

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica



TESIS

Diseño de un sistema de automatización mediante técnicas de control moderno del proceso de fumigación con Bromuro de Metilo en la agroindustria

Para obtener el título profesional de Ingeniero electrónico.

Elaborado por

David Enrique Ortega Solorzano

 [0000-0003-2621-6670](https://orcid.org/0000-0003-2621-6670)

Asesor

MSc. Ing. Juan Francisco Tisza Contreras

 [0000-0003-2548-2686](https://orcid.org/0000-0003-2548-2686)

LIMA – PERÚ

2024

Citar/How to cite	Ortega Solorzano [1]
Referencia/Reference	[1] D. Ortega Solorzano, " <i>Diseño de un sistema de automatización mediante técnicas de control moderno del proceso de fumigación con Bromuro de Metilo en la agroindustria</i> " [Tesis]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2024.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Ortega, 2024)
Referencia/Reference	Ortega, D. (2024). <i>Diseño de un sistema de automatización mediante técnicas de control moderno del proceso de fumigación con Bromuro de Metilo en la agroindustria</i> . [Tesis, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional CyberTesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

A mis padres.

Resumen

En esta Tesis se analizan todas las etapas del proceso de fumigación, que se utiliza para tratar frutas y verduras eliminando plagas antes de venderlas o importarlas. El objetivo principal es diseñar un sistema de automatización mediante técnicas modernas de control para el proceso de fumigación con el Bromuro de Metilo (BM) en la agroindustria. Los resultados se estiman mediante simulaciones realizadas en los programas MATLAB, Labview y COMSOL multiphysics.

Las estrategias de control evaluadas son el control predictivo basado en modelos (MPC), el control difuso (Fuzzy), y el control proporcional, integrativo y derivativo (PID). Además, se usa el método de elementos finitos para modelar la expulsión del BM al terminar el proceso.

La estrategia MPC se utiliza para mantener la temperatura de un vaporizador, el algoritmo PID se aplica para estabilizar la temperatura en el interior de la cámara de fumigación y el control difuso se emplea para mantener la concentración de BM bajo los estándares ambientales en la chimenea.

De los resultados obtenidos de la simulación de cada bucle de control y de la integración en su conjunto, se concluye que se puede gobernar el comportamiento de todas las etapas del proceso, de manera independiente y global.

Palabras clave — Fumigación, Automatización, MPC, Control Difuso.

Abstract

In this thesis, all stages of the fumigation process are analyzed, which is used to treat fruits and vegetables by eliminating pests before selling or importing them. The main objective is to design an automation system using modern control techniques for the fumigation process with Methyl Bromide (MB) in the agroindustry. The results are estimated through simulations carried out in the MATLAB, LabVIEW, and COMSOL Multiphysics programs.

The evaluated control strategies include Model Predictive Control (MPC), Fuzzy Control, and Proportional-Integral-Derivative (PID) control. Additionally, the finite element method is employed to model the release of MB at the end of the process.

The MPC strategy is used to maintain the temperature of a vaporizer, the PID algorithm was applied to stabilize the temperature inside the fumigation chamber, and fuzzy control is employed to maintain the concentration of MB within environmental standards in the chimney.

Based on the results obtained from the simulation of each control loop and their integration as a whole, it is concluded that it is possible to govern the behavior of all stages of the process, both independently and globally.

Keywords — Fumigation, Automation, MPC, Fuzzy Control.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	iv
Abstract.....	v
Introducción.....	xvi
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Descripción del Problema de Investigación	2
1.2.1 Formulación del problema general	4
1.2.2 Problemas específicos	4
1.3 Objetivos e hipótesis del Estudio y Estructura del trabajo	4
1.3.1 Objetivo General	4
1.3.2 Objetivos Específicos	4
1.3.3 Hipótesis general.....	5
1.3.4 Hipótesis secundarias	5
1.3.5 Estructura del trabajo	5
1.4 Antecedentes nacionales e internacionales	7
Capítulo II. Marco teórico y conceptual	10
2.1 Marco Teórico	10
2.1.1 Fumigación.....	10
2.1.2 Vaporizador	11
2.1.3 Refrigeración	12
2.1.4 Control MPC.....	13
2.1.5 Control Difuso.....	14
2.1.6 Simulación mediante COMSOL.....	15
2.1.7 Simulación mediante LabVIEW	15
2.2 Marco Conceptual.....	16
2.2.1 Fumigantes.....	16
2.2.2 Bromuro de Metilo	18
2.2.3 Normas de calidad y cuidado ambiental.....	19
2.2.4 Control Predictivo Basado en Modelo	20
2.2.5 Relaciones fundamentales del control MPC.....	22
2.2.6 Control DMC.....	24

2.2.7 Control difuso	29
2.2.8 Conjuntos difusos.....	29
2.2.9 Funciones de membresía.....	30
2.2.10 Operaciones difusas.....	31
2.2.11 Fuzzificación.....	32
2.2.12 Reglas difusas.....	33
2.2.13 Defuzzificación	35
2.2.14 Función de transferencia	36
2.2.15 Respuestas sobre amortiguadas.....	37
2.2.16 Toolbox System Identification Tool de Matlab	38
Capítulo III. Planta de fumigación.....	42
3.1 Descripción general.	42
3.2 Planta de Fumigación	43
3.3 Plano de automatización de la planta de fumigación	44
Capítulo IV. Etapas del proceso de fumigación	47
4.1 Etapa de Carga del Producto.....	47
4.1.1 Descripción de la etapa de carga del producto	47
4.1.2 Proceso de carga del producto	47
4.2 Etapa de Dosificación	49
4.2.1 Descripción de la etapa de dosificación	49
4.2.2 Proceso de dosificación.....	49
4.2.3 Control de la temperatura del vaporizador	49
4.2.4 Control de la dosis ingresada	49
4.3 Etapa de Exposición	51
4.3.1 Descripción de la etapa de exposición	51
4.3.2 Proceso de exposición	51
4.3.3 Control del tiempo de exposición	51
4.3.4 Control de la concentración de BM	51
4.3.5 Control de la temperatura interior de la cámara de fumigación	52
4.4 Etapa de Aireación.....	53
4.4.1 Descripción de la etapa de aireación	53
4.4.2 Proceso de aireación.....	53
4.4.3 Control de la cantidad de BM expulsado	53
4.5 Etapa de descarga del producto	55

4.5.1	Descripción de la etapa de descarga de producto	55
4.5.2	Proceso de descarga del producto	55
Capítulo V. Modelamiento de sistemas físicos		57
5.1	Modelamiento de la temperatura del vaporizador	57
5.1.1	Modelamiento analítico del vaporizador	57
5.1.2	Modelamiento experimental del vaporizador	60
5.1.3	Comparación de ambos modelos encontrados	66
5.2	Modelamiento del peso de BM ingresado	67
5.3	Modelamiento de la concentración de BM	69
5.4	Modelamiento de la temperatura de la cámara de fumigación	71
5.5	Modelamiento de la expulsión de BM	73
5.5.1	Definición del sistema	73
5.5.2	Formulación del problema	73
5.5.3	Implementación del modelo	74
5.5.4	Validación del modelo	74
5.5.5	Simulación	75
5.5.6	Interpretación de resultados	77
5.5.7	Importación de la respuesta a Matlab	78
5.5.8	Estimación de la función de transferencia	79
Capítulo VI. Sistemas de control		80
6.1	Sistema de control de la temperatura del vaporizador	80
6.2	Sistema de control de la dosis ingresada.	87
6.3	Sistema de control de la concentración de BM.	93
6.4	Sistema de control de la temperatura de la cámara de fumigación.	97
6.4.1	Implementación del control PID	97
6.4.2	Respuesta frente a una entrada escalón	97
6.4.3	Respuesta con control PID	98
6.4.4	Respuesta con control PID con perturbación	99
6.5	Sistema de control de la concentración de la expulsión de BM.	101
6.5.1	Implementación del control Difuso	101
6.5.2	Respuesta frente a una entrada escalón	102
6.5.3	Respuesta con control PID	103
6.5.4	Diagrama de control difuso	104
6.5.5	Controlador difuso	105

6.5.6 Fuzzificación.....	105
6.5.7 Reglas del control difuso	108
6.5.8 Defuzzificación.....	109
6.5.9 Superficie de control	110
6.5.10 Control difuso.....	110
6.6 Sistema de control integrado de la planta de fumigación.....	112
Capítulo VII. Resultados.....	117
7.1 Resultados del control de la temperatura del vaporizador.	117
7.2 Resultados del control de la dosis ingresada.....	118
7.3 Resultados del control de la concentración de BM.	120
7.4 Resultados del control de la temperatura de la cámara de fumigación.....	121
7.5 Resultados del control de la concentración de la expulsión de BM.	122
Conclusiones.....	124
Referencias bibliográficas	125
Anexos	130

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1: Efectividad de los fumigantes comunes.	17
Tabla 2: Propiedades químicas del bromuro de metilo.....	18
Tabla 3: Principales diferencias entre una estructura Mamdani y Sugeno	34
Tabla 4: Tabla de reglas del controlador.....	34
Tabla 5: Principales características de cada respuesta.....	66
Tabla 6: Tabla de definiciones de la etapa de expulsión.	74
Tabla 7: Variables lingüísticas.	106
Tabla 8: Tabla de reglas del controlador.....	108
Tabla 9: Características del control de la temperatura del vaporizador.	118

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1 Diagrama de las etapas del proceso de fumigación.....	3
Figura 2 <i>Estrategia del MPC</i>	21
Figura 3 <i>Estructura básica necesaria para implementar el control predictivo.</i>	22
Figura 4 <i>Respuesta futura ante un escalón</i>	25
Figura 5 <i>Subconjuntos difusos para el conjunto Velocidad</i>	30
Figura 6 <i>Función de membresía triangular</i>	30
Figura 7 <i>Función de membresía S</i>	31
Figura 8 <i>Función de membresía trapezoidal</i>	31
Figura 9 <i>Operaciones lógicas difusas</i>	32
Figura 10 <i>Fuzzificación de una variable</i>	33
Figura 11 <i>Respuestas de sistemas sobre-amortiguadas y sub- amortiguadas</i>	36
Figura 12 <i>Sistema de primer orden puro y con retardo.</i>	37
Figura 13 <i>Respuestas de sistemas de polos reales múltiples</i>	38
Figura 14 <i>Pantalla inicial del Toolbox de Identificación de Sistemas de Matlab.</i>	39
Figura 15 <i>Flujo de importación de datos de entrada (u1) y salida (y1).</i>	40
Figura 16 <i>Flujo de estimación de la función de transferencia</i>	40
Figura 17 <i>Función de transferencia estimada.</i>	41
Figura 18 <i>Comparativa de datos importados con datos estimados.</i>	41
Figura 19 <i>Proceso de Fumigación.</i>	42
Figura 20 <i>Planta de fumigación propuesta</i>	43
Figura 21 <i>Planta de fumigación</i>	43
Figura 22 <i>Plano de automatización de la planta de automatización.</i>	44
Figura 23 <i>Lazos de control en la etapa de dosificación</i>	45
Figura 24 <i>Lazos de control en la etapa de exposición</i>	45

Figura 25 Lazos de control en la etapa de aireación.	46
Figura 26 Etapa de carga del producto	48
Figura 27 Diagrama de la etapa de dosificación	50
Figura 28 Diagrama de la etapa de exposición	52
Figura 29 Diagrama de la etapa de aireación	54
Figura 30 Diagrama del proceso de descarga del producto.	56
Figura 31 Modelo simplificado del vaporizador.	57
Figura 32 Diagrama de bloques del control de temperatura.....	59
Figura 33 Respuesta del modelo analítico del vaporizador frente a un escalón.	60
Figura 34 Vistas del modelo 3D del prototipo.....	61
Figura 35 Fotografía del prototipo del modelo.....	61
Figura 36 Diagrama de partes del prototipo del vaporizador.....	62
Figura 37 Curva de reacción experimental del Sistema.	62
Figura 38 Curva de reacción importada al Matlab.....	63
Figura 39 Datos cargados al System identification toolbox.	64
Figura 40 Comparación de aproximación de funciones de transferencias encontradas. ..	64
Figura 41 Características de la función con mayor porcentaje de coincidencia.....	65
Figura 42 Respuestas frente a una entrada escalón.....	66
Figura 43 Modelo de descarga del B.M.....	67
Figura 44 Valor del peso del balón de BM durante la descarga.	67
Figura 45 Valor de la concentración de BM sin ventiladores de recirculación.	69
Figura 46 Valor de la concentración de BM cuando se activa la recirculación.	70
Figura 47 Comportamiento de los valores de temperatura y el estado del compresor.	71
Figura 48 variación de la temperatura en el refrigerador y en el evaporador.....	71
Figura 49 Respuesta de la función de transferencia.	72
Figura 50 Diagrama del proceso de expulsión.	73
Figura 51 Geometría del modelo.....	74
Figura 52 Vista de las mallas que componen el modelo.	75

Figura 53 <i>Vista cromática de la velocidad del flujo</i>	76
Figura 54 <i>Vista de la concentración antes del inicio</i>	76
Figura 55 <i>Vista de la concentración instantes luego del inicio</i>	77
Figura 56 <i>Vista de la concentración luego de un tiempo</i>	77
Figura 57 <i>Concentración de BM en la chimenea</i>	78
Figura 58 <i>Señales importadas a MatLAB</i>	78
Figura 59 <i>Respuestas de las funciones de transferencia estimadas</i>	79
Figura 60 <i>Salida del sistema de control del vaporizador</i>	83
Figura 61 <i>Salida del sistema de control del vaporizador adelantando las referencias de manera predictiva</i>	84
Figura 62 <i>Valor de la salida y de la señal de control para un setpoint de 20</i>	85
Figura 63 <i>Valor de la salida y de la señal de control para un setpoint de 40</i>	85
Figura 64 <i>Valor de la salida y de la señal de control para un setpoint de 60</i>	86
Figura 65 <i>Valor de la salida y de la señal de control para un setpoint de 80</i>	86
Figura 66 <i>Respuesta del sistema de control del vaporizador frente a una perturbación</i> ...87	
Figura 67 <i>Interfaz gráfica del proceso de inyección</i>	89
Figura 68 <i>Declaración de la función característica con inyección verdadera</i>	90
Figura 69 <i>Declaración de la función característica con inyección falsa</i>	90
Figura 70 <i>Declaración de la función de inicio de la inyección en LabVIEW</i>	91
Figura 71 <i>Declaración del algoritmo de cálculo de la cantidad de BM en LabVIEW</i>	92
Figura 72 <i>Declaración de la condición de finalización de la inyección en LabVIEW</i>	92
Figura 73 <i>Variables iniciales declaradas en la fumigación</i>	93
Figura 74 <i>Interfaz gráfica de la fumigación en LabVIEW</i>	94
Figura 75 <i>Declaración de la función característica del sistema en LabVIEW</i>	95
Figura 76 <i>Algoritmo de encendido de ventiladores en LabVIEW</i>	96
Figura 77 <i>Algoritmo de apagado de ventiladores en LabVIEW</i>	96
Figura 78 <i>Diagrama para respuesta frente a escalón</i>	97
Figura 79 <i>Respuesta de la planta frente a entrada escalón unitario</i>	98

Figura 80 <i>Diagrama de control PID implementado en Simulink.</i>	98
Figura 81 <i>Respuesta de la planta con control PID y setpoint -10.</i>	98
Figura 82 <i>Diagrama de control PID con perturbación implementado en Simulink.</i>	99
Figura 83 <i>Valor de la señal de control en el tiempo.</i>	99
Figura 84 <i>Valor de la salida de la planta en el tiempo.</i>	100
Figura 85 <i>Valor de la señal de control en el tiempo.</i>	100
Figura 86 <i>Valor de la salida de la planta en el tiempo.</i>	101
Figura 87 <i>Diagrama para respuesta frente a escalón.</i>	102
Figura 88 <i>Respuesta de la planta frente a entrada escalón unitario.</i>	102
Figura 89 <i>Diagrama de control PID implementado en Simulink.</i>	103
Figura 90 <i>Valor de la señal de control en el tiempo.</i>	103
Figura 91 <i>Valor de la salida de la planta en el tiempo.</i>	104
Figura 92 <i>Diagrama de control difuso implementado en Simulink.</i>	104
Figura 93 <i>Características principales del controlador difuso.</i>	105
Figura 94 <i>Funciones de pertenencia de la variable Setpoint.</i>	106
Figura 95 <i>Funciones de pertenencia de la variable error.</i>	107
Figura 96 <i>Funciones de pertenencia de la variable output.</i>	107
Figura 97 <i>Reglas del control difuso implementado.</i>	108
Figura 98 <i>Visualización de las Reglas en MatLab.</i>	109
Figura 99 <i>Superficie de control para la salida Output 1.</i>	110
Figura 100 <i>Valor de la salida en el tiempo.</i>	111
Figura 101 <i>Valor de la señal de control en el tiempo.</i>	111
Figura 102 <i>Interfaz gráfica de la planta de fumigación.</i>	112
Figura 103 <i>Equipos que participan en la inyección y aireación.</i>	113
Figura 104 <i>Equipos que participan en la fumigación.</i>	114
Figura 105 <i>Gráficos durante la expulsión de BM.</i>	115
Figura 106 <i>Reporte del proceso de Fumigación.</i>	116
Figura 107 <i>Base de datos para el control de proceso de Fumigación.</i>	116

Figura 108 <i>Respuesta del sistema de control de la temperatura</i>	117
Figura 109 <i>Respuesta del sistema para una dosis de 32 g/m³</i>	119
Figura 110 <i>Respuesta del sistema para una dosis de 40 g/m³</i>	119
Figura 111 <i>Control de la concentración con límite inferior 30</i>	120
Figura 112 <i>Control de la concentración con límite inferior 20</i>	120
Figura 113 <i>Respuesta del sistema de control de la temperatura – Simulink</i>	121
Figura 114 <i>Respuesta del sistema de control de la temperatura - LabVIEW</i>	122
Figura 115 <i>Respuesta del sistema de control de la concentración – Simulink</i>	123
Figura 116 <i>Respuesta del sistema de control de la concentración – LabVIEW</i>	123

Introducción

En el Perú cada año se incrementan las exportaciones, entre las cuales se encuentran bienes tradicionales como las frutas y los vegetales. Para que estos productos puedan comercializarse en el mercado externo e interno, es necesario cumplir diversos protocolos sanitarios. Una de las medidas necesarias es la eliminación de plagas, la cual se logra mediante controles sanitarios en los campos de cultivo y después de la cosecha. Las cajas con frutas son llevadas a cámaras de fumigación para realizar tratamientos efectivos contra plagas cuarentenarias.

El objetivo de esta Tesis es diseñar un sistema de automatización utilizando técnicas modernas de control para el proceso de fumigación con Bromuro de Metilo (BM) en la agroindustria. Este objetivo se originó a partir del estudio de una planta de fumigación propiedad del Servicio Nacional de Sanidad Agraria - SENASA, ubicada en el departamento de La Libertad, en la provincia de Trujillo y en el distrito de Salaverry. En esta Tesis, se analizó cada etapa del proceso de fumigación y se modeló cada proceso para lograr una simulación completa del proceso estudiado.

Las simulaciones se implementaron en dos plataformas. Las simulaciones de cada lazo de control se realizaron en MATLAB y la simulación conjunta de todos los sistemas se implementó en LabVIEW. También se implementó una simulación en COMSOL para modelar el sistema de expulsión del bromuro de metilo de la cámara de fumigación. Además, se utilizó el método experimental para la obtención de la función de transferencia del equipo vaporizador que participa en el proceso de fumigación.

En el Capítulo I, se describe el problema de investigación y se presentan los objetivos de este trabajo. En el Capítulo II, se resumen los principales conceptos utilizados en el desarrollo de esta Tesis. En el Capítulo III, se esquematizan las partes que componen la planta de fumigación. En el Capítulo IV, se describen las etapas del proceso de fumigación. En el Capítulo V, se modelan los sistemas de la planta. En el Capítulo VI se

diseñan algoritmos de control para cada proceso correspondiente. En el Capítulo VII, se analizan los resultados, se presentan las conclusiones y recomendaciones de toda la Tesis.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

En este capítulo introductorio, se describe el problema de investigación, el objetivo general, se enumeran los objetivos específicos trazados, las hipótesis, la estructura del trabajo y los antecedentes nacionales e internacionales.

1.1 Generalidades

Un tratamiento fitosanitario es aquel que garantiza la eliminación de la plaga sin causar daño a los productos vegetales y frutos a los que se aplica, sin dejar ningún residuo que pueda afectar la salud de las personas que los consuman, y siguiendo las regulaciones específicas de cada país en esta materia. El tipo de tratamiento está condicionado por la plaga a eliminar, el producto a tratar, las condiciones ambientales donde se llevará a cabo el proceso y las facilidades disponibles. El más utilizado es de naturaleza química, física o radioactiva. El más extendido es la fumigación con Bromuro de Metilo (BM), el cual se analiza en esta Tesis debido a que se utiliza actualmente en nuestro país.

La automatización de procesos industriales permite el control eficiente y seguro de sustancias peligrosas, como es el caso de los compuestos utilizados en la fumigación química. Otra ventaja de la automatización es la monitorización en tiempo real de las condiciones presentes durante todo el proceso y el registro histórico para la elaboración de un informe del proceso. Además, la automatización permite aplicar técnicas de control para optimizar el proceso de fumigación.

Antes de desarrollar los sistemas de control, es necesario conocer el comportamiento de cada proceso. Para ello, se deben determinar las funciones de transferencia que modelen su comportamiento. Una de estas funciones se encuentra utilizando un método experimental mediante el desarrollo de un prototipo.

Los programas utilizados en el desarrollo de esta Tesis son Matlab, LabVIEW, COMSOL y ACCESS. El software Matlab se utiliza para expresar las funciones de transferencia y para diseñar los controladores mediante código, así como su toolbox Simulink. Por otro lado, el software LabVIEW se emplea para implementar funciones de transferencia y para integrar todos los procesos en una interfaz de monitoreo. Además, el

software COMSOL se usa para realizar simulaciones del entorno con el objetivo de obtener datos que sirvan para determinar la función de transferencia de una etapa del proceso. El software ACCESS, conocido por su manejo de bases de datos, tablas y formularios, se utiliza para implementar una base de datos del proceso, de frutas, clientes y operadores.

Los algoritmos de control aplicados en el desarrollo de esta Tesis son algunos de los más utilizados debido a su rapidez de implementación y robustez. Estos son: el control proporcional, integral y derivativo (PID); el control predictivo basado en modelos (MPC) y el control difuso (Fuzzy).

1.2 Descripción del Problema de Investigación

Esta Tesis se aplica en el proceso de fumigación química con Bromuro de Metilo. Debido a la naturaleza de la sustancia involucrada en el proceso de fumigación y considerando los posibles efectos dañinos que una mala supervisión, control y operación del proceso puedan causar a las personas y al medio ambiente, es necesario implementar un sistema automatizado que ejecute el proceso de fumigación. Para ello, se lleva a cabo un estudio y diseño del sistema de supervisión, control y registro de las variables involucradas en todo el proceso de fumigación utilizando Bromuro de Metilo. Este proceso se aplica en una actividad agroindustrial que consta de las siguientes etapas enumeradas en el procedimiento de Díaz (2014) y representadas en la figura 1:

- Etapa de carga del producto.
- Etapa de dosificación.
- Etapa de exposición.
- Etapa de aireación.
- Etapa de descarga del producto.

La etapa de Carga del producto (Etapa 1) requiere un control mediante registros en los que se incluyan el operario, el producto tratado y el cliente. Esto se implementa en una base de datos utilizando el software Access, que contiene el registro de los operarios,

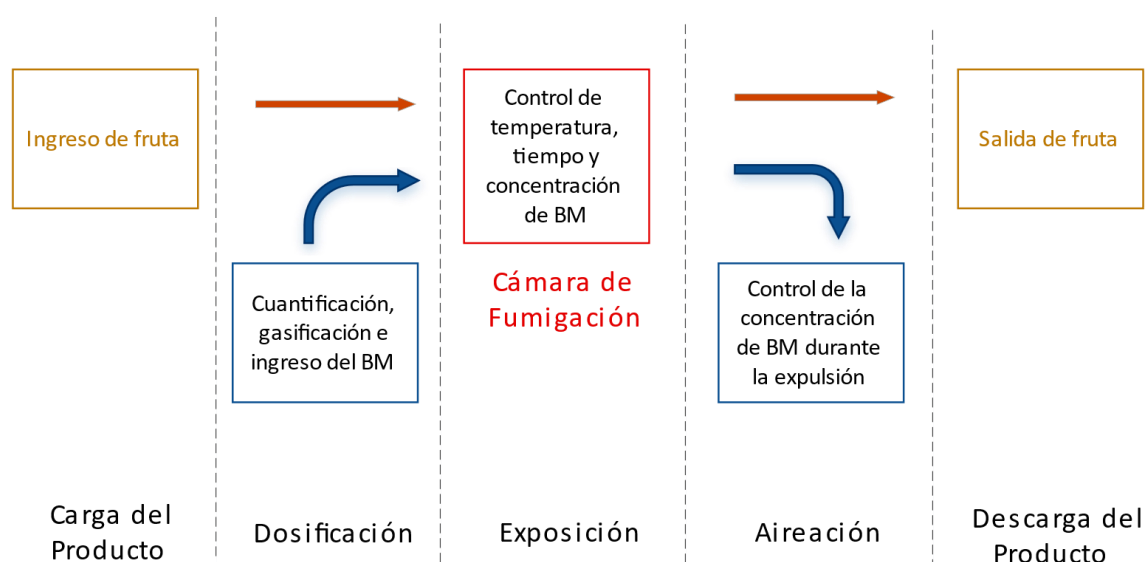
clientes y frutas con las dosis recomendadas para cada variedad. Además, la aplicación permite mantener un registro histórico de las pruebas realizadas.

Las etapas de dosificación, exposición y aireación (Etapas 2, 3 y 4) requieren la implementación de sistemas de control para automatizar los subprocesos que las componen. Para ello, se estudian de forma separada durante el desarrollo de esta Tesis. Los sistemas de control se implementan en Matlab y en LabVIEW. La simulación con interfaz gráfica que integra todas estas etapas se lleva a cabo en LabVIEW.

La etapa de Descarga del producto (Etapa 5) requiere un registro de las condiciones, así como de las variables más importantes en las cuales se llevó a cabo todo el proceso de fumigación. Esto se implementa en un reporte HTML al finalizar el proceso, que incluye la cantidad de Bromuro de Metilo utilizado, la temperatura de la cámara de fumigación durante el tiempo de exposición y un gráfico de la concentración de Bromuro de Metilo a lo largo del tiempo.

Figura 1

Diagrama de las etapas del proceso de fumigación.



Nota: Fuente elaboración propia

1.2.1 Formulación del problema general

El problema general consiste en conocer:

- ¿Cómo diseñar un sistema de automatización mediante técnicas de control moderno del proceso para optimizar la fumigación con Bromuro de Metilo en la agroindustria?

1.2.2 Problemas específicos

Los problemas específicos consisten en conocer:

- ¿Cómo diseñar sistemas de control moderno para cada etapa del proceso de fumigación?
- ¿Cómo elaborar los algoritmos de control para cada etapa del proceso de fumigación?
- ¿Cómo simular los lazos de control de cada etapa del proceso de fumigación?
- ¿Cómo programar la interfaz para el control simulado de una planta de fumigación agroindustrial?

1.3 Objetivos e hipótesis del Estudio y Estructura del trabajo

Los objetivos de este trabajo se dividen en dos grupos, los cuales se detallan a continuación:

1.3.1 Objetivo General

El objetivo general de este trabajo consiste en:

- Diseñar un sistema de automatización mediante técnicas de control moderno del proceso de fumigación con Bromuro de Metilo en la agroindustria.

1.3.2 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos de este trabajo consisten en:

- Diseñar sistemas de control moderno para cada etapa del proceso de fumigación.
- Elaborar los algoritmos de control para cada etapa del proceso de fumigación.
- Simular los lazos de control de cada etapa del proceso de fumigación.

- Programar la interfaz para el control simulado de una planta de fumigación agroindustrial

1.3.3 Hipótesis general

Si se diseña un sistema de automatización mediante técnicas de control moderno entonces se optimizará el proceso de fumigación con Bromuro de Metilo.

1.3.4 Hipótesis secundarias

Las hipótesis específicas de este trabajo consisten en:

- Es posible diseñar sistemas de control moderno para cada etapa del proceso de fumigación.
- Es factible elaborar los algoritmos de control para cada etapa del proceso de fumigación.
- Es posible simular los lazos de control de cada etapa del proceso de fumigación.
- Es factible programar la interfaz para el control simulado de una planta de fumigación agroindustrial.

1.3.5 Estructura del trabajo

Este trabajo de Tesis se organiza en las siguientes etapas:

a. Primera Etapa: (Organizativa)

En esta fase, se realiza un análisis del proceso de fumigación, se sintetiza en un plano de automatización y se divide en tres subetapas:

- Revisión bibliográfica y conceptual de los algoritmos de control y del proceso de fumigación.
- División del proceso de fumigación en subprocesos para un análisis y modelado más detallados.
- Creación de un plano de automatización que incluye los lazos de control propuestos para todas las etapas del proceso de fumigación.

b. Segunda Etapa: (Modelamiento)

En esta etapa, se implementan los algoritmos de control de los procesos identificados en la primera etapa. Esta fase se divide en tres subetapas:

- Modelado de los lazos de control que componen el proceso de fumigación.
- Simulación individual de los algoritmos de control implementados.
- Construcción de una base de datos junto con tablas y formularios para la etapa de carga del producto en el proceso de fumigación.

c. Tercera Etapa: (Integrativa)

En esta etapa, se integran los modelos previamente desarrollados en la etapa anterior. Esta fase se divide en dos subetapas:

- Integración de los procesos en una interfaz única creada en LabVIEW.
- Adición de la capacidad para generar un reporte HTML al finalizar la ejecución del proceso de fumigación.

d. Análisis Final: (Análisis)

En esta última etapa, se analizan los resultados de las simulaciones y se divide en dos subetapas:

- Análisis de los parámetros obtenidos a través de los algoritmos de control.
- Elaboración de las conclusiones y perspectivas futuras de la investigación.

1.4 Antecedentes nacionales e internacionales

En el contexto de la globalización y la firma de nuevos tratados de libre comercio, el sector agro-exportador peruano está experimentando un crecimiento significativo gracias a la apertura comercial de Perú. Como resultado, se han establecido tanto plantas de fumigación estatales como privadas en diversas zonas agrícolas del país. Estas instalaciones juegan un papel crucial al mejorar el potencial exportador al desinfectar los cultivos de plagas y dejarlos listos tanto para el consumo interno como para la exportación. Un ejemplo de propuesta para mejorar las medidas fitosanitarias en la región de Arequipa se encuentra en el trabajo de R. Márquez (2014).

En Perú, el Servicio Nacional de Sanidad Agraria (SENASA) es la entidad encargada de autorizar, monitorear y fiscalizar los tratamientos de cuarentena y fumigación. Algunos de los tratamientos autorizados por esta entidad estatal incluyen la fumigación con Bromuro de Metilo, la fumigación con Fosfamida, la inmersión, la aspersión-pulverización, la nebulización y el espolvoreo, además de los tratamientos de cuarentena y monitoreo de plagas.

Uno de los fumigantes más ampliamente utilizados, según M. Pizano (2014), es el Bromuro de Metilo (BM), que se ha convertido en el método preferido para el control de plagas y enfermedades por numerosos productores en todo el mundo debido a su alta eficacia y amplio espectro. Sin embargo, es importante destacar que este fumigante está restringido a nivel mundial debido a los daños que puede causar a la capa de ozono y a la salud de las personas si se inhala. Como resultado, la expulsión de este gas debe cumplir tanto con las normativas nacionales, como se detalla en el procedimiento de J. Díaz (2014), como con las normativas internacionales, como se indica en la guía de Tratamientos de M. Schwartz (1996), que se desarrolló en Chile y se ajusta a las regulaciones nacionales. Además, cabe mencionar que se han registrado patentes relacionadas con este proceso, como la de Smithyman (2003) en Estados Unidos.

La automatización de procesos se lleva a cabo mediante controladores lógicos programables (PLC), microcontroladores (uC) o computadoras con interfaces, como se describe en la Tesis de A. Alvaro (2016). Además, S. Yaduvir (2011) define LabView como una plataforma que permite diseñar sistemas de control e interfaces de usuario a través de un lenguaje de programación gráfico. Esta característica acelera el desarrollo y mantenimiento, y al estar integrada en un entorno informático, posibilita la aplicación de nuevos métodos de control, como el control difuso o adaptativo, además de facilitar el monitoreo y control a distancia a través de Internet. El control difuso también se puede implementar en Matlab siguiendo el manual "LabVIEW PID and Fuzzy Logic Toolkit User Manual" (2019), que se utilizó en esta Tesis.

En el proceso de fumigación, intervienen diversos componentes, como balanzas, electroválvulas, intercambiadores de calor y bombas de extracción, entre otros. El control de los intercambiadores de calor es especialmente crucial en la primera etapa del proceso. En la actualidad, se aplican nuevas teorías de control, como se describe en el artículo de J. Ricardo (2016), donde se utiliza el control multivariable lineal con desacoples. Esto contrasta con los métodos de sintonización PID que se mencionan en el trabajo de J. Forero (2013), donde se desarrollan nuevas ecuaciones de sintonía basadas en el criterio integral de desempeño, que los autores denominan FAD.

Los programas de modelamiento físico se utilizan para estudiar el comportamiento físico de sistemas cuyo modelado no puede ser reemplazado por ecuaciones lineales o cuando se busca comprender las características de un escenario completo. En la Tesis de Y. Amaya (2018), se destaca la importancia del programa COMSOL como una herramienta invaluable para analizar fenómenos físicos complejos, como se aplicó en un horno reactor térmico. Estos modelos, generados mediante el método de elementos finitos, se pueden combinar para realizar simulaciones más complejas y cercanas a los procesos estudiados, como se ejemplifica en el artículo de M. Fütterer (2008), donde se utiliza la interfaz de COMSOL en Simulink para implementar el control adaptativo en plantas de lecho móvil.

Esta Tesis se inspira en la publicación realizada por D. Ortega (2020) en la revista ECI, donde el autor comparte su experiencia en el campo de la fumigación con Bromuro de Metilo. En esta publicación, se presentan datos reales de temperatura y concentración, además de listar características importantes de una planta de fumigación ubicada en Trujillo. Esta fuente de información ha sido un punto de partida esencial para el desarrollo de la presente Tesis.

Capítulo II. Marco teórico y conceptual

En este capítulo, se describen los conceptos fundamentales que sirven como base para comprender el proceso de fumigación que se estudia y automatiza en el desarrollo de esta Tesis. También se revisan conceptos teóricos que se aplican en el diseño.

2.1 Marco Teórico

En esta sección, se enumeran los artículos de investigación que se seleccionaron como referencia para el desarrollo de la Tesis.

2.1.1 Fumigación

Una de las plagas más destructivas del mundo es la mosca de la fruta. Debido a su amplia propagación mundial, su habilidad para tolerar diversos tipos de climas y su amplio rango de frutos hospederos, se le considera como una de las plagas que más daños ha ocasionado en la economía. Esta plaga infecta a la fruta madura, atravesando la cáscara y depositando sus huevos en la perforación en el interior de la fruta, los huevos al eclosionar se convierten en larvas, las cuales se alimentan de la pulpa de la fruta. Considerando las cuantiosas pérdidas económicas que ocasiona esta plaga en nuestro país y a su propagación en casi todo el territorio nacional, el Servicio Nacional de Sanidad Agraria - SENASA, único organismo encargado de velar por la sanidad agraria en el Perú, ejecuta constantemente programas para evitar, controlar y erradicar la propagación de la mosca de la fruta, como el Programa Nacional de Moscas de la Fruta con la implementación de sistemas de detección y seguimiento, así como la deposición de medidas fitosanitarias encaminadas a erradicar a esta plaga, de manera permanente en nuestro país, programas que son estudiadas en la Tesis de Márquez (2014), donde luego de estudiar el alcance de estas medidas, proponen mejoras con la finalidad de que la región Arequipa esté libre de la mosca de la fruta.

Las características y descripciones del proceso de fumigación son obtenidas de Díaz (2014) que es un procedimiento de medidas fitosanitarias de cuarentena interna para

moscas de la fruta, fue redactado para el organismo SENASA con el objetivo de estandarizar el proceso en el Perú de acuerdo a los estándares internacionales, adicionalmente se realizó una contrastación con el documento de Marco (2008) que es un manual de tratamientos fitosanitarios, emitido por la Agencia ecuatoriana de aseguramiento de la calidad del Agro – AGROCALIDAD, para verificar que el procedimiento y la planta estudiada tenga validez internacional.

2.1.2 Vaporizador

El vaporizador utilizado en este trabajo de Tesis es una simplificación de un intercambiador de calor. Un intercambiador de calor común es un equipo que se utiliza para transferir calor de un medio a otro, ya sea para enfriar (como en las máquinas de plasma) o calentar (como en calefactores). Los intercambiadores de calor suelen emplear un líquido en circulación para aumentar o disminuir la temperatura del líquido objetivo. En el caso del vaporizador, se utiliza una masa de líquido en reposo para calentar el Bromuro de Metilo (BM) que circula en su interior y lograr una correcta gasificación

Debido a la naturaleza no lineal del comportamiento de los intercambiadores su estudio y análisis es frecuente, como en el artículo de Forero (2013) donde se estudian diferentes ecuaciones de sintonía de controladores PID para un intercambiador de calor aplicado en la industria papelera, en el trabajo de Ricardo (2016) muestra el desarrollo de un control multivariable lineal con desacoples, de donde se tomará el método usado para probar la robustez del algoritmo de control, el cual es añadir perturbaciones y analizar las características de la respuesta del sistema de control.

En Abdulrahman (2012) realizan un modelado matemático del intercambiador de calor y luego comparan lo obtenido con datos experimentales encontrando una alta correlación entre ambas respuestas, lo que demuestra que las simplificaciones matemáticas realizadas son correctas y que la función de transferencia encontrada es muy cercana a la función real.

2.1.3 Refrigeración

La refrigeración industrial se lleva a cabo mediante compresores que, dependiendo de su eficiencia y diseño, permiten alcanzar temperaturas más bajas. Dado que todos los métodos de refrigeración siguen el mismo principio básico, los modelos tienden a ser similares entre sí, como se ha demostrado al comparar diversos artículos sobre el tema.

En el estudio de Jara (2017), se realizó un análisis experimental del comportamiento de un refrigerador doméstico, destacando que el gráfico que muestra la evolución de la temperatura en el interior tiene un comportamiento casi lineal en el tiempo. Un análisis similar se encuentra en la Tesis de Vaca (2012), que se enfoca en el diseño e implementación de un módulo didáctico de refrigeración basado en un refrigerador comercial. En este trabajo, se logra controlar un refrigerador comercial mediante un PLC, y se utiliza como referencia el método de control On-Off del compresor.

Otro enfoque de refrigeración se presenta en la Tesis de Rojas (2012), donde se desarrolla el diseño de una cámara de temperatura controlada. En este caso, se encuentra una función de transferencia de primer orden para la temperatura, lo que proporciona una idea de la función de transferencia que podría ser adecuada en este proyecto.

En la presente Tesis, se ha considerado la función de transferencia encontrada en el artículo de García (2017) titulado "Controlador PID de una celda termoeléctrica". En este artículo se prueban diversos algoritmos genéticos para sintonizar un controlador PID, y los resultados respaldan el modelo presentado en el artículo. Además, esta función de transferencia presenta un comportamiento similar al de los modelos encontrados en trabajos anteriores. Otra razón para elegir este modelo es su potencial escalabilidad a otros casos estudiados, ya que las celdas termoeléctricas son una tecnología emergente en el mercado.

2.1.4 Control MPC

El control MPC, definido en Camacho (2007), es una opción versátil en la mayoría de los casos debido a su capacidad predictiva, lo que proporciona una respuesta más rápida y cercana a la referencia deseada. Sin embargo, la confiabilidad de esta respuesta depende en gran medida de que el modelo utilizado describa de manera precisa el proceso que se está controlando. Por lo tanto, es fundamental utilizar funciones de transferencia que representen fielmente los procesos a controlar. Este aspecto se aborda inicialmente en el artículo de Camacho (2004) titulado "Control predictivo: pasado, presente y futuro", que sirve como guía para comprender el algoritmo de control MPC y su base teórica.

Un primer vistazo a la implementación de este tipo de control se encuentra en la Tesis de maestría de Guzmán (2018), donde, después de una revisión teórica del algoritmo, logran implementarlo en un microcontrolador de gama alta. Del artículo de Dougherty (2002), en el cual se aplican diferentes estrategias adaptativas para un bucle singular de control MPC en una planta de neutralización del pH, se extrae un resumen del algoritmo y se utiliza como base para probar la sintonización del controlador.

El concepto se expande a un control multivariable en el artículo de Calisaya (2012), donde se aplica el algoritmo MPC en el control de una columna de flotación. En este caso, se destaca la robustez del método para controlar variables tan diversas sin necesidad de desacoplarlas. En el artículo de Chen (2007), se encuentra otra aplicación para procesos de múltiple entrada y salida (MIMO) en un proceso de molienda de bolas. Se destaca que utilizan el software Matlab para identificar las funciones de transferencia, un método que se utilizó en el desarrollo de esta Tesis.

Además, se revisaron artículos en los que se realiza una comparativa del control MPC con otros métodos, como en la Tesis de Alfaro (2021), en el que se compara el control MPC con el control difuso en un sistema de control de un molino semi-autógeno, enumerando las ventajas y desventajas de cada método de control.

2.1.5 Control Difuso

Este tipo de control se utiliza para mejorar el rendimiento en comparación con un algoritmo de control PID, como se evidencia en la Tesis de Álvaro (2019) en la aplicación de control de nivel de agua en un tanque. En este caso, se cuantifican los resultados del control del nivel de agua utilizando indicadores clave de desempeño, lo que permite una comparación numérica de la respuesta de ambos controladores.

Otra aplicación relevante del control de nivel de líquido se encuentra en la Tesis de Criollo (2015), donde se implementa un controlador difuso tipo Mamdani tolerante a fallas en una planta didáctica Festo MPS. Esta Tesis destaca el método de implementación mediante Matlab y el uso del toolbox Fuzzy, que también se empleó en el desarrollo de esta investigación.

El control difuso también se aplica en la automatización de plantas industriales, como se observa en el artículo de Guimaraes (2018), donde se utiliza para controlar una planta de inertización por plasma. En esta implementación, el control difuso se ejecuta en un computador mediante el software LabVIEW y se conecta a un PLC utilizando la interfaz OPC.

Otra aplicación del control difuso se encuentra en el artículo de Kher (2000), donde se controla un vaporizador utilizado en un proceso químico. En la implementación de este controlador se utilizan cinco funciones de pertenencia, una cantidad similar a las que se emplearon en esta Tesis.

Además, el control difuso puede combinarse con otros algoritmos de control clásicos, como el control proporcional-derivativo (PD), como se muestra en el artículo de Chamorro (2010), donde se utiliza para controlar la velocidad de un motor de inducción. En este caso, el autor logra mejorar las características dinámicas y reducir a la mitad el número de reglas utilizando esta técnica combinada.

2.1.6 Simulación mediante COMSOL

El software COMSOL se utiliza para realizar simulaciones de fenómenos multi-físicos o químicos mediante el método de elementos finitos. Según Pepper (2017), el método de elementos finitos se utiliza para recrear escenarios o fenómenos donde se conocen las físicas involucradas y los límites, dividiendo el escenario en partes más pequeñas y resolviéndolas. Existen varios programas en los que se puede realizar este tipo de simulación, como Matlab, Maple y COMSOL. En el desarrollo de esta Tesis, se optó por utilizar COMSOL.

Una demostración de la capacidad de COMSOL se encuentra en la Tesis de Amaya (2018), donde se lleva a cabo una simulación con interacción físico-química en COMSOL de un horno reactor térmico. Esto demuestra el poder de cálculo del software y su capacidad para recrear diversos escenarios.

En el artículo de Muñoz (2008), se presenta una simulación conjunta entre Matlab y COMSOL para la optimización de intercambiadores de calor utilizando algoritmos genéticos. Asimismo, COMSOL se ha utilizado en el control de procesos, como se describe en el artículo de Marco (2008), donde se implementó el control adaptativo en las plantas de lecho móvil utilizando la interfaz de Simulink-COMSOL.

Cabe destacar que el autor de esta Tesis fue coautor del artículo con Tisza (2020), donde se desarrolló un método para encontrar la función de transferencia de un proceso a partir de los resultados de su simulación mediante elementos finitos. Este método se utilizará en el desarrollo de esta Tesis para encontrar la función de transferencia de la expulsión de Bromuro de Metilo.

2.1.7 Simulación mediante LabVIEW

El software LabVIEW utiliza un lenguaje de programación gráfico para diseñar sistemas centrados en el control de hardware simulado o embebido. Una aplicación se encuentra en el artículo de Yaduvir (2011), donde se utiliza LabVIEW para la supervisión y

adquisición de señales en procesos industriales. En este caso, se implementa una interfaz gráfica para monitorear y controlar una planta que consta de varias calderas.

Otra aplicación se presenta en la Tesis de Tumbaco (2015), donde se controla un reservorio de dos tanques en una planta industrial. LabVIEW se utiliza como interfaz gráfica, y se establece una conexión con un PLC a través de un servidor OPC para controlar el nivel del líquido.

El software LabVIEW no solo permite la implementación de estrategias de control clásicas, sino también estrategias avanzadas, como se describe en la Tesis de Johnson (2010). En este trabajo, se aplica LabVIEW en el proceso de calentamiento inductivo de fluidos, donde se implementa el algoritmo de control PID fraccionario para controlar una planta físicamente implementada en una planta piloto. Los resultados se comparan con los obtenidos mediante el algoritmo de Control Adaptable con referencia a Modelo (MRAC) y el algoritmo PI tradicional.

2.2 Marco Conceptual

En esta subsección, se exponen y detallan los conceptos fundamentales que sirven de base para el desarrollo de la Tesis.

2.2.1 Fumigantes

El manual de tratamientos Fitosanitarios de SENASICA (2016) define a los fumigantes como compuestos químicos que deben permanecer en estado gaseoso durante el tratamiento de fumigación. Esta definición excluye a agentes que tengan un tamaño de partícula mayor que los fumigantes, como aerosoles, humo y formulaciones de insecticidas, ya que carecen de propiedades de penetración necesarias para eliminar las plagas que se encuentran en el interior del cultivo infectado. Algunas de las condiciones que deben tener los fumigantes son las siguientes:

- Permanecer en estado gaseoso a temperatura ambiente.
- Desaparecer sin dejar residuos después del tratamiento.
- Presentar altos índices de difusión y penetración.

- Ser más denso que el aire.
- Ser tóxico en cualquiera de los estados de desarrollo de la plaga que se pretende eliminar.

La temperatura de la fruta es uno de los parámetros más importantes durante la fumigación, ya que la toxicidad del fumigante aplicado depende directamente de la tasa de respiración del organismo. Esto significa que, a mayor temperatura de la fruta, mayor será su tasa respiratoria, lo que aumentará la efectividad del fumigante y reducirá el tiempo de exposición. Por lo tanto, si la temperatura disminuye, la dosis del fumigante y el tiempo de exposición aumentan.

