

# Universidad Nacional de Ingeniería

## Facultad de Ingeniería Mecánica



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

### **Diseño de un sistema de control automático para mejorar la dosificación de una máquina envasadora, basado en un controlador difuso en una línea de producción de pasta lavavajillas.**

Para obtener el título de Ingeniero en Ciencias con mención en Ingeniería

Mecatrónica.

Elaborado por

Alexander Castro Martinez

 [0009-0001-7689-3234](https://orcid.org/0009-0001-7689-3234)

Asesor

Mag. Ing. José Fortunato Oviden Martínez

 [0000-0003-2643-327X](https://orcid.org/0000-0003-2643-327X)

LIMA – PERÚ

2023

***Dedico este trabajo***

*Dedico este trabajo a mi mamá, Nelly O. Martínez Quispe; a mi papá,  
Ricardo F. Castro Inga y a mi hermano, Ricardo V. Castro Martínez.*

## RESUMEN

En la industria del consumo masivo, las empresas de manufactura y envasado llevan controles de calidad a través de distintas etapas productivas, con la finalidad de cumplir con las especificaciones técnicas de cada producto producido, una de estas especificaciones es la cantidad de producto, la cual se establece en la Norma Metrológica Peruana NMP 002:2018. Para cumplir con estas especificaciones, las empresas de manufactura implementan sistemas automatizados en sus procesos para cumplir con los rangos permisibles de peso dentro del marco normativo nacional o internacional.

La presente investigación plantea como objetivo mejorar la dosificación de una máquina envasadora en una línea de producción de pasta en crema lavavajillas basado en un controlador difuso. Para ello, como primer paso se recopiló los pesos de los pots con la finalidad de tener una línea base. Posterior a ello, se analizó los datos de las principales variables que están directamente relacionadas con una correcta dosificación de producto. Para finalmente, diseñar un algoritmo de control que permita mantener un control del producto envasado, para ello se propuso y comparó un controlador PID (proporcional, integral y derivativo) frente a un controlador difuso. Concluyendo finalmente que el controlador difuso presentó un mejor desempeño para los distintos formatos de producción que se producen en la máquina envasadora.

Palabras clave: Algoritmo de control, máquina envasadora, dosificación, pasta en crema lavavajillas.

## **ABSTRACT**

In the consumer industry, the manufacture and packing companies have quality controls through different production stages to achieve the technical specifications of all the products that they produce, one of these specifications is the quantity of product, which is established in the Peruvian Metrologic Standard NMP 002:2018. With the goal of achieving this specification, the manufacture companies implement automated systems in their process, all of this to reach with the allowable weight ranges inside the national or international regulatory framework.

Accordingly, this research has the objective to improve the dosage of a packaging machine in a production line of dishwashing cream paste, this based on a fuzzy controller. For this, as a first step, the data of the pot weights is collected with the goal of having a baseline. After that, the data of the main variables that are directly related to a correct dosage of the product will be analyzed.

Finally, to design a control algorithm that allows maintaining control of the packaged product, for this, a PID controller (proportional, integral and derivative) was proposed and compared against a fuzzy controller. To finally conclude that the fuzzy controller presented a better performance for the different production formats that are produced in the package machine.

Keywords: Control algorithm, packaging machine, dosage, dishwashing cream paste.

## ÍNDICE

RESUMEN .....	II
ABSTRACT .....	III
ÍNDICE .....	V
PRÓLOGO .....	1
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN .....	3
1.1. Generalidades .....	3
1.2. Antecedentes investigativos .....	9
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL .....	15
2.1. Marco Teórico .....	15
2.2. Marco conceptual .....	34
CAPÍTULO III HIPÓTESIS Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES ..	35
3.1. Hipótesis general .....	35
3.2. Operacionalización de las variables .....	35
CAPÍTULO IV METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....	37
4.1. Tipo y diseño de la investigación .....	37
4.2. Unidad de análisis .....	39
4.3. Matriz de consistencia .....	40
CAPÍTULO V DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN .....	41
5.1. Recopilación de data .....	42
5.2. Procesamiento de data .....	51
5.3. Diseño del algoritmo de control .....	58

CAPÍTULO VI	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	117
6.1.	Correlación entre las variables de medición.....	117
6.2.	Modelado matemático del proceso.....	120
6.3.	Resultados del controlador PID .....	121
6.4.	Resultados del controlador difuso .....	123
6.5.	Comparación entre los controladores diseñados.....	125
6.6.	Contrastación de la hipótesis .....	128
CONCLUSIONES	.....	131
RECOMENDACIONES	.....	134
BIBLIOGRAFÍA	.....	136
ANEXOS	.....	140

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> Diagrama P&ID vs. Diagrama de flujo.....	16
<b>Figura 2.2</b> Bomba de engranajes externa (izquierda) y bomba de engranajes interna (derecha).....	22
<b>Figura 2.3</b> Función de pertenencia booleana (a) y función de pertenencia difusa (b).....	26
<b>Figura 2.4</b> Función de pertenencia de la variable altura sobre los conjuntos difusos bajo, medio y alto. ....	27
<b>Figura 2.5</b> Función de pertenencia de variable voltaje.....	29
<b>Figura 2.6</b> Unión de funciones de pertenencia para la variable Z. ....	31
<b>Figura 2.7</b> Selección de la salida difusa $Z^*$ por el método de pertenencia máxima. ....	32
<b>Figura 2.8</b> Selección de la salida difusa $Z^*$ por el método del centroide. ...	33
<b>Figura 5.1</b> Representación gráfica del proceso de manufactura de pasta lavavajillas.....	44
<b>Figura 5.2</b> Diagrama P&ID de la zona de envasado. ....	46
<b>Figura 5.3</b> Línea 1 de llenado de pasta en crema lavavajillas.....	47
<b>Figura 5.4</b> Transmisor de peso de la línea de llenado 1. ....	49
<b>Figura 5.5</b> Valor del peso de la tolva envasadora durante el periodo de medición. ....	51
<b>Figura 5.6</b> Tendencia del peso de la temperatura de envasado durante el periodo de medición.....	52
<b>Figura 5.7</b> Tendencia de pesos de los potes en el dosificador 1.....	53

<b>Figura 5.8</b> tendencia de pesos de los potes en el dosificador 2.....	54
<b>Figura 5.9</b> Tendencia de pesos de los potes en el dosificador 3.....	54
<b>Figura 5.10</b> Tendencia de pesos de los potes en el dosificador 4.....	55
<b>Figura 5.11</b> Representación gráfica del proceso de envasado. ....	59
<b>Figura 5.12</b> Diseño del modelo matemático del proceso en el software simulink.....	64
<b>Figura 5.13</b> Respuesta al escalón del modelo desarrollado en simulink...	65
<b>Figura 5.14</b> Modelo con retroalimentación y control proporcional $K_{cr}$ .....	66
<b>Figura 5.15</b> Respuesta del sistema ante un $K_{cr} = 1$ .....	67
<b>Figura 5.16</b> Respuesta del sistema ante un $K_{cr} = 2.3$ .....	67
<b>Figura 5.17</b> Respuesta del sistema ante un $K_{cr} = 2.5$ .....	68
<b>Figura 5.18</b> Respuesta del sistema ante un $K_{cr} = 10$ .....	68
<b>Figura 5.19</b> .....	69
<b>Figura 5.20</b> Cálculo del periodo de la respuesta oscilatoria.....	70
<b>Figura 5.21</b> Representación de un controlador PID en el software simulink. .....	71
<b>Figura 5.22</b> Respuesta del sistema ante un controlador PID.....	72
<b>Figura 5.23</b> Respuesta del sistema ante condiciones reales de proceso...	74
<b>Figura 5.24</b> Respuesta del sistema con el valor de $T_i$ modificado. ....	76
<b>Figura 5.25</b> Modelado del sistema con controlador PID y $Q_s=0.75$ Kg/s...	77
<b>Figura 5.26</b> <i>Respuesta del controlador PID para el valor de <math>Q_s = 0.75</math> Kg/s.</i> .....	78
<b>Figura 5.27</b> Modelado del sistema con controlador PID y $Q_s=0.31$ Kg/s...	79

<b>Figura 5.28</b> Respuesta del controlador PID para el valor de $Q_s = 0.31$ Kg/s. .....	80
<b>Figura 5.29</b> Modelado del sistema con controlador PID y $Q_s$ fluctuante. ...	81
<b>Figura 5.30</b> Respuesta del controlador PID para el valor de $Q_s$ fluctuante.	82
<b>Figura 5.31</b> Representación gráfica de la variable $Q_s$ a lo largo de la simulación. ....	83
<b>Figura 5.32</b> Detalle de valores de respuesta y tiempo en la respuesta del controlador PID. ....	84
<b>Figura 5.33</b> Diagrama de bloques del controlador difuso. ....	86
<b>Figura 5.34</b> Diagrama de bloques de proceso con $K_p=0.002$ , $K_d=1$ y $K_u=0.01$ . .....	91
<b>Figura 5.35</b> Representación gráfica de las funciones de pertenencia de la variable error $[-1 +1]$ . ....	94
<b>Figura 5.36</b> Representación gráfica de las funciones de pertenencia de la variable error $[-0.06 +0.06]$ . ....	95
<b>Figura 5.37</b> Representación gráfica de las funciones de pertenencia de la variable derivada del error. ....	96
<b>Figura 5.38</b> Representación gráfica de las funciones de pertenencia de la razón de cambio de la frecuencia. ....	98
<b>Figura 5.39</b> Registro de reglas difusas en software simulink. ....	104
<b>Figura 5.40</b> Respuesta de controlador difuso aplicando el método de mandani. ....	106
<b>Figura 5.41</b> Respuesta del sistema utilizando un controlador difuso. ....	107

<b>Figura 5.42</b> Modelado del sistema con controlador difuso y $Q_s=0.75$ Kg/s. .....	108
<b>Figura 5.43</b> Respuesta del controlador difuso para el valor de $Q_s = 0.75$ Kg/s. .....	109
<b>Figura 5.44</b> Modelado del sistema con controlador difuso y $Q_s=0.31$ Kg/s. .....	110
<b>Figura 5.45</b> Respuesta del controlador difuso para el valor de $Q_s = 0.31$ Kg/s. .....	111
<b>Figura 5.46</b> Modelado del sistema con controlador difuso y $Q_s$ fluctuante. .....	112
<b>Figura 5.47</b> Respuesta del controlador difuso para el valor de $Q_s$ fluctuante. .....	113
<b>Figura 5.48</b> Representación gráfica de la variable $Q_s$ a lo largo de la simulación.....	114
<b>Figura 5.49</b> Detalle de valores de respuesta y tiempo en la respuesta del controlador difuso. ....	115
<b>Figura 6.1</b> Comparación de la respuesta del controlador difuso y el controlador PID.....	125

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1</b> Cantidad de reclamos durante el periodo enero a marzo 2023. ...	5
<b>Tabla 1.2</b> Niveles de tolerancia en cantidad de producto establecido por el INACAL.....	7
<b>Tabla 3.1</b> Variables e indicadores de la presente investigación.....	36
<b>Tabla 4.1</b> Matriz de consistencia de la presente investigación.....	40
<b>Tabla 5.1</b> Velocidad de producción de los formatos producidos por la máquina envasadora. ....	48
<b>Tabla 5.2</b> Variables críticas dentro del proceso de producción. ....	50
<b>Tabla 5.3</b> Niveles de correlación entre variables medidas. ....	56
<b>Tabla 5.4</b> Listado de variables involucradas en el modelamiento matemático. .....	59
<b>Tabla 5.5</b> Valores numéricos del proceso de envasado.....	62
<b>Tabla 5.6</b> Valores de $K_p$ , $T_i$ y $T_d$ de un controlador PID. ....	70
<b>Tabla 5.7</b> Niveles de sobreimpulso obtenidos al realizar cambios en la ganancia integral $T_i$ .....	75
<b>Tabla 5.8</b> Valores mínimos y máximos del error y la derivada del error. ....	90
<b>Tabla 5.9</b> Definición de funciones de pertenencia del error.....	93
<b>Tabla 5.10</b> Definición de funciones de pertenencia de la derivada del error. .....	96

<b>Tabla 5.11</b> Funciones de pertenencia de la razón de cambio de la frecuencia. .....	97
<b>Tabla 6.1</b> Niveles de correlación entre variables medidas. ....	118
<b>Tabla 6.2</b> Valores reales de las variables asociadas al modelamiento matemático. ....	120
<b>Tabla 6.3</b> Resultados de la respuesta del controlador PID optimizado. ...	121
<b>Tabla 6.4</b> Resultados de la respuesta del controlador difuso. ....	123
<b>Tabla 6.5</b> Comparación de los indicadores de desempeño de los controladores difuso y PID. ....	126

## PRÓLOGO

La presente investigación se ha estructurado en 6 capítulos, los cuales describen el proceso de recopilación, análisis y desarrollo de la investigación con el objetivo de brindar el diseño de un sistema de control para mejorar la dosificación de una máquina envasadora de pasta en crema lavavajillas.

En el capítulo 1, se describe la naturaleza de la realidad problemática, la cual se basó en una normativa legal nacional e internacional, la cual plantea como objetivo de estudio resolver la problemática de la dosificación de producto en potes, además se presentan investigaciones recientes que tienen una relación o similitud con la problemática, el alcance o con la solución planteada mediante los distintos algoritmos de control aplicados.

En el capítulo 2, se presenta el marco teórico sobre los distintos conceptos y teorías que se aplican a lo largo del proceso de producción y envasado de pasta en crema lavavajillas, adicionalmente se presenta el marco conceptual, el cual brinda un contexto para los términos que poseen varios significados de acuerdo al campo en el que se apliquen.

En el capítulo 3, se presenta la hipótesis que se contrasta a lo largo de la presente investigación. Asimismo, se menciona los principales indicadores bajo los cuales se midió el impacto de la variable independiente sobre la variable dependiente.

En el capítulo 4, se presenta la naturaleza de la investigación, la cual detalla el enfoque que se manejó en la presente investigación, durante cada una de las etapas de recabar datos, procesarlos y analizarlos.

En el capítulo 5, se presenta el desarrollo de la presente investigación. Como primer paso se describe el origen de las principales variables y como se realizó la captura de información, mediante un análisis a detalle del proceso productivo. Luego, se realiza un análisis de la correlación entre las distintas variables de entrada que se miden a lo largo del proceso con las variables de salida que se mide al finalizar la dosificación de producto en los potes. Luego, se propone una serie de algoritmos de control que permitan controlar la variable que influye directamente en el peso dosificado. Finalmente, se realiza la comparación entre los distintos algoritmos de control, para brindar la solución óptima al problema planteado.

En el capítulo 6, se describe el análisis de los resultados obtenidos con los distintos algoritmos de control planteados y se compara de manera objetiva el desempeño de las respuestas de los sistemas de control estudiados en la presente investigación. Asimismo, se presenta el análisis de la hipótesis para ser validada con base en los resultados obtenidos en el capítulo 5.

## CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

### 1.1. Generalidades

La presente investigación plantea como objetivo presentar una solución a la problemática del control de dosificado en líneas de envasado, esto debido a que las empresas de producción de productos de consumo directo están sujetas a normativas nacionales para el control de peso dosificado, de no cumplir con estos parámetros o límites permitidos este tipo de empresas son sancionadas con multas económicas.

En los siguientes capítulos se presenta el análisis de distintos factores que desempeñan un papel importante en la variación de peso de los productos dosificados para una planta de envasado de pasta en crema lavavajillas. Estas variables permiten conocer cuál es la relación directa de cada uno de estos

factores con relación a un óptimo dosificado, para luego proponer una solución que permita controlar la variable de peso.

Finalmente, se proponen distintos modelos de control sobre la variable en cuestión con la finalidad de tener un peso estable y dentro de los límites permitidos. Los modelos propuestos son comparados con el fin de brindar una propuesta que permita una respuesta confiable para el amplio rango de presentaciones que se envasan en la línea de producción industrial. La situación esperada dentro del alcance de la presente investigación es proponer un modelo de control que permita tener el peso de los potes controlados y cumpliendo las tolerancias de peso permitidas por la autoridad normativa.

#### **1.1.1. Descripción del problema de investigación**

[19] El instituto nacional de defensa de la competencia y de la propiedad intelectual (INDECOP) es la entidad encargada de realizar el seguimiento y estadística de reclamos que se presentan hacia las distintas empresas del sector nacional. [9] Solo en el primer trimestre del año 2023, se han presentado 31,826 reclamos, de los cuales el 8.8% de estos fueron dirigidos a las empresas de consumo masivo, es decir, alrededor de 2,807 reclamos en un periodo de 3 meses. Esto según la información publicada por la entidad gubernamental, la cual se presenta en la tabla 1.1.

**Tabla 1.1***Cantidad de reclamos durante el periodo enero a marzo 2023.*

<b>N.º</b>	<b>Actividad económica</b>	<b>Total 2022</b>	<b>Total 2023 Ene- Mar</b>	<b>%</b>
1	Sistema financiero	39,411	11,230	35.29
2	Telecomunicaciones	9,004	3,162	9.94
3	Transporte por vía aérea	7,385	2,095	6.58
4	Servicios profesionales	5,397	2,011	6.32
5	Educación	4,412	1,607	5.05
6	Comercio minorista	5,527	1,454	4.57
7	Comercio mayorista	4,230	1,353	4.25
8	Comercio minorista de textiles	6,253	1,303	4.09
9	Transporte terrestre	3,149	1,066	3.35
10	Actividades artísticas	2,455	804	2.53
11	Seguros	2,704	647	2.03
12	Agencias de viaje	2,425	641	2.01
13	Construcción e inmobiliario	2,010	629	1.98
14	Servicios varios	2,105	580	1.82
15	Supermercados, bodegas y similares	2,541	496	1.56
16	Venta, mantenimiento y reparación de vehículos	1,727	450	1.41
17	Restaurantes, bares y cantinas	1,572	412	1.29
18	Comercio minorista de línea blanca	1,017	262	0.82
19	Comercio minorista de ferretería	860	240	0.75
20	Otras actividades económicas	5,179	1,384	4.35
		<b>109,363</b>	<b>31,826</b>	<b>100.00</b>

Fuente: INSTITUTO NACIONAL DE DEFENSA DE LA COMPETENCIA Y DE LA PROTECCIÓN DE LA PROPIEDAD INTELECTUAL (INDECOPI) (2023) Reporte trimestral de reclamos gestionados por la autoridad gubernamental [9].

Dentro de las competencias de la entidad gubernamental está la fiscalización del cumplimiento de especificaciones de los productos producidos por las empresas de consumo masivo, dentro de las especificaciones está la cantidad de producto [8] la cual establece que las empresas están obligadas a entregar el producto con un peso que se encuentre dentro de los límites de tolerancia permitidos, sustentado mediante el artículo 98 de la ley N.º 29571, el cual es el código de protección y defensa al consumidor. El artículo 98 también establece que la empresa de manufactura está sujeta a multas de presentar incumplimientos a la norma, las cuales se encuentran establecidas en el D.S. N.º 032-2021-PCM, para ello la empresa de manufactura debe cumplir con los límites de error permisibles en la dosificación de la cantidad de producto, estos límites se encuentran establecidos en la Norma Metrológica Peruana NMP 002:2018 “Cantidad de productos en Pre envases” [7], el límite permisible que se establece en la norma es un error entre 3% a 9% del peso del producto a envasar (Ver tabla 1.2). Lo cual significa que para un producto de 500 g el máximo error permisible es de 15 g.

El gran nivel de precisión que se requiere durante los procesos de envasado y los elevados volúmenes de producción por los que se caracterizan las empresas de la industria del consumo masivo, hace que las empresas que no automatizan sus procesos o no realicen los controles debidos se encuentren

expuestos a denuncias y fiscalizaciones por parte de la entidad gubernamental. Lo cual conlleva a que las empresas de manufactura implementen controles detallados del peso de los productos a la salida de las máquinas envasadoras, para cumplir con los niveles de tolerancia permitidos por la norma.

**Tabla 1.2**

*Niveles de tolerancia en cantidad de producto establecido por el INACAL.*

Cantidad nominal de producto (Qnom) en g o mL	Deficiencia tolerable (T)*	
	Porcentaje de Qnom	g o mL
0 a 50	9	-
50 a 100	-	4.5
100 a 200	4.5	-
200 a 300	-	9
300 a 500	3	-
500 a 1000	-	15
1000 a 10000	1.5	-
10000 a 15000	-	150
Encima de 15000	1	-

Nota: (\*) Los valores T se redondean al siguiente 0.1 de gramo o mililitro para Qnom inferior o igual a 1000 g o 1000 mL y al siguiente gramo o mililitro entero para Qnom mayor de 1000 g o 1000 mL. Fuente: INSTITUTO NACIONAL DE CALIDAD (INACAL) (2018) Norma Metrológica Peruana. Cantidad de productos en Pre envases. Lima.

Con el objetivo de cumplir estos requerimientos, las empresas de manufactura utilizan máquinas envasadoras o llenadoras automáticas, las cuales se

encargan de asegurar un nivel de dosificación estable, debido al grado de repetibilidad con la que cuentan los sistemas electrónicos actuales. Esto en contraste con una parte del sector manufactura, los cuales aún realizan sus procesos de envasado de manera manual.

Lo cual conlleva a plantear la siguiente problemática:

- ¿En qué medida el bajo nivel de automatización en los procesos de envasado impacta en la dosificación de una máquina envasadora?

#### **1.1.2. Objetivos del estudio**

- ✓ Mejorar la dosificación de las máquinas envasadoras basado en el diseño de un sistema de control automático.

## **1.2. Antecedentes investigativos**

A continuación, se presentan los resúmenes de los antecedentes investigativos relacionados con el tema de investigación, segmentados por el tipo de origen: ámbitos internacionales y nacionales.

### **1.2.1. Internacionales**

**Liqing Xiao (2021) [14]**, en su investigación titulada “Parameter tuning of PID controller for beer filling machine liquid level control base on improved genético algorithm”, desarrolla el modelamiento matemático para el control de nivel de una máquina llenadora de cerveza mediante un algoritmo de control PID el cual es sintonizado por medio de la implementación de un algoritmo genético. El artículo plantea una serie de pasos a seguir para ejecutar el algoritmo genético, para que en función a una solución inicial se genere las subsiguientes, la investigación también demuestra la convergencia de dicho algoritmo hacia una solución en particular. Luego de ello se procede a realizar la validación sobre el modelo matemático de la máquina llenadora, resultando que el algoritmo genético presenta un mejor desempeño en la respuesta obtenida, incluso llegando a eliminar el error en estado estacionario. El principal aporte de la investigación es la propuesta de utilizar algoritmos genéticos para sintonizar las ganancias proporcional, integral y derivativa del controlador PID.

**Mitra P., Dey C., K. Mudi R. (2020) [17]**, en su investigación titulada “Fuzzy rule-based set point weighting for fuzzy PID controles”, los autores destacan la importancia del uso correcto de las reglas difusas en el desempeño de un

controlador difuso. Los errores más comunes que destacan son las oscilaciones no deseadas al momento de que la variable se acerca al estado estacionario, esto conduciendo a una saturación del actuador. Durante la investigación, se propone un método de ajuste basado en reglas difusas para un controlador PID difuso, esto debido a que por lo general el método de optimización de un algoritmo difuso es a base de prueba y error. Asimismo, se destaca que para mejorar el desempeño del algoritmo se recomienda plantear una mayor cantidad de reglas de inferencia. El principal aporte de la investigación radica en el uso de reglas difusas para realizar la sintonización de las ganancias del controlador PID.

**Madlmeir S., Loidolt P., G. Khinast J. (2019) [15]**, en su investigación titulada “Study of the capsule filling dosator process via calibrated DEM simulations”, estudian el peso de llenado y la variabilidad del mismo, mediante un análisis del proceso de dosificación y el modelamiento de los parámetros críticos del proceso de llenado de cápsulas, tales como: la geometría del dosificador, la masa de producto dentro de la envasadora, la cantidad de lechos llenados dentro de la máquina, densidad del producto, homogeneidad de la mezcla, la presencia de grumos, la velocidad de la máquina y las vibraciones producto de los cambios de velocidad. Esta investigación se realizó sobre el producto lactohale 100, el cual es lactosa en polvo. Como conclusión, la investigación menciona que los efectos más representativos son la altura o columna de producto, el cual tiene el efecto de aumentar las fuerzas de cohesión del producto debido a que la altura produce una mayor compresibilidad del producto. Otros efectos identificados durante la

investigación, fueron la geometría del dosificador, siendo el principal componente de este el espacio entre la boquilla y el fondo del contenedor, esto debido a que el espacio mencionado determina el nivel de compresión del polvo. Finalmente, la investigación concluye que el modelo planteado mejorará al introducir un modelamiento del rozamiento de las partículas de polvo con las paredes del contenedor, esto con la finalidad de tener un resultado más próximo a la realidad. El principal aporte de la investigación radica en el análisis del efecto que tienen distintas variables, tales como geometría del dosificador, densidad del producto, altura de producto y otros; sobre la precisión en la dosificación de producto.

**Ahmed Hessien, Mohamed y H.E.A. Ibrahim (2018) [1]**, en su investigación titulada “Comparative study between PID and Fuzzy PID controller for speed control of BLDC Motor”, comparan el desempeño de un controlador PID y de un controlador PID difuso para el control de velocidad de un motor sin escobillas. En el artículo se menciona el alto grado de complejidad para modelar un sistema no lineal y como un controlador PID difuso brinda un mejor desempeño en estos casos, ya que el cálculo de las ganancias proporcionales de un PID clásico es más complejo debido a las no linealidades presentes en el modelo matemático. El documento enfoca la comparación en 4 puntos relevantes: tiempo de respuesta, el error en estado estacionario, el tiempo de asentamiento y el sobre impulso, concluyendo que el PID difuso mostró mejores resultados en cada uno de los puntos analizados, ya que se consiguió una mayor precisión. El principal aporte de la investigación es el enfoque

planteado para realizar la comparación objetiva en la respuesta entre los controladores.

**Gutiérrez M.W., López J. (2016) [5]**, en su investigación titulada “Control difuso para un sistema de nivel implementado en un autómata programable” los autores diseñan un controlador difuso para el control de una planta didáctica, en esta planta la variable de control es el nivel y el actuador es una válvula automática la cual se encarga de regular la apertura de la misma para así regular el flujo que ingresa al tanque. Como algoritmo de control se plantea un control proporcional e integrativo y también un controlador difuso. Llegando a la conclusión que el controlador difuso presenta un mejor desempeño que el controlador PI, también se menciona la importancia de tener un experto que establezca las reglas de inferencia de manera óptima. Como parte del alcance, los autores también explican cómo se llevó a cabo la implementación de la investigación, al llevar el algoritmo de control hacia un controlador lógico programable (PLC). El principal aporte de la investigación es la comparación práctica que se realizó entre los controladores PI y el controlador difuso.

### **1.2.2. Nacionales**

**Meza Tito, Emilio Enrique (2019) [16]**, en su investigación titulada “Sistema de control automático de nivel de agua en la cámara de carga basado en la lógica difusa para la central hidroeléctrica de Machu Picchu”, describe la implementación del control de nivel de agua en una cámara de carga para una central hidroeléctrica mediante técnicas de control de lógica difusa a través de

un servidor OPC que conecta al PLC de la planta y a una PC de Ingeniería, la cual contiene el software Simulink, el cual realizara las labores de procesamiento de las variables de entradas que son el error y la velocidad con la que cambia el valor del error para proponer un nivel de apertura de válvulas que modificaran el nivel. El autor realiza un modelado del sistema, sin embargo, termina desestimando el modelo debido a la gran cantidad de variables que afectan el proceso, las cuales afectan al modelo matemático no lineal, motivo por el cual se propone un algoritmo de control con lógica difusa a fin de replicar el método de trabajo de los operadores. El autor recalca que, a diferencia de sus antecesores, la presente investigación aplica un algoritmo de control avanzado a diferencia del algoritmo PID presentado por sus antecesores. El principal aporte de la investigación es el análisis realizado del modelamiento matemático de la planta, el cual permitió definir el controlador a difuso frente al controlador PID debido a un mejor desempeño del controlador.

**Vargas Quevedo, Francisco José (2020) [22]**, en su investigación titulada “Impacto del mantenimiento autónomo en la eficiencia general de una línea de producción de lavavajillas”, describe el proceso producción de pasta en crema lavavajillas y realiza un estudio de las principales perdidas de eficiencia operacional. Dentro de las pérdidas que se mencionan en el informe, se encuentran: la falta de estándares de limpieza, la falta de estándares operaciones, paros no planeados, etc. Adicionalmente, el estudio enfatiza que dentro de las principales perdidas de eficiencia operacional está el defecto por cantidad de producto que existe en la línea de envasado y que las pérdidas

de eficiencia operacional relacionadas a esta causa alcanzan el 1.5% de la producción, lo cual genera reprocesos y pérdidas monetarias debido al descarte de envases y producto. La investigación toma un enfoque distinto a partir de ese punto, ya que se enfoca en reducir las otras pérdidas operacionales mediante técnicas de manufactura esbelta y mantenimiento autónomo. El principal aporte de la investigación es el análisis de las principales pérdidas de eficiencia operación que se generan en una línea de producción de pasta lavavajillas.

## **CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL**

### **2.1. Marco Teórico**

#### **2.1.1. Diagramas de tuberías e instrumentación (P&ID)**

**Sección Española International Society of automation (ISA) (2018) [21]**

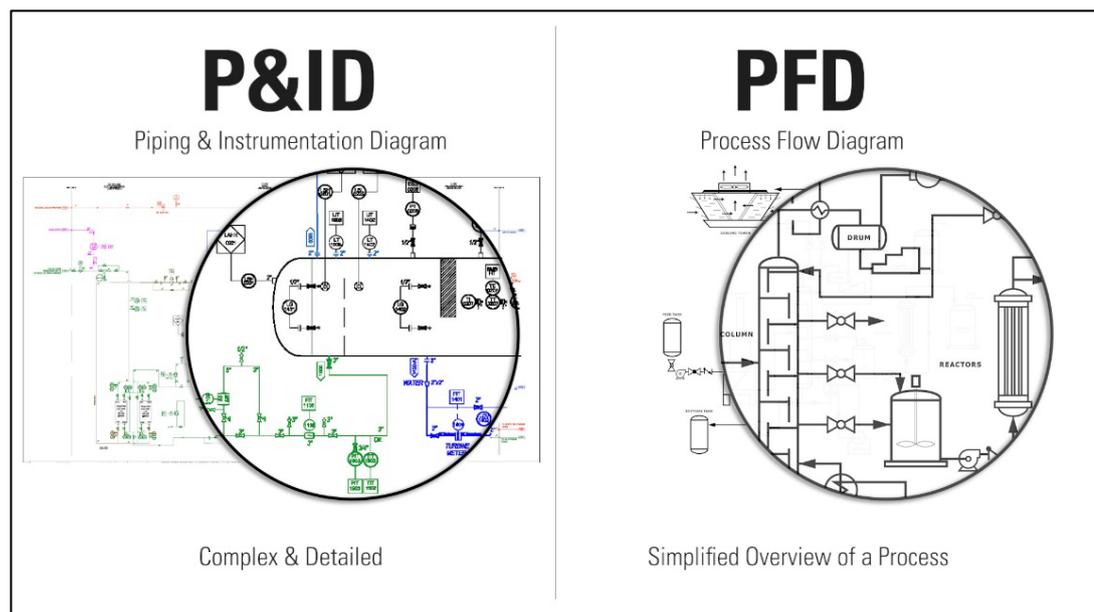
Ingeniería de instrumentación de plantas de proceso. España: Ediciones Díaz de santos.

Conocido por su abreviatura en inglés P&ID (Piping and instrumentation diagram) los diagramas de tuberías e instrumentación, son una fuente de información importante al momento de realizar un proyecto de automatización. Estos diagramas contienen información para varias disciplinas y son un elemento clave para el diseño de tuberías e instrumentación. Los diagramas P&ID son construidos bajo la norma ISA 5.1, la cual establece un estándar para la representación, identificación y funciones de los instrumentos o dispositivos.

Un diagrama P&ID también se identifica como un diagrama de flujo del proceso al que se le incorporan los detalles funcionales, por ejemplo: diseño de tuberías, equipos de proceso e instrumentación. Por lo que un diagrama P&ID lleva una mayor complejidad en la información y detalle que un diagrama de flujo, el cual tiene por fin mostrar una versión simplificada del proceso, en la figura 2.1 se observa el nivel de detalle que hay entre estos 2 tipos de diagramas utilizados a nivel industrial.

**Figura 2.1**

*Diagrama P&ID vs. Diagrama de flujo.*



Fuente: KYLE, Andrews (s.f.) How to read oil and gas P&ID symbols (consulta: 5 de marzo del 2023) (<https://kimray.com/training/how-read-oil-and-gas-pid-symbols>) [12].

