

# ING. MECATRÓNICA

**Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero en  
Mecatrónica.**

**AUTOR:** Renato Javier Pérez  
Loor

**TUTOR:** Ing. Gabriela  
Andaluz, MSc

Máquina dosificadora y empacadora de condimentos en  
polvo

## DECLARACIÓN

Yo PÉREZ LOOR RENATO JAVIER, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que se ha investigado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Universidad Internacional del Ecuador, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por normativa institucional vigente.



---

**PÉREZ LOOR RENATO JAVIER**

**C.C. 172525925-1**

## CERTIFICACIÓN

La Docente de la Facultad de Ciencias Técnicas Ingeniera Gabriela Andaluz.

CERTIFICA QUE:

El proyecto de investigación “MÁQUINA DOSIFICADORA Y EMPACADORA DE CONDIMENTOS EN POLVO”, fue desarrollado por el Sr. PÉREZ LOOR RENATO JAVIER ha sido debidamente revisado y está en condiciones de ser entregado para que siga lo dispuesto por la Facultad de Ciencias Técnicas, correspondiente a la sustentación y defensa del mismo.



---

**ING. GABRIELA ANDALUZ, M.Sc.**

**DIRECTOR DE PROYECTO**

*Dedico a mi padre por su motivación y apoyo incondicional.*

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	Tema . . . . .	1
2	Objetivos . . . . .	1
	2.1 General . . . . .	1
	2.2 Específicos . . . . .	1
3	Problema . . . . .	2
4	Hipótesis . . . . .	2
5	Estudio Teórico . . . . .	2
	5.1 Introducción . . . . .	2
	5.2 Proceso de Producción de Condimentos en Polvo . . . . .	4
	5.3 Normativas Aplicables al Proyecto . . . . .	4
	5.4 Sistema de Dosificación . . . . .	6
	5.5 Sistema de Sellado . . . . .	10
	5.6 Sistema de Pesaje . . . . .	12
	5.7 Condimentos . . . . .	14
	5.8 Sistema de Arrastre . . . . .	16
	5.9 Trabajos Existentes . . . . .	19
6	Necesidades y Parámetros de Diseño . . . . .	22
	6.1 Análisis de Alternativas . . . . .	25
	6.2 Factores de Seguridad . . . . .	31
7	Diseño Mecatrónico . . . . .	32
	7.1 Diseño Mecánico . . . . .	34
	7.2 Diseño Electrónico . . . . .	76
	7.3 Diseño del Control . . . . .	94
	7.4 Diseño de la Programación . . . . .	102

8	Construcción del Prototipo . . . . .	107
9	Pruebas y Resultados de Funcionamiento . . . . .	109
9.1	Prueba Sellado . . . . .	110
9.2	Prueba Masa . . . . .	112
9.3	Prueba tiempo (fundas por hora) . . . . .	115
9.4	Base de datos . . . . .	115
10	Análisis de costos . . . . .	116
10.1	Costos Directos . . . . .	116
10.2	Costos Indirectos . . . . .	117
10.3	Costo Total . . . . .	118
11	Conclusiones . . . . .	118
12	Recomendaciones . . . . .	119

# ÍNDICE DE FIGURAS

1	Diagrama de procesos de condimentos en polvo . . . . .	4
2	Dosificador gravimétrico . . . . .	7
3	Dosificador volumétrico . . . . .	8
4	Dosificador de tornillo sin fin . . . . .	8
5	Dosificador por peso . . . . .	9
6	Dosificador por tiempo . . . . .	10
7	Selladora de pedal . . . . .	11
8	Selladora de mordaza . . . . .	12
9	Selladora vertical . . . . .	12
10	Balanza multicabezal . . . . .	13
11	Balanza generalmente usada con polvos . . . . .	14
12	Rodillos tensores . . . . .	16
13	Banda de arrastre . . . . .	17
14	Rodillos de arrastre . . . . .	18
15	Sistema de arrastre más sellado . . . . .	19
16	Factores de diseño . . . . .	32
17	Modelo 3D de la máquina dosificadora y empacadora de condimentos . . . . .	33
18	Modelo 2D de la tolva con dimensiones en mm . . . . .	36
19	Diseño 3D de la Tolva de capacidad 5 kg. . . . .	37
20	Diseño de un dosificador de tornillo sin fin . . . . .	38
21	Diseño 3D del tornillo dosificador . . . . .	42
22	Diseño 3D de la balanza . . . . .	44
23	Viga con extremos empotrados . . . . .	46
24	Cátalogo de tubos cuadrados DIPAC . . . . .	48

25	Puntos fijos de la estructura . . . . .	50
26	Fuerzas aplicadas en la estructura . . . . .	50
27	Mallado de la estructura para la simulación de elementos finitos . . . . .	51
28	Resultado de esfuerzos producidos por las fuerzas aplicadas a la estructura	52
29	Deformaciones en la estructura . . . . .	52
30	Estructura principal de la máquina dosificadora . . . . .	54
31	Esquema para el cálculo de soldadura . . . . .	55
32	Tipos de electrodos disponibles en el mercado . . . . .	58
33	Estructura principal de la máquina dosificadora . . . . .	59
34	Tubo de alimentación . . . . .	61
35	Tubo de alimentación . . . . .	62
36	Cuello formador . . . . .	63
37	Mordaza vertical . . . . .	66
38	Mordaza horizontal de sellado . . . . .	69
39	Especificaciones técnicas de engranajes de módulo 1 a 2,5 . . . . .	71
40	Sistema de sellado con mordazas vertical y horizontales . . . . .	73
41	Diagrama de cuerpo libre de rodillo de arrastre . . . . .	74
42	Diagrama de bloques para dimensionamiento electrónico . . . . .	77
43	Raspberry pi 3b+ . . . . .	80
44	Pantalla Waveshare de 7 in . . . . .	81
45	Driver para control motor a pasos DRV8825 . . . . .	86
46	Celda de carga . . . . .	87
47	Módulo HX711 . . . . .	88
48	Conexión celda de carga, HX711 y Raspberry . . . . .	88
49	Pulsador de emergencia 22mm tipo hongo de liberación por giro . . . . .	90
50	Luz piloto verde, 22 mm, 120 V . . . . .	90
51	Gráfica Tiempo vs Masa de la señal esperada y la señal obtenida de la balanza	94
52	Constantes de control . . . . .	97
53	Simulación sistema de control lazo abierto . . . . .	98
54	Simulación sistema de control lazo abierto gráfico . . . . .	99



55	Simulación sistema de control lazo cerrado sin control . . . . .	99
56	Simulación sistema de control lazo cerrado sin control gráfico . . . . .	100
57	Simulación sistema de control PI en Simulink . . . . .	100
58	Simulación sistema de control PI en Simulink . . . . .	101
59	Gráficas de las señales de control . . . . .	101
60	Diagrama de flujo para el control de la máquina . . . . .	103
61	Pantalla 1 del GUI del prototipo . . . . .	104
62	Pantalla 2 del GUI del prototipo . . . . .	105
63	Pantalla 3 del GUI del prototipo . . . . .	105
64	Diagrama de flujo para base de datos . . . . .	106
65	Diagrama de flujo para control PI . . . . .	107
66	Prototipo final vista frontal . . . . .	108
67	Prototipo final vista lateral . . . . .	109
68	Sellado insatisfactorio 2 segundos . . . . .	111
69	Sellado satisfactorio 3 segundos . . . . .	112
70	Pesaje de funda de pimienta negra de 50 gramos . . . . .	113
71	Pesaje de funda de azúcar de 25 gramos . . . . .	114
72	Consulta de procesos . . . . .	116

# ÍNDICE DE TABLAS

1	Normativas relacionadas con el desarrollo del proyecto . . . . .	5
2	Comparativa de condimentos . . . . .	14
3	Análisis de trabajos existentes . . . . .	19
4	Parámetros de diseño . . . . .	24
5	Comparativa del material acero inoxidable vs aluminio . . . . .	25
6	Propiedades acero ASTM A36 . . . . .	26
7	Comparativa de mecanismos de dosificadores . . . . .	27
8	Comparativa materiales plásticos . . . . .	29
9	Comparativa materiales de la tolva . . . . .	30
10	Listado partes principales de la máquina . . . . .	33
11	Comparativa de ángulos de fricción mínimos para lograr un flujo másico . . . .	35
12	Coeficiente de relleno . . . . .	39
13	Pesos de elementos de la máquina . . . . .	49
14	Comparativa de tipos de carga y que esfuerzos y factores de seguridad se aplican . . . . .	57
15	Análisis de I/O . . . . .	78
16	Comparativa controladores . . . . .	79
17	Alternativas Pantallas HMI . . . . .	81
18	Alternativas Motores . . . . .	82
19	Alternativas drivers motores a pasos . . . . .	85
20	Alternativas pulsadores de emergencia . . . . .	89
21	Alternativas pulsadores de emergencia . . . . .	90
22	Componentes electrónicos seleccionados . . . . .	93
23	Voltajes de alimentación . . . . .	93

24	Pruebas sellado . . . . .	110
25	Pruebas masa . . . . .	113
26	Pruebas masa . . . . .	114
27	Pruebas tiempo de producción de fundas de 25 g . . . . .	115
28	Costos directos . . . . .	117
29	Comparativa EM-A4DP vs Prototipo Construido . . . . .	118

# MÁQUINA DOSIFICADORA Y EMPACADORA DE CONDIMENTOS EN POLVO

## 1. Tema

Máquina dosificadora y empacadora de condimentos en polvo

## 2. Objetivos

### 2.1. General

Diseñar y construir una máquina dosificadora y empacadora de condimentos en polvo.

