 8)	(7; 8)	(8; 8)

Nota. Código de tratamiento, (variable 1; variable 2)

Tabla 158

Desarrollo de tratamientos pre experimento 2 y 3

Variable 1	1	2	3
1	(1; 1)	(2; 1)	(3; 1)
2	(1; 2)	(2; 2)	(3; 2)
3	(1; 3)	(2; 3)	(3; 3)

Nota. Código de tratamiento, (variable 1; variable 2)

2.3.4.4 Procedimiento experimental

- Ajuste de variables en la válvula de impulso.
- Colocación de válvula en banco de pruebas y puesta en marcha.
- Registro de presión máxima y posición de perno (con respecto a una marca de referencia.

2.3.4.5 Resultados y análisis

Expresamos los resultados en gráficos de coordenadas con curvas de nivel de presión.

Figura 114

Curvas de nivel de presión del pre experimento N°1.

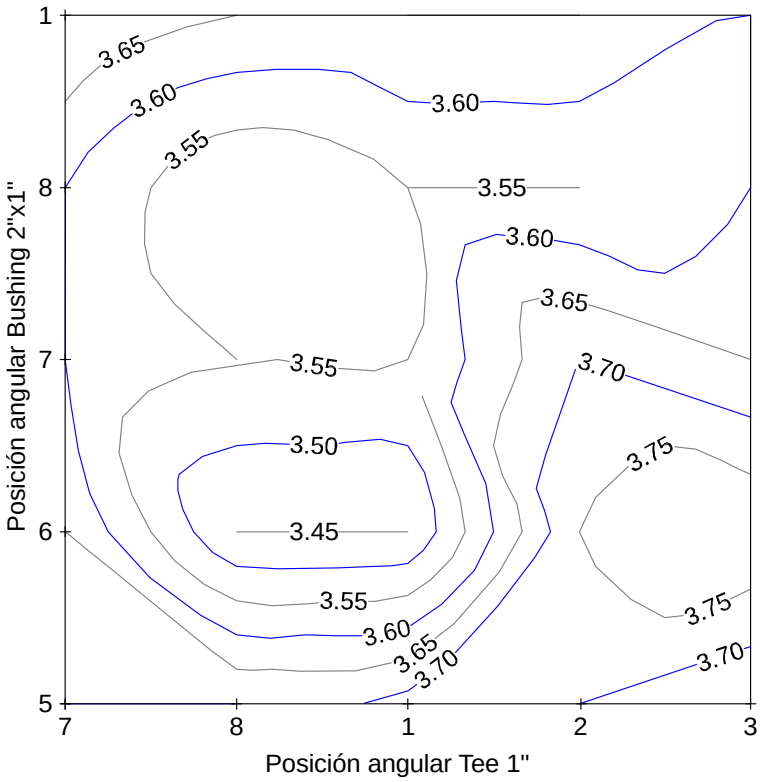
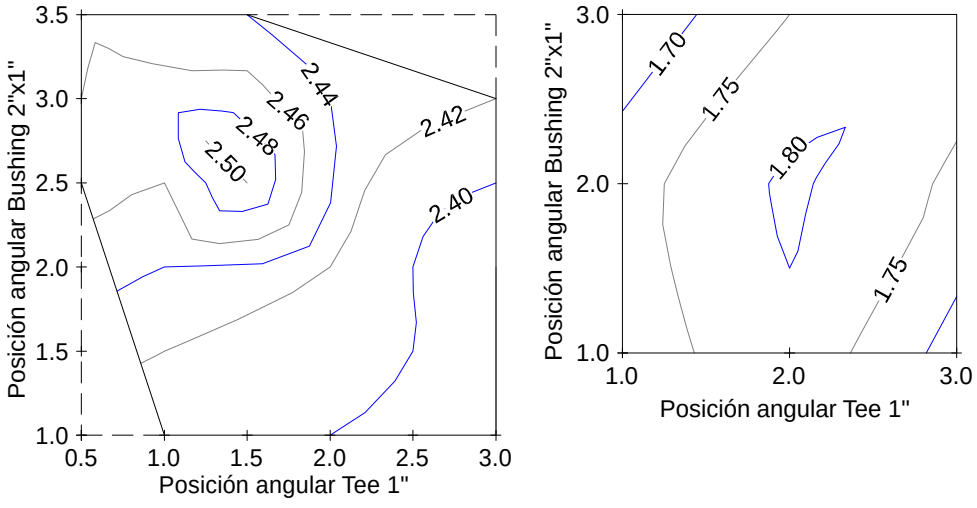


Figura 115

Curvas de nivel de presión del pre experimento N°2 y N°3.



En función a las Figuras 114 y 115, elaboramos la Tabla 159, donde se muestra las coordenadas de posición a la cual debería ajustarse cada válvula de impulso para un desempeño óptimo (máximo) de la presión.

Tabla 159

Coordenadas de presión máxima

N°	Pre experimento	Coordenada	Presión máxima, Bar
1	S = 10.1 mm, H = 3 m	(3; 6)	3.8
2	S = 6.8 mm, H = 2 m	(1.5; 2.75)	2.5
3	S = 5.4 mm, H = 1.4 m	(2; 2)	1.8

2.3.4.6 Conclusiones

Los gráficos indican que la presión máxima es una función de la posición angular de los accesorios Tee y Bushing. Esto significa que existe una posición de accesorios, para cada prototipo de válvula de impulso construida, en el cual se obtendrá una presión máxima.

La explicación puede derivarse del hecho que los cambios de posición angular significan un ajuste controlado de la verticalidad del perno (eje vertical) y/o permiten un choque más efectivo del disco de la válvula de impuso (arandela ½").

Esto último significaría que incluso si trabajamos con una misma válvula de impulso y luego cambiamos algunas de sus componentes (por acciones de mantenimiento por ejemplo), esto significaría una alteración de la verticalidad y la disminución de la presión máxima.

Por tanto, la optimización de la válvula de impulso, es un procedimiento de calibración que se debe realizar en cada instalación de bomba de ariete. El patrón de referencia son las presiones máxima obtenidas previamente por otros modelos similares.

2.3.4.7 Orden aleatorio de pruebas

La aleatorización del orden de las pruebas se realizó en función a números aleatorios generados en una hoja de cálculo. Cada prueba se asocia con un número aleatorio

luego se orden de menor a mayor obteniendo un orden aleatorio de pruebas. En el Anexo 18, se muestra la tabla de datos de pruebas aleatorizadas.

La columna “código” hace referencia al código asignado a cada prueba, en este caso el código tiene los componentes siguientes: “(Variable 1, Variable 2), (Réplica, Repetición)”

2.3.4.8 Tabla de datos y de análisis

El pre experimento consiste en medir la presión máxima en cada prueba. Dado que no se pretende medir la velocidad del flujo, los requisitos de ensayo son prescindibles. En el Anexo 18, se muestra las tablas datos y de análisis.

2.4 Determinación de la carrera de la válvula de impulso

2.4.1 Objetivo del experimento

Determinar los valores corregidos de la carrera de válvula de impulso medidos con dos calibres, uno con un error sistemático (calibre analógico) y el otro calibre de mayor precisión (digital).

2.4.2 Muestra y población

La población viene representada por todas las bombas de ariete a construir. Estas las clasificó por el tipo de fabricante (factor de bloqueo). Dentro de cada fabricante tenemos unidades muy homogéneas, por ende, utilizamos una unidad experimental en cada bloque. Se ha seleccionado el fabricante PAVCO para las pruebas sucesivas.

2.4.3 Diseño experimental

El experimento consiste en la medición de la variable: “carrera de la válvula de impulso”, definida como la distancia entre el disco de la válvula de impulso y el extremo superior del cuerpo de la bomba de ariete (la plataforma de choque)

Como se indica en el Anexo 14.1, la medición de la carrera es indirecta, pues al ubicarse dentro de la caja de la válvula de impulso su medición directa no es factible, por lo que, la medición se realiza en la parte superior luego de mantener cerrada la válvula de impulso.

En el experimento de velocidad crítica (Anexo 2.2), se midió la carrera con el calibre analógico. El procedimiento consistió ajustar la carrera seguido de la medición con el calibre analógico, las carreras medias (sin corregir) seleccionadas fueron 5.4 mm, 6.8 mm y 10.1 mm.

La medición con el calibre analógico, significó un error sistemático el cual requiere un experimento de corrección. En el presente experimento se verifica la medición de la variable carrera de la válvula de impulso con el calibre analógico y con un calibre digital para verificar la medida real de las carreras utilizadas en los tres prototipos de válvula de impulso construidos.

El diseño es de tipo factorial a × b, con las siguientes consideraciones:

- Unidad experimental (UE): 3 (válvulas de impulso)
- Cantidad de réplicas (RE): 1
- Cantidad de repeticiones (R): 4 y 3 (elegido arbitrariamente)

En la Tabla 160, se muestra el total de pruebas para el experimento y en la Tabla 161, los tratamientos.

Tabla 160

Cantidad de variables, pruebas y tratamientos.

N.º	Variable	Niveles	Tratamientos (Tr)	Repeticiones (R)	Total de pruebas , $P = Tr \times RE \times R$
1	Carrera S, en mm	5.4	1	4	4
		6.8	1	3	3
		10.1	1	3	3

Tabla 161

Desarrollo de tratamientos

N.º	Variable	Tratamiento
1	5.4	(5.4)
2	6.8	(6.8)
3	10.1	(10.2)

Nota. Código de tratamiento: (variable 1)

Procedimiento

- Se coloca la primera válvula de impulso en el banco de pruebas. A cada válvula le corresponde una carrera S.
- Se enciende el equipo de bombeo para mantener el nivel del agua y lograr que el eje vertical se quede inmóvil.
- Se procede a medir la carrera en dos posiciones, la posición 1 de carrera mínima y la posición 2 de carrera máxima.
    - Se mide con el calibre 1 (analógico) luego el calibre 2 (digital) en la posición 1, se repite 5 veces alternando una y otra (error de medición)

- Se mide con el calibre 1 (analógico) luego el calibre 2 (digital) en la posición 2, se repite 5 veces alternando una y otra (error de medición)

- Las mediciones se registran en la hoja de cálculo, así mismo, fotográficamente.
- Una vez terminada las diez mediciones, se procede con la siguiente prueba según el orden aleatorio.

2.4.4 Resultados

Estadísticas descriptivas

En la Tabla 162 y Tabla 163, cada variable tiene su valor promedio con cada calibre, así mismo, el intervalo de confianza para la media (ver Anexo 4).

Tabla 162

Resultados de la carrera con el calibre 1

Variable	$\bar{x}_S$ mm	s, mm	n	Intervalo de confianza			$t_{0.025}$	E	W	Valor p
5.4	5.321	0.028	4	5.277 <	μ	< 5.365	3.182	0.044	0.99	0.98
6.8	6.748	0.040	3	6.648 <	μ	< 6.849	4.303	0.100	0.75	0.00
10.2	10.183	0.003	3	10.176 <	μ	< 10.191	4.303	0.007	0.75	0.00

Nota. $\bar{x}_S$ media del diámetro interior. Simbología en la Tabla 97.

Tabla 163

Resultados de la carrera con el calibre 2

Variable	$\bar{x}_S$ mm	s, mm	n	Intervalo de confianza			$t_{0.025}$	E	W	Valor p
5.4	5.490	0.016	4	5.464 <	μ	< 5.516	3.182	0.026	0.90	0.42
6.8	6.898	0.031	3	6.821 <	μ	< 6.975	4.303	0.077	0.82	0.15
10.2	10.335	0.007	3	10.318 <	μ	< 10.352	4.303	0.017	1.00	1.00

Nota. $\bar{x}_S$ media del diámetro interior. Simbología en la Tabla 97.

A simple vista los resultados con el calibre 2 dan valores superiores respecto al calibre 1. Como prueba estadística podemos utilizar el ANOVA de medidas repetidas, sin embargo se comprueba que no se cumple el supuesto de igualdad de varianzas, por lo que podemos realizar la prueba de T-student para muestras emparejadas para comparar los resultados de cada variable.

Estadística inferencial – Contraste T-Student

Los valores p-ajustados de la Tabla 164, muestran que se rechaza la hipótesis nula de igualdad de medias, dado que los valores p son menores a 0.0167 (corrección de Bonferroni). La diferencia de medias se encuentra sobre los 0.15 mm para estos datos.

Tabla 164

Contraste T para Muestras Emparejadas

Medida 1	Medida 2	t	gl	p	Diferencia de Medias	Diferencia del Error Típico	p- ajustado (x3)	Significativo (α = 0.0167)
Calibre 1 - 5.4	Calibre 2 - 5.4	-16.07	3	0.00052	-0.1688	0.0105	0.00156	SI
Calibre 1 - 6.8	Calibre 2 - 6.8	-26.38	2	0.00143	-0.1500	0.0057	0.00429	SI
Calibre 1 - 10.1	Calibre 2 - 10.1	-55.59	2	0.00032	-0.1517	0.0027	0.00096	SI

Nota. Contraste t de Student.

En la Tabla 165, se verifica el supuesto de normalidad en las tres comparaciones.

Tabla 165

Contraste de Normalidad (Shapiro-Wilk)

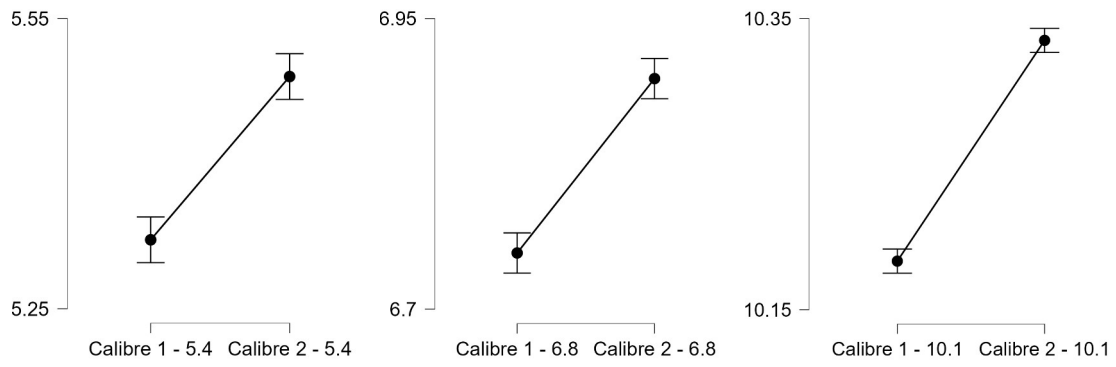
		W	p
Calibre 1 - 5.4	Calibre 2 - 5.4	0.86	0.25
Calibre 1 - 6.8	Calibre 2 - 6.8	0.93	0.49
Calibre 1 - 10.1	Calibre 2 - 10.1	0.91	0.41

Nota. Los resultados significativos sugieren una desviación respecto a la Normalidad.

En la Figura 114, se observa los valores medios de la carrera medido con los calibres 1 y 2. En general, las el calibre 1 siempre da valores mas bajos.

Figura 116

Gráficos descriptivos



La Tabla 166, muestra el análisis de la propagación de incertidumbres respecto a la medición con el calibre 2 (digital). La incertidumbre de calibración se extrae del certificado de calibración del Anexo 17. La incertidumbre de resolución corresponde a una distribución rectangular con desviación típica de 0.01 / 2√3 según la guía GUM (Comité Conjunto de Guías en Metrología [JCGM], 2008).

Tabla 166

Incertidumbre típica expandida (calibre 2)

Variable 1	Media $\bar{x}_S$, mm	Error estándar $s/\sqrt{n}$	Incertidumbre Calibración u_{cal}	Incertidumbre Resolución u_{res}	Incertidumbre Combinada $u_c(S)$	k	Incertidumbre Expandida $k^*u_c(S)$
5.4	5.490	0.008	0.025	0.003	0.026	3.182	0.08
6.8	6.898	0.018	0.025	0.003	0.031	4.303	0.13
10.1	10.335	0.004	0.025	0.003	0.025	4.303	0.11

Nota: $\bar{x}_S$ media de la carrera; k = coeficiente de expansión. Simbología en la Tabla 97.

De forma referencial, se ha tomado el coeficiente de expansión k igual al valor t de la distribucion T-Student para un nivel de confianza del 95% (ver Tabla 163)

2.4.5 Conclusiones

La prueba t-Student demuestra estadísticamente que existe diferencia significativa entre los valores reportados por el calibre 1 y el calibre 2 (Tabla 164).

El calibre 1 (analógico) tiene un error sistemático alrededor de - 0.15 mm. Se requiere un experimento para estimar coeficientes de corrección de la carrera medidas con este calibre.

Las mediciones con el calibre 2 (digital), representan los valores corregidos para los tres valores de carreras de válvula de impulso utilizados. Se pueden expresar estos valores como el promedio más la incertidumbre expandida: $S_{5.4}$ = (5.49 ± 0.08) mm, $S_{6.8}$ = (6.90 ± 0.13) mm y $S_{10.1}$ = (10.34 ± 0.11) mm.

2.5 Determinación de la carrera de la válvula de impulso II

2.5.1 Objetivo del experimento

Determinar los valores corregidos de la carrera de válvula de impulso del experimento de velocidad crítica.

2.5.2 Muestra y población

La población viene representada por todas las bombas de ariete a construir. Estas las clasificó por el tipo de fabricante (factor de bloqueo). Dentro de cada fabricante tenemos unidades muy homogéneas, por ende, utilizamos una unidad experimental en cada bloque. Se ha seleccionado el fabricante PAVCO para las pruebas sucesivas.

2.5.3 Diseño experimental

El experimento de velocidad crítica (Anexo 2.2), consistió en la medición de la velocidad en la condición estática, dado una altura de suministro y una carrera de válvula de impulso. Aquí se midió la carrera con el calibre analógico.

En el experimento del Anexo 2.2, se mostró que las mediciones con el calibre analógico tienen un error sistemático el cual podría encontrarse alrededor de - 0.15 mm.

Dado que el experimento de velocidad crítica se realizó con anterioridad, y se tienen las mediciones individuales de la carrera en cada prueba realizada, se conviene en corregir estas mediciones de carrera con un experimento adicional.

Dado la dificultad de realizar un experimento de determinación del error sistemático del calibre, se prefiere una aproximación mediante otro método.

El método consiste en fijar el conjunto de medidas con el calibre analógico, luego medir exteriormente el valor con el calibre digital. Este cambio de escala (interior a exterior) puede significar una complicación, sin embargo, en el Anexo 14.1 se analiza la propagación de incertidumbres del mismo.

El diseño experimental planteado es de tipo factorial a × b, con las siguientes consideraciones:

- Unidad experimental (UE): 1 (calibre analógico)

- Cantidad de réplicas (RE): 1
- Cantidad de repeticiones (R): 10 (elegido arbitrariamente)

En la Tabla 167, se muestra el total de pruebas para el experimento y en la Tabla 168, los tratamientos.

Tabla 167

Cantidad de variables, pruebas y tratamientos.

N.º	Variable	Niveles	Tratamientos (Tr)	Repeticiones (R)	Total de pruebas , $P = Tr \times RE \times R$
1	Indicación de longitud de calibre analógico, S_i	5.4 mm; 6 mm; 6.8 mm; 7.5 mm; 9 mm; 10.1 mm; 10.5 mm; 12 mm; 13.5 mm	9	10	90

Tabla 168

Desarrollo de tratamientos

N.º	Variable S_i	Tratamiento
1	5.4	(5.4)
2	6	(6)
3	6.8	(6.8)
4	7.5	(7.5)
5	9	(9)
6	10.1	(10.1)
7	10.5	(10.5)
8	12	(12)
9	13.5	(13.5)

Nota. Código de tratamiento: (variable 1)

Procedimiento

- Se toma el calibre analógico, se sitúa la indicación en el valor de variable correspondiente.
- Con el calibre digital se mide la indicación dada por el calibre analógico, se realizan tres mediciones (error de medición)
- Las mediciones se registran en la hoja de cálculo, así mismo, fotográficamente.
- Una vez terminada, se procede con la siguiente prueba según el orden aleatorio.

2.5.4 Resultados

2.5.4.1 Análisis descriptivo de los datos

La Tabla 169, muestra los estadísticos descriptivos de la medición con el calibre digital. Se muestra también el intervalo de confianza de la media con un 95% de confianza. Por otro lado, el estadístico W y el valor p del contraste de normalidad de Shapiro-Wik indican que la mayoría de muestras son normales (p > 0.05).

Tabla 169

Estadísticos descriptivos

Variable, S_i	$\bar{x}$ mm	s, mm	n	Intervalo de confianza			$t_{0.025}$	E	W	Valor p
5.4	5.541	0.021	9	5.524 <	μ	< 5.557	2.306	0.016	0.978	0.952
6.0	6.147	0.023	9	6.130 <	μ	< 6.164	2.306	0.017	0.968	0.881
6.8	6.952	0.018	10	6.939 <	μ	< 6.965	2.262	0.013	0.944	0.603
7.5	7.645	0.013	9	7.635 <	μ	< 7.656	2.306	0.010	0.849	0.073
9.0	9.151	0.017	10	9.139 <	μ	< 9.163	2.262	0.012	0.953	0.705
10.1	10.277	0.019	10	10.264 <	μ	< 10.291	2.262	0.014	0.952	0.695
10.5	10.658	0.015	10	10.647 <	μ	< 10.669	2.262	0.011	0.930	0.450
12.0	12.166	0.030	9	12.143 <	μ	< 12.188	2.306	0.023	0.977	0.948
13.5	13.639	0.013	10	13.630 <	μ	< 13.648	2.262	0.009	0.843	0.048

Nota. $\bar{x}$ media del diámetro interior. Simbología en la Tabla 97.

2.5.4.2 Regresión lineal y modelo matemático

2.5.4.2.a Modelación

El modelo lineal se puede expresar según la Ecuación 80 o 81.

$$Y_1 = -\hat{\alpha} X_1 + \hat{C} \tag{80}$$

$$F_1(\hat{y}_{1i}) = -\hat{\alpha} G_1(x_{1i}) + \hat{C} \tag{81}$$

Donde, $-\hat{\alpha}$, y $\hat{C}$, son los estimadores, llamados coeficientes de mínimos cuadrados. Las funciones F_1 y G_1 son de transformación de variables; en este caso no son necesarias, entonces tenemos la Ecuación 82.

$$\hat{y}_1 = -\hat{\alpha} x_1 + \hat{C} \tag{82}$$

Se detalla más sobre el modelo y su notación en el Anexo 6.4.

Para el experimento actual, haciendo $\hat{y}_1 = S$, $x_1 = S_i$, determinamos los estadísticos y parámetros del modelo lineal, esto se muestra en la Tabla 170.

En la Tabla 170 se muestra dos modelos, en el primero se ha obviado las pruebas inválidas N.º 1, 2 y 3, dado que se realizaron con otro procedimiento. En el segundo modelo no se considera la prueba N°78, que resulta ser un punto influyente del modelo.

Los estadísticos de ambos modelos son buenos, el modelo 2 tiene un mejor error estándar de la regresión ($RMSE$).

El modelo 1, falla en el supuesto de normalidad (p < 0.05). Mientras que el modelo 2 tiene resultados más adecuados.

Se prefiere el modelo 2, el cual cumple los supuestos de la regresión lineal a comparación.

Tabla 170

Resultados del análisis por regresión lineal

Modelo		**Estadísticos**	
Modelo 1:		R^2	: 0.99991
$S = 1.00059\,S_i + 0.14901$ ..... (83)		$R^2 ajust.$	: 0.99991
		$RMSE$	: 0.02483
Verificación de supuestos:		F	: 969829.5
- Homocedasticidad	: BP = 0.59156, df = 1, p-value = 0.4418	gl	: 86
- Independencia	: DW = 1.8255, p-value = 0.2092	n	: 87
- Normalidad	: W = 0.93733, p-value = 0.0003844	Parámetros estimados:	
		$+\ \hat{C}$	= 0.14901
		$-\ \hat{\alpha}$	= 1.00059
Modelo 2: Sin punto influyente N°78.		R^2	: 0.99993
$S = 1.00128\,S_i + 0.14147$ ..... (84)		$R^2 ajust.$	: 0.99993
		$RMSE$	: 0.02172
Verificación de supuestos:		F	: 1.2412×10^6
- Homocedasticidad	: BP = 2.1402, df = 1, p-value = 0.1407	gl	: 84
- Independencia	: DW = 1.5881 , p-value = 0.02664	n	: 86
- Normalidad	: W = 0.98869 , p-value = 0.6648	Parámetros estimados:	
		$+\ \hat{C}$	= 0.14147
		$-\ \hat{\alpha}$	= 1.00128

Nota. Homocedasticidad (Breusch-Pagan Test), Independencia (Durbin-Watson test), Normalidad (Shapiro-Wilk).

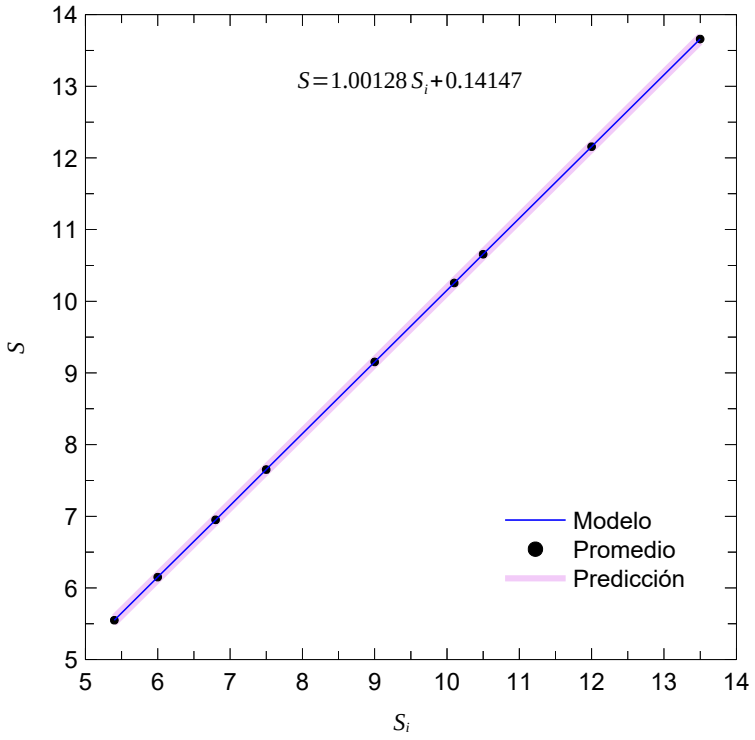
2.5.4.2.b Modelo matemático y predicciones.

En la Figura 117 se grafica el modelo 2: $S = 1.00128\ S_i + 0.14147$ de la Tabla 170, así mismo, los valores promedio de S de la Tabla 169.

La Figura 117 muestra también el intervalo de confianza para la predicción de nuevas observaciones.

Figura 117

Dispersión e intervalo de predicción de nuevas observaciones (modelo 2)



2.5.4.2.c Análisis estadístico del modelo 2

En las Tablas 171, 172, 173 y 174 se resumen de la estadística del procedimiento de regresión lineal del modelo, donde $Y_1 = S$ y $X_1 = S_i$ de la Ecuación 80 o 82.

Tabla 171

Resumen del Modelo - Y_1

Modelo	R	R²	R² Ajustado	RMSE	Durbin-Watson		
					Autocorrelación	Estadístico	p
H_0	0.00000	0.00000	0.00000	2.62526	-0.04771	2.07102	0.74110
H_1	0.99997	0.99993	0.99993	0.02172	0.15422	1.58813	0.05328

Tabla 172

Análisis de varianza de la regresión lineal, ANOVA

Modelo		Suma de Cuadrados	gl	Cuadrado Medio	F	*p*
H_1	Regresión	585.77823	1	585.77823	$1.24120\times10^{+6}$	6.54081×10^{-177}
	Residuo	0.03964	84	0.00047		
	Total	585.81788	85			

Nota. El modelo de la constante se omite, ya que no se puede mostrar información importante.

Tabla 173

Coeficientes de la regresión lineal

Modelo		No tipificado	Error Típico	Tipificado	t	*p*	IC del 95%	
							Inf.	Sup.
H_0	(Const.)	9.18911	0.28309		32.46017	1.13740×10^{-49}	8.62625	9.75196
H_1	(Const.)	0.14147	0.00845		16.73773	1.73713×10^{-28}	0.12466	0.15828
	X1	1.00128	0.00090	0.99997	1114.09253	6.54081×10^{-177}	0.99950	1.00307

Tabla 174

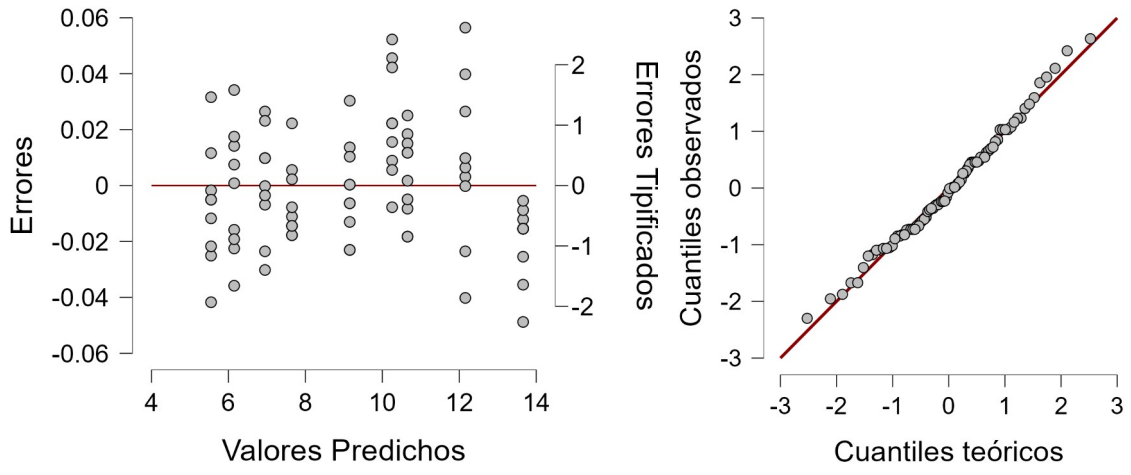
Casos influyentes

Caso	Error Típico	YT	Valor Predicho	Error	Cook's Distance
4	2.63472	12.21333	12.15686	0.05647	0.09508

La Figura 118 muestra gráficos de verificación de supuestos de la regresión lineal.

Figura 118

Verificación de supuestos de la regresión lineal.



Nota. Izquierda: Supuesto de varianza constante. Derecha: Gráfico Q-Q, supuesto de normalidad.

2.5.4.2.d Corrección de la carrera de válvula de impulso promedio.

Aplicamos el modelo seleccionado: $S = 1.00128\ S_i + 0.14147$, a los valores promedio de la carrera de válvula de impulso del experimento de velocidad crítica del Anexo 2.2 y obtenemos los resultados de la Tabla 175.

La primera columna es el código de variable del experimento de velocidad crítica, la tercera columna son los valores corregidos, mientras que la última es la incertidumbre expandida deducida en el experimento de incertidumbres del Anexo 14.1.

Tabla 175

Corrección de la carrera de la válvula de impulso

Variable	S_i, mm	S, mm	$k*u_c(S)$
Hmin1	4.72	4.87	0.14
Hmin2	5.40	5.55	0.12
Hmin3	6.02	6.16	0.12
Hmin4	6.77	6.92	0.12
Hmin5	8.37	8.52	0.14
Hmin6	10.08	10.24	0.14
Hmin7	11.65	11.81	0.14

Nota. S_i carrera medida, S carrera corregida, $k*u_c(S)$ incertidumbre expandida.

2.5.5 Conclusiones

- Se encontró el modelo que corrige las carreras de válvula de impulso medidas con el calibre analógico:

  $S = 1.00128\ S_i + 0.14147$, $R^2_{ajust.}$: 0.99993, $RMSE$: 0.02172
- El modelo satisface los supuestos de normalidad y de homocedasticidad de varianzas. Respecto al supuesto de independencia existe una ligera autocorrelación positiva de errores es decir (DW < 2), lo cual indica una posible dependencia entre observaciones (Ver Tabla 170). Sin embargo, en la prueba bilateral (Tabla 171) se tiene $p > 0.05$, con esto la hipótesis nula de homocedasticidad no se rechaza.
- Se corrigió las carreras medias encontradas en el experimento del Anexo 2.2.

Anexo 3: Procedimiento de determinación del coeficiente de pérdidas locales

Procedimiento de prueba de coeficiente de pérdidas locales en la válvula de impulso, adaptado de Pashkov & Dolqachev (1985)

3.1 Introducción

Las pérdidas de carga hw provocada por una u otras resistencias se calculan según la formula: $hw = k.v^2/(2g)$. En calidad de fórmula de cálculo para determinar k sirve la dependencia $k = hw / [v^2/(2g)]$, donde se sabe que $v = Q/A_S$, y el término $[v^2/(2g)]$ representa la carga de velocidad Ec, entonces $k = h_w / Ec$.

Donde:

k : coeficiente de resistencia local, [,]

v : velocidad media del flujo, m/s

g : aceleración estándar de la gravedad, (9.80665 m/s²)

Q : caudal conducido, m³/s

A_S : sección útil de la tubería de conducción, m²

Ec : carga de velocidad del fluido, m

hw : pérdida de energía local, m

De la ecuación de energía, aplicado antes y después de la resistencia local, tenemos que $E_1 = E_2 + hw$, donde E_i es la suma de las cargas (Ecuación 85)

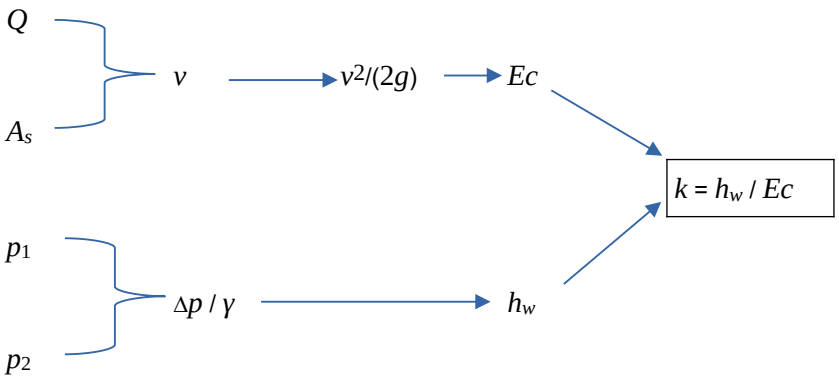
$$E_i = z_i + \frac{v^2}{2g} + \frac{p_i}{\gamma} \tag{85}$$

Tomando los puntos 1 y 2 en el mismo nivel de referencia, tenemos que $z_1 = z_2$, por tanto, $E_1 - E_2 = p_1/\gamma - p_2/\gamma = \Delta p/\gamma$, es decir, $hw = \Delta p/\gamma$.

A continuación, se muestra el esquema de determinación del coeficiente de pérdidas locales:

Figura 119

Esquema de determinación del coeficiente k



3.2 Propósito del experimento

Determinación experimental de los coeficientes de resistencia locales k, para resistencias locales.

3.3 Descripción de la instalación

De manera general las instalaciones experimentales constan de un tubo de ingreso de 1”, tubo de rebose 2”, tubo de impulsión 3/4”, dos piezómetros, un elemento de recolección de agua e instalaciones complementarias.

El sistema funciona gracias a una electrobomba de 1/2 hp, y un sistema de nivel constante por rebose de manera que se obtenga velocidades permanentes por el tubo de ingreso. Son tres niveles de prueba los cuales se controlan con válvulas.

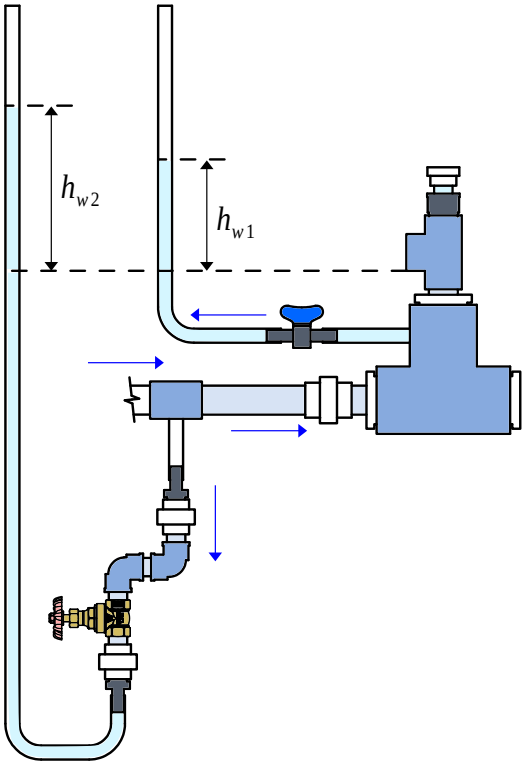
El elemento de recolección consiste en tres codos PVC de 2” y una reducción PVC 4”x2”. La reducción recolecta el agua y el codo final gira en torno a su eje para derivar el caudal hacia un depósito de recolección.

El piezómetro es una manguera transparente de 1/16” adaptada al sistema según cada experimento. Cuenta con una válvula de control y una wincha para medición de altura. Antes del inicio de la prueba se marca el nivel mínimo, base o de referencia del agua (nivel mínimo), a partir del cual se realizará las mediciones. Adicionalmente en primeros experimentos se contaba con una derivación para purga de aire.

En la Figura 120 se observa un esquema del experimento realizado.

Figura 120

Esquema de instalación Experimento 2





3.4 Realización del experimento

3.4.1 Proceso de puesta en marcha.

Encendido del banco de pruebas y acondicionamiento de instrumentos de medición.

- Asegurarse que los accesorios se encuentren bien unidos (unión universal, uniones roscadas, etc.)
- Encender equipo de bombeo.
- Purgar aire en por el dispositivo para purga.
- Abrir válvula de control del piezómetro.

  Asegurar condiciones de caudal, presión, temperatura.
- Ajustar la altura de suministro H al nivel deseado (variable N°1), mediante las válvulas de control correspondientes, H = {1.4 m, 2 m, 3 m}

- Ajustar la carrera de la válvula de impulso S a la longitud deseada (variable N°2) y asegurar que no haya movimiento del eje móvil (obviar en el caso del experimento sin válvula de impulso)
    - S = {4.5 mm, 6.0 mm, 7.5 mm, 9.0 mm, 10.50 mm, 12.0 mm}.
    - Se marcó los seis vértices del perno (eje vertical móvil) numerando del uno al seis. Se toma uno de los vértices aleatoriamente y se ajusta a la carrera requerida. Este ajuste se realiza girando la unión universal de la válvula de impulso. Con la otra mitad de la unión universal se fija para evitar el movimiento del perno.
- Verificar ausencia de pulsaciones de presión, burbujas en el sistema, partículas en suspensión.
    - Las pulsaciones se observan en los piezómetros como movimientos periódicos de arriba hacia abajo del nivel del agua. Para limitar las pulsaciones regular la válvula de control correspondiente hasta conseguir un nivel menos variable.
    - Verificar ausencia de burbujas especialmente en los piezómetros. Esto mediante inspección visual.
- Registro de datos de condiciones iniciales de ensayo. Toma de fotos de cada instrumento de medición y registro en computadora.
    - Tiempo de inicio de prueba en formato “AA/MM/DD hh:mm” en hoja de cálculo.
    - Medición de carrera (S) con calibre en mm
    - Temperatura inicial Ti en °C

3.4.2 Proceso de ensayo

Duración de prueba entre 30 s a 60 s.

Inicio de prueba:

- Aforo de volumen en recipiente y control de tiempo con cronómetro.

Durante la prueba:

- Registro de altura de agua en piezómetro (registros fotográficos)
- Altura de agua en piezómetro aguas arriba Pi en “cm” (según experimento)

3.4.3 Proceso de parada

Finalización simultánea de registro de cronómetro y aforo de caudal.

Registro de datos de condiciones finales de ensayo. Toma de fotos de cada instrumento de medición y registro de datos en computadora:

- Altura de agua en piezómetro aguas arriba Pi en “cm” (según experimento)
- Temperatura final Tf en “°C”
- Masa del volumen de agua m en “Kg”
- Tiempo de ensayo, t1 y t2, (minutos y segundos)

Apagado de banco de pruebas (electrobomba)

3.5 Interpretación de observaciones

Para cada experimento se calculan las pérdidas reales de carga en cada resistencia local para el gasto dado:

$$Q = m / \rho t$$

Donde:

m : Masa del volumen de agua aforado.

ρ : Densidad del agua a la temperatura durante el experimento

t : Duración del experimento.

Basándose en los datos de la tabla se calculan los coeficientes “k” para cada tipo de resistencias locales.

3.6 Información de la construcción física del prototipo

3.6.1 Diámetro interior de tubería de suministro

Se utilizó el diámetro interior indicado por el fabricante según lo descrito en el Anexo 1.3.1.5.

3.6.2 Nivel mínimo

Se toma el nivel mínimo del agua en el piezómetro en estado estático para los tres tipos de válvulas construidas. La medición se realizó con una wincha invertida por lo cual el valor mínimo h_{min} es mayor que los valores tomados del nivel del agua durante las pruebas. En el análisis de datos se resta el este valor mínimo menos el valor registrado de cada piezómetro. La Tabla 176 muestra los valores mínimos obtenidos.

Tabla 176

Nivel mínimo h_{min} del agua en piezómetro

N.º	Fabricante	Nivel minino de referencia, (cm)
1	Inyecto	295.8
2	Tigre	295.1
3	Pavco	294.9

3.7 Tabla de datos

Cada experimento cuenta con su tabla de datos adaptada a las necesidades del experimento. En la Tabla 177 se muestra la descripción de los símbolos y/o abreviaturas utilizadas.

Tabla 177

Leyenda de símbolos utilizados en las tablas de datos.

N.º	Símbolo:	Unidad:	Descripción:	Experimento
1	Ti	°C	Temperatura del agua al inicio de la prueba.	1, 2, 3
2	Tf	°C	Temperatura del agua al final de la prueba.	1, 2, 3
3	t1	min	Tiempo de aforo por el observador 1, parte en minutos.	1, 2, 3
4		s	Tiempo de aforo por el observador 1, parte en segundos.	1, 2, 3
5	t2	min	Tiempo de aforo por el observador 2, parte en minutos.	1, 2, 3
6		s	Tiempo de aforo por el observador 2 parte en segundos.	1, 2, 3
7	M	kg	Masa total medida.	1, 2, 3
8	wi	kg	Masa del recipiente i, utilizado en el aforo.	1
9	wi – i	kg	Masa del recipiente i al inicio. Recipiente de apoyo (mide las pérdidas por goteo)	1
10	wi – f	kg	Masa del recipiente i al final. Recipiente de apoyo (mide las pérdidas por goteo)	1
13	Pi, o Pi – j	Bar o cm	Presión o carga en la posición i, medido en el manómetro y/o piezómetro. Medidas repetidas en j={1 2 3 4 5}	2, 3
14	Pi – max	Bar o cm	Presión o carga máxima en la posición i, medido en el manómetro y/o piezómetro.	1

N.º	Símbolo:	Unidad:	Descripción:	Experimento
15	Pi – min	Bar o cm	Presión o carga mínima en la posición i, medido en el manómetro y/o piezómetro.	1
16	Smin	mm	Medición mínima de la carrera de válvula de impulso.	3
17	Smax	mm	Medición máxima de la carrera de válvula de impulso.	3
18	E	-	Estado de la prueba en base a las observaciones.	1, 2, 3

3.8 Tabla de análisis

La tabla de análisis, al igual que la tabla de datos, corresponde a cada experimento realizado. En la Tabla 178, se observa la leyenda de símbolos utilizado en las tablas de análisis.

Tabla 178

Leyenda de símbolos utilizados en las tablas de análisis

N.º	Símbolo	Unidad	Descripción	Ecuación	Grupo
1	% ΔPi	%	Variación relativa de la presión aguas arriba % ΔPi<= 10%	• ΔP1 = [P(i 1) - P(f 1)] / P(i 1) • ΔP1 = [(Pi – max) - (Pi – min)] / (Pi – min) • ∑Pi – j	Requisitos de ensayo
2	P	Bar	Presión aguas abajo P(i 2) o P(f 2) > 0.3 bar		
3	ΔT°	°C	Variación de temperatura ΔT°<=5 °C	ΔT° = Tf - Ti	
4	% ΔQ	%	Variación relativa de caudal La variación relativa en el caudal durante cada ensayo (sin incluir la puesta en marcha o la parada) no debe exceder: ± 2 5 % de Q1 a Q2 (sin incluir Q2), ± 5 0 % de Q2 (inclusive) a Q4.	ΔQ = [Qf - Qi] / Qi	
5	t	s	Tiempo promedio	t = [t1 – t2]/2	Parámetros base
6	m	kg	Masa del volumen del agua aforado	m = M-∑wi	
7	T	°C	Temperatura media durante la prueba	ΔT°= [Tf + Ti] / 2	
8	ρ	kg/m³	Densidad del agua a la temperatura medida	ρ=F(T°)	
9	Q	l/min	Caudal de prueba	Q=(m/ρ) /t	Aforo y velocidad
10	v	m/s	Velocidad media prueba	v=Q/s	
11	Ec	m	Carga de velocidad	Ec = v²/2g	
12	ΔP / ρg	cm	Carga de presión	ΔP = ([P(f 1) - P(f 2)] + [P(i 1) – P(i 2)])/2	Presión
13	hw	cm	Pérdida de energía	hw = ΔP/ρg + ΔZ, con ΔZ =0	
14	kacc	[ ]	Coeficientes de pérdida de carga	kacc=hw/ Ec	Coeficiente de pérdidas locales
15	S1	mm	Carrera media	S1 = [Smax+Smin]/2	
16	S2	mm	Carrera media corregida	S2 = F(S1)	
17	Pi	Bar o cm	Presión en la posición i		
18	f	[ ]	Factor de fricción de Darcy		
19	O	[ ]	Observaciones		
20	u		Incertidumbres típicas combinadas.	Ver guía GUM.	

Anexo 4: Estimación de la media poblacional μ

Consideraciones previas:

- La muestra de datos es aleatoria
- La desviación estándar poblacional σ es desconocida
- La población está distribuida aproximadamente normal

En esta situación, en la que se desconoce desviación estándar poblacional σ, se puede utilizar la variable aleatoria, T para construir el intervalo de confianza de la media poblacional μ. La variable aleatoria $T=(\bar{X} -\mu)/(s / \sqrt{n})$ tiene una distribución t de student con $n - 1$ grados de libertad. Donde, $\bar{X}$ es la media muestral, μ es la media poblacional, s es la desviación típica o estándar de la muestra, n es el número de observaciones. El intervalo de confianza del $100(1 - \alpha)\%$ para la media poblacional de una muestra aleatoria de tamaño n, media $\bar{x}$ y desviación estándar s es (Walpole et al., 2012):

$$\bar{x} - t_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + t_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} \tag{86}$$

donde $t_{\alpha/2}$ es el valor de t con $v = n - 1$ grados de libertad que deja una área de $\alpha/2$ a la derecha.

De la Ecuación 86, tenemos el término de error E que es el valor del error máximo de estimación, $E = t_{\alpha/2}\, s / \sqrt{n}$, entonces:

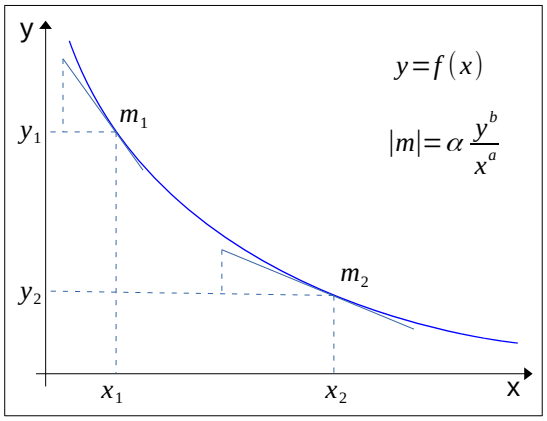
$$\bar{x} - E < \mu < \bar{x} + E \tag{87}$$

Anexo 5: Modelo matemático I

La Figura 121 es una representación del comportamiento de los datos de los diferentes experimentos realizados. Se observa el comportamiento asintótico de la función en el eje x y en el eje y.

Figura 121

Función asintótica y=f(x).



Sea la función $y=f(x)$ y la pendiente $m = dy/dx$, a partir de la Figura 121, se plantean las siguientes hipótesis:

- A menor valor de la variable y, menor es el valor absoluto de pendiente m.
- A mayor valor de la variable x, menor es el valor absoluto de la pendiente m.

Entonces, tenemos la relación de proporcionalidad entre las magnitudes: $|m|$ es directamente proporcional a, y^b y $|m|$ es inversamente proporcional a x^a, donde a y b son exponentes reales positivos, $|m|$ es el valor absoluto de la pendiente $|m| = |dy/dx|$

Podemos planear la Ecuación 88 como una ecuación diferencial ordinaria (EDO):

$$|m|=\alpha \frac{y^b}{x^a} \tag{88}$$

Como, $m < 0$ en el dominio de la función $f(x)$ en la Figura 121, entonces:

$$-\frac{dy}{dx}=\alpha \frac{y^b}{x^a} \tag{89}$$

Resolviendo la EDO por el método de separación de variables:

$$-\int \frac{dy}{y^b} = \alpha \int \frac{dx}{x^a} \tag{90}$$

Resolvemos la Ecuación 90 para diferentes valores de los exponentes a y b, esto se muestra en la Tabla 179. La solución general es una función linealizada de la forma:

$$H(y) = -\alpha\, G(x) + C \tag{91}$$

Mediante el método de regresión lineal, estimamos los coeficientes α y C. En el caso de las exponentes a y b mediante iteraciones se determina los valores que generan un R^2 máximo y/o $RMSE$ mínimo, a estos les denominamos exponentes optimizados.

Tabla 179

Solución de la ecuación diferencial ordinaria del modelo.

N.º	Exponentes		Ecuaciones	Solución general
	b	a		
1	0	0	$-\int dy =, \alpha \int dx$	$y = -\alpha\, x + c$
2	0	1	$-\int dy =, \alpha \int dx / x$	$y = -\alpha\, ln(x) + c$
3	0	a	$-\int dy =, \alpha \int dx / x^a$	$y = -\alpha\, \underline{x^{-a+1}} + c$, , $-a+1$
4	1	0	$-\int dy / y =, \alpha \int dx$	$ln(y) = -\alpha\, x + c$
5	1	1	$-\int dy / y =, \alpha \int dx / x$	$ln(y) = -\alpha\, ln(x) + c$
6	1	a	$-\int dy / y =, \alpha \int dx / x^a$	$ln(y) = -\alpha\, \underline{x^{-a+1}} + c$, $-a+1$
7	b	0	$-\int dy / y^b =, \alpha \int dx$	$\underline{y^{-b+1}} = -\alpha\, x + c$ $-b+1$
8	b	1	$-\int dy / y^b =, \alpha \int dx / x$	$\underline{y^{-b+1}} = -\alpha\, ln(x) + c$ $-b+1$
9	b	a	$-\int dy / y^b =, \alpha \int dx / x^a$	$\underline{y^{-b+1}} = -\alpha\, \underline{x^{-a+1}} + c$ $-b+1$, , $-a+1$

Anexo 6: Modelo matemático II

6.1 Solución de la ecuación diferencial parcial

En el Anexo 5, a partir del comportamiento asintótico en los ejes y y x, se dedujo la Ecuación Diferencial Ordinaria (EDO) Ecuación 89.

Para el caso de dos variables x_1 y x_2 tendríamos las ecuaciones diferenciales parciales (EDP) de la Ecuación 92.

$$-\frac{\partial y}{\partial x_1}=\alpha\frac{y^b}{x_1^a}\ -\frac{\partial y}{\partial x_2}=\beta\frac{y^d}{x_2^c} \tag{92}$$

Donde:

- $-\partial y/\partial x_i$: derivada parcial respecto a x_i.
- α, β : son los coeficientes de proporcionalidad
- a, b, c y d : exponentes reales positivos de las variables

Resolviendo las dos EDPs por el método de separación de variables tenemos la Ecuación 93.

$$-\int\frac{\partial y}{y^b}=\alpha\int\frac{\partial x_1}{x_1^a},\ -\int\frac{\partial y}{y^d}=\alpha\int\frac{\partial x_2}{x_2^c} \tag{93}$$

Los exponentes a, b, c y d pueden tomar diferentes valores, con los cuales se obtienen diferentes soluciones a las EDPs. Dos formas generales de solución se expresan cuando los exponentes se igualan a uno o a otro valor real cualesquiera. Entonces las soluciones generales se pueden escribir como se indica en la Tabla 180.

Tabla 180

Soluciones de ecuaciones diferenciales parciales.

N.º	b	a	Solución general EDP 1	Solución general EDP 2
1	1	1	$ln(y) = -\alpha\ ln(x_1) + C_1$	$ln(y) = -\beta\ ln(x_2) + C_2$
2	1	a	$ln(y) = -\alpha\ \frac{x_1^{-a+1}}{-a+1} + C_1$	$ln(y) = -\beta\ \frac{x_2^{-c+1}}{-c+1} + C_2$
3	b	1	$\frac{y^{-b+1}}{-b+1} = -\alpha\ ln(x_1) + C_1$	$\frac{y^{-d+1}}{-d+1} = -\beta\ ln(x_2) + C_2$
4	b	a	$\frac{y^{-b+1}}{-b+1} = -\alpha\ \frac{x_1^{-a+1}}{-a+1} + C_1$	$\frac{y^{-d+1}}{-d+1} = -\beta\ \frac{x_2^{-c+1}}{-c+1} + C_2$

Por tanto la solución global de las ecuaciones diferenciales parciales es una función de la forma, $F(y) = G(x_1, x_2)$

A manera de simplificar las soluciones y evitar modelos complejos, realizamos combinaciones de las soluciones parciales mediante adición y/o multiplicación de las soluciones parciales y tenemos la solución general de la Ecuación 94.

$$F(y) = -\alpha\, G_1(x_1) - \beta\, G_2(x_2) + C \tag{94}$$

Combinando adecuadamente las soluciones parciales y evitando exponentes en la variable y, obtenemos ocho combinaciones como se muestra en la Tabla 181:

Tabla 181

Solución general de la ecuación diferencial parcial para $F(y)$.

N.º	Solución general
1	$ln(y) = -\alpha\, ln(x_1) - \beta\, ln(x_2) + C$
2	$ln(y) = -\alpha\, ln(x_1) - \beta \frac{x_2^{-c+1}}{-c+1} + C$
3	$ln(y) = -\alpha \frac{x_1^{-a+1}}{-a+1} - \beta\, ln(x_2) + C$
4	$ln(y) = -\alpha \frac{x_1^{-a+1}}{-a+1} - \beta \frac{x_2^{-c+1}}{-c+1} + C$
5	$y = -\alpha\, ln(x_1) - \beta\, ln(x_2) + C$
6	$y = -\alpha\, ln(x_1) - \beta \frac{x_2^{-c+1}}{-c+1} + C$
7	$y = -\alpha \frac{x_1^{-a+1}}{-a+1} - \beta\, ln(x_2) + C$
8	$y = -\alpha \frac{x_1^{-a+1}}{-a+1} - \beta \frac{x_2^{-c+1}}{-c+1} + C$

6.2 Modelo estadístico linealizado

Finalmente, a partir de la Ecuación 94, el modelo estadístico linealizado esta dado por la Ecuación 95:

$$F(y) = -\alpha\, G_1(x_1) - \beta\, G_2(x_2) + C, + \epsilon \tag{95}$$

Donde: ϵ es el error aleatorio aditivo; $-\alpha$, $-\beta$ y C son coeficientes estimados por el método de regresión lineal. Por otra parte, mediante iteraciones podemos encontrar los valores de los exponentes a y c que optimicen los estadísticos de la regresión (R^2, $RMSE$)

6.3 Selección *de modelos matemáticos*

Dado que se tienen varios modelos posibles, la selección consiste en verificar la recta de mínimos cuadrados que cumplan los criterios de un adecuado coeficiente $R^2 ajustado$, $RMSE$, funciones de selección de variables ($PRESS$, $R^2\ pred$, $logLik$ y AIC), y finalmente el cumplimiento de los supuestos de normalidad, varianza constante e independencia.

- **Coeficiente de determinación**, R^2: Es una medida de la proporción de la variabilidad explicada por el modelo ajustado (Walpole et al., 2012). R^2 no mide lo apropiado del modelo, ya que puede inflarse en forma artificial añadiendo términos polinomios de orden más alto (Hines & Montgomery, 1993)
- **Raíz del error cuadrático medio**, $RMSE$: El error cuadrático medio (MSE) da una estimación de la variación del experimento (Mendenhall et al., 2010), es un estimador insesgado de la varianza σ^2 del error (Navidi, 2006). La raíz de este valor mide la desviación estándar de los residuales. Mide el error residual, la variación no explicada o “sobrante” del experimento (Mendenhall et al., 2010)
- **Coeficiente de determinación ajustado**, $R^2 ajustado$: Es una variación del coeficiente de determinación R^2. Resulta de dividir por los grados de libertad respectivos. A medida que se agregan más variables al modelo, $R^2\ ajustado$ disminuye ya que se reduce los grados de libertad (Walpole et al., 2012).
- **Funciones de selección de variables** ($PRESS$, $R^2\ pred$, $logLik$ y AIC).

  El estadístico $PRESS$, es una medida de lo BIEN que el modelo logra predecir y para nuevas observaciones. El R^2 de predicción, es una medida del porcentaje de la variabilidad explicada por el modelo para nuevas observaciones (Hernández & Mazo, s/f)

El criterio de información de Akaike (AIC) compara la calidad de un grupo de modelos estadísticos entre sí. El AIC clasifica los modelos de mejor a peor (Benites, 2021). $AIC = -2\times logLik + k\times npar$, donde $logLik$, corresponde al valor de log-verosimilitud del modelo. Se debe recordar siempre que, el mejor modelo el que $logLik \uparrow$ y, $AIC \downarrow$ (Hernández & Mazo, s/f)

- **Cumplimiento de los supuestos respecto a los errores** ϵ_i: Los resultados de un análisis de regresión son válidos sólo cuando los datos satisfacen las suposiciones de regresión necesarias (Mendenhall et al., 2010). De hecho, suponemos que las ϵ_i son variables aleatorias independientes N(0, σ) (Walpole et al., 2012). En la situación más simple se satisfacen los siguientes supuestos (Navidi, 2006):
  - Los errores $\epsilon_1, \ldots, \epsilon_n$ son aleatorios e independientes. En particular, la magnitud de cualquier error ϵ_i no influye en el valor del siguiente error ϵ_{i+1}.
  - Los errores $\epsilon_{1,\ldots,}\epsilon_n$ tienen media 0.
  - Los errores $\epsilon_{1,\ldots,}\epsilon_n$ tienen la misma varianza, que se denota por medio de $\sigma 2$.
  - Los errores $\epsilon_{1,\ldots,}\epsilon_n$ están distribuidos normalmente.

  La verificación de supuestos se suele realizar con el análisis residual $e_i = y_i - \hat{y}_i$, dado que ϵ_i no se observan. Los residuales, corresponden al error en el ajuste de la recta de regresión, por lo que sirven para imitar a las ϵ_i. (Walpole et al., 2012). El análisis consiste en realizar gráficas residuales, de residuos vs predictores y de probabilidad normal.

6.4 Notación del modelo estadístico

La solución de las ecuaciones diferenciales parciales depende de los valores que tomen los exponentes. Utilizando el método de separación de variables para cada caso, nos genera funciones que transforman las variables y, x_1 y x_2. Como una de las soluciones generales podemos plantear la siguiente función:

$$F_1(y_{1ij}) = -\alpha\, G_1(x_{1i}) - \beta\, G_2(x_{2j}) + C + \epsilon_{ij}, \text{ con } \epsilon_{ij} \sim N(0, \sigma^2) \quad (96)$$

Donde:

- y_{1ij}, la variable respuesta
- x_{1i}, primer factor
- x_{2j}, segundo factor
- $-\alpha$, $-\beta$ y C, parámetros del modelo
- $\epsilon_{ij} \sim N(0, \sigma^2)$, error aleatorio del modelo con media 0 y varianza σ^2.
- F_1, G_1 y G_2, funciones de transformación de variables.

Abreviando

$$Y_{1ij} = -\alpha X_{1i} - \beta X_{2j} + C + \epsilon_{ij}, \text{ con } \epsilon_{ij} \sim N(0, \sigma^2) \quad (97)$$

Con los datos recolectados, estimamos los parámetros $-\alpha$, $-\beta$ y C y obtenemos las Ecuación 98 o 99, que es la recta de mínimos cuadrados.

$$\hat{Y}_{1ij} = -\hat{\alpha} X_{1i} - \hat{\beta} X_{2j} + \hat{C} \quad (98)$$

$$F_1(\hat{y}_{1ij}) = -\hat{\alpha} G_1(x_{1i}) - \hat{\beta} G_2(x_{2j}) + \hat{C} \quad (99)$$

Donde:

- $-\hat{\alpha}$, $-\hat{\beta}$ y $\hat{C}$, son los estimadores de $-\alpha$, $-\beta$ y C, también llamados coeficientes de mínimos cuadrados.
- $\hat{y}$ es la respuesta estimada, con $\hat{Y}$ como respuesta estimada transformada.

Podemos expresar el modelo de diferentes formas:

- $Y_1 \sim X_1 + X_2$ Modelo en formato del software R
- $\hat{Y}_{1ij} = -\hat{\alpha} X_{1i} - \hat{\beta} X_{2j} + \hat{C}$ Modelo linealizado simple
- $F_1(\hat{y}_{1ij}) = -\hat{\alpha} G_1(x_{1i}) - \hat{\beta} G_2(x_{2j}) + \hat{C}$ Modelo linealizado
- $\frac{\hat{y}_{1ij}^{-b+1}}{-b+1} = -\hat{\alpha} \frac{x_{1i}^{-a+1}}{-a+1} - \hat{\beta} \frac{x_{2j}^{-c+1}}{-c+1} + \hat{C}$ Modelo expandido
- $\hat{y}_1 = G(x_{1i}\, x_{2j})$ Modelo resumido

6.4.1 Predicción de un valor promedio o particular

A partir del modelo ajustado, podemos realizar dos tipos de predicciones, del valor promedio (o respuesta media) y de nuevas observaciones (o valor particular). La predicción puede ser puntual o mediante un intervalo de confianza.

La predicción de la respuesta media está referida al error que comete el modelo respecto a la recta de medias, es decir, a la recta que ajusta a la población total (el modelo ideal). Mientras que la predicción de nuevas observaciones está referida al error que comete el modelo respecto a un valor particular (Mendenhall et al., 2010).

Las expresiones para encontrar los intervalos de confianza, para el caso de regresión lineal simple, se muestran en la Ecuación 100 y Ecuación 101. El primero corresponde al intervalo de confianza de la predicción del valor promedio y el segundo el intervalo de confianza de la predicción del valor particular:

$$\hat{y}_0 \pm t_{\alpha/2}\sqrt{MSE\left(\frac{1}{n}+\frac{(x_0-\bar{x})^2}{S_{XX}}\right)} \tag{100}$$

$$\hat{y}_0 \pm t_{\alpha/2}\sqrt{MSE\left(1+\frac{1}{n}+\frac{(x_0-\bar{x})^2}{S_{XX}}\right)} \tag{101}$$

Donde:

- $\hat{y}_0$: Valor estimado de y cuando $x = x_0$
- x_0 : Valor del factor x, para el que se determina el intervalo de confianza
- $\bar{x}$: Promedio global de los valores de x
- n : Número de observaciones
- S_{xx} : Suma de cuadrados de los valores x, $S_{XX}=\sum(x_{10} - \bar{x})^2$
- MSE : Media cuadrática del error
- $t_{\alpha/2}$: es el valor de t con $(n - 2)$ grados de libertad y área $\alpha/2$ a su derecha

Los intervalos de predicción son determinados con ayuda de software estadístico, para la regresión lineal simple y/o múltiple.

Anexo 7: Método de estimación de la velocidad crítica

7.1 Teoría

La definición de velocidad crítica y coeficiente de arrastre se puede observar en el Capítulo 2.1.2.2.2.2, del marco teórico, ahí se dedujo la Ecuación 102 de la velocidad v_1 en el inicio de cierre de la válvula de impulso.

$$v_1 = \sqrt{\frac{W}{\rho_{H2O} \times K_d \times A_{disc}}} \tag{102}$$

También se observó que la velocidad crítica v_c es ligeramente mayor a v_1, además el coeficiente de arrastre K_d puede representarse como una función de la carrera S y del diámetro del disco de la válvula de impulso D_{disc}, $K_d = f(S , D_{disc})$.

Un método de aproximación de la velocidad crítica v_c es mencionado por Tacke (1988). El método consiste en determinar la altura de suministro mínima que genera un golpe inminente en la válvula de impulso.

"Si se conoce el coeficiente de pérdidas locales se puede obtener una estimación de v_c estableciendo una altura de suministro mínima H_{min} necesaria para el cierre de la válvula de impulso" (Tacke, 1988, p.72)

$$v_c \geq \sqrt{\frac{2gH_{min}}{k_{sist}}} \tag{103}$$

Donde:

- g : Aceleración de la gravedad estándar.
- H_{min} : Altura de suministro mínima.
- k_{sist} : Coeficiente de pérdidas de carga del sistema.

Este método establece que $v_c \geq v_0$, donde v_0 representa la velocidad en la condición estática para H_{min}, con $v_0 = \sqrt{(2gH_{min})/(k_{sist})}$. Por tanto, en estas condiciones, la velocidad estática v_0 es una aproximación de la velocidad crítica v_c.

De no tenerse el coeficiente de pérdidas de carga del sistema k_{sist}, es necesario realizar pruebas experimentales para obtener la velocidad estática v_0, el coeficiente de arrastre K_d y el coeficiente de pérdidas de carga k_{sist}.

- En el Anexo 2.1 se desarrolla el experimento para determinar el coeficiente de pérdidas locales de la válvula de impulso k_{valv}.
- En el Anexo 2.2 se desarrolla el experimento para determinar el coeficiente de arrastre de la válvula de impulso K_d.

En la práctica, es difícil establecer el momento de cierre de la válvula de impulso, por lo que utilizamos el momento de inicio de cierre de válvula, cuando la fuerza de arrastre se iguala al peso de válvula de impulso. En este punto, lo que se estima es la velocidad v_1, que es la velocidad en el inicio de movimiento de la válvula de impulso, por tanto:

$$v_1 = v_0 = \sqrt{\frac{2gH_{min}}{k_{sist}}} \tag{104}$$

Dada una bomba de ariete universal y su válvula de impulso, cada carrera S tendrá una altura de suministro mínima H_{min} (experimental) donde el golpe de ariete es inminente, en este punto se puede aproximar en valor de la velocidad crítica v_c, a partir de la velocidad de inicio de cierre de la válvula de impulso v_1.

Una variación del método consiste en fijar primero la altura de suministro mínima H_{min} e ir disminuyendo la carrera hasta encontrar la respectiva carrera S, donde el golpe de ariete es inminente. Con esta modificación, se puede obtener el valor experimental de la velocidad v_1 , asociada a la carrera S (Figura 122)

7.2 Procedimiento

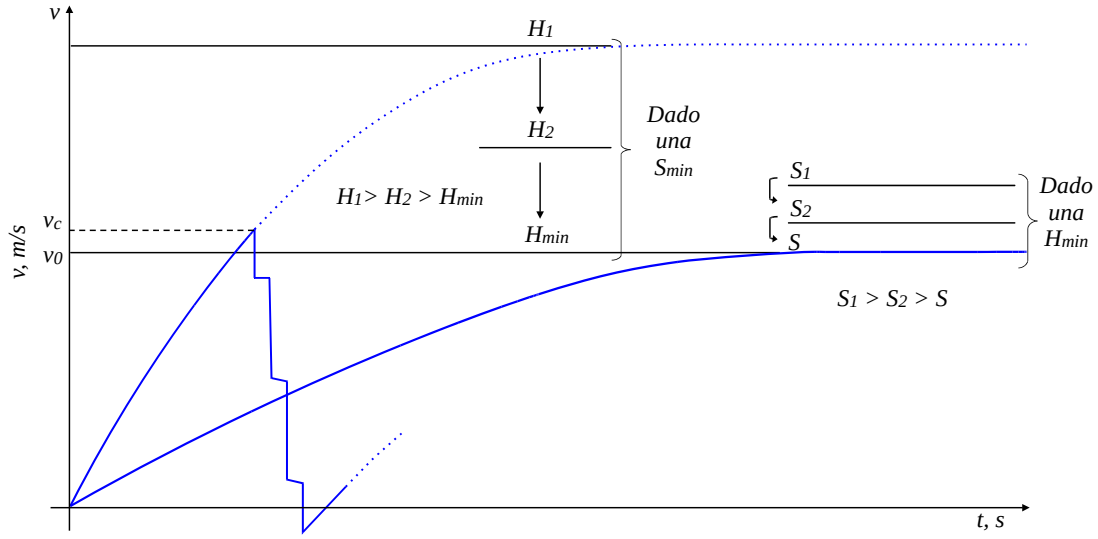
Un procedimiento sencillo para el segundo caso es el siguiente:

- Se inicia con alturas de suministro H que van desde los 0.80 cm en adelante. Fijamos la primera altura a trabajar H_{min1}.
- Mantener la carrera S_1 en una posición de flujo estático (S_x > 13 mm)

- Se disminuye S_1 girando el niple de la válvula de impulso hasta un punto de golpe de ariete inminente (no llega a darse el golpe)
- En esta posición, medir y registrar la carrera S en dos posiciones alrededor del eje vertical (de mayor y menor longitud).
    - Iniciar el aforo del caudal en recipientes previamente pesados.
    - Iniciar los cronómetros (dos mediciones) en forma simultánea al aforo.
    - Medir la altura del agua en el piezómetro 1 (tanque de suministro)
    - Medir la temperatura inicial de la prueba.
    - Finalizar la prueba deteniendo el aforo y los cronómetros.
    - Medir la masa de los recipientes con agua.
    - Registrar el tiempo de ambos cronómetros.
    - Registrar la temperatura final.
- Finalizar y continuar la siguiente prueba.

Figura 122

Método de aproximación de la velocidad crítica.



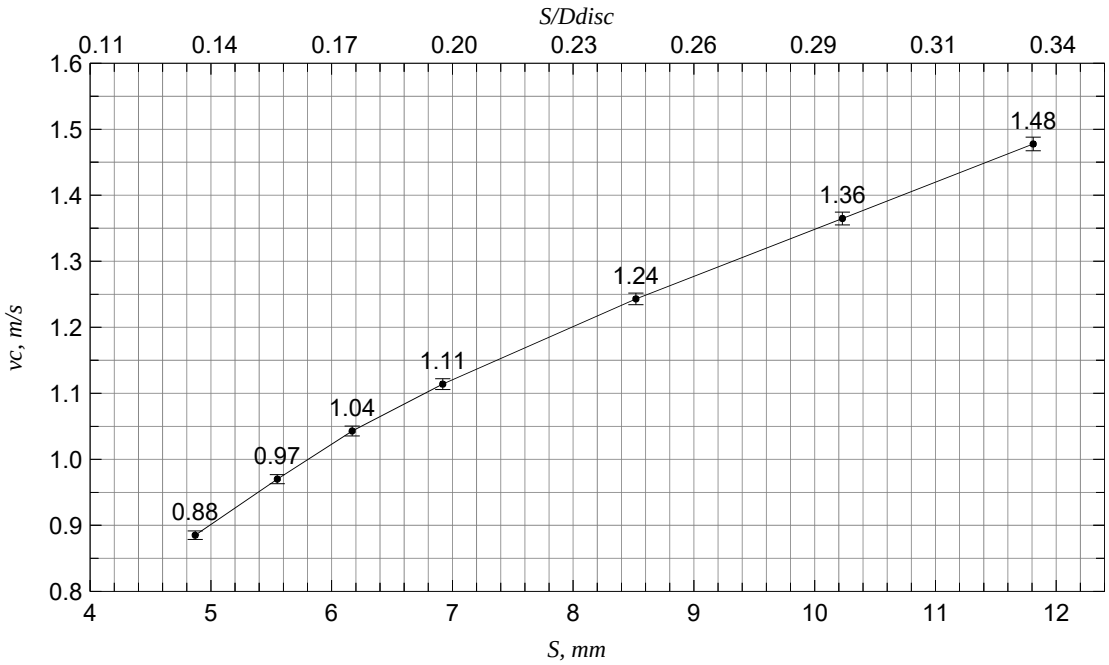
Nota. Adaptado de Tacke (1988)

En la Figura 123 se muestra los valores experimentales de la velocidad crítica v_c en función de la carrera de la válvula de impulso S.

Los datos de velocidad son en realidad la velocidad v_1 estimada según la Ecuación 104 para la altura de suministro mínima prefijada H_{min} en cada caso.

Figura 123

Velocidad crítica aproximada v_c en función de la carrera S.



Anexo 8: Estudio de la altura de descarga

Mediante el presente, se pretende analizar las condiciones que presenta la altura de descarga, la manera en que se relaciona con otras variables de la bomba de ariete y su influencia en la producción del caudal de descarga y en el caudal de funcionamiento.

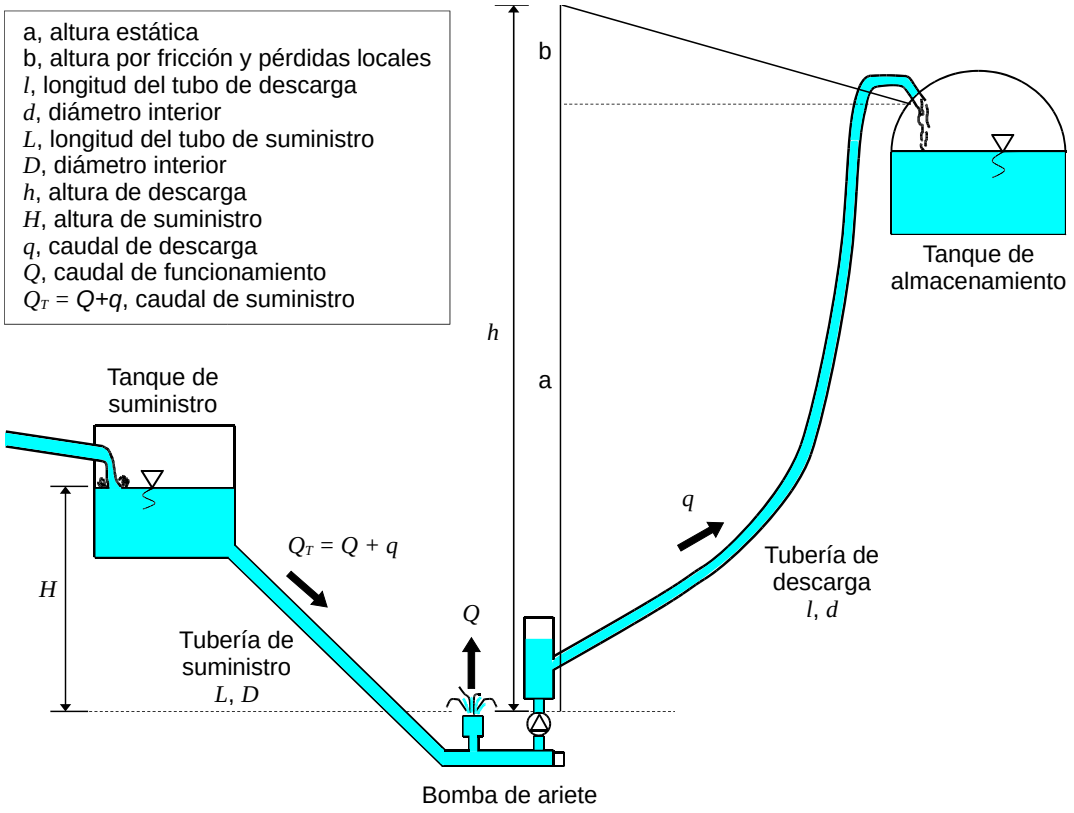
El presente capítulo analiza las condiciones hidráulicas en la tubería de descarga, a partir de la definición de la altura de descarga.

8.1 Definición de la altura de descarga

Según lo definido en el marco teórico, es la altura desde el nivel de la válvula de impulso, hasta el nivel de descarga del agua. Sin embargo, en la Figura 124, se observa que adicionalmente se tiene una altura b.

Figura 124

Esquema de bomba de ariete y altura de descarga ampliada.



En general las instalaciones tienen una distancia l de tubería desde la bomba de ariete hasta el tanque de almacenamiento, por lo que, existentes pérdidas de energía.

Por tanto, podemos ampliar la definición de altura de descarga incluyendo los términos de pérdidas por fricción y pérdidas locales.

De la Figura 124 planteamos la expresión h = a + b, para las alturas piezométricas, entonces tenemos la Ecuación 105:

$$h = \mathrm{a} + \left(k + f\frac{l}{d}\frac{v_1^2}{2g}\right) \tag{105}$$

Donde,

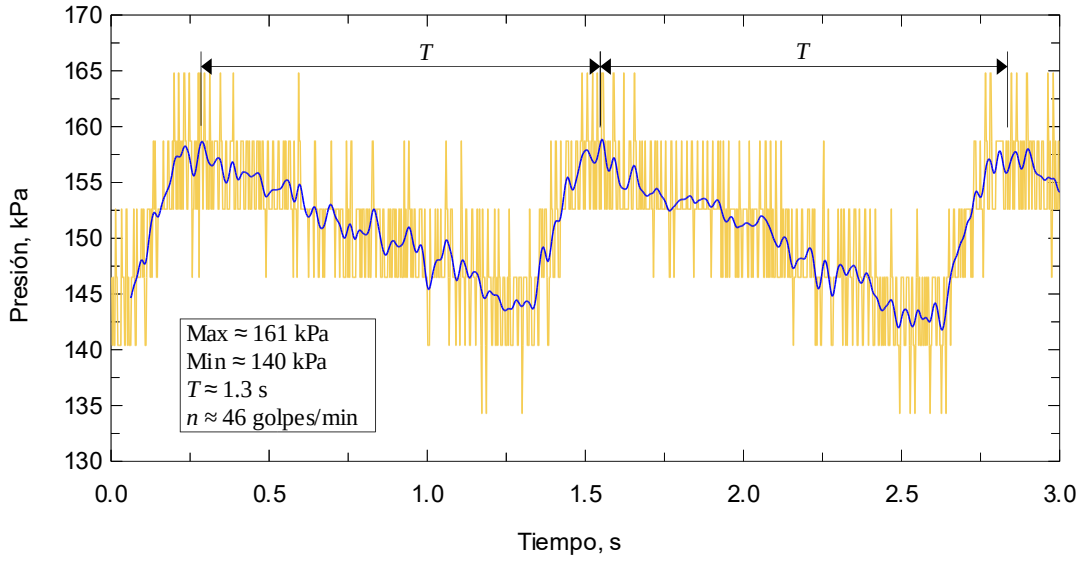
- f, es el factor de fricción de Darcy.
- v_1, es la velocidad media a través del tubo de descarga.

8.2 Comportamiento oscilante de la presión

La presión es oscilante en el tubo de descarga, es decir, llega a un valor máximo como consecuencia del golpe de ariete y luego desciende hasta el siguiente golpe. En la Figura 125 se aprecia los límites máximos y mínimos de presión, a la salida de la cámara de aire. La línea oscura representa los valores promedios que suavizan la curva.

Figura 125

Presión a la salida de la cámara de aire para L/D = 400, H = 3 m.

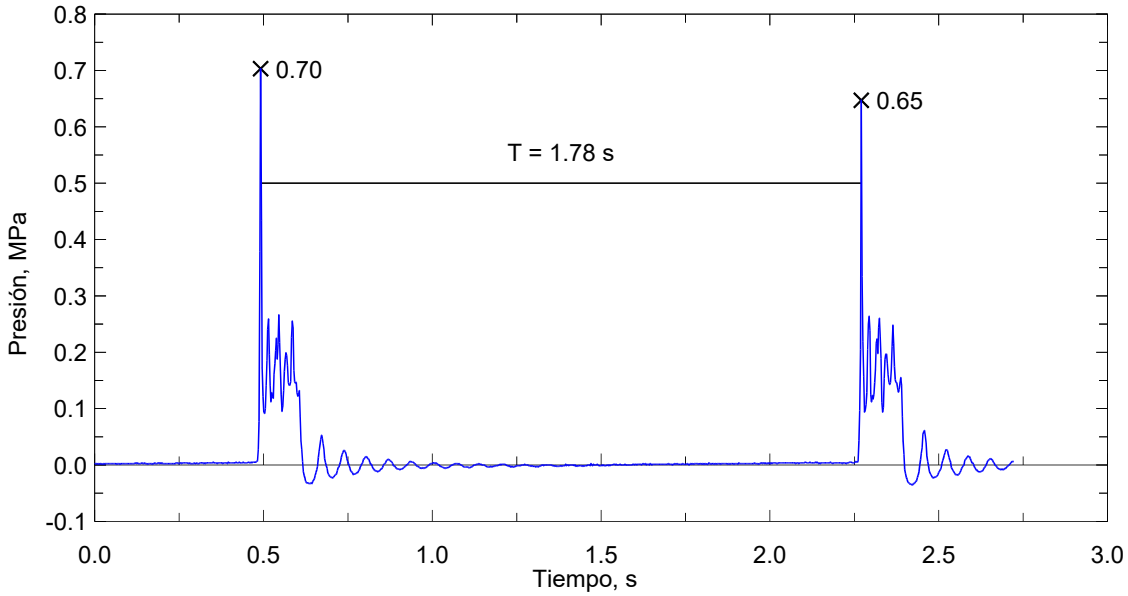


Nota. Mediciones con sensor HK3025 5.0 MPa, ±1% FSO.

En el caso del tubo de suministro el comportamiento también es oscilante como se muestran en la Figura 126.

Figura 126

Presión en el extremo inferior del tubo de suministro L/D = 400, H = 1.4 m.



Nota. Mediciones con sensor SEN0257 1.6 MPa, ±0.5% FS.

8.3 Altura de descarga máxima.

La altura de descarga máxima h_{max} se da cuando el caudal de descarga es nulo, es decir, no hay flujo en el tubo de descarga.

Operativamente, esto se consigue cerrando la válvula de control del tubo de descarga (a la salida de la bomba de ariete). Aquí la presión se acumula en la cámara de aire hasta llegar a las condiciones de presión máxima y altura de descarga máxima, esto, para el tipo de instalación realizada.

Tacke (1988) deduce el valor máximo teórico de la altura de descarga, partiendo de las ecuaciones de continuidad y de movimiento. Llega a la ecuación infinitesimal 106:

$$\Delta h = \pm \frac{c}{g} \times \Delta v \qquad (106)$$

Donde, c es la velocidad de onda de presión y g la aceleración de la gravedad estándar.

La Ecuación 106 representa el cambio brusco del caudal (Δv) relacionado con el cambio brusco de la altura (Δh) y viceversa. El cambio máximo de velocidad que puede desarrollarse en la bomba de ariete es el de la velocidad crítica v_c (Tacke, 1988), entonces se tiene la Ecuación 107:

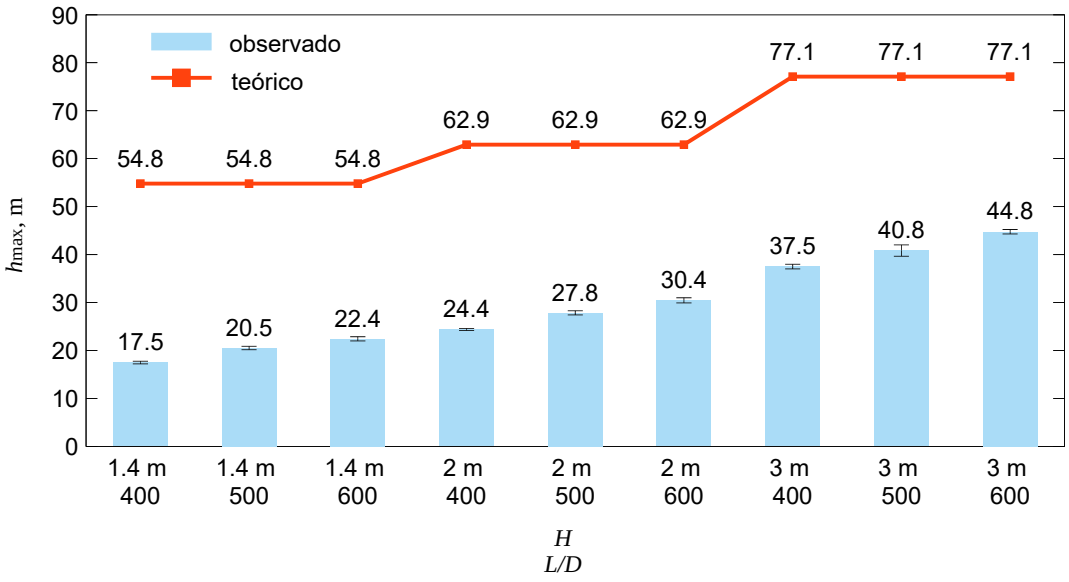
$$h_{max} = \pm \frac{c}{g} \times v_c \tag{107}$$

Donde h_{max}, es la altura de descarga máxima.

En la Tabla 101 del Anexo 1.3.1.4, se muestra estadísticas de altura de descarga máxima h_{max} del experimento principal; estos datos se grafican en la Figura 127.

Figura 127

Altura máxima observada y teórica.



En la Figura 127, los valores teóricos son mayores a los encontrados experimentalmente. Según Tacke (1988), el fuerte retroceso de la velocidad (v_r = -v_c) puede provocar la aspiración de aire al interior de la válvula de impulso. Najm et al. (1999) indican que esta diferencia indica que válvula de descarga se ha abierto antes de que se cerrara completamente la válvula de impulso, por lo que parte del aumento de presión se alivia a través de la apertura de la válvula de descarga, lo que disminuye la fuerza del golpe de ariete.