Debido a que los fumigantes son gaseosos y se difunden fácilmente, pueden ser absorbidos por los pulmones, intestinos y piel, lo que hace necesario el uso de equipos de protección, como ropa y mascarillas de cara completa con filtros adecuados para el tamaño de partícula de los fumigantes utilizados. Además, se deben contar con equipos para monitorear posibles fugas al medio ambiente o para realizar una limpieza adecuada en caso de contacto directo.

Tabla 1
Efectividad de los fumigantes comunes.

Fumigante	Efectividad contra:				
	Bacterias	Hongos	Nematodos	Insectos	Malezas
Cloropicrina	100%	100%	100%	100%	100%
Dazomet	-	100%	100%	100%	50%
1,3-Dicloropropeno	-	0%	100%	-	50%
Dibromuro de Etileno	-	0%	100%	-	-
Metham sodio	0%	50%	50%	100%	100%
Isotiocianato de Metilo	100%	50%	100%	100%	50%
Bromuro de Metilo	0%	50%	100%	100%	100%
Yoduro de metilo	-	100%	100%	-	100%

Nota. Adaptado del artículo de Otazú, V. (2008).

En la tabla 1 se enumeran los fumigantes más utilizados junto con su espectro de efectividad, que se representa como 100% si son altamente efectivos, 50% si su efectividad es limitada contra algunos microorganismos o requiere dosis más altas de lo normal, y 0% si su efectividad es baja o nula.

2.2.2 Bromuro de Metilo

El bromuro de metilo que se puede abreviar como BM es un compuesto orgánico halogenado, su fórmula química es CH_3Br , tiene un bajo punto de ebullición (3.56°C) lo que significa que a temperatura ambiente se puede encontrar en estado gaseoso. Es un gas inoloro, incoloro e inflamable cuyas propiedades más importantes son nombradas en la tabla 2.

Tabla 2

Propiedades químicas del bromuro de metilo.

Nombre químico	Bromo metano, Monobrometano
Fórmula química	CH_3Br
Olor	En concentraciones altas huele a moho o cloroformo ninguno a concentraciones bajas
Punto de ebullición	3.56°C
Punto de congelación	-93°C
Inflamable en el aire	No
Solubilidad en agua	1.34 g/100 ml a 25°C
Propiedades	En estado puro no es corrosivo para los metales . Poderoso disolvente de sustancias orgánicas, especialmente caucho natural. En estado líquido reacciona con el aluminio.
Envases y liberación:	Botellas cilíndricas de acero y latas de diferentes pesos por presión natural.
Pureza comercial	99.4%
Fitotoxicidad	El BM puede ser utilizado sin peligro en la fumigación de muchas plantas, y productos vegetales sin producir efectos perjudiciales. Sin embargo, algunas plantas vivas y productos como frutas y verduras frescas y ciertas semillas, pueden sufrir daño.

Nota: Extraído de la Tesis de Bazán, S. (2021).

El Bromuro de Metilo fue utilizado desde la década de 1930 debido a su amplio espectro de actividad contra la mayoría de plagas, pero su uso se hizo más popular para granos y madera; Actualmente toda la manera que se utilice en el transporte de mercancías debe contener un certificado de fumigación. El manual de tratamientos Fitosanitarios de SENASICA (2016) indica que de acuerdo con la National Fire Protection Association (NFPA), el BM se clasifica como tóxico (3), poco flamable (1) y estable (0); El manual indica también que la penetración del BM es pobre en alimentos balanceados a base de semillas y harina, además que las larvas en diapausa (estado de reposo) de *Trogoderma granarium* (gorgojo Khapra) y *Ephestia elutella* (polilla del cacao o del tabaco) son altamente tolerantes al BM.

El Bromuro de Metilo es tres veces más pesado que el aire y esto es un parámetro a considerar cuando se diseñan los sistemas de aplicación del producto porque deben tener mecanismos de recirculación de aire. Este gas penetra con relativa facilidad dentro de la mayor parte de los productos a tratar a presión atmosférica normal. El BM es un químico reactivo, particularmente con materiales que contienen azufre, produciendo un olor desagradable.

2.2.3 Normas de calidad y cuidado ambiental

Las consideraciones sobre el procedimiento y el tratamiento que se van a usar son tomadas del manual de tratamientos fitosanitarios de SENASICA (2016):

- Se debe instalar tomas de muestra en el interior de la cámara de fumigación para realizar la lectura de concentraciones del fumigante usado.
- Se necesitan sistemas de recirculación mediante ventiladores industriales con grandes caudales para asegurar la distribución homogénea del gas.
- Se debe tener un sistema de extracción del gas que se va a usar al final de la fumigación para cada cámara.
- Se debe agregar un 2% de un agente delator (Cloropicrina) en el Bromuro de Metilo para la detección de fugas.

- Se debe monitorear la concentración durante todo el proceso de fumigación luego de la inyección del BM.

Otras consideraciones tomadas de Diaz (2014) son:

- Se debe tener como concentración máxima permitida del BM en el aire en las instalaciones de 20 ppm según la norma actual de la Organización de Salud Ocupacional de los Estados Unidos - OSHA.
- Se debe controlar la salida del BM al ambiente a una cantidad no mayor a 500 ppm durante la etapa de expulsión.
- Se debe controlar que la temperatura del agua en el vaporizador debe ser mayor a 70°C.

Sobre las etapas finales el manual de Vizcaino (2016) indica:

- Todos los documentos generados (registros de fumigación con BM) deben ser archivados y mantenidos en un solo lugar para verificaciones y auditorías cuando sean requeridas.
- El registro del proceso de fumigación debe ser completo en el sitio de fumigación, la información registrada debe ser clara, y legible.

2.2.4 Control Predictivo Basado en Modelo

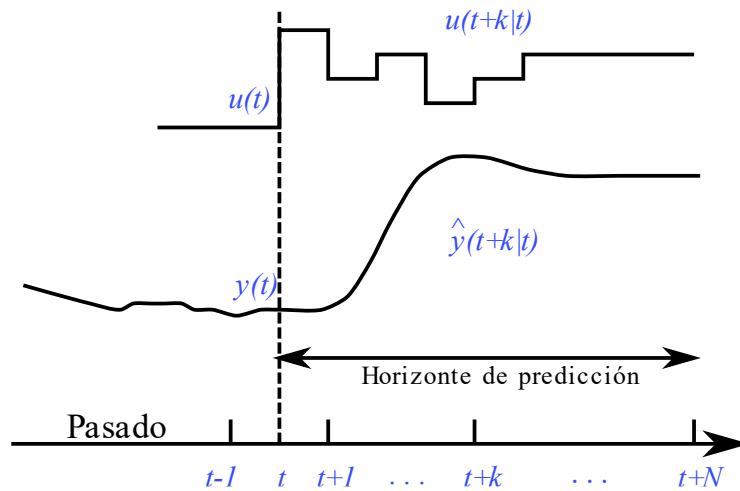
El control predictivo está formado por diversos métodos que se caracterizan en que obtienen la señal de control luego de minimizar una función objetivo. La metodología controladores MPC fue estudiado por Camacho (2014) de donde se extraerá la mayoría de conceptos usados en esta Tesis. Para explicar la metodología del MPC se usa la representación que está en la figura 2 donde se encuentra representada la señal de control $u(t)$ y la respuesta del sistema $y(t)$ desde el pasado hasta el tiempo t , además están las salidas futuras hasta el tiempo $t + N$ donde N es llamado horizonte de predicción.

Las salidas futuras se predicen cada instante t utilizando el modelo del proceso, debido a ello el método adquiere el nombre de control predictivo basado en modelo, la

cantidad de pasos en el futuro es llamado horizonte de predicción N . Los valores futuros predichos de la salida y dependerán de las señales de control futuras, de los valores de las entradas y salidas pasadas hasta el instante t , lo que se definirá como $y(t + k|t)$ para $k = 1, 2, \dots, N$ predicha en el tiempo t .

Figura 2

Estrategia del MPC



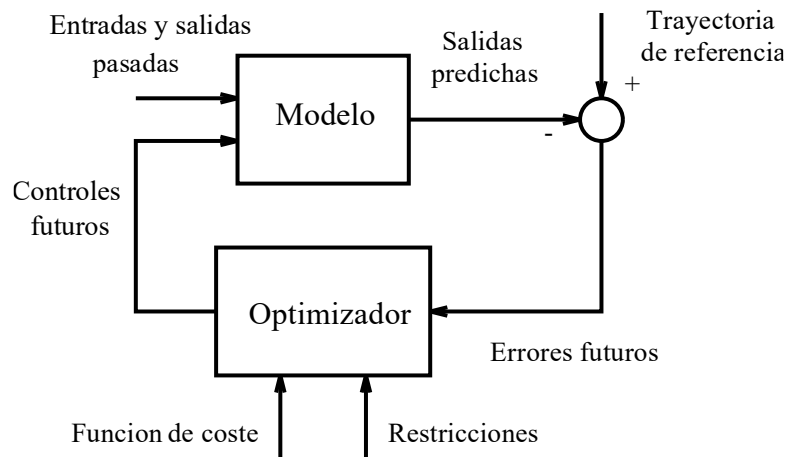
Nota. Adaptado de "Control predictivo: pasado, Presente y futuro" (p. 6), por E. Camacho, 2004, Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, Vol.1, Núm. 3.

Las señales de control futuras se calculan buscando mantener al proceso cerca de la trayectoria de referencia $w(t + k)$ minimizando un criterio. Este criterio normalmente tiene la forma de una función cuadrática de la diferencia (error) entre la salida predicha y la trayectoria de referencias futuras. Usualmente se añade el esfuerzo de control dentro de la función objetivo.

Al finalizar el cálculo la señal de control $u(t|t)$ se envía al proceso mientras que el resto de las señales futuras calculadas no se consideran, debido a que en el siguiente instante de muestreo $y(t + 1)$ ya se conoce y los pasos anteriores se repetirán con este nuevo valor de manera sucesiva. Lo que significa que $u(t + 1|t + 1)$ (señal de control del tiempo $t + 1$ predicha en el tiempo $t + 1$) se calcula con información diferente y será diferente de $u(t + 1|t)$ (señal de control del tiempo $t + 1$ predicha en el tiempo t).

Figura 3

Estructura básica necesaria para implementar el control predictivo.



Nota. Adaptado de “Control predictivo: pasado, Presente y futuro” (p. 7), por E. Camacho, 2004, Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, Vol.1, Núm. 3.

En la figura 3 se muestra la estructura básica por la que está compuesto el control predictivo de manera general, se usa un modelo para predecir las salidas futuras y el estado del proceso a partir de las señales de entrada y salidas pasadas.

Las señales de control futuras se calculan en el optimizador, que considera la función del coste y las posibles restricciones. Debido a que el modelo de proceso que se utilice desarrolla un papel decisivo en el controlador, el modelo elegido debe ser representativo del proceso porque debe ser capaz de reproducir la dinámica del proceso con la finalidad de predecir de forma confiable la salida del sistema. Además, debe ser simple de implementar debido a que el cálculo se hará para cada instante.

2.2.5 Relaciones fundamentales del control MPC

En esta subsección se presentarán las deducciones para una entrada y una salida, luego el tratamiento se podría extender en el caso de múltiples entradas y salidas como lo desarrollado en el artículo de Dougherty (2002). El método de control de predicción se desarrolla a partir de la ecuación de $y(t)$. Con base a este modelo de comportamiento de la planta se avanza k pasos en el tiempo, lo que se representa mediante la siguiente ecuación:

$$y(t) \rightarrow t + k \rightarrow \hat{y}(t + k|t) \quad (1)$$

Donde:

$y(t)$: Es la salida actual.

$\hat{y}(t + k|t)$: Es la salida futura (Predicha), calculada en el tiempo t .

$t + k$: Es el tiempo futuro (k pasos desde el tiempo actual).

En base a esta notación se formula un sistema SISO en espacios de estados de la siguiente forma:

$$x_m(k + 1) = A_m x_m(k) + B_m u(k) \quad (2)$$

$$y(k) = C_m x_m(k) + D_m u(k) \quad (3)$$

El estado actual de x_m es:

$$x_m(k) = A_m x_m(k - 1) + B_m u(k - 1) \quad (4)$$

Restando las ecuaciones (2) y (4):

$$x_m(k + 1) - x_m(k) = A_m [x_m(k) - x_m(k - 1)] + B_m [u(k) - u(k - 1)] \quad (5)$$

$$\Delta x_m(k + 1) = A_m \Delta x_m(k) + B_m \Delta u(k) \quad (6)$$

En la ecuación (6) se calcula la variación de los estados futuros, en función de la variación del estado actual y de la variación de la señal de control. Se desea calcular la variación de la salida a partir de la ecuación (3) sin considerar D_m :

$$y(k + 1) - y(k) = C_m [x_m(k + 1) - x_m(k)] \quad (7)$$

$$y(k + 1) - y(k) = C_m \Delta x_m(k + 1) \quad (8)$$

Reemplazando el valor de $\Delta x_m(k + 1)$ por la ecuación (6):

$$y(k + 1) - y(k) = C_m A_m \Delta x_m(k) + C_m B_m \Delta u(k) \quad (9)$$

$$y(k + 1) = C_m A_m \Delta x_m(k) + y(k) + C_m B_m \Delta u(k) \quad (10)$$

Para conectar la variable $\Delta x_m(k)$ con la salida $y(k)$ se define un nuevo vector de estados:

$$x(k) = \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_m & O_m^T \\ C_m A_m & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_m \\ C_m B_m \end{bmatrix} \Delta u(k) \quad (12)$$

$$y(k) = [O_m \quad 1] \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} \quad (13)$$

Las ecuaciones (12) y (13) se escriben como:

$$x(k+1) = A x(k) + B \Delta u(k) \quad (14)$$

$$y(k) = C x(k) \quad (15)$$

Las ecuaciones (14) y (15) son conocidas como el modelo aumentado, que se usó para el controlador predictivo.

2.2.6 Control DMC

Se usó el modelo de respuesta ante un escalón, represento en la figura 4:

$$y(t) = y_o + \sum_{i=1}^{\infty} g_i \Delta u(t-i) \quad (16)$$

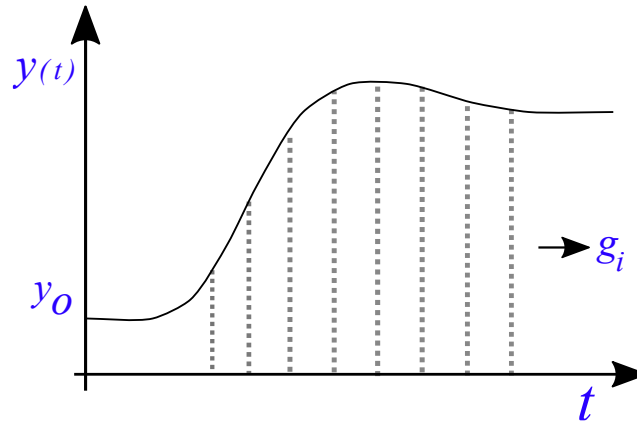
Donde:

$\Delta u(t-i)$: Son las variaciones de control.

g_i : Son las respuestas del sistema al escalón.

Figura 4

Respuesta futura ante un escalón.



Nota. Adaptado de “Control predictivo: pasado, Presente y futuro” (p. 7), por E. Camacho, 2004, Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, Vol.1, Núm. 3.

La ecuación (16) se mueve k pasos al futuro según la ecuación (1):

$$\hat{y}(t+k|t) = \sum_{i=1}^{\infty} g_i \Delta u(t+k-i) \quad (17)$$

Donde:

$k-i \geq 0$: Genera términos referentes al futuro

$k-i < 0$: Genera términos referentes al Pasado

Dividiendo la sumatoria en la ecuación (17) en sus términos referentes al futuro y al pasado:

$$\hat{y}(t+k|t) = \sum_{i=1}^K g_i \Delta u(t+k-i) + \sum_{i=K+1}^{\infty} g_i \Delta u(t+k-i) \quad (18)$$

Para que el modelo esté completo se agrega el error de perturbación actual:

$$n(t) = y_m(t) - \hat{y}(t|t) \quad (19)$$

Como se considera que las perturbaciones son constantes en el futuro:

$$\hat{n}(t+k|t) = \hat{n}(t) = y_m(t) - \hat{y}(t|t) \quad (20)$$

Se agrega la perturbación de la ecuación (19) a la expresión (18):

$$\hat{y}(t+k|t) = \sum_{i=1}^K g_i \Delta u(t+k-i) + \sum_{i=K+1}^{\infty} g_i \Delta u(t+k-i) + n(t) \quad (21)$$

Usando la relación (20):

$$\hat{y}(t+k|t) = \sum_{i=1}^K g_i \Delta u(t+k-i) + \sum_{i=K+1}^{\infty} g_i \Delta u(t+k-i) + y_m(t) - \hat{y}(t|t) \quad (22)$$

La ecuación (22) es conocida como el modelo de predicción completo, donde el primer término es referente al futuro y los restantes al pasado. Se realiza la siguiente definición para referirnos a los términos pasados:

$$\hat{y}_P = \sum_{i=K+1}^{\infty} g_i \Delta u(t+k-i) + y_m(t) - \hat{y}(t|t) \quad (23)$$

La ecuación (17) se llevará k pasos al pasado para simplificar los factores:

$$\hat{y}(t+k|t) \rightarrow \hat{y}(t|t) = \sum_{i=1}^{\infty} g_i \Delta u(t-i) \quad (24)$$

Reemplazando la ecuación (24) en la ecuación (23):

$$\hat{y}_P = y_m(t) + \sum_{i=K+1}^{\infty} g_i \Delta u(t+k-i) - \sum_{i=1}^{\infty} g_i \Delta u(t-i) \quad (25)$$

Se hace un cambio de variable para igualar sumatorias $j = i - k$:

$$\hat{y}_P = y_m(t) + \sum_{j=1}^{\infty} g_{j+k} \Delta u(t-j) - \sum_{i=1}^{\infty} g_i \Delta u(t-i) \quad (26)$$

$$\hat{y}_P = y_m(t) + \sum_{j=1}^{\infty} (g_{j+k} - g_i) \Delta u(t-j) \quad (27)$$

Si el proceso es estable los coeficientes g_j de la respuesta ante escalón tienden a valores constantes después de N periodos de muestreo, por lo que se puede considerar que:

$$g_{j+k} - g_j \approx 0 \quad \forall i > N \quad (28)$$

Por lo que la ecuación (27) quedará limitada a:

$$\hat{y}_P = y_m(t) + \sum_{j=1}^N (g_{j+k} - g_i) \Delta u(t-j) \quad (29)$$

Por lo que todo el modelo queda de la siguiente forma:

$$\hat{y}(t+k|t) = \sum_{i=1}^K g_i \Delta u(t+k-i) + y_m(t) + \sum_{j=1}^N (g_{j+k} - g_i) \Delta u(t-j) \quad (30)$$

La respuesta forzada es el primer término y el segundo corresponde a la respuesta libre. La respuesta libre es llamada $f(t + k)$.

$$f(t + k) = y_m(t) + \sum_{j=1}^N (g_{j+k} - g_i) \Delta u(t - j) \quad (31)$$

Se desarrolla termino a término la ecuación (30):

$$\hat{y}(t + 1|t) = g_1 \Delta u(t) + y_m(t) + \sum_{j=1}^N (g_{j+1} - g_i) \Delta u(t - j) \quad (32)$$

Usando la relación (31):

$$\hat{y}(t + 1|t) = g_1 \Delta u(t) + f(t + 1) \quad (33)$$

$$\hat{y}(t + 2|t) = g_1 \Delta u(t + 1) + g_2 \Delta u(t) + f(t + 2) \quad (34)$$

$$\hat{y}(t + P|t) = g_1 \Delta u(t + P - 1) + g_2 \Delta u(t + P - 2) + \dots + g_P \Delta u(t) + f(t + P) \quad (35)$$

Desarrollando matricialmente:

$$\begin{bmatrix} \hat{y}(t + 1|t) \\ \hat{y}(t + 2|t) \\ \vdots \\ \hat{y}(t + P|t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_1 & 0 & \dots & 0 \\ g_2 & g_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_P & g_{P-1} & \dots & g_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u(t) \\ \Delta u(t + 1) \\ \vdots \\ \Delta u(t + P - 1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f(t + 1) \\ f(t + 2) \\ \vdots \\ f(t + P) \end{bmatrix} \quad (36)$$

Se usa la siguiente notificación simplificada:

$$\hat{y} = G u + f \quad (37)$$

Las variables manipuladas se calculan de forma que minimicen la siguiente función objetivo cuadrática, que incluye el esfuerzo de control.

$$J = \sum_{j=1}^P \delta_{(j)} [\hat{y}(t + j|t) - w(t + j)]^2 + \sum_{j=1}^N \lambda_{(j)} [\Delta u(t + j - 1)]^2 \quad (38)$$

Donde:

P : Horizonte de predicción

$\hat{y}(t + j|t)$: Salidas de predicción

$w(t + j)$: Puntos de ajuste a lo largo del futuro

$\hat{y}(t + j|t) - w(t + j)$: Diferencia para seguir la referencia

$\delta_{(j)}$: Peso que pondera el seguimiento de la referencia

N : Horizonte de control

$\Delta u(t + j - 1)$: Representa el esfuerzo de control

$\lambda_{(j)}$: Peso que pondera el esfuerzo de control

Los términos $\delta_{(j)}$ y $\lambda_{(j)}$ permiten dar más peso al esfuerzo por seguir la referencia o al esfuerzo de control. La función objetivo se representa en forma de matriz, una expresión que se expandirá al desarrollo para cada valor de j :

$$J = (\hat{y} - w)^T \delta (\hat{y} - w) + \lambda u^T u \quad (39)$$

Reemplazando el valor de \hat{y} encontrada en la ecuación (37):

$$J = (G u + f - w)^T \delta (G u + f - w) + \lambda u^T u \quad (40)$$

Por propiedad de la transpuesta:

$$J = (u^T G^T + (f - w)^T) \delta (G u + f - w) + \lambda u^T u \quad (41)$$

$$J = [u^T G^T \delta G u + u^T G^T \delta (f - w) + (f - w)^T \delta G u + (f - w)^T \delta (f - w)] + \lambda u^T u \quad (42)$$

El segundo término es simétrico por lo que se puede invertir el orden de sus factores:

$$J = [u^T G^T \delta G u + (f - w)^T \delta G u + (f - w)^T \delta G u + (f - w)^T \delta (f - w)] + \lambda u^T u \quad (43)$$

$$J = [u^T (G^T \delta G + \lambda I) u + 2(f - w)^T \delta G u + (f - w)^T \delta (f - w)] \quad (44)$$

Esta función se deriva y se iguala a cero para minimizarla:

$$\frac{\partial f}{\partial u} = 2(G^T \delta G + \lambda I) u + 2(f - w)^T \delta G = 0 \quad (45)$$

Despejando u :

$$u = -(G^T \delta G + \lambda I)^{-1} (f - w)^T \delta G \quad (46)$$

$$\Delta u = (G^T \delta G + \lambda I)^{-1} G^T \delta^T (w - f) \quad (47)$$

De la ecuación (47) solo el termino $(w - f)$ es variable, el resto solo se tiene que calcular una sola vez y al ser constante se le puede reemplazar por K :

$$\Delta u = K(w - f) \quad (48)$$

De la ecuación (48) solo interesa la primera fila porque las demás son de tiempo futuros que serán calculadas respectivamente cuando sea necesario.

$$\Delta u = u(t) - u(t - 1) \quad (49)$$

$$u(t) = \Delta u + u(t - 1) \quad (50)$$

2.2.7 Control difuso

Como se expuso en la subsección anterior el control predictivo usa un modelo matemático de la planta a controlar para calcular el comportamiento futuro del sistema, y mediante este comportamiento futuro se puede predecir la señal de control que se debe usar, definición encontrada en la Tesis de Bedate (2015).

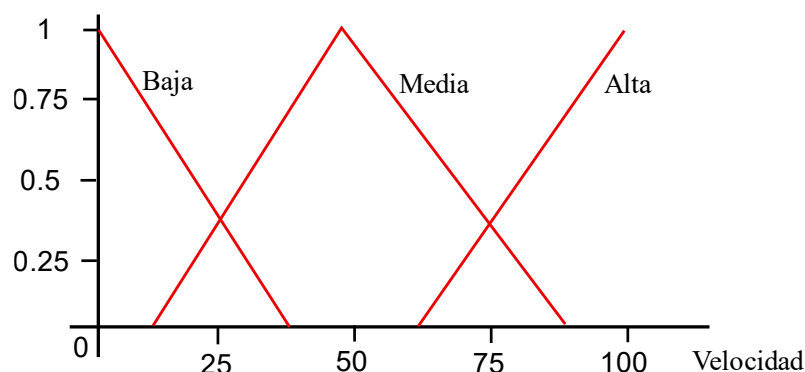
Por su parte el control difuso está basado a partir del concepto de lógica difusa, el cual parte del concepto de la manera en la que las personas perciben el medio, en donde la naturaleza de un valor se encuentra entre la verdad absoluta y la falsedad absoluta. La lógica difusa admite el uso de información imprecisa como temperatura alta, media y baja, en términos de conjuntos difusos que se combinan con reglas para definir la acción de control. Lo que significa, que los sistemas de control basados en lógica difusa combinan variables de entrada, definidas en términos de conjuntos difusos que mediante grupos de reglas producen los valores de salida.

2.2.8 Conjuntos difusos

En la Tesis de Vicent (2014) se define los conjuntos difusos como una modificación de los conjuntos clásicos, a los cuales se les añade una función de membresía, la cual está definida como un número comprendido entre 0 y 1, a la cual se le relaciona con un determinado valor lingüístico, el cual es el nombre del conjunto o subconjunto, por ejemplo “velocidad” representada en la figura 5. Para cada conjunto se tiene que definir una o más funciones de membresía denominadas $\mu_A(x)$, cuya denominación pondera el grado de inclusión de la variable x dentro del concepto representado por la etiqueta A ($0 \leq \mu_A(x) \leq 1$), cuando esta función toma el mínimo valor que es 0 significa que la variable x no está incluido en A y si toma el valor 1 significa que está completamente incluido en A .

Figura 5

Subconjuntos difusos para el conjunto Velocidad



Nota. Adaptado de “Conjuntos difusos: aplicación al control de procesos”, por I. Vicent, 2014, Tesis de pregrado, Universidad Jaume I, Castellón.

Algunos de los conceptos de la teoría clásica de conjuntos también se pueden extender a la teoría de los conjuntos difusos, en cambio otros son exclusivos de esta teoría.

Algunos de los conceptos más usados son:

- Los conjuntos difusos A y B serán iguales si y solo si sus funciones características que los componen: $\mu_A(x)$ y $\mu_B(x)$ sean iguales.
- El conjunto difuso B contendrá al conjunto difuso A . esto es $A \subset B$, si y solo si $\mu_A(x) \leq \mu_B(x)$ para todo $x \in U$.

2.2.9 Funciones de membresía

La Tesis de Álvaro (2019) indica que la función de membresía indica el grado de pertenencia de un elemento a un subconjunto definido por una etiqueta. Las formas más comunes son la triangular, S y trapezoidal, que se muestran en las figuras 6, 7 y 8 respectivamente:

Figura 6

Función de membresía triangular

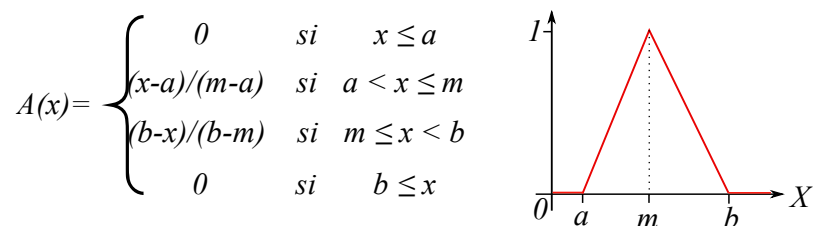


Figura 7

Función de membresía S

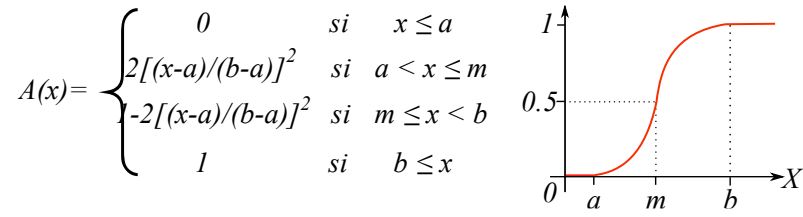
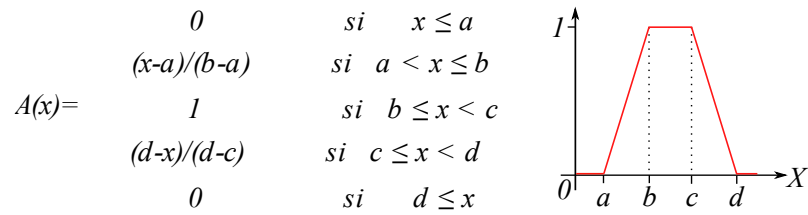


Figura 8

Función de membresía trapezoidal



Nota. Figuras adaptadas de “Análisis comparativo de control PID y lógica difusa como técnicas de control en un proceso de nivel de un tanque de recuperación de agua de una planta minera”, por F. Álvaro, 2019, Universidad Católica de Santa María.

Cuando se aumente el número de funciones características se logra una mayor resolución, pero también se incrementa la complejidad computacional; adicionalmente las funciones de membrecía pueden estar solapadas, esto hace visible un aspecto clave de la lógica difusa: Una variable puede pertenecer en diferentes grados a varios conjuntos difusos a la vez.

2.2.10 Operaciones difusas

A las funciones características se les aplica operadores o se pueden realizar operaciones entre ellos, luego de la aplicación de estas operaciones se obtiene otro conjunto. Se definirán a continuación 3 operaciones básicas a realizar sobre conjuntos, estas operaciones son: complemento, unión e intersección. Además, se usarán las etiquetas A y B para identificar a dos conjuntos difusos asociados a una variable x, las operaciones se definen como:

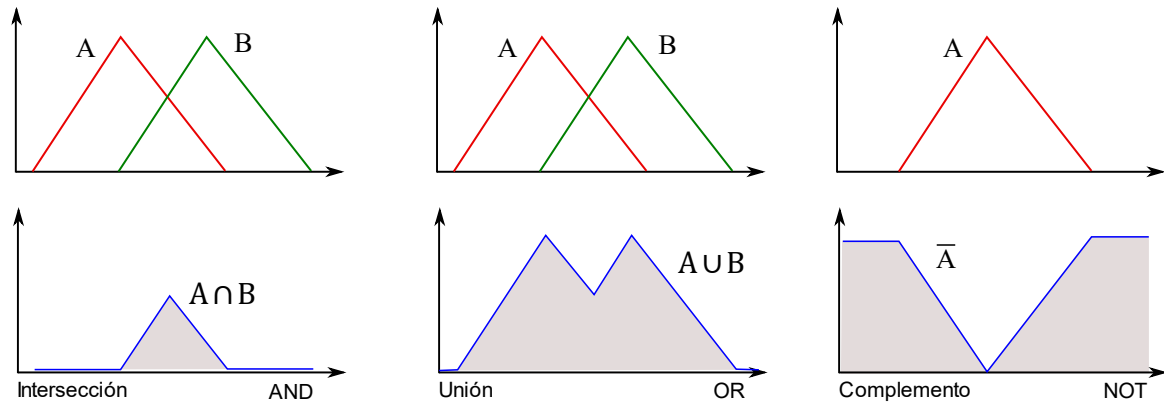
- Complemento: $\mu_A(x) = 1 - \mu_A(x)$ (51)

- Unión: $\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)]$ (52)

- Intersección: $\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]$ (53)

Figura 9

Operaciones lógicas difusas



Nota. Adaptado de “Análisis comparativo de control PID y lógica difusa como técnicas de control en un proceso de nivel de un tanque de recuperación de agua de una planta minera”, por F. Álvaro, 2019, Universidad Católica de Santa María.

En la figura 9 se puede observar que las operaciones mostradas se pueden interpretar como las operaciones lógicas NOT, OR y AND respectivamente. Las tres operaciones lógicas definidas para conjuntos difusos y conjuntos clásicos cumplen la teoría clásica de conjuntos de asociatividad, conmutatividad y distributiva, así como las leyes de Morgan. Sin embargo, existen dos leyes fundamentales de la teoría clásica de conjuntos que no se cumplen en la teoría de conjuntos difusos los cuales son:

- El principio de contradicción: $A \cup \bar{A} = U$ (54)

- El principio de exclusión: $A \cap \bar{A} = \Phi$ (55)

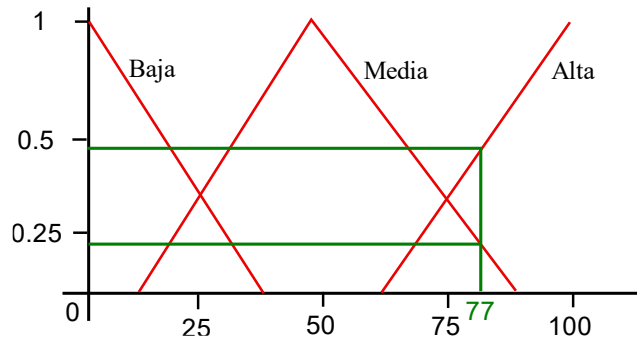
•

2.2.11 Fuzzificación

Es un proceso matemático en el que se transforma la variable medida del proceso en un valor específico para cada función de membresía definidos en su dominio.

Figura 10

Fuzzificación de una variable



Nota. Adaptado de “Análisis comparativo de control PID y lógica difusa como técnicas de control en un proceso de nivel de un tanque de recuperación de agua de una planta minera”, por F. Álvaro, 2019, Universidad Católica de Santa María.

En la figura 10 se eligió el valor de la variable de velocidad 77, el cual tiene los siguientes valores en las funciones de membresía existentes: $\mu_{Alta}(77) = 0.45$, $\mu_{Media}(77) = 0.20$ y $\mu_{Baja}(77) = 0.00$. Este valor de velocidad no pertenece al conjunto Baja, pero si pertenece a los otros dos conjuntos con distintos grados en cada uno. El fuzzificador de la figura 10 es nombrado como singleton, el cual resulta ser el más usado en las aplicaciones, debido a que consiste en operaciones que son sencillas de implementar y calcular.

2.2.12 Reglas difusas

Las reglas combinan uno o más conjuntos de entrada y lo relaciona a un conjunto de salida. Son afirmaciones con una estructura del tipo si – entonces, los conjuntos difusos de entrada se asocian mediante operaciones lógicas difusas.

La agrupación de reglas forma una base de reglas, la cual determina el comportamiento del controlador difuso, para la creación de la base de reglas se necesita el conocimiento o experiencia del operador en el proceso. La base de reglas suele representarse por tablas. Cada regla está asociado un valor entre cero y uno que le brindan un peso. Existe gran variedad de tipos de reglas, pero en general se emplean dos: Mamdani y Takagi-Sugeno, cuya estructura se detalla a continuación:

- Mamdani: *IF x_1 is A AND x_2 is B AND x_3 is C THEN u_1 is D* (56)

- Sugeno: *IF* x_1 *is* A *AND* x_2 *is* B *AND* x_3 *is* C *THEN* $u_1 = f(x_1, x_2, x_3)$ (57)

En la tabla 3 se observan las principales diferencias entre una estructura Mamdani y Sugeno:

Tabla 3

Principales diferencias entre una estructura Mamdani y Sugeno

amdani	Sugeno
Tiene una función de membresía como salida.	o tiene una función de membresía como salida.
El resultado se obtiene mediante las reglas de defuzzificación.	El resultado se obtiene mediante el promedio ponderado del consecuente.
La superficie de salida es discreta.	La superficie de salida es continua.
Útil para sistemas MISO y MIMO.	Útil sólo a sistemas MISO.
Interpretación fácil.	Interpretación difícil.
Poca flexibilidad para el diseño.	Bastante flexibilidad para el diseño.
Alta carga computacional.	Baja carga computacional.

Nota. Adaptado del artículo web “What is the difference between Mamdani and Sugeno un Fuzzy Logic?” de Mathematics Stack Exchange.

De las funciones de pertenencia para cada una de las entradas y las salidas se puede elaborar una base de reglas para el diseño del controlador en la tabla 4.

Tabla 4

Tabla de reglas del controlador.

Set \ error	e1	e2	e3	e4	e5
s1	u1	u1	u1	u2	u3
s2	u1	u1	u2	u3	u4
s3	u1	u2	u3	u4	u5
s4	u2	u3	u4	u5	u5
s5	u3	u4	u5	u5	u5

Nota. Elaboración propia.

2.2.13 Defuzzificación

La función de la defuzzificación es obtener el valor numérico de la salida luego del proceso de inferencia. Existen varios métodos para realizar ese cálculo, pero no todos son óptimos para su implementación.

La defuzzificación por centroide visto por Kartalopoulos (1993), la inferencia de las funciones de membresía que no varían en el tiempo hace posible calcular fácilmente el centro de gravedad de las mismas, en adelante el **centroide**. Esta conversión pondera la veracidad de cada regla con un peso del centroide en salida de la misma, con la expresión matemática:

$$y = \frac{\sum_{k=1}^N y_k \cdot \mu_k}{\sum_{k=1}^N \mu_k} \quad (58)$$

Donde:

y_k : Representa el centroide de la función de membresía.

μ_k : Es el grado de realidad o peso de las entradas existentes.

y : Es la salida que produce nuestro sistema.

Si se expresa de forma continua:

$$y = \frac{\int x\mu(x)dx}{\int \mu(x)dx} \quad (59)$$

Donde:

$\mu(x)$: Es la función de pertenencia del conjunto de salida, cuya variable es x .

El dato de salida y debe ser un número real. Para calcular la salida existen diversos métodos de defuzzificación, entre ellos se encuentran:

- Centro de gravedad: Es el método más común. La salida se calcula mediante el centro de gravedad de cada conjunto de salida correspondiente a cada regla.
- Media del máximo: La salida se calcula mediante el valor medio de los valores cuyas funciones de membresía que alcanzan el valor máximo.

- Máximo menor: La salida se calcula mediante el valor medio de los valores cuyas funciones de membresía que generan el valor más alto de la función de membresía.
- Máximo mayor: La salida se calcula mediante el máximo valor de todos aquellos que generen el valor más alto en la función de membresía.
- Bisector de área: La salida se calcula mediante el valor que separa el área bajo la curva en dos sub áreas iguales.

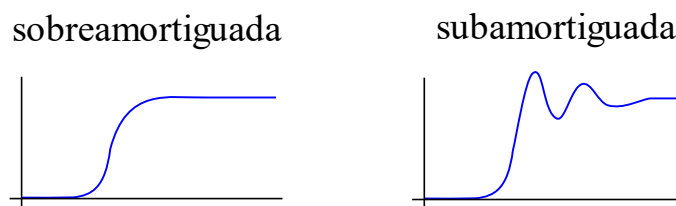
Tanto la defuzzificación como la fuzzificación conectan el sistema difuso con el mundo real.

2.2.14 Función de transferencia

Se requiere obtener el modelo matemático del proceso según el tipo de respuesta que se presente. Existen dos tipos de respuestas como en la figura 11, sub-amortiguadas y sobre-amortiguadas. Generalmente las respuestas sub-amortiguadas se presentan en procesos de mayores velocidades de respuesta, debido a ello, presentan inconvenientes como la sobre-oscilación.

Figura 11

Respuestas de sistemas sobre-amortiguadas y sub- amortiguadas.



Nota. Elaboración propia.

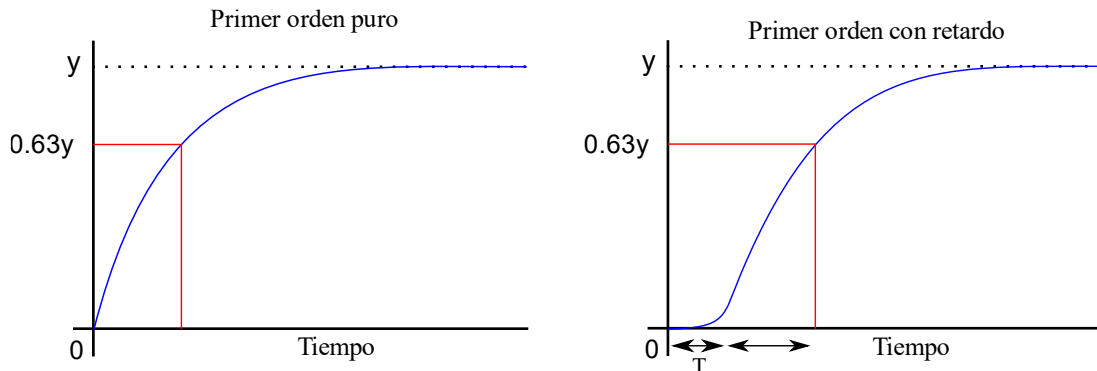
La identificación mediante la respuesta ante la entrada escalón radica en emplear, una entrada en forma de escalón sobre un sistema en equilibrio. Luego de analizar su respuesta, se obtiene la función de transferencia que representa al proceso.

2.2.15 Respuestas sobre amortiguadas

Este tipo de respuestas se presentan en sistemas que tienen polos reales. Los sistemas de primer orden puro representados en la figura 12, no presentan sobreoscilación en la salida, además que nunca llegan al valor exacto definido.

Figura 12

Sistema de primer orden puro y con retardo.



Nota. Elaboración propia.

La constante de tiempo corresponde a un valor de 63%y.

La función de transferencia de este sistema de primer orden es la siguiente:

$$G(s) = \frac{K}{1 + \tau \cdot s} \quad (60)$$

Donde:

K : Representa la ganancia del sistema.

τ : Es la constante de tiempo.

$$K = \frac{\text{Señal salida}}{\text{Señal entrada}} = \frac{\Delta y}{\Delta u} \quad (61)$$

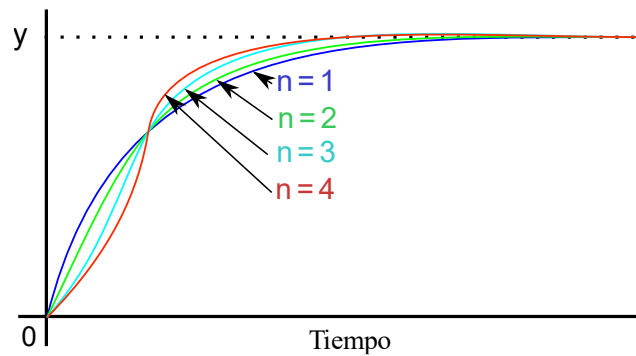
Si el sistema es de primer orden con retardo T posee la siguiente configuración:

$$G(s) = \frac{K}{1 + \tau \cdot s} \cdot e^{-T \cdot s} \quad (62)$$

Si el sistema es de polos reales múltiples originan respuestas que varían según la cantidad de polos existentes, mientras aumenten el número de polos la respuesta, se acelera, pero al inicio origina un arranque con mayor suavidad, según la figura 13.

Figura 13

Respuestas de sistemas de polos reales múltiples



Nota. Elaboración propia.

La función de transferencia de un sistema de polos reales múltiples es la siguiente:

$$G(s) = \frac{K}{(1 + \tau \cdot s)^n} \quad (63)$$

Donde:

n : Numero de polos del sistema.

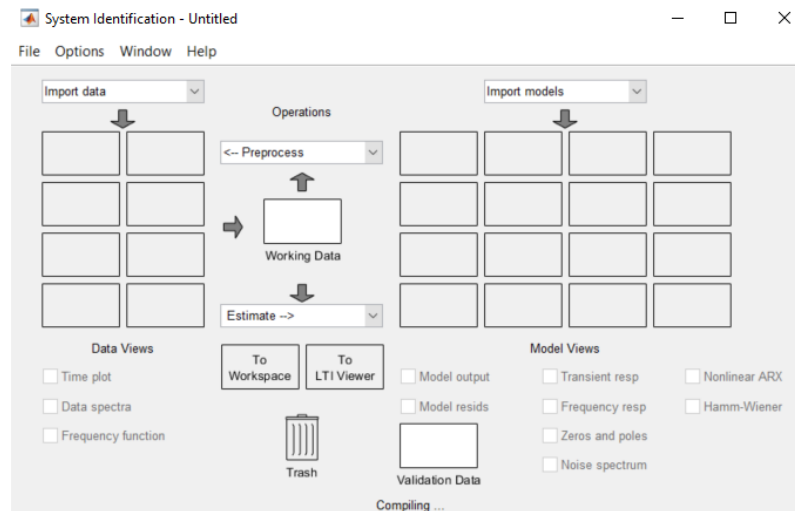
2.2.16 Toolbox System Identification Tool de Matlab

El artículo web de Osorio (2015) define que el Toolbox de Identificación de Sistemas de Matlab - System Identification Tool, es una herramienta de Matlab que permite obtener modelos a partir de las señales de control y de salida. Esta herramienta permite seleccionar las características de las pruebas realizadas con el proceso a identificar, además que permite elegir diferentes configuraciones de un mismo tipo de modelo y decidir el modelo a utilizar en representación de la planta (Vargas, 2016).

Previamente al uso del Toolbox, se requiere que los datos de entrada y de salida del sistema a obtener, sean importados al workspace de Matlab. Luego de ello desde el prompt de Matlab, escribir **ident** o seleccionar **System Identification** desde la barra de tareas. En la figura 14 se encuentra la pantalla inicial del Toolbox.

Figura 14

Pantalla inicial del Toolbox de Identificación de Sistemas de Matlab.

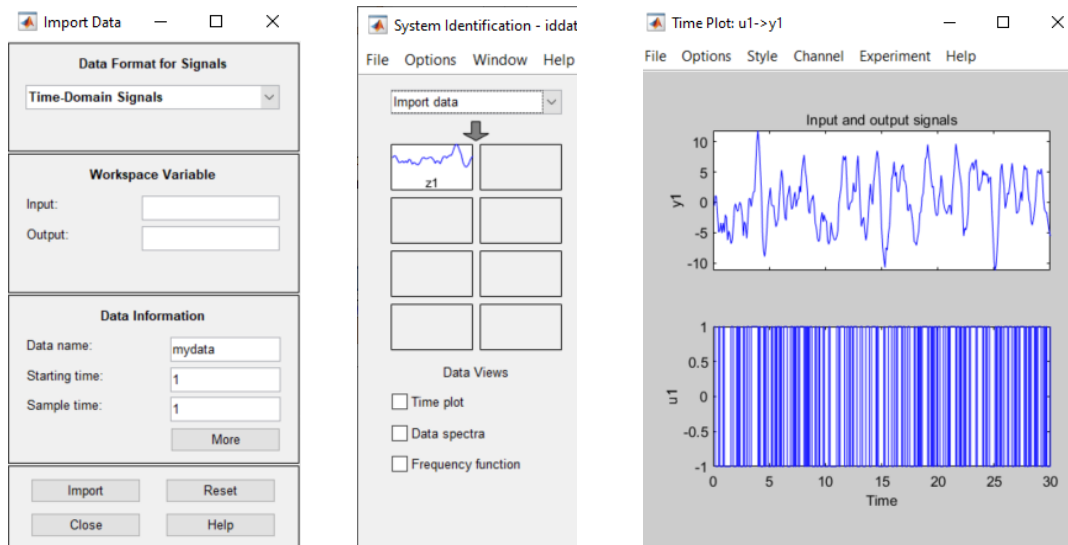


Nota. Extraído de la interfaz del programa MATLAB.