### 2.2. Específicos

- Investigar y documentar las normativas, tecnologías y mecanismos existentes para elegir el mejor sistema de sellado y dosificación para condimentos en polvo.
- Diseñar la estructura y mecanismos mecánicos necesarios para la máquina dosificadora y empacadora de condimentos en polvo.
- Dimensionar y seleccionar los componentes mecatrónicos de la máquina dosificadora y empacadora de condimentos en polvo.
- Construir e implementar todos los componentes mecánicos, electrónicos, eléctricos y de control de la máquina dosificadora y empacadora de condimentos en polvo.
- Implementar un HMI para controlar y automatizar el funcionamiento de la máquina en el proceso de dosificación y empaquetado de 25 g y 50 g de tres condimentos en polvo.
- Diseñar una base de datos que permita el registro de producción por fecha, tipo de condimento, peso y cantidad de fundas selladas.
- Realizar pruebas de funcionamiento de máquina dosificadora y empacadora de condimentos en polvo.

### **3. Problema**

Los productos granulares y en polvo presentan algunos problemas cuando necesitan ser dispensados, ya que fluyen de forma errante, se comprimen fácilmente lo que compacta el producto formando masas granulosas las cuales deben disolverse. Este tipo de características dificultan el uso de sistemas de dosificación volumétricos debido a que su densidad cambia según el nivel de compresión al que este sometido. Al existir otras alternativas de dosificación se debe considerar la capacidad de los mecanismos de adaptarse a varios tipos de condimentos asegurando que el contenido de cada funda este acorde a la tolerancia definida.

### **4. Hipótesis**

La máquina dosificadora y empacadora de condimentos en polvo será capaz de almacenar los condimentos en polvo (específicamente sal, azúcar y pimienta) en una tolva, cuya capacidad máxima será de 5 kg. En la parte superior de la tolva, empleando un sistema de dosificación, el polvo del condimento pasará a una balanza hasta alcanzar la masa deseada dentro de un rango de error aceptable de  $\pm 2$  por ciento, con la máquina se dosificará condimento en porciones de 25 y 50 g. Además, incluye un sistema de empaquetado y sellado de 110 fundas por hora. Cuyos registros de producción podrán ser consultados en la base de datos que considerará el sistema.

### **5. Estudio Teórico**

#### **5.1. Introducción**

Hoy en día cualquier máquina que permita mejorar los procesos de producción dentro de la industria es vital para las empresas que desean volverse competitivas y posicionarse en el mercado, esto en especial dentro de la industria de alimentos. Por esto las dosificadoras de alimentos que están diseñadas para distribuir el producto y llenar envases, fundas o recipientes con este en cantidades exactas, son de vital importancia. Para que una de estas máquinas justifique la inversión debe mejorar considerablemente los tiempos de llenado y

empaque, manteniendo la misma calidad de los alimentos. [1]

Las primeras máquinas de dosificación consistían en un sistema de medición de peso, siendo susceptibles a dos grandes problemas, una necesidad constante de calibración, y problemas con los mecanismos de dosificación. Con la mejora constante en la tecnología involucrada en estas máquinas, actualmente brindan procesos precisos y mejoran los tiempos comparados con la mano de obra humana. Están presentes en casi todas las industrias donde se procesa, produce y elabora productos, los cuales requieren de tiempos de producción y empaque cortos. En la industria farmacéutica y química se necesita de una precisión muy alta al momento de dosificar los ingredientes de medicinas y otros productos, por lo que dosificadoras más caras y precisas son usadas. En cambio, en la industria alimenticia se enfocan más en un buen ritmo de dosificación de polvos, ausencia de grumos y otros parámetros que tienen que ver más con las propiedades de los materiales a usar. [2]

Debido a la realidad de nuestro país las empresas tienden a importar estas máquinas cuyos costos sobrepasan los 10 mil dólares más impuestos, por lo que, empresas pequeñas dudan al momento de invertir en estas máquinas. Las opciones que manejan actualmente las empresas que desean realizar esta inversión están en importar dosificadoras desde Colombia, cuyos impuestos son los menores si se opta por importar. La segunda opción es la de comprar dosificadoras de segunda mano, lo cual si bien es una solución viable no suele contar con técnicos especializados y las máquinas al dañarse son difíciles de reparar, o sus repuestos tardan en llegar. Pocas son las compañías ecuatorianas que se especializan en este tipo de máquinas, pero en los últimos años la empresa rino-maquinarias ha sacado al mercado muchos modelos de dosificadoras para diferentes tipos de productos lo que en un futuro podrá reducir los costos de las máquinas dosificadoras y así motivar a más micro empresas a invertir en esta forma de automatización. [3]

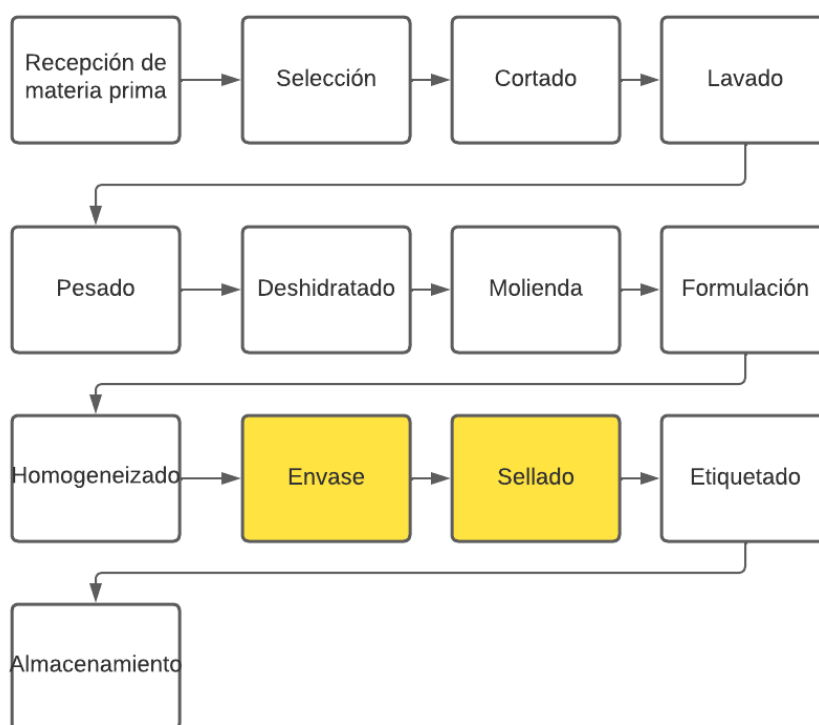
Si se considera que estas máquinas juntan todas las áreas de estudio de la mecatrónica, es una integración de sistemas perfecto para demostrar los conocimientos adquiridos durante la carrera y aplicarlos en un proyecto de grado. Por esto el proyecto a realizar está enfocado a las micro empresas ecuatorianas que necesitan una solución a sus problemas de automatización en el empaque dosificación y sellado de condimentos en polvo, tomando en cuenta que los pequeños productores de este tipo de alimento realizan estos procesos

de forma artesanal costándoles tiempo, dinero y competitividad.

Los alimentos pueden tener cualquier forma estado o composición y se desarrollan diferentes mecanismos aplicados a cada tipo. En el mercado, existen dosificadoras especializadas en líquidos, sólidos, granos, polvo, entre otras. Se necesitan de diferentes técnicas y funcionalidades para que la precisión sea alta. Además, que para cumplir con las normas sanitarias los líquidos requieren de diferentes parámetros que los sólidos o granos.

## 5.2. Proceso de Producción de Condimentos en Polvo

El proceso de elaboración y empaqueo de los condimentos puede generalizarse con el diagrama de bloques de la Figura 1 , los subprocesos resaltados corresponden a la máquina que se construirá dentro del presente proyecto.



**Figura 1:** Diagrama de procesos de condimentos en polvo

## 5.3. Normativas Aplicables al Proyecto

En la Tabla 1 se presentan las normas aplicadas al área alimenticia y su respectiva descripción.

**Tabla 1:** Normativas relacionadas con el desarrollo del proyecto

<b>Norma</b>	<b>Código</b>	<b>Nombre</b>	<b>Parte aplicable</b>
INEN	57	Sal para consumo humano.	Porcentaje máximo de humedad de la sal
INEN	2532	Especias y Condimentos	Tabla de humedad máxima de varios condimentos y artículos 4.3 y 4.4
INEN	259	Azúcar blanco.	Humedad máxima del azúcar
GEA	A15	Niro Method	Proceso necesario para que polvos no absorban humedad



Norma	Código	Nombre	Parte aplicable)
INEN	01:1987	Código de práctica para manipulación de alimentos	Recomienda la aplicación de prácticas generales y selección de materiales en el envasado de alimentos para el consumo humano con objeto de garantizar un producto inocuo, saludable y sano.