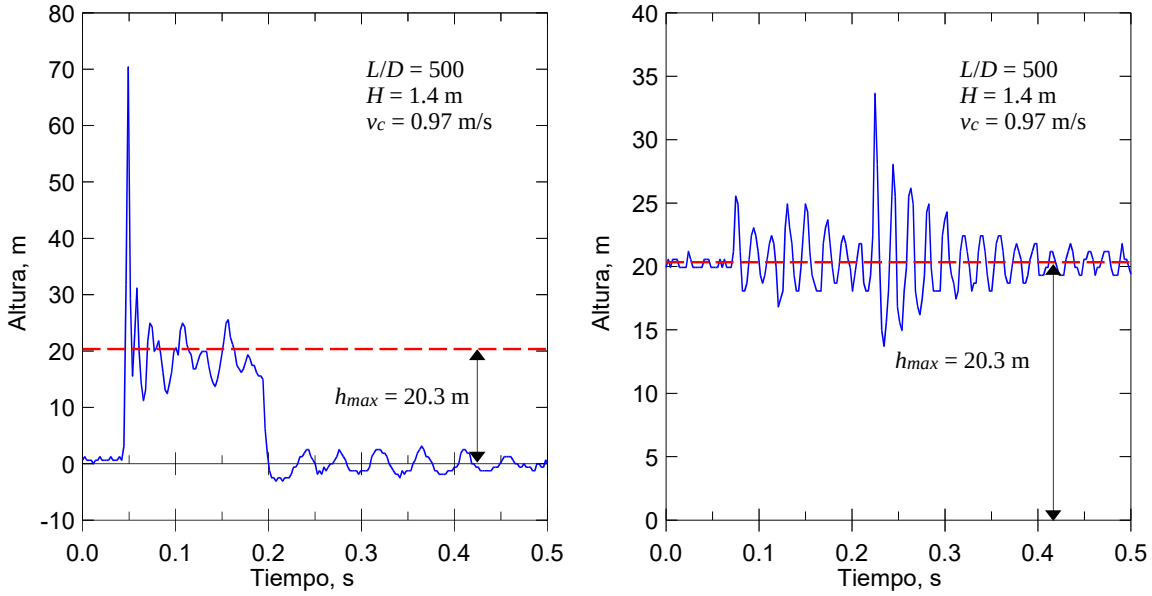
8.4 Pulso de presión y altura de descarga máxima

En la Figura 128 se muestra dos pulsos de presión medidos en la condición de altura máxima (q = 0).

El primero (izquierda) es medido en el extremo inferior del tubo de suministro y el segundo (derecha) a la salida de la cámara de aire.

Figura 128

Pulso de presión y altura de descarga máxima h_{max}.



Nota. Se ha graficado en unidades de energía "m", considerando una temperatura media de 15 °C.

El valor de la altura de descarga se representa con una línea horizontal segmentada. Este valor es el que se observa en el manómetro instalado.

Las mediciones del sensor, en ambos pulsos, muestran variabilidad de la presión en torno a este valor h_{max}.

La altura de descarga máxima de 20.3 m, puede compararse con el de la Figura 127, donde se tiene una altura de descarga máxima promedio de 20.5 m, para las mismas condiciones.

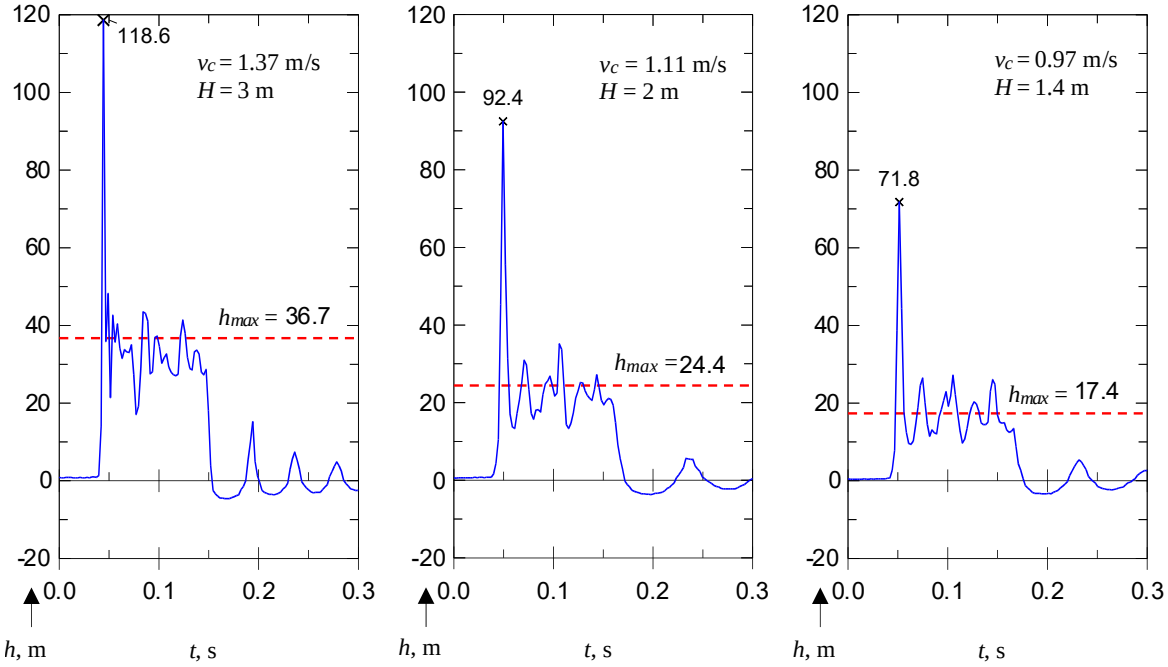
En la Figura 129 se analiza tres pulsos de presión para tres valores de la altura de suministro H. Estos pulsos se miden en el extremo inferior del tubo de suministro.

Se puede observar una presión pico que indica el punto de máxima presión por el golpe de ariete, luego una zona intermedia que representa a la presión sostenida, esto, como resultado de la continua disminución de la velocidad según $\Delta h = \pm (c/g)\Delta v$.

Al finalizar la zona intermedia, se observa un descenso drástico de la presión como consecuencia del agotamiento de la velocidad y un periodo de presión negativa (periodo de retroceso) que promueve la succión y apertura de la válvula de impulso[1], reiniciándose así el ciclo de operación de la bomba de ariete.

Figura 129

Pulso de presión para L/D = 400 y H = {1.4, 2, 3}



Nota. Presión en el extremo inferior del tubo de suministro con el sensor SEN0257 1.6 MPa, ±0.5% FS.

La altura máxima h_{max} indicada con la línea horizontal segmentada, se determinó a partir de la lectura manométrica de la presión en la respectiva prueba.

1 A la vez el sentido del flujo se invierte, es decir, la velocidad de retroceso es igual a - v_c (Tacke, 1988)

Las mediciones de pulsos de presión, como los de la Figura 129, se realizó complementariamente a la del experimento del Anexo 2.3.3, las mediciones culminaron hasta la altura de H = 3 m, donde el sensor falló.

Posteriormente se realizaron mediciones complementarias con un sensor de mayor capacidad, encontrándose valores pico de presión como los indicados en la Tabla 182.

Los valores mostrados en la Tabla 182, se encontraron en mediciones con sensor en un lapso de 30 segundos, con un tiempo de respuesta de 2.34 ms.

Las mediciones son puntuales por tanto son sólo referenciales, sin embargo, nos dan una idea de los picos de presión y las alturas máxima que se pueden encontrarse.

A la luz de estos resultados, a partir de H = 3 m, se encontraron presiones pico por encima de 1 MPa (10 Bar), así mismo las alturas máximas alcanzan hasta 40 m (4 Bar), lo cual sugiere que las tuberías y accesorios PVC pueden verse afectados luego de exposición prolongada a las pulsaciones de presión (fatiga)

Es recomendable estudiar estos factores de modo que se limite la altura de suministro H máxima a la que es factible trabajar.

Tabla 182

Valores de pico de presión P_P y alturas de descarga máxima h_{max}.

H, m	v_c. m/s	L/D	P_P. MPa	h_{max}. m
1.4	0.970	400	0.56	17.6
		500	0.69	20.3
		600	0.37	22.1
2	1.114	400	0.90	24.0
		500	0.96	25.7
		600	0.85	28.6
3	1.365	400	1.18	33.8
		500	1.46	41.7
		600	0.87	44.5

Nota. Medición con sensor HK3025 5.0 MPa, ±1% FSO.

8.5 Pulso de presión y variables dependientes

En la Figura 130 se esquematiza el comportamiento de la velocidad en el extremo inferior del tubo de suministro en relación con el pulso de presión.

El pulso de presión se divide en tramos según la ida y vuelta de la onda de presión a través de la tubería de suministro. Tacke (1988) realiza un análisis exhaustivo de este comportamiento.

Como se observa, la velocidad es siempre menor a la velocidad estática v_0, es decir, no se llega a la condición estática, dado que, la fuerza de arrastre hidráulico cierra la válvula de impulso antes.

La velocidad máxima alcanzada es la velocidad crítica v_c. Se ha definido también el concepto de ratio de velocidades como $r = v_c/v_0$ (ver Anexo 1.2.4).

El área bajo la curva representa el caudal. Hasta la velocidad crítica todo es caudal de desperdicio Q_1, luego en la zona de desaceleración de velocidad se tiene el caudal de bombeo q.

Finalmente, un pequeño caudal Q_2 de desperdicio en la zona de retroceso de velocidad. El caudal de funcionamiento Q es igual a $Q_1 + Q_2$.

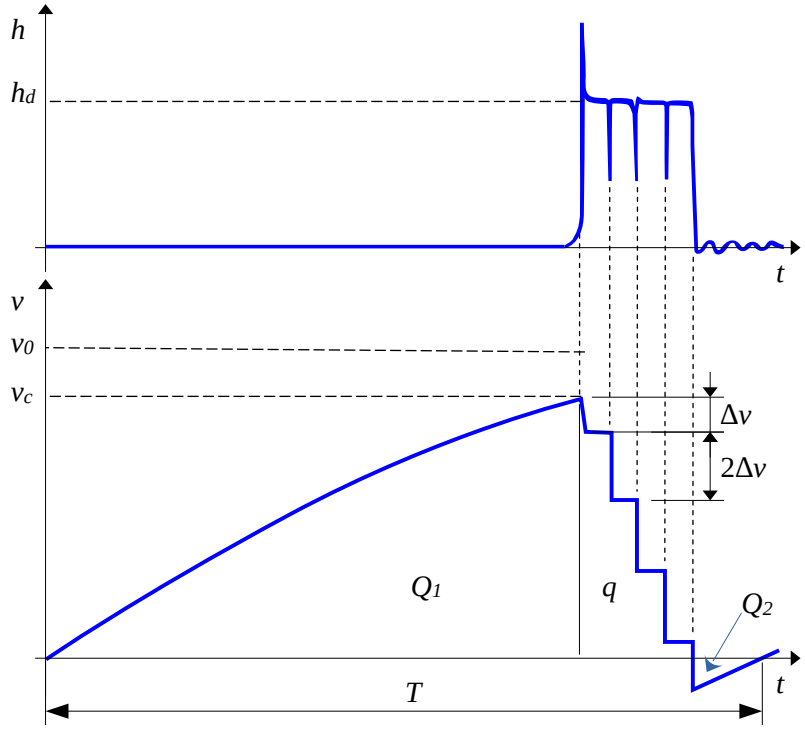
De la Ecuación 106, para una altura de descarga h_d, se tiene una caída de velocidad $\Delta v = - (g / c) \times h_d$.

Entonces, a mayor altura de descarga, la velocidad cae más rápidamente, por lo que el caudal de bombeo q se reduce.

Al cambiar la altura de descarga h_d, ocurre la modificación del caudal de descarga q por ciclo, también del periodo de duración T. Esto modifica el número de golpes por minuto n, el caudal de descarga q, el caudal de suministro $Q + q$ y en última la eficiencia $\eta = (q/Q)*(h_d/H\text{-}1)$.

Figura 130

Gráfica del pulso de presión y velocidad en el tubo de suministro.



Nota. Adaptado de Tacke (1988)

8.6 Condiciones hidráulicas de flujo en el tubo de descarga

Los caudales de descarga según el Anexo 1.4.1, se encuentran entre 0.171 l/min y 5.915 l/min para una tubería PVC ½" (d = 17.4 mm, ks = 0.0015 mm).

En la Tabla 183 se muestra el rango del número de Reynolds $Re = v \times d/\nu$, a través del tubo de descarga. Para valores de 2300 < Re < 4000, el número de Reynolds se encuentra en la zona de flujo crítico (entre la zona de flujo laminar y flujo de transición)

Tabla 183

Rango del número de Reynolds y ƒ de Darcy, T° = 15 °C

N.º	q, l/min	Re	f	Zona
1	0.20	213	0.2999	Laminar
2	0.80	854	0.0750	Laminar
3	1.50	1 600	0.0400	Laminar
4	1.90	2 027	0.0316	Laminar
5	2.20	2 347	0.0470	Crítica
6	3.50	3 734	0.0407	Crítica
7	4.00	4 268	0.0392	Transición

N.º	q, l/min	Re	f	Zona
8	4.50	4 801	0.0378	Transición
9	5.30	5 654	0.0361	Transición
10	5.90	6 295	0.0350	Transición

8.7 Influencia de las pérdidas de carga locales y por fricción

Según la configuración y componentes del tubo de descarga, se genera pérdidas de la energía disponible.

Las pérdidas locales se generan, principalmente, por el tipo de ingreso, tipo de salida y tipos de accesorios presentes en la instalación. En general, las resistencias locales en las instalaciones de bombas de ariete son mínimas y prácticamente no influyen en el desempeño.

Las pérdidas continuas por fricción obedecen a la ley de Darcy. De la Ecuación 105 deducimos la Ecuación 108:

$$hf = h - \text{a} \rightarrow hf = \left(k + f\frac{l}{d}\right)\frac{v^2}{2g} \tag{108}$$

o también

$$hf = \left(\frac{8}{\pi^2}\frac{1}{g}(k) + \frac{8}{\pi^2}\frac{1}{g}(f\frac{l}{d})\right)\frac{q^2}{d^4} \tag{109}$$

podemos verificar la influencia promedio de las pérdidas por fricción, a partir de plantearnos las siguientes condiciones usuales:

- l = {10 m, 25 m, 50 m, 100 m, 150 m}
- k = 1.5
- d = 17.4 mm (PVC 1/2")
- ks = 0.0015 mm
- $T°$= 15 °C.
- Ariete seleccionado: L/D = 400, H = 3 m, v_c = 1.37 m/s

En la Tabla 184 se observa las pérdidas de energía, para diferentes caudal q y longitudes de tubería l.

Hasta el régimen laminar q < 1.9 l/min (ver Tabla 73), las pérdidas de energía son pequeñas en todos los casos. Para el régimen crítico y de transición, a partir de una longitud de 100 m se tienen pérdidas mayores a 1 m.

Tabla 184

Pérdida de carga h_f, para diferentes condiciones de caudal y longitud l

N.º	q, l/min	l, m				
		25	50	100	150	300
1	0.20	0.004	0.009	0.017	0.026	0.052
2	0.80	0.018	0.035	0.069	0.104	0.208
3	1.50	0.033	0.066	0.130	0.195	0.390
4	1.90	0.042	0.083	0.166	0.248	0.494
5	2.20	0.084	0.166	0.329	0.493	0.984
6	3.50	0.184	0.364	0.723	1.083	2.161
7	4.00	0.232	0.457	0.908	1.359	2.713
8	4.50	0.283	0.559	1.111	1.663	3.318
9	5.30	0.376	0.741	1.471	2.202	4.393
10	5.90	0.452	0.891	1.769	2.647	5.282

Podemos verificar la influencia de las pérdidas de locales, comparando los coeficientes k y $f \times l/d$ (Ecuación 110):

$$hf_{acc} / hf_{tub} = \left(k \frac{v^2}{2g} \right) / \left(f \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \right) \tag{110}$$

En la Tabla 185, se observa que en todos los casos el porcentaje de influencia es menor al 4%. Así mismo, para longitudes mayores a 150 m el efecto es prácticamente menor al 0.55%.

Tabla 185

Porcentaje de influencia de las pérdidas locales k / ($f \times l/d$) × 100%.

N.º	q, l/min	l, m				
		25	50	100	150	300
1	0.20	0.35 %	0.17 %	0.09 %	0.06 %	0.03 %
2	0.80	1.39 %	0.70 %	0.35 %	0.23 %	0.12 %
3	1.50	2.61 %	1.31 %	0.65 %	0.44 %	0.22 %
4	1.90	3.31 %	1.65 %	0.83 %	0.55 %	0.28 %
5	2.20	2.22 %	1.11 %	0.56 %	0.37 %	0.19 %
6	3.50	2.56 %	1.28 %	0.64 %	0.43 %	0.21 %
7	4.00	2.67 %	1.33 %	0.67 %	0.44 %	0.22 %
8	4.50	2.76 %	1.38 %	0.69 %	0.46 %	0.23 %
9	5.30	2.89 %	1.45 %	0.72 %	0.48 %	0.24 %

N.º	q, l/min	l, m				
		25	50	100	150	300
10	5.90	2.98 %	1.49 %	0.75 %	0.50 %	0.25 %

Por otra parte, los valores mostrados en la Tabla 184 pueden presentarse como gradiente $S = hf/l$. (Ecuación 111)

$$\frac{hf}{l}=\left(\frac{8}{\pi^2}\frac{1}{g}\left(\frac{k}{l}\right)+\frac{8}{\pi^2}\frac{1}{g}\left(f\frac{1}{d}\right)\right)\frac{q^2}{d^4} \tag{111}$$

Los valores de gradiente $S = hf/l$ son prácticamente los mismos a diferentes longitudes de tubería (Tabla 186).

Si el coeficiente de pérdidas locales fuera cero, todos los valores de gradiente serían los mismos y muy cercanos a los valores de l = 300 m.

Tabla 186

Gradiente hidráulico en la tubería de descarga, $hf/l \times 1000‰$.

N.º	q, l/min	l, m				
		25	50	100	150	300
1	0.20	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
2	0.80	0.70	0.70	0.69	0.69	0.69
3	1.50	1.33	1.31	1.30	1.30	1.30
4	1.90	1.70	1.67	1.66	1.65	1.65
5	2.20	3.35	3.31	3.29	3.29	3.28
6	3.50	7.37	7.28	7.23	7.22	7.20
7	4.00	9.26	9.14	9.08	9.06	9.04
8	4.50	11.34	11.19	11.11	11.09	11.06
9	5.30	15.03	14.82	14.71	14.68	14.64
10	5.90	18.09	17.82	17.69	17.65	17.61

En las Figuras 131 y 132, se grafica el gradiente hidráulico promedio $S = hf/l$, para tuberías de PVC y PEAD respectivamente y l = 25 m. Se observa un desfase del gradiente debido al cambio la zona laminar de flujo a la zona de transición, considerando un Re critico de 2300.

Figura 131

Gradiente hidráulico en función del caudal de descarga q y la temperatura PVC.

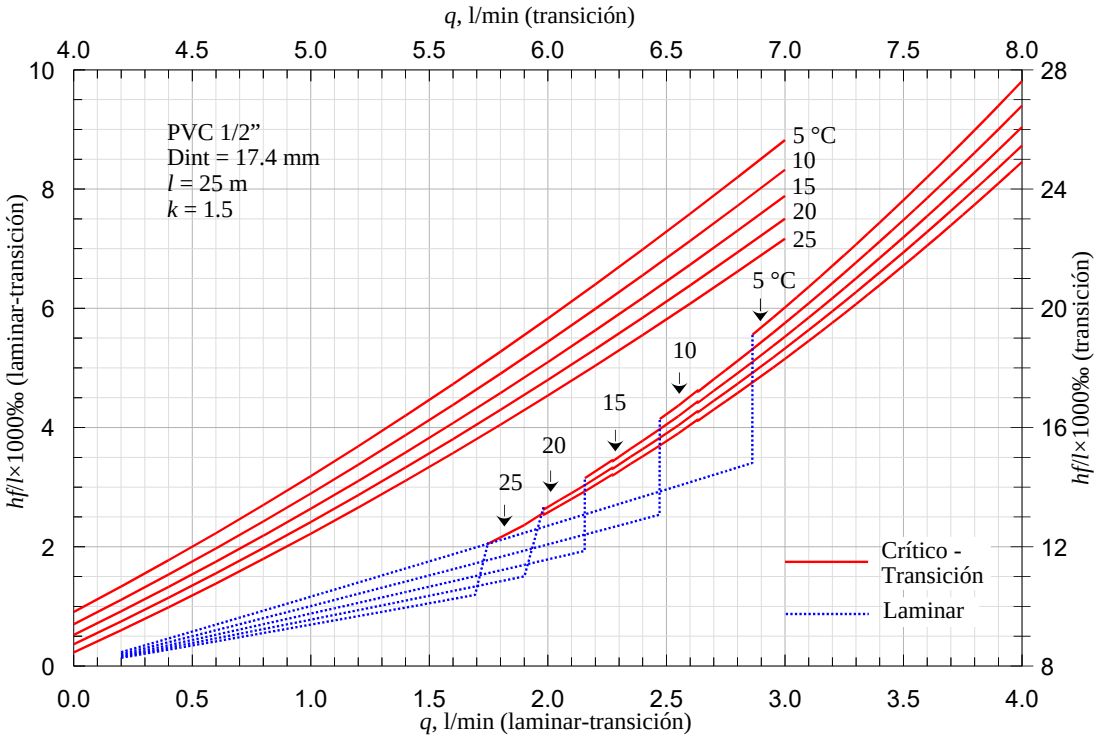
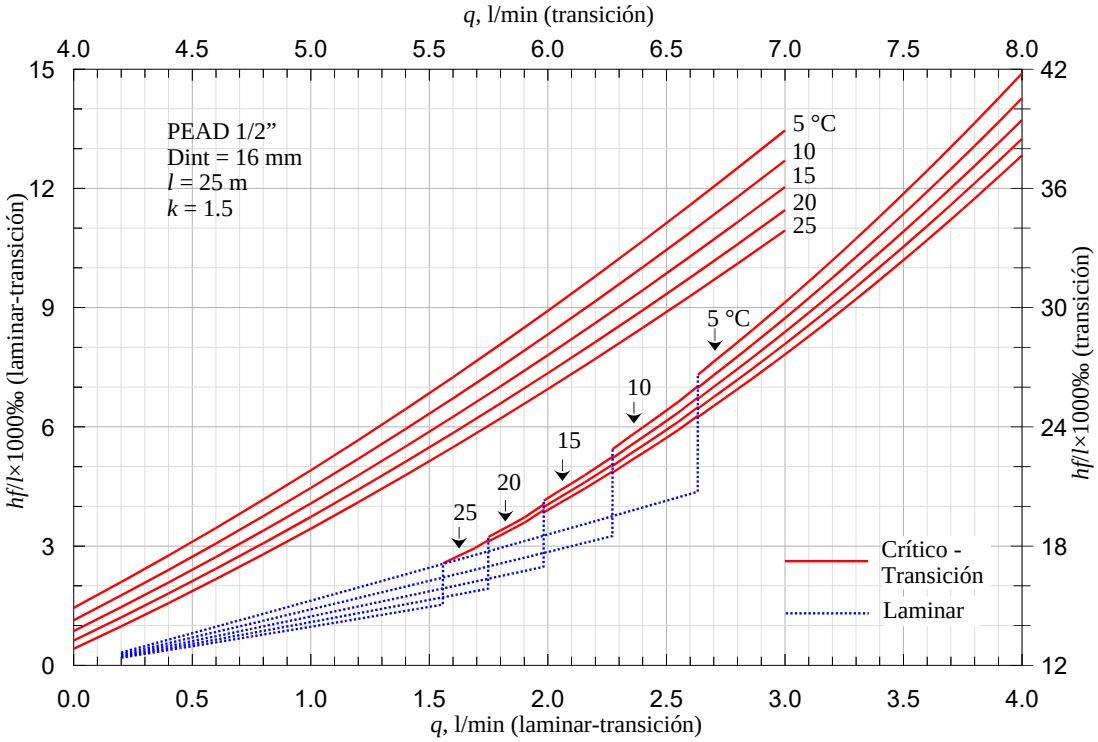


Figura 132

Gradiente hidráulico en función del caudal de descarga q y la temperatura PEAD.



Por tanto, puede resumirse la influencia de la pérdida de energía por resistencias locales y de fricción de la forma siguiente:

$$S = hf / l \rightarrow hf = S \times l$$

Entonces la altura de descarga h, puede expresarse como la Ecuación 112:

$$h = h_o + S \times l \tag{112}$$

Donde:

- h, es la altura de descarga, m
- h_o, es la diferencia de cotas desde válvula de impulso hasta el punto de descarga.
- S, es el gradiente hidráulico promedio.
- l, es la longitud de la tubería de descarga.

Es posible generalizar los gráficos de las Figuras 131 y 132. Al usar el número de Reynolds en las abscisas se absorbe la influencia de la temperatura. En el eje de las ordenadas, un factor C absorbe el efecto del diámetro interior del tubo de descarga.

Partimos de la expresión de pérdidas de carga:

$$hf = \left(\frac{8}{\pi^2} \frac{1}{g} (k) + \frac{8}{\pi^2} \frac{1}{g} (f \frac{l}{d}) \right) \frac{q^2}{d^4}$$

Acomodando la expresión anterior y dividendo por l obtenemos:

$$\frac{\pi^2 g}{8} \times \frac{d^4}{q^2} \times \frac{hf}{l} = \left(k + f \frac{l}{d} \right) \frac{1}{l} \tag{113}$$

El factor C viene a ser los dos primeros términos de la Ecuación 113. Simplificando tenemos la Ecuación 114:

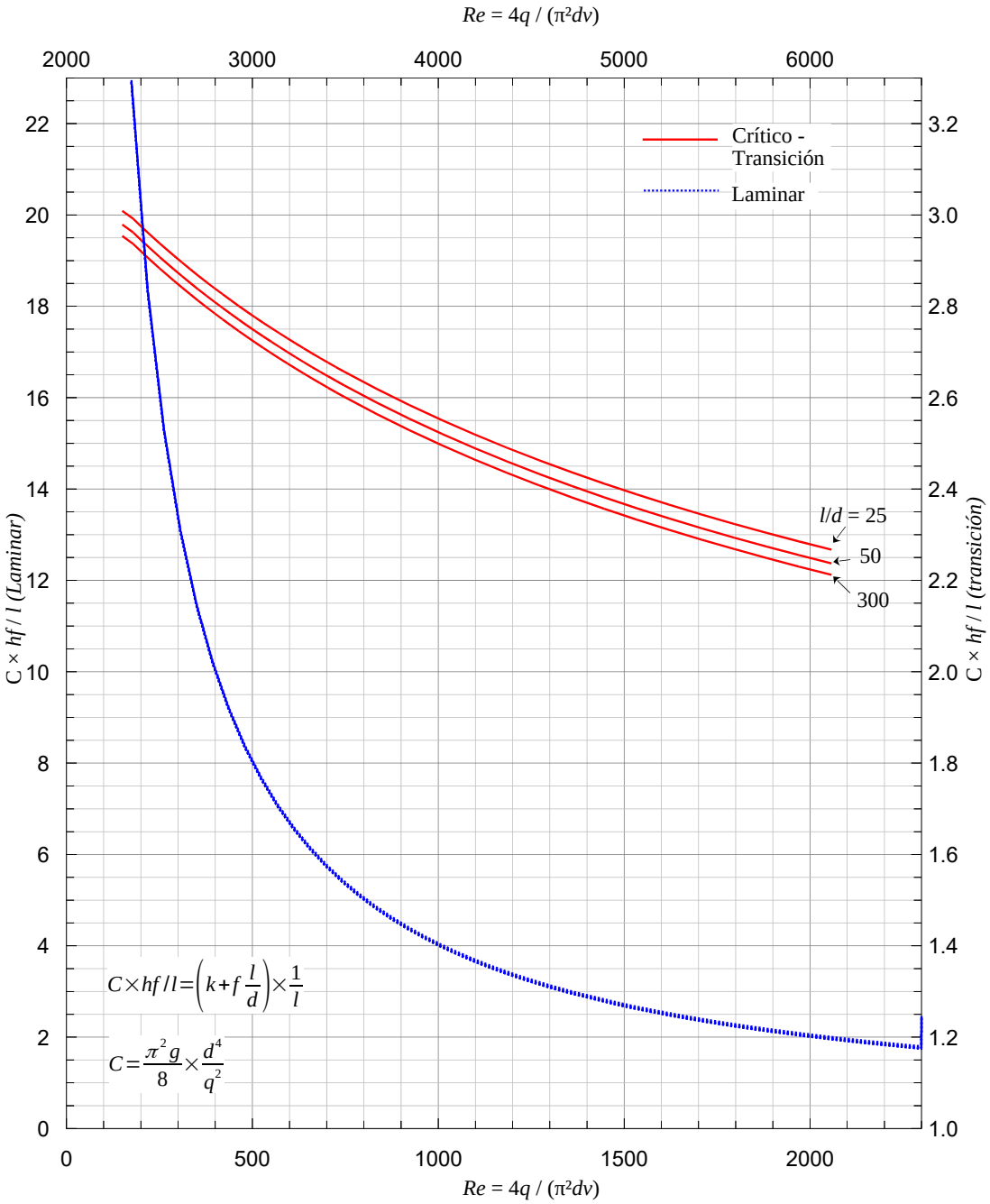
$$C \times \frac{hf}{l} = \left(k + f \frac{l}{d} \right) \frac{1}{l} \tag{114}$$

Al graficar esta expresión en función del número de Reynolds y la relación l/d, obtenemos la Figura 133.

El efecto del coeficiente de pérdidas locales es mínimo y se aprecia más a pequeñas l/d en el flujo de régimen crítico-transición.

Figura 133

Gradiente transformado, para el régimen laminar y de transición.



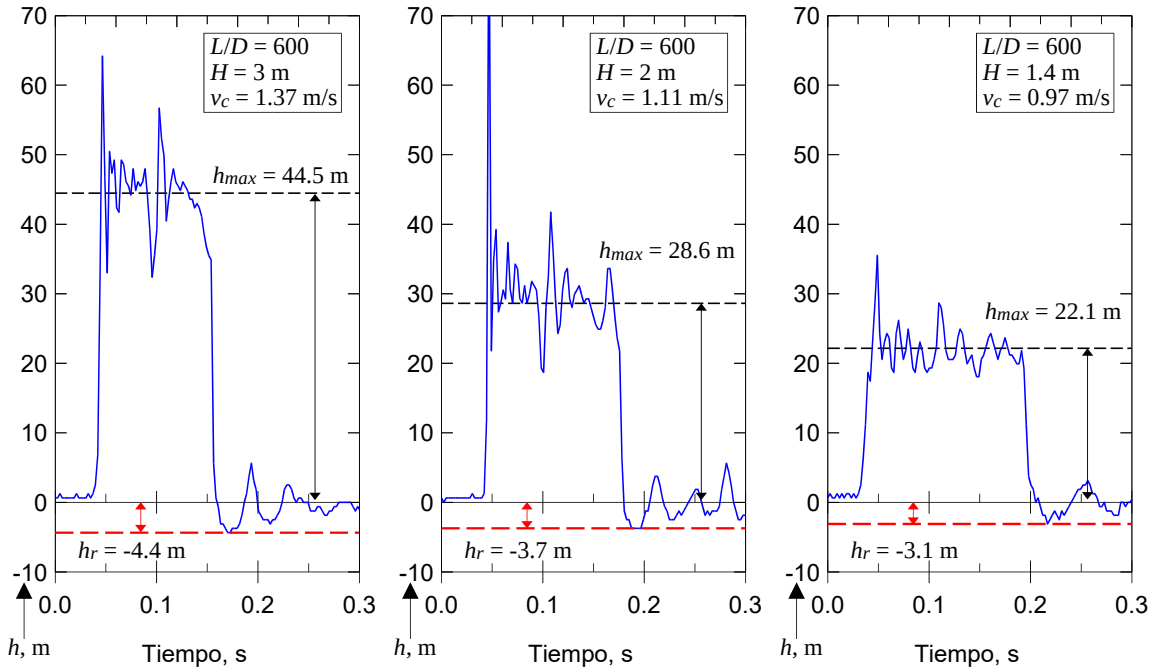
8.8 Pulso de presión y presión negativa

Entre los periodos de retardación y retroceso del ciclo operativo de la bomba de ariete, se genera presión negativa en el cuerpo de la bomba de ariete como consecuencia del retroceso del flujo en el tubo de suministro (ver Tabla 12). Debido a esta "succión" la válvula de impulso se abre y la válvula de descarga se cierra, reiniciándose así el ciclo operativo de la bomba de ariete. La apertura de la válvula de impulso evita un mayor desarrollo de la presión negativa.

La Figura 134 muestra la carga de presión de retroceso h_r en tres pulsos de presión medidos en el extremo inferior del tubo de suministro (próximo a la bomba de ariete). La cavitación se da cuando se alcanza la presión de vaporización del agua, que para 15 °C es de 0.174 m. La carga de presión atmosférica para las condiciones del estudio (ver Capítulo 3.1.2) es de 6.71 m aproximadamente, por tanto la carga h_r en unidades absolutas seria de 2.31 m, 3.01 m y 3.61 m, por lo cual la cavitación no se da.

Figura 134

Carga de presión de retroceso h_r a diferentes alturas de suministro H



Anexo 9: Reporte estadístico de la regresión lineal de los modelos matemáticos

9.1 Modelo $y_1 = q/Q_T$

Tabla 187

Resumen del Modelo - Y_1

Modelo	R	R^2	R^2 Ajustado	RMSE	Durbin-Watson		
					Autocorrelación	Estadístico	*p*
H_0	0.00000	0.00000	0.00000	0.06345	-0.00241	1.98768	0.91476
H_1	0.99492	0.98987	0.98977	0.00642	0.09017	1.81762	0.10026

Tabla 188

Análisis de varianza de la regresión lineal, ANOVA

Modelo		Suma de Cuadrados	gl	Cuadrado Medio	F	*p*
H_1	Regresión	1.19138	3	0.39713	9641.03627	9.31001×10^{-295}
	Residuo	0.01219	296	0.00004		
	Total	1.20358	299			

Nota. El modelo de la constante se omite, ya que no se puede mostrar información importante. H_1 incluye X1, X2, X1*X2.

Tabla 189

Coeficientes de la regresión lineal

Modelo		No tipificado	Error Típico	Tipificado	*t*	*p*	IC del 95%	
							Inf.	Sup.
H_0	(Const.)	0.09166	0.00366		25.02326	2.57640×10^{-75}	0.08445	0.09887
H_1	(Const.)	-0.32609	0.01380		-23.63061	4.19160×10^{-70}	-0.35325	-0.29893
	X1	-0.39609	0.01250	-1.51087	-31.69234	3.88297×10^{-97}	-0.42068	-0.37149
	X2	0.00098	0.00010	0.26878	10.06461	1.09838×10^{-20}	0.00079	0.00118
	X1*X2	0.00097	0.00009	0.59301	10.95474	1.13954×10^{-23}	0.00080	0.00114

Tabla 190

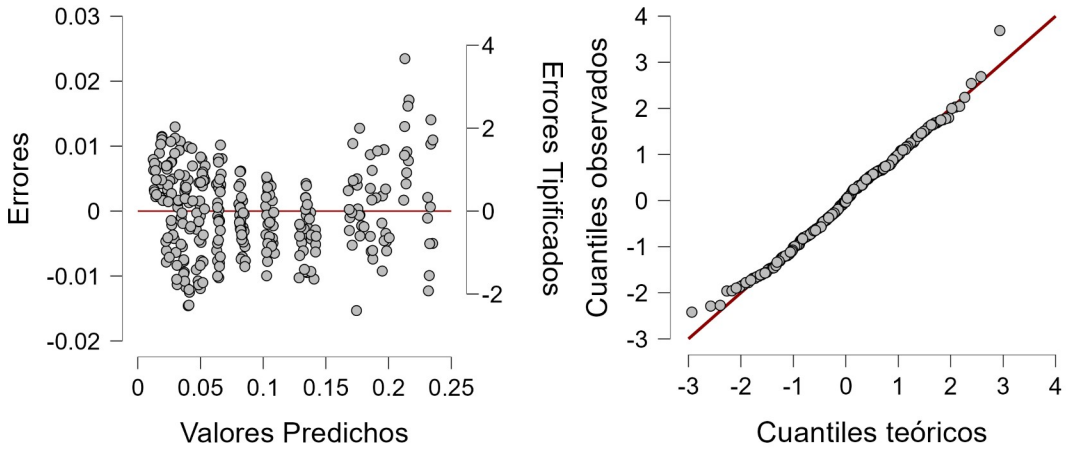
Casos influyentes

Case Number	Error Típico	YT	Valor Predicho	Error	Cook's Distance
83	3.68590	0.23651	0.21305	0.02347	0.05492

La Figura 135 muestra gráficos de verificación de supuestos de la regresión lineal.

Figura 135

Verificación de supuestos de la regresión lineal.



Nota. Izquierda: Errores vs predichos. Derecha: Gráfico Q-Q de errores tipificados.

9.2 Modelo $y_2=Q/Q_T$

Tabla 191

Resumen del Modelo - Y2

Modelo	R	R^2	R^2 Ajustado	RMSE	Durbin-Watson		
					Autocorrelación	Estadístico	*p*
H_0	0.00000	0.00000	0.00000	0.06345	-0.00241	1.98768	0.91476
H_1	0.99492	0.98987	0.98977	0.00642	0.09017	1.81762	0.10026

Tabla 192

Análisis de varianza de la regresión lineal, ANOVA

Modelo		Suma de Cuadrados	gl	Cuadrado Medio	F	*p*
H_1	Regresión	1.19138	3	0.39713	9641.03627	9.31001×10^{-295}
	Residuo	0.01219	296	0.00004		
	Total	1.20358	299			

Nota. El modelo de la constante se omite, ya que no se puede mostrar información importante. H_1 incluye X1, X2, X1*X2.

Tabla 193

Coeficientes de la regresión lineal

Modelo		No tipificado	Error Típico	Tipificado	*t*	*p*	IC del 95%	
							Inf.	Sup.
H_0	(Const.)	0.90834	0.00366		247.97472	0.00000	0.90113	0.91555
H_1	(Const.)	1.32609	0.01380		96.09754	3.25970×10^{-225}	1.29893	1.35325
	X1	0.39609	0.01250	1.51087	31.69234	3.88297×10^{-97}	0.37149	0.42068
	X2	-0.00098	0.00010	-0.26878	-10.06461	1.09838×10^{-20}	-0.00118	-0.00079
	X1*X2	-0.00097	0.00009	-0.59301	-10.95474	1.13954×10^{-23}	-0.00114	-0.00080

Tabla 194

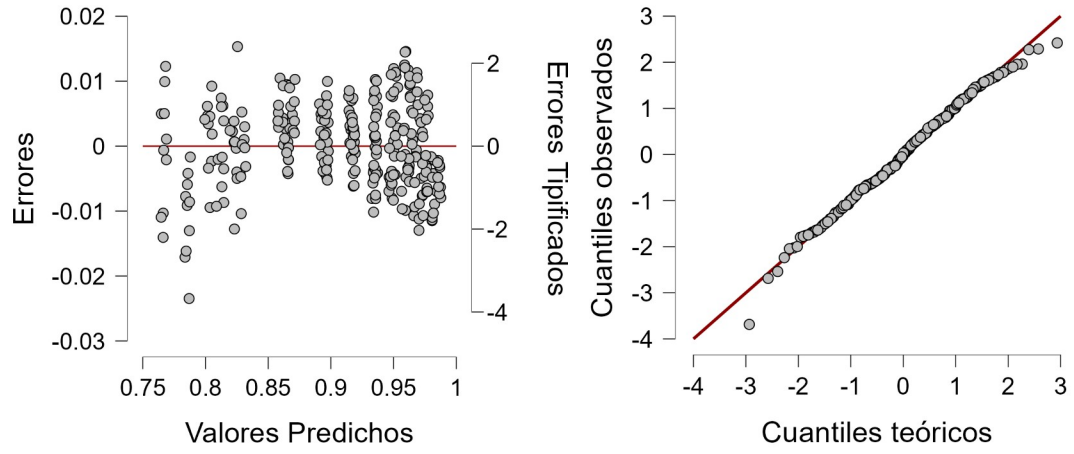
Casos influyentes

Case Number	Error Típico	Y_T	Valor Predicho	Error	Cook's Distance
83	-3.68590	0.76349	0.78695	-0.02347	0.05492

La Figura 136 muestra gráficos de verificación de supuestos de la regresión lineal.

Figura 136

Verificación de supuestos de la regresión lineal.



Nota. Izquierda: Errores vs predichos. Derecha: Gráfico Q-Q de errores tipificados.

9.3 ***Modelo*** $y_3=nD/v_c$

Tabla 195

Resumen del Modelo - Y_3

Modelo	R	R^2	R^2 Ajustado	RMSE	Durbin-Watson		
					Autocorrelación	Estadístico	*p*
H_0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00182	0.86191	0.26956	4.25285×10^{-51}
H_1	0.97728	0.95508	0.95478	0.00039	0.05061	1.89169	0.32168

Tabla 196

Análisis de varianza de la regresión lineal, ANOVA

Modelo		Suma de Cuadrados	gl	Cuadrado Medio	F	*p*
H_1	Regresión	0.00095	2	0.00048	3157.72742	7.59397×10^{-201}
	Residuo	0.00004	297	1.50525×10^{-7}		
	Total	0.00100	299			

Nota. El modelo de la constante se omite, ya que no se puede mostrar información importante. H_1 incluye X2, X3.

Tabla 197

Coeficientes de la regresión lineal

Modelo		No tipificado	Error Típico	Tipificado	*t*	*p*	IC del 95%	
							Inf.	Sup.
H_0	(Constante)	0.01253	0.00011		118.90969	8.56012×10^{-254}	0.01232	0.01273
H_1	(Constante)	-0.05105	0.00098		-52.01926	2.98492×10^{-151}	-0.05299	-0.04912
	X2	-0.02645	0.00034	-0.95145	-77.34347	7.81841×10^{-199}	-0.02712	-0.02578
	X3	-0.00004	2.69547×10^{-6}	-0.20002	-16.25948	5.85926×10^{-43}	-0.00005	-0.00004

Tabla 198

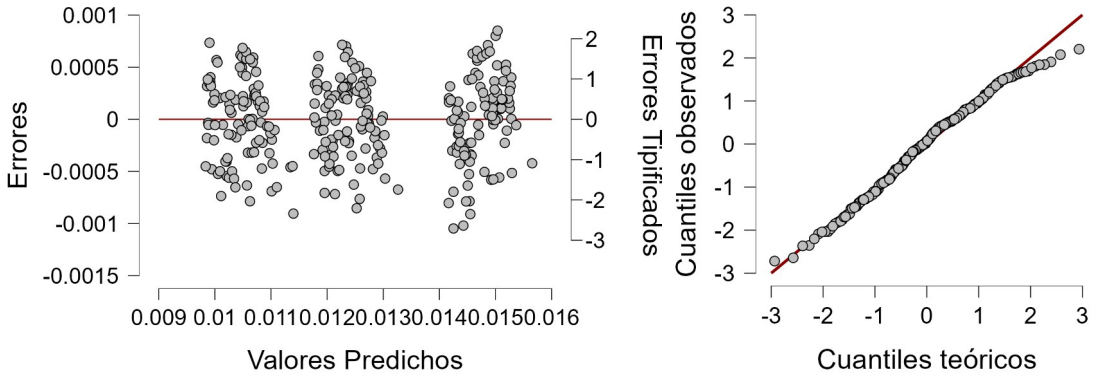
Casos influyentes

Case Number	Error Típico	Y_T	Valor Predicho	Error	Cook's Distance
188	-2.64265	0.01341	0.01443	-0.00102	0.02616
269	-2.71916	0.01320	0.01425	-0.00105	0.03662

La Figura 137 muestra gráficos de verificación de supuestos de la regresión lineal.

Figura 137

Verificación de supuestos de la regresión lineal.



Nota. Izquierda: Errores vs predichos. Derecha: Gráfico Q-Q de errores tipificados.

9.4 Modelo $y_4=\eta$

Tabla 199

Resumen del Modelo - Y_4

Modelo	R	R^2	R^2 Ajustado	RMSE	Durbin-Watson		
					Autocorrelación	Estadístico	*p*
H_0	0.00000	0.00000	0.00000	0.08568	-0.02135	2.04257	0.71147
H_1	0.88441	0.78218	0.77922	0.04026	0.08783	1.82313	0.11055

Tabla 200

Análisis de varianza de la regresión lineal, ANOVA

Modelo		Suma de Cuadrados	gl	Cuadrado Medio	F	*p*
H_1	Regresión	1.71676	4	0.42919	264.82854	2.72884×10^{-96}
	Residuo	0.47809	295	0.00162		
	Total	2.19485	299			

Nota. El modelo de la constante se omite, ya que no se puede mostrar información importante. H_1 incluye X1, X2, X1*X2, X1^2

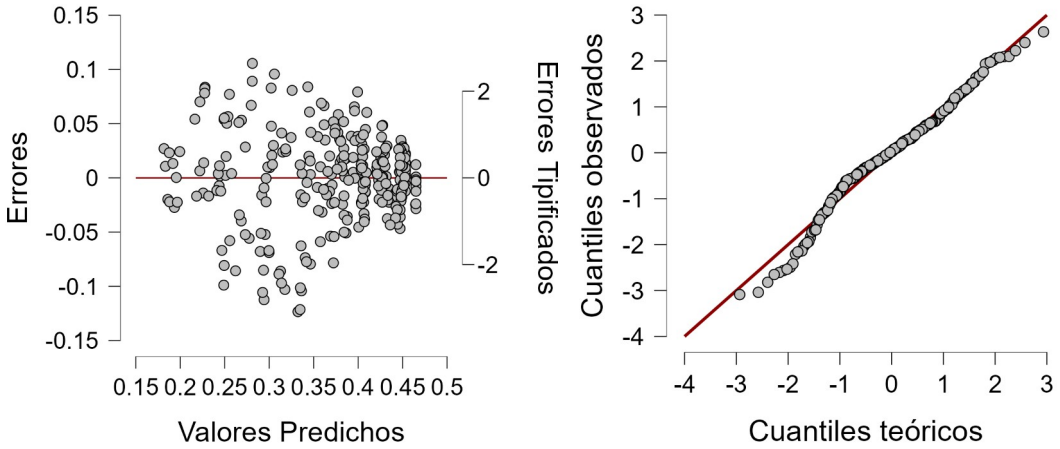
Tabla 201

Casos influyentes

Case Number	Error Típico	Y_T	Valor Predicho	Error	Cook's Distance
73	-3.08803	0.20892	0.33233	-0.12340	0.02829
248	-3.03863	0.21329	0.33474	-0.12144	0.02691

Figura 138

Verificación de supuestos de la regresión lineal.



Nota. Izquierda: Errores vs predichos. Derecha: Gráfico Q-Q de errores tipificados.

Tabla 202

Coeficientes del modelo, $y_4=\eta$

Modelo		No tipificado	Error Típico	Tipificado	*t*	*p*	IC del 95% Inferior	IC del 95% Superior	Tolerancia*	FIV*
H_0	(Constante)	0.37100	0.00495		75.00085	6.03119×10^{-196}	0.36126	0.38073		
H_1	(Constante)	-36.13504	2.84695		-12.69257	9.48888×10^{-30}	-41.73794	-30.53215		
	X_1	5.20517	0.30081	35.66234	17.30363	8.60188×10^{-47}	4.61316	5.79719	0.00017	5752.60864
	X_2	-3.22268	0.49130	-3.36402	-6.55955	2.41563×10^{-10}	-4.18957	-2.25579	0.00281	356.19455
	X_1*X_2	0.29554	0.04444	11.39918	6.65013	1.41823×10^{-10}	0.20808	0.38300	0.00025	3979.29348
	X_1^2	-0.16971	0.00784	-25.41277	-21.65193	6.76806×10^{-63}	-0.18514	-0.15429	0.00054	1865.64992

Nota. *Multicolinealidad

Tabla 203

Diagnósticos de Multicolinealidad

				Proporciones de Varianza				
Modelo	Dimensión	Autovalor	Índice de Condición	(Intercept)	X_1	X_2	X_1:X_2	X_1^2
H_1	1	4.99201	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	2	0.00770	25.46336	0.00002	0.00000	0.00002	0.00000	0.00039
	3	0.00029	130.40113	0.00071	0.00019	0.00044	0.00102	0.00034
	4	1.77502×10^{-6}	1677.01190	0.00168	0.09438	0.08319	0.08316	0.88723
	5	1.74220×10^{-7}	5352.89487	0.99759	0.90542	0.91635	0.91582	0.11204

Nota. El modelo de la constante se omite, ya que no se puede mostrar información importante.

9.5 Modelo $y_5 = Q_T / v_c D^2$

Tabla 204

Resumen del Modelo - Y_5

Modelo	R	R^2	R^2 Ajustado	RMSE	Durbin-Watson		
					Autocorrelación	Estadístico	*p*
H_0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0640	0.0411	1.9114	0.4412
H_1	0.9743	0.9493	0.9489	0.0145	0.0101	1.9712	0.7580

Tabla 205

Análisis de varianza de la regresión lineal, ANOVA

Modelo		Suma de Cuadrados	gl	Cuadrado Medio	F	*p*
H_1	Regresión	1.1614	2	0.5807	2779.2579	5.2590×10^{-193}
	Residuo	0.0621	297	0.0002		
	Total	1.2234	299			

Nota. El modelo de la constante se omite, ya que no se puede mostrar información importante. H_1 incluye X1, X2

Tabla 206

Coeficientes de la regresión lineal

Modelo		No tipificado	Error Típico	Tipificado	*t*	*p*	IC del 95%	
							Inf.	Sup.
H_0	(Constante)	0.35568	0.00369		96.30898	4.04682×10^{-227}	0.34841	0.36295
H_1	(Constante)	0.39778	0.00553		71.97914	4.96836×10^{-190}	0.38691	0.40866
	X1	-0.02176	0.00030	-0.94215	-72.09432	3.17038×10^{-190}	-0.02235	-0.02116
		0.00020	0.00001	0.25043	19.16293	7.65511×10^{-54}	0.00018	0.00022

Tabla 207

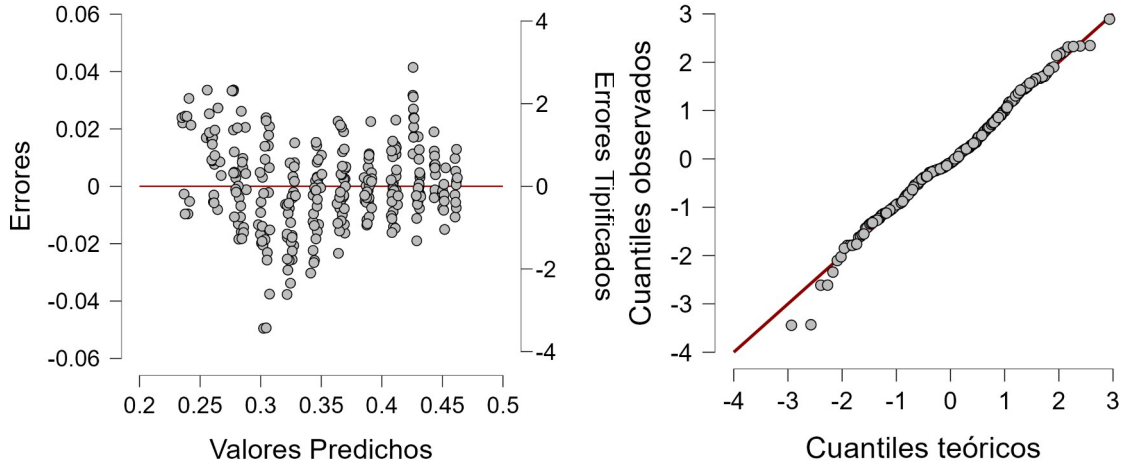
Casos influyentes

Case Number	Error Típico	Y_T	Valor Predicho	Error	Cook's Distance
20	-3.44259	0.25287	0.30239	-0.04953	0.03745
107	-3.43149	0.25520	0.30457	-0.04937	0.03668

La Figura 139 muestra gráficos de verificación de supuestos de la regresión lineal.

Figura 139

Verificación de supuestos de la regresión lineal.



Nota. Izquierda: Errores vs predichos (Supuesto de varianza constante). Derecha: Gráfico Q-Q de errores tipificados (supuesto de normalidad)

Anexo 10: Velocidad de onda de presión.

Determinamos la velocidad de onda c, a partir de la Ecuación 115. Esta expresión no considera la presencia de burbujas de aire.

$$c=\left(\frac{\rho}{K}+\frac{\rho D}{E e}\times\varphi\right)^{-1/2} \tag{115}$$

Donde

c = velocidad de onda de presión, m/s

ρ = densidad del líquido ρ = f(°T), kg/m³

K = módulo volumétrico de elasticidad del líquido K = f(°T), N/m²

D = Diámetro interior del tubo de suministro D = 0.0262 m

e = espesor del tubo de suministro e = 0.0034 m[6]

E = Módulo de Young's del material de la tubería E =2.76×10[6] N/m²

φ = coeficiente que introduce la condición de restricción de la tubería φ = 1

El módulo de elasticidad E, depende del tipo de material, para el caso del PVC, autores indican valores de 1.4 GPa (Wylie & Streeter, 1978), 4×10[5] lbf/in² (Larock et al., 1999), 3 GPa (Tacke, 1988), entre otros. PAVCO WAVIN (2023) indica un valor de 28100 kgf/cm² para tubos PVC Tipo 1 Grado 1, de la norma colombiana.

Anexo 11: Predicción del coeficiente de pérdidas totales, k_{total}

11.1 Teoría

En el presente capítulo se utiliza los modelos 1 y 2 encontrados para el coeficiente k_{valv} (Anexo 2.1), para predecir el valor del coeficiente de pérdida de carga totales por accesorios k_{total}.

De la Figura 94 y Tabla 120 (Anexo 2.1.5.1), podemos deducir la Ecuación 116:

$$k_{total} = k_{valv} + k_{acc} \quad (116)$$

El coeficiente k_{acc}, se puede estimar según la Tabla 208, la cual es un resumen de la Tabla 120.

Tabla 208

Coeficiente de pérdidas locales de otros accesorios k_{acc}

H, m	$\bar{x}_{kacc}$	s	n
1.4	3.433	0.060	60
2	3.345	0.050	60
3	3.297	0.067	60

Nota. $\bar{x}_{kacc}$ media del coeficiente k_{acc}, H altura de suministro. Simbología en la Tabla 97.

El coeficiente k_{acc} se puede elegir considerando un k_{acc} = 3.43 para $H \leq 1.4$ y k_{acc} = 3.35 para $H \leq 2$.

11.2 Aplicación

Utilizamos la Ecuación 116 para estimar el coeficiente k_{total} de otro experimento, en este caso del experimento de velocidad crítica y coeficiente de arrastre del Anexo 2.2.

En la Figura 140 se muestran los valores promedios del coeficiente k_{total} del experimento de velocidad crítica con H = {0.82, 0.94, 1.06, 1.17, 1.41, 1.64, 1.88} y los valores arrojados por la Ecuación 116 aplicando el modelo 1 y de forma similar en la Figura 141 se utiliza el modelo 2 (ver Tabla 129).

Se observa que, el modelo 2 sobrestima el k_{total} para H = {0.82 m, 0.94 m}, y el modelo 1 subestima para H = 0.82 m. La diferencia puede deberse al coeficiente de pérdidas locales de otros accesorios k_{acc} el cual es un poco mayor para menores H.

Figura 140

Predicción del coeficiente de pérdidas locales totales k_{total} modelo 1.

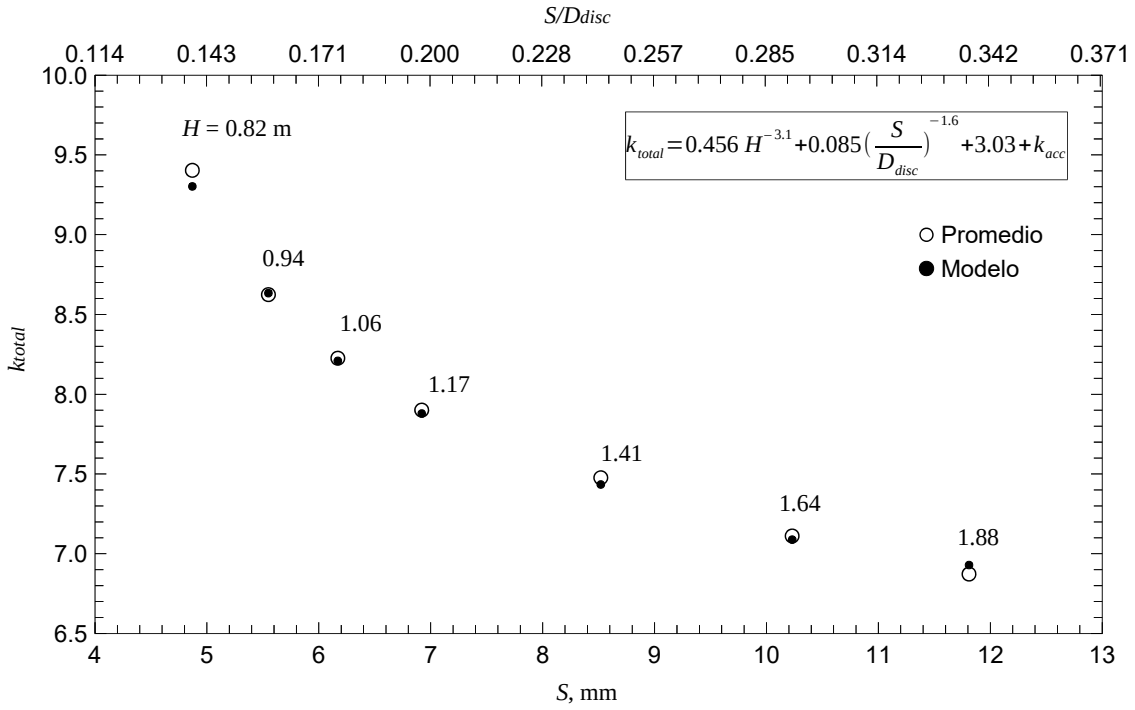
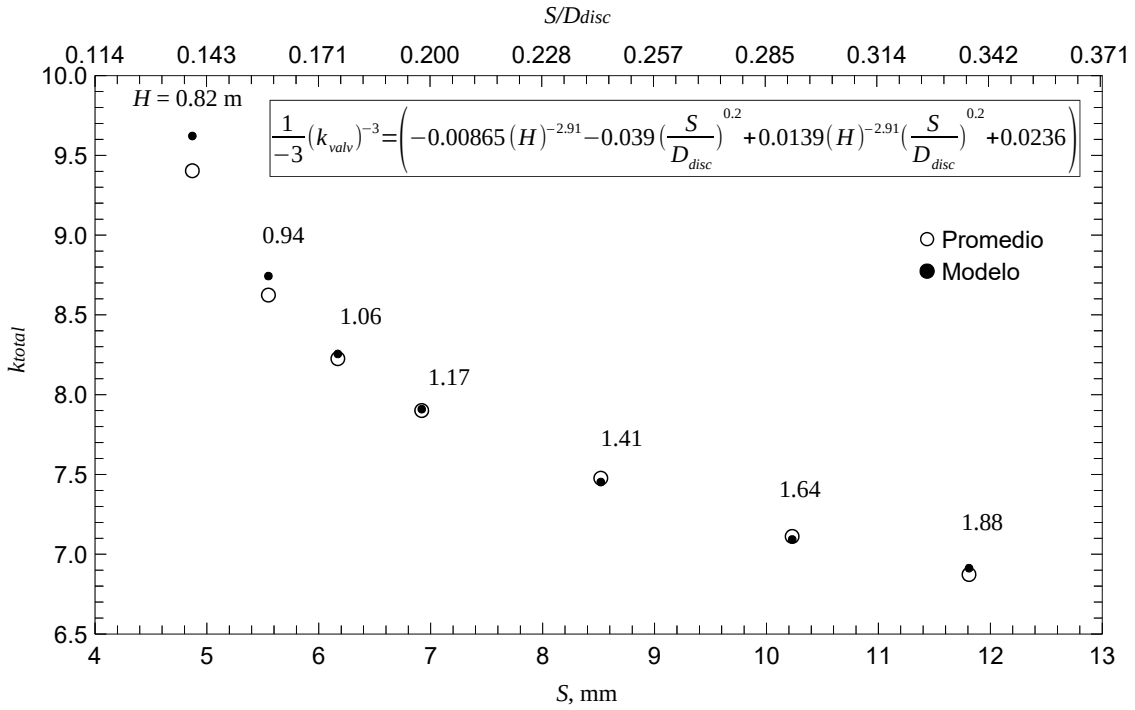


Figura 141

Predicción del coeficiente de pérdidas locales totales k_{total} modelo 2 (final).



Anexo 12: Procedimiento experimental de la prueba principal

La Tabla 209 es una ampliación del procedimiento simplificado indicado en el Capítulo 3.1.5.

Varios de los pasos indicados en la Tabla 209, se realizan en paralelo. Se debe tener en cuenta que para el desarrollo del experimento son necesarios dos personas.

Tabla 209

Procedimiento experimental detallado.

N°	Procedimiento
1	Verificar condiciones de prueba según tratamiento X (i, j)
	- Verificar datos iniciales de prueba en hoja de calculo (según orden aleatorio)
	- Verificación de límite superior en inferior aceptables de la presión de prueba (h)
	- Registrar la fecha y hora de inicio.
2	Adecuación del banco de pruebas
	2.1 Cambio de válvula de impulso
	- Retiro de válvula
	- Retiro de aire de la caja del ariete.
	- Colocación de siguiente válvula de impulso.
	- Ajuste de posición angular de tee 2", Bushing y tee 1" (ver tres alineamientos "marcas")
	2.2 Cambio de válvula de estrangulación
	- Según la altura de descarga h, cambiar las válvulas de aguja correspondientes.
3	Pesaje inicial de recipientes: 2 L, 8 L, 20 L
	- Calibración en cero de la balanza.
	- Verificación ausencia de aire.
4	Encendido de banco de pruebas
	- Ajustar la altura de suministro de trabajo H.
	- Encendido la bomba periférica 1.
	- Abertura de válvula de tanque de agua, para mantener el nivel del agua.
	- Levantamiento de perno de la válvula de impulso.
	- Apagar bomba periférica y encender bomba centrífuga, hasta llenado completo del sistema.
	- Retiro de materiales flotantes con colador.
	- Presionar el perno para iniciar los golpeteos.
5	Medición de la presión máxima
	- Cerrar la válvula de salida de la bomba de ariete para acumulación de la presión.
	- Colocar el manómetro, quitando el seguro superior para evitar acumulación de presión.
	- Esperar estabilización y registrar.
6	Ajuste a la presión de trabajo requerida.
	- Abertura lenta de la válvula de globo.
	- Graduar la válvula de aguja en función al disco graduado.
	- Verificar en el manómetro la presión requerida.
	- Registrar la graduación de la válvula de aguja.
	- Registrar la presión alcanzada (presión máxima y mínima).

N°	Procedimiento
7	Medición de temperatura inicial de prueba
	- Encender y colocar el termómetro en el flotador de la cisterna.
	- Esperar estabilización y registrar.
8	Medir la cantidad de golpes por minuto inicial.
	- Verificar el contó metro y cronómetro en cero.
	- Contar los golpes de la válvula de impulso en un minuto.
9	Inicio de aforo del caudal de descarga
	- Cerrar y abrir válvulas a la salida del tubo de descarga.
	- Esperar estabilización de flujo.
	- Preparar el cronómetro.
	- Colocar el recipiente e iniciar el cronómetro simultáneamente.
	- Quitar el recipiente y finalizar el cronómetro.
	- Abrir y cerrar válvulas del tubo de descarga.
10	Inicio de aforo del caudal de funcionamiento
	- Girar el accesorio codo para derivación del flujo hacia el recipiente de medición.
	- Simultáneamente iniciar el cronómetro.
	- Verificar la caída correcta del flujo.
	- Girar el codo a su posición inicial y finalización del cronómetro
	- Registrar los valores de los cronómetros
11	Medición y registro de datos.
	- Medir y registrar la presión final de prueba en el manómetro (presión máxima y mínima).
	- Medir y registrar la temperatura final de prueba.
	- Pesado de recipientes, verificar calibrado y ausencia de aire.
	- Medición final de golpeteos (pulsaciones), con el contó metro y cronómetro.
	- Medición de nivel del agua en el piezómetro del tanque de suministro (nivel mínimo y máximo).
	- Verificar en la hoja de cálculo que los resultados obtenidos sean similares apruebas anteriores.
12	Finalización de prueba
	- Apagar la bomba periférica.
	- Cerra y abrir válvulas para el cambio de dirección de flujo.
	- Encender la bomba centrífuga para recircular hacia el tanque de almacenamiento.
	- Devolver el agua aforada en los recipientes a la cisterna.
	- Apagado de la bomba periférica y cierre de válvulas.

El registro de datos se realizó en una hoja de cálculo. En el Anexo 19 se muestra tablas con los datos recolectados y el análisis inicial.

Adicionalmente, se realizó el registro fotográfico de cada medición realizada, con la finalidad de tener un respaldo de la información recolectada.

Las Tablas 210 y 211, describen la nomenclatura utilizada en las tablas de datos y de análisis.

Tabla 210

Leyenda de símbolos utilizados en las tablas de datos.

N.º	Símbolo	Unidad	Descripción
1	T_i	°C	Temperatura del agua al inicio de la prueba.
2	T_f	°C	Temperatura del agua al final de la prueba.
3	t_1	min	Tiempo de aforo de Q, parte en minutos.
4	t_1	s	Tiempo de aforo por Q, parte en segundos.
5	t_2	min	Tiempo de aforo de q, parte en minutos.
6	t_2	s	Tiempo de aforo por q, parte en segundos.
7	M_1	kg	Masa total medida del aforo de Q (agua + recipiente).
8	M_2	kg	Masa total medida del aforo de q (agua + recipiente).
9	W_1	kg	Masa del recipiente 1, utilizado en el aforo.
10	W_2	kg	Masa del recipiente 2, utilizado en el aforo.
11	P_{1i}	Bar	Presión inicial en el manómetro.
12	P_{1i}	Bar	Presión final en el manómetro.
13	P_{1imin}	Bar	Presión inicial mínima en el manómetro.
14	P_{1fmin}	Bar	Presión final mínima en el manómetro.
15	P_{max}	Bar	Presión máxima en el manómetro a caudal cero (q = 0)
16	t_{n1}	min	Tiempo de recuento de golpes al inicio, parte en minutos.
17	t_{n1}	s	Tiempo de recuento de golpes al inicio, parte en segundos.
18	n_1	[ ]	Cantidad de golpes registrados al inicio en el contómetro.
19	t_{n2}	min	Tiempo de recuento de golpes al final, parte en minutos.
20	t_{n2}	s	Tiempo de recuento de golpes al final, parte en segundos.
21	$n2$	[ ]	Cantidad de golpes registrados al final en el contómetro.
22	H_{min}	cm	Registro de altura mínima en el tanque suministro.
23	H_{max}	cm	Registro de altura máxima en el tanque suministro.
24	N_{min}	cm	Nivel mínimo en el sistema cuando no hay flujo.
25	E		Situación de prueba (1: Válida, 2: Adicional, 3: Invalida)

Tabla 211

Leyenda de símbolos utilizados en las tablas de análisis

N.º	Símbolo	Unidad	Descripción	Ecuación
1	$\%\Delta P_1$	%	Variación relativa de la presión aguas arriba: % $\Delta P1 \leq 10\%$	$\% \Delta P_1 = \lvert P_{1i}\text{-}P_{1f}\rvert \,/\, P_{1i}$
2	$\Delta T°$	°C	Variación de temperatura: $\Delta T° \leq 5$ °C	$\Delta T° = T_f - T_i$
3	T_{med}	°C	Temperatura media durante la prueba	$\Delta T° = [T_f + T_i] / 2$
4	L/D	[ ]	Relación longitud y diámetro del tubo de suministro	-
5	H_1	cm	Altura de suministro medida	$H_1 = N_{min} - (H_{min}+H_{max})/2$
6	H_{real}	m	Altura de suministro asignada	H_{real} = Función lógica (H_1 o H promedio)
7	h_{real}	[ ]	Altura de descarga medida	$h_{real} = (P_{1f}+P_{1i})/2 \times 10^5/(\rho \times q)$
8	h/H	[ ]	Relación de alturas	$h/H = h_{real}/H_{real}$
9	h_{max}	m	Altura de descarga a caudal cero	$h_{max} = P_{max} \times 10^5/(\rho \times q)$
10	Re	[ ]	Número de Reynolds	$Re = v_c \times D/\nu$
11	f	[ ]	Factor de fricción de Darcy	
12	Q	l/min	Caudal de funcionamiento	$Q = m_1/(\rho \times t_1) \times 1000/60$

N.º	Símbolo	Unidad	Descripción	Ecuación
13	q	l/min	Caudal de descarga	$q = m_2/(\rho \times t_2) \times 1000/60$
14	n	[ ]	Cantidad de golpes por minuto	$n = [(n_1\text{-}1) / (t_3)+(n_2\text{-}1) / (t_4)] / 2$ $t_3=t_3(\text{min})*60+t_3(\text{s})$ $t_4=t_4(\text{min})*60+t_4(\text{s})$
15	q/Q_T	[ ]	Caudal de descarga relativo	
16	Q/Q_T	[ ]	Caudal de funcionamiento relativo	
17	nD/v_c	[ ]	Parámetro de la válvula de impulso	
18	η	[ ]	Eficiencia de Rankine	
19	Q_T/v_cD^2	[ ]	Caudal de suministro relativo	$Q_T = Q+q$

Anexo 13: Límites de rendimiento de la bomba de ariete.

El límite de altura de descarga está determinado por la ecuación $h_{max} = \pm (c/g) \times v_c$, deducida en el Anexo 8.3. La ecuación nos dice se obtienen mayores alturas de descarga cuando la velocidad de onda c es máxima (mayor modulo de elasticidad) y/o cuando la válvula de impulso de ajusta a una velocidad crítica v_c mayor (mayor carrera S, masa W y/o carga del resorte).

Normalmente la altura de descarga máxima llega hasta un límite de 0.8 – 0.9 de la h_{max} (Tacke, 1988; B. W. Young, 1995), esta disminución de presión puede deberse al fuerte retroceso (Tacke, 1988) o al alivio de presión por la válvula de descarga (Najm et al. 1999). Bombas de ariete comerciales reportan alturas de descarga de 150 m (Tacke, 1988), Green & Carter (2025), fabricante de bombas de ariete, indica que los modelos pesados pueden bombear hasta 300 m.

El máximo caudal de descarga viene limitado por el diámetro de la bomba de ariete y del tubo de suministro. Las bombas de ariete comerciales solían fabricarse de 1" hasta 10" (Tacke, 1988), actualmente se ofrecen hasta 8" (Green & Carter, 2025), por ejemplo, la bomba Vulcan 8" puede bombear 3000 galones/hora (≈ 3 l/s)

Para el caso del PVC la altura de descarga es menor, dado su bajo módulo de elasticidad y rango de velocidad crítica menor, hasta 1.37 m/s en la presente tesis, experimentalmente se llegó a una altura máxima de 0.58*h_{max} (Figura 127), con un valor máximo de 44.8 m (q = 0). Respecto al caudal de descarga, el límite máximo en la tesis es de 5.79 l/min para la bomba de ariete de PVC 1".

Hadzich (s/f), sugiere utilizar F°G° en bombas de ariete de hasta 4", dado que abarata su fabricación. El modelo BAH 4", puede bombear hasta 38 l/min. Para diámetros mayores se utiliza tuberías de acero o hierro fundido.

Centro Las Gaviotas (2025), ofrecen bombas de F°G° de 1 ¼", con una caudal de descarga máximo de 8.4 l/min y alturas de descarga de hasta 100 m.

Anexo 14: Incertidumbres de experimentos preliminares

Hablar sobre el método GUM y la determinación de la incertidumbre típica combinada de las variables donde se requieran.

La determinación de incertidumbres se realiza en el experimento de la velocidad crítica (Ver Anexo 2.2) y el experimento de corrección de la carrera (ver Anexo 2.5).

Dado la incertidumbre en las mediciones realizadas, se determina el valor de la incertidumbre típica en las siguientes variables de los dos experimentos mencionados:

- Carrera de la válvula de impulso
- Velocidad media del flujo
- Coeficiente de arrastre.

14.1 Incertidumbre de la carrera de la válvula de impulso

14.1.1 Definición del mesurando

Variable: Carrera de la válvula de impulso S en mm, donde el cierre de la válvula por arrastre es inminente.

La carrera es la distancia de abertura entre el disco de la válvula de impulso y la plataforma de choque.

La medición de la carrera es indirecta, pues al ubicarse dentro de la caja de la válvula de impulso su medición directa no es factible, por lo que, la medición se realiza en la parte superior luego de mantener cerrada la válvula de impulso.

Al medir de esta manera, se observa que hay varios resultados según la posición donde se mida (Figura 142). Lo más razonable es considerar una carrera representativa. Esta carrera podría definirse como aquella que resulta del promedio de todas las carreras medibles alrededor del eje. Otra definición podría ser, la carrera que da un área equivalente al real por donde pasa el flujo de agua. Esta última es más apropiada.

Definición de variable: Es la longitud de la carrera que da un área lateral de cilindro equivalente al área lateral de tronco de cilindro real, por donde atraviesa el flujo de agua cuando el cierre de la válvula es inminente.

El área lateral de un cilindro de altura S_i y longitud de circunferencia L_C es:

$$A_L = L_c \times S_i$$

Considerando un tronco de cilindro el área lateral puede determinarse como

$$A_L = \frac{L_{C2} \times (S_{min} + S_{max})}{2}$$

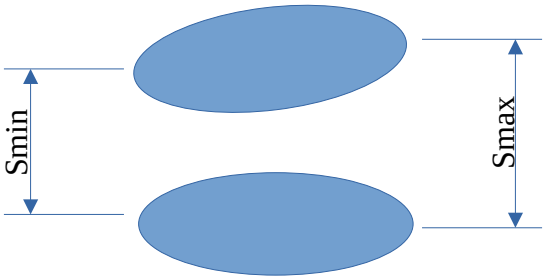
Dado que, el área lateral es la mitad de un cilindro completo de altura S_{min} + S_{max}

Considerando que la longitud de circunferencia L_C y L_{C2}, son prácticamente similares, tenemos que, la carrera representativa es:

$$S_i = \frac{(S_{min} + S_{max})}{2} \quad (117)$$

Figura 142

Medición de la carrera de la válvula de impulso



Corrección de la variable

Por otra parte, las mediciones de carrera del experimento de velocidad crítica (Anexo 2.2 tuvo un error sistemático por el instrumento de medición utilizado. Este error lo corregimos de la siguiente manera:

$$S = S_i + \text{corrección}$$

$$S = S_i + (m-1) S_i + C$$

$$S = m S_i + C \quad (118)$$

De la Ecuación 117 y 118, tenemos el modelo matemático de la carrera de la válvula de impulso:

$$S = m\left(\frac{S_{min} + S_{max}}{2}\right) + C \quad (119)$$

Donde, los coeficientes m y C, los obtenemos del método de mínimos cuadrados para lo cual se realizó un experimento adicional, la Tabla 212 es el reporte de regresión lineal.

Tabla 212

Reporte de regresión lineal

	m	***C***
Coeficientes	1.00128	0.1415
Error estándar	0.00090	0.0085
R^2 y $RMSE$	0.99993	0.0217
F y gl	1241202.17	84
$Ss_{regresión}$ y $SS_{residuo}$	585.78	0.0396

14.1.2 Identificar las fuentes de incertidumbre

Del modelo planteado en la Ecuación 119, podemos aplicar la ley de propagación de incertidumbres según la guía GUM (Comité Conjunto de Guías en Metrología [JCGM], 2008). Para esto consideramos que S_{min}, S_{max}, m y C son variables con sus respectivas incertidumbres, por tanto:

$$u_c^2(S)=\sum_{i=1}^{N}\left[\frac{\partial S}{\partial x_i}\right]^2 u^2(x_i) \tag{120}$$

Desarrollando la Ecuación 120:, tenemos la Ecuación 121:

$$u_c^2(S)=\left(\frac{\partial S}{\partial S_{min}}\right)^2 u^2(S_{min})+\left(\frac{\partial S}{\partial S_{max}}\right)^2 u^2(S_{max})+\left(\frac{\partial S}{\partial m}\right)^2 u^2(m)+\left(\frac{\partial S}{\partial C}\right)^2 u^2(C) \tag{121}$$

Desarrollamos las derivadas parciales de cada término y obtenemos:

- $\left(\frac{\partial S}{\partial S_{min}}\right)^2 u^2(S_{min})=\left(\frac{m}{2}\right)^2 u^2(S_{min})$
- $\left(\frac{\partial S}{\partial S_{max}}\right)^2 u^2(S_{max})=\left(\frac{m}{2}\right)^2 u^2(S_{max})$
- $\left(\frac{\partial S}{\partial m}\right)^2 u^2(m)=\left(\frac{S_{min}+S_{max}}{2}\right)^2 u^2(m)$
- $\left(\frac{\partial S}{\partial C}\right)^2 u^2(C)=u^2(C)$

Finalmente reemplazando en la Ecuación 121:

$$u_c^2(S)=\left(\frac{m}{2}\right)^2 u^2(S_{min})+\left(\frac{m}{2}\right)^2 u^2(S_{max})+\left(\frac{S_{min}+S_{max}}{2}\right)^2 u^2(m)+u^2(C) \quad (122)$$

Las incertidumbres de la carrera mínima S_{min} y una máxima S_{max}., tienen las incertidumbres de tipo B siguientes de calibración y de resolución del calibre utilizado.

La incertidumbre de los coeficientes m y C del modelo que corrige la carrera, tienen incertidumbres del procesos de estadístico de determinación de coeficientes de mínimos cuadrados. Estos se pueden ver en la Tabla 212 y son incertidumbres de tipo A:

Se realizaron diez repeticiones para cada carrera por lo que se tiene una incertidumbre adicional de tipo A.

Según lo indicado por la guía GUM (Comité Conjunto de Guías en Metrología [JCGM], 2008), definimos las distribuciones de probabilidad de cada tipo de incertidumbre. La calibración viene dada por el certificado así que no definimos una distribución de probabilidad. Para la resolución definimos una distribución rectangular. La corrección y dispersión tienen distribución normal y se expresan por el error estándar respectivo.

14.1.3 Calcular las incertidumbres

Calculamos la incertidumbre de cada fuente del Anexo 14.1.2, según la ley estadística que lo gobierna:

a. $u^2(S_{min})=u^2(S_{max})=u^2_{\text{calibración}}+u^2_{resolución}$ donde:

- $u^2_{calibración}=(81.53^2+0.01^2\times L^2)\,\mu\text{m}^2$, donde L = S_i, en mm (ver Anexo 17)
- $u^2_{resolución}=\frac{(\delta x)^2}{12}=\frac{(0.05\,\text{mm})^2}{12}$, donde δx = 0.05 mm es la resolución del calibre.

b. $u(m)$ y $u(C)$ son los errores estándar de los coeficientes de mínimos cuadrados (Tabla 212). Desarrollando la expresión tenemos:

$u^2(m)=(0.00090)^2$

$u^2(C)=(0.0085)^2$

c. $u^2_{dispersión}=\left(\frac{s}{\sqrt{n}}\right)^2$, donde $s^2/\sqrt{n}$ es el error estándar de la dispersión de S_i.

14.1.4 Combinar las incertidumbres

Reemplazamos las incertidumbres calculadas en la Ecuación 122 obtenemos:

$$u_c^2(S)=\left(\frac{m}{2}\right)^2\times 2\left(u^2_{\text{calibración}}+u^2_{\text{resolución}}\right)+\left(\frac{S_{min}+S_{max}}{2}\right)^2 u^2(m)+u^2(C)$$

$$u_c^2(S)=\left(\frac{1.00128}{2}\right)^2\times 2\left(\frac{81.53^2+0.01^2\times S_i^2}{10^6}+\frac{0.05^2}{12}\right)+\left(\frac{S_{min}+S_{max}}{2}\right)^2(0.00090)^2+(0.0085)^2$$

Luego, adicionamos la incertidumbre por medidas repetidas:

$$u(S)=\sqrt{u_c^2(S)+\left(\frac{s}{\sqrt{n}}\right)^2} \tag{123}$$

Por tanto la Ecuación 123, es incertidumbre típica combinada de la carrera de la válvula de impulso en el experimento de velocidad crítica Anexo 2.2.

Tabla 213

Carrera corregida e evaluación de la incertidumbre

Variable	S, mm	$u_c(S)$	$s/\sqrt{n}$	$u(S)$	$k*u(S)$
H_{min1}	4.87	0.059	0.0331	0.07	0.14
H_{min2}	5.55	0.059	0.0180	0.06	0.12
H_{min3}	6.17	0.059	0.0163	0.06	0.12
H_{min4}	6.92	0.060	0.0179	0.06	0.12
H_{min5}	8.52	0.060	0.0327	0.07	0.14
H_{min6}	10.23	0.060	0.0327	0.07	0.14
H_{min7}	11.81	0.060	0.0376	0.07	0.14

Nota: S media de la carrera corregida; k = 2 coeficiente de expansión.

14.1.5 Factor de cobertura e incertidumbre expandida

Aplicamos un factor de cobertura a la incertidumbre de la Ecuación Error: no se encontró el origen de la referencia. La Guía GUM, indica que debemos calcular, en función de los grados de libertad de cada componente de incertidumbre. En nuestro caso a fin de simplificar el proceso, utilizamos el factor de cobertura k = 2, el cual usamos referencialmente según la guía GUM (Comité Conjunto de Guías en Metrología [JCGM], 2008)

14.2 Velocidad media del flujo

Se realiza la determinación de la incertidumbre típica expandida de la velocidad media del flujo en el experimento de velocidad crítica del Anexo 2.2.

14.2.1 Definición del mesurando

Variable: Velocidad media del flujo en el momento de cierre inminente de la válvula de impulso producto del arrastre hidráulico.

La velocidad se mide de manera indirecta a partir del pesaje de un volumen de agua en un tiempo dado, entonces el modelo para la velocidad sería:

$$v = \frac{m}{\rho A t} \tag{124}$$

Donde:

- m, es la masa del fluido aforado en un tiempo t.
- ρ, es la densidad del agua a la temperatura de prueba T.
- A, es el área de la sección transversal interior del tubo de suministro.
- t, es el tiempo de duración del aforo del fluido.

14.2.2 Identificar las fuentes de incertidumbre

De la fórmula de propagación de la incertidumbre tenemos:

$$u_c^2(v) = \sum_{i=1}^{n} \left[\frac{\partial v}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) \tag{125}$$

Desarrollando a partir de la Ecuación 124 y 125 tenemos:

$$\left(\frac{u_c(v)}{v} \right)^2 = \left(\frac{u(m)}{m} \right)^2 + \left(\frac{u(\rho)}{\rho} \right)^2 + \left(\frac{u(A)}{A} \right)^2 + \left(\frac{u(t)}{t} \right)^2 \tag{126}$$

La Ecuación 126, incluye incertidumbres de cada variable:

- $u(m)$ incertidumbre de la masa
- $u(\rho)$ incertidumbre de la densidad
- $u(A)$ incertidumbre del área
- $u(t)$ incertidumbre del tiempo

14.2.3 Calcular las incertidumbres

Calculamos cada una de las incertidumbres identificadas previamente.

14.2.3.1 Incertidumbre de la masa

La incertidumbre cuadrática de la masa $u^2(m)$ se desarrolla en la Tabla 214. La expresión final de la incertidumbre típica cuadrática se expresa con la fórmula siguiente:

$$u_c^2(m)=\left[n\times\frac{(0.001\,\text{kg})^2}{12}\right]+\left[n\times(5.82\times10^{-7})\,\text{kg}^2+1.49\times10^{-8}\sum_{i=1}^{n}(m_i^2)\,\text{kg}^2\right] \quad (127)$$

Tabla 214

Incertidumbre de la masa

Pasos	Desarrollo
Definición	Masa del volumen de agua que se recolecta en recipientes sucesivos en un tiempo dado. Modelo: $m=m_1+m_2+m_3-m_{R1}-m_{R2}-m_{R3}$ Donde, m es la masa del volumen de agua, m_i son las masas totales y m_{Ri} la masa de los recipientes.
Identificación	Resolución de la balanza (Tipo B) Calibración de la balanza (Tipo B) Otras fuentes (pérdidas durante aforo, viento, 3700 m.s.n.m., temperatura variable)
Cálculo de incertidumbres	Fórmula de propagación: $u_c^2(m)=\sum_{i=1}^{n}\left[\frac{\partial m}{\partial m_i}\right]^2u^2(m_i)$ Desarrollando: $u_c^2(m)=\sum_{i=1}^{n}[1]^2u^2(m_i)=\sum_{i=1}^{n}u^2(m_i)$ La incertidumbre de cada masa es distinta por lo que la sumatoria no se desarrolla aún. Los componentes de la incertidumbre de la masa son: $u^2(m_i)=u^2_{resolución}+u^2_{calibración}$ De la **resolución** de la balanza 0.001 kg y considerando una distribución rectangular (ítem 4.3.7 de la guía GUM) $u^2_{resolución}=\frac{(0.001\,\text{kg})^2}{12}$ Del certificado de **calibración** (Anexo 17), la incertidumbre típica cuadrática es: $u^2_{calibración}=(5.82\times10^{-7}+1.49\times10^{-8}m_i^2)\,\text{kg}^2$
Combinar incertidumbres	La incertidumbre combinada final será $u_c^2(m)=\sum_{i=1}^{n}u^2(m_i)=\sum_{i=1}^{n}[u^2_{resolución}+u^2_{calibración}]=n\times u^2_{resolución}+\sum_{i=1}^{n}u^2_{calibración}$ Reemplazando la expresión de incertidumbres: $u_c^2(m)=n\times\frac{(0.001)^2}{12}+\sum_{i=1}^{n}(5.82\times10^{-7}+1.49\times10^{-8}m_i^2)$ Desarrollando obtenemos:

Pasos	Desarrollo
	$u_c^2(m)=\left[n\times\frac{(0.001\,\mathrm{kg})^2}{12}\right]+\left[n\times(5.82\times10^{-7})\,\mathrm{kg}^2+1.49\times10^{-8}\sum_{i=1}^{n}(m_i^2)\,\mathrm{kg}^2\right]$ (128) Donde: n es la cantidad de mediciones realizadas para determinar la masa m; m_i es la i-ésima masa medida.