En la parte superior izquierda, se debe seleccionar **Import data**, saldrá una lista donde se debe seleccionar **Time domain data**. Al hacer eso se abre una pantalla para seleccionar las variables de entrada y de salida para identificar según el flujo de la Figura 15. Luego de colocar los nombres de las variables de entrada y salida, además colocar el tiempo de inicio y del tiempo de muestreo, se debe seleccionar **Import**. Cuando la importación se realizó exitosamente se puede visualizar los datos en un cuadro a la mitad del toolbox, para comprobar visualmente los datos se debe seleccionar la opción **Time plot** que originará la ventana a derecha de la figura 15.

Figura 15

Flujo de importación de datos de entrada (u1) y salida (y1).

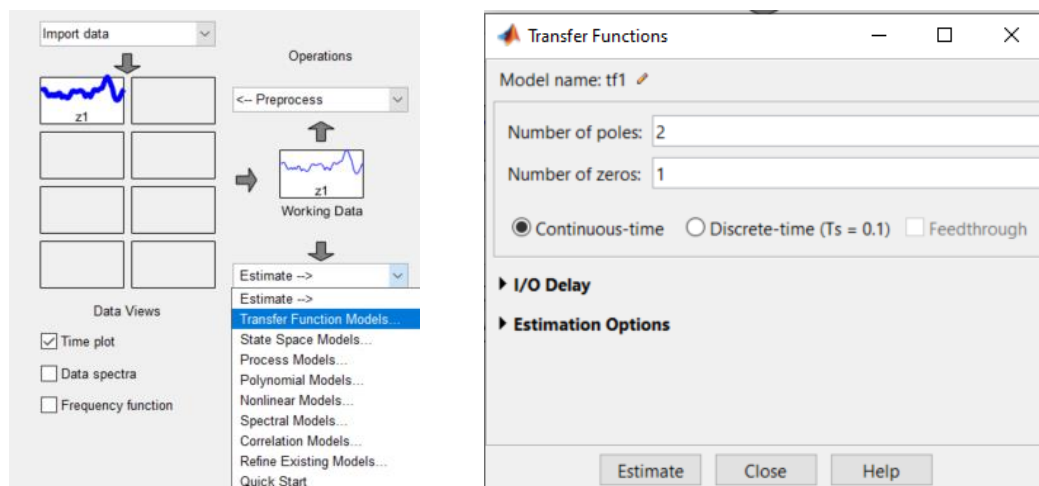


Nota. Extraído de la interfaz del programa MATLAB.

Con los datos importados, ya se puede iniciar la identificación del modelo, para ello en la zona de estimación ubicado en la parte central, se selecciona **Transfer Function Models** y luego se selecciona la cantidad de polos y ceros como en la figura 16.

Figura 16

Flujo de estimación de la función de transferencia.



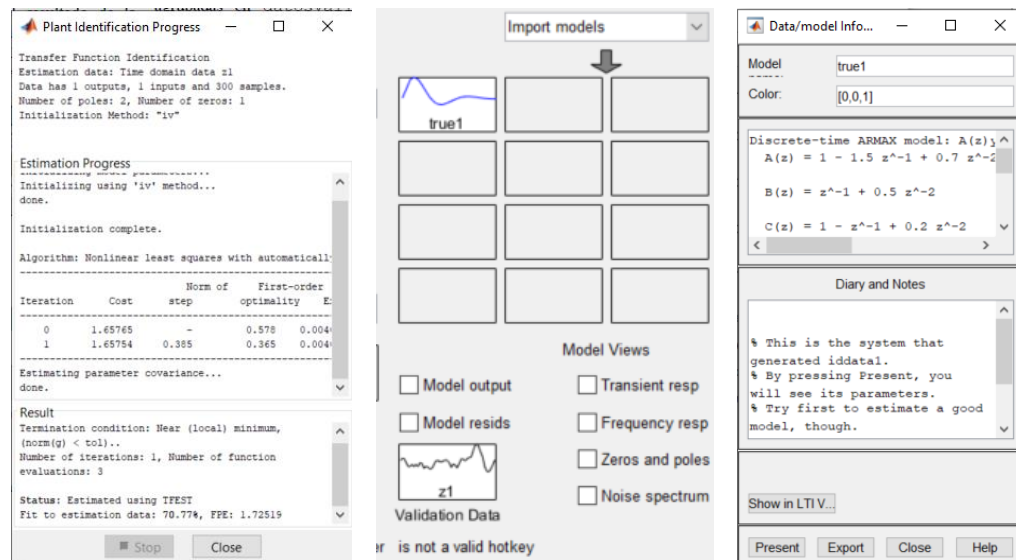
Nota. Extraído de la interfaz del programa MATLAB.

Al seleccionar **Estimate** emergerá la ventana presentada en la figura 17 donde se presenta características de la función de transferencia estimada, así como el porcentaje de correlación entre la función encontrada y los datos iniciales. Cuando la estimación ha

concluido se puede encontrar la función de transferencia encontrada en la parte derecha del toolbox.

Figura 17

Función de transferencia estimada.

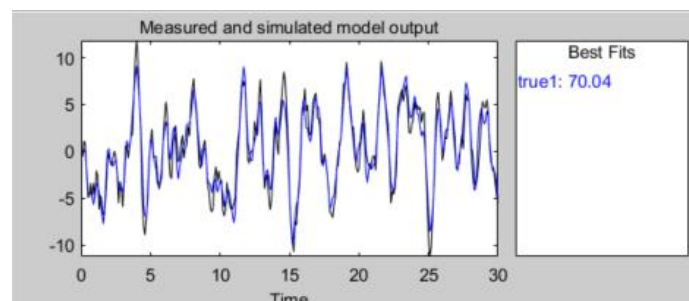


Nota. Extraído de la interfaz del programa MATLAB.

Para hacer una comparativa visual de la validez de la función de transferencia estimada, se puede seleccionar la opción **Model output** que muestra la ventana vista en la figura 18, donde están los datos importados junto a los datos estimados, además del porcentaje de correlación de la estimación.

Figura 18

Comparativa de datos importados con datos estimados.



Nota. Extraído de la interfaz del programa MATLAB.

Capítulo III. Planta de fumigación

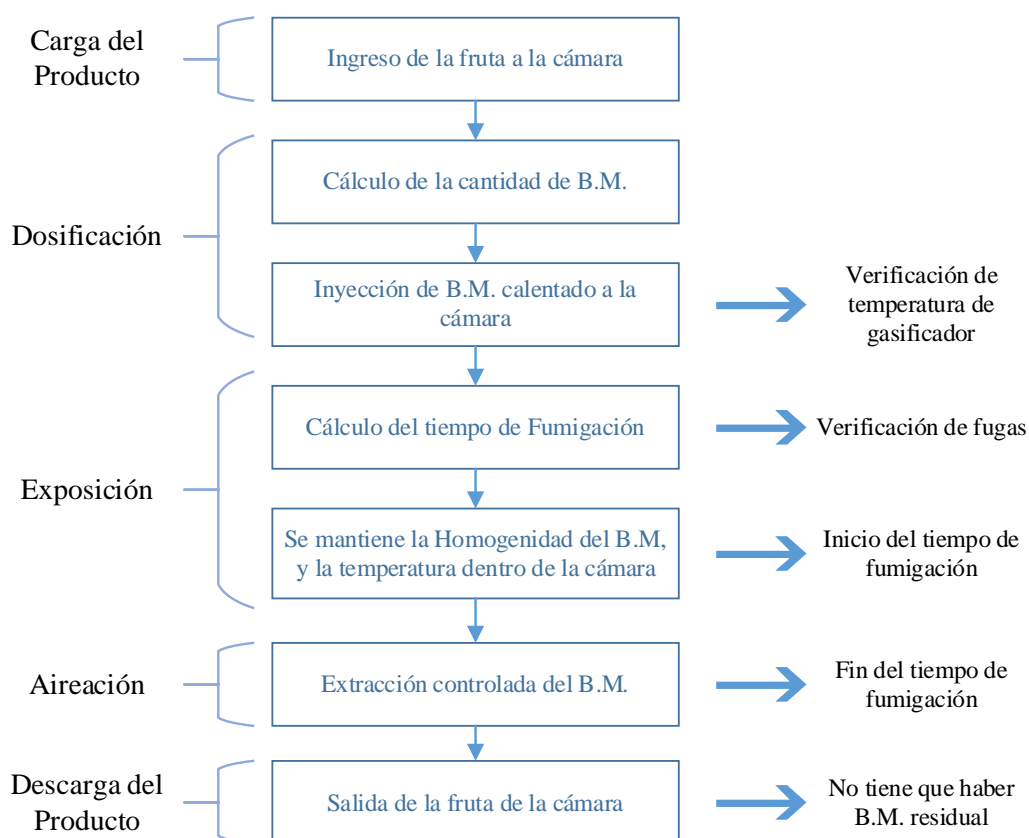
En este capítulo se describe de manera detallada la planta de fumigación, los equipos que intervienen y cada proceso que se sigue para lograr el objetivo deseado.

3.1 Descripción general.

Por la naturaleza de la sustancia involucrada en el proceso de fumigación es necesario que se implemente un sistema automático que ejecute el proceso de fumigación, para lo cual se necesita realizar un estudio y diseño del sistema de supervisión y control de las variables dentro del proceso de fumigación con BM aplicado a un proceso agroindustrial. El proceso de fumigación con bromuro de metilo consta de las siguientes etapas:

Figura 19

Proceso de Fumigación.



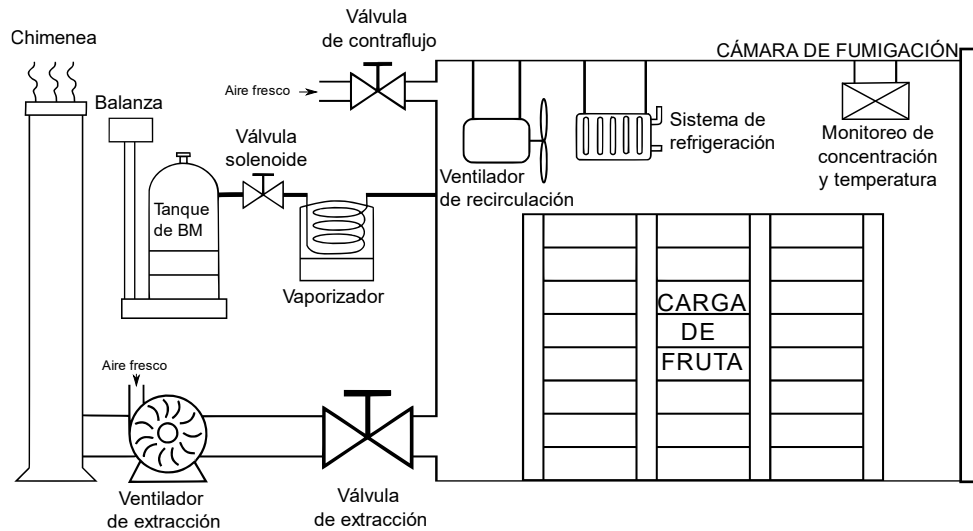
Nota. Elaboración propia.

3.2 Planta de Fumigación

Considerando el procedimiento de medidas fitosanitarias de cuarentena interna para moscas de la fruta Diaz (2014) se tiene la figura 20.

Figura 20

Planta de fumigación propuesta.

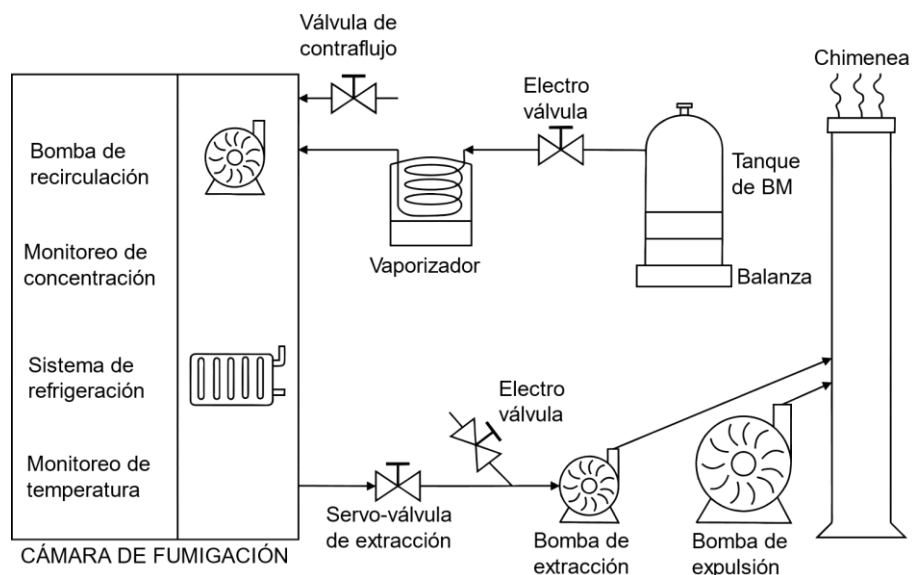


Nota. Adaptado del procedimiento de medidas fitosanitarias de cuarentena interna Diaz (2014).

Para los fines descriptivos se simplificó a la figura 21:

Figura 21

Planta de fumigación



Nota. Elaboración propia.

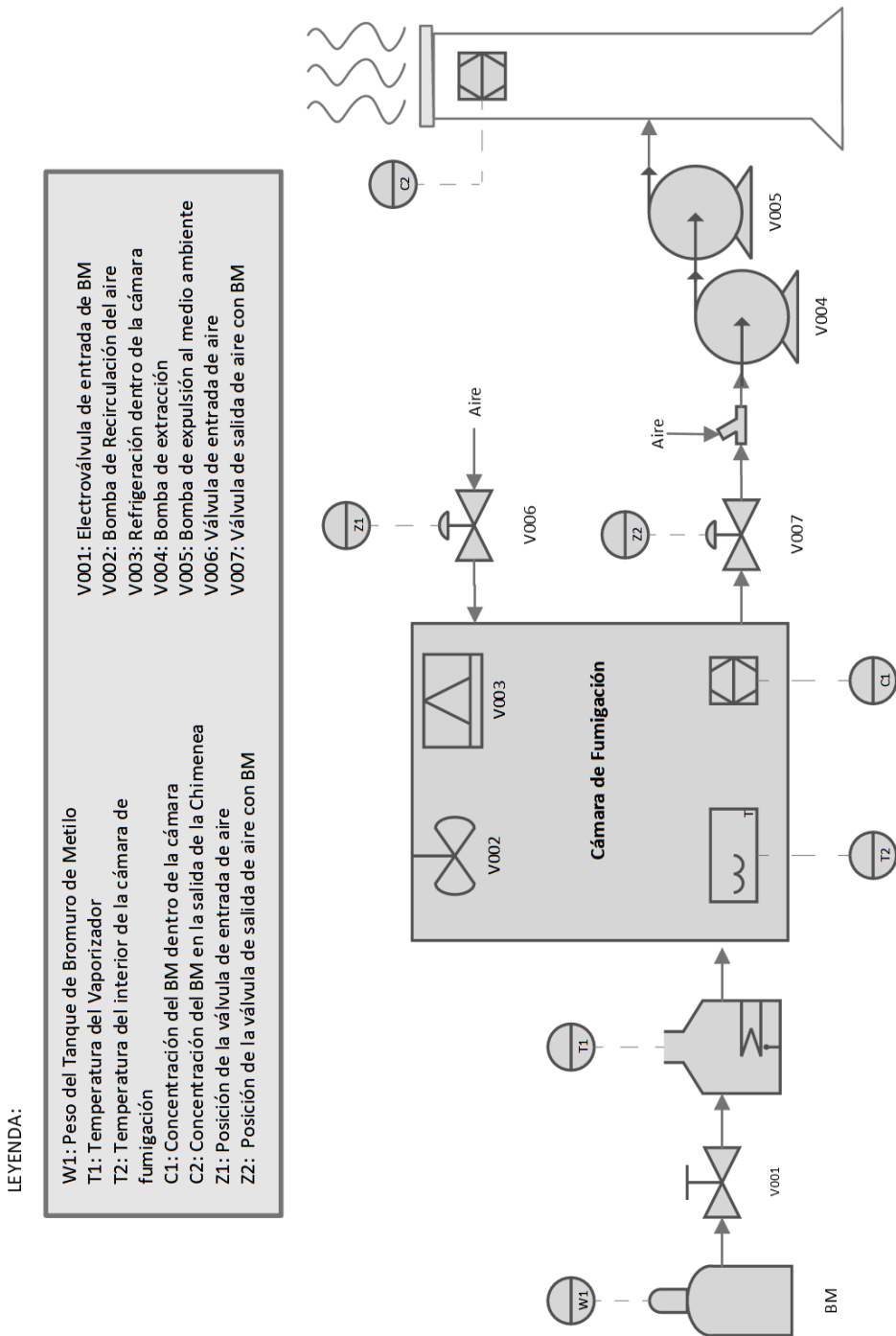
La numeración de las partes de la planta de fumigación se realizó en el Anexo 2.

3.3 Plano de automatización de la planta de fumigación

Luego de estructurar la planta de fumigación se realiza un plano de automatización para tener una referencia al implementar los lazos de control y para integrar los actuadores y sensores.

Figura 22

Plano de automatización de la planta de automatización.

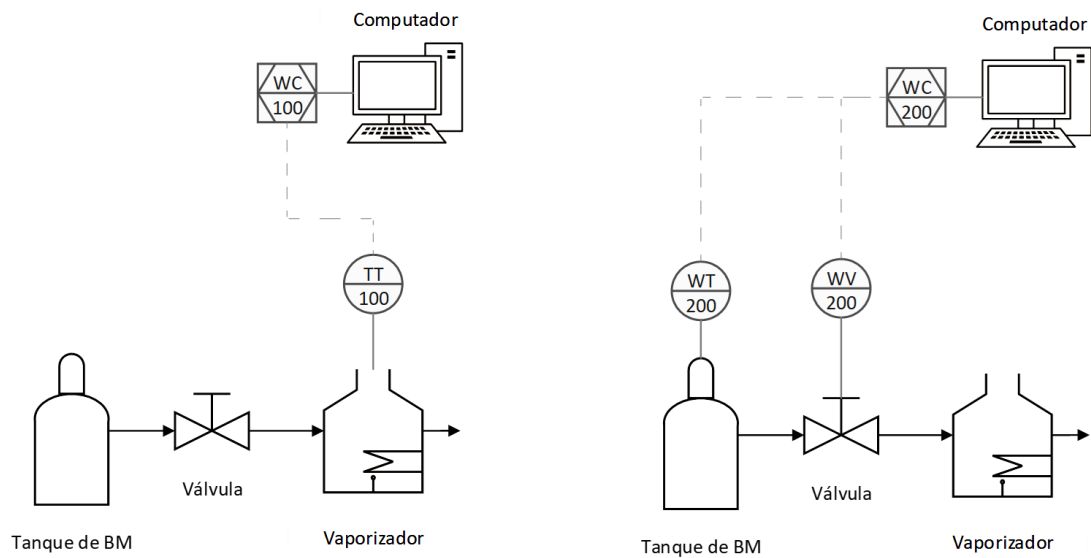


Nota. Elaboración propia.

En las figuras 23, 24 y 25 se muestran los planos en lazos de control combinados según la etapa donde participan.

Figura 23

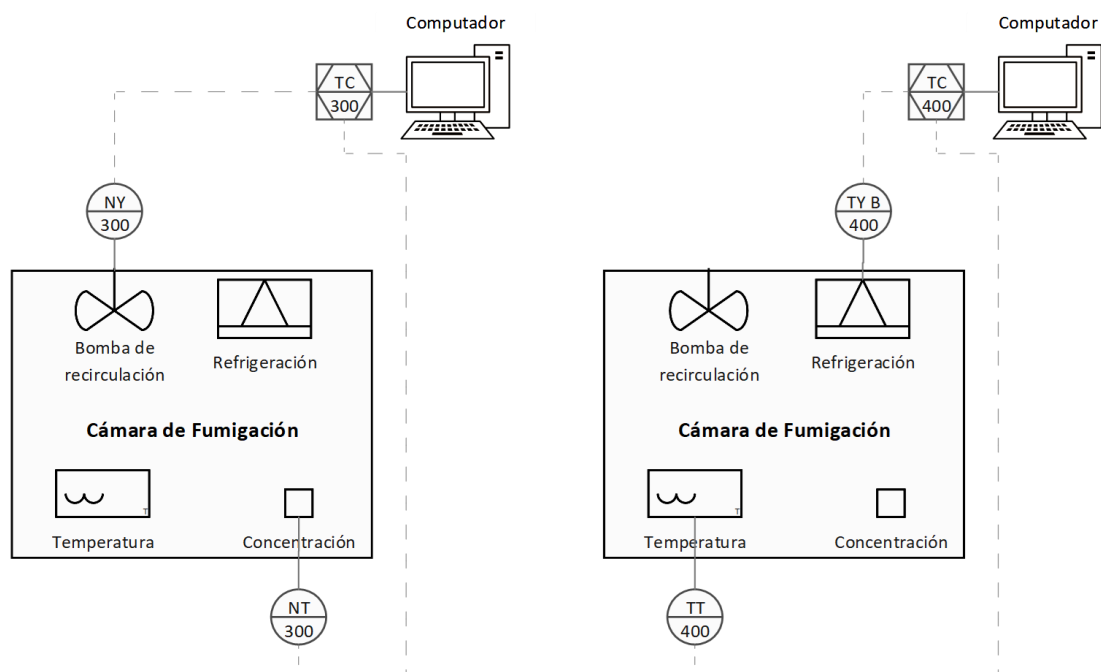
Lazos de control en la etapa de dosificación.



Nota. Elaboración propia.

Figura 24

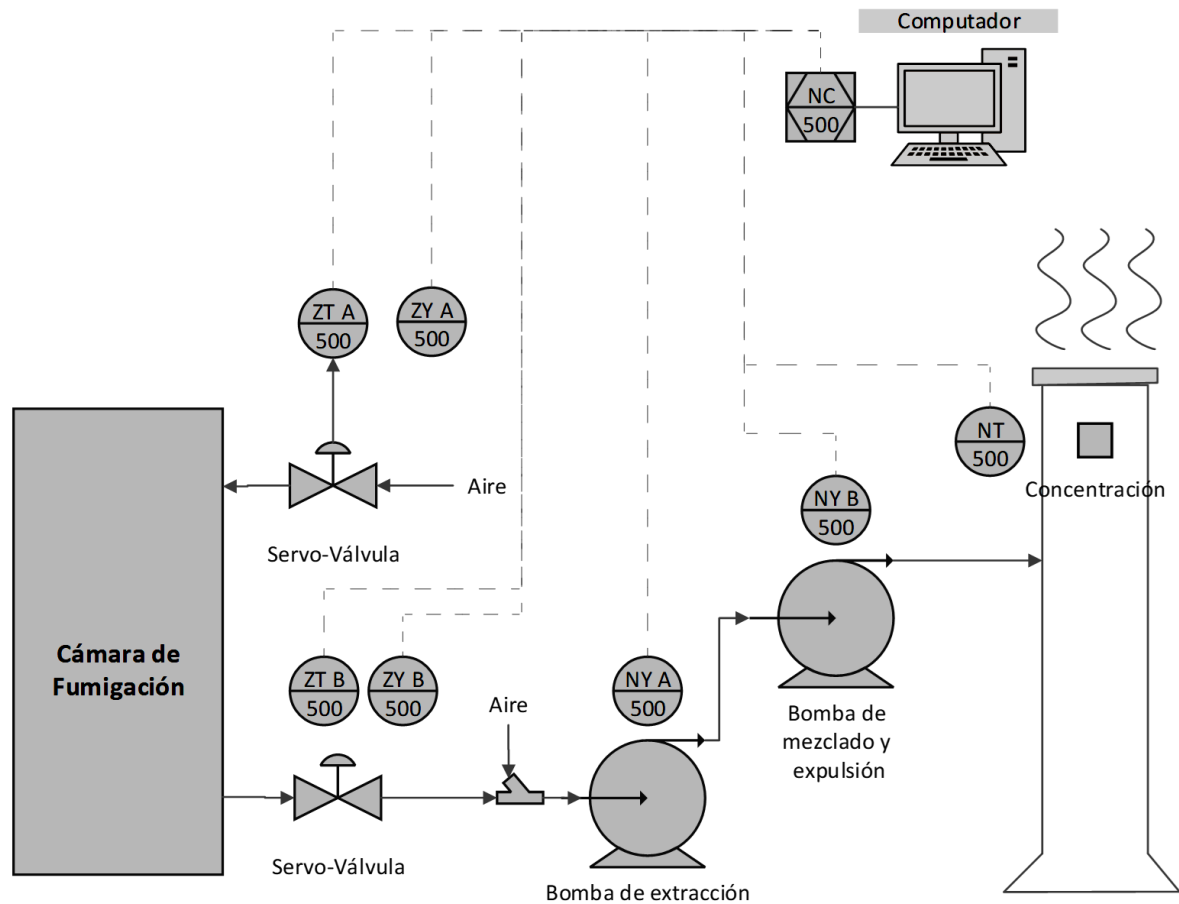
Lazos de control en la etapa de exposición.



Nota. Elaboración propia.

Figura 25

Lazos de control en la etapa de aireación.



Nota. Elaboración propia.

Los lazos de control mostrados son:

- WC100: Control de la temperatura del vaporizador. (Figura 23)
- WC200: Control del peso de BM inyectado. (Figura 23)
- WC300: Control de la concentración en el interior de la cámara. (Figura 24)
- WC400: Control de la temperatura en el interior de la cámara. (Figura 24)
- WC500: Control de concentración de BM en la chimenea. (Figura 25)

Capítulo IV. Etapas del proceso de fumigación

En este capítulo se describen las etapas del proceso de fumigación.

4.1 Etapa de Carga del Producto

4.1.1 Descripción de la etapa de carga del producto

Esta es la etapa inicial del proceso de fumigación, en esta se ingresa la fruta de manera física a la cámara de fumigación. Luego de ello se elige qué tipo de dosis de BM se usará en el proceso según la cantidad y tipo de fruta ingresada. También se debe elegir el tiempo que dura la etapa de exposición en el proceso de fumigación.

4.1.2 Proceso de carga del producto

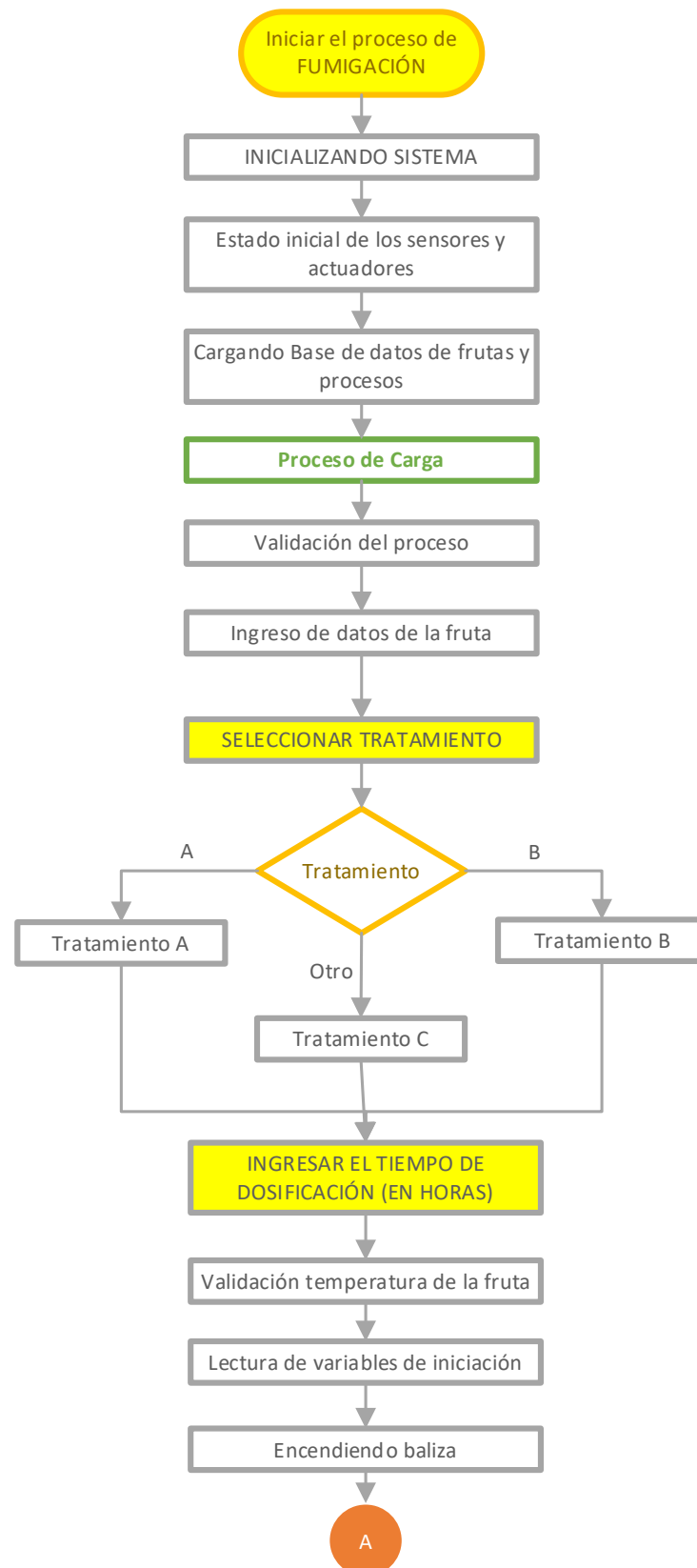
El proceso inicia cargando el estado inicial de los sensores y actuadores, luego cargando la base de datos de frutas y procesos anteriores. Luego de validar el proceso actual se ingresa los datos de la fruta, tipo, cantidad. Además de datos del cliente a quien se le realiza el proceso de fumigación. A partir del tipo de la fruta ingresada se debe seleccionar el tipo de tratamiento que se hará, el tratamiento está directamente relacionado con la dosis de B.M que se usa en la fumigación:

- Tratamiento A: corresponde a 40 g/m³ de dosis
- Tratamiento B: corresponde a 32 g/m³ de dosis
- Tratamiento C: se debe ingresar la dosis de manera manual

Luego de elegir el tratamiento se debe ingresar el tiempo de exposición en horas. El sistema debe validar que la temperatura de la fruta se encuentre en los márgenes adecuados antes de empezar la fumigación y se debe guardar las condiciones iniciales del proceso, se enciende una baliza que indica que el proceso de fumigación se encuentra en curso.

Figura 26

Etapas de carga del producto



Nota. Elaboración propia.

4.2 Etapa de Dosificación

4.2.1 Descripción de la etapa de dosificación

En la etapa de dosificación se calcula y controla automáticamente la dosis de BM que ingresará a la cámara de fumigación y además se controla que este correcta la temperatura del BM que ingresará la cual será igual que la temperatura del vaporizador.

4.2.2 Proceso de dosificación

El proceso se divide en las siguientes partes:

- Inicialmente el proceso de dosificación comienza con el control de la temperatura del vaporizador debido a que este demoraría un tiempo en llegar a su objetivo.
- Luego de eso se debe validar que el peso del tanque de BM no sea el de uno vacío. Del peso inicial se calcula el peso final que tendrá el tanque, mediante la diferencia de pesos es igual a la dosis que ingresa por el volumen de la cámara.
- Antes de apertura la válvula de ingreso del BM se debe validar que el vaporizador se encuentre en la temperatura objetivo, caso contrario se debe esperar.
- Luego que la temperatura sea la correcta se inicia la inyección del BM, en donde se ejecutaran de manera simultánea dos controles automáticos, el primero para controlar que la cantidad de BM que ingrese sea la que se ha calculado y el segundo lazo de control es para mantener la temperatura del vaporizador. Al final de eso se guarda el valor del peso final que balón de BM que debe ser cercano al calculado.

4.2.3 Control de la temperatura del vaporizador

El BM debe pasar por un vaporizador para asegurar una conversión adecuada de BM líquido a gaseoso. El agua debe calentarse a temperaturas de 93 °C o más, con un mínimo de 65 °C durante el proceso de introducción del gas.

4.2.4 Control de la dosis ingresada

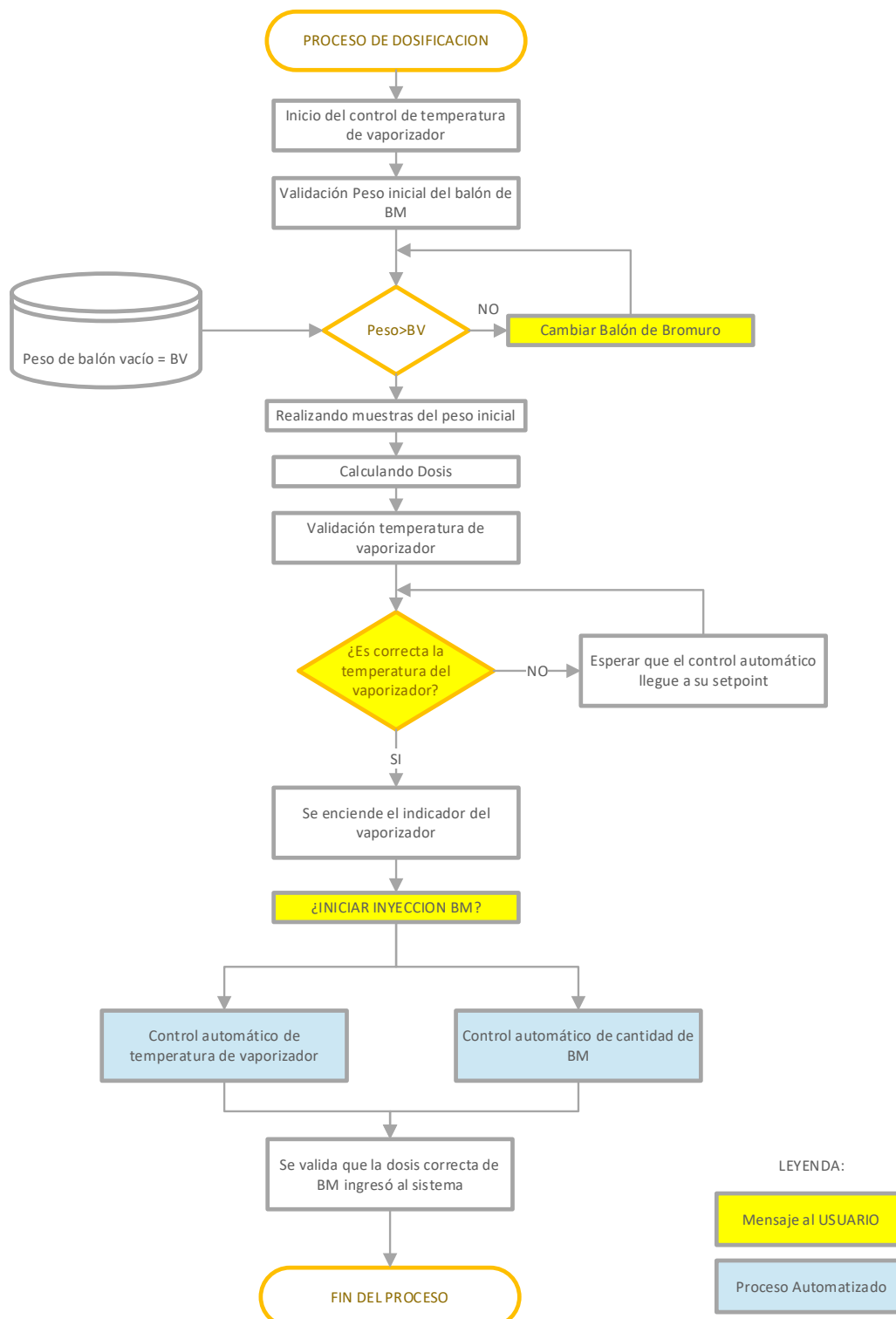
El control de la dosis se realiza mediante el accionamiento de una válvula que permite el ingreso del BM a la cámara de fumigación. La válvula se cierra cuando el peso

del balón de BM haya descendido una cantidad que sea equivalente a la dosis requerida para el proceso por el volumen de cámara de fumigación de la siguiente manera:

$$W_{inicial} - W_{final} = \Delta W [g] = Dosis \left[\frac{g}{m^3} \right] \times Vol_{cámara} [m^3] \quad (64)$$

Figura 27

Diagrama de la etapa de dosificación



4.3 Etapa de Exposición

4.3.1 Descripción de la etapa de exposición

En la etapa de exposición se lleva a cabo la acción fumigante del gas de BM sobre las frutas dentro de la cámara de fumigación durante todo el tiempo que se ha programado en la etapa inicial, para obtener resultados satisfactorios la concentración en todo el ambiente debe ser homogénea, además, que la temperatura interior no debe salir del rango óptimo de trabajo.

4.3.2 Proceso de exposición

Este proceso se caracteriza por:

- La etapa de exposición inicia con los ventiladores de recirculación encendidos para garantizar la homogenización de la concentración dentro de la cámara de fumigación
- Durante todo el tiempo que dure la etapa se debe realizar el control automático de la temperatura en el interior, dentro del rango óptimo. Encendiendo el calefactor o el equipo refrigerante según corresponda.
- Para optimizar el consumo de energía los ventiladores se apagarán si la desviación en las concentraciones medidas es cercana a cero.
- Se debe graficar el valor de las concentraciones y de la temperatura interior durante toda esta etapa.

4.3.3 Control del tiempo de exposición

El control de tiempo se realiza mediante un temporizador que leerá el valor que se introdujo en la etapa de carga del producto.

4.3.4 Control de la concentración de BM

El control de la concentración de BM se realiza principalmente en tres puntos en el interior de la cámara de fumigación que son puerta, centro y fondo. De acuerdo a la

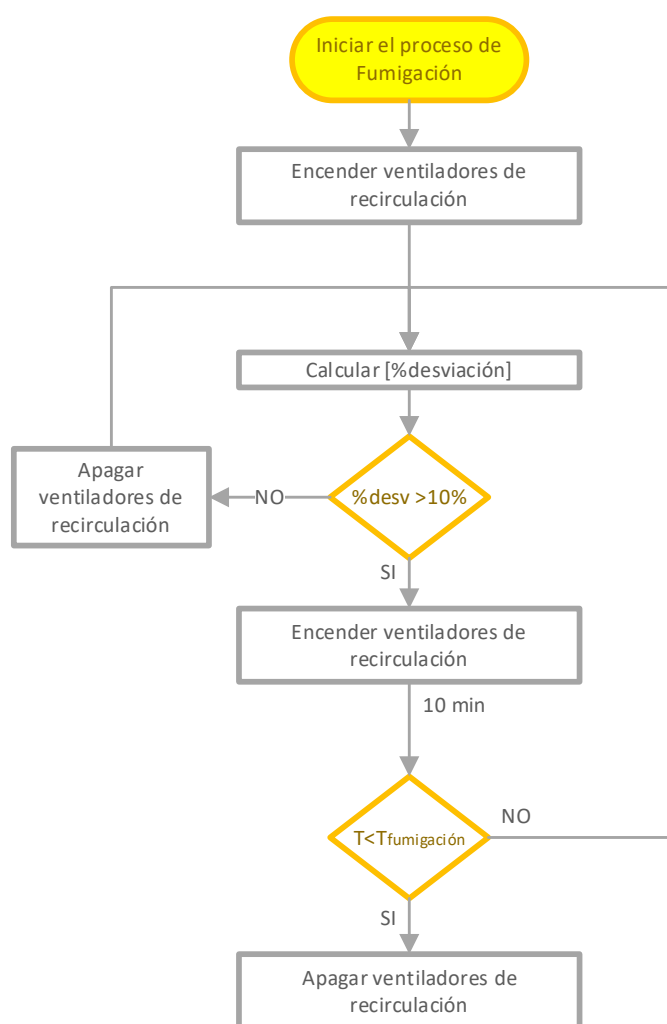
desviación en las mediciones de esos puntos se tomará la decisión de encender o no los ventiladores de recirculación que se encargan de que la concentración de BM sea homogénea en toda la cámara.

4.3.5 Control de la temperatura interior de la cámara de fumigación

El control de la temperatura interior de la cámara de fumigación es importante para proteger el producto que está siendo fumigado al interior de la cámara. Se realizará mediante un resistor calefactor y un equipo de refrigeración que se accionarán de acuerdo a la temperatura medida y con el objetivo de mantener la temperatura dentro de un rango definido durante la etapa de carga del producto.

Figura 28

Diagrama de la etapa de exposición



Nota. Elaboración propia.

4.4 Etapa de Aireación

4.4.1 Descripción de la etapa de aireación

En la etapa de aireación se procederá con la eliminación del BM que se encuentra en el interior de la cámara de fumigación y será eliminado por la chimenea. Antes de que el aire con BM sea eliminado se debe mezclar con aire puro para bajar la concentración del BM. Durante esta etapa se debe controlar la concentración de BM que está siendo expulsada para cumplir los estándares de manejo del BM y para evitar posibles daños ambientales.

4.4.2 Proceso de aireación

En este proceso se caracteriza por:

- El encendido de los ventiladores de dilución y extracción. El ventilador de dilución se encarga de inyectar aire puro al canal de expulsión lo que disminuye la concentración de BM expulsado. El ventilador de expulsión se encarga de extraer el BM del interior de cámara mezclado previamente con el aire puro inyectado por el ventilador de dilución.
- La apertura ligera del Damper de extracción.
- La apertura un Damper anti-vacío para evitar la generación de vacío dentro de la cámara de fumigación, por donde ingresa aire puro a la cámara.
- El control automático se encarga de controlar la concentración de BM en la expulsión hasta que la concentración de BM sea cercana a cero en el interior de la cámara (menor a 20 ppm).
- La gráfica del valor de la concentración de BM que está siendo expulsado por la chimenea.

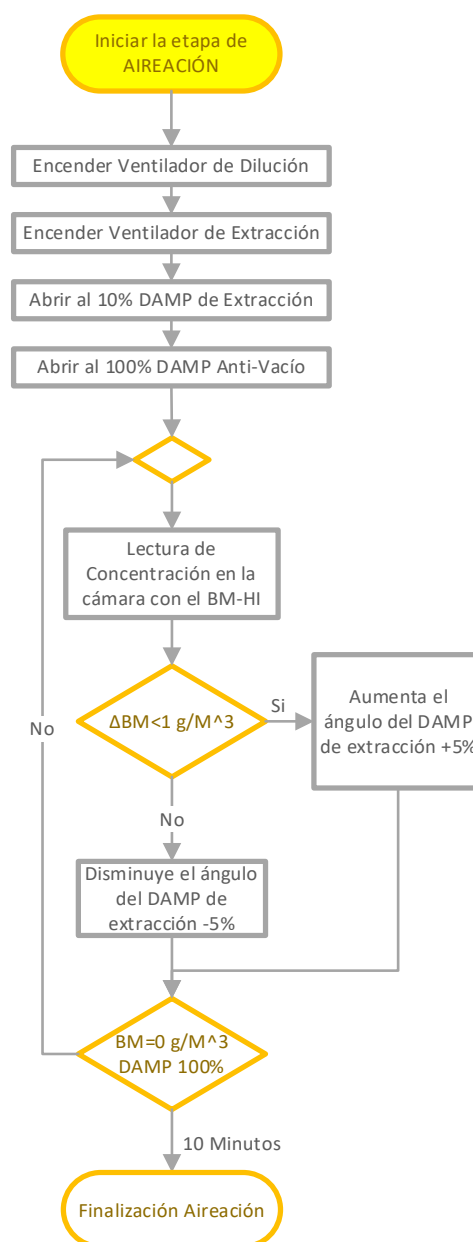
4.4.3 Control de la cantidad de BM expulsado

El control de la cantidad de BM expulsado por la chimenea se realiza cambiando el ángulo de apertura del damper de extracción según la concentración leída en la chimenea.

Este control es importante para mantener la expulsión de BM bajo los límites que las normas sanitarias permiten para evitar posibles daños ambientales o personales. La dificultad de este control radica en que hay un gran retardo entre la acción de control y la medición de la concentración en la chimenea, además que la naturaleza turbulenta del aire con BM hace difícil predecir el valor futuro de concentración correspondiente a la apertura del damper de extracción.

Figura 29

Diagrama de la etapa de aireación



4.5 Etapa de descarga del producto

4.5.1 Descripción de la etapa de descarga de producto

En la etapa de descarga del producto se terminará todo el proceso de fumigación, terminando los procesos automáticos de las etapas previas y generando un reporte de todo el proceso desde el inicio. Al finalizar esta etapa se debe retirar el producto de la cámara de fumigación y el sistema debe quedar en espera de un nuevo proceso.

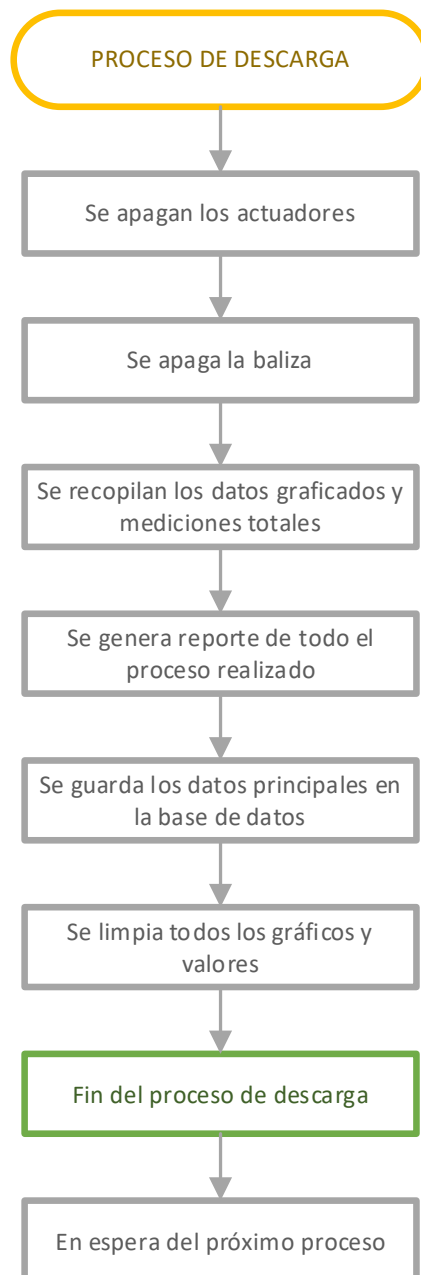
4.5.2 Proceso de descarga del producto

En este proceso se realizan las siguientes acciones:

- Desactivar los actuadores y cancelar todos los procesos automáticos que estén activos.
- Apagar la baliza porque ya el proceso de fumigación ya no está en curso.
- Recopilar los gráficos y las mediciones más significativas del proceso.
- Con los datos y gráficos recopilados generar un reporte que puede ser impreso o enviado por correo para su correcto guardado.
- Guardar los datos principales del proceso en una base de datos.
- Limpiar los gráficos y valores de la interfaz gráfica.
- Informar el fin de proceso de descarga, donde el operador queda habilitado para retirar el producto del interior de la cámara de fumigación.

Figura 30

Diagrama del proceso de descarga del producto.



Nota. Elaboración propia.

Capítulo V. Modelamiento de sistemas físicos

En este capítulo se describe el proceso de modelamiento de los sistemas que se seleccionaron para controlar.