### **2.1.2. Instrumentación industrial**

**Creus Solé, Antonio (2011) [3]**, Instrumentación industrial, 8va edición. Barcelona: Marcombo.

En todo proceso industrial es necesario controlar y mantener ciertas magnitudes constantes, tales como: nivel, caudal, presión, temperatura, etc. Motivo por el cual la instrumentación industrial conlleva una gran importancia en la industria. A principios de la era industrial, se manejaba controles manuales de las variables del proceso, sin embargo, hoy en día se utilizan equipos de gran precisión que llevan la información de manera centralizada a grandes sistemas de control. Los instrumentos se clasifican en 2 tipos de acuerdo a la función del instrumento y de acuerdo a la variable que mide en el proceso. En el presente capítulo se detalla los principales instrumentos para el control de nivel y peso.

### **2.1.3. Medición de nivel**

**LIPTÁK, Béla G. (2017) [13]**, Instrument and Automation Engineer's Handbook: measurement and safety. Florida: CRC Press.

Existen distintas tecnologías de medición de nivel, estas varían según la característica de aplicación: rango de trabajo, forma de tanque, material de proceso, presión, temperatura y precisión. Entre los principales principios de operación de los transmisores de nivel tenemos:

- Densidad: Mediante la medición de la diferencia de presión de una columna de líquido.
- Conductividad: Mediante la medición de la conductividad entre la parte superior e inferior de una columna de líquido.
- Mecánica o de contacto: Mediante el uso de flotadores, cables y reglas de medición.
- Óptico: Mediante el uso de la medición del tiempo que demora en reflejar un láser.
- Sonoro: Mediante el uso de la medición del tiempo de retorno de una onda sonora.
- Radar: Mediante el uso de la medición del tiempo de retorno de un pulso electromagnético.

El desempeño de un transmisor de nivel dependerá de distintos factores ligados al campo de aplicación del instrumento, los fabricantes normalmente brindan un nivel de error estimado para cada instrumento asociado a pruebas de laboratorio y corresponden a un nivel de error máximo que podría entregar el instrumento, bajo las condiciones especificadas en las hojas técnicas asumiendo aplicaciones perfectas, es decir, donde los parámetros críticos son invariables. Sin embargo, existen parámetros que en una aplicación real pueden afectar la precisión en la medición, los cuales son:

- Variación en la densidad de los líquidos para instrumentos que utilicen este parámetro como método de medición indirecta.

- Variación en la velocidad del sonido debido a la composición del espacio aéreo, para instrumentos que utilizan ecos sonoros para la medición de nivel.
- Condensación en las antenas de los medidores de tipo radar, que generan imprecisiones al momento de realizar la medición de nivel.

#### **2.1.4. Medición de peso**

**LIPTÁK, Béla G. (2017) [13]**, Instrument and Automation Engineer's Handbook: measurement and safety. Florida: CRC Press.

Existen varios detectores utilizados en la medición de pesos estacionarios o dinámicos, estos sensores se clasifican en:

- Básculas mecánicas de palanca.
- Básculas hidráulicas.
- Celdas de carga neumáticas.
- Celdas de carga electrónicas.

Debido al poco espacio que ocupan y al alto grado de precisión las celdas de carga electrónicas son las más utilizadas dentro de la industria, dentro de estas celdas la más conocida es la celda de carga de tipo de galga extensiométrica, estas se componen de una celda que contiene una pieza con un valor de elasticidad conocida la cual soportara la carga, esta tensión o compresión que se aplica sobre la celda genera una variación en la resistencia eléctrica de las galgas lo cual brinda una referencia del peso.

Existen algunos criterios que deben ser tomados en cuenta para la correcta selección de celdas de carga, entre estos tenemos:

- El rango de pesaje.
- La precisión requerida.
- Modo de carga (tensión o compresión).
- Tipo de ambiente.
- Temperatura de operación.
- Número de celdas.
- Distribución de las celdas con respecto a la carga.

La precisión en la medición depende exclusivamente de una correcta selección y consideración de los puntos mencionados con anterioridad.

#### **2.1.5. Bombas de desplazamiento positivo**

**IGOR J., Karassik y otros (2008) Pump Handbook. New York: McGraw-Hill. [6]**

Las bombas de desplazamiento positivo son equipos que transforman el movimiento rotacional de un motor a un movimiento que permite trasladar los fluidos de un compartimiento a otro, ya sea a través de pistones, émbolos, etc. La capacidad de estas bombas está dada por la velocidad rotacional del mecanismo a diferencia de las bombas centrífugas. Las bombas de desplazamiento positivo no generan presión, la presión que se encuentra en las tuberías es producida únicamente por la resistencia del fluido al pasar a

través de las tuberías o el proceso. Dichas bombas son capaces de variar proporcionalmente el flujo entregado cuando el motor es acoplado a un variador de frecuencia, el cual permita controlar su velocidad.

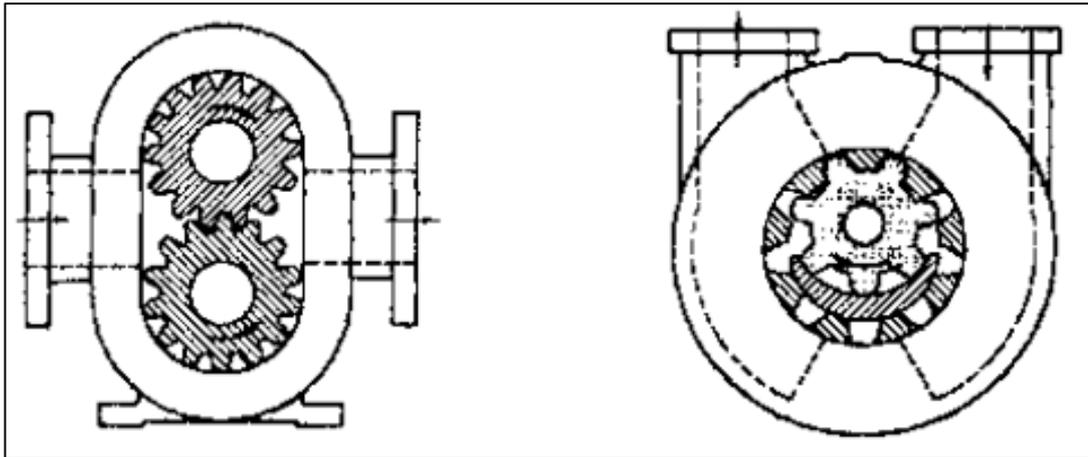
#### **2.1.6. Bombas de engranaje**

Las bombas de engranaje son conocidas por no transportar únicamente fluidos puros, sino también fluido que presenten una mezcla de líquidos, gases, lodos o sólidos en suspensión. El funcionamiento de estos comienza con un engranaje rotando dentro de un asiento estacionario, el cual define la cantidad de volumen estacionario que se tiene dentro de la bomba. Conforme se inicia el movimiento rotativo del engranaje, el volumen se irá desplazando desde la zona de succión a la descarga de la bomba.

Las bombas de engranaje presentan 2 engranajes los cuales al interactuar permiten ejercer la acción de bombeo. Estas bombas se clasifican como externas e internas (ver figura 2.2). Las bombas externas presentan 2 engranajes los cuales tienen contacto por la parte externa y las bombas internas presentan 2 engranajes donde uno de los engranajes tiene contacto por la parte interna y el otro por la parte externa.

**Figura 2.2**

Bomba de engranajes externa (izquierda) y bomba de engranajes interna (derecha)



Fuente: IGOR J., Karassik y otros (2008) Pump Handbook. New York: McGraw-Hill [8].

### 2.1.7. Algoritmos de control

Durante la presente investigación se menciona a 2 tipos de algoritmos de control, los cuales serán descritos líneas abajo:

#### 2.1.7.1. Controlador proporcional, integral y derivativo

##### (PID)

**J. ASTROM K., HAGGLUND T. (2009)** Control PID avanzado. Madrid: Pearson. [10]

El controlador PID es el algoritmo de control más utilizado en la industria, se implementa de distintas maneras, ya sea como un único controlador o como

parte de otro. La función se suele representar como se muestra en la ecuación 2.1:

$$u(t) = K \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.1)$$

En la ecuación se presenta la señal de control “u” como variable dependiente y el error “e” como variable independiente, el cual es la diferencia entre el valor de la variable de proceso a controlar y la referencia o setpoint deseado. La señal de control es la suma de 3 términos: el término P o proporcional el cual presenta un valor proporcional al error, el término I o integrativo el cual es proporcional a la integral del error y el término D o derivativo el cual es proporcional a la derivada del error. Estos valores son afectados por medio de ganancias las cuales son la ganancia proporcional K, el tiempo integral Ti y el tiempo derivativo Td.

Por lo general la señal de control se compone de estos 3, sin embargo, dependiendo del proceso se puede prescindir de alguno de ellos, de manera que el controlador PID pasa a convertirse, por ejemplo: en un controlador proporcional únicamente o un controlador proporcional e integral.

#### 2.1.7.2. Lógica difusa

**KASABOV K., Nikola (1996)** Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems, and knowledge engineering. Cambridge: The MIT Press. [11]

Un controlador difuso es un sistema basado en reglas difusas y un sistema de inferencia difusa. Las reglas difusas representan de manera directa el

conocimiento y habilidades de una persona experta en un campo o materia. Las reglas difusas buscan representar de manera matemática un tipo de conocimiento subjetivo o ambiguo. Este conocimiento se plantea basándose en el conocimiento experto acerca de un proceso.

Un sistema difuso está definido principalmente por 3 componentes:

- Las variables de entrada y salida.
- Las reglas difusas.
- Los mecanismos de inferencia.

El proceso para el diseño de un sistema difuso comienza con la definición de las entradas y salidas difusas, luego con la definición de las funciones de pertenencias numéricas para cada una de estas y finalmente se procede a describir la naturaleza del proceso articulando reglas de sentido común utilizando sentencias lógicas, para finalmente mediante el método de inferencia seleccionado se pueda obtener la salida difusa la cual es parte del sistema de control planteado.

#### **2.1.7.2.1 Variables difusas y funciones de pertenencia.**

**ROSS, Timothy J. (2004)** Fuzzy Logic with engineering applications. Inglaterra: Editorial John Wiley & Sons [20].

Las variables difusas y las funciones de pertenencia buscan representar una manera objetiva de tomar decisiones sobre procesos que contiene una incertidumbre no aleatoria, como la incertidumbre en el lenguaje natural, el

establecer una correcta función de pertenencia es la clave para poder representar una variable frente a las incertidumbres presentes.

La principal característica de la lógica difusa es que se trabajan con proposiciones difusas, es decir, proposiciones que contienen variables difusas y valores difusos, por ejemplo, “la velocidad es baja” o “esa persona es alta”, los valores de verdad, para la lógica difusa, no trabajan en un enfoque binario como el caso de la lógica booleana, si no incluyen toda una escala entre los posibles valores de las variables.

Las funciones de pertenencia buscan establecer hasta qué punto un valor es parte de un concepto difuso. Por ejemplo:

- “Los niños entre 5 a 7 años son niños pequeños”

Según el concepto de lógica booleana, solo los niños que tienen una edad entre 5 a 7 años se considerarían pequeños, es decir, se representaría como 1 a los niños que tienen una edad entre esos valores y como 0 a los niños que tienen su edad fuera de ese rango.

El concepto difuso aparece cuando se requiere evaluar consultas, tales como:

¿Es un niño de casi 5 años pequeño?

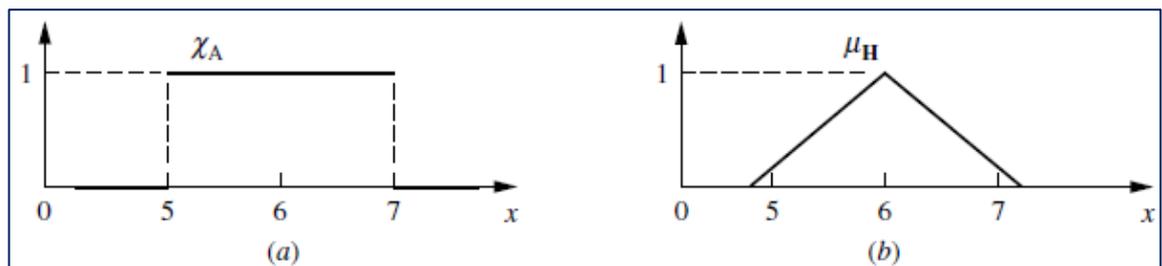
La incertidumbre presentada en este caso se debe a la vaguedad del adjetivo “casi”, una persona de 5 años 11 meses y 30 días podría ser clasificada directamente como no pequeña, sin embargo, el concepto de lógica difusa y funciones de pertenencia busca establecer de manera matemática que tan cierta o no es la consulta presentada. Para ello se establecen “grados de

pertenencia”, es decir, se busca representar este tipo de proposiciones mediante valores numéricos dentro del intervalo continuo real  $[0, 1]$ , donde 0 y 1 son los extremos representados por la lógica binaria.

Las gráficas de las funciones de pertenencia de la lógica booleana ( $\chi_A$ ) y la lógica difusa ( $\mu_H$ ) se pueden observar en la figura 2.3 (a) y 2.3 (b) respectivamente.

### Figura 2.3

*Función de pertenencia booleana (a) y función de pertenencia difusa (b).*



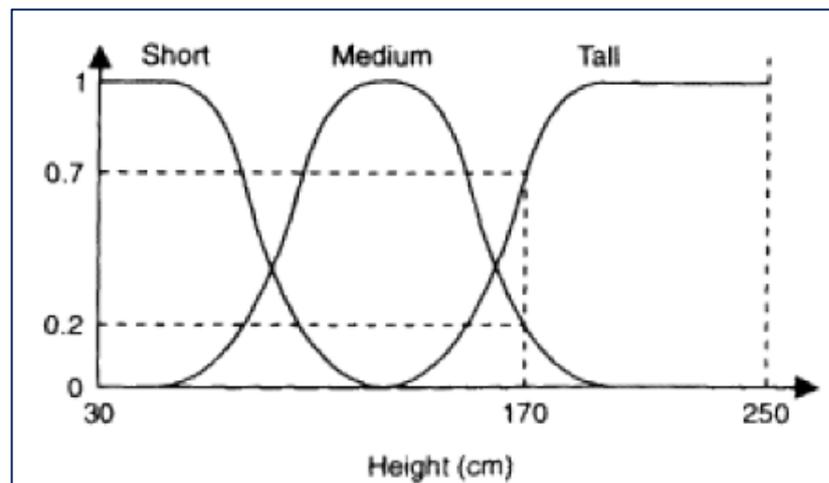
Fuente: ROSS, Timothy J. (2004) Fuzzy Logic with engineering applications. Inglaterra: Editorial John Wiley & Sons [20].

Como se pudo apreciar en la figura 2.3, el grado de pertenencia de un objeto a un conjunto difuso se establece a través de las funciones de pertenencia, el grado de pertenencia presenta valores entre 0 y 1, donde 0 representa que el objeto no es miembro del conjunto difuso y 1 representa que el objeto es totalmente parte del conjunto difuso. La forma en la que se representa las funciones de pertenencia es mediante funciones matemáticas.

En la figura 2.4 se muestra 3 funciones de pertenencia que representan a 3 conjuntos difusos etiquetados como bajo, mediano y alto, estos representan conjuntos difusos para la variable altura.

#### Figura 2.4

*Función de pertenencia de la variable altura sobre los conjuntos difusos bajo, medio y alto.*



Fuente: KASABOV K., Nikola (1996) Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems, and knowledge engineering. Cambridge: The MIT Press. [11]

Como se puede apreciar en la figura 2.4, el valor de 170 centímetros tiene un grado de pertenencia de 0.2 para el conjunto “mediano” y al mismo tiempo presenta un grado de pertenencia de 0.7 para el conjunto “alto”.

Existen distintos tipos de funciones de pertenencia a las cuales se puede asociar una variable, entre las más usadas se tiene; la función tipo Z, tipo S, normal, trapezoidal, triángulo y delta.

### 2.1.7.2.2 Reglas difusas

La forma más común de representar el conocimiento humano es a través de expresiones del tipo “Si premisa ENTONCES conclusión”, los sistemas basados en lógica difusa utilizan este tipo de premisas deductivas para representar el conocimiento humano empírico y heurístico que es parte del lenguaje de comunicación.

Las reglas difusas que se establecen en un controlador difuso, por lo general manejan la siguiente estructura:

- Regla 1: Si  $X_1$  es  $A_{1.1}$  Y  $X_2$  es  $A_{2.1}$ , entonces Y será  $B_1$ .
- Regla 2: Si  $X_1$  es  $A_{1.2}$  Y  $X_2$  es  $A_{2.2}$ , entonces Y será  $B_2$ .
- ...
- Regla K: Si  $X_k$  es  $A_{1.k}$  O  $X_2$  es  $A_{2.k}$ , entonces Y será  $B_k$ .

Donde:

- $X_1$  y  $X_2$ , son las variables difusas de entrada, las cuales pertenecen a las distintas funciones de pertenencia  $A_{1.1}$ ,  $A_{1.2}$ , ...  $A_{1.k}$  y  $A_{2.1}$ ,  $A_{2.2}$ , ...,  $A_{2.k}$  respectivamente.
- Y es la variable difusa de salida, la cual pertenece a las distintas funciones de pertenencia  $B_1$ ,  $B_2$ , ...,  $B_k$ .

Como se puede apreciar en las reglas difusas se tienen conectores

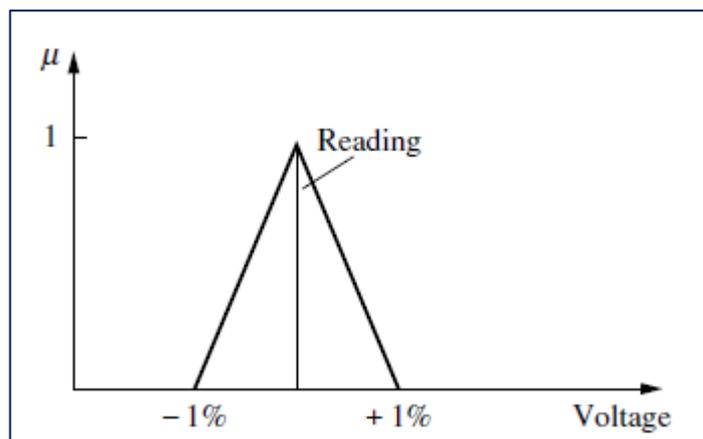
### 2.1.7.2.3 Proceso de fuzificación y defuzificación

Los procesos de fuzificación y defuzificación son partes importantes del desarrollo de un algoritmo de lógica difusa, ya que estos procesos sirven para trasladar el lenguaje o expresiones a términos difusos y viceversa.

El proceso de fuzificación implica el trasladar una cantidad determinista o fija a un campo difuso, el cual busca plasmar las incertidumbres no visibles de la variable, a través de las funciones de pertenencia, una de las incertidumbres más conocidas en el mundo real es la imprecisión o error de lectura de variables analógicas. Por ejemplo, cuando se realiza la medición de voltaje se debe tomar en cuenta el error del instrumento de medición, por lo que la variable real se tomara valores dentro de un rango de tolerancia que se encuentra alrededor de la variable medida. La probabilidad de que el valor real sea el valor medido se expresa gráficamente en la figura 2.5, donde se puede apreciar la función de pertenencia de la variable voltaje real, la cual presentará valores únicamente dentro del rango de tolerancia del instrumento.

**Figura 2.5**

*Función de pertenencia de variable voltaje.*



Nota: la variable  $u$  representa la función de pertenencia de la variable voltaje, la cual tiene el nivel de probabilidad de que la medición tome el valor leído.

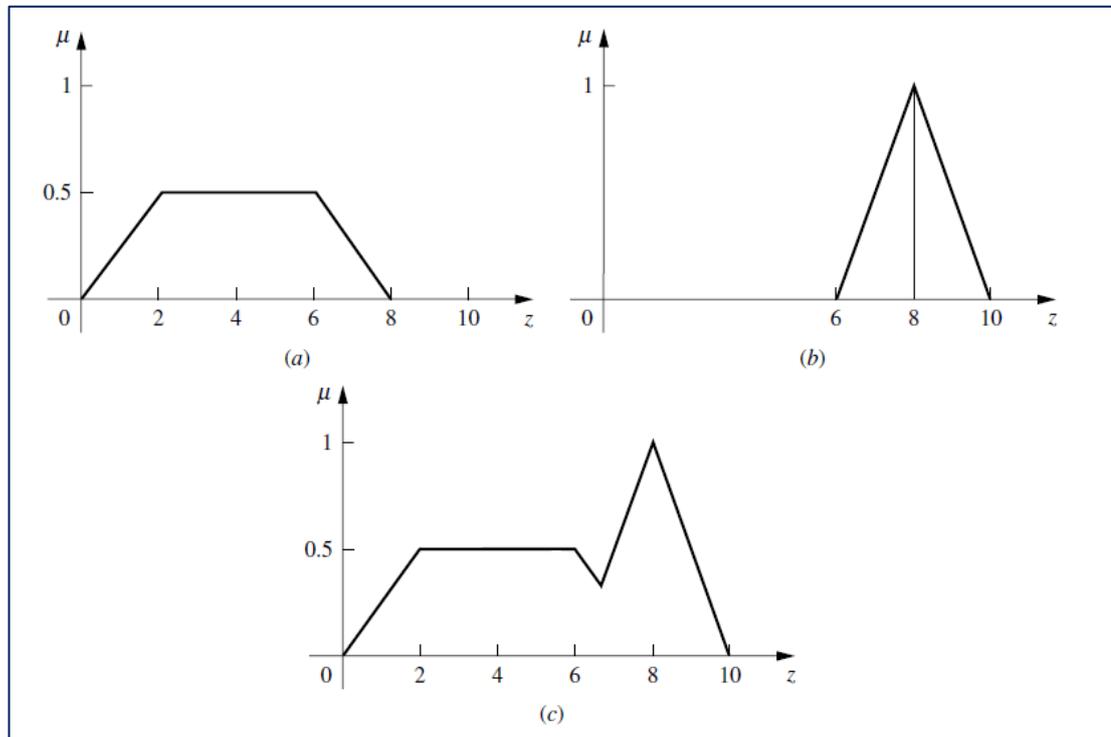
Fuente: ROSS, Timothy J. (2004) Fuzzy Logic with engineering applications. Inglaterra: Editorial John Wiley & Sons [20].

Los algoritmos de lógica difusa por lo general tienen el fin de entregar una variable escalar, es por ello que el proceso de defuzificación toma una gran relevancia dentro de los pasos del diseño de un controlador difuso. El proceso de defuzificación es el proceso inverso al proceso de fuzificación, esto debido a que el punto de partida es un conjunto difuso, sobre el cual se busca obtener una variable escalar o determinista.

La salida de un proceso difuso puede llegar a ser la unión de 2 o más funciones de pertenencia definidas dentro de un mismo universo de la variable de salida. Por ejemplo, en la figura 2.6 (a) se representa una primera función de pertenencia para la variable  $Z$  la cual presenta forma trapezoidal, en la figura 2.6 (b) se representa una segunda función de pertenencia para la variable  $Z$  la cual presenta una forma triangular y finalmente la figura 2.6 (c) representa la unión de estas 2 funciones de pertenencia expresadas a través del operador "máximo".

**Figura 2.6**

*Unión de funciones de pertenencia para la variable Z.*



Nota: (a) Función de pertenencia tipo trapezoide, (b) función de pertenencia tipo triángulo y (c) unión de las funciones de pertenencia. Fuente: ROSS, Timothy J. (2004) Fuzzy Logic with engineering applications. Inglaterra: Editorial John Wiley & Sons [20].

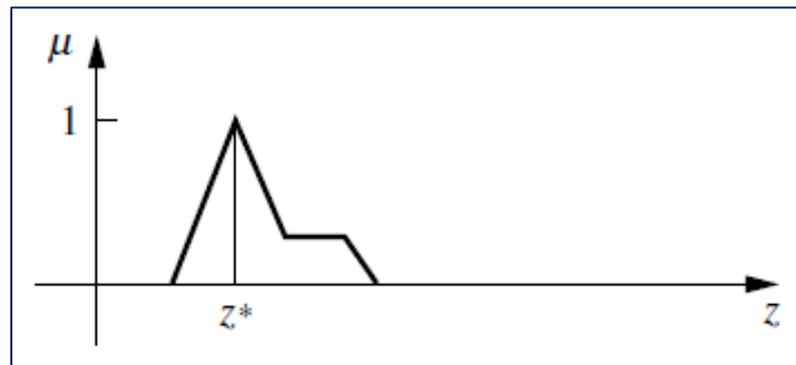
El método de unión utilizado en el ejemplo mostrado en la figura 2.6 fue el operador “máximo” o “unión”, sin embargo, este no es el único operador conocido, ya que también se utiliza el operador “mínimo” o “intersección”.

Posterior a la unión entre las funciones de pertenencia, se realiza el proceso de defuzificación de las funciones de pertenencia, para lo cual existen muchos métodos, entre estos tenemos:

1. Principio de membresía máxima: conocido como el método de la altura, este método permite obtener el valor de la salida difusa a través del valor más alto obtenido en la función de pertenencia, tal cual se presenta en la figura 2.7.

**Figura 2.7**

*Selección de la salida difusa  $Z^*$  por el método de pertenencia máxima.*

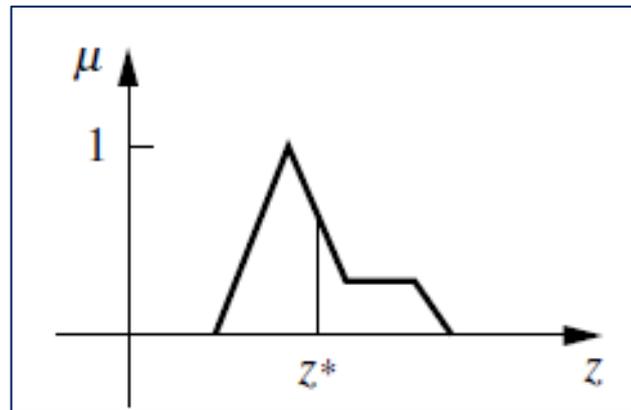


Fuente: ROSS, Timothy J. (2004) Fuzzy Logic with engineering applications. Inglaterra: Editorial John Wiley & Sons [20].

2. Método del centroide: este método es también llamado centro de área o centro de gravedad y es el más utilizado dentro de todos los métodos de defuzificación y como se nombre menciona implica realizar el cálculo matemático del centro de gravedad o el centro del área bajo la gráfica que generan las funciones de pertenencia, tal cual se presenta en la figura 2.8.

**Figura 2.8**

*Selección de la salida difusa  $Z^*$  por el método del centroide.*



Fuente: ROSS, Timothy J. (2004) Fuzzy Logic with engineering applications. Inglaterra: Editorial John Wiley & Sons [20].

3. Método de promedio ponderado: este método es otro de los métodos más utilizados dentro de las aplicaciones de lógica difusa debido a la eficiencia computacional que presenta al momento de su implementación. Sin embargo, este método está restringido generalmente a funciones de membresía de salida simétricas.

## 2.2. Marco conceptual

**Fluido:** Sustancia en estado líquido o gaseoso que puede contener partículas en suspensión.

**Celdas:** Instrumento que permite medir el peso de un objeto, mediante el uso de diferentes tecnologías (neumática, hidráulica o galgas extensiométricas).

**Diagrama:** Es una representación gráfica que simplifica la información de un sistema o proceso complejo, basada básicamente en elementos gráficos.

**Algoritmos:** Secuencia de pasos o instrucciones los cuales permiten llevar a cabo una tarea.

## CAPÍTULO III HIPÓTESIS Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

### 3.1. Hipótesis general

- ✓ El diseño de un sistema de control automático, basado en un controlador difuso, influirá en la mejora de la dosificación de una máquina envasadora.

### 3.2. Operacionalización de las variables

- **Variable independiente (VI):** Sistema de control automático basado en un controlador difuso.
- **Variable dependiente (VD):** Dosificación de una máquina envasadora

En la tabla 3.1 se presenta la operacionalización de variables, donde se presentan la variable dependiente e independiente con los respectivos indicadores.

**Tabla 3.1**

*Variables e indicadores de la presente investigación.*

<b>Variables</b>	<b>Indicadores</b>
V.D.: Dosificación de una máquina envasadora.	- Variación del peso durante la dosificación (Unidades: gramos).
V.I.: Sistema de control automático basado en un controlador difuso.	- Tiempo transcurrido para llegar al nivel de referencia (Unidades: segundos). - Error en el estado estacionario (Unidades: kilogramos). - Nivel de sobre impulso de la respuesta (Unidades: kilogramos). - Tiempo de recuperación de la referencia ante fluctuaciones (Unidades: segundos).

Fuente: Elaboración propia.

## CAPÍTULO IV METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

### 4.1. Tipo y diseño de la investigación

**PEREZ SERRANO, Gloria (1994) [18]**, Investigación cualitativa. Retos e interrogantes. Madrid: La Muralla.

La presente investigación presenta un enfoque de tipo cuantitativo, esto sustentado bajo los siguientes factores:

- Desde el punto de vista de percepción de la realidad, la investigación es objetiva, debido a que se basa en datos numéricos y cálculos matemáticos los cuales se sustentan en teorías científicas validadas.
- Desde el punto de vista de razonamiento, la presente investigación busca contrastar la hipótesis mencionada anteriormente, mediante el análisis de la interacción entre las variables dependiente e independiente.

- Desde el punto de vista de finalidad, la presente investigación busca comprobar la hipótesis basada en los efectos de la variable independiente.
- Desde el punto de vista de orientación, la presente investigación está orientada al resultado, debido a que se basa en los datos numéricos presentados en el anexo 1 del presente documento.
- Desde el punto de vista del principio de verdad, la presente investigación es particular al proceso y busca tomar como referencia mediciones objetivas.
- Desde la perspectiva del investigador, la presente investigación utiliza datos objetivos, los cuales están al margen de las opiniones o sesgos del investigador.
- Desde el punto de vista de causalidad, la presente investigación cuenta con antecedentes específicos, ya que esta se basa en teoría científica, la cual está demostrada en cada una de las bibliografías referenciadas.

El alcance de la investigación presenta un alcance explicativo debido a que busca establecer una correlación entre el diseño del sistema de control y la dosificación de producto. Además, el diseño de la investigación es de tipo experimental, debido a que se realiza la manipulación de una de las variables durante la toma de datos, a fin de comprobar la hipótesis y demostrar la relación entre las variables dependiente e independiente.

#### **4.2. Unidad de análisis**

La investigación tiene por unidad de análisis una de las 3 líneas de envasado en potes en una planta de elaboración de pasta en crema lavavajillas. La cual se compone de un tanque pulmón de pasta lavavajillas de 7.0 toneladas métricas de capacidad (TM), una bomba de desplazamiento positivo de una capacidad de 11.3 toneladas métricas por hora (TMH) y una máquina envasadora de producto la cual cuenta con una capacidad de 2.5 toneladas métricas por hora (TMH).

Los equipos mencionados son utilizados durante el proceso de producción de pasta en crema lavavajillas de la empresa de manufactura INTRADEVCO [4] la cual se encarga de fabricar productos para el cuidado personal y del hogar, la cual se ubica en la Av. Industrial con Av. Comercial SN en el distrito de Lurín del departamento de Lima, Perú.

### 4.3. Matriz de consistencia

Título de la investigación: “Diseño de un sistema de control automático para mejorar la dosificación de una máquina envasadora basado en un controlador difuso en una línea de producción de pasta lavavajillas”.

**Tabla 4.1**

*Matriz de consistencia de la presente investigación.*

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES		INDICADORES	INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS
			DEPENDIENTE	INDEPENDIENTE		
¿En qué medida el bajo nivel de automatización impacta en la dosificación de una máquina envasadora?	Mejorar la dosificación de una máquina envasadora.	El diseño de un sistema de control automático basado en un controlador difuso influirá en la mejora de la dosificación de una máquina envasadora.	Dosificación de una máquina envasadora.	Sistema de control automático basado en un controlador difuso.	Tiempo para estabilizar el peso (Unidades: segundos). Error en el peso dosificado (Unidades: gramos). Nivel de sobre impulso de la respuesta (Unidades: %). Tiempo de recuperación de la variable (segundos).	Registro de control de peso de potes de producto envasado en una línea de producción de pasta lavavajillas.

Fuente: Elaboración propia.

## **CAPÍTULO V DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**

La primera etapa de la presente investigación fue la etapa de recopilación y procesamiento de información, la cual consistió en: la revisión de la filosofía de control del proceso, la identificación de las principales variables a monitorear, la definición del método de captura de datos y finalmente la adquisición de datos durante el proceso productivo.