14.2.3.2 Incertidumbre de la densidad

Se estima la densidad a partir de un modelo polinomial. El modelo es de tercer grado y se basó en datos de densidad y temperatura de los libros de física Pashkov & Dolqachev (1985), Giles (1987) y Saldarriaga (1998). El modelo tiene la siguiente forma:

$$\rho=F(T)=AT^3+BT^2+CT+D \quad (129)$$

Donde, A = 5.294 × 10^{-5}, B = - 0.008261, C = 0.06135, D = 999.882, son los coeficientes estimados mediante el método de mínimos cuadrados (Ver Tabla 215)

Tabla 215

Reporte de regresión lineal

	T³	T²	T	1
Coeficientes	5.294E-05	-0.00826	0.06135	999.88
Error estándar	3.652E-06	0.000168	0.00210	0.00619
R^2 y $RMSE$	0.99999	0.00700	-	-
F y gl	130231.8	5	-	-
$Ss_{regresión}$ y $SS_{residuo}$	19.164	0.000245	-	-

Aplicando la fórmula de propagación de incertidumbre, tenemos que:

$$u_c^2(\rho)=\sum_{i=1}^{n}\left[\frac{\partial\rho}{\partial x_i}\right]^2u^2(x_i)$$

Ampliando la suma, tenemos los siguientes componentes de incertidumbre:

$$u_c^2(\rho)=\left(\frac{\partial\rho}{\partial A}\right)^2u^2(A)+\left(\frac{\partial\rho}{\partial B}\right)^2u^2(B)+\left(\frac{\partial\rho}{\partial C}\right)^2u^2(C)\left(\frac{\partial\rho}{\partial D}\right)^2u^2(D)+\left(\frac{\partial\rho}{\partial T}\right)^2u^2(T)+SE^2 \quad (130)$$

Donde, SE es el error estándar de la regresión y $u^2(T)$ es la incertidumbre de la temperatura. Desarrollando cada derivada y su respectiva incertidumbre:

- $\left(\frac{\partial\rho}{\partial A}\right)^2u^2(A)=[T^3]^2\times[3.652\times10^{-6}]^2$

- $\left(\frac{\partial \rho}{\partial B}\right)^2 u^2(B)=[T^2]^2\times[0.000168]^2$
- $\left(\frac{\partial \rho}{\partial C}\right)^2 u^2(C)=[T]^2\times[0.00210]^2$
- $\left(\frac{\partial \rho}{\partial D}\right)^2 u^2(D)=[0.00619]^2$
- $\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)^2 u^2(T)=\left[3AT^2+2BT+C\right]^2\times\left[\frac{(T_{final}-T_{inicial})^2}{12}+\frac{(0.1\,°\mathrm{C})^2}{12}+\left(\frac{0.11\,°\mathrm{C}}{2}\right)^2\right]$
- $SE^2=[0.007]^2$

La incertidumbre cuadrática de la temperatura $u^2(T)$ se desarrolla en la Tabla 216.

Reemplazando estos valores en la Ecuación 130, se obtiene:

$$u_c^2(\rho)=[T^3]^2\times[3.652\times10^{-6}]^2+[T^2]^2\times[0.000168]^2+[T]^2\times[0.00210]^2+[0.00619]^2+$$

$$\left[3AT^2+2BT+C\right]^2\times\left[\frac{(T_{final}-T_{inicial})^2}{12}+\frac{(0.1\,°\mathrm{C})^2}{12}+\left(\frac{0.11\,°\mathrm{C}}{2}\right)^2\right]+[0.007]^2 \qquad (131)$$

Tabla 216

Incertidumbre de la temperatura

Pasos	Desarrollo
Definición	Temperatura media durante la prueba experimental. Modelo: $T=\frac{(T_{\text{inicial}}+T_{\text{final}})}{2}$ Donde, $T_{inicial}$ es la temperatura al inicio de la prueba y T_{final} al final.
Identificación	Temperatura con valor máximo y mínimo conocido (Tipo B) Resolución del termómetro (Tipo B) Calibración del termómetro (Tipo B)
Cálculo de incertidumbres	Considerando una distribución rectangular: $u_{B1}^2(T)=\frac{(T_{\text{inicial}}+T_{\text{final}})^2}{12}$ Los otros componentes de incertidumbre de la temperatura son: $u_{B2}^2(T)=u_{resolución}^2+u_{calibración}^2$ - De la **resolución** del termómetro es 0.1 °C y considerando una distribución rectangular (ítem 4.3.7 de la guía GUM): $u_{resolución}^2=\frac{(0.1\,°\mathrm{C})^2}{12}$ - Del certificado de **calibración** (Anexo 17), la incertidumbre expandida es 0.11 °C (factor de cobertura k = 2). La incertidumbre típica es de 0.11/2 = 0.055 °C: $u_{calibración}^2=\left(\frac{0.11\,°\mathrm{C}}{2}\right)^2$

Pasos	Desarrollo
Combinar incertidumbres	La incertidumbre combinada final será $u_c^2(T)=u_{B1}^2+u_{B2}^2$ $u_c^2(T)=\frac{(T_{\text{inicial}}+T_{\text{final}})^2}{12}+\frac{(0.1\,°\text{C})^2}{12}+\left(\frac{0.11\,°\text{C}}{2}\right)^2$ (132)

14.2.3.3 Incertidumbre del área

La Tabla 217 muestra el análisis de incertidumbre del área de la sección transversal de la tubería. La expresión final de la incertidumbre típica cuadrática se expresa con la fórmula siguiente:

$$u_c^2(A)=\left[\frac{\pi}{2}\times D_{interior}\right]^2\times\left[\frac{s^2}{n}+\frac{(0.01\,\text{mm})^2}{12}+\frac{(24.79^2+0.01^2\,D_{interior}^2)}{10^6}\,\text{mm}^2\right] \quad (133)$$

Donde: n es la cantidad de mediciones; $D_{interior}$ es diámetro promedio.

Tabla 217

Incertidumbre del área.

Pasos	Desarrollo
Definición	Es el área de la sección transversal interior del tubo de suministro por donde atraviesa el agua. Modelo: $A=\frac{\pi}{4}D_{interior}^2$ Donde $D_{interior}$ es el diámetro interior promedio de la tubería de suministro en m. El diámetro interior se puede expresar mediante la siguiente modelo: Modelo: $D_{interior}=\frac{1}{p}\sum_{j=1}^{p}D_j$ Donde D_j corresponde a una medición de diámetro interior con calibre en la posición j; p la cantidad total de posiciones angulares medidas.
Identificación	Repetición de medición (Tipo A) Resolución del pie de rey (Tipo B) Calibración del pie de rey (Tipo B)
Cálculo de incertidumbres	**Para el caso del área de la sección transversal** - De la fórmula de propagación: $u_c^2(A)=\left[\frac{\partial A}{\partial D_{interior}}\right]^2 u^2(D_{interior})$ - Desarrollando: $u_c^2(A)=\left[\frac{\pi}{4}\times 2\,D_{interior}\right]^2 u^2(D_{interior})$ - Por tanto: $u_c^2(A)=\left[\frac{\pi}{2}D_{interior}\right]^2 u^2(D_{interior})$ (134) **Para el caso del diámetro interior** - Incertidumbre tipo A: $u_A^2(D_{interior})=\frac{s^2}{n}$, donde s es la desviación estándar de la muestra, n es la cantidad de mediciones de diámetro interior realizadas (p = n).

Pasos	Desarrollo
	- Incertidumbre tipo B: $u_B^2(D_{interior}) = u_{resolución}^2 + u_{calibración}^2$, donde: - De la **resolución** del pie de rey 0.01 mm, considerando una distribución rectangular (ítem 4.3.7 de la guía GUM) $u_{resolución}^2 = \frac{(0.01\,\text{mm})^2}{12}$ - Del certificado de **calibración** (Anexo 17) $u_{calibración}^2 = (24.79^2 + 0.01^2 L^2)\,\mu\text{m}^2$, Donde, $L = D_{interior}$, en mm.
Combinar incertidumbres	De la Ecuación 134 y la incertidumbre del diámetro: $u_c^2(A) = \left[\frac{\pi}{2} \times D_{interior}\right]^2 \times \left[\frac{s^2}{n} + u_{resolución}^2 + u_{calibración}^2\right]$ Reemplazando las fuentes de incertidumbre: $u_c^2(A) = \left[\frac{\pi}{2} \times D_{interior}\right]^2 \times \left[\frac{s^2}{n} + \frac{(0.01\,\text{mm})^2}{12} + \frac{(24.79^2 + 0.01^2 D_{interior}^2)}{10^6}\,\text{mm}^2\right]$ (135)

14.2.3.4 Incertidumbre del tiempo

La Tabla 218 muestra el análisis de incertidumbre del tiempo. La expresión final de la incertidumbre típica cuadrática se expresa con la fórmula siguiente:

$$u^2(t_{aforo}) = \left[\frac{(0.01\,\text{s})^2}{12}\right] \quad (136)$$

Tabla 218

Incertidumbre del tiempo

Pasos	Desarrollo
Definición	Tiempo desde la apertura de la válvula de aforo hasta su cierre. Modelo: $t = t_{aforo}$
Identificación	Resolución del cronómetro (Tipo B)
Cálculo de incertidumbres	La incertidumbre del tiempo de aforo será: $u^2(t_{aforo}) = u_{resolución}^2$ De la resolución del cronómetro 0.01 s y considerando una distribución rectangular (ítem 4.3.7 de la guía GUM) $u_{resolución}^2 = \frac{(0.01\,\text{s})^2}{12}$
Combinar incertidumbres	La incertidumbre combinada final será $u^2(t_{aforo}) = \left[\frac{(0.01\,\text{s})^2}{12}\right]$ (137)

14.2.4 Combinar las incertidumbres

Reemplazamos las ecuaciones 127, 130, 133 y 136, en la Ecuación 126, y obtendremos la incertidumbre típica combinada para la velocidad, en su forma relativa:

$$\left(\frac{u_c(v)}{v}\right)^2=\left(\frac{u(m)}{m}\right)^2+\left(\frac{u(\rho)}{\rho}\right)^2+\left(\frac{u(A)}{A}\right)^2+\left(\frac{u(t)}{t}\right)^2 \quad (138)$$

En la Tabla 219, se observa que la incertidumbre relativa respecto al área es la que contribuye más en la incertidumbre total, esto dado que tiene una contribución de incertidumbre tipo A (ver Tabla 217).

Tabla 219

Determinación de la incertidumbre de la velocidad

Variable 1	Promedio - $(u(m)/m)^2$	Promedio - $(u(\rho)/\rho)^2$	Promedio - $(u(A)/A)^2$	Promedio - $(u(t)/t)^2$
H_{min1}	1.17E-08	3.04E-09	1.21E-05	2.30E-09
H_{min2}	1.09E-08	3.24E-09	1.21E-05	2.30E-09
H_{min3}	1.06E-08	3.00E-09	1.21E-05	2.30E-09
H_{min4}	1.02E-08	3.25E-09	1.21E-05	2.30E-09
H_{min5}	1.03E-08	3.31E-09	1.21E-05	2.30E-09
H_{min6}	9.36E-09	3.10E-09	1.21E-05	2.30E-09
H_{min7}	8.21E-09	3.33E-09	1.21E-05	2.30E-09

Dado que el experimento cuenta con repeticiones para la velocidad, adicionamos un término de incertidumbre tipo A, por tanto a expresión final de incertidumbre típica expandida sería .

$$u(v)=\sqrt{\left(\frac{u_c(v)}{v}\right)^2\times v^2+\left(\frac{s}{\sqrt{n}}\right)^2} \quad (139)$$

Donde, $s/\sqrt{n}$, es la incertidumbre tipo A o error estándar de medidas repetidas.

14.2.5 Factor de cobertura e incertidumbre expandida

Aplicamos un factor de cobertura a la incertidumbre de la Ecuación 139. La Guía GUM, indica que debemos calcular, en función de los grados de libertad de cada componente de incertidumbre. En nuestro caso a fin de simplificar el proceso, utilizamos el factor de cobertura k = 2, el cual usamos referencialmente según la guía GUM (Comité Conjunto de Guías en Metrología [JCGM], 2008)

La última columna de la Tabla 220 representa la incertidumbre expandida para cada valor de velocidad del experimento de velocidad crítica del Anexo 2.2.

Tabla 220

Incertidumbre típica expandida de la velocidad

Variable	v, m/s	$s/\sqrt{n}$, m/s	$(u_c^2(v)/v)^2$	$u_c^2(v) + (s/\sqrt{n})^2$	$u(v)$	$k^*u(v)$
H_{min1}	0.885	0.00093	1.21E-05	1.03E-05	0.0032	0.006
H_{min2}	0.970	0.00063	1.21E-05	1.18E-05	0.0034	0.007
H_{min3}	1.043	0.00088	1.21E-05	1.39E-05	0.0037	0.007
H_{min4}	1.114	0.00134	1.21E-05	1.68E-05	0.0041	0.008
H_{min5}	1.243	0.00086	1.21E-05	1.94E-05	0.0044	0.009
H_{min6}	1.365	0.00103	1.21E-05	2.36E-05	0.0049	0.010
H_{min7}	1.478	0.00058	1.21E-05	2.67E-05	0.0052	0.010

Nota: v media de la velocidad; $s/\sqrt{n}$ error estándar; k = 2 coeficiente de expansión.

14.3 Incertidumbre del coeficiente de arrastre Kd.

14.3.1 Definición del mesurando

El experimento de la velocidad crítica también sirve para determinar el coeficiente de arrastre el cual se expresa con el siguiente modelo:

Coeficiente de arrastre: Es un coeficiente adimensional proveniente de la definición de la fuerza de arrastre o arrastre total (Sotelo Ávila, 1997). Para su cálculo utilizamos la expresión deducida en el ítem 1.2.2.2.

$$K_d = \frac{m \times g}{\rho_{H2O} \times v_1^2 \times A_{disco}} \tag{140}$$

Donde:

- m, es la masa del eje vertical móvil de la válvula de impulso.
- g, es la aceleración de la gravedad estándar.
- ρ, es la densidad del agua a una temperatura T.
- v_1, es la velocidad en el momento de inicio de cierre de la válvula de impulso.
- A_{disc}, es el área del disco de la válvula de impulso.

14.3.2 Identificación de fuentes de incertidumbre

De la ley de propagación de la incertidumbre:

$$u_c^2(Kd) = \sum_{i=1}^{N} \left[\frac{\partial Kd}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i)$$

Desarrollando la expresión en función de la Ecuación 140 obtenemos:

$$\left(\frac{u_c(Kd)}{Kd}\right)^2=\left(\frac{u(m)}{m}\right)^2+\left(\frac{u(\rho)}{\rho}\right)^2+\left(2\frac{u(v_1)}{v_1}\right)^2+\left(\frac{u(A_{disc})}{A_{disc}}\right)^2 \quad (141)$$

Las tres primeras incertidumbres relativas se determinaron en el ítem 14.2. En la Tabla 221 determinamos la incertidumbre de la variable A_{disc}.

14.3.3 Calcular las incertidumbres

La Tabla 221 muestra el análisis de incertidumbre del área del disco. La expresión final de la incertidumbre típica cuadrática se expresa con la fórmula siguiente:

$$u_c^2(A)=\left[\frac{\pi}{2}\times D_{disc}\right]^2\times\left[\frac{s^2}{n}+\frac{(0.01\,\text{mm})^2}{12}+\frac{(24.79^2+0.01^2 D_{disc}^2)}{10^6}\text{mm}^2\right] \quad (142)$$

Donde: n es la cantidad de mediciones; D_{disc} es diámetro promedio del disco.

Tabla 221

Incertidumbre del área de disco.

Pasos	Desarrollo
Definición	Es el área que proyecta el disco sobre una sección perpendicular a la velocidad de flujo. Se considera que el eje vertical de la válvula de impulso se encuentra en dirección al flujo, por consiguiente el área proyectada será equivalente al área del disco. El área del disco sigue el siguiente modelo: $A=\frac{\pi}{4}D_{disc}$ Donde D_{disc} , es el diámetro medio del disco en m y sigue el siguiente modelo: $D_{disc}=\frac{1}{p}\sum_{j=1}^{p}D_j$ Donde D_j corresponde a una medición de diámetro de disco con calibre en la posición j; p la cantidad total de posiciones angulares medidas.
Identificación	Repetición de medición (Tipo A) Resolución del pie de rey (Tipo B) Calibración del pie de rey (Tipo B)
Cálculo de incertidumbres	**Para el caso del área de la sección transversal** - De la fórmula de propagación: $u_c^2(A)=\left[\frac{\partial A}{\partial D_{disc}}\right]^2 u^2(D_{disc})$ - Desarrollando: $u_c^2(A)=\left[\frac{\pi}{4}\times 2\,D_{disc}\right]^2 u^2(D_{disc})$ - Por tanto: $u_c^2(A)=\left[\frac{\pi}{2}D_{disc}\right]^2 u^2(D_{disc})$ (143) **Para el caso del diámetro interior** - Incertidumbre tipo A: $u_A^2(D_{disc})=\frac{s^2}{n}$, donde s es la desviación estándar de la muestra, n es la cantidad de mediciones de diámetro interior realizadas (p = n).

Pasos	Desarrollo
	- Incertidumbre tipo B: $u_B^2(D_{disc}) = u_{resolución}^2 + u_{calibración}^2$, donde: - De la **resolución** del pie de rey 0.01 mm, considerando una distribución rectangular (ítem 4.3.7 de la guía GUM) $u_{resolución}^2 = \frac{(0.01\,\text{mm})^2}{12}$ - Del certificado de **calibración** (Anexo 17) $u_{calibración}^2 = (24.79^2 + 0.01^2 L^2)\,\mu\text{m}^2$, Donde, $L = D_{disc}$, en mm.
Combinar incertidumbres	De la Ecuación 143 y la incertidumbre del diámetro: $u_c^2(A) = \left[\frac{\pi}{2} \times D_{disc}\right]^2 \times \left[\frac{s^2}{n} + u_{resolución}^2 + u_{calibración}^2\right]$ Reemplazando las fuentes de incertidumbre: $u_c^2(A) = \left[\frac{\pi}{2} \times D_{disc}\right]^2 \times \left[\frac{s^2}{n} + \frac{(0.01\,\text{mm})^2}{12} + \frac{(24.79^2 + 0.01^2 D_{disc}^2)}{10^6}\,\text{mm}^2\right]$ (144)

14.3.4 Combinar las incertidumbres

Reemplazamos las ecuaciones 127, 130, 136 y 142, en la Ecuación 141, y obtendremos la incertidumbre típica combinada para el coeficiente de arrastre, en su forma relativa:

$$\left(\frac{u_c(Kd)}{Kd}\right)^2 = \left(\frac{u(m)}{m}\right)^2 + \left(\frac{u(\rho)}{\rho}\right)^2 + 4 \times \left(\frac{u(v_1)}{v_1}\right)^2 + \left(\frac{u(A_{disc})}{A_{disc}}\right)^2 \quad (145)$$

En la Tabla 222, se observa que la incertidumbre relativa respecto a la velocidad es la que contribuye más en la incertidumbre total.

Tabla 222

Determinación de la incertidumbre de la velocidad

Variable 1	Promedio - $(u(m)/m)^2$	Promedio - $(u(\rho)/\rho)^2$	Promedio - $(u(v_1)/v_1)^2$	Promedio - $(u(A_{disc})/A_{disc})^2$
H_{min1}	1.17E-08	3.04E-09	1.21E-05	2.18E-06
H_{min2}	1.09E-08	3.24E-09	1.21E-05	2.18E-06
H_{min3}	1.06E-08	3.00E-09	1.21E-05	2.18E-06
H_{min4}	1.02E-08	3.25E-09	1.21E-05	2.18E-06
H_{min5}	1.03E-08	3.31E-09	1.21E-05	2.18E-06
H_{min6}	9.36E-09	3.10E-09	1.21E-05	2.18E-06
H_{min7}	8.21E-09	3.33E-09	1.21E-05	2.18E-06

Dado que el experimento cuenta con repeticiones para el coeficiente de arrastre, adicionamos un término de incertidumbre tipo A, por tanto a expresión final de incertidumbre típica expandida sería .

$$u(Kd)=\sqrt{\left(\frac{u_c(Kd)}{Kd}\right)^2\times Kd^2+\left(\frac{s}{\sqrt{n}}\right)^2} \quad (146)$$

Donde, $s/\sqrt{n}$, es la incertidumbre tipo A o error estándar de medidas repetidas.

14.3.5 Factor de cobertura e incertidumbre expandida

Aplicamos un factor de cobertura a la incertidumbre de la Ecuación 146. La Guía GUM, indica que debemos calcular, en función de los grados de libertad de cada componente de incertidumbre. En nuestro caso a fin de simplificar el proceso, utilizamos el factor de cobertura k = 2, el cual usamos referencialmente según la guía GUM (Comité Conjunto de Guías en Metrología [JCGM], 2008)

La última columna de la Tabla 223 representa la incertidumbre expandida para cada valor de velocidad del experimento de velocidad crítica del Anexo 2.2.

Tabla 223

Incertidumbre típica expandida de la velocidad

Variable	K_d	$s/\sqrt{n}$	$(u_c^2(K_d)/K_d)^2$	$u(Kd)$	$k^*u(K_d)$
H_{min1}	1.8338	0.0038	5.05E-05	0.014	0.027
H_{min2}	1.5261	0.0019	5.05E-05	0.011	0.022
H_{min3}	1.3199	0.0022	5.05E-05	0.010	0.019
H_{min4}	1.1573	0.0027	5.05E-05	0.009	0.017
H_{min5}	0.9294	0.0013	5.05E-05	0.007	0.013
H_{min6}	0.7710	0.0011	5.05E-05	0.006	0.011
H_{min7}	0.6576	0.0005	5.05E-05	0.005	0.009

Nota: Kd media del coeficiente de arrastre; $s/\sqrt{n}$ error estándar; k = 2 coeficiente de expansión.

Anexo 15: Aspectos constructivos de la cámara de aire y válvula de impulso

15.1 Cámara *de aire*

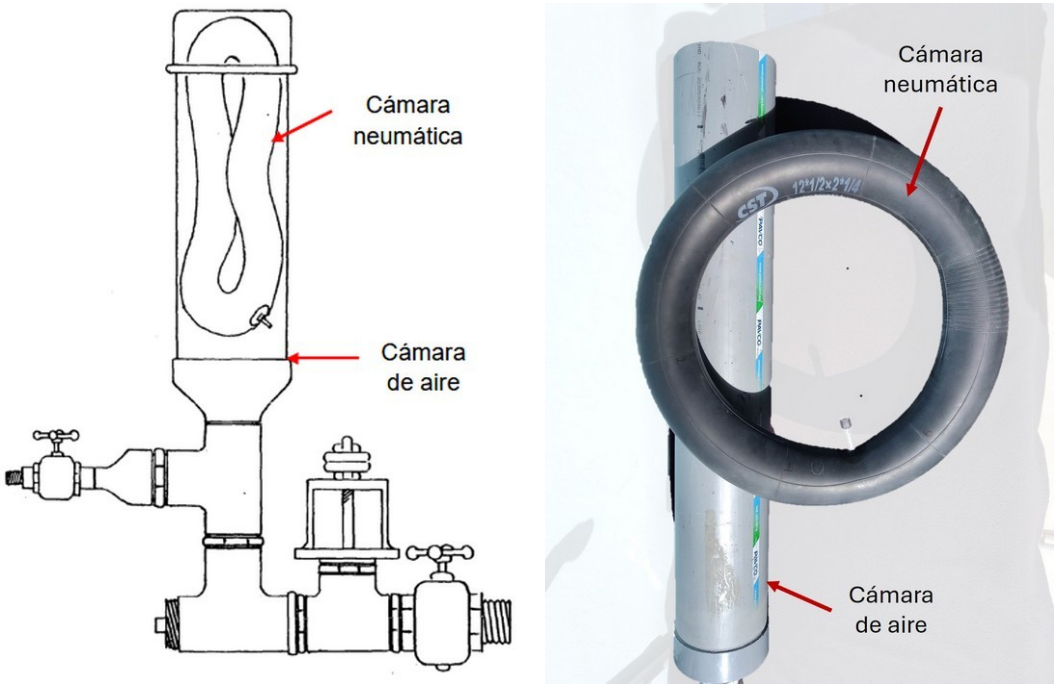
Permite mantener un flujo constante así como regular los cambios drásticos de presión. En el Capítulo 2.1.2.4, se describe algunas consideraciones acerca del volumen de la cámara de aire.

Para su adecuado funcionamiento, la cámara de aire requiere mantener un volumen de aire en su interior. Para conseguir esto, se ha introducido una cámara neumática en el interior de la cámara de aire.

La cámara de aire es un tubo de PVC de 4” (Dint = 102.1 mm, s = 0.80, n = 6) de 60 cm de longitud de norma NTP 399.003 : 2015. El volumen de la cámara es de 4.9 litros. La cámara neumática es de 12” con un volumen interior aproximado de 2.2 litros. La Figura 143 muestra la cámara de aire y cámara neumática utilizadas.

Figura 143

Cámara de aire y cámara neumática.



Nota. Izquierda imagen referencial adaptado de Silver (1977)

15.2 Válvula *de impulso*

Hemos hablado de la válvula de impulso en diferentes ítems del presente trabajo, empezamos con la teoría en el Capítulo 2.1.2.2.2, luego se calculó sus principales parámetros como son el coeficiente de pérdidas locales (Anexo 2.1) y el coeficiente de arrastre (Anexo 2.2), por último en el Anexo 14, se estudió la propagación de incertidumbres en el experimento de velocidad crítica.

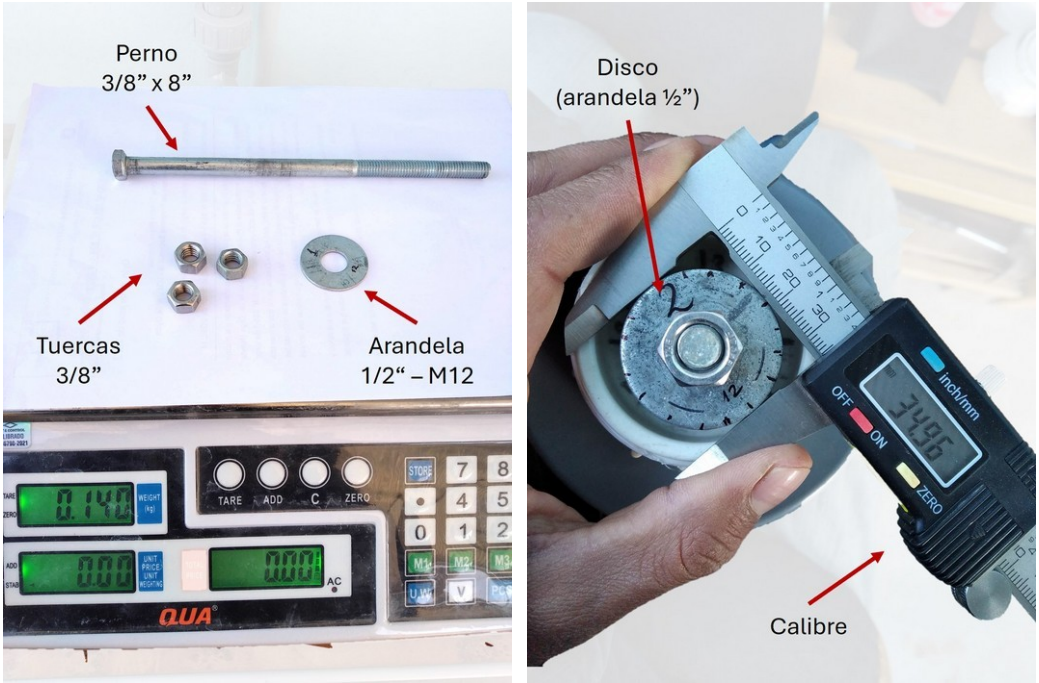
Vamos a detallar algunos aspectos constructivos de la válvula de impulso,

Masa del eje vertical móvil: El eje vertical esta constituido por un perno de ⅜" x 8", tres tuercas y una arandela de ½". En conjunto pesan 141 g (s = 1 g, n = 3).

Área del disco: El disco de la válvula de impulso es una arandela o huacha de ½", su diámetro es de 35 mm (s = 0.05 mm, n = 3). El área del disco, lo calculamos a partir del diámetro de disco (D_{disc}): $A_{disc} = \pi D_{disc}^2/4$.

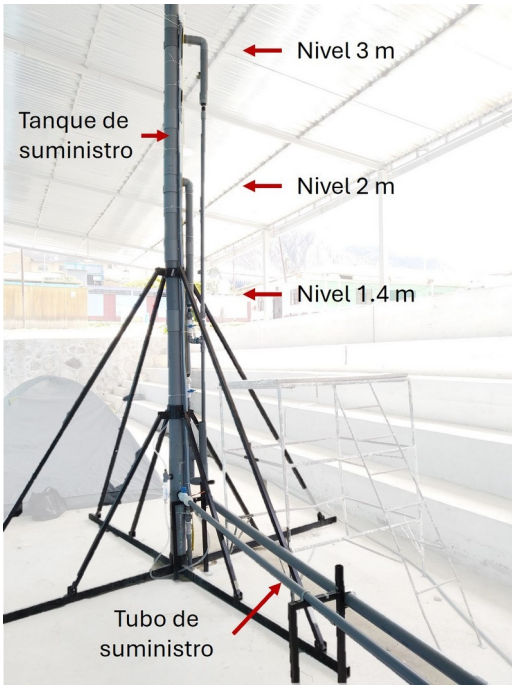
Figura 144

Medición de la masa del eje vertical móvil y diámetro del disco de la válvula de impulso



Anexo 16: Panel fotográfico

16.1 Variables independientes



Altura de suministro, H



Rebose a 2 m.



Tubo de suministro L y D



Altura de descarga h

16.2 Instrumentos de medición



Balanza



Termómetro

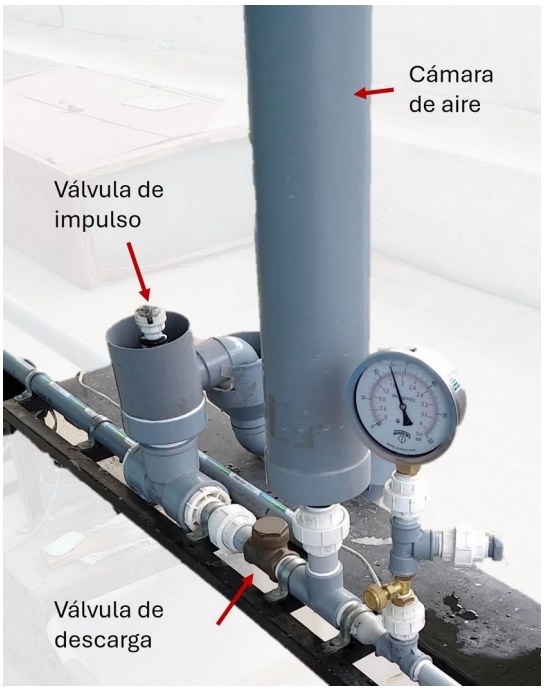


Contómetro



Cronómetros

16.3 Bomba de ariete y válvula de impulso



Bomba de ariete



Sistema de recolección

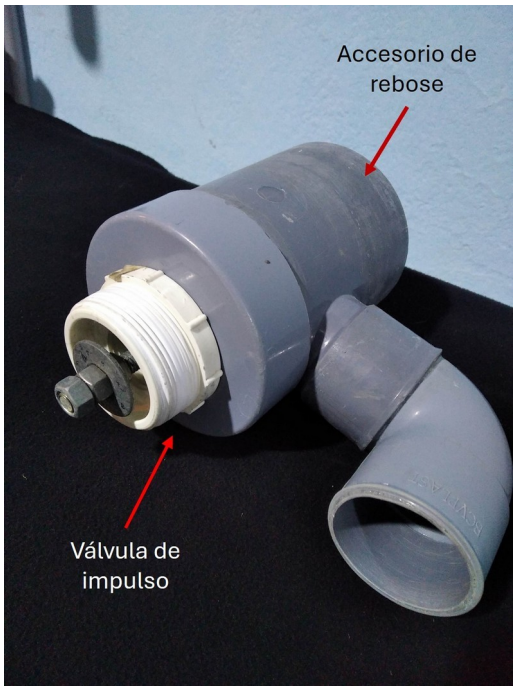


Válvula de impulso

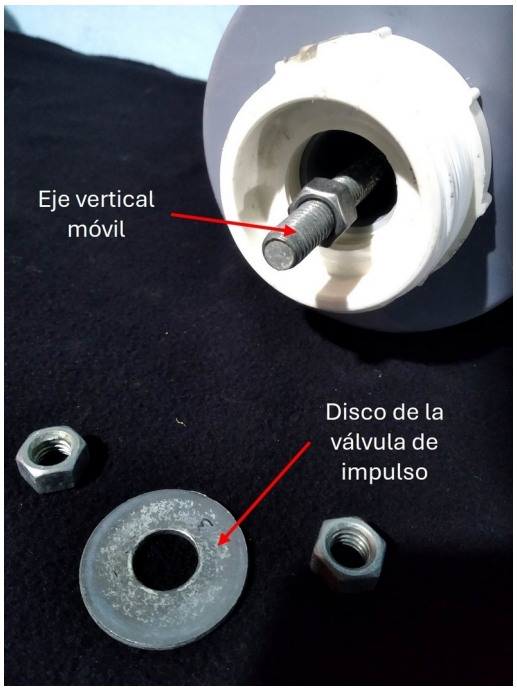


Partes de la válvula de impulso

16.4 Desmontaje de la válvula de impulso



Válvula de impulso



Partes del eje vertical

Anexo 17: Certificados de calibración de instrumentos de medición.

17.1 Manómetro 2 Bar

TEST & CONTROL

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN ACREDITADO POR EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA CON REGISTRO N° LC - 016

INACAL DA - Perú

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

TC-09895-2021

PROFORMA : 3726A Fecha de emisión: 2021-07-02

SOLICITANTE : ESTRADA HUAYTA FLEMING ERICK
DIRECCIÓN : CALLE DANIEL ALCIDES CARRIÓN MZ A1 LT1 ASENTAMIENTO HUMANO DANIEL ALCIDES CARRIÓN TERCERA ETAPA LIMA - LIMA - LOS OLIVOS

INSTRUMENTO DE MEDICIÓN :	**MANÓMETRO ANALÓGICO**
Marca	: WINTERS
Modelo	: No Indica
N° de Serie	: No Indica
Intervalo de Indicación	: 0,00 bar a 2,00 bar
Resolución	: 0,02 bar
N° de Parte	: No Indica
Identificación	: No Indica
Clase de Exactitud (1)	: 1
Ubicación	: No Indica
Fecha de Calibración	: 2021-07-01

LUGAR DE CALIBRACIÓN
Laboratorio de TEST & CONTROL S.A.C.

MÉTODO DE CALIBRACIÓN
La calibración de instrumentos de medición de presión relativa se basa en el método de comparación directa; el cual consiste en comparar la indicación del instrumento bajo calibración contra la indicación de presión de un patrón, ambos conectados en línea a una fuente de generación de presión según procedimiento PC-004 "Procedimiento para la calibración de instrumentos de medición de presión relativa con clase de exactitud igual o mayor a 0,05 %F.S.". Tercera Edición - Agosto 2019. DM-INACAL.

CONDICIONES AMBIENTALES

	Inicial	Final
Temperatura	20,3 °C	20,4 °C
Humedad Relativa	74,0 %	74,7 %
Presión Atmosférica	1 007,5 hPa	1 007,7 hPa

TEST & CONTROL S.A.C. es un Laboratorio de Calibración y Certificación de equipos de medición basado a la Norma Técnica Peruana ISO/IEC 17025.

TEST & CONTROL S.A.C. brinda los servicios de calibración de instrumentos de medición con los más altos estándares de calidad, garantizando la satisfacción de nuestros clientes.

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales o internacionales, de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Con el fin de asegurar la calidad de sus mediciones se le recomienda al usuario recalibrar sus instrumentos a intervalos apropiados.

Los resultados son válidos solamente para el ítem sometido a calibración, no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

TEST & CONTROL S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que puedan ocurrir después de su calibración debido a la mala manipulación de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración declarados en el presente documento.

El presente documento carece de valor sin firma y sello.

Lic. Nicolás Ramos Paucar
Gerente Técnico
CFP: 0316

Jr. Condesa de Lemos N°117
San Miguel, Lima
(01) 262 9536
(51) 988 901 065
informes@testcontrol.com.pe
www.testcontrol.com.pe

Certificado de Calibración
TC-09895-2021

TRAZABILIDAD

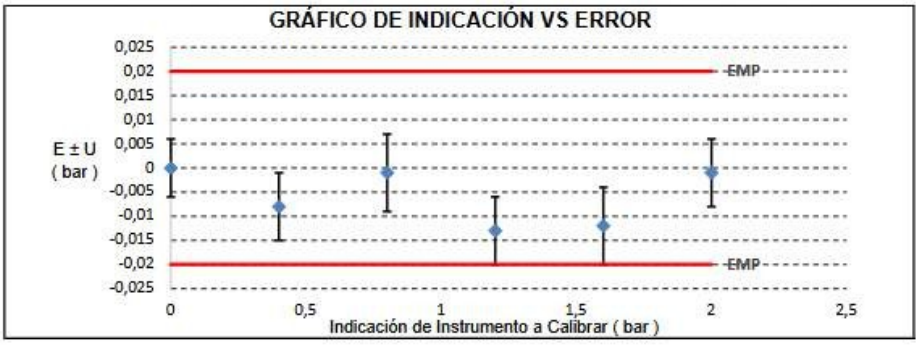
Trazabilidad	Patrón de Trabajo	Certificado de Calibración
Patrones de Referencia de Accredia	Manovacuómetro de -1 bar a 5 bar Clase de Exactitud 0,05	LAT-093 114021 Abril 2021

RESULTADOS DE MEDICIÓN

Indicación del Instrumento a Calibrar		Error de Indicación E	Error de Histéresis	Incertidumbre U
(kPa)	(bar)	(bar)	(bar)	(bar)
0	0,00	0,000	0,000	0,006
40	0,40	-0,008	0,002	0,007
80	0,80	-0,001	0,003	0,008
120	1,20	-0,013	0,003	0,007
160	1,60	-0,012	0,004	0,008
200	2,00	-0,001	0,002	0,007

Máximo Error Absoluto de Indicación:	0,013	bar
Máximo Error Absoluto de Histéresis:	0,004	bar

El error máximo permitido para el manómetro de 0,00 bar a 2,00 bar de clase de exactitud 1 es de ± 0,02 bar.



OBSERVACIONES
Para una mejor aproximación del instrumento bajo calibración, se subdividió la resolución en 2 partes.
Con fines de identificación de la calibración se colocó una etiqueta autoadhesiva con el número de certificado.
[1] Calculado según la OIML R101, Edición 1991.

INCERTIDUMBRE
La incertidumbre expandida que resulta de multiplicar la incertidumbre típica combinada por el factor de cobertura k=2 que, para una distribución normal, corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95%.

FIN DEL DOCUMENTO

Jr. Condesa de Lemos N°117
San Miguel, Lima
(01) 262 9536
(51) 988 901 065
informes@testcontrol.com.pe
www.testcontrol.com.pe

17.2 Manómetro 30 psi.

TEST & CONTROL

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN ACREDITADO POR EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA CON REGISTRO N° LC - 016

INACAL DA - Perú

Certificado de Calibración

TC-16521-2023

Proforma : 20772A Fecha de emisión: 2023-08-24

Solicitante : **ESTRADA HUAYTA FLEMING ERICK**
Dirección : Calle Daniel Alcides Carrión Mz A1 Lt1 Asentamiento Humano Daniel Alcides Carrión Tercera Etapa Lima - Lima - Los Olivos

Instrumento de medición	:	**Manómetro analógico**
Marca	:	WINTERS
Modelo	:	PFQ-ZR
N° de Serie	:	No indica
Intervalo de Indicación	:	0,0 psi a 30,0 psi
Resolución	:	0,2 psi
N° de Parte	:	No indica
Identificación	:	No indica
Clase de Exactitud	:	1,5
Ubicación	:	No indica
Fecha de Calibración	:	2023-08-22

Lugar de calibración
Laboratorio de TEST & CONTROL S.A.C.

Método de calibración
La calibración de instrumentos de medición de presión relativa se basa en el método de comparación directa; el cual consiste en comparar la indicación del instrumento bajo calibración contra la indicación de presión de un patrón, ambos conectados en línea a una fuente de generación de presión según procedimiento PC-004 "Procedimiento para la calibración de instrumentos de medición de presión relativa con clase de exactitud igual o mayor a 0,05 %F.S.". Tercera Edición - Agosto 2019. DM-INACAL.

Condiciones ambientales

	Inicial	Final
Temperatura	20,0 °C	20,1 °C
Humedad Relativa	56,5 %	55,6 %
Presión Atmosférica	1 002,9 hPa	1 002,7 hPa

TEST & CONTROL S.A.C. es un Laboratorio de Calibración y Certificación de equipos de medición basado a la Norma Técnica Peruana ISO/IEC 17025.

TEST & CONTROL S.A.C. brinda los servicios de calibración de instrumentos de medición con los más altos estándares de calidad, garantizando la satisfacción de nuestros clientes.

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales o internacionales, de acuerdo con el Sistema Internacionalde Unidades (SI).

Con el fin de asegurar la calidad de sus mediciones se le recomienda al usuario recalibrar sus instrumentos a intervalos apropiados.

Los resultados son válidos solamente para el ítem sometido a calibración, no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

TEST & CONTROL S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que puedan ocurrir después de su calibración debido a la mala manipulación de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración declarados en el presente documento.

El presente documento carece de valor sin firma y sello.

Lic. Nicolás Ramos Paucar
Gerente Técnico
CFP: 0316

Jr. Condesa de Lemos N°117
San Miguel, Lima
(01) 262 9536
(51) 988 901 065
informes@testcontrol.com.pe
www.testcontrol.com.pe

Certificado de Calibración
TC-16521-2023

Trazabilidad

Trazabilidad	Patrón de Trabajo	Certificado de Calibración
Patrón de Referencia del DM-INACAL	Manómetro Digital 0 bar a 5 bar Clase de Exactitud 0,05	LFP-215-2023 Julio 2023

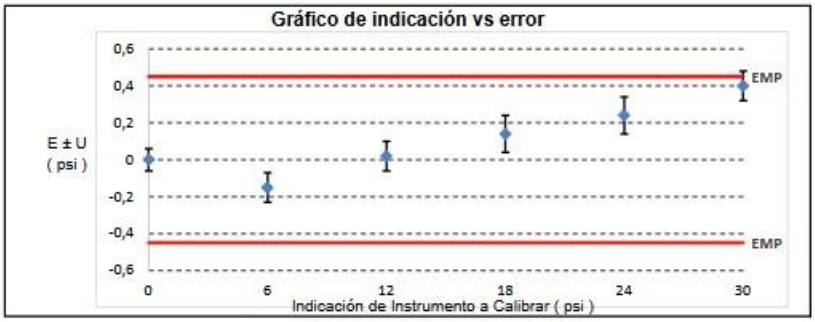
Resultados de medición

Indicación del Instrumento a Calibrar		Error de Indicación E	Error de Histéresis	Incertidumbre U
(kPa)	(psi)	(psi)	(psi)	(psi)
0	0,0	0,00	0,00	0,06
41	6,0	-0,15	0,04	0,08
83	12,0	0,02	0,04	0,08
124	18,0	0,14	0,06	0,10
165	24,0	0,24	0,06	0,10
207	30,0	0,40	0,04	0,08

Error de descenso = Error de medición + Histéresis

Máximo Error Absoluto de Indicación:	0,40	psi
Máximo Error Absoluto de Histéresis:	0,06	psi

El error máximo permitido para el manómetro de 0,0 psi a 30,0 psi de clase de exactitud 1,5 es de ± 0,45 psi.



Incertidumbre
La incertidumbre expandida que resulta de multiplicar la incertidumbre típica combinada por el factor de cobertura k=2 que, para una distribución normal, corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95%.

Observaciones
Para una mejor aproximación del instrumento bajo calibración, se subdividió la resolución en 2 partes.
Con fines de identificación de la calibración se colocó una etiqueta autoadhesiva con el número de certificado.

FIN DEL DOCUMENTO

Jr. Condesa de Lemos N°117
San Miguel, Lima
(01) 262 9536
(51) 988 901 065
informes@testcontrol.com.pe
www.testcontrol.com.pe

17.3 Manómetro 4.12 Bar

TEST & CONTROL

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN ACREDITADO POR EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA CON REGISTRO N° LC - 016

INACAL DA - Perú

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

TC-09894-2021

PROFORMA : 3726A Fecha de emisión: 2021-07-02

SOLICITANTE : ESTRADA HUAYTA FLEMING ERICK
DIRECCIÓN : CALLE DANIEL ALCIDES CARRIÓN MZ A1 LT1 ASENTAMIENTO HUMANO DANIEL ALCIDES CARRIÓN TERCERA ETAPA LIMA - LIMA - LOS OLIVOS

INSTRUMENTO DE MEDICIÓN :	**MANÓMETRO ANALÓGICO**
Marca	WINTERS
Modelo	No Indica
N° de Serie	No Indica
Intervalo de Indicación	0,00 bar a 4,12 bar
Resolución	0,04 bar
N° de Parte	No Indica
Identificación	No Indica
Clase de Exactitud (1)	1
Ubicación	No Indica
Fecha de Calibración	2021-07-01

LUGAR DE CALIBRACIÓN
Laboratorio de TEST & CONTROL S.A.C.

MÉTODO DE CALIBRACIÓN
La calibración de instrumentos de medición de presión relativa se basa en el método de comparación directa; el cual consiste en comparar la indicación del instrumento bajo calibración contra la indicación de presión de un patrón, ambos conectados en línea a una fuente de generación de presión según procedimiento PC-004 "Procedimiento para la calibración de instrumentos de medición de presión relativa con clase de exactitud igual o mayor a 0,05 %F.S.". Tercera Edición - Agosto 2019. DM-INACAL.

CONDICIONES AMBIENTALES

	Inicial	Final
Temperatura	20,2 °C	20,3 °C
Humedad Relativa	73,5 %	74,3 %
Presión Atmosférica	1 007,4 hPa	1 007,5 hPa

TEST & CONTROL S.A.C. es un Laboratorio de Calibración y Certificación de equipos de medición basado a la Norma Técnica Peruana ISO/IEC 17025.

TEST & CONTROL S.A.C. brinda los servicios de calibración de instrumentos de medición con los más altos estándares de calidad, garantizando la satisfacción de nuestros clientes.

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales o internacionales, de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Con el fin de asegurar la calidad de sus mediciones se le recomienda al usuario recalibrar sus instrumentos a intervalos apropiados.

Los resultados son válidos solamente para el ítem sometido a calibración, no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

TEST & CONTROL S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que puedan ocurrir después de su calibración debido a la mala manipulación de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración declarados en el presente documento.

El presente documento carece de valor sin firma y sello.

Lic. Nicolás Ramos Paucar
Gerente Técnico
CFP: 0316

Jr. Condesa de Lemos N°117
San Miguel, Lima
(01) 262 9536
(51) 988 901 065
informes@testcontrol.com.pe
www.testcontrol.com.pe

Certificado de Calibración
TC-09894-2021

TRAZABILIDAD

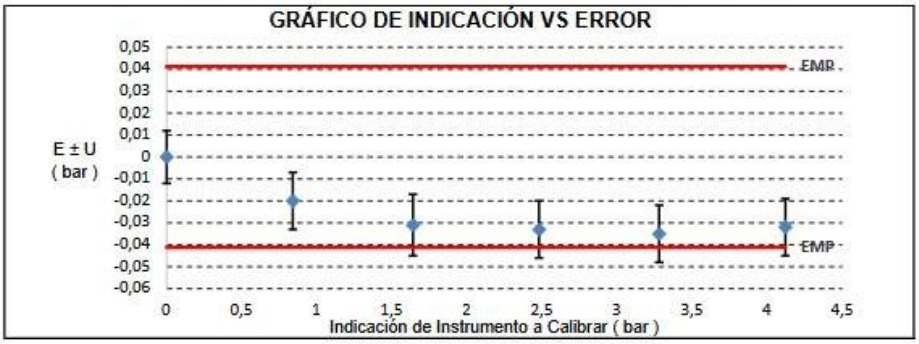
Trazabilidad	Patrón de Trabajo	Certificado de Calibración
Patrones de Referencia de Accredia	Manovacuómetro de -1 bar a 5 bar Clase de Exactitud 0,05	LAT-093 114021 Abril 2021

RESULTADOS DE MEDICIÓN

Indicación del Instrumento a Calibrar		Error de Indicación E	Error de Histéresis	Incertidumbre U
(kPa)	(bar)	(bar)	(bar)	(bar)
0	0,00	0,000	0,000	0,012
84	0,84	-0,020	0,005	0,013
164	1,64	-0,031	0,005	0,014
248	2,48	-0,033	0,004	0,013
328	3,28	-0,035	0,004	0,013
412	4,12	-0,032	0,005	0,013

Máximo Error Absoluto de Indicación:	0,035	bar
Máximo Error Absoluto de Histéresis:	0,004	bar

El error máximo permitido para el manómetro de 0,00 bar a 4,12 bar de clase de exactitud 1 es de ± 0,0412 bar.



OBSERVACIONES
Para una mejor aproximación del instrumento bajo calibración, se subdividió la resolución en 2 partes.
Con fines de identificación de la calibración se colocó una etiqueta autoadhesiva con el número de certificado.
[1] Calculado según la OIML R101, Edición 1991.

INCERTIDUMBRE
La incertidumbre expandida que resulta de multiplicar la incertidumbre típica combinada por el factor de cobertura k=2 que, para una distribución normal, corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95%.

FIN DEL DOCUMENTO

Jr. Condesa de Lemos N°117
San Miguel, Lima
(01) 262 9536
(51) 988 901 065
informes@testcontrol.com.pe
www.testcontrol.com.pe

17.4 Manómetro 60 psi

TEST & CONTROL

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN ACREDITADO POR EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA CON REGISTRO Nº LC - 016

INACAL DA - Perú

Certificado de Calibración

TC-16522-2023

Proforma : 20772A Fecha de emisión: 2023-08-24

Solicitante : **ESTRADA HUAYTA FLEMING ERICK**
Dirección : Calle Daniel Alcides Carrión Mz A1 Lt1 Asentamiento Humano Daniel Alcides Carrión Tercera Etapa Lima - Lima - Los Olivos

Instrumento de medición	:	**Manómetro analógico**
Marca	:	WINTERS
Modelo	:	PFQ
N° de Serie	:	No indica
Intervalo de Indicación	:	0,0 psi a 60,0 psi
Resolución	:	0,4 psi
N° de Parte	:	No indica
Identificación	:	No indica
Clase de Exactitud	:	1,5
Ubicación	:	No indica
Fecha de Calibración	:	2023-08-22

Lugar de calibración
Laboratorio de TEST & CONTROL S.A.C.

Método de calibración
La calibración de instrumentos de medición de presión relativa se basa en el método de comparación directa; el cual consiste en comparar la indicación del instrumento bajo calibración contra la indicación de presión de un patrón, ambos conectados en línea a una fuente de generación de presión según procedimiento PC-004 "Procedimiento para la calibración de instrumentos de medición de presión relativa con clase de exactitud igual o mayor a 0,05 %F.S.". Tercera Edición - Agosto 2019. DM-INACAL.

Condiciones ambientales

	Inicial	Final
Temperatura	20,6 °C	20,5 °C
Humedad Relativa	58,1 %	57,4 %
Presión Atmosférica	1 003,0 hPa	1 002,8 hPa

TEST & CONTROL S.A.C. es un Laboratorio de Calibración y Certificación de equipos de medición basado a la Norma Técnica Peruana ISO/IEC 17025.

TEST & CONTROL S.A.C. brinda los servicios de calibración de instrumentos de medición con los más altos estándares de calidad, garantizando la satisfacción de nuestros clientes.

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales o internacionales, de acuerdo con el Sistema Internacionalde Unidades (SI).

Con el fin de asegurar la calidad de sus mediciones se le recomienda al usuario recalibrar sus instrumentos a intervalos apropiados.

Los resultados son válidos solamente para el ítem sometido a calibración, no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

TEST & CONTROL S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que puedan ocurrir después de su calibración debido a la mala manipulación de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración declarados en el presente documento.

El presente documento carece de valor sin firma y sello.

Lic. Nicolás Ramos Paucar
Gerente Técnico
CFP: 0316

Jr. Condesa de Lemos N°117
San Miguel, Lima
(01) 262 9536
(51) 988 901 065
informes@testcontrol.com.pe
www.testcontrol.com.pe

Certificado de Calibración
TC-16522-2023

Trazabilidad

Trazabilidad	Patrón de Trabajo	Certificado de Calibración
Patrón de Referencia del DM-INACAL	Manómetro Digital 0 bar a 5 bar Clase de Exactitud 0,05	LFP-215-2023 Julio 2023

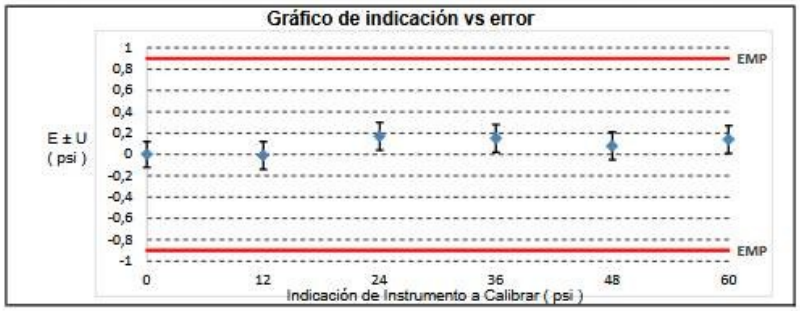
Resultados de medición

Indicación del Instrumento a Calibrar		Error de Indicación E	Error de Histéresis	Incertidumbre U
(kPa)	(psi)	(psi)	(psi)	(psi)
0	0,0	0,00	0,00	0,12
83	12,0	-0,01	0,03	0,13
165	24,0	0,17	0,04	0,13
248	36,0	0,15	0,04	0,13
331	48,0	0,08	0,03	0,13
414	60,0	0,14	0,02	0,13

Error de descenso = Error de medición + Histéresis

Máximo Error Absoluto de Indicación:	0,17	psi
Máximo Error Absoluto de Histéresis:	0,04	psi

El error máximo permitido para el manómetro de 0,0 psi a 60,0 psi de clase de exactitud 1,5 es de ± 0,9 psi.



Incertidumbre
La incertidumbre expandida que resulta de multiplicar la incertidumbre típica combinada por el factor de cobertura k=2 que, para una distribución normal, corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95%.

Observaciones
Para una mejor aproximación del instrumento bajo calibración, se subdividió la resolución en 2 partes.
Con fines de identificación de la calibración se colocó una etiqueta autoadhesiva con el número de certificado.

FIN DEL DOCUMENTO

Jr. Condesa de Lemos N°117
San Miguel, Lima
(01) 262 9536
(51) 988 901 065
informes@testcontrol.com.pe
www.testcontrol.com.pe

17.5 Manómetro 160 psi

TEST & CONTROL

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN ACREDITADO POR EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA CON REGISTRO N° LC - 016

INACAL DA - Perú

Certificado de Calibración

TC-16666-2023

Proforma : 20772A Fecha de emisión: 2023-08-23

Solicitante : **ESTRADA HUAYTA FLEMING ERICK**
Dirección : Calle Daniel Alcides Carrión Mz A1 Lt1 Asentamiento Humano Daniel Alcides Carrión Tercera Etapa Lima - Lima - Los Olivos

Instrumento de medición	:	**Manómetro analógico**
Marca	:	WINTERS
Modelo	:	PFQ-ZR
N° de Serie	:	No indica
Intervalo de Indicación	:	0 psi a 160 psi
Resolución	:	2 psi
N° de Parte	:	No indica
Identificación	:	No indica
Clase de Exactitud	:	1,5
Ubicación	:	No indica
Fecha de Calibración	:	2023-08-22

Lugar de calibración
Laboratorio de TEST & CONTROL S.A.C.

Método de calibración
La calibración de instrumentos de medición de presión relativa se basa en el método de comparación directa; el cual consiste en comparar la indicación del instrumento bajo calibración contra la indicación de presión de un patrón, ambos conectados en línea a una fuente de generación de presión según procedimiento PC-004 "Procedimiento para la calibración de instrumentos de medición de presión relativa con clase de exactitud igual o mayor a 0,05 %F.S.". Tercera Edición - Agosto 2019. DM-INACAL.

Condiciones ambientales

	Inicial	Final
Temperatura	20,9 °C	20,7 °C
Humedad Relativa	66,5 %	67,5 %
Presión Atmosférica	1 003,0 hPa	1 002,8 hPa

TEST & CONTROL S.A.C. es un Laboratorio de Calibración y Certificación de equipos de medición basado a la Norma Técnica Peruana ISO/IEC 17025.

TEST & CONTROL S.A.C. brinda los servicios de calibración de instrumentos de medición con los más altos estándares de calidad, garantizando la satisfacción de nuestros clientes.

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales o internacionales, de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Con el fin de asegurar la calidad de sus mediciones se le recomienda al usuario recalibrar sus instrumentos a intervalos apropiados.

Los resultados son válidos solamente para el ítem sometido a calibración, no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

TEST & CONTROL S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que puedan ocurrir después de su calibración debido a la mala manipulación de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración declarados en el presente documento.

El presente documento carece de valor sin firma y sello.

Lic. Nicolás Ramos Paucar
Gerente Técnico
CFP: 0316

Jr. Condesa de Lemos N°117
San Miguel, Lima
(01) 262 9536
(51) 988 901 065
informes@testcontrol.com.pe
www.testcontrol.com.pe

Certificado de Calibración
TC-16666-2023

Trazabilidad

Trazabilidad	Patrón de Trabajo	Certificado de Calibración
Patrón de Referencia del DM-INACAL	Manómetro Digital 0 bar a 50 bar Clase de Exactitud 0,05	LFP-108-2023 Abril 2023

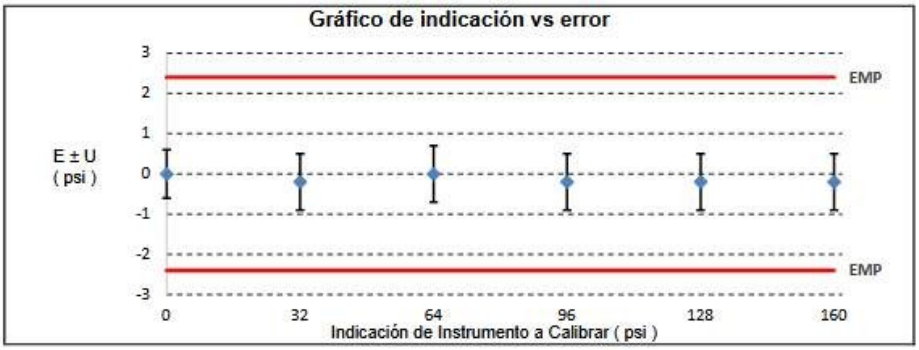
Resultados de medición

Indicación del Instrumento a Calibrar		Error de Indicación E	Error de Histéresis	Incertidumbre U
(kPa)	(psi)	(psi)	(psi)	(psi)
0	0	0,0	0,0	0,6
221	32	-0,2	0,3	0,7
441	64	0,0	0,3	0,7
662	96	-0,2	0,2	0,7
883	128	-0,2	0,2	0,7
1103	160	-0,2	0,2	0,7

Error de descenso = Error de medición + Histéresis

Máximo Error Absoluto de Indicación:	0,2	psi
Máximo Error Absoluto de Histéresis:	0,3	psi

El error máximo permitido para el manómetro de 0 psi a 160 psi de clase de exactitud 1,5 es de ± 2,4 psi.



Incertidumbre
La incertidumbre expandida que resulta de multiplicar la incertidumbre típica combinada por el factor de cobertura k=2 que, para una distribución normal, corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95%.

Observaciones
Para una mejor aproximación del instrumento bajo calibración, se subdividió la resolución en 2 partes.
Con fines de identificación de la calibración se colocó una etiqueta autoadhesiva con el número de certificado.

FIN DEL DOCUMENTO

Jr. Condesa de Lemos N°117
San Miguel, Lima
(01) 262 9536
(51) 988 901 065
informes@testcontrol.com.pe
www.testcontrol.com.pe

17.6 Pie de rey analógico

TEST & CONTROL

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN ACREDITADO POR EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA CON REGISTRO N° LC - 016

INACAL

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

TC - 17812 - 2023

PROFORMA : 20772A Fecha de emisión: 2023-08-22

SOLICITANTE : **PSA MARINE PERU S.A.**
Dirección : Av. Paseo De La Republica Nro. 5895 Int. 501 Urb. Miraflores Lima-Limamiraflores

INSTRUMENTO DE MEDICIÓN	:	**PIE DE REY**
Tipo	:	Analógico
Marca	:	Stander
Modelo	:	No Indica
N° de Serie	:	No Indica
Intervalo de Indicación	:	0 mm a 150 mm
División de Escala	:	0,05 mm
Procedencia	:	No Indica
Identificación	:	No Indica
Fecha de Calibración	:	2023 - 08 - 22

LUGAR DE CALIBRACIÓN
Laboratorio de TEST & CONTROL S.A.C.

MÉTODO DE CALIBRACIÓN
La calibración se realizó por comparación directa con nuestro bloques patrón según procedimiento PC - 012 " Procedimiento de calibración de pie de rey". Quinta Edición - Agosto 2012. SNM - INDECOPI

CONDICIONES AMBIENTALES

Magnitud	Inicial	Final
Temperatura	19,9 °C	21,2 °C
Humedad Relativa	49,4 %	51,3 %

TEST & CONTROL S.A.C. es un Laboratorio de Calibración y Certificación de equipos de medición basado a la Norma Técnica Peruana ISO/IEC 17025.

TEST & CONTROL S.A.C. brinda los servicios de calibración de instrumentos de medición con los más altos estándares de calidad, garantizando la satisfacción de nuestros clientes.

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales o internacionales, de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Con el fin de asegurar la calidad de sus mediciones se le recomienda al usuario recalibrar sus instrumentos a intervalos apropiados de acuerdo al uso.

Los resultados son válidos solamente para el ítem sometido a calibración, no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

TEST & CONTROL S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que puedan ocurrir después de su calibración debido a la mala manipulación de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración declarados en el presente documento.

El presente documento carece de valor sin firma y sello.

Lic. Nicolás Ramos Paucar
Gerente Técnico
CFP: 0316

Jr. Condesa de Lemos N° 117 San Miguel - Lima (01) 2629545 990089889 informes@testcontrol.com.pe
*Empresa con **responsabilidad social**, acercando la ciencia a los que comparten nuestra **pasión por la metrología**.*

Certificado : TC - 17812 - 2023

TRAZABILIDAD

Patrón de Referencia	Patrón de Trabajo	Certificado de Calibración
Bloques Patrón Grado K DM-INACAL	Bloques Patrón de Longitud 0,5 mm a 100 mm Grado 0	LLA-C-081-2022
Comparador Horizontal Incertidumbre de 0,2 µm + 0,78 µm/m DM-INACAL	Varilla Cilindrica 10 mm	LLA-038-2023
Máquina de Medición por Coordenadas DM-INACAL	Anillo Patrón 5 mm	LLA - 006 - 2023

RESULTADOS DE MEDICIÓN

Error de referencia inicial (I) = 0 µm

Error de indicación del pie de rey para medición de exteriores

Valor Patrón (mm)	Promedio de la indicación del Pie de Rey (mm)	Error (µm)
50,000	50,033	33
100,000	100,033	33
150,000	150,033	33

Error de contacto superficie parcial (E)

Valor Patrón (mm)	Error (µm)
150,000	50

Jr. Condesa de Lemos N° 117 San Miguel - Lima (01) 2629545 990089889 informes@testcontrol.com.pe
*Empresa con **responsabilidad social**, acercando la ciencia a los que comparten nuestra **pasión por la metrología**.*

Certificado : TC - 17812 - 2023

RESULTADOS DE MEDICIÓN

Error de repetibilidad (R)

Valor Patrón (mm)	Error (µm)
150,000	100

Error de cambio de escala de exteriores a interiores (S_{E-I})

Valor Patrón (mm)	Error (µm)
10,000	67

Error de cambio de escala de exteriores a profundidad (S_{E-P})

Valor Patrón (mm)	Error (µm)
10,000	67

Error de contacto lineal (L)

Valor Patrón (mm)	Error (µm)
10,000	50

Error de contacto de superficie completa (J)

Valor Patrón (mm)	Error (µm)
10,000	50

Error debido a la distancia de cruce de las superficies de medición para medición de interiores (K)

Valor Patrón (mm)	Error (µm)
5,000	50

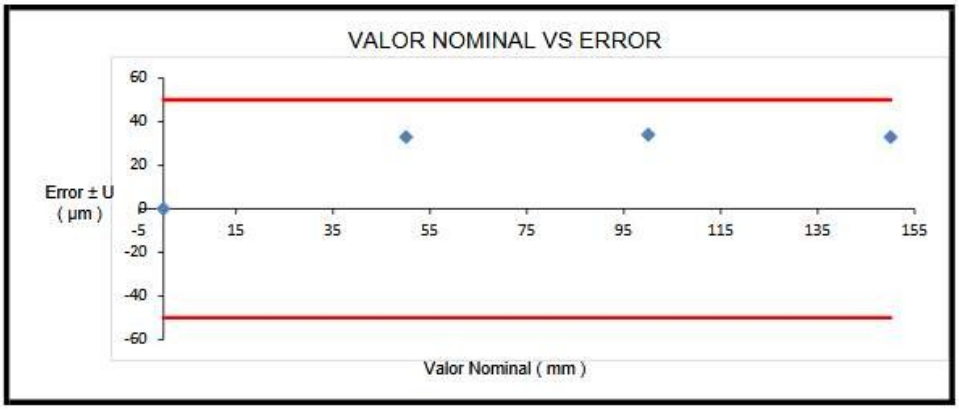
Incertidumbre de Medición : $(81{,}53^2 + 0{,}01^2 \times L^2)^{1/2}$ µm
L: Indicación del pie de rey expresado en milimetros (mm)

Nota 1: Error de indicación del pie de rey para medición de interiores = Error de indicación de exteriores + Error de cambio de escala de exteriores e interiores (SE-I).
Nota 2: Error de indicación del pie de rey para medición de profundidad = Error de indicación de exteriores + Error de cambio de escala de exterioresa profundidad (SE-P).
Nota 3: El instrumento tiene un error máximo permitido de ± 50 µm, según norma DIN 862.

Jr. Condesa de Lemos N° 117 San Miguel - Lima (01) 2629545 990089889 informes@testcontrol.com.pe
*Empresa con **responsabilidad social**, acercando la ciencia a los que comparten nuestra **pasión por la metrología**.*

Certificado : TC - 17812 - 2023

RESULTADOS DE MEDICIÓN



OBSERVACIONES
Con fines de identificación de la calibración se colocó una etiqueta autoadhesiva con el número de certificado.

INCERTIDUMBRE
La incertidumbre expandida que resulta de multiplicar la incertidumbre típica combinada por el factor de cobertura k=2 que, para una distribución normal, corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95%.

FIN DEL DOCUMENTO

Jr. Condesa de Lemos N° 117 San Miguel - Lima (01) 2629545 990089889 informes@testcontrol.com.pe
*Empresa con **responsabilidad social**, acercando la ciencia a los que comparten nuestra **pasión por la metrología**.*

17.7 Pie de rey digital

TEST & CONTROL

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN ACREDITADO POR EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA CON REGISTRO N° LC - 016

INACAL

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

TC - 17815 - 2023

PROFORMA : 20772A Fecha de emisión: 2023-08-22

SOLICITANTE : **ESTRADA HUAYTA FLEMING ERICK**
Dirección : Cal. Daniel Alcides Carrión Mz A1 Lt1 A.A.H.H. Daniel A.Carrión 3Ra Etapa Lima-Lima-Los Olivos

INSTRUMENTO DE MEDICIÓN	:	**PIE DE REY**
Tipo	:	Digital
Marca	:	Truper
Modelo	:	CALDI-6MP
N° de Serie	:	No Indica
Intervalo de Indicación	:	0 mm a 150 mm
División de Escala	:	0,01 mm
Procedencia	:	No Indica
Identificación	:	21
Fecha de Calibración	:	2023 - 08 - 22

LUGAR DE CALIBRACIÓN
Laboratorio de TEST & CONTROL S.A.C.

MÉTODO DE CALIBRACIÓN
La calibración se realizó por comparación directa con nuestro bloques patrón según procedimiento PC - 012 " Procedimiento de calibración de pie de rey". Quinta Edición - Agosto 2012. SNM - INDECOPI

CONDICIONES AMBIENTALES

Magnitud	Inicial	Final
Temperatura	19,9 °C	21,2 °C
Humedad Relativa	49,4 %	51,3 %

TEST & CONTROL S.A.C. es un Laboratorio de Calibración y Certificación de equipos de medición basado a la Norma Técnica Peruana ISO/IEC 17025.

TEST & CONTROL S.A.C. brinda los servicios de calibración de instrumentos de medición con los más altos estándares de calidad, garantizando la satisfacción de nuestros clientes.

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales o internacionales, de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Con el fin de asegurar la calidad de sus mediciones se le recomienda al usuario recalibrar sus instrumentos a intervalos apropiados de acuerdo al uso.

Los resultados son válidos solamente para el ítem sometido a calibración, no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

TEST & CONTROL S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que puedan ocurrir después de su calibración debido a la mala manipulación de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración declarados en el presente documento.

El presente documento carece de valor sin firma y sello.

Lic. Nicolás Ramos Paucar
Gerente Técnico
CFP: 0316

Jr. Condesa de Lemos N° 117 San Miguel - Lima (01) 2629545 990089889 informes@testcontrol.com.pe
*Empresa con **responsabilidad social**, acercando la ciencia a los que comparten nuestra **pasión por la metrología**.*

Certificado : TC - 17815 - 2023

TRAZABILIDAD

Patrón de Referencia	Patrón de Trabajo	Certificado de Calibración
Bloques Patrón Grado K DM-INACAL	Bloques Patrón de Longitud 0,5 mm a 100 mm Grado 0	LLA-C-081-2022
Comparador Horizontal Incertidumbre de 0,2 µm + 0,78 µm/m DM-INACAL	Varilla Cilindrica 10 mm	LLA-038-2023
Máquina de Medición por Coordenadas DM-INACAL	Anillo Patrón 5 mm	LLA - 006 - 2023

RESULTADOS DE MEDICIÓN

Error de referencia inicial (I) = 0 µm

Error de indicación del pie de rey para medición de exteriores

Valor Patrón (mm)	Promedio de la indicación del Pie de Rey (mm)	Error (µm)
50,000	50,023	23
100,000	100,017	17
150,000	150,023	23

Error de contacto superficie parcial (E)

Valor Patrón (mm)	Error (µm)
150,000	10

Jr. Condesa de Lemos N° 117 San Miguel - Lima (01) 2629545 990089889 informes@testcontrol.com.pe

*Empresa con **responsabilidad social**, acercando la ciencia a los que comparten nuestra **pasión por la metrología**.*

Certificado : TC - 17815 - 2023

RESULTADOS DE MEDICIÓN

Error de repetibilidad (R)

Valor Patrón (mm)	Error (µm)
150,000	0

Error de cambio de escala de exteriores a interiores (S_{E-I})

Valor Patrón (mm)	Error (µm)
10,000	37

Error de cambio de escala de exteriores a profundidad (S_{E-P})

Valor Patrón (mm)	Error (µm)
10,000	37

Error de contacto lineal (L)

Valor Patrón (mm)	Error (µm)
10,000	10

Error de contacto de superficie completa (J)

Valor Patrón (mm)	Error (µm)
10,000	10

Error debido a la distancia de cruce de las superficies de medición para medición de interiores (K)

Valor Patrón (mm)	Error (µm)
5,000	10

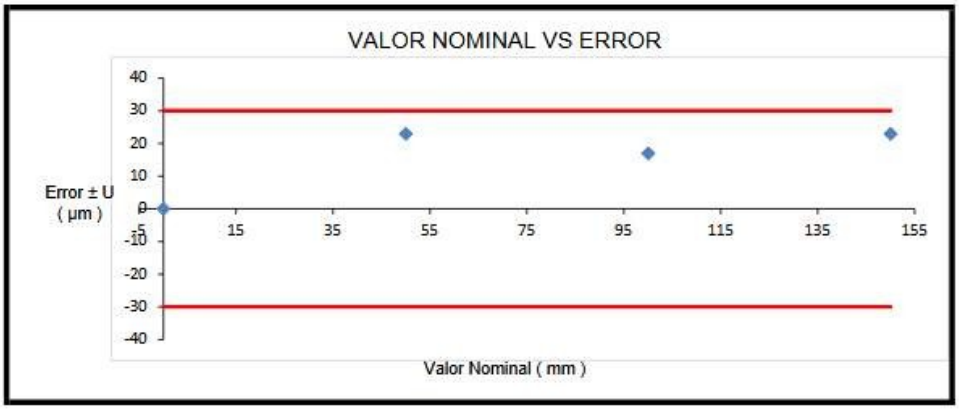
Incertidumbre de Medición : $(24{,}79^2 + 0{,}01^2 \times L^2)^{1/2}$ µm
L: Indicación del pie de rey expresado en milimetros (mm)

Nota 1: Error de indicación del pie de rey para medición de interiores = Error de indicación de exteriores + Error de cambio de escala de exteriores e interiores (SE-I).
Nota 2: Error de indicación del pie de rey para medición de profundidad = Error de indicación de exteriores + Error de cambio de escala de exterioresa profundidad (SE-P).
Nota 3: El instrumento tiene un error máximo permitido de ± 30 µm, según norma DIN 862.

Jr. Condesa de Lemos N° 117 San Miguel - Lima (01) 2629545 990089889 informes@testcontrol.com.pe
*Empresa con **responsabilidad social**, acercando la ciencia a los que comparten nuestra **pasión por la metrología**.*

Certificado : TC - 17815 - 2023

RESULTADOS DE MEDICIÓN



OBSERVACIONES
Con fines de identificación de la calibración se colocó una etiqueta autoadhesiva con el número de certificado.

INCERTIDUMBRE
La incertidumbre expandida que resulta de multiplicar la incertidumbre típica combinada por el factor de cobertura k=2 que, para una distribución normal, corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95%.

FIN DEL DOCUMENTO

Jr. Condesa de Lemos N° 117 San Miguel - Lima (01) 2629545 990089889 informes@testcontrol.com.pe
*Empresa con **responsabilidad social**, acercando la ciencia a los que comparten nuestra **pasión por la metrología**.*

17.8 Termómetro digital

CORPORACIÓN 2M & N S.A.C.
Especialistas en Metrología

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN ACREDITADO POR EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA CON REGISTRO N° LC - 024

INACAL
Registro N°LC - 024

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

148-CT-T-2021

Área de Metrología

Expediente	:	498-06-2021
Solicitante	:	**FLEMING ERICK ESTRADA HUAYTA**
Dirección	:	Cal. Daniel Alcides Carrión Mza. A2 LT1 Asentamiento Humano Daniel Alcides Carrión - Los Olivos - Lima - Perú
Equipo/ Instrumento	:	**TERMÓMETRO DE INDICACIÓN DIGITAL**
Marca	:	ThermoLab
Modelo	:	TP101
Serie	:	No indica
Identificación	:	107-TT (*)
Ubicación	:	No indica
Procedencia	:	Alemania
Intervalo de indicación	:	-50 °C a 300 °C (**)
Resolución	:	0,1 °C
Elemento Sensor	:	No indica
Fecha de calibración	:	2021-06-24
Lugar:	:	**Laboratorio 01 - CORPORACIÓN 2M & N S.A.C.** Jr. Chiclayo Nro. 489, Int A - Rímac - Lima.
Método utilizado:	:	Por comparación directa siguiendo el procedimiento INDECOPI-SNM PC-017 "Procedimiento para la Calibración de Termómetros Digitales" (2da Edición Diciembre 2012).

La incertidumbre reportada en el presente certificado es la incertidumbre expandida de medición que resulta de multiplicar la incertidumbre estándar por el factor de cobertura k=2. La incertidumbre fue determinada según la "Guía para la Expresión de la incertidumbre en la medición". Generalmente, el valor de la magnitud está dentro del intervalo de los valores determinados con la incertidumbre expandida con una probabilidad de aproximadamente 95%.

Los resultados son válidos en el momento y en las condiciones de la calibración. Al solicitante le corresponde disponer en su momento la ejecución de una recalibración, la cual está en función del uso, conservación y mantenimiento del equipo o reglamentaciones vigentes.

Los resultados no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del Sistema de Calidad

CORPORACIÓN 2M & N S.A.C. no se responsabiliza de lo perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este equipo, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí declarados. El certificado de calibración sin firma y sello carece de validez.

CORPORACIÓN 2M & N S.A.C. ÁREA METROLOGÍA LABORATORIO 01

2021-06-28
Fecha de emisión

ALVAREZ NAVARRO ANGEL GUSTAVO
CORPORACION 2M N S.A.C.
JEFE DE METROLOGIA
logistica@2myn.com
Fecha: 28/06/2021 19:08
Firmado por: www.tocapu.pe

VELASCO NAVARRO MIRIAN ARACELI
CORPORACION 2M N S.A.C.
GERENTE GENERAL
logistica@2myn.com
Fecha: 30/06/2021 00:26
Firmado por: www.tocapu.pe

Cód. de Servicio: 01064-A **Cód. FT-T-01 Rev. 04**

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL DE ESTE DOCUMENTO SIN AUTORIZACIÓN ESCRITA POR CORPORACIÓN 2M & N S.A.C.

Jr. Chiclayo N° 489 Int. A Rimac - Lima - Perú | Telf.: (01) 381-6230 RPC: 989-645-623 / 961-505-209
Página web: www.2myn.com | Correos: ventas@2myn.com | metrologia@2myn.com

Condiciones ambientales:

Temperatura °C	19,3 °C ± 0,9 °C
Humedad Relativa %hr	56,2 %hr ± 3,7 %hr

Patrones de referencia:

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad metrológica a los patrones nacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Trazabilidad	Patrón utilizado	Certificado de calibración
Patrones de Referencia a LO JUSTO	Dos termómetros Digitales con 2 sensores de platino con incertidumbres del orden desde 0,028 °C hasta 0,072 °C .	TE-296-2021

Observaciones:

- Se colocó una etiqueta autoadhesiva, indicando el código de servicio N° 01064-A y la fecha de calibración.
- Las temperaturas convencionalmente verdaderas mostradas en los resultados de medición son las de la Escala Internacional de Temperatura de 1990 "International Temperature Scale ITS-90
- (*) Código de Identificación asignado por CORPORACIÓN 2M & N S.A.C.
- (**) Dato grabado al indicador del instrumento de medición.

Resultados de medición:

Indicación Termómetro (°C)	Corrección (°C)	TCV (°C)	Incertidumbre (°C)
3,9	0,13	4,03	0,11
11,9	0,20	12,10	0,11
19,9	0,12	20,02	0,11

La Temperatura Convencionalmente Verdadera (TCV) resulta de la relación:
TCV = Indicación del termómetro + Corrección

Nota

- La profundidad de inmersión del sensor fue de aproximadamente 9 cm
- El tiempo de estabilización fue de aproximadamente 5 min

Fin del documento

Cód. de Servicio: 01064-A **Cód. FT-T-01 Rev. 04**

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL DE ESTE DOCUMENTO SIN AUTORIZACIÓN ESCRITA POR CORPORACIÓN 2M & N S.A.C.
Jr. Chiclayo N° 489 Int. A Rímac - Lima - Perú | Telf.: (01) 381-6230 RPC: 989-645-623 / 961-505-209
Página web: www.2myn.com | Correos: ventas@2myn.com | metrologia@2myn.com

17.9 Balanza gramera 30 kg

TEST & CONTROL

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN ACREDITADO POR EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA CON REGISTRO Nº LC - 016

INACAL DA - Perú

CERTIFICADO DE CALIBRACION

TC - 06798 - 2021

PROFORMA : 3726A Fecha de emisión : 2021-07-06

SOLICITANTE : ESTRADA HUAYTA FLEMING ERICK

Dirección : CALLE DANIEL ALCIDES CARRIÓN MZ A1 LT1 ASENTAMIENTO HUMANO DANIEL ALCIDES CARRIÓN TERCERA ETAPA LIMA - LIMA - LOS OLIVOS

INSTRUMENTO DE MEDICIÓN :	**BALANZA**
Tipo	ELECTRÓNICA
Marca	QUA
Modelo	810
N° de Serie	03010
Capacidad Máxima	30 kg
Resolución	0,001 kg
División de Verificación	0,01 kg
Clase de Exactitud	III
Capacidad Mínima	0,2 kg
Procedencia	CHINA
Identificación	No Indica
Ubicación	No Indica
Variación de ΔT Local	3 °C
Fecha de Calibración	2021-07-06

LUGAR DE CALIBRACIÓN
Laboratorio de TEST & CONTROL S.A.C.

MÉTODO DE CALIBRACIÓN
La calibración se realizó por comparación directa entre las indicaciones de lectura de la balanza y las cargas aplicadas mediante pesas patrones según procedimiento PC-001 "Procedimiento para la Calibración de Instrumentos de Pesaje de Funcionamiento No Automático Clase III y IIII". Primera Edición - Mayo 2019. DM - INACAL.

TEST & CONTROL S.A.C. es un Laboratorio de Calibración y Certificación de equipos de medición basado a la Norma Técnica Peruana ISO/IEC 17025.

TEST & CONTROL S.A.C. brinda los servicios de calibración de instrumentos de medición con los más altos estándares de calidad, garantizando la satisfacción de nuestros clientes.

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales o internacionales, de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Con el fin de asegurar la calidad de sus mediciones se le recomienda al usuario recalibrar sus instrumentos a intervalos apropiados.

Los resultados son válidos solamente para el ítem sometido a calibración, no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

TEST & CONTROL S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que puedan ocurrir después de su calibración debido a la mala manipulación de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración declarados en el presente documento.

El presente documento carece de valor sin firma y sello.

Lic. Nicolás Ramos Paucar
Gerente Técnico
CFP: 0316

Jr. Condesa de Lemos N°117
San Miguel, Lima
(01) 262 9536
(51) 988 901 065
informes@testcontrol.com.pe
www.testcontrol.com.pe

Certificado de Calibración
TC - 06798 - 2021

TRAZABILIDAD

Trazabilidad	Patrón de Trabajo	Certificado de Calibración
Patrones de Referencia de TEST & CONTROL	Juego de Pesas 100 mg a 1 kg Clase de Exactitud M2	TC-07157-2021 Mayo 2021
Patrones de Referencia de TEST & CONTROL	Juego de Pesas 2 kg Clase de Exactitud M2	TC-07381-2021 Mayo 2021
Patrones de Referencia de TEST & CONTROL	Juego de Pesas 5 kg Clase de Exactitud M2	TC-08046-2021 Mayo 2021
Patrones de Referencia de TEST & CONTROL	Juego de Pesas 10 kg Clase de Exactitud M2	TC-08047-2021 Mayo 2021
Patrones de Referencia de TEST & CONTROL	Juego de Pesas 20 kg Clase de Exactitud M2	TC-07160-2021 Mayo 2021

RESULTADOS DE MEDICIÓN

INSPECCION VISUAL

Ajuste de Cero	Tiene
Oscilación Libre	Tiene
Plataforma	Tiene
Sistema de Traba	No Tiene

Escala	No Tiene
Cursor	No Tiene
Nivelación	Tiene

ENSAYO DE REPETIBILIDAD

Magnitud	Inicial	Final
Temperatura	20,3 °C	20,4 °C
Humedad Relativa	68 %	68 %

Medición Nº	Carga (kg)	I (kg)	ΔL (g)	E (g)
1	15	14,989	0,9	-11,4
2		14,989	0,8	-11,3
3		14,989	0,8	-11,3
4		14,988	0,3	-11,8
5		14,988	0,2	-11,7
6		14,988	0,4	-11,9
7		14,988	0,4	-11,9
8		14,989	0,8	-11,3
9		14,989	0,8	-11,3
10		14,989	0,7	-11,2
| Emax - Emin | (g)			0,7	
e.m.p. ± (g)			20	

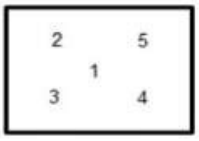
Medición Nº	Carga (kg)	I (kg)	ΔL (g)	E (g)
1	30	29,974	0,7	-26,2
2		29,974	0,6	-26,1
3		29,973	0,2	-26,7
4		29,974	0,8	-26,3
5		29,974	0,7	-26,2
6		29,973	0,3	-26,8
7		29,973	0,4	-26,9
8		29,974	0,8	-26,3
9		29,974	0,7	-26,2
10		29,974	0,8	-26,3
| Emax - Emin | (g)			0,8	
e.m.p. ± (g)			30	

Jr. Condesa de Lemos Nº117
San Miguel, Lima

(01) 262 9536
(51) 988 901 065

informes@testcontrol.com.pe
www.testcontrol.com.pe

Certificado de Calibración
TC - 06798 - 2021



ENSAYO DE EXCENTRICIDAD

Magnitud	Inicial	Final
Temperatura	20,4 °C	20,4 °C
Humedad Relativa	68 %	69 %

N°	Determinación de Eo				Determinación del Error Corregido Ec					e.m.p.
	Carga (kg)	I (kg)	ΔL (g)	Eo (g)	Carga (kg)	I (kg)	ΔL (g)	E (g)	Ec (g)	± (g)
1	0,1	0,100	0,7	-0,2	10	9,993	0,4	-6,9	-6,7	20
2		0,100	0,4	0,1		9,994	0,8	-6,3	-6,4	
3		0,100	0,6	-0,1		9,989	0,2	-10,7	-10,6	
4		0,100	0,6	-0,1		9,992	0,6	-8,1	-8,0	
5		0,100	0,7	-0,2		9,994	0,8	-6,3	-6,1	

ENSAYO DE PESAJE

Magnitud	Inicial	Final
Temperatura	20,4 °C	20,3 °C
Humedad Relativa	69 %	72 %

Carga (kg)	Carga Creciente				Carga Decreciente				e.m.p.
	I (kg)	ΔL (g)	E (g)	Ec (g)	I (kg)	ΔL (g)	E (g)	Ec (g)	± (g)
0,100 0	0,100	0,7	-0,2						
0,200 0	0,200	0,6	-0,1	0,1	0,200	0,6	-0,1	0,1	10
1,000 0	0,999	0,3	-0,8	-0,6	1,000	0,7	-0,2	0,0	10
5,000 1	4,997	0,7	-3,3	-3,1	4,999	0,8	-1,4	-1,2	10
8,000 2	7,995	0,4	-5,1	-4,9	7,997	0,4	-3,1	-2,9	20
10,000 3	9,993	0,6	-7,4	-7,2	9,995	0,6	-5,4	-5,2	20
12,000 3	11,991	0,3	-9,1	-8,9	11,993	0,7	-7,5	-7,3	20
15,000 4	14,989	0,5	-11,4	-11,2	14,991	0,8	-9,7	-9,5	20
20,000 9	19,984	0,4	-16,8	-16,6	19,982	0,2	-18,6	-18,4	20
25,001 0	24,980	0,7	-21,2	-21,0	24,979	0,3	-21,8	-21,6	30
30,001 2	29,974	0,6	-27,3	-27,1	29,974	0,6	-27,3	-27,1	30

Donde:

I : Indicación de la balanza
ΔL : Carga incrementada
Eo : Error en cero
e.m.p. : Error máximo permitido
E : Error encontrado
Ec : Error corregido

LECTURA CORREGIDA E INCERTIDUMBRE DE LA BALANZA

Lectura Corregida = $R + 7{,}74 \times 10^{-4} \times R$

Incertidumbre Expandida = $2 \times \sqrt{5{,}82 \times 10^{-7}\ kg^2 + 1{,}49 \times 10^{-8} \times R^2}$

R : Lectura, cualquier indicación obtenida después de la calibración (kg)

OBSERVACIONES

Con fines de identificación de la calibración se colocó una etiqueta autoadhesiva con el número de certificado.
La indicación de la balanza fue de 29,974 kg para una carga de valor nominal 30 kg.