La selección de materiales para el diseño de la máquina dosificadora y empaquetadora de condimentos se basa en estas normas.

#### 5.4. Sistema de Dosificación

Los sistemas de dosificación son los encargados de suministrar una cantidad exacta de material, están presentes en las industrias química, metalúrgica, cementera, alimentaria, farmacéutica y otras. En la industria alimenticia existen varios sistemas según el producto que se necesite dosificar y de la precisión requerida.

Los mecanismos de dosificación varían mucho dependiendo del producto, su densidad, su comportamiento al moverse, su tendencia a compactarse y principalmente según su estado y viscosidad [1]. En general, un sistema de dosificación consta de una parte de almacenamiento, un mecanismo que traslada la cantidad exacta de material desde el contenedor de

material hasta un empaque. Entre los principales sistemas de dosificación se tienen:

- **Dosificadores Gravimétricos**

También conocidos como dosificadores ponderados, se utilizan en las industrias farmacéutica, agrícola, alimenticia y química. Son recomendados para procesos que requieran de un nivel de precisión muy alto y con materiales que sean en polvo, en grano o con viscosidades muy elevadas. Consiste en el producto retenido en una tolva conectada a una balanza que controla permanentemente el peso del interior de la tolva, este tipo de dosificadores trabajan por el método de pérdida de peso diferencial dentro de un tiempo específico [4]. Un ejemplo de este tipo de dosificador se puede observar en la Figura 2.



**Figura 2:** Dosificador gravimétrico [5]

- **Dosificadores Volumétricos**

Este tipo de dosificadores trabajan midiendo el volumen específico del producto y descargándolo sobre un rango variable. No mide masa y para el diseño de este tipo se necesita analizar la esencia del material, su fluidez y la cantidad requerida para la dosificación, que son aspectos importantes a considerar. Su sistema requiere una calibración constante en especial si la máquina será usada para varios tipos de producto [6]. Un ejemplo de este tipo de dosificador se puede observar en la Figura 3.



**Figura 3:** Dosificador volumétrico [7]

- Dosificadores de Tornillo Sin Fin

Son utilizados para materiales con poca fluidez, en polvo o aquellos que son viscosos. Este tipo de mecanismo puede ser adaptado tanto a los sistemas gravimétricos como volumétricos. Su funcionamiento consiste en un contenedor con un tornillo sin fin giratorio en el centro [8]. Un ejemplo de este tipo de dosificador se puede observar en la Figura 4.



**Figura 4:** Dosificador de tornillo sin fin [9]

- Dosificadores por Peso

El producto se almacena en un contenedor y su peso se mide de manera ininterrumpida de forma electrónica a través de balanzas de alta precisión las cuales son controladas por microprocesadores específicos para este tipo de máquinas [10]. Suelen requerir un operador que presione un pedal o botón de dosificación hasta adquirir el peso deseado que se muestra en una pantalla, por lo que su precisión de este tipo de dosificador suele ser variable dependiendo del operador. Un ejemplo de este tipo de

dosificador se puede observar en la Figura 5.



**Figura 5:** Dosificador por peso [2]

- Dosificadores por Tiempo

Este tipo de dosificadores son recomendados cuando se necesita de distribución continua y repetitiva de fluidos tanto de alta y baja viscosidad. Trabajan con cambios de presión para lograr el flujo de producto constante durante un tiempo delimitado [11].

Un ejemplo de este tipo de dosificador se puede observar en la Figura 6.



**Figura 6:** Dosificador por tiempo [12]

## 5.5. Sistema de Sellado

El proceso de sellado se realiza una vez que el producto se encuentra en el contenedor y es necesario aislarlo del ambiente externo para su conservación, en la industria alimenticia se debe tener algo cercano a un sellado hermético, tanto en empaques flexibles o rígidos. En el caso de las fundas la gran mayoría se someten a un termo sellado, donde, se unen dos capas de similares características hasta que estas capas se suelden formando una sola lámina. [13] Este proceso debe darse en todas sus partes superior, inferior y vertical. Existen varias técnicas de sellado disponibles en el mercado, y estas son clasificadas según el tipo de material que se va a sellar, pero en general los procesos combinan presión con calor, es decir que requiere de mecanismos lineales que ejerzan presión, y de abrazaderas o niquelinas que generen el calor requerido para sellar las fundas, el proceso de sellado o empaquetado también está sujeto a diferentes mecanismos existentes en la industria como:

- Máquinas de Empacamiento Vertical
- Máquinas de Empacamiento Horizontal
- Máquinas de Sellado Combinado

Al tener tantas variantes las máquinas dosificadoras actuales, permiten combinar cada tipo de mecanismo para obtener los mejores resultados dependiendo del material a dosificar. Para el proceso de sellado de fundas se tienen varios tipos de máquinas las cuales se

detallan a continuación:

- Selladoras de Pedal

Sirven para sellar bolsas de plástico o bolsas metalizadas, de cualquier calibre a través de dispersión de temperatura en el área a sellar. La temperatura de sellado es regulable y cambia dependiendo del calibre de plástico con el que se va a trabajar. La niquelina es la parte que se calienta y a través de un pedal se cierra el cabezal superior y aplasta a la funda hasta sellarla. [2] Un ejemplo de este tipo de selladora se puede observar en la Figura 7.



**Figura 7:** Selladora de pedal [14]

- Selladoras de Mordaza

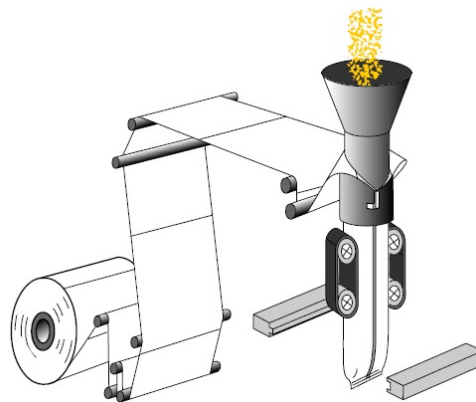
Ofrecen un sellado plano o ranurado, emplea el mismo principio de sellado por temperatura, pero hace uso de un mecanismo de mordaza donde la funda es aplastada hasta lograr un sellado uniforme o con patrones específicos. Debido al mecanismo que utiliza puede abarcar grandes distancias de sellado de hasta 50 cm de largo [2]. Un ejemplo de este tipo de selladora se puede observar en la Figura 8.



**Figura 8:** Selladora de mordaza [15]

- Selladoras Continuas Verticales

Se utilizan en especial para polvos y líquidos donde se requiere un ritmo de sellado bastante rápido, trabaja con temperatura regulable, utilizan una sola bobina de film para las fundas y conforman el empaque con tres niquelinas, dos transversales y una longitudinal [2]. Un ejemplo de este tipo de selladora se puede observar en la Figura 9.



**Figura 9:** Selladora vertical [16]

## 5.6. Sistema de Pesaje

Otra de las partes más importantes de una dosificadora es el sistema de pesaje como el que se muestra en la Figura 11, debido a que sin un mecanismo que permita obtener resultados viables y precisos la dosificadora no cumplirá su función principal. Para pesar en general usan sensores que transforman la fuerza ejercida en un dato legible por el dispositivo de control para mostrar la masa que se esta dosificando. A continuación, se detallan los principales sistemas de pesaje utilizados en máquinas dosificadoras:

- Sistema de Tolvas para Pesaje

La idea de este sistema es que mida el peso dentro del recipiente contenedor, en la industria generalmente se utiliza una tolva o un tanque para almacenar los productos. A estas se agrega una celda de carga en la base de la tolva, que necesita de un mecanismo electrónico para lograr una medición de peso constante que se muestra inmediatamente después de la medición. Esto quiere decir que no importa la densidad del producto dentro de la tolva porque se mide la cantidad de masa que hay en el contenedor. Requiere de una calibración inicial y de un cero referencial para trabajar con varios materiales o productos. [17]

- Sistema de Balanza Multicabezal

Utilizan un proceso de pesaje por asociación, tienen entre 8 a 16 recipientes donde se introduce el producto de forma aleatoria, cada recipiente tiene una celda que reporta el peso de cada recipiente, con la ayuda de un microprocesador se asocian los pesos y se sabe cuándo se obtiene la cantidad deseada. Generalmente, se combinan varios recipientes y su contenido se deja caer a la parte formadora y de sellado de la máquina [17]. Un ejemplo se puede ver en la Figura 10.



**Figura 10:** Balanza multicabezal [18]

- Sistema de balanza externa

Se utiliza una balanza ubicada a la salida de la tolva que tiene un recipiente propio y recibe el material para así comprobar el peso correcto antes de dejar pasar el mate-



rial a la siguiente etapa del proceso [17]. Esta es la elegida para este proyecto y se muestra un ejemplo general en la Figura 11.