Como segunda etapa, se planteó la etapa de diseño, en la cual se evaluó distintos modelos de sistemas de control aplicados al proceso de envasado, con la finalidad de realizar la comparación del desempeño de la respuesta a través de los indicadores de medición definidos en el capítulo 4. Los indicadores fueron obtenidos mediante simulaciones se realizaron a través del software de modelado SIMULINK el cual permitió realizar comparaciones

objetivas sobre los diseños planteados, con la finalidad de seleccionar el algoritmo de control con mejor desempeño.

Finalmente, se desarrolló la etapa de análisis en la cual se presentaron los resultados obtenidos de los distintos modelos de control planteados y se realizó la comparación de los indicadores propuestos. Para luego plasmar los resultados obtenidos y finalmente presentar el análisis de los mismos en el capítulo 6.

## **5.1. Recopilación de data**

### **5.1.1. Proceso de producción y envasado de pasta lavavajillas**

El proceso de envasado de pasta lavavajillas está compuesta de 2 etapas: la etapa de manufactura y la etapa de envasado.

#### **5.1.1.1. Etapas de manufactura**

En la etapa de manufactura, se tienen 2 subprocesos los cuales son: neutralizado y batido, en estos subprocesos se realiza la mezcla de insumos mayores y menores respectivamente. Los insumos mayores utilizados en la formulación son el ácido sulfónico, soda cáustica, silicato de sodio y agua; estos insumos son bombeados desde unos tanques de almacenamiento hacia la zona de formulación.

Como se observa en la representación gráfica mostrada en la figura 5.1, los insumos llegan al tanque reactor P1, el cual presenta un agitador para realizar la mezcla homogénea de estos insumos, este proceso tiene una duración

aproximada de 20 minutos y produce una mezcla la cual es un producto intermedio conocido como pasta neutralizada.

Como parte del análisis de calidad del insumo, se realiza la medición del pH, este valor debe encontrarse entre 10 a 11 para considerar al producto apto para continuar hacia la siguiente etapa, la cual corresponde al subproceso de batido.

El subproceso de batido comienza con el envío de la pasta neutralizada desde el reactor P1 hacia la batidora B2. El traslado del producto se realiza por medio de gravedad al abrir la válvula manual ubicada entre los 2 tanques, este trasvase entre tanques tiene una duración aproximada de 6 a 10 minutos.

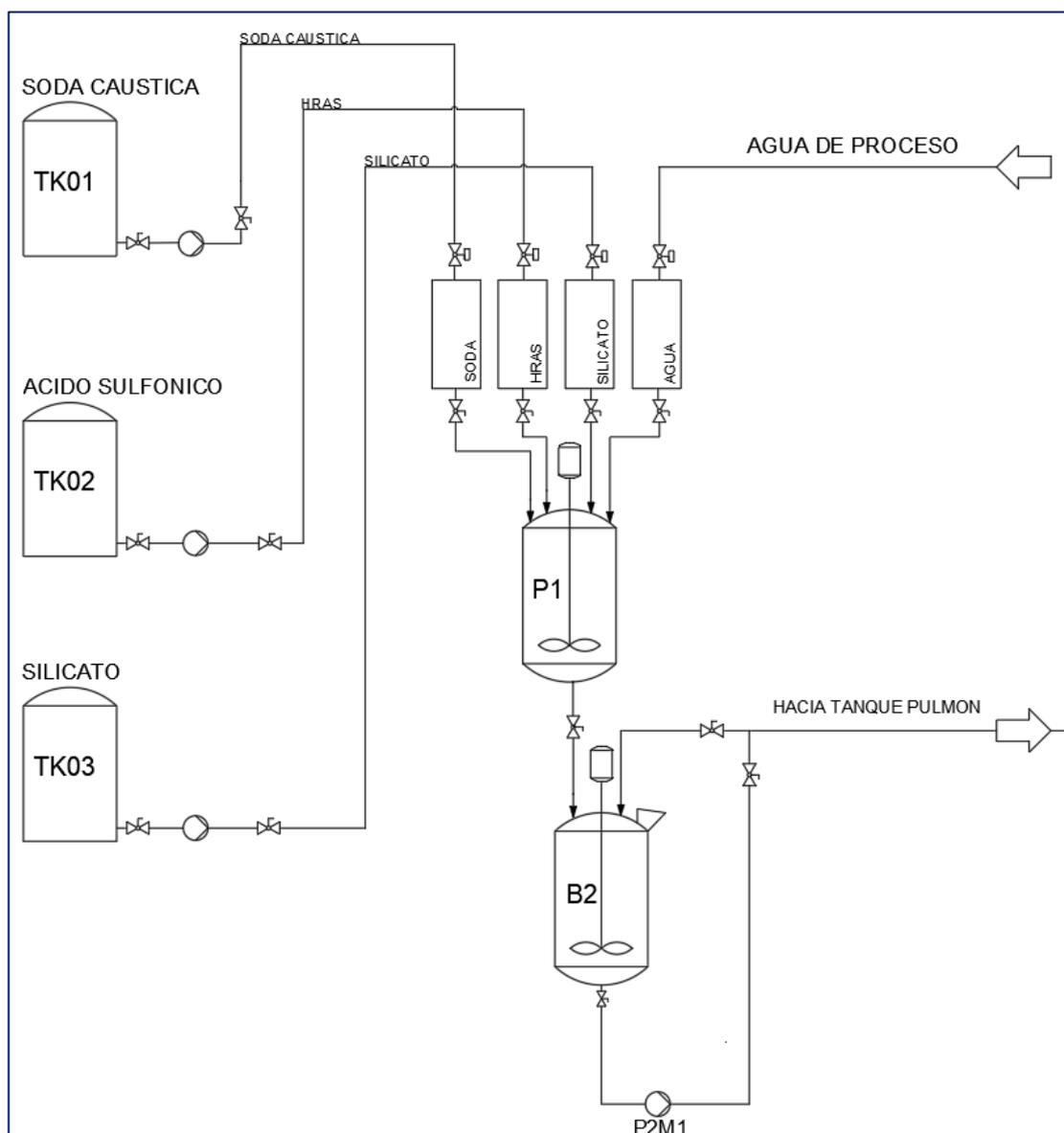
Al término del trasvase de la pasta neutralizada hacia la batidora B2, se procede con la adición de insumos menores, tales como: carbonato de sodio, carbonato de calcio, fragancias y colorantes. En esta etapa la mayoría de los insumos son sólidos, por lo que el tiempo de homogeneización es mayor, la duración aproximada de esta etapa es de 30 minutos. Para obtener una mejor homogeneización de los componentes de la mezcla, se utiliza la bomba P2M1 para recircular la pasta de crema lavavajillas.

Posterior a la agitación se realiza la prueba de barrido la cual permite validar que la pasta en crema lavavajillas no presente grumos. De tener la presencia de grumos se procede a aumentar el tiempo de agitación con el fin de eliminarlos.

Finalmente, luego de haber superado los 2 controles de calidad, los cuales fueron el pH y la prueba de barrido, se envía el producto formulado hacia el tanque pulmón o de almacenamiento, el producto se mantiene en los tanques hasta ser utilizado en la etapa de envasado.

**Figura 5.1**

*Representación gráfica del proceso de manufactura de pasta lavavajillas.*



Fuente: Elaboración propia.

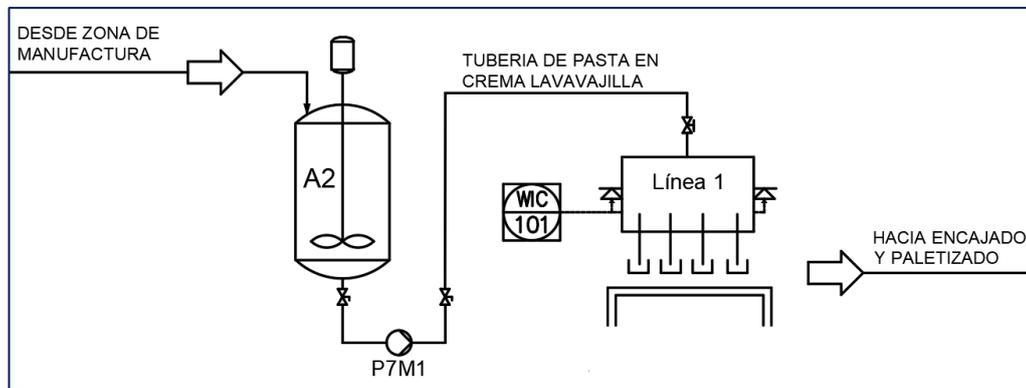
### 5.1.1.2. Etapa de envasado

La etapa de envasado comienza con el trasvase de la pasta en crema lavavajillas hacia el tanque de almacenamiento A2, el cual se observa en el diagrama P&ID mostrado en la figura 5.2. El trasvase tiene una duración de 8 minutos debido a la alta viscosidad (36,529 centipoise cP) que presenta el producto terminado, esta información se extrajo de la hoja de especificación técnica presentada en el anexo 2.

El tanque almacenamiento A2 contiene un agitador de 2 velocidades, el cual evita que el producto que está en contacto con las paredes se solidifique debido al contacto de la pasta con las paredes metálicas, las cuales sirven de medio para disipar el calor; para controlar que el producto dentro del tanque de almacenamiento se encuentre en óptimas condiciones para el envasado se tiene un termómetro, el cual debe indicar una temperatura de 45 a 60 °C. Debido a que a temperaturas inferiores de 45 °C la viscosidad comienza a incrementar por valores encima de los 40,000 cP hasta llegar al estado sólido.

**Figura 5.2**

Diagrama P&ID de la zona de envasado.



Fuente: Elaboración propia.

Para realizar el trasvase de producto hacia la tolva de la envasadora de producto se utiliza la bomba de desplazamiento positivo P7M1 la cual se encuentra conectada a la base del tanque de almacenamiento.

El principio de envasado de la línea de llenado es del tipo volumétrico. Como se muestra en la figura 5.3, la línea de llenado cuenta con 3 componentes principales, los cuales son: La tolva de la máquina llenadora, los 4 pistones dosificadores y las 4 boquillas de salida de producto.

**Figura 5.3**

*Línea 1 de llenado de pasta en crema lavavajillas.*



Fuente: Elaboración propia.

La dosificación del producto hacia los potes, se da mediante el desplazamiento del producto almacenado a través de las 4 boquillas dosificadoras; este producto del accionamiento de los 4 pistones que se ubican en la parte superior de la tolva. Por lo que cada ciclo de expansión y contracción del pistón es equivalente a dosificar 4 potes de pasta lavavajillas.

Los operadores realizan la regulación de la longitud de carrera de los pistones para graduar la cantidad de producto a dosificar dentro de los envases, esto debido a que las máquinas envasadoras están diseñadas para dosificar producto en distintos formatos, los cuales se observan en la tabla 5.1, en la cual se observa los distintos formatos y las velocidades de dosificación.

**Tabla 5.1**

*Velocidad de producción de los formatos producidos por la máquina envasadora.*

Formato	Velocidad de producción		
	Potes por minuto	Kilogramos por hora	Kilogramos por segundo
180 g	105	1137	0.31
360 g	58	1263	0.35
500 g	54	1620	0.45
900 g	45	2445	0.67
1000 g	45	2707	0.75

Fuente: Elaboración propia.

Este proceso se repite de manera constante hasta que la tolva de la llenadora se encuentre sin producto, lo cual se detecta mediante el transmisor de peso de la tolva WIC101 mostrado en la figura 5.4.

**Figura 5.4**

*Transmisor de peso de la línea de llenado 1.*



Fuente: Elaboración propia.

El proceso para realizar la reposición del producto es realizado de manera manual, por lo cual se dispone de 1 operador que realiza el encendido manual de la bomba P7M1 cuando la cantidad de producto dentro de la tolva es menor a 50 kg y realiza el apagado de la misma, cuando la cantidad de producto llega a los 480 kg.

### **5.1.1.3. Recopilación de información**

Como se mencionó en las secciones 5.1.1.1 y 5.1.1.2 de la presente investigación, las principales variables a recopiladas para el presente análisis son las mostradas en la tabla 5.2.

**Tabla 5.2***Variables críticas dentro del proceso de producción.*

<b>Tipo de variable</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor esperado</b>	<b>Unidades</b>
	pH de pasta neutralizada	8.45 - 9.05	adimensional
Variables de entrada	Peso de la tolva	0 - 500	Kilogramos
	Temperatura del producto	45 - 60	Grados Celsius
Variables de salida	Peso del pote envasado	0 - 1000	Gramos

Fuente: Elaboración propia.

La fuente de información de las variables consideradas fueron las siguientes:

- Mediciones de pH en el laboratorio de calidad de la empresa.
- Transmisor de peso de la tolva envasadora.
- Indicador de temperatura dentro del tanque de almacenamiento.
- Balanza digital móvil para el cálculo del peso de los potes a la salida de la envasadora.

Estas variables se recopilaron por medio del formato presentado en el plan de trabajo de la presente investigación y durante el proceso de producción de la fórmula sapolio tutifruti en la presentación de 500 g. La data recolectada se presenta en el anexo 1 del presente documento.

## 5.2. Procesamiento de data

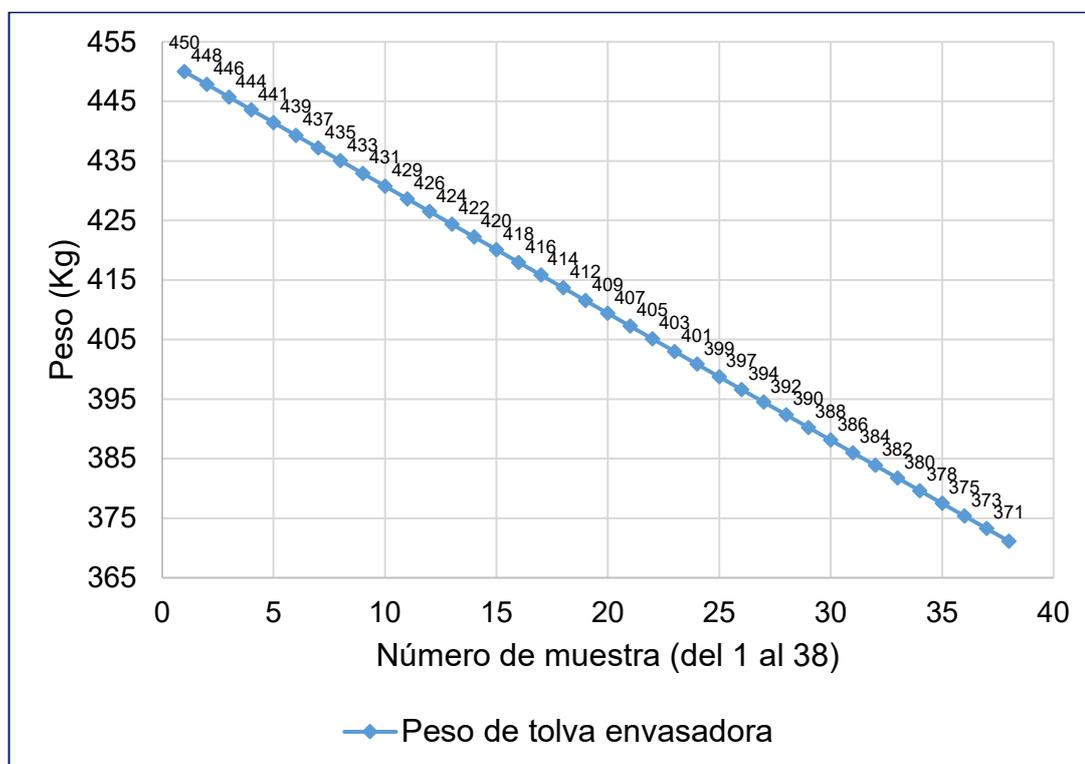
La información fue recopilada de manera manual y se trasladó al software Excel para realizar el análisis de tendencia y correlación entre variables. La información se encuentra en el anexo 1 al final del presente documento.

En las figuras 5.5 y 5.6 se observa la tendencia de 2 de las 3 variables de entradas respectivamente.

La primera variable fue el peso de la tolva de la envasadora, la cual presenta una tendencia al descenso durante el periodo de medición, lo cual permitirá validar el grado de correlación con las variables de salida.

**Figura 5.5**

*Valor del peso de la tolva envasadora durante el periodo de medición.*

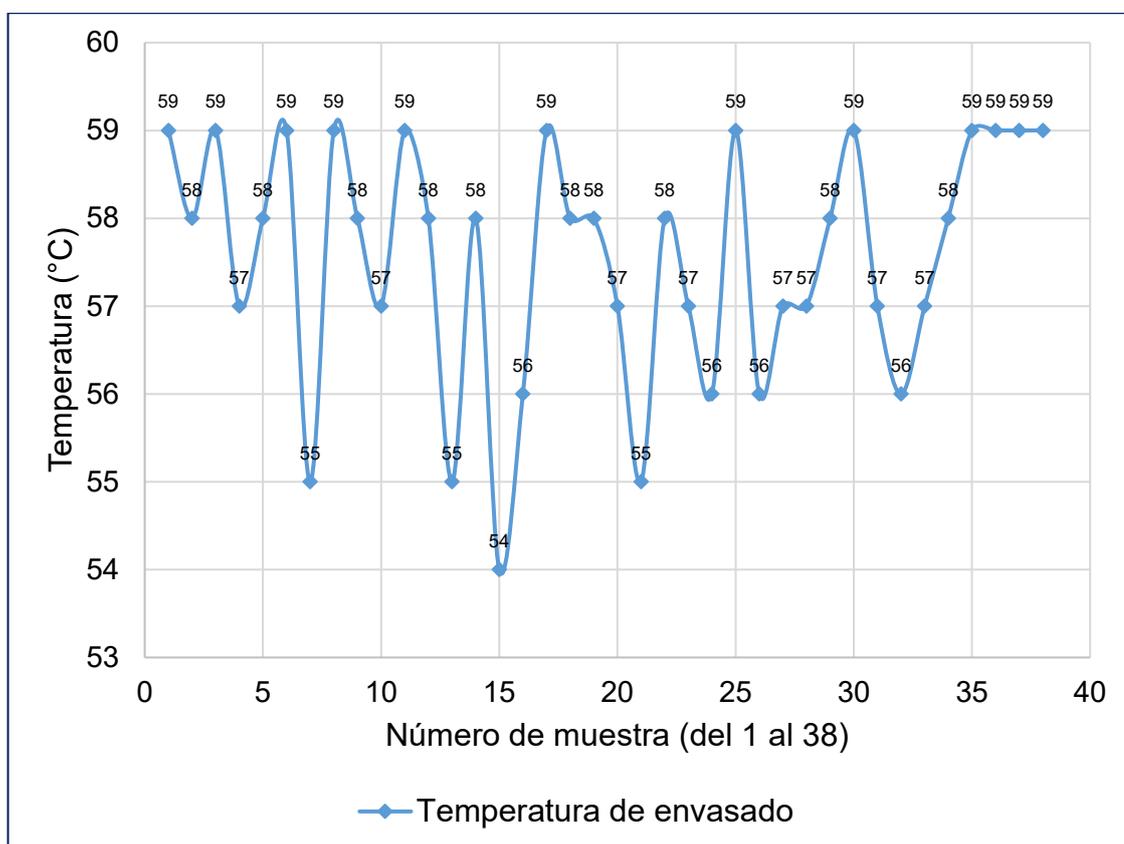


Fuente: Elaboración propia.

La segunda variable fue la temperatura de envasado del producto, como se observa en la figura 5.6, los valores de esta variable fueron uniformes a lo largo de la medición esto debido a que la variable se mantuvo en el rango de 56 a 59 °C.

**Figura 5.6**

*Tendencia del peso de la temperatura de envasado durante el periodo de medición.*



Fuente: Elaboración propia.

La tercera variable a medir fue el pH de la pasta neutralizada, el cual es el componente principal del producto. Sin embargo, de acuerdo con las

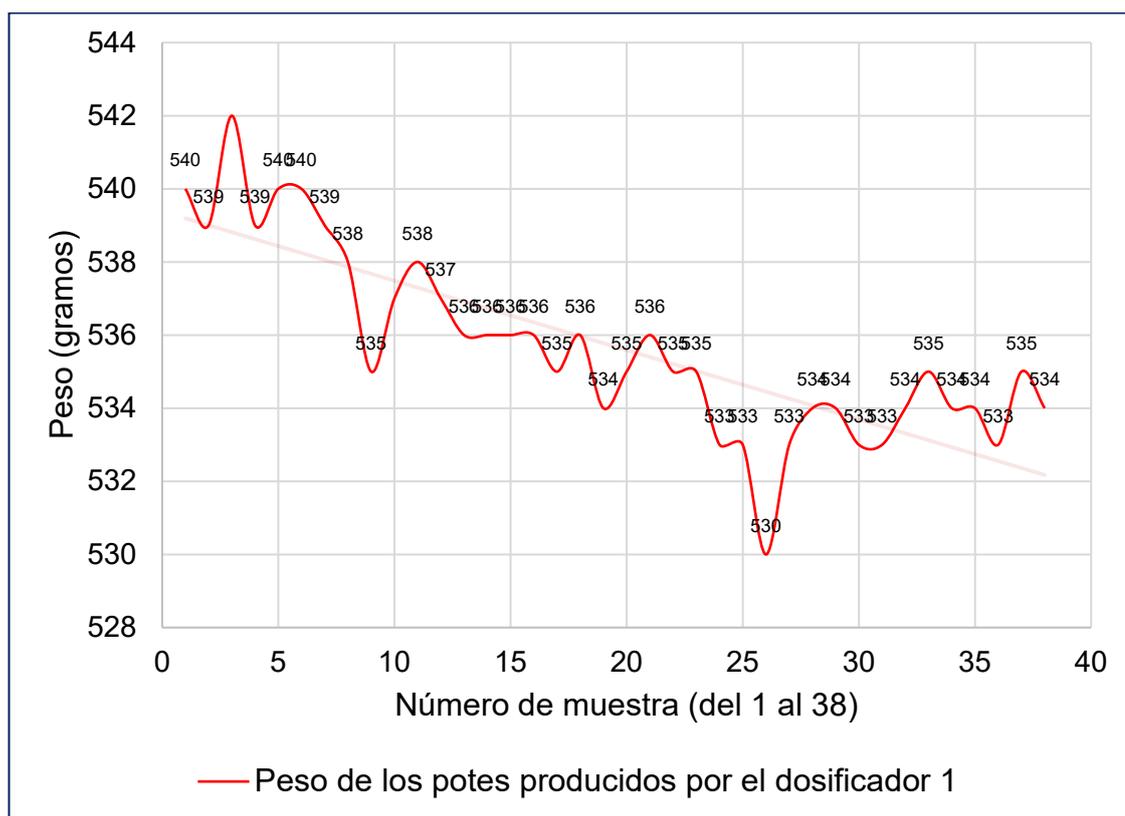
mediciones el nivel de pH se mantuvo constante a lo largo de toda la medición y con un valor igual a 10.5.

Luego del realizar el análisis de las variables de ingreso, se procede a presentar la tendencia de las variables de salida.

En las figuras 5.7, 5.8, 5.9 y 5.10 se presenta la tendencia de pesos de los distintos potes llenados por cada una de las 4 boquillas de dosificación.

### Figura 5.7

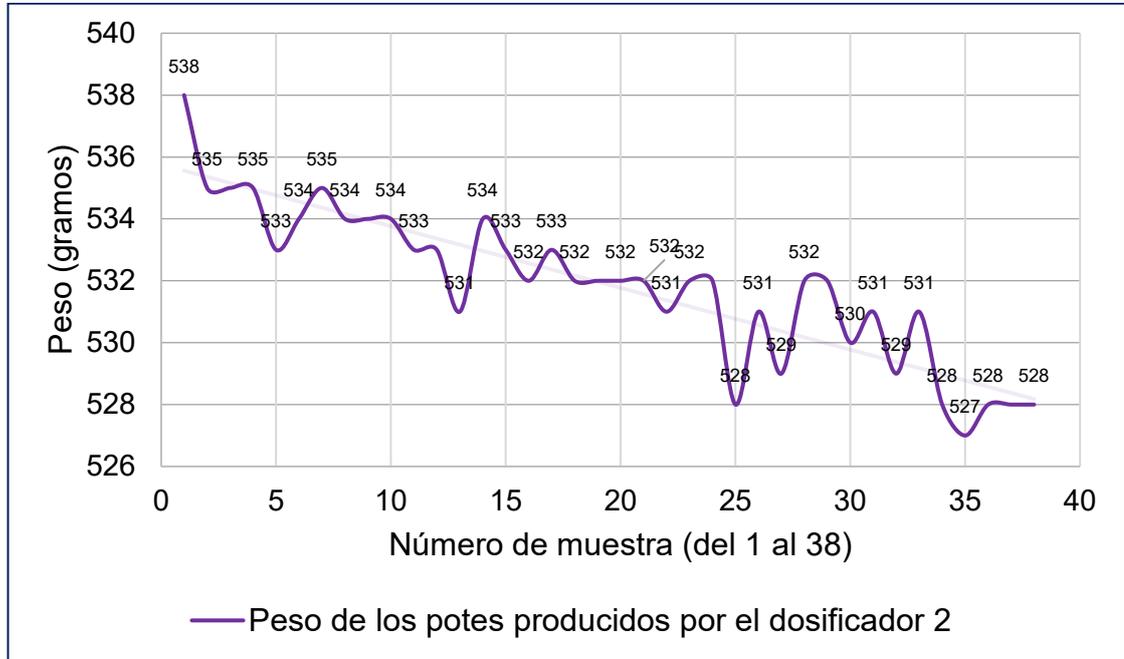
*Tendencia de pesos de los potes en el dosificador 1.*



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 5.8**

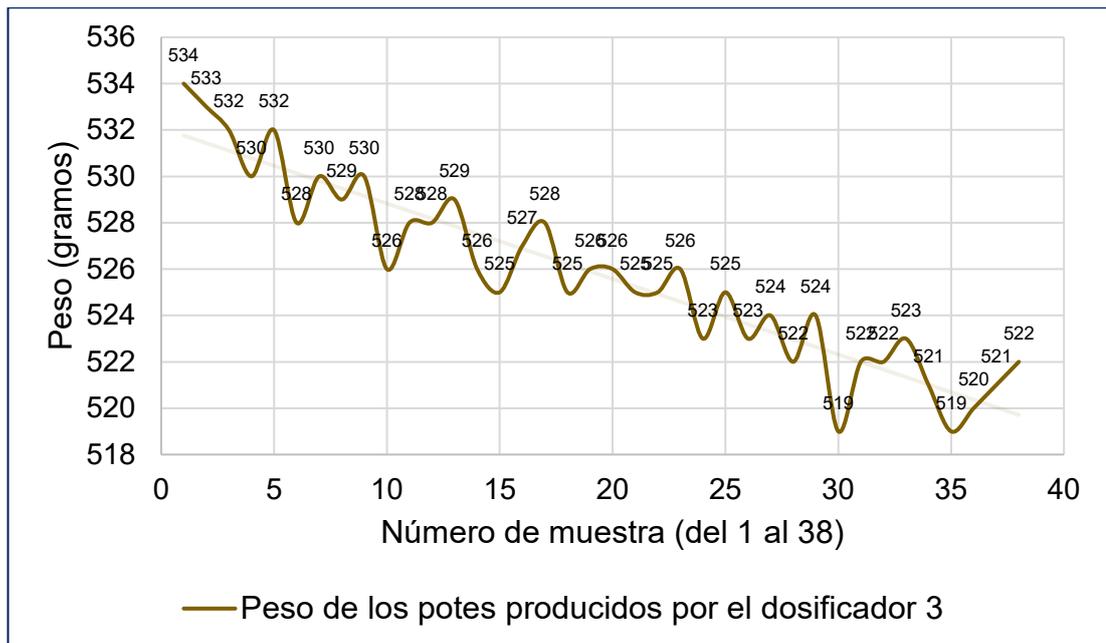
*tendencia de pesos de los potes en el dosificador 2.*



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 5.9**

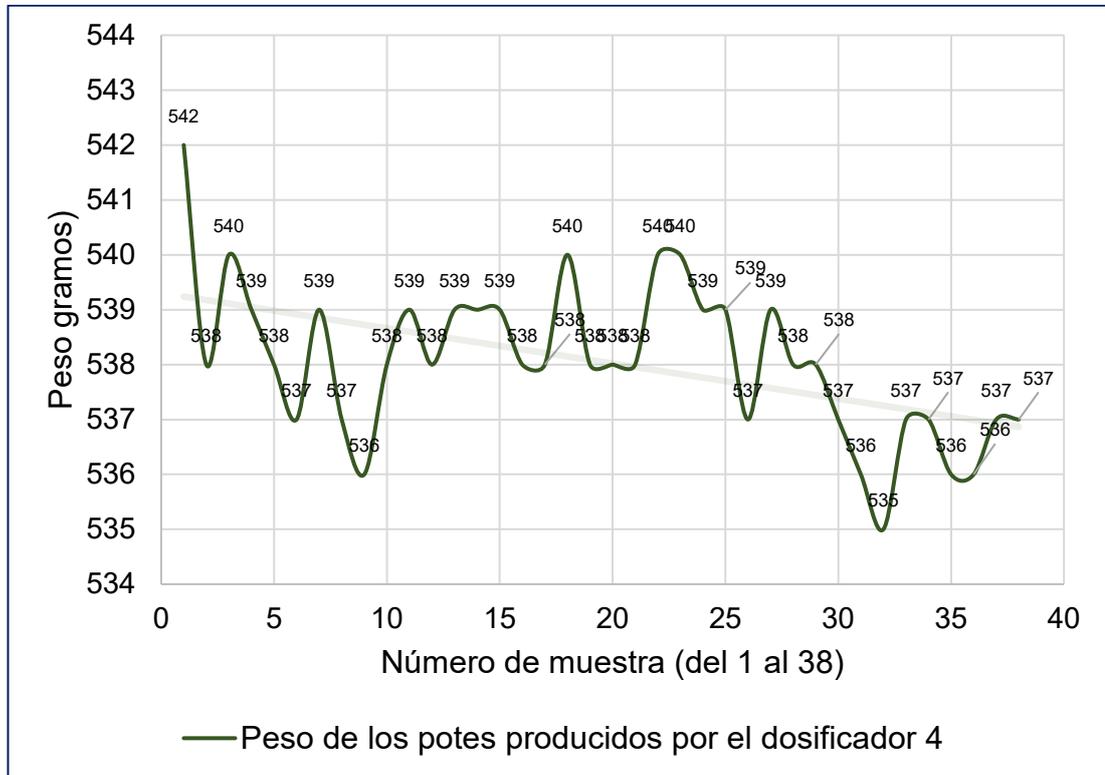
*Tendencia de pesos de los potes en el dosificador 3.*



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 5.10**

*Tendencia de pesos de los potes en el dosificador 4.*



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a lo presentado en las figuras anteriores, a lo largo de la medición la tendencia de cada una de las variables medidas es al descenso.

Para validar de manera objetiva el grado de correlación entre las variables de ingreso y de salida, se presenta en la tabla 5.3 los niveles de correlación que existe entre todas las variables involucradas en la medición.

**Tabla 5.3***Niveles de correlación entre variables medidas.*

	pH Pasta	Temperatura	Peso Tolva	Peso Dosificador 1	Peso Dosificador 2	Peso Dosificador 3	Peso Dosificador 4
pH Pasta	1.00	-0.17	0.28	0.11	0.26	0.16	0.12
Temperatura	-0.17	1.00	-0.04	0.13	-0.10	0.01	-0.07
Peso Tolva	0.28	-0.04	1.00	<b>0.82</b>	<b>0.89</b>	<b>0.94</b>	<b>0.50</b>
Peso Dosificador 1	0.11	0.13	0.82	1.00	0.73	0.81	0.42
Peso Dosificador 2	0.26	-0.10	0.89	0.73	1.00	0.84	0.52
Peso Dosificador 3	0.16	0.01	0.94	0.81	0.84	1.00	0.53
Peso Dosificador 4	0.12	-0.07	0.50	0.42	0.52	0.53	1.00

Nota: El color de las celdas representa qué tan cercano a 1 es el nivel de correlación entre las variables del eje vertical con las variables del eje horizontal, si el valor es más cercano a 1 la celda es más oscura y si el valor es más cercano a 0 la celda será más clara. Fuente: elaboración propia.

Luego de lo presentado en la tabla 5.3, se concluye:

- El nivel de correlación entre la variable pH Pasta y los pesos dosificados en los potes no excede de 0.26, lo cual se interpreta como un nivel de correlación débil. Asimismo, debido a que dicho valor por lo regular permanece constante durante todo el proceso productivo se concluye que es irrelevante con respecto a la variabilidad del peso de los potes.