INCERTIDUMBRE

La incertidumbre expandida que resulta de multiplicar la incertidumbre típica combinada por el factor de cobertura k=2 que, para una distribución normal, corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95%.

FIN DEL DOCUMENTO

Jr. Condesa de Lemos N°117
San Miguel, Lima
(01) 262 9536
(51) 988 901 065
informes@testcontrol.com.pe
www.testcontrol.com.pe

Anexo 18: Tablas de los experimentos preliminares

18.1 Orden aleatorio de pruebas

Tabla 224

Orden aleatorio de pruebas

N.º	N.ºg	Orden	N.ºt	Código	H	Repetición	Aleatorio
1	3	1	1	(2.3, 400)	2	7	0.21183850674424
2	3	1	6	(7, 400)	1.4	6	0.22447106509935
3	3	1	6	(7, 400)	2	5	0.22760081512388
4	3	1	10	(11, 400)	2	5	0.24016403348651
5	3	1	4	(5, 400)	2	5	0.24502603255678
6	3	1	7	(8, 400)	2	8	0.27505018759985
7	3	1	3	(4, 400)	3	7	0.27626438334119
8	3	1	5	(6, 400)	2	8	0.28009424090851
9	3	1	2	(3, 400)	1.4	6	0.28589558636304
10	3	1	10	(11, 400)	2	7	0.31311480456497
11	3	1	9	(10, 400)	3	7	0.33195040852297
12	3	1	10	(11, 400)	3	6	0.34691213082988
13	3	1	1	(2.3, 400)	3	8	0.42628516315017
14	3	1	8	(9, 400)	2	5	0.46718764409889
15	3	1	3	(4, 400)	2	8	0.51603480812628
16	3	1	5	(6, 400)	3	7	0.52055200247560
17	3	1	8	(9, 400)	1.4	6	0.67213762027677
18	3	1	4	(5, 400)	1.4	6	0.67868295393419
19	3	1	4	(5, 400)	3	7	0.68549077061471
20	3	1	7	(8, 400)	3	7	0.70505949168000
21	3	1	2	(3, 400)	2	5	0.71903835155536
22	3	1	9	(10, 400)	2	8	0.76528026780579
23	3	1	8	(9, 400)	3	7	0.81340900121722
24	3	1	2	(3, 400)	3	7	0.96019861346576
25	3	1	6	(7, 400)	3	7	0.98226887814235
26	6	2	11	(2.4, 500)	3	4	0.01273246097844
27	6	2	18	(9, 500)	3	4	0.03140717430506
28	6	2	14	(5, 500)	1.4	3	0.03387598961126
29	6	2	11	(2.4, 500)	2	5	0.05491488624830
30	6	2	11	(2.4, 500)	3	6	0.07887488894630
31	6	2	12	(3, 500)	1.4	3	0.11355308012571
32	6	2	17	(8, 500)	3	4	0.37298022897448
33	6	2	16	(7, 500)	1.4	3	0.43802341481205
34	6	2	13	(4, 500)	2	5	0.44829077890609
35	6	2	17	(8, 500)	2	5	0.48932308435906
36	6	2	15	(6, 500)	1.4	6	0.64138782408554
37	6	2	18	(9, 500)	1.4	3	0.68380989355501
38	6	2	20	(11, 500)	2	3	0.75442542682868
39	6	2	17	(8, 500)	1.4	6	0.78851737582590
40	6	2	16	(7, 500)	3	4	0.81863665103447
41	6	2	14	(5, 500)	3	4	0.84414285828825

N.º	N.ºg	Orden	N.ºt	Código	H	Repetición	Aleatorio
42	6	2	12	(3, 500)	3	4	0.85097807773855
43	6	2	15	(6, 500)	3	4	0.91016409720760
44	6	2	13	(4, 500)	3	4	0.91532852093224
45	6	2	19	(10, 500)	2	5	0.91933901596349
46	6	2	20	(11, 500)	3	4	0.92013676848728
47	6	2	19	(10, 500)	1.4	6	0.95692481438164
48	6	2	19	(10, 500)	3	4	0.97984449740034
49	6	2	15	(6, 500)	2	5	0.98389151657466
50	6	2	13	(4, 500)	1.4	6	0.98394680826459
51	10	3	27	(8, 600)	1.4	6	0.10462692088913
52	10	3	28	(9, 600)	1.4	3	0.12884364195634
53	10	3	24	(5, 600)	1.4	3	0.20446619077120
54	10	3	29	(10, 600)	1.4	6	0.21987938310485
55	10	3	30	(11, 600)	2	3	0.23636532586534
56	10	3	25	(6, 600)	3	4	0.27822708210442
57	10	3	29	(10, 600)	3	4	0.32227202842478
58	10	3	25	(6, 600)	1.4	6	0.32605137734208
59	10	3	30	(11, 600)	3	4	0.33607078844216
60	10	3	22	(3, 600)	1.4	3	0.37590223120060
61	10	3	23	(4, 600)	1.4	6	0.38683937594760
62	10	3	21	(2.5, 600)	3	4	0.39461544773076
63	10	3	26	(7, 600)	1.4	3	0.43700617703144
64	10	3	29	(10, 600)	2	5	0.50980390433688
65	10	3	27	(8, 600)	3	4	0.52738030382898
66	10	3	22	(3, 600)	3	4	0.64775320480112
67	10	3	21	(2.5, 600)	3	6	0.73389632918406
68	10	3	21	(2.5, 600)	2	5	0.73433836398181
69	10	3	24	(5, 600)	3	4	0.82983010343742
70	10	3	26	(7, 600)	3	4	0.82984403229784
71	10	3	27	(8, 600)	2	5	0.88941222906578
72	10	3	23	(4, 600)	2	5	0.91232772136573
73	10	3	28	(9, 600)	3	4	0.97647187358234
74	10	3	23	(4, 600)	3	4	0.98444895993453
75	10	3	25	(6, 600)	2	5	0.98846158140805
76	5	4	12	(3, 500)	3	1	0.02555400074925
77	5	4	17	(8, 500)	2	2	0.04204435728025
78	5	4	18	(9, 500)	3	1	0.05295223195571
79	5	4	15	(6, 500)	2	2	0.06480965076480
80	5	4	12	(3, 500)	2	2	0.09041122009512
81	5	4	16	(7, 500)	2	2	0.11720963066910
82	5	4	20	(11, 500)	2	1	0.12261561385822
83	5	4	11	(2.4, 500)	2	3	0.17513920494821
84	5	4	14	(5, 500)	3	1	0.27943103259895
85	5	4	19	(10, 500)	2	2	0.34691719093826
86	5	4	19	(10, 500)	1.4	3	0.37406709801871
87	5	4	13	(4, 500)	2	2	0.40021246985998
88	5	4	19	(10, 500)	3	1	0.41742357041221
89	5	4	13	(4, 500)	3	1	0.45386164530646

N.º	N.ºg	Orden	N.ºt	Código	H	Repetición	Aleatorio
90	5	4	17	(8, 500)	1.4	3	0.50851767894346
91	5	4	11	(2.4, 500)	2	1	0.55408371810336
92	5	4	17	(8, 500)	3	1	0.56032385432627
93	5	4	16	(7, 500)	3	1	0.58260077971499
94	5	4	15	(6, 500)	1.4	3	0.68153830582742
95	5	4	18	(9, 500)	2	2	0.76596387068275
96	5	4	11	(2.4, 500)	3	2	0.78331167751458
97	5	4	13	(4, 500)	1.4	3	0.88107959704939
98	5	4	20	(11, 500)	3	2	0.93265422491822
99	5	4	15	(6, 500)	3	1	0.93573966145050
100	5	4	14	(5, 500)	2	2	0.99937655276153
101	2	5	7	(8, 400)	1.4	6	0.03936320648063
102	2	5	9	(10, 400)	2	5	0.04258737701457
103	2	5	4	(5, 400)	3	4	0.09569079952780
104	2	5	3	(4, 400)	1.4	6	0.09751195239369
105	2	5	8	(9, 400)	3	4	0.16298626933713
106	2	5	5	(6, 400)	2	5	0.17023728124332
107	2	5	7	(8, 400)	3	4	0.22501267015468
108	2	5	5	(6, 400)	1.4	6	0.22867075854447
109	2	5	9	(10, 400)	3	4	0.23379064595792
110	2	5	1	(2.3, 400)	2	5	0.29838945844676
111	2	5	7	(8, 400)	2	5	0.37972589151468
112	2	5	4	(5, 400)	1.4	3	0.38892989780288
113	2	5	3	(4, 400)	2	5	0.41762739920523
114	2	5	2	(3, 400)	3	4	0.46571557258721
115	2	5	10	(11, 400)	2	3	0.55877864139620
116	2	5	10	(11, 400)	3	4	0.55912339116912
117	2	5	8	(9, 400)	1.4	3	0.56654288701247
118	2	5	2	(3, 400)	1.4	3	0.64882999227848
119	2	5	3	(4, 400)	3	4	0.66391835978720
120	2	5	9	(10, 400)	1.4	6	0.67084815225098
121	2	5	6	(7, 400)	3	4	0.73813221009914
122	2	5	6	(7, 400)	1.4	3	0.77314041031059
123	2	5	1	(2.3, 400)	3	6	0.79383327171672
124	2	5	1	(2.3, 400)	3	4	0.81012430286501
125	2	5	5	(6, 400)	3	4	0.92521545209456
126	7	6	12	(3, 500)	3	7	0.03789370611776
127	7	6	18	(9, 500)	1.4	6	0.07233453041408
128	7	6	19	(10, 500)	2	8	0.07902317692060
129	7	6	16	(7, 500)	2	5	0.08892624091823
130	7	6	11	(2.4, 500)	2	7	0.11341431003530
131	7	6	19	(10, 500)	3	7	0.11842976778280
132	7	6	17	(8, 500)	2	8	0.19373182894196
133	7	6	16	(7, 500)	3	7	0.25476701848675
134	7	6	15	(6, 500)	2	7	0.27631518628914
135	7	6	18	(9, 500)	3	7	0.29243122681510
136	7	6	14	(5, 500)	2	7	0.36169046058785
137	7	6	17	(8, 500)	3	7	0.36957144399639

N.º	N.ºg	Orden	N.ºt	Código	H	Repetición	Aleatorio
138	7	6	20	(11, 500)	2	7	0.42042800772470
139	7	6	16	(7, 500)	1.4	6	0.42296937073115
140	7	6	13	(4, 500)	3	7	0.59731362003367
141	7	6	11	(2.4, 500)	3	8	0.68899477168452
142	7	6	12	(3, 500)	1.4	6	0.70698817574885
143	7	6	15	(6, 500)	3	8	0.74805608193856
144	7	6	13	(4, 500)	2	8	0.75713470147457
145	7	6	14	(5, 500)	3	5	0.80036407255102
146	7	6	12	(3, 500)	2	5	0.88957493158523
147	7	6	18	(9, 500)	2	5	0.89865119650494
148	7	6	20	(11, 500)	3	6	0.91165919450577
149	7	6	20	(11, 500)	2	5	0.98754784942139
150	7	6	14	(5, 500)	1.4	6	0.99028562300373
151	9	7	23	(4, 600)	2	2	0.02398427988857
152	9	7	28	(9, 600)	3	1	0.03901914767993
153	9	7	21	(2.5, 600)	3	2	0.13444976832652
154	9	7	24	(5, 600)	2	2	0.24728717381047
155	9	7	29	(10, 600)	1.4	3	0.24884656820252
156	9	7	29	(10, 600)	2	2	0.32289618487437
157	9	7	30	(11, 600)	3	2	0.40667593307979
158	9	7	29	(10, 600)	3	1	0.51645579614659
159	9	7	21	(2.5, 600)	2	1	0.51660260990781
160	9	7	21	(6, 600)	1.4	3	0.52488662159863
161	9	7	25	(2.5, 600)	2	3	0.56613974643801
162	9	7	30	(11, 600)	2	1	0.60480027700209
163	9	7	25	(6, 600)	3	1	0.61231948945671
164	9	7	23	(4, 600)	3	1	0.64593482380784
165	9	7	28	(9, 600)	2	2	0.64960437290407
166	9	7	24	(5, 600)	3	1	0.70438738502007
167	9	7	23	(4, 600)	1.4	3	0.73112724059654
168	9	7	27	(8, 600)	3	1	0.78604704429926
169	9	7	27	(8, 600)	1.4	3	0.81183953128000
170	9	7	26	(7, 600)	2	2	0.83273085236689
171	9	7	27	(8, 600)	2	2	0.84381086766234
172	9	7	25	(6, 600)	2	2	0.87309518211128
173	9	7	22	(3, 600)	3	1	0.88140207789007
174	9	7	22	(3, 600)	2	2	0.90334088537766
175	9	7	26	(7, 600)	3	1	0.91138140744762
176	1	8	7	(8, 400)	2	2	0.01364927465526
177	1	8	8	(9, 400)	3	1	0.03148831665052
178	1	8	3	(4, 400)	1.4	3	0.14390235082527
179	1	8	4	(5, 400)	3	1	0.15592002583859
180	1	8	9	(10, 400)	2	2	0.23103734930726
181	1	8	8	(9, 400)	2	2	0.30529982149910
182	1	8	6	(7, 400)	3	1	0.31833977565514
183	1	8	3	(4, 400)	3	1	0.43327700812119
184	1	8	5	(6, 400)	1.4	3	0.47791476637855
185	1	8	9	(10, 400)	3	1	0.49364454039910

N.º	N.ºg	Orden	N.ºt	Código	H	Repetición	Aleatorio
186	1	8	9	(10, 400)	1.4	3	0.59095009894916
187	1	8	2	(3, 400)	2	2	0.61171607989812
188	1	8	1	(2.3, 400)	3	2	0.70773112244511
189	1	8	10	(11, 400)	2	1	0.72818449146911
190	1	8	6	(7, 400)	2	2	0.73020677801728
191	1	8	1	(2.3, 400)	2	1	0.73043862785384
192	1	8	5	(6, 400)	3	1	0.73443582792399
193	1	8	1	(2.3, 400)	2	3	0.74782364311797
194	1	8	2	(3, 400)	3	1	0.75618079147457
195	1	8	4	(5, 400)	2	2	0.81141266421160
196	1	8	7	(8, 400)	1.4	3	0.89087873279775
197	1	8	7	(8, 400)	3	1	0.93019955141599
198	1	8	3	(4, 400)	2	2	0.93212700025860
199	1	8	5	(6, 400)	2	2	0.96381048243193
200	1	8	10	(11, 400)	3	2	0.97768881433967
201	8	9	14	(5, 500)	2	8	0.00613516115118
202	8	9	18	(9, 500)	2	8	0.03171031072270
203	8	9	11	(2.4, 500)	2	9	0.09249214211013
204	8	9	17	(8, 500)	3	10	0.22577353066299
205	8	9	13	(4, 500)	1.4	9	0.32256571610924
206	8	9	18	(9, 500)	3	10	0.39108339452650
207	8	9	18	(9, 500)	1.4	9	0.46019298827741
208	8	9	15	(6, 500)	3	10	0.48940783424769
209	8	9	19	(10, 500)	1.4	9	0.55210154026281
210	8	9	12	(3, 500)	3	10	0.58883696387056
211	8	9	16	(7, 500)	3	10	0.63267491117585
212	8	9	15	(6, 500)	1.4	9	0.64634038589429
213	8	9	19	(10, 500)	3	10	0.65959324047435
214	8	9	20	(11, 500)	3	10	0.69986821885686
215	8	9	13	(4, 500)	3	10	0.72918324882630
216	8	9	17	(8, 500)	1.4	9	0.74024768185336
217	8	9	20	(11, 500)	2	9	0.76431470771786
218	8	9	20	(11, 500)	3	8	0.77162111515645
219	8	9	11	(2.4, 500)	3	10	0.79115741525311
220	8	9	16	(7, 500)	1.4	9	0.82854919799138
221	8	9	16	(7, 500)	2	8	0.85286581295077
222	8	9	14	(5, 500)	3	10	0.86521207017358
223	8	9	14	(5, 500)	1.4	9	0.90203514427412
224	8	9	12	(3, 500)	2	8	0.96569585159887
225	8	9	12	(3, 500)	1.4	9	0.98749295680318
226	11	10	27	(8, 600)	3	7	0.01494268390850
227	11	10	23	(4, 600)	2	8	0.04779929869649
228	11	10	29	(10, 600)	2	8	0.07219053347216
229	11	10	24	(5, 600)	2	5	0.09292063594199
230	11	10	21	(2.5, 600)	3	8	0.14752716480553
231	11	10	26	(7, 600)	1.4	6	0.25513697366481
232	11	10	24	(5, 600)	3	7	0.34162622081942
233	11	10	30	(11, 600)	2	5	0.39466125836468

N.º	N.ºg	Orden	N.ºt	Código	H	Repetición	Aleatorio
234	11	10	27	(8, 600)	2	8	0.46638883259692
235	11	10	26	(7, 600)	3	7	0.50684235244755
236	11	10	30	(11, 600)	3	6	0.53994569369439
237	11	10	30	(11, 600)	2	7	0.57528056258421
238	11	10	28	(9, 600)	2	5	0.57965089361021
239	11	10	29	(10, 600)	3	7	0.61275503544706
240	11	10	22	(3, 600)	3	7	0.68017093585862
241	11	10	21	(2.5, 600)	2	7	0.68220668150520
242	11	10	28	(9, 600)	1.4	6	0.69417370890861
243	11	10	25	(6, 600)	3	7	0.75044893318935
244	11	10	23	(4, 600)	3	7	0.82778937895803
245	11	10	24	(5, 600)	1.4	6	0.84663986886079
246	11	10	22	(3, 600)	2	5	0.88394434305751
247	11	10	25	(6, 600)	2	8	0.91610724365185
248	11	10	28	(9, 600)	3	7	0.92607614375700
249	11	10	26	(7, 600)	2	5	0.95902748686998
250	11	10	22	(3, 600)	1.4	6	0.97113700798452
251	4	11	10	(11, 400)	3	10	0.14452048759772
252	4	11	2	(3, 400)	3	10	0.16349070027125
253	4	11	6	(7, 400)	2	8	0.16690072829398
254	4	11	9	(10, 400)	1.4	9	0.21055052135202
255	4	11	8	(9, 400)	3	10	0.23178519605869
256	4	11	6	(7, 400)	3	10	0.37806229088161
257	4	11	5	(6, 400)	1.4	9	0.38704946574493
258	4	11	4	(5, 400)	2	8	0.41057263955027
259	4	11	9	(10, 400)	3	10	0.43363157269670
260	4	11	8	(9, 400)	2	8	0.45967561118830
261	4	11	6	(7, 400)	1.4	9	0.50746518757005
262	4	11	1	(2.3, 400)	2	9	0.58776955940802
263	4	11	8	(9, 400)	1.4	9	0.64163297056084
264	4	11	7	(8, 400)	3	10	0.65392333866060
265	4	11	7	(8, 400)	1.4	9	0.67584651052934
266	4	11	5	(6, 400)	3	10	0.78513170140013
267	4	11	4	(5, 400)	3	10	0.80282346075006
268	4	11	4	(5, 400)	1.4	9	0.83103134629942
269	4	11	1	(2.3, 400)	3	10	0.84165136873109
270	4	11	2	(3, 400)	2	8	0.84206185812531
271	4	11	10	(11, 400)	2	9	0.85973033464264
272	4	11	10	(11, 400)	3	8	0.86317040864557
273	4	11	3	(4, 400)	1.4	9	0.87180592590753
274	4	11	2	(3, 400)	1.4	9	0.88485658428406
275	4	11	3	(4, 400)	3	10	0.98332827507688
276	12	12	24	(5, 600)	1.4	9	0.04029300657860
277	12	12	21	(2.5, 600)	3	10	0.10303134658795
278	12	12	24	(5, 600)	2	8	0.11652294468878
279	12	12	24	(5, 600)	3	10	0.12597899240336
280	12	12	21	(2.5, 600)	2	9	0.14307382813532
281	12	12	29	(10, 600)	1.4	9	0.15829658890863

N.º	N.ºg	Orden	N.ºt	Código	H	Repetición	Aleatorio
282	12	12	25	(6, 600)	3	10	0.18440759910105
283	12	12	23	(4, 600)	3	10	0.29893616973536
284	12	12	26	(7, 600)	1.4	9	0.34933492269365
285	12	12	30	(11, 600)	3	8	0.36496038043659
286	12	12	23	(4, 600)	1.4	9	0.38406077904018
287	12	12	28	(9, 600)	3	10	0.38728471447603
288	12	12	29	(10, 600)	3	10	0.39701286081547
289	12	12	26	(7, 600)	2	8	0.42318925347161
290	12	12	28	(9, 600)	2	8	0.43545521923025
291	12	12	22	(3, 600)	1.4	9	0.44850863151913
292	12	12	22	(3, 600)	3	10	0.45847706258878
293	12	12	30	(11, 600)	2	9	0.59340132551310
294	12	12	26	(7, 600)	3	10	0.60420234113409
295	12	12	27	(8, 600)	3	10	0.66416782572418
296	12	12	22	(3, 600)	2	8	0.73911135589724
297	12	12	25	(6, 600)	1.4	9	0.75572668275913
298	12	12	30	(11, 600)	3	10	0.87544494889547
299	12	12	28	(9, 600)	1.4	9	0.94730661670026
300	12	12	27	(8, 600)	1.4	9	0.95838538194910
301	12	12	23	(4, 600)	1.4	9	0.38406077904018
302	11	10	22	(3, 600)	1.4	6	0.97113700798452
303	11	10	23	(4, 600)	2	8	0.04779929869649
304	11	10	27	(8, 600)	2	8	0.46638883259692
305	8	9	12	(3, 500)	1.4	9	0.98749295680318
306	8	9	16	(7, 500)	1.4	9	0.82854919799138
307	8	9	13	(4, 500)	1.4	9	0.32256571610924
308	7	6	13	(4, 500)	2	8	0.75713470147457
309	7	6	12	(3, 500)	2	5	0.88957493158523
310	8	9	16	(7, 500)	2	8	0.85286581295077
311	8	9	20	(11, 500)	2	9	0.76431470771786
312	5	4	20	(11, 500)	2	1	0.12261561385822
313	6	2	18	(9, 500)	1.4	3	0.68380989355501
314	1	8	9	(10, 400)	1.4	3	0.59095009894916
315	4	11	6	(7, 400)	1.4	9	0.50746518757005
316	4	11	2	(3, 400)	1.4	9	0.88485658428406
317	2	5	1	(2.3, 400)	2	5	0.29838945844676
318	3	1	2	(3, 400)	2	5	0.71903835155536
319	3	1	7	(8, 400)	2	8	0.27505018759985
320	3	1	10	(11, 400)	2	5	0.24016403348651
321	4	11	6	(7, 400)	2	8	0.16690072829398
322	3	1	1	(2.3, 400)	2	7	0.21183850674424
323	8	9	18	(9, 500)	3	10	0.39108339452650
324	1	8	6	(7, 400)	2	2	0.73020677801728
325	6	2	18	(9, 500)	3	4	0.03140717430506
326	6	2	18	(9, 500)	3	4	0.03140717430506
327	6	2	19	(10, 500)	1.4	6	0.95692481438164
328	6	2	11	(2.4, 500)	2	5	0.05491488624830
329	9	7	29	(10, 600)	3	1	0.51645579614659

N.º	N.ºg	Orden	N.ºt	Código	H	Repetición	Aleatorio
330	8	9	17	(8, 500)	3	10	0.22577353066299
331	3	1	10	(11, 400)	2	7	0.31311480456497
332	3	1	9	(10, 400)	2	8	0.76528026780579
333	10	3	22	(3, 600)	3	4	0.64775320480112
334	11	10	30	(11, 600)	2	5	0.39466125836468
335	11	10	30	(11, 600)	2	7	0.57528056258421
336	12	12	21	(2.5, 600)	3	10	0.10303134658795
337	5	4	11	(2.4, 500)	2	3	0.17513920494821
338	5	4	11	(2.4, 500)	3	2	0.78331167751458
339	8	9	17	(8, 500)	3	10	0.22577353066299
340	8	9	12	(3, 500)	3	10	0.58883696387056
341	6	2	18	(9, 500)	3	4	0.03140717430506
342	3	1	5	(6, 400)	3	7	0.52055200247560
343	1	8	8	(9, 400)	3	1	0.03148831665052
344	3	1	5	(6, 400)	3	7	0.52055200247560
345	3	1	10	(11, 400)	3	6	0.34691213082988
346	3	1	10	(11, 400)	3	6	0.34691213082988
347	3	1	7	(8, 400)	2	8	0.27505018759985
348	3	1	1	(2.3, 400)	2	7	0.21183850674424
349	3	1	1	(2.3, 400)	3	8	0.42628516315017
350	3	1	2	(3, 400)	1.4	6	0.28589558636304
351	6	2	11	(2.4, 500)	3	4	0.01273246097844
352	6	2	18	(9, 500)	3	4	0.03140717430506
353	5	4	18	(9, 500)	3	1	0.05295223195571
354	5	4	13	(4, 500)	3	1	0.45386164530646
355	2	5	6	(7, 400)	1.4	3	0.77314041031059
356	2	5	2	(3, 400)	1.4	3	0.64882999227848
357	2	5	2	(3, 400)	1.4	3	0.64882999227848
358	7	6	12	(3, 500)	2	5	0.88957493158523
359	7	6	12	(3, 500)	2	5	0.88957493158523
360	7	6	12	(3, 500)	1.4	6	0.70698817574885
361	7	6	14	(5, 500)	1.4	6	0.99028562300373
362	9	7	28	(9, 600)	3	1	0.03901914767993
363	9	7	29	(10, 600)	1.4	3	0.24884656820252
364	9	7	21	(6, 600)	1.4	3	0.52488662159863
365	1	8	6	(7, 400)	3	1	0.31833977565514
366	1	8	5	(6, 400)	1.4	3	0.47791476637855
367	1	8	9	(10, 400)	1.4	3	0.59095009894916
368	2	5	3	(4, 400)	2	5	0.41762739920523
369	2	5	2	(3, 400)	1.4	3	0.64882999227848
370	3	1	6	(7, 400)	2	5	0.22760081512388
371	1	8	10	(11, 400)	2	1	0.72818449146911
372	1	8	1	(2.3, 400)	2	1	0.73043862785384
373	7	6	14	(5, 500)	2	7	0.36169046058785
374	5	4	13	(4, 500)	1.4	3	0.88107959704939
375	7	6	11	(2.4, 500)	2	7	0.11341431003530
376	7	6	12	(3, 500)	1.4	6	0.70698817574885
377	7	6	13	(4, 500)	2	8	0.75713470147457

N.º	N.ºg	Orden	N.ºt	Código	H	Repetición	Aleatorio
378	7	6	14	(5, 500)	1.4	6	0.99028562300373
379	7	6	12	(3, 500)	2	5	0.88957493158523
380	11	10	26	(7, 600)	3	7	0.50684235244755
381	10	3	30	(11, 600)	3	4	0.33607078844216
382	4	11	7	(8, 400)	3	10	0.65392333866060
383	1	8	8	(9, 400)	2	2	0.30529982149910
384	1	8	4	(5, 400)	2	2	0.81141266421160
385	12	12	24	(5, 600)	2	8	0.11652294468878
386	12	12	26	(7, 600)	2	8	0.42318925347161
387	8	9	17	(8, 500)	3	10	0.22577353066299

18.2 Tabla de datos

Tabla 225

Tabla de datos

N.º	Código prueba	Fecha	Ti	Tf	t1	t1	t2	t2	M1	M2	W1	W2	P1i	P1f	$P1i_{min}$	$P1f_{min}$	P_{max}	t_{n1}	t_{n1}	n1	t_{n2}	t_{n2}	n2	H_{min}	H_{max}	N_{min}	E
			°C	°C	min	s	min	s	kg	kg	kg	kg	Bar	Bar	Bar	Bar	Bar	min	s	[ ]	min	s	[ ]	cm	cm	cm	
			1	2	3	4	5	6	7	7	8	8	9	10	11	12	13	14	15	16	14	15	16	17	18	19	20
1	(X1); (2); (7)	26/08/22	11.2	11.1	1	0.35	1	1.32	5.086	16.533	0.772	0.298	0.45	0.46			2.41	1	1.22	39	1	0.34	38				1
2	(X6); (1.4); (6)	07/08/22	15.0	15.2	1	0.37	1	0.09	0.849	13.486	0.767	0.082	0.95	0.98				1	0.97	36	1	0.97	36				1
3	(X6); (2); (5)	07/09/22	19.1	19.2	1	0.31	1	0.37	0.996	13.964	0.769	0.080	1.36	1.35			2.38	1	0.10	40	1	0.41	40	113.3	112.3		1
4	(X10); (2); (5)	07/08/22	17.3	17.6	1	0.56	1	0.69	0.309	12.464	0.779	0.083	2.18	2.21			2.42	1	1.19	39	1	0.91	39				1
5	(X4); (2); (5)	07/08/22	17.8	17.7	1	0.44	1	0.31	2.095	16.840	0.772	0.296	0.98	0.98			2.40	1	0.09	40	1	0.31	40				1
6	(X7); (2); (8)	12/08/22	10.8	10.7	1	0.44	1	0.62	0.664	13.469	0.771	0.081	1.59	1.58			2.38	1	0.66	40	1	0.09	40				1
7	(X3); (3); (7)	08/08/22	13.6	13.5	1	0.84	1	0.31	3.060	20.178	0.778	0.296	1.18	1.23			3.60	0	59.38	46	1	1.32	47				1
8	(X5); (2); (8)	08/08/22	13.0	12.9	1	0.41	1	0.59	1.580	15.637	0.778	0.300	1.18	1.18			2.43	1	0.97	40	1	0.41	40				1
9	(X2); (1.4); (6)	13/08/22	15.7	15.6	1	0.78	1	1.03	3.515	14.150	0.769	0.298	0.42	0.42			1.69	1	0.19	35	1	2.22	36				1
10	(X10); (2); (7)	20/09/22	12.9	12.9	1	0.97	1	0.37	0.257	11.313	0.767	0.081	2.17	2.15	2.16	2.14	2.41	1	0.19	39	0	59.66	39	112.6	111.7		1
11	(X9); (3); (7)	09/08/22	11.8	11.8	1	0.53	1	0.28	0.494	15.620	0.769	0.082	2.9	2.96			3.60	1	0.81	46	1	0.66	46				1
12	(X10); (3); (6)	12/08/22	11.6	11.5	1	0.53	1	0.47	0.417	15.378	0.771	0.082	3.21	3.18			3.72	1	1.03	46	1	0.40	46				1
13	(X1); (3); (8)	13/08/22	16.6	16.5	0	59.94	1	0.09	6.212	20.512	0.772	0.300	0.69	0.69			3.65	1	0.90	44	1	0.87	44				1
14	(X8); (2); (5)	10/08/22	12.9	12.9	1	0.50	1	0.63	0.515	13.192	0.770	0.081	1.74	1.8				1	0.44	40	1	0.75	40				1
15	(X3); (2); (8)	10/08/22	12.6	12.6	1	0.75	1	1.16	2.815	16.451	0.779	0.297	0.8	0.78			2.39	1	1.31	41	1	1.31	41				1
16	(X5); (3); (7)	26/09/22	12.3	12.2	0	59.56	1	0.28	1.581	18.694	0.768	0.080	1.75	1.75	1.72	1.74		1	0.22	45	1	0.41	45	12.5	11.1	315.4	1
17	(X8); (1.4); (6)	11/08/22	12.6	12.6	1	0.68	1	0.31	0.564	11.865	0.772	0.081	1.23	1.22			1.72	1	0.00	35	1	0.15	35				1
18	(X4); (1.4); (6)	11/08/22	12.6	12.6	1	0.50	1	0.19	1.656	14.165	0.774	0.081	0.7	0.69			1.73	1	0.25	36	1	0.31	36				1
19	(X4); (3); (7)	11/08/22	12.4	12.4	1	0.43	1	0.41	2.351	18.688	0.771	0.296	1.45	1.46			3.69	1	0.82	48	1	0.31	48				1

N.º	Código prueba	Fecha	Ti	Tf	t1	t1	t2	t2	M1	M2	W1	W2	P1i	P1f	$P1i_{min}$	$P1f_{min}$	P_{max}	t_{n1}	t_{n1}	n1	t_{n2}	t_{n2}	n2	H_{min}	H_{max}	N_{min}	E
			°C	°C	min	s	min	s	kg	kg	kg	kg	Bar	Bar	Bar	Bar	Bar	min	s	[ ]	min	s	[ ]	cm	cm	cm	
20	(X7); (3); (7)	11/08/22	12.2	12.1	1	0.53	1	0.31	0.617	14.559	0.775	0.080	2.37	2.38			3.65	1	0.25	46	1	0.50	46				1
21	(X2); (2); (5)	11/08/22	11.6	11.5	1	1.78	1	0.68	4.126	16.966	0.786	0.298	0.59	0.59			2.38	1	0.90	40	0	59.44	39				1
22	(X9); (2); (8)	20/09/22	12.9	13.0	1	0.50	1	0.34	0.414	12.281	0.771	0.081	1.94	1.93	1.93	1.93		0	59.88	39	0	59.66	39	112.6	111.8		1
23	(X8); (3); (7)	12/08/22	13.3	13.1	1	0.68	1	1.75	0.548	15.539	0.772	0.081	2.63	2.62			3.66	0	59.90	45	0	59.93	45				1
24	(X2); (3); (7)	12/08/22	12.6	12.6	0	50.50	1	0.97	4.760	17.617	0.772	0.299	0.89	0.88			3.66	1	1.00	45	1	0.78	45				1
25	(X6); (3); (7)	12/08/22	12.1	12.0	1	0.50	1	0.75	1.303	18.180	0.772	0.300	2.03	2.04			3.72	1	0.91	46	0	59.94	45				1
26	(X11); (3); (4)	19/08/22	11.9	11.9	1	0.56	1	0.87	5.919	20.189	0.772	0.298	0.7	0.71			3.95	1	0.94	38	1	0.53	38				1
27	(X18); (3); (4)	24/09/22	15.5	15.5	1	0.31	1	0.25	0.513	16.584	0.770	0.081	2.6	2.65	2.56	2.61	4.07	1	0.32	37	1	0.28	37	13.3	11.3		1
28	(X14); (1.4); (3)	14/08/22	11.3	11.3	1	0.47	1	0.63	1.820	14.937	0.771	0.081	0.69	0.7			2.01	1	0.16	30	1	16.75	38				1
29	(X11); (2); (5)	20/08/22	17.0	17.0	1	0.63	1	0.22	4.849	16.665	0.768	0.298	0.47	0.47			2.65	0	59.75	32	1	1.31	33				1
30	(X11); (3); (6)	17/08/22	13.7	13.6	1	0.07	1	0.85	5.832	19.995	0.770	0.298	0.72	0.71			3.90	1	0.87	38	1	1.75	39				1
31	(X12); (1.4); (3)	17/08/22	13.2	13.2	1	0.72	1	1.32	3.380	15.029	0.770	0.298	0.42	0.42			2.04	1	0.31	29	1	2.69	30				1
32	(X17); (3); (4)	17/08/22	12.5	12.5	1	0.68	1	0.75	0.842	16.154	0.782	0.082	2.36	2.38			3.90	1	0.16	39	1	0.04	39				1
33	(X16); (1.4); (3)	17/08/22	11.8	11.7	1	0.41	1	0.53	1.061	13.855	0.772	0.081	0.96	0.97			2.02	1	0.29	30	1	0.63	30				1
34	(X13); (2); (5)	17/08/22	11.3	11.3	1	0.66	1	1.97	2.986	17.170	0.773	0.296	0.79	0.78			2.77	0	59.84	34	0	59.93	34				1
35	(X17); (2); (5)	17/08/22	10.8	10.7	1	0.84	1	0.56	0.822	14.716	0.774	0.083	1.56	1.57			2.75	1	0.75	34	1	0.87	34				1
36	(X15); (1.4); (6)	18/08/22	16.1	16.5	1	3.65	1	0.34	1.348	15.128	0.767	0.080	0.82	0.83			2.06	1	1.50	31	1	1.69	31				1
37	(X18); (1.4); (3)	18/08/22	18.3	18.2	1	0.41	1	0.41	0.714	12.724	0.769	0.080	1.22	1.22			2.05	1	0.84	30	1	0.97	30				1
38	(X20); (2); (3)	18/08/22	16.8	16.7	1	1.37	1	0.56	0.475	13.357	0.768	0.081	2.14	2.14			2.69	1	0.75	34	1	1.32	34				1
39	(X17); (1.4); (6)	18/08/22	15.9	15.9	1	0.56	1	0.00	0.841	12.963	0.769	0.081	1.1	1.1				1	1.00	30	1	1.19	30				1
40	(X16); (3); (4)	18/08/22	15.3	15.2	1	0.60	1	0.25	1.256	18.366	0.783	0.082	2.06	2.06			3.89	1	0.03	39	1	0.72	39				1
41	(X14); (3); (4)	18/08/22	14.4	14.3	1	0.03	1	0.19	2.562	19.634	0.775	0.302	1.47	1.47			3.94	0	59.47	39	1	1.10	40				1
42	(X12); (3); (4)	18/08/22	13.3	13.3	1	0.21	1	0.28	4.561	20.623	0.771	0.298	0.88	0.88			3.93	0	59.78	38	1	2.87	40				1
43	(X15); (3); (4)	18/08/22	12.6	12.5	1	0.50	1	1.28	1.974	19.368	0.773	0.299	1.77	1.78			3.82	1	0.40	40	1	0.59	40				1
44	(X13); (3); (4)	18/08/22	12.1	12.0	1	0.46	1	0.56	3.384	20.352	0.775	0.299	1.17	1.18			3.94	0	59.94	39	1	0.97	40				1

N.º	Código prueba	Fecha	Ti	Tf	t1	t1	t2	t2	M1	M2	W1	W2	P1i	P1f	$P1i_{min}$	$P1f_{min}$	P_{max}	t_{n1}	t_{n1}	n1	t_{n2}	t_{n2}	n2	H_{min}	H_{max}	N_{min}	E
			°C	°C	min	s	min	s	kg	kg	kg	kg	Bar	Bar	Bar	Bar	Bar	min	s	[ ]	min	s	[ ]	cm	cm	cm	
45	(X19); (2); (5)	19/08/22	12.8	13.0	1	0.28	1	0.82	0.537	13.316	0.770	0.081	1.96	1.98			2.74	1	0.72	34	1	0.97	34				1
46	(X20); (3); (4)	19/08/22	13.5	13.8	1	0.66	1	0.41	0.440	16.464	0.770	0.081	3.25	3.24			3.89	0	59.59	38	0	59.97	38				1
47	(X19); (1.4); (6)	19/08/22	15.6	15.8	1	0.60	0	59.96	0.583	12.144	0.768	0.081	1.36	1.37			2.02	0	59.44	29	0	59.62	29				1
48	(X19); (3); (4)	20/08/22	16.7	16.9	1	2.41	1	0.66	0.469	16.526	0.775	0.081	2.95	2.83			3.90	1	0.22	38	1	0.53	38				1
49	(X15); (2); (5)	19/08/22	12.2	12.3	1	0.54	1	1.10	1.827	16.405	0.768	0.299	1.17	1.17			2.68	1	1.50	35	0	59.72	34				1
50	(X13); (1.4); (6)	19/08/22	12.2	12.2	1	0.37	1	0.19	2.470	14.933	0.770	0.298	0.55	0.55			1.98	0	59.69	29	1	1.88	30				1
51	(X27); (1.4); (6)	22/08/22	7.5	7.5	1	1.19	1	6.28	1.031	14.356	0.782	0.082	1.09	1.11			2.30	0	59.60	25	1	1.97	26				1
52	(X28); (1.4); (3)	21/08/22	18.9	18.9	1	0.78	1	0.78	0.783	13.388	0.768	0.080	1.22	1.24			2.15	1	1.28	26	1	1.65	26				1
53	(X24); (1.4); (3)	21/08/22	18.8	18.7	1	1.37	1	0.41	1.968	15.726	0.769	0.300	0.69	0.7			2.17	1	1.88	26	0	59.25	25				1
54	(X29); (1.4); (6)	21/08/22	18.6	18.6	1	0.68	0	59.81	0.648	13.112	0.769	0.080	1.37	1.36			2.18	0	59.28	25	0	59.09	25				1
55	(X30); (2); (3)	21/08/22	16.4	16.5	1	0.54	1	0.15	0.482	13.777	0.769	0.082	2.17	2.16			3.05	1	1.72	29	1	1.88	29				1
56	(X25); (3); (4)	21/08/22	16.4	16.3	0	59.93	1	0.16	2.029	20.415	0.776	0.300	1.75	1.78				1	1.56	35	0	59.81	34				1
57	(X29); (3); (4)	22/08/22	7.3	7.3	1	0.82	1	0.19	0.468	16.593	0.772	0.081	2.94	3				1	0.63	32	1	0.31	32				1
58	(X25); (1.4); (6)	21/08/22	15.8	15.7	1	0.63	1	0.09	1.379	15.534	0.769	0.081	0.82	0.82			2.20	1	1.09	26	1	1.25	26				1
59	(X30); (3); (4)	22/09/22	13.6	13.5	1	0.28	1	0.22	0.374	18.031	0.770	0.081	3.2	3.3	3.18	3.25		1	0.69	32	1	0.72	32	11.3	13		1
60	(X22); (1.4); (3)	22/08/22	15.9	16.3	1	0.69	1	0.56	3.403	15.278	0.771	0.298	0.41	0.42			2.21	1	1.12	25	1	0.93	25				1
61	(X23); (1.4); (6)	22/08/22	17.5	17.6	1	0.62	1	0.44	2.510	15.611	0.773	0.300	0.55	0.55			2.20	1	1.94	26	0	59.09	25				1
62	(X21); (3); (4)	22/08/22	18.7	18.7	0	50.81	1	0.53	5.322	17.916	0.769	0.297	0.74	0.75				1	0.75	32	1	0.12	32				1
63	(X26); (1.4); (3)	22/08/22	19.1	19.1	1	1.69	1	0.10	1.178	14.612	0.769	0.080	0.96	0.97			2.15	0	59.65	26	1	0.13	26				1
64	(X29); (2); (5)	22/08/22	15.1	14.9	1	0.56	1	0.28	0.751	14.393	0.767	0.296	1.94	1.96			3.05	1	0.00	28	1	2.00	29	113.8	112.2		1
65	(X27); (3); (4)	22/08/22	19.0	19.0	1	0.88	0	59.90	0.831	17.706	0.767	0.080	2.38	2.37				1	0.12	33	1	0.56	33				1
66	(X22); (3); (4)	23/09/22	8.1	8.1	0	50.41	1	0.44	4.563	18.364	0.767	0.297	0.89	0.88	0.86	0.85	4.35	0	59.72	32	1	0.03	32	13.7	12.2	315.8	1
67	(X21); (3); (6)	22/08/22	18.6	18.6	0	50.85	1	0.34	5.276	18.159	0.774	0.299	0.73	0.74				1	0.28	32	1	0.75	32				1
68	(X21); (2); (5)	01/09/22	18.6	18.8	1	0.56	1	0.50	4.327	18.457	0.768	0.296	0.5	0.5				0	59.66	27	1	0.12	27	114.7	113.1		1
69	(X24); (3); (4)	22/08/22	18.3	18.3	0	50.93	1	1.12	2.534	17.833	0.768	0.296	1.46	1.47				1	1.09	35	1	1.59	35	13.9	11.9		1

N.º	Código prueba	Fecha	Ti	Tf	t1	t1	t2	t2	M1	M2	W1	W2	P1i	P1f	$P1i_{min}$	$P1f_{min}$	P_{max}	t_{n1}	t_{n1}	n1	t_{n2}	t_{n2}	n2	H_{min}	H_{max}	N_{min}	E
			°C	°C	min	s	min	s	kg	kg	kg	kg	Bar	Bar	Bar	Bar	Bar	min	s	[ ]	min	s	[ ]	cm	cm	cm	
70	(X26); (3); (4)	22/08/22	18.1	18.0	1	0.38	1	1.00	1.530	18.792	0.771	0.298	2.06	2.07				1	1.31	34	0	59.53	33	13.2	11.1		1
71	(X27); (2); (5)	22/08/22	17.5	17.4	1	0.63	0	59.94	1.199	15.601	0.772	0.299	1.57	1.57			3.05	1	1.81	30	1	1.38	30	113.6	112		1
72	(X23); (2); (5)	22/08/22	17.0	17.0	1	0.56	1	1.40	2.802	17.919	0.770	0.299	0.78	0.78			3.03	1	0.28	29	1	3.94	31	114.2	112.8		1
73	(X28); (3); (4)	01/09/22	19.1	19.0	1	0.43	1	0.13	0.533	18.068	0.775	0.081	2.63	2.68				0	59.28	31	0	59.72	31	14	11.8		1
74	(X23); (3); (4)	01/09/22	18.1	18.1	0	50.43	1	0.91	3.330	18.304	0.766	0.298	1.18	1.19				1	0.00	33	1	7.00	37				1
75	(X25); (2); (5)	22/08/22	12.8	12.7	1	0.66	1	0.88	1.849	17.160	0.769	0.297	1.17	1.17			3.06	1	0.65	30	1	1.25	30	113.5	112.6		1
76	(X12); (3); (1)	24/08/22	6.1	6.1	0	50.88	1	0.69	4.585	17.616	0.767	0.297	0.89	0.9			4.06	0	59.85	38	1	0.35	38	13.8	12.9		1
77	(X17); (2); (2)	24/08/22	5.9	5.9	1	0.62	1	0.28	0.903	14.877	0.769	0.080	1.54	1.54			2.84	1	0.28	33	1	0.47	33	113.5	112.4		1
78	(X18); (3); (1)	24/08/22	14.1	14.4	1	0.60	1	0.25	0.519	16.252	0.771	0.081	2.64	2.67				1	1.59	38	1	1.06	38	14	11.5		1
79	(X15); (2); (2)	24/08/22	17.1	17.5	1	0.65	0	59.97	1.566	16.434	0.786	0.081	1.17	1.18			2.71	0	59.40	34	1	1.47	35	113.6	112.6		1
80	(X12); (2); (2)	24/08/22	17.6	17.9	1	0.91	1	1.00	4.024	17.839	0.769	0.297	0.6	0.6				1	0.25	33	1	1.81	34	114.2	112.9		1
81	(X16); (2); (2)	24/08/22	18.5	18.5	1	0.69	1	0.09	1.232	15.681	0.768	0.080	1.36	1.37			2.78	0	59.84	34	0	59.72	34				1
82	(X20); (2); (1)	24/08/22	18.4	18.6	1	0.06	1	0.16	0.408	12.912	0.774	0.081	2.18	2.2			2.74	1	1.54	34	1	0.15	33	113.7	112		1
83	(X11); (2); (3)	24/09/22	15.6	15.6	1	0.41	0	59.69	5.154	16.636	0.768	0.297	0.48	0.47	0.44	0.44	2.66	1	0.28	32	1	0.35	32	113.7	112.9		1
84	(X14); (3); (1)	24/08/22	17.3	17.2	1	0.38	1	1.28	2.591	20.195	0.769	0.298	1.44	1.46			4.10	1	0.62	40	1	0.87	40	13.4	12.1		1
85	(X19); (2); (2)	24/08/22	16.9	16.9	1	0.44	0	59.97	0.506	13.331	0.770	0.081	1.95	1.95			2.74	1	0.00	33	1	1.37	34	113.5	112.2		1
86	(X19); (1.4); (3)	24/08/22	16.5	16.3	1	0.47	1	0.25	0.559	12.021	0.774	0.081	1.36	1.37			2.06	1	1.19	30	1	1.60	30	171.4	170.4		1
87	(X13); (2); (2)	24/08/22	15.6	15.5	1	0.65	1	1.15	2.923	16.973	0.770	0.298	0.79	0.78			2.77	1	0.78	34	1	0.19	34	113.9	112.7		1
88	(X19); (3); (1)	24/08/22	13.1	13.0	1	0.97	1	0.50	0.449	15.706	0.768	0.079	2.9	2.94				1	0.13	38	1	0.69	38			314.9	1
89	(X13); (3); (1)	25/08/22	15.1	14.8	0	59.90	1	1.12	3.321	19.972	0.772	0.296	1.17	1.17				0	59.35	39	1	0.72	40				1
90	(X17); (1.4); (3)	24/08/22	11.6	11.6	1	0.75	1	1.12	0.871	13.413	0.772	0.081	1.1	1.12			2.06	0	59.90	29	1	1.75	30	171.5	170.8	314.8	1
91	(X11); (2); (1)	25/08/22	16.2	16.6	1	0.37	1	0.44	5.044	17.019	0.768	0.297	0.47	0.48			2.78	0	59.78	32	1	1.88	33	114.1	112.9		1
92	(X17); (3); (1)	25/08/22	18.2	18.4	1	0.50	1	0.09	0.826	16.478	0.778	0.081	2.32	2.34			4.15	0	59.31	38	1	1.38	39	13	11.4	314.8	1
93	(X16); (3); (1)	25/08/22	18.2	18.3	1	0.21	1	0.13	1.244	17.541	0.770	0.081	2.06	2.06				1	1.44	40	1	0.53	39	13.1	11.6		1
94	(X15); (1.4); (3)	25/08/22	18.8	18.9	1	0.25	1	0.06	1.306	14.595	0.775	0.081	0.81	0.82			2.05	0	59.88	30	1	1.97	31	171.6	170.7	315	1

N.º	Código prueba	Fecha	Ti	Tf	t1	t1	t2	t2	M1	M2	W1	W2	P1i	P1f	$P1i_{min}$	$P1f_{min}$	P_{max}	t_{n1}	t_{n1}	n1	t_{n2}	t_{n2}	n2	H_{min}	H_{max}	N_{min}	E
			°C	°C	min	s	min	s	kg	kg	kg	kg	Bar	Bar	Bar	Bar	Bar	min	s	[ ]	min	s	[ ]	cm	cm	cm	
95	(X18); (2); (2)	25/08/22	19.1	19.1	1	0.53	1	0.31	0.613	13.226	0.768	0.081	1.75	1.77			2.73	0	59.90	33	0	59.25	33				1
96	(X11); (3); (2)	24/09/22	15.5	15.5	0	50.12	1	0.34	5.871	17.800	0.769	0.296	0.71	0.72	0.68	0.68		0	59.75	36	0	59.69	36	14.1	12.7	315.1	1
97	(X13); (1.4); (3)	08/09/22	13.9	13.9	1	0.28	1	0.66	2.539	15.187	0.771	0.297	0.53	0.56				0	59.72	29	0	59.69	29	171.7	171		1
98	(X20); (3); (2)	25/08/22	15.5	15.6	1	0.50	1	0.63	0.410	16.058	0.770	0.081	3.17	3.27				0	59.94	38	1	0.75	39				1
99	(X15); (3); (1)	25/08/22	17.3	17.2	1	0.06	1	2.63	1.964	19.255	0.778	0.296	1.75	1.74				1	0.12	40	1	0.13	40				1
100	(X14); (2); (2)	25/08/22	15.4	15.4	1	0.57	1	1.06	2.215	16.637	0.778	0.298	0.98	0.98			2.73	1	0.03	34	1	1.25	35				1
101	(X7); (1.4); (6)	25/08/22	13.1	13.0	1	0.72	1	0.22	0.727	13.375	0.777	0.081	1.1	1.1			1.71	1	0.12	35	1	1.22	36				1
102	(X9); (2); (5)	25/08/22	12.3	12.3	1	0.47	1	0.22	0.398	12.255	0.774	0.081	1.96	1.97			2.40	0	59.75	39	1	1.06	40				1
103	(X4); (3); (4)	25/08/22	11.7	11.6	1	0.16	1	0.68	2.387	18.737	0.770	0.301	1.46	1.46			3.75	1	0.03	47	1	1.51	48			315.3	1
104	(X3); (1.4); (6)	26/08/22	6.3	6.3	1	0.50	1	0.88	2.376	14.568	0.767	0.299	0.56	0.56			1.74	1	0.22	35	1	0.37	35	170.9	170.7	315.2	1
105	(X8); (3); (4)	26/08/22	6.4	6.4	1	0.31	1	0.19	0.517	15.214	0.771	0.081	2.65	2.66			3.75	1	0.06	46	1	0.38	46				1
106	(X5); (2); (5)	26/08/22	6.3	6.4	1	0.25	0	59.89	1.361	15.579	0.775	0.081	1.17	1.19			2.43	0	59.78	40	1	0.03	40				1
107	(X7); (3); (4)	26/08/22	12.9	13.3	1	0.53	1	0.16	0.616	14.682	0.768	0.080	2.34	2.35			3.72	0	59.97	45	0	59.56	45			315	1
108	(X5); (1.4); (6)	26/08/22	13.3	13.2	1	0.56	1	0.22	1.238	14.152	0.778	0.081	0.81	0.83			1.74	1	1.50	36	1	1.25	36				1
109	(X9); (3); (4)	26/08/22	15.0	15.6	1	0.32	1	0.13	0.457	14.965	0.769	0.080	2.96	2.91				1	0.06	46	0	59.91	46				1
110	(X1); (2); (5)	26/08/22	17.1	17.3	1	0.32	1	1.00	5.105	16.873	0.770	0.301	0.45	0.46			2.39	0	59.75	38	1	3.06	40				1
111	(X7); (2); (5)	26/08/22	17.8	17.9	1	0.22	1	0.00	0.693	13.326	0.769	0.080	1.58	1.58				1	0.00	40	1	0.25	40				1
112	(X4); (1.4); (3)	26/08/22	12.8	12.8	1	0.32	1	0.41	1.634	14.348	0.772	0.081	0.69	0.69			1.71	1	0.62	36	1	0.66	36				1
113	(X3); (2); (5)	07/09/22	17.8	17.8	1	0.41	1	0.25	2.824	16.497	0.768	0.296	0.77	0.77			2.38	0	59.94	40	0	59.75	40	113.5	112.7		1
114	(X2); (3); (4)	26/08/22	17.1	17.1	1	0.18	1	0.81	4.576	20.045	0.768	0.298	0.88	0.87			3.65	1	0.88	46	1	0.75	46				1
115	(X10); (2); (3)	26/08/22	16.8	16.8	1	2.94	1	0.63	0.258	11.834	0.773	0.081	2.17	2.2			2.37	1	0.82	40	1	1.16	40				1
116	(X10); (3); (4)	26/08/22	16.3	16.3	1	0.37	1	0.07	0.376	15.092	0.770	0.081	3.3	3.29			3.70	1	0.62	46	1	0.43	46				1
117	(X8); (1.4); (3)	26/08/22	12.5	12.3	1	5.38	1	0.09	0.579	13.617	0.771	0.081	1.22	1.24			1.72	1	0.66	34	0	59.97	34				1
118	(X2); (1.4); (3)	07/09/22	18.5	18.6	1	0.88	1	0.66	3.447	14.055	0.768	0.301	0.41	0.41			1.73	1	0.84	35	1	0.38	35	171.2	170.6	315.2	1
119	(X3); (3); (4)	26/08/22	15.5	15.5	1	0.47	1	0.97	3.191	19.330	0.770	0.296	1.18	1.18			3.65	1	0.75	47	0	59.88	46				1

N.º	Código prueba	Fecha	Ti	Tf	t1	t1	t2	t2	M1	M2	W1	W2	P1i	P1f	$P1i_{min}$	$P1f_{min}$	P_{max}	t_{n1}	t_{n1}	n1	t_{n2}	t_{n2}	n2	H_{min}	H_{max}	N_{min}	E
			°C	°C	min	s	min	s	kg	kg	kg	kg	Bar	Bar	Bar	Bar	Bar	min	s	[ ]	min	s	[ ]	cm	cm	cm	
120	(X9); (1.4); (6)	27/08/22	14.5	14.8	1	1.16	1	0.22	0.434	12.284	0.768	0.081	1.37	1.38			1.73	0	59.71	34	1	1.43	35	171.2	170.3	315.2	1
121	(X6); (3); (4)	26/08/22	14.6	14.5	1	0.53	1	0.03	1.024	16.830	0.769	0.080	2.05	2.05				1	0.22	46	1	0.22	46				1
122	(X6); (1.4); (3)	27/08/22	17.0	17.2	1	0.31	0	59.85	0.822	13.238	0.776	0.080	0.96	0.97				1	0.75	36	1	0.87	36				1
123	(X1); (3); (6)	26/08/22	11.9	11.9	0	50.66	1	1.22	6.139	16.654	0.773	0.298	0.69	0.69			3.64	0	59.44	43	1	0.15	44				1
124	(X1); (3); (4)	27/08/22	17.9	17.9	0	50.37	1	1.72	6.170	17.514	0.776	0.299	0.68	0.69			3.72	1	0.38	43	1	0.28	43			315.1	1
125	(X5); (3); (4)	27/08/22	17.8	17.8	1	0.41	1	0.54	1.798	18.170	0.770	0.298	1.76	1.74				0	59.96	46	1	1.56	47				1
126	(X12); (3); (7)	27/08/22	13.2	13.1	0	50.46	1	0.78	4.610	17.527	0.776	0.298	0.88	0.89			4.06	0	59.88	38	1	0.06	38				1
127	(X18); (1.4); (6)	27/08/22	12.8	12.8	1	0.69	1	0.18	0.663	13.273	0.771	0.080	1.22	1.23			2.02	1	1.75	30	1	2.00	30				1
128	(X19); (2); (8)	27/08/22	12.5	12.3	1	0.31	1	0.25	0.525	13.369	0.777	0.082	1.98	1.98			2.74	1	0.10	33	1	0.00	33				1
129	(X16); (2); (5)	27/08/22	12.1	12.0	1	0.18	1	0.22	1.219	15.446	0.774	0.081	1.37	1.36			2.73	1	1.34	35	1	1.91	35				1
130	(X11); (2); (7)	08/09/22	16.5	16.5	1	0.60	1	1.10	5.177	16.666	0.769	0.297	0.47	0.46			2.70	1	0.31	32	0	59.65	32	114.5	113.2		1
131	(X19); (3); (7)	27/08/22	11.5	11.5	1	0.43	1	0.03	0.470	16.121	0.773	0.080	2.94	2.96				1	0.29	38	1	0.81	38			314.9	1
132	(X17); (2); (8)	27/08/22	11.0	10.9	1	0.81	1	0.09	0.823	14.150	0.773	0.080	1.58	1.58			2.70	1	0.87	34	1	1.56	34			314.7	1
133	(X16); (3); (7)	28/08/22	6.0	6.0	1	0.35	1	1.38	1.353	18.208	0.767	0.082	2.06	2.1			4.23	1	0.18	39	1	0.22	39			314.9	1
134	(X15); (2); (7)	28/08/22	6.1	6.1	1	0.97	1	0.35	1.565	16.956	0.771	0.081	1.17	1.16				1	0.47	34	1	0.15	34				1
135	(X18); (3); (7)	28/08/22	15.9	16.2	1	0.59	1	0.28	0.512	16.373	0.767	0.081	2.66	2.68				1	0.82	38	0	59.69	37	13.2	11.4		1
136	(X14); (2); (7)	07/09/22	14.6	14.5	1	0.62	1	1.03	2.217	16.523	0.769	0.296	0.98	0.99			2.65	1	0.06	34	1	1.25	35	114.3	113.2		1
137	(X17); (3); (7)	28/08/22	15.9	15.8	1	0.28	1	0.22	0.818	16.561	0.767	0.081	2.36	2.36			4.10	1	1.60	39	1	0.09	38				1
138	(X20); (2); (7)	29/08/22	16.9	17.0	1	0.59	1	0.19	0.469	13.187	0.768	0.080	2.14	2.14			2.75	1	1.28	34	1	1.22	34	113.7	112.3		1
139	(X16); (1.4); (6)	28/08/22	15.1	15.0	1	0.19	1	0.22	1.060	13.724	0.769	0.082	0.96	0.96			1.94	0	59.75	30	1	1.47	31				1
140	(X13); (3); (7)	28/08/22	13.5	13.6	0	50.43	1	0.50	3.405	17.503	0.769	0.297	1.17	1.18				1	0.19	39	1	0.19	39				1
141	(X11); (3); (8)	28/08/22	12.7	12.6	0	50.62	1	0.66	5.923	17.590	0.770	0.299	0.71	0.71				1	0.37	37	1	0.62	37				1
142	(X12); (1.4); (6)	08/09/22	14.5	14.3	1	0.57	1	1.78	3.442	15.181	0.769	0.296	0.42	0.42			1.96	1	1.28	29	1	1.31	29	171.8	171.2		1
143	(X15); (3); (8)	29/08/22	17.6	17.5	0	50.56	1	0.22	1.698	16.500	0.769	0.081	1.75	1.77			4.15	1	0.12	39	0	59.78	39	13.8	12.1	315.1	1
144	(X13); (2); (8)	07/09/22	14.1	14.1	1	0.43	1	0.72	2.871	17.057	0.771	0.297	0.79	0.78				1	0.31	34	1	0.97	34	114.1	113.2		1

N.º	Código prueba	Fecha	Ti	Tf	t1	t1	t2	t2	M1	M2	W1	W2	P1i	P1f	$P1i_{min}$	$P1f_{min}$	P_{max}	t_{n1}	t_{n1}	n1	t_{n2}	t_{n2}	n2	H_{min}	H_{max}	N_{min}	E
			°C	°C	min	s	min	s	kg	kg	kg	kg	Bar	Bar	Bar	Bar	Bar	min	s	[ ]	min	s	[ ]	cm	cm	cm	
145	(X14); (3); (5)	29/08/22	17.6	17.6	1	0.47	1	0.97	2.528	20.453	0.770	0.298	1.45	1.46				1	0.50	39	1	0.03	39	13.7	12.1		1
146	(X12); (2); (5)	08/09/22	12.9	12.8	1	1.56	1	0.53	4.081	17.210	0.769	0.297	0.59	0.59				1	0.22	33	0	59.88	33	114.3	113.4		1
147	(X18); (2); (5)	29/08/22	18.1	18.1	1	0.75	1	0.31	0.740	13.428	0.769	0.189	1.74	1.75			2.73	1	0.43	33	1	0.06	33	113.6	112.3		1
148	(X20); (3); (6)	29/08/22	18.0	17.9	1	0.38	1	0.37	0.512	16.790	0.771	0.190	3.25	3.28				1	0.46	38	1	0.22	38	13.5	11.4		1
149	(X20); (2); (5)	29/08/22	17.5	17.5	1	0.25	1	0.12	0.570	13.020	0.769	0.190	2.14	2.14			2.65	1	0.06	33	0	59.90	33	113.8	112.3		1
150	(X14); (1.4); (6)	08/09/22	13.7	13.6	1	0.37	1	4.03	2.128	14.703	0.772	0.299	0.69	0.68				1	7.50	33	1	1.75	30	171.6	171		1
151	(X23); (2); (2)	30/08/22	11.6	11.7	1	0.43	1	0.57	2.798	17.805	0.769	0.299	0.78	0.79				1	0.25	29	1	0.28	29			315.5	1
152	(X28); (3); (1)	30/08/22	13.9	13.8	1	1.00	1	1.12	0.594	18.131	0.770	0.080	2.64	2.62			4.35	1	0.60	32	1	1.03	32	13.9	11.4		1
153	(X21); (3); (2)	30/08/22	13.3	13.3	0	50.28	1	0.50	5.291	18.147	0.779	0.298	0.75	0.75				1	0.71	32	1	0.09	32				1
154	(X24); (2); (2)	30/08/22	12.9	12.8	1	0.56	1	0.88	2.258	17.780	0.772	0.299	0.98	0.99			3.00	1	2.00	30	1	0.07	29	113.9	112.8		1
155	(X29); (1.4); (3)	02/09/22	6.6	6.6	1	0.31	1	1.60	0.652	13.385	0.768	0.081	1.37	1.38			2.30	1	2.04	25	1	4.06	26	171.4	170.4	315.6	1
156	(X29); (2); (2)	31/08/22	15.0	15.3	1	0.10	1	1.82	0.587	14.639	0.770	0.080	1.95	1.91			3.05	1	0.53	28	1	0.13	28	113.8	112.4	315.6	1
157	(X30); (3); (2)	31/08/22	16.9	17.2	1	0.34	1	0.41	0.342	18.036	0.771	0.081	3.24	3.25			4.40	1	1.06	32	1	0.59	32	14	11.5		1
158	(X29); (3); (1)	31/08/22	13.6	13.4	1	0.34	0	59.97	0.413	17.091	0.777	0.081	2.88	2.99				1	0.22	31	1	0.91	32	13.7	11.6		1
159	(X21); (2); (1)	31/08/22	18.1	18.2	1	0.31	1	1.10	4.483	17.965	0.769	0.299	0.49	0.49			2.95	1	1.22	28	1	1.28	28	114.4	113.2		1
160	(X25); (1.4); (3)	02/09/22	6.8	6.9	1	0.34	1	0.13	1.355	15.586	0.772	0.081	0.82	0.82			2.29	0	59.31	25	1	1.72	26	170.3	171.8		1
161	(X21); (2); (3)	31/08/22	17.2	17.1	1	0.44	1	0.72	4.601	17.794	0.772	0.298	0.49	0.49			3.00	1	1.34	28	1	1.15	28	114.1	113.2		1
162	(X30); (2); (1)	31/08/22	12.8	12.7	1	0.88	1	0.38	0.486	14.182	0.774	0.080	2.16	2.18			3.02	1	0.25	28	1	0.59	28	113.5	112.3		1
163	(X25); (3); (1)	31/08/22	16.1	16.0	0	50.31	0	59.84	1.771	17.446	0.769	0.080	1.74	1.74			4.40	1	1.22	35	1	0.18	34	12.6	11.3		1
164	(X23); (3); (1)	31/08/22	12.3	12.1	0	50.25	1	1.10	3.337	17.912	0.772	0.303	1.18	1.18				0	59.50	33	0	59.09	33	13.8	12.3		1
165	(X28); (2); (2)	31/08/22	11.8	11.8	1	0.59	1	0.31	0.691	14.744	0.773	0.080	1.76	1.77				1	2.03	29	1	2.31	29	113.7	112.4		1
166	(X24); (3); (1)	01/09/22	15.3	15.6	0	50.44	1	0.25	2.586	17.590	0.768	0.299	1.46	1.46			4.42	0	59.91	33	1	1.35	34	13.9	11.9	315.7	1
167	(X23); (1.4); (3)	02/09/22	16.5	16.8	1	0.34	1	0.53	2.474	16.074	0.769	0.300	0.55	0.55			2.18	1	0.06	25	1	0.12	25	171.7	170.8		1
168	(X27); (3); (1)	01/09/22	17.3	17.3	1	0.07	1	0.22	0.912	18.705	0.769	0.080	2.34	2.34				1	0.96	33	1	0.32	33	14.3	11.5		1
169	(X27); (1.4); (3)	02/09/22	17.3	17.5	1	0.41	1	0.31	0.923	14.396	0.770	0.081	1.1	1.1			2.18	1	0.69	26	1	0.97	26	171.7	170.7		1

N.º	Código prueba	Fecha	Ti	Tf	t1	t1	t2	t2	M1	M2	W1	W2	P1i	P1f	$P1i_{min}$	$P1f_{min}$	P_{max}	t_{n1}	t_{n1}	n1	t_{n2}	t_{n2}	n2	H_{min}	H_{max}	N_{min}	E
			°C	°C	min	s	min	s	kg	kg	kg	kg	Bar	Bar	Bar	Bar	Bar	min	s	[ ]	min	s	[ ]	cm	cm	cm	
170	(X26); (2); (2)	01/09/22	16.9	17.0	1	0.22	0	59.94	1.283	17.323	0.768	0.080	1.38	1.38			3.04	1	1.66	30	1	1.41	30	114.2	112.8		1
171	(X27); (2); (2)	01/09/22	16.8	16.8	1	0.50	1	3.75	1.047	15.736	0.771	0.081	1.56	1.55				1	0.16	29	1	0.25	29	113.9	112.7		1
172	(X25); (2); (2)	01/09/22	15.8	15.6	1	0.22	1	0.38	1.810	17.118	0.769	0.298	1.18	1.18			3.00	1	1.31	30	1	1.15	30	114.1	112.9	315.3	1
173	(X22); (3); (1)	01/09/22	14.6	14.5	0	50.65	1	0.43	4.444	18.276	0.781	0.297	0.88	0.9				1	1.19	33	1	0.56	33	14.5	12.8		1
174	(X22); (2); (2)	01/09/22	13.9	13.8	1	0.06	1	1.34	3.882	17.782	0.774	0.298	0.59	0.6			2.98	1	1.56	29	1	1.84	29	114.2	113		1
175	(X26); (3); (1)	01/09/22	12.8	12.7	1	0.21	1	0.59	1.345	19.205	0.769	0.081	2.04	2.06			4.40	1	1.07	34	1	0.69	34	13.5	12		1
176	(X7); (2); (2)	02/09/22	18.3	18.3	1	0.50	1	0.19	0.692	13.190	0.767	0.081	1.55	1.56			2.37	1	1.00	40	1	0.59	40	113	112.3		1
177	(X8); (3); (1)	26/09/22	12.1	12.1	1	0.47	1	0.43	0.527	15.694	0.770	0.082	2.6	2.6	2.56	2.56		0	59.84	44	1	0.19	44	12.4	11.1		1
178	(X3); (1.4); (3)	02/09/22	17.5	17.6	1	0.53	1	0.72	2.419	14.112	0.779	0.301	0.55	0.55			1.72	1	8.15	41	1	0.00	36	170.6	171		1
179	(X4); (3); (1)	02/09/22	17.5	17.5	1	0.12	1	0.53	2.387	19.194	0.769	0.298	1.47	1.47			3.68	0	59.68	46	0	59.40	46	12.8	11.8		1
180	(X9); (2); (2)	02/09/22	17.4	17.4	1	0.88	1	0.03	0.409	12.319	0.768	0.081	1.94	1.97			2.38	1	0.63	40	1	0.72	40	113.2	112.2	315.1	1
181	(X8); (2); (2)	20/09/22	13.0	13.0	1	0.25	1	0.25	0.520	12.878	0.769	0.081	1.77	1.75	1.75	1.74		1	2.34	41	1	1.47	40	112.9	111.9		1
182	(X6); (3); (1)	02/09/22	15.3	15.2	1	0.35	1	0.31	1.062	17.051	0.771	0.081	2.06	2.06				1	0.87	46	1	0.85	46	13	11.5		1
183	(X3); (3); (1)	02/09/22	15.6	15.6	0	50.53	1	0.47	3.229	16.538	0.769	0.296	1.18	1.18			3.72	0	59.90	46	1	0.10	46	13.2	12	315.2	1
184	(X5); (1.4); (3)	06/09/22	13.6	13.6	1	0.47	1	0.28	1.261	13.620	0.770	0.081	0.82	0.83			1.75	0	59.25	35	0	59.84	35	170.8	170.3		1
185	(X9); (3); (1)	02/09/22	15.1	15.0	1	0.65	1	0.16	0.462	15.660	0.772	0.082	2.95	2.95			3.70	1	0.72	46	1	0.78	46				1
186	(X9); (1.4); (3)	07/09/22	15.5	16.0	1	0.66	1	0.13	0.489	11.443	0.769	0.082	1.37	1.37			1.72	1	0.19	35	1	2.35	36	170.8	170	315.2	1
187	(X2); (2); (2)	02/09/22	14.3	14.2	1	0.90	1	0.75	3.992	16.731	0.770	0.296	0.59	0.59			2.40	0	59.94	39	0	59.84	39	113.7	112.8		1
188	(X1); (3); (2)	02/09/22	13.8	13.8	0	50.91	1	0.84	6.203	16.946	0.772	0.299	0.68	0.68			3.60	1	0.31	43	0	59.94	43	13.5	12.2		1
189	(X10); (2); (1)	07/09/22	19.3	19.3	1	1.31	1	0.38	0.253	11.257	0.769	0.081	2.18	2.17			2.38	1	1.34	40	1	1.19	40	113	112		1
190	(X6); (2); (2)	20/09/22	13.1	13.1	1	0.50	1	0.60	0.919	14.203	0.771	0.081	1.37	1.37	1.36	1.36		1	1.00	40	1	0.85	40	113.1	112.1		1
191	(X1); (2); (1)	07/09/22	19.6	19.6	1	0.34	1	0.79	5.354	16.320	0.768	0.296	0.46	0.45				1	0.72	38	1	0.62	38	113.7	113		1
192	(X5); (3); (1)	05/09/22	15.1	15.3	1	0.44	1	0.59	1.809	17.976	0.769	0.296	1.78	1.75			3.65	0	59.87	46	1	0.54	47	12.8	11.6		1
193	(X1); (2); (3)	05/09/22	15.5	15.6	1	0.28	0	59.85	5.395	16.351	0.767	0.297	0.45	0.46			2.39	1	0.88	38	1	0.84	38	113.9	113		1
194	(X2); (3); (1)	05/09/22	15.1	15.1	0	50.75	1	1.10	4.539	16.652	0.768	0.297	0.88	0.89			3.62	1	0.31	46	1	0.91	46	12.4	13.2		1

N.º	Código prueba	Fecha	Ti	Tf	t1	t1	t2	t2	M1	M2	W1	W2	P1i	P1f	$P1i_{min}$	$P1f_{min}$	P_{max}	t_{n1}	t_{n1}	n1	t_{n2}	t_{n2}	n2	H_{min}	H_{max}	N_{min}	E
			°C	°C	min	s	min	s	kg	kg	kg	kg	Bar	Bar	Bar	Bar	Bar	min	s	[ ]	min	s	[ ]	cm	cm	cm	
195	(X4); (2); (2)	05/09/22	14.6	14.5	1	0.57	1	0.53	2.115	15.656	0.768	0.297	0.98	0.97			2.39	1	0.22	41	1	0.59	41	113.4	112.5		1
196	(X7); (1.4); (3)	06/09/22	17.2	17.1	1	0.28	1	0.31	0.702	12.339	0.769	0.081	1.1	1.11			1.73	1	0.03	35	1	0.16	35	170.9	170.2		1
197	(X7); (3); (1)	06/09/22	16.9	16.9	1	0.34	1	1.78	0.673	15.415	0.772	0.081	2.3	2.31			3.65	1	0.28	45	1	1.00	45	12.8	11.1	315.3	1
198	(X3); (2); (2)	06/09/22	16.3	16.2	1	0.06	1	0.50	2.815	16.348	0.769	0.296	0.77	0.77			2.40	1	1.34	41	0	59.59	40	113.6	112.7		1
199	(X5); (2); (2)	06/09/22	15.0	14.9	1	0.59	1	0.37	1.585	15.182	0.769	0.296	1.18	1.18			2.39	1	0.91	41	1	0.72	41	113.5	112.5		1
200	(X10); (3); (2)	06/09/22	14.5	14.3	1	0.59	1	0.68	0.388	15.308	0.768	0.080	3.24	3.28			3.70	0	59.75	45	1	1.09	46	12.4	11.3	315.2	1
201	(X14); (2); (8)	07/09/22	16.7	16.8	1	0.41	1	5.37	2.352	16.662	0.768	0.296	0.98	0.98			2.68	0	59.84	34	1	1.25	35	114	113	314.8	1
202	(X18); (2); (8)	07/09/22	17.3	17.5	1	0.59	1	0.22	0.646	13.487	0.770	0.080	1.76	1.77				1	1.57	34	1	1.22	34	113.8	112.5		1
203	(X11); (2); (9)	07/09/22	17.6	17.6	1	0.35	1	1.34	5.193	16.753	0.771	0.298	0.47	0.47			2.73	1	0.32	32	1	0.09	32	114.2	113.3		1
204	(X17); (3); (10)	24/09/22	14.2	14.1	1	0.65	1	0.22	0.776	16.966	0.769	0.081	2.35	2.34	2.33	2.32		1	1.16	38	1	1.13	38	13.4	11.5		1
205	(X13); (1.4); (9)	07/09/22	16.6	16.5	1	0.15	1	0.72	2.544	14.880	0.768	0.297	0.56	0.55			1.98	1	0.81	30	1	0.66	30	171.9	171		1
206	(X18); (3); (10)	08/09/22	15.5	15.3	1	0.35	1	1.03	0.509	16.266	0.768	0.081	2.65	2.65				1	1.22	38	1	1.16	38	13.2	11.6		1
207	(X18); (1.4); (9)	07/09/22	15.4	15.2	1	0.60	1	0.09	0.616	13.014	0.767	0.081	1.23	1.26			1.98	1	1.40	30	0	59.94	29	171.5	170.7		1
208	(X15); (3); (10)	07/09/22	13.6	13.5	1	0.31	1	0.35	1.943	19.124	0.769	0.299	1.76	1.76				1	1.00	40	1	1.00	40	13.4	12		1
209	(X19); (1.4); (9)	07/09/22	12.8	12.7	1	0.65	1	0.22	0.531	12.145	0.777	0.081	1.37	1.37			1.98	1	0.50	29	1	0.65	29	171.1	170.5		1
210	(X12); (3); (10)	24/09/22	15.2	15.2	0	50.78	1	0.57	4.655	18.190	0.769	0.296	0.89	0.87	0.85	0.83		1	0.62	38	1	0.19	38	14	12.5		1
211	(X16); (3); (10)	07/09/22	11.8	11.6	0	51.00	0	59.90	1.235	15.408	0.770	0.081	2.06	2.03			4.14	1	0.62	39	1	0.43	39	13.3	11.8		1
212	(X15); (1.4); (9)	08/09/22	6.7	6.8	1	0.18	1	0.59	1.372	14.792	0.778	0.082	0.82	0.83			2.02	1	0.03	29	1	0.12	29	171.7	170.9		1
213	(X19); (3); (10)	08/09/22	6.9	6.9	1	0.38	1	0.38	0.465	15.521	0.772	0.084	2.98	2.95				1	0.90	38	1	0.78	38	13	11.7		1
214	(X20); (3); (10)	08/09/22	7.2	8.1	1	0.40	1	0.75	0.446	15.609	0.772	0.082	3.24	3.2			4.14	0	59.78	38	1	1.72	39	13.1	11.6	315	1
215	(X13); (3); (10)	08/09/22	14.1	14.5	0	50.53	1	0.50	3.340	16.968	0.767	0.296	1.16	1.14				1	0.12	39	0	59.63	39	13.6	12.5		1
216	(X17); (1.4); (9)	08/09/22	17.7	17.7	1	0.57	1	0.94	0.823	13.002	0.767	0.080	1.1	1.1			1.98	1	0.16	29	1	1.85	30	171.5	170.7	315	1
217	(X20); (2); (9)	08/09/22	18.0	18.1	1	0.22	1	0.59	0.446	13.105	0.768	0.081	2.15	2.17			2.72	0	59.85	33	1	1.44	34	113.9	112.5	314.8	1
218	(X20); (3); (8)	08/09/22	18.3	18.4	1	0.50	1	0.03	0.423	16.361	0.768	0.081	3.19	3.17				1	0.29	38	1	0.16	38	13.4	11.4		1
219	(X11); (3); (10)	08/09/22	18.5	18.5	0	50.47	1	0.84	5.939	17.330	0.769	0.297	0.71	0.71				1	0.12	37	1	0.78	37	14.1	12.6		1

N.º	Código prueba	Fecha	Ti	Tf	t1	t1	t2	t2	M1	M2	W1	W2	P1i	P1f	$P1i_{min}$	$P1f_{min}$	P_{max}	t_{n1}	t_{n1}	n1	t_{n2}	t_{n2}	n2	H_{min}	H_{max}	N_{min}	E
			°C	°C	min	s	min	s	kg	kg	kg	kg	Bar	Bar	Bar	Bar	Bar	min	s	[ ]	min	s	[ ]	cm	cm	cm	
220	(X16); (1.4); (9)	08/09/22	18.5	18.6	1	0.59	1	0.47	1.172	14.038	0.768	0.081	0.96	0.96			1.98	1	0.62	30	1	0.84	30	171.8	170.9		1
221	(X16); (2); (8)	08/09/22	17.7	17.6	1	0.21	1	0.13	1.157	15.511	0.769	0.081	1.37	1.35			2.73	1	0.16	34	1	1.85	35	114.1	112.7		1
222	(X14); (3); (10)	08/09/22	17.6	17.6	0	50.82	1	0.72	2.392	16.790	0.768	0.296	1.46	1.48				1	0.97	40	1	1.07	40	13.7	12		1
223	(X14); (1.4); (9)	08/09/22	17.3	17.3	1	0.50	1	0.56	1.777	14.797	0.769	0.081	0.69	0.69			2.02	1	0.66	30	1	0.75	30	171.7	171		1
224	(X12); (2); (8)	08/09/22	17.0	16.9	1	0.41	1	2.50	3.978	17.004	0.769	0.296	0.59	0.6			2.75	1	0.09	33	1	1.72	34	114.3	113.3		1
225	(X12); (1.4); (9)	08/09/22	16.8	16.7	1	0.56	1	1.00	3.391	14.951	0.772	0.298	0.41	0.41			1.98	1	0.97	29	1	0.97	29	171.8	171.2		1
226	(X27); (3); (7)	09/09/22	7.8	7.9	1	0.75	1	0.88	0.960	17.941	0.768	0.082	2.34	2.35			4.42	0	59.72	33	0	59.91	33	12.9	11.1	315.7	1
227	(X23); (2); (8)	09/09/22	8.0	8.4	1	0.37	1	0.47	2.858	18.513	0.770	0.299	0.78	0.77			3.05	0	59.18	28	1	0.35	29	113.6	112.6	315.6	1
228	(X29); (2); (8)	09/09/22	14.5	14.6	1	0.66	1	0.59	0.552	14.190	0.767	0.081	1.95	1.94			2.94	0	59.57	28	1	0.03	28	113.2	112		1
229	(X24); (2); (5)	09/09/22	15.6	15.9	1	0.32	1	1.06	2.338	17.424	0.767	0.296	0.97	0.98			2.95	0	59.97	29	1	0.07	29	113.6	112.4		1
230	(X21); (3); (8)	09/09/22	17.6	17.7	0	50.25	1	0.69	5.373	18.471	0.767	0.296	0.74	0.75				1	0.87	31	1	0.78	31	14	12.2		1
231	(X26); (1.4); (6)	09/09/22	18.1	18.1	1	0.15	1	0.03	1.196	15.134	0.767	0.081	0.96	0.98			2.18	1	1.44	26	1	1.81	26	171.5	170.5		1
232	(X24); (3); (7)	09/09/22	18.3	18.4	1	0.53	1	1.37	2.442	21.460	0.768	0.296	1.46	1.46				1	0.09	33	0	59.78	33	13	11.8		1
233	(X30); (2); (5)	23/09/22	8.8	9.0	1	0.66	1	0.06	0.470	13.528	0.770	0.082	2.16	2.16	2.15	2.14	3.00	0	59.62	28	0	59.66	28	113.3	112	315.6	1
234	(X27); (2); (8)	09/09/22	17.6	17.6	1	0.38	1	0.22	0.948	15.133	0.770	0.081	1.56	1.56				0	59.94	29	1	0.37	29	113.5	112.3		1
235	(X26); (3); (7)	09/09/22	17.2	16.6	0	50.91	1	0.41	1.267	16.468	0.768	0.081	2.08	2.06				0	59.78	33	1	2.13	34				1
236	(X30); (3); (6)	09/09/22	15.9	15.9	1	0.34	1	0.47	0.390	17.936	0.769	0.080	3.24	3.29				1	4.53	33	1	0.31	31	13.2	11.4		1
237	(X30); (2); (7)	23/09/22	18.9	19.0	1	0.47	1	0.31	0.472	13.192	0.772	0.081	2.15	2.15	2.13	2.13		0	59.78	28	1	0.53	28	113.4	112		1
238	(X28); (2); (5)	09/09/22	14.2	14.1	1	0.62	1	0.12	0.646	14.889	0.769	0.082	1.75	1.76				1	1.96	29	1	0.19	28	113.3	112		1
239	(X29); (3); (7)	09/09/22	12.9	12.9	1	0.32	1	0.38	0.436	17.592	0.768	0.083	2.93	2.98				1	1.31	32	1	1.50	32	12.7	10.9		1
240	(X22); (3); (7)	09/09/22	12.3	12.2	0	50.35	1	0.62	4.577	18.074	0.769	0.296	0.87	0.89				1	0.65	33	1	2.34	34	14.1	12.3		1
241	(X21); (2); (7)	10/09/22	13.8	14.3	0	50.43	1	0.53	4.629	14.693	0.768	0.297	0.51	0.49			2.90	0	59.03	27	0	59.28	27	113.8	112.7	315.5	1
242	(X28); (1.4); (6)	10/09/22	16.2	16.2	1	0.47	1	0.13	0.757	13.531	0.768	0.081	1.22	1.23			2.18	0	59.44	25	1	1.81	26	171.3	170.2		1
243	(X25); (3); (7)	10/09/22	17.9	17.9	0	50.34	1	0.84	1.939	17.464	0.767	0.303	1.74	1.75			4.42	1	0.00	33	0	59.85	33	13.5	11.5		1
244	(X23); (3); (7)	10/09/22	18.7	18.9	0	50.47	1	0.75	3.155	18.455	0.768	0.297	1.18	1.19				0	59.75	33	1	0.03	33	13.7	11.7	315.9	1