**Figura 11:** Balanza generalmente usada con polvos [19]

## 5.7. Condimentos

La utilización de envases aparece con más frecuencia en el sector de la industria alimenticia, donde están presentes productos en polvo los cuales tienen consistencias y densidad variadas por lo que existen diferentes tipos de sistemas de dosificación automatizados que han optimizado la industria y sus procesos [20]. Para seleccionar los condimentos con los cuales podrá trabajar la máquina se busca aquellos que presenten menos complicaciones al momento de dosificar. Como requerimiento los condimentos deben tener granos delgados, que no se formen grumos y que no necesiten de condiciones de humedad controladas. En la Tabla 2 se muestra una comparación de las principales características que se consideran para los condimentos en polvo.

**Tabla 2:** Comparativa de condimentos

Condimento	Densidad(g/ml)	Densidad(kg/m <sup>3</sup> )	Humedad(max. porc.)
Canela en polvo	0,56	560	14
Ajo en polvo	0,32	320	9
Azúcar en polvo	0,56	560	7,5

Condimento	Densidad(g/ml)	Densidad(kg/m <sup>3</sup> )	Humedad(max. porc.)
Pimienta negra en polvo	0,864	864	14
Cúrcuma en polvo	0,348	348	10
Sal en polvo	1,15	1000	15

La densidad aparente que tiene un polvo se refiere a la relación que existe entre su volumen y la masa de una muestra no compactada, tomando en cuenta el espacio vacío que queda entre las partículas granulares del material. Este detalle de consideración del volumen ocupado por los vacíos hacen que la densidad este influenciada tanto por la densidad de las partículas del polvo como por la disposición espacial de las mismas. La densidad aparente se mide en gramos por mililitro (g/ml), pero la unidad estandarizada es el kilogramo por metro cúbico (kg/m<sup>3</sup>).

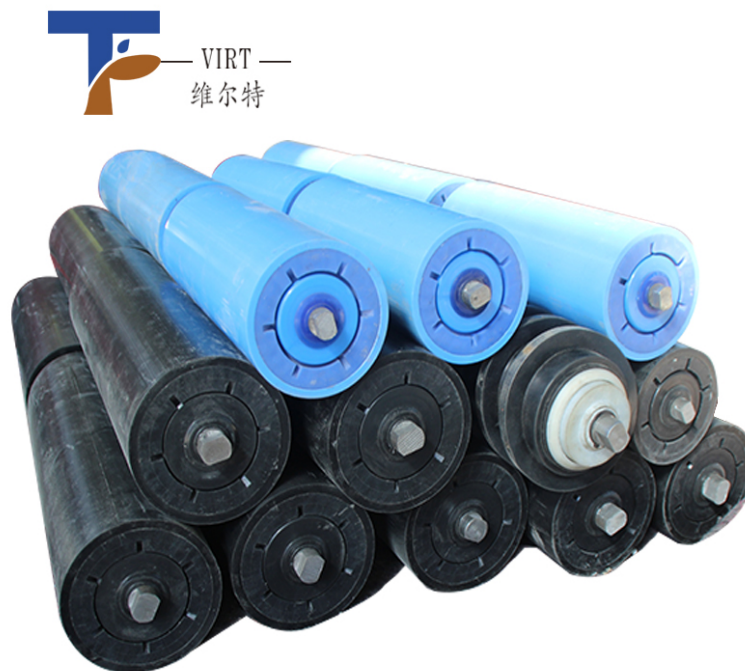
Las propiedades de volumen de un polvo están relacionadas con cómo se prepara, trata y almacena la muestra de material. Las partículas se pueden empaquetar para tener un rango de densidades aparentes y, además, pequeñas alteraciones de la muestra puede resultar en variaciones de densidad aparente. Por esto se dice que la densidad aparente de un polvo suele ser muy difícil de medir y depender de esta en casos reales no es muy conveniente [21]. Sin embargo, en los polvos se tiende a formar aglomerados o grumos, estos aparecen cuando se absorbe humedad o vapor de agua del ambiente en el que se encuentra, esto puede ser un problema, pero se soluciona con una adecuada manipulación y conservación del material dentro de contenedores y espacios herméticos. Se entiende por humedad la cantidad de vapor de agua presente en un volumen específico de aire seco a una temperatura determinada e invariante en el tiempo de medición. Por estos factores, se busca un proceso donde la densidad tenga la menor relevancia posible y que los condimentos soporten la mayor cantidad de humedad. Por lo expuesto, en el presente proyecto se consideran los siguientes condimentos a dosificar: pimienta negra en polvo, sal en polvo y azúcar en polvo [1].

## 5.8. Sistema de Arrastre

Para arrastrar el plástico se necesita un sistema que desenvuelva desde el bobinado, pasando por ejes de tensión que hacen que el plástico mantenga la tensión para llegar al cuello formador de funda, con la cantidad adecuada de film para introducir los condimentos [13]. El sistema de arrastre se compone básicamente de:

- Rodillos Tensores

Estos cumplen la función de estirar el film plástico con el cual se forma la funda, necesario para lograr un sellado correcto y sin desperdicio de material. Generalmente constan de un eje central y una parte exterior que gira como se muestra en la Figura 12.



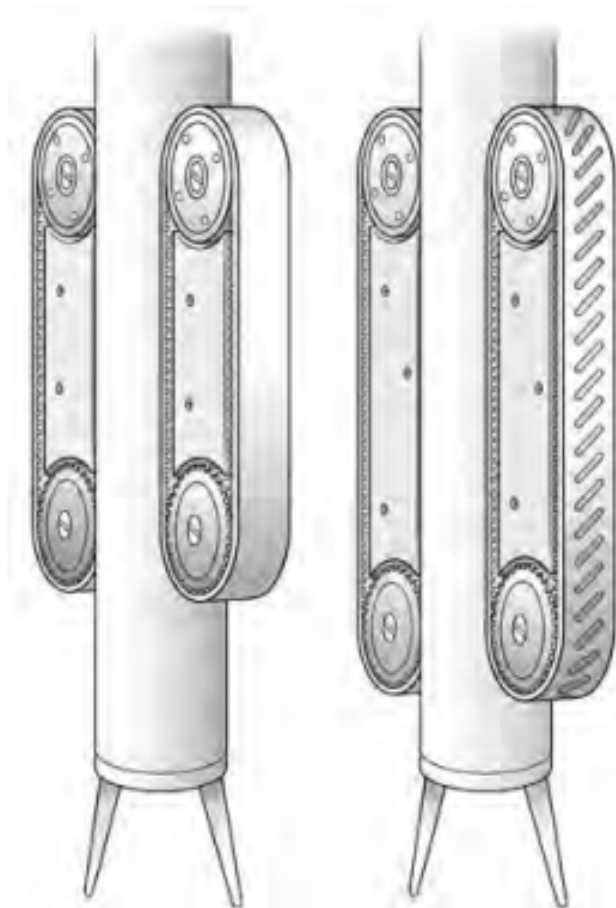
**Figura 12:** Rodillos tensores [22]

- Mecanismo de Arrastre de Película

Para el mecanismo de arrastre se tienen las siguientes alternativas:

- Bandas de Arrastre.- Son los elementos que están encima de una polea motorizada, estas permiten el impulso o deslizamiento del film de plástico. Su ventaja es

la gran área de contacto que tiene con el plástico asegurándose que la bobina se desenvuelva de forma uniforme. Generalmente, el área de contacto de la banda debe ser un poco mayor a la altura de la funda para que en una vuelta de banda se desenrolle la cantidad suficiente para formar una funda [13]. Un ejemplo se muestra en la Figura 13.



**Figura 13:** Banda de arrastre [23]

- Rodillos.- Están destinados a poner en movimiento materiales con los cuales tiene contacto directo. El rodillo recibe el movimiento por su eje, y su parte exterior, la cual realiza el contacto, suele estar recubierta por materiales que generen la fricción necesaria para arrastrarlos. Además, utilizan el mismo principio de funcionamiento que las bandas de arrastre descritas anteriormente, pero tienen menor área de contacto con el material a arrastrar, comúnmente se fabrican con silicona, perfecta para adherirse al plástico, se encuentran sistemas de arrastre con rodillos cuando se tienen fundas y producciones a pequeña y mediana escala [13]. Al tener una menor área de contacto toma más importancia evitar que ambos

rodillos empiecen desfasados o que uno se mueva más que el otro, debido a que puede que el plástico se desiguale y salgan fundas mal formadas. Un ejemplo se muestra en la Figura 14.



**Figura 14:** Rodillos de arrastre [24]

- Sistema de Arrastre más Sellado.- Combina el proceso de sellado y arrastre en un solo movimiento haciendo uso de un ensamble de sellado que se mueve sobre una riel, lo que le permite moverse de forma vertical a todo el conjunto de sellado, este contiene las mordazas de sellado y sistema de corte. Para este tipo de sistema se necesita sincronización precisa y para lograr el movimiento se utilizan actuadores lineales o mecanismo tipo biela manivela [13]. Un ejemplo se muestra en la Figura 15.



**Figura 15:** Sistema de arrastre más sellado [25]

### 5.9. Trabajos Existentes

A continuación se muestra trabajos y estudios referentes al tema o similares al proyecto a desarrollar.