- El nivel de correlación entre la variable temperatura y los pesos dosificados no excede de 0.13 lo cual se interpreta como un nivel de correlación débil.
- El nivel de correlación entre la variable peso de la tolva y los pesos dosificados presenta un valor entre 0.5 y 0.94, lo que se considera un nivel de correlación fuerte. Lo cual indica que la variabilidad del peso de la tolva o el nivel de este afecta de manera directa el peso dosificado en cada uno de los potes.

Finalmente, se concluye que el peso de la tolva dosificadora es la variable que presenta mayor grado de correlación con la variabilidad de peso en los potes dosificados. Con lo cual el objetivo que se planteó fue diseñar un algoritmo de control para el peso de la tolva de la envasadora, esto para consecuentemente y bajo lo analizado en el presente capítulo permita controlar el peso del producto llenado en los potes de pasta lavavajillas.

### **5.3. Diseño del algoritmo de control**

De lo analizado en los capítulos anteriores, se concluye que el principal enfoque para tener un control del peso de los productos dosificados por la máquina envasadora es el control del peso de la tolva envasadora, esto basado en el alto nivel de correlación existente entre estas 2 variables.

En el presente capítulo se presentó el análisis del modelo matemático de la envasadora, los algoritmos de control propuestos para el control de peso y finalmente se realizó la comparación de estos para definir la propuesta que presente los mejores indicadores.

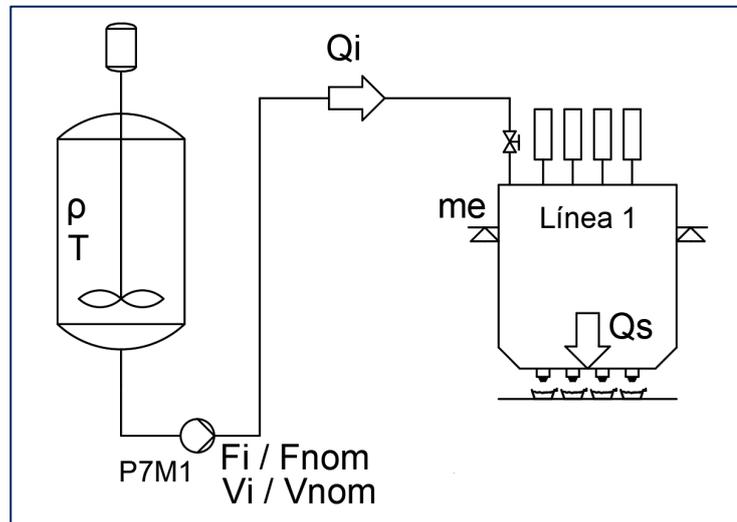
#### **5.3.1. Modelado matemático del sistema de dosificación**

Luego del análisis de la data se identificó la necesidad de tener un peso constante dentro de la tolva, con la finalidad de asegurar una dosificación homogénea.

Con la finalidad de plantear el algoritmo de control óptimo para realizar el control de peso, se procede a realizar el modelamiento matemático del proceso de llenado de las envasadoras. Para lo cual se presenta el diagrama de flujo del proceso mostrado en la figura 5.11.

**Figura 5.11**

*Representación gráfica del proceso de envasado.*



Fuente: Elaboración propia.

Luego se procedió a definir las variables presentadas en la tabla 5.4, las cuales son parte del modelado matemático de la máquina envasadora:

**Tabla 5.4**

*Listado de variables involucradas en el modelamiento matemático.*

Símbolo	Descripción	Unidades	Límites
me	Peso de la tolva envasadora	kg	0 – 500
Qi	Caudal másico de ingreso	m <sup>3</sup> /h	-
Qs	Caudal másico de salida	m <sup>3</sup> /h	-
Qnom	Caudal nominal de la bomba	LPM	-
Vnom	Velocidad nominal de la bomba	RPM	-
Vi	Velocidad de giro de la bomba	RPM	-
Fnom	Frecuencia nominal de la bomba	Hz	-
Fi	Frecuencia del motor	Hz	0 – 60
ρ	Densidad del producto (a 45 °C)	kg/L	-
T	Temperatura del producto	°C	0 - 50

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo al diagrama de flujo presentado en la figura 5.11, se planteó las ecuaciones de balance de materia dentro de la tolva de la envasadora. La cual se establece bajo el principio de conservación de materia: la diferencia entre el flujo másico de ingreso y el flujo másico de salida de producto dentro de la tolva, es equivalente a la variación del peso de la tolva envasadora en el tiempo, lo cual se representa mediante la ecuación 5.1.

$$\frac{\Delta m_e}{\Delta t} = Qi - Qs \quad (5.1)$$

Adicionalmente, cuando el análisis tiende a analizarse para intervalos muy cortos de tiempo, la tasa de cambio será igual a la derivada del peso de la tolva con respecto al tiempo. Lo cual se representa en la ecuación 5.2.

$$\frac{\Delta m_e}{\Delta t} = \frac{dm_e}{dt} = \dot{m}_e = Qi - Qs \quad (5.2)$$

Lo cual se reduce la siguiente ecuación 5.3.

$$\dot{m}_e = Qi - Qs \quad (5.3)$$

Posterior a esto, se realizó el análisis del caudal de ingreso a la envasadora, tomando como referencia el marco teórico descrito en la presente investigación sobre la bomba de desplazamiento positivo P7M1 la cual se utiliza como parte del proceso.

El flujo entregado por parte de la bomba de desplazamiento positivo depende de la velocidad de giro del motor la cual a su vez depende de la frecuencia de

la alimentación eléctrica del motor. Por lo cual se plantea la siguiente ecuación

5.4:

$$\frac{Q_i}{Q_{nom}} = \frac{V_i}{V_{nom}} = \frac{F_i}{F_{nom}} \quad (5.4)$$

Obteniendo finalmente una relación entre la frecuencia de alimentación eléctrica del motor y el caudal másico entregado por la bomba, obteniéndose finalmente la ecuación 5.5:

$$Q_i = \frac{Q_{nom} * F_i}{F_{nom}} \quad (5.5)$$

Luego de analizar el caudal de ingreso, se realizó el análisis del caudal de salida. Este caudal presenta distintos valores, debido a que la máquina envasadora produce distintos formatos los cuales tienen distintas velocidades de producción (para mayor detalle revisar la tabla 5.1).

Por consiguiente, de las ecuaciones 5.2 y 5.5 se presenta la ecuación final 5.6.

$$\dot{m}_e = \frac{Q_{nom} * F_i}{F_{nom}} - Q_s \quad (5.6)$$

Finalmente, se presenta el modelo matemático reemplazando las variables por los valores numéricos obtenidos de la data técnica de la bomba, lo cual se presenta en el anexo 3 y las variables de la tabla 5.5.

**Tabla 5.5**

*Valores numéricos del proceso de envasado.*

<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Q <sub>s</sub>	Caudal másico de salida	1100 - 2500	KGH
		60	LPM
Q <sub>nom</sub>	Caudal nominal de la bomba	5400	KGH
		1.5	KGS
V <sub>nom</sub>	Velocidad nominal de la bomba	57	RPM
F <sub>nom</sub>	Frecuencia nominal de la bomba	60	Hz
ρ	Densidad del producto (a 45 °C)	1.5	kg/L

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, luego de reemplazar los valores numéricos de la tabla 5.5 en la ecuación 5.6 se obtuvo la ecuación 5.7.

$$\dot{m}_e = \frac{1.5 * Fi}{60} - Q_s \quad (5.7)$$

Como parte final del modelamiento, se concluye:

- El modelamiento matemático presenta 3 variables.
- La variable de control de frecuencia eléctrica que alimenta el motor (Fi), la cual permite realizar el control del peso de la envasadora (m<sub>e</sub>).
- La variable de caudal de salida (Q<sub>s</sub>), la cual presenta un valor variable la cual está determinada según el tipo de presentación que se esté envasando en la línea de producción. Dichos valores fueron presentados en la tabla 5.1.

- La variable de peso de la envasadora ( $m_e$ ), la cual es la variable de proceso que se controlará por la acción de la variable del control.

Como parte del desarrollo de los algoritmos de control, se estableció realizar el diseño del modelo utilizando el valor de  $Q_s$  igual a 0.75 Kilogramos por segundo. Sin embargo, con el objetivo de realizar una correcta selección del algoritmo de control que brinde el mejor desempeño se evaluó la respuesta del sistema frente a los distintos valores que toma la variable  $Q_s$ .

### **5.3.2. Diseño de algoritmos de control**

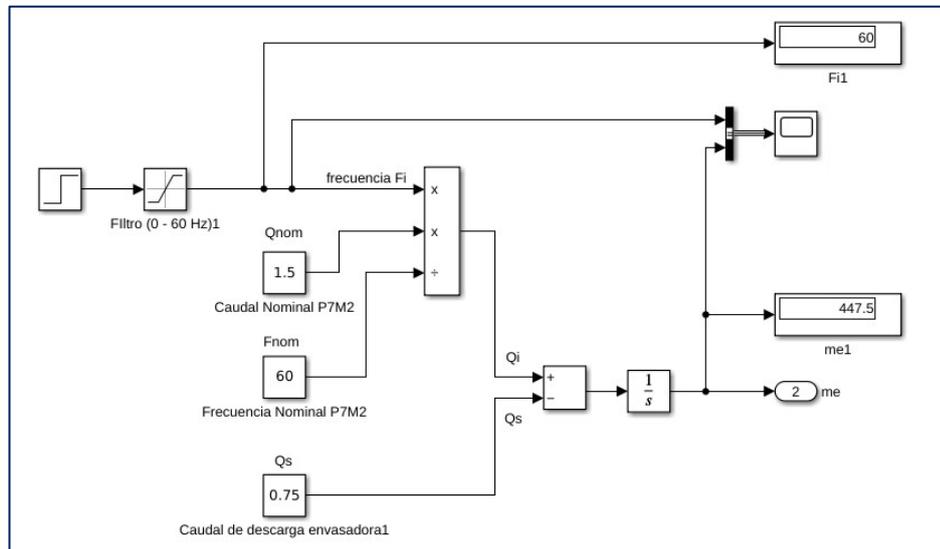
A continuación, se listan los principales algoritmos de control que se analizaron con la finalidad de diseñar el controlador del peso de la tolva envasadora de la envasadora:

- Control proporcional, integral y derivativo (PID).
- Control difuso.

Para realizar las comparaciones y simulaciones, se utilizó el software SIMULINK y el modelo matemático de la envasadora obtenida en el acápite 5.3.1 del presente documento (ver ecuación 5.7). La representación en el software simulink se muestra en la figura 5.12.

**Figura 5.12**

*Diseño del modelo matemático del proceso en el software simulink.*



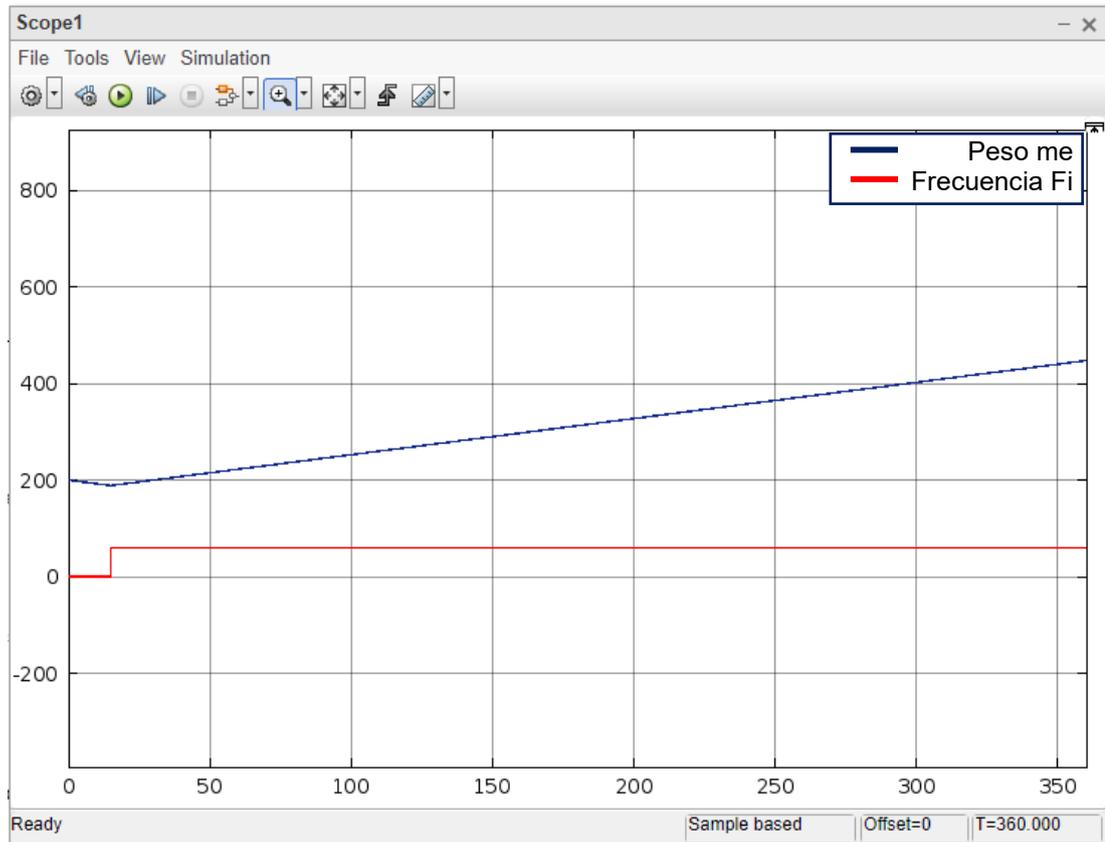
Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, se presenta en la figura 5.13 la respuesta del sistema frente a las siguientes condiciones:

- Step de valor 200 y a los 15 segundos.
- Valor inicial de peso me igual a 200.
- Tiempo de simulación 360 segundos.

**Figura 5.13**

*Respuesta al escalón del modelo desarrollado en simulink.*



Fuente: Elaboración propia.

### 5.3.2.1. Diseño de algoritmo de control PID

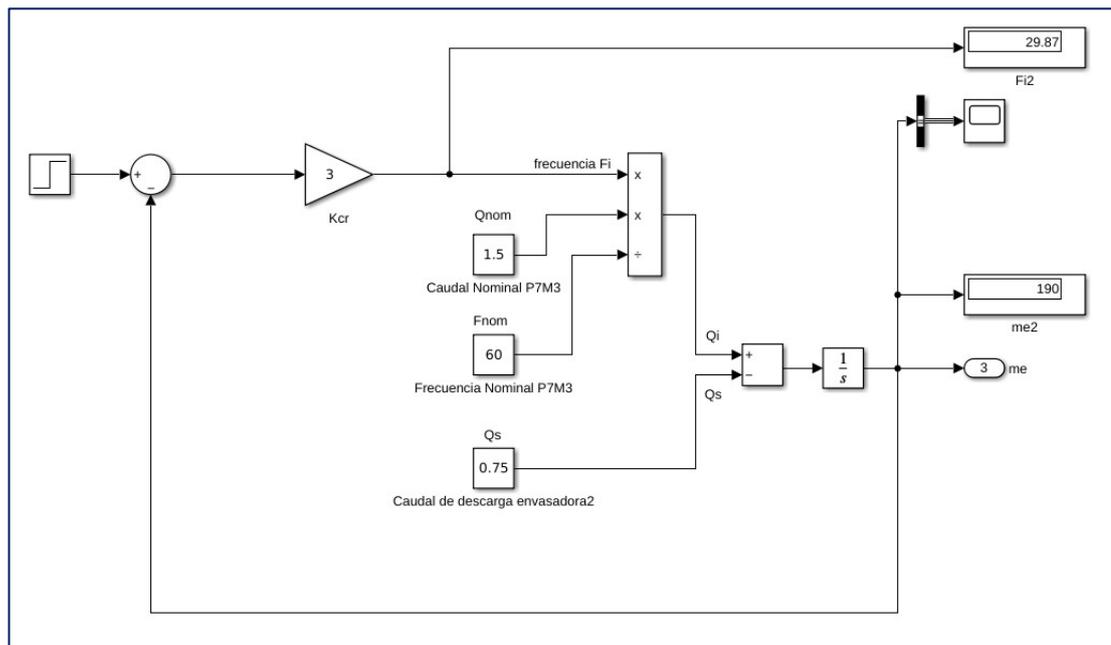
Para el diseño del controlador PID, se utilizó el método de Ziegler-Nichols a lazo cerrado. Esto debido a que la respuesta del sistema no logra estabilizarse ante la entrada escalón, lo cual se presentó en la figura 5.13.

Como primer paso para el diseño del controlador PID, se realizó la búsqueda del  $K_{cr}$  el cual permita obtener una respuesta oscilatoria sostenida ante una entrada escalón.

Para esto se realizó el modelado mostrado en la figura 5.14 en el software simulink:

**Figura 5.14**

*Modelo con retroalimentación y control proporcional Kcr.*

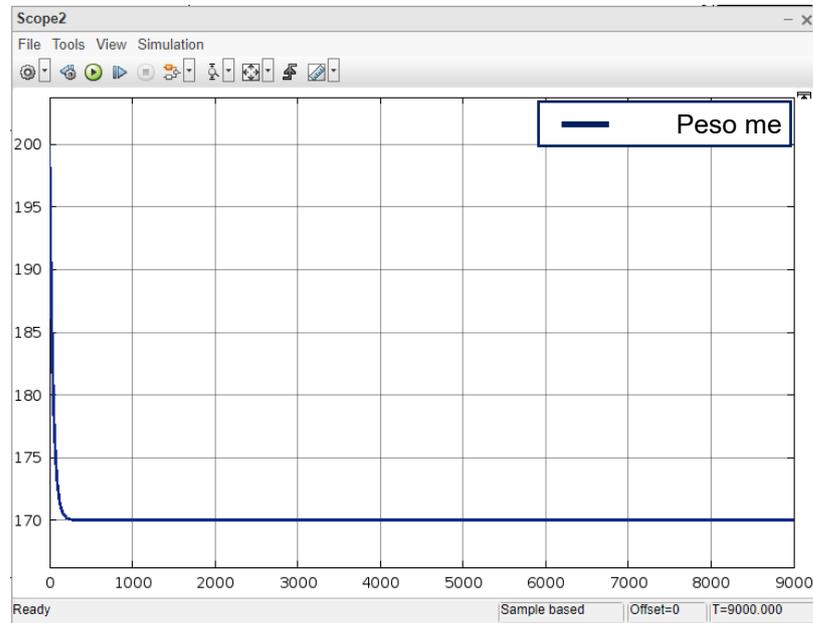


Fuente: Elaboración propia.

Para calcular el valor de Kcr, se realizó la evaluación de la respuesta frente a distintos valores. En las figuras 5.15, 5.16, 5.17, 5.18 y 5.19 se presenta la respuesta del sistema ante los valores 1, 2.3, 2.5, 10 y 50 para la ganancia proporcional crítica Kcr respectivamente.

**Figura 5.15**

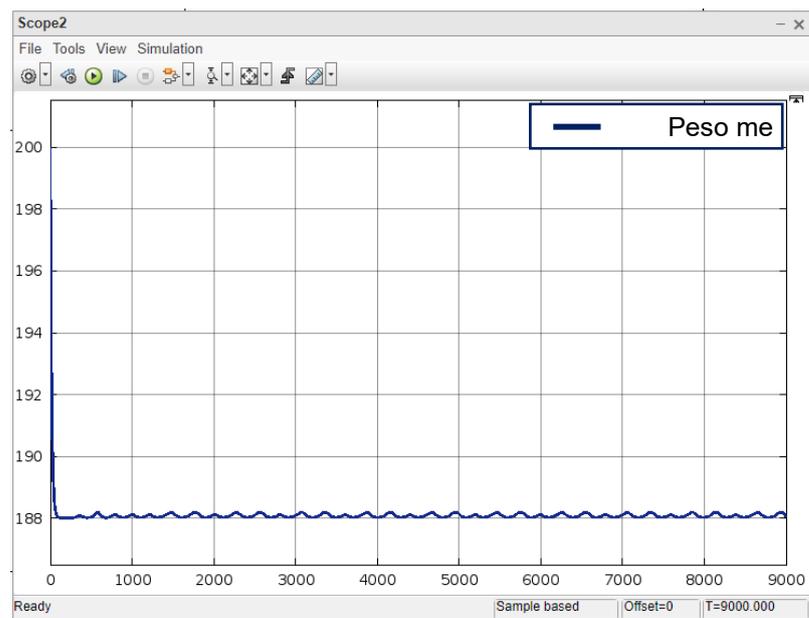
*Respuesta del sistema ante un  $K_{cr} = 1$ .*



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 5.16**

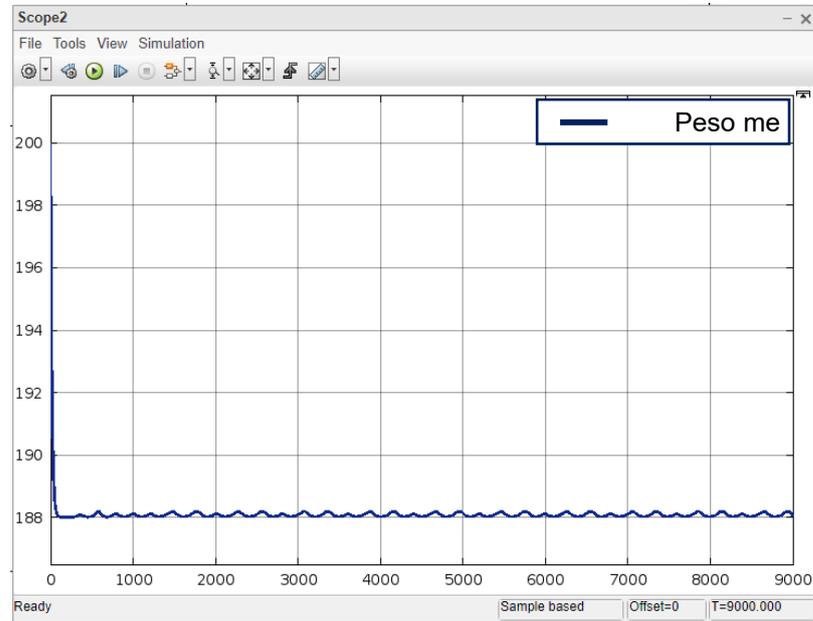
*Respuesta del sistema ante un  $K_{cr} = 2.3$ .*



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 5.17**

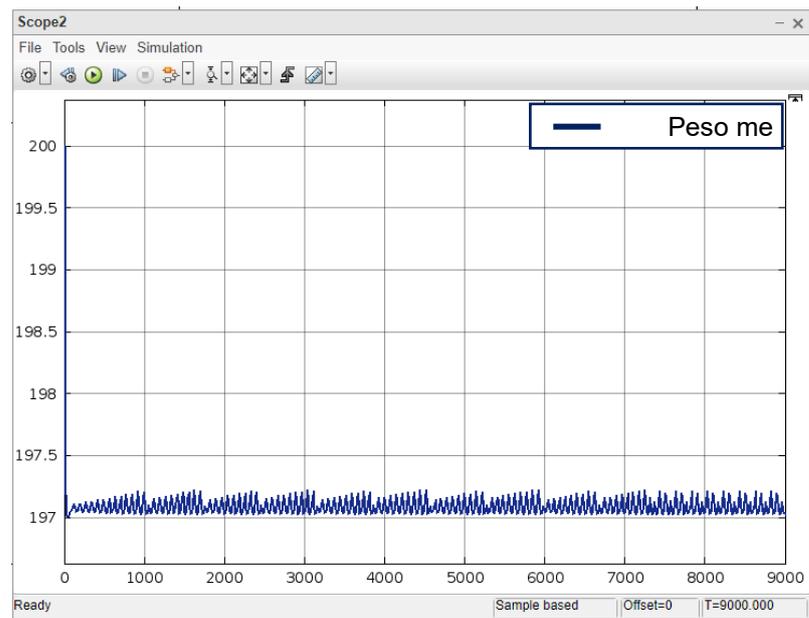
*Respuesta del sistema ante un  $K_{cr} = 2.5$ .*



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 5.18**

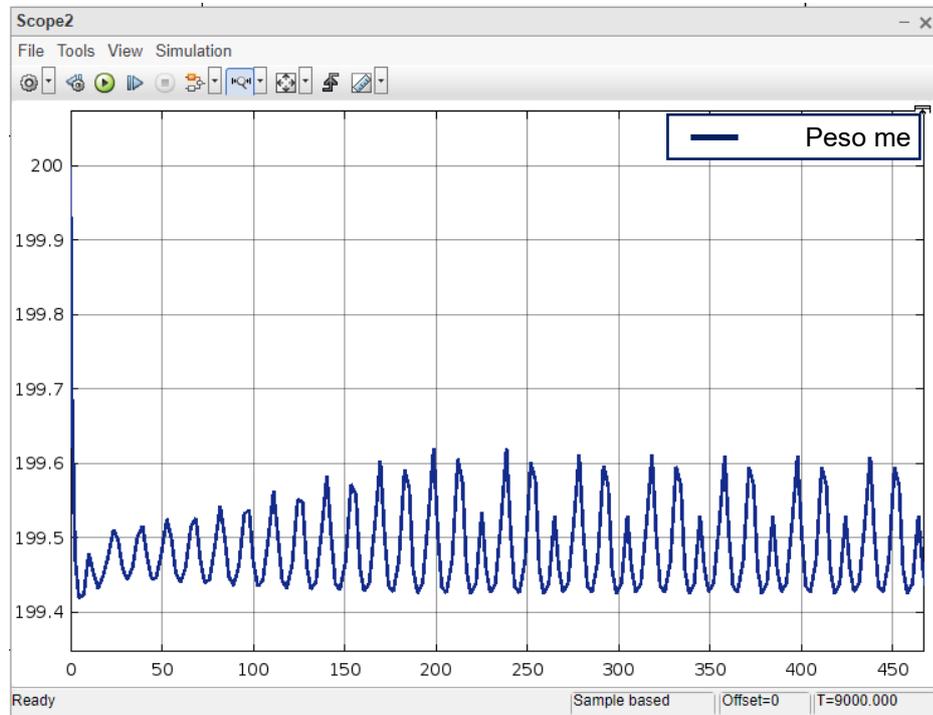
*Respuesta del sistema ante un  $K_{cr} = 10$ .*



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 5.19**

*Respuesta del sistema ante un  $K_{cr} = 50$ .*



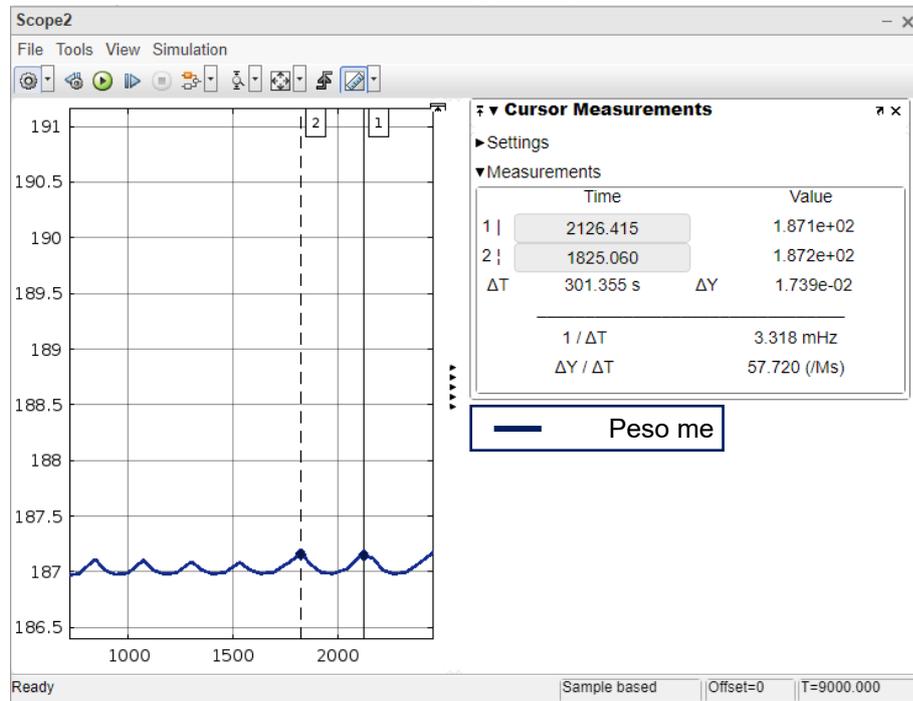
Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en las imágenes anteriores, cuando el  $K_{cr}$  toma valores mayores a 2.3 las oscilaciones sostenidas comenzaron a presentarse en la respuesta del sistema, por lo que el valor que se asume para el  $K_{cr}$  será 2.3.

Posterior a ello, se procede a calcular el valor del periodo de las oscilaciones sostenidas  $T_{cr}$ . En la figura 5.20 se presenta la gráfica de la respuesta, en donde se observa que el periodo crítico es de 300 segundos.

**Figura 5.20**

*Cálculo del periodo de la respuesta oscilatoria.*



Fuente: Elaboración propia.

Luego se procedió a realizar el reemplazo de los valores para calcular los valores de  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$ , los cuales se muestran en la tabla 5.6.

**Tabla 5.6**

*Valores de  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$  de un controlador PID.*

Algoritmo	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.5 \times 2.3$		
PI	$0.45 \times 2.3$	$300 / 1.2$	
PID	$0.6 \times 2.3$	$300 / 2$	$300 / 8$

Fuente: Elaboración propia.

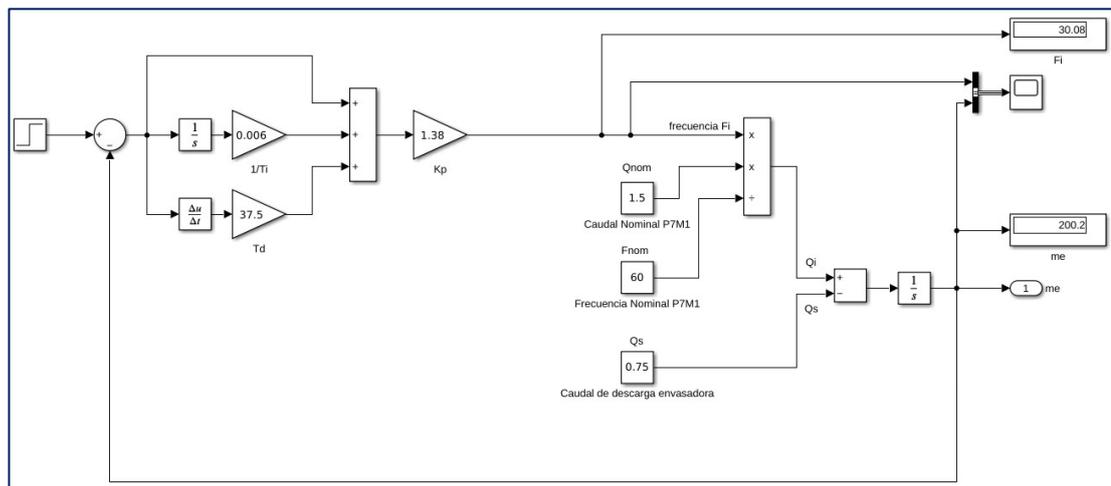
Finalmente, se obtuvieron los valores:

$$Kp = 1.38 \quad Ti = 150 \quad Td = 37.5$$

Estos valores son ingresados al programa simulink para analizar la respuesta del sistema frente al controlador PID, el modelo del sistema de control se observa en la figura 5.21.