N.º	Código prueba	Fecha	Ti	Tf	t1	t1	t2	t2	M1	M2	W1	W2	P1i	P1f	$P1i_{min}$	$P1f_{min}$	P_{max}	t_{n1}	t_{n1}	n1	t_{n2}	t_{n2}	n2	H_{min}	H_{max}	N_{min}	E
			°C	°C	min	s	min	s	kg	kg	kg	kg	Bar	Bar	Bar	Bar	Bar	min	s	[ ]	min	s	[ ]	cm	cm	cm	
245	(X24); (1.4); (6)	10/09/22	16.9	16.9	1	0.50	1	0.15	1.686	16.013	0.769	0.082	0.7	0.69			2.14	1	1.69	26	1	1.34	26	171.6	170.6	315.8	1
246	(X22); (2); (5)	10/09/22	16.6	16.5	1	0.38	1	0.28	3.782	17.952	0.769	0.296	0.6	0.59			2.89	0	59.93	28	0	59.50	28	114	112.7		1
247	(X25); (2); (8)	10/09/22	16.0	15.6	1	0.50	1	0.66	1.703	17.044	0.770	0.298	1.18	1.18				1	1.18	30	1	0.62	30	113.6	112.5		1
248	(X28); (3); (7)	10/09/22	15.2	14.9	1	0.46	1	0.84	0.538	17.581	0.775	0.081	2.63	2.66				0	59.47	30	1	1.32	31	13.4	11		1
249	(X26); (2); (5)	10/09/22	13.8	13.7	1	0.91	1	0.19	1.202	16.238	0.768	0.081	1.38	1.4			2.95	1	0.75	30	1	0.82	30	113.3	112.3		1
250	(X22); (1.4); (6)	10/09/22	13.2	13.2	1	0.50	1	0.94	3.262	16.300	0.770	0.302	0.41	0.41			2.19	1	0.41	24	0	59.97	24	171.7	170.8		1
251	(X10); (3); (10)	14/09/22	15.6	15.7	1	0.43	1	0.13	0.383	15.369	0.773	0.082	3.24	3.24			3.60	1	0.12	45	1	0.13	45	12.1	11		1
252	(X2); (3); (10)	15/09/22	15.6	15.6	0	50.75	1	0.50	4.660	17.309	0.770	0.297	0.87	0.88				1	0.21	45	1	0.50	45	13	11.9	315.5	1
253	(X6); (2); (8)	15/09/22	15.5	15.5	1	0.60	1	0.25	0.990	14.110	0.769	0.081	1.37	1.37			2.37	1	1.25	40	1	1.00	40	113.1	112.1	315.2	1
254	(X9); (1.4); (9)	15/09/22	15.4	15.3	1	0.41	1	0.43	0.403	11.339	0.771	0.081	1.36	1.36			1.66	0	59.87	35	1	0.07	35	170.9	170.2		1
255	(X8); (3); (10)	15/09/22	15.1	15.0	1	0.24	1	0.34	0.525	15.527	0.770	0.081	2.61	2.59				1	1.18	46	1	0.06	45	12.5	11		1
256	(X6); (3); (10)	15/09/22	14.7	14.6	1	0.31	1	0.75	1.221	16.978	0.773	0.296	2.06	2.04				0	59.68	45	0	59.66	45	12.8	11		1
257	(X5); (1.4); (9)	15/09/22	14.3	14.2	1	0.50	1	0.03	1.186	13.921	0.770	0.080	0.82	0.82			1.68	1	0.25	36	1	1.81	37	171.1	170.5		1
258	(X4); (2); (8)	15/09/22	14.0	13.9	1	0.37	1	0.43	1.869	16.246	0.772	0.081	0.99	0.99			2.36	1	0.38	41	1	0.63	41	113.3	112.5		1
259	(X9); (3); (10)	15/09/22	13.6	13.6	1	0.31	1	0.44	0.479	15.773	0.771	0.082	2.9	2.95				1	0.96	46	0	59.88	45	12.4	11.1		1
260	(X8); (2); (8)	15/09/22	13.3	13.3	1	0.60	1	0.72	0.501	12.673	0.772	0.082	1.74	1.76			2.38	1	1.21	40	1	1.35	40	113	111.9		1
261	(X6); (1.4); (9)	15/09/22	13.1	13.1	1	0.66	1	0.25	0.901	13.073	0.771	0.082	0.97	0.96			1.68	1	0.79	36	1	1.00	36	170.9	170.5		1
262	(X1); (2); (9)	15/09/22	12.9	12.9	1	0.18	1	0.72	5.439	16.371	0.770	0.296	0.45	0.45			2.35	1	0.62	38	1	0.37	38	113.5	112.6		1
263	(X8); (1.4); (9)	16/09/22	15.5	15.7	1	0.44	1	0.07	0.542	12.037	0.767	0.080	1.23	1.23			1.65	0	59.78	35	1	0.22	35	171	170.2		1
264	(X7); (3); (10)	16/09/22	13.1	13.0	1	0.75	1	0.28	0.667	16.069	0.771	0.081	2.34	2.33				1	0.50	44	1	0.09	44	12.6	11.2		1
265	(X7); (1.4); (9)	16/09/22	17.9	17.9	1	0.66	1	0.19	0.717	11.908	0.767	0.080	1.1	1.1				1	0.22	35	1	0.06	35	171	170.3	315.3	1
266	(X5); (3); (10)	16/09/22	17.8	17.8	1	0.32	1	0.34	1.825	18.545	0.769	0.296	1.76	1.77			3.73	1	0.25	46	1	0.25	46	13.2	11.6		1
267	(X4); (3); (10)	16/09/22	17.3	17.3	1	0.13	1	0.72	2.408	19.237	0.768	0.304	1.46	1.47				1	0.00	46	1	0.07	46	12.9	11.8		1
268	(X4); (1.4); (9)	16/09/22	17.0	16.9	1	0.44	1	0.22	1.684	14.018	0.768	0.082	0.69	0.69			1.73	1	1.22	37	1	1.19	37	171.3	170.6		1
269	(X1); (3); (10)	16/09/22	16.6	16.5	0	50.25	1	0.47	6.097	17.909	0.771	0.297	0.68	0.69				0	59.84	42	1	0.81	43	13.4	12.5		1

N.º	Código prueba	Fecha	Ti	Tf	t1	t1	t2	t2	M1	M2	W1	W2	P1i	P1f	$P1i_{min}$	$P1f_{min}$	P_{max}	t_{n1}	t_{n1}	n1	t_{n2}	t_{n2}	n2	H_{min}	H_{max}	N_{min}	E
			°C	°C	min	s	min	s	kg	kg	kg	kg	Bar	Bar	Bar	Bar	Bar	min	s	[ ]	min	s	[ ]	cm	cm	cm	
270	(X2); (2); (8)	16/09/22	16.0	15.9	1	0.13	1	1.54	4.062	16.558	0.769	0.297	0.59	0.59			2.40	1	1.12	40	0	59.34	39	113.3	112.5		1
271	(X10); (2); (9)	16/09/22	15.4	15.3	1	0.72	1	0.31	0.272	11.520	0.770	0.082	2.15	2.14				0	59.72	39	0	59.88	39	112.8	111.8		1
272	(X10); (3); (8)	16/09/22	14.8	14.8	1	1.16	1	0.19	0.380	15.998	0.771	0.081	3.23	3.2				1	0.68	45	1	0.53	45	12.5	11.2		1
273	(X3); (1.4); (9)	16/09/22	14.3	14.3	1	0.19	1	0.72	2.446	14.372	0.770	0.296	0.55	0.55			1.72	1	0.31	36	1	0.50	36	171.2	170.7		1
274	(X2); (1.4); (9)	16/09/22	14.1	13.9	1	0.90	1	1.40	3.654	14.048	0.772	0.298	0.41	0.41				1	0.75	35	1	0.94	35				1
275	(X3); (3); (10)	16/09/22	13.5	13.5	0	50.90	1	0.87	3.232	17.379	0.771	0.297	1.18	1.19				0	59.71	45	1	0.09	45	13	11.8		1
276	(X24); (1.4); (9)	21/09/22	13.5	13.7	1	0.47	1	0.38	1.907	16.015	0.768	0.081	0.69	0.7	0.58	0.58	2.21	1	2.10	26	1	2.31	26	171.6	170.8	315.8	1
277	(X21); (3); (10)	23/09/22	19.4	19.4	0	50.62	1	0.16	5.429	18.903	0.768	0.296	0.72	0.74	0.65	0.67		0	59.00	30	0	59.62	30	15	12.6		1
278	(X24); (2); (8)	22/09/22	16.8	16.8	1	0.53	1	1.56	2.361	18.156	0.767	0.297	0.97	0.99	0.94	0.94	2.96	1	1.28	30	1	0.75	30	113.6	112.7		1
279	(X24); (3); (10)	21/09/22	13.9	13.8	0	50.41	1	0.29	2.430	17.483	0.768	0.297	1.46	1.46	1.42	1.42		1	0.97	34	1	0.82	34	13.3	12	315.8	1
280	(X21); (2); (9)	21/09/22	13.4	13.3	1	0.16	1	0.69	4.533	17.945	0.768	0.297	0.49	0.48	0.45	0.44	2.95	1	1.07	28	1	1.25	28	113.9	112.7	315.6	1
281	(X29); (1.4); (9)	21/09/22	12.9	12.9	1	0.94	1	0.22	0.591	13.523	0.770	0.083	1.36	1.39	1.34	1.38	2.16	1	1.22	25	1	1.04	25	171.4	170.4		1
282	(X25); (3); (10)	21/09/22	12.7	12.3	0	59.87	1	1.25	1.999	20.113	0.768	0.296	1.74	1.74	1.7	1.7		1	0.31	34	1	0.22	34				1
283	(X23); (3); (10)	21/09/22	12.7	12.6	0	50.40	1	0.47	3.135	17.735	0.772	0.298	1.18	1.18	1.14	1.15		1	1.34	34	1	0.97	34	13.4	12.3		1
284	(X26); (1.4); (9)	21/09/22	12.3	12.3	1	0.66	1	0.12	1.143	15.313	0.771	0.080	0.97	0.99	0.95	0.97	2.22	1	1.75	26	1	1.47	26	171.5	170.6		1
285	(X30); (3); (8)	21/09/22	12.1	12.0	1	0.28	1	1.06	0.423	17.423	0.772	0.082	3.2	3.22	3.15	3.16	4.30	1	1.00	32	1	0.35	32	12.6	11.3		1
286	(X23); (1.4); (9)	21/09/22	11.6	11.6	1	0.25	1	0.31	2.463	16.076	0.771	0.296	0.55	0.55	0.53	0.53	2.24	0	59.81	24	1	1.63	25	171.5	170.9		1
287	(X28); (3); (10)	21/09/22	11.5	11.5	1	0.25	1	0.22	0.563	17.015	0.771	0.082	2.64	2.65	2.6	2.61		1	1.22	32	1	2.50	33	12.9	11.3		1
288	(X29); (3); (10)	21/09/22	11.2	11.1	1	0.53	1	0.31	0.458	16.879	0.779	0.082	2.94	2.95	2.9	2.9		1	1.35	32	1	1.16	32	13.1	11.2		1
289	(X26); (2); (8)	22/09/22	14.5	14.6	1	0.43	1	0.25	1.248	16.265	0.768	0.081	1.37	1.37	1.33	1.33		0	59.21	29	1	0.44	30	113.7	112.3	315.6	1
290	(X28); (2); (8)	22/09/22	15.4	15.6	1	0.25	1	0.72	0.657	14.559	0.776	0.081	1.74	1.74	1.7	1.71		0	59.03	28	1	1.50	29	113.5	112		1
291	(X22); (1.4); (9)	22/09/22	16.2	16.4	1	0.41	1	0.25	3.562	15.498	0.767	0.296	0.41	0.42	0.37	0.38	2.18	1	0.25	24	0	59.63	24	172	170.9	315.8	1
292	(X22); (3); (10)	22/09/22	13.1	12.9	0	50.41	1	0.50	4.537	18.556	0.772	0.296	0.88	0.87	0.83	0.84	4.35	1	0.81	33	1	0.81	33	14	12.6	315.7	1
293	(X30); (2); (9)	22/09/22	16.5	16.9	1	0.34	1	0.16	0.467	13.381	0.768	0.081	2.15	2.19	2.14	2.18		1	1.59	29	1	1.25	29	113.4	112		1
294	(X26); (3); (10)	22/09/22	16.9	16.9	0	53.03	1	0.00	1.280	17.752	0.772	0.081	2.06	2.02	2.02	1.99		1	0.19	33	1	0.53	33	13.5	11.8		1

N.º	Código prueba	Fecha	Ti	Tf	t1	t1	t2	t2	M1	M2	W1	W2	P1i	P1f	$P1i_{min}$	$P1f_{min}$	P_{max}	t_{n1}	t_{n1}	n1	t_{n2}	t_{n2}	n2	H_{min}	H_{max}	N_{min}	E
			°C	°C	min	s	min	s	kg	kg	kg	kg	Bar	Bar	Bar	Bar	Bar	min	s	[ ]	min	s	[ ]	cm	cm	cm	
295	(X27); (3); (10)	22/09/22	16.8	16.7	1	0.40	1	0.59	0.824	18.155	0.769	0.082	2.34	2.36	2.3	2.32		1	1.34	33	1	0.22	32	13.1	11.6		1
296	(X22); (2); (8)	22/09/22	16.5	16.5	1	0.06	1	0.81	3.953	17.620	0.767	0.296	0.57	0.59	0.53	0.55	2.95	0	59.62	28	0	59.25	28	113.9	112.8		1
297	(X25); (1.4); (9)	22/09/22	15.6	15.5	1	0.50	1	0.18	1.352	16.116	0.767	0.081	0.82	0.81	0.8	0.79	2.17	1	1.31	26	1	1.50	26	171.7	170.6		1
298	(X30); (3); (10)	22/09/22	15.4	15.3	1	0.38	1	0.16	0.395	17.973	0.770	0.081	3.15	3.17	3.11	3.15		0	59.94	31	1	0.10	31	13.1	11.6		1
299	(X28); (1.4); (9)	22/09/22	14.7	14.6	1	0.34	1	0.62	0.709	13.922	0.779	0.081	1.22	1.23	1.21	1.22	2.17	1	2.09	26	0	59.75	25	171.7	170.4		1
300	(X27); (1.4); (9)	22/09/22	14.1	14.0	1	0.34	1	0.66	0.861	14.482	0.772	0.081	1.1	1.11	1.08	1.1		1	2.00	26	1	1.97	26	171.5	170.6		1
301	(X23); (1.4); (9)	23/09/22	14.9	15.3	1	0.31	1	0.91	2.471	16.151	0.768	0.297	0.56	0.55	0.53	0.54	2.16	1	1.44	25	1	1.40	25	172	170.9		2
302	(X22); (1.4); (6)	23/09/22	16.1	16.5	1	0.50	0	59.90	3.371	15.913	0.768	0.297	0.41	0.42	0.37	0.38		0	59.53	24	1	1.91	25	171.8	171	315.8	2
303	(X23); (2); (8)	23/09/22	17.3	17.4	1	0.63	1	0.00	2.857	17.912	0.767	0.296	0.79	0.78	0.84	0.82	2.95	0	59.72	29	0	59.88	29	113.7	112.9		2
304	(X27); (2); (8)	23/09/22	18.5	18.6	1	0.63	1	0.19	0.923	15.412	0.767	0.081	1.58	1.58	1.54	1.54		1	0.34	29	1	0.19	29	113.4	112.2		2
305	(X12); (1.4); (9)	23/09/22	17.4	17.2	1	0.53	1	0.22	3.455	15.140	0.767	0.297	0.41	0.41	0.38	0.38	1.94	1	0.75	29	1	0.96	29	171.8	171.2		2
306	(X16); (1.4); (9)	23/09/22	17.2	17.1	1	0.54	1	0.59	1.081	14.012	0.769	0.080	0.96	0.98	0.95	0.96		0	59.97	30	1	0.19	30	171.6	170.9		2
307	(X13); (1.4); (9)	23/09/22	16.8	16.7	1	0.28	1	0.28	2.435	15.468	0.768	0.297	0.54	0.55	0.52	0.53		1	0.63	30	1	0.25	30	171.9	171.1		2
308	(X13); (2); (8)	24/09/22	14.0	14.3	1	0.57	1	0.28	2.909	17.991	0.768	0.297	0.76	0.79	0.72	0.73	2.66	1	0.03	34	1	0.18	34	113.5	112.7	314.9	2
309	(X12); (2); (5)	23/09/22	16.3	16.2	1	1.00	1	0.09	4.046	17.128	0.768	0.298	0.59	0.59	0.55	0.56		0	59.90	33	1	0.10	33	112.9	113.8		2
310	(X16); (2); (8)	24/09/22	14.8	14.9	1	0.38	1	1.03	1.162	15.273	0.768	0.081	1.38	1.36	1.35	1.33		1	0.19	34	0	59.66	34	113.5	112.4		2
311	(X20); (2); (9)	24/09/22	15.5	15.6	1	0.60	1	0.03	0.452	12.836	0.768	0.081	2.14	2.15	2.12	2.14		0	59.47	33	0	59.75	33	113.1	112.1		2
312	(X20); (2); (1)	24/09/22	14.8	14.8	1	0.88	1	0.78	0.461	12.904	0.769	0.081	2.14	2.14	2.13	2.12	2.75	1	0.15	33	1	1.03	34	113.2	112.1		2
313	(X18); (1.4); (3)	24/09/22	13.5	13.5	1	0.44	1	0.28	0.633	12.887	0.769	0.081	1.22	1.26	1.22	1.25	2.01	1	5.78	32	1	2.04	30	171.7	170.7		2
314	(X9); (1.4); (3)	24/09/22	13.0	13.0	1	0.44	1	0.29	0.418	11.407	0.769	0.082	1.35	1.35	1.35	1.34	1.67	1	0.31	35	1	0.91	35	170.8	170.3	315.5	2
315	(X6); (1.4); (9)	24/09/22	12.9	12.8	1	0.37	1	0.35	0.941	13.122	0.770	0.081	0.95	0.96	0.95	0.95		0	59.85	35	0	59.79	35	170.9	170.4		2
316	(X2); (1.4); (9)	24/09/22	12.8	12.7	1	0.37	1	0.62	3.456	14.285	0.770	0.297	0.42	0.41	0.4	0.4	1.69	0	59.94	34	0	59.72	34	171.3	170.7		2
317	(X1); (2); (5)	24/09/22	12.6	12.5	1	0.50	1	0.40	5.500	16.232	0.770	0.297	0.45	0.44	0.42	0.42	2.35	1	0.91	38	1	0.85	38	113.7	112.7	315.2	2
318	(X2); (2); (5)	24/09/22	12.5	12.5	1	0.53	1	0.66	4.114	16.379	0.771	0.298	0.59	0.59	0.57	0.57		1	1.35	40	1	0.00	39	113.4	112.7		2
319	(X7); (2); (8)	25/09/22	14.5	14.4	1	0.54	1	0.15	0.683	13.501	0.778	0.081	1.57	1.56	1.55	1.54	2.38	0	59.75	39	1	1.09	40	113.4	112.6		2

N.º	Código prueba	Fecha	Ti	Tf	t1	t1	t2	t2	M1	M2	W1	W2	P1i	P1f	$P1i_{min}$	$P1f_{min}$	P_{max}	t_{n1}	t_{n1}	n1	t_{n2}	t_{n2}	n2	H_{min}	H_{max}	N_{min}	E
			°C	°C	min	s	min	s	kg	kg	kg	kg	Bar	Bar	Bar	Bar	Bar	min	s	[ ]	min	s	[ ]	cm	cm	cm	
320	(X10); (2); (5)	25/09/22	14.3	14.3	1	0.44	1	0.44	0.225	10.998	0.769	0.080	2.18	2.17	2.18	2.17		1	0.16	39	0	59.97	39	112.8	111.8		2
321	(X6); (2); (8)	27/09/22	14.8	15.2	1	0.38	0	59.94	0.887	13.805	0.767	0.081	1.37	1.38	1.36	1.37	2.37	1	0.66	40	1	0.09	40	112.2	113.2		2
322	(X1); (2); (7)	06/08/22	13.9	13.9	1	0.28	1	0.94	5.415	16.989	0.770	0.295	0.46	0.46				1	0.63	37	0	59.25	36				2
323	(X18); (3); (10)	07/09/22	16.1	15.9	1	0.38	1	0.22	0.497	16.159	0.768	0.080	2.64	2.65				0	59.75	37	1	0.75	38	13.3	11.5		2
324	(X6); (2); (2)	05/09/22	14.0	14.5	1	0.63	1	0.22	0.960	14.424	0.769	0.082	1.38	1.37			2.38	0	59.47	39	0	59.09	39	113.3	112.2		2
325	(X18); (3); (4)	14/08/22	12.3	12.2	1	0.28	1	0.47	0.532	15.922	0.771	0.082	2.65	2.65			3.90	1	0.82	38	1	1.47	38				2
326	(X18); (3); (4)	14/08/22	11.9	11.9	1	0.50	1	0.22	0.536	16.066	0.776	0.081	2.62	2.66				1	0.50	38	1	1.09	38				2
327	(X19); (1.4); (6)	19/08/22	15.1	15.2	1	0.53	1	0.47	0.597	12.334	0.770	0.082	1.34	1.35			2.03	1	1.75	30	1	1.75	30				2
328	(X11); (2); (5)	14/08/22	10.9	10.9	1	0.72	1	0.97	5.398	16.105	0.774	0.296	0.47	0.47			2.70	1	1.03	33	1	1.81	33				2
329	(X29); (3); (1)	31/08/22	14.1	14.0	1	0.50	1	0.09	0.425	18.633	0.777	0.081	3	3				0	59.94	31	1	1.93	33	13.9	11.8		3
330	(X17); (3); (10)	07/09/22	17.1	17.1	1	0.31	1	0.41	0.695	16.592	0.765	0.080	2.34	2.38			4.14	1	1.19	38	1	0.07	37	13.7	11.7	315	2
331	(X10); (2); (7)	08/08/22	10.8	10.8	1	0.43	1	4.28	0.237	11.874	0.772	0.080	2.16	2.18			2.41	1	0.78	39	1	0.41	39				2
332	(X9); (2); (8)	11/08/22	11.3	11.2	1	2.16	1	0.32	0.341	11.996	0.778	0.083	1.99	2.01			2.38	1	0.00	40	1	0.31	40				2
333	(X22); (3); (4)	22/08/22	18.9	18.9	0	50.25	1	0.53	4.393	18.598	0.785	0.296	0.87	0.88				1	0.50	33	1	0.28	33				2
334	(X30); (2); (5)	09/09/22	17.8	17.8	1	0.75	1	0.18	0.456	13.579	0.777	0.082	2.16	2.18			2.95	1	0.06	28	1	0.28	28	113.5	112.1		2
335	(X30); (2); (7)	09/09/22	14.6	14.5	1	0.40	1	0.50	0.480	13.371	0.771	0.081	2.15	2.17			2.89	1	1.44	29	1	2.06	29	113.3	111.6		2
336	(X21); (3); (10)	21/09/22	14.1	14.1	0	50.44	1	1.13	5.413	19.008	0.768	0.296	0.73	0.74	0.68	0.69		0	59.84	31	0	59.72	31	14.8	12.9		2
337	(X11); (2); (3)	24/08/22	17.8	17.9	1	0.16	1	0.72	4.719	17.712	0.781	0.300	0.47	0.47			2.78	1	0.56	32	1	2.13	33	114.3	112.9	314.9	2
338	(X11); (3); (2)	25/08/22	18.9	18.9	0	50.88	1	0.22	5.737	17.815	0.768	0.297	0.71	0.72				1	0.37	37	1	1.53	38				2
339	(X17); (3); (10)	08/09/22	16.1	16.0	1	0.25	1	0.25	0.718	16.605	0.769	0.081	2.34	2.34				1	0.31	38	1	0.88	38	13.5	11.6		2
340	(X12); (3); (10)	07/09/22	12.3	12.2	0	50.31	1	0.82	4.680	17.387	0.770	0.296	0.88	0.89				0	59.78	38	1	0.31	38	14.5	12.7		2
341	(X18); (3); (4)	19/08/22	11.6	11.5	1	0.37	1	0.19	0.549	15.380	0.773	0.080	2.62	2.59			3.94	1	0.62	38	1	0.35	38				2
342	(X5); (3); (7)	10/08/22	12.2	12.1	1	0.75	1	0.72	1.724	17.935	0.772	0.299	1.78	1.82			3.72	1	0.15	47	1	0.28	47				2
343	(X8); (3); (1)	02/09/22	17.3	17.5	1	0.50	0	59.94	0.494	15.542	0.772	0.082	2.57	2.61			3.73	1	0.47	45	1	0.63	45	12.7	11.5		2
344	(X5); (3); (7)	26/09/22	14.6	14.7	0	59.84	1	0.32	1.762	18.650	0.767	0.298	1.76	1.76	1.74	1.74		0	59.85	45	0	59.25	45	12.7	11.3		2

N.º	Código prueba	Fecha	Ti	Tf	t1	t1	t2	t2	M1	M2	W1	W2	P1i	P1f	$P1i_{min}$	$P1f_{min}$	P_{max}	t_{n1}	t_{n1}	n1	t_{n2}	t_{n2}	n2	H_{min}	H_{max}	N_{min}	E
			°C	°C	min	s	min	s	kg	kg	kg	kg	Bar	Bar	Bar	Bar	Bar	min	s	[ ]	min	s	[ ]	cm	cm	cm	
345	(X10); (3); (6)	09/08/22	11.6	11.6	1	6.12	1	7.54	0.400	16.721	0.776	0.084	3.22	3.4			3.61	1	0.28	45	1	1.06	46				3
346	(X10); (3); (6)	10/08/22	14.5	14.5	1	0.87	1	0.16	0.505	15.314	0.694	0.082	2.9	2.8				1	1.03	47	1	1.16	47				3
347	(X7); (2); (8)	07/08/22	18.0	18.0	1	0.34	1	0.41	0.621	13.715	0.775	0.081	1.65	1.67			2.42	1	0.32	39	1	0.19	39				3
348	(X1); (2); (7)	30/07/22	13.9	13.9	1	0.28	1	0.94	5.415	16.989	0.770	0.295	0.46	0.46				1	0.63	37	0	59.25	36				3
349	(X1); (3); (8)	10/08/22	13.9	13.8	0	50.44	1	0.13	7.546	16.217	0.770	0.299	0.59	0.59			3.67	1	0.78	42	1	0.94	42				3
350	(X2); (1.4); (6)	08/08/22	11.8	11.7	1	0.50	1	2.79	3.340	14.920	0.779	0.300	0.43	0.43				1	0.25	35	1	1.15	35				3
351	(X11); (3); (4)	14/08/22	12.8	12.9	1	0.03	1	0.97	6.346	20.403	0.770	0.303	0.68	0.68			3.93	1	1.15	37	1	1.00	37				3
352	(X18); (3); (4)	14/08/22	12.3	12.2	1	0.28	1	0.47	0.532	15.922	0.771	0.082	2.65	2.65			3.90	1	0.82	38	1	1.47	38				3
353	(X18); (3); (1)	24/08/22	5.9	5.9	1	0.66	1	0.32		16.260	0.786	0.080	2.62	2.65				1	1.35	38	1	1.38	38	13.4	11.5		3
354	(X13); (3); (1)	24/08/22	12.3	12.2	0	50.44	1	0.94	3.381				1.17	1.18				1	0.72	40	1	1.15	40				3
355	(X6); (1.4); (3)	27/08/22	16.7	16.8	1	0.57			0.841	13.063	0.769	0.080	0.97	0.96			1.71	1	0.28	36	1	0.53	36				3
356	(X2); (1.4); (3)	26/08/22	12.1	12.1	1	0.62	1	0.16	3.055	15.332	0.775	0.297	0.41	0.41			1.73	1	1.50	36	1	0.31	35				3
357	(X2); (1.4); (3)	27/08/22	17.9	17.9	1	0.28	1	2.75	3.025	15.844	0.768	0.297	0.42	0.41			1.67	1	0.88	36	1	1.12	36				3
358	(X12); (2); (5)	29/08/22	17.9	17.9	1	0.54	1	0.90	3.571	19.144	0.769	0.299	0.6	0.6			2.72	1	0.03	33	1	0.56	33	114.4	113.1		3
359	(X12); (2); (5)	29/08/22	17.1	17.1	1	0.59	1	1.06	3.048	18.086	0.769	0.190	0.69	0.7			2.76	0	59.94	33	1	1.97	34	114.1	113.2		3
360	(X12); (1.4); (6)	28/08/22	12.1	12.1	1	0.35	1	1.28	3.204	15.995	0.771	0.298	0.42	0.41			1.99	1	0.47	29	1	0.31	29				3
361	(X14); (1.4); (6)	29/08/22	17.2	17.4	1	1.22	1	0.29	1.704	15.358	0.771	0.190	0.7	0.69			1.99	0	59.69	30	1	0.18	30	171.8	170.8		3
362	(X28); (3); (1)	30/08/22	15.8	16.6	1	0.41	1	0.75	0.593	18.562	0.771	0.080	2.65	2.61			4.45	1	1.31	32	0	59.75	31	14.9	11.2		3
363	(X29); (1.4); (3)	30/08/22	12.5	12.5	1	0.59	1	1.12	0.606	13.668	0.773	0.082	1.36	1.37			2.22	1	0.56	25	1	11.06	29	171.2	170.3		3
364	(X25); (1.4); (3)	31/08/22	18.5	18.4	1	2.69	1	0.53	1.311	16.482	0.769	0.080	0.8	0.83			2.17	0	59.31	25	1	3.56	27	171.8	170.9		3
365	(X6); (3); (1)	02/09/22	16.5	16.5	1	0.56	1	0.00	1.285	16.857	0.770	0.298	2.04	2.04				0	59.63	45	0	59.46	45	12.6	11.3		3
366	(X5); (1.4); (3)	02/09/22	16.2	16.1	1	0.85	1	0.25	1.290	13.344	0.768	0.081	0.82	0.83			1.74	1	0.06	36	1	0.56	36	171.1	170.5	315.3	3
367	(X9); (1.4); (3)	02/09/22	14.6	14.6	1	1.07	1	0.13	0.479	11.360	0.771	0.081	1.36	1.35			1.73	1	0.53	35	1	0.29	35	170.6	170.2		3
368	(X3); (2); (5)	26/08/22	18.5	18.5	1	0.50	1	0.69	2.616	16.603	0.768	0.297	0.78	0.77			2.38	1	0.91	41	1	0.97	41				3
369	(X2); (1.4); (3)	26/08/22	12.1	12.1	1	0.62	1	0.16	3.055	15.332	0.775	0.297	0.41	0.41				1	1.50	36	1	0.31	35				3

N.º	Código prueba	Fecha	Ti	Tf	t1	t1	t2	t2	M1	M2	W1	W2	P1i	P1f	$P1i_{min}$	$P1f_{min}$	P_{max}	t_{n1}	t_{n1}	n1	t_{n2}	t_{n2}	n2	H_{min}	H_{max}	N_{min}	E
			°C	°C	min	s	min	s	kg	kg	kg	kg	Bar	Bar	Bar	Bar	Bar	min	s	[ ]	min	s	[ ]	cm	cm	cm	
370	(X6); (2); (5)	07/08/22	16.9	17.0	1	1.15	1	0.04	0.873	14.524	0.774	0.082	1.42	1.46			2.41	1	0.25	38	1	0.34	39				3
371	(X10); (2); (1)	02/09/22	13.4	13.4	1	0.59	1	47.00	0.270	11.494	0.770	0.081	2.16	2.14			2.38	0	59.69	39	1	0.09	39	113.1	112.2		3
372	(X1); (2); (1)	05/09/22	15.1	15.3	1	0.46	1	0.75	5.385	16.470	0.769	0.297	0.45	0.45				1	11.91	45	1	0.12	38	113.7	112.9		3
373	(X14); (2); (7)	29/08/22	13.6	13.9	0	50.37	1	0.25	2.204	14.763	0.767	0.296	0.98	0.98			2.76	1	1.13	34	1	1.22	34	114	113	314.8	3
374	(X13); (1.4); (3)	25/08/22	18.7	18.6	1	0.57	1	0.85	2.363	15.140	0.770	0.298	0.55	0.56			2.06	0	59.75	30	0	59.81	30				3
375	(X11); (2); (7)	27/08/22	11.8	11.7	1	0.34	1	0.68	4.623	17.486	0.776	0.296	0.48	0.47			2.74	0	59.31	32	1	1.15	33				3
376	(X12); (1.4); (6)	29/08/22	16.6	16.5	1	0.65	1	0.22	2.975	16.325	0.770	0.299	0.42	0.42				1	4.13	31	1	2.13	30	171.8	171.1		3
377	(X13); (2); (8)	29/08/22	17.3	17.5	1	0.65	1	0.03	2.695	17.793	0.768	0.298	0.78	0.8			2.70	1	0.28	34	1	0.91	34				3
378	(X14); (1.4); (6)	29/08/22	16.3	16.2	1	0.25	1	0.12	1.723	15.089	0.771	0.191	0.69	0.7			2.02	1	2.44	31	1	1.10	30	171.7	170.9	314.9	3
379	(X12); (2); (5)	29/08/22	16.9	16.9	1	0.28	1	0.59	3.768	18.002	0.772	0.296	0.59	0.58				1	0.94	33	1	0.44	33	114.4	113.1		3
380	(X26); (3); (7)	09/09/22	17.2	17.2	0	51.78	1	0.78	1.489	17.583	0.770	0.296	2.06	2.02				0	59.84	33	1	0.41	33				3
381	(X30); (3); (4)	22/08/22	7.2	7.1	1	1.31	1	0.12	0.458	16.118	0.772	0.081	3.2	3.05				1	1.06	33	1	0.85	33				3
382	(X7); (3); (10)	16/09/22	16.2	16.4	1	0.22	1	0.47	0.595	15.395	0.769	0.080	2.33	2.37				1	0.25	44	1	0.25	44	12.3	10.8		3
383	(X8); (2); (2)	02/09/22	16.9	16.9	1	0.44	0	59.93	0.530	12.665	0.774	0.082	1.76	1.76			2.38	1	0.46	40	1	0.81	40				3
384	(X4); (2); (2)	05/09/22	14.6	14.5	1	0.57	1	0.53	2.115	15.656	0.768	0.297	0.98	0.97				1	0.22	41	1	0.59	41	113.4	112.5		3
385	(X24); (2); (8)	21/09/22	14.1	14.1	0	50.75	1	0.00	2.239	15.484	0.768	0.298	0.96	0.97	0.93	0.94	2.95	1	1.81	30	0	59.31	29	113.7	112.6	315.6	3
386	(X26); (2); (8)	22/09/22	13.9	14.1	1	0.18	0	59.97	1.120	15.907	0.767	0.081	1.45	1.45	1.42	1.42	2.92	0	59.81	29	1	1.28	30	113.5	112.4		3
387	(X17); (3); (10)	24/09/22	15.1	15.1	1	0.72	1	0.13	1.062	17.605	0.767	0.080	2.17	2.15	2.14	2.12		0	59.97	38	1	0.22	38	13.2	11.6		3

18.3 Tabla de análisis

Tabla 226

Tabla de análisis

N.º	Código	Requisitos			Variables independientes									Variables dependientes						E
		$\%\Delta P_1$	$\Delta T°$	T_{med}	L/D	H_1	H_{real}	H_{real}	h/H	h_{max}	Re	f	Q	q	n	q/Q_T	Q/Q_T	nD/v_c	η	Q_T/v_cD^2	
		%	°C	°C	[ ]	cm	m	[ ]	[ ]	m	[ ]	[ ]	l/min	l/min	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
1	(X1); (2); (7)	2.3 %	0.1	11.34	400		2.019	4.591	2.274	24.585	23,132	0.0251	15.688	4.690	37.02	0.230	0.770	0.0145	0.381	0.444	1
2	(X6); (1.4); (6)	3.2 %	0.2	15.27	400		1.446	9.849	6.812		22,388	0.0253	12.662	0.767	34.44	0.057	0.943	0.0155	0.352	0.336	1
3	(X6); (2); (5)	0.7 %	0.1	19.28	400	202.4	2.024	13.840	6.839	24.309	28,441	0.0239	13.159	0.913	38.84	0.065	0.935	0.0152	0.405	0.307	1
4	(X10); (2); (5)	1.4 %	0.3	17.59	400		2.028	22.412	11.052	24.709	27,285	0.0242	11.601	0.224	37.35	0.019	0.981	0.0146	0.194	0.258	1
5	(X4); (2); (5)	0.0 %	0.1	17.89	400		2.022	10.007	4.948	24.507	27,488	0.0241	15.985	1.794	38.87	0.101	0.899	0.0152	0.443	0.387	1
6	(X7); (2); (8)	0.6 %	0.1	10.94	400		2.023	16.168	7.991	24.278	22,873	0.0252	12.620	0.578	38.76	0.044	0.956	0.0152	0.320	0.288	1
7	(X3); (3); (7)	4.2 %	0.1	13.73	400		3.028	12.296	4.061	36.735	30,254	0.0236	19.160	2.754	45.24	0.126	0.874	0.0145	0.440	0.390	1
8	(X5); (2); (8)	0.0 %	0.1	13.14	400		2.022	12.040	5.956	24.794	24,300	0.0248	14.779	1.269	38.56	0.079	0.921	0.0151	0.426	0.350	1
9	(X2); (1.4); (6)	1.2 %	0.1	15.81	400		1.443	4.262	2.953	17.251	22,707	0.0252	13.233	3.168	33.82	0.193	0.807	0.0152	0.468	0.411	1
10	(X10); (2); (7)	0.9 %	0.0	13.09	400	203.0	2.030	22.039	10.856	24.590	24,268	0.0248	10.393	0.175	38.05	0.017	0.983	0.0149	0.166	0.230	1
11	(X9); (3); (7)	2.1 %	0.0	12.00	400		3.035	29.892	9.849	36.727	28,863	0.0238	14.739	0.411	44.46	0.027	0.973	0.0142	0.247	0.269	1
12	(X10); (3); (6)	0.9 %	0.1	11.75	400		3.035	32.595	10.740	37.951	28,663	0.0239	14.497	0.333	44.47	0.022	0.978	0.0142	0.224	0.264	1
13	(X1); (3); (8)	0.7 %	0.1	16.70	400		3.024	7.019	2.321	37.263	32,690	0.0232	19.798	5.915	42.37	0.230	0.770	0.0136	0.395	0.457	1
14	(X8); (2); (5)	3.5 %	0.0	13.09	400		2.027	18.060	8.908		24,268	0.0248	12.336	0.430	38.62	0.034	0.966	0.0151	0.276	0.278	1
15	(X3); (2); (8)	2.5 %	0.0	12.79	400		2.020	8.060	3.989	24.385	24,073	0.0249	15.499	2.474	39.15	0.138	0.862	0.0153	0.477	0.392	1
16	(X5); (3); (7)	0.0 %	0.1	12.45	400	303.6	3.036	17.855	5.881		29,220	0.0238	18.082	1.496	43.77	0.076	0.924	0.0140	0.404	0.348	1
17	(X8); (1.4); (6)	0.8 %	0.0	12.79	400		1.447	12.499	8.639	17.549	20,961	0.0257	10.983	0.481	33.96	0.042	0.958	0.0153	0.335	0.287	1
18	(X4); (1.4); (6)	0.7 %	0.0	12.79	400		1.443	7.066	4.896	17.651	20,961	0.0257	13.298	1.572	34.84	0.106	0.894	0.0157	0.461	0.372	1
19	(X4); (3); (7)	0.7 %	0.0	12.60	400		3.029	14.845	4.901	37.648	29,338	0.0238	17.813	2.044	46.56	0.103	0.897	0.0149	0.448	0.353	1
20	(X7); (3); (7)	0.4 %	0.1	12.35	400		3.035	24.231	7.985	37.239	29,141	0.0238	13.681	0.535	44.72	0.038	0.962	0.0143	0.273	0.253	1
21	(X2); (2); (5)	0.0 %	0.1	11.75	400		2.021	6.019	2.978	24.280	23,393	0.0251	15.733	3.790	38.39	0.194	0.806	0.0150	0.477	0.426	1

N.º	Código	Requisitos			Variables independientes								Variables dependientes								E
		$\%\Delta P_1$	$\Delta T°$	T_{med}	L/D	H_1	H_{real}	H_{real}	h/H	h_{max}	Re	f	Q	q	n	q/Q_T	Q/Q_T	nD/v_c	η	Q_T/v_cD^2	
		%	°C	°C	[ ]	cm	m	[ ]	[ ]	m	[ ]	[ ]	l/min	l/min	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	
22	(X9); (2); (8)	0.5 %	0.1	13.14	400	203.0	2.030	19.744	9.728		24,300	0.0248	11.431	0.332	38.15	0.028	0.972	0.0150	0.253	0.256	1
23	(X8); (3); (7)	0.4 %	0.2	13.39	400		3.034	26.785	8.829	37.346	29,975	0.0236	14.622	0.454	44.06	0.030	0.970	0.0141	0.243	0.268	1
24	(X2); (3); (7)	1.1 %	0.0	12.79	400		3.026	8.979	2.967	37.343	29,497	0.0237	20.041	4.396	43.36	0.180	0.820	0.0139	0.431	0.435	1
25	(X6); (3); (7)	0.5 %	0.1	12.25	400		3.032	20.762	6.847	37.953	29,062	0.0238	17.286	0.992	44.19	0.054	0.946	0.0141	0.336	0.325	1
26	(X11); (3); (4)	1.4 %	0.0	12.10	500		3.016	7.142	2.368	40.299	28,944	0.0238	19.262	5.548	36.55	0.224	0.776	0.0117	0.394	0.441	1
27	(X18); (3); (4)	1.9 %	0.0	15.66	500	302.7	3.027	26.794	8.853	41.543	31,831	0.0233	15.760	0.431	35.82	0.027	0.973	0.0115	0.215	0.288	1
28	(X14); (1.4); (3)	0.7 %	0.0	11.49	500		1.436	7.065	4.919	20.505	20,227	0.0259	14.073	1.723	28.92	0.109	0.891	0.0130	0.480	0.395	1
29	(X11); (2); (5)	0.0 %	0.0	17.15	500		2.012	4.799	2.385	27.056	26,982	0.0242	15.763	4.543	31.22	0.224	0.776	0.0122	0.399	0.443	1
30	(X11); (3); (6)	0.7 %	0.1	13.83	500		3.016	7.271	2.411	39.797	30,335	0.0236	19.231	5.465	36.70	0.221	0.779	0.0117	0.401	0.439	1
31	(X12); (1.4); (3)	0.0 %	0.0	13.39	500		1.434	4.235	2.952	20.816	21,301	0.0256	14.110	3.020	27.81	0.176	0.824	0.0125	0.418	0.429	1
32	(X17); (3); (4)	0.9 %	0.0	12.69	500		3.025	24.181	7.994	39.791	29,418	0.0237	15.220	0.752	37.94	0.047	0.953	0.0121	0.345	0.284	1
33	(X16); (1.4); (3)	1.1 %	0.1	11.95	500		1.436	9.794	6.819	20.608	20,483	0.0259	13.010	0.973	28.78	0.070	0.930	0.0130	0.435	0.350	1
34	(X13); (2); (5)	1.9 %	0.0	11.49	500		2.015	7.983	3.962	28.258	23,230	0.0251	16.238	2.608	33.06	0.138	0.862	0.0130	0.476	0.411	1
35	(X17); (2); (5)	0.6 %	0.1	10.94	500		2.019	15.964	7.908	28.052	22,873	0.0252	13.765	0.733	32.56	0.051	0.949	0.0128	0.368	0.316	1
36	(X15); (1.4); (6)	0.6 %	0.4	16.46	500		1.437	8.396	5.843	21.029	23,085	0.0251	13.563	1.263	29.22	0.085	0.915	0.0132	0.451	0.371	1
37	(X18); (1.4); (3)	0.0 %	0.1	18.39	500		1.438	12.459	8.665	20.935	24,230	0.0248	11.900	0.631	28.57	0.050	0.950	0.0129	0.407	0.314	1
38	(X20); (2); (3)	0.0 %	0.1	16.90	500		2.019	21.848	10.820	27.463	26,814	0.0243	12.332	0.391	32.44	0.031	0.969	0.0127	0.311	0.277	1
39	(X17); (1.4); (6)	0.0 %	0.0	16.06	500		1.438	11.229	7.808		22,852	0.0252	12.103	0.761	28.48	0.059	0.941	0.0128	0.428	0.322	1
40	(X16); (3); (4)	0.0 %	0.1	15.42	500		3.025	21.026	6.950	39.704	31,627	0.0234	17.439	1.171	37.77	0.063	0.937	0.0121	0.400	0.331	1
41	(X14); (3); (4)	0.0 %	0.1	14.53	500		3.021	15.002	4.965	40.209	30,898	0.0235	18.879	2.256	38.32	0.107	0.893	0.0123	0.474	0.376	1
42	(X12); (3); (4)	0.0 %	0.0	13.49	500		3.016	8.979	2.978	40.101	30,054	0.0236	19.811	4.249	37.18	0.177	0.823	0.0119	0.424	0.428	1
43	(X15); (3); (4)	0.6 %	0.1	12.74	500		3.021	18.110	5.994	38.975	29,457	0.0237	18.466	1.642	38.68	0.082	0.918	0.0124	0.444	0.358	1
44	(X13); (3); (4)	0.9 %	0.1	12.25	500		3.019	11.988	3.971	40.197	29,062	0.0238	19.453	3.060	38.21	0.136	0.864	0.0122	0.467	0.400	1
45	(X19); (2); (5)	0.8 %	0.2	13.09	500		2.020	20.075	9.940	27.957	24,268	0.0248	12.505	0.450	32.54	0.035	0.965	0.0128	0.322	0.282	1
46	(X20); (3); (4)	0.3 %	0.3	13.83	500		3.026	33.113	10.944	39.695	30,335	0.0236	15.546	0.357	37.14	0.022	0.978	0.0119	0.228	0.283	1
47	(X19); (1.4); (6)	0.7 %	0.2	15.86	500		1.441	13.933	9.671	20.619	22,736	0.0252	11.284	0.503	28.22	0.043	0.957	0.0127	0.387	0.295	1
48	(X19); (3); (4)	4.1 %	0.2	16.95	500		3.026	29.505	9.750	39.816	32,896	0.0231	15.173	0.385	36.77	0.025	0.975	0.0118	0.222	0.277	1
49	(X15); (2); (5)	0.0 %	0.1	12.45	500		2.017	11.937	5.918	27.343	23,847	0.0249	15.518	1.502	33.16	0.088	0.912	0.0130	0.476	0.371	1

N.º	Código	Requisitos			Variables independientes								Variables dependientes							E
		$\%\Delta P_1$	$\Delta T°$	T_{med}	L/D	H_1	H_{real}	H_{real}	h/H	h_{max}	Re	f	Q	q	n	q/Q_T	Q/Q_T	nD/v_c	η	Q_T/v_cD^2	
		%	°C	°C	[ ]	cm	m	[ ]	[ ]	m	[ ]	[ ]	l/min	l/min	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	
50	(X13); (1.4); (6)	0.0 %	0.0	12.40	500		1.435	5.611	3.911	20.201	20,736	0.0258	14.095	2.168	28.13	0.133	0.867	0.0127	0.448	0.407	1
51	(X27); (1.4); (6)	1.8 %	0.0	7.66	600		1.446	11.218	7.756	23.456	18,128	0.0266	13.322	0.860	24.18	0.061	0.939	0.0109	0.436	0.355	1
52	(X28); (1.4); (3)	1.6 %	0.0	19.03	600		1.449	12.562	8.672	21.959	24,616	0.0248	12.487	0.696	24.40	0.053	0.947	0.0110	0.427	0.330	1
53	(X24); (1.4); (3)	1.5 %	0.1	18.88	600		1.446	7.047	4.873	22.162	24,527	0.0248	14.657	1.661	24.27	0.102	0.898	0.0109	0.439	0.408	1
54	(X29); (1.4); (6)	0.4 %	0.0	18.73	600		1.449	13.915	9.602	22.264	24,438	0.0248	12.233	0.571	24.33	0.045	0.955	0.0110	0.402	0.320	1
55	(X30); (2); (3)	0.5 %	0.1	16.60	600		2.028	22.102	10.896	31.137	26,612	0.0243	12.917	0.400	27.18	0.030	0.970	0.0107	0.306	0.290	1
56	(X25); (3); (4)	1.7 %	0.1	16.51	600		3.035	18.018	5.936		32,526	0.0232	19.699	1.728	33.12	0.081	0.919	0.0106	0.433	0.381	1
57	(X29); (3); (4)	2.0 %	0.0	7.46	600		3.034	30.289	9.983		25,359	0.0246	15.621	0.386	30.76	0.024	0.976	0.0098	0.222	0.285	1
58	(X25); (1.4); (6)	0.0 %	0.1	15.91	600		1.446	8.370	5.789	22.457	22,765	0.0252	14.638	1.298	24.52	0.081	0.919	0.0110	0.425	0.399	1
59	(X30); (3); (4)	3.1 %	0.1	13.73	600	303.6	3.036	33.164	10.923		30,254	0.0236	17.206	0.292	30.64	0.017	0.983	0.0098	0.169	0.311	1
60	(X22); (1.4); (3)	1.2 %	0.4	16.26	600		1.444	4.211	2.916	22.560	22,968	0.0252	14.369	3.082	23.60	0.177	0.823	0.0106	0.411	0.437	1
61	(X23); (1.4); (6)	0.9 %	0.1	17.69	600		1.445	5.590	3.870	22.464	23,817	0.0249	14.717	2.199	24.29	0.130	0.870	0.0109	0.429	0.423	1
62	(X21); (3); (4)	1.4 %	0.0	18.83	600		3.022	7.609	2.518		34,473	0.0229	20.295	4.993	30.78	0.197	0.803	0.0098	0.373	0.450	1
63	(X26); (1.4); (3)	1.1 %	0.0	19.23	600		1.447	9.805	6.775	21.959	24,735	0.0247	13.496	1.099	25.05	0.075	0.925	0.0113	0.470	0.365	1
64	(X29); (2); (5)	1.0 %	0.2	15.17	600	202.5	2.025	19.902	9.826	31.129	25,646	0.0245	13.523	0.454	27.05	0.032	0.968	0.0106	0.296	0.305	1
65	(X27); (3); (4)	0.4 %	0.0	19.13	600		3.034	24.257	7.996		34,724	0.0229	16.734	0.754	31.82	0.043	0.957	0.0102	0.315	0.311	1
66	(X22); (3); (4)	1.1 %	0.0	8.27	600	302.9	3.029	9.026	2.980	44.364	25,966	0.0244	20.964	4.239	31.06	0.168	0.832	0.0099	0.400	0.448	1
67	(X21); (3); (6)	0.7 %	0.0	18.73	600		3.022	7.481	2.476		34,389	0.0229	20.560	4.960	30.74	0.194	0.806	0.0098	0.356	0.454	1
68	(X21); (2); (5)	1.0 %	0.2	18.83	600	201.6	2.016	5.081	2.520		28,134	0.0240	17.566	4.007	26.05	0.186	0.814	0.0102	0.347	0.470	1
69	(X24); (3); (4)	0.7 %	0.0	18.44	600	302.9	3.029	14.961	4.940		34,139	0.0230	20.149	2.202	33.26	0.099	0.901	0.0106	0.431	0.398	1
70	(X26); (3); (4)	0.5 %	0.1	18.19	600	303.6	3.036	21.087	6.945		33,931	0.0230	17.947	1.214	32.27	0.063	0.937	0.0103	0.402	0.341	1
71	(X27); (2); (5)	0.0 %	0.1	17.59	600	202.7	2.027	16.031	7.907	31.142	27,285	0.0242	14.706	0.903	28.25	0.058	0.942	0.0111	0.424	0.340	1
72	(X23); (2); (5)	0.7 %	0.0	17.15	600	202.0	2.020	7.938	3.929	30.935	26,982	0.0242	17.024	2.451	28.01	0.126	0.874	0.0110	0.422	0.424	1
73	(X28); (3); (4)	1.9 %	0.1	19.18	600	302.9	3.029	27.117	8.953		34,766	0.0229	17.211	0.452	30.25	0.026	0.974	0.0097	0.209	0.314	1
74	(X23); (3); (4)	0.9 %	0.0	18.24	600		3.029	12.050	3.978		33,973	0.0230	20.912	2.993	32.12	0.125	0.875	0.0103	0.426	0.425	1
75	(X25); (2); (5)	0.0 %	0.1	12.94	600	202.5	2.025	11.938	5.895	31.222	24,170	0.0249	16.235	1.532	28.55	0.086	0.914	0.0112	0.462	0.387	1
76	(X12); (3); (1)	1.1 %	0.0	6.25	500	301.6	3.016	9.076	3.009	41.402	24,463	0.0248	19.885	4.243	36.94	0.176	0.824	0.0118	0.429	0.429	1
77	(X17); (2); (2)	0.0 %	0.0	6.05	500	201.9	2.019	15.704	7.780	28.961	19,845	0.0261	13.975	0.820	31.80	0.055	0.945	0.0125	0.398	0.322	1

N.º	Código	Requisitos			Variables independientes								Variables dependientes								E
		$\%\Delta P_1$	$\Delta T°$	T_{med}	L/D	H_1	H_{real}	H_{real}	h/H	h_{max}	Re	f	Q	q	n	q/Q_T	Q/Q_T	nD/v_c	η	Q_T/v_cD^2	
		%	°C	°C	[ ]	cm	m	[ ]	[ ]	m	[ ]	[ ]	l/min	l/min	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	
78	(X18); (3); (1)	1.1 %	0.3	14.43	500	302.2	3.022	27.095	8.966		30,817	0.0235	15.352	0.437	36.20	0.028	0.972	0.0116	0.227	0.281	1
79	(X15); (2); (2)	0.9 %	0.4	17.45	500	201.7	2.017	11.997	5.947	27.670	27,184	0.0242	15.512	1.489	33.26	0.088	0.912	0.0130	0.475	0.371	1
80	(X12); (2); (2)	0.0 %	0.3	17.89	500	201.3	2.013	6.076	3.019		27,488	0.0241	16.851	3.674	31.95	0.179	0.821	0.0125	0.440	0.447	1
81	(X16); (2); (2)	0.7 %	0.0	18.63	500		2.016	13.940	6.913	28.391	27,998	0.0240	14.777	1.153	33.12	0.072	0.928	0.0130	0.461	0.347	1
82	(X20); (2); (1)	0.7 %	0.2	18.63	500	202.0	2.020	22.340	11.061	27.982	27,998	0.0240	12.154	0.327	32.05	0.026	0.974	0.0126	0.271	0.272	1
83	(X11); (2); (3)	2.1 %	0.0	15.76	500	201.5	2.015	4.848	2.406	27.152	26,044	0.0244	15.788	4.891	30.84	0.237	0.763	0.0121	0.436	0.451	1
84	(X14); (3); (1)	1.4 %	0.1	17.40	500	302.2	3.022	14.805	4.899	41.862	33,268	0.0231	19.343	2.250	38.52	0.104	0.896	0.0123	0.453	0.384	1
85	(X19); (2); (2)	0.3 %	0.0	17.05	500	202.0	2.020	19.883	9.845	27.974	26,914	0.0242	12.494	0.426	32.13	0.033	0.967	0.0126	0.302	0.282	1
86	(X19); (1.4); (3)	0.7 %	0.2	16.56	500	144.0	1.440	13.935	9.675	21.030	23,143	0.0251	11.181	0.477	28.34	0.041	0.959	0.0128	0.370	0.292	1
87	(X13); (2); (2)	1.3 %	0.1	15.71	500	201.5	2.015	7.962	3.951	28.274	26,011	0.0244	16.058	2.580	32.74	0.138	0.862	0.0128	0.474	0.406	1
88	(X19); (3); (1)	1.4 %	0.1	13.24	500		3.026	29.795	9.846		29,855	0.0237	14.721	0.367	36.75	0.024	0.976	0.0118	0.221	0.268	1
89	(X13); (3); (1)	0.0 %	0.3	15.12	500		3.019	11.941	3.955		31,383	0.0234	19.264	2.975	38.48	0.134	0.866	0.0123	0.456	0.396	1
90	(X17); (1.4); (3)	1.8 %	0.0	11.80	500	143.7	1.437	11.324	7.883	21.016	20,397	0.0259	12.500	0.776	28.11	0.058	0.942	0.0127	0.428	0.332	1
91	(X11); (2); (1)	2.1 %	0.4	16.56	500	201.3	2.013	4.849	2.409	28.380	26,579	0.0243	16.182	4.721	31.07	0.226	0.774	0.0122	0.411	0.456	1
92	(X17); (3); (1)	0.9 %	0.2	18.44	500	302.6	3.026	23.794	7.863	42.380	34,139	0.0230	15.605	0.746	37.29	0.046	0.954	0.0119	0.328	0.291	1
93	(X16); (3); (1)	0.0 %	0.1	18.39	500	302.6	3.026	21.037	6.952		34,097	0.0230	16.750	1.163	37.88	0.065	0.935	0.0121	0.413	0.319	1
94	(X15); (1.4); (3)	1.2 %	0.1	18.98	500	143.9	1.439	8.324	5.786	20.937	24,586	0.0248	13.795	1.227	29.05	0.082	0.918	0.0131	0.426	0.376	1
95	(X18); (2); (2)	1.1 %	0.0	19.23	500		2.018	17.976	8.909	27.883	28,407	0.0239	12.378	0.531	32.23	0.041	0.959	0.0126	0.339	0.281	1
96	(X11); (3); (2)	1.4 %	0.0	15.66	500	301.7	3.017	7.298	2.419		31,831	0.0233	20.424	5.553	35.16	0.214	0.786	0.0112	0.386	0.462	1
97	(X13); (1.4); (3)	4.7 %	0.0	14.08	500	143.6	1.436	5.536	3.856		21,699	0.0255	14.371	2.221	28.14	0.134	0.866	0.0127	0.441	0.415	1
98	(X20); (3); (2)	3.2 %	0.1	15.71	500		3.026	32.867	10.863		31,871	0.0233	15.188	0.326	37.28	0.021	0.979	0.0119	0.212	0.276	1
99	(X15); (3); (1)	0.6 %	0.1	17.40	500		3.021	17.817	5.897		33,268	0.0231	18.496	1.601	38.92	0.080	0.920	0.0125	0.424	0.357	1
100	(X14); (2); (2)	0.0 %	0.0	15.57	500		2.012	9.952	4.945	27.865	25,911	0.0245	15.737	1.887	33.14	0.107	0.893	0.0130	0.473	0.384	1
101	(X7); (1.4); (6)	0.0 %	0.1	13.24	400		1.447	11.224	7.758	17.448	21,216	0.0256	12.466	0.645	34.12	0.049	0.951	0.0154	0.349	0.328	1
102	(X9); (2); (5)	0.5 %	0.0	12.50	400		2.027	20.048	9.890	24.486	23,879	0.0249	11.407	0.316	38.24	0.027	0.973	0.0150	0.246	0.256	1
103	(X4); (3); (4)	0.0 %	0.1	11.85	400		3.029	14.895	4.917	38.257	28,743	0.0239	17.941	2.065	45.91	0.103	0.897	0.0147	0.451	0.356	1
104	(X3); (1.4); (6)	0.0 %	0.0	6.45	400	144.4	1.444	5.660	3.919	17.744	17,489	0.0269	13.698	2.049	33.83	0.130	0.870	0.0152	0.437	0.394	1
105	(X8); (3); (4)	0.4 %	0.0	6.55	400		3.034	27.075	8.924	38.242	24,685	0.0247	14.381	0.435	44.84	0.029	0.971	0.0143	0.240	0.264	1

N.º	Código	Requisitos			Variables independientes								Variables dependientes								E
		$\%\Delta P_1$	$\Delta T°$	T_{med}	L/D	H_1	H_{real}	H_{real}	h/H	h_{max}	Re	f	Q	q	n	q/Q_T	Q/Q_T	nD/v_c	η	Q_T/v_cD^2	
		%	°C	°C	[ ]	cm	m	[ ]	[ ]	m	[ ]	[ ]	l/min	l/min	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	
106	(X5); (2); (5)	1.7 %	0.1	6.50	400		2.022	12.033	5.952	24.780	20,116	0.0260	14.755	1.283	39.06	0.080	0.920	0.0153	0.431	0.350	1
107	(X7); (3); (4)	0.4 %	0.4	13.29	400		3.035	23.928	7.885	37.958	29,895	0.0237	13.812	0.535	44.17	0.037	0.963	0.0141	0.267	0.255	1
108	(X5); (1.4); (6)	2.5 %	0.1	13.44	400		1.446	8.367	5.788	17.755	21,329	0.0256	13.269	1.154	34.22	0.080	0.920	0.0154	0.417	0.361	1
109	(X9); (3); (4)	1.7 %	0.6	15.47	400		3.035	29.957	9.871		31,668	0.0233	14.145	0.377	45.01	0.026	0.974	0.0144	0.236	0.258	1
110	(X1); (2); (5)	2.2 %	0.2	17.35	400		2.019	4.646	2.301	24.402	27,116	0.0242	16.050	4.735	37.13	0.228	0.772	0.0146	0.384	0.453	1
111	(X7); (2); (5)	0.3 %	0.1	17.99	400		2.023	16.108	7.961		27,556	0.0241	12.538	0.614	38.92	0.047	0.953	0.0153	0.341	0.287	1
112	(X4); (1.4); (3)	0.7 %	0.0	12.99	400		1.443	7.015	4.861	17.448	21,074	0.0257	13.523	1.545	34.63	0.103	0.897	0.0156	0.441	0.377	1
113	(X3); (2); (5)	0.0 %	0.0	17.94	400	202.1	2.021	7.863	3.891	24.303	27,522	0.0241	15.656	2.523	39.10	0.139	0.861	0.0153	0.466	0.396	1
114	(X2); (3); (4)	1.7 %	0.0	17.25	400		3.026	8.908	2.944	37.266	33,144	0.0231	19.258	4.230	44.40	0.180	0.820	0.0142	0.427	0.418	1
115	(X10); (2); (3)	1.4 %	0.0	16.95	400		2.028	22.307	11.000	24.196	26,847	0.0243	10.565	0.176	38.37	0.016	0.984	0.0150	0.166	0.234	1
116	(X10); (3); (4)	0.3 %	0.0	16.46	400		3.035	33.637	11.083	37.771	32,485	0.0232	14.261	0.295	44.61	0.020	0.980	0.0143	0.209	0.259	1
117	(X8); (1.4); (3)	1.6 %	0.2	12.60	400		1.447	12.549	8.674	17.549	20,849	0.0257	11.805	0.498	32.83	0.040	0.960	0.0148	0.324	0.308	1
118	(X2); (1.4); (3)	0.0 %	0.1	18.68	400	144.3	1.443	4.187	2.902	17.668	24,408	0.0248	13.125	3.119	33.66	0.192	0.808	0.0152	0.452	0.407	1
119	(X3); (3); (4)	0.0 %	0.0	15.66	400		3.028	12.044	3.978	37.256	31,831	0.0233	18.448	2.854	45.26	0.134	0.866	0.0145	0.461	0.379	1
120	(X9); (1.4); (6)	0.7 %	0.3	14.82	400	144.5	1.445	14.033	9.715	17.656	22,129	0.0254	11.316	0.352	33.18	0.030	0.970	0.0149	0.271	0.292	1
121	(X6); (3); (4)	0.0 %	0.1	14.72	400		3.032	20.922	6.900		31,059	0.0235	15.946	0.945	44.84	0.056	0.944	0.0143	0.350	0.300	1
122	(X6); (1.4); (3)	1.0 %	0.2	17.25	400		1.446	9.853	6.814		23,553	0.0250	12.423	0.745	34.53	0.057	0.943	0.0155	0.349	0.330	1
123	(X1); (3); (6)	0.7 %	0.0	12.10	400		3.024	7.014	2.320	37.136	28,944	0.0238	18.833	5.732	42.64	0.233	0.767	0.0136	0.402	0.437	1
124	(X1); (3); (4)	0.7 %	0.0	18.04	400		3.024	6.969	2.305	37.986	33,806	0.0230	19.981	5.720	41.77	0.223	0.777	0.0134	0.374	0.457	1
125	(X5); (3); (4)	1.1 %	0.0	17.94	400		3.032	17.870	5.895		33,723	0.0230	17.319	1.490	44.93	0.079	0.921	0.0144	0.421	0.335	1
126	(X12); (3); (7)	0.6 %	0.1	13.34	500		3.016	9.005	2.986	41.427	29,935	0.0236	19.946	4.263	37.02	0.176	0.824	0.0118	0.424	0.431	1
127	(X18); (1.4); (6)	0.8 %	0.0	12.99	500		1.438	12.499	8.693	20.611	21,074	0.0257	12.377	0.582	28.12	0.045	0.955	0.0127	0.362	0.324	1
128	(X19); (2); (8)	0.0 %	0.2	12.60	500		2.020	20.201	10.002	27.956	23,944	0.0249	12.544	0.442	31.97	0.034	0.966	0.0125	0.317	0.283	1
129	(X16); (2); (5)	0.7 %	0.1	12.25	500		2.016	13.926	6.906	27.852	23,718	0.0250	14.647	1.135	33.10	0.072	0.928	0.0130	0.458	0.344	1
130	(X11); (2); (7)	2.1 %	0.0	16.65	500	201.0	2.010	4.747	2.362	27.564	26,646	0.0243	15.770	4.801	31.01	0.233	0.767	0.0122	0.415	0.448	1
131	(X19); (3); (7)	0.7 %	0.0	11.70	500		3.026	30.095	9.945		28,623	0.0239	15.257	0.390	36.66	0.025	0.975	0.0117	0.229	0.278	1
132	(X17); (2); (8)	0.0 %	0.1	11.14	500		2.019	16.118	7.984	27.543	23,003	0.0252	13.214	0.743	32.35	0.053	0.947	0.0127	0.393	0.304	1
133	(X16); (3); (7)	1.9 %	0.0	6.15	500		3.025	21.211	7.012	43.136	24,389	0.0248	17.354	1.243	37.87	0.067	0.933	0.0121	0.431	0.331	1

N.º	Código	Requisitos			Variables independientes								Variables dependientes								E
		$\%\Delta P_1$	$\Delta T°$	T_{med}	L/D	H_1	H_{real}	H_{real}	h/H	h_{max}	Re	f	Q	q	n	q/Q_T	Q/Q_T	nD/v_c	η	Q_T/v_cD^2	
		%	°C	°C	[ ]	cm	m	[ ]	[ ]	m	[ ]	[ ]	l/min	l/min	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	
134	(X15); (2); (7)	0.9 %	0.0	6.25	500		2.017	11.880	5.890		19,965	0.0260	15.941	1.477	32.83	0.085	0.915	0.0129	0.453	0.380	1
135	(X18); (3); (7)	0.8 %	0.3	16.21	500	302.7	3.027	27.256	9.005		32,280	0.0232	15.483	0.430	36.34	0.027	0.973	0.0116	0.222	0.283	1
136	(X14); (2); (7)	0.5 %	0.1	14.72	500	201.1	2.011	10.027	4.987	27.045	25,348	0.0246	15.618	1.892	33.14	0.108	0.892	0.0130	0.483	0.382	1
137	(X17); (3); (7)	0.0 %	0.1	16.01	500		3.025	24.090	7.964	41.852	32,116	0.0233	15.749	0.736	36.98	0.045	0.955	0.0118	0.325	0.293	1
138	(X20); (2); (7)	0.0 %	0.1	17.10	500	201.8	2.018	21.849	10.826	28.076	26,948	0.0242	12.323	0.389	32.33	0.031	0.969	0.0127	0.310	0.277	1
139	(X16); (1.4); (6)	0.5 %	0.1	15.22	500		1.436	9.773	6.804	19.801	22,359	0.0253	12.936	0.976	29.20	0.070	0.930	0.0131	0.438	0.348	1
140	(X13); (3); (7)	0.9 %	0.1	13.73	500		3.019	11.990	3.971		30,254	0.0236	19.939	3.087	37.88	0.134	0.866	0.0121	0.460	0.410	1
141	(X11); (3); (8)	0.7 %	0.1	12.84	500		3.016	7.219	2.394		29,537	0.0237	19.964	5.570	35.71	0.218	0.782	0.0114	0.389	0.454	1
142	(X12); (1.4); (6)	0.0 %	0.2	14.58	500	143.4	1.434	4.235	2.953	20.003	21,985	0.0254	14.299	3.060	27.41	0.176	0.824	0.0123	0.418	0.435	1
143	(X15); (3); (8)	1.1 %	0.1	17.69	500	302.2	3.022	17.971	5.948	42.374	33,516	0.0230	18.707	1.614	38.03	0.079	0.921	0.0122	0.427	0.361	1
144	(X13); (2); (8)	0.6 %	0.0	14.28	500	201.2	2.012	7.985	3.970		25,052	0.0246	16.195	2.547	32.65	0.136	0.864	0.0128	0.467	0.408	1
145	(X14); (3); (5)	0.7 %	0.0	17.74	500	302.1	3.021	14.857	4.918		33,557	0.0230	19.571	2.199	37.83	0.101	0.899	0.0121	0.440	0.387	1
146	(X12); (2); (5)	0.9 %	0.1	13.04	500	201.0	2.010	5.994	2.983		24,235	0.0248	16.046	3.756	31.97	0.190	0.810	0.0125	0.464	0.432	1
147	(X18); (2); (5)	0.6 %	0.0	18.24	500	201.9	2.019	17.819	8.827	27.878	27,726	0.0241	12.530	0.549	31.87	0.042	0.958	0.0125	0.343	0.285	1
148	(X20); (3); (6)	0.9 %	0.1	18.09	500	302.5	3.025	33.340	11.021		33,848	0.0230	15.953	0.321	36.79	0.020	0.980	0.0118	0.201	0.289	1
149	(X20); (2); (5)	0.0 %	0.0	17.64	500	201.8	2.018	21.851	10.830	27.058	27,319	0.0242	12.226	0.380	32.01	0.030	0.970	0.0125	0.306	0.275	1
150	(X14); (1.4); (6)	1.5 %	0.1	13.83	500	143.6	1.436	6.990	4.867		21,556	0.0255	13.866	1.716	28.31	0.110	0.890	0.0127	0.479	0.390	1
151	(X23); (2); (2)	0.6 %	0.1	11.85	600		2.022	7.983	3.947		23,458	0.0250	16.936	2.479	27.88	0.128	0.872	0.0109	0.431	0.423	1
152	(X28); (3); (1)	0.8 %	0.1	14.03	600	303.1	3.031	26.838	8.854	44.390	30,495	0.0235	17.102	0.505	30.58	0.029	0.971	0.0098	0.232	0.313	1
153	(X21); (3); (2)	0.7 %	0.0	13.49	600		3.022	7.627	2.524		30,054	0.0236	20.755	4.959	30.80	0.193	0.807	0.0099	0.364	0.457	1
154	(X24); (2); (2)	1.0 %	0.1	13.04	600	202.2	2.022	9.999	4.945	30.610	24,235	0.0248	16.874	1.933	28.02	0.103	0.897	0.0110	0.452	0.410	1
155	(X29); (1.4); (3)	0.7 %	0.0	6.75	600	144.7	1.447	14.022	9.690	23.455	17,648	0.0268	12.563	0.557	23.31	0.042	0.958	0.0105	0.385	0.328	1
156	(X29); (2); (2)	2.1 %	0.3	15.32	600	202.5	2.025	19.699	9.728	31.130	25,745	0.0245	13.869	0.493	26.85	0.034	0.966	0.0105	0.310	0.313	1
157	(X30); (3); (2)	0.3 %	0.3	17.20	600	303.0	3.030	33.131	10.934	44.923	33,102	0.0231	17.202	0.260	30.58	0.015	0.985	0.0098	0.150	0.311	1
158	(X29); (3); (1)	3.8 %	0.2	13.68	600	303.1	3.031	29.949	9.880		30,214	0.0236	16.246	0.333	30.21	0.020	0.980	0.0097	0.182	0.295	1
159	(X21); (2); (1)	1.0 %	0.1	18.29	600	201.7	2.017	4.978	2.468	30.125	27,760	0.0241	17.145	4.118	26.45	0.194	0.806	0.0104	0.352	0.463	1
160	(X25); (1.4); (3)	0.0 %	0.1	7.01	600	144.7	1.447	8.362	5.779	23.353	17,780	0.0268	14.743	1.272	24.29	0.079	0.921	0.0109	0.412	0.401	1
161	(X21); (2); (3)	0.0 %	0.1	17.30	600	201.9	2.019	5.003	2.478	30.630	27,083	0.0242	16.932	4.261	26.45	0.201	0.799	0.0104	0.372	0.462	1

N.º	Código	Requisitos		Variables independientes								Variables dependientes								E
		$\%\Delta P_1$	$\Delta T°$	T_{med}	L/D	H_1	H_{real}	H_{real}	h/H	h_{max}	Re	f	Q	q	n	q/Q_T	Q/Q_T	nD/v_c	η	Q_T/v_cD^2	
		%	°C	°C	[ ]	cm	m	[ ]	[ ]	m	[ ]	[ ]	l/min	l/min	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	
162	(X30); (2); (1)	0.9 %	0.1	12.94	600	202.6	2.026	22.141	10.926	30.814	24,170	0.0249	13.232	0.404	26.81	0.030	0.970	0.0105	0.303	0.297	1
163	(X25); (3); (1)	0.0 %	0.1	16.21	600	303.8	3.038	17.762	5.846	44.916	32,280	0.0232	19.926	1.699	33.11	0.079	0.921	0.0106	0.413	0.385	1
164	(X23); (3); (1)	0.0 %	0.2	12.40	600	302.7	3.027	12.039	3.977		29,180	0.0238	20.492	2.983	32.38	0.127	0.873	0.0104	0.433	0.418	1
165	(X28); (2); (2)	0.6 %	0.0	12.00	600	202.5	2.025	18.007	8.892		23,556	0.0250	13.852	0.609	27.02	0.042	0.958	0.0106	0.347	0.315	1
166	(X24); (3); (1)	0.3 %	0.3	15.61	600	302.8	3.028	14.877	4.913	45.115	31,790	0.0233	20.045	2.281	32.16	0.102	0.898	0.0103	0.445	0.397	1
167	(X23); (1.4); (3)	0.0 %	0.3	16.80	600	144.5	1.445	5.564	3.850	22.256	23,289	0.0251	15.248	2.159	23.96	0.124	0.876	0.0108	0.404	0.436	1
168	(X27); (3); (1)	0.0 %	0.0	17.45	600	302.9	3.029	23.892	7.889		33,309	0.0231	17.952	0.831	31.66	0.044	0.956	0.0101	0.319	0.334	1
169	(X27); (1.4); (3)	0.0 %	0.2	17.55	600	144.6	1.446	11.231	7.769	22.208	23,729	0.0250	13.562	0.839	24.66	0.058	0.942	0.0111	0.419	0.360	1
170	(X26); (2); (2)	0.4 %	0.1	17.10	600	202.0	2.020	14.064	6.961	31.037	26,948	0.0242	16.527	1.207	28.28	0.068	0.932	0.0111	0.435	0.387	1
171	(X27); (2); (2)	0.6 %	0.0	16.95	600	202.2	2.022	15.876	7.850		26,847	0.0243	14.871	0.911	27.90	0.058	0.942	0.0109	0.420	0.344	1
172	(X25); (2); (2)	0.0 %	0.2	15.86	600	201.8	2.018	12.045	5.969	30.622	26,111	0.0244	16.318	1.505	28.42	0.084	0.916	0.0111	0.458	0.388	1
173	(X22); (3); (1)	2.3 %	0.1	14.72	600	302.1	3.021	9.032	2.990		31,059	0.0235	20.758	4.124	31.54	0.166	0.834	0.0101	0.395	0.443	1
174	(X22); (2); (2)	1.7 %	0.1	14.03	600	201.9	2.019	6.072	3.007	30.410	24,888	0.0247	17.017	3.511	27.23	0.171	0.829	0.0107	0.414	0.447	1
175	(X26); (3); (1)	1.0 %	0.1	12.94	600	303.0	3.030	20.917	6.903	44.894	29,616	0.0237	18.397	1.253	32.52	0.064	0.936	0.0104	0.402	0.350	1
176	(X7); (2); (2)	0.7 %	0.0	18.44	400	202.5	2.025	15.880	7.841	24.203	27,862	0.0240	12.348	0.610	38.49	0.047	0.953	0.0151	0.338	0.282	1
177	(X8); (3); (1)	0.0 %	0.0	12.30	400	303.5	3.035	26.526	8.740		29,101	0.0238	14.827	0.442	42.99	0.029	0.971	0.0138	0.231	0.272	1
178	(X3); (1.4); (3)	0.0 %	0.1	17.69	400	144.5	1.445	5.616	3.887	17.562	23,817	0.0249	13.244	2.097	35.11	0.137	0.863	0.0158	0.457	0.384	1
179	(X4); (3); (1)	0.0 %	0.0	17.64	400	303.0	3.030	15.010	4.954	37.575	33,474	0.0231	18.427	2.075	45.35	0.101	0.899	0.0145	0.445	0.365	1
180	(X9); (2); (2)	1.6 %	0.0	17.55	400	202.4	2.024	19.961	9.862	24.301	27,251	0.0242	11.408	0.329	38.57	0.028	0.972	0.0151	0.255	0.256	1
181	(X8); (2); (2)	1.1 %	0.0	13.19	400	202.8	2.028	17.958	8.857		24,333	0.0248	12.076	0.438	38.28	0.035	0.965	0.0150	0.285	0.273	1
182	(X6); (3); (1)	0.0 %	0.1	15.42	400	303.0	3.030	21.026	6.939		31,627	0.0234	16.213	0.978	44.36	0.057	0.943	0.0142	0.358	0.306	1
183	(X3); (3); (1)	0.0 %	0.0	15.76	400	302.6	3.026	12.045	3.980	37.971	31,912	0.0233	18.758	2.915	45.00	0.135	0.865	0.0144	0.463	0.386	1
184	(X5); (1.4); (3)	1.2 %	0.0	13.78	400	144.7	1.447	8.419	5.817	17.858	21,528	0.0256	12.769	1.176	34.26	0.084	0.916	0.0154	0.444	0.349	1
185	(X9); (3); (1)	0.0 %	0.1	15.22	400		3.035	30.109	9.921	37.764	31,464	0.0234	14.753	0.380	44.44	0.025	0.975	0.0142	0.230	0.269	1
186	(X9); (1.4); (3)	0.4 %	0.5	15.91	400	144.8	1.448	13.959	9.640	17.557	22,765	0.0252	10.577	0.407	33.79	0.037	0.963	0.0152	0.332	0.275	1
187	(X2); (2); (2)	0.0 %	0.1	14.43	400	201.9	2.019	5.970	2.957	24.493	25,150	0.0246	15.750	3.656	38.07	0.188	0.812	0.0149	0.454	0.423	1
188	(X1); (3); (2)	0.0 %	0.0	13.98	400	302.4	3.024	6.939	2.295	36.737	30,455	0.0236	19.091	5.831	41.91	0.234	0.766	0.0134	0.395	0.443	1
189	(X10); (2); (1)	0.5 %	0.0	19.43	400	202.7	2.027	22.216	10.962	24.310	28,544	0.0239	10.289	0.171	38.19	0.016	0.984	0.0150	0.166	0.228	1

N.º	Código	Requisitos		Variables independientes								Variables dependientes									E
		$\%\Delta P_1$	$\Delta T°$	T_{med}	L/D	H_1	H_{real}	H_{real}	h/H	h_{max}	Re	f	Q	q	n	q/Q_T	Q/Q_T	nD/v_c	η	Q_T/v_cD^2	
		%	°C	°C	[ ]	cm	m	[ ]	[ ]	m	[ ]	[ ]	l/min	l/min	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	
190	(X6); (2); (2)	0.0 %	0.0	13.29	400	202.6	2.026	13.979	6.901		24,398	0.0248	13.340	0.831	38.41	0.059	0.941	0.0151	0.368	0.309	1
191	(X1); (2); (1)	1.1 %	0.0	19.72	400	201.8	2.018	4.622	2.290		28,750	0.0239	15.503	5.005	36.59	0.244	0.756	0.0143	0.417	0.447	1
192	(X5); (3); (1)	1.7 %	0.2	15.37	400	303.1	3.031	18.015	5.945	37.254	31,586	0.0234	17.111	1.501	45.34	0.081	0.919	0.0145	0.434	0.331	1
193	(X1); (2); (3)	1.1 %	0.1	15.71	400	201.7	2.017	4.619	2.290	24.395	26,011	0.0244	15.539	5.120	36.48	0.248	0.752	0.0143	0.425	0.450	1
194	(X2); (3); (1)	0.6 %	0.0	15.27	400	302.5	3.025	9.007	2.978	36.948	31,505	0.0234	18.811	4.173	44.55	0.182	0.818	0.0143	0.439	0.409	1
195	(X4); (2); (2)	1.0 %	0.1	14.72	400	202.2	2.022	9.951	4.921	24.392	25,348	0.0246	14.772	1.805	39.73	0.109	0.891	0.0156	0.479	0.361	1
196	(X7); (1.4); (3)	0.9 %	0.1	17.30	400	144.7	1.447	11.282	7.796	17.663	23,582	0.0250	11.540	0.619	33.95	0.051	0.949	0.0153	0.365	0.304	1
197	(X7); (3); (1)	0.4 %	0.0	17.05	400	303.4	3.034	23.533	7.758	37.265	32,979	0.0231	14.589	0.576	43.54	0.038	0.962	0.0139	0.267	0.270	1
198	(X3); (2); (2)	0.7 %	0.1	16.41	400	202.0	2.020	7.835	3.878	24.500	26,478	0.0243	15.593	2.503	39.20	0.138	0.862	0.0154	0.462	0.394	1
199	(X5); (2); (2)	0.0 %	0.1	15.12	400	202.2	2.022	12.043	5.957	24.393	25,612	0.0245	14.297	1.283	39.46	0.082	0.918	0.0155	0.445	0.340	1
200	(X10); (3); (2)	1.2 %	0.2	14.58	400	303.4	3.034	33.270	10.967	37.760	30,938	0.0235	14.421	0.305	44.19	0.021	0.979	0.0141	0.211	0.262	1
201	(X14); (2); (8)	0.5 %	0.1	16.90	500	201.3	2.013	9.980	4.958	27.361	26,814	0.0243	15.817	1.891	33.20	0.107	0.893	0.0130	0.473	0.386	1
202	(X18); (2); (8)	0.6 %	0.2	17.55	500	201.7	2.017	18.021	8.936		27,251	0.0242	12.619	0.565	32.25	0.043	0.957	0.0126	0.355	0.287	1
203	(X11); (2); (9)	1.1 %	0.0	17.74	500	201.1	2.011	4.774	2.374	27.875	27,387	0.0241	15.923	4.798	30.89	0.232	0.768	0.0121	0.414	0.452	1
204	(X17); (3); (10)	0.4 %	0.1	14.33	500	302.5	3.025	23.931	7.911		30,736	0.0235	16.048	0.694	36.31	0.041	0.959	0.0116	0.299	0.298	1
205	(X13); (1.4); (9)	0.9 %	0.1	16.70	500	143.5	1.435	5.640	3.931	20.214	23,231	0.0251	14.104	2.225	28.65	0.136	0.864	0.0129	0.462	0.409	1
206	(X18); (3); (10)	0.0 %	0.2	15.57	500	302.6	3.026	27.049	8.940		31,749	0.0233	15.435	0.422	36.28	0.027	0.973	0.0116	0.217	0.282	1
207	(X18); (1.4); (9)	2.4 %	0.2	15.47	500	143.8	1.438	12.708	8.835	20.210	22,504	0.0253	12.147	0.535	28.18	0.042	0.958	0.0127	0.345	0.317	1
208	(X15); (3); (10)	0.0 %	0.1	13.73	500	302.3	3.023	17.960	5.942		30,254	0.0236	18.288	1.637	38.36	0.082	0.918	0.0123	0.442	0.354	1
209	(X19); (1.4); (9)	0.0 %	0.1	12.94	500	144.1	1.441	13.978	9.699	20.202	21,046	0.0257	11.262	0.449	27.73	0.038	0.962	0.0125	0.347	0.293	1
210	(X12); (3); (10)	2.3 %	0.0	15.37	500	301.7	3.017	8.982	2.977		31,586	0.0234	20.619	4.325	36.75	0.173	0.827	0.0118	0.415	0.444	1
211	(X16); (3); (10)	1.5 %	0.2	11.90	500	302.4	3.024	20.863	6.899	42.236	28,783	0.0239	17.243	1.157	37.67	0.063	0.937	0.0121	0.396	0.327	1
212	(X15); (1.4); (9)	1.2 %	0.1	6.90	500	143.6	1.436	8.362	5.822	20.600	17,727	0.0268	13.984	1.279	27.97	0.084	0.916	0.0126	0.441	0.382	1
213	(X19); (3); (10)	1.0 %	0.0	7.06	500	302.6	3.026	30.237	9.992		25,058	0.0246	14.669	0.379	36.49	0.025	0.975	0.0117	0.232	0.268	1
214	(X20); (3); (10)	1.2 %	0.9	7.81	500	302.7	3.027	32.839	10.850	42.221	25,623	0.0245	14.752	0.360	37.04	0.024	0.976	0.0118	0.240	0.269	1
215	(X13); (3); (10)	1.7 %	0.4	14.48	500	301.9	3.019	11.736	3.887		30,857	0.0235	19.268	3.024	38.08	0.136	0.864	0.0122	0.453	0.397	1
216	(X17); (1.4); (9)	0.0 %	0.0	17.84	500	143.9	1.439	11.232	7.805	20.218	23,906	0.0249	12.146	0.733	28.03	0.057	0.943	0.0126	0.411	0.322	1
217	(X20); (2); (9)	0.9 %	0.1	18.19	500	201.6	2.016	22.057	10.941	27.776	27,692	0.0241	12.319	0.362	32.15	0.029	0.971	0.0126	0.292	0.276	1