**Tabla 3:** Análisis de trabajos existentes

Año	Publicación	Nombre de Investigación o Producto	Método	Explicación
2018	ESPE	Diseño e implementación de un sistema de clasificación y empaquetado automático de helados para una micro empresa mediante inteligencia artificial	Tesis	Se propone desarrollar un sistema de clasificación y empaquetado de helados utilizando inteligencia artificial. El sistema constaría de cuatro componentes: la parte mecánica, el control, una parte inteligente de clasificación y una interfaz para el usuario.

Año	Publicación	Nombre de Investigación	Método	Explicación
2019	ESPE	Diseño y construcción de una máquina automática para el pesaje y sellado de fundas de harina desde 0.5 hasta 2 libras, con supervisión remota para el comercial Jacqueline, ubicado en la ciudad de Ambato	Tesis	El proyecto se enfoca en el diseño y construcción de un sistema de pesado y sellado automático con supervisión remota. El sistema cuenta con una tolva para depositar la materia prima, seguido de una etapa de pesaje del producto, formación y sellado de la funda con film de plástico. También incluye un sistema de alarmas y notificaciones, para alertar cuando la materia prima y el film de plástico se han agotado.

Año	Publicación	Nombre de Investigación	Método	Explicación
2007	Universidad de la Salle	Máquina automática de llenado y sellado de envase tipo Pet para condimentos en polvo	Tesis	El documento sustenta el diseño de una máquina automática para el empaque de condimentos en polvo en envases de tipo PET, este proyecto contiene: El análisis de las diferentes granulometrías de los condimentos que se encuentran actualmente en el mercado, el diseño más óptimo del envase donde va ser empacado el alimento, y, la estructura física de los sistemas mecánicos más adecuados para el empaque de estos condimentos, luego es presentado, el análisis de fuerzas aplicadas sobre el modelo de la máquina para, establecer el soporte y estabilidad de la misma.



Año	Publicación	Nombre de Investigación	Método	Explicación
2006	Universidad de la Salle	Diseño, modelamiento y simulación de máquina dosificadora de alimento granulado para animales	Tesis	Un diseño de máquina la cual va a brindar seguridad en la cantidad dosificada de material, en un tiempo corto y evitando una manipulación manual, para así reducir el riesgo de introducir impurezas al mismo.
2006	Bosch	Guide to Vertical Form-Fill-Seal Baggers	Guía	En este folleto, puede leer todo acerca de las capacidades clave de VFFS máquinas, las diferentes formas de bolsas, las partes de las máquinas VFFS y sus función en el envasado de bolsas, y sobre cómo optimizar su máquina ajustes. Este conocimiento amplía la comprensión de las máquinas. con los que trabaja.

## 6. Necesidades y Parámetros de Diseño

Los requerimientos que se han establecido para la construcción de la máquina dosificadora y empacadora de condimentos en polvo, se basan en los parámetros principales previamente definidos, los cuales se explican a continuación:

- Tolva

- Para el diseño de la tolva se toma en cuenta que el tamaño de la estructura será

mayor al de la tolva, y considerando que el prototipo debe ser de fácil transporte y pase por puertas y corredores con facilidad, se decide que la tolva no debería ocupar un volumen mayor al de un cubo de 25 cm de lado.

- La capacidad máxima de la tolva se define en 5 kg de condimento para elaborar 100 fundas con la masa máxima de 50 g con una sola recarga de condimento en la tolva.

#### ■ Prototipo

- La máquina se considera un prototipo que no funcionará en la industria ni en un ambiente real de alta exigencia, por lo que, para su construcción prevalece en la elección el costo y funcionalidad de los materiales y piezas, antes que buscar cumplir con estándares industriales pensados para alta exigencia y durabilidad.

#### ■ Balanza

- Para el diseño de la balanza es importante que esta sea capaz de almacenar el volumen completo que ocupa el condimento con la masa máxima de una funda, se elige la forma de prisma puesto que esta forma es la que se encuentra en la mayoría de balanzas a la salida de tolvas de uso industrial, aunque puede tomar otra forma como piramidal o circular siempre y cuando cumpla con el volumen de almacenamiento requerido.

#### ■ General

- Fácil manejo.
- Fácil transporte del prototipo.
- Fácil mantenimiento.

#### ■ Sellado

- Para considerar un sellado eficiente se necesita que la funda no presente fugas, no se abra con facilidad y no se quemé el polietileno.

A continuación, se muestra en la Tabla 4 los valores principales que forman parte del diseño de todos los elementos del prototipo.

**Tabla 4:** Parámetros de diseño

Número	Parámetro	Valor o especificación	Unidad
1	Tasa de empaquetado	100	fundas/hora
2	Masa máxima funda	50	g
3	Masa mínima funda	25	g
4	Capacidad de la tolva	5	kg
5	Altura	Que sea cómodo rellenar la tolva para el usuario	N/A
6	Mantenimiento	Fácil y accesible	N/A
7	Factor de diseño	1,5	N/A
8	Tamaño Máximo del grano del condimento	2	mm
9	Densidad de la pimienta negra	0,864	g/ml
10	Densidad del azúcar en polvo	0,56	g/ml
11	Densidad de la sal	1,15	g/ml

Número	Parámetro	Valor o especificación	Unidad
12	Dimensiones de la funda	9 . 13	cm
13	Voltaje de alimentación	120	V

## 6.1. Análisis de Alternativas

### Material Estructura

La estructura de soporte es la plataforma en la que se montan todos los componentes, mecánicos y eléctricos, se necesita entonces que las diferentes vigas y soportes de esta tengan caras planas para así facilitar su función de sostener los componentes, por lo que, se deben buscar tubos cuadrados de un material resistente, no tóxico, poco poroso y que soporte el peso de los componentes.

Para el diseño de la estructura se analiza entonces dos alternativas: estructura de tubos cuadrados de acero inoxidable o de acero negro A36, las características de ambos materiales se describen en la Tabla 6.

**Tabla 5:** Comparativa del material acero inoxidable vs aluminio Comparativa del material acero inoxidable vs aluminio [2]

	Acero inoxidable	Acero negro
Peso	Es más pesado que el acero negro	Es alrededor de la mitad del peso acero inoxidable
Corrosión	El acero inoxidable tiene en su composición un cierto porcentaje de cromo, lo que le proporciona una mayor resistencia a la corrosión.	Presenta una resistencia media a la corrosión y oxidación

	Acero inoxidable	Acero negro
Soldadura	Es más fácil de soldar y tiene un mejor acabado	Soldabilidad similar que el acero inoxidable pero necesita de más post-procesos para un acabado correcto
Practicidad	Más complicado de trabajar por su resistencia	Corte, manipulación y moldeado es más fácil
Costo	Medio	Bajo

El acero inoxidable es la mejor opción para la implementación de la máquina en la parte industrial, ya que cumple con los requerimientos de soldabilidad, peso, y resistencia a la corrosión de la máquina. No obstante, al ser un prototipo, se considera por costo el material para la estructura mecánica de soporte al acero negro ASTM A36, cuyas especificaciones técnicas principales se presenta en la Tabla 6.

**Tabla 6:** Propiedades acero ASTM A36 [26]

Propiedad	Valor
Esfuerzo a la fluencia mínimo	250 MPa (36300 PSI)
Esfuerzo a la tracción	400 – 550 MPa (58000 – 79800 PSI)
Elongación mínima en 50 mm (2")	23
Módulo de elasticidad	200 GPa (29000 KSI)

### Sistema de Dosificación

Al trabajar con masas de condimentos bajas, se requiere un dosificador que sea preciso, que pueda trabajar con materiales granulares y que su costo de elaboración no sea elevado.

Se analizan 3 opciones en la Tabla 7, los dosificadores por peso y tiempo son descartados del análisis debido a que no suelen ser utilizados en la industria de alimentos granulares sólidos.

**Tabla 7:** Comparativa de mecanismos de dosificadores

Alternativa	Ventajas	Desventajas
Volumétrico	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Facilidad de manufactura</li> <li>■ Costo medio</li> <li>■ Exactitud aceptable</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Baja velocidad</li> <li>■ Si hay un cambio de densidad muy grande entre condimentos la exactitud se pierde en el peso entregado</li> <li>■ Para lograr un peso variable debería tener piezas intercambiables</li> </ul>
Tornillo sin fin	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Facilidad de manufactura</li> <li>■ Exactitud precisa con el agregado de una balanza externa</li> <li>■ Costo medio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Velocidad media</li> <li>■ Limpieza y mantenimiento requiere más tiempo</li> <li>■ Requiere de más piezas como paletas y hélices</li> </ul>

Alternativa	Ventajas	Desventajas
Gravimétrico	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Control de material restante en la tolva</li> <li>■ Velocidad alta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Dificil manufactura</li> <li>■ Costo elevado</li> <li>■ Dificil mantenimiento</li> </ul>

De todos los sistemas expuestos el más utilizado para materiales en polvo y granulares es el mecanismo de tornillo sin fin. Además de cumplir con los requerimientos mínimos, presenta una mayor precisión a un costo moderado y piezas fáciles de imprimir en 3D, es el dosificador elegido para este prototipo.