**Figura 5.21**

*Representación de un controlador PID en el software simulink.*



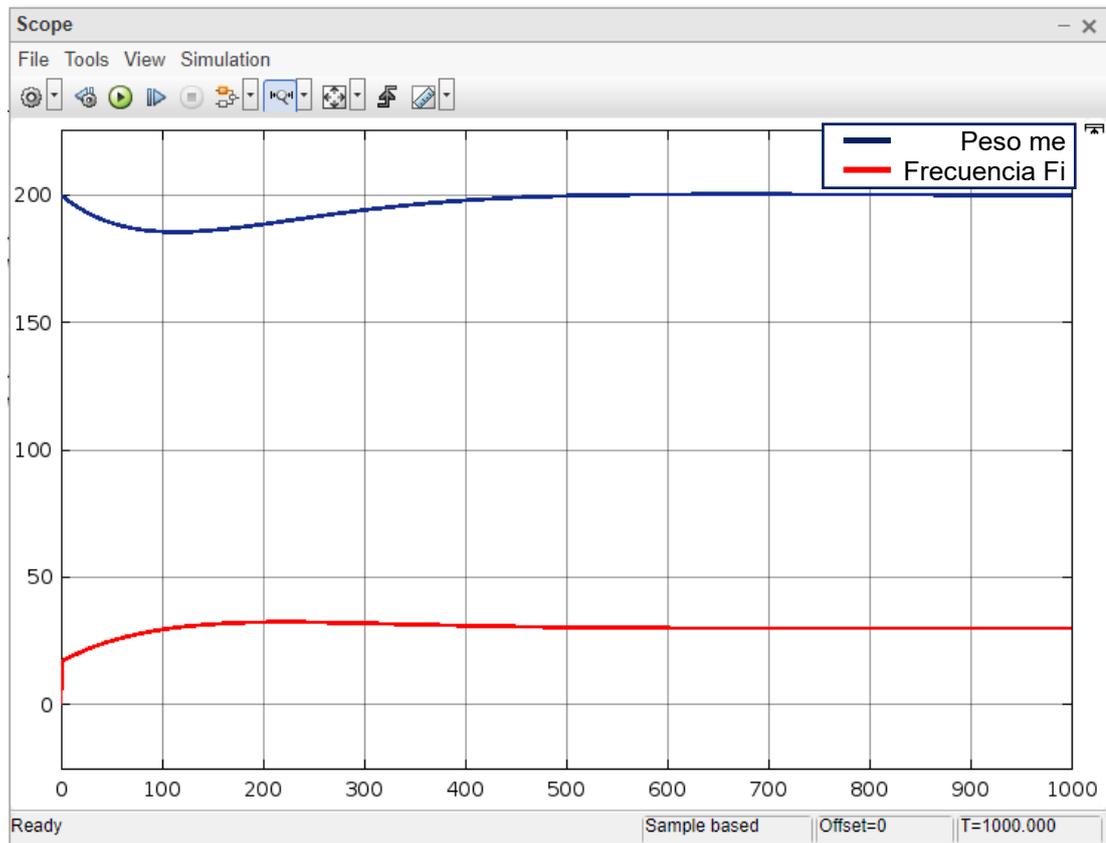
Fuente: Elaboración propia.

Para realizar la simulación de la respuesta se tomaron en consideración las siguientes condiciones:

- El step realiza el salto en el segundo 0 y el valor es de 200 Kg.
- Se asume que el peso inicial en la tolva es de 200 Kg.

**Figura 5.22**

*Respuesta del sistema ante un controlador PID.*



Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en el gráfico 5.22, la respuesta se logró estabilizar a partir de los 500 segundos aproximadamente en el valor de los 200 Kg el cual es el valor de referencia, se eliminaron los errores en estado estacionario los cuales se presentaron cuando se realizó las pruebas para hallar el valor del  $K_{cr}$ .

Adicionalmente, se observó que la frecuencia  $F_i$  no supera el valor de 60 Hz en ningún momento. Sin embargo, esto podría variar en los análisis frente a otras referencias, por lo cual se procedió a integrar un filtro para el valor de la

frecuencia dentro del modelado simulink esto debido a que según lo explicado en la tabla 5.4, el valor de la frecuencia del motor no debe exceder los 60 Hz.

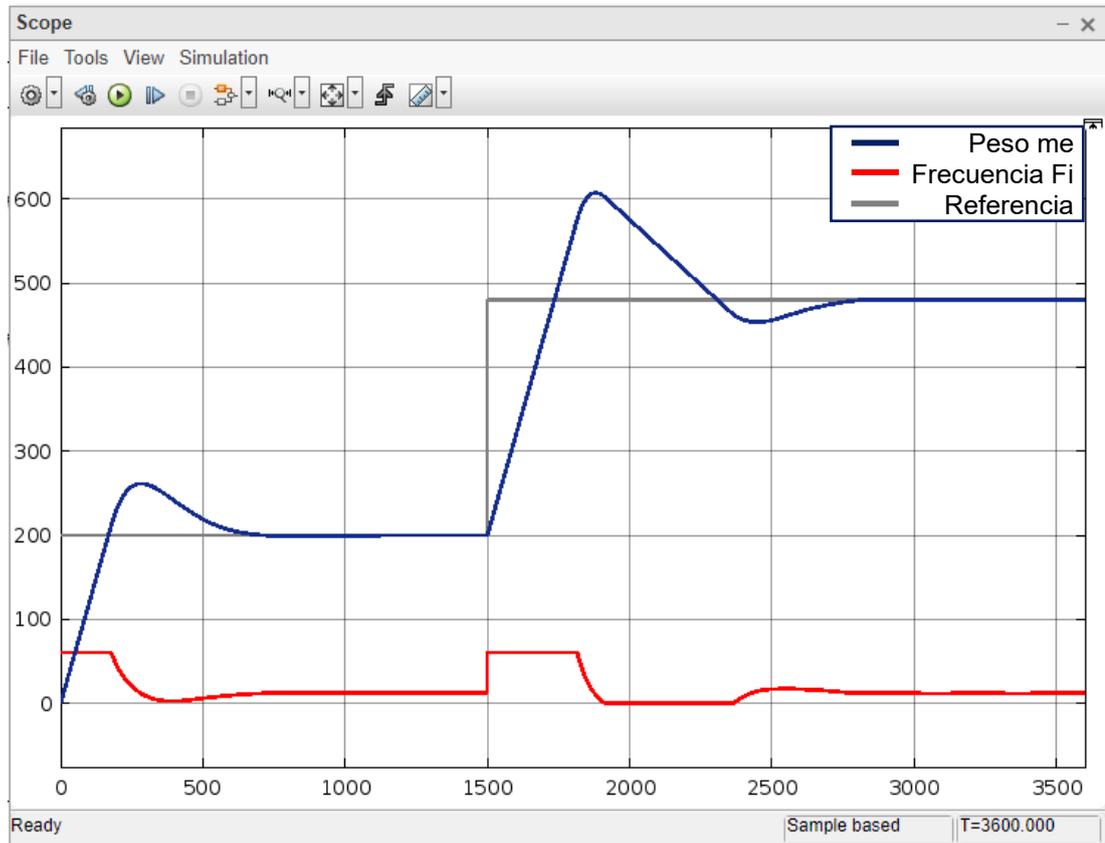
Luego, se procedió a analizar la respuesta del algoritmo de control frente a valores reales utilizados dentro del proceso:

- Entrada escalón comienza en 200 kg y luego de 1500 segundos este sube a 480 Kg.
- Peso inicial de la tolva 0 Kg.

La respuesta del sistema es la mostrada en la figura 5.23.:

**Figura 5.23**

*Respuesta del sistema ante condiciones reales de proceso.*



Fuente: Elaboración propia.

Como se observa, la respuesta del sistema alcanza un valor de 261 ante un step de 200 y un valor de 607 ante un step de 480. Lo cual muestra un sobreimpulso de 137% y 126% respectivamente. Como se presentó en la tabla 5.4, el valor de peso de la tolva está limitado como valor máximo 500 kg, motivo por el cual no es viable que el sistema responda con un sobreimpulso alto.

Por lo cual se realizó la evaluación de la respuesta ante distintos valores de ganancia integral con el fin de eliminar el sobreimpulso, obteniéndose la siguiente tabla:

**Tabla 5.7**

*Niveles de sobreimpulso obtenidos al realizar cambios en la ganancia integral  $T_i$ .*

Ti	Sobreimpulso Step 200 Kg		Sobreimpulso Step 480 Kg	
	Peso (Kg)	%	Peso	%
150	261	137%	607	126%
300	231	115%	554	115%
1000	208	104%	510	106%
2500	199	99%	492	102%
5000	196	98%	483	101%

Fuente: Elaboración propia.

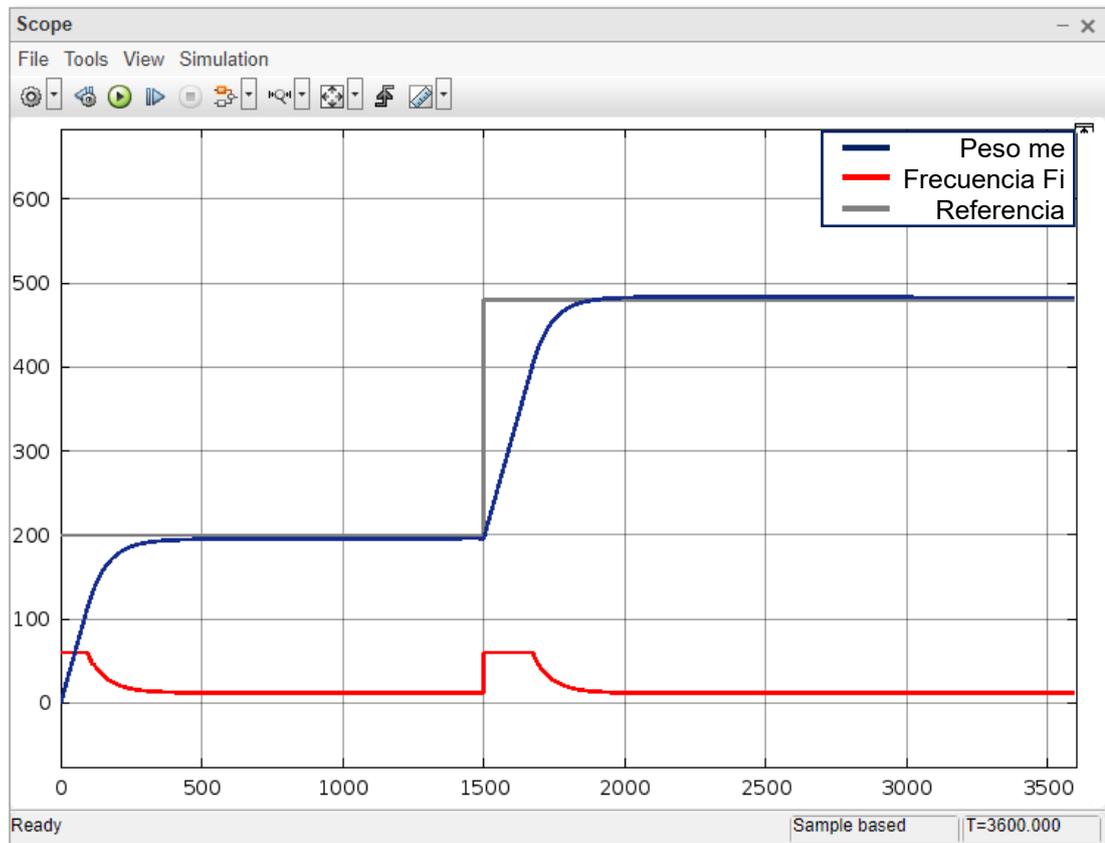
De la evaluación realizada, se concluyó que se debe realizar la modificación del valor de  $T_i$  para cumplir con el valor de sobreimpulso permisible. Por lo cual los nuevos parámetros  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$  fueron:

$$K_p = 1.38 \quad T_i = 5000 \quad T_d = 37.5$$

En la figura 5.24 se muestra la respuesta del sistema considerando los nuevos valores de las ganancias proporcional, derivativa e integral.

**Figura 5.24**

*Respuesta del sistema con el valor de  $T_i$  modificado.*



Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en el gráfico 5.24, la variable de proceso (peso me) alcanza el valor de 480 kg a los 380 segundos, sin embargo, debido a que la ganancia integral ha disminuido el tiempo necesario para eliminar el error en estado estacionario ha superado los 500 segundos, incluso superando los 2500 segundos, que se tenía con los parámetros anteriores que se evaluaron en el gráfico 5.23.

Finalmente, se concluye que los parámetros para el controlador PID, serán:

$$K_p = 1.38 \quad T_i = 5000 \quad T_d = 37.5$$

Con estos valores definidos para el controlador PID, se procedió a realizar el análisis de la respuesta del sistema frente a los distintos valores de la variable  $Q_s$  (ver tabla 5.1).

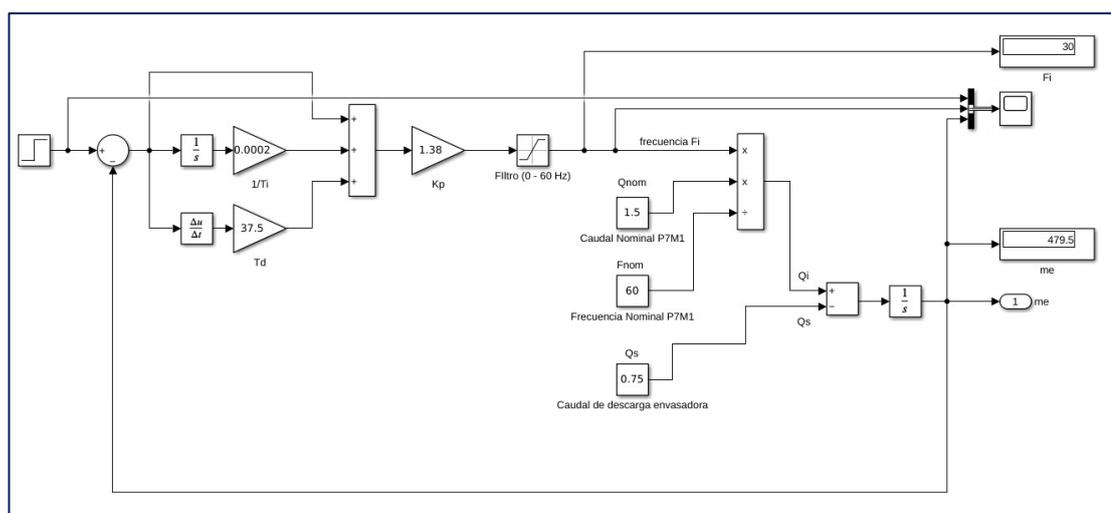
Para ello se presenta la respuesta ante 3 casos:

- Cuando la variable  $Q_s$  toma su máximo valor.

Para ello, se define el valor de  $Q_s = 0.75 \text{ Kg/s}$ , el cual es la condición de dosificación más exigente por el alto consumo de flujo de salida. Luego, se define la referencia inicial a  $200 \text{ Kg}$ , para luego cambiar dicho valor a  $480 \text{ Kg}$  a los  $1500$  segundos.

**Figura 5.25**

*Modelado del sistema con controlador PID y  $Q_s=0.75 \text{ Kg/s}$ .*

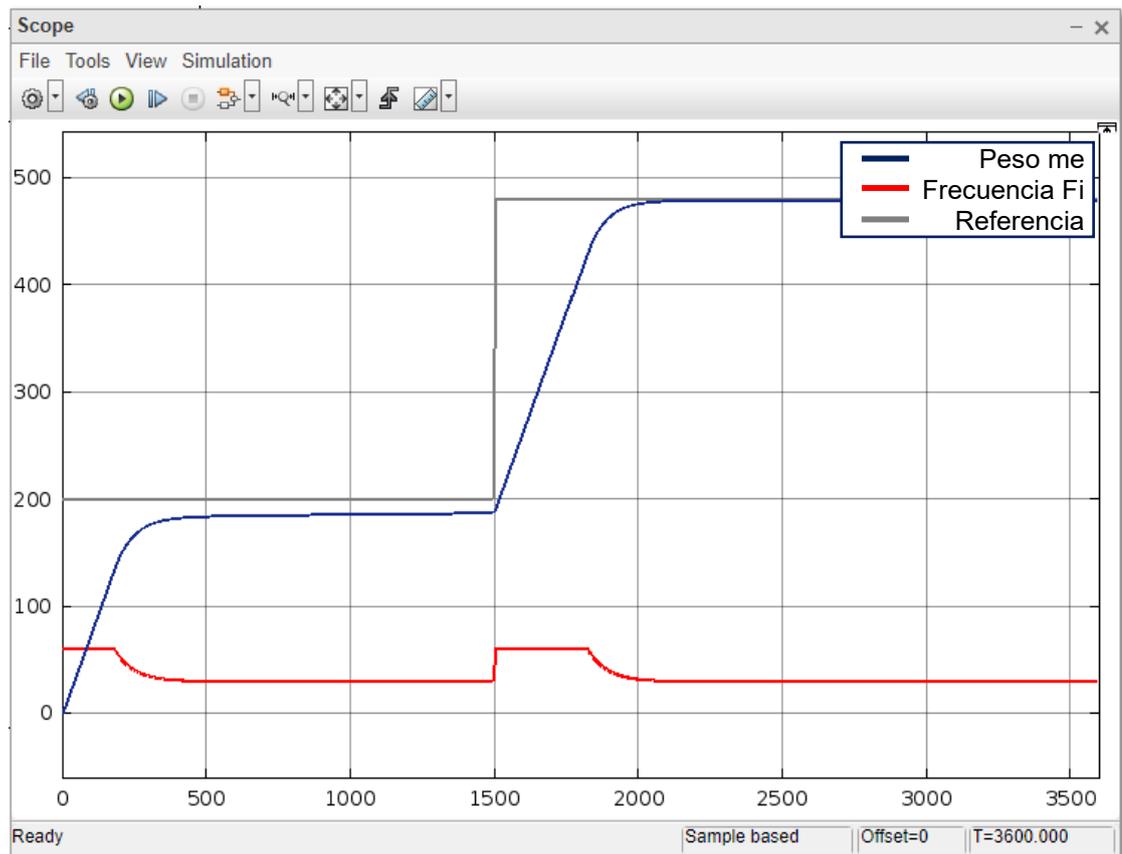


Fuente: Elaboración propia.

Luego, se presenta la respuesta del sistema en la figura 5.26.

**Figura 5.26**

*Respuesta del controlador PID para el valor de  $Q_s = 0.75 \text{ Kg/s}$ .*



Fuente: Elaboración propia.

En la respuesta se observa, que el sistema no llega a alcanzar la referencia de 200 Kg dentro de los primeros 1500 segundos, además presenta un error en el estado estacionario de  $-14 \text{ Kg}$  con un nivel de sobreimpulso de 0 Kg.

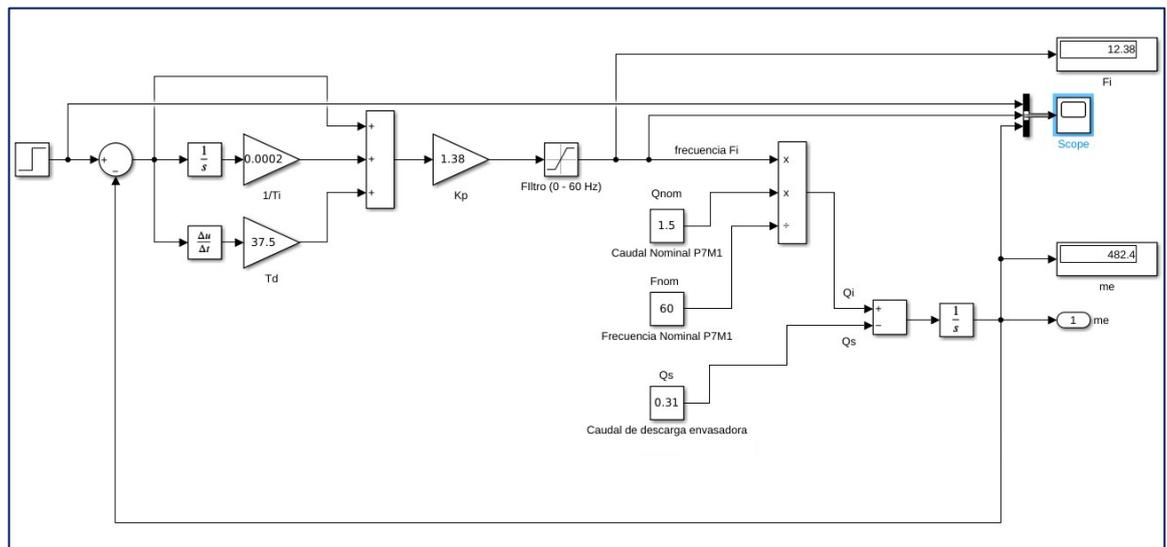
Finalmente, cuando la referencia cambia al valor de 480 Kg, este valor es alcanzado luego de 650 segundos y presenta un error en el estado estacionario de  $-0.6 \text{ Kg}$  con un nivel de sobreimpulso de 0 Kg.

- Cuando la variable  $Q_s$  toma su mínimo valor.

Para ello, se define el valor de  $Q_s = 0.31 \text{ Kg/s}$ , el cual es la condición de dosificación menos exigente por el bajo consumo de flujo de salida. Luego, se definió la referencia inicial a 200 Kg, para luego cambiar dicho valor a 480 Kg a los 1500 segundos.

**Figura 5.27**

*Modelado del sistema con controlador PID y  $Q_s=0.31 \text{ Kg/s}$ .*

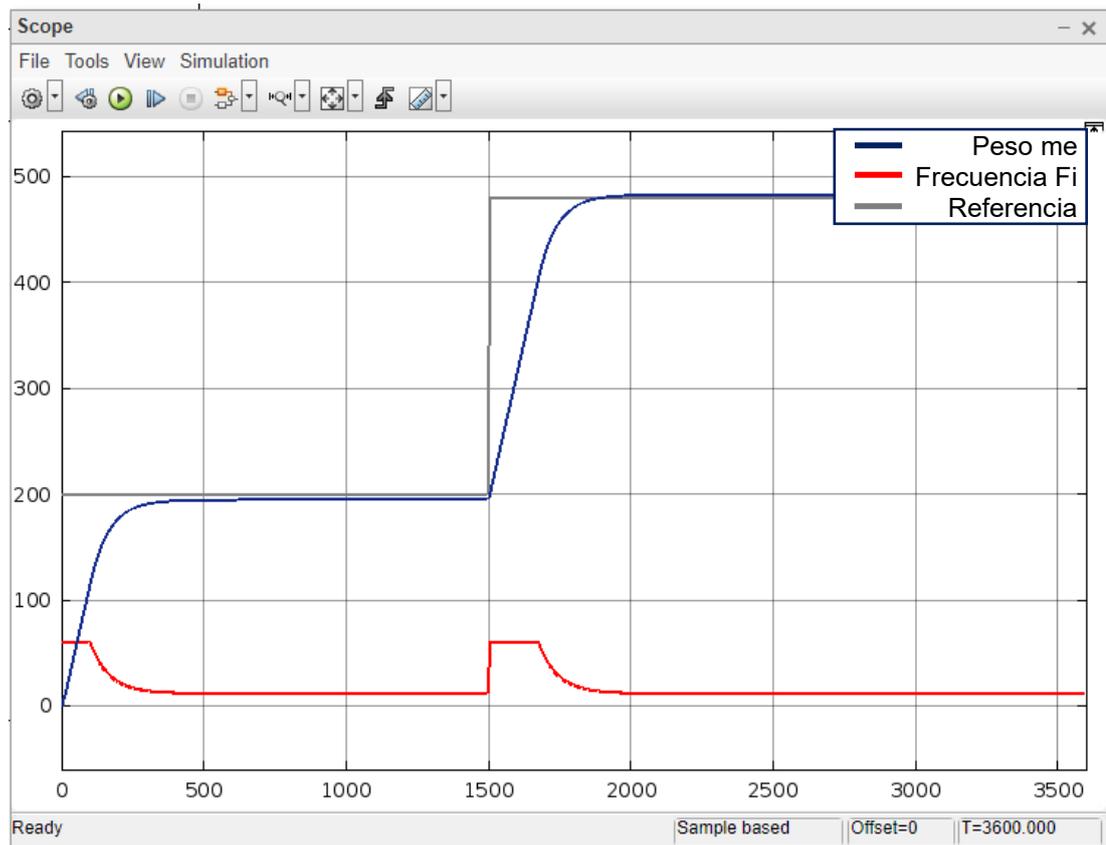


Fuente: Elaboración propia.

Luego, se presenta la respuesta del sistema en la figura 5.28.

**Figura 5.28**

*Respuesta del controlador PID para el valor de  $Q_s = 0.31$  Kg/s.*



Fuente: Elaboración propia.

En la respuesta se identifica que el sistema no llega a alcanzar la referencia de 200 Kg dentro de los primeros 1500 segundos, así como también presenta un error en el estado estacionario de  $-4.4$  Kg con un nivel de sobreimpulso de 0 Kg.

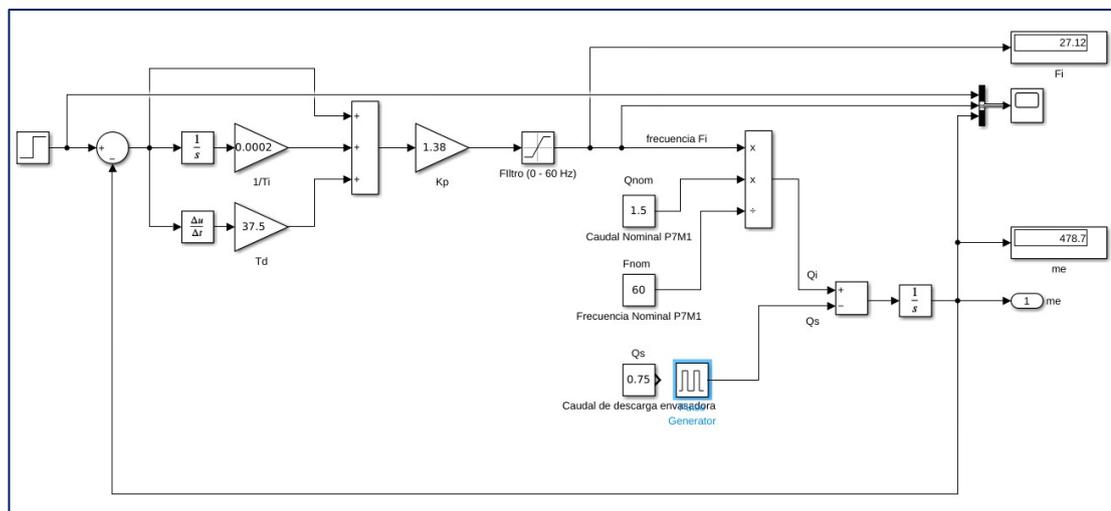
Finalmente, cuando la referencia cambia al valor de 480 Kg, este valor es alcanzado luego de 391 segundos y presenta un error en el estado estacionario de + 2.9 Kg con un nivel de sobreimpulso de + 3.1 Kg.

- Cuando la variable  $Q_s$  toma un valor fluctuante, simulando condiciones de proceso reales.

Para ello, se definió el valor de  $Q_s$  como un generador de pulsos el cual permitió simular un valor intermitente, para ello se utilizó un pulso de amplitud de 0.75 Kg/s, con un periodo de 1000 segundos y un pulso de 75% de ancho. Luego, se define la referencia inicial a 480 Kg la cual comienza en el segundo 0 de la simulación.

**Figura 5.29**

*Modelado del sistema con controlador PID y  $Q_s$  fluctuante.*

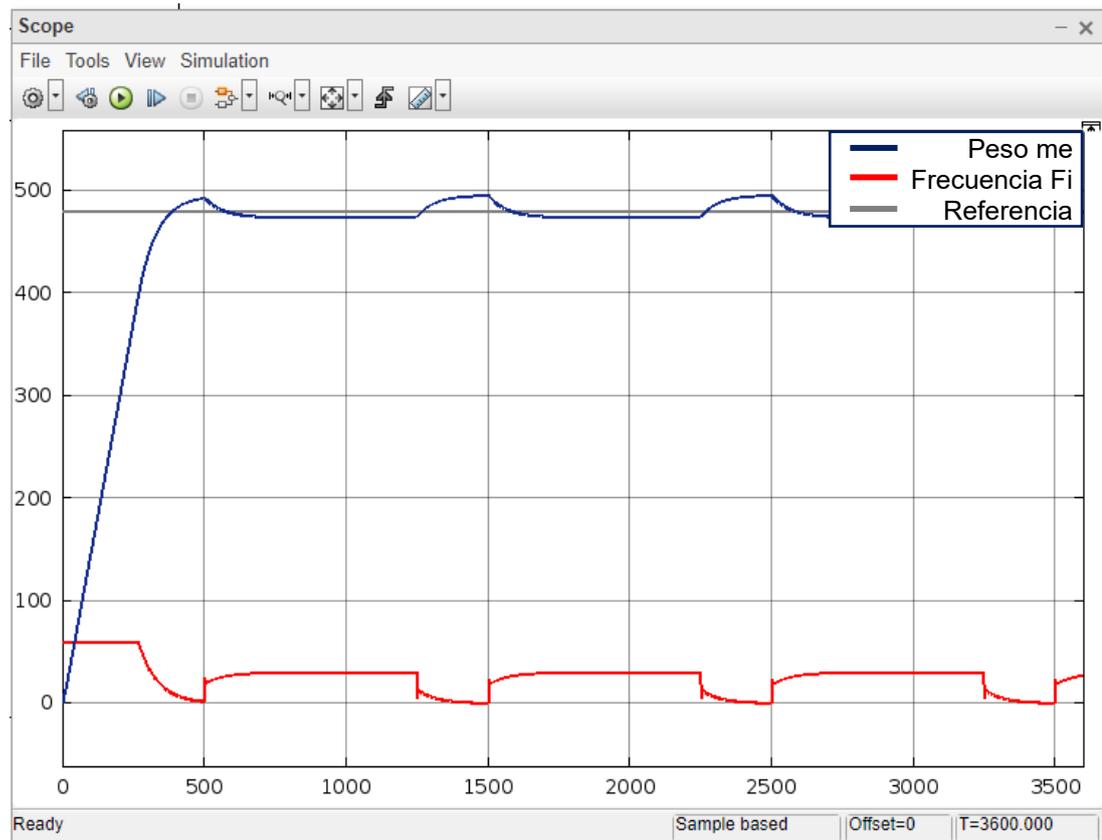


Fuente: Elaboración propia.

Luego, se presenta la respuesta del sistema en la figura 5.30 y la gráfica de la variable  $Q_s$  en la figura 5.31.

### Figura 5.30

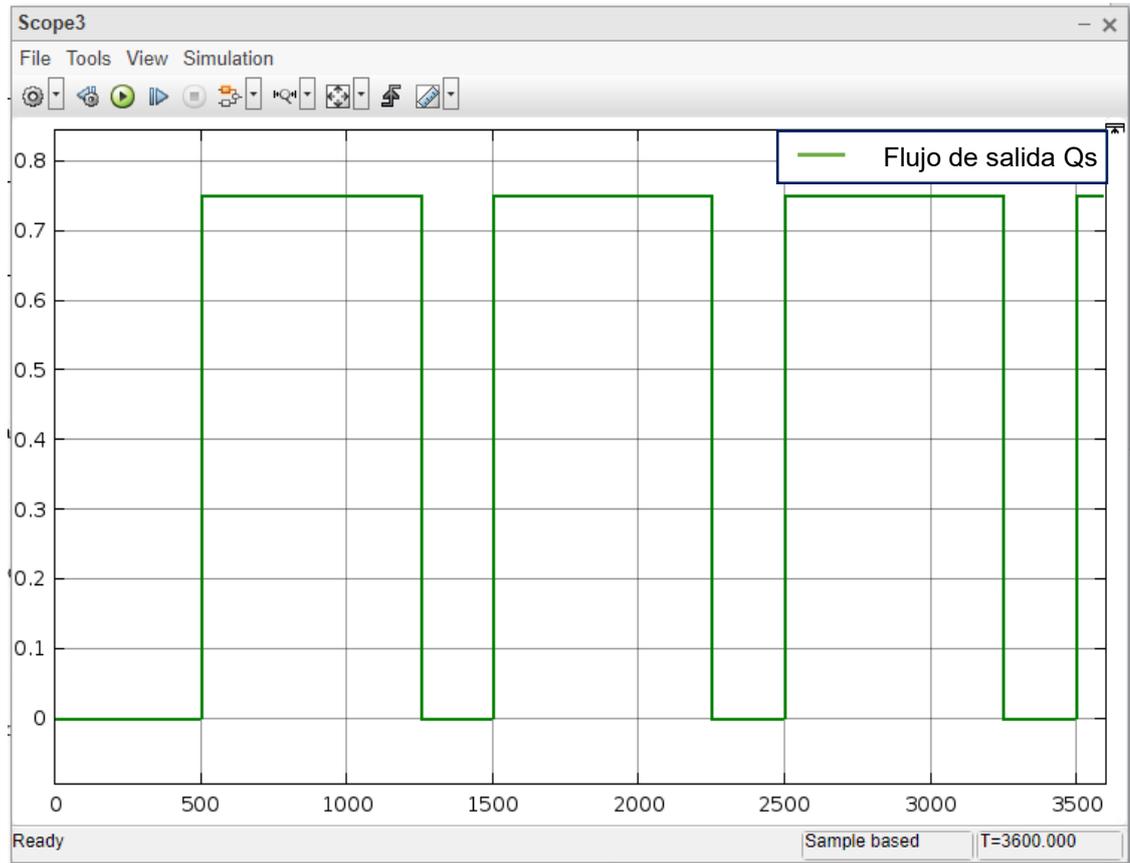
*Respuesta del controlador PID para el valor de  $Q_s$  fluctuante.*



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 5.31**

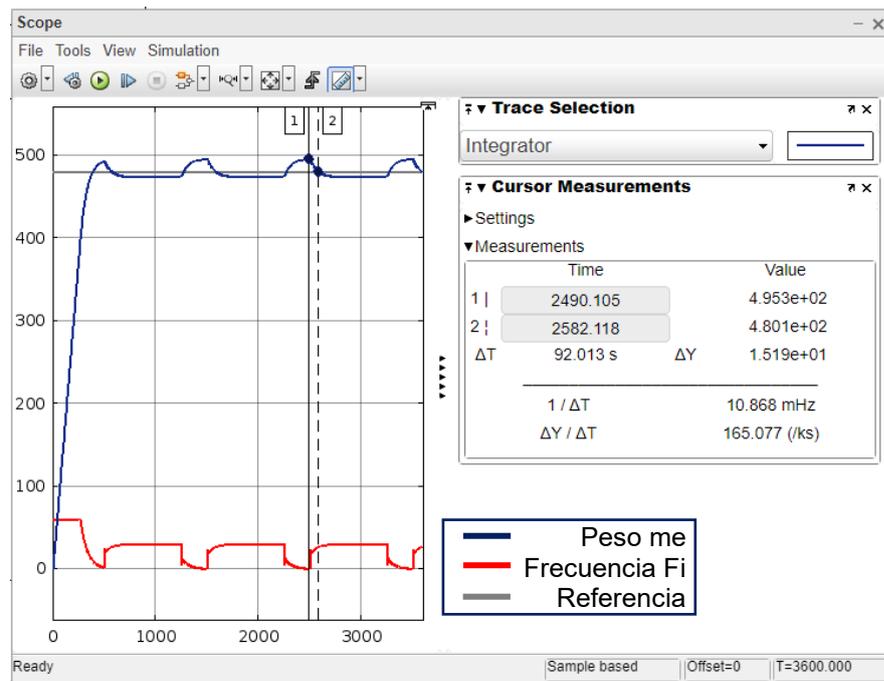
*Representación gráfica de la variable  $Q_s$  a lo largo de la simulación.*



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 5.32**

*Detalle de valores de respuesta y tiempo en la respuesta del controlador PID.*



Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en el gráfico 5.32, la respuesta del sistema frente a cambios de la variable de  $Q_s$  genera:

- Error durante el estado estacionario de 5.7 kg.
- Sobreimpulsos de 495 Kg.
- Retraso de 90 segundos para recuperar la referencia.