N.º	Código	Requisitos			Variables independientes								Variables dependientes								E
		$\%\Delta P_1$	$\Delta T°$	T_{med}	L/D	H_1	H_{real}	H_{real}	h/H	h_{max}	Re	f	Q	q	n	q/Q_T	Q/Q_T	nD/v_c	η	Q_T/v_cD^2	
		%	°C	°C	[ ]	cm	m	[ ]	[ ]	m	[ ]	[ ]	l/min	l/min	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	
218	(X20); (3); (8)	0.6 %	0.1	18.49	500	302.6	3.026	32.475	10.733		34,181	0.0229	15.499	0.343	36.86	0.022	0.978	0.0118	0.215	0.282	1
219	(X11); (3); (10)	0.0 %	0.0	18.63	500	301.6	3.016	7.200	2.387		34,306	0.0229	19.733	5.577	35.73	0.220	0.780	0.0114	0.392	0.450	1
220	(X16); (1.4); (9)	0.5 %	0.1	18.68	500	143.6	1.436	9.779	6.811	20.221	24,408	0.0248	13.171	1.085	28.65	0.076	0.924	0.0129	0.479	0.357	1
221	(X16); (2); (8)	1.5 %	0.1	17.79	500	201.4	2.014	13.887	6.895	27.876	27,421	0.0241	14.722	1.076	32.95	0.068	0.932	0.0129	0.431	0.344	1
222	(X14); (3); (10)	1.4 %	0.0	17.74	500	302.1	3.021	15.010	4.968		33,557	0.0230	18.956	2.076	38.35	0.099	0.901	0.0123	0.434	0.374	1
223	(X14); (1.4); (9)	0.0 %	0.0	17.45	500	143.6	1.436	7.045	4.907	20.625	23,670	0.0250	13.941	1.684	28.66	0.108	0.892	0.0129	0.472	0.391	1
224	(X12); (2); (8)	1.7 %	0.1	17.10	500	201.0	2.010	6.075	3.022	28.076	26,948	0.0242	16.157	3.542	32.02	0.180	0.820	0.0125	0.443	0.429	1
225	(X12); (1.4); (9)	0.0 %	0.1	16.90	500	143.4	1.434	4.186	2.918	20.214	23,347	0.0251	14.075	3.048	27.55	0.178	0.822	0.0124	0.415	0.429	1
226	(X27); (3); (7)	0.4 %	0.1	8.01	600	303.7	3.037	23.915	7.875	45.077	25,775	0.0245	16.976	0.866	32.10	0.049	0.951	0.0103	0.351	0.317	1
227	(X23); (2); (8)	1.9 %	0.4	8.37	600	202.5	2.025	7.879	3.891	31.106	21,253	0.0256	17.651	2.541	27.61	0.126	0.874	0.0108	0.416	0.440	1
228	(X29); (2); (8)	0.5 %	0.1	14.72	600	202.9	2.029	19.850	9.781	30.005	25,348	0.0246	13.298	0.467	27.09	0.034	0.966	0.0106	0.308	0.300	1
229	(X24); (2); (5)	1.0 %	0.3	15.91	600	202.5	2.025	9.952	4.914	30.112	26,144	0.0244	16.598	2.010	27.99	0.108	0.892	0.0110	0.474	0.406	1
230	(X21); (3); (8)	1.4 %	0.1	17.79	600	302.7	3.027	7.556	2.496		33,599	0.0230	21.184	5.030	29.59	0.192	0.808	0.0095	0.355	0.466	1
231	(X26); (1.4); (6)	1.6 %	0.0	18.24	600	144.8	1.448	9.880	6.825	22.262	24,142	0.0249	14.363	1.117	24.34	0.072	0.928	0.0110	0.453	0.387	1
232	(X24); (3); (7)	0.0 %	0.1	18.49	600	303.4	3.034	14.910	4.915		34,181	0.0229	20.557	2.103	32.03	0.093	0.907	0.0102	0.400	0.403	1
233	(X30); (2); (5)	0.0 %	0.2	9.07	600	203.0	2.030	22.030	10.855	30.598	21,692	0.0255	12.632	0.388	27.16	0.030	0.970	0.0106	0.303	0.284	1
234	(X27); (2); (8)	0.0 %	0.0	17.74	600	202.6	2.026	15.929	7.860		27,387	0.0241	14.303	0.866	27.93	0.057	0.943	0.0109	0.415	0.331	1
235	(X26); (3); (7)	1.0 %	0.6	17.05	600		3.033	21.134	6.969		32,979	0.0231	18.540	1.180	31.99	0.060	0.940	0.0102	0.380	0.351	1
236	(X30); (3); (6)	1.5 %	0.0	16.06	600	303.5	3.035	33.329	10.983		32,157	0.0233	17.101	0.308	29.80	0.018	0.982	0.0095	0.180	0.310	1
237	(X30); (2); (7)	0.0 %	0.1	19.08	600	202.8	2.028	21.959	10.825		28,305	0.0240	12.353	0.390	26.93	0.031	0.969	0.0106	0.310	0.278	1
238	(X28); (2); (5)	0.6 %	0.1	14.33	600	202.9	2.029	17.910	8.827		25,085	0.0246	13.997	0.564	27.01	0.039	0.961	0.0106	0.315	0.317	1
239	(X29); (3); (7)	1.7 %	0.0	13.09	600	304.0	3.040	30.151	9.919		29,735	0.0237	16.758	0.351	30.29	0.021	0.979	0.0097	0.187	0.304	1
240	(X22); (3); (7)	2.3 %	0.1	12.45	600	302.6	3.026	8.927	2.951		29,220	0.0238	20.649	4.243	31.71	0.170	0.830	0.0101	0.401	0.443	1
241	(X21); (2); (7)	4.0 %	0.5	14.23	600	202.3	2.023	5.051	2.498	29.594	25,019	0.0247	16.593	4.301	26.37	0.206	0.794	0.0103	0.388	0.455	1
242	(X28); (1.4); (6)	0.8 %	0.0	16.36	600	145.0	1.450	12.505	8.624	22.254	23,026	0.0251	12.687	0.676	24.25	0.051	0.949	0.0109	0.406	0.334	1
243	(X25); (3); (7)	0.6 %	0.0	18.04	600	303.3	3.033	17.819	5.876	45.134	33,806	0.0230	19.944	1.617	32.04	0.075	0.925	0.0102	0.395	0.384	1
244	(X23); (3); (7)	0.9 %	0.2	18.93	600	303.2	3.032	12.102	3.992		34,557	0.0229	21.076	2.829	32.06	0.118	0.882	0.0103	0.402	0.425	1
245	(X24); (1.4); (6)	2.1 %	0.0	17.05	600	144.7	1.447	7.070	4.886	21.848	23,435	0.0250	15.148	1.603	24.38	0.096	0.904	0.0110	0.411	0.419	1

N.º	Código	Requisitos		Variables independientes								Variables dependientes								E
		$\%\Delta P_1$	$\Delta T°$	T_{med}	L/D	H_1	H_{real}	H_{real}	h/H	h_{max}	Re	f	Q	q	n	q/Q_T	Q/Q_T	nD/v_c	η	Q_T/v_cD^2	
		%	°C	°C	[ ]	cm	m	[ ]	[ ]	m	[ ]	[ ]	l/min	l/min	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	
246	(X22); (2); (5)	0.8 %	0.1	16.70	600	202.2	2.022	6.049	2.992	29.504	26,679	0.0243	17.108	3.476	27.13	0.169	0.831	0.0106	0.405	0.449	1
247	(X25); (2); (8)	0.0 %	0.4	15.96	600	202.5	2.025	12.045	5.948		26,177	0.0244	16.169	1.392	28.57	0.079	0.921	0.0112	0.426	0.383	1
248	(X28); (3); (7)	1.1 %	0.3	15.22	600	303.6	3.036	26.996	8.893		31,464	0.0234	16.706	0.451	29.31	0.026	0.974	0.0094	0.213	0.305	1
249	(X26); (2); (5)	1.5 %	0.1	13.93	600	202.7	2.027	14.184	6.996	30.103	24,822	0.0247	15.262	1.119	28.63	0.068	0.932	0.0112	0.440	0.357	1
250	(X22); (1.4); (6)	1.2 %	0.0	13.39	600	144.5	1.445	4.158	2.877	22.346	21,301	0.0256	15.424	2.918	22.93	0.159	0.841	0.0103	0.355	0.459	1
251	(X10); (3); (10)	0.0 %	0.1	15.81	400	303.7	3.037	33.072	10.890	36.747	31,953	0.0233	14.518	0.301	43.91	0.020	0.980	0.0140	0.205	0.264	1
252	(X2); (3); (10)	1.2 %	0.0	15.76	400	303.1	3.031	8.931	2.947		31,912	0.0233	19.588	4.335	43.74	0.181	0.819	0.0140	0.431	0.426	1
253	(X6); (2); (8)	0.0 %	0.0	15.66	400	202.6	2.026	13.984	6.902	24.191	25,978	0.0244	13.232	0.907	38.28	0.064	0.936	0.0150	0.404	0.308	1
254	(X9); (1.4); (9)	0.0 %	0.1	15.52	400	144.7	1.447	13.881	9.592	16.944	22,533	0.0253	10.514	0.320	34.02	0.030	0.970	0.0153	0.262	0.271	1
255	(X8); (3); (10)	0.8 %	0.1	15.22	400	303.5	3.035	26.537	8.744		31,464	0.0234	14.723	0.442	44.04	0.029	0.971	0.0141	0.233	0.270	1
256	(X6); (3); (10)	1.0 %	0.1	14.82	400	303.4	3.034	20.922	6.897		31,140	0.0234	16.148	0.915	44.24	0.054	0.946	0.0142	0.334	0.304	1
257	(X5); (1.4); (9)	0.6 %	0.1	14.43	400	144.5	1.445	8.343	5.775	17.145	21,899	0.0254	13.063	1.107	34.90	0.078	0.922	0.0157	0.405	0.355	1
258	(X4); (2); (8)	0.0 %	0.1	14.13	400	202.3	2.023	10.103	4.995	24.083	24,953	0.0247	15.403	1.778	39.67	0.103	0.897	0.0155	0.461	0.374	1
259	(X9); (3); (10)	1.7 %	0.0	13.78	400	303.5	3.035	29.848	9.834		30,294	0.0236	14.947	0.395	44.19	0.026	0.974	0.0141	0.233	0.273	1
260	(X8); (2); (8)	1.2 %	0.0	13.49	400	202.7	2.027	17.857	8.809	24.285	24,528	0.0248	11.800	0.415	38.19	0.034	0.966	0.0150	0.274	0.266	1
261	(X6); (1.4); (9)	1.0 %	0.0	13.29	400	144.6	1.446	9.796	6.776	17.142	21,244	0.0256	12.185	0.817	34.49	0.063	0.937	0.0155	0.387	0.325	1
262	(X1); (2); (9)	0.0 %	0.0	13.09	400	202.1	2.021	4.592	2.272	23.978	24,268	0.0248	15.576	5.089	36.70	0.246	0.754	0.0144	0.416	0.450	1
263	(X8); (1.4); (9)	0.4 %	0.2	15.76	400	144.7	1.447	12.530	8.661	16.842	22,678	0.0252	11.208	0.462	34.00	0.040	0.960	0.0153	0.316	0.292	1
264	(X7); (3); (10)	0.4 %	0.1	13.24	400	303.4	3.034	23.825	7.854		29,855	0.0237	15.130	0.584	42.79	0.037	0.963	0.0137	0.265	0.280	1
265	(X7); (1.4); (9)	0.5 %	0.0	18.04	400	144.7	1.447	11.207	7.748		24,024	0.0249	11.044	0.636	33.92	0.054	0.946	0.0153	0.389	0.292	1
266	(X5); (3); (10)	0.9 %	0.0	17.94	400	302.9	3.029	17.997	5.943	38.088	33,723	0.0230	17.720	1.524	44.81	0.079	0.921	0.0143	0.425	0.342	1
267	(X4); (3); (10)	0.7 %	0.0	17.45	400	302.9	3.029	14.958	4.938		33,309	0.0231	18.467	2.083	44.97	0.101	0.899	0.0144	0.444	0.366	1
268	(X4); (1.4); (9)	0.0 %	0.1	17.10	400	144.3	1.443	7.045	4.881	17.663	23,465	0.0250	13.180	1.599	35.29	0.108	0.892	0.0159	0.471	0.370	1
269	(X1); (3); (10)	1.5 %	0.1	16.70	400	302.3	3.023	6.993	2.313		32,690	0.0232	20.503	5.766	41.28	0.220	0.780	0.0132	0.369	0.467	1
270	(X2); (2); (8)	0.0 %	0.1	16.11	400	202.3	2.023	6.023	2.978	24.499	26,278	0.0244	15.784	3.677	38.35	0.189	0.811	0.0150	0.461	0.424	1
271	(X10); (2); (9)	0.5 %	0.1	15.52	400	202.9	2.029	21.894	10.792		25,878	0.0245	10.641	0.189	38.13	0.017	0.983	0.0149	0.174	0.236	1
272	(X10); (3); (8)	0.9 %	0.0	14.97	400	303.4	3.034	32.813	10.815		31,262	0.0234	14.963	0.299	43.56	0.020	0.980	0.0139	0.196	0.271	1
273	(X3); (1.4); (9)	0.0 %	0.0	14.48	400	144.3	1.443	5.613	3.889	17.553	21,928	0.0254	13.580	2.128	34.77	0.135	0.865	0.0157	0.453	0.393	1

N.º	Código	Requisitos			Variables independientes								Variables dependientes								E
		$\%\Delta P_1$	$\Delta T°$	T_{med}	L/D	H_1	H_{real}	H_{real}	h/H	h_{max}	Re	f	Q	q	n	q/Q_T	Q/Q_T	nD/v_c	η	Q_T/v_cD^2	
		%	°C	°C	[ ]	cm	m	[ ]	[ ]	m	[ ]	[ ]	l/min	l/min	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	
274	(X2); (1.4); (9)	1.2 %	0.2	14.18	400		1.443	4.158	2.881		21,756	0.0255	13.100	3.285	33.53	0.200	0.800	0.0151	0.472	0.410	1
275	(X3); (3); (10)	0.4 %	0.0	13.68	400	302.9	3.029	12.066	3.984		30,214	0.0236	19.606	2.897	44.07	0.129	0.871	0.0141	0.441	0.400	1
276	(X24); (1.4); (9)	0.7 %	0.2	13.78	600	144.6	1.446	7.067	4.887	22.552	21,528	0.0256	15.151	1.817	24.11	0.107	0.893	0.0109	0.466	0.425	1
277	(X21); (3); (10)	1.7 %	0.0	19.53	600	302.0	3.020	7.444	2.465		35,060	0.0228	21.548	5.132	29.34	0.192	0.808	0.0094	0.349	0.475	1
278	(X24); (2); (8)	1.6 %	0.0	16.95	600	202.4	2.024	9.980	4.931	30.220	26,847	0.0243	17.271	2.016	28.52	0.105	0.895	0.0112	0.459	0.420	1
279	(X24); (3); (10)	0.0 %	0.1	14.03	600	303.2	3.032	14.899	4.915		30,495	0.0235	19.925	2.126	32.52	0.096	0.904	0.0104	0.418	0.392	1
280	(X21); (2); (9)	1.0 %	0.1	13.54	600	202.3	2.023	4.923	2.434	30.102	24,561	0.0248	17.156	4.194	26.49	0.196	0.804	0.0104	0.350	0.465	1
281	(X29); (1.4); (9)	2.2 %	0.0	13.09	600	144.9	1.449	14.030	9.685	22.039	21,131	0.0257	12.574	0.507	23.56	0.039	0.961	0.0106	0.350	0.327	1
282	(X25); (3); (10)	0.0 %	0.4	12.69	600		3.035	17.753	5.849		29,418	0.0237	19.413	1.670	32.85	0.079	0.921	0.0105	0.417	0.375	1
283	(X23); (3); (10)	0.0 %	0.1	12.84	600	302.9	3.029	12.040	3.975		29,537	0.0237	20.221	2.819	32.38	0.122	0.878	0.0104	0.415	0.410	1
284	(X26); (1.4); (9)	2.1 %	0.0	12.50	600	144.7	1.447	9.948	6.874	22.650	20,792	0.0258	14.403	1.062	24.35	0.069	0.931	0.0110	0.433	0.387	1
285	(X30); (3); (8)	0.6 %	0.1	12.25	600	303.8	3.038	32.750	10.779	43.870	29,062	0.0238	16.595	0.336	30.66	0.020	0.980	0.0098	0.198	0.301	1
286	(X23); (1.4); (9)	0.9 %	0.0	11.80	600	144.6	1.446	5.586	3.864	22.852	20,397	0.0259	15.260	2.159	23.22	0.124	0.876	0.0105	0.405	0.436	1
287	(X28); (3); (10)	0.4 %	0.0	11.70	600	303.7	3.037	26.984	8.886		28,623	0.0239	16.196	0.480	30.55	0.029	0.971	0.0098	0.234	0.297	1
288	(X29); (3); (10)	0.3 %	0.1	11.34	600	303.6	3.036	30.043	9.895		28,344	0.0239	15.978	0.375	30.36	0.023	0.977	0.0097	0.208	0.291	1
289	(X26); (2); (8)	0.0 %	0.1	14.72	600	202.6	2.026	13.982	6.901		25,348	0.0246	15.412	1.164	28.58	0.070	0.930	0.0112	0.446	0.361	1
290	(X28); (2); (8)	0.0 %	0.2	15.66	600	202.8	2.028	17.760	8.758		25,978	0.0244	13.750	0.570	27.38	0.040	0.960	0.0107	0.322	0.312	1
291	(X22); (1.4); (9)	2.4 %	0.2	16.46	600	144.4	1.444	4.237	2.935	22.255	23,085	0.0251	14.659	3.259	23.02	0.182	0.818	0.0104	0.430	0.448	1
292	(X22); (3); (10)	0.6 %	0.2	13.19	600	302.4	3.024	8.903	2.944	44.385	29,815	0.0237	21.197	4.212	31.57	0.166	0.834	0.0101	0.386	0.452	1
293	(X30); (2); (9)	1.9 %	0.4	16.85	600	202.8	2.028	22.154	10.922		26,780	0.0243	12.566	0.386	27.35	0.030	0.970	0.0107	0.305	0.282	1
294	(X26); (3); (10)	1.9 %	0.0	17.05	600	303.1	3.031	20.827	6.871		32,979	0.0231	19.250	1.201	31.81	0.059	0.941	0.0102	0.366	0.364	1
295	(X27); (3); (10)	0.9 %	0.1	16.90	600	303.4	3.034	23.992	7.907		32,855	0.0232	17.305	0.736	31.09	0.041	0.959	0.0099	0.294	0.321	1
296	(X22); (2); (8)	3.5 %	0.0	16.65	600	202.2	2.022	5.921	2.928	30.116	26,646	0.0243	16.868	3.615	27.26	0.176	0.824	0.0107	0.413	0.446	1
297	(X25); (1.4); (9)	1.2 %	0.1	15.71	600	144.6	1.446	8.268	5.717	22.150	22,649	0.0252	15.249	1.269	24.43	0.077	0.923	0.0110	0.393	0.413	1
298	(X30); (3); (10)	0.6 %	0.1	15.52	600	303.4	3.034	32.254	10.630		31,708	0.0233	17.124	0.314	29.99	0.018	0.982	0.0096	0.176	0.310	1
299	(X28); (1.4); (9)	0.8 %	0.1	14.82	600	144.7	1.447	12.451	8.604	22.147	22,129	0.0254	13.090	0.623	24.13	0.045	0.955	0.0109	0.362	0.343	1
300	(X27); (1.4); (9)	0.9 %	0.1	14.23	600	144.7	1.447	11.276	7.792		21,785	0.0255	13.654	0.773	24.20	0.054	0.946	0.0109	0.384	0.361	1
301	(X23); (1.4); (9)	1.8 %	0.4	15.27	600	144.3	1.443	5.665	3.925	22.046	22,388	0.0253	15.330	2.145	23.45	0.123	0.877	0.0106	0.409	0.437	2

N.º	Código	Requisitos		Variables independientes							Variables dependientes										E
		$\%\Delta P_1$	$\Delta T°$	T_{med}	L/D	H_1	H_{real}	H_{real}	h/H	h_{max}	Re	f	Q	q	n	q/Q_T	Q/Q_T	nD/v_c	η	Q_T/v_cD^2	
		%	°C	°C	[ ]	cm	m	[ ]	[ ]	m	[ ]	[ ]	l/min	l/min	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	
302	(X22); (1.4); (6)	1.2 %	0.4	16.46	600	144.4	1.444	4.211	2.916		23,085	0.0251	15.048	3.085	23.22	0.170	0.830	0.0105	0.393	0.454	2
303	(X23); (2); (8)	1.3 %	0.1	17.50	600	202.2	2.022	8.015	3.963	30.120	27,218	0.0242	17.002	2.566	28.09	0.131	0.869	0.0110	0.447	0.426	2
304	(X27); (2); (8)	0.0 %	0.1	18.68	600	202.7	2.027	16.136	7.959		28,032	0.0240	14.526	0.841	27.88	0.055	0.945	0.0109	0.403	0.335	2
305	(X12); (1.4); (9)	1.2 %	0.2	17.45	500	143.4	1.434	4.161	2.901	19.808	23,670	0.0250	14.276	3.153	27.61	0.181	0.819	0.0124	0.420	0.436	2
306	(X16); (1.4); (9)	2.1 %	0.1	17.30	500	143.7	1.437	9.853	6.858		23,582	0.0250	13.152	0.993	28.96	0.070	0.930	0.0130	0.442	0.354	2
307	(X13); (1.4); (9)	1.9 %	0.1	16.90	500	143.4	1.434	5.564	3.879		23,347	0.0251	14.660	2.132	28.79	0.127	0.873	0.0130	0.419	0.420	2
308	(X13); (2); (8)	3.3 %	0.3	14.33	500	201.8	2.018	7.883	3.907	27.146	25,085	0.0246	17.087	2.604	32.94	0.132	0.868	0.0129	0.443	0.429	2
309	(X12); (2); (5)	0.9 %	0.1	16.41	500	201.5	2.015	5.997	2.977		26,478	0.0243	16.122	3.749	32.00	0.189	0.811	0.0125	0.460	0.433	2
310	(X16); (2); (8)	1.5 %	0.1	15.02	500	201.9	2.019	13.982	6.927		25,546	0.0245	14.438	1.065	33.04	0.069	0.931	0.0130	0.437	0.338	2
311	(X20); (2); (9)	0.5 %	0.1	15.71	500	202.2	2.022	21.895	10.827		26,011	0.0244	11.970	0.371	32.21	0.030	0.970	0.0126	0.305	0.269	2
312	(X20); (2); (1)	0.0 %	0.0	14.97	500	202.2	2.022	21.841	10.803	28.067	25,513	0.0245	11.979	0.376	32.18	0.030	0.970	0.0126	0.307	0.269	2
313	(X18); (1.4); (3)	3.3 %	0.0	13.68	500	143.7	1.437	12.653	8.804	20.510	21,471	0.0256	12.047	0.550	28.16	0.044	0.956	0.0127	0.356	0.315	2
314	(X9); (1.4); (3)	0.0 %	0.0	13.19	400	145.0	1.450	13.775	9.503	17.040	21,187	0.0256	10.575	0.335	33.66	0.031	0.969	0.0152	0.269	0.273	2
315	(X6); (1.4); (9)	0.5 %	0.1	13.04	400	144.6	1.446	9.719	6.720		21,102	0.0257	12.293	0.856	34.10	0.065	0.935	0.0154	0.398	0.329	2
316	(X2); (1.4); (9)	1.2 %	0.1	12.94	400	144.3	1.443	4.209	2.917	17.243	21,046	0.0257	13.451	3.131	33.09	0.189	0.811	0.0149	0.446	0.415	2
317	(X1); (2); (5)	2.2 %	0.1	12.74	400	202.0	2.020	4.540	2.248	23.977	24,041	0.0249	15.355	5.175	36.47	0.252	0.748	0.0143	0.421	0.447	2
318	(X2); (2); (5)	0.0 %	0.0	12.69	400	202.1	2.021	6.020	2.978		24,008	0.0249	15.492	3.780	38.07	0.196	0.804	0.0149	0.483	0.420	2
319	(X7); (2); (8)	0.6 %	0.1	14.62	400	202.2	2.022	15.972	7.900	24.289	25,282	0.0246	12.630	0.601	38.23	0.045	0.955	0.0150	0.329	0.288	2
320	(X10); (2); (5)	0.5 %	0.0	14.48	400	202.9	2.029	22.197	10.941		25,183	0.0246	10.171	0.144	37.96	0.014	0.986	0.0149	0.141	0.225	2
321	(X6); (2); (8)	0.7 %	0.4	15.17	400	202.5	2.025	14.034	6.931	24.189	25,646	0.0245	12.978	0.808	38.76	0.059	0.941	0.0152	0.369	0.300	2
322	(X1); (2); (7)	1.1 %	0.0	14.08	400		2.019	4.669	2.312		24,920	0.0247	16.168	5.049	35.53	0.238	0.762	0.0139	0.410	0.462	2
323	(X18); (3); (10)	0.4 %	0.2	16.16	500	302.6	3.026	27.000	8.924		32,239	0.0233	15.322	0.416	36.35	0.026	0.974	0.0116	0.215	0.280	2
324	(X6); (2); (2)	0.7 %	0.5	14.43	400	202.4	2.024	14.032	6.932	24.289	25,150	0.0246	13.534	0.876	38.46	0.061	0.939	0.0151	0.384	0.314	2
325	(X18); (3); (4)	0.0 %	0.1	12.45	500		3.025	27.037	8.937	39.790	29,220	0.0238	15.100	0.447	36.31	0.029	0.971	0.0116	0.235	0.277	2
326	(X18); (3); (4)	1.5 %	0.0	12.10	500		3.025	26.934	8.903		28,944	0.0238	15.183	0.454	36.52	0.029	0.971	0.0117	0.236	0.278	2
327	(X19); (1.4); (6)	0.8 %	0.1	15.32	500		1.441	13.728	9.528	20.719	22,417	0.0253	11.482	0.512	28.18	0.043	0.957	0.0127	0.380	0.300	2
328	(X11); (2); (5)	0.0 %	0.0	11.09	500		2.012	4.743	2.357	27.543	22,970	0.0252	15.167	5.027	31.26	0.249	0.751	0.0123	0.450	0.440	2
329	(X29); (3); (1)	0.0 %	0.1	14.23	600	302.9	3.029	30.615	10.107		30,656	0.0235	17.736	0.344	30.52	0.019	0.981	0.0098	0.177	0.322	3

N.º	Código	Requisitos			Variables independientes								Variables dependientes								E
		$\%\Delta P_1$	$\Delta T°$	T_{med}	L/D	H_1	H_{real}	H_{real}	h/H	h_{max}	Re	f	Q	q	n	q/Q_T	Q/Q_T	nD/v_c	η	Q_T/v_cD^2	
		%	°C	°C	[ ]	cm	m	[ ]	[ ]	m	[ ]	[ ]	l/min	l/min	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	
330	(X17); (3); (10)	1.7 %	0.0	17.25	500	302.3	3.023	24.095	7.971	42.269	33,144	0.0231	15.777	0.612	36.12	0.037	0.963	0.0116	0.270	0.292	2
331	(X10); (2); (7)	0.9 %	0.0	10.99	400		2.028	22.136	10.916	24.584	22,906	0.0252	11.036	0.147	37.63	0.013	0.987	0.0147	0.132	0.244	2
332	(X9); (2); (8)	1.0 %	0.1	11.44	400		2.027	20.403	10.065	24.279	23,197	0.0251	10.841	0.257	38.90	0.023	0.977	0.0152	0.215	0.242	2
333	(X22); (3); (4)	0.6 %	0.0	19.03	600		3.025	8.911	2.946		34,640	0.0229	21.319	4.071	31.79	0.160	0.840	0.0102	0.372	0.452	2
334	(X30); (2); (5)	0.9 %	0.0	17.94	600	202.7	2.027	22.158	10.929	30.123	27,522	0.0241	12.671	0.374	26.92	0.029	0.971	0.0106	0.293	0.284	2
335	(X30); (2); (7)	0.9 %	0.1	14.72	600	203.1	2.031	22.044	10.854	29.494	25,348	0.0246	12.537	0.396	27.21	0.031	0.969	0.0107	0.312	0.282	2
336	(X21); (3); (10)	2.1 %	0.0	14.28	600	301.9	3.019	7.475	2.476		30,696	0.0235	21.731	5.030	30.11	0.188	0.812	0.0096	0.342	0.476	2
337	(X11); (2); (3)	0.0 %	0.1	17.99	500	201.3	2.013	4.748	2.359	28.387	27,556	0.0241	16.922	4.376	30.81	0.205	0.795	0.0121	0.351	0.464	2
338	(X11); (3); (2)	1.4 %	0.0	19.03	500		3.016	7.251	2.404		34,640	0.0229	20.150	5.433	35.93	0.212	0.788	0.0115	0.379	0.455	2
339	(X17); (3); (10)	0.0 %	0.1	16.21	500	302.4	3.024	23.887	7.899		32,280	0.0232	15.799	0.636	36.64	0.039	0.961	0.0117	0.278	0.292	2
340	(X12); (3); (10)	0.6 %	0.1	12.45	500	301.4	3.014	9.004	2.988		29,220	0.0238	19.843	4.331	36.97	0.179	0.821	0.0118	0.434	0.430	2
341	(X18); (3); (4)	1.2 %	0.1	11.75	500		3.025	26.576	8.784	40.195	28,663	0.0239	14.535	0.468	36.70	0.031	0.969	0.0117	0.251	0.267	2
342	(X5); (3); (7)	2.3 %	0.1	12.35	400		3.032	18.364	6.058	37.953	29,141	0.0238	16.973	1.410	45.84	0.077	0.923	0.0147	0.420	0.327	2
343	(X8); (3); (1)	1.6 %	0.2	17.55	400	303.2	3.032	26.445	8.723	38.085	33,392	0.0231	14.678	0.413	43.60	0.027	0.973	0.0139	0.217	0.268	2
344	(X5); (3); (7)	0.0 %	0.1	14.82	400	303.3	3.033	17.962	5.923		31,140	0.0234	17.960	1.459	44.33	0.075	0.925	0.0142	0.400	0.345	2
345	(X10); (3); (6)	5.6 %	0.0	11.80	400		3.035	33.768	11.126	36.829	28,703	0.0239	14.487	0.281	44.01	0.019	0.981	0.0141	0.196	0.263	3
346	(X10); (3); (6)	3.5 %	0.0	14.67	400		3.035	29.086	9.584		31,019	0.0235	14.434	0.423	45.18	0.028	0.972	0.0145	0.251	0.264	3
347	(X7); (2); (8)	1.2 %	0.0	18.14	400		2.023	16.951	8.377	24.712	27,658	0.0241	12.895	0.538	37.84	0.040	0.960	0.0148	0.308	0.293	3
348	(X1); (2); (7)	1.1 %	0.0	14.08	400		2.019	4.669	2.312		24,920	0.0247	16.168	5.049	35.53	0.238	0.762	0.0139	0.410	0.462	3
349	(X1); (3); (8)	0.0 %	0.1	14.03	400		3.024	6.021	1.991	37.451	30,495	0.0235	18.402	7.242	40.42	0.282	0.718	0.0129	0.390	0.456	3
350	(X2); (1.4); (6)	1.2 %	0.1	11.95	400		1.443	4.361	3.022		20,483	0.0259	14.042	2.909	33.61	0.172	0.828	0.0151	0.419	0.424	3
351	(X11); (3); (4)	0.7 %	0.0	13.09	500		3.016	6.913	2.292	40.099	29,735	0.0237	19.650	5.955	35.37	0.233	0.767	0.0113	0.392	0.455	3
352	(X18); (3); (4)	0.0 %	0.1	12.45	500		3.025	27.037	8.937	39.790	29,220	0.0238	15.100	0.447	36.31	0.029	0.971	0.0116	0.235	0.277	3
353	(X18); (3); (1)	1.2 %	0.0	6.05	500	302.5	3.025	26.871	8.882		24,316	0.0248	15.318	-	36.18			0.0116		-	3
354	(X13); (3); (1)	0.4 %	0.1	12.45	500		3.019	11.963	3.962		29,220	0.0238	-	3.333	38.40			0.0123		-	3
355	(X6); (1.4); (3)	0.5 %	0.1	16.90	400		1.446	9.826	6.796	17.458	23,347	0.0251	12.202		34.77			0.0157		-	3
356	(X2); (1.4); (3)	1.2 %	0.0	12.30	400		1.443	4.157	2.881	17.650	20,680	0.0258	14.427	2.754	33.99	0.160	0.840	0.0153	0.359	0.430	3
357	(X2); (1.4); (3)	1.2 %	0.0	18.04	400		1.443	4.212	2.919	17.053	24,024	0.0249	15.038	2.614	34.43	0.148	0.852	0.0155	0.334	0.442	3

N.º	Código	Requisitos			Variables independientes								Variables dependientes								E
		$\%\Delta P_1$	$\Delta T°$	T_{med}	L/D	H_1	H_{real}	H_{real}	h/H	h_{max}	Re	f	Q	q	n	q/Q_T	Q/Q_T	nD/v_c	η	Q_T/v_cD^2	
		%	°C	°C	[ ]	cm	m	[ ]	[ ]	m	[ ]	[ ]	l/min	l/min	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	
358	(X12); (2); (5)	0.8 %	0.0	18.04	500	201.1	2.011	6.101	3.034	27.775	27,590	0.0241	18.251	3.231	31.84	0.150	0.850	0.0125	0.360	0.468	3
359	(X12); (2); (5)	0.7 %	0.0	17.25	500	201.2	2.012	7.070	3.515	28.179	27,049	0.0242	17.183	2.814	31.99	0.141	0.859	0.0125	0.412	0.436	3
360	(X12); (1.4); (6)	2.4 %	0.0	12.30	500		1.434	4.183	2.916	20.303	20,680	0.0258	15.155	2.849	27.82	0.158	0.842	0.0125	0.360	0.451	3
361	(X14); (1.4); (6)	0.7 %	0.2	17.45	500	143.6	1.436	7.071	4.923	20.318	23,670	0.0250	14.326	1.510	29.03	0.095	0.905	0.0131	0.413	0.396	3
362	(X28); (3); (1)	1.5 %	0.8	16.36	600	302.7	3.027	26.848	8.869	45.427	32,403	0.0232	17.703	0.508	30.23	0.028	0.972	0.0097	0.226	0.324	3
363	(X29); (1.4); (3)	0.7 %	0.0	12.69	600	145.0	1.450	13.927	9.604	22.650	20,905	0.0257	12.787	0.515	23.71	0.039	0.961	0.0107	0.347	0.333	3
364	(X25); (1.4); (3)	3.8 %	0.1	18.58	600	144.4	1.444	8.272	5.728	22.161	24,349	0.0248	15.073	1.223	24.41	0.075	0.925	0.0110	0.384	0.408	3
365	(X6); (3); (1)	0.0 %	0.0	16.65	400	303.3	3.033	20.826	6.866		32,649	0.0232	15.969	0.989	44.34	0.058	0.942	0.0142	0.363	0.302	3
366	(X5); (1.4); (3)	1.2 %	0.1	16.31	400	144.5	1.445	8.371	5.793	17.762	22,997	0.0252	12.423	1.206	34.82	0.089	0.911	0.0157	0.465	0.341	3
367	(X9); (1.4); (3)	0.7 %	0.0	14.77	400	144.9	1.449	13.829	9.546	17.656	22,100	0.0254	10.420	0.398	33.77	0.037	0.963	0.0152	0.326	0.271	3
368	(X3); (2); (5)	0.7 %	0.0	18.63	400		2.020	7.889	3.905	24.306	27,998	0.0240	15.740	2.298	39.38	0.127	0.873	0.0154	0.424	0.393	3
369	(X2); (1.4); (3)	1.2 %	0.0	12.30	400		1.443	4.157	2.881		20,680	0.0258	14.427	2.754	33.99	0.160	0.840	0.0153	0.359	0.430	3
370	(X6); (2); (5)	2.8 %	0.1	17.10	400		2.025	14.702	7.261	24.605	26,948	0.0242	13.518	0.792	37.32	0.055	0.945	0.0146	0.367	0.312	3
371	(X10); (2); (1)	0.9 %	0.0	13.59	400	202.5	2.025	21.939	10.833	24.286	24,593	0.0248	10.635	0.106	38.07	0.010	0.990	0.0149	0.098	0.234	3
372	(X1); (2); (1)	1.1 %	0.2	15.37	400	201.9	2.019	4.567	2.263		25,778	0.0245	15.608	5.034	36.82	0.244	0.756	0.0144	0.407	0.450	3
373	(X14); (2); (7)	0.0 %	0.3	13.93	500	201.3	2.013	10.000	4.968	28.165	24,822	0.0247	16.697	1.903	32.37	0.102	0.898	0.0127	0.452	0.405	3
374	(X13); (1.4); (3)	0.9 %	0.1	18.78	500		1.435	5.643	3.932	21.038	24,468	0.0248	14.268	2.041	29.11	0.125	0.875	0.0131	0.419	0.408	3
375	(X11); (2); (7)	1.1 %	0.1	11.95	500		2.012	4.820	2.396	27.953	23,523	0.0250	16.637	4.284	31.38	0.205	0.795	0.0123	0.359	0.456	3
376	(X12); (1.4); (6)	0.0 %	0.1	16.70	500	143.5	1.435	4.237	2.953		23,231	0.0251	15.418	2.671	28.04	0.148	0.852	0.0126	0.338	0.453	3
377	(X13); (2); (8)	2.6 %	0.2	17.55	500		2.015	8.015	3.978	27.568	27,251	0.0242	16.878	2.401	32.68	0.125	0.875	0.0128	0.424	0.420	3
378	(X14); (1.4); (6)	1.5 %	0.1	16.41	500	143.6	1.436	7.044	4.905	20.621	23,055	0.0251	14.285	1.532	28.65	0.097	0.903	0.0129	0.419	0.396	3
379	(X12); (2); (5)	1.7 %	0.0	17.05	500	201.1	2.011	5.973	2.970		26,914	0.0242	17.184	3.445	31.64	0.167	0.833	0.0124	0.395	0.450	3
380	(X26); (3); (7)	1.9 %	0.0	17.35	600		3.033	20.829	6.868		33,226	0.0231	19.522	1.180	31.93	0.057	0.943	0.0102	0.355	0.368	3
381	(X30); (3); (4)	4.7 %	0.1	7.31	600		3.035	31.869	10.502		25,246	0.0246	15.031	0.377	31.50	0.024	0.976	0.0101	0.238	0.274	3
382	(X7); (3); (10)	1.7 %	0.2	16.46	400	303.7	3.037	23.990	7.899		32,485	0.0232	14.600	0.512	42.82	0.034	0.966	0.0137	0.242	0.269	3
383	(X8); (2); (2)	0.0 %	0.0	17.05	400		2.027	17.969	8.863	24.299	26,914	0.0242	11.828	0.449	38.59	0.037	0.963	0.0151	0.299	0.268	3
384	(X4); (2); (2)	1.0 %	0.1	14.72	400	202.2	2.022	9.951	4.921		25,348	0.0246	14.772	1.805	39.73	0.109	0.891	0.0156	0.479	0.361	3
385	(X24); (2); (8)	1.0 %	0.0	14.28	600	202.5	2.025	9.848	4.864	30.105	25,052	0.0246	17.425	1.944	28.24	0.100	0.900	0.0111	0.431	0.422	3

N.º	Código	Requisitos			Variables independientes								Variables dependientes							E
		$\%\Delta P_1$	$\Delta T°$	T_{med}	L/D	H_1	H_{real}	H_{real}	h/H	h_{max}	Re	f	Q	q	n	q/Q_T	Q/Q_T	nD/v_c	η	Q_T/v_cD^2	
		%	°C	°C	[ ]	cm	m	[ ]	[ ]	m	[ ]	[ ]	l/min	l/min	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	
386	(X26); (2); (8)	0.0 %	0.2	14.18	600	202.6	2.026	14.797	7.304	29.798	24,986	0.0247	15.118	1.041	28.24	0.064	0.936	0.0111	0.434	0.352	3
387	(X17); (3); (10)	0.9 %	0.0	15.27	500	302.6	3.026	22.046	7.286		31,505	0.0234	16.667	0.982	36.94	0.056	0.944	0.0118	0.370	0.314	3

Nota. “E” referido al estado de la prueba: 1 Válido, 2 Adicional, 3 Atípico, 4 Inválido. Nota2: Pruebas atípicas según software estadístico JASP.

18.4 Tabla de observaciones

Tabla 227

Tabla de observaciones

N.º	Observación	Estado
301	Shapiro-wilk, adicional.	Adicional
302	Shapiro-wilk, adicional.	Adicional
303	Shapiro-wilk, adicional.	Adicional
304	Shapiro-wilk, adicional.	Adicional
305	Shapiro-wilk, adicional.	Adicional
306	Shapiro-wilk, adicional.	Adicional
307	Valor atípico según software.	Adicional
308	Shapiro-wilk, adicional.	Adicional
309	Shapiro-wilk, adicional.	Adicional
310	Shapiro-wilk, adicional.	Adicional
311	Shapiro-wilk, adicional.	Adicional
312	Shapiro-wilk, adicional.	Adicional
313	Shapiro-wilk, adicional.	Adicional
314	Shapiro-wilk, adicional.	Adicional
315	Shapiro-wilk, adicional.	Adicional
316	Shapiro-wilk, adicional.	Adicional
317	Shapiro-wilk, adicional.	Adicional
318	Shapiro-wilk, adicional.	Adicional
319	Shapiro-wilk, adicional.	Adicional
320	Shapiro-wilk, adicional.	Adicional
321	Se realizó prueba de ejemplo grabada.	Adicional
322	Prueba adicional validada.	Adicional
323	Prueba adicional validada.	Adicional
324	Prueba adicional validada.	Adicional
325	Prueba adicional validada.	Adicional
326	Prueba adicional validada.	Adicional
327	Prueba adicional validada.	Adicional
328	Prueba adicional validada.	Adicional
329	No se registró la presión inicial.	Invalida
330	Prueba adicional validada.	Adicional
331	Prueba adicional validada.	Adicional
332	Prueba adicional validada.	Adicional
333	Valor atípico según software.	Adicional
334	Valor atípico según software.	Adicional
335	Prueba adicional validada.	Adicional
336	Valor atípico según software.	Adicional
337	Valor atípico según software.	Adicional
338	Prueba adicional validada.	Adicional
339	Prueba adicional validada.	Adicional
340	Valor atípico según software.	Adicional
341	Prueba adicional validada.	Adicional
342	Prueba adicional validada.	Adicional
343	Valor atípico según software.	Adicional

N.º	Observación	Estado
344	Prueba adicional validada.	Adicional
345	No cumple requisitos de prueba. %$\Delta P1$>5%	Invalida
346	Presión de prueba errónea.	Invalida
347	No cumple requisitos de prueba. %h>5%	Invalida
348	Datos duplicados.	Invalida
349	Presión de prueba errónea.	Invalida
350	No cumple requisitos de prueba. %h>3%	Invalida
351	Se cambio de h/H=2 a h/H=2.4	Invalida
352	Datos duplicados.	Invalida
353	No se registró la masa “m1”	Invalida
354	No se registró la masa “m2”	Invalida
355	No se registró tiempo de muestra 2.	Invalida
356	Golpes defectuosos	Invalida
357	Golpes defectuosos	Invalida
358	Golpes defectuosos	Invalida
359	Presión de prueba errónea.	Invalida
360	Golpes defectuosos	Invalida
361	Golpes defectuosos	Invalida
362	Golpes defectuosos	Invalida
363	Golpes defectuosos	Invalida
364	Golpes defectuosos	Invalida
365	No se registró el cronómetro N°2	Invalida
366	Retención del eje vertical por la silicona.	Invalida
367	Retención del eje vertical por la silicona.	Invalida
368	Golpes defectuosos	Invalida
369	Datos duplicados.	Invalida
370	No cumple requisitos de prueba. %h>5%	Invalida
371	Golpes defectuosos	Invalida
372	Golpes defectuosos	Invalida
373	Golpes defectuosos	Invalida
374	Golpes defectuosos	Invalida
375	Golpes defectuosos	Invalida
376	Golpes defectuosos	Invalida
377	Golpes defectuosos	Invalida
378	Golpes defectuosos	Invalida
379	Golpes defectuosos	Invalida
380	Golpes defectuosos	Invalida
381	No cumple requisitos de prueba. %h>3%	Invalida
382	Registro erróneo de manómetro por deterioro.	Invalida
383	Retención del eje vertical por la silicona.	Invalida
384	Datos duplicados.	Invalida
385	No se registró el cronómetro N°2	Invalida
386	Presión de prueba errónea.	Invalida
387	Presión de prueba errónea.	Invalida

Nota. Pruebas atípicas según análisis estadístico en software estadístico JASP.

Anexo 19: Tablas del experimento principal

19.1 Orden aleatorio de pruebas

Tabla 228

Orden aleatorio de pruebas

N.º	N.ºg	Orden	N.ºt	Código	H	Repetición	Aleatorio
1	3	1	1	(2.3, 400)	2	7	0.21183850674424
2	3	1	6	(7, 400)	1.4	6	0.22447106509935
3	3	1	6	(7, 400)	2	5	0.22760081512388
4	3	1	10	(11, 400)	2	5	0.24016403348651
5	3	1	4	(5, 400)	2	5	0.24502603255678
6	3	1	7	(8, 400)	2	8	0.27505018759985
7	3	1	3	(4, 400)	3	7	0.27626438334119
8	3	1	5	(6, 400)	2	8	0.28009424090851
9	3	1	2	(3, 400)	1.4	6	0.28589558636304
10	3	1	10	(11, 400)	2	7	0.31311480456497
11	3	1	9	(10, 400)	3	7	0.33195040852297
12	3	1	10	(11, 400)	3	6	0.34691213082988
13	3	1	1	(2.3, 400)	3	8	0.42628516315017
14	3	1	8	(9, 400)	2	5	0.46718764409889
15	3	1	3	(4, 400)	2	8	0.51603480812628
16	3	1	5	(6, 400)	3	7	0.52055200247560
17	3	1	8	(9, 400)	1.4	6	0.67213762027677
18	3	1	4	(5, 400)	1.4	6	0.67868295393419
19	3	1	4	(5, 400)	3	7	0.68549077061471
20	3	1	7	(8, 400)	3	7	0.70505949168000
21	3	1	2	(3, 400)	2	5	0.71903835155536
22	3	1	9	(10, 400)	2	8	0.76528026780579
23	3	1	8	(9, 400)	3	7	0.81340900121722
24	3	1	2	(3, 400)	3	7	0.96019861346576
25	3	1	6	(7, 400)	3	7	0.98226887814235
26	6	2	11	(2.4, 500)	3	4	0.01273246097844
27	6	2	18	(9, 500)	3	4	0.03140717430506
28	6	2	14	(5, 500)	1.4	3	0.03387598961126
29	6	2	11	(2.4, 500)	2	5	0.05491488624830
30	6	2	11	(2.4, 500)	3	6	0.07887488894630
31	6	2	12	(3, 500)	1.4	3	0.11355308012571
32	6	2	17	(8, 500)	3	4	0.37298022897448
33	6	2	16	(7, 500)	1.4	3	0.43802341481205
34	6	2	13	(4, 500)	2	5	0.44829077890609
35	6	2	17	(8, 500)	2	5	0.48932308435906
36	6	2	15	(6, 500)	1.4	6	0.64138782408554
37	6	2	18	(9, 500)	1.4	3	0.68380989355501
38	6	2	20	(11, 500)	2	3	0.75442542682868
39	6	2	17	(8, 500)	1.4	6	0.78851737582590
40	6	2	16	(7, 500)	3	4	0.81863665103447
41	6	2	14	(5, 500)	3	4	0.84414285828825

N.º	N.ºg	Orden	N.ºt	Código	H	Repetición	Aleatorio
42	6	2	12	(3, 500)	3	4	0.85097807773855
43	6	2	15	(6, 500)	3	4	0.91016409720760
44	6	2	13	(4, 500)	3	4	0.91532852093224
45	6	2	19	(10, 500)	2	5	0.91933901596349
46	6	2	20	(11, 500)	3	4	0.92013676848728
47	6	2	19	(10, 500)	1.4	6	0.95692481438164
48	6	2	19	(10, 500)	3	4	0.97984449740034
49	6	2	15	(6, 500)	2	5	0.98389151657466
50	6	2	13	(4, 500)	1.4	6	0.98394680826459
51	10	3	27	(8, 600)	1.4	6	0.10462692088913
52	10	3	28	(9, 600)	1.4	3	0.12884364195634
53	10	3	24	(5, 600)	1.4	3	0.20446619077120
54	10	3	29	(10, 600)	1.4	6	0.21987938310485
55	10	3	30	(11, 600)	2	3	0.23636532586534
56	10	3	25	(6, 600)	3	4	0.27822708210442
57	10	3	29	(10, 600)	3	4	0.32227202842478
58	10	3	25	(6, 600)	1.4	6	0.32605137734208
59	10	3	30	(11, 600)	3	4	0.33607078844216
60	10	3	22	(3, 600)	1.4	3	0.37590223120060
61	10	3	23	(4, 600)	1.4	6	0.38683937594760
62	10	3	21	(2.5, 600)	3	4	0.39461544773076
63	10	3	26	(7, 600)	1.4	3	0.43700617703144
64	10	3	29	(10, 600)	2	5	0.50980390433688
65	10	3	27	(8, 600)	3	4	0.52738030382898
66	10	3	22	(3, 600)	3	4	0.64775320480112
67	10	3	21	(2.5, 600)	3	6	0.73389632918406
68	10	3	21	(2.5, 600)	2	5	0.73433836398181
69	10	3	24	(5, 600)	3	4	0.82983010343742
70	10	3	26	(7, 600)	3	4	0.82984403229784
71	10	3	27	(8, 600)	2	5	0.88941222906578
72	10	3	23	(4, 600)	2	5	0.91232772136573
73	10	3	28	(9, 600)	3	4	0.97647187358234
74	10	3	23	(4, 600)	3	4	0.98444895993453
75	10	3	25	(6, 600)	2	5	0.98846158140805
76	5	4	12	(3, 500)	3	1	0.02555400074925
77	5	4	17	(8, 500)	2	2	0.04204435728025
78	5	4	18	(9, 500)	3	1	0.05295223195571
79	5	4	15	(6, 500)	2	2	0.06480965076480
80	5	4	12	(3, 500)	2	2	0.09041122009512
81	5	4	16	(7, 500)	2	2	0.11720963066910
82	5	4	20	(11, 500)	2	1	0.12261561385822
83	5	4	11	(2.4, 500)	2	3	0.17513920494821
84	5	4	14	(5, 500)	3	1	0.27943103259895
85	5	4	19	(10, 500)	2	2	0.34691719093826
86	5	4	19	(10, 500)	1.4	3	0.37406709801871
87	5	4	13	(4, 500)	2	2	0.40021246985998
88	5	4	19	(10, 500)	3	1	0.41742357041221
89	5	4	13	(4, 500)	3	1	0.45386164530646

N.º	N.ºg	Orden	N.ºt	Código	H	Repetición	Aleatorio
90	5	4	17	(8, 500)	1.4	3	0.50851767894346
91	5	4	11	(2.4, 500)	2	1	0.55408371810336
92	5	4	17	(8, 500)	3	1	0.56032385432627
93	5	4	16	(7, 500)	3	1	0.58260077971499
94	5	4	15	(6, 500)	1.4	3	0.68153830582742
95	5	4	18	(9, 500)	2	2	0.76596387068275
96	5	4	11	(2.4, 500)	3	2	0.78331167751458
97	5	4	13	(4, 500)	1.4	3	0.88107959704939
98	5	4	20	(11, 500)	3	2	0.93265422491822
99	5	4	15	(6, 500)	3	1	0.93573966145050
100	5	4	14	(5, 500)	2	2	0.99937655276153
101	2	5	7	(8, 400)	1.4	6	0.03936320648063
102	2	5	9	(10, 400)	2	5	0.04258737701457
103	2	5	4	(5, 400)	3	4	0.09569079952780
104	2	5	3	(4, 400)	1.4	6	0.09751195239369
105	2	5	8	(9, 400)	3	4	0.16298626933713
106	2	5	5	(6, 400)	2	5	0.17023728124332
107	2	5	7	(8, 400)	3	4	0.22501267015468
108	2	5	5	(6, 400)	1.4	6	0.22867075854447
109	2	5	9	(10, 400)	3	4	0.23379064595792
110	2	5	1	(2.3, 400)	2	5	0.29838945844676
111	2	5	7	(8, 400)	2	5	0.37972589151468
112	2	5	4	(5, 400)	1.4	3	0.38892989780288
113	2	5	3	(4, 400)	2	5	0.41762739920523
114	2	5	2	(3, 400)	3	4	0.46571557258721
115	2	5	10	(11, 400)	2	3	0.55877864139620
116	2	5	10	(11, 400)	3	4	0.55912339116912
117	2	5	8	(9, 400)	1.4	3	0.56654288701247
118	2	5	2	(3, 400)	1.4	3	0.64882999227848
119	2	5	3	(4, 400)	3	4	0.66391835978720
120	2	5	9	(10, 400)	1.4	6	0.67084815225098
121	2	5	6	(7, 400)	3	4	0.73813221009914
122	2	5	6	(7, 400)	1.4	3	0.77314041031059
123	2	5	1	(2.3, 400)	3	6	0.79383327171672
124	2	5	1	(2.3, 400)	3	4	0.81012430286501
125	2	5	5	(6, 400)	3	4	0.92521545209456
126	7	6	12	(3, 500)	3	7	0.03789370611776
127	7	6	18	(9, 500)	1.4	6	0.07233453041408
128	7	6	19	(10, 500)	2	8	0.07902317692060
129	7	6	16	(7, 500)	2	5	0.08892624091823
130	7	6	11	(2.4, 500)	2	7	0.11341431003530
131	7	6	19	(10, 500)	3	7	0.11842976778280
132	7	6	17	(8, 500)	2	8	0.19373182894196
133	7	6	16	(7, 500)	3	7	0.25476701848675
134	7	6	15	(6, 500)	2	7	0.27631518628914
135	7	6	18	(9, 500)	3	7	0.29243122681510
136	7	6	14	(5, 500)	2	7	0.36169046058785
137	7	6	17	(8, 500)	3	7	0.36957144399639

N.º	N.ºg	Orden	N.ºt	Código	H	Repetición	Aleatorio
138	7	6	20	(11, 500)	2	7	0.42042800772470
139	7	6	16	(7, 500)	1.4	6	0.42296937073115
140	7	6	13	(4, 500)	3	7	0.59731362003367
141	7	6	11	(2.4, 500)	3	8	0.68899477168452
142	7	6	12	(3, 500)	1.4	6	0.70698817574885
143	7	6	15	(6, 500)	3	8	0.74805608193856
144	7	6	13	(4, 500)	2	8	0.75713470147457
145	7	6	14	(5, 500)	3	5	0.80036407255102
146	7	6	12	(3, 500)	2	5	0.88957493158523
147	7	6	18	(9, 500)	2	5	0.89865119650494
148	7	6	20	(11, 500)	3	6	0.91165919450577
149	7	6	20	(11, 500)	2	5	0.98754784942139
150	7	6	14	(5, 500)	1.4	6	0.99028562300373
151	9	7	23	(4, 600)	2	2	0.02398427988857
152	9	7	28	(9, 600)	3	1	0.03901914767993
153	9	7	21	(2.5, 600)	3	2	0.13444976832652
154	9	7	24	(5, 600)	2	2	0.24728717381047
155	9	7	29	(10, 600)	1.4	3	0.24884656820252
156	9	7	29	(10, 600)	2	2	0.32289618487437
157	9	7	30	(11, 600)	3	2	0.40667593307979
158	9	7	29	(10, 600)	3	1	0.51645579614659
159	9	7	21	(2.5, 600)	2	1	0.51660260990781
160	9	7	21	(6, 600)	1.4	3	0.52488662159863
161	9	7	25	(2.5, 600)	2	3	0.56613974643801
162	9	7	30	(11, 600)	2	1	0.60480027700209
163	9	7	25	(6, 600)	3	1	0.61231948945671
164	9	7	23	(4, 600)	3	1	0.64593482380784
165	9	7	28	(9, 600)	2	2	0.64960437290407
166	9	7	24	(5, 600)	3	1	0.70438738502007
167	9	7	23	(4, 600)	1.4	3	0.73112724059654
168	9	7	27	(8, 600)	3	1	0.78604704429926
169	9	7	27	(8, 600)	1.4	3	0.81183953128000
170	9	7	26	(7, 600)	2	2	0.83273085236689
171	9	7	27	(8, 600)	2	2	0.84381086766234
172	9	7	25	(6, 600)	2	2	0.87309518211128
173	9	7	22	(3, 600)	3	1	0.88140207789007
174	9	7	22	(3, 600)	2	2	0.90334088537766
175	9	7	26	(7, 600)	3	1	0.91138140744762
176	1	8	7	(8, 400)	2	2	0.01364927465526
177	1	8	8	(9, 400)	3	1	0.03148831665052
178	1	8	3	(4, 400)	1.4	3	0.14390235082527
179	1	8	4	(5, 400)	3	1	0.15592002583859
180	1	8	9	(10, 400)	2	2	0.23103734930726
181	1	8	8	(9, 400)	2	2	0.30529982149910
182	1	8	6	(7, 400)	3	1	0.31833977565514
183	1	8	3	(4, 400)	3	1	0.43327700812119
184	1	8	5	(6, 400)	1.4	3	0.47791476637855
185	1	8	9	(10, 400)	3	1	0.49364454039910

N.º	N.ºg	Orden	N.ºt	Código	H	Repetición	Aleatorio
186	1	8	9	(10, 400)	1.4	3	0.59095009894916
187	1	8	2	(3, 400)	2	2	0.61171607989812
188	1	8	1	(2.3, 400)	3	2	0.70773112244511
189	1	8	10	(11, 400)	2	1	0.72818449146911
190	1	8	6	(7, 400)	2	2	0.73020677801728
191	1	8	1	(2.3, 400)	2	1	0.73043862785384
192	1	8	5	(6, 400)	3	1	0.73443582792399
193	1	8	1	(2.3, 400)	2	3	0.74782364311797
194	1	8	2	(3, 400)	3	1	0.75618079147457
195	1	8	4	(5, 400)	2	2	0.81141266421160
196	1	8	7	(8, 400)	1.4	3	0.89087873279775
197	1	8	7	(8, 400)	3	1	0.93019955141599
198	1	8	3	(4, 400)	2	2	0.93212700025860
199	1	8	5	(6, 400)	2	2	0.96381048243193
200	1	8	10	(11, 400)	3	2	0.97768881433967
201	8	9	14	(5, 500)	2	8	0.00613516115118
202	8	9	18	(9, 500)	2	8	0.03171031072270
203	8	9	11	(2.4, 500)	2	9	0.09249214211013
204	8	9	17	(8, 500)	3	10	0.22577353066299
205	8	9	13	(4, 500)	1.4	9	0.32256571610924
206	8	9	18	(9, 500)	3	10	0.39108339452650
207	8	9	18	(9, 500)	1.4	9	0.46019298827741
208	8	9	15	(6, 500)	3	10	0.48940783424769
209	8	9	19	(10, 500)	1.4	9	0.55210154026281
210	8	9	12	(3, 500)	3	10	0.58883696387056
211	8	9	16	(7, 500)	3	10	0.63267491117585
212	8	9	15	(6, 500)	1.4	9	0.64634038589429
213	8	9	19	(10, 500)	3	10	0.65959324047435
214	8	9	20	(11, 500)	3	10	0.69986821885686
215	8	9	13	(4, 500)	3	10	0.72918324882630
216	8	9	17	(8, 500)	1.4	9	0.74024768185336
217	8	9	20	(11, 500)	2	9	0.76431470771786
218	8	9	20	(11, 500)	3	8	0.77162111515645
219	8	9	11	(2.4, 500)	3	10	0.79115741525311
220	8	9	16	(7, 500)	1.4	9	0.82854919799138
221	8	9	16	(7, 500)	2	8	0.85286581295077
222	8	9	14	(5, 500)	3	10	0.86521207017358
223	8	9	14	(5, 500)	1.4	9	0.90203514427412
224	8	9	12	(3, 500)	2	8	0.96569585159887
225	8	9	12	(3, 500)	1.4	9	0.98749295680318
226	11	10	27	(8, 600)	3	7	0.01494268390850
227	11	10	23	(4, 600)	2	8	0.04779929869649
228	11	10	29	(10, 600)	2	8	0.07219053347216
229	11	10	24	(5, 600)	2	5	0.09292063594199
230	11	10	21	(2.5, 600)	3	8	0.14752716480553
231	11	10	26	(7, 600)	1.4	6	0.25513697366481
232	11	10	24	(5, 600)	3	7	0.34162622081942
233	11	10	30	(11, 600)	2	5	0.39466125836468

N.º	N.ºg	Orden	N.ºt	Código	H	Repetición	Aleatorio
234	11	10	27	(8, 600)	2	8	0.46638883259692
235	11	10	26	(7, 600)	3	7	0.50684235244755
236	11	10	30	(11, 600)	3	6	0.53994569369439
237	11	10	30	(11, 600)	2	7	0.57528056258421
238	11	10	28	(9, 600)	2	5	0.57965089361021
239	11	10	29	(10, 600)	3	7	0.61275503544706
240	11	10	22	(3, 600)	3	7	0.68017093585862
241	11	10	21	(2.5, 600)	2	7	0.68220668150520
242	11	10	28	(9, 600)	1.4	6	0.69417370890861
243	11	10	25	(6, 600)	3	7	0.75044893318935
244	11	10	23	(4, 600)	3	7	0.82778937895803
245	11	10	24	(5, 600)	1.4	6	0.84663986886079
246	11	10	22	(3, 600)	2	5	0.88394434305751
247	11	10	25	(6, 600)	2	8	0.91610724365185
248	11	10	28	(9, 600)	3	7	0.92607614375700
249	11	10	26	(7, 600)	2	5	0.95902748686998
250	11	10	22	(3, 600)	1.4	6	0.97113700798452
251	4	11	10	(11, 400)	3	10	0.14452048759772
252	4	11	2	(3, 400)	3	10	0.16349070027125
253	4	11	6	(7, 400)	2	8	0.16690072829398
254	4	11	9	(10, 400)	1.4	9	0.21055052135202
255	4	11	8	(9, 400)	3	10	0.23178519605869
256	4	11	6	(7, 400)	3	10	0.37806229088161
257	4	11	5	(6, 400)	1.4	9	0.38704946574493
258	4	11	4	(5, 400)	2	8	0.41057263955027
259	4	11	9	(10, 400)	3	10	0.43363157269670
260	4	11	8	(9, 400)	2	8	0.45967561118830
261	4	11	6	(7, 400)	1.4	9	0.50746518757005
262	4	11	1	(2.3, 400)	2	9	0.58776955940802
263	4	11	8	(9, 400)	1.4	9	0.64163297056084
264	4	11	7	(8, 400)	3	10	0.65392333866060
265	4	11	7	(8, 400)	1.4	9	0.67584651052934
266	4	11	5	(6, 400)	3	10	0.78513170140013
267	4	11	4	(5, 400)	3	10	0.80282346075006
268	4	11	4	(5, 400)	1.4	9	0.83103134629942
269	4	11	1	(2.3, 400)	3	10	0.84165136873109
270	4	11	2	(3, 400)	2	8	0.84206185812531
271	4	11	10	(11, 400)	2	9	0.85973033464264
272	4	11	10	(11, 400)	3	8	0.86317040864557
273	4	11	3	(4, 400)	1.4	9	0.87180592590753
274	4	11	2	(3, 400)	1.4	9	0.88485658428406
275	4	11	3	(4, 400)	3	10	0.98332827507688
276	12	12	24	(5, 600)	1.4	9	0.04029300657860
277	12	12	21	(2.5, 600)	3	10	0.10303134658795
278	12	12	24	(5, 600)	2	8	0.11652294468878
279	12	12	24	(5, 600)	3	10	0.12597899240336
280	12	12	21	(2.5, 600)	2	9	0.14307382813532
281	12	12	29	(10, 600)	1.4	9	0.15829658890863

N.º	N.ºg	Orden	N.ºt	Código	H	Repetición	Aleatorio
282	12	12	25	(6, 600)	3	10	0.18440759910105
283	12	12	23	(4, 600)	3	10	0.29893616973536
284	12	12	26	(7, 600)	1.4	9	0.34933492269365
285	12	12	30	(11, 600)	3	8	0.36496038043659
286	12	12	23	(4, 600)	1.4	9	0.38406077904018
287	12	12	28	(9, 600)	3	10	0.38728471447603
288	12	12	29	(10, 600)	3	10	0.39701286081547
289	12	12	26	(7, 600)	2	8	0.42318925347161
290	12	12	28	(9, 600)	2	8	0.43545521923025
291	12	12	22	(3, 600)	1.4	9	0.44850863151913
292	12	12	22	(3, 600)	3	10	0.45847706258878
293	12	12	30	(11, 600)	2	9	0.59340132551310
294	12	12	26	(7, 600)	3	10	0.60420234113409
295	12	12	27	(8, 600)	3	10	0.66416782572418
296	12	12	22	(3, 600)	2	8	0.73911135589724
297	12	12	25	(6, 600)	1.4	9	0.75572668275913
298	12	12	30	(11, 600)	3	10	0.87544494889547
299	12	12	28	(9, 600)	1.4	9	0.94730661670026
300	12	12	27	(8, 600)	1.4	9	0.95838538194910
301	12	12	23	(4, 600)	1.4	9	0.38406077904018
302	11	10	22	(3, 600)	1.4	6	0.97113700798452
303	11	10	23	(4, 600)	2	8	0.04779929869649
304	11	10	27	(8, 600)	2	8	0.46638883259692
305	8	9	12	(3, 500)	1.4	9	0.98749295680318
306	8	9	16	(7, 500)	1.4	9	0.82854919799138
307	8	9	13	(4, 500)	1.4	9	0.32256571610924
308	7	6	13	(4, 500)	2	8	0.75713470147457
309	7	6	12	(3, 500)	2	5	0.88957493158523
310	8	9	16	(7, 500)	2	8	0.85286581295077
311	8	9	20	(11, 500)	2	9	0.76431470771786
312	5	4	20	(11, 500)	2	1	0.12261561385822
313	6	2	18	(9, 500)	1.4	3	0.68380989355501
314	1	8	9	(10, 400)	1.4	3	0.59095009894916
315	4	11	6	(7, 400)	1.4	9	0.50746518757005
316	4	11	2	(3, 400)	1.4	9	0.88485658428406
317	2	5	1	(2.3, 400)	2	5	0.29838945844676
318	3	1	2	(3, 400)	2	5	0.71903835155536
319	3	1	7	(8, 400)	2	8	0.27505018759985
320	3	1	10	(11, 400)	2	5	0.24016403348651
321	4	11	6	(7, 400)	2	8	0.16690072829398
322	3	1	1	(2.3, 400)	2	7	0.21183850674424
323	8	9	18	(9, 500)	3	10	0.39108339452650
324	1	8	6	(7, 400)	2	2	0.73020677801728
325	6	2	18	(9, 500)	3	4	0.03140717430506
326	6	2	18	(9, 500)	3	4	0.03140717430506
327	6	2	19	(10, 500)	1.4	6	0.95692481438164
328	6	2	11	(2.4, 500)	2	5	0.05491488624830
329	9	7	29	(10, 600)	3	1	0.51645579614659

N.º	N.ºg	Orden	N.ºt	Código	H	Repetición	Aleatorio
330	8	9	17	(8, 500)	3	10	0.22577353066299
331	3	1	10	(11, 400)	2	7	0.31311480456497
332	3	1	9	(10, 400)	2	8	0.76528026780579
333	10	3	22	(3, 600)	3	4	0.64775320480112
334	11	10	30	(11, 600)	2	5	0.39466125836468
335	11	10	30	(11, 600)	2	7	0.57528056258421
336	12	12	21	(2.5, 600)	3	10	0.10303134658795
337	5	4	11	(2.4, 500)	2	3	0.17513920494821
338	5	4	11	(2.4, 500)	3	2	0.78331167751458
339	8	9	17	(8, 500)	3	10	0.22577353066299
340	8	9	12	(3, 500)	3	10	0.58883696387056
341	6	2	18	(9, 500)	3	4	0.03140717430506
342	3	1	5	(6, 400)	3	7	0.52055200247560
343	1	8	8	(9, 400)	3	1	0.03148831665052
344	3	1	5	(6, 400)	3	7	0.52055200247560
345	3	1	10	(11, 400)	3	6	0.34691213082988
346	3	1	10	(11, 400)	3	6	0.34691213082988
347	3	1	7	(8, 400)	2	8	0.27505018759985
348	3	1	1	(2.3, 400)	2	7	0.21183850674424
349	3	1	1	(2.3, 400)	3	8	0.42628516315017
350	3	1	2	(3, 400)	1.4	6	0.28589558636304
351	6	2	11	(2.4, 500)	3	4	0.01273246097844
352	6	2	18	(9, 500)	3	4	0.03140717430506
353	5	4	18	(9, 500)	3	1	0.05295223195571
354	5	4	13	(4, 500)	3	1	0.45386164530646
355	2	5	6	(7, 400)	1.4	3	0.77314041031059
356	2	5	2	(3, 400)	1.4	3	0.64882999227848
357	2	5	2	(3, 400)	1.4	3	0.64882999227848
358	7	6	12	(3, 500)	2	5	0.88957493158523
359	7	6	12	(3, 500)	2	5	0.88957493158523
360	7	6	12	(3, 500)	1.4	6	0.70698817574885
361	7	6	14	(5, 500)	1.4	6	0.99028562300373
362	9	7	28	(9, 600)	3	1	0.03901914767993
363	9	7	29	(10, 600)	1.4	3	0.24884656820252
364	9	7	21	(6, 600)	1.4	3	0.52488662159863
365	1	8	6	(7, 400)	3	1	0.31833977565514
366	1	8	5	(6, 400)	1.4	3	0.47791476637855
367	1	8	9	(10, 400)	1.4	3	0.59095009894916
368	2	5	3	(4, 400)	2	5	0.41762739920523
369	2	5	2	(3, 400)	1.4	3	0.64882999227848
370	3	1	6	(7, 400)	2	5	0.22760081512388
371	1	8	10	(11, 400)	2	1	0.72818449146911
372	1	8	1	(2.3, 400)	2	1	0.73043862785384
373	7	6	14	(5, 500)	2	7	0.36169046058785
374	5	4	13	(4, 500)	1.4	3	0.88107959704939
375	7	6	11	(2.4, 500)	2	7	0.11341431003530
376	7	6	12	(3, 500)	1.4	6	0.70698817574885
377	7	6	13	(4, 500)	2	8	0.75713470147457

N.º	N.ºg	Orden	N.ºt	Código	H	Repetición	Aleatorio
378	7	6	14	(5, 500)	1.4	6	0.99028562300373
379	7	6	12	(3, 500)	2	5	0.88957493158523
380	11	10	26	(7, 600)	3	7	0.50684235244755
381	10	3	30	(11, 600)	3	4	0.33607078844216
382	4	11	7	(8, 400)	3	10	0.65392333866060
383	1	8	8	(9, 400)	2	2	0.30529982149910
384	1	8	4	(5, 400)	2	2	0.81141266421160
385	12	12	24	(5, 600)	2	8	0.11652294468878
386	12	12	26	(7, 600)	2	8	0.42318925347161
387	8	9	17	(8, 500)	3	10	0.22577353066299

19.2 Tabla de datos

Tabla 229

Tabla de datos

N.º	Código prueba	Fecha	Ti	Tf	t1	t1	t2	t2	M1	M2	W1	W2	P1i	P1f	$P1i_{min}$	$P1f_{min}$	P_{max}	t_{n1}	t_{n1}	n1	t_{n2}	t_{n2}	n2	H_{min}	H_{max}	N_{min}	E
			°C	°C	min	s	min	s	kg	kg	kg	kg	Bar	Bar	Bar	Bar	Bar	min	s	[ ]	min	s	[ ]	cm	cm	cm	
			1	2	3	4	5	6	7	7	8	8	9	10	11	12	13	14	15	16	14	15	16	17	18	19	20
1	(X1); (2); (7)	26/08/22	11.2	11.1	1	0.35	1	1.32	5.086	16.533	0.772	0.298	0.45	0.46			2.41	1	1.22	39	1	0.34	38				1
2	(X6); (1.4); (6)	07/08/22	15.0	15.2	1	0.37	1	0.09	0.849	13.486	0.767	0.082	0.95	0.98				1	0.97	36	1	0.97	36				1
3	(X6); (2); (5)	07/09/22	19.1	19.2	1	0.31	1	0.37	0.996	13.964	0.769	0.080	1.36	1.35			2.38	1	0.10	40	1	0.41	40	113.3	112.3		1
4	(X10); (2); (5)	07/08/22	17.3	17.6	1	0.56	1	0.69	0.309	12.464	0.779	0.083	2.18	2.21			2.42	1	1.19	39	1	0.91	39				1
5	(X4); (2); (5)	07/08/22	17.8	17.7	1	0.44	1	0.31	2.095	16.840	0.772	0.296	0.98	0.98			2.40	1	0.09	40	1	0.31	40				1
6	(X7); (2); (8)	12/08/22	10.8	10.7	1	0.44	1	0.62	0.664	13.469	0.771	0.081	1.59	1.58			2.38	1	0.66	40	1	0.09	40				1
7	(X3); (3); (7)	08/08/22	13.6	13.5	1	0.84	1	0.31	3.060	20.178	0.778	0.296	1.18	1.23			3.60	0	59.38	46	1	1.32	47				1
8	(X5); (2); (8)	08/08/22	13.0	12.9	1	0.41	1	0.59	1.580	15.637	0.778	0.300	1.18	1.18			2.43	1	0.97	40	1	0.41	40				1
9	(X2); (1.4); (6)	13/08/22	15.7	15.6	1	0.78	1	1.03	3.515	14.150	0.769	0.298	0.42	0.42			1.69	1	0.19	35	1	2.22	36				1
10	(X10); (2); (7)	20/09/22	12.9	12.9	1	0.97	1	0.37	0.257	11.313	0.767	0.081	2.17	2.15	2.16	2.14	2.41	1	0.19	39	0	59.66	39	112.6	111.7		1
11	(X9); (3); (7)	09/08/22	11.8	11.8	1	0.53	1	0.28	0.494	15.620	0.769	0.082	2.9	2.96			3.60	1	0.81	46	1	0.66	46				1
12	(X10); (3); (6)	12/08/22	11.6	11.5	1	0.53	1	0.47	0.417	15.378	0.771	0.082	3.21	3.18			3.72	1	1.03	46	1	0.40	46				1
13	(X1); (3); (8)	13/08/22	16.6	16.5	0	59.94	1	0.09	6.212	20.512	0.772	0.300	0.69	0.69			3.65	1	0.90	44	1	0.87	44				1
14	(X8); (2); (5)	10/08/22	12.9	12.9	1	0.50	1	0.63	0.515	13.192	0.770	0.081	1.74	1.8				1	0.44	40	1	0.75	40				1
15	(X3); (2); (8)	10/08/22	12.6	12.6	1	0.75	1	1.16	2.815	16.451	0.779	0.297	0.8	0.78			2.39	1	1.31	41	1	1.31	41				1
16	(X5); (3); (7)	26/09/22	12.3	12.2	0	59.56	1	0.28	1.581	18.694	0.768	0.080	1.75	1.75	1.72	1.74		1	0.22	45	1	0.41	45	12.5	11.1	315.4	1
17	(X8); (1.4); (6)	11/08/22	12.6	12.6	1	0.68	1	0.31	0.564	11.865	0.772	0.081	1.23	1.22			1.72	1	0.00	35	1	0.15	35				1
18	(X4); (1.4); (6)	11/08/22	12.6	12.6	1	0.50	1	0.19	1.656	14.165	0.774	0.081	0.7	0.69			1.73	1	0.25	36	1	0.31	36				1
19	(X4); (3); (7)	11/08/22	12.4	12.4	1	0.43	1	0.41	2.351	18.688	0.771	0.296	1.45	1.46			3.69	1	0.82	48	1	0.31	48				1

N.º	Código prueba	Fecha	Ti	Tf	t1	t1	t2	t2	M1	M2	W1	W2	P1i	P1f	$P1i_{min}$	$P1f_{min}$	P_{max}	t_{n1}	t_{n1}	n1	t_{n2}	t_{n2}	n2	H_{min}	H_{max}	N_{min}	E
			°C	°C	min	s	min	s	kg	kg	kg	kg	Bar	Bar	Bar	Bar	Bar	min	s	[ ]	min	s	[ ]	cm	cm	cm	
20	(X7); (3); (7)	11/08/22	12.2	12.1	1	0.53	1	0.31	0.617	14.559	0.775	0.080	2.37	2.38			3.65	1	0.25	46	1	0.50	46				1
21	(X2); (2); (5)	11/08/22	11.6	11.5	1	1.78	1	0.68	4.126	16.966	0.786	0.298	0.59	0.59			2.38	1	0.90	40	0	59.44	39				1
22	(X9); (2); (8)	20/09/22	12.9	13.0	1	0.50	1	0.34	0.414	12.281	0.771	0.081	1.94	1.93	1.93	1.93		0	59.88	39	0	59.66	39	112.6	111.8		1
23	(X8); (3); (7)	12/08/22	13.3	13.1	1	0.68	1	1.75	0.548	15.539	0.772	0.081	2.63	2.62			3.66	0	59.90	45	0	59.93	45				1
24	(X2); (3); (7)	12/08/22	12.6	12.6	0	50.50	1	0.97	4.760	17.617	0.772	0.299	0.89	0.88			3.66	1	1.00	45	1	0.78	45				1
25	(X6); (3); (7)	12/08/22	12.1	12.0	1	0.50	1	0.75	1.303	18.180	0.772	0.300	2.03	2.04			3.72	1	0.91	46	0	59.94	45				1
26	(X11); (3); (4)	19/08/22	11.9	11.9	1	0.56	1	0.87	5.919	20.189	0.772	0.298	0.7	0.71			3.95	1	0.94	38	1	0.53	38				1
27	(X18); (3); (4)	24/09/22	15.5	15.5	1	0.31	1	0.25	0.513	16.584	0.770	0.081	2.6	2.65	2.56	2.61	4.07	1	0.32	37	1	0.28	37	13.3	11.3		1
28	(X14); (1.4); (3)	14/08/22	11.3	11.3	1	0.47	1	0.63	1.820	14.937	0.771	0.081	0.69	0.7			2.01	1	0.16	30	1	16.75	38				1
29	(X11); (2); (5)	20/08/22	17.0	17.0	1	0.63	1	0.22	4.849	16.665	0.768	0.298	0.47	0.47			2.65	0	59.75	32	1	1.31	33				1
30	(X11); (3); (6)	17/08/22	13.7	13.6	1	0.07	1	0.85	5.832	19.995	0.770	0.298	0.72	0.71			3.90	1	0.87	38	1	1.75	39				1
31	(X12); (1.4); (3)	17/08/22	13.2	13.2	1	0.72	1	1.32	3.380	15.029	0.770	0.298	0.42	0.42			2.04	1	0.31	29	1	2.69	30				1
32	(X17); (3); (4)	17/08/22	12.5	12.5	1	0.68	1	0.75	0.842	16.154	0.782	0.082	2.36	2.38			3.90	1	0.16	39	1	0.04	39				1
33	(X16); (1.4); (3)	17/08/22	11.8	11.7	1	0.41	1	0.53	1.061	13.855	0.772	0.081	0.96	0.97			2.02	1	0.29	30	1	0.63	30				1
34	(X13); (2); (5)	17/08/22	11.3	11.3	1	0.66	1	1.97	2.986	17.170	0.773	0.296	0.79	0.78			2.77	0	59.84	34	0	59.93	34				1
35	(X17); (2); (5)	17/08/22	10.8	10.7	1	0.84	1	0.56	0.822	14.716	0.774	0.083	1.56	1.57			2.75	1	0.75	34	1	0.87	34				1
36	(X15); (1.4); (6)	18/08/22	16.1	16.5	1	3.65	1	0.34	1.348	15.128	0.767	0.080	0.82	0.83			2.06	1	1.50	31	1	1.69	31				1
37	(X18); (1.4); (3)	18/08/22	18.3	18.2	1	0.41	1	0.41	0.714	12.724	0.769	0.080	1.22	1.22			2.05	1	0.84	30	1	0.97	30				1
38	(X20); (2); (3)	18/08/22	16.8	16.7	1	1.37	1	0.56	0.475	13.357	0.768	0.081	2.14	2.14			2.69	1	0.75	34	1	1.32	34				1
39	(X17); (1.4); (6)	18/08/22	15.9	15.9	1	0.56	1	0.00	0.841	12.963	0.769	0.081	1.1	1.1				1	1.00	30	1	1.19	30				1
40	(X16); (3); (4)	18/08/22	15.3	15.2	1	0.60	1	0.25	1.256	18.366	0.783	0.082	2.06	2.06			3.89	1	0.03	39	1	0.72	39				1
41	(X14); (3); (4)	18/08/22	14.4	14.3	1	0.03	1	0.19	2.562	19.634	0.775	0.302	1.47	1.47			3.94	0	59.47	39	1	1.10	40				1
42	(X12); (3); (4)	18/08/22	13.3	13.3	1	0.21	1	0.28	4.561	20.623	0.771	0.298	0.88	0.88			3.93	0	59.78	38	1	2.87	40				1
43	(X15); (3); (4)	18/08/22	12.6	12.5	1	0.50	1	1.28	1.974	19.368	0.773	0.299	1.77	1.78			3.82	1	0.40	40	1	0.59	40				1
44	(X13); (3); (4)	18/08/22	12.1	12.0	1	0.46	1	0.56	3.384	20.352	0.775	0.299	1.17	1.18			3.94	0	59.94	39	1	0.97	40				1

N.º	Código prueba	Fecha	Ti	Tf	t1	t1	t2	t2	M1	M2	W1	W2	P1i	P1f	$P1i_{min}$	$P1f_{min}$	P_{max}	t_{n1}	t_{n1}	n1	t_{n2}	t_{n2}	n2	H_{min}	H_{max}	N_{min}	E
			°C	°C	min	s	min	s	kg	kg	kg	kg	Bar	Bar	Bar	Bar	Bar	min	s	[ ]	min	s	[ ]	cm	cm	cm	
45	(X19); (2); (5)	19/08/22	12.8	13.0	1	0.28	1	0.82	0.537	13.316	0.770	0.081	1.96	1.98			2.74	1	0.72	34	1	0.97	34				1
46	(X20); (3); (4)	19/08/22	13.5	13.8	1	0.66	1	0.41	0.440	16.464	0.770	0.081	3.25	3.24			3.89	0	59.59	38	0	59.97	38				1
47	(X19); (1.4); (6)	19/08/22	15.6	15.8	1	0.60	0	59.96	0.583	12.144	0.768	0.081	1.36	1.37			2.02	0	59.44	29	0	59.62	29				1
48	(X19); (3); (4)	20/08/22	16.7	16.9	1	2.41	1	0.66	0.469	16.526	0.775	0.081	2.95	2.83			3.90	1	0.22	38	1	0.53	38				1
49	(X15); (2); (5)	19/08/22	12.2	12.3	1	0.54	1	1.10	1.827	16.405	0.768	0.299	1.17	1.17			2.68	1	1.50	35	0	59.72	34				1
50	(X13); (1.4); (6)	19/08/22	12.2	12.2	1	0.37	1	0.19	2.470	14.933	0.770	0.298	0.55	0.55			1.98	0	59.69	29	1	1.88	30				1
51	(X27); (1.4); (6)	22/08/22	7.5	7.5	1	1.19	1	6.28	1.031	14.356	0.782	0.082	1.09	1.11			2.30	0	59.60	25	1	1.97	26				1
52	(X28); (1.4); (3)	21/08/22	18.9	18.9	1	0.78	1	0.78	0.783	13.388	0.768	0.080	1.22	1.24			2.15	1	1.28	26	1	1.65	26				1
53	(X24); (1.4); (3)	21/08/22	18.8	18.7	1	1.37	1	0.41	1.968	15.726	0.769	0.300	0.69	0.7			2.17	1	1.88	26	0	59.25	25				1
54	(X29); (1.4); (6)	21/08/22	18.6	18.6	1	0.68	0	59.81	0.648	13.112	0.769	0.080	1.37	1.36			2.18	0	59.28	25	0	59.09	25				1
55	(X30); (2); (3)	21/08/22	16.4	16.5	1	0.54	1	0.15	0.482	13.777	0.769	0.082	2.17	2.16			3.05	1	1.72	29	1	1.88	29				1
56	(X25); (3); (4)	21/08/22	16.4	16.3	0	59.93	1	0.16	2.029	20.415	0.776	0.300	1.75	1.78				1	1.56	35	0	59.81	34				1
57	(X29); (3); (4)	22/08/22	7.3	7.3	1	0.82	1	0.19	0.468	16.593	0.772	0.081	2.94	3				1	0.63	32	1	0.31	32				1
58	(X25); (1.4); (6)	21/08/22	15.8	15.7	1	0.63	1	0.09	1.379	15.534	0.769	0.081	0.82	0.82			2.20	1	1.09	26	1	1.25	26				1
59	(X30); (3); (4)	22/09/22	13.6	13.5	1	0.28	1	0.22	0.374	18.031	0.770	0.081	3.2	3.3	3.18	3.25		1	0.69	32	1	0.72	32	11.3	13		1
60	(X22); (1.4); (3)	22/08/22	15.9	16.3	1	0.69	1	0.56	3.403	15.278	0.771	0.298	0.41	0.42			2.21	1	1.12	25	1	0.93	25				1
61	(X23); (1.4); (6)	22/08/22	17.5	17.6	1	0.62	1	0.44	2.510	15.611	0.773	0.300	0.55	0.55			2.20	1	1.94	26	0	59.09	25				1
62	(X21); (3); (4)	22/08/22	18.7	18.7	0	50.81	1	0.53	5.322	17.916	0.769	0.297	0.74	0.75				1	0.75	32	1	0.12	32				1
63	(X26); (1.4); (3)	22/08/22	19.1	19.1	1	1.69	1	0.10	1.178	14.612	0.769	0.080	0.96	0.97			2.15	0	59.65	26	1	0.13	26				1
64	(X29); (2); (5)	22/08/22	15.1	14.9	1	0.56	1	0.28	0.751	14.393	0.767	0.296	1.94	1.96			3.05	1	0.00	28	1	2.00	29	113.8	112.2		1
65	(X27); (3); (4)	22/08/22	19.0	19.0	1	0.88	0	59.90	0.831	17.706	0.767	0.080	2.38	2.37				1	0.12	33	1	0.56	33				1
66	(X22); (3); (4)	23/09/22	8.1	8.1	0	50.41	1	0.44	4.563	18.364	0.767	0.297	0.89	0.88	0.86	0.85	4.35	0	59.72	32	1	0.03	32	13.7	12.2	315.8	1
67	(X21); (3); (6)	22/08/22	18.6	18.6	0	50.85	1	0.34	5.276	18.159	0.774	0.299	0.73	0.74				1	0.28	32	1	0.75	32				1
68	(X21); (2); (5)	01/09/22	18.6	18.8	1	0.56	1	0.50	4.327	18.457	0.768	0.296	0.5	0.5				0	59.66	27	1	0.12	27	114.7	113.1		1
69	(X24); (3); (4)	22/08/22	18.3	18.3	0	50.93	1	1.12	2.534	17.833	0.768	0.296	1.46	1.47				1	1.09	35	1	1.59	35	13.9	11.9		1