### **Material para Fundas**

Hay una gran variedad de opciones de materiales disponibles para el embalaje y empaquetado de productos alimenticios, para este proyecto se busca uno que sea sellable, que presente un nivel de rigidez adecuado para el formado de la funda, resistente a la humedad y que se consiga con facilidad en presentación de bobinas. Existen varios materiales plásticos para fundas que se venden en rollos, los cuales se describen en la Tabla 9.

**Tabla 8:** Comparativa materiales plásticos

<b>Material</b>	<b>Características</b>
Poliétileno	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Plástico firme</li> <li>■ Capacidad de resistir la abrasión, desgaste e impactos</li> <li>■ Buena resistencia a bajas temperaturas</li> <li>■ Elástico</li> <li>■ Económico</li> </ul>
Polipropileno	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Ligero</li> <li>■ Resiste ácidos abrasivos</li> <li>■ Difícil de romper</li> <li>■ Sus propiedades no cambian entre los 0 y 100 °C</li> </ul>
Poliéster	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Resistente a compuestos alcalinos</li> <li>■ Alta elasticidad</li> <li>■ Se mancha fácilmente con grasa y aceites</li> <li>■ Repele el agua y se seca fácilmente</li> </ul>



Se elige el polietileno por su bajo costo, resistencia al calor necesaria para evitar deformaciones y aberturas en el momento de sellado y por ser un material utilizado en la industria alimenticia y cumplir los requerimientos mínimos para este proyecto.

### Material para la Tolva

Existen diferentes formas para este tipo de piezas tipo embudo, entre estas están cuadradas, rectangulares, piramidales y cónicas. Debido a la elección de un dosificador de tornillo que necesita paletas, se elige una tolva cónica pues la que mejor se adapta a este mecanismo y además está presente en casi todas las dosificadoras comerciales.

Al estar en contacto directo con el condimento es esencial que el material de esta no tenga la capacidad de retener olores, sabores o partículas, debe ser fácil de limpiar, poco poroso y resistente a la corrosión. Se procede a analizar los materiales con los cuales se puede fabricar:

**Tabla 9:** Comparativa materiales de la tolva [2]

Material	Características
Acero inoxidable	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ El más pesado de las 3 alternativas de materiales</li> <li>■ Precio alto</li> <li>■ Conduce calor</li> <li>■ Soldabilidad alta, pero más costosa</li> <li>■ Mayor resistencia, por lo que, se demora más en darle forma</li> <li>■ Resistencia al óxido alta</li> </ul>

Material	Características
Acero galvanizado	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Peso intermedio</li> <li>■ Difícil de soldar si es muy delgado</li> <li>■ Fácil de dar forma</li> <li>■ Baja resistencia a la oxidación</li> </ul>
Aluminio	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ El más liviano de las 3 alternativas de materiales</li> <li>■ Resistencia al óxido media</li> <li>■ Fácil de dar forma</li> <li>■ Precio medio</li> </ul>

La mejor opción es el acero inoxidable pues cubre todos los parámetros y cumple con la normativa alimenticia, sin embargo por costo se elige el acero galvanizado que cumple con los parámetros mínimos para un funcionamiento óptimo bajo condiciones no industriales, y al tratarse de un prototipo este material se adaptará bien despreciando su tendencia a oxidarse.

## 6.2. Factores de Seguridad

Para aplicar correctamente los principios de resistencia de materiales, es importante tener una comprensión precisa de las cargas que serán soportadas por la estructura en cuestión, durante el análisis y diseño. La tabla de factores de diseño generales se muestra en la Figura 16 donde se ve que el factor de seguridad depende del trabajo a realizar.

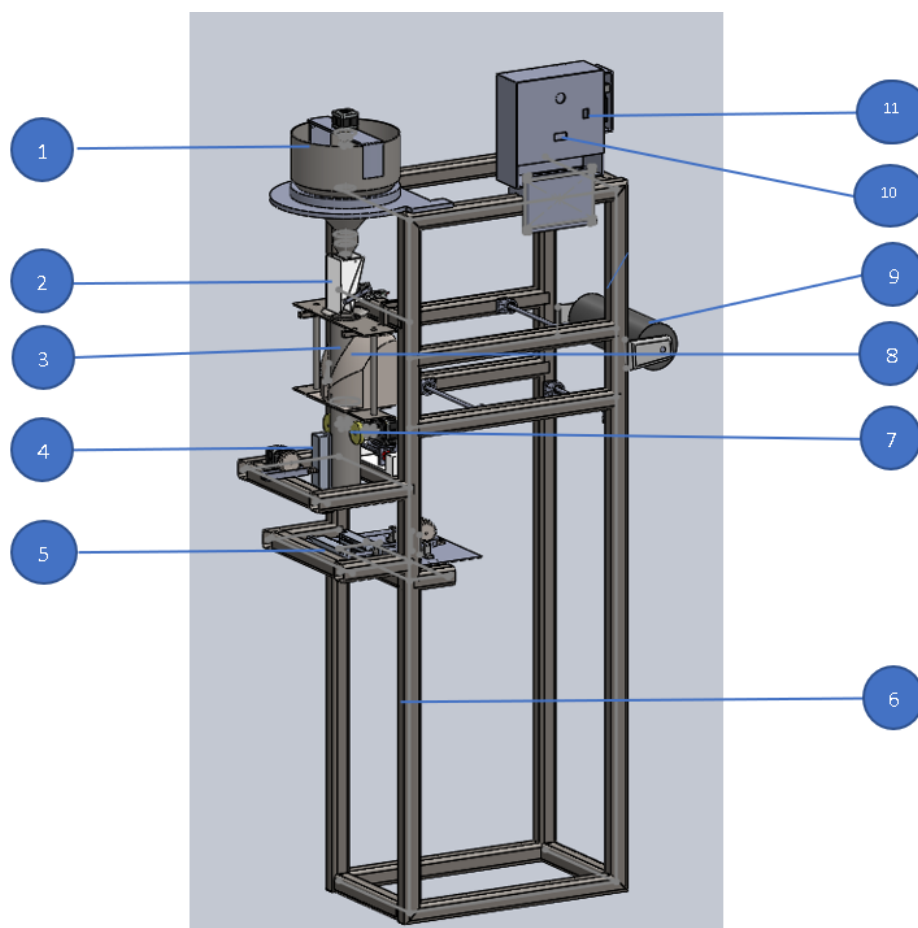
FACTORES DE DISEÑO		
VALOR	APLICACIÓN	DESCRIPCIÓN
1.25 - 2	Estructuras bajo cargas estáticas.	Alto grado de confianza.
2 - 2.5	Elementos de maquina bajo cargas dinámicas.	Promedio de confianza.
2.5 - 4	Estructuras estáticas o elementos de máquinas bajo cargas dinámicas incertidumbre.	Incertidumbre en cargas, propiedades de materiales, análisis de esfuerzos o ambiente.
4 o Superior	Estructuras estáticas o elementos de máquinas bajo cargas dinámicas.	Incertidumbre en cargas, propiedades de materiales, análisis de esfuerzos o ambiente.

**Figura 16:** Factores de diseño [27]

Se elige como valor de diseño 1,5 puesto que la estructura esta sujeta a cargas estáticas, no se tiene incertidumbre de las cargas a soportar y se asegura un alto grado de confianza, puesto que las cargas a soportar están bien definidas por el peso de cada pieza, y se conocen todas las propiedades del material.

## 7. Diseño Mecatrónico

En ésta sección se listarán y explicarán los parámetros, mecanismos y factores para el diseño y dimensionamiento de los componentes que se requieren para la construcción de la máquina dosificadora y empacadora de condimentos en polvo. Esta conformada por componentes mecánicos, electrónicos/eléctricos y de programación, la estructura de la máquina en 3D se muestra en la Figura 17 y en la Tabla 10 se nombran sus partes.



**Figura 17:** Modelo 3D de la máquina dosificadora y empacadora de condimentos

**Tabla 10:** Listado partes principales de la máquina

Número	Nombre
1	Dosificador
2	Balanza
3	Tubo de alimentación
4	Mordaza de sellado vertical
5	Mordazas de sellado horizontal
6	Estructura
7	Rodillos de arrastre
8	Cuello formador
9	Bobina de plástico
10	Paro de emergencia

Número	Nombre
11	SWitch encendido

## 7.1. Diseño Mecánico

En ésta sección se llevará a cabo el diseño y dimensionamiento de los componentes mecánicos que se requieren para la construcción de la máquina dosificadora y empacadora de condimentos, los mismos que se describen a continuación:

### Diseño Tolva

El prototipo utiliza una tolva donde se almacena el condimento a dosificar, según la Tabla 4 se estableció como requerimiento que la tolva almacene 5 kg de producto, y por normativa debería ser de acero inoxidable al estar en contacto con un producto alimenticio, pero como se indicó anteriormente, por cuestión económica se decide trabajar con un acero galvanizado. Para iniciar el proceso de diseño se requiere definir el tamaño del orificio de salida de la tolva, parte crucial para evitar que el producto se trabaje. Para esto se utiliza (1).

$$D = \left(2 + \frac{\theta}{60}\right) \cdot \frac{CAS}{p \cdot g} \quad (1)$$

Donde:

$D$ : Diámetro del orificio de salida de la tolva, en m;

$\theta$  : Ángulo de fricción interna, en °;

$CAS$ : Tensión crítica del condimento, en Pa;

$p$ : Densidad del lecho de polvo, en kg/m<sup>3</sup>;

$g$ : Gravedad, en m/s<sup>2</sup>.