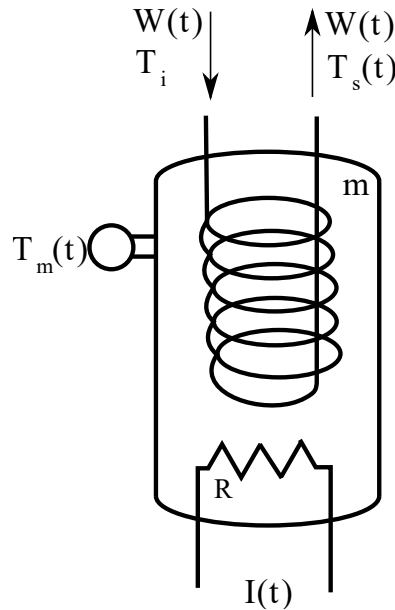
5.1 Modelamiento de la temperatura del vaporizador

Este equipo está en la etapa de dosificación, en esta etapa se deben controlar dos variables: La temperatura del vaporizador y la cantidad de BM que ingresa a la cámara de fumigación. En esta sección se modela el vaporizador que es un depósito de agua que se calienta mediante un resistor y por el cual circula un fluido por las tuberías sumergidas que se deberá calentar.

5.1.1 Modelamiento analítico del vaporizador

Figura 31

Modelo simplificado del vaporizador.



Nota. Elaboración propia.

El sistema físico mostrado en la figura 31 es usado para modelar el equipo, se usa la relación de conservación de energía, en este caso relacionado a la energía calorífica.

$$\text{Energía}_{\text{Ingresar}} - \text{Energía}_{\text{Sale}} = \text{Acumulación} \quad (65)$$

$$I(t)^2 R + W(t)C_{p1}T_i - W(t)C_{p1}T_s(t) = mC_{p2} \frac{dT_m(t)}{dt} \quad (66)$$

Donde:

$I(t)$: Corriente aplicada al resistor calefactor

R : Resistor calefactor

$W(t)$: Masa del fluido que ingresa

C_{p1} : Calor específico del fluido

T_i : Temperatura de ingreso del fluido

$T_s(t)$: Temperatura de salida del fluido

m : Masa del agua del Vaporizador (constante).

C_{p2} : Calor específico del agua

$T_m(t)$: Temperatura del agua

Para linealizar se elige el siguiente punto de equilibrio:

$$T_{so} = T_{mo}; W_o; V_o^2 \quad (67)$$

Linealizando la ecuación (66) se obtiene:

$$\Delta I(t)^2 R + \Delta W(t) C_{p1} T_i - W_o C_{p1} \Delta T_s(t) - \Delta W(t) C_{p1} T_{so} = m C_{p2} \frac{dT_{mo}(t)}{dt} \quad (68)$$

Aplicando la trasformada de Laplace se obtiene:

$$\Delta I(s)^2 R + \Delta W(s) [C_{p1} T_i - C_{p1} T_{so}] = m C_{p2} s \Delta T_{mo}(s) + W_o C_{p1} \Delta T_s(s) \quad (69)$$

Si la longitud de la tubería de cobre es suficientemente larga, se tiene que la temperatura de salida del fluido es la misma que la del vaporizador:

$$\Delta T_{mo}(s) = \Delta T_s(s) \quad (70)$$

Entonces la ecuación (69) se expresa como:

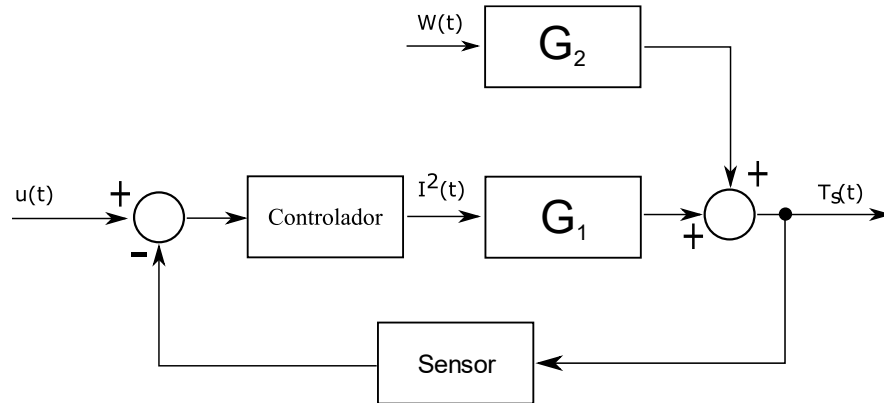
$$\Delta I^2(s) R + \Delta W(s) [C_{p1} T_i - C_{p1} T_{so}] = [m C_{p2} s + W_o C_{p1}] \Delta T_s(s) \quad (71)$$

$$G1 = \frac{R}{m C_{p2} s + W_o C_{p1}} \quad (72)$$

$$G2 = \frac{C_{p1} T_i - C_{p1} T_{so}}{m C_{p2} s + W_o C_{p1}} \quad (73)$$

Figura 32

Diagrama de bloques del control de temperatura.



Nota. Elaboración propia.

El sistema de control se puede representar como diagrama de bloques mostrado en la figura 32, pero debido a que la capacidad del vaporizador para mantener el calor, se puede simplificar el sistema MISO y convertirlo en un sistema SISO. Por lo cual solo quedaría la función de transferencia G_1 mostrada en la ecuación (72). Luego de eso se reemplaza las constantes por sus valores numéricos para visualizar el comportamiento de la función de transferencia encontrada. Para calcular la resistencia se empieza por la potencia de resistencia calefactora (4000W).

$$Potencia = \frac{Voltaje^2}{Resistencia} \quad (74)$$

$$R = \frac{220^2}{4000} = 12.1 \quad (75)$$

Se reemplazaron las constantes por los siguientes valores:

R : 12.1 Ω

W_0 : 0.001 Kg

C_{p1} : 838 J/(Kg.K)

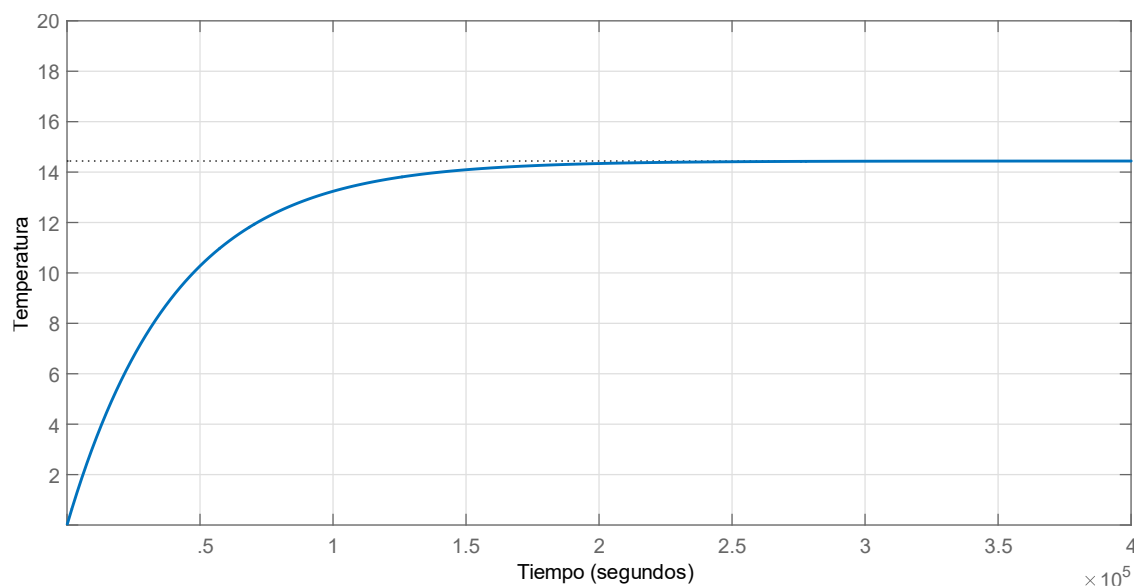
m : 8.05 Kg

C_{p2} : 4186 J/(Kg.K)

$$G_1 = \frac{0.000359079}{s + 2.486 * 10^{-5}} \quad (76)$$

Figura 33

Respuesta del modelo analítico del vaporizador frente a un escalón.



Nota. Elaboración propia.

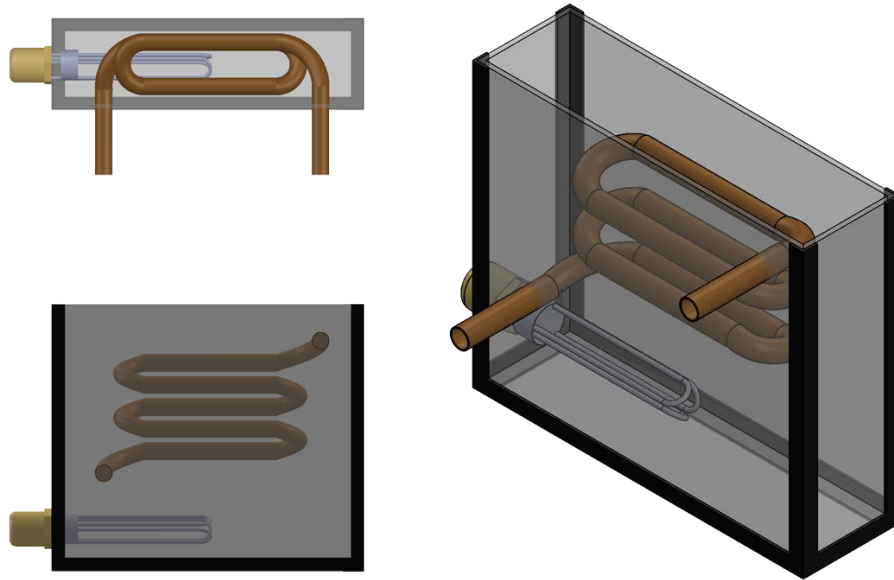
5.1.2 Modelamiento experimental del vaporizador

El modelamiento de este proceso se empieza con la experimentación para registrar la curva de reacción del proceso estudiado frente a una entrada escalón. Para ello se debe implementar un prototipo de la planta estudiada que es un vaporizador en este caso. El diseño del modelo armado, empieza con el diseño de los planos para luego empezar su construcción, en las imágenes siguientes se simplifica el diseño y la construcción.

El prototipo tiene la estructura de la figura 36, en las que la resistencia calefactora y el sensor de temperatura están inmersos en el agua del vaporizador, la placa de desarrollo Arduino Due es usado como datalogger y para controlar el relé sólido. Los relés sólidos habitualmente tienen un tiempo de On-Off de 10 ms, por lo que se deben usar frecuencias de conmutación menores de 100Hz, en este caso se usa 1Hz para evitar daños en el equipo. A esas frecuencias el PWM tiene una resolución de 256 bits, por lo que el valor de duty cycle está en el rango de 0 a 255, para la toma de datos se ajustará a la mitad de su valor (128) y además se dividió la señal de control en dos escalones separados en el tiempo.

Figura 34

Vistas del modelo 3D del prototipo.



Nota. El prototipo fue diseñado previamente en Solidworks antes de su implementación.

Figura 35

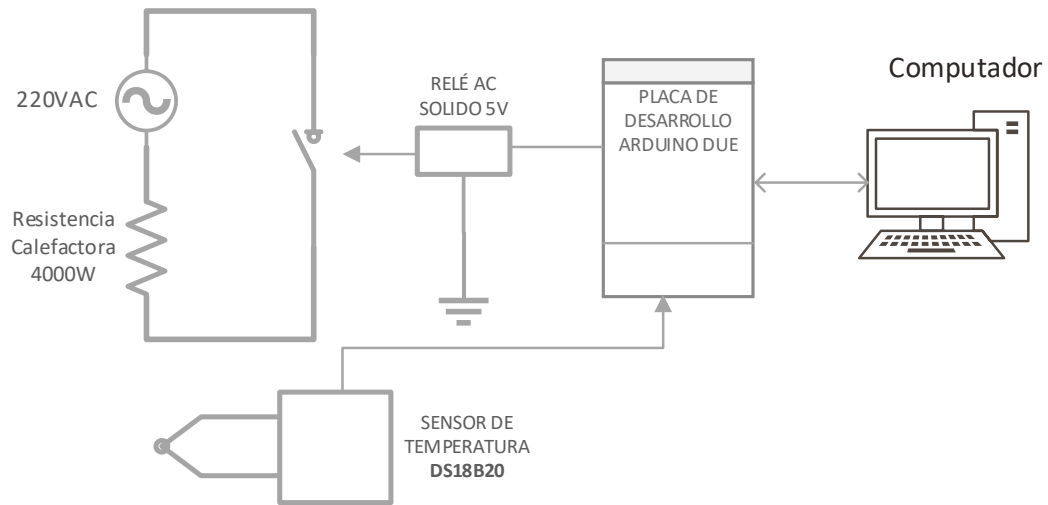
Fotografía del prototipo del modelo.



Nota. Elaboración propia.

Figura 36

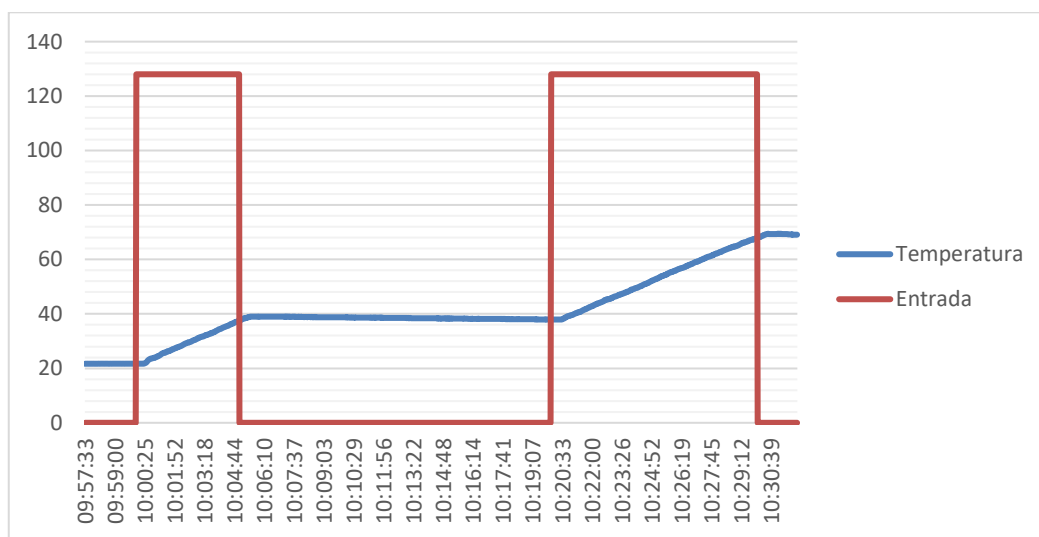
Diagrama de partes del prototipo del vaporizador



Nota. Elaboración propia.

Figura 37

Curva de reacción experimental del Sistema.

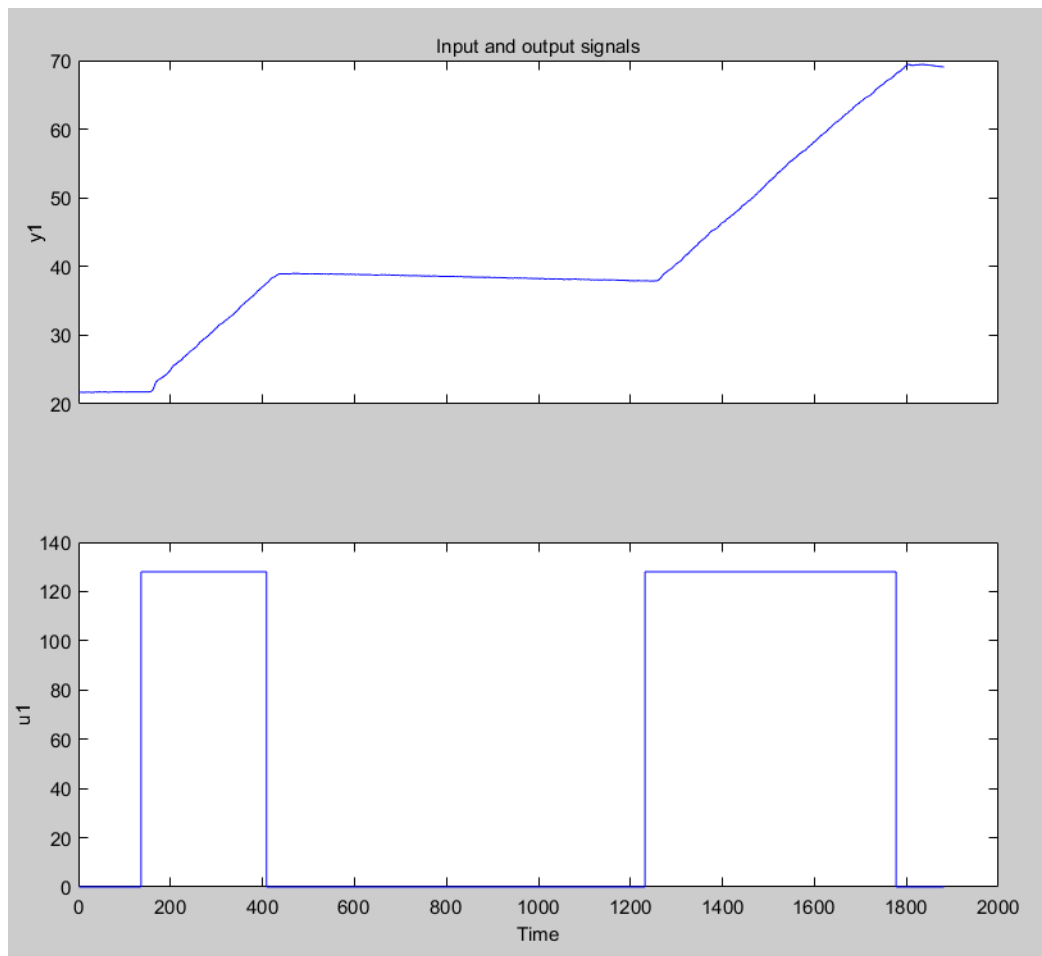


Nota. Elaboración propia.

Las mediciones realizadas fueron grabadas en un archivo Excel como en la figura 37, la señal de color azul representa el valor de la temperatura (°C) en el tiempo y la señal roja representa el valor de la señal de control que va de cero a 128. Luego estas mediciones son importadas a Matlab mediante el toolbox System identification según la figura 38.

Figura 38

Curva de reacción importada al Matlab.

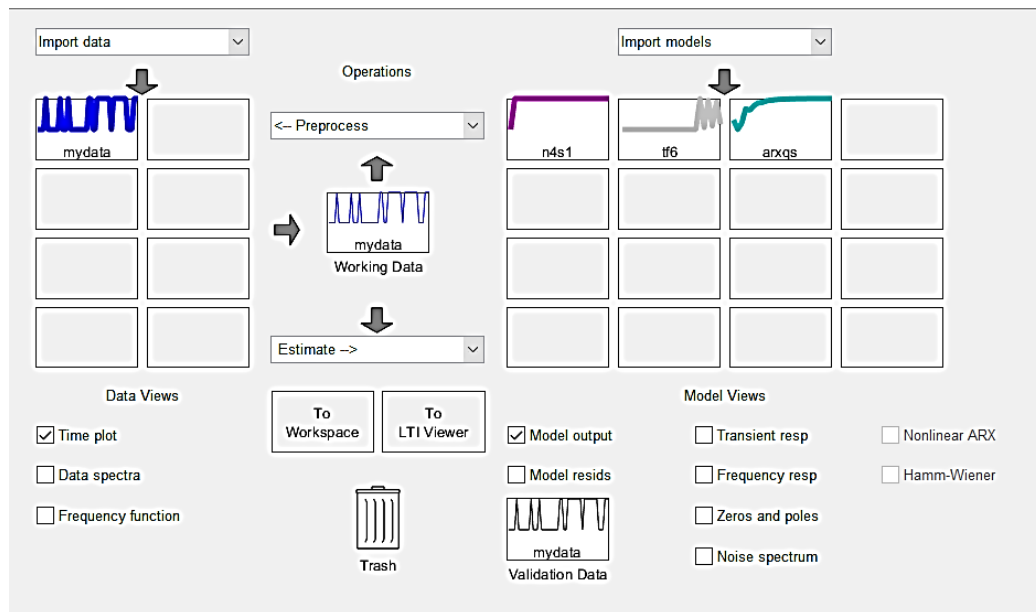


Nota. Elaboración propia.

Luego de importar los datos al Toolbox la ventana está representada en la figura 39. Los datos importados se ven a la izquierda, mientras que las 3 funciones que fueron estimadas se encuentran a la derecha, para cada estimación se variaron las cantidades de ceros y polos con la finalidad de obtener mayor aproximación de la función de transferencia con los datos experimentales ingresados.

Figura 39

Datos cargados al System identification toolbox.

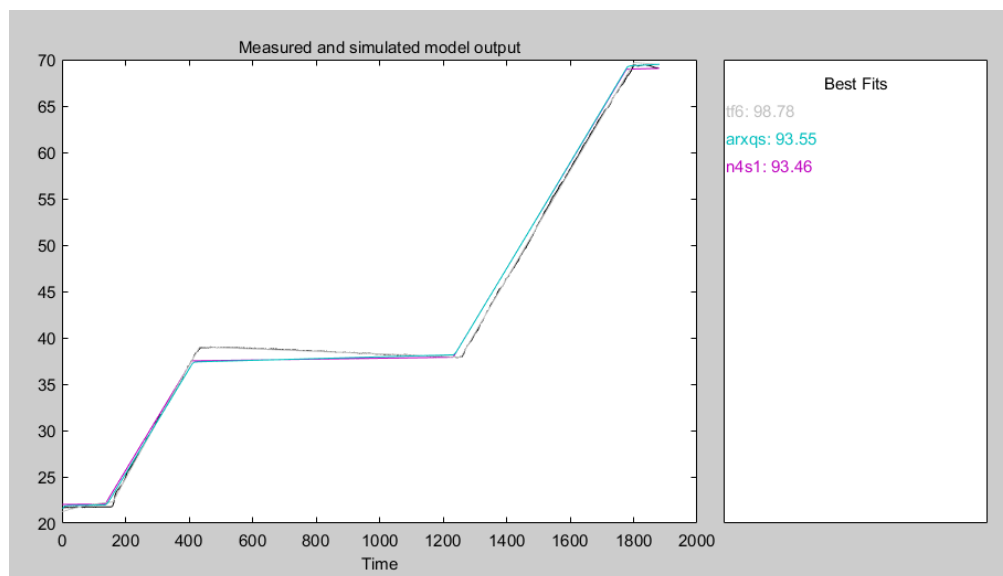


Nota. Elaboración propia.

Estos datos son procesados mediante un algoritmo estima que función de transferencia se aproxima a los datos ingresados, luego de probar con tres funciones de transferencia se tiene una que se aproxima en un 96 %.

Figura 40

Comparación de aproximación de funciones de transferencias encontradas.



Nota. Elaboración propia.

Figura 41

Características de la función con mayor porcentaje de coincidencia.

Model name:

Color:

From input "u1" to output "y1":

$$z^{-18} * \frac{0.00129 z^{-1} - 0.001279 z^{-2}}{1 - 1.051 z^{-1} - 0.8797 z^{-2} + 0.9311 z^{-3}}$$
Name: tf6
Sample time: 1.4065 seconds
Discrete-time identified transfer function.

Parameterization:
Number of poles: 3 Number of zeros: 2
Number of free coefficients: 5
Use "tfdata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

Diary and Notes

```
% Import mydata

% Transfer function estimation
Options = tfestOptions;
Options.Display = 'on';
Options.WeightingFilter = [];

np = 3;
nz = 2;
num = arrayfun(@(x) NaN(1,x), nz+1, 'UniformOutput', false);
den = arrayfun(@(x) [1, NaN(1,x)], np, 'UniformOutput', false);

% Prepare input/output delay
iodValue = 18;
```

Show in LTI Viewer

Present Export Close Help

Nota. Elaboración propia.

La función de transferencia con un tiempo de muestreo de 1.4065 es:

$$z^{-18} * \frac{0.00129 z^{-1} - 0.001279 z^{-2}}{1 - 1.051 z^{-1} - 0.8797 z^{-2} + 0.9311 z^{-3}} \quad (77)$$

El sistema encontrado en el tiempo de Laplace es el siguiente:

$$e^{-25.3s} * \frac{0.0004872 s^3 + 0.001653 s^2 + 0.002371 s + 1.506e - 05}{s^4 + 0.09511 s^3 + 4.992 s^2 + 0.03225 s + 1.175e - 06} \quad (78)$$

5.1.3 Comparación de ambos modelos encontrados

Se vuelven a escribir las ecuaciones (76) y (78) sin el retardo:

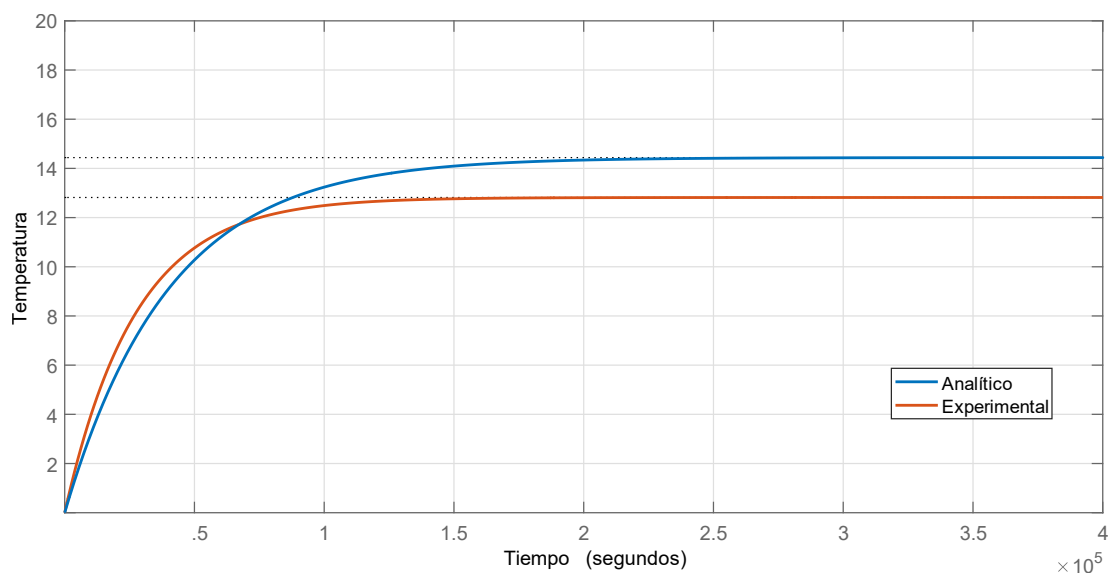
$$FT_{Analitico} = \frac{0.000359079}{s + 2.486 * 10^{-5}} \quad (79)$$

$$FT_{Exp.} = \frac{0.0004872 s^3 + 0.001653 s^2 + 0.002371 s + 1.506e - 05}{s^4 + 0.09511 s^3 + 4.992 s^2 + 0.03225 s + 1.175e - 06} \quad (80)$$

Se comparan sus respuestas frente a una entrada escalón y las principales características de cada respuesta.

Figura 42

Respuestas frente a una entrada escalón.



Nota. Elaboración propia.

En la figura 42 se visualiza que las funciones de transferencia con diferentes magnitudes de orden tienen respuestas frente a un escalón parecidas. Se escogerá la función experimental debido a que resulta más confiable.

Tabla 5

Principales características de cada respuesta.

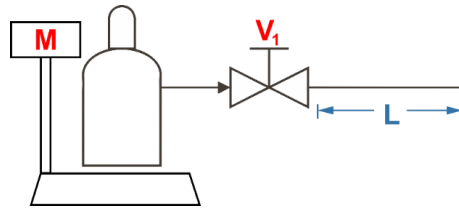
	Función Analítica	Función Experimental
Tiempo de establecimiento	1.07×10^5	1.57×10^5
Error en estado estable	13.4	11.8

5.2 Modelamiento del peso de BM ingresado

Durante la etapa de dosificación además del control de la temperatura del vaporizador se controla el peso del gas que es introducido a la cámara de fumigación, el modelado de este proceso se empieza con el modelo de descarga de un balón de gas a presión atmosférica externa constante.

Figura 43

Modelo de descarga del B.M.



Nota. Elaboración propia.

Luego de abrir la válvula V1 se puede observar que la masa del balón de bromuro se puede modelar de la siguiente manera:

$$M = (M_o - M_f) * e^{-k_1 * t} + M_f \quad (81)$$

Donde:

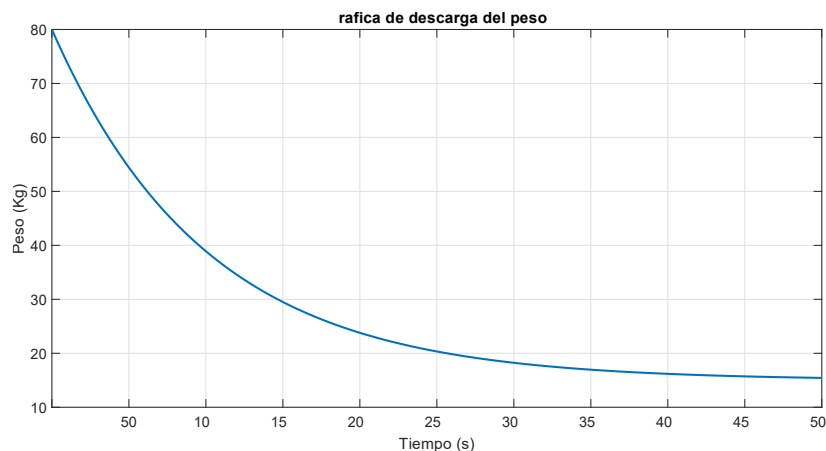
M_o : Masa inicial

M_f : Masa final

k_1 : constante de descarga (depende de la presión que se regule a la salida)

Figura 44

Valor del peso del balón de BM durante la descarga.



Nota. Grafica realizada para los valores de: $M_o = 80 \text{ Kg}$, $M_f = 15 \text{ Kg}$, $k_1 = 0.01$.

A este modelo se agrega el efecto de la distancia del balón al cámara representado con la variable L . Esta distancia originará un retardo de tiempo t_0 , con la siguiente representación en tiempo continuo y en el dominio de Laplace:

$$U(t - t_0) \Rightarrow e^{-s \cdot t_0} \quad (82)$$

Lo que modifica el comportamiento de masa de la ecuación (81) a:

$$M = U(t - t_0) * [(M_o - M_f) * e^{-k_1 \cdot t} + M_f] \quad (83)$$

Se reemplaza las constantes con $M_o = 80 \text{ Kg}$, $M_f = 15 \text{ Kg}$, $k_1 = 0.01$, $t_0 = 10 \text{ s}$.

$$M(t) = U(t - 10) * [65 * e^{-0.01 \cdot t} + 15] \quad (84)$$

El tiempo que debe pasar para que la diferencia de masas sea la que se requiere se calcula de la diferencia de masas lo que se representa como:

$$\Delta M = M(t_f) - M(t_i) \quad (85)$$

$$\Delta M = U(t_f - 10) * [65 * e^{-0.01 \cdot t_f} + 15] - U(t_i - 10) * [65 * e^{-0.01 \cdot t_i} + 15] \quad (86)$$

Donde:

t_i : Tiempo de inicio de la inyección de la dosis

t_f : Tiempo final

El tiempo de aplicación de la dosis se denomina t_a . Por lo que hace el siguiente cambio de variable: $t_f = t_i + t_a$

$$\Delta M = U(t_i + t_a - 10) * [65 * e^{-0.01 \cdot (t_i + t_a)} + 15] - U(t_i - 10) * [65 * e^{-0.01 \cdot t_i} + 15] \quad (87)$$

Adicionalmente en esta sección se muestra cómo se realiza el cálculo del peso de bromuro de metilo.

$$Dosis = Volumen_{cámara} \times Concentración \quad (88)$$

Para una concentración de 32 g/m^3 para una cámara de 90 m^3 :

$$Dosis = 90 \times 32 = 2,880 \text{ kg} \quad (89)$$

Esto significa que se inyectará 2.88 Kg de BM si se selecciona la opción de 32 g/m^3 de concentración en una cámara de 90 m^3 de volumen.

5.3 Modelamiento de la concentración de BM

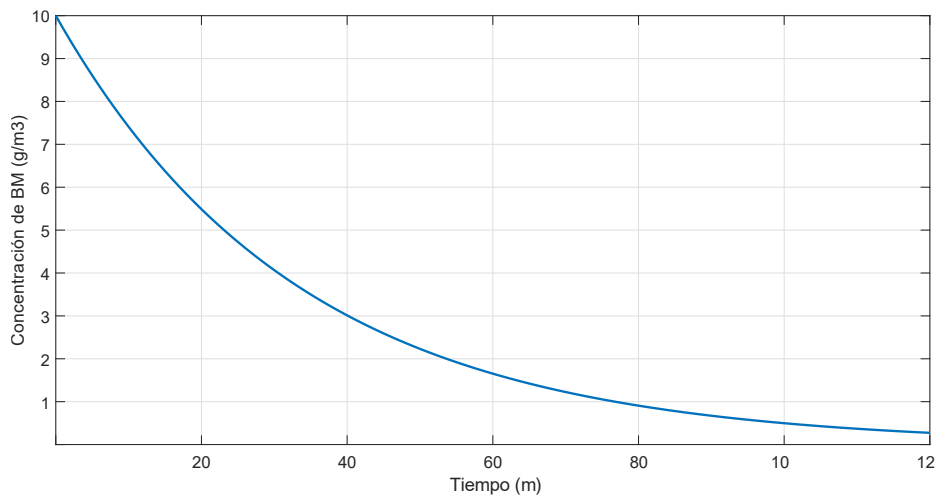
En la etapa de fumigación se modelan dos sistemas, el primero de ellos es como varía la concentración de BM en el interior en el tiempo, debido a que esta concentración baja por que la densidad del BM es mayor que del aire, el segundo sistema consiste en la variación de la temperatura en el interior de la cámara de fumigación. Para el primer caso se dedujo un modelo exponencial de la siguiente manera:

$$C(t) = C_0 * e^{-k_2 * t} \Rightarrow C(s) = C_0 * \frac{1}{s + k_2} \quad (90)$$

Los coeficientes serán aproximados según los resultados experimentales obtenidos, que se aproxima a lo siguiente:

Figura 45

Valor de la concentración de BM sin ventiladores de recirculación.



Nota. Elaboración propia.

La concentración varía de forma libre de la siguiente manera:

$$C_L(t) = 10 * e^{-0.03 * t} \quad (91)$$

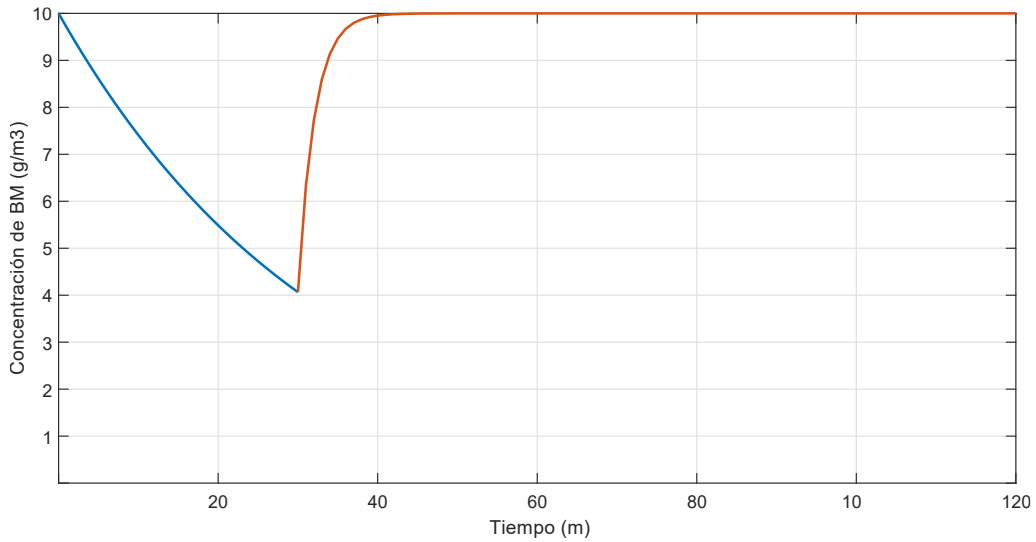
Este es el comportamiento de la concentración si no se activaría en ningún momento los ventiladores de recirculación, los que hacen que la concentración se eleve hasta su valor inicial luego de un pequeño tiempo. Por ello el valor de la acción de los ventiladores se modela de la siguiente manera, donde el tiempo de activación de los ventiladores es t_0 .

$$Cv(t) = U(t - t_0) * [1 - e^{-0.5*(t-t_0)}] * [10 - 10 * e^{-0.03*t}] \quad (92)$$

Cuando el tiempo de activación de los ventiladores es 30 segundos ($t_0 = 30$) se origina la respuesta mostrada en la figura 46, donde la concentración aumenta hasta el valor inicial (10 g/m³) luego del encendido de los ventiladores de recirculación, lo cual está representado en color rojo. En algunas implementaciones se encienden los ventiladores de recirculación de forma permanente. Otra consideración es que los ventiladores permanezcan encendidos quince minutos luego de la inyección de BM, durante la etapa inicial de la exposición.

Figura 46

Valor de la concentración de BM cuando se activa la recirculación.



Nota. Elaboración propia.

La combinación de las ecuaciones (91) y (92) es la función de transferencia:

$$C(t) = 10 * e^{-0.03*t} + U(t - t_0) * [1 - e^{-0.5*(t-t_0)}] * [10 - 10 * e^{-0.03*t}] \quad (93)$$

$$C(t) = 10 * e^{-0.03*t} + U(t - t_0) * 10[1 - e^{-0.03*t} - e^{-0.5*(t-t_0)} + e^{-0.5*t+0.5*t_0-0.03*t}] \quad (94)$$

$$C(t) = 10 * e^{-0.03*t} + U(t - t_0) * 10[1 - e^{-0.03*t} - e^{-0.5*(t-t_0)} + e^{-0.53*t+0.5*t_0}] \quad (95)$$

Lo que en el dominio de Laplace es:

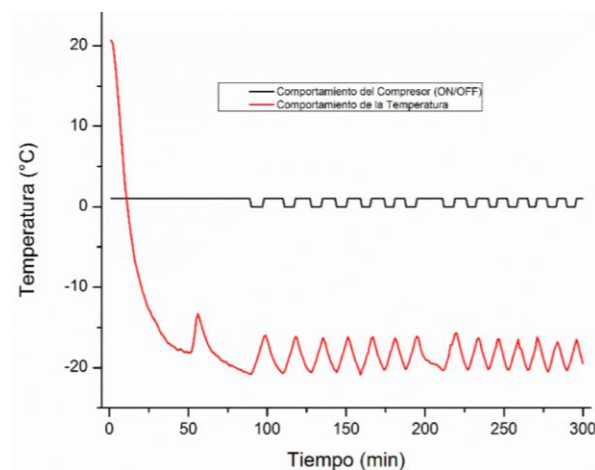
$$C(s) = \frac{10}{s + 0.03} + 10 * e^{-t_0*s} * \left[1 - \frac{1}{s + 0.03} - \frac{e^{0.5*t_0}}{s + 0.5} + \frac{e^{0.5*t_0}}{s + 0.53} \right] \quad (96)$$

5.4 Modelamiento de la temperatura de la cámara de fumigación

Este sistema describe la temperatura en el interior de la cámara de fumigación. En este caso se analizarán las respuestas encontradas en las referencias con el fin de encontrar un modelo que se pueda generalizar en la mayoría de casos posibles. En primer lugar, se observará el gráfico de la variación de temperatura de un refrigerador genérico estudiado en el artículo de Jara (2017). En la figura 47 se observa que la salida del sistema es de carácter negativo, que la magnitud de la acción que tiene la temperatura externa es comparable a la acción del compresor porque las subidas y bajadas de temperatura son casi simétricas.

Figura 47

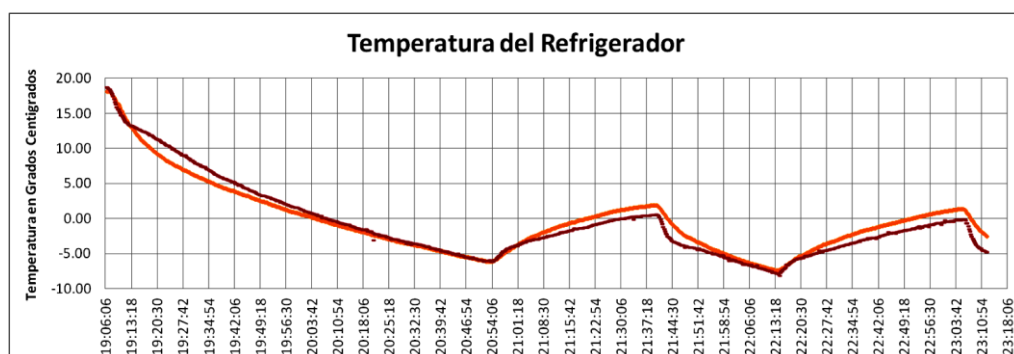
Comportamiento de los valores de temperatura y el estado del compresor.



Nota. Adaptado de “Instrumentación de un Refrigerador Doméstico para El Análisis del Comportamiento de las Variables de Presión y Temperatura de Operación”, por Jara, 2017.

Figura 48

Variación de la temperatura en el refrigerador y en el evaporador.



Nota. Adaptado de la Tesis de pregrado “Diseño e implementación de un módulo didáctico de refrigeración basado en un refrigerador comercial”, por Vaca, 2012.

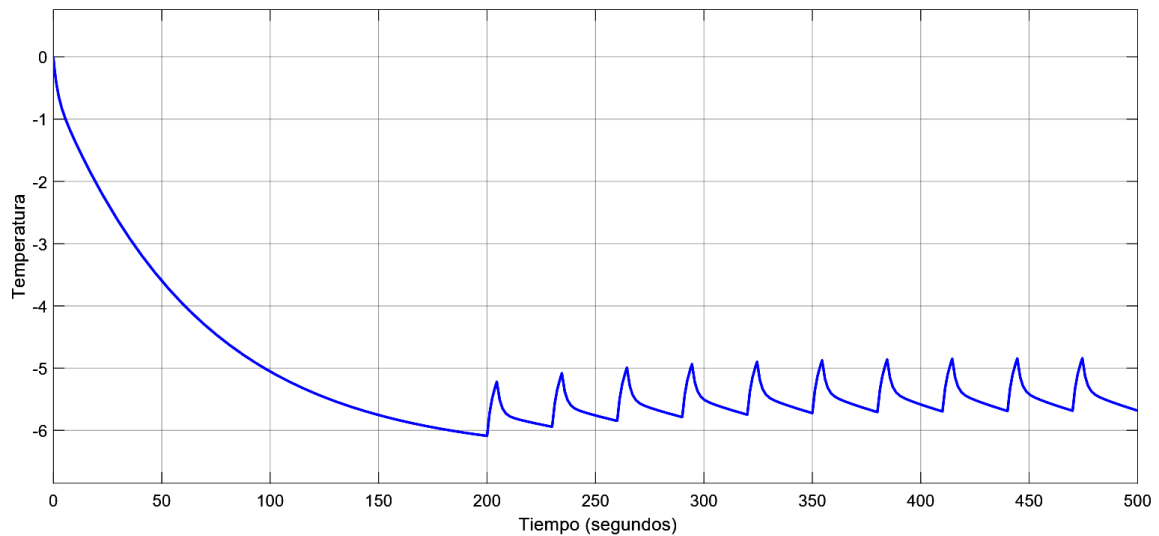
En la figura 48 se observa un comportamiento similar al presentado inicialmente, por lo que el sistema que se va a modelar debe responder de una manera parecida frente a una misma señal de control. Para este proceso se usará el modelo encontrado de manera experimental en el artículo de García (2017):

$$G_r = -6.4061 * \left(\frac{0.064s + 0.00854}{s^2 + 0.5964s + 0.00855} \right) \quad (97)$$

Esta función de transferencia describe el comportamiento de la temperatura de una celda termoeléctrica en relación con la corriente de alimentación de la celda. Para determinar el comportamiento de la función de transferencia y comprobar que un comportamiento similar a un enfriamiento por compresor se aplica una entrada similar a las presentada en a las referencias y la respuesta se puede ver en la figura 49:

Figura 49

Respuesta de la función de transferencia.



Nota. Elaboración propia.

El modelo en la figura 49 tiene similitudes en su respuesta a los casos anteriores, por lo que se determina que se usará en el desarrollo de esta Tesis, quedando pendiente el tema de escalar para la aplicación que se desea implementar.

Adicionalmente se eligió este modelo debido a que la tecnología de enfriamiento mediante celdas termoeléctricas es una tecnología en desarrollo cuyas aplicaciones están saliendo en el mercado.

5.5 Modelamiento de la expulsión de BM

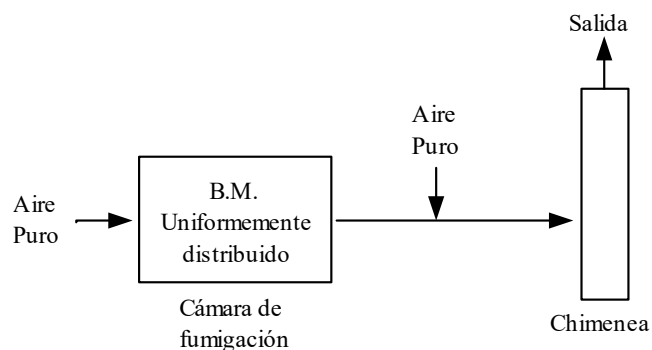
En esta sección se describe el proceso de modelado del proceso de aireación en COMSOL con la finalidad de tener datos que sirvan para obtener la función de transferencia de este proceso.

5.5.1 Definición del sistema

En esta sección se define el escenario a simular. Se va simular el proceso de expulsión de B.M. contenido en la cámara de fumigación mediante una chimenea que previamente es mezclada con aire puro representado en la figura 50.

Figura 50

Diagrama del proceso de expulsión.



Nota. Elaboración propia.

En el proceso de expulsión las bombas de extracción que se encuentran en el pie de la chimenea se activan al término del tiempo de fumigación y extraen el B.M. que se encuentra dentro de la cámara de fumigación junto a las cajas de las frutas que recibieron el tratamiento, para evitar que la cámara se deforme se debe activar una válvula que permita el ingreso de aire puro a la cámara, al momento de la extracción se debe restringir la salida de B.M. para que la concentración en la salida de la chimenea no sea tan alta se controla una servo-válvula, la cual es el objetivo de esta sección.

5.5.2 Formulación del problema

En esta sección se deben organizar las variables que se van a utilizar para implementar el modelo, siguiendo la definición expresada anteriormente se construye la siguiente tabla:

Tabla 6

Tabla de definiciones de la etapa de expulsión.

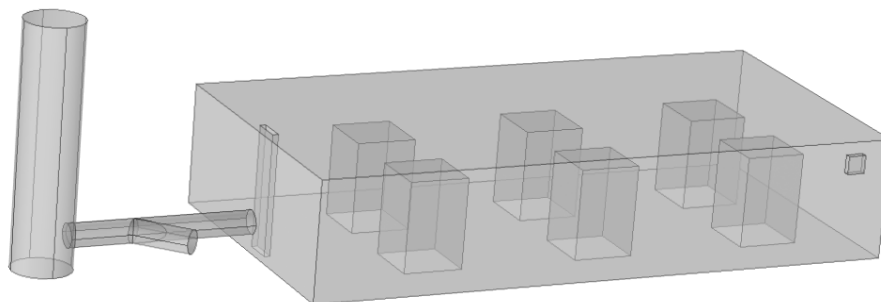
Variable	Definición	Unidades
Concentración	Concentración de la chimenea	mol/m ³
Concentración	Concentración inicial	mol/m ³
Velocidad	Entrada de aire 1	m/s
Velocidad	Entrada de aire 2	m/s
Velocidad	Salida de aire	m/s

5.5.3 Implementación del modelo

En esta sección se construye el modelo en COMSOL. Este programa ofrece dos alternativas para la implementación del modelo la primera es la importación directa de un modelo en un formato compatible y la segunda alternativa es construir el modelo a partir de figuras primitivas que tiene el programa, esta fue la opción elegida porque facilita el cálculo computacional.