N.º	Código prueba	Fecha	Ti	Tf	t1	t1	t2	t2	M1	M2	W1	W2	P1i	P1f	$P1i_{min}$	$P1f_{min}$	P_{max}	t_{n1}	t_{n1}	n1	t_{n2}	t_{n2}	n2	H_{min}	H_{max}	N_{min}	E
			°C	°C	min	s	min	s	kg	kg	kg	kg	Bar	Bar	Bar	Bar	Bar	min	s	[ ]	min	s	[ ]	cm	cm	cm	
70	(X26); (3); (4)	22/08/22	18.1	18.0	1	0.38	1	1.00	1.530	18.792	0.771	0.298	2.06	2.07				1	1.31	34	0	59.53	33	13.2	11.1		1
71	(X27); (2); (5)	22/08/22	17.5	17.4	1	0.63	0	59.94	1.199	15.601	0.772	0.299	1.57	1.57			3.05	1	1.81	30	1	1.38	30	113.6	112		1
72	(X23); (2); (5)	22/08/22	17.0	17.0	1	0.56	1	1.40	2.802	17.919	0.770	0.299	0.78	0.78			3.03	1	0.28	29	1	3.94	31	114.2	112.8		1
73	(X28); (3); (4)	01/09/22	19.1	19.0	1	0.43	1	0.13	0.533	18.068	0.775	0.081	2.63	2.68				0	59.28	31	0	59.72	31	14	11.8		1
74	(X23); (3); (4)	01/09/22	18.1	18.1	0	50.43	1	0.91	3.330	18.304	0.766	0.298	1.18	1.19				1	0.00	33	1	7.00	37				1
75	(X25); (2); (5)	22/08/22	12.8	12.7	1	0.66	1	0.88	1.849	17.160	0.769	0.297	1.17	1.17			3.06	1	0.65	30	1	1.25	30	113.5	112.6		1
76	(X12); (3); (1)	24/08/22	6.1	6.1	0	50.88	1	0.69	4.585	17.616	0.767	0.297	0.89	0.9			4.06	0	59.85	38	1	0.35	38	13.8	12.9		1
77	(X17); (2); (2)	24/08/22	5.9	5.9	1	0.62	1	0.28	0.903	14.877	0.769	0.080	1.54	1.54			2.84	1	0.28	33	1	0.47	33	113.5	112.4		1
78	(X18); (3); (1)	24/08/22	14.1	14.4	1	0.60	1	0.25	0.519	16.252	0.771	0.081	2.64	2.67				1	1.59	38	1	1.06	38	14	11.5		1
79	(X15); (2); (2)	24/08/22	17.1	17.5	1	0.65	0	59.97	1.566	16.434	0.786	0.081	1.17	1.18			2.71	0	59.40	34	1	1.47	35	113.6	112.6		1
80	(X12); (2); (2)	24/08/22	17.6	17.9	1	0.91	1	1.00	4.024	17.839	0.769	0.297	0.6	0.6				1	0.25	33	1	1.81	34	114.2	112.9		1
81	(X16); (2); (2)	24/08/22	18.5	18.5	1	0.69	1	0.09	1.232	15.681	0.768	0.080	1.36	1.37			2.78	0	59.84	34	0	59.72	34				1
82	(X20); (2); (1)	24/08/22	18.4	18.6	1	0.06	1	0.16	0.408	12.912	0.774	0.081	2.18	2.2			2.74	1	1.54	34	1	0.15	33	113.7	112		1
83	(X11); (2); (3)	24/09/22	15.6	15.6	1	0.41	0	59.69	5.154	16.636	0.768	0.297	0.48	0.47	0.44	0.44	2.66	1	0.28	32	1	0.35	32	113.7	112.9		1
84	(X14); (3); (1)	24/08/22	17.3	17.2	1	0.38	1	1.28	2.591	20.195	0.769	0.298	1.44	1.46			4.10	1	0.62	40	1	0.87	40	13.4	12.1		1
85	(X19); (2); (2)	24/08/22	16.9	16.9	1	0.44	0	59.97	0.506	13.331	0.770	0.081	1.95	1.95			2.74	1	0.00	33	1	1.37	34	113.5	112.2		1
86	(X19); (1.4); (3)	24/08/22	16.5	16.3	1	0.47	1	0.25	0.559	12.021	0.774	0.081	1.36	1.37			2.06	1	1.19	30	1	1.60	30	171.4	170.4		1
87	(X13); (2); (2)	24/08/22	15.6	15.5	1	0.65	1	1.15	2.923	16.973	0.770	0.298	0.79	0.78			2.77	1	0.78	34	1	0.19	34	113.9	112.7		1
88	(X19); (3); (1)	24/08/22	13.1	13.0	1	0.97	1	0.50	0.449	15.706	0.768	0.079	2.9	2.94				1	0.13	38	1	0.69	38			314.9	1
89	(X13); (3); (1)	25/08/22	15.1	14.8	0	59.90	1	1.12	3.321	19.972	0.772	0.296	1.17	1.17				0	59.35	39	1	0.72	40				1
90	(X17); (1.4); (3)	24/08/22	11.6	11.6	1	0.75	1	1.12	0.871	13.413	0.772	0.081	1.1	1.12			2.06	0	59.90	29	1	1.75	30	171.5	170.8	314.8	1
91	(X11); (2); (1)	25/08/22	16.2	16.6	1	0.37	1	0.44	5.044	17.019	0.768	0.297	0.47	0.48			2.78	0	59.78	32	1	1.88	33	114.1	112.9		1
92	(X17); (3); (1)	25/08/22	18.2	18.4	1	0.50	1	0.09	0.826	16.478	0.778	0.081	2.32	2.34			4.15	0	59.31	38	1	1.38	39	13	11.4	314.8	1
93	(X16); (3); (1)	25/08/22	18.2	18.3	1	0.21	1	0.13	1.244	17.541	0.770	0.081	2.06	2.06				1	1.44	40	1	0.53	39	13.1	11.6		1
94	(X15); (1.4); (3)	25/08/22	18.8	18.9	1	0.25	1	0.06	1.306	14.595	0.775	0.081	0.81	0.82			2.05	0	59.88	30	1	1.97	31	171.6	170.7	315	1

N.º	Código prueba	Fecha	Ti	Tf	t1	t1	t2	t2	M1	M2	W1	W2	P1i	P1f	$P1i_{min}$	$P1f_{min}$	P_{max}	t_{n1}	t_{n1}	n1	t_{n2}	t_{n2}	n2	H_{min}	H_{max}	N_{min}	E
			°C	°C	min	s	min	s	kg	kg	kg	kg	Bar	Bar	Bar	Bar	Bar	min	s	[ ]	min	s	[ ]	cm	cm	cm	
95	(X18); (2); (2)	25/08/22	19.1	19.1	1	0.53	1	0.31	0.613	13.226	0.768	0.081	1.75	1.77			2.73	0	59.90	33	0	59.25	33				1
96	(X11); (3); (2)	24/09/22	15.5	15.5	0	50.12	1	0.34	5.871	17.800	0.769	0.296	0.71	0.72	0.68	0.68		0	59.75	36	0	59.69	36	14.1	12.7	315.1	1
97	(X13); (1.4); (3)	08/09/22	13.9	13.9	1	0.28	1	0.66	2.539	15.187	0.771	0.297	0.53	0.56				0	59.72	29	0	59.69	29	171.7	171		1
98	(X20); (3); (2)	25/08/22	15.5	15.6	1	0.50	1	0.63	0.410	16.058	0.770	0.081	3.17	3.27				0	59.94	38	1	0.75	39				1
99	(X15); (3); (1)	25/08/22	17.3	17.2	1	0.06	1	2.63	1.964	19.255	0.778	0.296	1.75	1.74				1	0.12	40	1	0.13	40				1
100	(X14); (2); (2)	25/08/22	15.4	15.4	1	0.57	1	1.06	2.215	16.637	0.778	0.298	0.98	0.98			2.73	1	0.03	34	1	1.25	35				1
101	(X7); (1.4); (6)	25/08/22	13.1	13.0	1	0.72	1	0.22	0.727	13.375	0.777	0.081	1.1	1.1			1.71	1	0.12	35	1	1.22	36				1
102	(X9); (2); (5)	25/08/22	12.3	12.3	1	0.47	1	0.22	0.398	12.255	0.774	0.081	1.96	1.97			2.40	0	59.75	39	1	1.06	40				1
103	(X4); (3); (4)	25/08/22	11.7	11.6	1	0.16	1	0.68	2.387	18.737	0.770	0.301	1.46	1.46			3.75	1	0.03	47	1	1.51	48			315.3	1
104	(X3); (1.4); (6)	26/08/22	6.3	6.3	1	0.50	1	0.88	2.376	14.568	0.767	0.299	0.56	0.56			1.74	1	0.22	35	1	0.37	35	170.9	170.7	315.2	1
105	(X8); (3); (4)	26/08/22	6.4	6.4	1	0.31	1	0.19	0.517	15.214	0.771	0.081	2.65	2.66			3.75	1	0.06	46	1	0.38	46				1
106	(X5); (2); (5)	26/08/22	6.3	6.4	1	0.25	0	59.89	1.361	15.579	0.775	0.081	1.17	1.19			2.43	0	59.78	40	1	0.03	40				1
107	(X7); (3); (4)	26/08/22	12.9	13.3	1	0.53	1	0.16	0.616	14.682	0.768	0.080	2.34	2.35			3.72	0	59.97	45	0	59.56	45			315	1
108	(X5); (1.4); (6)	26/08/22	13.3	13.2	1	0.56	1	0.22	1.238	14.152	0.778	0.081	0.81	0.83			1.74	1	1.50	36	1	1.25	36				1
109	(X9); (3); (4)	26/08/22	15.0	15.6	1	0.32	1	0.13	0.457	14.965	0.769	0.080	2.96	2.91				1	0.06	46	0	59.91	46				1
110	(X1); (2); (5)	26/08/22	17.1	17.3	1	0.32	1	1.00	5.105	16.873	0.770	0.301	0.45	0.46			2.39	0	59.75	38	1	3.06	40				1
111	(X7); (2); (5)	26/08/22	17.8	17.9	1	0.22	1	0.00	0.693	13.326	0.769	0.080	1.58	1.58				1	0.00	40	1	0.25	40				1
112	(X4); (1.4); (3)	26/08/22	12.8	12.8	1	0.32	1	0.41	1.634	14.348	0.772	0.081	0.69	0.69			1.71	1	0.62	36	1	0.66	36				1
113	(X3); (2); (5)	07/09/22	17.8	17.8	1	0.41	1	0.25	2.824	16.497	0.768	0.296	0.77	0.77			2.38	0	59.94	40	0	59.75	40	113.5	112.7		1
114	(X2); (3); (4)	26/08/22	17.1	17.1	1	0.18	1	0.81	4.576	20.045	0.768	0.298	0.88	0.87			3.65	1	0.88	46	1	0.75	46				1
115	(X10); (2); (3)	26/08/22	16.8	16.8	1	2.94	1	0.63	0.258	11.834	0.773	0.081	2.17	2.2			2.37	1	0.82	40	1	1.16	40				1
116	(X10); (3); (4)	26/08/22	16.3	16.3	1	0.37	1	0.07	0.376	15.092	0.770	0.081	3.3	3.29			3.70	1	0.62	46	1	0.43	46				1
117	(X8); (1.4); (3)	26/08/22	12.5	12.3	1	5.38	1	0.09	0.579	13.617	0.771	0.081	1.22	1.24			1.72	1	0.66	34	0	59.97	34				1
118	(X2); (1.4); (3)	07/09/22	18.5	18.6	1	0.88	1	0.66	3.447	14.055	0.768	0.301	0.41	0.41			1.73	1	0.84	35	1	0.38	35	171.2	170.6	315.2	1
119	(X3); (3); (4)	26/08/22	15.5	15.5	1	0.47	1	0.97	3.191	19.330	0.770	0.296	1.18	1.18			3.65	1	0.75	47	0	59.88	46				1

N.º	Código prueba	Fecha	Ti	Tf	t1	t1	t2	t2	M1	M2	W1	W2	P1i	P1f	$P1i_{min}$	$P1f_{min}$	P_{max}	t_{n1}	t_{n1}	n1	t_{n2}	t_{n2}	n2	H_{min}	H_{max}	N_{min}	E
			°C	°C	min	s	min	s	kg	kg	kg	kg	Bar	Bar	Bar	Bar	Bar	min	s	[ ]	min	s	[ ]	cm	cm	cm	
120	(X9); (1.4); (6)	27/08/22	14.5	14.8	1	1.16	1	0.22	0.434	12.284	0.768	0.081	1.37	1.38			1.73	0	59.71	34	1	1.43	35	171.2	170.3	315.2	1
121	(X6); (3); (4)	26/08/22	14.6	14.5	1	0.53	1	0.03	1.024	16.830	0.769	0.080	2.05	2.05				1	0.22	46	1	0.22	46				1
122	(X6); (1.4); (3)	27/08/22	17.0	17.2	1	0.31	0	59.85	0.822	13.238	0.776	0.080	0.96	0.97				1	0.75	36	1	0.87	36				1
123	(X1); (3); (6)	26/08/22	11.9	11.9	0	50.66	1	1.22	6.139	16.654	0.773	0.298	0.69	0.69			3.64	0	59.44	43	1	0.15	44				1
124	(X1); (3); (4)	27/08/22	17.9	17.9	0	50.37	1	1.72	6.170	17.514	0.776	0.299	0.68	0.69			3.72	1	0.38	43	1	0.28	43			315.1	1
125	(X5); (3); (4)	27/08/22	17.8	17.8	1	0.41	1	0.54	1.798	18.170	0.770	0.298	1.76	1.74				0	59.96	46	1	1.56	47				1
126	(X12); (3); (7)	27/08/22	13.2	13.1	0	50.46	1	0.78	4.610	17.527	0.776	0.298	0.88	0.89			4.06	0	59.88	38	1	0.06	38				1
127	(X18); (1.4); (6)	27/08/22	12.8	12.8	1	0.69	1	0.18	0.663	13.273	0.771	0.080	1.22	1.23			2.02	1	1.75	30	1	2.00	30				1
128	(X19); (2); (8)	27/08/22	12.5	12.3	1	0.31	1	0.25	0.525	13.369	0.777	0.082	1.98	1.98			2.74	1	0.10	33	1	0.00	33				1
129	(X16); (2); (5)	27/08/22	12.1	12.0	1	0.18	1	0.22	1.219	15.446	0.774	0.081	1.37	1.36			2.73	1	1.34	35	1	1.91	35				1
130	(X11); (2); (7)	08/09/22	16.5	16.5	1	0.60	1	1.10	5.177	16.666	0.769	0.297	0.47	0.46			2.70	1	0.31	32	0	59.65	32	114.5	113.2		1
131	(X19); (3); (7)	27/08/22	11.5	11.5	1	0.43	1	0.03	0.470	16.121	0.773	0.080	2.94	2.96				1	0.29	38	1	0.81	38			314.9	1
132	(X17); (2); (8)	27/08/22	11.0	10.9	1	0.81	1	0.09	0.823	14.150	0.773	0.080	1.58	1.58			2.70	1	0.87	34	1	1.56	34			314.7	1
133	(X16); (3); (7)	28/08/22	6.0	6.0	1	0.35	1	1.38	1.353	18.208	0.767	0.082	2.06	2.1			4.23	1	0.18	39	1	0.22	39			314.9	1
134	(X15); (2); (7)	28/08/22	6.1	6.1	1	0.97	1	0.35	1.565	16.956	0.771	0.081	1.17	1.16				1	0.47	34	1	0.15	34				1
135	(X18); (3); (7)	28/08/22	15.9	16.2	1	0.59	1	0.28	0.512	16.373	0.767	0.081	2.66	2.68				1	0.82	38	0	59.69	37	13.2	11.4		1
136	(X14); (2); (7)	07/09/22	14.6	14.5	1	0.62	1	1.03	2.217	16.523	0.769	0.296	0.98	0.99			2.65	1	0.06	34	1	1.25	35	114.3	113.2		1
137	(X17); (3); (7)	28/08/22	15.9	15.8	1	0.28	1	0.22	0.818	16.561	0.767	0.081	2.36	2.36			4.10	1	1.60	39	1	0.09	38				1
138	(X20); (2); (7)	29/08/22	16.9	17.0	1	0.59	1	0.19	0.469	13.187	0.768	0.080	2.14	2.14			2.75	1	1.28	34	1	1.22	34	113.7	112.3		1
139	(X16); (1.4); (6)	28/08/22	15.1	15.0	1	0.19	1	0.22	1.060	13.724	0.769	0.082	0.96	0.96			1.94	0	59.75	30	1	1.47	31				1
140	(X13); (3); (7)	28/08/22	13.5	13.6	0	50.43	1	0.50	3.405	17.503	0.769	0.297	1.17	1.18				1	0.19	39	1	0.19	39				1
141	(X11); (3); (8)	28/08/22	12.7	12.6	0	50.62	1	0.66	5.923	17.590	0.770	0.299	0.71	0.71				1	0.37	37	1	0.62	37				1
142	(X12); (1.4); (6)	08/09/22	14.5	14.3	1	0.57	1	1.78	3.442	15.181	0.769	0.296	0.42	0.42			1.96	1	1.28	29	1	1.31	29	171.8	171.2		1
143	(X15); (3); (8)	29/08/22	17.6	17.5	0	50.56	1	0.22	1.698	16.500	0.769	0.081	1.75	1.77			4.15	1	0.12	39	0	59.78	39	13.8	12.1	315.1	1
144	(X13); (2); (8)	07/09/22	14.1	14.1	1	0.43	1	0.72	2.871	17.057	0.771	0.297	0.79	0.78				1	0.31	34	1	0.97	34	114.1	113.2		1

N.º	Código prueba	Fecha	Ti	Tf	t1	t1	t2	t2	M1	M2	W1	W2	P1i	P1f	$P1i_{min}$	$P1f_{min}$	P_{max}	t_{n1}	t_{n1}	n1	t_{n2}	t_{n2}	n2	H_{min}	H_{max}	N_{min}	E
			°C	°C	min	s	min	s	kg	kg	kg	kg	Bar	Bar	Bar	Bar	Bar	min	s	[ ]	min	s	[ ]	cm	cm	cm	
145	(X14); (3); (5)	29/08/22	17.6	17.6	1	0.47	1	0.97	2.528	20.453	0.770	0.298	1.45	1.46				1	0.50	39	1	0.03	39	13.7	12.1		1
146	(X12); (2); (5)	08/09/22	12.9	12.8	1	1.56	1	0.53	4.081	17.210	0.769	0.297	0.59	0.59				1	0.22	33	0	59.88	33	114.3	113.4		1
147	(X18); (2); (5)	29/08/22	18.1	18.1	1	0.75	1	0.31	0.740	13.428	0.769	0.189	1.74	1.75			2.73	1	0.43	33	1	0.06	33	113.6	112.3		1
148	(X20); (3); (6)	29/08/22	18.0	17.9	1	0.38	1	0.37	0.512	16.790	0.771	0.190	3.25	3.28				1	0.46	38	1	0.22	38	13.5	11.4		1
149	(X20); (2); (5)	29/08/22	17.5	17.5	1	0.25	1	0.12	0.570	13.020	0.769	0.190	2.14	2.14			2.65	1	0.06	33	0	59.90	33	113.8	112.3		1
150	(X14); (1.4); (6)	08/09/22	13.7	13.6	1	0.37	1	4.03	2.128	14.703	0.772	0.299	0.69	0.68				1	7.50	33	1	1.75	30	171.6	171		1
151	(X23); (2); (2)	30/08/22	11.6	11.7	1	0.43	1	0.57	2.798	17.805	0.769	0.299	0.78	0.79				1	0.25	29	1	0.28	29			315.5	1
152	(X28); (3); (1)	30/08/22	13.9	13.8	1	1.00	1	1.12	0.594	18.131	0.770	0.080	2.64	2.62			4.35	1	0.60	32	1	1.03	32	13.9	11.4		1
153	(X21); (3); (2)	30/08/22	13.3	13.3	0	50.28	1	0.50	5.291	18.147	0.779	0.298	0.75	0.75				1	0.71	32	1	0.09	32				1
154	(X24); (2); (2)	30/08/22	12.9	12.8	1	0.56	1	0.88	2.258	17.780	0.772	0.299	0.98	0.99			3.00	1	2.00	30	1	0.07	29	113.9	112.8		1
155	(X29); (1.4); (3)	02/09/22	6.6	6.6	1	0.31	1	1.60	0.652	13.385	0.768	0.081	1.37	1.38			2.30	1	2.04	25	1	4.06	26	171.4	170.4	315.6	1
156	(X29); (2); (2)	31/08/22	15.0	15.3	1	0.10	1	1.82	0.587	14.639	0.770	0.080	1.95	1.91			3.05	1	0.53	28	1	0.13	28	113.8	112.4	315.6	1
157	(X30); (3); (2)	31/08/22	16.9	17.2	1	0.34	1	0.41	0.342	18.036	0.771	0.081	3.24	3.25			4.40	1	1.06	32	1	0.59	32	14	11.5		1
158	(X29); (3); (1)	31/08/22	13.6	13.4	1	0.34	0	59.97	0.413	17.091	0.777	0.081	2.88	2.99				1	0.22	31	1	0.91	32	13.7	11.6		1
159	(X21); (2); (1)	31/08/22	18.1	18.2	1	0.31	1	1.10	4.483	17.965	0.769	0.299	0.49	0.49			2.95	1	1.22	28	1	1.28	28	114.4	113.2		1
160	(X25); (1.4); (3)	02/09/22	6.8	6.9	1	0.34	1	0.13	1.355	15.586	0.772	0.081	0.82	0.82			2.29	0	59.31	25	1	1.72	26	170.3	171.8		1
161	(X21); (2); (3)	31/08/22	17.2	17.1	1	0.44	1	0.72	4.601	17.794	0.772	0.298	0.49	0.49			3.00	1	1.34	28	1	1.15	28	114.1	113.2		1
162	(X30); (2); (1)	31/08/22	12.8	12.7	1	0.88	1	0.38	0.486	14.182	0.774	0.080	2.16	2.18			3.02	1	0.25	28	1	0.59	28	113.5	112.3		1
163	(X25); (3); (1)	31/08/22	16.1	16.0	0	50.31	0	59.84	1.771	17.446	0.769	0.080	1.74	1.74			4.40	1	1.22	35	1	0.18	34	12.6	11.3		1
164	(X23); (3); (1)	31/08/22	12.3	12.1	0	50.25	1	1.10	3.337	17.912	0.772	0.303	1.18	1.18				0	59.50	33	0	59.09	33	13.8	12.3		1
165	(X28); (2); (2)	31/08/22	11.8	11.8	1	0.59	1	0.31	0.691	14.744	0.773	0.080	1.76	1.77				1	2.03	29	1	2.31	29	113.7	112.4		1
166	(X24); (3); (1)	01/09/22	15.3	15.6	0	50.44	1	0.25	2.586	17.590	0.768	0.299	1.46	1.46			4.42	0	59.91	33	1	1.35	34	13.9	11.9	315.7	1
167	(X23); (1.4); (3)	02/09/22	16.5	16.8	1	0.34	1	0.53	2.474	16.074	0.769	0.300	0.55	0.55			2.18	1	0.06	25	1	0.12	25	171.7	170.8		1
168	(X27); (3); (1)	01/09/22	17.3	17.3	1	0.07	1	0.22	0.912	18.705	0.769	0.080	2.34	2.34				1	0.96	33	1	0.32	33	14.3	11.5		1
169	(X27); (1.4); (3)	02/09/22	17.3	17.5	1	0.41	1	0.31	0.923	14.396	0.770	0.081	1.1	1.1			2.18	1	0.69	26	1	0.97	26	171.7	170.7		1

N.º	Código prueba	Fecha	Ti	Tf	t1	t1	t2	t2	M1	M2	W1	W2	P1i	P1f	$P1i_{min}$	$P1f_{min}$	P_{max}	t_{n1}	t_{n1}	n1	t_{n2}	t_{n2}	n2	H_{min}	H_{max}	N_{min}	E
			°C	°C	min	s	min	s	kg	kg	kg	kg	Bar	Bar	Bar	Bar	Bar	min	s	[ ]	min	s	[ ]	cm	cm	cm	
170	(X26); (2); (2)	01/09/22	16.9	17.0	1	0.22	0	59.94	1.283	17.323	0.768	0.080	1.38	1.38			3.04	1	1.66	30	1	1.41	30	114.2	112.8		1
171	(X27); (2); (2)	01/09/22	16.8	16.8	1	0.50	1	3.75	1.047	15.736	0.771	0.081	1.56	1.55				1	0.16	29	1	0.25	29	113.9	112.7		1
172	(X25); (2); (2)	01/09/22	15.8	15.6	1	0.22	1	0.38	1.810	17.118	0.769	0.298	1.18	1.18			3.00	1	1.31	30	1	1.15	30	114.1	112.9	315.3	1
173	(X22); (3); (1)	01/09/22	14.6	14.5	0	50.65	1	0.43	4.444	18.276	0.781	0.297	0.88	0.9				1	1.19	33	1	0.56	33	14.5	12.8		1
174	(X22); (2); (2)	01/09/22	13.9	13.8	1	0.06	1	1.34	3.882	17.782	0.774	0.298	0.59	0.6			2.98	1	1.56	29	1	1.84	29	114.2	113		1
175	(X26); (3); (1)	01/09/22	12.8	12.7	1	0.21	1	0.59	1.345	19.205	0.769	0.081	2.04	2.06			4.40	1	1.07	34	1	0.69	34	13.5	12		1
176	(X7); (2); (2)	02/09/22	18.3	18.3	1	0.50	1	0.19	0.692	13.190	0.767	0.081	1.55	1.56			2.37	1	1.00	40	1	0.59	40	113	112.3		1
177	(X8); (3); (1)	26/09/22	12.1	12.1	1	0.47	1	0.43	0.527	15.694	0.770	0.082	2.6	2.6	2.56	2.56		0	59.84	44	1	0.19	44	12.4	11.1		1
178	(X3); (1.4); (3)	02/09/22	17.5	17.6	1	0.53	1	0.72	2.419	14.112	0.779	0.301	0.55	0.55			1.72	1	8.15	41	1	0.00	36	170.6	171		1
179	(X4); (3); (1)	02/09/22	17.5	17.5	1	0.12	1	0.53	2.387	19.194	0.769	0.298	1.47	1.47			3.68	0	59.68	46	0	59.40	46	12.8	11.8		1
180	(X9); (2); (2)	02/09/22	17.4	17.4	1	0.88	1	0.03	0.409	12.319	0.768	0.081	1.94	1.97			2.38	1	0.63	40	1	0.72	40	113.2	112.2	315.1	1
181	(X8); (2); (2)	20/09/22	13.0	13.0	1	0.25	1	0.25	0.520	12.878	0.769	0.081	1.77	1.75	1.75	1.74		1	2.34	41	1	1.47	40	112.9	111.9		1
182	(X6); (3); (1)	02/09/22	15.3	15.2	1	0.35	1	0.31	1.062	17.051	0.771	0.081	2.06	2.06				1	0.87	46	1	0.85	46	13	11.5		1
183	(X3); (3); (1)	02/09/22	15.6	15.6	0	50.53	1	0.47	3.229	16.538	0.769	0.296	1.18	1.18			3.72	0	59.90	46	1	0.10	46	13.2	12	315.2	1
184	(X5); (1.4); (3)	06/09/22	13.6	13.6	1	0.47	1	0.28	1.261	13.620	0.770	0.081	0.82	0.83			1.75	0	59.25	35	0	59.84	35	170.8	170.3		1
185	(X9); (3); (1)	02/09/22	15.1	15.0	1	0.65	1	0.16	0.462	15.660	0.772	0.082	2.95	2.95			3.70	1	0.72	46	1	0.78	46				1
186	(X9); (1.4); (3)	07/09/22	15.5	16.0	1	0.66	1	0.13	0.489	11.443	0.769	0.082	1.37	1.37			1.72	1	0.19	35	1	2.35	36	170.8	170	315.2	1
187	(X2); (2); (2)	02/09/22	14.3	14.2	1	0.90	1	0.75	3.992	16.731	0.770	0.296	0.59	0.59			2.40	0	59.94	39	0	59.84	39	113.7	112.8		1
188	(X1); (3); (2)	02/09/22	13.8	13.8	0	50.91	1	0.84	6.203	16.946	0.772	0.299	0.68	0.68			3.60	1	0.31	43	0	59.94	43	13.5	12.2		1
189	(X10); (2); (1)	07/09/22	19.3	19.3	1	1.31	1	0.38	0.253	11.257	0.769	0.081	2.18	2.17			2.38	1	1.34	40	1	1.19	40	113	112		1
190	(X6); (2); (2)	20/09/22	13.1	13.1	1	0.50	1	0.60	0.919	14.203	0.771	0.081	1.37	1.37	1.36	1.36		1	1.00	40	1	0.85	40	113.1	112.1		1
191	(X1); (2); (1)	07/09/22	19.6	19.6	1	0.34	1	0.79	5.354	16.320	0.768	0.296	0.46	0.45				1	0.72	38	1	0.62	38	113.7	113		1
192	(X5); (3); (1)	05/09/22	15.1	15.3	1	0.44	1	0.59	1.809	17.976	0.769	0.296	1.78	1.75			3.65	0	59.87	46	1	0.54	47	12.8	11.6		1
193	(X1); (2); (3)	05/09/22	15.5	15.6	1	0.28	0	59.85	5.395	16.351	0.767	0.297	0.45	0.46			2.39	1	0.88	38	1	0.84	38	113.9	113		1
194	(X2); (3); (1)	05/09/22	15.1	15.1	0	50.75	1	1.10	4.539	16.652	0.768	0.297	0.88	0.89			3.62	1	0.31	46	1	0.91	46	12.4	13.2		1

N.º	Código prueba	Fecha	Ti	Tf	t1	t1	t2	t2	M1	M2	W1	W2	P1i	P1f	$P1i_{min}$	$P1f_{min}$	P_{max}	t_{n1}	t_{n1}	n1	t_{n2}	t_{n2}	n2	H_{min}	H_{max}	N_{min}	E
			°C	°C	min	s	min	s	kg	kg	kg	kg	Bar	Bar	Bar	Bar	Bar	min	s	[ ]	min	s	[ ]	cm	cm	cm	
195	(X4); (2); (2)	05/09/22	14.6	14.5	1	0.57	1	0.53	2.115	15.656	0.768	0.297	0.98	0.97			2.39	1	0.22	41	1	0.59	41	113.4	112.5		1
196	(X7); (1.4); (3)	06/09/22	17.2	17.1	1	0.28	1	0.31	0.702	12.339	0.769	0.081	1.1	1.11			1.73	1	0.03	35	1	0.16	35	170.9	170.2		1
197	(X7); (3); (1)	06/09/22	16.9	16.9	1	0.34	1	1.78	0.673	15.415	0.772	0.081	2.3	2.31			3.65	1	0.28	45	1	1.00	45	12.8	11.1	315.3	1
198	(X3); (2); (2)	06/09/22	16.3	16.2	1	0.06	1	0.50	2.815	16.348	0.769	0.296	0.77	0.77			2.40	1	1.34	41	0	59.59	40	113.6	112.7		1
199	(X5); (2); (2)	06/09/22	15.0	14.9	1	0.59	1	0.37	1.585	15.182	0.769	0.296	1.18	1.18			2.39	1	0.91	41	1	0.72	41	113.5	112.5		1
200	(X10); (3); (2)	06/09/22	14.5	14.3	1	0.59	1	0.68	0.388	15.308	0.768	0.080	3.24	3.28			3.70	0	59.75	45	1	1.09	46	12.4	11.3	315.2	1
201	(X14); (2); (8)	07/09/22	16.7	16.8	1	0.41	1	5.37	2.352	16.662	0.768	0.296	0.98	0.98			2.68	0	59.84	34	1	1.25	35	114	113	314.8	1
202	(X18); (2); (8)	07/09/22	17.3	17.5	1	0.59	1	0.22	0.646	13.487	0.770	0.080	1.76	1.77				1	1.57	34	1	1.22	34	113.8	112.5		1
203	(X11); (2); (9)	07/09/22	17.6	17.6	1	0.35	1	1.34	5.193	16.753	0.771	0.298	0.47	0.47			2.73	1	0.32	32	1	0.09	32	114.2	113.3		1
204	(X17); (3); (10)	24/09/22	14.2	14.1	1	0.65	1	0.22	0.776	16.966	0.769	0.081	2.35	2.34	2.33	2.32		1	1.16	38	1	1.13	38	13.4	11.5		1
205	(X13); (1.4); (9)	07/09/22	16.6	16.5	1	0.15	1	0.72	2.544	14.880	0.768	0.297	0.56	0.55			1.98	1	0.81	30	1	0.66	30	171.9	171		1
206	(X18); (3); (10)	08/09/22	15.5	15.3	1	0.35	1	1.03	0.509	16.266	0.768	0.081	2.65	2.65				1	1.22	38	1	1.16	38	13.2	11.6		1
207	(X18); (1.4); (9)	07/09/22	15.4	15.2	1	0.60	1	0.09	0.616	13.014	0.767	0.081	1.23	1.26			1.98	1	1.40	30	0	59.94	29	171.5	170.7		1
208	(X15); (3); (10)	07/09/22	13.6	13.5	1	0.31	1	0.35	1.943	19.124	0.769	0.299	1.76	1.76				1	1.00	40	1	1.00	40	13.4	12		1
209	(X19); (1.4); (9)	07/09/22	12.8	12.7	1	0.65	1	0.22	0.531	12.145	0.777	0.081	1.37	1.37			1.98	1	0.50	29	1	0.65	29	171.1	170.5		1
210	(X12); (3); (10)	24/09/22	15.2	15.2	0	50.78	1	0.57	4.655	18.190	0.769	0.296	0.89	0.87	0.85	0.83		1	0.62	38	1	0.19	38	14	12.5		1
211	(X16); (3); (10)	07/09/22	11.8	11.6	0	51.00	0	59.90	1.235	15.408	0.770	0.081	2.06	2.03			4.14	1	0.62	39	1	0.43	39	13.3	11.8		1
212	(X15); (1.4); (9)	08/09/22	6.7	6.8	1	0.18	1	0.59	1.372	14.792	0.778	0.082	0.82	0.83			2.02	1	0.03	29	1	0.12	29	171.7	170.9		1
213	(X19); (3); (10)	08/09/22	6.9	6.9	1	0.38	1	0.38	0.465	15.521	0.772	0.084	2.98	2.95				1	0.90	38	1	0.78	38	13	11.7		1
214	(X20); (3); (10)	08/09/22	7.2	8.1	1	0.40	1	0.75	0.446	15.609	0.772	0.082	3.24	3.2			4.14	0	59.78	38	1	1.72	39	13.1	11.6	315	1
215	(X13); (3); (10)	08/09/22	14.1	14.5	0	50.53	1	0.50	3.340	16.968	0.767	0.296	1.16	1.14				1	0.12	39	0	59.63	39	13.6	12.5		1
216	(X17); (1.4); (9)	08/09/22	17.7	17.7	1	0.57	1	0.94	0.823	13.002	0.767	0.080	1.1	1.1			1.98	1	0.16	29	1	1.85	30	171.5	170.7	315	1
217	(X20); (2); (9)	08/09/22	18.0	18.1	1	0.22	1	0.59	0.446	13.105	0.768	0.081	2.15	2.17			2.72	0	59.85	33	1	1.44	34	113.9	112.5	314.8	1
218	(X20); (3); (8)	08/09/22	18.3	18.4	1	0.50	1	0.03	0.423	16.361	0.768	0.081	3.19	3.17				1	0.29	38	1	0.16	38	13.4	11.4		1
219	(X11); (3); (10)	08/09/22	18.5	18.5	0	50.47	1	0.84	5.939	17.330	0.769	0.297	0.71	0.71				1	0.12	37	1	0.78	37	14.1	12.6		1

N.º	Código prueba	Fecha	Ti	Tf	t1	t1	t2	t2	M1	M2	W1	W2	P1i	P1f	$P1i_{min}$	$P1f_{min}$	P_{max}	t_{n1}	t_{n1}	n1	t_{n2}	t_{n2}	n2	H_{min}	H_{max}	N_{min}	E
			°C	°C	min	s	min	s	kg	kg	kg	kg	Bar	Bar	Bar	Bar	Bar	min	s	[ ]	min	s	[ ]	cm	cm	cm	
220	(X16); (1.4); (9)	08/09/22	18.5	18.6	1	0.59	1	0.47	1.172	14.038	0.768	0.081	0.96	0.96			1.98	1	0.62	30	1	0.84	30	171.8	170.9		1
221	(X16); (2); (8)	08/09/22	17.7	17.6	1	0.21	1	0.13	1.157	15.511	0.769	0.081	1.37	1.35			2.73	1	0.16	34	1	1.85	35	114.1	112.7		1
222	(X14); (3); (10)	08/09/22	17.6	17.6	0	50.82	1	0.72	2.392	16.790	0.768	0.296	1.46	1.48				1	0.97	40	1	1.07	40	13.7	12		1
223	(X14); (1.4); (9)	08/09/22	17.3	17.3	1	0.50	1	0.56	1.777	14.797	0.769	0.081	0.69	0.69			2.02	1	0.66	30	1	0.75	30	171.7	171		1
224	(X12); (2); (8)	08/09/22	17.0	16.9	1	0.41	1	2.50	3.978	17.004	0.769	0.296	0.59	0.6			2.75	1	0.09	33	1	1.72	34	114.3	113.3		1
225	(X12); (1.4); (9)	08/09/22	16.8	16.7	1	0.56	1	1.00	3.391	14.951	0.772	0.298	0.41	0.41			1.98	1	0.97	29	1	0.97	29	171.8	171.2		1
226	(X27); (3); (7)	09/09/22	7.8	7.9	1	0.75	1	0.88	0.960	17.941	0.768	0.082	2.34	2.35			4.42	0	59.72	33	0	59.91	33	12.9	11.1	315.7	1
227	(X23); (2); (8)	09/09/22	8.0	8.4	1	0.37	1	0.47	2.858	18.513	0.770	0.299	0.78	0.77			3.05	0	59.18	28	1	0.35	29	113.6	112.6	315.6	1
228	(X29); (2); (8)	09/09/22	14.5	14.6	1	0.66	1	0.59	0.552	14.190	0.767	0.081	1.95	1.94			2.94	0	59.57	28	1	0.03	28	113.2	112		1
229	(X24); (2); (5)	09/09/22	15.6	15.9	1	0.32	1	1.06	2.338	17.424	0.767	0.296	0.97	0.98			2.95	0	59.97	29	1	0.07	29	113.6	112.4		1
230	(X21); (3); (8)	09/09/22	17.6	17.7	0	50.25	1	0.69	5.373	18.471	0.767	0.296	0.74	0.75				1	0.87	31	1	0.78	31	14	12.2		1
231	(X26); (1.4); (6)	09/09/22	18.1	18.1	1	0.15	1	0.03	1.196	15.134	0.767	0.081	0.96	0.98			2.18	1	1.44	26	1	1.81	26	171.5	170.5		1
232	(X24); (3); (7)	09/09/22	18.3	18.4	1	0.53	1	1.37	2.442	21.460	0.768	0.296	1.46	1.46				1	0.09	33	0	59.78	33	13	11.8		1
233	(X30); (2); (5)	23/09/22	8.8	9.0	1	0.66	1	0.06	0.470	13.528	0.770	0.082	2.16	2.16	2.15	2.14	3.00	0	59.62	28	0	59.66	28	113.3	112	315.6	1
234	(X27); (2); (8)	09/09/22	17.6	17.6	1	0.38	1	0.22	0.948	15.133	0.770	0.081	1.56	1.56				0	59.94	29	1	0.37	29	113.5	112.3		1
235	(X26); (3); (7)	09/09/22	17.2	16.6	0	50.91	1	0.41	1.267	16.468	0.768	0.081	2.08	2.06				0	59.78	33	1	2.13	34				1
236	(X30); (3); (6)	09/09/22	15.9	15.9	1	0.34	1	0.47	0.390	17.936	0.769	0.080	3.24	3.29				1	4.53	33	1	0.31	31	13.2	11.4		1
237	(X30); (2); (7)	23/09/22	18.9	19.0	1	0.47	1	0.31	0.472	13.192	0.772	0.081	2.15	2.15	2.13	2.13		0	59.78	28	1	0.53	28	113.4	112		1
238	(X28); (2); (5)	09/09/22	14.2	14.1	1	0.62	1	0.12	0.646	14.889	0.769	0.082	1.75	1.76				1	1.96	29	1	0.19	28	113.3	112		1
239	(X29); (3); (7)	09/09/22	12.9	12.9	1	0.32	1	0.38	0.436	17.592	0.768	0.083	2.93	2.98				1	1.31	32	1	1.50	32	12.7	10.9		1
240	(X22); (3); (7)	09/09/22	12.3	12.2	0	50.35	1	0.62	4.577	18.074	0.769	0.296	0.87	0.89				1	0.65	33	1	2.34	34	14.1	12.3		1
241	(X21); (2); (7)	10/09/22	13.8	14.3	0	50.43	1	0.53	4.629	14.693	0.768	0.297	0.51	0.49			2.90	0	59.03	27	0	59.28	27	113.8	112.7	315.5	1
242	(X28); (1.4); (6)	10/09/22	16.2	16.2	1	0.47	1	0.13	0.757	13.531	0.768	0.081	1.22	1.23			2.18	0	59.44	25	1	1.81	26	171.3	170.2		1
243	(X25); (3); (7)	10/09/22	17.9	17.9	0	50.34	1	0.84	1.939	17.464	0.767	0.303	1.74	1.75			4.42	1	0.00	33	0	59.85	33	13.5	11.5		1
244	(X23); (3); (7)	10/09/22	18.7	18.9	0	50.47	1	0.75	3.155	18.455	0.768	0.297	1.18	1.19				0	59.75	33	1	0.03	33	13.7	11.7	315.9	1

N.º	Código prueba	Fecha	Ti	Tf	t1	t1	t2	t2	M1	M2	W1	W2	P1i	P1f	$P1i_{min}$	$P1f_{min}$	P_{max}	t_{n1}	t_{n1}	n1	t_{n2}	t_{n2}	n2	H_{min}	H_{max}	N_{min}	E
			°C	°C	min	s	min	s	kg	kg	kg	kg	Bar	Bar	Bar	Bar	Bar	min	s	[ ]	min	s	[ ]	cm	cm	cm	
245	(X24); (1.4); (6)	10/09/22	16.9	16.9	1	0.50	1	0.15	1.686	16.013	0.769	0.082	0.7	0.69			2.14	1	1.69	26	1	1.34	26	171.6	170.6	315.8	1
246	(X22); (2); (5)	10/09/22	16.6	16.5	1	0.38	1	0.28	3.782	17.952	0.769	0.296	0.6	0.59			2.89	0	59.93	28	0	59.50	28	114	112.7		1
247	(X25); (2); (8)	10/09/22	16.0	15.6	1	0.50	1	0.66	1.703	17.044	0.770	0.298	1.18	1.18				1	1.18	30	1	0.62	30	113.6	112.5		1
248	(X28); (3); (7)	10/09/22	15.2	14.9	1	0.46	1	0.84	0.538	17.581	0.775	0.081	2.63	2.66				0	59.47	30	1	1.32	31	13.4	11		1
249	(X26); (2); (5)	10/09/22	13.8	13.7	1	0.91	1	0.19	1.202	16.238	0.768	0.081	1.38	1.4			2.95	1	0.75	30	1	0.82	30	113.3	112.3		1
250	(X22); (1.4); (6)	10/09/22	13.2	13.2	1	0.50	1	0.94	3.262	16.300	0.770	0.302	0.41	0.41			2.19	1	0.41	24	0	59.97	24	171.7	170.8		1
251	(X10); (3); (10)	14/09/22	15.6	15.7	1	0.43	1	0.13	0.383	15.369	0.773	0.082	3.24	3.24			3.60	1	0.12	45	1	0.13	45	12.1	11		1
252	(X2); (3); (10)	15/09/22	15.6	15.6	0	50.75	1	0.50	4.660	17.309	0.770	0.297	0.87	0.88				1	0.21	45	1	0.50	45	13	11.9	315.5	1
253	(X6); (2); (8)	15/09/22	15.5	15.5	1	0.60	1	0.25	0.990	14.110	0.769	0.081	1.37	1.37			2.37	1	1.25	40	1	1.00	40	113.1	112.1	315.2	1
254	(X9); (1.4); (9)	15/09/22	15.4	15.3	1	0.41	1	0.43	0.403	11.339	0.771	0.081	1.36	1.36			1.66	0	59.87	35	1	0.07	35	170.9	170.2		1
255	(X8); (3); (10)	15/09/22	15.1	15.0	1	0.24	1	0.34	0.525	15.527	0.770	0.081	2.61	2.59				1	1.18	46	1	0.06	45	12.5	11		1
256	(X6); (3); (10)	15/09/22	14.7	14.6	1	0.31	1	0.75	1.221	16.978	0.773	0.296	2.06	2.04				0	59.68	45	0	59.66	45	12.8	11		1
257	(X5); (1.4); (9)	15/09/22	14.3	14.2	1	0.50	1	0.03	1.186	13.921	0.770	0.080	0.82	0.82			1.68	1	0.25	36	1	1.81	37	171.1	170.5		1
258	(X4); (2); (8)	15/09/22	14.0	13.9	1	0.37	1	0.43	1.869	16.246	0.772	0.081	0.99	0.99			2.36	1	0.38	41	1	0.63	41	113.3	112.5		1
259	(X9); (3); (10)	15/09/22	13.6	13.6	1	0.31	1	0.44	0.479	15.773	0.771	0.082	2.9	2.95				1	0.96	46	0	59.88	45	12.4	11.1		1
260	(X8); (2); (8)	15/09/22	13.3	13.3	1	0.60	1	0.72	0.501	12.673	0.772	0.082	1.74	1.76			2.38	1	1.21	40	1	1.35	40	113	111.9		1
261	(X6); (1.4); (9)	15/09/22	13.1	13.1	1	0.66	1	0.25	0.901	13.073	0.771	0.082	0.97	0.96			1.68	1	0.79	36	1	1.00	36	170.9	170.5		1
262	(X1); (2); (9)	15/09/22	12.9	12.9	1	0.18	1	0.72	5.439	16.371	0.770	0.296	0.45	0.45			2.35	1	0.62	38	1	0.37	38	113.5	112.6		1
263	(X8); (1.4); (9)	16/09/22	15.5	15.7	1	0.44	1	0.07	0.542	12.037	0.767	0.080	1.23	1.23			1.65	0	59.78	35	1	0.22	35	171	170.2		1
264	(X7); (3); (10)	16/09/22	13.1	13.0	1	0.75	1	0.28	0.667	16.069	0.771	0.081	2.34	2.33				1	0.50	44	1	0.09	44	12.6	11.2		1
265	(X7); (1.4); (9)	16/09/22	17.9	17.9	1	0.66	1	0.19	0.717	11.908	0.767	0.080	1.1	1.1				1	0.22	35	1	0.06	35	171	170.3	315.3	1
266	(X5); (3); (10)	16/09/22	17.8	17.8	1	0.32	1	0.34	1.825	18.545	0.769	0.296	1.76	1.77			3.73	1	0.25	46	1	0.25	46	13.2	11.6		1
267	(X4); (3); (10)	16/09/22	17.3	17.3	1	0.13	1	0.72	2.408	19.237	0.768	0.304	1.46	1.47				1	0.00	46	1	0.07	46	12.9	11.8		1
268	(X4); (1.4); (9)	16/09/22	17.0	16.9	1	0.44	1	0.22	1.684	14.018	0.768	0.082	0.69	0.69			1.73	1	1.22	37	1	1.19	37	171.3	170.6		1
269	(X1); (3); (10)	16/09/22	16.6	16.5	0	50.25	1	0.47	6.097	17.909	0.771	0.297	0.68	0.69				0	59.84	42	1	0.81	43	13.4	12.5		1

N.º	Código prueba	Fecha	Ti	Tf	t1	t1	t2	t2	M1	M2	W1	W2	P1i	P1f	$P1i_{min}$	$P1f_{min}$	P_{max}	t_{n1}	t_{n1}	n1	t_{n2}	t_{n2}	n2	H_{min}	H_{max}	N_{min}	E
			°C	°C	min	s	min	s	kg	kg	kg	kg	Bar	Bar	Bar	Bar	Bar	min	s	[ ]	min	s	[ ]	cm	cm	cm	
270	(X2); (2); (8)	16/09/22	16.0	15.9	1	0.13	1	1.54	4.062	16.558	0.769	0.297	0.59	0.59			2.40	1	1.12	40	0	59.34	39	113.3	112.5		1
271	(X10); (2); (9)	16/09/22	15.4	15.3	1	0.72	1	0.31	0.272	11.520	0.770	0.082	2.15	2.14				0	59.72	39	0	59.88	39	112.8	111.8		1
272	(X10); (3); (8)	16/09/22	14.8	14.8	1	1.16	1	0.19	0.380	15.998	0.771	0.081	3.23	3.2				1	0.68	45	1	0.53	45	12.5	11.2		1
273	(X3); (1.4); (9)	16/09/22	14.3	14.3	1	0.19	1	0.72	2.446	14.372	0.770	0.296	0.55	0.55			1.72	1	0.31	36	1	0.50	36	171.2	170.7		1
274	(X2); (1.4); (9)	16/09/22	14.1	13.9	1	0.90	1	1.40	3.654	14.048	0.772	0.298	0.41	0.41				1	0.75	35	1	0.94	35				1
275	(X3); (3); (10)	16/09/22	13.5	13.5	0	50.90	1	0.87	3.232	17.379	0.771	0.297	1.18	1.19				0	59.71	45	1	0.09	45	13	11.8		1
276	(X24); (1.4); (9)	21/09/22	13.5	13.7	1	0.47	1	0.38	1.907	16.015	0.768	0.081	0.69	0.7	0.58	0.58	2.21	1	2.10	26	1	2.31	26	171.6	170.8	315.8	1
277	(X21); (3); (10)	23/09/22	19.4	19.4	0	50.62	1	0.16	5.429	18.903	0.768	0.296	0.72	0.74	0.65	0.67		0	59.00	30	0	59.62	30	15	12.6		1
278	(X24); (2); (8)	22/09/22	16.8	16.8	1	0.53	1	1.56	2.361	18.156	0.767	0.297	0.97	0.99	0.94	0.94	2.96	1	1.28	30	1	0.75	30	113.6	112.7		1
279	(X24); (3); (10)	21/09/22	13.9	13.8	0	50.41	1	0.29	2.430	17.483	0.768	0.297	1.46	1.46	1.42	1.42		1	0.97	34	1	0.82	34	13.3	12	315.8	1
280	(X21); (2); (9)	21/09/22	13.4	13.3	1	0.16	1	0.69	4.533	17.945	0.768	0.297	0.49	0.48	0.45	0.44	2.95	1	1.07	28	1	1.25	28	113.9	112.7	315.6	1
281	(X29); (1.4); (9)	21/09/22	12.9	12.9	1	0.94	1	0.22	0.591	13.523	0.770	0.083	1.36	1.39	1.34	1.38	2.16	1	1.22	25	1	1.04	25	171.4	170.4		1
282	(X25); (3); (10)	21/09/22	12.7	12.3	0	59.87	1	1.25	1.999	20.113	0.768	0.296	1.74	1.74	1.7	1.7		1	0.31	34	1	0.22	34				1
283	(X23); (3); (10)	21/09/22	12.7	12.6	0	50.40	1	0.47	3.135	17.735	0.772	0.298	1.18	1.18	1.14	1.15		1	1.34	34	1	0.97	34	13.4	12.3		1
284	(X26); (1.4); (9)	21/09/22	12.3	12.3	1	0.66	1	0.12	1.143	15.313	0.771	0.080	0.97	0.99	0.95	0.97	2.22	1	1.75	26	1	1.47	26	171.5	170.6		1
285	(X30); (3); (8)	21/09/22	12.1	12.0	1	0.28	1	1.06	0.423	17.423	0.772	0.082	3.2	3.22	3.15	3.16	4.30	1	1.00	32	1	0.35	32	12.6	11.3		1
286	(X23); (1.4); (9)	21/09/22	11.6	11.6	1	0.25	1	0.31	2.463	16.076	0.771	0.296	0.55	0.55	0.53	0.53	2.24	0	59.81	24	1	1.63	25	171.5	170.9		1
287	(X28); (3); (10)	21/09/22	11.5	11.5	1	0.25	1	0.22	0.563	17.015	0.771	0.082	2.64	2.65	2.6	2.61		1	1.22	32	1	2.50	33	12.9	11.3		1
288	(X29); (3); (10)	21/09/22	11.2	11.1	1	0.53	1	0.31	0.458	16.879	0.779	0.082	2.94	2.95	2.9	2.9		1	1.35	32	1	1.16	32	13.1	11.2		1
289	(X26); (2); (8)	22/09/22	14.5	14.6	1	0.43	1	0.25	1.248	16.265	0.768	0.081	1.37	1.37	1.33	1.33		0	59.21	29	1	0.44	30	113.7	112.3	315.6	1
290	(X28); (2); (8)	22/09/22	15.4	15.6	1	0.25	1	0.72	0.657	14.559	0.776	0.081	1.74	1.74	1.7	1.71		0	59.03	28	1	1.50	29	113.5	112		1
291	(X22); (1.4); (9)	22/09/22	16.2	16.4	1	0.41	1	0.25	3.562	15.498	0.767	0.296	0.41	0.42	0.37	0.38	2.18	1	0.25	24	0	59.63	24	172	170.9	315.8	1
292	(X22); (3); (10)	22/09/22	13.1	12.9	0	50.41	1	0.50	4.537	18.556	0.772	0.296	0.88	0.87	0.83	0.84	4.35	1	0.81	33	1	0.81	33	14	12.6	315.7	1
293	(X30); (2); (9)	22/09/22	16.5	16.9	1	0.34	1	0.16	0.467	13.381	0.768	0.081	2.15	2.19	2.14	2.18		1	1.59	29	1	1.25	29	113.4	112		1
294	(X26); (3); (10)	22/09/22	16.9	16.9	0	53.03	1	0.00	1.280	17.752	0.772	0.081	2.06	2.02	2.02	1.99		1	0.19	33	1	0.53	33	13.5	11.8		1

N.º	Código prueba	Fecha	Ti	Tf	t1	t1	t2	t2	M1	M2	W1	W2	P1i	P1f	$P1i_{min}$	$P1f_{min}$	P_{max}	t_{n1}	t_{n1}	n1	t_{n2}	t_{n2}	n2	H_{min}	H_{max}	N_{min}	E
			°C	°C	min	s	min	s	kg	kg	kg	kg	Bar	Bar	Bar	Bar	Bar	min	s	[ ]	min	s	[ ]	cm	cm	cm	
295	(X27); (3); (10)	22/09/22	16.8	16.7	1	0.40	1	0.59	0.824	18.155	0.769	0.082	2.34	2.36	2.3	2.32		1	1.34	33	1	0.22	32	13.1	11.6		1
296	(X22); (2); (8)	22/09/22	16.5	16.5	1	0.06	1	0.81	3.953	17.620	0.767	0.296	0.57	0.59	0.53	0.55	2.95	0	59.62	28	0	59.25	28	113.9	112.8		1
297	(X25); (1.4); (9)	22/09/22	15.6	15.5	1	0.50	1	0.18	1.352	16.116	0.767	0.081	0.82	0.81	0.8	0.79	2.17	1	1.31	26	1	1.50	26	171.7	170.6		1
298	(X30); (3); (10)	22/09/22	15.4	15.3	1	0.38	1	0.16	0.395	17.973	0.770	0.081	3.15	3.17	3.11	3.15		0	59.94	31	1	0.10	31	13.1	11.6		1
299	(X28); (1.4); (9)	22/09/22	14.7	14.6	1	0.34	1	0.62	0.709	13.922	0.779	0.081	1.22	1.23	1.21	1.22	2.17	1	2.09	26	0	59.75	25	171.7	170.4		1
300	(X27); (1.4); (9)	22/09/22	14.1	14.0	1	0.34	1	0.66	0.861	14.482	0.772	0.081	1.1	1.11	1.08	1.1		1	2.00	26	1	1.97	26	171.5	170.6		1
301	(X23); (1.4); (9)	23/09/22	14.9	15.3	1	0.31	1	0.91	2.471	16.151	0.768	0.297	0.56	0.55	0.53	0.54	2.16	1	1.44	25	1	1.40	25	172	170.9		2
302	(X22); (1.4); (6)	23/09/22	16.1	16.5	1	0.50	0	59.90	3.371	15.913	0.768	0.297	0.41	0.42	0.37	0.38		0	59.53	24	1	1.91	25	171.8	171	315.8	2
303	(X23); (2); (8)	23/09/22	17.3	17.4	1	0.63	1	0.00	2.857	17.912	0.767	0.296	0.79	0.78	0.84	0.82	2.95	0	59.72	29	0	59.88	29	113.7	112.9		2
304	(X27); (2); (8)	23/09/22	18.5	18.6	1	0.63	1	0.19	0.923	15.412	0.767	0.081	1.58	1.58	1.54	1.54		1	0.34	29	1	0.19	29	113.4	112.2		2
305	(X12); (1.4); (9)	23/09/22	17.4	17.2	1	0.53	1	0.22	3.455	15.140	0.767	0.297	0.41	0.41	0.38	0.38	1.94	1	0.75	29	1	0.96	29	171.8	171.2		2
306	(X16); (1.4); (9)	23/09/22	17.2	17.1	1	0.54	1	0.59	1.081	14.012	0.769	0.080	0.96	0.98	0.95	0.96		0	59.97	30	1	0.19	30	171.6	170.9		2
307	(X13); (1.4); (9)	23/09/22	16.8	16.7	1	0.28	1	0.28	2.435	15.468	0.768	0.297	0.54	0.55	0.52	0.53		1	0.63	30	1	0.25	30	171.9	171.1		2
308	(X13); (2); (8)	24/09/22	14.0	14.3	1	0.57	1	0.28	2.909	17.991	0.768	0.297	0.76	0.79	0.72	0.73	2.66	1	0.03	34	1	0.18	34	113.5	112.7	314.9	2
309	(X12); (2); (5)	23/09/22	16.3	16.2	1	1.00	1	0.09	4.046	17.128	0.768	0.298	0.59	0.59	0.55	0.56		0	59.90	33	1	0.10	33	112.9	113.8		2
310	(X16); (2); (8)	24/09/22	14.8	14.9	1	0.38	1	1.03	1.162	15.273	0.768	0.081	1.38	1.36	1.35	1.33		1	0.19	34	0	59.66	34	113.5	112.4		2
311	(X20); (2); (9)	24/09/22	15.5	15.6	1	0.60	1	0.03	0.452	12.836	0.768	0.081	2.14	2.15	2.12	2.14		0	59.47	33	0	59.75	33	113.1	112.1		2
312	(X20); (2); (1)	24/09/22	14.8	14.8	1	0.88	1	0.78	0.461	12.904	0.769	0.081	2.14	2.14	2.13	2.12	2.75	1	0.15	33	1	1.03	34	113.2	112.1		2
313	(X18); (1.4); (3)	24/09/22	13.5	13.5	1	0.44	1	0.28	0.633	12.887	0.769	0.081	1.22	1.26	1.22	1.25	2.01	1	5.78	32	1	2.04	30	171.7	170.7		2
314	(X9); (1.4); (3)	24/09/22	13.0	13.0	1	0.44	1	0.29	0.418	11.407	0.769	0.082	1.35	1.35	1.35	1.34	1.67	1	0.31	35	1	0.91	35	170.8	170.3	315.5	2
315	(X6); (1.4); (9)	24/09/22	12.9	12.8	1	0.37	1	0.35	0.941	13.122	0.770	0.081	0.95	0.96	0.95	0.95		0	59.85	35	0	59.79	35	170.9	170.4		2
316	(X2); (1.4); (9)	24/09/22	12.8	12.7	1	0.37	1	0.62	3.456	14.285	0.770	0.297	0.42	0.41	0.4	0.4	1.69	0	59.94	34	0	59.72	34	171.3	170.7		2
317	(X1); (2); (5)	24/09/22	12.6	12.5	1	0.50	1	0.40	5.500	16.232	0.770	0.297	0.45	0.44	0.42	0.42	2.35	1	0.91	38	1	0.85	38	113.7	112.7	315.2	2
318	(X2); (2); (5)	24/09/22	12.5	12.5	1	0.53	1	0.66	4.114	16.379	0.771	0.298	0.59	0.59	0.57	0.57		1	1.35	40	1	0.00	39	113.4	112.7		2
319	(X7); (2); (8)	25/09/22	14.5	14.4	1	0.54	1	0.15	0.683	13.501	0.778	0.081	1.57	1.56	1.55	1.54	2.38	0	59.75	39	1	1.09	40	113.4	112.6		2

N.º	Código prueba	Fecha	Ti	Tf	t1	t1	t2	t2	M1	M2	W1	W2	P1i	P1f	$P1i_{min}$	$P1f_{min}$	P_{max}	t_{n1}	t_{n1}	n1	t_{n2}	t_{n2}	n2	H_{min}	H_{max}	N_{min}	E
			°C	°C	min	s	min	s	kg	kg	kg	kg	Bar	Bar	Bar	Bar	Bar	min	s	[ ]	min	s	[ ]	cm	cm	cm	
320	(X10); (2); (5)	25/09/22	14.3	14.3	1	0.44	1	0.44	0.225	10.998	0.769	0.080	2.18	2.17	2.18	2.17		1	0.16	39	0	59.97	39	112.8	111.8		2
321	(X6); (2); (8)	27/09/22	14.8	15.2	1	0.38	0	59.94	0.887	13.805	0.767	0.081	1.37	1.38	1.36	1.37	2.37	1	0.66	40	1	0.09	40	112.2	113.2		2
322	(X1); (2); (7)	06/08/22	13.9	13.9	1	0.28	1	0.94	5.415	16.989	0.770	0.295	0.46	0.46				1	0.63	37	0	59.25	36				2
323	(X18); (3); (10)	07/09/22	16.1	15.9	1	0.38	1	0.22	0.497	16.159	0.768	0.080	2.64	2.65				0	59.75	37	1	0.75	38	13.3	11.5		2
324	(X6); (2); (2)	05/09/22	14.0	14.5	1	0.63	1	0.22	0.960	14.424	0.769	0.082	1.38	1.37			2.38	0	59.47	39	0	59.09	39	113.3	112.2		2
325	(X18); (3); (4)	14/08/22	12.3	12.2	1	0.28	1	0.47	0.532	15.922	0.771	0.082	2.65	2.65			3.90	1	0.82	38	1	1.47	38				2
326	(X18); (3); (4)	14/08/22	11.9	11.9	1	0.50	1	0.22	0.536	16.066	0.776	0.081	2.62	2.66				1	0.50	38	1	1.09	38				2
327	(X19); (1.4); (6)	19/08/22	15.1	15.2	1	0.53	1	0.47	0.597	12.334	0.770	0.082	1.34	1.35			2.03	1	1.75	30	1	1.75	30				2
328	(X11); (2); (5)	14/08/22	10.9	10.9	1	0.72	1	0.97	5.398	16.105	0.774	0.296	0.47	0.47			2.70	1	1.03	33	1	1.81	33				2
329	(X29); (3); (1)	31/08/22	14.1	14.0	1	0.50	1	0.09	0.425	18.633	0.777	0.081	3	3				0	59.94	31	1	1.93	33	13.9	11.8		3
330	(X17); (3); (10)	07/09/22	17.1	17.1	1	0.31	1	0.41	0.695	16.592	0.765	0.080	2.34	2.38			4.14	1	1.19	38	1	0.07	37	13.7	11.7	315	2
331	(X10); (2); (7)	08/08/22	10.8	10.8	1	0.43	1	4.28	0.237	11.874	0.772	0.080	2.16	2.18			2.41	1	0.78	39	1	0.41	39				2
332	(X9); (2); (8)	11/08/22	11.3	11.2	1	2.16	1	0.32	0.341	11.996	0.778	0.083	1.99	2.01			2.38	1	0.00	40	1	0.31	40				2
333	(X22); (3); (4)	22/08/22	18.9	18.9	0	50.25	1	0.53	4.393	18.598	0.785	0.296	0.87	0.88				1	0.50	33	1	0.28	33				2
334	(X30); (2); (5)	09/09/22	17.8	17.8	1	0.75	1	0.18	0.456	13.579	0.777	0.082	2.16	2.18			2.95	1	0.06	28	1	0.28	28	113.5	112.1		2
335	(X30); (2); (7)	09/09/22	14.6	14.5	1	0.40	1	0.50	0.480	13.371	0.771	0.081	2.15	2.17			2.89	1	1.44	29	1	2.06	29	113.3	111.6		2
336	(X21); (3); (10)	21/09/22	14.1	14.1	0	50.44	1	1.13	5.413	19.008	0.768	0.296	0.73	0.74	0.68	0.69		0	59.84	31	0	59.72	31	14.8	12.9		2
337	(X11); (2); (3)	24/08/22	17.8	17.9	1	0.16	1	0.72	4.719	17.712	0.781	0.300	0.47	0.47			2.78	1	0.56	32	1	2.13	33	114.3	112.9	314.9	2
338	(X11); (3); (2)	25/08/22	18.9	18.9	0	50.88	1	0.22	5.737	17.815	0.768	0.297	0.71	0.72				1	0.37	37	1	1.53	38				2
339	(X17); (3); (10)	08/09/22	16.1	16.0	1	0.25	1	0.25	0.718	16.605	0.769	0.081	2.34	2.34				1	0.31	38	1	0.88	38	13.5	11.6		2
340	(X12); (3); (10)	07/09/22	12.3	12.2	0	50.31	1	0.82	4.680	17.387	0.770	0.296	0.88	0.89				0	59.78	38	1	0.31	38	14.5	12.7		2
341	(X18); (3); (4)	19/08/22	11.6	11.5	1	0.37	1	0.19	0.549	15.380	0.773	0.080	2.62	2.59			3.94	1	0.62	38	1	0.35	38				2
342	(X5); (3); (7)	10/08/22	12.2	12.1	1	0.75	1	0.72	1.724	17.935	0.772	0.299	1.78	1.82			3.72	1	0.15	47	1	0.28	47				2
343	(X8); (3); (1)	02/09/22	17.3	17.5	1	0.50	0	59.94	0.494	15.542	0.772	0.082	2.57	2.61			3.73	1	0.47	45	1	0.63	45	12.7	11.5		2
344	(X5); (3); (7)	26/09/22	14.6	14.7	0	59.84	1	0.32	1.762	18.650	0.767	0.298	1.76	1.76	1.74	1.74		0	59.85	45	0	59.25	45	12.7	11.3		2

N.º	Código prueba	Fecha	Ti	Tf	t1	t1	t2	t2	M1	M2	W1	W2	P1i	P1f	$P1i_{min}$	$P1f_{min}$	P_{max}	t_{n1}	t_{n1}	n1	t_{n2}	t_{n2}	n2	H_{min}	H_{max}	N_{min}	E
			°C	°C	min	s	min	s	kg	kg	kg	kg	Bar	Bar	Bar	Bar	Bar	min	s	[ ]	min	s	[ ]	cm	cm	cm	
345	(X10); (3); (6)	09/08/22	11.6	11.6	1	6.12	1	7.54	0.400	16.721	0.776	0.084	3.22	3.4			3.61	1	0.28	45	1	1.06	46				3
346	(X10); (3); (6)	10/08/22	14.5	14.5	1	0.87	1	0.16	0.505	15.314	0.694	0.082	2.9	2.8				1	1.03	47	1	1.16	47				3
347	(X7); (2); (8)	07/08/22	18.0	18.0	1	0.34	1	0.41	0.621	13.715	0.775	0.081	1.65	1.67			2.42	1	0.32	39	1	0.19	39				3
348	(X1); (2); (7)	30/07/22	13.9	13.9	1	0.28	1	0.94	5.415	16.989	0.770	0.295	0.46	0.46				1	0.63	37	0	59.25	36				3
349	(X1); (3); (8)	10/08/22	13.9	13.8	0	50.44	1	0.13	7.546	16.217	0.770	0.299	0.59	0.59			3.67	1	0.78	42	1	0.94	42				3
350	(X2); (1.4); (6)	08/08/22	11.8	11.7	1	0.50	1	2.79	3.340	14.920	0.779	0.300	0.43	0.43				1	0.25	35	1	1.15	35				3
351	(X11); (3); (4)	14/08/22	12.8	12.9	1	0.03	1	0.97	6.346	20.403	0.770	0.303	0.68	0.68			3.93	1	1.15	37	1	1.00	37				3
352	(X18); (3); (4)	14/08/22	12.3	12.2	1	0.28	1	0.47	0.532	15.922	0.771	0.082	2.65	2.65			3.90	1	0.82	38	1	1.47	38				3
353	(X18); (3); (1)	24/08/22	5.9	5.9	1	0.66	1	0.32		16.260	0.786	0.080	2.62	2.65				1	1.35	38	1	1.38	38	13.4	11.5		3
354	(X13); (3); (1)	24/08/22	12.3	12.2	0	50.44	1	0.94	3.381				1.17	1.18				1	0.72	40	1	1.15	40				3
355	(X6); (1.4); (3)	27/08/22	16.7	16.8	1	0.57			0.841	13.063	0.769	0.080	0.97	0.96			1.71	1	0.28	36	1	0.53	36				3
356	(X2); (1.4); (3)	26/08/22	12.1	12.1	1	0.62	1	0.16	3.055	15.332	0.775	0.297	0.41	0.41			1.73	1	1.50	36	1	0.31	35				3
357	(X2); (1.4); (3)	27/08/22	17.9	17.9	1	0.28	1	2.75	3.025	15.844	0.768	0.297	0.42	0.41			1.67	1	0.88	36	1	1.12	36				3
358	(X12); (2); (5)	29/08/22	17.9	17.9	1	0.54	1	0.90	3.571	19.144	0.769	0.299	0.6	0.6			2.72	1	0.03	33	1	0.56	33	114.4	113.1		3
359	(X12); (2); (5)	29/08/22	17.1	17.1	1	0.59	1	1.06	3.048	18.086	0.769	0.190	0.69	0.7			2.76	0	59.94	33	1	1.97	34	114.1	113.2		3
360	(X12); (1.4); (6)	28/08/22	12.1	12.1	1	0.35	1	1.28	3.204	15.995	0.771	0.298	0.42	0.41			1.99	1	0.47	29	1	0.31	29				3
361	(X14); (1.4); (6)	29/08/22	17.2	17.4	1	1.22	1	0.29	1.704	15.358	0.771	0.190	0.7	0.69			1.99	0	59.69	30	1	0.18	30	171.8	170.8		3
362	(X28); (3); (1)	30/08/22	15.8	16.6	1	0.41	1	0.75	0.593	18.562	0.771	0.080	2.65	2.61			4.45	1	1.31	32	0	59.75	31	14.9	11.2		3
363	(X29); (1.4); (3)	30/08/22	12.5	12.5	1	0.59	1	1.12	0.606	13.668	0.773	0.082	1.36	1.37			2.22	1	0.56	25	1	11.06	29	171.2	170.3		3
364	(X25); (1.4); (3)	31/08/22	18.5	18.4	1	2.69	1	0.53	1.311	16.482	0.769	0.080	0.8	0.83			2.17	0	59.31	25	1	3.56	27	171.8	170.9		3
365	(X6); (3); (1)	02/09/22	16.5	16.5	1	0.56	1	0.00	1.285	16.857	0.770	0.298	2.04	2.04				0	59.63	45	0	59.46	45	12.6	11.3		3
366	(X5); (1.4); (3)	02/09/22	16.2	16.1	1	0.85	1	0.25	1.290	13.344	0.768	0.081	0.82	0.83			1.74	1	0.06	36	1	0.56	36	171.1	170.5	315.3	3
367	(X9); (1.4); (3)	02/09/22	14.6	14.6	1	1.07	1	0.13	0.479	11.360	0.771	0.081	1.36	1.35			1.73	1	0.53	35	1	0.29	35	170.6	170.2		3
368	(X3); (2); (5)	26/08/22	18.5	18.5	1	0.50	1	0.69	2.616	16.603	0.768	0.297	0.78	0.77			2.38	1	0.91	41	1	0.97	41				3
369	(X2); (1.4); (3)	26/08/22	12.1	12.1	1	0.62	1	0.16	3.055	15.332	0.775	0.297	0.41	0.41				1	1.50	36	1	0.31	35				3

N.º	Código prueba	Fecha	Ti	Tf	t1	t1	t2	t2	M1	M2	W1	W2	P1i	P1f	$P1i_{min}$	$P1f_{min}$	P_{max}	t_{n1}	t_{n1}	n1	t_{n2}	t_{n2}	n2	H_{min}	H_{max}	N_{min}	E
			°C	°C	min	s	min	s	kg	kg	kg	kg	Bar	Bar	Bar	Bar	Bar	min	s	[ ]	min	s	[ ]	cm	cm	cm	
370	(X6); (2); (5)	07/08/22	16.9	17.0	1	1.15	1	0.04	0.873	14.524	0.774	0.082	1.42	1.46			2.41	1	0.25	38	1	0.34	39				3
371	(X10); (2); (1)	02/09/22	13.4	13.4	1	0.59	1	47.00	0.270	11.494	0.770	0.081	2.16	2.14			2.38	0	59.69	39	1	0.09	39	113.1	112.2		3
372	(X1); (2); (1)	05/09/22	15.1	15.3	1	0.46	1	0.75	5.385	16.470	0.769	0.297	0.45	0.45				1	11.91	45	1	0.12	38	113.7	112.9		3
373	(X14); (2); (7)	29/08/22	13.6	13.9	0	50.37	1	0.25	2.204	14.763	0.767	0.296	0.98	0.98			2.76	1	1.13	34	1	1.22	34	114	113	314.8	3
374	(X13); (1.4); (3)	25/08/22	18.7	18.6	1	0.57	1	0.85	2.363	15.140	0.770	0.298	0.55	0.56			2.06	0	59.75	30	0	59.81	30				3
375	(X11); (2); (7)	27/08/22	11.8	11.7	1	0.34	1	0.68	4.623	17.486	0.776	0.296	0.48	0.47			2.74	0	59.31	32	1	1.15	33				3
376	(X12); (1.4); (6)	29/08/22	16.6	16.5	1	0.65	1	0.22	2.975	16.325	0.770	0.299	0.42	0.42				1	4.13	31	1	2.13	30	171.8	171.1		3
377	(X13); (2); (8)	29/08/22	17.3	17.5	1	0.65	1	0.03	2.695	17.793	0.768	0.298	0.78	0.8			2.70	1	0.28	34	1	0.91	34				3
378	(X14); (1.4); (6)	29/08/22	16.3	16.2	1	0.25	1	0.12	1.723	15.089	0.771	0.191	0.69	0.7			2.02	1	2.44	31	1	1.10	30	171.7	170.9	314.9	3
379	(X12); (2); (5)	29/08/22	16.9	16.9	1	0.28	1	0.59	3.768	18.002	0.772	0.296	0.59	0.58				1	0.94	33	1	0.44	33	114.4	113.1		3
380	(X26); (3); (7)	09/09/22	17.2	17.2	0	51.78	1	0.78	1.489	17.583	0.770	0.296	2.06	2.02				0	59.84	33	1	0.41	33				3
381	(X30); (3); (4)	22/08/22	7.2	7.1	1	1.31	1	0.12	0.458	16.118	0.772	0.081	3.2	3.05				1	1.06	33	1	0.85	33				3
382	(X7); (3); (10)	16/09/22	16.2	16.4	1	0.22	1	0.47	0.595	15.395	0.769	0.080	2.33	2.37				1	0.25	44	1	0.25	44	12.3	10.8		3
383	(X8); (2); (2)	02/09/22	16.9	16.9	1	0.44	0	59.93	0.530	12.665	0.774	0.082	1.76	1.76			2.38	1	0.46	40	1	0.81	40				3
384	(X4); (2); (2)	05/09/22	14.6	14.5	1	0.57	1	0.53	2.115	15.656	0.768	0.297	0.98	0.97				1	0.22	41	1	0.59	41	113.4	112.5		3
385	(X24); (2); (8)	21/09/22	14.1	14.1	0	50.75	1	0.00	2.239	15.484	0.768	0.298	0.96	0.97	0.93	0.94	2.95	1	1.81	30	0	59.31	29	113.7	112.6	315.6	3
386	(X26); (2); (8)	22/09/22	13.9	14.1	1	0.18	0	59.97	1.120	15.907	0.767	0.081	1.45	1.45	1.42	1.42	2.92	0	59.81	29	1	1.28	30	113.5	112.4		3
387	(X17); (3); (10)	24/09/22	15.1	15.1	1	0.72	1	0.13	1.062	17.605	0.767	0.080	2.17	2.15	2.14	2.12		0	59.97	38	1	0.22	38	13.2	11.6		3

19.3 Tabla de análisis

Tabla 230

Tabla de análisis

N.º	Código	Requisitos			Variables independientes								Variables dependientes							E
		$\%\Delta P_1$	$\Delta T°$	T_{med}	L/D	H_1	H_{real}	H_{real}	h/H	h_{max}	Re	f	Q	q	n	q/Q_T	Q/Q_T	nD/v_c	η	Q_T/v_cD^2	
		%	°C	°C	[ ]	cm	m	[ ]	[ ]	m	[ ]	[ ]	l/min	l/min	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
1	(X1); (2); (7)	2.3 %	0.1	11.34	400		2.019	4.591	2.274	24.585	23,132	0.0251	15.688	4.690	37.02	0.230	0.770	0.0145	0.381	0.444	1
2	(X6); (1.4); (6)	3.2 %	0.2	15.27	400		1.446	9.849	6.812		22,388	0.0253	12.662	0.767	34.44	0.057	0.943	0.0155	0.352	0.336	1
3	(X6); (2); (5)	0.7 %	0.1	19.28	400	202.4	2.024	13.840	6.839	24.309	28,441	0.0239	13.159	0.913	38.84	0.065	0.935	0.0152	0.405	0.307	1
4	(X10); (2); (5)	1.4 %	0.3	17.59	400		2.028	22.412	11.052	24.709	27,285	0.0242	11.601	0.224	37.35	0.019	0.981	0.0146	0.194	0.258	1
5	(X4); (2); (5)	0.0 %	0.1	17.89	400		2.022	10.007	4.948	24.507	27,488	0.0241	15.985	1.794	38.87	0.101	0.899	0.0152	0.443	0.387	1
6	(X7); (2); (8)	0.6 %	0.1	10.94	400		2.023	16.168	7.991	24.278	22,873	0.0252	12.620	0.578	38.76	0.044	0.956	0.0152	0.320	0.288	1
7	(X3); (3); (7)	4.2 %	0.1	13.73	400		3.028	12.296	4.061	36.735	30,254	0.0236	19.160	2.754	45.24	0.126	0.874	0.0145	0.440	0.390	1
8	(X5); (2); (8)	0.0 %	0.1	13.14	400		2.022	12.040	5.956	24.794	24,300	0.0248	14.779	1.269	38.56	0.079	0.921	0.0151	0.426	0.350	1
9	(X2); (1.4); (6)	1.2 %	0.1	15.81	400		1.443	4.262	2.953	17.251	22,707	0.0252	13.233	3.168	33.82	0.193	0.807	0.0152	0.468	0.411	1
10	(X10); (2); (7)	0.9 %	0.0	13.09	400	203.0	2.030	22.039	10.856	24.590	24,268	0.0248	10.393	0.175	38.05	0.017	0.983	0.0149	0.166	0.230	1
11	(X9); (3); (7)	2.1 %	0.0	12.00	400		3.035	29.892	9.849	36.727	28,863	0.0238	14.739	0.411	44.46	0.027	0.973	0.0142	0.247	0.269	1
12	(X10); (3); (6)	0.9 %	0.1	11.75	400		3.035	32.595	10.740	37.951	28,663	0.0239	14.497	0.333	44.47	0.022	0.978	0.0142	0.224	0.264	1
13	(X1); (3); (8)	0.7 %	0.1	16.70	400		3.024	7.019	2.321	37.263	32,690	0.0232	19.798	5.915	42.37	0.230	0.770	0.0136	0.395	0.457	1
14	(X8); (2); (5)	3.5 %	0.0	13.09	400		2.027	18.060	8.908		24,268	0.0248	12.336	0.430	38.62	0.034	0.966	0.0151	0.276	0.278	1
15	(X3); (2); (8)	2.5 %	0.0	12.79	400		2.020	8.060	3.989	24.385	24,073	0.0249	15.499	2.474	39.15	0.138	0.862	0.0153	0.477	0.392	1
16	(X5); (3); (7)	0.0 %	0.1	12.45	400	303.6	3.036	17.855	5.881		29,220	0.0238	18.082	1.496	43.77	0.076	0.924	0.0140	0.404	0.348	1
17	(X8); (1.4); (6)	0.8 %	0.0	12.79	400		1.447	12.499	8.639	17.549	20,961	0.0257	10.983	0.481	33.96	0.042	0.958	0.0153	0.335	0.287	1
18	(X4); (1.4); (6)	0.7 %	0.0	12.79	400		1.443	7.066	4.896	17.651	20,961	0.0257	13.298	1.572	34.84	0.106	0.894	0.0157	0.461	0.372	1
19	(X4); (3); (7)	0.7 %	0.0	12.60	400		3.029	14.845	4.901	37.648	29,338	0.0238	17.813	2.044	46.56	0.103	0.897	0.0149	0.448	0.353	1
20	(X7); (3); (7)	0.4 %	0.1	12.35	400		3.035	24.231	7.985	37.239	29,141	0.0238	13.681	0.535	44.72	0.038	0.962	0.0143	0.273	0.253	1
21	(X2); (2); (5)	0.0 %	0.1	11.75	400		2.021	6.019	2.978	24.280	23,393	0.0251	15.733	3.790	38.39	0.194	0.806	0.0150	0.477	0.426	1

N.º	Código	Requisitos			Variables independientes								Variables dependientes								E
		$\%\Delta P_1$	$\Delta T°$	T_{med}	L/D	H_1	H_{real}	H_{real}	h/H	h_{max}	Re	f	Q	q	n	q/Q_T	Q/Q_T	nD/v_c	η	Q_T/v_cD^2	
		%	°C	°C	[ ]	cm	m	[ ]	[ ]	m	[ ]	[ ]	l/min	l/min	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	
22	(X9); (2); (8)	0.5 %	0.1	13.14	400	203.0	2.030	19.744	9.728		24,300	0.0248	11.431	0.332	38.15	0.028	0.972	0.0150	0.253	0.256	1
23	(X8); (3); (7)	0.4 %	0.2	13.39	400		3.034	26.785	8.829	37.346	29,975	0.0236	14.622	0.454	44.06	0.030	0.970	0.0141	0.243	0.268	1
24	(X2); (3); (7)	1.1 %	0.0	12.79	400		3.026	8.979	2.967	37.343	29,497	0.0237	20.041	4.396	43.36	0.180	0.820	0.0139	0.431	0.435	1
25	(X6); (3); (7)	0.5 %	0.1	12.25	400		3.032	20.762	6.847	37.953	29,062	0.0238	17.286	0.992	44.19	0.054	0.946	0.0141	0.336	0.325	1
26	(X11); (3); (4)	1.4 %	0.0	12.10	500		3.016	7.142	2.368	40.299	28,944	0.0238	19.262	5.548	36.55	0.224	0.776	0.0117	0.394	0.441	1
27	(X18); (3); (4)	1.9 %	0.0	15.66	500	302.7	3.027	26.794	8.853	41.543	31,831	0.0233	15.760	0.431	35.82	0.027	0.973	0.0115	0.215	0.288	1
28	(X14); (1.4); (3)	0.7 %	0.0	11.49	500		1.436	7.065	4.919	20.505	20,227	0.0259	14.073	1.723	28.92	0.109	0.891	0.0130	0.480	0.395	1
29	(X11); (2); (5)	0.0 %	0.0	17.15	500		2.012	4.799	2.385	27.056	26,982	0.0242	15.763	4.543	31.22	0.224	0.776	0.0122	0.399	0.443	1
30	(X11); (3); (6)	0.7 %	0.1	13.83	500		3.016	7.271	2.411	39.797	30,335	0.0236	19.231	5.465	36.70	0.221	0.779	0.0117	0.401	0.439	1
31	(X12); (1.4); (3)	0.0 %	0.0	13.39	500		1.434	4.235	2.952	20.816	21,301	0.0256	14.110	3.020	27.81	0.176	0.824	0.0125	0.418	0.429	1
32	(X17); (3); (4)	0.9 %	0.0	12.69	500		3.025	24.181	7.994	39.791	29,418	0.0237	15.220	0.752	37.94	0.047	0.953	0.0121	0.345	0.284	1
33	(X16); (1.4); (3)	1.1 %	0.1	11.95	500		1.436	9.794	6.819	20.608	20,483	0.0259	13.010	0.973	28.78	0.070	0.930	0.0130	0.435	0.350	1
34	(X13); (2); (5)	1.9 %	0.0	11.49	500		2.015	7.983	3.962	28.258	23,230	0.0251	16.238	2.608	33.06	0.138	0.862	0.0130	0.476	0.411	1
35	(X17); (2); (5)	0.6 %	0.1	10.94	500		2.019	15.964	7.908	28.052	22,873	0.0252	13.765	0.733	32.56	0.051	0.949	0.0128	0.368	0.316	1
36	(X15); (1.4); (6)	0.6 %	0.4	16.46	500		1.437	8.396	5.843	21.029	23,085	0.0251	13.563	1.263	29.22	0.085	0.915	0.0132	0.451	0.371	1
37	(X18); (1.4); (3)	0.0 %	0.1	18.39	500		1.438	12.459	8.665	20.935	24,230	0.0248	11.900	0.631	28.57	0.050	0.950	0.0129	0.407	0.314	1
38	(X20); (2); (3)	0.0 %	0.1	16.90	500		2.019	21.848	10.820	27.463	26,814	0.0243	12.332	0.391	32.44	0.031	0.969	0.0127	0.311	0.277	1
39	(X17); (1.4); (6)	0.0 %	0.0	16.06	500		1.438	11.229	7.808		22,852	0.0252	12.103	0.761	28.48	0.059	0.941	0.0128	0.428	0.322	1
40	(X16); (3); (4)	0.0 %	0.1	15.42	500		3.025	21.026	6.950	39.704	31,627	0.0234	17.439	1.171	37.77	0.063	0.937	0.0121	0.400	0.331	1
41	(X14); (3); (4)	0.0 %	0.1	14.53	500		3.021	15.002	4.965	40.209	30,898	0.0235	18.879	2.256	38.32	0.107	0.893	0.0123	0.474	0.376	1
42	(X12); (3); (4)	0.0 %	0.0	13.49	500		3.016	8.979	2.978	40.101	30,054	0.0236	19.811	4.249	37.18	0.177	0.823	0.0119	0.424	0.428	1
43	(X15); (3); (4)	0.6 %	0.1	12.74	500		3.021	18.110	5.994	38.975	29,457	0.0237	18.466	1.642	38.68	0.082	0.918	0.0124	0.444	0.358	1
44	(X13); (3); (4)	0.9 %	0.1	12.25	500		3.019	11.988	3.971	40.197	29,062	0.0238	19.453	3.060	38.21	0.136	0.864	0.0122	0.467	0.400	1
45	(X19); (2); (5)	0.8 %	0.2	13.09	500		2.020	20.075	9.940	27.957	24,268	0.0248	12.505	0.450	32.54	0.035	0.965	0.0128	0.322	0.282	1
46	(X20); (3); (4)	0.3 %	0.3	13.83	500		3.026	33.113	10.944	39.695	30,335	0.0236	15.546	0.357	37.14	0.022	0.978	0.0119	0.228	0.283	1
47	(X19); (1.4); (6)	0.7 %	0.2	15.86	500		1.441	13.933	9.671	20.619	22,736	0.0252	11.284	0.503	28.22	0.043	0.957	0.0127	0.387	0.295	1
48	(X19); (3); (4)	4.1 %	0.2	16.95	500		3.026	29.505	9.750	39.816	32,896	0.0231	15.173	0.385	36.77	0.025	0.975	0.0118	0.222	0.277	1
49	(X15); (2); (5)	0.0 %	0.1	12.45	500		2.017	11.937	5.918	27.343	23,847	0.0249	15.518	1.502	33.16	0.088	0.912	0.0130	0.476	0.371	1