Al complicarse la obtención del parámetro CAS para condimentos por falta de información bibliográfica confiable y precisa, se aplica la teoría de Nedderman quien encontró que el efecto de pared en el flujo de elementos granulares en silos es despreciable si el diámetro de salida es 30 veces mayor que el diámetro del grano. Al trabajar con condimentos en polvo se asume un tamaño de grano máximo de 1,5 mm, por lo que, un diámetro adecuado para la salida de la tolva es de 47 mm.

La variabilidad en las características del polvo al salir de la tolva de almacenamiento, causada por las agrupaciones ocurridas durante la carga de la tolva, se puede minimizar o evitar si el flujo del polvo al momento de su salida es másico, lo cual está relacionado con el ángulo de la zona de descarga. La descarga en flujo másico de una tolva, evita que se formen grumos y acumulaciones debido a que todo el material se mueve al mismo tiempo. Además, las tensiones que se generan durante la descarga son predecibles, lo que permite evitar retenciones que interrumpan la descarga. Para lograr un ángulo que brinde flujo másico se tiene según la Tabla 11, obtenida a través de experimentación, en el cual se puede ver que el óxido de zinc tiene el mayor ángulo requerido para un flujo másico, dado que se quiere asegurar el flujo correcto se necesita un valor mayor a  $43^\circ$  de inclinación, por lo que, se define un ángulo de  $51^\circ$ .

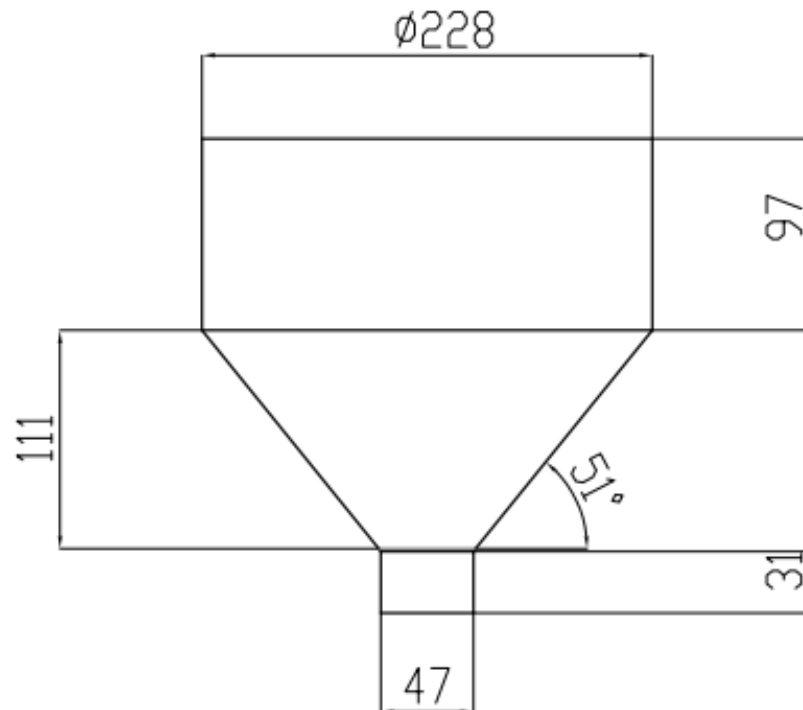
**Tabla 11:** Comparativa de ángulos de fricción mínimos para lograr un flujo másico

Material	Ángulo de fricción interna( $^\circ$ )	Ángulo de fricción polvo-pared( $^\circ$ )	Densidad(kg/m <sup>3</sup> )
Polvo atomizado	34	25	1050
Material triturado	40	23	950
Óxido de zinc	43	24	600

Existen varias formas y tipos de tolva, generalmente para productos alimenticios la forma de la estructura es cónica y tiene paredes inclinadas, de manera tal que la carga se distribuya adecuadamente por el peso desde la parte superior y caiga por las paredes del cono, la descarga se realiza en la parte inferior, aunque también existen formas piramidales que se usan más en minería. [28]

Para el diseño de la tolva se plantea que la misma tendrá un área recta y un área variable, el área variable es por donde las paletas girarán y evitarán grumos. El largo y ancho de la tolva para adaptarse a los requerimientos se considera que no debe sobrepasar los 25 cm (como se detallo en la sección Necesidades y Parámetros de Diseño) para ambos

casos, Además se busca que el largo del embudo cubra parte de las espirales del tornillo de dosificación, un diseño inicial se muestra en la Figura 18.



**Figura 18:** Modelo 2D de la tolva con dimensiones en mm

Para comprobar que este diseño podrá almacenar los 5 kg seleccionados se debe comparar el volumen de la tolva con el del condimento con (2), según [17]:

$$V_t = \frac{\pi}{(24 \cdot \tan(\phi))} \cdot [a^3 - D^3] + \frac{\pi}{4} \cdot (a^2 \cdot h) \quad (2)$$

Donde:

$V_t$ : Volumen de la capacidad de la tolva, en  $\text{cm}^3$ ;

$h$ : Altura de la sección recta, en  $\text{cm}$ ;

$a$ : Diámetro de la sección recta, en  $\text{cm}$ ;

$\phi$ : Ángulo de fricción interna, en  $^\circ$ .

Remplazando en (2) las medidas de la tolva se tiene que:

$$V_t = \frac{\pi}{(24 \cdot \tan(51))} \cdot [22,8^3 - 4,7^3] + \frac{\pi}{4} \cdot (22,8^2 \cdot 9,7)$$

$$V_t = 5205,6791 \text{ cm}^3$$

Y el volumen del condimento para el caso más extremo se calcula con (3), donde se asume un condimento ficticio con una densidad de  $1000 \text{ kg/m}^3$  que es mayor a cualquier densidad mostrada en la Tabla 2.

$$V_m = m/\delta \quad (3)$$

Donde:

$\delta$ : Densidad del condimento ficticio, en  $\text{kg/cm}^3$ ;

$m$ : Masa del condimento, en  $\text{kg}$ ;

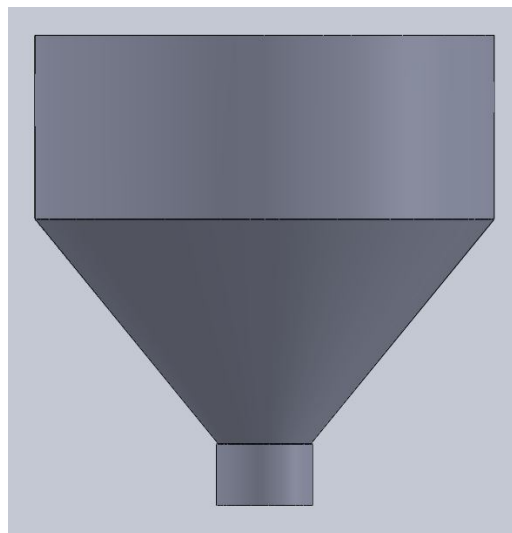
$V_m$ : Volumen que ocupa el condimento en la tolva, en  $\text{cm}^3$ ;

Remplazando en (3) se tiene que:

$$V_m = 5/0,001$$

$$V_m = 5000 \text{ cm}^3$$

Con los datos obtenidos se puede evidenciar que el volumen de la tolva diseñada, permitirá cubrir la necesidad del volumen requerido por el condimento e incluso un adicional en volumen de aproximadamente  $200 \text{ cm}^3$ . El modelo 3D de la tolva se puede ver en la Figura 19.

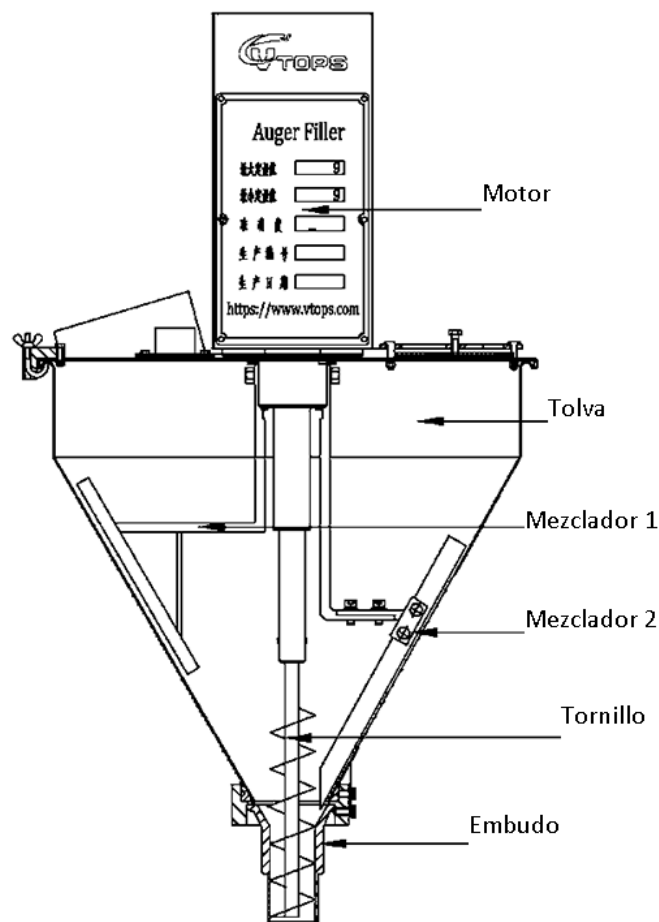


**Figura 19:** Diseño 3D de al Tolva de capacidad 5 kg.



## Diseño del Dosificador

Dosificador tornillo sin fin es el mecanismo de dosificación ideal para polvos ya que remueve el material con su giro independiente evitando apelmazamiento y aglomeraciones del producto. En especial útil para aquellos que tienen cierto grado de dificultad en el deslizamiento. Para trabajar dentro de la tolva el tornillo debe ser de hélice con diámetro continuo, pues es el que mejor trabaja en estas condiciones. El diseño general de la tolva se muestra en la Figura 20.