Por lo cual, se concluye que el controlador PID diseñado presenta buenas prestaciones ante condiciones regulares, sin embargo, cuando se les somete a condiciones reales este presenta deficiencias con el sobreimpulso y el error

en estado estacionario de la respuesta. Motivo por el cual en la presente investigación se consideró evaluar el diseño de un controlador difuso, lo cual se analizó en la siguiente parte del presente capítulo.

#### **5.3.2.2. Diseño de algoritmo de control difuso**

El diseño del presente controlador difuso se estableció como un controlador difuso del tipo MISO (multiple input and single output) de 2 entradas y 1 salida.

La primera entrada que se consideró relevante para el proceso es el nivel de error del sistema, esto debido a que es el parámetro a controlar y dependiendo del rango en el que se encuentre este, la respuesta debe incrementarse o disminuir en mayor o menor medida.

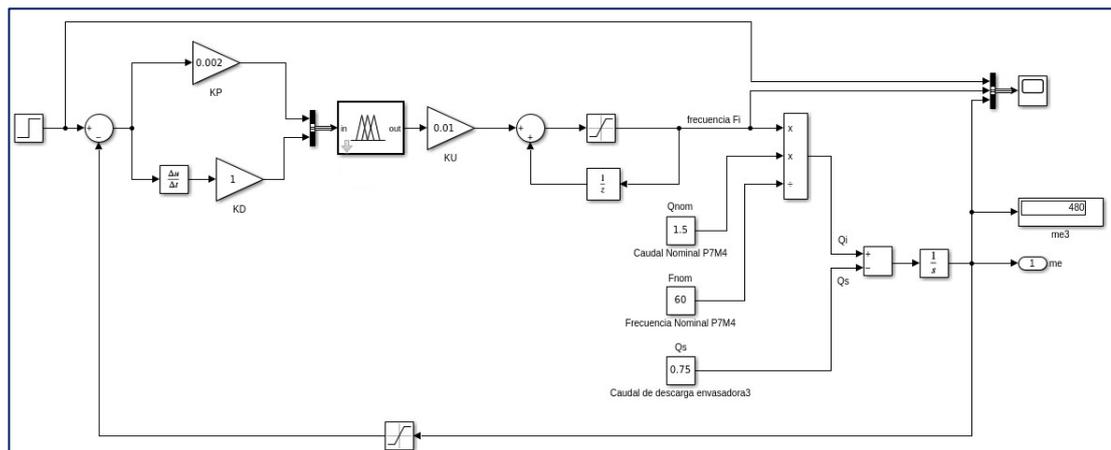
Por otro lado, debido a la importancia de la velocidad con la que se debe llegar al estado estacionario y debido a las fluctuaciones que se tiene presente en la variable  $Q_s$ , el cual depende de la presentación que se está produciendo, se considera la derivada del error como un factor relevante para definir la señal de salida.

Finalmente, se definió como variable de salida la razón de cambio de la variable frecuencia, esto debido a que definir la variable de salida como la razón de cambio de la frecuencia y no como la frecuencia ( $F_i$ ), permite que el controlador sea robusto ante cambios dentro del modelo matemático, lo cual sucede en el modelo matemático de la presente investigación, el cual presenta cambios en la variable  $Q_s$  y no linealidades producto de los límites impuestos a la variable  $F_i$ .

En la figura 5.33 se presenta el diagrama de bloques del controlador difuso que se diseñó con el fin de controlar la variable de proceso  $me$ .

**Figura 5.33**

*Diagrama de bloques del controlador difuso.*



Fuente: Elaboración propia.

Las constantes  $KP$ ,  $KD$  y  $KU$  son valores de escalamiento para las entradas y salida del controlador difuso.

Para el diseño del controlador difuso, se comenzó con la evaluación de los rangos de las variables: error, derivada del error y cambio de la frecuencia, esto con la finalidad de seleccionar valores adecuados para las variables  $KP$ ,  $KD$  y  $KU$ . Para ello se tomó de referencia lo mostrado en la tabla 5.4, el anexo 3 y el anexo 4.

Líneas abajo se presenta el análisis de los rangos de cada una de las variables del modelo difuso:

Para obtener los rangos en los que varía el error, se evaluó los valores más extremos de la ecuación 5.8.

$$error = referencia - m_e \quad (5.8)$$

El valor de referencia es un valor que varía desde 0 a 500 kg durante todo el proceso y el valor de peso de la tolva envasadora ( $m_e$ ) varía desde 0 a 500 kg.

Por lo que se asumirán los casos extremos del proceso:

- Valor máximo del error: Cuando la referencia es 500 kg y el valor actual del peso de la tolva de la envasadora ( $m_e$ ) es de 0 kg.

$$error_{maximo} = 500 - 0 = + 500 \text{ kg} \quad (5.9)$$

- Valor mínimo del error: Cuando la referencia es de 0 kg y el valor actual del peso de la tolva de la envasadora ( $m_e$ ) es de 500 kg.

$$error_{minimo} = 0 - 500 = - 500 \text{ kg} \quad (5.10)$$

Por lo que se concluye que la variable del error variara en el rango de  $- 500$  kg a  $+500$  kg, lo cual implica que la variable fluctúa en un rango de 1000 kg.

Luego se calculó los rangos en los que varía la derivada del error, este valor está relacionado con la velocidad de descarga de producto en la tolva cuando se comienza con el proceso de envasado de producto. Para ello se tomó como punto de partida la ecuación 5.11.

$$error = referencia - \dot{m}_e \quad (5.11)$$

La referencia es un valor constante, por lo que su derivada es igual a 0. Teniendo finalmente la ecuación 5.12.

$$\dot{error} = -\dot{m}_e \quad (5.12)$$

Según la ecuación 5.3, la derivada del peso es la diferencia entre el caudal de ingreso y el caudal de salida, esto se reemplazó en la ecuación 5.12, obteniendo las ecuaciones 5.13 y 5.14.

$$\dot{error} = -\dot{m}_e = -(Q_i - Q_s) \quad (5.13)$$

$$\dot{error} = Q_s - Q_i \quad (5.14)$$

Para calcular los rangos de la derivada del error se asumieron los casos extremos del proceso:

- Valor máximo de la derivada del error: Cuando el caudal de salida de producto es el valor máximo 0.75 kg/s y el caudal de ingreso es igual a 0 kg/s, los rangos para el caudal de salida fueron presentados en la tabla 5.1.

$$error_{\dot{m}_{maximo}} = 0.75 - 0 = + 0.75 \text{ Kg/s} \quad (5.15)$$

- Valor mínimo de la derivada del error: Cuando el caudal de salida sea 0 kg/s y el caudal de ingreso sea el mayor posible, este valor es presentado por el flujo nominal de la bomba que bombea producto a la tolva de la envasadora, valor que se observa en el anexo 3.

$$error_{\dot{m}_{minimo}} = 0 - 1.5 = - 1.5 \text{ Kg/s} \quad (5.16)$$

Por lo que se concluye que la variable derivada del error presenta el rango de -1.5 kg/s a 0.75 kg/s, lo cual implica que la variable fluctúa en un rango de 2.25 kg/s.

Finalmente, se procedió a calcular el rango de la variable de salida ( $F_i$ ), la cual está definida por las características del actuador. Esto se obtiene de la ficha técnica del variador de frecuencia Danfoss FC-302, equipo que se encarga de bombear el producto hacia la tolva envasadora. La ficha técnica del actuador se presenta en el anexo 4, el cual indica que la rampa de aceleración o desaceleración varía de 1 a 3600 segundos.

Para ello se evaluó como punto de partida la siguiente ecuación 5.17.

$$\dot{F}_t = \frac{\Delta F_t}{\Delta t} = \frac{F_{t+1} - F_t}{\Delta t} \quad (5.17)$$

Para calcular los rangos de la razón de cambio del valor de frecuencia se asumieron los casos extremos del proceso:

- Valor máximo de la razón de cambio de la frecuencia: cuando la frecuencia actual es 0 Hz, la frecuencia deseada es 60 Hz y la rampa está definida a 1 segundo.

$$\dot{F}_{l_{maximo}} = \frac{60 - 0}{1} = + 60 \text{ Hz/s} \quad (5.18)$$

- Valor mínimo de la razón de cambio de la frecuencia: cuando la frecuencia actual es 60 Hz, la frecuencia deseada es 0 Hz y la rampa está definida a 1 segundo.

$$\dot{f}_{\text{mínimo}} = \frac{0 - 60}{1} = -60 \text{ Hz/s} \quad (5.19)$$

Por lo que se concluye que la razón de cambio del valor de la frecuencia variara en el rango de -60 Hz/s a +60 Hz/s, lo cual implica que la variable fluctúa en un rango de 120 Hz/s.

De lo revisado anteriormente, se resume los rangos obtenidos en tabla 5.8.

**Tabla 5.8**

*Valores mínimos y máximos del error y la derivada del error.*

<b>Variable</b>	<b>Valor mínimo</b>	<b>Valor máximo</b>	<b>Rango</b>	<b>Unidades</b>
Error	- 500	+ 500	1000	Kg
Derivada del error	- 1.5	+ 0.75	2.25	Kg / s
Derivada de la frecuencia	- 60	+ 60	120	Hz / s

Fuente: Elaboración propia.

Debido a que el rango de los del error y de la derivada del error, mostrados en la tabla 5.8 presentan diferencias significativas, se procedió a definir como factor de ganancia para la entrada error un valor de 0.002 con la finalidad de trabajar dentro de un rango estándar de -1 a +1.

Por lo que, se definen los siguientes valores para las ganancias Kp y Kd:

$$KP = 0.002 \quad KD = 1$$

Luego, es importante recalcar que para la simulación del controlador difuso se utilizó un tiempo de muestreo de 10 mili segundos, es decir de 0.01 segundos. Lo cual implica que el incremento o cambio de la variable de salida  $F_i$  se realizará cada 0.01 segundos, por lo que el factor  $K_u$  será igual a 0.01. Esto con el fin de cumplir con los requisitos de los límites de la razón de cambio de la frecuencia que entrega el actuador mencionado en la tabla 5.8.

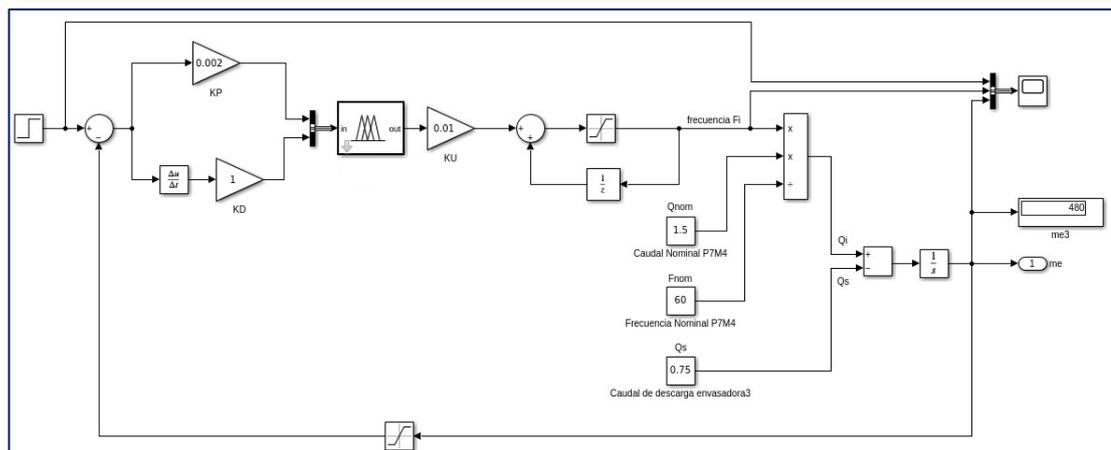
Obteniendo finalmente los valores de las ganancias:

$$K_P = 0.002 \quad K_D = 1 \quad K_U = 0.01$$

Con lo cual el diagrama de bloques del proceso quedaría según lo mostrado en la figura 5.34.

**Figura 5.34**

*Diagrama de bloques de proceso con  $K_p=0.002$ ,  $K_d=1$  y  $K_u=0.01$ .*



Fuente: Elaboración propia.

Líneas abajo se describe las funciones de pertenencia de las entradas y salidas del controlador difuso, así como también se describe cada una de las

reglas que regirán la lógica difusa, para finalmente mostrar los resultados obtenidos mediante la simulación del controlador con apoyo del software SIMULINK.

Cabe resaltar que las funciones de pertenencia presentadas se definirán en su mayoría con formas triangulares y trapezoidales, esto debido a que estas funciones son simples y permiten ser procesadas por controladores de medianas prestaciones.

### 5.3.2.2.1 Funciones de pertenencia del error

Para definir las funciones de pertenencia del error se tuvo en cuenta el rango del input "error" considerando la ganancia  $K_p$ , la cual se definió con anterioridad:

Rango variable error:  $[-500 \quad + 500]$

Ganancia proporcional:  $K_p = 0.02$

Rango de la entrada difusa:  $[-1 \quad + 1]$

Luego, tomando en cuenta esos valores se definió las funciones de pertenencia, con su descripción y parámetros, en la tabla 5.9.

**Tabla 5.9**

*Definición de funciones de pertenencia del error.*

Nombre	Tipo	Parámetros	Valores reales
Negativo Grande	Trapezoidal	$[-1 \ -1 \ -0.04 \ -0.03]$	$[-500 \ -500 \ -20 \ -15]$
Negativo Mediano	Triangular	$[-0.04 \ -0.03 \ -0.02]$	$[-20 \ -15 \ -10]$
Negativo Pequeño	Triangular	$[-0.03 \ -0.02 \ -0.01]$	$[-15 \ -10 \ -5]$
Negativo	Triangular	$[-0.02 \ -0.01 \ 0]$	$[-10 \ -5 \ 0]$
Cero	Triangular	$[-0.01 \ 0 \ +0.01]$	$[-5 \ 0 \ +5]$
Positivo	Triangular	$[0 \ +0.01 \ 0.02]$	$[0 \ +5 \ +10]$
Positivo Pequeño	Triangular	$[+0.01 \ +0.02 \ +0.03]$	$[+5 \ +10 \ +15]$
Positivo Mediano	Triangular	$[+0.02 \ +0.03 \ +0.04]$	$[+10 \ +15 \ +20]$
Positivo Grande	Trapezoidal	$[+0.03 \ +0.04 \ +1 \ +1]$	$[+15 \ +20 \ +500 \ +500]$

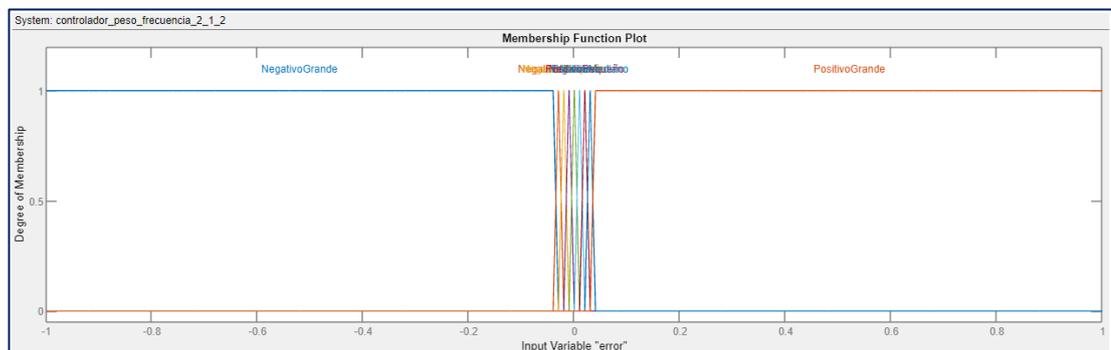
Fuente: Elaboración propia.

Cabe resaltar que se definió que el primer y último rango presenten un mayor ancho, con la finalidad de que cuando el error se encuentre entre los rangos  $[+20$  a  $+500]$  o  $[-20$  a  $-500]$ , la variable error se ubique dentro de las funciones de pertenencia “negativo grande” o “positivo grande”. Esto para forzar una rápida respuesta por parte del algoritmo de control.

Con la finalidad de comprender la distribución de las funciones de pertenencia en todo el rango de la entrada difusa, se presentan las figuras 5.35 y 5.36.

### Figura 5.35

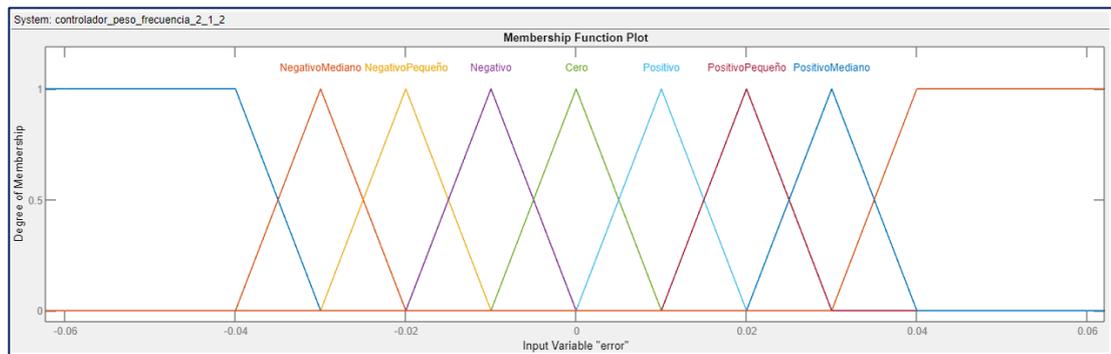
*Representación gráfica de las funciones de pertenencia de la variable error  $[-1 +1]$ .*



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 5.36**

Representación gráfica de las funciones de pertenencia de la variable error [-0.06 +0.06].



Fuente: Elaboración propia.

### 5.3.2.2.2 Función de pertenencia de la derivada del error

Para definir las funciones de pertenencia de la derivada del error se tuvo en cuenta el rango del input “derivada del error” considerando la ganancia  $K_d$  y un ajuste por desborde, esto debido a que durante la operación dicha variable podría exceder los límites definidos.

Rango variable derivada del error:  $[-1.5 \quad + 0.75]$

Ganancia proporcional:  $K_d = 1$

Nivel de desborde mínimo:  $- 2.0$

Nivel de desborde máximo:  $+ 1.0$

Rango de la entrada difusa:  $[-2 \quad + 1]$

Luego, tomando en cuenta esos valores se definió las funciones de pertenencia, con su descripción y parámetros, en la tabla 5.9.

**Tabla 5.10**

*Definición de funciones de pertenencia de la derivada del error.*

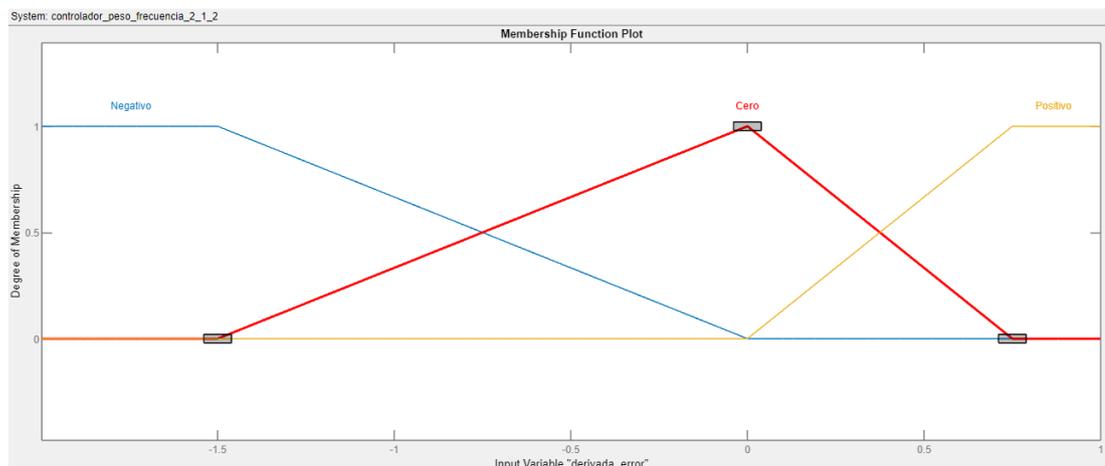
Nombre	Tipo	Parámetros
Negativo	Trapezoidal	[-2 -2 -1.5 0]
Cero	Triangular	[-1.5 0 +0.75]
Positivo	Trapezoidal	[0 +0.75 +1 +1]

Fuente: Elaboración propia.

Con la finalidad de comprender la distribución de las funciones de pertenencia en todo el rango de la entrada difusa, se presenta en la imagen 5.37.

**Figura 5.37**

*Representación gráfica de las funciones de pertenencia de la variable derivada del error.*



Fuente: Elaboración Propia.

### 5.3.2.2.3 Funciones de pertenencia de la razón de cambio de la frecuencia

Para definir las funciones de pertenencia de la razón de cambio se tuvo en cuenta el rango de la salida “frecuencia” y un ajuste por desborde, esto debido a que durante la operación dicha variable podría exceder los límites definidos.

Rango variable razón de cambio de frecuencia:  $[-60 \quad + 60]$

Nivel de desborde mínimo:  $- 5.0$

Nivel de desborde máximo:  $+ 5.0$

Rango de la salida difusa:  $[-65 \quad + 65]$

Luego tomando en cuenta esos valores se definió las funciones de pertenencia, con su descripción y parámetros, en la tabla 5.11.

**Tabla 5.11**

*Funciones de pertenencia de la razón de cambio de la frecuencia.*

Nombre	Tipo	Parámetros
Negativo Grande	Trapezoidal	$[-65 \quad -65 \quad -60 \quad -55]$
Negativo Mediano	Triangular	$[-60 \quad -35 \quad -10]$
Negativo Pequeño	Triangular	$[-55 \quad -30 \quad -5]$
Negativo	Triangular	$[-10 \quad -5 \quad 0]$
Cero	Triangular	$[-5 \quad 0 \quad +5]$
Positivo	Triangular	$[0 \quad +5 \quad +10]$
Positivo Pequeño	Triangular	$[+5 \quad +30 \quad +55]$
Positivo Mediano	Triangular	$[+10 \quad +35 \quad +60]$
Positivo Grande	Trapezoidal	$[+55 \quad +60 \quad +65 \quad +65]$

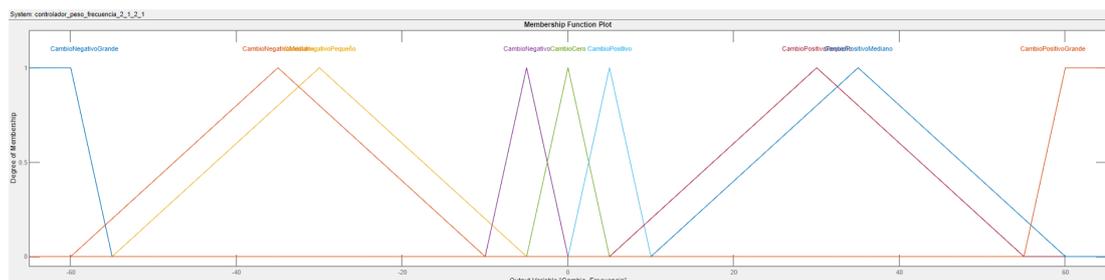
Fuente: Elaboración propia.

Cabe resaltar que las funciones de pertenencia de negativo grande y positivo grande, se han definido de tal manera que cuando el valor de la razón de cambio se ubique en esos valores, la tasa de cambio sea mayor con la finalidad de llegar de en el menor tiempo posible al valor de referencia.

Con la finalidad de comprender la distribución de las funciones de pertenencia en todo el rango de la salida difusa, se presenta la figura 5.38.

### Figura 5.38

*Representación gráfica de las funciones de pertenencia de la razón de cambio de la frecuencia.*



Fuente: Elaboración propia.

#### 5.3.2.2.4 Reglas de inferencia

Para definir las reglas de inferencia, se realizó el análisis de los posibles valores de las variables en distintos escenarios. Como ejemplo se presenta el análisis para uno de estos casos:

- **Input 1:** Error es positivo grande.
- **Input 2:** Derivada del error es positivo.

El caso que se presenta involucraría que la variable de proceso (Peso me) está muy por debajo de la señal de referencia y la derivada del error indicaría que el flujo de salida ( $Q_s$ ) es mayor que el flujo de ingreso ( $Q_i$ ). Estas 2 condiciones denotarían lo desfavorable de las condiciones para alcanzar la referencia, ya que el error es amplio y la tendencia es que esta brecha no disminuya.

Con lo que el objetivo de la variable de control (Frecuencia  $F_i$ ) será incrementarse para cumplir con el objetivo de alcanzar la referencia, debido a que nos encontramos en el escenario más desfavorable el controlador difuso debe incrementar la variable de control de manera rápida. Por lo que la condición de salida del controlador difuso debe ser que la razón de cambio de la frecuencia sea "positiva grande". Por lo cual se define la siguiente regla de inferencia:

Si el **error** es **positivo grande** y la **derivada del error** es **positiva** entonces la **razón de cambio de la frecuencia** debe ser **positiva grande**.

A continuación, se presenta la lista de reglas de control del sistema difuso para el control de peso a través de la modulación de la frecuencia de actuador considerando la combinación de las 9 posibilidades para el input 1 que es el error y 3 posibilidades para el input 2 que es la derivada del error.

1. Si el **error** presenta un valor **negativo grande** y la **derivada del error** presenta un valor **negativo**, entonces la **razón de cambio de la frecuencia** será **negativo grande**.
2. Si el **error** presenta un valor **negativo grande** y la **derivada del error** presenta un valor **cero**, entonces la **razón de cambio de la frecuencia** será **negativo grande**.
3. Si el **error** presenta un valor **negativo grande** y la **derivada del error** presenta un valor **positivo**, entonces la **razón de cambio de la frecuencia** será **negativo mediano**.
4. Si el **error** presenta un valor **negativo mediano** y la **derivada del error** presenta un valor **negativo**, entonces la **razón de cambio de la frecuencia** será **negativo grande**.
5. Si el **error** presenta un valor **negativo mediano** y la **derivada del error** presenta un valor **cero**, entonces la **razón de cambio de la frecuencia** será **negativo mediano**.
6. Si el **error** presenta un valor **negativo mediano** y la **derivada del error** presenta un valor **positivo**, entonces la **razón de cambio de la frecuencia** será **negativo pequeño**.

7. Si el **error** presenta un valor **negativo pequeño** y la **derivada del error** presenta un valor **negativo**, entonces la **razón de cambio de la frecuencia** será **negativo mediano**.
8. Si el **error** presenta un valor **negativo pequeño** y la **derivada del error** presenta un valor **cero**, entonces la **razón de cambio de la frecuencia** será **negativo pequeño**.
9. Si el **error** presenta un valor **negativo pequeño** y la **derivada del error** presenta un valor **positivo**, entonces la **razón de cambio de la frecuencia** será **negativa**.
10. Si el **error** presenta un valor **negativo** y la **derivada del error** presenta un valor **negativo**, entonces la **razón de cambio de la frecuencia** será **negativo pequeño**.
11. Si el **error** presenta un valor **negativo** y la **derivada del error** presenta un valor **cero**, entonces la **razón de cambio de la frecuencia** será **negativa**.
12. Si el **error** presenta un valor **negativo** y la **derivada del error** presenta un valor **positivo**, entonces la **razón de cambio de la frecuencia** será **negativa**.
13. Si el **error** presenta un valor **cero** y la **derivada del error** presenta un valor **negativo**, entonces la **razón de cambio de la frecuencia** será **negativa**.
14. Si el **error** presenta un valor **cero** y la **derivada del error** presenta un valor **cero**, entonces la **razón de cambio de la frecuencia** será **cero**.

15. Si el **error** presenta un valor **cero** y la **derivada del error** presenta un valor **positivo**, entonces la **razón de cambio de la frecuencia** será **positiva**.
16. Si el **error** presenta un valor **positivo** y la **derivada del error** presenta un valor **negativo**, entonces la **razón de cambio de la frecuencia** será **positiva**.
17. Si el **error** presenta un valor **positivo** y la **derivada del error** presenta un valor **cero**, entonces la **razón de cambio de la frecuencia** será **positiva**.
18. Si el **error** presenta un valor **positivo** y la **derivada del error** presenta un valor **positivo**, entonces la **razón de cambio de la frecuencia** será **positivo pequeño**.
19. Si el **error** presenta un valor **positivo pequeño** y la **derivada del error** presenta un valor **negativo**, entonces la **razón de cambio de la frecuencia** será **positiva**.
20. Si el **error** presenta un valor **positivo pequeño** y la **derivada del error** presenta un valor **cero**, entonces la **razón de cambio de la frecuencia** será **positivo pequeño**.
21. Si el **error** presenta un valor **positivo pequeño** y la **derivada del error** presenta un valor **positivo**, entonces la **razón de cambio de la frecuencia** será **positivo mediano**.
22. Si el **error** presenta un valor **positivo mediano** y la **derivada del error** presenta un valor **negativo**, entonces la **razón de cambio de la frecuencia** será **positivo pequeño**.

23. Si el **error** presenta un valor **positivo mediano** y la **derivada del error** presenta un valor **cero**, entonces la **razón de cambio de la frecuencia** será **positivo mediano**.
24. Si el **error** presenta un valor **positivo mediano** y la **derivada del error** presenta un valor **positivo**, entonces la **razón de cambio de la frecuencia** será **positiva grande**.
25. Si el **error** presenta un valor **positivo grande** y la **derivada del error** presenta un valor **negativo**, entonces la **razón de cambio de la frecuencia** será **positivo mediano**.
26. Si el **error** presenta un valor **positivo grande** y la **derivada del error** presenta un valor **cero**, entonces la **razón de cambio de la frecuencia** será **positivo grande**.
27. Si el **error** presenta un valor **positivo grande** y la **derivada del error** presenta un valor **positivo**, entonces la **razón de cambio de la frecuencia** será **positiva grande**.

En la figura 5.39 se observan las 27 reglas definidas para el controlador difuso ingresadas al software SIMULINK con la finalidad de simular la respuesta del controlador difuso.

Figura 5.39

Registro de reglas difusas en software simulink.