N.º	Código	Requisitos			Variables independientes								Variables dependientes							E
		$\%\Delta P_1$	$\Delta T°$	T_{med}	L/D	H_1	H_{real}	H_{real}	h/H	h_{max}	Re	f	Q	q	n	q/Q_T	Q/Q_T	nD/v_c	η	Q_T/v_cD^2	
		%	°C	°C	[ ]	cm	m	[ ]	[ ]	m	[ ]	[ ]	l/min	l/min	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	
50	(X13); (1.4); (6)	0.0 %	0.0	12.40	500		1.435	5.611	3.911	20.201	20,736	0.0258	14.095	2.168	28.13	0.133	0.867	0.0127	0.448	0.407	1
51	(X27); (1.4); (6)	1.8 %	0.0	7.66	600		1.446	11.218	7.756	23.456	18,128	0.0266	13.322	0.860	24.18	0.061	0.939	0.0109	0.436	0.355	1
52	(X28); (1.4); (3)	1.6 %	0.0	19.03	600		1.449	12.562	8.672	21.959	24,616	0.0248	12.487	0.696	24.40	0.053	0.947	0.0110	0.427	0.330	1
53	(X24); (1.4); (3)	1.5 %	0.1	18.88	600		1.446	7.047	4.873	22.162	24,527	0.0248	14.657	1.661	24.27	0.102	0.898	0.0109	0.439	0.408	1
54	(X29); (1.4); (6)	0.4 %	0.0	18.73	600		1.449	13.915	9.602	22.264	24,438	0.0248	12.233	0.571	24.33	0.045	0.955	0.0110	0.402	0.320	1
55	(X30); (2); (3)	0.5 %	0.1	16.60	600		2.028	22.102	10.896	31.137	26,612	0.0243	12.917	0.400	27.18	0.030	0.970	0.0107	0.306	0.290	1
56	(X25); (3); (4)	1.7 %	0.1	16.51	600		3.035	18.018	5.936		32,526	0.0232	19.699	1.728	33.12	0.081	0.919	0.0106	0.433	0.381	1
57	(X29); (3); (4)	2.0 %	0.0	7.46	600		3.034	30.289	9.983		25,359	0.0246	15.621	0.386	30.76	0.024	0.976	0.0098	0.222	0.285	1
58	(X25); (1.4); (6)	0.0 %	0.1	15.91	600		1.446	8.370	5.789	22.457	22,765	0.0252	14.638	1.298	24.52	0.081	0.919	0.0110	0.425	0.399	1
59	(X30); (3); (4)	3.1 %	0.1	13.73	600	303.6	3.036	33.164	10.923		30,254	0.0236	17.206	0.292	30.64	0.017	0.983	0.0098	0.169	0.311	1
60	(X22); (1.4); (3)	1.2 %	0.4	16.26	600		1.444	4.211	2.916	22.560	22,968	0.0252	14.369	3.082	23.60	0.177	0.823	0.0106	0.411	0.437	1
61	(X23); (1.4); (6)	0.9 %	0.1	17.69	600		1.445	5.590	3.870	22.464	23,817	0.0249	14.717	2.199	24.29	0.130	0.870	0.0109	0.429	0.423	1
62	(X21); (3); (4)	1.4 %	0.0	18.83	600		3.022	7.609	2.518		34,473	0.0229	20.295	4.993	30.78	0.197	0.803	0.0098	0.373	0.450	1
63	(X26); (1.4); (3)	1.1 %	0.0	19.23	600		1.447	9.805	6.775	21.959	24,735	0.0247	13.496	1.099	25.05	0.075	0.925	0.0113	0.470	0.365	1
64	(X29); (2); (5)	1.0 %	0.2	15.17	600	202.5	2.025	19.902	9.826	31.129	25,646	0.0245	13.523	0.454	27.05	0.032	0.968	0.0106	0.296	0.305	1
65	(X27); (3); (4)	0.4 %	0.0	19.13	600		3.034	24.257	7.996		34,724	0.0229	16.734	0.754	31.82	0.043	0.957	0.0102	0.315	0.311	1
66	(X22); (3); (4)	1.1 %	0.0	8.27	600	302.9	3.029	9.026	2.980	44.364	25,966	0.0244	20.964	4.239	31.06	0.168	0.832	0.0099	0.400	0.448	1
67	(X21); (3); (6)	0.7 %	0.0	18.73	600		3.022	7.481	2.476		34,389	0.0229	20.560	4.960	30.74	0.194	0.806	0.0098	0.356	0.454	1
68	(X21); (2); (5)	1.0 %	0.2	18.83	600	201.6	2.016	5.081	2.520		28,134	0.0240	17.566	4.007	26.05	0.186	0.814	0.0102	0.347	0.470	1
69	(X24); (3); (4)	0.7 %	0.0	18.44	600	302.9	3.029	14.961	4.940		34,139	0.0230	20.149	2.202	33.26	0.099	0.901	0.0106	0.431	0.398	1
70	(X26); (3); (4)	0.5 %	0.1	18.19	600	303.6	3.036	21.087	6.945		33,931	0.0230	17.947	1.214	32.27	0.063	0.937	0.0103	0.402	0.341	1
71	(X27); (2); (5)	0.0 %	0.1	17.59	600	202.7	2.027	16.031	7.907	31.142	27,285	0.0242	14.706	0.903	28.25	0.058	0.942	0.0111	0.424	0.340	1
72	(X23); (2); (5)	0.7 %	0.0	17.15	600	202.0	2.020	7.938	3.929	30.935	26,982	0.0242	17.024	2.451	28.01	0.126	0.874	0.0110	0.422	0.424	1
73	(X28); (3); (4)	1.9 %	0.1	19.18	600	302.9	3.029	27.117	8.953		34,766	0.0229	17.211	0.452	30.25	0.026	0.974	0.0097	0.209	0.314	1
74	(X23); (3); (4)	0.9 %	0.0	18.24	600		3.029	12.050	3.978		33,973	0.0230	20.912	2.993	32.12	0.125	0.875	0.0103	0.426	0.425	1
75	(X25); (2); (5)	0.0 %	0.1	12.94	600	202.5	2.025	11.938	5.895	31.222	24,170	0.0249	16.235	1.532	28.55	0.086	0.914	0.0112	0.462	0.387	1
76	(X12); (3); (1)	1.1 %	0.0	6.25	500	301.6	3.016	9.076	3.009	41.402	24,463	0.0248	19.885	4.243	36.94	0.176	0.824	0.0118	0.429	0.429	1
77	(X17); (2); (2)	0.0 %	0.0	6.05	500	201.9	2.019	15.704	7.780	28.961	19,845	0.0261	13.975	0.820	31.80	0.055	0.945	0.0125	0.398	0.322	1

N.º	Código	Requisitos			Variables independientes							Variables dependientes								E
		$\%\Delta P_1$	$\Delta T°$	T_{med}	L/D	H_1	H_{real}	H_{real}	h/H	h_{max}	Re	f	Q	q	n	q/Q_T	Q/Q_T	nD/v_c	η	Q_T/v_cD^2	
		%	°C	°C	[ ]	cm	m	[ ]	[ ]	m	[ ]	[ ]	l/min	l/min	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	
78	(X18); (3); (1)	1.1 %	0.3	14.43	500	302.2	3.022	27.095	8.966		30,817	0.0235	15.352	0.437	36.20	0.028	0.972	0.0116	0.227	0.281	1
79	(X15); (2); (2)	0.9 %	0.4	17.45	500	201.7	2.017	11.997	5.947	27.670	27,184	0.0242	15.512	1.489	33.26	0.088	0.912	0.0130	0.475	0.371	1
80	(X12); (2); (2)	0.0 %	0.3	17.89	500	201.3	2.013	6.076	3.019		27,488	0.0241	16.851	3.674	31.95	0.179	0.821	0.0125	0.440	0.447	1
81	(X16); (2); (2)	0.7 %	0.0	18.63	500		2.016	13.940	6.913	28.391	27,998	0.0240	14.777	1.153	33.12	0.072	0.928	0.0130	0.461	0.347	1
82	(X20); (2); (1)	0.7 %	0.2	18.63	500	202.0	2.020	22.340	11.061	27.982	27,998	0.0240	12.154	0.327	32.05	0.026	0.974	0.0126	0.271	0.272	1
83	(X11); (2); (3)	2.1 %	0.0	15.76	500	201.5	2.015	4.848	2.406	27.152	26,044	0.0244	15.788	4.891	30.84	0.237	0.763	0.0121	0.436	0.451	1
84	(X14); (3); (1)	1.4 %	0.1	17.40	500	302.2	3.022	14.805	4.899	41.862	33,268	0.0231	19.343	2.250	38.52	0.104	0.896	0.0123	0.453	0.384	1
85	(X19); (2); (2)	0.3 %	0.0	17.05	500	202.0	2.020	19.883	9.845	27.974	26,914	0.0242	12.494	0.426	32.13	0.033	0.967	0.0126	0.302	0.282	1
86	(X19); (1.4); (3)	0.7 %	0.2	16.56	500	144.0	1.440	13.935	9.675	21.030	23,143	0.0251	11.181	0.477	28.34	0.041	0.959	0.0128	0.370	0.292	1
87	(X13); (2); (2)	1.3 %	0.1	15.71	500	201.5	2.015	7.962	3.951	28.274	26,011	0.0244	16.058	2.580	32.74	0.138	0.862	0.0128	0.474	0.406	1
88	(X19); (3); (1)	1.4 %	0.1	13.24	500		3.026	29.795	9.846		29,855	0.0237	14.721	0.367	36.75	0.024	0.976	0.0118	0.221	0.268	1
89	(X13); (3); (1)	0.0 %	0.3	15.12	500		3.019	11.941	3.955		31,383	0.0234	19.264	2.975	38.48	0.134	0.866	0.0123	0.456	0.396	1
90	(X17); (1.4); (3)	1.8 %	0.0	11.80	500	143.7	1.437	11.324	7.883	21.016	20,397	0.0259	12.500	0.776	28.11	0.058	0.942	0.0127	0.428	0.332	1
91	(X11); (2); (1)	2.1 %	0.4	16.56	500	201.3	2.013	4.849	2.409	28.380	26,579	0.0243	16.182	4.721	31.07	0.226	0.774	0.0122	0.411	0.456	1
92	(X17); (3); (1)	0.9 %	0.2	18.44	500	302.6	3.026	23.794	7.863	42.380	34,139	0.0230	15.605	0.746	37.29	0.046	0.954	0.0119	0.328	0.291	1
93	(X16); (3); (1)	0.0 %	0.1	18.39	500	302.6	3.026	21.037	6.952		34,097	0.0230	16.750	1.163	37.88	0.065	0.935	0.0121	0.413	0.319	1
94	(X15); (1.4); (3)	1.2 %	0.1	18.98	500	143.9	1.439	8.324	5.786	20.937	24,586	0.0248	13.795	1.227	29.05	0.082	0.918	0.0131	0.426	0.376	1
95	(X18); (2); (2)	1.1 %	0.0	19.23	500		2.018	17.976	8.909	27.883	28,407	0.0239	12.378	0.531	32.23	0.041	0.959	0.0126	0.339	0.281	1
96	(X11); (3); (2)	1.4 %	0.0	15.66	500	301.7	3.017	7.298	2.419		31,831	0.0233	20.424	5.553	35.16	0.214	0.786	0.0112	0.386	0.462	1
97	(X13); (1.4); (3)	4.7 %	0.0	14.08	500	143.6	1.436	5.536	3.856		21,699	0.0255	14.371	2.221	28.14	0.134	0.866	0.0127	0.441	0.415	1
98	(X20); (3); (2)	3.2 %	0.1	15.71	500		3.026	32.867	10.863		31,871	0.0233	15.188	0.326	37.28	0.021	0.979	0.0119	0.212	0.276	1
99	(X15); (3); (1)	0.6 %	0.1	17.40	500		3.021	17.817	5.897		33,268	0.0231	18.496	1.601	38.92	0.080	0.920	0.0125	0.424	0.357	1
100	(X14); (2); (2)	0.0 %	0.0	15.57	500		2.012	9.952	4.945	27.865	25,911	0.0245	15.737	1.887	33.14	0.107	0.893	0.0130	0.473	0.384	1
101	(X7); (1.4); (6)	0.0 %	0.1	13.24	400		1.447	11.224	7.758	17.448	21,216	0.0256	12.466	0.645	34.12	0.049	0.951	0.0154	0.349	0.328	1
102	(X9); (2); (5)	0.5 %	0.0	12.50	400		2.027	20.048	9.890	24.486	23,879	0.0249	11.407	0.316	38.24	0.027	0.973	0.0150	0.246	0.256	1
103	(X4); (3); (4)	0.0 %	0.1	11.85	400		3.029	14.895	4.917	38.257	28,743	0.0239	17.941	2.065	45.91	0.103	0.897	0.0147	0.451	0.356	1
104	(X3); (1.4); (6)	0.0 %	0.0	6.45	400	144.4	1.444	5.660	3.919	17.744	17,489	0.0269	13.698	2.049	33.83	0.130	0.870	0.0152	0.437	0.394	1
105	(X8); (3); (4)	0.4 %	0.0	6.55	400		3.034	27.075	8.924	38.242	24,685	0.0247	14.381	0.435	44.84	0.029	0.971	0.0143	0.240	0.264	1

N.º	Código	Requisitos			Variables independientes								Variables dependientes							E
		$\%\Delta P_1$	$\Delta T°$	T_{med}	L/D	H_1	H_{real}	H_{real}	h/H	h_{max}	Re	f	Q	q	n	q/Q_T	Q/Q_T	nD/v_c	η	Q_T/v_cD^2	
		%	°C	°C	[ ]	cm	m	[ ]	[ ]	m	[ ]	[ ]	l/min	l/min	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	
106	(X5); (2); (5)	1.7 %	0.1	6.50	400		2.022	12.033	5.952	24.780	20,116	0.0260	14.755	1.283	39.06	0.080	0.920	0.0153	0.431	0.350	1
107	(X7); (3); (4)	0.4 %	0.4	13.29	400		3.035	23.928	7.885	37.958	29,895	0.0237	13.812	0.535	44.17	0.037	0.963	0.0141	0.267	0.255	1
108	(X5); (1.4); (6)	2.5 %	0.1	13.44	400		1.446	8.367	5.788	17.755	21,329	0.0256	13.269	1.154	34.22	0.080	0.920	0.0154	0.417	0.361	1
109	(X9); (3); (4)	1.7 %	0.6	15.47	400		3.035	29.957	9.871		31,668	0.0233	14.145	0.377	45.01	0.026	0.974	0.0144	0.236	0.258	1
110	(X1); (2); (5)	2.2 %	0.2	17.35	400		2.019	4.646	2.301	24.402	27,116	0.0242	16.050	4.735	37.13	0.228	0.772	0.0146	0.384	0.453	1
111	(X7); (2); (5)	0.3 %	0.1	17.99	400		2.023	16.108	7.961		27,556	0.0241	12.538	0.614	38.92	0.047	0.953	0.0153	0.341	0.287	1
112	(X4); (1.4); (3)	0.7 %	0.0	12.99	400		1.443	7.015	4.861	17.448	21,074	0.0257	13.523	1.545	34.63	0.103	0.897	0.0156	0.441	0.377	1
113	(X3); (2); (5)	0.0 %	0.0	17.94	400	202.1	2.021	7.863	3.891	24.303	27,522	0.0241	15.656	2.523	39.10	0.139	0.861	0.0153	0.466	0.396	1
114	(X2); (3); (4)	1.7 %	0.0	17.25	400		3.026	8.908	2.944	37.266	33,144	0.0231	19.258	4.230	44.40	0.180	0.820	0.0142	0.427	0.418	1
115	(X10); (2); (3)	1.4 %	0.0	16.95	400		2.028	22.307	11.000	24.196	26,847	0.0243	10.565	0.176	38.37	0.016	0.984	0.0150	0.166	0.234	1
116	(X10); (3); (4)	0.3 %	0.0	16.46	400		3.035	33.637	11.083	37.771	32,485	0.0232	14.261	0.295	44.61	0.020	0.980	0.0143	0.209	0.259	1
117	(X8); (1.4); (3)	1.6 %	0.2	12.60	400		1.447	12.549	8.674	17.549	20,849	0.0257	11.805	0.498	32.83	0.040	0.960	0.0148	0.324	0.308	1
118	(X2); (1.4); (3)	0.0 %	0.1	18.68	400	144.3	1.443	4.187	2.902	17.668	24,408	0.0248	13.125	3.119	33.66	0.192	0.808	0.0152	0.452	0.407	1
119	(X3); (3); (4)	0.0 %	0.0	15.66	400		3.028	12.044	3.978	37.256	31,831	0.0233	18.448	2.854	45.26	0.134	0.866	0.0145	0.461	0.379	1
120	(X9); (1.4); (6)	0.7 %	0.3	14.82	400	144.5	1.445	14.033	9.715	17.656	22,129	0.0254	11.316	0.352	33.18	0.030	0.970	0.0149	0.271	0.292	1
121	(X6); (3); (4)	0.0 %	0.1	14.72	400		3.032	20.922	6.900		31,059	0.0235	15.946	0.945	44.84	0.056	0.944	0.0143	0.350	0.300	1
122	(X6); (1.4); (3)	1.0 %	0.2	17.25	400		1.446	9.853	6.814		23,553	0.0250	12.423	0.745	34.53	0.057	0.943	0.0155	0.349	0.330	1
123	(X1); (3); (6)	0.7 %	0.0	12.10	400		3.024	7.014	2.320	37.136	28,944	0.0238	18.833	5.732	42.64	0.233	0.767	0.0136	0.402	0.437	1
124	(X1); (3); (4)	0.7 %	0.0	18.04	400		3.024	6.969	2.305	37.986	33,806	0.0230	19.981	5.720	41.77	0.223	0.777	0.0134	0.374	0.457	1
125	(X5); (3); (4)	1.1 %	0.0	17.94	400		3.032	17.870	5.895		33,723	0.0230	17.319	1.490	44.93	0.079	0.921	0.0144	0.421	0.335	1
126	(X12); (3); (7)	0.6 %	0.1	13.34	500		3.016	9.005	2.986	41.427	29,935	0.0236	19.946	4.263	37.02	0.176	0.824	0.0118	0.424	0.431	1
127	(X18); (1.4); (6)	0.8 %	0.0	12.99	500		1.438	12.499	8.693	20.611	21,074	0.0257	12.377	0.582	28.12	0.045	0.955	0.0127	0.362	0.324	1
128	(X19); (2); (8)	0.0 %	0.2	12.60	500		2.020	20.201	10.002	27.956	23,944	0.0249	12.544	0.442	31.97	0.034	0.966	0.0125	0.317	0.283	1
129	(X16); (2); (5)	0.7 %	0.1	12.25	500		2.016	13.926	6.906	27.852	23,718	0.0250	14.647	1.135	33.10	0.072	0.928	0.0130	0.458	0.344	1
130	(X11); (2); (7)	2.1 %	0.0	16.65	500	201.0	2.010	4.747	2.362	27.564	26,646	0.0243	15.770	4.801	31.01	0.233	0.767	0.0122	0.415	0.448	1
131	(X19); (3); (7)	0.7 %	0.0	11.70	500		3.026	30.095	9.945		28,623	0.0239	15.257	0.390	36.66	0.025	0.975	0.0117	0.229	0.278	1
132	(X17); (2); (8)	0.0 %	0.1	11.14	500		2.019	16.118	7.984	27.543	23,003	0.0252	13.214	0.743	32.35	0.053	0.947	0.0127	0.393	0.304	1
133	(X16); (3); (7)	1.9 %	0.0	6.15	500		3.025	21.211	7.012	43.136	24,389	0.0248	17.354	1.243	37.87	0.067	0.933	0.0121	0.431	0.331	1

N.º	Código	Requisitos			Variables independientes								Variables dependientes								E
		$\%\Delta P_1$	$\Delta T°$	T_{med}	L/D	H_1	H_{real}	H_{real}	h/H	h_{max}	Re	f	Q	q	n	q/Q_T	Q/Q_T	nD/v_c	η	Q_T/v_cD^2	
		%	°C	°C	[ ]	cm	m	[ ]	[ ]	m	[ ]	[ ]	l/min	l/min	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	
134	(X15); (2); (7)	0.9 %	0.0	6.25	500		2.017	11.880	5.890		19,965	0.0260	15.941	1.477	32.83	0.085	0.915	0.0129	0.453	0.380	1
135	(X18); (3); (7)	0.8 %	0.3	16.21	500	302.7	3.027	27.256	9.005		32,280	0.0232	15.483	0.430	36.34	0.027	0.973	0.0116	0.222	0.283	1
136	(X14); (2); (7)	0.5 %	0.1	14.72	500	201.1	2.011	10.027	4.987	27.045	25,348	0.0246	15.618	1.892	33.14	0.108	0.892	0.0130	0.483	0.382	1
137	(X17); (3); (7)	0.0 %	0.1	16.01	500		3.025	24.090	7.964	41.852	32,116	0.0233	15.749	0.736	36.98	0.045	0.955	0.0118	0.325	0.293	1
138	(X20); (2); (7)	0.0 %	0.1	17.10	500	201.8	2.018	21.849	10.826	28.076	26,948	0.0242	12.323	0.389	32.33	0.031	0.969	0.0127	0.310	0.277	1
139	(X16); (1.4); (6)	0.5 %	0.1	15.22	500		1.436	9.773	6.804	19.801	22,359	0.0253	12.936	0.976	29.20	0.070	0.930	0.0131	0.438	0.348	1
140	(X13); (3); (7)	0.9 %	0.1	13.73	500		3.019	11.990	3.971		30,254	0.0236	19.939	3.087	37.88	0.134	0.866	0.0121	0.460	0.410	1
141	(X11); (3); (8)	0.7 %	0.1	12.84	500		3.016	7.219	2.394		29,537	0.0237	19.964	5.570	35.71	0.218	0.782	0.0114	0.389	0.454	1
142	(X12); (1.4); (6)	0.0 %	0.2	14.58	500	143.4	1.434	4.235	2.953	20.003	21,985	0.0254	14.299	3.060	27.41	0.176	0.824	0.0123	0.418	0.435	1
143	(X15); (3); (8)	1.1 %	0.1	17.69	500	302.2	3.022	17.971	5.948	42.374	33,516	0.0230	18.707	1.614	38.03	0.079	0.921	0.0122	0.427	0.361	1
144	(X13); (2); (8)	0.6 %	0.0	14.28	500	201.2	2.012	7.985	3.970		25,052	0.0246	16.195	2.547	32.65	0.136	0.864	0.0128	0.467	0.408	1
145	(X14); (3); (5)	0.7 %	0.0	17.74	500	302.1	3.021	14.857	4.918		33,557	0.0230	19.571	2.199	37.83	0.101	0.899	0.0121	0.440	0.387	1
146	(X12); (2); (5)	0.9 %	0.1	13.04	500	201.0	2.010	5.994	2.983		24,235	0.0248	16.046	3.756	31.97	0.190	0.810	0.0125	0.464	0.432	1
147	(X18); (2); (5)	0.6 %	0.0	18.24	500	201.9	2.019	17.819	8.827	27.878	27,726	0.0241	12.530	0.549	31.87	0.042	0.958	0.0125	0.343	0.285	1
148	(X20); (3); (6)	0.9 %	0.1	18.09	500	302.5	3.025	33.340	11.021		33,848	0.0230	15.953	0.321	36.79	0.020	0.980	0.0118	0.201	0.289	1
149	(X20); (2); (5)	0.0 %	0.0	17.64	500	201.8	2.018	21.851	10.830	27.058	27,319	0.0242	12.226	0.380	32.01	0.030	0.970	0.0125	0.306	0.275	1
150	(X14); (1.4); (6)	1.5 %	0.1	13.83	500	143.6	1.436	6.990	4.867		21,556	0.0255	13.866	1.716	28.31	0.110	0.890	0.0127	0.479	0.390	1
151	(X23); (2); (2)	0.6 %	0.1	11.85	600		2.022	7.983	3.947		23,458	0.0250	16.936	2.479	27.88	0.128	0.872	0.0109	0.431	0.423	1
152	(X28); (3); (1)	0.8 %	0.1	14.03	600	303.1	3.031	26.838	8.854	44.390	30,495	0.0235	17.102	0.505	30.58	0.029	0.971	0.0098	0.232	0.313	1
153	(X21); (3); (2)	0.7 %	0.0	13.49	600		3.022	7.627	2.524		30,054	0.0236	20.755	4.959	30.80	0.193	0.807	0.0099	0.364	0.457	1
154	(X24); (2); (2)	1.0 %	0.1	13.04	600	202.2	2.022	9.999	4.945	30.610	24,235	0.0248	16.874	1.933	28.02	0.103	0.897	0.0110	0.452	0.410	1
155	(X29); (1.4); (3)	0.7 %	0.0	6.75	600	144.7	1.447	14.022	9.690	23.455	17,648	0.0268	12.563	0.557	23.31	0.042	0.958	0.0105	0.385	0.328	1
156	(X29); (2); (2)	2.1 %	0.3	15.32	600	202.5	2.025	19.699	9.728	31.130	25,745	0.0245	13.869	0.493	26.85	0.034	0.966	0.0105	0.310	0.313	1
157	(X30); (3); (2)	0.3 %	0.3	17.20	600	303.0	3.030	33.131	10.934	44.923	33,102	0.0231	17.202	0.260	30.58	0.015	0.985	0.0098	0.150	0.311	1
158	(X29); (3); (1)	3.8 %	0.2	13.68	600	303.1	3.031	29.949	9.880		30,214	0.0236	16.246	0.333	30.21	0.020	0.980	0.0097	0.182	0.295	1
159	(X21); (2); (1)	1.0 %	0.1	18.29	600	201.7	2.017	4.978	2.468	30.125	27,760	0.0241	17.145	4.118	26.45	0.194	0.806	0.0104	0.352	0.463	1
160	(X25); (1.4); (3)	0.0 %	0.1	7.01	600	144.7	1.447	8.362	5.779	23.353	17,780	0.0268	14.743	1.272	24.29	0.079	0.921	0.0109	0.412	0.401	1
161	(X21); (2); (3)	0.0 %	0.1	17.30	600	201.9	2.019	5.003	2.478	30.630	27,083	0.0242	16.932	4.261	26.45	0.201	0.799	0.0104	0.372	0.462	1

N.º	Código	Requisitos		Variables independientes								Variables dependientes								E
		$\%\Delta P_1$	$\Delta T°$	T_{med}	L/D	H_1	H_{real}	H_{real}	h/H	h_{max}	Re	f	Q	q	n	q/Q_T	Q/Q_T	nD/v_c	η	Q_T/v_cD^2	
		%	°C	°C	[ ]	cm	m	[ ]	[ ]	m	[ ]	[ ]	l/min	l/min	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	
162	(X30); (2); (1)	0.9 %	0.1	12.94	600	202.6	2.026	22.141	10.926	30.814	24,170	0.0249	13.232	0.404	26.81	0.030	0.970	0.0105	0.303	0.297	1
163	(X25); (3); (1)	0.0 %	0.1	16.21	600	303.8	3.038	17.762	5.846	44.916	32,280	0.0232	19.926	1.699	33.11	0.079	0.921	0.0106	0.413	0.385	1
164	(X23); (3); (1)	0.0 %	0.2	12.40	600	302.7	3.027	12.039	3.977		29,180	0.0238	20.492	2.983	32.38	0.127	0.873	0.0104	0.433	0.418	1
165	(X28); (2); (2)	0.6 %	0.0	12.00	600	202.5	2.025	18.007	8.892		23,556	0.0250	13.852	0.609	27.02	0.042	0.958	0.0106	0.347	0.315	1
166	(X24); (3); (1)	0.3 %	0.3	15.61	600	302.8	3.028	14.877	4.913	45.115	31,790	0.0233	20.045	2.281	32.16	0.102	0.898	0.0103	0.445	0.397	1
167	(X23); (1.4); (3)	0.0 %	0.3	16.80	600	144.5	1.445	5.564	3.850	22.256	23,289	0.0251	15.248	2.159	23.96	0.124	0.876	0.0108	0.404	0.436	1
168	(X27); (3); (1)	0.0 %	0.0	17.45	600	302.9	3.029	23.892	7.889		33,309	0.0231	17.952	0.831	31.66	0.044	0.956	0.0101	0.319	0.334	1
169	(X27); (1.4); (3)	0.0 %	0.2	17.55	600	144.6	1.446	11.231	7.769	22.208	23,729	0.0250	13.562	0.839	24.66	0.058	0.942	0.0111	0.419	0.360	1
170	(X26); (2); (2)	0.4 %	0.1	17.10	600	202.0	2.020	14.064	6.961	31.037	26,948	0.0242	16.527	1.207	28.28	0.068	0.932	0.0111	0.435	0.387	1
171	(X27); (2); (2)	0.6 %	0.0	16.95	600	202.2	2.022	15.876	7.850		26,847	0.0243	14.871	0.911	27.90	0.058	0.942	0.0109	0.420	0.344	1
172	(X25); (2); (2)	0.0 %	0.2	15.86	600	201.8	2.018	12.045	5.969	30.622	26,111	0.0244	16.318	1.505	28.42	0.084	0.916	0.0111	0.458	0.388	1
173	(X22); (3); (1)	2.3 %	0.1	14.72	600	302.1	3.021	9.032	2.990		31,059	0.0235	20.758	4.124	31.54	0.166	0.834	0.0101	0.395	0.443	1
174	(X22); (2); (2)	1.7 %	0.1	14.03	600	201.9	2.019	6.072	3.007	30.410	24,888	0.0247	17.017	3.511	27.23	0.171	0.829	0.0107	0.414	0.447	1
175	(X26); (3); (1)	1.0 %	0.1	12.94	600	303.0	3.030	20.917	6.903	44.894	29,616	0.0237	18.397	1.253	32.52	0.064	0.936	0.0104	0.402	0.350	1
176	(X7); (2); (2)	0.7 %	0.0	18.44	400	202.5	2.025	15.880	7.841	24.203	27,862	0.0240	12.348	0.610	38.49	0.047	0.953	0.0151	0.338	0.282	1
177	(X8); (3); (1)	0.0 %	0.0	12.30	400	303.5	3.035	26.526	8.740		29,101	0.0238	14.827	0.442	42.99	0.029	0.971	0.0138	0.231	0.272	1
178	(X3); (1.4); (3)	0.0 %	0.1	17.69	400	144.5	1.445	5.616	3.887	17.562	23,817	0.0249	13.244	2.097	35.11	0.137	0.863	0.0158	0.457	0.384	1
179	(X4); (3); (1)	0.0 %	0.0	17.64	400	303.0	3.030	15.010	4.954	37.575	33,474	0.0231	18.427	2.075	45.35	0.101	0.899	0.0145	0.445	0.365	1
180	(X9); (2); (2)	1.6 %	0.0	17.55	400	202.4	2.024	19.961	9.862	24.301	27,251	0.0242	11.408	0.329	38.57	0.028	0.972	0.0151	0.255	0.256	1
181	(X8); (2); (2)	1.1 %	0.0	13.19	400	202.8	2.028	17.958	8.857		24,333	0.0248	12.076	0.438	38.28	0.035	0.965	0.0150	0.285	0.273	1
182	(X6); (3); (1)	0.0 %	0.1	15.42	400	303.0	3.030	21.026	6.939		31,627	0.0234	16.213	0.978	44.36	0.057	0.943	0.0142	0.358	0.306	1
183	(X3); (3); (1)	0.0 %	0.0	15.76	400	302.6	3.026	12.045	3.980	37.971	31,912	0.0233	18.758	2.915	45.00	0.135	0.865	0.0144	0.463	0.386	1
184	(X5); (1.4); (3)	1.2 %	0.0	13.78	400	144.7	1.447	8.419	5.817	17.858	21,528	0.0256	12.769	1.176	34.26	0.084	0.916	0.0154	0.444	0.349	1
185	(X9); (3); (1)	0.0 %	0.1	15.22	400		3.035	30.109	9.921	37.764	31,464	0.0234	14.753	0.380	44.44	0.025	0.975	0.0142	0.230	0.269	1
186	(X9); (1.4); (3)	0.4 %	0.5	15.91	400	144.8	1.448	13.959	9.640	17.557	22,765	0.0252	10.577	0.407	33.79	0.037	0.963	0.0152	0.332	0.275	1
187	(X2); (2); (2)	0.0 %	0.1	14.43	400	201.9	2.019	5.970	2.957	24.493	25,150	0.0246	15.750	3.656	38.07	0.188	0.812	0.0149	0.454	0.423	1
188	(X1); (3); (2)	0.0 %	0.0	13.98	400	302.4	3.024	6.939	2.295	36.737	30,455	0.0236	19.091	5.831	41.91	0.234	0.766	0.0134	0.395	0.443	1
189	(X10); (2); (1)	0.5 %	0.0	19.43	400	202.7	2.027	22.216	10.962	24.310	28,544	0.0239	10.289	0.171	38.19	0.016	0.984	0.0150	0.166	0.228	1

N.º	Código	Requisitos		Variables independientes								Variables dependientes									E
		$\%\Delta P_1$	$\Delta T°$	T_{med}	L/D	H_1	H_{real}	H_{real}	h/H	h_{max}	Re	f	Q	q	n	q/Q_T	Q/Q_T	nD/v_c	η	Q_T/v_cD^2	
		%	°C	°C	[ ]	cm	m	[ ]	[ ]	m	[ ]	[ ]	l/min	l/min	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	
190	(X6); (2); (2)	0.0 %	0.0	13.29	400	202.6	2.026	13.979	6.901		24,398	0.0248	13.340	0.831	38.41	0.059	0.941	0.0151	0.368	0.309	1
191	(X1); (2); (1)	1.1 %	0.0	19.72	400	201.8	2.018	4.622	2.290		28,750	0.0239	15.503	5.005	36.59	0.244	0.756	0.0143	0.417	0.447	1
192	(X5); (3); (1)	1.7 %	0.2	15.37	400	303.1	3.031	18.015	5.945	37.254	31,586	0.0234	17.111	1.501	45.34	0.081	0.919	0.0145	0.434	0.331	1
193	(X1); (2); (3)	1.1 %	0.1	15.71	400	201.7	2.017	4.619	2.290	24.395	26,011	0.0244	15.539	5.120	36.48	0.248	0.752	0.0143	0.425	0.450	1
194	(X2); (3); (1)	0.6 %	0.0	15.27	400	302.5	3.025	9.007	2.978	36.948	31,505	0.0234	18.811	4.173	44.55	0.182	0.818	0.0143	0.439	0.409	1
195	(X4); (2); (2)	1.0 %	0.1	14.72	400	202.2	2.022	9.951	4.921	24.392	25,348	0.0246	14.772	1.805	39.73	0.109	0.891	0.0156	0.479	0.361	1
196	(X7); (1.4); (3)	0.9 %	0.1	17.30	400	144.7	1.447	11.282	7.796	17.663	23,582	0.0250	11.540	0.619	33.95	0.051	0.949	0.0153	0.365	0.304	1
197	(X7); (3); (1)	0.4 %	0.0	17.05	400	303.4	3.034	23.533	7.758	37.265	32,979	0.0231	14.589	0.576	43.54	0.038	0.962	0.0139	0.267	0.270	1
198	(X3); (2); (2)	0.7 %	0.1	16.41	400	202.0	2.020	7.835	3.878	24.500	26,478	0.0243	15.593	2.503	39.20	0.138	0.862	0.0154	0.462	0.394	1
199	(X5); (2); (2)	0.0 %	0.1	15.12	400	202.2	2.022	12.043	5.957	24.393	25,612	0.0245	14.297	1.283	39.46	0.082	0.918	0.0155	0.445	0.340	1
200	(X10); (3); (2)	1.2 %	0.2	14.58	400	303.4	3.034	33.270	10.967	37.760	30,938	0.0235	14.421	0.305	44.19	0.021	0.979	0.0141	0.211	0.262	1
201	(X14); (2); (8)	0.5 %	0.1	16.90	500	201.3	2.013	9.980	4.958	27.361	26,814	0.0243	15.817	1.891	33.20	0.107	0.893	0.0130	0.473	0.386	1
202	(X18); (2); (8)	0.6 %	0.2	17.55	500	201.7	2.017	18.021	8.936		27,251	0.0242	12.619	0.565	32.25	0.043	0.957	0.0126	0.355	0.287	1
203	(X11); (2); (9)	1.1 %	0.0	17.74	500	201.1	2.011	4.774	2.374	27.875	27,387	0.0241	15.923	4.798	30.89	0.232	0.768	0.0121	0.414	0.452	1
204	(X17); (3); (10)	0.4 %	0.1	14.33	500	302.5	3.025	23.931	7.911		30,736	0.0235	16.048	0.694	36.31	0.041	0.959	0.0116	0.299	0.298	1
205	(X13); (1.4); (9)	0.9 %	0.1	16.70	500	143.5	1.435	5.640	3.931	20.214	23,231	0.0251	14.104	2.225	28.65	0.136	0.864	0.0129	0.462	0.409	1
206	(X18); (3); (10)	0.0 %	0.2	15.57	500	302.6	3.026	27.049	8.940		31,749	0.0233	15.435	0.422	36.28	0.027	0.973	0.0116	0.217	0.282	1
207	(X18); (1.4); (9)	2.4 %	0.2	15.47	500	143.8	1.438	12.708	8.835	20.210	22,504	0.0253	12.147	0.535	28.18	0.042	0.958	0.0127	0.345	0.317	1
208	(X15); (3); (10)	0.0 %	0.1	13.73	500	302.3	3.023	17.960	5.942		30,254	0.0236	18.288	1.637	38.36	0.082	0.918	0.0123	0.442	0.354	1
209	(X19); (1.4); (9)	0.0 %	0.1	12.94	500	144.1	1.441	13.978	9.699	20.202	21,046	0.0257	11.262	0.449	27.73	0.038	0.962	0.0125	0.347	0.293	1
210	(X12); (3); (10)	2.3 %	0.0	15.37	500	301.7	3.017	8.982	2.977		31,586	0.0234	20.619	4.325	36.75	0.173	0.827	0.0118	0.415	0.444	1
211	(X16); (3); (10)	1.5 %	0.2	11.90	500	302.4	3.024	20.863	6.899	42.236	28,783	0.0239	17.243	1.157	37.67	0.063	0.937	0.0121	0.396	0.327	1
212	(X15); (1.4); (9)	1.2 %	0.1	6.90	500	143.6	1.436	8.362	5.822	20.600	17,727	0.0268	13.984	1.279	27.97	0.084	0.916	0.0126	0.441	0.382	1
213	(X19); (3); (10)	1.0 %	0.0	7.06	500	302.6	3.026	30.237	9.992		25,058	0.0246	14.669	0.379	36.49	0.025	0.975	0.0117	0.232	0.268	1
214	(X20); (3); (10)	1.2 %	0.9	7.81	500	302.7	3.027	32.839	10.850	42.221	25,623	0.0245	14.752	0.360	37.04	0.024	0.976	0.0118	0.240	0.269	1
215	(X13); (3); (10)	1.7 %	0.4	14.48	500	301.9	3.019	11.736	3.887		30,857	0.0235	19.268	3.024	38.08	0.136	0.864	0.0122	0.453	0.397	1
216	(X17); (1.4); (9)	0.0 %	0.0	17.84	500	143.9	1.439	11.232	7.805	20.218	23,906	0.0249	12.146	0.733	28.03	0.057	0.943	0.0126	0.411	0.322	1
217	(X20); (2); (9)	0.9 %	0.1	18.19	500	201.6	2.016	22.057	10.941	27.776	27,692	0.0241	12.319	0.362	32.15	0.029	0.971	0.0126	0.292	0.276	1

N.º	Código	Requisitos			Variables independientes								Variables dependientes								E
		$\%\Delta P_1$	$\Delta T°$	T_{med}	L/D	H_1	H_{real}	H_{real}	h/H	h_{max}	Re	f	Q	q	n	q/Q_T	Q/Q_T	nD/v_c	η	Q_T/v_cD^2	
		%	°C	°C	[ ]	cm	m	[ ]	[ ]	m	[ ]	[ ]	l/min	l/min	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	
218	(X20); (3); (8)	0.6 %	0.1	18.49	500	302.6	3.026	32.475	10.733		34,181	0.0229	15.499	0.343	36.86	0.022	0.978	0.0118	0.215	0.282	1
219	(X11); (3); (10)	0.0 %	0.0	18.63	500	301.6	3.016	7.200	2.387		34,306	0.0229	19.733	5.577	35.73	0.220	0.780	0.0114	0.392	0.450	1
220	(X16); (1.4); (9)	0.5 %	0.1	18.68	500	143.6	1.436	9.779	6.811	20.221	24,408	0.0248	13.171	1.085	28.65	0.076	0.924	0.0129	0.479	0.357	1
221	(X16); (2); (8)	1.5 %	0.1	17.79	500	201.4	2.014	13.887	6.895	27.876	27,421	0.0241	14.722	1.076	32.95	0.068	0.932	0.0129	0.431	0.344	1
222	(X14); (3); (10)	1.4 %	0.0	17.74	500	302.1	3.021	15.010	4.968		33,557	0.0230	18.956	2.076	38.35	0.099	0.901	0.0123	0.434	0.374	1
223	(X14); (1.4); (9)	0.0 %	0.0	17.45	500	143.6	1.436	7.045	4.907	20.625	23,670	0.0250	13.941	1.684	28.66	0.108	0.892	0.0129	0.472	0.391	1
224	(X12); (2); (8)	1.7 %	0.1	17.10	500	201.0	2.010	6.075	3.022	28.076	26,948	0.0242	16.157	3.542	32.02	0.180	0.820	0.0125	0.443	0.429	1
225	(X12); (1.4); (9)	0.0 %	0.1	16.90	500	143.4	1.434	4.186	2.918	20.214	23,347	0.0251	14.075	3.048	27.55	0.178	0.822	0.0124	0.415	0.429	1
226	(X27); (3); (7)	0.4 %	0.1	8.01	600	303.7	3.037	23.915	7.875	45.077	25,775	0.0245	16.976	0.866	32.10	0.049	0.951	0.0103	0.351	0.317	1
227	(X23); (2); (8)	1.9 %	0.4	8.37	600	202.5	2.025	7.879	3.891	31.106	21,253	0.0256	17.651	2.541	27.61	0.126	0.874	0.0108	0.416	0.440	1
228	(X29); (2); (8)	0.5 %	0.1	14.72	600	202.9	2.029	19.850	9.781	30.005	25,348	0.0246	13.298	0.467	27.09	0.034	0.966	0.0106	0.308	0.300	1
229	(X24); (2); (5)	1.0 %	0.3	15.91	600	202.5	2.025	9.952	4.914	30.112	26,144	0.0244	16.598	2.010	27.99	0.108	0.892	0.0110	0.474	0.406	1
230	(X21); (3); (8)	1.4 %	0.1	17.79	600	302.7	3.027	7.556	2.496		33,599	0.0230	21.184	5.030	29.59	0.192	0.808	0.0095	0.355	0.466	1
231	(X26); (1.4); (6)	1.6 %	0.0	18.24	600	144.8	1.448	9.880	6.825	22.262	24,142	0.0249	14.363	1.117	24.34	0.072	0.928	0.0110	0.453	0.387	1
232	(X24); (3); (7)	0.0 %	0.1	18.49	600	303.4	3.034	14.910	4.915		34,181	0.0229	20.557	2.103	32.03	0.093	0.907	0.0102	0.400	0.403	1
233	(X30); (2); (5)	0.0 %	0.2	9.07	600	203.0	2.030	22.030	10.855	30.598	21,692	0.0255	12.632	0.388	27.16	0.030	0.970	0.0106	0.303	0.284	1
234	(X27); (2); (8)	0.0 %	0.0	17.74	600	202.6	2.026	15.929	7.860		27,387	0.0241	14.303	0.866	27.93	0.057	0.943	0.0109	0.415	0.331	1
235	(X26); (3); (7)	1.0 %	0.6	17.05	600		3.033	21.134	6.969		32,979	0.0231	18.540	1.180	31.99	0.060	0.940	0.0102	0.380	0.351	1
236	(X30); (3); (6)	1.5 %	0.0	16.06	600	303.5	3.035	33.329	10.983		32,157	0.0233	17.101	0.308	29.80	0.018	0.982	0.0095	0.180	0.310	1
237	(X30); (2); (7)	0.0 %	0.1	19.08	600	202.8	2.028	21.959	10.825		28,305	0.0240	12.353	0.390	26.93	0.031	0.969	0.0106	0.310	0.278	1
238	(X28); (2); (5)	0.6 %	0.1	14.33	600	202.9	2.029	17.910	8.827		25,085	0.0246	13.997	0.564	27.01	0.039	0.961	0.0106	0.315	0.317	1
239	(X29); (3); (7)	1.7 %	0.0	13.09	600	304.0	3.040	30.151	9.919		29,735	0.0237	16.758	0.351	30.29	0.021	0.979	0.0097	0.187	0.304	1
240	(X22); (3); (7)	2.3 %	0.1	12.45	600	302.6	3.026	8.927	2.951		29,220	0.0238	20.649	4.243	31.71	0.170	0.830	0.0101	0.401	0.443	1
241	(X21); (2); (7)	4.0 %	0.5	14.23	600	202.3	2.023	5.051	2.498	29.594	25,019	0.0247	16.593	4.301	26.37	0.206	0.794	0.0103	0.388	0.455	1
242	(X28); (1.4); (6)	0.8 %	0.0	16.36	600	145.0	1.450	12.505	8.624	22.254	23,026	0.0251	12.687	0.676	24.25	0.051	0.949	0.0109	0.406	0.334	1
243	(X25); (3); (7)	0.6 %	0.0	18.04	600	303.3	3.033	17.819	5.876	45.134	33,806	0.0230	19.944	1.617	32.04	0.075	0.925	0.0102	0.395	0.384	1
244	(X23); (3); (7)	0.9 %	0.2	18.93	600	303.2	3.032	12.102	3.992		34,557	0.0229	21.076	2.829	32.06	0.118	0.882	0.0103	0.402	0.425	1
245	(X24); (1.4); (6)	2.1 %	0.0	17.05	600	144.7	1.447	7.070	4.886	21.848	23,435	0.0250	15.148	1.603	24.38	0.096	0.904	0.0110	0.411	0.419	1

N.º	Código	Requisitos			Variables independientes								Variables dependientes								E
		$\%\Delta P_1$	$\Delta T°$	T_{med}	L/D	H_1	H_{real}	H_{real}	h/H	h_{max}	Re	f	Q	q	n	q/Q_T	Q/Q_T	nD/v_c	η	Q_T/v_cD^2	
		%	°C	°C	[ ]	cm	m	[ ]	[ ]	m	[ ]	[ ]	l/min	l/min	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	
246	(X22); (2); (5)	0.8 %	0.1	16.70	600	202.2	2.022	6.049	2.992	29.504	26,679	0.0243	17.108	3.476	27.13	0.169	0.831	0.0106	0.405	0.449	1
247	(X25); (2); (8)	0.0 %	0.4	15.96	600	202.5	2.025	12.045	5.948		26,177	0.0244	16.169	1.392	28.57	0.079	0.921	0.0112	0.426	0.383	1
248	(X28); (3); (7)	1.1 %	0.3	15.22	600	303.6	3.036	26.996	8.893		31,464	0.0234	16.706	0.451	29.31	0.026	0.974	0.0094	0.213	0.305	1
249	(X26); (2); (5)	1.5 %	0.1	13.93	600	202.7	2.027	14.184	6.996	30.103	24,822	0.0247	15.262	1.119	28.63	0.068	0.932	0.0112	0.440	0.357	1
250	(X22); (1.4); (6)	1.2 %	0.0	13.39	600	144.5	1.445	4.158	2.877	22.346	21,301	0.0256	15.424	2.918	22.93	0.159	0.841	0.0103	0.355	0.459	1
251	(X10); (3); (10)	0.0 %	0.1	15.81	400	303.7	3.037	33.072	10.890	36.747	31,953	0.0233	14.518	0.301	43.91	0.020	0.980	0.0140	0.205	0.264	1
252	(X2); (3); (10)	1.2 %	0.0	15.76	400	303.1	3.031	8.931	2.947		31,912	0.0233	19.588	4.335	43.74	0.181	0.819	0.0140	0.431	0.426	1
253	(X6); (2); (8)	0.0 %	0.0	15.66	400	202.6	2.026	13.984	6.902	24.191	25,978	0.0244	13.232	0.907	38.28	0.064	0.936	0.0150	0.404	0.308	1
254	(X9); (1.4); (9)	0.0 %	0.1	15.52	400	144.7	1.447	13.881	9.592	16.944	22,533	0.0253	10.514	0.320	34.02	0.030	0.970	0.0153	0.262	0.271	1
255	(X8); (3); (10)	0.8 %	0.1	15.22	400	303.5	3.035	26.537	8.744		31,464	0.0234	14.723	0.442	44.04	0.029	0.971	0.0141	0.233	0.270	1
256	(X6); (3); (10)	1.0 %	0.1	14.82	400	303.4	3.034	20.922	6.897		31,140	0.0234	16.148	0.915	44.24	0.054	0.946	0.0142	0.334	0.304	1
257	(X5); (1.4); (9)	0.6 %	0.1	14.43	400	144.5	1.445	8.343	5.775	17.145	21,899	0.0254	13.063	1.107	34.90	0.078	0.922	0.0157	0.405	0.355	1
258	(X4); (2); (8)	0.0 %	0.1	14.13	400	202.3	2.023	10.103	4.995	24.083	24,953	0.0247	15.403	1.778	39.67	0.103	0.897	0.0155	0.461	0.374	1
259	(X9); (3); (10)	1.7 %	0.0	13.78	400	303.5	3.035	29.848	9.834		30,294	0.0236	14.947	0.395	44.19	0.026	0.974	0.0141	0.233	0.273	1
260	(X8); (2); (8)	1.2 %	0.0	13.49	400	202.7	2.027	17.857	8.809	24.285	24,528	0.0248	11.800	0.415	38.19	0.034	0.966	0.0150	0.274	0.266	1
261	(X6); (1.4); (9)	1.0 %	0.0	13.29	400	144.6	1.446	9.796	6.776	17.142	21,244	0.0256	12.185	0.817	34.49	0.063	0.937	0.0155	0.387	0.325	1
262	(X1); (2); (9)	0.0 %	0.0	13.09	400	202.1	2.021	4.592	2.272	23.978	24,268	0.0248	15.576	5.089	36.70	0.246	0.754	0.0144	0.416	0.450	1
263	(X8); (1.4); (9)	0.4 %	0.2	15.76	400	144.7	1.447	12.530	8.661	16.842	22,678	0.0252	11.208	0.462	34.00	0.040	0.960	0.0153	0.316	0.292	1
264	(X7); (3); (10)	0.4 %	0.1	13.24	400	303.4	3.034	23.825	7.854		29,855	0.0237	15.130	0.584	42.79	0.037	0.963	0.0137	0.265	0.280	1
265	(X7); (1.4); (9)	0.5 %	0.0	18.04	400	144.7	1.447	11.207	7.748		24,024	0.0249	11.044	0.636	33.92	0.054	0.946	0.0153	0.389	0.292	1
266	(X5); (3); (10)	0.9 %	0.0	17.94	400	302.9	3.029	17.997	5.943	38.088	33,723	0.0230	17.720	1.524	44.81	0.079	0.921	0.0143	0.425	0.342	1
267	(X4); (3); (10)	0.7 %	0.0	17.45	400	302.9	3.029	14.958	4.938		33,309	0.0231	18.467	2.083	44.97	0.101	0.899	0.0144	0.444	0.366	1
268	(X4); (1.4); (9)	0.0 %	0.1	17.10	400	144.3	1.443	7.045	4.881	17.663	23,465	0.0250	13.180	1.599	35.29	0.108	0.892	0.0159	0.471	0.370	1
269	(X1); (3); (10)	1.5 %	0.1	16.70	400	302.3	3.023	6.993	2.313		32,690	0.0232	20.503	5.766	41.28	0.220	0.780	0.0132	0.369	0.467	1
270	(X2); (2); (8)	0.0 %	0.1	16.11	400	202.3	2.023	6.023	2.978	24.499	26,278	0.0244	15.784	3.677	38.35	0.189	0.811	0.0150	0.461	0.424	1
271	(X10); (2); (9)	0.5 %	0.1	15.52	400	202.9	2.029	21.894	10.792		25,878	0.0245	10.641	0.189	38.13	0.017	0.983	0.0149	0.174	0.236	1
272	(X10); (3); (8)	0.9 %	0.0	14.97	400	303.4	3.034	32.813	10.815		31,262	0.0234	14.963	0.299	43.56	0.020	0.980	0.0139	0.196	0.271	1
273	(X3); (1.4); (9)	0.0 %	0.0	14.48	400	144.3	1.443	5.613	3.889	17.553	21,928	0.0254	13.580	2.128	34.77	0.135	0.865	0.0157	0.453	0.393	1

N.º	Código	Requisitos		Variables independientes								Variables dependientes									E
		$\%\Delta P_1$	$\Delta T°$	T_{med}	L/D	H_1	H_{real}	H_{real}	h/H	h_{max}	Re	f	Q	q	n	q/Q_T	Q/Q_T	nD/v_c	η	Q_T/v_cD^2	
		%	°C	°C	[ ]	cm	m	[ ]	[ ]	m	[ ]	[ ]	l/min	l/min	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	
274	(X2); (1.4); (9)	1.2 %	0.2	14.18	400		1.443	4.158	2.881		21,756	0.0255	13.100	3.285	33.53	0.200	0.800	0.0151	0.472	0.410	1
275	(X3); (3); (10)	0.4 %	0.0	13.68	400	302.9	3.029	12.066	3.984		30,214	0.0236	19.606	2.897	44.07	0.129	0.871	0.0141	0.441	0.400	1
276	(X24); (1.4); (9)	0.7 %	0.2	13.78	600	144.6	1.446	7.067	4.887	22.552	21,528	0.0256	15.151	1.817	24.11	0.107	0.893	0.0109	0.466	0.425	1
277	(X21); (3); (10)	1.7 %	0.0	19.53	600	302.0	3.020	7.444	2.465		35,060	0.0228	21.548	5.132	29.34	0.192	0.808	0.0094	0.349	0.475	1
278	(X24); (2); (8)	1.6 %	0.0	16.95	600	202.4	2.024	9.980	4.931	30.220	26,847	0.0243	17.271	2.016	28.52	0.105	0.895	0.0112	0.459	0.420	1
279	(X24); (3); (10)	0.0 %	0.1	14.03	600	303.2	3.032	14.899	4.915		30,495	0.0235	19.925	2.126	32.52	0.096	0.904	0.0104	0.418	0.392	1
280	(X21); (2); (9)	1.0 %	0.1	13.54	600	202.3	2.023	4.923	2.434	30.102	24,561	0.0248	17.156	4.194	26.49	0.196	0.804	0.0104	0.350	0.465	1
281	(X29); (1.4); (9)	2.2 %	0.0	13.09	600	144.9	1.449	14.030	9.685	22.039	21,131	0.0257	12.574	0.507	23.56	0.039	0.961	0.0106	0.350	0.327	1
282	(X25); (3); (10)	0.0 %	0.4	12.69	600		3.035	17.753	5.849		29,418	0.0237	19.413	1.670	32.85	0.079	0.921	0.0105	0.417	0.375	1
283	(X23); (3); (10)	0.0 %	0.1	12.84	600	302.9	3.029	12.040	3.975		29,537	0.0237	20.221	2.819	32.38	0.122	0.878	0.0104	0.415	0.410	1
284	(X26); (1.4); (9)	2.1 %	0.0	12.50	600	144.7	1.447	9.948	6.874	22.650	20,792	0.0258	14.403	1.062	24.35	0.069	0.931	0.0110	0.433	0.387	1
285	(X30); (3); (8)	0.6 %	0.1	12.25	600	303.8	3.038	32.750	10.779	43.870	29,062	0.0238	16.595	0.336	30.66	0.020	0.980	0.0098	0.198	0.301	1
286	(X23); (1.4); (9)	0.9 %	0.0	11.80	600	144.6	1.446	5.586	3.864	22.852	20,397	0.0259	15.260	2.159	23.22	0.124	0.876	0.0105	0.405	0.436	1
287	(X28); (3); (10)	0.4 %	0.0	11.70	600	303.7	3.037	26.984	8.886		28,623	0.0239	16.196	0.480	30.55	0.029	0.971	0.0098	0.234	0.297	1
288	(X29); (3); (10)	0.3 %	0.1	11.34	600	303.6	3.036	30.043	9.895		28,344	0.0239	15.978	0.375	30.36	0.023	0.977	0.0097	0.208	0.291	1
289	(X26); (2); (8)	0.0 %	0.1	14.72	600	202.6	2.026	13.982	6.901		25,348	0.0246	15.412	1.164	28.58	0.070	0.930	0.0112	0.446	0.361	1
290	(X28); (2); (8)	0.0 %	0.2	15.66	600	202.8	2.028	17.760	8.758		25,978	0.0244	13.750	0.570	27.38	0.040	0.960	0.0107	0.322	0.312	1
291	(X22); (1.4); (9)	2.4 %	0.2	16.46	600	144.4	1.444	4.237	2.935	22.255	23,085	0.0251	14.659	3.259	23.02	0.182	0.818	0.0104	0.430	0.448	1
292	(X22); (3); (10)	0.6 %	0.2	13.19	600	302.4	3.024	8.903	2.944	44.385	29,815	0.0237	21.197	4.212	31.57	0.166	0.834	0.0101	0.386	0.452	1
293	(X30); (2); (9)	1.9 %	0.4	16.85	600	202.8	2.028	22.154	10.922		26,780	0.0243	12.566	0.386	27.35	0.030	0.970	0.0107	0.305	0.282	1
294	(X26); (3); (10)	1.9 %	0.0	17.05	600	303.1	3.031	20.827	6.871		32,979	0.0231	19.250	1.201	31.81	0.059	0.941	0.0102	0.366	0.364	1
295	(X27); (3); (10)	0.9 %	0.1	16.90	600	303.4	3.034	23.992	7.907		32,855	0.0232	17.305	0.736	31.09	0.041	0.959	0.0099	0.294	0.321	1
296	(X22); (2); (8)	3.5 %	0.0	16.65	600	202.2	2.022	5.921	2.928	30.116	26,646	0.0243	16.868	3.615	27.26	0.176	0.824	0.0107	0.413	0.446	1
297	(X25); (1.4); (9)	1.2 %	0.1	15.71	600	144.6	1.446	8.268	5.717	22.150	22,649	0.0252	15.249	1.269	24.43	0.077	0.923	0.0110	0.393	0.413	1
298	(X30); (3); (10)	0.6 %	0.1	15.52	600	303.4	3.034	32.254	10.630		31,708	0.0233	17.124	0.314	29.99	0.018	0.982	0.0096	0.176	0.310	1
299	(X28); (1.4); (9)	0.8 %	0.1	14.82	600	144.7	1.447	12.451	8.604	22.147	22,129	0.0254	13.090	0.623	24.13	0.045	0.955	0.0109	0.362	0.343	1
300	(X27); (1.4); (9)	0.9 %	0.1	14.23	600	144.7	1.447	11.276	7.792		21,785	0.0255	13.654	0.773	24.20	0.054	0.946	0.0109	0.384	0.361	1
301	(X23); (1.4); (9)	1.8 %	0.4	15.27	600	144.3	1.443	5.665	3.925	22.046	22,388	0.0253	15.330	2.145	23.45	0.123	0.877	0.0106	0.409	0.437	2

N.º	Código	Requisitos			Variables independientes							Variables dependientes									E
		$\%\Delta P_1$	$\Delta T°$	T_{med}	L/D	H_1	H_{real}	H_{real}	h/H	h_{max}	Re	f	Q	q	n	q/Q_T	Q/Q_T	nD/v_c	η	Q_T/v_cD^2	
		%	°C	°C	[ ]	cm	m	[ ]	[ ]	m	[ ]	[ ]	l/min	l/min	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	
302	(X22); (1.4); (6)	1.2 %	0.4	16.46	600	144.4	1.444	4.211	2.916		23,085	0.0251	15.048	3.085	23.22	0.170	0.830	0.0105	0.393	0.454	2
303	(X23); (2); (8)	1.3 %	0.1	17.50	600	202.2	2.022	8.015	3.963	30.120	27,218	0.0242	17.002	2.566	28.09	0.131	0.869	0.0110	0.447	0.426	2
304	(X27); (2); (8)	0.0 %	0.1	18.68	600	202.7	2.027	16.136	7.959		28,032	0.0240	14.526	0.841	27.88	0.055	0.945	0.0109	0.403	0.335	2
305	(X12); (1.4); (9)	1.2 %	0.2	17.45	500	143.4	1.434	4.161	2.901	19.808	23,670	0.0250	14.276	3.153	27.61	0.181	0.819	0.0124	0.420	0.436	2
306	(X16); (1.4); (9)	2.1 %	0.1	17.30	500	143.7	1.437	9.853	6.858		23,582	0.0250	13.152	0.993	28.96	0.070	0.930	0.0130	0.442	0.354	2
307	(X13); (1.4); (9)	1.9 %	0.1	16.90	500	143.4	1.434	5.564	3.879		23,347	0.0251	14.660	2.132	28.79	0.127	0.873	0.0130	0.419	0.420	2
308	(X13); (2); (8)	3.3 %	0.3	14.33	500	201.8	2.018	7.883	3.907	27.146	25,085	0.0246	17.087	2.604	32.94	0.132	0.868	0.0129	0.443	0.429	2
309	(X12); (2); (5)	0.9 %	0.1	16.41	500	201.5	2.015	5.997	2.977		26,478	0.0243	16.122	3.749	32.00	0.189	0.811	0.0125	0.460	0.433	2
310	(X16); (2); (8)	1.5 %	0.1	15.02	500	201.9	2.019	13.982	6.927		25,546	0.0245	14.438	1.065	33.04	0.069	0.931	0.0130	0.437	0.338	2
311	(X20); (2); (9)	0.5 %	0.1	15.71	500	202.2	2.022	21.895	10.827		26,011	0.0244	11.970	0.371	32.21	0.030	0.970	0.0126	0.305	0.269	2
312	(X20); (2); (1)	0.0 %	0.0	14.97	500	202.2	2.022	21.841	10.803	28.067	25,513	0.0245	11.979	0.376	32.18	0.030	0.970	0.0126	0.307	0.269	2
313	(X18); (1.4); (3)	3.3 %	0.0	13.68	500	143.7	1.437	12.653	8.804	20.510	21,471	0.0256	12.047	0.550	28.16	0.044	0.956	0.0127	0.356	0.315	2
314	(X9); (1.4); (3)	0.0 %	0.0	13.19	400	145.0	1.450	13.775	9.503	17.040	21,187	0.0256	10.575	0.335	33.66	0.031	0.969	0.0152	0.269	0.273	2
315	(X6); (1.4); (9)	0.5 %	0.1	13.04	400	144.6	1.446	9.719	6.720		21,102	0.0257	12.293	0.856	34.10	0.065	0.935	0.0154	0.398	0.329	2
316	(X2); (1.4); (9)	1.2 %	0.1	12.94	400	144.3	1.443	4.209	2.917	17.243	21,046	0.0257	13.451	3.131	33.09	0.189	0.811	0.0149	0.446	0.415	2
317	(X1); (2); (5)	2.2 %	0.1	12.74	400	202.0	2.020	4.540	2.248	23.977	24,041	0.0249	15.355	5.175	36.47	0.252	0.748	0.0143	0.421	0.447	2
318	(X2); (2); (5)	0.0 %	0.0	12.69	400	202.1	2.021	6.020	2.978		24,008	0.0249	15.492	3.780	38.07	0.196	0.804	0.0149	0.483	0.420	2
319	(X7); (2); (8)	0.6 %	0.1	14.62	400	202.2	2.022	15.972	7.900	24.289	25,282	0.0246	12.630	0.601	38.23	0.045	0.955	0.0150	0.329	0.288	2
320	(X10); (2); (5)	0.5 %	0.0	14.48	400	202.9	2.029	22.197	10.941		25,183	0.0246	10.171	0.144	37.96	0.014	0.986	0.0149	0.141	0.225	2
321	(X6); (2); (8)	0.7 %	0.4	15.17	400	202.5	2.025	14.034	6.931	24.189	25,646	0.0245	12.978	0.808	38.76	0.059	0.941	0.0152	0.369	0.300	2
322	(X1); (2); (7)	1.1 %	0.0	14.08	400		2.019	4.669	2.312		24,920	0.0247	16.168	5.049	35.53	0.238	0.762	0.0139	0.410	0.462	2
323	(X18); (3); (10)	0.4 %	0.2	16.16	500	302.6	3.026	27.000	8.924		32,239	0.0233	15.322	0.416	36.35	0.026	0.974	0.0116	0.215	0.280	2
324	(X6); (2); (2)	0.7 %	0.5	14.43	400	202.4	2.024	14.032	6.932	24.289	25,150	0.0246	13.534	0.876	38.46	0.061	0.939	0.0151	0.384	0.314	2
325	(X18); (3); (4)	0.0 %	0.1	12.45	500		3.025	27.037	8.937	39.790	29,220	0.0238	15.100	0.447	36.31	0.029	0.971	0.0116	0.235	0.277	2
326	(X18); (3); (4)	1.5 %	0.0	12.10	500		3.025	26.934	8.903		28,944	0.0238	15.183	0.454	36.52	0.029	0.971	0.0117	0.236	0.278	2
327	(X19); (1.4); (6)	0.8 %	0.1	15.32	500		1.441	13.728	9.528	20.719	22,417	0.0253	11.482	0.512	28.18	0.043	0.957	0.0127	0.380	0.300	2
328	(X11); (2); (5)	0.0 %	0.0	11.09	500		2.012	4.743	2.357	27.543	22,970	0.0252	15.167	5.027	31.26	0.249	0.751	0.0123	0.450	0.440	2
329	(X29); (3); (1)	0.0 %	0.1	14.23	600	302.9	3.029	30.615	10.107		30,656	0.0235	17.736	0.344	30.52	0.019	0.981	0.0098	0.177	0.322	3

N.º	Código	Requisitos			Variables independientes								Variables dependientes								E
		$\%\Delta P_1$	$\Delta T°$	T_{med}	L/D	H_1	H_{real}	H_{real}	h/H	h_{max}	Re	f	Q	q	n	q/Q_T	Q/Q_T	nD/v_c	η	Q_T/v_cD^2	
		%	°C	°C	[ ]	cm	m	[ ]	[ ]	m	[ ]	[ ]	l/min	l/min	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	
330	(X17); (3); (10)	1.7 %	0.0	17.25	500	302.3	3.023	24.095	7.971	42.269	33,144	0.0231	15.777	0.612	36.12	0.037	0.963	0.0116	0.270	0.292	2
331	(X10); (2); (7)	0.9 %	0.0	10.99	400		2.028	22.136	10.916	24.584	22,906	0.0252	11.036	0.147	37.63	0.013	0.987	0.0147	0.132	0.244	2
332	(X9); (2); (8)	1.0 %	0.1	11.44	400		2.027	20.403	10.065	24.279	23,197	0.0251	10.841	0.257	38.90	0.023	0.977	0.0152	0.215	0.242	2
333	(X22); (3); (4)	0.6 %	0.0	19.03	600		3.025	8.911	2.946		34,640	0.0229	21.319	4.071	31.79	0.160	0.840	0.0102	0.372	0.452	2
334	(X30); (2); (5)	0.9 %	0.0	17.94	600	202.7	2.027	22.158	10.929	30.123	27,522	0.0241	12.671	0.374	26.92	0.029	0.971	0.0106	0.293	0.284	2
335	(X30); (2); (7)	0.9 %	0.1	14.72	600	203.1	2.031	22.044	10.854	29.494	25,348	0.0246	12.537	0.396	27.21	0.031	0.969	0.0107	0.312	0.282	2
336	(X21); (3); (10)	2.1 %	0.0	14.28	600	301.9	3.019	7.475	2.476		30,696	0.0235	21.731	5.030	30.11	0.188	0.812	0.0096	0.342	0.476	2
337	(X11); (2); (3)	0.0 %	0.1	17.99	500	201.3	2.013	4.748	2.359	28.387	27,556	0.0241	16.922	4.376	30.81	0.205	0.795	0.0121	0.351	0.464	2
338	(X11); (3); (2)	1.4 %	0.0	19.03	500		3.016	7.251	2.404		34,640	0.0229	20.150	5.433	35.93	0.212	0.788	0.0115	0.379	0.455	2
339	(X17); (3); (10)	0.0 %	0.1	16.21	500	302.4	3.024	23.887	7.899		32,280	0.0232	15.799	0.636	36.64	0.039	0.961	0.0117	0.278	0.292	2
340	(X12); (3); (10)	0.6 %	0.1	12.45	500	301.4	3.014	9.004	2.988		29,220	0.0238	19.843	4.331	36.97	0.179	0.821	0.0118	0.434	0.430	2
341	(X18); (3); (4)	1.2 %	0.1	11.75	500		3.025	26.576	8.784	40.195	28,663	0.0239	14.535	0.468	36.70	0.031	0.969	0.0117	0.251	0.267	2
342	(X5); (3); (7)	2.3 %	0.1	12.35	400		3.032	18.364	6.058	37.953	29,141	0.0238	16.973	1.410	45.84	0.077	0.923	0.0147	0.420	0.327	2
343	(X8); (3); (1)	1.6 %	0.2	17.55	400	303.2	3.032	26.445	8.723	38.085	33,392	0.0231	14.678	0.413	43.60	0.027	0.973	0.0139	0.217	0.268	2
344	(X5); (3); (7)	0.0 %	0.1	14.82	400	303.3	3.033	17.962	5.923		31,140	0.0234	17.960	1.459	44.33	0.075	0.925	0.0142	0.400	0.345	2
345	(X10); (3); (6)	5.6 %	0.0	11.80	400		3.035	33.768	11.126	36.829	28,703	0.0239	14.487	0.281	44.01	0.019	0.981	0.0141	0.196	0.263	3
346	(X10); (3); (6)	3.5 %	0.0	14.67	400		3.035	29.086	9.584		31,019	0.0235	14.434	0.423	45.18	0.028	0.972	0.0145	0.251	0.264	3
347	(X7); (2); (8)	1.2 %	0.0	18.14	400		2.023	16.951	8.377	24.712	27,658	0.0241	12.895	0.538	37.84	0.040	0.960	0.0148	0.308	0.293	3
348	(X1); (2); (7)	1.1 %	0.0	14.08	400		2.019	4.669	2.312		24,920	0.0247	16.168	5.049	35.53	0.238	0.762	0.0139	0.410	0.462	3
349	(X1); (3); (8)	0.0 %	0.1	14.03	400		3.024	6.021	1.991	37.451	30,495	0.0235	18.402	7.242	40.42	0.282	0.718	0.0129	0.390	0.456	3
350	(X2); (1.4); (6)	1.2 %	0.1	11.95	400		1.443	4.361	3.022		20,483	0.0259	14.042	2.909	33.61	0.172	0.828	0.0151	0.419	0.424	3
351	(X11); (3); (4)	0.7 %	0.0	13.09	500		3.016	6.913	2.292	40.099	29,735	0.0237	19.650	5.955	35.37	0.233	0.767	0.0113	0.392	0.455	3
352	(X18); (3); (4)	0.0 %	0.1	12.45	500		3.025	27.037	8.937	39.790	29,220	0.0238	15.100	0.447	36.31	0.029	0.971	0.0116	0.235	0.277	3
353	(X18); (3); (1)	1.2 %	0.0	6.05	500	302.5	3.025	26.871	8.882		24,316	0.0248	15.318	-	36.18			0.0116		-	3
354	(X13); (3); (1)	0.4 %	0.1	12.45	500		3.019	11.963	3.962		29,220	0.0238	-	3.333	38.40			0.0123		-	3
355	(X6); (1.4); (3)	0.5 %	0.1	16.90	400		1.446	9.826	6.796	17.458	23,347	0.0251	12.202		34.77			0.0157		-	3
356	(X2); (1.4); (3)	1.2 %	0.0	12.30	400		1.443	4.157	2.881	17.650	20,680	0.0258	14.427	2.754	33.99	0.160	0.840	0.0153	0.359	0.430	3
357	(X2); (1.4); (3)	1.2 %	0.0	18.04	400		1.443	4.212	2.919	17.053	24,024	0.0249	15.038	2.614	34.43	0.148	0.852	0.0155	0.334	0.442	3

N.º	Código	Requisitos			Variables independientes								Variables dependientes								E
		$\%\Delta P_1$	$\Delta T°$	T_{med}	L/D	H_1	H_{real}	H_{real}	h/H	h_{max}	Re	f	Q	q	n	q/Q_T	Q/Q_T	nD/v_c	η	Q_T/v_cD^2	
		%	°C	°C	[ ]	cm	m	[ ]	[ ]	m	[ ]	[ ]	l/min	l/min	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	
358	(X12); (2); (5)	0.8 %	0.0	18.04	500	201.1	2.011	6.101	3.034	27.775	27,590	0.0241	18.251	3.231	31.84	0.150	0.850	0.0125	0.360	0.468	3
359	(X12); (2); (5)	0.7 %	0.0	17.25	500	201.2	2.012	7.070	3.515	28.179	27,049	0.0242	17.183	2.814	31.99	0.141	0.859	0.0125	0.412	0.436	3
360	(X12); (1.4); (6)	2.4 %	0.0	12.30	500		1.434	4.183	2.916	20.303	20,680	0.0258	15.155	2.849	27.82	0.158	0.842	0.0125	0.360	0.451	3
361	(X14); (1.4); (6)	0.7 %	0.2	17.45	500	143.6	1.436	7.071	4.923	20.318	23,670	0.0250	14.326	1.510	29.03	0.095	0.905	0.0131	0.413	0.396	3
362	(X28); (3); (1)	1.5 %	0.8	16.36	600	302.7	3.027	26.848	8.869	45.427	32,403	0.0232	17.703	0.508	30.23	0.028	0.972	0.0097	0.226	0.324	3
363	(X29); (1.4); (3)	0.7 %	0.0	12.69	600	145.0	1.450	13.927	9.604	22.650	20,905	0.0257	12.787	0.515	23.71	0.039	0.961	0.0107	0.347	0.333	3
364	(X25); (1.4); (3)	3.8 %	0.1	18.58	600	144.4	1.444	8.272	5.728	22.161	24,349	0.0248	15.073	1.223	24.41	0.075	0.925	0.0110	0.384	0.408	3
365	(X6); (3); (1)	0.0 %	0.0	16.65	400	303.3	3.033	20.826	6.866		32,649	0.0232	15.969	0.989	44.34	0.058	0.942	0.0142	0.363	0.302	3
366	(X5); (1.4); (3)	1.2 %	0.1	16.31	400	144.5	1.445	8.371	5.793	17.762	22,997	0.0252	12.423	1.206	34.82	0.089	0.911	0.0157	0.465	0.341	3
367	(X9); (1.4); (3)	0.7 %	0.0	14.77	400	144.9	1.449	13.829	9.546	17.656	22,100	0.0254	10.420	0.398	33.77	0.037	0.963	0.0152	0.326	0.271	3
368	(X3); (2); (5)	0.7 %	0.0	18.63	400		2.020	7.889	3.905	24.306	27,998	0.0240	15.740	2.298	39.38	0.127	0.873	0.0154	0.424	0.393	3
369	(X2); (1.4); (3)	1.2 %	0.0	12.30	400		1.443	4.157	2.881		20,680	0.0258	14.427	2.754	33.99	0.160	0.840	0.0153	0.359	0.430	3
370	(X6); (2); (5)	2.8 %	0.1	17.10	400		2.025	14.702	7.261	24.605	26,948	0.0242	13.518	0.792	37.32	0.055	0.945	0.0146	0.367	0.312	3
371	(X10); (2); (1)	0.9 %	0.0	13.59	400	202.5	2.025	21.939	10.833	24.286	24,593	0.0248	10.635	0.106	38.07	0.010	0.990	0.0149	0.098	0.234	3
372	(X1); (2); (1)	1.1 %	0.2	15.37	400	201.9	2.019	4.567	2.263		25,778	0.0245	15.608	5.034	36.82	0.244	0.756	0.0144	0.407	0.450	3
373	(X14); (2); (7)	0.0 %	0.3	13.93	500	201.3	2.013	10.000	4.968	28.165	24,822	0.0247	16.697	1.903	32.37	0.102	0.898	0.0127	0.452	0.405	3
374	(X13); (1.4); (3)	0.9 %	0.1	18.78	500		1.435	5.643	3.932	21.038	24,468	0.0248	14.268	2.041	29.11	0.125	0.875	0.0131	0.419	0.408	3
375	(X11); (2); (7)	1.1 %	0.1	11.95	500		2.012	4.820	2.396	27.953	23,523	0.0250	16.637	4.284	31.38	0.205	0.795	0.0123	0.359	0.456	3
376	(X12); (1.4); (6)	0.0 %	0.1	16.70	500	143.5	1.435	4.237	2.953		23,231	0.0251	15.418	2.671	28.04	0.148	0.852	0.0126	0.338	0.453	3
377	(X13); (2); (8)	2.6 %	0.2	17.55	500		2.015	8.015	3.978	27.568	27,251	0.0242	16.878	2.401	32.68	0.125	0.875	0.0128	0.424	0.420	3
378	(X14); (1.4); (6)	1.5 %	0.1	16.41	500	143.6	1.436	7.044	4.905	20.621	23,055	0.0251	14.285	1.532	28.65	0.097	0.903	0.0129	0.419	0.396	3
379	(X12); (2); (5)	1.7 %	0.0	17.05	500	201.1	2.011	5.973	2.970		26,914	0.0242	17.184	3.445	31.64	0.167	0.833	0.0124	0.395	0.450	3
380	(X26); (3); (7)	1.9 %	0.0	17.35	600		3.033	20.829	6.868		33,226	0.0231	19.522	1.180	31.93	0.057	0.943	0.0102	0.355	0.368	3
381	(X30); (3); (4)	4.7 %	0.1	7.31	600		3.035	31.869	10.502		25,246	0.0246	15.031	0.377	31.50	0.024	0.976	0.0101	0.238	0.274	3
382	(X7); (3); (10)	1.7 %	0.2	16.46	400	303.7	3.037	23.990	7.899		32,485	0.0232	14.600	0.512	42.82	0.034	0.966	0.0137	0.242	0.269	3
383	(X8); (2); (2)	0.0 %	0.0	17.05	400		2.027	17.969	8.863	24.299	26,914	0.0242	11.828	0.449	38.59	0.037	0.963	0.0151	0.299	0.268	3
384	(X4); (2); (2)	1.0 %	0.1	14.72	400	202.2	2.022	9.951	4.921		25,348	0.0246	14.772	1.805	39.73	0.109	0.891	0.0156	0.479	0.361	3
385	(X24); (2); (8)	1.0 %	0.0	14.28	600	202.5	2.025	9.848	4.864	30.105	25,052	0.0246	17.425	1.944	28.24	0.100	0.900	0.0111	0.431	0.422	3

N.º	Código	Requisitos			Variables independientes										Variables dependientes						E
		$\%\Delta P_1$	$\Delta T°$	T_{med}	L/D	H_1	H_{real}	H_{real}	h/H	h_{max}	Re	f	Q	q	n	q/Q_T	Q/Q_T	nD/v_c	η	Q_T/v_cD^2	
		%	°C	°C	[ ]	cm	m	[ ]	[ ]	m	[ ]	[ ]	l/min	l/min	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	
386	(X26); (2); (8)	0.0 %	0.2	14.18	600	202.6	2.026	14.797	7.304	29.798	24,986	0.0247	15.118	1.041	28.24	0.064	0.936	0.0111	0.434	0.352	3
387	(X17); (3); (10)	0.9 %	0.0	15.27	500	302.6	3.026	22.046	7.286		31,505	0.0234	16.667	0.982	36.94	0.056	0.944	0.0118	0.370	0.314	3

Nota. “E” referido al estado de la prueba: 1 Válido, 2 Adicional, 3 Atípico, 4 Inválido. Nota2: Pruebas atípicas según software estadístico JASP.

19.4 Tabla de observaciones

Tabla 231

Tabla de observaciones

N.º	Observación	Estado
301	Shapiro-wilk, adicional.	Adicional
302	Shapiro-wilk, adicional.	Adicional
303	Shapiro-wilk, adicional.	Adicional
304	Shapiro-wilk, adicional.	Adicional
305	Shapiro-wilk, adicional.	Adicional
306	Shapiro-wilk, adicional.	Adicional
307	Valor atípico según software.	Adicional
308	Shapiro-wilk, adicional.	Adicional
309	Shapiro-wilk, adicional.	Adicional
310	Shapiro-wilk, adicional.	Adicional
311	Shapiro-wilk, adicional.	Adicional
312	Shapiro-wilk, adicional.	Adicional
313	Shapiro-wilk, adicional.	Adicional
314	Shapiro-wilk, adicional.	Adicional
315	Shapiro-wilk, adicional.	Adicional
316	Shapiro-wilk, adicional.	Adicional
317	Shapiro-wilk, adicional.	Adicional
318	Shapiro-wilk, adicional.	Adicional
319	Shapiro-wilk, adicional.	Adicional
320	Shapiro-wilk, adicional.	Adicional
321	Se realizó prueba de ejemplo grabada.	Adicional
322	Prueba adicional validada.	Adicional
323	Prueba adicional validada.	Adicional
324	Prueba adicional validada.	Adicional
325	Prueba adicional validada.	Adicional
326	Prueba adicional validada.	Adicional
327	Prueba adicional validada.	Adicional
328	Prueba adicional validada.	Adicional
329	No se registró la presión inicial.	Invalida
330	Prueba adicional validada.	Adicional
331	Prueba adicional validada.	Adicional
332	Prueba adicional validada.	Adicional
333	Valor atípico según software.	Adicional
334	Valor atípico según software.	Adicional
335	Prueba adicional validada.	Adicional
336	Valor atípico según software.	Adicional
337	Valor atípico según software.	Adicional
338	Prueba adicional validada.	Adicional
339	Prueba adicional validada.	Adicional
340	Valor atípico según software.	Adicional
341	Prueba adicional validada.	Adicional
342	Prueba adicional validada.	Adicional
343	Valor atípico según software.	Adicional

N.º	Observación	Estado
344	Prueba adicional validada.	Adicional
345	No cumple requisitos de prueba. %$\Delta P1$>5%	Invalida
346	Presión de prueba errónea.	Invalida
347	No cumple requisitos de prueba. %h>5%	Invalida
348	Datos duplicados.	Invalida
349	Presión de prueba errónea.	Invalida
350	No cumple requisitos de prueba. %h>3%	Invalida
351	Se cambio de h/H=2 a h/H=2.4	Invalida
352	Datos duplicados.	Invalida
353	No se registró la masa “m1”	Invalida
354	No se registró la masa “m2”	Invalida
355	No se registró tiempo de muestra 2.	Invalida
356	Golpes defectuosos	Invalida
357	Golpes defectuosos	Invalida
358	Golpes defectuosos	Invalida
359	Presión de prueba errónea.	Invalida
360	Golpes defectuosos	Invalida
361	Golpes defectuosos	Invalida
362	Golpes defectuosos	Invalida
363	Golpes defectuosos	Invalida
364	Golpes defectuosos	Invalida
365	No se registró el cronómetro N°2	Invalida
366	Retención del eje vertical por la silicona.	Invalida
367	Retención del eje vertical por la silicona.	Invalida
368	Golpes defectuosos	Invalida
369	Datos duplicados.	Invalida
370	No cumple requisitos de prueba. %h>5%	Invalida
371	Golpes defectuosos	Invalida
372	Golpes defectuosos	Invalida
373	Golpes defectuosos	Invalida
374	Golpes defectuosos	Invalida
375	Golpes defectuosos	Invalida
376	Golpes defectuosos	Invalida
377	Golpes defectuosos	Invalida
378	Golpes defectuosos	Invalida
379	Golpes defectuosos	Invalida
380	Golpes defectuosos	Invalida
381	No cumple requisitos de prueba. %h>3%	Invalida
382	Registro erróneo de manómetro por deterioro.	Invalida
383	Retención del eje vertical por la silicona.	Invalida
384	Datos duplicados.	Invalida
385	No se registró el cronómetro N°2	Invalida
386	Presión de prueba errónea.	Invalida
387	Presión de prueba errónea.	Invalida

Nota. Pruebas atípicas según análisis estadístico en software estadístico JASP.