Figura 51

Geometría del modelo.



Nota. Elaboración propia.

5.5.4 Validación del modelo

En esta sección se añadirán las físicas, las condiciones de contorno y detalles que necesite el modelo implementado para que tenga validez como simulación del proceso que replicado, que en este caso es la física en el interior de la cámara de fumigación durante la extracción del aire con bromuro de metilo. Se siguen los siguientes pasos:

1. Se agrega el material “Aire” el cual compondrá el interior de todo el modelo.

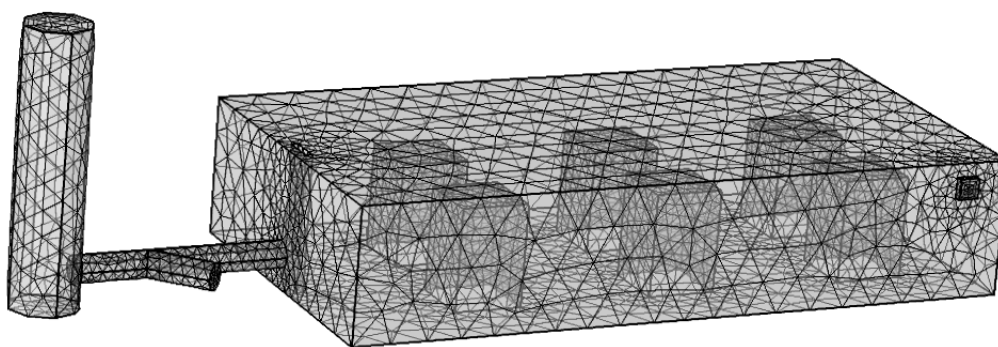
2. Se añaden las condiciones de contorno en cada cara que compone el modelo, se colocan como paredes, excepto en las entradas y salidas de aire.
3. La primera física que se incorpora es el “Flujo laminar (spf)” esto permite realizar simulaciones de fluidos newtonianos como aire o agua. Para esta Tesis se usa para simular el flujo del aire en el interior de la cámara.
4. La segunda física que se incorpora es el “Trasporte de especies diluidas (tds)” esto permite realizar simulaciones donde interactúan un solvente y un soluto que no reaccionan entre ellas (para simular esas reacciones se deberá añadir la física de “Química (chem)” u otra dependiendo de la reacción que se debe estudiar). Esta física permite simular la interacción del aire con el bromuro de metilo en términos de concentración.

5.5.5 Simulación

Después de agregar lo necesario para que la simulación sea válida el modelo se divide en pequeñas secciones representadas en la figura 52 que serán los elementos finitos que componen el modelo.

Figura 52

Vista de las mallas que componen el modelo.



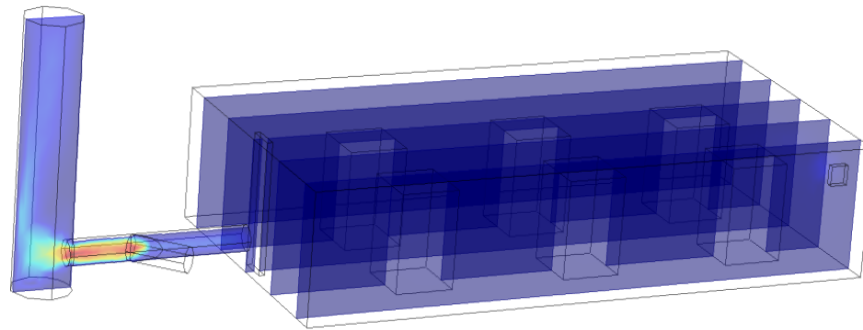
Nota. Elaboración propia.

Luego se ajusta el tiempo de simulación y las diferenciales de tiempo para visualizar el desarrollo de la simulación. Al final de los cálculos ya se tienen los resultados configurados, el primero que se va a analizar es el presentado en la figura 53 donde se encuentra una representación de la velocidad del aire en el interior, se puede observar que

a la salida de la cámara la velocidad aumenta debido a que en esa parte se encuentra las bombas que extraen el aire y lo impulsan a la chimenea.

Figura 53

Vista cromática de la velocidad del flujo.

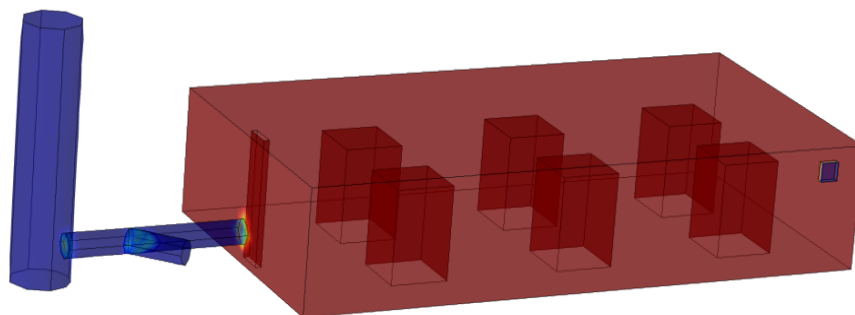


Nota. Elaboración propia.

La variación de la concentración del BM en el interior de la cámara, en diferentes instantes de tiempo se encuentra representada, antes del inicio (Figura 54), instantes después del inicio (Figura 55) y también luego de un tiempo (Figura 56). El color rojo representa una alta concentración de BM y el color Azul una baja concentración.

Figura 54

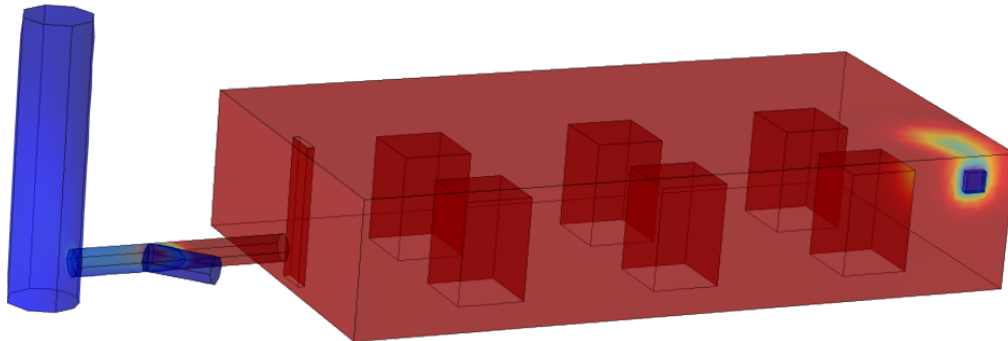
Vista de la concentración antes del inicio.



Nota. Elaboración propia.

Figura 55

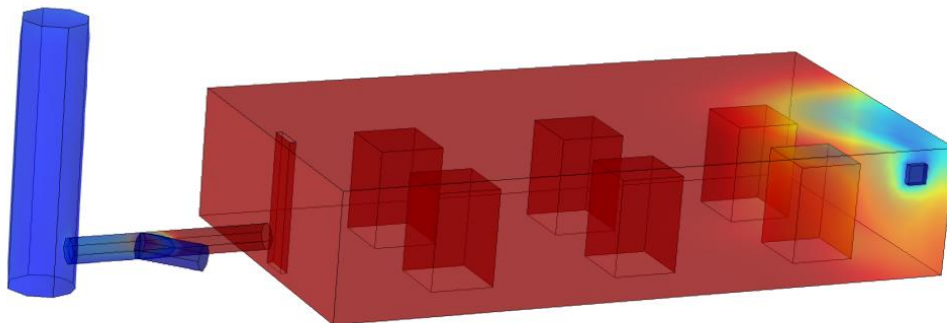
Vista de la concentración instantes luego del inicio.



Nota. Elaboración propia.

Figura 56

Vista de la concentración luego de un tiempo.



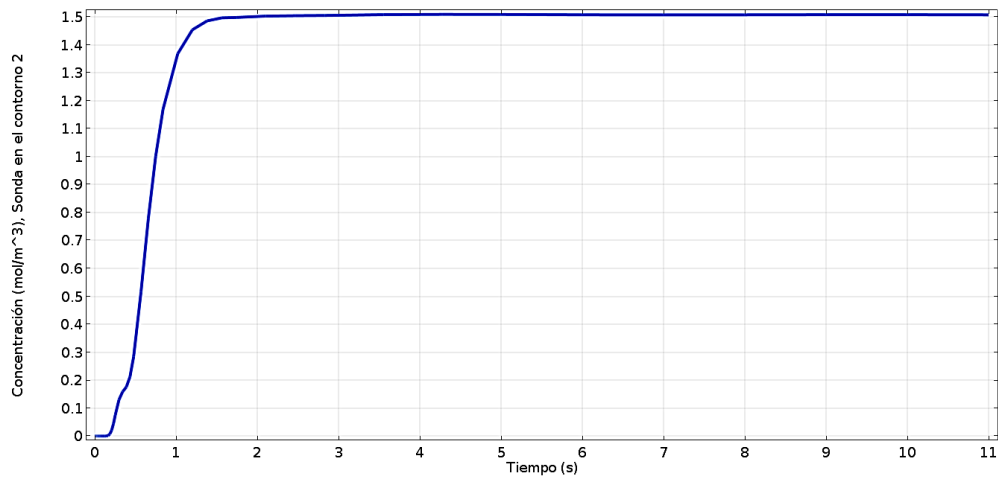
Nota. Elaboración propia.

5.5.6 Interpretación de resultados

En esta sección se muestran los resultados de la simulación de manera lineal, originada de colocar una sonda de concentración en la chimenea representada en la figura 57.

Figura 57

Concentración de BM en la chimenea.



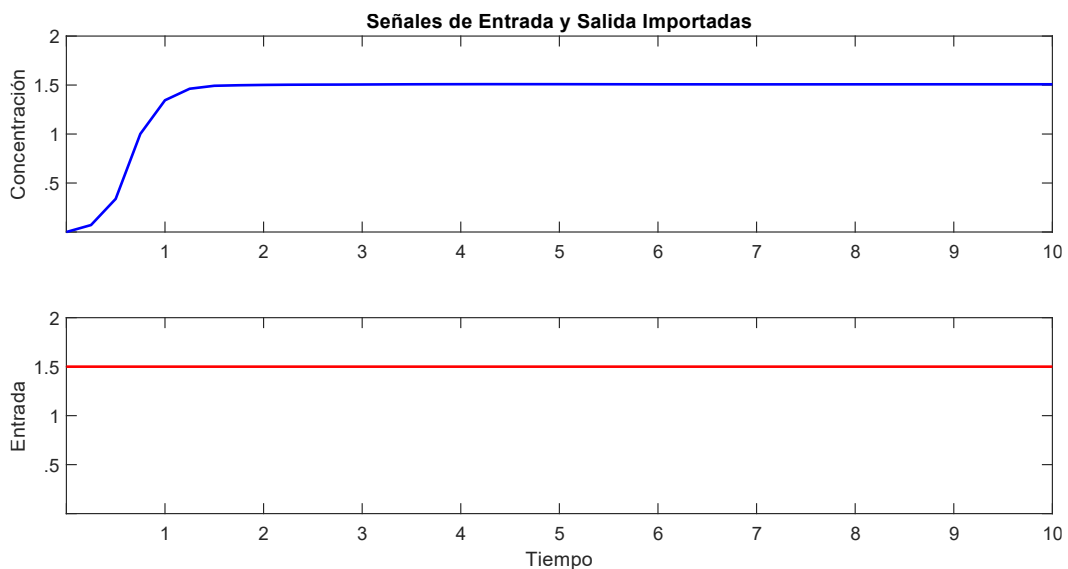
Nota. Elaboración propia.

5.5.7 Importación de la respuesta a Matlab

Los datos de la simulación de COMSOL se almacenan en tablas, estas pueden ser exportadas directamente si se usa el toolbox de COMSOL y MatLab o pueden ser previamente exportadas a un documento de texto delimitado por comas (.CSV) y luego ser importadas a MatLab. A veces es necesario un resample de los datos para tenerlos simétricamente tomados.

Figura 58

Señales importadas a MatLAB.



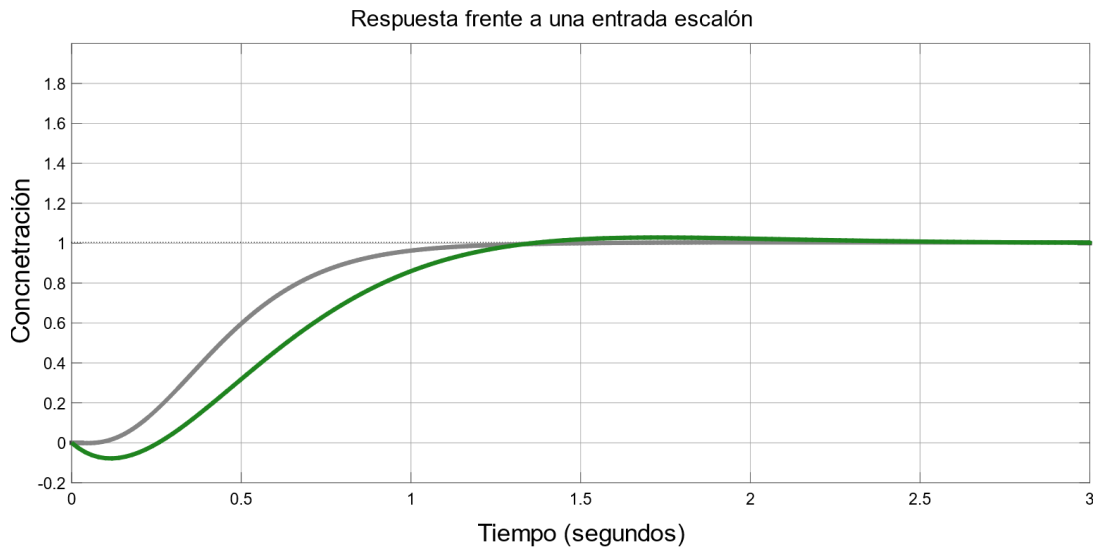
Nota. Elaboración propia.

5.5.8 Estimación de la función de transferencia

La obtención de la función de transferencia se realizó con MatLab y el toolbox IDENT según el procedimiento descrito en el capítulo teórico. Mediante este toolbox se importan los datos y luego al momento de estimar la función de transferencia se selecciona el número de polos y ceros que puede tener el sistema. En este caso se eligieron 2 y 3 polos para comparar ambas estimaciones.

Figura 59

Respuestas de las funciones de transferencia estimadas.



Nota. Elaboración propia.

Entre estas respuestas se escoge la función que tiene 3 polos debido a que es la más cercana a la forma de los datos iniciales que se adquirieron de la simulación en COMSOL. Esta función tiene la forma descrita en la ecuación (98):

$$H(s) = \frac{-5.24s + 210}{s^3 + 15.25s^2 + 96.66s + 209} \quad (98)$$

Con este toolbox se puede estimar modelos de espacio de estados, modelos polinomiales, modelos no lineales, etc. Lo que ofrece una gran variedad de opciones para lograr una correcta representación del sistema simulado en COMSOL.

Capítulo VI. Sistemas de control

En este capítulo se implementarán los sistemas de control de todas las etapas.

6.1 Sistema de control de la temperatura del vaporizador.

Antes de implementar el control se debe recordar la función de transferencia que describe el funcionamiento de vaporizador, la cual es la siguiente:

$$G_P(z) = z^{-18} * \frac{0.00129 * z^{-1} - 0.001279 * z^{-2}}{1 - 1.051 * z^{-1} - 0.8797 * z^{-2} + 0.9311 * z^{-3}} \quad (99)$$

La cual tiene un tiempo de muestreo de 1.4065 segundos.

6.1.1 Implementación del control MPC

Para implementar el controlador se debe empezar por recordar el desarrollo que se explicó en el capítulo 2, para lo cual se vuelve a escribir la expresión (48) encontrada luego de minimizar la función objetivo:

$$\Delta u = (G^T \delta G + \lambda I)^{-1} G^T \delta^T (w - f) \quad (100)$$

De la ecuación (100) solo el termino $(w - f)$ es variable, el resto solo se tiene que calcular una sola vez y al ser constante se le puede reemplazar por K :

$$\Delta u = K(w - f) \quad (101)$$

De la ecuación (101) solo interesa la primera fila porque las demás son de tiempo futuros que serán calculadas respectivamente cuando sea necesario.

$$\Delta u = u(t) - u(t - 1) \quad (102)$$

$$u(t) = \Delta u + u(t - 1) \quad (103)$$

Con esto se elabora un algoritmo preliminar de control, el cual se expandirá a continuación:

- Calcular el valor de K
- Leer salida de la planta $y(t)$
- Calcular vector $F(t)$ (respuesta libre)
- Calcular $\Delta u = K(w - f)$
- Sumar $u = u(\text{anterior}) + \Delta u$

Los parámetros usados en el control son los siguientes:

$P = 80$: Horizonte de predicción

$N = 5$: Horizonte de control

$\delta = 0.5$: Peso que pondera el seguimiento de la referencia

$w = 80$: Terminó para colocar referencias futuras

El algoritmo usado del control:

I. Cálculo preliminar de K

Para implementar este cálculo se debe recordar previamente como está definida la constante K que está en las ecuaciones (100) y (101):

$$K = (G^T \delta G + \lambda I)^{-1} G^T \delta^T \quad (104)$$

Con esto se implementa el siguiente código:

```
%% Vector de coeficientes Gi
gi=step(gp);          %Guardo la respuesta al escalón
Nm=length(gi)-1;      %Valor donde trunco la sumatoria

%% Cálculo de la Matriz G
G=zeros(P,N);
G(:,1)=gi(1+d:P+d);

for i=2:N
    for j=2:P
        G(j,i)=G(j-1,i-1);
    end
end

%% Cálculo de matriz Mn
Mn=inv(G'*delta*G + lamda*eye(N))*G'*delta;

K1=Mn(1,:);          %Calculo de K
```

Donde:

G_P : Función de transferencia vista en (98).

d : Retardo de la función de transferencia ($d = 18$).

II. Leer salida de la planta $y(t)$

Como el sistema está siendo simulado se usan los valores de la función de transferencia para encontrar la salida de la planta de la siguiente manera:

$$y_m(k) = B(3)u(k-d) + B(4)u(k-1-d) - A(2)y_m(k-1) - A(3)y_m(k-2) - A(4)y_m(k-3) + d_o(k);$$

Donde:

A y B: Son el denominador y el numerador de la función de transferencia respectivamente.

u: Son las señales de control pasadas.

ym: Son las salidas pasadas.

k: Son los pasos del bucle de control.

III. Calcular vector $F(t)$ (respuesta libre)

Para calcular el vector libre primero se crea el vector libre y luego se llenan sus componentes mediante los bucles de control “for”:

```
f=zeros(1,P); % Vector f: Respuesta Libre
for kk=1:P
    % monta un vector con las gkk+i - gkk
    for i=1:Nm-P
        vect_g(i)=gi(kk+i)-gi(i);
    end
    for i=Nm-P+1:Nm
        vect_g(i)=gi(Nm)-gi(i);
    end
    f(kk)=ym(k)+vect_g*duf';
end
```

IV. Calcular $\Delta u = K(w - f)$

Se calcula el cambio de la señal de control:

$$\text{inc_u} = K1 * (r(k+w) - f');$$

V. Sumar $u = u(\text{anterior}) + \Delta u$

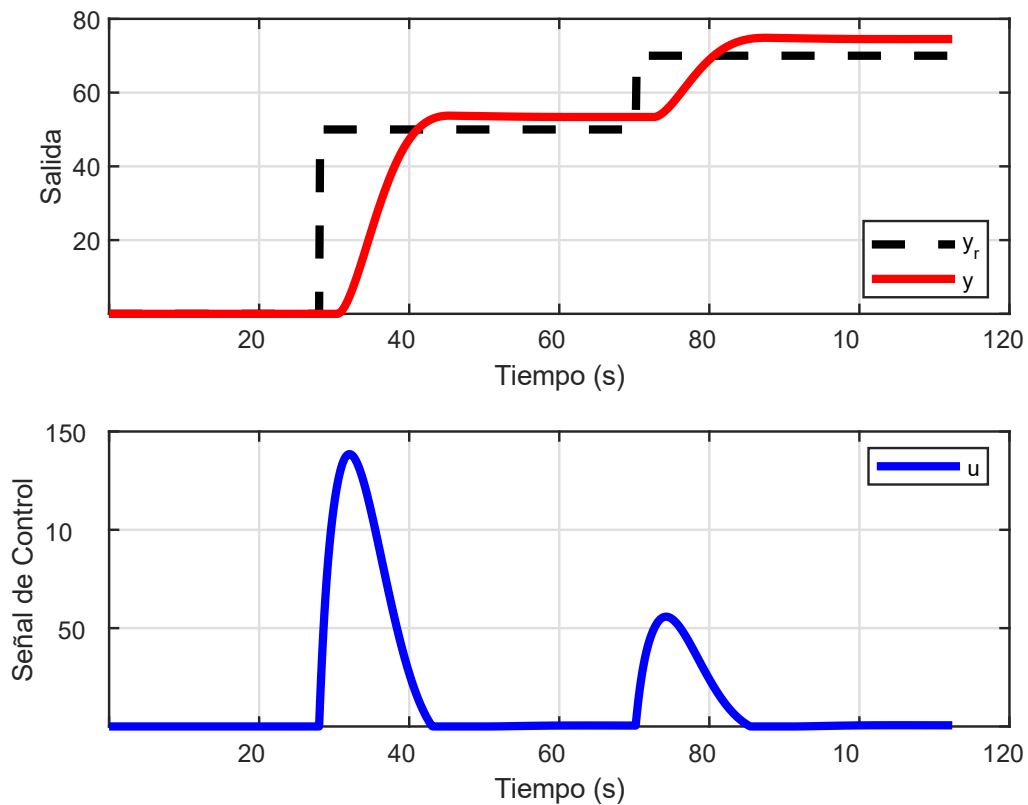
Luego se añade el cambio a la señal de control:

```
if k==1
    u(k)=inc_u;
else
    u(k)=u(k-1)+ inc_u;
end
```

Luego de eso se repite el bucle desde la parte II hasta que todo el tiempo sea calculado. A continuación, se grafican los resultados de esta implementación inicialmente con $w = 0$ y luego con $w = 80$. Para ver la diferencia de la respuesta cuando se activa la característica predictiva del algoritmo.

Figura 60

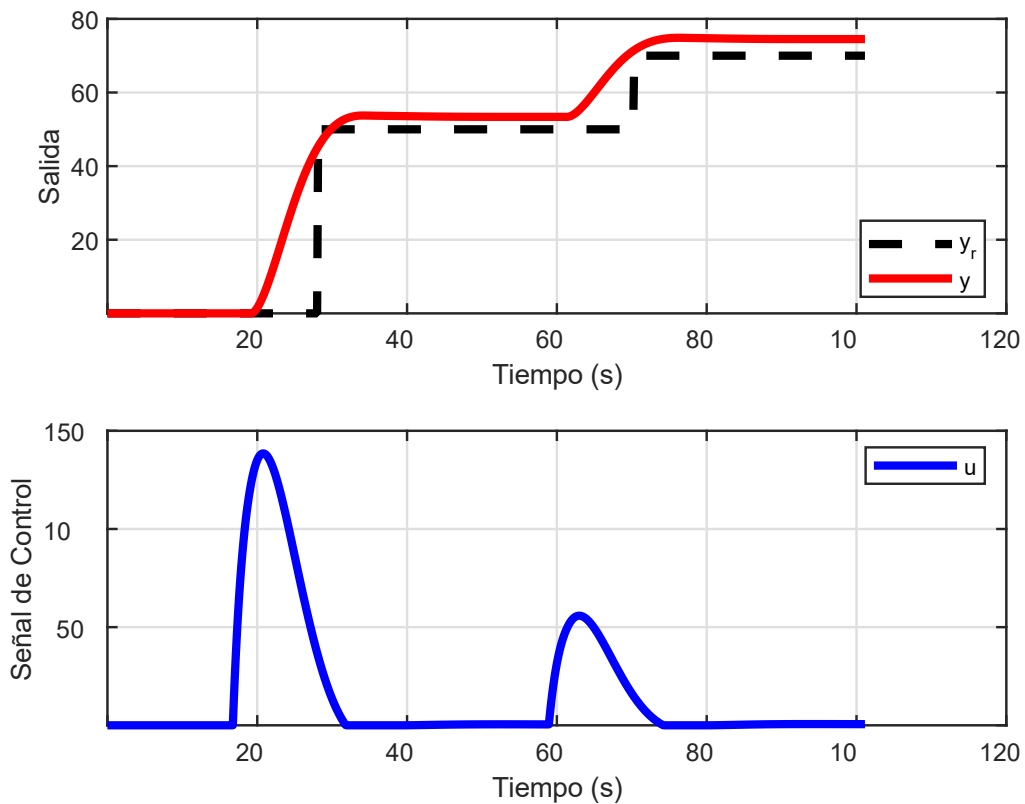
Salida del sistema de control del vaporizador.



Nota. Elaboración propia.

Figura 61

Salida del sistema de control del vaporizador adelantando las referencias de manera predictiva.



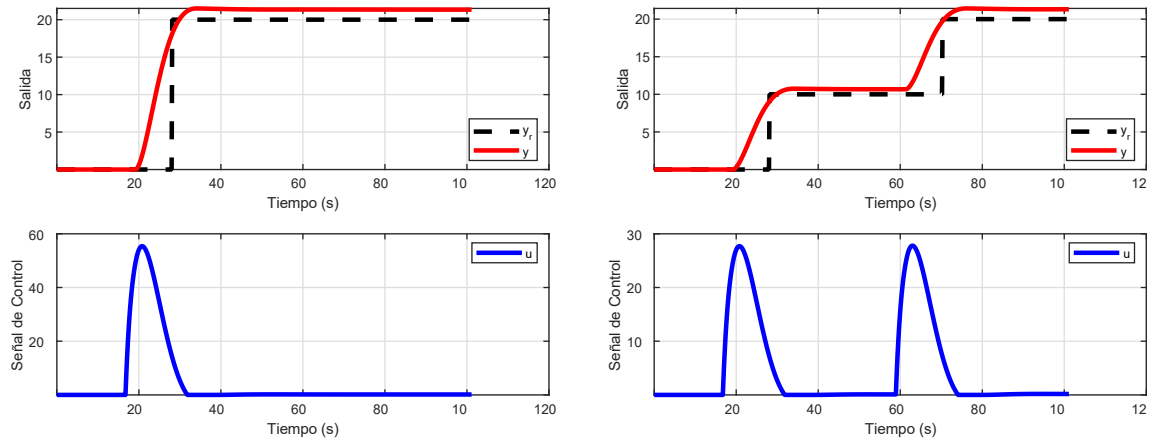
Nota. Elaboración propia.

6.1.2 Pruebas frente a diferentes valores de setpoint.

En este apartado se probó el comportamiento del sistema de control frente a 4 valores diferentes del setpoint y se evaluó sus características dinámicas y en estado estable. Para estas pruebas se configuraron dos tipos de señales de setpoint, una señal escalón típica y una segunda que es la composición de 2 escalones. Adicionalmente del valor de la salida (color rojo) se puede ver el valor de la señal de control (color azul) para cada caso.

Figura 62

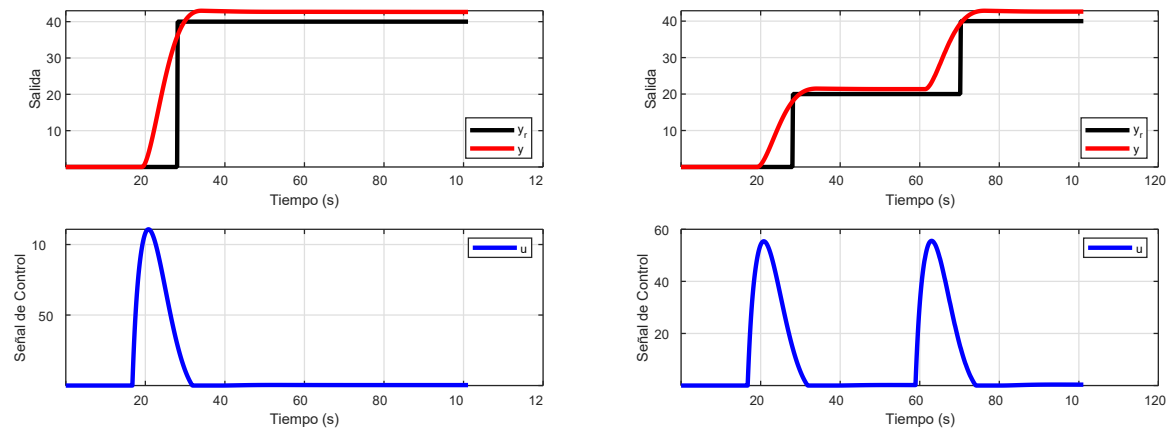
Valor de la salida y de la señal de control para un setpoint de 20.



Nota. Elaboración propia.

Figura 63

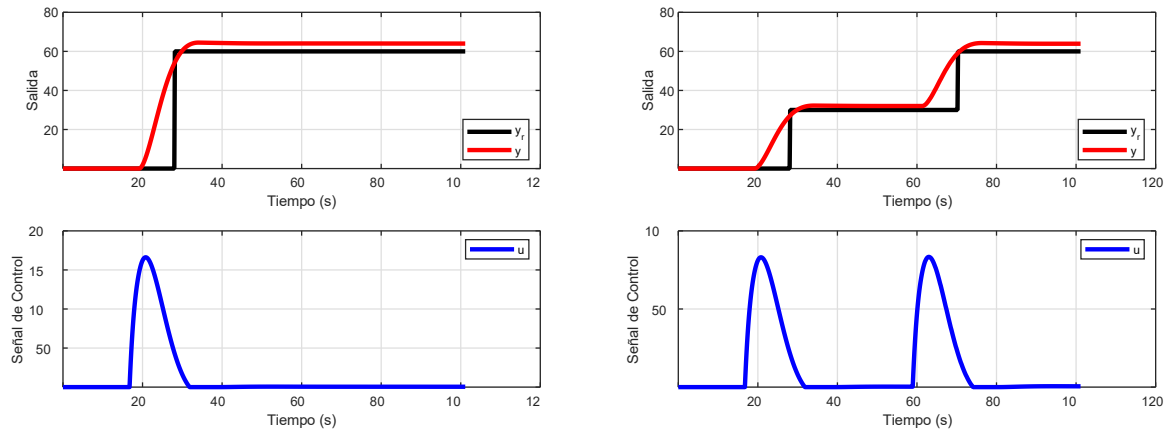
Valor de la salida y de la señal de control para un setpoint de 40.



Nota. Elaboración propia.

Figura 64

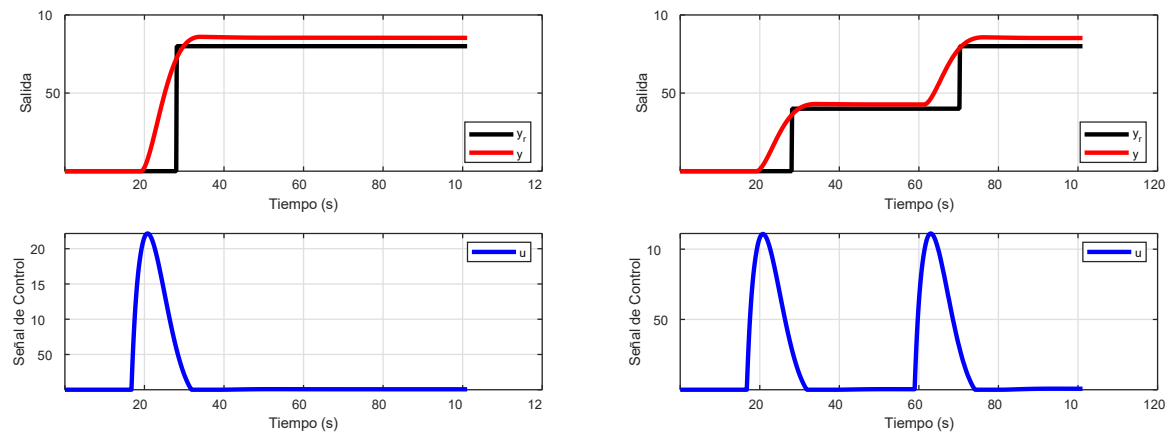
Valor de la salida y de la señal de control para un setpoint de 60.



Nota. Elaboración propia.

Figura 65

Valor de la salida y de la señal de control para un setpoint de 80.



Nota. Elaboración propia.

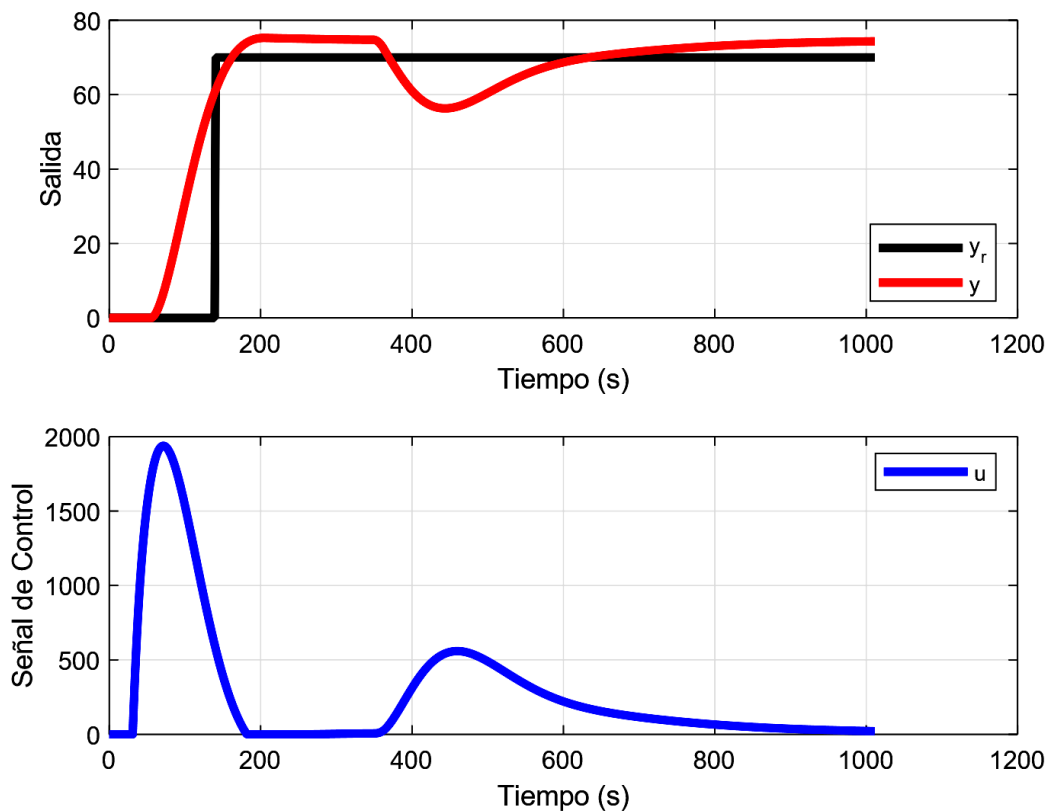
En estas figuras se puede verificar de forma gráfica que el sistema de control MPC implementado responde adecuadamente a diferentes valores de referencia y a cambios de este, que su respuesta es de forma sobre-amortiguada que presenta un error pequeño en estado estable.

6.1.3 Pruebas frente a diferentes valores de setpoint.

La última prueba que se realiza es añadir una perturbación para verificar que el sistema pueda regresar a su valor seteado. El efecto de la perturbación es superado y no origina oscilaciones luego de la recuperación del setpoint.

Figura 66

Respuesta del sistema de control del vaporizador frente a una perturbación.



Nota. Elaboración propia.

6.2 Sistema de control de la dosis ingresada.

Antes de implementar el algoritmo de control se debe encontrar la función de transferencia o una relación matemática que describa el comportamiento del sistema de inyección de la dosis, en el capítulo anterior se encontró la función que describe el comportamiento de la masa del balón de bromuro:

$$M(t) = U(t - 10) * [65 * e^{-0.01*t} + 15] \quad (105)$$

Lo que se necesita encontrar es la diferencia de masas lo que se representa como:

$$\Delta M = M(t_f) - M(t_i) \quad (106)$$

$$\Delta M = U(t_f - 10) * [65 * e^{-0.01*t_f} + 15] - U(t_i - 10) * [65 * e^{-0.01*t_i} + 15] \quad (107)$$

Donde:

t_i : Tiempo de inicio de la inyección de la dosis

t_f : Tiempo final

El tiempo de aplicación de la dosis se denomina t_a . Por lo que se puede hacer el siguiente cambio de variable: $t_f = t_i + t_a$

$$\Delta M = U(t_i + t_a - 10) * [65 * e^{-0.01*(t_i+t_a)} + 15] - U(t_i - 10) * [65 * e^{-0.01*t_i} + 15] \quad (108)$$

6.2.1 Implementación del control de la dosis

La implementación de este subproceso se hará en LabVIEW, se describirá a continuación en esta sección.

6.2.1.1 Declaración de variables iniciales

Todo algoritmo de control debe comenzar con la declaración de las variables a usarse, en este caso algunas se declararán en esta sección y otras serán declaradas durante los cálculos.

Donde:

- M_i : Masa del balón de BM llena (incluye el peso del balón en sí).
- M_f : Masa del balón de BM vacío.
- $M_{deseada}$: Masa que debería ingresar a la cámara.
- $Peso$: Peso actual del balón de BM.
- $Minicial$: Masa inicial antes del inicio de la inyección de BM.
- M_{final} : Masa calculada para el final de la inyección.
- $Inyeccion$: Variable que indica el proceso de inyección.

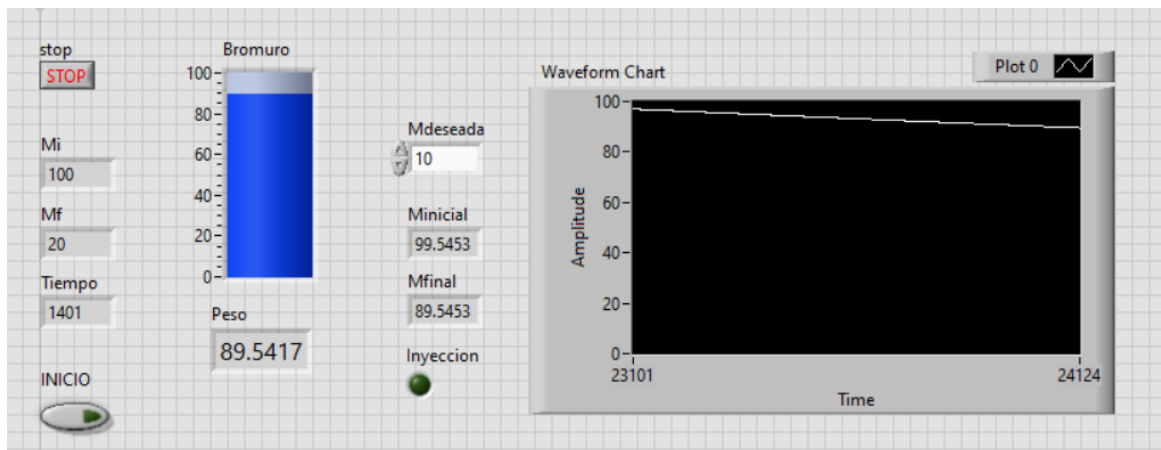
6.2.1.2 Configuración de la interfaz grafica

Esta interfaz gráfica se compone de los siguientes elementos (de izquierda a derecha):

- Primera columna de datos del balón de BM y de tiempo, además de tener el botón que inicia el proceso de inyección.
- Gráfico que representa el total de BM en el balón y el peso actual del BM
- La masa deseada con los valores de masa calculados (donde inicia y donde termina el proceso de inyección). Además de un icono para indicar que la inyección está en proceso.
- Gráfico de la variación del peso del balón de BM en el tiempo.

Figura 67

Interfaz gráfica del proceso de inyección.

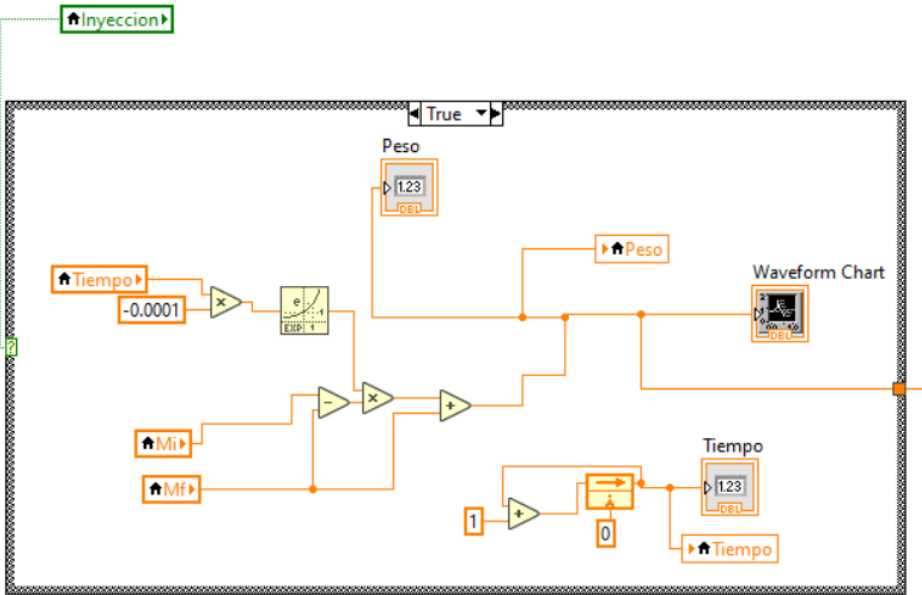


Nota. Elaboración propia.

6.2.1.3 Declaración de la función característica del sistema

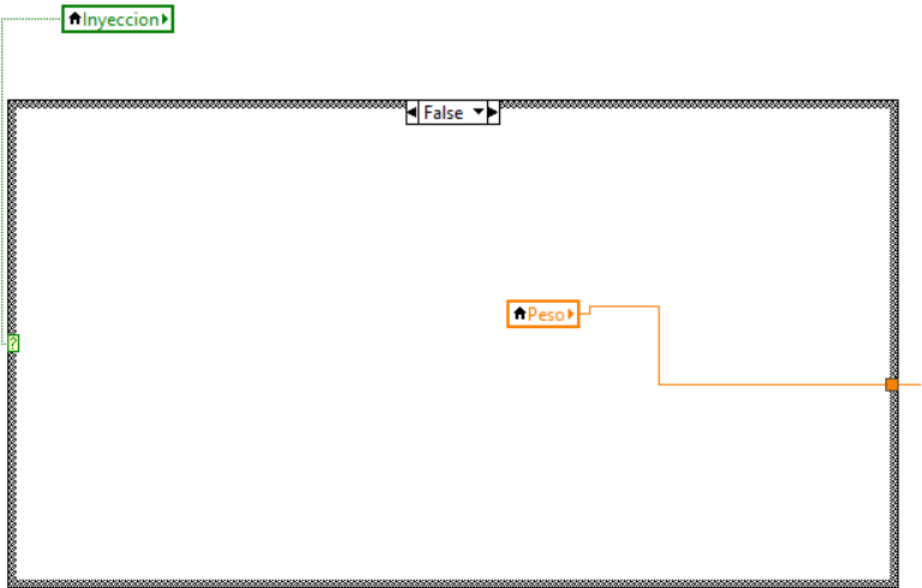
La declaración de la función característica del sistema se realiza de tal manera que la composición de bloques forme la función encontrada anteriormente. En la figura 68 se observa el valor de la estructura case en el caso de que la variable booleana “Inyección” sea verdadera, y en la figura 69 en caso sea falsa.

Figura 68
Declaración de la función característica con inyección verdadera.



Nota. Elaboración propia.

Figura 69
Declaración de la función característica con inyección falsa.



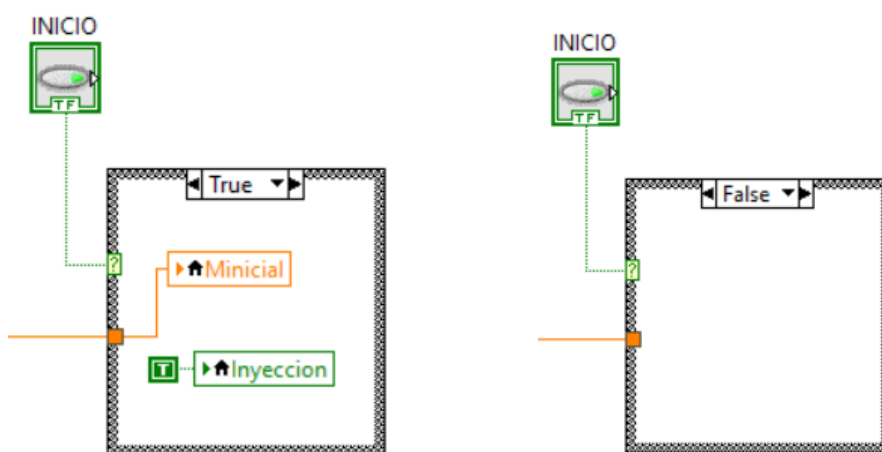
Nota. Elaboración propia.

6.2.1.4 Declaración del inicio de la inyección de BM

El inicio de la inyección está controlado por el botón interactivo llamado “INICIO”, el cual es la condición de la estructura case que almacena el valor actual de la masa dentro de la variable “Minicial” y también pone en verdadero el valor de la variable “inyección”. En la figura 70 se encuentra el algoritmo a ejecutarse cuando la condición sea verdadera a la izquierda y cuando sea falsa a la derecha.

Figura 70

Declaración de la función de inicio de la inyección en LabVIEW.



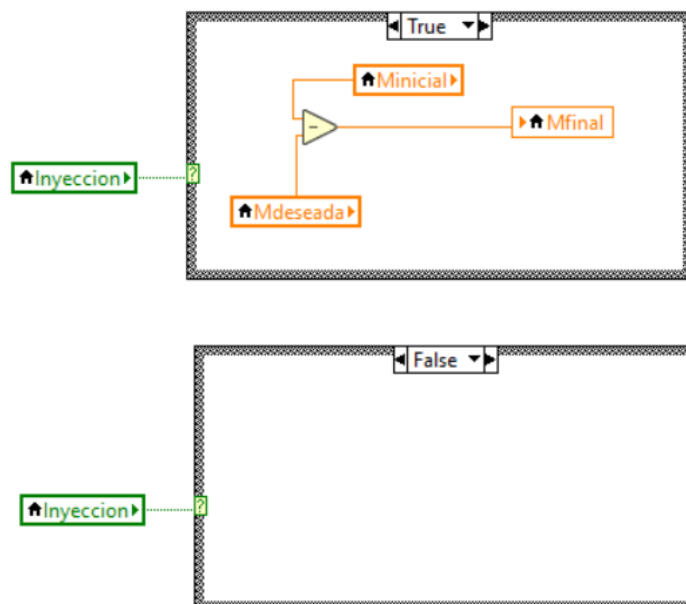
Nota. Elaboración propia.