Fuzzy Inference System (FIS) Plot    Membership Function (MF) Editor    Rule Editor			
System: controlador_peso_frecuencia_2_1_2			
<input type="button" value="Add All Possible Rules"/> <input type="button" value="Clear All Rules"/>			
	Rule	Weight	Name
1	If error is NegativoGrande and derivada_error is Negativo then Cambio_Frecuencia is CambioNegativoGrande	1	rule1
2	If error is NegativoGrande and derivada_error is Cero then Cambio_Frecuencia is CambioNegativoGrande	1	rule2
3	If error is NegativoGrande and derivada_error is Positivo then Cambio_Frecuencia is CambioNegativoMediano	1	rule3
4	If error is NegativoMediano and derivada_error is Negativo then Cambio_Frecuencia is CambioNegativoGrande	1	rule4
5	If error is NegativoMediano and derivada_error is Cero then Cambio_Frecuencia is CambioNegativoMediano	1	rule5
6	If error is NegativoMediano and derivada_error is Positivo then Cambio_Frecuencia is CambioNegativoPequeño	1	rule6
7	If error is NegativoPequeño and derivada_error is Negativo then Cambio_Frecuencia is CambioNegativoMediano	1	rule7
8	If error is NegativoPequeño and derivada_error is Cero then Cambio_Frecuencia is CambioNegativoPequeño	1	rule8
9	If error is NegativoPequeño and derivada_error is Positivo then Cambio_Frecuencia is CambioNegativo	1	rule9
10	If error is Negativo and derivada_error is Negativo then Cambio_Frecuencia is CambioNegativoPequeño	1	rule10
11	If error is Negativo and derivada_error is Cero then Cambio_Frecuencia is CambioNegativo	1	rule11
12	If error is Negativo and derivada_error is Positivo then Cambio_Frecuencia is CambioNegativo	1	rule12
13	If error is Cero and derivada_error is Negativo then Cambio_Frecuencia is CambioNegativo	1	rule13
14	If error is Cero and derivada_error is Cero then Cambio_Frecuencia is CambioCero	1	rule14
15	If error is Cero and derivada_error is Positivo then Cambio_Frecuencia is CambioPositivo	1	rule15
16	If error is Positivo and derivada_error is Negativo then Cambio_Frecuencia is CambioPositivo	1	rule16
17	If error is Positivo and derivada_error is Cero then Cambio_Frecuencia is CambioPositivo	1	rule17
18	If error is Positivo and derivada_error is Positivo then Cambio_Frecuencia is CambioPositivoPequeño	1	rule18
19	If error is PositivoPequeño and derivada_error is Negativo then Cambio_Frecuencia is CambioPositivo	1	rule19
20	If error is PositivoPequeño and derivada_error is Cero then Cambio_Frecuencia is CambioPositivoPequeño	1	rule20
21	If error is PositivoPequeño and derivada_error is Positivo then Cambio_Frecuencia is CambioPositivoMediano	1	rule21
22	If error is PositivoMediano and derivada_error is Negativo then Cambio_Frecuencia is CambioPositivoPequeño	1	rule22
23	If error is PositivoMediano and derivada_error is Cero then Cambio_Frecuencia is CambioPositivoMediano	1	rule23
24	If error is PositivoMediano and derivada_error is Positivo then Cambio_Frecuencia is CambioPositivoGrande	1	rule24
25	If error is PositivoGrande and derivada_error is Negativo then Cambio_Frecuencia is CambioPositivoMediano	1	rule25
26	If error is PositivoGrande and derivada_error is Cero then Cambio_Frecuencia is CambioPositivoGrande	1	rule26
27	If error is PositivoGrande and derivada_error is Positivo then Cambio_Frecuencia is CambioPositivoGrande	1	rule27

Fuente: Elaboración propia.

### 5.3.2.2.5 Respuesta del controlador difuso

Un sistema difuso consta de 3 partes principalmente: las entradas y salidas difusas, las reglas difusas y por último los métodos de inferencia. El método de inferencia que se utilizó para el diseño de la presente investigación es el controlador del tipo mamdani. Para ello se utilizó el software de simulación SIMULINK.

En la figura 5.40 se representa la interpretación de la ejecución del controlador difuso ante los siguientes valores en las entradas:

- Valor del error: -0.2
- Valor de la derivada del error: -0.5

Las reglas de inferencia aplicadas para calcular el valor de la salida difusa razón de cambio de la frecuencia mediante el método de inferencia de mandani son:

Regla 1: Si el **error** presenta un valor **negativo grande** y la **derivada del error** presenta un valor **negativo**, entonces la **razón de cambio de la frecuencia** será **negativo grande**.

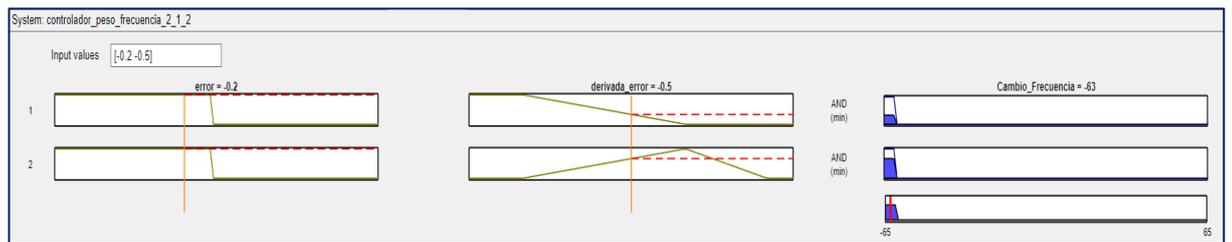
Regla 2: Si el **error** presenta un valor **negativo grande** y la **derivada del error** presenta un valor **cero**, entonces la **razón de cambio de la frecuencia** será **negativo grande**.

Luego de que el controlador difuso realizo el procedimiento de fuzificación, inferencia y desfuzificación. El controlador entrega un valor de -63, lo cual representa que la variable de control (frecuencia  $F_i$ ) debe disminuir debido a

que se ha superado en gran medida la referencia y debido a que la tendencia de cambio del error será a incrementar y no a disminuir como se espera.

### Figura 5.40

*Respuesta de controlador difuso aplicando el método de mandani.*



Fuente: Elaboración propia.

Luego de comprobar el correcto funcionamiento del controlador difuso, se procede a incluir a este controlador en el diagrama de bloques realizado con simulink para analizar la respuesta del sistema.

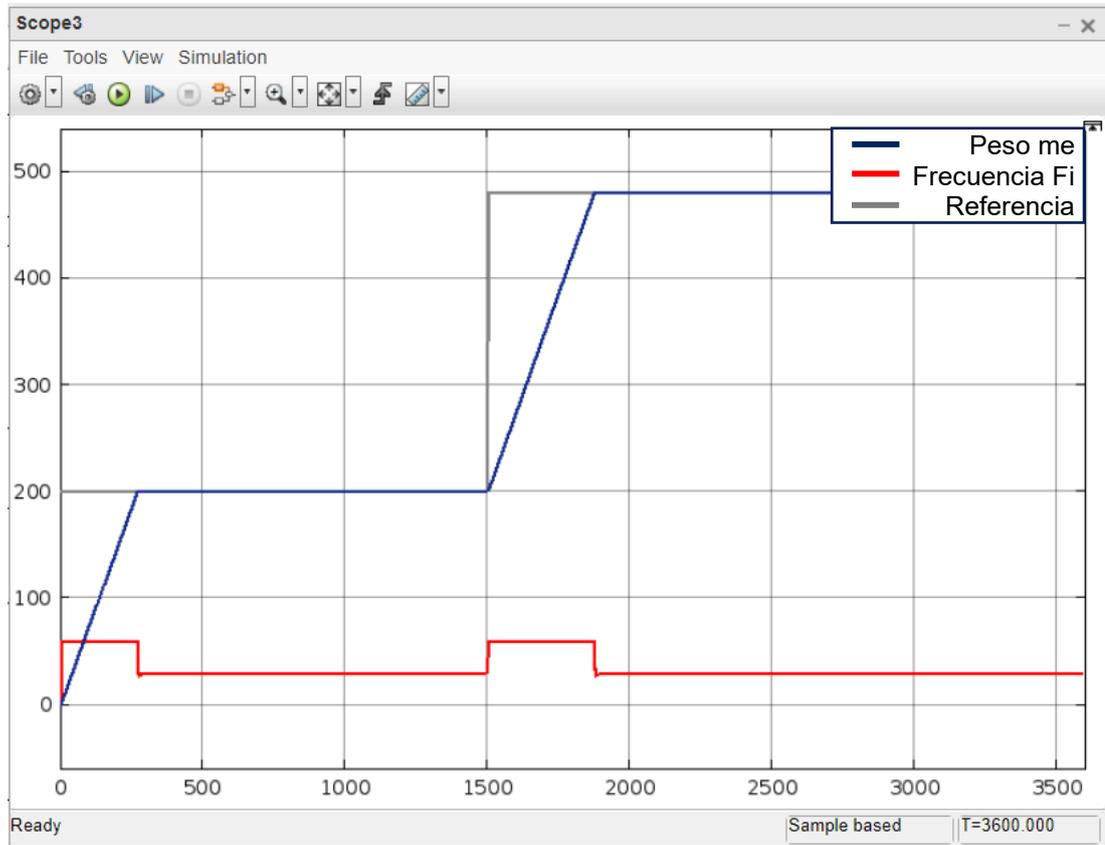
Con la finalidad de tener una comparación objetiva con el controlador PID anteriormente diseñado, se estableció las mismas condiciones para el análisis de la respuesta. Por lo cual se plantearon las siguientes condiciones:

- Entrada escalón comienza en 200 kg y luego de 1500 segundos este sube a 480 Kg.
- Peso inicial de la tolva 0 Kg.

Con estas condiciones se realizó la simulación de la respuesta del sistema la cual se muestra en la figura 5.41.

**Figura 5.41**

*Respuesta del sistema utilizando un controlador difuso.*



Fuente: Elaboración propia.

Como se ve en el gráfico 5.41: la variable de proceso (peso me) alcanza el valor de 480 kg a los 360 segundos, no se generó sobreimpulso y no se presentó error en el estado estacionario. Por lo que se concluye que el controlador presenta mejoras significativas con respecto a la respuesta obtenida con el controlador PID.

Con el controlador difuso diseñado, se procede a analizar la respuesta del sistema frente a los distintos valores de la variable  $Q_s$  (ver tabla 5.1).

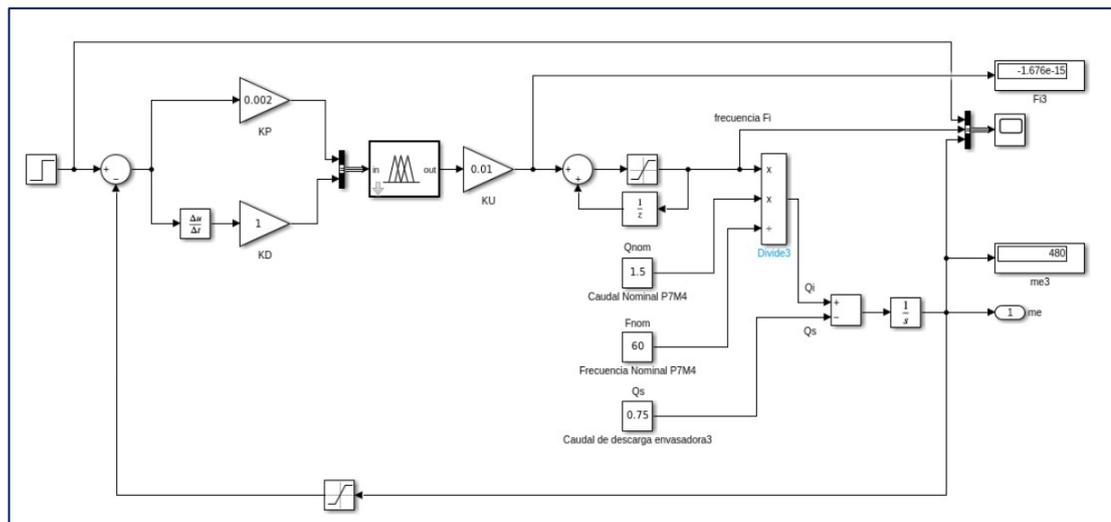
Para ello se analizó la respuesta ante los mismos 3 casos analizados para el controlador PID:

- Cuando la variable  $Q_s$  toma su máximo valor.

Para ello, se define el valor de  $Q_s = 0.75$  Kg/s, el cual es la condición de dosificación más exigente por el alto consumo de flujo de salida. Luego, se define la referencia inicial a 200 Kg, para luego cambiar dicho valor a 480 Kg a los 1500 segundos.

**Figura 5.42**

*Modelado del sistema con controlador difuso y  $Q_s=0.75$  Kg/s.*

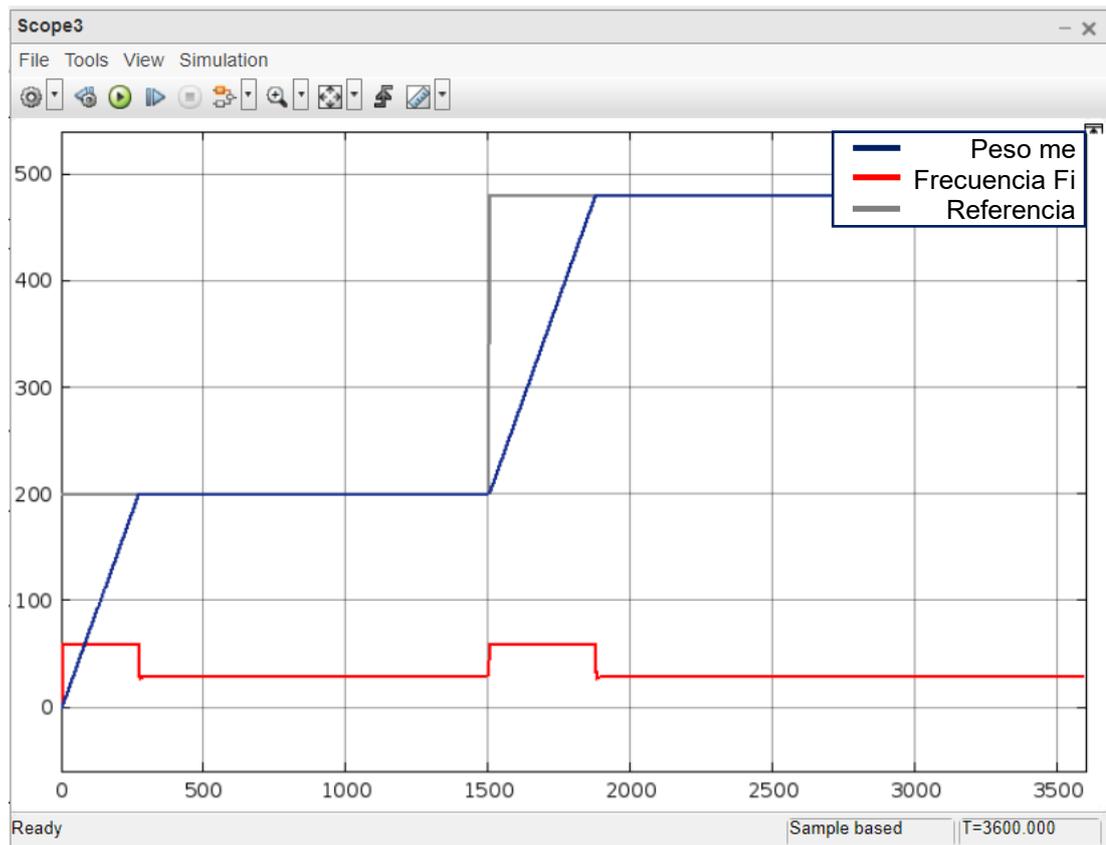


Fuente: Elaboración propia.

Luego, se presenta la respuesta del sistema en la figura 5.43.

**Figura 5.43**

*Respuesta del controlador difuso para el valor de  $Q_s = 0.75$  Kg/s.*



Fuente: Elaboración propia.

En la respuesta se observa, que el sistema alcanza la referencia de 200 Kg dentro luego de 278 segundos, así como también presentó un error en el estado estacionario de 0 Kg con un nivel de sobreimpulso de + 0.4 Kg.

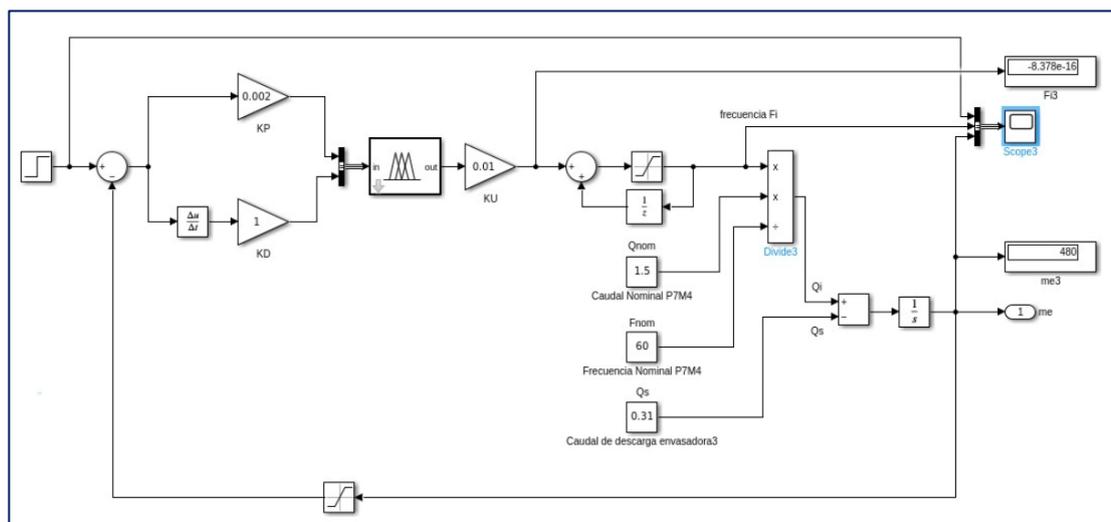
Finalmente, cuando la referencia cambia al valor de 480 Kg, este valor es alcanzado luego de 379 segundos y presentó un error en el estado estacionario de 0 Kg con un nivel de sobreimpulso de + 0.7 Kg.

- Cuando la variable  $Q_s$  toma su mínimo valor.

Para ello, se define el valor de  $Q_s = 0.31$  Kg/s, el cual es la condición de dosificación menos exigente por el alto bajo consumo de flujo de salida. Luego, se define la referencia inicial a 200 Kg, para luego cambiar dicho valor a 480 Kg a los 1500 segundos.

**Figura 5.44**

*Modelado del sistema con controlador difuso y  $Q_s=0.31$  Kg/s.*

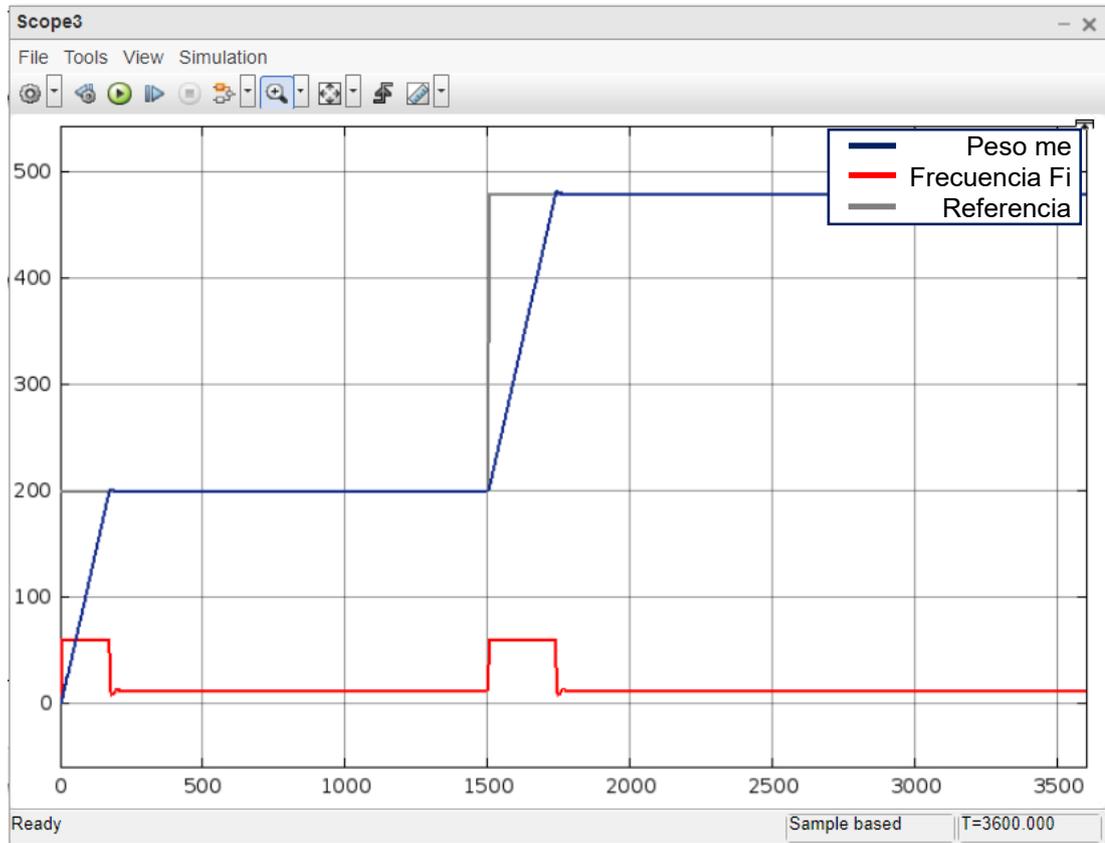


Fuente: Elaboración propia.

Luego, se presenta la respuesta del sistema en la figura 5.45.

**Figura 5.45**

*Respuesta del controlador difuso para el valor de  $Q_s = 0.31$  Kg/s.*



Fuente: Elaboración propia.

En la respuesta se observa, que el sistema alcanza la referencia de 200 Kg dentro luego de 176 segundos, así como también presenta un error en el estado estacionario de 0 Kg con un nivel de sobreimpulso de + 1.3 Kg.

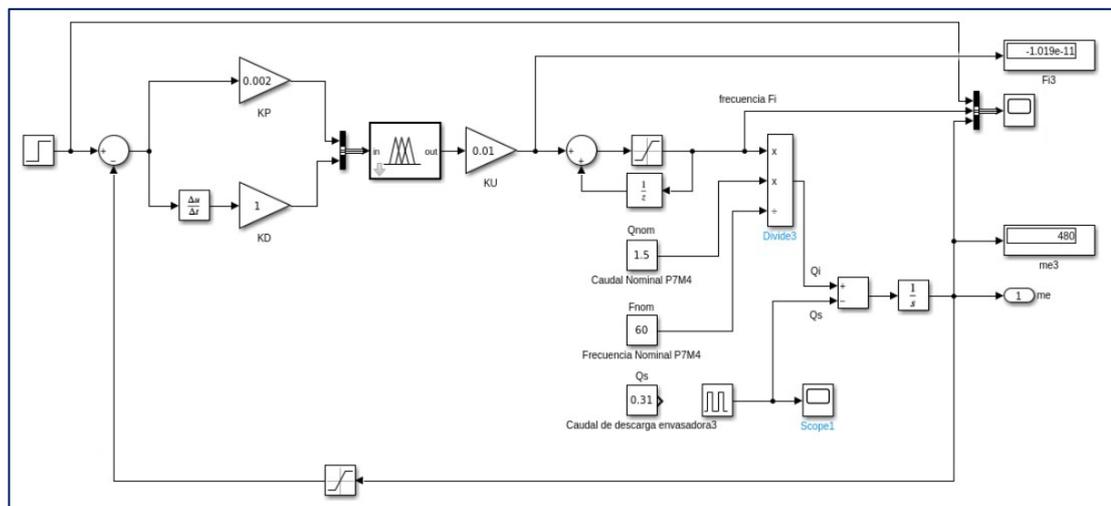
Finalmente, cuando la referencia cambia al valor de 480 Kg, este valor es alcanzado luego de 243 segundos y presentó un error en el estado estacionario de 0 Kg con un nivel de sobreimpulso de + 1.3 Kg.

- Cuando la variable  $Q_s$  toma un valor fluctuante, simulando condiciones de proceso reales.

Para ello, se define el valor de  $Q_s$  como un generador de pulsos el cual permite simular un valor intermitente, para ello se utilizó un pulso de amplitud de 0.75 Kg/s, con un periodo de 1000 segundos y un pulso de 75% de ancho. Luego, se define la referencia inicial a 480 Kg la cual comienza en el segundo 0 de la simulación.

**Figura 5.46**

*Modelado del sistema con controlador difuso y  $Q_s$  fluctuante.*

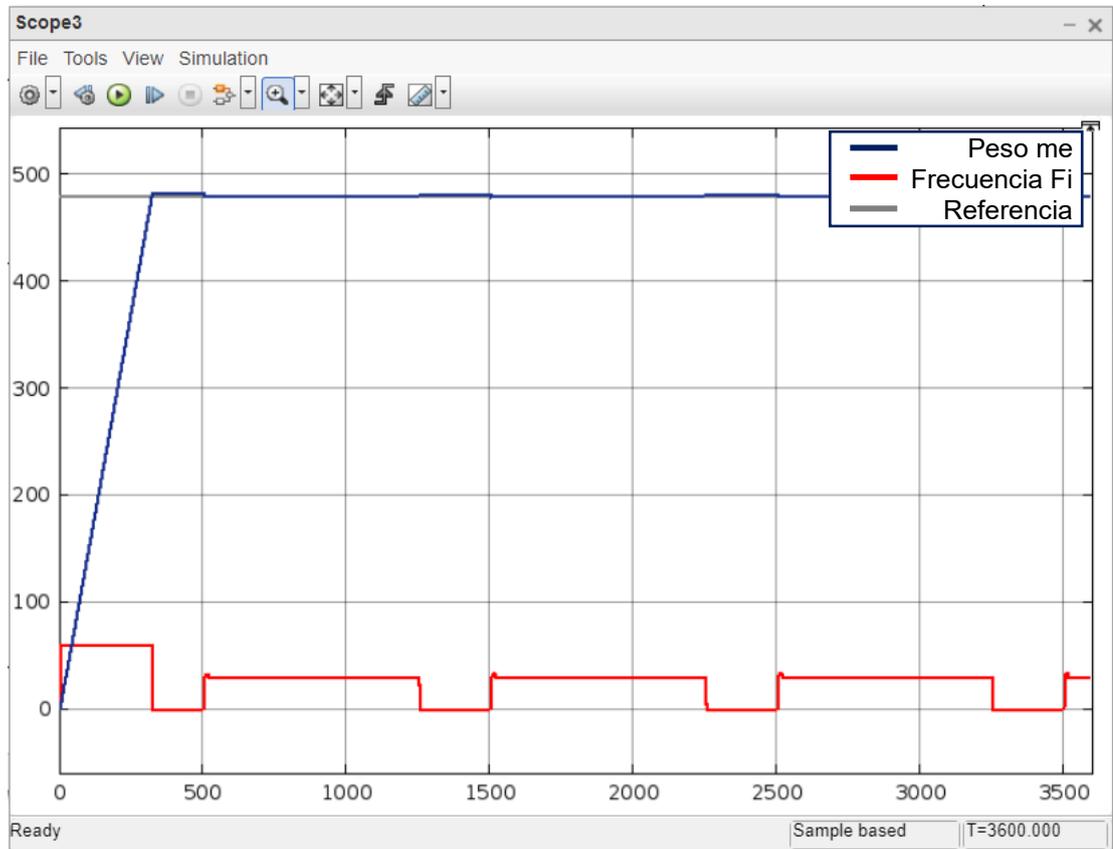


Fuente: Elaboración propia.

Luego, se presenta la respuesta del sistema en la figura 5.47 y la gráfica de la variable  $Q_s$  en la figura 5.48.

**Figura 5.47**

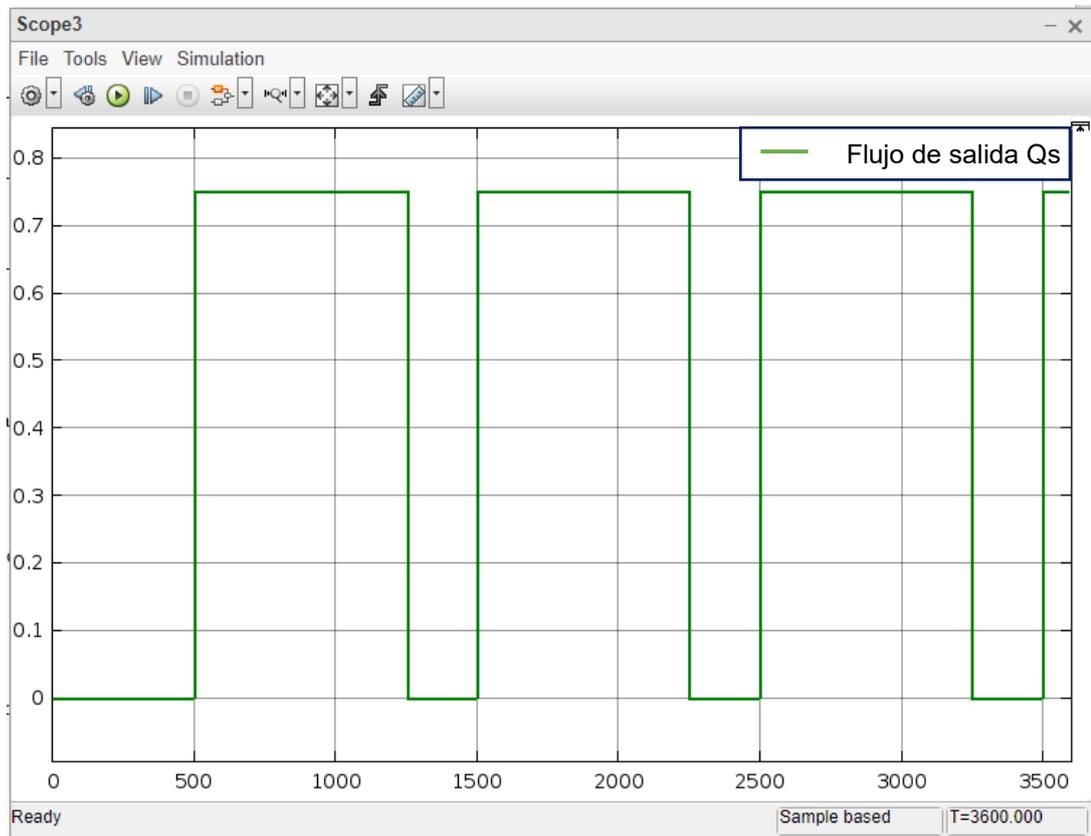
Respuesta del controlador difuso para el valor de  $Q_s$  fluctuante.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 5.48**

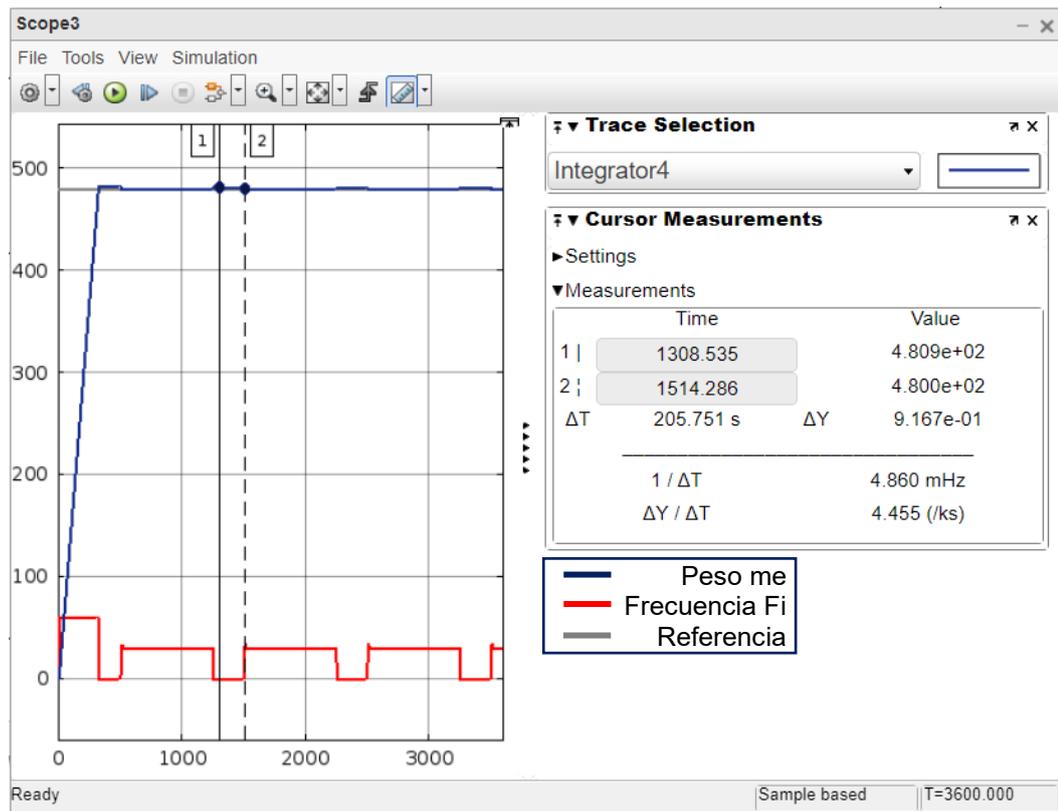
*Representación gráfica de la variable  $Q_s$  a lo largo de la simulación.*



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 5.49**

*Detalle de valores de respuesta y tiempo en la respuesta del controlador difuso.*



Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en el gráfico 5.49, la respuesta del sistema frente a cambios de la variable de  $Q_s$  genera:

- Sobreimpulsos de 0.9 Kg.
- Retraso de 205 segundos para recuperar la referencia.