6.2.1.5 Declaración del algoritmo de cálculo de la cantidad de BM

Cuando la variable booleana “Inyección” sea verdad, se debe realizar el cálculo de la cantidad de BM que se va a inyectar dentro de la cámara lo que se realiza restando la masa inicial del balón menos la masa deseada, lo que origina la masa final que debe tener el balón y donde el algoritmo debe cortar la inyección. En la Figura 71 se encuentra el algoritmo a ejecutarse cuando la condición sea verdadera a la izquierda y cuando sea falsa a la derecha.

Figura 71

Declaración del algoritmo de cálculo de la cantidad de BM en LabVIEW.



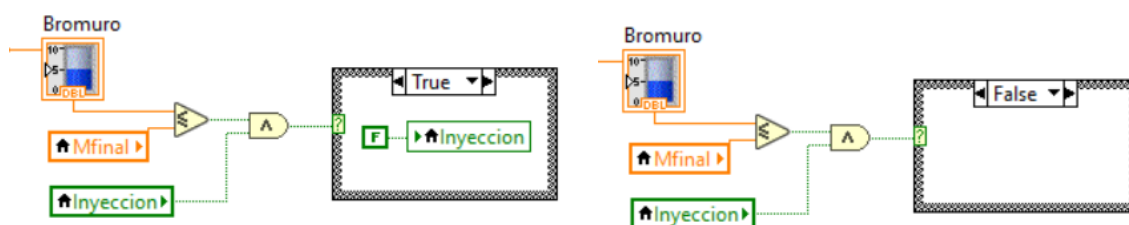
Nota. Elaboración propia.

6.2.1.6 Declaración de la condición de finalización de la inyección

Luego de haber calculado la masa final objetivo solo resta compararla con la masa actual del balón de BM durante la descarga, cuando sea igual o menor se debe detener la inyección. En la Figura 72 se encuentra el algoritmo a ejecutarse cuando la condición sea verdadera a la izquierda y cuando sea falsa a la derecha.

Figura 72

Declaración de la condición de finalización de la inyección en LabVIEW.



Nota. Elaboración propia.

6.3 Sistema de control de la concentración de BM.

Para iniciar la implementación el algoritmo de control se necesita recordar la función de transferencia que describe el comportamiento de la concentración de BM en el interior de la cámara de fumigación durante el tiempo.

$$C(t) = 10 * e^{-0.03*t} + U(t - t_0) * 10[1 - e^{-0.03*t} - e^{-0.5*(t-t_0)} + e^{-0.53*t+0.5t_0}] \quad (109)$$

Donde:

t_0 : Es el tiempo donde se activa los ventiladores

6.3.1 Implementación del control de la concentración.

Esta implementación de este subproceso que se hizo en LabVIEW, se describirá en esta sección.

6.3.2 Declaración de variables iniciales

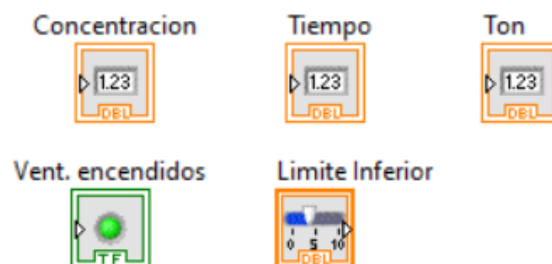
Todo algoritmo de control debe comenzar con la declaración de las variables a usarse, en este caso algunas se declararán en esta sección y otras serán declaradas durante los cálculos.

Donde:

- Concentración: Variable que indica la concentración de BM actual.
- Tiempo: Variable temporal.
- Ton: Tiempo en el cual se enciende los ventiladores.
- Vent, encendidos: Indicador de que los ventiladores están encendidos.
- Límite Inferior: Limite donde los ventiladores se encenderán.

Figura 73

Variables iniciales declaradas en la fumigación.



Nota. Elaboración propia.

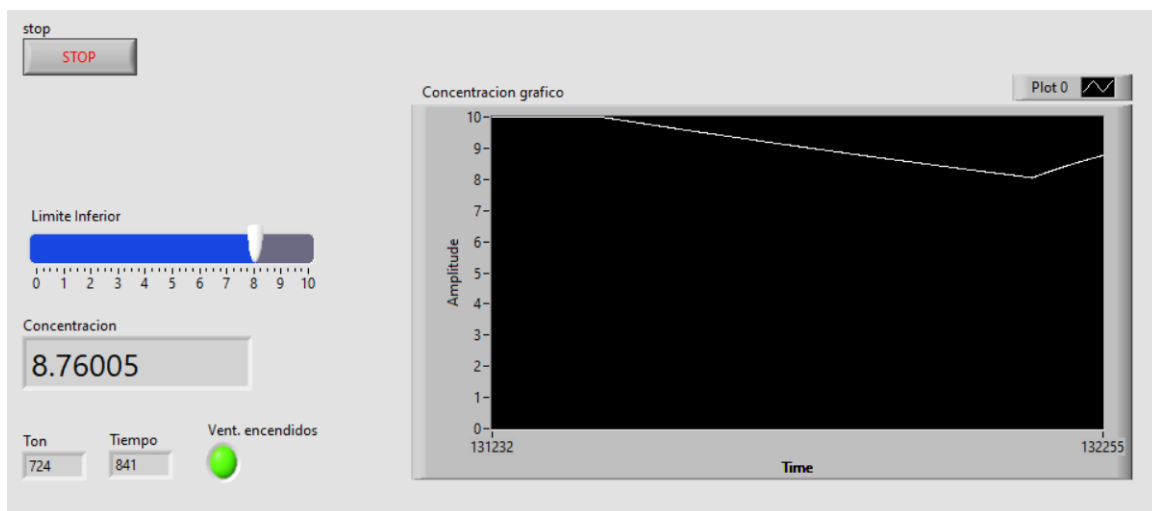
6.3.3 Declaración de la interfaz gráfica

La interfaz gráfica está compuesta por los siguientes elementos nombrados de arriba abajo y de izquierda a derecha:

- Barra interactiva donde se puede escoger el valor mínimo que la concentración de BM en el interior de la cámara debe descender para que se encienda el ventilador de recirculación.
- El valor de concentración de BM actual.
- El valor del tiempo y del tiempo de encendido de los ventiladores (variables auxiliares)
- Indicador del encendido del ventilador de recirculación.
- Gráfico del valor de BM en el interior de la cámara en el tiempo.

Figura 74

Interfaz gráfica de la fumigación en LabVIEW.



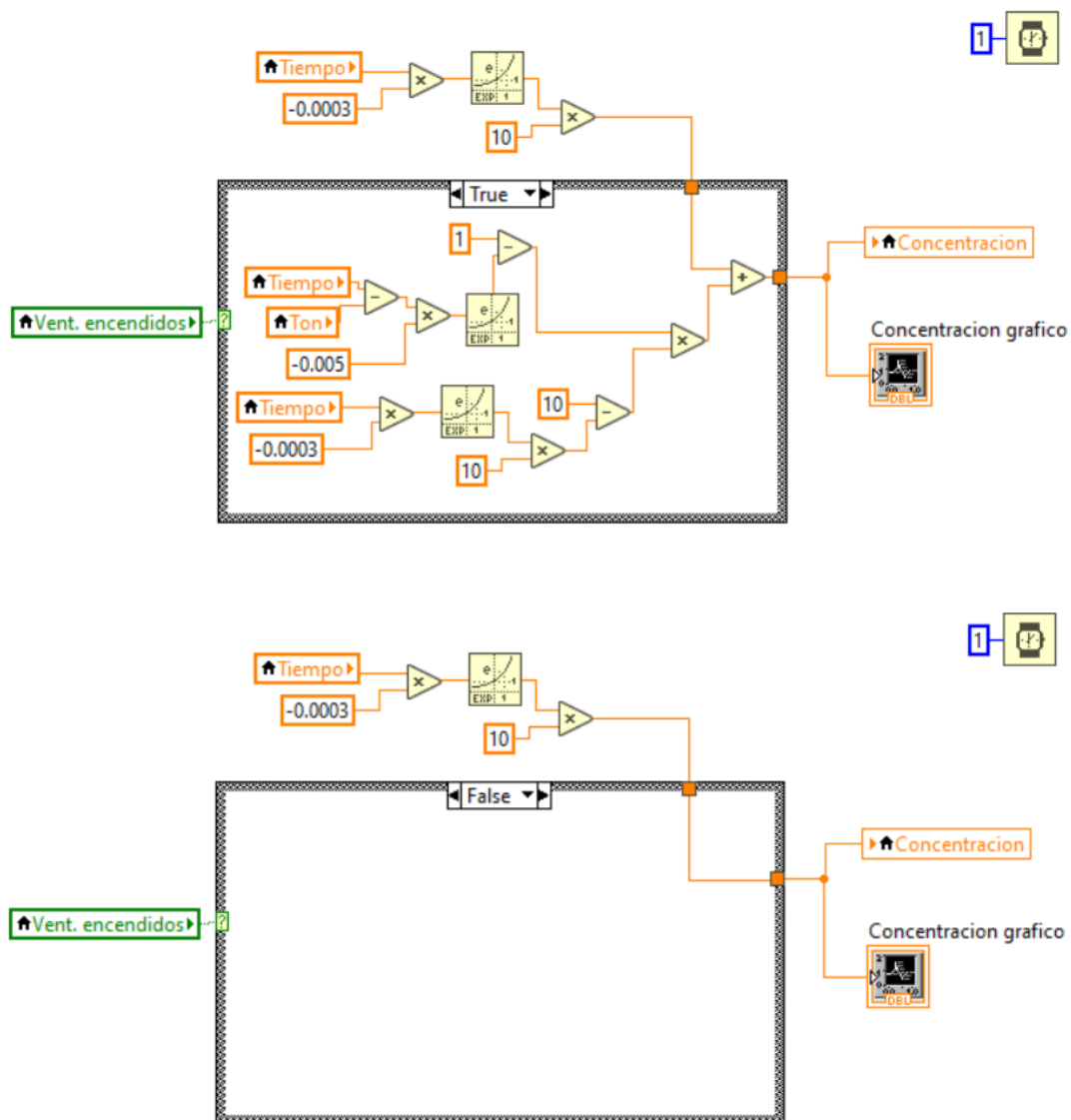
Nota. Elaboración propia.

6.3.4 Declaración de la función característica

La declaración de la función característica del sistema se realiza de tal manera que la composición de bloques forme la función encontrada anteriormente. En la Figura 75, en la parte de arriba se observa el valor de la estructura case en el caso de que la variable booleana “Vent. encendidos” sea verdadera, y en la figura de abajo en caso sea falsa.

Figura 75

Declaración de la función característica del sistema en LabVIEW.



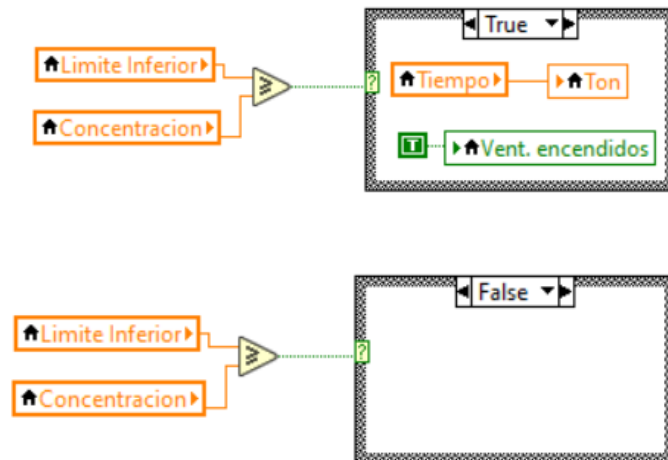
Nota. Elaboración propia.

6.3.5 Declaración del algoritmo de encendido de ventiladores

El algoritmo de encendido de ventiladores compara el valor actual de la concentración de BM con el límite que se configuró previamente, también guarda el valor actual de la variable auxiliar tiempo en la variable "Ton". En la Figura 76 se encuentra el algoritmo a ejecutarse cuando la condición sea verdadera a la izquierda y cuando sea falsa a la derecha.

Figura 76

Algoritmo de encendido de ventiladores en LabVIEW.



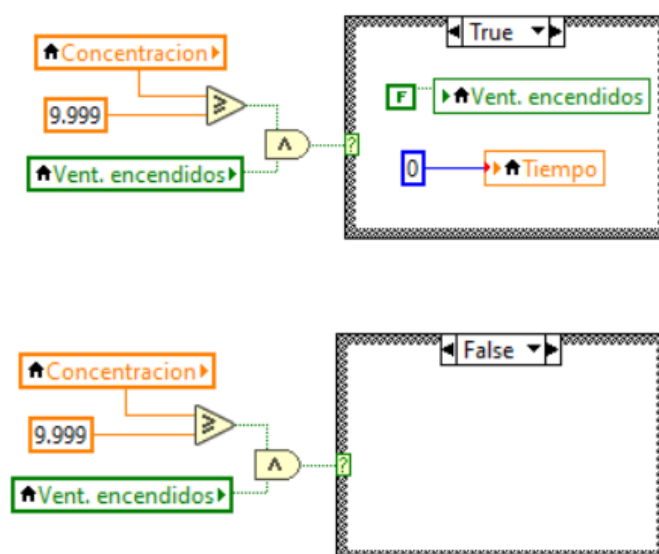
Nota. Elaboración propia.

6.3.6 Declaración del algoritmo de apagado de ventiladores

Este algoritmo detiene los ventiladores de recirculación cuando el valor de concentración llegue al 9.99 y también reinicia la variable auxiliar del tiempo. En la Figura 77 se encuentra el algoritmo a ejecutarse cuando la condición sea verdadera a la izquierda y cuando sea falsa a la derecha.

Figura 77

Algoritmo de apagado de ventiladores en LabVIEW.



Nota. Elaboración propia.

6.4 Sistema de control de la temperatura de la cámara de fumigación.

Para implementar el sistema de control se necesita recordar la función de transferencia que describe el comportamiento de la temperatura frente a la corriente que ingresa a la celda termoeléctrica.

$$G_r = -6.4061 * \left(\frac{0.064s + 0.00854}{s^2 + 0.5964s + 0.00855} \right) \quad (110)$$

6.4.1 Implementación del control PID

En esta sección se describe el método de implementación y sintonización de un controlador PID, se usa el método asistido por software, en este caso el toolbox PID Tuner de Matlab debido a la facilidad para ajustar los parámetros dinámicos requeridos y la inmediatez para observar los cambios en la respuesta del sistema (cada ajuste que se realiza actualiza el gráfico de la respuesta frente a un escalón en tiempo real).

6.4.2 Respuesta frente a una entrada escalón

Para iniciar el proceso de implementación del control, se debe conocer el comportamiento de la función de transferencia para ello se coloca una entrada escalón unitario a la planta y se coloca un Scope para visualizar el resultado según la figura 78.

Figura 78

Diagrama para respuesta frente a escalón.

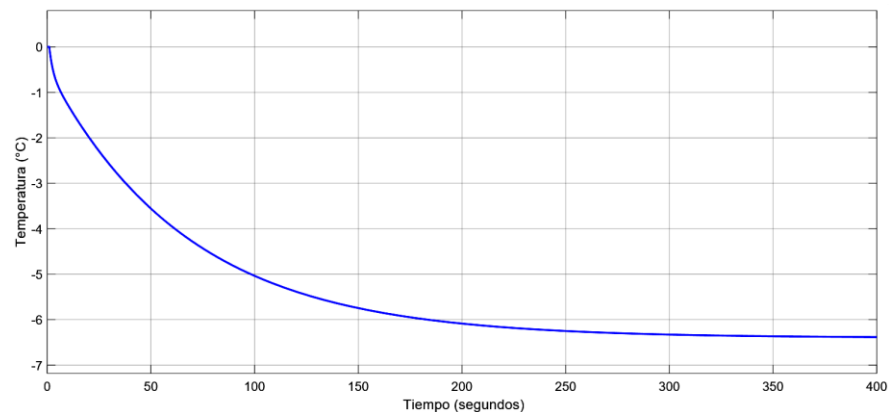


Nota. Elaboración propia.

En la figura 79 se encuentra la salida de la planta a una entrada escalón unitario, en ella se puede ver que el tiempo de estabilización es de 260 segundos y que tiene un valor de ganancia negativo que produce un resultado decreciente en el tiempo.

Figura 79

Respuesta de la planta frente a entrada escalón unitario.



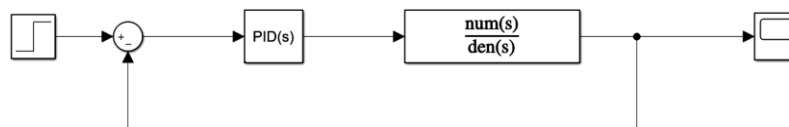
Nota. Elaboración propia.

6.4.3 Respuesta con control PID

Las constantes del controlador PID se encontraron gracias al toolbox PID Tuner de Matlab, estas son: K_p : -0.1666 K_i : -0.007217. Luego de eso se crea el diagrama de bloques según se muestra en la figura 80 con una retroalimentación unitaria.

Figura 80

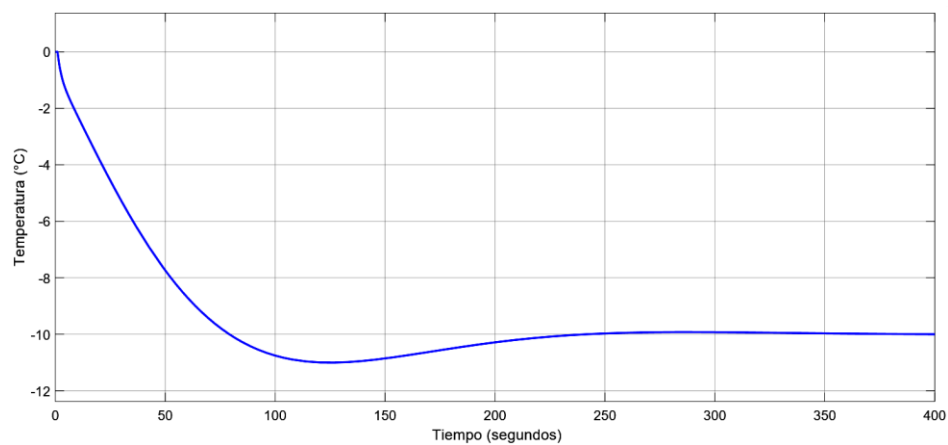
Diagrama de control PID implementado en Simulink.



Nota. Elaboración propia.

Figura 81

Respuesta de la planta con control PID y setpoint -10.



Nota. Elaboración propia.

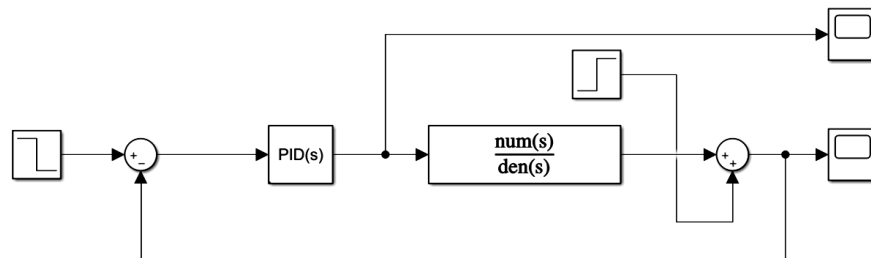
En la figura 81 se encuentra la respuesta de la planta con control PID y con un setpoint de -10, lo que origina un overshoot de 10% con un tiempo de establecimiento de 223 segundos.

6.4.4 Respuesta con control PID con perturbación

Para probar la capacidad del controlador se añade una perturbación continua, que estará presente durante todo el tiempo. Para esto se agrega una segunda entrada escalón en la salida de la planta según se muestra en la figura 82.

Figura 82

Diagrama de control PID con perturbación implementado en Simulink.

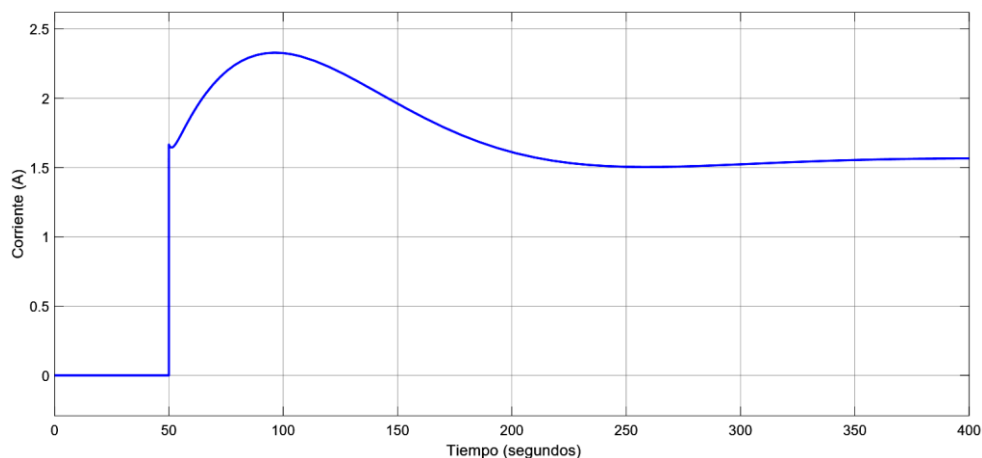


Nota. Elaboración propia.

En la figura 83 se encuentra el valor de la señal de control que es cero hasta que el setpoint cambia de 31 a 21. De ahí el valor de la señal de control (que en este caso es una corriente de entrada) sube hasta 2.33 amperios.

Figura 83

Valor de la señal de control en el tiempo.

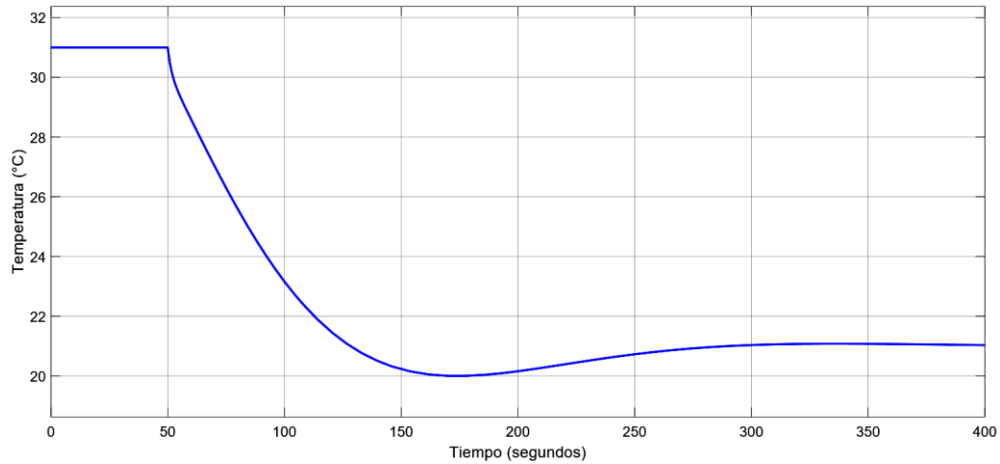


Nota. Elaboración propia.

En la figura 84 se encuentra la respuesta de la planta con control PID con una perturbación continua de 31 y con un setpoint de 21, lo que origina un overshoot de 10% con un tiempo de establecimiento de 270 segundos.

Figura 84

Valor de la salida de la planta en el tiempo.

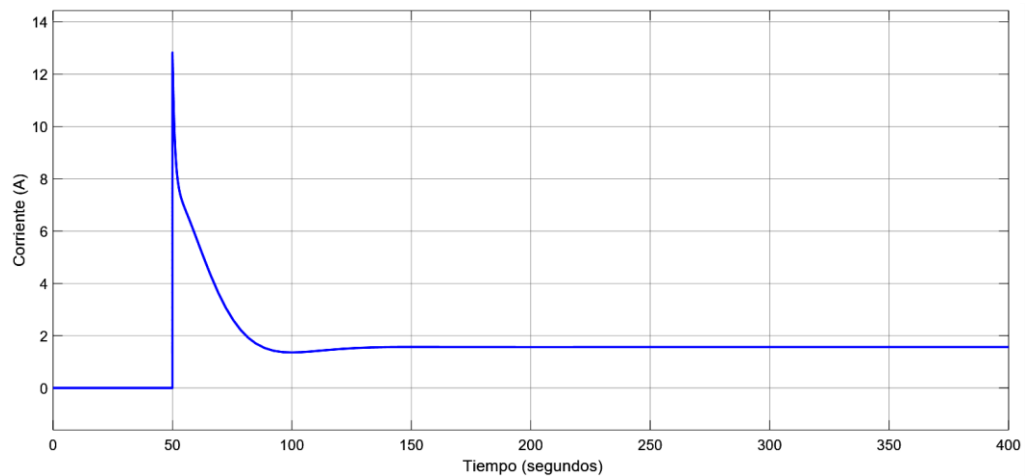


Nota. Elaboración propia.

Para mejorar el tiempo de establecimiento se varían los parámetros de control de la siguiente manera: K_p : -1.283 K_i : -0.1479. En la figura 85 se encuentra el valor de la señal de control que es cero hasta que el setpoint cambia de 31 a 21. De ahí el valor de la señal de control que en este caso es una corriente de entrada sube hasta 12.5 amperios.

Figura 85

Valor de la señal de control en el tiempo.

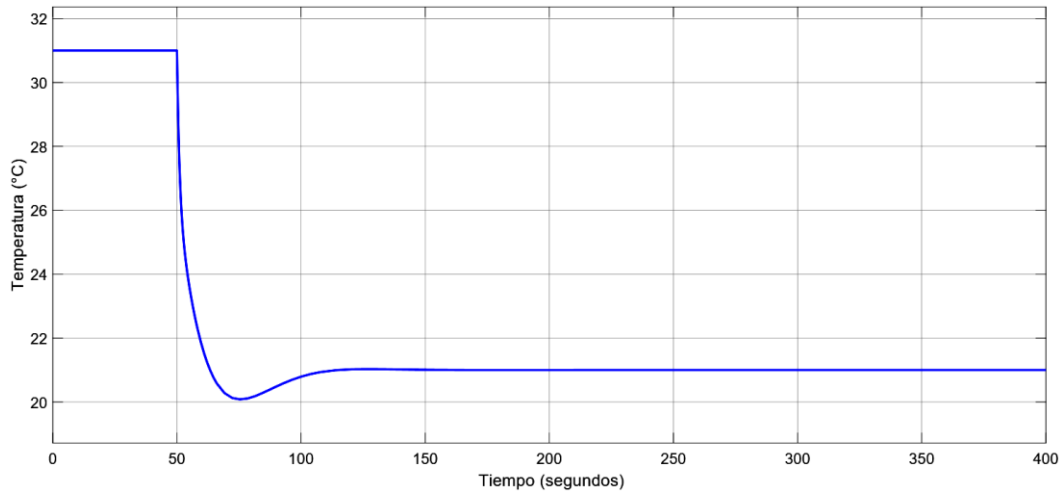


Nota. Elaboración propia.

En la figura 86 se encuentra la respuesta de la planta con control PID con una perturbación continua de 31 y con un setpoint de 21, lo que origina un overshoot de 10% con un tiempo de establecimiento de 105 segundos.

Figura 86

Valor de la salida de la planta en el tiempo.



Nota. Elaboración propia.

6.5 Sistema de control de la concentración de la expulsión de BM.

Para implementar el sistema de control se necesita recordar la función de transferencia que describe el comportamiento de la concentración en la salida de la chimenea frente a la apertura de la válvula de extracción.

$$G_e(s) = \frac{-5.24s + 210}{s^3 + 15.25s^2 + 96.66s + 209} \quad (111)$$

6.5.1 Implementación del control Difuso

En esta sección se describirá de manera sintética el método de implementación y sintonización de un controlador Difuso, se usará el método asistido por software, en este caso el toolbox Fuzzy de Matlab. El diseño del controlador difuso no requiere el conocimiento del modelo matemático de la planta, sino lo que se requiere es el conocimiento de las variables de entrada y salida, para determinar su rango y su correlación al momento de implementar las reglas de pertenencia.

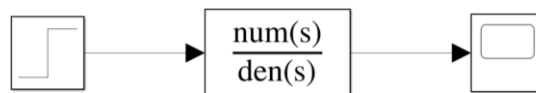
Cuando lo que se necesita es regular la salida de la planta siguiendo una referencia, habitualmente se considera el error como una entrada, además de la derivada del error o la integral del error, pero en este caso se considerará solamente el error y se añadirá el valor de setpoint.

6.5.2 Respuesta frente a una entrada escalón

Para iniciar el proceso de implementación del control, se debe conocer el comportamiento de la función de transferencia para ello se coloca una entrada escalón unitario a la planta y se coloca un Scope para visualizar el resultado según la figura 87.

Figura 87

Diagrama para respuesta frente a escalón.

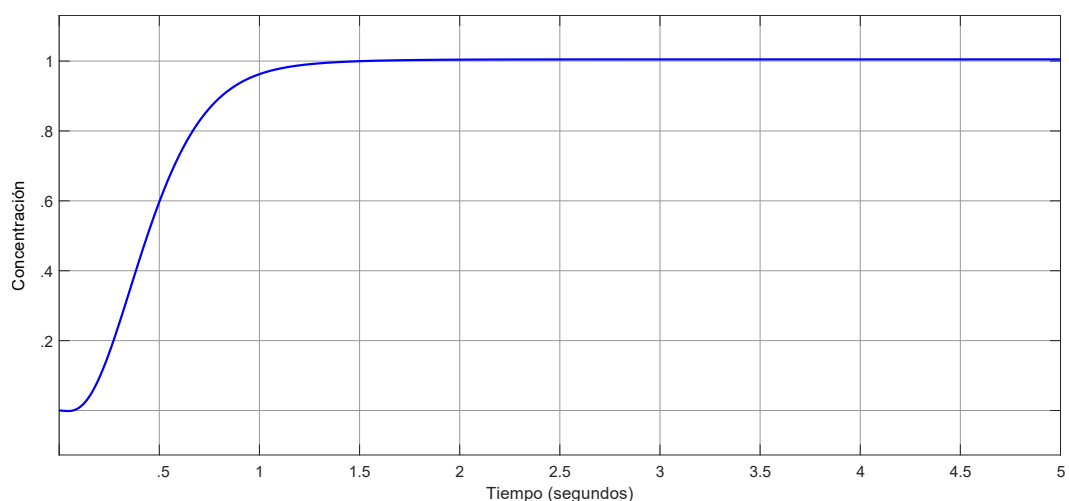


Nota. Elaboración propia.

En la Figura 88 se puede ver la salida de la planta a una entrada escalón unitario, en ella se puede ver que el tiempo de estabilización es de 1.23 segundos y que tiene una respuesta sobre-amortiguada.

Figura 88

Respuesta de la planta frente a entrada escalón unitario.



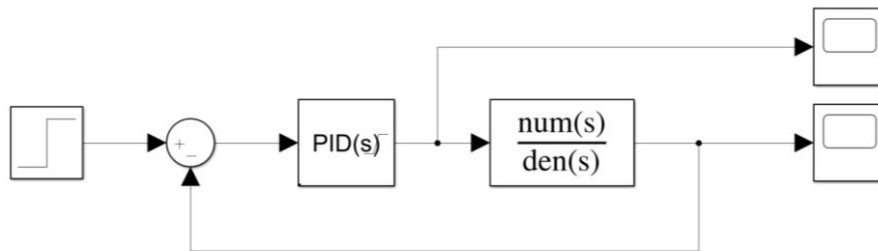
Nota. Elaboración propia.

6.5.3 Respuesta con control PID

Las constantes del controlador PID se encontraron gracias al toolbox PID Tuner de Matlab, estas son: K_p : 2.020 K_i : 4.465 K_d : 0.226. Luego de eso se crea el diagrama de bloques según lo mostrado en la figura 89 con una retroalimentación unitaria.

Figura 89

Diagrama de control PID implementado en Simulink.

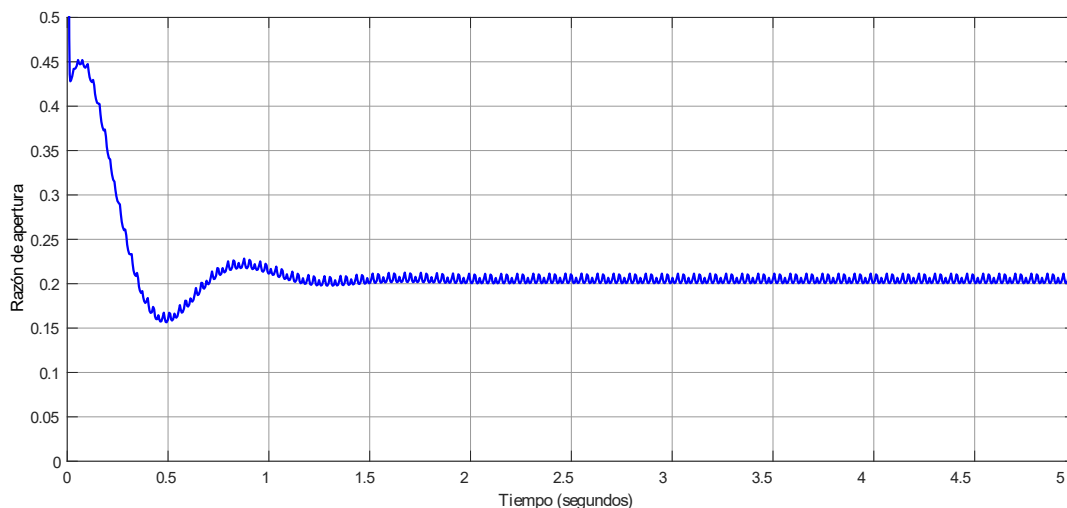


Nota. Elaboración propia.

En la figura 90 se encuentra el valor de la señal de control en el tiempo el cual está limitado de cero a uno, en la etapa transitoria el valor máximo de la señal de control llega a 0.45 (45% de apertura). Durante su etapa de estado estable se presentan pequeñas oscilaciones debido a que el sistema es de orden 3.

Figura 90

Valor de la señal de control en el tiempo.



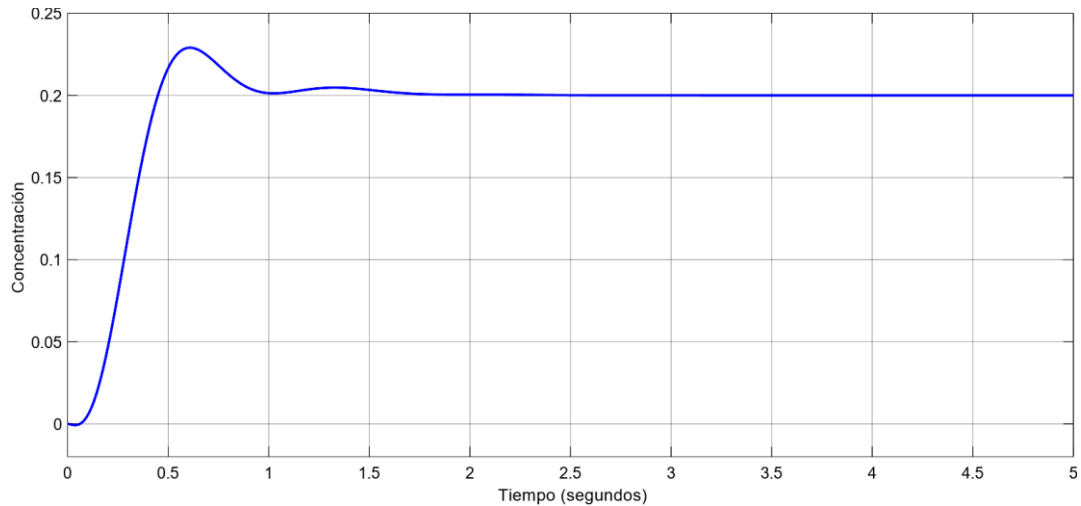
Nota. Elaboración propia.

En la figura 91 se encuentra el valor de la salida de la planta en el tiempo con una respuesta del tipo sub-amortiguada con un overshoot de 14.5% con un tiempo de

establecimiento de 1.603 segundos y con un valor estable de 0.2 que se mantiene en el tiempo.

Figura 91

Valor de la salida de la planta en el tiempo.



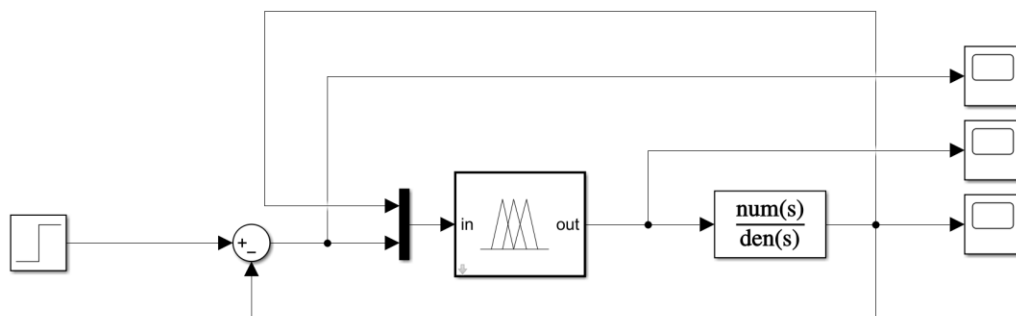
Nota. Elaboración propia.

6.5.4 Diagrama de control difuso

Para implementar el controlador difuso además de la entrada del error, se añade como entrada el valor de la salida como está representado en la figura 92, además se añaden más Scopes para visualizar el comportamiento completo del sistema de control.

Figura 92

Diagrama de control difuso implementado en Simulink.



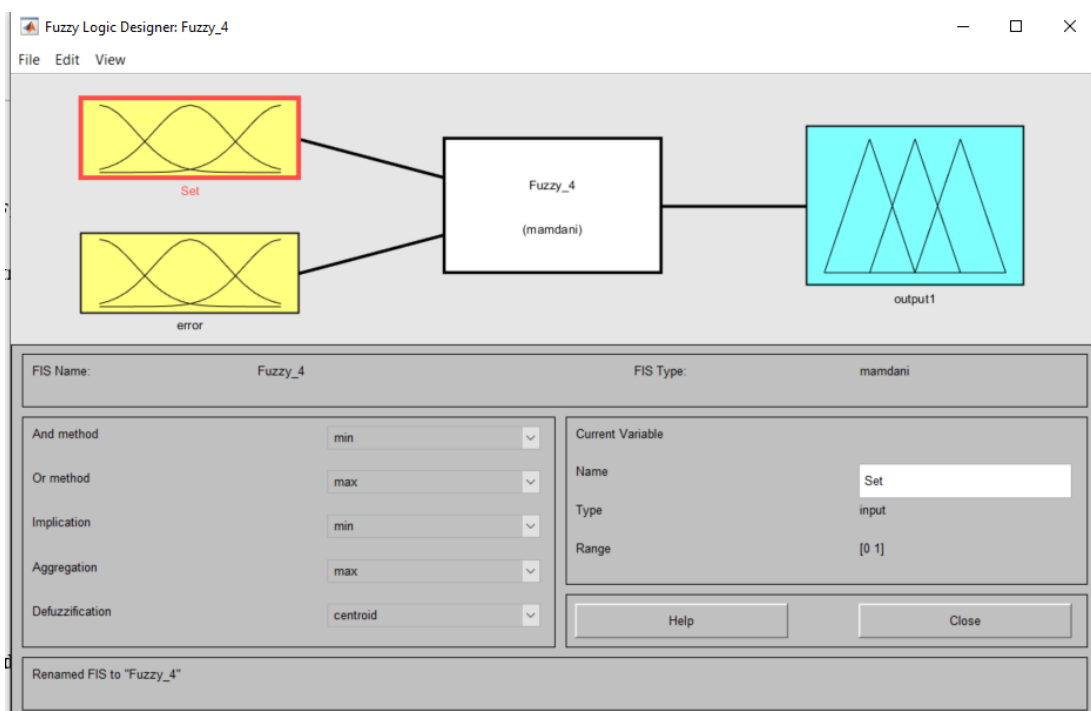
Nota. Elaboración propia.

6.5.5 Controlador difuso

En esta sección se desarrolla la implementación de un controlador difuso del tipo Mamdani con dos entradas y una salida. Además de la defuzzificación será mediante el método del centroide.

Figura 93

Características principales del controlador difuso.



Nota. Elaboración propia.

6.5.6 Fuzzificación

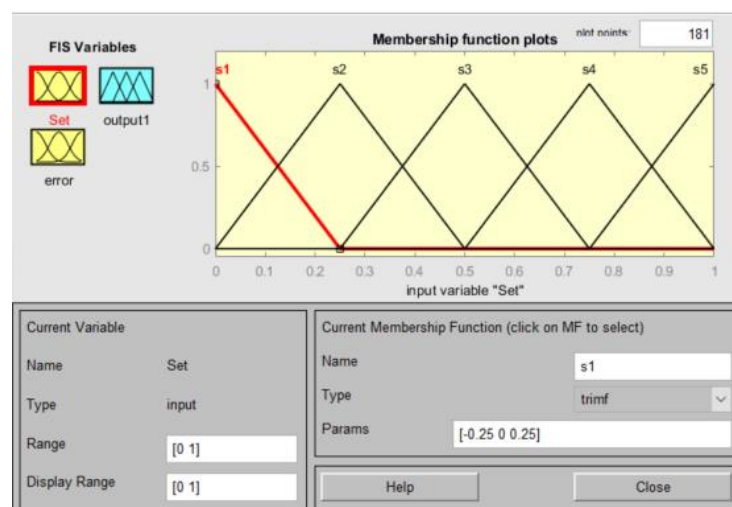
Se realiza la etapa de fuzzificación de acuerdo a las variables de entrada como setpoint y error y la variable de salida output. Para las señales de entrada, se fijaron cinco funciones de pertenencia para el error (e), cinco funciones de pertenencia para el setpoint (s). Y para la salida se fijaron cinco funciones de pertenencia (u). El modo de inferencia difuso, así como las variables lingüísticas asociadas a cada función de pertenencia, tanto de las entradas como de la salida, se resume en la siguiente tabla:

Tabla 7***Variables lingüísticas.***

Error (e)	Setpoint (s)	Salida (u)
Error Negativo Grande (e1)	Setpoint cercano a cero (s1)	Salida cercana a cero (u1)
Error Negativo Pequeño (e2)	Setpoint cercano a 0.25 (s2)	Salida cercana a 0.25 (u2)
Error cercano a cero (e3)	Setpoint cercano a 0.5 (s3)	Salida cercana a 0.5 (u3)
Error Positivo Pequeño (e4)	Setpoint cercano a 0.75 (s4)	Salida cercana a 0.75 (u4)
Error Positivo Grande (e5)	Setpoint cercano a uno (s5)	Salida cercana a uno (u5)

Las funciones de pertenencia se definen de manera uniforme para cada una de las variables, si el comportamiento final del controlador no es el deseado se podrían modificar. Para este trabajo se optó por utilizar funciones de pertenencia lineales, tales como triangulares y trapezoidales, en lugar de las gaussianas, debido a razones de costo computacional visto también en el artículo de Chamorro (2010) donde usan las mismas funciones de transferencia.

En la figura 94 se encuentra la configuración de la variable de entrada Setpoint (s) las funciones de pertenencia usadas son triangulares de un ancho de 0.5. El valor de esta entrada va desde cero a uno.

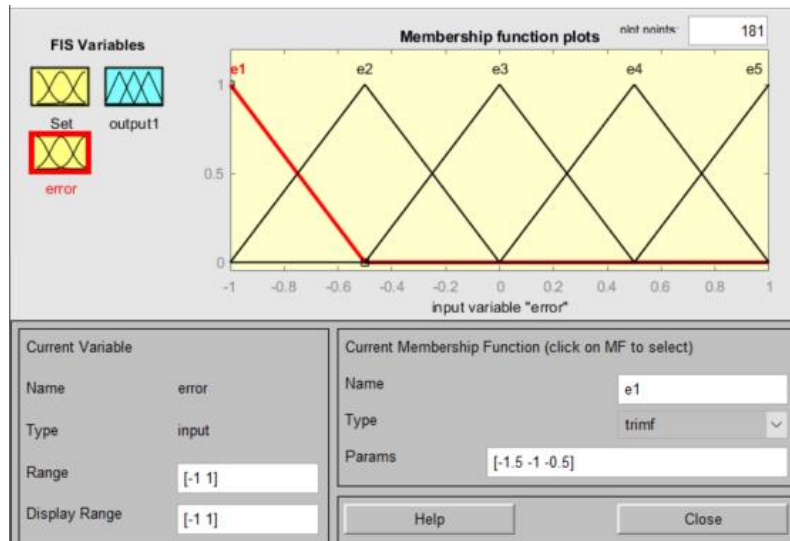
Figura 94**Funciones de pertenencia de la variable Setpoint.**

Nota. Elaboración propia.

En la figura 95 se encuentra la configuración de la variable de entrada error (e) las funciones de pertenencia usadas son triangulares de un ancho de 1. El valor de esta entrada va desde menos uno a uno.

Figura 95

Funciones de pertenencia de la variable error.

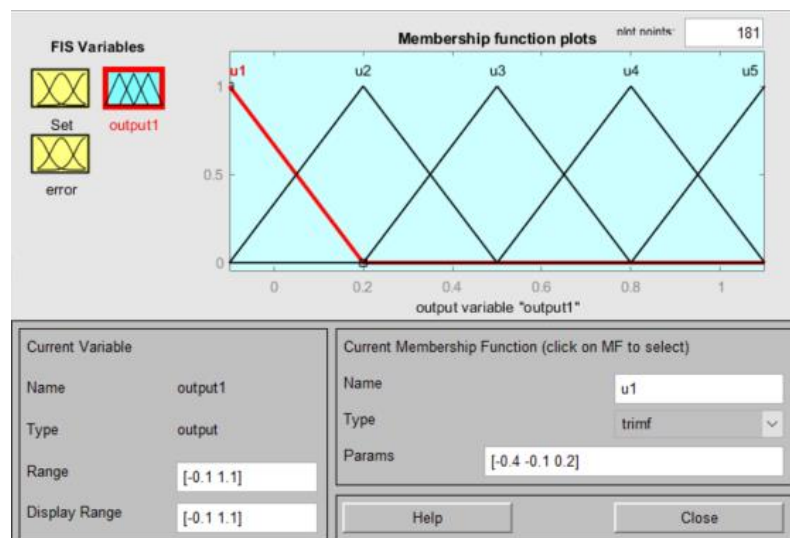


Nota. Elaboración propia.

En la figura 96 se encuentra la configuración de la variable de salida output las funciones de pertenencia usadas son triangulares de un ancho de 0.5. El valor de esta entrada va desde cero a uno.

Figura 96

Funciones de pertenencia de la variable output.



Nota. Elaboración propia.

6.5.7 Reglas del control difuso

De las funciones de pertenencia presentadas anteriormente para cada una de las entradas y las salidas se elabora una base de reglas para el diseño del controlador en la Tabla 7.

Tabla 8

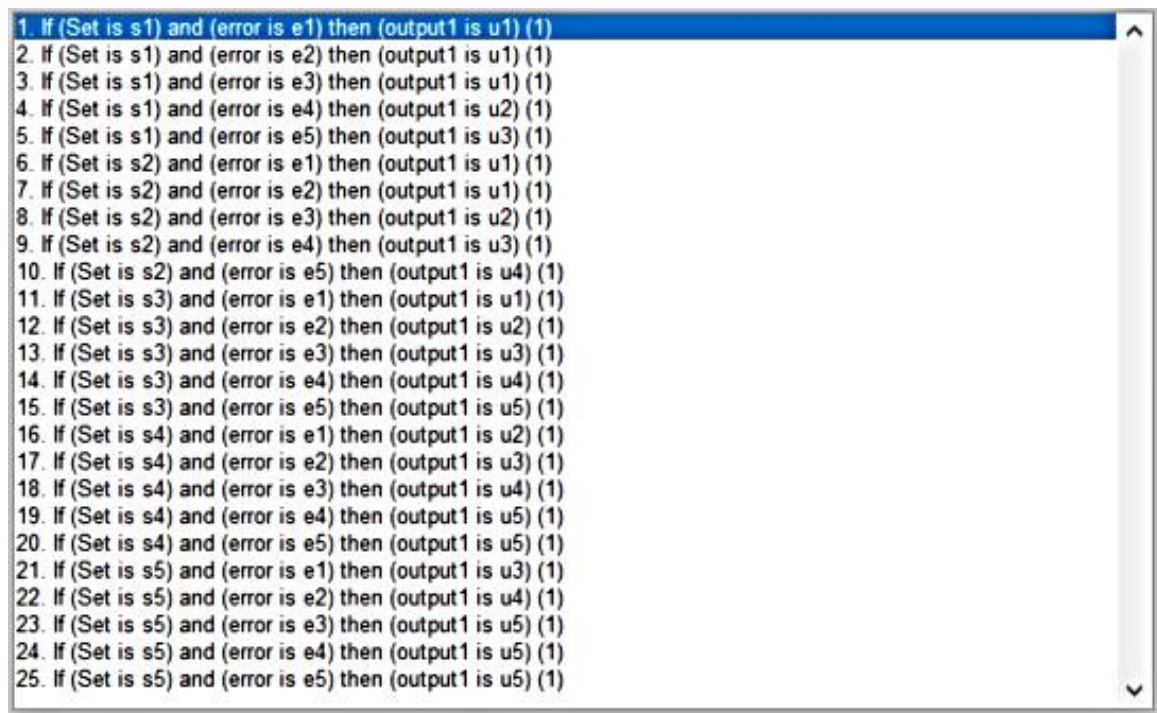
Tabla de reglas del controlador.

Set \ error	e1	e2	e3	e4	e5
s1	u1	u1	u1	u2	u3
s2	u1	u1	u2	u3	u4
s3	u1	u2	u3	u4	u5
s4	u2	u3	u4	u5	u5
s5	u3	u4	u5	u5	u5

En la figura 97 se encuentran las reglas del controlador difuso implementados en la interfaz de Matlab.

Figura 97

Reglas del control difuso implementado.



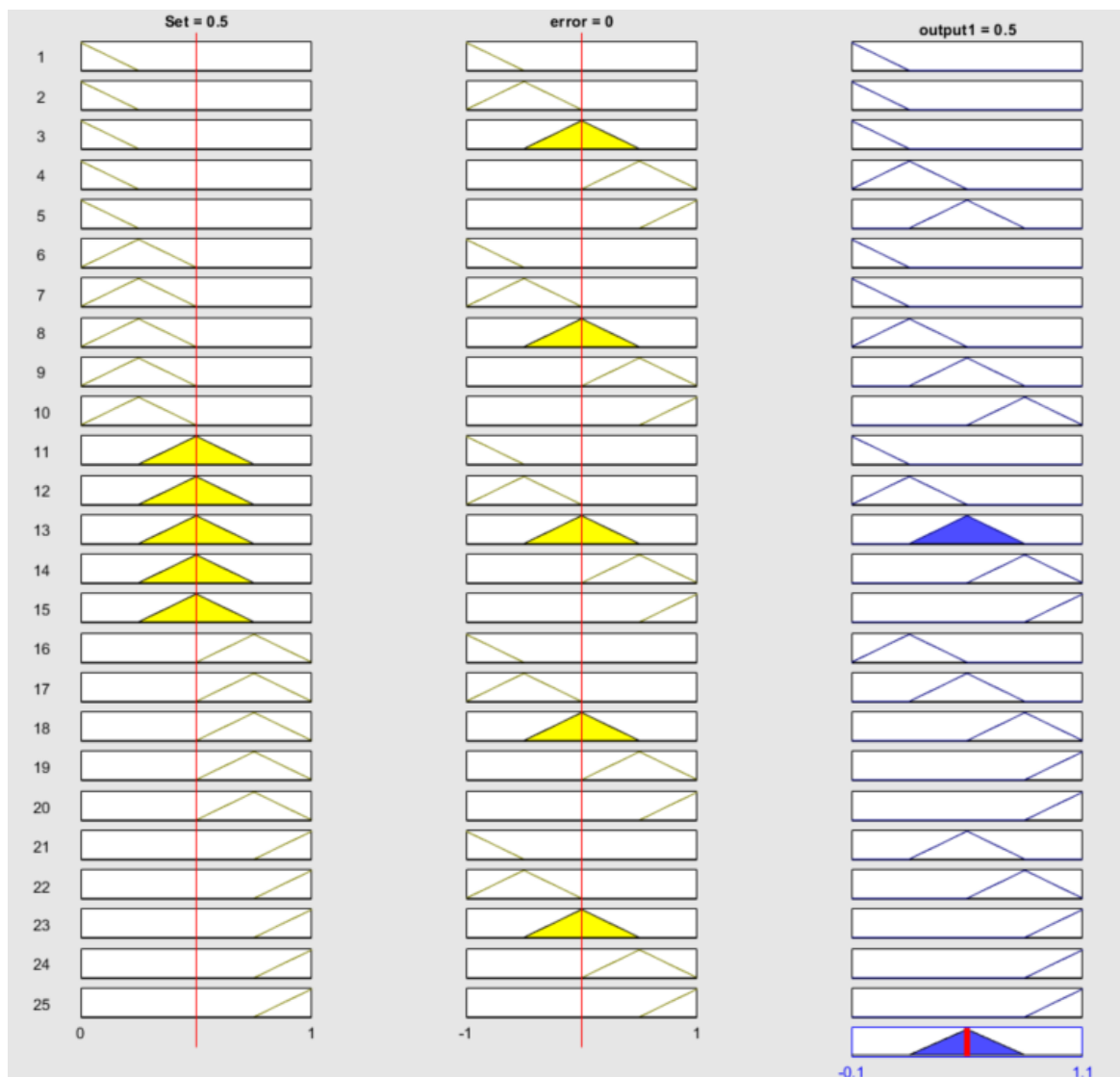
Nota. Elaboración propia.

6.5.8 Defuzzificación

En la figura 98 se muestra el valor de las salidas con respecto a las funciones de pertenencia y a la base de reglas del controlador según la variación de las entradas. Como la defuzzificación está realizada por el método del centroide se puede ver que la función de pertenencia se activa (se colorea de amarillo para las entradas y morado para las salidas) cuando el valor que ingresa esta por el centro. Esta interfaz permite ingresar los valores de entrada y observar cómo se comporta la salida de acuerdo de las 25 reglas creadas, en el caso de la figura se puede ver el comportamiento para $set=0.5$ y $error=0$.

Figura 98

Visualización de las Reglas en MatLab.



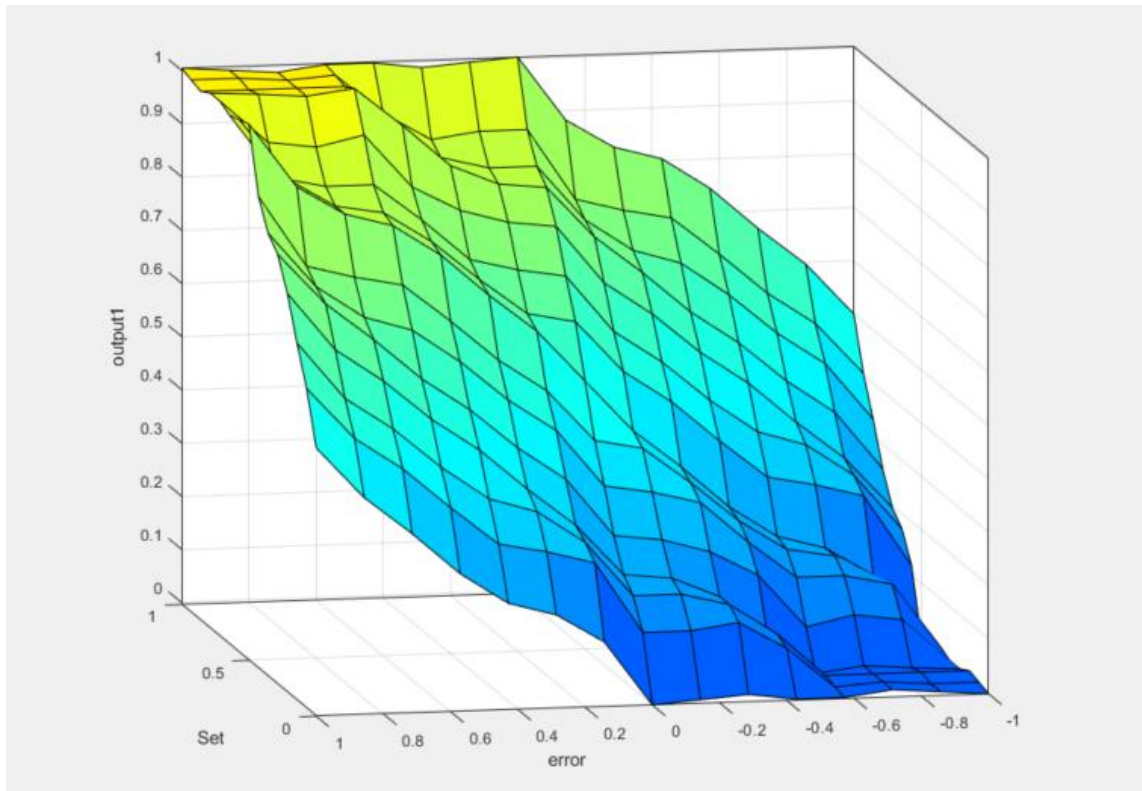
Nota. Elaboración propia.

6.5.9 Superficie de control

En la figura 99 se muestra la superficie de control para la salida, también llamada superficie de conmutación, en ella se puede apreciar que el comportamiento de las reglas de control es simétrico y la superficie es casi un plano.

Figura 99

Superficie de control para la salida Output 1.



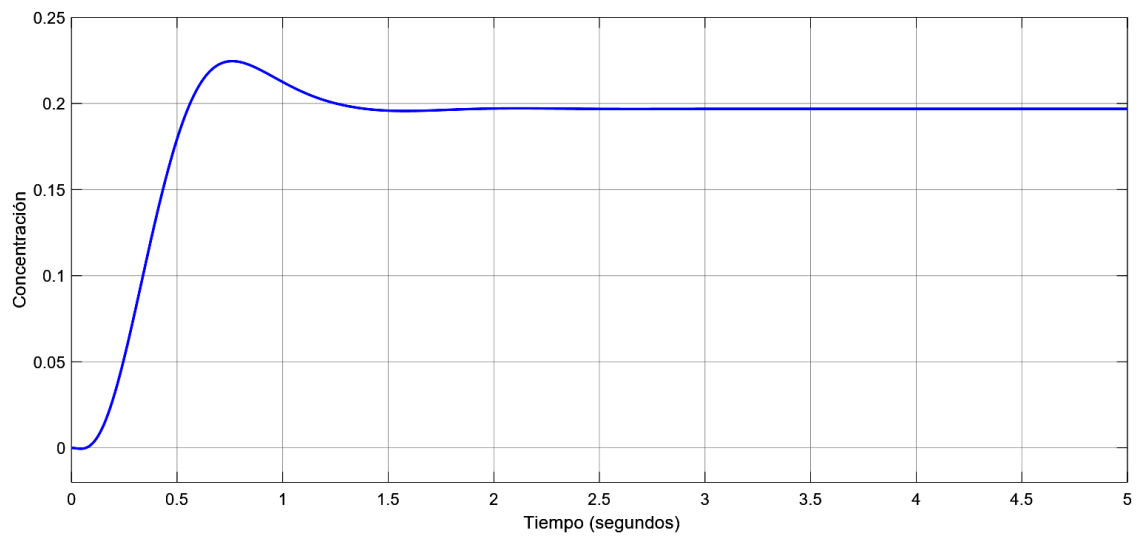
Nota. Elaboración propia.

6.5.10 Control difuso

En la figura 100 se encuentra el valor de la salida de la planta en el tiempo con una respuesta del tipo sub-amortiguada con un overshoot de 12.3% con un tiempo de establecimiento de 1.195 segundos y con un valor estable de 0.196 que se mantiene en el tiempo, lo cual representa una mejora frente a las características obtenidas con el controlador PID.

Figura 100

Valor de la salida en el tiempo.

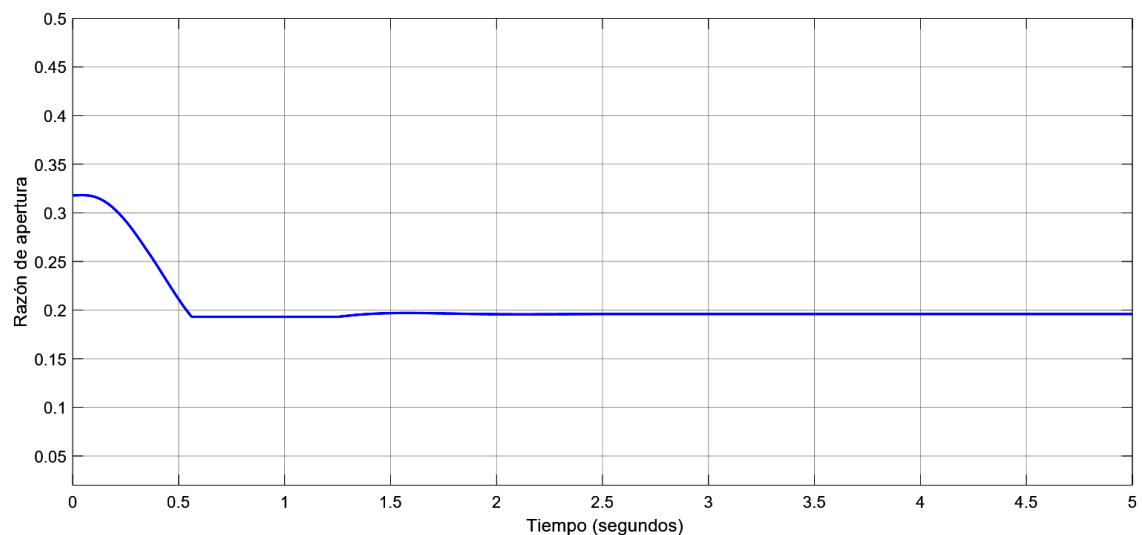


Nota. Elaboración propia.

En la figura 101 se encuentra el valor de la señal de control en el tiempo el cual está limitado de cero a uno, en la etapa transitoria el valor máximo de la señal de control llega a 0.31 (31% de apertura). Durante su etapa de estado estable se pueden ver que ya no existen las oscilaciones que se presentaban con el controlador PID implementado anteriormente.

Figura 101

Valor de la señal de control en el tiempo.



Nota. Elaboración propia.

Luego de desarrollar cada sistema de control, se procede a integrar todos los sistemas en una única interfaz donde se pueden encontrar todos los procesos juntos y visualizar las principales variables presentes en los procesos. Esta integración fue desarrollada en el software LabView, como se muestra en la figura 102, donde se presenta la interfaz completa de la planta.

The screenshot displays the 'EXPULSION EN PROCESO' (Expulsion in Process) screen of the HPLC control software. The interface is divided into several sections:

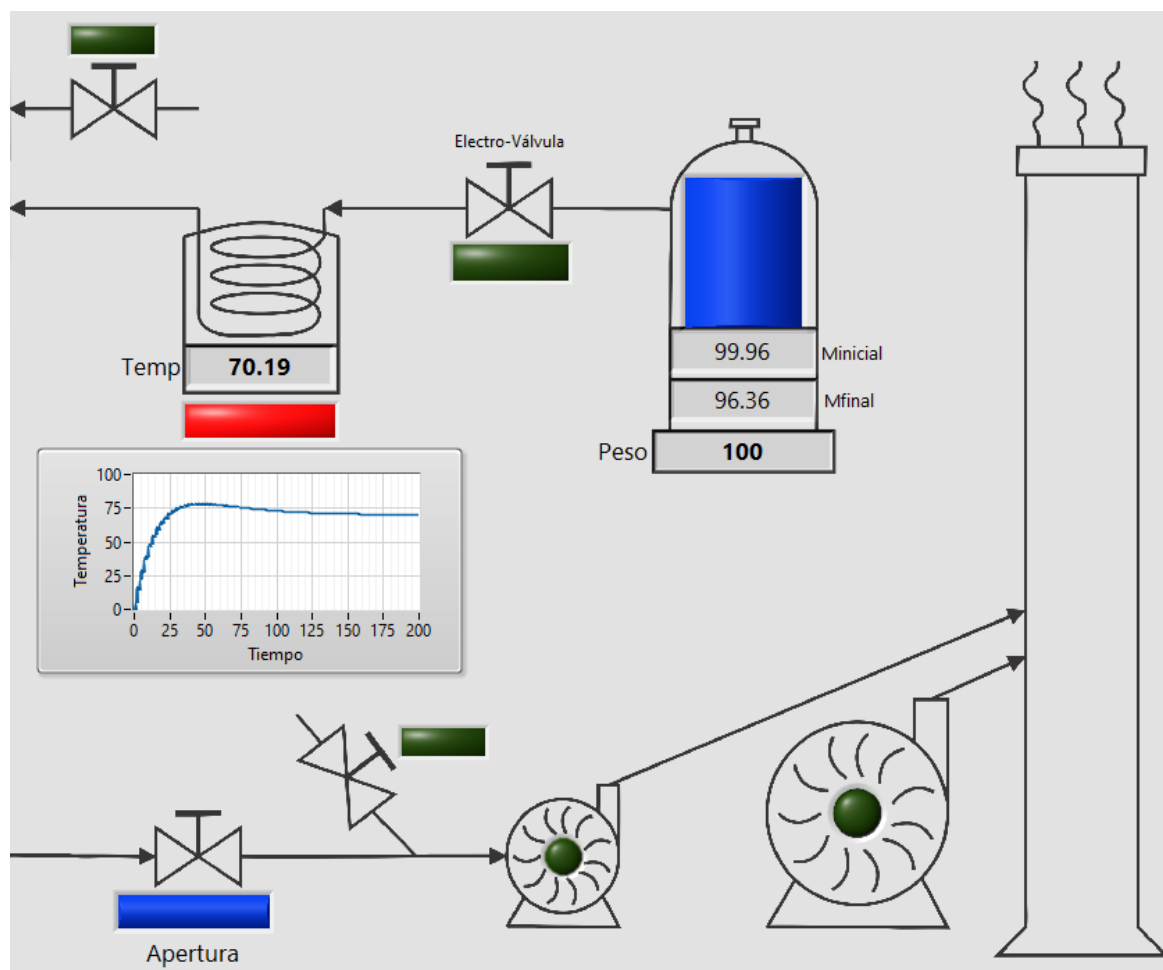
- Top Section:** Contains two empty graphs for 'Concentracion en Columna' (Concentration in Column) and 'Apertura de valvula' (Valve Opening), both plotted against 'Tiempo' (Time) from 0 to 250.
- Process Flow Diagram:** A central schematic showing the flow from a 'Vaseo' (Filling) tank through a 'Electro-Valvula' (Electro-Valve) and a 'Temp.' (Temperature) sensor (70.19) into a 'Tratamiento' (Treatment) unit (40). The 'Tratamiento' unit has a 'Temp. Int.' (Internal Temperature) of 21.83. The flow then goes through a 'Vent. emergencia' (Emergency Vent) and a 'Conc. inferior' (Lower Concentration) sensor (30) before reaching the 'Expulsion' stage. The 'Expulsion' stage includes a 'Mistral' (Fan) and a 'Peso' (Weight) sensor (96.36).
- Control Buttons:** On the right side, there are four buttons: 'EXPULSION', 'FUMIGACION', 'INYECCION', and 'INICIO' (Start).
- Data Readouts:** Various numerical values are displayed, including 'Temp. Int.' (21.83), 'Conc. inferior' (30), 'Mistral' (96.36), and 'Peso' (96.36).

112

En la figura 103, se aprecian las representaciones de los equipos que participan en los procesos de inyección y aireación, además del gráfico de la variación de la temperatura en el vaporizador. También se muestran el estado de los actuadores mediante un indicador de estado y el nivel del balón del BM se representa de forma gráfica.

Figura 103

Equipos que participan en la inyección y aireación.



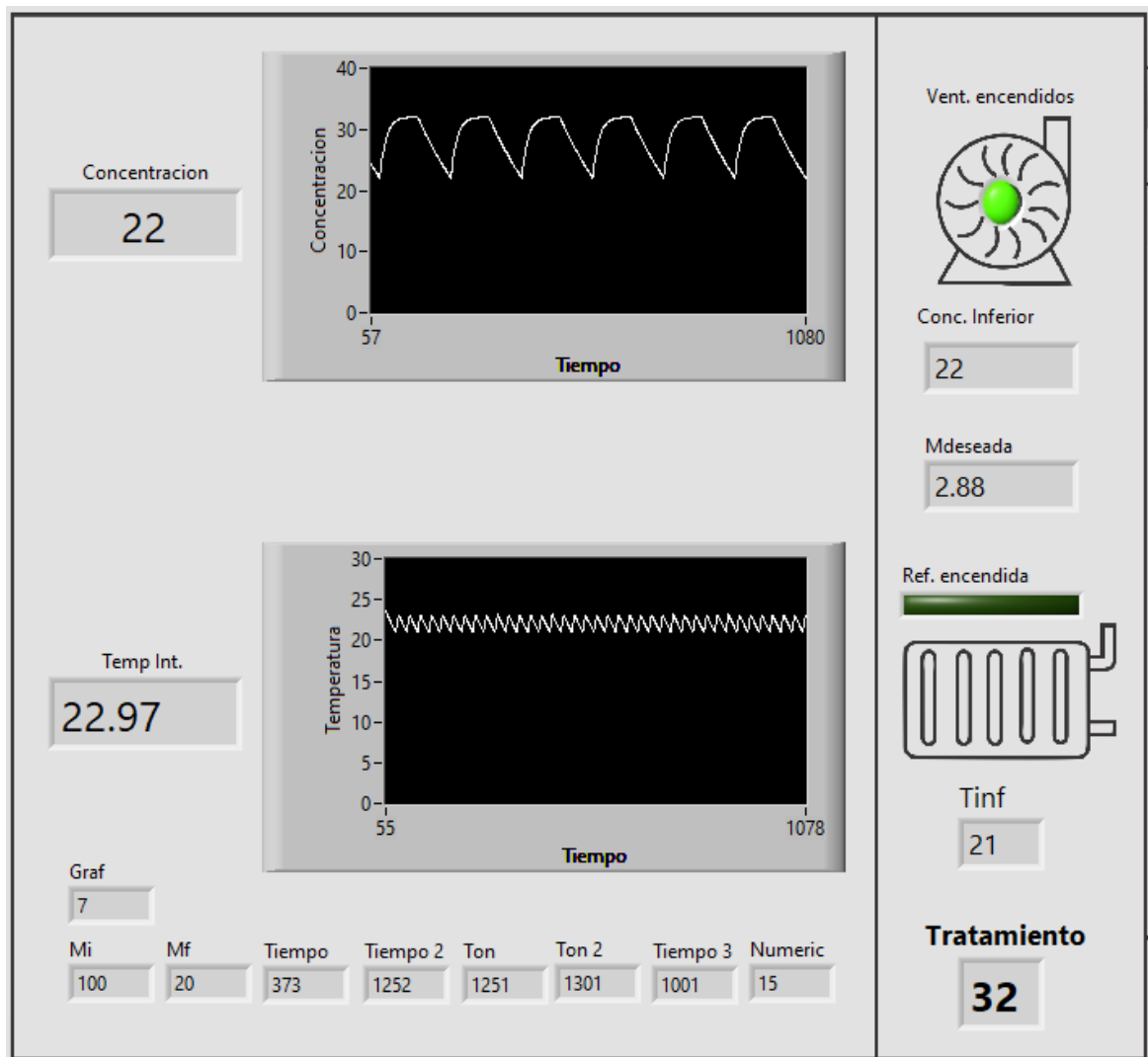
Nota. Elaboración propia.

En la figura 104, se observa una representación de la cámara de fumigación con los equipos que participan en la fumigación, así como los gráficos de la concentración y temperatura en el interior de la cámara de fumigación.

Asimismo, en la figura 104 se muestra el valor de concentración escogido según el tratamiento a llevar a cabo. Además, se presentan variables adicionales que se utilizaron en los algoritmos de control.

Figura 104

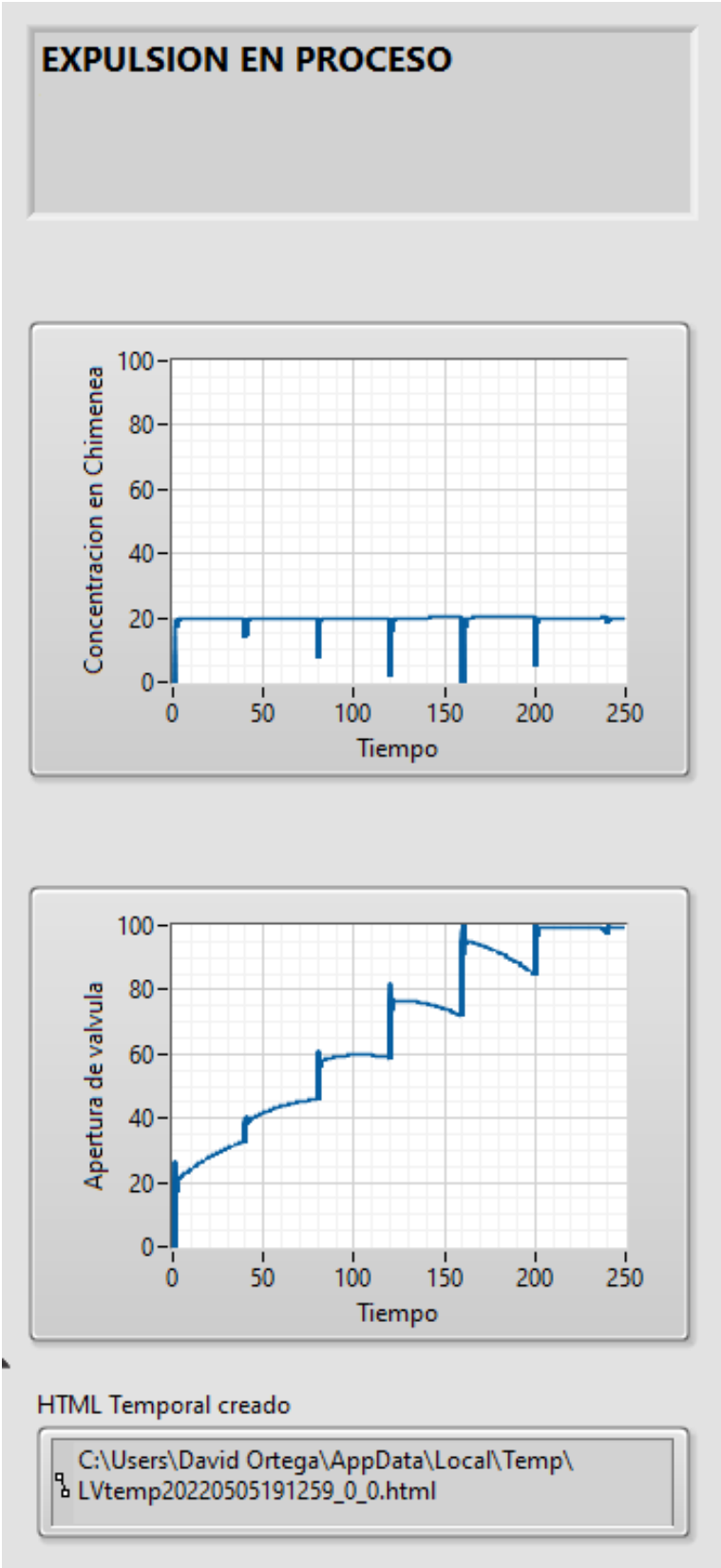
Equipos que participan en la fumigación.



Nota. Elaboración propia.

La figura 105 incluye un cuadro de texto donde se encuentra una descripción del proceso o indicaciones. A continuación, se presentan dos gráficos: el primero muestra el valor de la concentración de BM en la chimenea, y el segundo gráfico muestra el valor de apertura de la válvula de extracción. Adicionalmente, se muestra la ruta del archivo HTML creado como informe del proceso, el cual se puede visualizar en la figura 106.

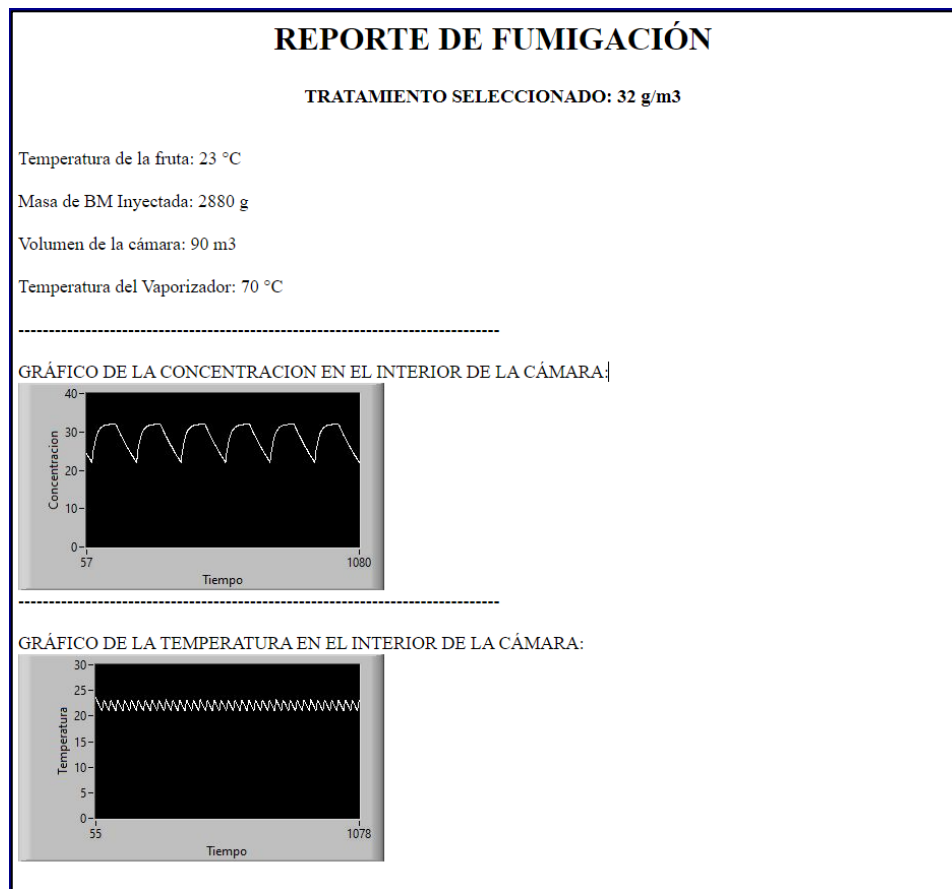
Figura 105
Gráficos durante la expulsión de BM.



Nota. Elaboración propia.

Figura 106

Reporte del proceso de Fumigación.



Nota. Elaboración propia.

Para el proceso de Carga del producto se implementó una base de datos en el software Access para el registro de los productos, clientes y operadores que forman parte de cada proceso.

Figura 107

Base de datos para el control de proceso de Fumigación.

PROCESOS

Número de Proceso:	151515				
Código de Operario:	OP0005	David	Ortega	Solorzano	
Código de Supervisor:	SU0002	Jorge	Salinas	Nieto	
Fruta:	FR0010	arandanos			
Cliente:	41111111	Peso (Kg):	40000	Guía:	5855495
Detalle:					
Observaciones:					

Nota. Elaboración propia.

Capítulo VII. Resultados

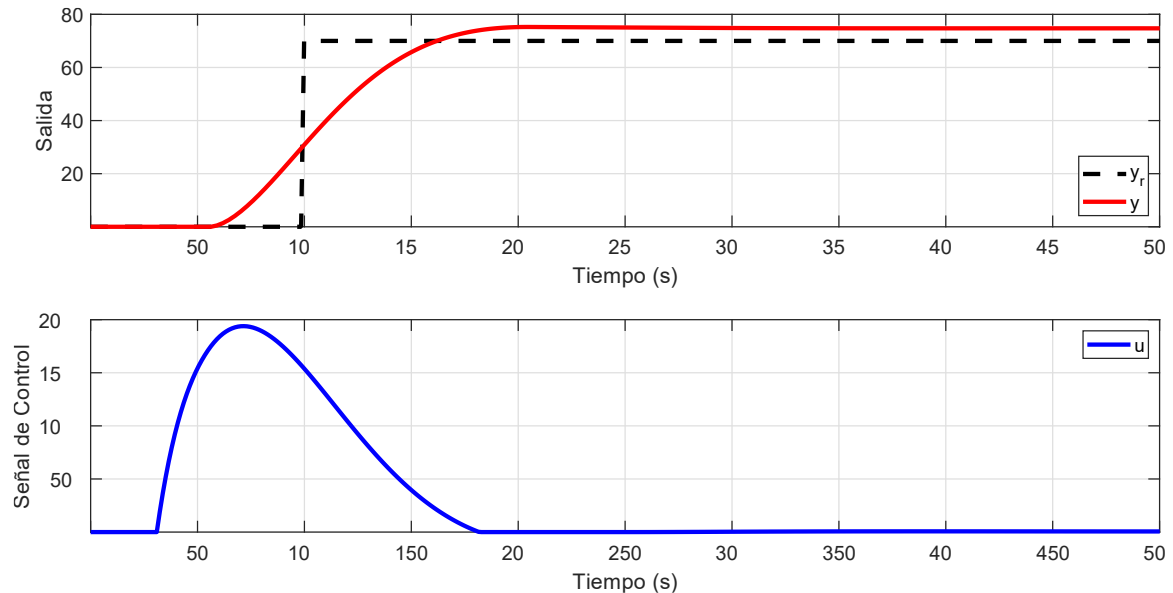
En este capítulo se analizaron las respuestas de los diferentes sistemas de control implementados.

7.1 Resultados del control de la temperatura del vaporizador.

En esta sección se analizaron los resultados del sistema de control de la temperatura del vaporizador, que fue diseñado con el algoritmo de control predictivo basado en modelo (MPC) con 80 pasos de horizonte de predicción.

Figura 108

Respuesta del sistema de control de la temperatura.



Nota. Elaboración propia.

En la figura 108 se muestra la respuesta del sistema de control frente a una entrada escalón de valor de 70°C , este valor se escogió debido a que una de las condiciones del proceso de fumigación era que la temperatura del vaporizador sea mayor a 60°C . La respuesta del sistema es sub amortiguado con un sobrepico de 5.26°C lo que es 7.5% del valor del setpoint, este valor se encuentra dentro de lo esperado para el correcto funcionamiento del equipo y para evitar daños por sobrecalentamiento dentro del vaporizador.

Tabla 9**Características del control de la temperatura del vaporizador.**

Setpoint	70° C
Tiempo de establecimiento	63 segundos
Sobrepico	75.25° C
Valor en estado estable	74.65° C
Error en estado estable	4.65° C

En la tabla 9 se enumeran las características de la respuesta del sistema de control de la temperatura del vaporizador, el tiempo de establecimiento es de 63 segundos que se consiguió mediante la el controlador MPC que permitió predecir la señal de control para obtener la referencia deseada, activándose 60 segundos de manera anticipada para alcanzar el valor en el estado estable de manera rápida.

El error en estado estable es de 4.65° C lo que representa un 6.64% del setpoint, este valor esta dentro de los limites de lo esperado. El valor en el estado estable es de 74.65° C lo que cumple con las condiciones del proceso de fumigación que es que el valor de temperatura del vaporizador sea mayor a 60° C.

7.2 Resultados del control de la dosis ingresada.

El sistema de control de la dosis tiene como objetivo controlar la masa de BM que ingresa a la cámara de fumigación. Para analizar la respuesta del controlador se probó dos valores de setpoint (32 g/m^3 y 40 g/m^3) para la concentración en la cámara de fumigación. Para calcular la masa deseada se hacen las operaciones mostradas en las relaciones (111) y (112), estos valores son los esperados como resultado de las simulaciones.

Para una concentración de 32 g/m^3 para una cámara de 90 m^3 :

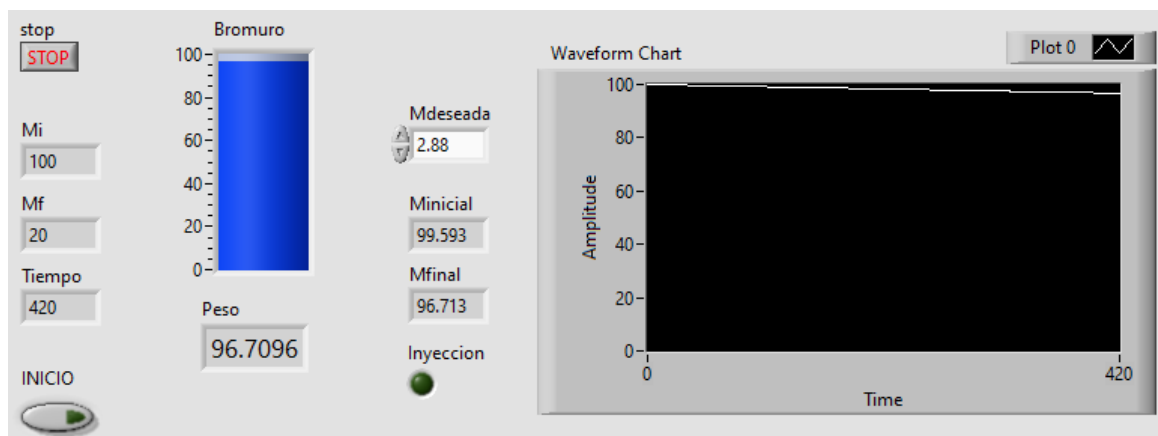
$$Dosis = 90 \times 32 = 2,880 \text{ kg} \quad (111)$$

Para una concentración de 40 g/m^3 para una cámara de 90 m^3 :

$$Dosis = 90 \times 40 = 3,600 \text{ kg} \quad (112)$$

Figura 109

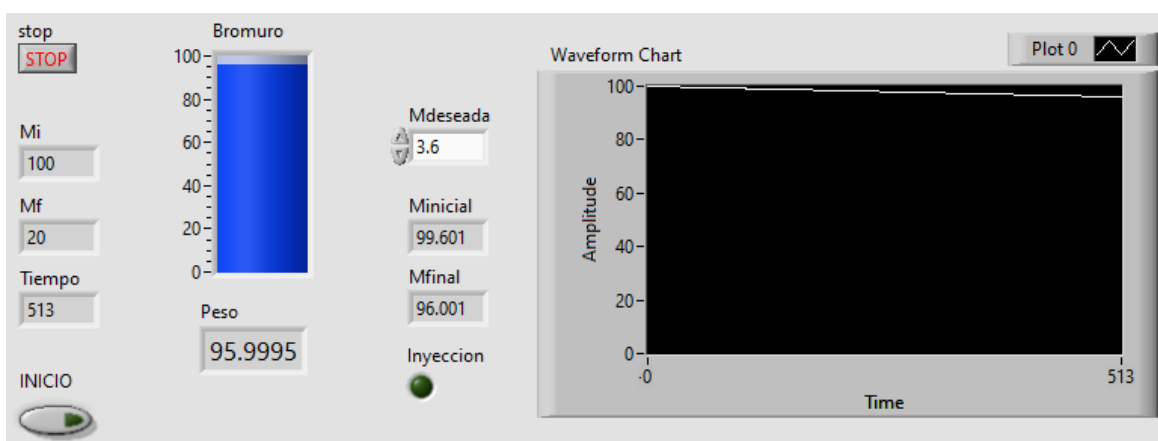
Respuesta del sistema para una dosis de 32 g/m^3 .



Nota. Elaboración propia.

Figura 110

Respuesta del sistema para una dosis de 40 g/m^3 .



Nota. Elaboración propia.

En estas figuras 109 y 110 se muestran las capturas de las respuestas de los sistemas para los dos valores de concentraciones.

Para el valor de concentración de 32 g/m^3 se obtiene que la masa deseada es la obtenida (2,880 kg) y que el tiempo del proceso de dosificación es de 420 segundos lo que es lo esperado para la etapa de dosificación.

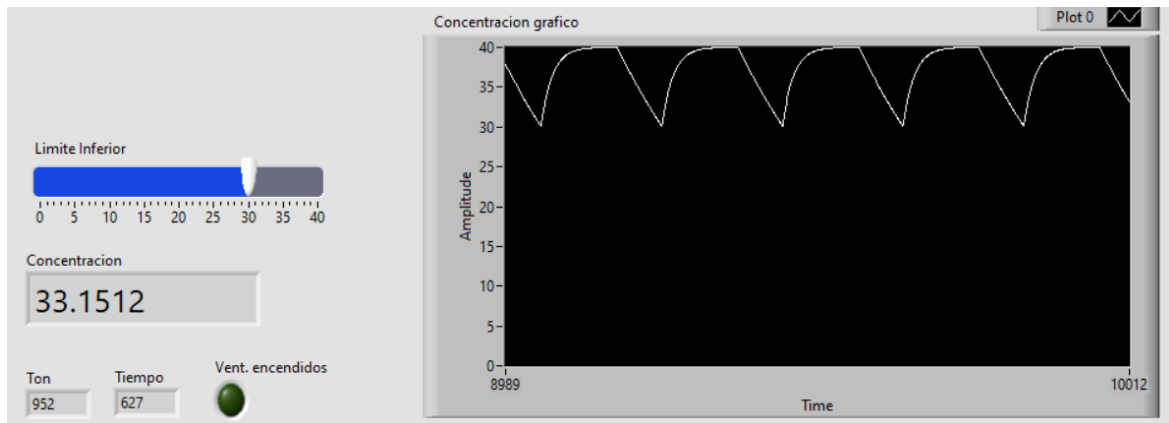
Para el valor de concentración de 50 g/m^3 se obtiene que la masa deseada es la obtenida (3,600 kg) y que el tiempo del proceso de dosificación es de 513 segundos lo que es lo esperado para la etapa de dosificación.

7.3 Resultados del control de la concentración de BM.

El sistema de control de la concentración de BM tiene como objetivo evitar que disminuya el valor de concentración dentro de la cámara de fumigación. En las figuras 111 y 112 se muestran las capturas de la simulación para una concentración de 40 g/m^3 , se probaron dos valores del límite inferior (30 g/m^3 y 20 g/m^3).

Figura 111

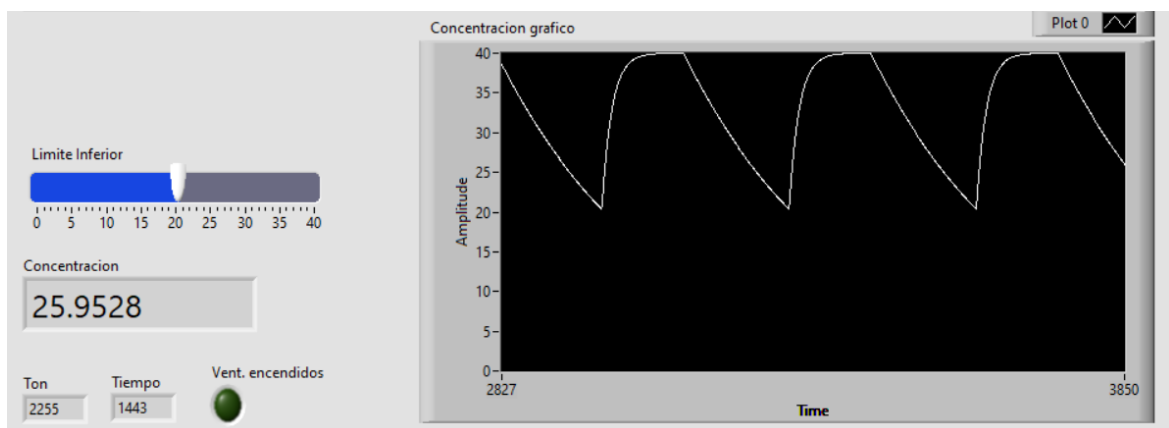
Control de la concentración con límite inferior 30.



Nota. Elaboración propia.

Figura 112

Control de la concentración con límite inferior 20.



Nota. Elaboración propia.

En las figuras 111 y 112 se observa que el valor de la concentración se mantiene dentro de los límites esperados, lo que indica que los resultados son satisfactorios.

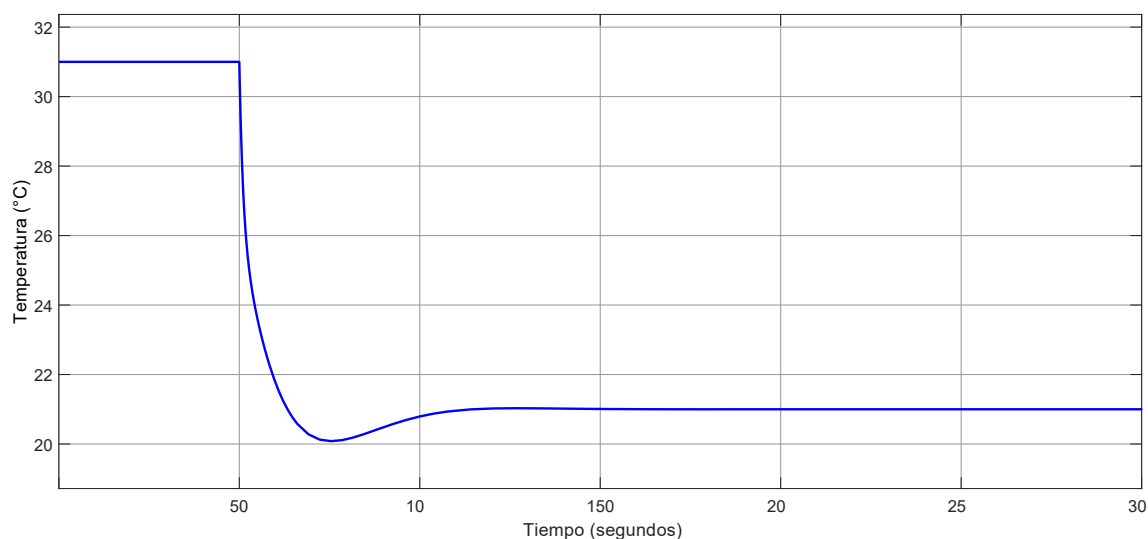
7.4 Resultados del control de la temperatura de la cámara de fumigación.

El sistema de control de la temperatura de la cámara de fumigación tiene como objetivo bajar la temperatura ambiente a los 21° C para evitar que las frutas se descompongan durante el proceso de fumigación. Se implementaron dos algoritmos de control, el primero usando el algoritmo de control PID en el software Matlab y el segundo usando un control on-off en el software LabVIEW.

La implementación del algoritmo PID se realizó en la plataforma Simulink del software Matlab usando el modelo de un enfriador Peltier. La respuesta del sistema de control se muestra en la figura 113, se obtuvo un sobre-pico de alrededor de un grado y un error en estado estable cercano a cero y sin oscilaciones observables en la respuesta ni la señal de control. Esta respuesta se encuentra dentro de los límites esperados y asegura que la temperatura de las frutas no acelere su descomposición.