Por lo cual, se concluye que el controlador difuso diseñado presenta mejores prestaciones frente a condiciones regulares y reales, esto justificado en el nivel de sobreimpulso el cual es menor a 1 kg y la eliminación completa del

error en estado estacionario. Adicionalmente, se observó que ante perturbaciones el error en estado estacionario no excede de 1 kg lo cual es un error permisible dentro de la operación.

## CAPÍTULO VI ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El presente capítulo tiene por objetivo el identificar y analizar los resultados obtenidos, producto del desarrollo de la presente investigación. Adicionalmente, al finalizar el presente capítulo se presenta la validación de la hipótesis formulada en el capítulo 3 con base a los indicadores propuestos en el punto 3.2.

### 6.1. Correlación entre las variables de medición

La data recopilada constó de 7 variables, 3 variables de entradas: pH de pasta neutralizada, temperatura de envasado y peso de la tolva envasadora y 4 variables de salida: peso dosificador 1, peso dosificador 2, peso dosificador 3 y peso dosificador 4.

Luego de realizar el análisis de estas variables, se identificó que el valor de pH presenta un valor normalmente constante y que el valor de la temperatura

del producto envasado presenta una variabilidad de menor de 5 °C. Lo cual demostró de manera preliminar que estas variables no influyeron en el valor de las variables de salida.

Luego de realizar el análisis de correlación entre las distintas variables vistas en la tabla 6.1, se identificó de manera objetiva, que el peso de la tolva presenta un grado de correlación alto con respecto a las variables de salida. Por lo tanto, se planteó como objetivo el diseñar un algoritmo de control para el peso de la tolva con la finalidad de mejorar la dosificación de la máquina envasadora de pasta lavavajillas.

**Tabla 6.1**

Niveles de correlación entre variables medidas.

	pH Pasta	Temperatura	Peso Tolva	Peso Dosificador 1	Peso Dosificador 2	Peso Dosificador 3	Peso Dosificador 4
pH Pasta	1.00	-0.17	0.28	0.11	0.26	0.16	0.12
Temperatura	-0.17	1.00	-0.04	0.13	-0.10	0.01	-0.07
Peso Tolva	0.28	-0.04	1.00	<b>0.82</b>	<b>0.89</b>	<b>0.94</b>	<b>0.50</b>
Peso Dosificador 1	0.11	0.13	0.82	1.00	0.73	0.81	0.42
Peso Dosificador 2	0.26	-0.10	0.89	0.73	1.00	0.84	0.52
Peso Dosificador 3	0.16	0.01	0.94	0.81	0.84	1.00	0.53
Peso Dosificador 4	0.12	-0.07	0.50	0.42	0.52	0.53	1.00

Nota: El color de las celdas representa qué tan cercano a 1 es el nivel de correlación entre las variables del eje vertical con las variables del eje horizontal, si el valor es más cercano a 1 la celda es más oscura y si el valor es más cercano a 0 la celda será más clara. Fuente: elaboración propia.

Bajo el planteamiento mencionado, se evaluó 2 modelos de algoritmos de control con la finalidad de seleccionar el que brinde mejores prestaciones según los indicadores definidos en el punto 3.2 del presente documento.

## 6.2. Modelado matemático del proceso

Con la finalidad de realizar el diseño del algoritmo de control se realizó el modelado matemático del proceso de envasado, el cual se obtuvo mediante la ecuación de balance de materia presentada en la ecuación 5.3, donde luego de desplegar las ecuaciones matemáticas se obtuvo la ecuación 6.1.

$$\dot{m}_e = \frac{Q_{nom} * Fi}{F_{nom}} - Q_s \quad (6.1)$$

Luego se reemplazó los parámetros con los valores reales de proceso mostrados en la tabla 6.2.

**Tabla 6.2**

*Valores reales de las variables asociadas al modelamiento matemático.*

<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Q <sub>s</sub>	Caudal másico de salida	1100 - 2500	KGH
		60	LPM
Q <sub>nom</sub>	Caudal nominal de la bomba	5400	KGH
		1.5	KGS
V <sub>nom</sub>	Velocidad nominal de la bomba	57	RPM
F <sub>nom</sub>	Frecuencia nominal de la bomba	60	Hz
ρ	Densidad del producto (a 45 °C)	1.5	Kg/L

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, luego de reemplazar los valores se obtuvo la ecuación 6.2.

$$\dot{m}_e = \frac{1.5 * Fi}{60} - Q_s \quad (6.2)$$

### 6.3. Resultados del controlador PID

Con el objetivo de diseñar un algoritmo de control que permita controlar el peso de la tolva envasadora, se planteó el algoritmo de control PID. El cual se realizó mediante el algoritmo de ajuste de Ziegler-Nichols, el algoritmo permitió calcular los valores de las ganancias proporcional, integral y derivativa. Sin embargo, se realizó la optimización de variables debido al sobreimpulso obtenido en la respuesta. Obteniendo los siguientes valores para las ganancias PID:

$$Kp = 1.38 \quad Ti = 5000 \quad Td = 37.5$$

Finalmente, se evaluó el algoritmo frente a distintos escenarios, obteniendo los resultados mostrados en la tabla 6.3.

**Tabla 6.3**

*Resultados de la respuesta del controlador PID optimizado.*

Respuesta del controlador PID	Qs = 0.75 Kg/s		Qs = 0.31 Kg/s		Qs variable
Nivel de Referencia (Kilogramos)	200	480	200	480	480
Tiempo transcurrido para llegar a la referencia (segundos)	> 1500	650	> 1500	391	387
Error en el estado estacionario (Kilogramos)	- 14	- 0.6	- 4.4	+ 2.9	+ 5.7
Nivel de sobreimpulso (Kilogramos)	0	0	0	+ 3.1	+ 15
Tiempo necesario para recuperar la referencia (segundos)	-	-	-	-	No recuperó la referencia

Fuente: Elaboración propia.

De lo expuesto en la tabla 6.3 se concluyó:

- El error en estado estacionario (para la referencia de 480 Kg) presenta un valor máximo de 2.9 Kg y el nivel de sobreimpulso generado es de 3.1 Kg lo cual indica que la respuesta del controlador PID es aceptable.
- Ante los cambios de la variable  $Q_s$  la eficiencia del controlador PID disminuye, esto se ha reflejado en los parámetros obtenidos para las respuestas considerando  $Q_s = 0.75 \text{ Kg/s}$  y  $Q_s = 0.31 \text{ Kg/s}$ .

Debido a que el algoritmo de control PID presentó oportunidades de mejora, se evaluó un controlador difuso con el fin de obtener mejores resultados.

#### 6.4. Resultados del controlador difuso

Luego del análisis de los resultados obtenidos por el controlador PID se propuso un controlador difuso, el cual al igual que el controlador PID, presenta ganancias con la finalidad de estandarizar las entradas y salidas difusas. Luego del análisis respectivo, se definió los siguientes valores para las ganancias:

$$KP = 0.002 \quad KD = 1 \quad KU = 0.01$$

Finalmente, se evaluó el algoritmo a los mismos escenarios a los que se evaluó el controlador PID, obteniendo los resultados mostrados en la tabla 6.3.

**Tabla 6.4**

*Resultados de la respuesta del controlador difuso.*

Respuesta del controlador PID	Qs = 0.75 Kg/s		Qs = 0.31 Kg/s		Qs variable
Nivel de Referencia (Kilogramos)	200	480	200	480	480
Tiempo transcurrido para llegar a la referencia (segundos)	278	379	176	243	323
Error en el estado estacionario (Kilogramos)	0	0	0	0	0
Nivel de sobreimpulso (Kilogramos)	+ 0.4	+ 0.7	+ 1.3	+ 1.3	+ 0.9
Tiempo necesario para recuperar la referencia (segundos)	-	-	-	-	205

Fuente: Elaboración propia.

De lo expuesto en la tabla 6.4 se concluyó:

- El error en estado estacionario durante todos los escenarios simulados es igual a 0 kg, demostrando la estabilidad del controlador difuso.
- Ante los cambios de la variable  $Q_s$ , el controlador difuso pierde la referencia, sin embargo, el nivel de sobreimpulso que genera es mínimo (máximo de 1.3 Kg) y logra recuperar la referencia luego de 205 segundos.

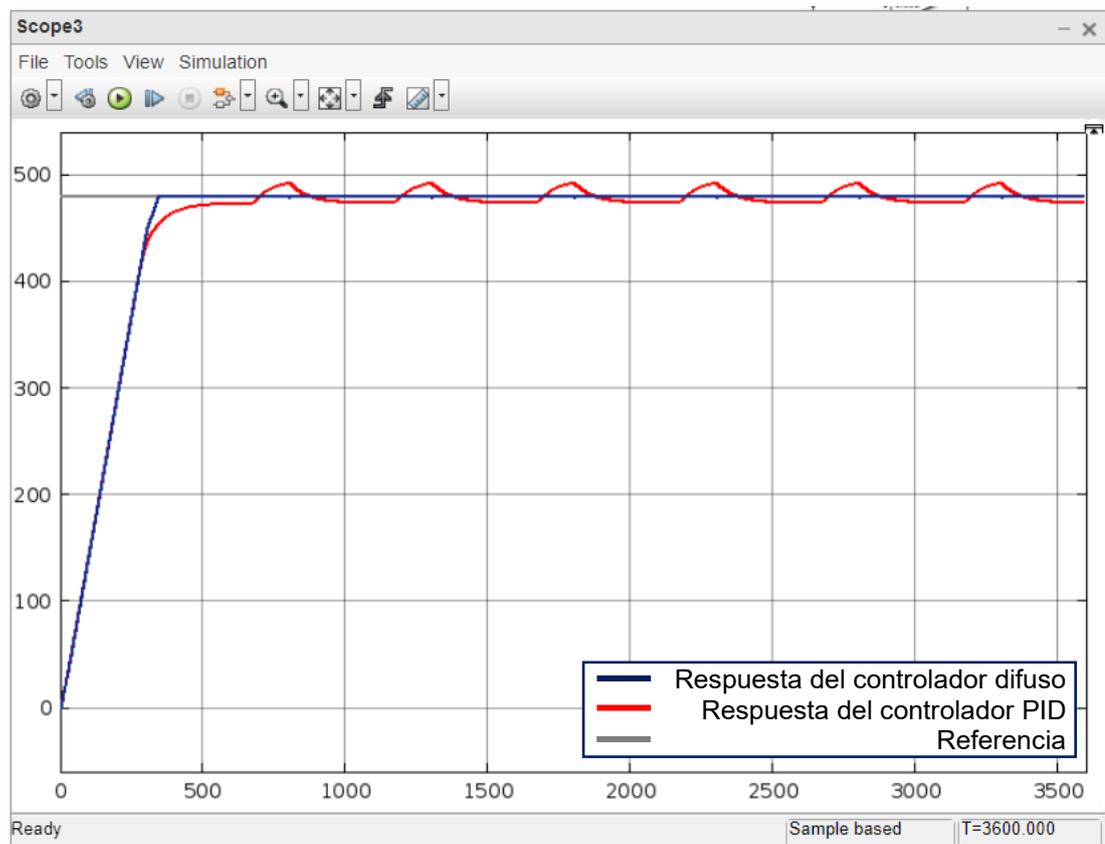
### 6.5. Comparación entre los controladores diseñados.

En la figura 6.1 se presenta la comparación de la respuesta entre el controlador difuso y el controlador PID frente a las siguientes condiciones:

- Flujo de salida  $Q_s = 0.75$  kg/s fluctuante (esto para simular condiciones de proceso reales).
- Nivel de referencia 480 Kg.
- Nivel de peso inicial de la tolva 0 Kg.

**Figura 6.1**

*Comparación de la respuesta del controlador difuso y el controlador PID.*



Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 6.5 se presentan los indicadores medidos en la respuesta del controlador PID (sombreado en azul) y la respuesta del controlador difuso (sombreado en rojo).

**Tabla 6.5**

*Comparación de los indicadores de desempeño de los controladores difuso y PID.*

Respuesta del controlador difuso Controlador PID	Qs = 0.75 Kg/s		Qs = 0.31 Kg/s		Qs variable
Nivel de Referencia (Kilogramos)	200	480	200	480	480
Tiempo transcurrido para llegar a la referencia (segundos)	278	379	176	243	323
	>1500	650	>1500	391	387
Error en el estado estacionario (Kilogramos)	0	0	0	0	0
	-14	-0.6	-4.4	+2.9	+5.7
Nivel de sobreimpulso (Kilogramos)	+ 0.4	+ 0.7	+ 1.3	+ 1.3	+ 0.9
	0	0	0	+3.1	+15
Tiempo necesario para recuperar la referencia (segundos)	-	-	-	-	205
					No se recuperó la referencia

Nota: En azul se representa los valores obtenidos por el controlador difuso, en rojo se representa los valores obtenidos por el controlador PID. Fuente:

Elaboración propia.

De lo presentado en la figura 6.1 y la tabla 6.5, se concluye que la respuesta del controlador difuso presenta mejores prestaciones, debido a:

- El controlador difuso alcanza la referencia en un menor tiempo que el controlador PID.
- El controlador difuso elimina el error en estado estacionario durante el proceso de dosificación.
- Las variaciones del flujo de salida  $Q_s$  fluctuante generan que el controlador PID pierda la referencia y demore en recuperarla, a diferencia del controlador difuso en el que se observa que las fluctuaciones perturban en menor medida la respuesta del controlador, logrando una mejor estabilidad de la respuesta.

## **6.6. Contrastación de la hipótesis**

La hipótesis planteada en el punto 3.1 del presente documento fue: “El diseño de un sistema de control automático basado en un controlador difuso influirá en la mejora de la dosificación de una máquina envasadora”.

De acuerdo a la información recopilada en la etapa de procesamiento de la información 5.2 se concluyó que el peso dosificado a lo largo del proceso de envasado no es estable, tal cual se presentó en los gráficos 5.7, 5.8, 5.9 y 5.10 la tendencia del peso dosificado es a disminuir gradualmente, esto relacionado de manera directa con la disminución del peso del producto dentro la tolva envasadora, esto sustentado en el análisis de correlación presentado en la tabla 6.1 del presente capítulo. Por lo cual se infiere:

- El sistema de envasado bajo las condiciones iniciales de proceso no es capaz de mantener un peso de dosificación constante. Esto demostrado en la data recopilada y presentada en las figuras 5.7, 5.8, 5.9 y 5.10.
- La variación del peso dosificado durante el periodo de medición presenta valores entre 15 gramos a 20 gramos, lo cual escapa del límite de tolerancia permitida por la norma que es de 15 gramos como máximo.
- El peso de la tolva envasadora no tiene un sistema de control que permita mantener un nivel constante, por lo cual se genera las fluctuaciones en la cantidad de producto dosificado, esto sustentado en el nivel de correlación presentado en la tabla 6.1.

Por lo cual se concluyó:

- Es necesario tener un sistema de control del peso de la tolva envasadora con la finalidad de mantener un nivel de dosificación constante.

Posterior a ello, se planteó el diseño de 2 controladores automáticos que permitan controlar el peso dentro de la tolva envasadora, de los cuales se obtuvo un mejor desempeño en el controlador difuso esto sustentado en los indicadores de desempeño presentados en la tabla 6.5.

El controlador difuso logra mantener el peso de la envasadora constante a lo largo del tiempo, sustentado en los resultados obtenidos por el controlador los cuales son presentados en la tabla 6.5.

El uso del controlador automático permitió eliminar el error en estado estacionario, lo cual implica que el controlador automático permite mantener un nivel constante de peso en la tolva envasadora, a diferencia de la condición inicial del proceso (Ver figura 5.5).

Finalmente, se concluyó:

- El controlador difuso permite controlar el nivel de peso de la tolva manteniendo un nivel constante de peso, esto sustentado en las simulaciones realizadas y en los indicadores de desempeño presentados en la tabla 6.5.

- El controlador difuso permite mantener un nivel constante de peso en la tolva envasadora, lo cual genera que el nivel de peso dosificado por parte de la envasadora se mantenga constante.

Por lo tanto, se confirma la hipótesis.

## CONCLUSIONES

A continuación, se procede a presentar las conclusiones de la presente investigación:

- Se concluyó que el sistema de control automático basado en un controlador difuso permitió controlar el peso de la tolva envasadora obteniendo un error de 0 kg durante el estado estacionario, el mantener un peso constante en la tolva permite mantener un nivel de dosificación constante esto basado en el alto grado de correlación de las variables. Por lo cual, el sistema de control automático basado en un controlador difuso permitió mejorar la dosificación de la máquina envasadora con respecto a las condiciones inicialmente planteadas.
- Se concluye que la precisión de la dosificación de una máquina envasadora de pasta lavavajillas es afectada por la cantidad de producto presenta en la tolva envasadora, esto basado en los niveles de correlación de la variable peso de la tolva envasadora con la variable de peso dosificado en los potes de pasta en crema lavavajillas.
- Se concluye que la inclusión de un sistema de control automático permite mejorar las condiciones de dosificación de una máquina envasadora de pasta lavavajillas, esto basado en los resultados

obtenidos a partir de las simulaciones realizadas en el software Simulink.

- Se concluye que el sistema de control automático basado en un controlador PID, permitió mejorar las condiciones iniciales del proceso, permitiendo controlar el peso de la tolva generando un error en estado estacionario no mayor a 14 kg y un sobreimpulso de la respuesta no mayor a 3.1 kg. Sin embargo, estas características de la respuesta mostraron oportunidades de mejora, por lo cual se planteó otro controlador que brinde prestaciones.
- Se concluye que el sistema de control automático basado en un controlador difuso, permitió mejorar las condiciones iniciales del proceso, permitiendo controlar el peso de la tolva generando un error en estado estacionario de 0 kg y un sobreimpulso de la respuesta no mayor a 1.3 kg, demostrando tener mejores indicadores que la respuesta del controlador PID.
- Se concluye que el controlador difuso presentó un mejor desempeño que el controlador PID, esto debido fundamentalmente a las no-linealidades que se presentaron al momento de realizar el modelamiento matemático, las cuales fueron:
  - o El flujo de salida de la máquina envasadora ( $Q_s$ ), la cual presenta un valor cambiante de acuerdo al formato que se

- envasa en la máquina y de acuerdo a las paradas de máquina que puede sufrir el equipo durante la producción.
- Los límites de la variable de frecuencia de salida de la bomba dosificadora (Fi), la cual debe encontrarse en un rango de 0 a 60 Hz debido a los límites de frecuencia máxima que puede soportar el motor eléctrico utilizado durante el proceso.
- Se concluye que la hipótesis planteada en la presente investigación: “El diseño de un sistema de control automático basado en un controlador difuso influirá en la mejora de la dosificación de una máquina envasadora” es positiva, esto basado en los resultados obtenidos y presentados en el capítulo 6 del presente documento.

## RECOMENDACIONES

A continuación, se procede a presentar las recomendaciones de la presente investigación:

- Se recomienda para futuros casos similares donde se plantee el control de dosificación de máquinas envasadoras, considerar la aplicación de un controlador difuso, basado en que el controlador difuso es sensible a cambios de parámetros dentro del modelo matemático.
- Se recomienda que las empresas que deseen aplicar este tipo de controladores difusos, tengan una correcta evaluación de los rangos de operación de las entradas y salidas difusas, ya que el rebasar los rangos propuestos provoca un error en el cálculo del resultado de la salida del controlador difuso.
- Se recomienda utilizar las funciones de pertenencia triangulares y trapezoidales planteadas durante la presente investigación al momento de implementar el algoritmo de control. Debido a que el procesamiento matemático que requieren estas funciones es menor a otro tipo de funciones de pertenencia, lo cual permite que el controlador lógico programable (PLC) requerido para la implementación, no destine muchos recursos para el procesamiento del controlador difuso.

- Se recomienda utilizar un periodo de muestreo de 0.01 segundos durante una etapa de implementación, basado en que las simulaciones realizadas como parte de la presente investigación utilizaron ese tiempo de muestreo como "step time".
- Se recomienda aplicar controladores difusos para casos similares que presenten no linealidades en el modelado matemático similares a las presentadas en la presente investigación, las cuales fueron la variabilidad del flujo de salida de la máquina envasadora y la saturación de la variable de control Frecuencia.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] AHMED HESSIEN, Mohamed y H.E.A. Ibrahim (2018) Comparative study between PID and Fuzzy PID controller for speed control of BLDC Motor.
- [2] CERECERO, Luis y otros (2017) Comparación experimental de controladores PID Clásico, PID no lineal y PID difuso para el caso de regulación. México: Instituto tecnológico de Cancún.
- [3] CREUS SOLÉ, Antonio (2011) Instrumentación industrial 8va edición. Barcelona: Marcombo.
- [4] EMPRESA ALICORP (ALICORP) (2019) (<https://www.alicorp.com.pe/lat/es/historia/intradevco/>) Sitio web oficial de la empresa Alicorp; contiene información sobre la adquisición de la empresa INTRADEVCO al grupo ALICORP (consulta: 7 de marzo 2023).
- [5] GUTIÉRREZ M.W., López J. (2016) Control difuso para un sistema de nivel implementado en un autómata programable. Cali: ResearchGate.
- [6] IGOR J., Karassik y otros (2008) Pump Handbook. New York: McGraw-Hill.
- [7] INSTITUTO NACIONAL DE CALIDAD (INACAL) (2018) Norma Metrológica Peruana: NMP 002:2018 “Cantidad de productos en Pre envases. Lima: INACAL.

- [8] INSTITUTO NACIONAL DE DEFENSA DE LA COMPETENCIA Y DE LA PROTECCIÓN DE LA PROPIEDAD INTELECTUAL (INDECOPI) (2022) ([https://www.consumidor.gob.pe/documents/51084/8486113/Codigo\\_Consumo\\_DIC2022\\_VF1/96326e8c-f791-e275-0c62-bff4dae71641](https://www.consumidor.gob.pe/documents/51084/8486113/Codigo_Consumo_DIC2022_VF1/96326e8c-f791-e275-0c62-bff4dae71641)) Sitio Web oficial de INDECOPI; contiene información sobre la ley N.º 29571 Código de protección y defensa del consumidor (consulta: 20 de marzo).
- [9] INSTITUTO NACIONAL DE DEFENSA DE LA COMPETENCIA Y DE LA PROTECCIÓN DE LA PROPIEDAD INTELECTUAL (INDECOPI) (2023) (<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/4072104/Reporte%20estad%C3%ADstico%20trimestral.pdf?v=1683046137>) Portal de consulta estadística de INDECOPI; contiene información del reporte trimestral de reclamos gestionados por la autoridad gubernamental (consulta: 31 de mayo 2023).
- [10] J. ASTROM K., HAGGLUND T. (2009) Control PID avanzado. Madrid: Pearson.
- [11] KASABOV K., Nikola (1996) Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems, and knowledge engineering. Cambridge: The MIT Press.
- [12] KYLE, Andrews (s.f.) How to read oil and gas P&ID symbols (consulta: 5 de marzo del 2023) (<https://kimray.com/training/how-read-oil-and-gas-pid-symbols>).

- [13] LIPTÁK, Béla G. (2017) Instrument and Automation Engineer's Handbook: measurement and safety. Florida: CRC Press
- [14] LIQING, Xiao (2021) Parameter tuning of PID controller for beer filling Machine Liquid level control based on improved genetic algorithm. Hindawi.
- [15] MADLMEIR S., Loidolt P., G. Khinast J. (2019) Study of the capsule filling dosator process via calibrated DEM simulations. Austria: Elsevier.
- [16] MEZA TITO, Emilio Enrique (2019) Sistema de control automático de nivel de agua en la cámara de carga basado en la lógica difusa para la central hidroeléctrica de Machu Picchu. Cusco: Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco.
- [17] MITRA P., Dey C., K. Mudi R. (2020) Fuzzy rule-based set point weighting for fuzzy PID controller. Springer.
- [18] PEREZ SERRANO, Gloria (1994), Investigación cualitativa. Retos e interrogantes. Madrid: La Muralla.
- [19] PLATAFORMA DIGITAL ÚNICA DEL ESTADO PERUANO (GOB.PE) (2020) (<https://www.gob.pe/institucion/indecopi/institucional>) Sitio web oficial del estado peruano; contiene información institucional sobre las funciones de distintos organismos gubernamentales (consulta: 20 de marzo).
- [20] ROSS, Timothy J. (2004) Fuzzy Logic with engineering applications. Inglaterra: Editorial John Wiley & Sons.

- [21] SECCIÓN ESPAÑOLA INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION (ISA) (2018) Ingeniería de instrumentación de plantas de proceso. España: Ediciones Díaz de santos.
- [22] VARGAS QUEVEDO, Francisco José (2020) Impacto del mantenimiento autónomo en la eficiencia general de una línea de producción de lavavajillas. Lima: Universidad de ingeniería y tecnología (UTEC).

## ANEXOS

### ANEXO 1: Formato de recopilación de datos con la información del proceso.

pH Pasta neutralizada	Temperatura de envasado (°C)	Peso de tolva (Kg)	Pose de potes dosificador 1 (Gr)	Pose de potes dosificador 2 (Gr)	Pose de potes dosificador 3 (Gr)	Pose de potes dosificador 4 (Gr)
10.5	59	450	540	538	534	542
10.5	58	448	539	535	533	538
10.5	59	446	542	535	532	540
10.5	57	444	539	535	530	539
10.5	58	441	540	533	532	538
10.5	59	439	540	534	528	537
10.5	55	437	539	535	530	539
10.5	59	435	538	534	529	537
10.5	58	433	535	534	530	536
10.5	57	431	537	534	526	538
10.5	59	429	538	533	528	539
10.5	58	426	537	533	528	538
10.5	55	424	536	531	529	539
10.5	58	422	536	534	526	539
10.5	54	420	536	533	525	539
10.5	56	418	536	532	527	538
10.5	59	416	535	533	528	538
10.5	58	414	536	532	525	540
10.5	58	412	534	532	526	538
10.5	57	409	535	532	526	538
10.5	55	407	536	532	525	538
10.5	58	405	535	531	525	540
10.5	57	403	535	532	526	540
10.5	56	401	533	532	523	539
10.5	59	399	533	528	525	539
10.5	56	397	530	531	523	537
10.5	57	394	533	529	524	539
10.5	57	392	534	532	522	538
10.5	58	390	534	532	524	538
10.5	59	388	533	530	519	537
10.5	57	386	533	531	522	536
10.5	56	384	534	529	522	535
10.5	57	382	535	531	523	537
10.5	58	380	534	528	521	537
10.5	59	378	534	527	519	536
10.5	59	375	533	528	520	536
10.5	59	373	535	528	521	537
10.5	59	371	534	528	522	537

**ANEXO 2:** Especificación técnica del producto pasta en crema lavavajillas.

ESPECIFICACIÓN TÉCNICA
------------------------

PRODUCTO: LAVAVAJILLA CREMA SAPOLIO

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS-QUÍMICAS
----------------------------------

ASPECTO	: Crema dura
COLOR	: Verde claro, Verde oscuro, Naranja y Rosado
OLOR	: Limòn , Manzana , Naranja y Frutal

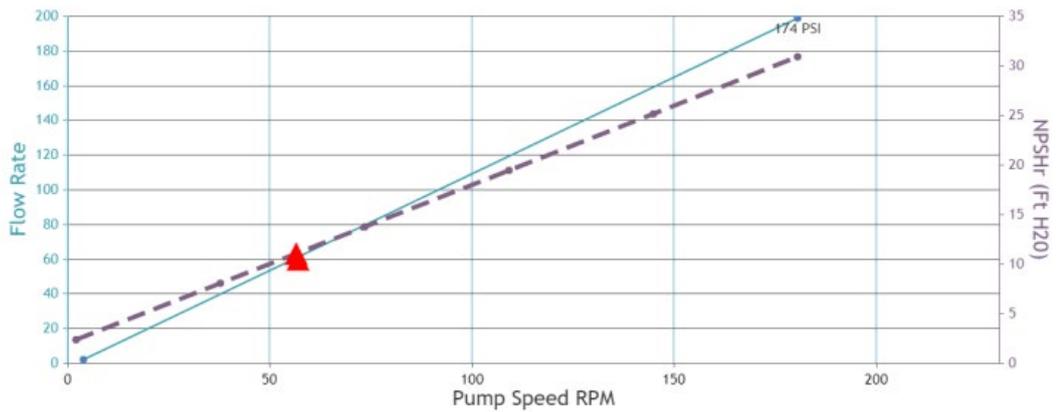
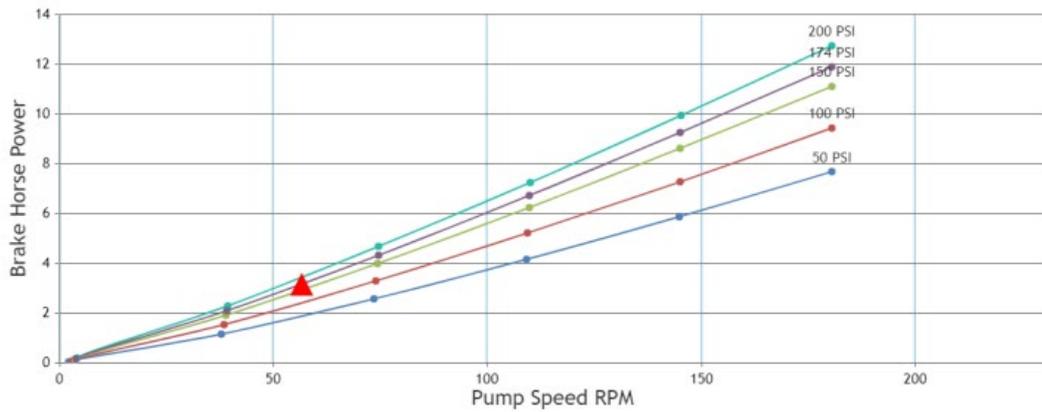
PARÁMETROS	ESTÁNDAR	MÍNIMO	MÁXIMO
DENSIDAD (KG/ L a 45 °C)	1,50		
pH AL 1 % A 25 °C	10,50	10,00	11,00
% INGREDIENTE ACTIVO ( DBSS )	16,00	15,00	17,00
DUREZA (mm)	15,00	10,00	20,00
VISCOSIDAD (cps, 45°C)	46165,0		
VISCOSIDAD (cps, 60°C)	36592,0		

**ANEXO 3: Curva de operación de la bomba VIKING PUMP P7M1.**

**VIKING PUMP**  
CURVE GENERATOR

Pump Series 124A	Pump Size LL	Viscosity 37000	Units cP	Differential Pressure 174	Units PSI	Specific Gravity 1.5
<input type="radio"/> Speed (RPM)	<input checked="" type="radio"/> Flow Rate	Units L/min	Application / Liquid Masa de lava vajilla			
Input Flow: 60 (L/min)		Calculated Speed: 56.5 (RPM)		Power at Input Flow: 3.16 (BHP)		NPSHr: 11.1 (Ft H2O)

**PERFORMANCE CURVES**



**ANEXO 4:** Extracto de ficha técnica de variador Danfoss FC-302.ENGINEERING  
TOMORROW**Especificaciones**

<b>Alimentación de red (L1, L2 y L3)</b>	
Tensión de alimentación	200-240 V $\pm$ 10 % FC 301: 380-480 V $\pm$ 10 % FC 302: 380-500 V $\pm$ 10 %, 525-600 V $\pm$ 10 % 525-690 V $\pm$ 10 %
Frecuencia de alimentación	50/60 Hz
Factor de potencia real ( $\lambda$ )	0,92 a la carga nominal
Factor de potencia de desplazamiento ( $\cos \varphi$ ) prácticamente uno	(>0,98)
Conmutación en la alimentación de la entrada L1, L2 y L3	1-2 veces/minuto
<b>Datos de salida (U, V y W)</b>	
Tensión de salida	0-100 % de la tensión de alimentación
Frecuencia de salida	FC 301: 0,2-590 Hz (0,25-75 kW) FC 302: 0-590 Hz (0,25-75 kW) 0-590 Hz (90-1200 kW) 0-300 Hz (modo de flujo)
Conmutación en la salida	Ilimitada
Tiempos de rampa	1-3600 segundos

*Nota: el convertidor puede suministrar el 160 % de corriente durante 1 minuto.  
Se consigue una mayor clasificación de sobrecarga sobredimensionando el convertidor.*