Figura 113

Respuesta del sistema de control de la temperatura – Simulink.



Nota. Elaboración propia.

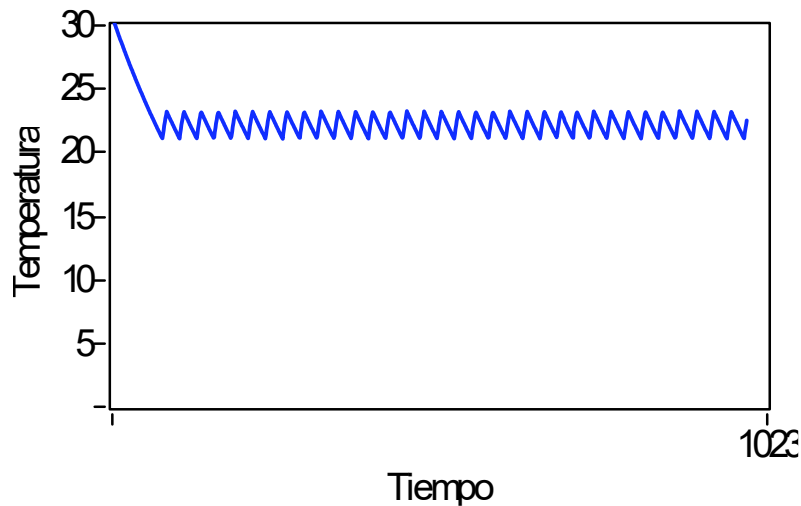
La implementación del algoritmo on-off se realizó en el software LabVIEW junto a los otros lazos de control en la simulación integrada. Se usó un algoritmo que enciende o apaga la refrigeración según la temperatura leída, para minimizar el coste computacional.

En la figura 114 se muestra la variación de la temperatura en el tiempo para el control on-off. La temperatura inicial es 31° C y la temperatura en estado estable varía entre

20° C y 22° C. Este rango se encuentra dentro de los límites esperados y asegura que la temperatura de las frutas no acelere su descomposición.

Figura 114

Respuesta del sistema de control de la temperatura - LabVIEW.



Nota. Elaboración propia.

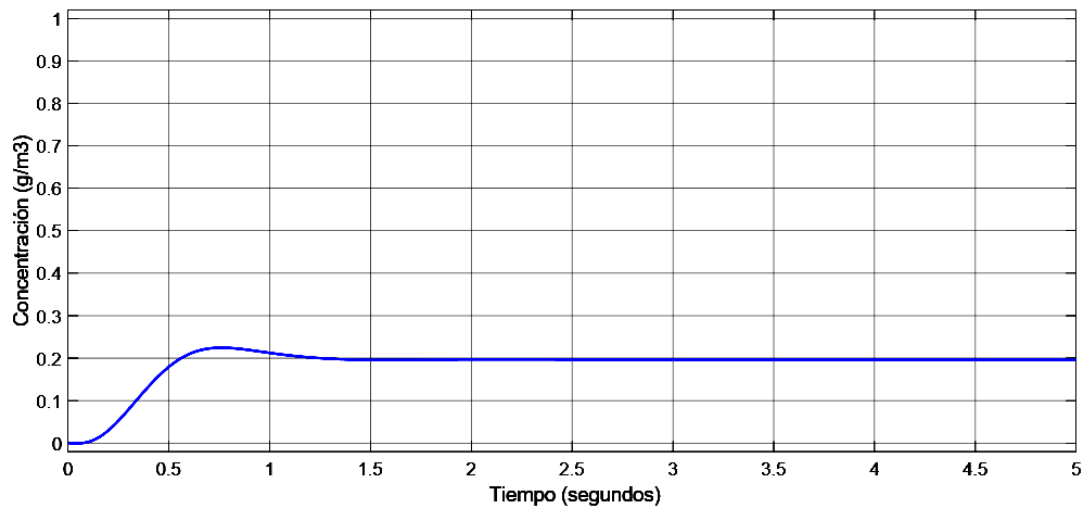
7.5 Resultados del control de la concentración de la expulsión de BM.

El sistema de control de la concentración de la expulsión de BM tiene como objetivo mantener la concentración de BM debajo de 500 ppm en la chimenea. Se implementaron dos algoritmos de control, el primero usando el algoritmo de control PID en el software Matlab y el segundo usando un control PID en el software LabVIEW.

La primera implementación del algoritmo PID se realizó en la plataforma Simulink del software Matlab usando el modelo obtenido mediante la simulación de elementos finitos en COMSOL. La respuesta del sistema de control se muestra en la figura 115, presenta un sobrepico de 0.025 g/m³ que es 12.5% del valor del setpoint (200 ppm). Se presenta un error cercano a cero en el estado estable, además que se logró evitar las oscilaciones.

Figura 115

Respuesta del sistema de control de la concentración – Simulink.

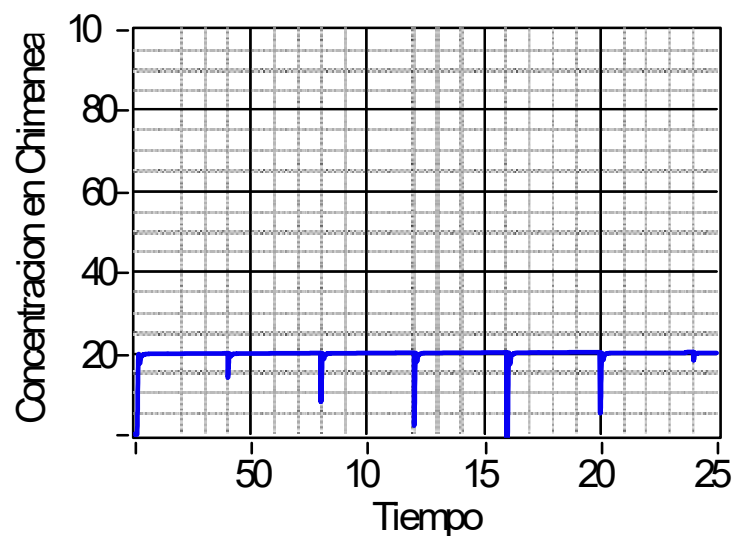


Nota. Elaboración propia.

La segunda implementación del algoritmo PID se realizó en el software LabVIEW. La respuesta del sistema de control se muestra en la figura 116, esta respuesta es del tipo sobre-amortiguado por lo que no se tiene sobrepico, además se añadieron perturbaciones para simular cambios reales en la expulsión. Ambas respuestas están dentro de los resultados esperados para la concentración durante la etapa de expulsión.

Figura 116

Respuesta del sistema de control de la concentración – LabVIEW.



Nota. Elaboración propia.

Conclusiones

- Se diseñó un sistema de automatización mediante técnicas de control moderno del proceso de fumigación con Bromuro de Metilo en la agroindustria cuyas respuestas en las simulaciones se aproximaron a las respuestas reales obtenidas de la planta de fumigación.
- Se diseñaron cinco lazos de control y se describieron las características clave de los equipos involucrados en cada etapa del proceso de fumigación.
- Se elaboraron los algoritmos de control para cada etapa del proceso de fumigación, en la etapa de dosificación se usó el algoritmo MPC, en la etapa de exposición se usó el algoritmo PID y en la etapa de aireación se usó el algoritmo Difuso.
- Se simularon los lazos de control de cada etapa del proceso de fumigación obteniendo sobrepicos menores al 10% y con tiempo de establecimientos menores a los 2 minutos, los cuales están dentro de lo esperado para una planta lenta.
- Se programó la interfaz para el control simulado de una planta de fumigación agroindustrial obteniendo una interfaz con un comportamiento similar al de la planta de fumigación física, elaborando un informe HTML al final del proceso.

Referencias bibliográficas

- Alfaro, G. (2021). Modelamiento y diseño de un sistema de control de las variables Críticas de un molino semiautógeno mediante un sistema experto Basado en control MPC y lógica difusa [Tesis de maestría]. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima.
- Alvaro, A. (2016). Rehabilitación y automatización del caldero Columbia CT-6 de la planta piloto de Ingeniería Química y Agroindustrial [Tesis de pregrado]. Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Álvaro, F. (2019). Análisis comparativo de control PID y lógica difusa como técnicas de control en un proceso de nivel de un tanque de recuperación de agua de una planta minera [Tesis de pregrado]. Universidad Católica de Santa María, Arequipa.
- Amaya, Y. (2018). Simulación físico-química de un horno reactor térmico (HRT) con mezclas etano-propano utilizando COMSOL como herramienta computacional [Tesis de pregrado]. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- Bazán, S. (2021). Tratamientos cuarentenarios para exportación de fruta fresca [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima.
- Bedate, F. (2015). Control predictivo de modelos borrosos Takagi-Sugeno mediante función de Lyapunov contractiva [Tesis de doctorado]. Universitat Jaume I, Castellón.
- Beingolea, R. (2012). Procedimiento autorización de personas naturales o jurídicas que ejecutan tratamientos químicos con fines fitosanitarios – SENASA. Recuperado de <https://www.senasa.gob.pe/senasa/descargasarchivos/2014/10/07.pdf>
- Calisaya et al. (2012). Multivariable Predictive Control of a Pilot Flotation Column. 2012 American Control Conference, pp. 4022-4027.
- Camacho, E. & Bordons, C. (2004). Control predictivo: pasado, Presente y futuro. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, Vol. 1, Núm.3, pp. 5-28.
- Camacho, E. & Bordons, C. (2007), Model predictive control, Sevilla, España, Editorial Springer.

- Chamorro et al. (2010). Diseño y simulación de un controlador PD difuso para el control de la velocidad de un motor de inducción. Ingeniería & Desarrollo, Universidad del Norte, vol. 27, pp. 62-92.
- Chen et al. (2007). Application of model predictive control in ball mill grinding circuit. Minerals Engineering 20, pp. 1099–1108.
- Criollo, E. (2015). Diseño e implementación de un controlador difuso tolerante a falla, aplicado al control de nivel de líquido [Tesis de pregrado]. Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca.
- Díaz, J. (2014). Procedimiento: Medidas fitosanitarias de cuarentena interna para moscas de la fruta en el Perú – SENASA. Recuperado de <https://www.senasa.gob.pe/senasa/descargasarchivos/2014/10/PROC-MED-FIT-CUAR-INT-Rev-02.pdf>
- Dougherty, D. & Cooper, D. (2002). A practical multiple model adaptive strategy for single-loop MPC. Control Engineering Practice 11, pp. 141–159.
- Emhemed et al. (2012). Mathematical Modeling of Industrial Heat Exchanger System. Applied Mechanics and Materials, Vols. 229-231 (2012), pp. 2122-2124.
- Forero, J. & Díaz, G. (2013). Desarrollo de ecuaciones de sintonía para controladores tipo PID aplicados al control de temperatura en intercambiadores de calor. ISSN on line: 2346-1446, Vol. 4, No. 7, pp. 21-28.
- García et al. (2017). Controlador PID de una celda termoeléctrica: Sintonización por medio de algoritmos genéticos con codificación real. Research in computing Science, Vol. 83, 2014 pp. 3-13.
- Guimarães et al. (2018). Automation System Applied To A Plasma Inertization Plant. Electrónica de Potencia, vol. 12, nº 1, pp. 19-25.
- Guzmán, G. (2018). Implementación de un controlador predictivo basado en modelo con restricciones sobre un microcontrolador de gama alta [Tesis de Maestría]. Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca.

- Jara et al. (2017). Instrumentación de un Refrigerador Doméstico para El Análisis del Comportamiento de las Variables de Presión y Temperatura de Operación. Revista de la Facultad de Ciencias Químicas, pp. 1-17.
- Johnson, V. (2010). Diseño e implementación de estrategias de control avanzado sobre plataforma labview para un sistema de calentamiento inductivo de fluidos [Tesis de pregrado]. Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Kartalopoulos, S. (1996). Understanding Neural Networks and Fuzzy Logic. Editorial Wiley-IEEE Press.
- Kher et al. (2000). Fuzzy control system for a multivariable process and its performance evaluation. Annual Conference of the Society of Instrument and Control – SICE, pp. 203-208.
- LabVIEW PID and Fuzzy Logic Toolkit User Manual. (2019). Recuperado de <http://www.ni.com/pdf/manuals/372192d.pdf>
- Marco Fütterer, M. (2008). Adaptive Control Of Simulated Moving Bed Plants Using Comsol's Simulink Interface. Proceedings of the COMSOL Conference 2008 Hannover.
- Márquez, R. (2014). Propuesta de mejora de las medidas fitosanitarias de cuarentena interna para alcanzar el área libre de moscas de la fruta en la región Arequipa [Tesis de maestría]. Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa.
- Mora, H. & Pariona, D. (2004). Propuesta de manual andino de tratamientos cuarentenarios. Comunidad Andina Secretaría General
- Muñoz et al. (2008). COMSOL and MATLAB Integration to Optimize Heat Exchangers Using Genetic Algorithms Technique. Proceedings of the COMSOL Conference 2008 Hannover.
- Ortega, D. & Tisza, J. (2020). Diseño de un sistema de automatización del proceso de fumigación y control de expulsión de bromuro de metilo en la agroindustria. Revista ECIPerú Volumen 17, número 1, pp. 5-11.

- Osorio, C. (2015). Extracción de Modelos Dinámicos Directamente de Datos Experimentales usando Identificación de Sistemas. MathWorks. Recuperado de <https://www.mathworks.com/videos/extracting-dynamic-models-from-experimental-data-using-system-identification-spanish-100499.html>
- Otazú, V. (2008). Otros productos usados en esterilización de sustratos. Alternativas al uso del bromuro de metilo en la producción de semilla de papa de calidad, pp. 1-6.
- Pepper, D & Heinrich, J. (2017). The Finite Element Method Basic Concepts and Applications with MATLAB, MAPLE, and COMSOL. New York, Editorial CRC Press.
- Pizano, M. (2014). Eliminación Del Bromuro de Metilo en Países en Vías de Desarrollo. Recuperado de https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/28414/7674MethylBr_SP.pdf
- Ricardo, J. & Barrios, E. (2016). Control multivariable lineal con desacoples en un intercambiador de calor. Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo, Vol. 17 (1), pp. 17-25.
- Rojas, L. (2012). Desarrollo de una cámara de temperatura controlada [Tesis de pregrado]. Instituto tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
- Schwartz, M. (1996). Tratamientos de las emisiones de Bromuro de Metilo en cámaras de fumigación [Proyecto]. Universidad de Chile, Santiago.
- SENASICA (2016). Manual de Tratamientos Fitosanitarios. México, Editorial del Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria.
- Smithyman et al. (2003). Gas fumigation method and system (United States Patent, No: US 6615534 B1). Cytec Canada Inc. <https://patents.google.com/patent/US6615534>
- Tisza, J. Ortega D. and Asencio J, (2020) "Simple Modeling Method for Complex Processes to Improve Teaching in Engineering," 2020 IEEE International Symposium on Accreditation of Engineering and Computing Education (ICACIT), pp. 1-4

- Tumbaco, A. (2015). Diseño e implementación de una planta didáctica industrial con aplicaciones para el control de nivel en un reservorio, para el laboratorio de automatización industrial [Tesis de pregrado]. Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil.
- Vaca, D. (2012). Diseño e implementación de un módulo didáctico de refrigeración basado en un refrigerador comercial [Tesis de pregrado]. Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Vargas, B. (2016). Obtención de Modelos de los Procesos Continuos Utilizando el Toolbox de Identificación de Sistemas de Matlab. Electrónica –UNMSM, vol.19, no.1, pp. 8-15.
- Vicent, I. (2014). Conjuntos difusos: aplicación al control de procesos [Tesis de pregrado]. Universitat Jaume I, Castellón.
- Vizcaíno, D. (2016). Manual de tratamientos fitosanitarios. Recuperado de <https://www.agrocalidad.gob.ec/wp-content/uploads/2020/06/resolucio%cc%81n271-manualdetratamientocuarentenario.pdf>
- What is the difference between Mamdani and Sugeno un Fuzzy Logic? – Colaboradores de Mathematics Stack Exchange. Recuperado de: <https://math.stackexchange.com/questions/148216/what-is-the-difference-between-mamdani-and-sugeno-in-fuzzy-logic>
- Yaduvir, S. (2011). Data Logging and Supervisory Control of Process Using LabVIEW. Proceeding of the 2011 IEEE Student's Technology Symposium, pp. 329-334.
- Yaduvir, S. (2011). Data Logging and Supervisory Control of Process Using LabVIEW. Proceeding of the 2011 IEEE Student's Technology Symposium, pp. 329-334.

Anexos

Anexo 1: Lista de equipos propuestos	1
Anexo 2: Reporte de prueba real	14
Anexo 3: Código completo de MATLAB	16

Anexo 1: Lista de equipos propuestos

En este anexo se listan los equipos propuestos para la planta de fumigación:

a. Tanque de Bromuro de Metilo

En el interior se encontrará el BM a presión en estado líquido y en temperatura ambiente, es importante añadir un regulador de presión en la salida del tanque a baja presión para tener mayor exactitud en la dosificación. Es importante que todo tanque de BM a usar contenga Cloropicrina para detectar fugas del gas sin necesidad de equipos como indica la Figura.

Figura del tanque y su representación simbólica.



Etiqueta de tanque de BM (simplificado).

PRECAUCIONES Y ADVERTENCIAS

Grupo químico: El Bromuro de Metilo pertenece al grupo de los organobromados y la Cloropicrina pertenece al grupo químico de los organoclorados.

- Conservar y comercializar este producto sólo en sus envases originales.
- Transportar y guardar este envase bien cerrado, bajo llave, en recinto que no reciba sol ni humedad

MUY TOXICO A ANIMALES, AVES, ABEJAS, PECES Y FAUNA MARINA. MANTENER FUERA DEL ALCANCE DE LOS NIÑOS Y DE PERSONAS INEXPERTAS.

EN CASO DE INTOXICACION MOSTRAR LA ETIQUETA AL PERSONAL DE SALUD.

UNA VEZ VACIOS LOS ENVASES, INUTILIZARLOS Y ELIMINARLOS DE ACUERDO CON INSTRUCCIONES DE LAS AUTORIDADES COMPETENTES.

“NO TRANSPORTAR NI ALMACENAR CON ALIMENTOS, PRODUCTOS VEGETALES O CUALESQUIERA OTROS QUE ESTÉN DESTINADOS AL USO O CONSUMO HUMANO O ANIMAL”.

NO LAVAR LOS ENVASES O EQUIPOS DE APLICACIÓN EN LAGOS, RIOS Y OTRAS FUENTES DE AGUA.

NO REINGRESAR AL AREA TRATADA ANTES DEL PERIODO INDICADO DE REINGRESO.

ESTE PRODUCTO DAÑA LA CAPA DE OZONO.

TELÉFONOS DE EMERGENCIA
CITUC: INTOXICACION: 2-2635 38 00
RITA-CHILE: 2-2661 94 14/ 2-2777 19 94
SOC. DE FUMIGACIONES LTDA. 33-2 33 36 00

Bromuro De Metilo
50% GA

Fumigante:
Insecticida, Nematicida,
Fungicida, Herbicida
Gas - GA

Bromuro de Metilo 50% GA es un fumigante de amplia acción, para uso exclusivo del Sector Agrícola

COMPOSICIÓN

Bromuro de Metilo*	50 % p/p (500 g/kg)
Cloropicrina**	50 % p/p (500 g/kg)

*Bromometano
** Tricloronitrometano



MUY TOXICO

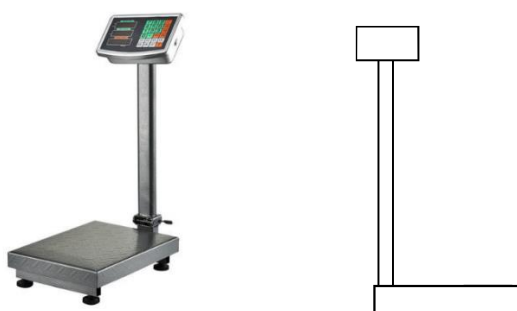


Nota. Adaptado de etiqueta del cilindro, BROMURO DE METILO 50% GA, studylib, (<https://studylib.es/doc/2862547/bromuro-de-metilo-50%25-ga>)

b. Balanza para el Tanque de BM

Esta balanza permitirá obtener la cantidad de BM que está ingresando a la cámara mediante la diferencia de peso del tanque. Deberá tener una resolución mínima de 100 g, además de un tiempo de respuesta rápido y salida de datos vía serial como en la Figura. Lo que permitiría la comunicación con el dispositivo controlador.

Figura de la balanza y su representación simbólica.



Características técnicas de balanza (resumen).

Características		Datos técnicos				
<ul style="list-style-type: none"> • Estándar industrial resistente, idónea para uso en entornos industriales duros • 1 Plataforma: plato de pesaje acero inoxidable, base de acero barnizado, célula de pesaje de aluminio recubierta de silicona, protección contra el polvo y el agua IP65 • Pie de mesa incl. soporte de pared para indicador, de serie • Capota protectora de trabajo incluida en el alcance de suministro 		<ul style="list-style-type: none"> • Pantalla LCD retroiluminada grande, altura de dígitos 52 mm • Dimensiones del plato de pesaje, acero inoxidable A×P×A A 230×230×110 mm, B 300×240×110 mm C 400×300×128 mm, D 500×400×130 mm E 650×500×142 mm, F 800×600×200 mm • Dimensiones del indicador A×P×A 230×230×360 mm • Longitud del cable del indicador aprox. 3 m • Temperatura ambiente admisible -10 °C / 40 °C 				
ESTÁNDAR		FABRICA				
Modelo	Campo de pesaje [Max] kg	Lectura [d] g	Valor de verificación [e] g	Carga mín. [Min] g	Peso neto aprox. kg	Plato de pesaje
KERN						
IFB 3K-4	3	0,1	-	-	6	A
IFB 6K-4S	6	0,2	-	-	6	A
IFB 6K-4	6	0,2	-	-	6	B
IFB 10K-4	15	0,5	-	-	6	B
IFB 10K-4L	15	0,5	-	-	10	C
IFB 30K-3	30	1	-	-	10	C
IFB 60K-3	60	2	-	-	10	C
IFB 60K-3L	60	2	-	-	14	D

Nota. Adaptado de la ficha técnica de balanzas de plataforma, KERN, 2019.

c. Electro-Válvula

Este equipo controlará la salida del BM hacia la cámara, funciona principalmente al inicio de la dosificación y cierra cuando el controlador detecte que el tanque de BM se encuentre en el peso final calculado. Para ello se necesitaría una electro-válvula normalmente cerrada accionada por un solenoide de 220 voltios alternos con las características de la Figura.

Figura de la electro-válvula y su representación simbólica.



Características técnicas de electro-válvula (resumen).

Construcción

Partes de la válvula en contacto con el fluido		
Cuerpo	Latón	Acero inoxidable 316
Sellos y disco	NBR y PA	
Tubo del núcleo	Acero inoxidable 305	
Núcleo móvil y núcleo fijo	Acero inoxidable 430F	
Resortes	Acero inoxidable 302	
Anillo de sombra	Cobre	Plata
Pistón	PA	

Características Eléctricas

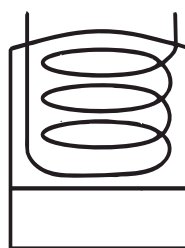
Clase de aislamiento, bobina estándar	Potencia nominal y consumo de energía				Número de parte bobina de repuesto					
	DC (watts)	AC			Uso general		A prueba de explosión (EF)		A prueba de explosión (EV)	
		(watts)	Sostenido (VA)	Arranque (VA)	AC	DC	AC	DC	AC	DC
F	11.6	10.1	25	50	238610	238710	238614	238714	274614	274714
Voltajes estándar: 24, 120, 240, 480 volts AC, 60 hz (o 110, 220, volts AC, 50 hz); 6, 12, 24, 120, 240 volts DC. Al ordenar la válvula, especifique el voltaje de operación. También se fabrican en voltajes especiales.										

Nota. Adaptado de la ficha técnica de válvulas solenoides, RedHat.

d. Vaporizador

Este es un intercambiador de calor que se encargará de elevar la temperatura del BM hasta los 80° Celsius. El serpentín en su interior tiene el largo suficiente para asegurar que se caliente todo el BM que ingresa en su interior. Para calentar el agua de su interior se puede usar combustión o electricidad, lo que convertiría al vaporizador en un equipo controlable.

Figura de vaporizador y su representación simbólica.



Parte de ficha técnica de un vaporizador comercial.



	Volumen	Volumen equivalente ¹	Caudal	Pérdida de carga	Potencia
IHI-800	800 L	2000 L	7,9 m3/h	2,4 m.c.a.	300 kW
Depósito acumulador	2000 L	2000 L	---	---	---
Intercambiador de placas	---	---	5,7 m3/h	5,1 m.c.a.	300 kW

Nota. Adaptado de la ficha técnica del intercambiador IHI-800, Hydronik, (<https://hydronik.es/ficha-tecnica-ih-800/>)

e. Termómetros en el Vaporizador y dentro de la cámara

Estos sensores informarán al controlador la temperatura del vaporizador, la temperatura del interior de la cámara y de las frutas que están siendo tratadas. Usualmente se usa termocupla tipo K o un PT100 con un dispositivo transmisor con una salida compatible con el dispositivo controlador (habitualmente 0-20ma) como en la Figura.

Sonda termocupla (izquierda) y trasmisor de temperatura (derecha).



Parte de ficha técnica de un transmisor de temperatura comercial.

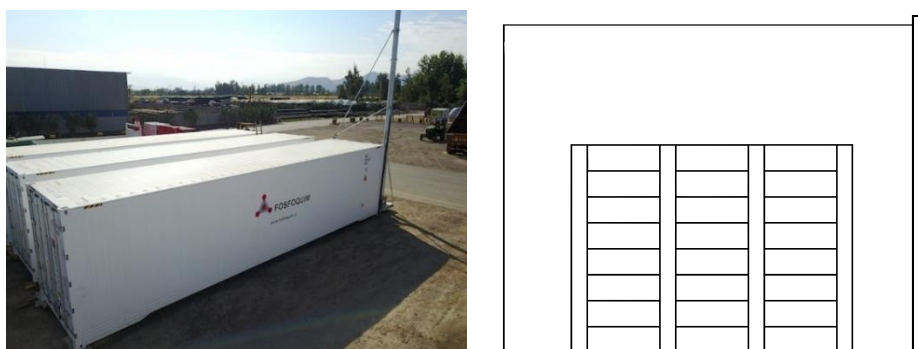


Nota. Adaptado de la ficha técnica del trasmisor inteligente de temperatura, ATO, (<https://www.ato.com/smart-temperature-transmitter>)

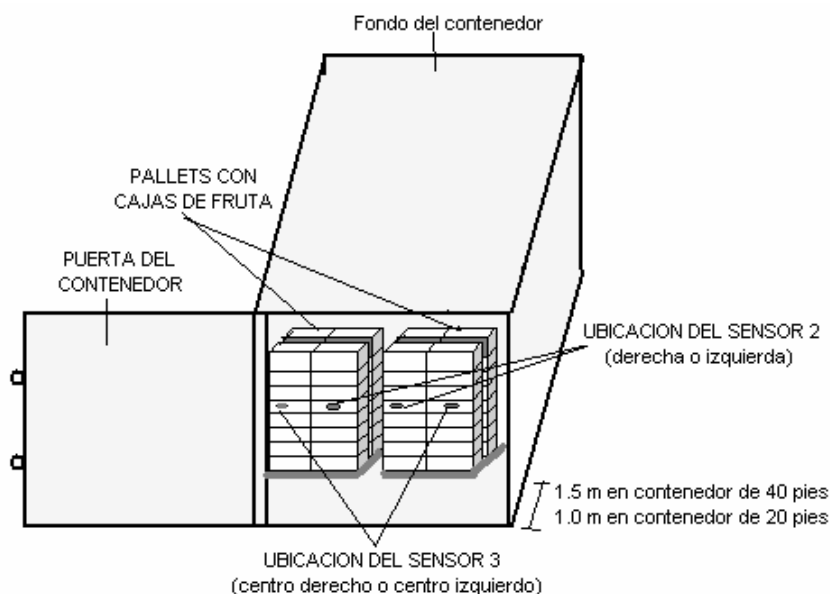
f. Cámara de Fumigación

Debe tener el tamaño suficiente para que el cargamento de fruta sea introducido y extraído sin inconvenientes luego de su fumigación. Debe quedar hermético durante todo el proceso de fumigación para evitar las fugas del aire con el gas de Bromuro de Metilo, además que debe seguir las indicaciones de la Figura.

Figura de cámara de fumigación y su representación simbólica.



Indicaciones de colocación de fruta dentro de cámara.

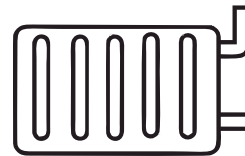


Nota. Adaptado de "Propuesta de manual andino de tratamientos cuarentenarios", por H. Mora, 2004, Comunidad Andina Secretaría General.

g. Refrigerador

Este equipo disminuirá la temperatura dentro de la cámara durante la fumigación para evitar la descomposición de la fruta, hasta los 21 grados Celsius indicados por Diaz (2014). Se usará un refrigerador termoeléctrico de la Figura del sistema de refrigeración con las características presentadas en la Figura de la ficha técnica.

Figura del sistema de refrigeración y su representación simbólica.

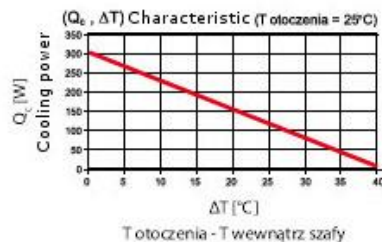


Parte de ficha técnica de un Acondicionador de aire termoeléctrico.

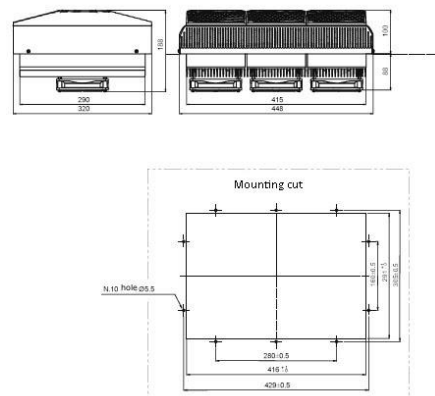
Technical data

• Type:	TCU 300
• Nominal cooling power:	300 W @ $\Delta T = 0$
• Power supply:	24 V DC
• Power supply range:	10V DC - 27,6 V DC
• Nominal current consumption:	13.4 A
• Max current consumption:	16.2 A
• Operation temperature range:	- 20°C - + 70°C
• Weight:	18 Kg

Characteristic



Dimensions [mm]



Additional information

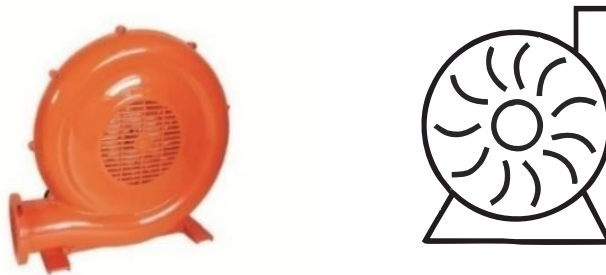
- standard colour: RAL 7032 (other colours for order),
- maximum power supply deviation: 5%

Nota. Adaptado de la ficha técnica del aire acondicionado termoeléctrico con Peltier, DACPOL, (<https://www.dacpol.eu/en/tcu-300/product/tcu-300>)

h. Bomba de recirculación y extracción

La bomba de recirculación mantiene uniforme la concentración de BM disuelto en el aire del interior de la cámara de fumigación. Mientras que la bomba de extracción se encarga de generar la presión negativa para la extracción del aire con BM del interior de la cámara. Cuando la servo-válvula de salida este cerrada la toma anexada de aire evitará que la bomba se dañe, además, el aire que ingrese servirá para bajar la concentración del BM en la salida. Las características físicas serán similares a la bomba de recirculación siendo un motor eléctrico con paletas o una bomba centrífuga de características de la Figura Parte de la ficha técnica de sopladores de aire de uso industrial, se controlará su velocidad mediante un variador de velocidad.

Figura de la bomba de aire (soplador) y su representación simbólica.



Parte de ficha técnica de sopladores de aire de uso industrial.



PL Centrífugos para atmósferas corrosivas o explosivas

PL/E 10, 15, 20, 25, 30 y 35

Brindan una gran eficiencia caudal-presión, en atmósferas donde el alto grado de sustancias corrosivas o explosivas disueltas en el ambiente, hacen imposible la colocación de extractores convencionales.

APLICACIONES

 LABORATORIOS QUÍMICOS	 INDUSTRIA FARMACÉUTICA	 INDUSTRIA EXTRACTIVA	 PROCESOS ALIMENTICIOS	 INDUSTRIA ELECTRÓNICA
 ALMACENES DE REACTIVOS	 MANEJO DE PINTURAS Y SOLVENTES	 QUÍMICA AGROPECUARIA	 INDUSTRIA PETROLÍUMICA	 TRATAMIENTOS DE AGUA

ACCESORIOS

CARACTERÍSTICAS

- Conjunto carcasa en una sola pieza fabricada en polipropileno.
- Rodete tipo álabes curvos adelantados.
- Opción de motor a prueba de explosión clase I grupo D.

Nota. Adaptado de ficha técnica de ventiladores industriales, S&P, México, (<https://www.solerpalau.mx/>).

i. Sensor de concentración de BM al interior de la cámara

Se tomarán lecturas en el interior de la cámara para comprobar la dispersión de la concentración del BM. Estos sensores suelen ser de infrarrojo no disperso según Figura del equipo comercial de monitoreo de BM.

Dos presentaciones del equipo de monitoreo de concentración de BM.



Parte de la ficha técnica de un equipo comercial de monitoreo de BM.

Gas Specifications	
Product Type	Methyl Bromide (CH ₃ Br)
Coverage	4 zones standard (8,12,16 zone options)
Measuring Range	0-10,000ppm (1%) Options
Monitoring Distance	500ft./150meters (sample + exhaust)
Detector Type	NDIR (Non-Dispersive Infrared)
Accuracy	+/- 1% (50-3000ppm) +/- 3% (full scale)
Interface	
Front Panel	3 Indicator lights
Data Logging & Web Portal Upload	<ul style="list-style-type: none">• Advanced microprocessor command and control• Data Storage with continuous data transfer to Spectros Instruments Web Portal and archival option of 1 million record storage
Displays	(1) Color touchscreen web interface; (2) Monochrome LCD monitor
Sampling Frequency	User selectable for automatic on/off collection of data and storage onboard and/or on secured web portal
Electronics Specifications	
Response Time/Flow Rate	Dependent on gas-sample line length; 0.25" OD x 0.17" ID tubing
Power Safety Mode	Fully automatic system reset; all programmed parameters retained
AC Power	100 - 240 VAC;50/60Hz
Power Consumption	20 Watts

Nota. Adaptado de la ficha técnica de equipo monitor de BM, SPECTROS INSTRUMENTS, 2019, (<https://www.spectrosinstruments.com>).

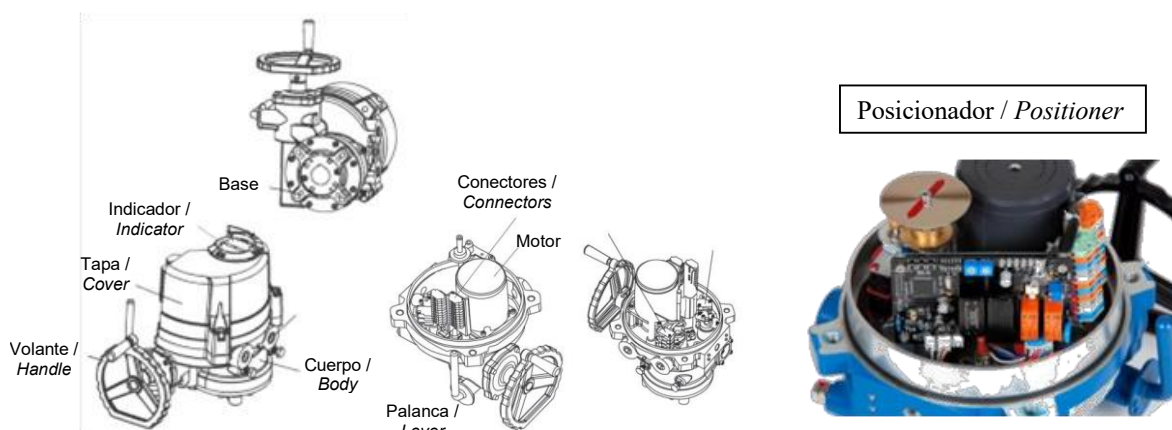
j. Servo-válvulas de entrada de Aire y de salida de Aire con BM

La válvula de entrada de aire se apertura durante la extracción del aire con BM para evitar que la cámara se deforme debido a la presión negativa, entonces su apertura debe estar condicionada a que en el interior de la cámara la presión sea menor a la presión atmosférica. Por ello es nombrada como válvula de contraflujo. En cambio, la válvula de salida de aire con BM debe controlar el ángulo de apertura para evitar que la concentración medida en la chimenea sea mayor a las 500 ppm. Ambas válvulas compartirán características físicas (Figura de la Ficha técnica de una servo-válvula comercial), solo se diferenciarán en su aplicación.

Figura de servo-válvula y su representación simbólica.



Parte de la ficha técnica de una servo-válvula comercial.



Nota. Adaptado de la ficha técnica de Actuadores Eléctricos Fracción de vuelta, GENE BRE, 2021, (<https://www.genebre.es>).

k. Bomba de expulsión

Esta bomba impulsará el aire desde el nivel del suelo hasta el final de la chimenea, además de hacer que el aire con BM llegue a más altura facilitando su degradación en la atmósfera.

Figura de Bomba de expulsión y su representación simbólica.



Parte de la ficha técnica de un soplador de aire para chimeneas.



CXW Centrifugos de álabes radiales

CXW310, 350, 400, 450 y 455

Disponibles en cinco capacidades de potencia y prestaciones de caudal dentro de una construcción robusta que le permite adaptarse a cualquier instalación o maquinaria de transporte neumático.

APLICACIONES



TRANSPORTE
NEUMÁTICO DE VIRUTAS,
POLVOS, GRANOS



IMPULSIÓN DE
AIRE EN
QUEMADORES



AIREACIÓN DE
SEMILLAS Y
MATERIALES



PROCESOS
INDUSTRIALES
DIVERSOS

ACCESORIOS



Nota. Adaptado de ficha técnica de ventiladores industriales, S&P, México, (<https://www.solerpalau.mx/>).

I. Sensor de concentración de BM en la salida de la chimenea

Este equipo servirá para cumplir con la reglamentación de los 500 pm de concentración en la expulsión del BM al medio ambiente, se estudiará el método más eficiente de medición: según las características de la boquilla y la distancia con respecto al centro de la chimenea, debido a que la salida de aire no es homogénea porque es un flujo turbulento. La diferencia de este equipo con el usado para monitorear la concentración en el interior de la cámara de fumigación es que este sensor debe ser para bajas concentraciones, con unidades en el rango de las partes por millón (ppm).

Dos presentaciones del equipo de monitoreo de concentración de BM.



Parte de la ficha técnica del equipo de monitoreo de concentración de BM.

UNIPHOS FUMISENSE TRI-GAS MONITOR

The UNIPHOS FUMISENSE is a microprocessor based Tri-Gas monitor for field determination of fumigation concentrations of Phosphine and Methyl Bromide or Sulfuryl Fluoride (Vikane / ProFume). It is very important to determine the concentration of the fumigant during the fumigation process. There can be a loss of fumigant due to absorption or leakage and steps will have to be taken to ensure fumigation is adequate. It may mean resealing the enclosure, adding more fumigant or increasing the exposure period. To ensure the efficacy of fumigation it is essential to monitor the PH_3 / MBr / SO_2F_2 concentration within the fumigation cover.

The FumiSense is an accurate and durable instrument developed specifically for fumigation monitoring. No single instrument can measure the fumigants at both parts per million-level and percentage level required for different applications.

FEATURES

- + Ranges: PH_3 : 0 – 2000 ppm
 MBr : 0-200 g/m^3
 SO_2F_2 : 0-100 g/m^3
- + Individual pumps and gas paths for PH_3 & $\text{MBr}/\text{SO}_2\text{F}_2$
- + Advanced Microprocessor based instrument
- + Datalogging capability with date / time / gas value
- + Logged data can be conveniently downloaded to a computer using our FumiSoft data-downloading and analysis software
- + Portable printer option for on-the-spot report printing

Nota. Adaptado de ficha técnica de equipamiento de fumigación UNIPHOS, UNIPHOS, India, (<http://www.uniphos-she.com/>).

Anexo 2: Reporte de prueba real



ACTA DE TRATAMIENTO N°14

DATOS GENERALES

Cámara N°: Cámara de Fumigación N° 4
Ubicación: Puesto de Control - Alto Salaverry
Fecha: 15/12/2017

CLIENTE

RUC/DNI: [REDACTED]
Nombre/Razón Social: [REDACTED]

PRODUCTOS

Código Fruta	Nombre común	Kg
FR1000	VARIOS	[REDACTED]

DETALLE DE PRODUCTOS PRUEBA EN VACIO

PRUEBA DE EQUIPOS

Fecha: 15/12/2017

Calef	Recir	Vcomp	Dil	VCam	Vaire	Vchim	VBM	Extrac	Da1Op	Da1Cl	Da2Op	Da2Cl	Baliza	Spect	Unip
OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK

Resultado: APROBADO

PRUEBA DE HERMETICIDAD

Fecha: 15/12/2017

Hora de inicio: 09:46 a.m.

Presión inicial (mmH2O)	Presión final (mmH2O)	Tiempo (s)
50	47	121

Resultado: APROBADO

Referencia Rango: Presión Final > 5mmH2O

PARÁMETROS INICIALES

Temp. Pulpa Puerta (°C)	Temp. Pulpa Medio (°C)	Temp. Pulpa Fondo (°C)	Temp. Fruta Superficie (°C)	Temp. Cámara (°C)	Humedad relativa (%)
21.50	21.70	21.40	21.40	21.40	68.60

DATOS DEL PROCESO DE FUMIGACIÓN

Dosis de bromuro de metilo (g/m3): 10.00

Bromuro de metilo aplicado(Kg): 0.45

Peso BM inicial Balanza	Peso BM final Balanza
97.23	96.78

Tiempo de aplicación (en horas): 1.0

Hora de inicio de fumigación: 09:57 a.m.

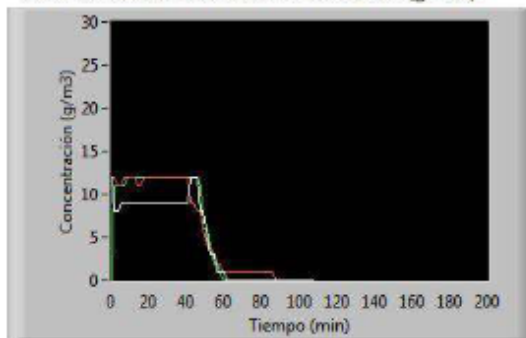
Hora de fin de fumigación: 11:04 a.m.

Hora de inicio de extracción: 11:06 a.m.

Hora de fin de extracción: 12:44 p.m.

Concentración final de BM en cámara: 0

CONCENTRACION BM EN CAMARA (g/m³)



SUPERVISOR	OPERARIO

Anexo 3: Código completo de MATLAB

```
clear all
close all

%% Modelo del Sistema
T=1.4065;
%Tiempo de muestreo
num=[0,0.001290193243111,-0.001278667276724];
%Numerador
den=[1,-1.051388942255890,-0.879674909135966,0.931064750486687];
%Denominador
ret=0;      %18 pasos
%Retardo del sistema
gp=tf(num,den,T);
%Funcion de transferencia
gp.outputdelay=ret;
%Se aplica el restardo
[B,A]=tfdata(gp,'v');
%Divide Numerador en B y denominador en A
d=18;
%Atraso de tiempo discreto
%% Define los ajustes del Control MPC
P=100;          %Horizonte de prediccion
N=100;          %Horizonte de control
lamda=1.6;      %Ponderación de seguimiento de referencia
delta=1*eye(P); %Matriz de ponderacion del error

%% Vector de coeficientes Gi
gi=step(gp);      %Guardo la respuesta al escalón
Nm=length(gi)-1;  %Valor donde trunco la sumatoria para la
predicción del modelo completo "M"

%% Calculo de la Matriz G
G=zeros(P,N);
G(:,1)=gi(1+d:P+d); %lleno la primera columna con los valores de
la respuesta al escalon hasta el horizonte de
%prediccion, quitando los retardos que pueda tener el sistema
```

```

for i=2:N
    for j=2:P
        G(j,i)=G(j-1,i-1);
    end
end

%% calculo de matriz Mn
Mn=inv(G'*delta*G + lamda*eye(N))*G'*delta;

Kl=Mn(1,:); %Calculo de controlador Kl (Primera fila de Mn)

%% Loop de Control
% inicializando parametros
nit=1500;
inc_u=0;
u_ant(1:25) = 0;
u(1:25) = 0; ym(1:25) = 0; r(1:25) = 0;
% Referencia
r(1:142) = 0; r(143:500) = 70;r(501:nit)=70;
do(1:710)= 0;do(711:720) = -0.1;do(721:nit) = 0;

duf=zeros(1,Nm); %Accion de control libre (Delta o libre)

w=0; %Termino para colocar referencias futuras

for k=24:nit-w
    % calcula salida de proceso
    ym(k)=B(3)*u(k-d)+B(4)*u(k-1-d)-A(2)*ym(k-1)-A(3)*ym(k-2)-
A(4)*ym(k-3)+do(k);
    %% CALCULO DE LA RESPUESTA LIBRE
    f=zeros(1,P); % Vetor f (free) Respuesta Libre
    for kk=1:P
        % monta un vector con las gkk+i - gkk
        for i=1:Nm-P
            vect_g(i)=gi(kk+i)-gi(i);
        end
        for i=Nm-P+1:Nm

```

```

        vect_g(i)=gi(Nm)-gi(i);
    end
    f(kk)=ym(k)+vect_g*duf';
    %Calculo de respuesta libre
    %f= Vector de respuesta libre con tamaño P
    %duf= (du libre) es la u correspondiente a la respuesta libre
    %ese vector siempre esta en el pasado. Es cero en el futuro
    %y vale unicamente en el pasado
    %ym= Salida de la planta

end

    %Calculo de la ley de control
    %Coloca el w=P, arriba antes de entrar al for, y analiza lo
que sucede
    inc_u=K1*(r(k+w)-f');

    if k==1
        u(k)=inc_u;
    else
        u(k)=u(k-1)+ inc_u;
    end
    if u(k) >=1024
        u(k) = 1024;
    end
    if u(k)<= 0
        u(k) =0;
    end

    % actualiza vector de control
    aux_u=u_ant(1:length(B)-1);
    u_ant=[u(k) aux_u];
    aux_2=duf(1:Nm-1);
    duf=[inc_u aux_2];

end

```

```

nm=nit;
t = 0:T:(nit-1)*T;
figure
subplot(2,1,1),plot(t(1:nit-w),r(1:nit-w),'--k',t(1:nit-w),ym,'-
r','Linewidth',3)
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Salida');
legend('y_r','y','Location','SouthEast')
grid on;
%figure
hold
subplot(2,1,2),plot(t(1:nit-w),u,'b','Linewidth',3)
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Señal de Control');
legend('u')
grid on;

```