**Figura 20:** Diseño de un dosificador de tornillo sin fin [29]

Para calcular el tornillo, el paso de las hélices, y la velocidad de giro se necesitan los siguientes cálculos:

### Área de Relleno del Canalón o Embudo

Por embudo se entiende a la parte final de la tolva utilizada para canalizar los materiales granulares a partes con bocas más estrechas que la de la tolva, evitando así el derrame de los condimentos. Mediante (4), se establece la fórmula para determinar el área de relleno del embudo, obtenida de [30].

$$S = \lambda \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (4)$$

Donde

$S$  : Área de relleno del embudo, en  $m^2$ ;

$\lambda$  : Coeficiente de relleno de la sección, adimensional;

Conociendo el coeficiente  $\lambda$  es 0,4 por la Tabla 12, donde se elige la opción ligera y no abrasiva pues un condimento al ser granular y para consumo humano cumple con esta descripción.

**Tabla 12:** Coeficiente de relleno

Tipo de carga	Coeficiente
Pesada y abrasiva	0,125
Pesada y poco abrasiva	0,25
Ligera y poco abrasiva	0,32
Ligera y no abrasiva	0,4

A la carga ligera y no abrasiva le corresponde un coeficiente de 0,4 datos que se reemplazan en (12) y se tiene:

$$S = 0,4 \cdot \frac{\pi \cdot 0,045^2}{4} = 0,0006362 \text{ m}^2$$

Este valor representa el área ocupada por el condimento cuando esta dentro del embudo, este servirá para el cálculo de flujo de material.

## Velocidad de Desplazamiento del Transportador

Con el área de llenado del embudo, se determina la velocidad de desplazamiento del dosificador, la cual indica la rapidez con la que el tornillo mueve el condimento de un lugar a otro. Este valor está relacionado con el paso del tornillo y su velocidad de rotación. La velocidad de desplazamiento del dosificador se determina con (5).

$$V_{tr} = \frac{\rho_t \cdot n_t}{60} \quad (5)$$

Donde:

$\rho_t$ : Paso del tornillo o paso de hélice, en m;

$V_{tr}$ : Velocidad de desplazamiento del dosificador, m/s;

$n_t$ : Velocidad de giro del eje del tornillo, en rpm.

Conociendo que una velocidad óptima de funcionamiento de un motor a pasos comercial esta entre los 200 rpm y 600 rpm, se elige hacer el cálculo con 200 rpm. Además, se define el paso del tornillo en 7 mm como valor inicial al definir una hélice continua para transporte de sólidos como se explica en [30] donde el paso debe ser igual o hasta 1,5 veces mayor que el diámetro del embudo, si se confirma que este paso puede brindar el flujo de material necesario este se mantendrá. Reemplazando estas consideraciones en (5), se tiene:

$$V_{tr} = \frac{0,007 \cdot 200}{60}$$

$$V_{tr} = 0,0233 \text{ m/s}$$

Esta es la velocidad con la que el tornillo es capaz de desplazar el condimento la cual será usada para calcular el flujo de material que entrega el dosificador.

## Flujo de Material

Con los valores del área de relleno del embudo y la velocidad de desplazamiento del condimento, se debe encontrar el flujo de material que el tornillo entrega, tomando en cuenta que se necesitan 100 fundas de 50 g en una hora, se establece una capacidad de transporte

mínima de 5,5 kg/h, multiplicando el número de fundas por la masa de condimento que cada una contiene, por lo que, el dosificador será capaz de entregar la cantidad necesaria de condimento para cumplir con la tasa de empaquetado si el valor de  $Q$  encontrado con los valores previos es mayor.

$$Q = 3600 \cdot S \cdot V \cdot \rho_c \cdot i \quad (6)$$

Donde:

$Q$ : Flujo de transporte de condimento, en ton/h;

$S$ : Área de relleno del dosificador, en  $m^2$ ;

$V$ : Velocidad de desplazamiento del dosificador, en m/s;

$\rho_c$ : Densidad del condimento transportado, en ton/  $m^3$ .

$i$ : Coeficiente de disminución del flujo del condimento debido a la inclinación del dosificador, adimensional.

Remplazando en (6) los valores calculados de área de relleno del embudo, densidad del condimento ficticio, la velocidad de desplazamiento del dosificador y tomando como valor de coeficiente de disminución de flujo 1 ya que el tornillo no está inclinado, se tiene:

$$Q = 3600 \cdot 0,0006362 \cdot 0,0233 \cdot 1 \cdot 1$$

$$Q = 0,05336 \text{ ton/h}$$

$$Q = 53,36 \text{ kg/h}$$

Con esto se comprueba que con una configuración de tornillo de 7 mm de paso que gira a 200 rpm se tiene una capacidad de transporte suficiente para cumplir la tasa de empaquetado. Solo resta calcular el diámetro primitivo del tornillo si se define la altura de filete en 20 mm.

$$D_{tp} = D_{et} - 2h_{tr} \quad (7)$$

Donde:

$D_{et}$ : Diámetro exterior del tornillo, en mm;

$D_{tp}$ : Diámetro primitivo del tornillo, en mm;

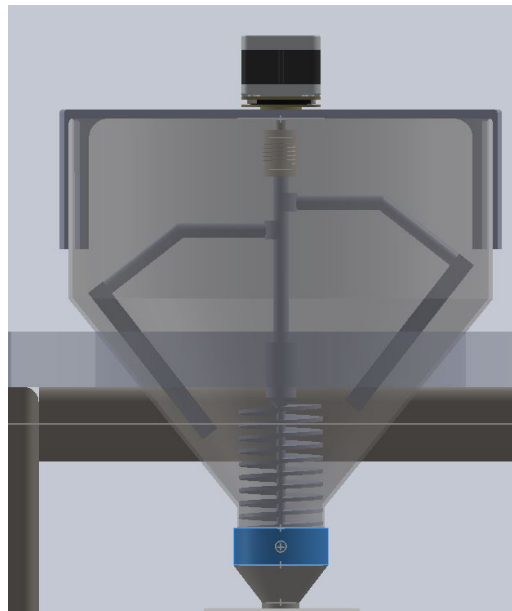
$h_{tr}$ : Altura de filete del tornillo, en mm.

Remplazando en (7), el diámetro exterior que es igual al del embudo y el valor de la altura de filete se tiene:

$$D_{tp} = 45 - 2(20)$$

$$D_{tp} = 5 \text{ mm}$$

El diseño final del tornillo dosificador cuenta con un diámetro exterior de 45 mm, un diámetro primitivo de 5 mm, paso de 7 mm y altura de filete de 20 mm, se muestra el diseño del tornillo en la Figura 21.



**Figura 21:** Diseño 3D del tornillo dosificador

### Diseño de la Balanza

Para comprobar que el producto suministrado por el dosificador sea el correcto se considera una balanza a la salida de la tolva, esta funciona con una celda de carga y un recipiente propio, el cual, una vez comprobada la masa se dejará pasar el producto a la fase de empaque y sellado.

## Forma de la balanza

Las balanzas externas de las máquinas dosificadoras necesitan de un mecanismo de apertura, se plantea usar un sistema como el de la balanza en la Figura 11, por lo que, la balanza a diseñar tendrá forma de prisma triangular, con una parte fija y otra móvil. Para calcular el tamaño de la balanza se utiliza la fórmula del volumen de un prisma triangular.

$$V_p = \frac{h_p \cdot B}{2} \cdot L \quad (8)$$

Donde:

$V_p$ : Volumen del prisma triangular, en mm<sup>3</sup>;

$h_p$ : Altura del prisma, en mm;

$B$ : Base del prisma, en mm;

$L$ : Largo del prisma, en mm.

Remplazando los datos de diseño en (8) se tiene:

$$V_p = \frac{116 \cdot 41}{2} \cdot 76 = 180728 \text{ mm}^3$$

$$V_p = 180,728 \text{ cm}^3$$

Para el cálculo del volumen ocupado se utiliza (3) y se considera la masa máxima en una funda.

$$V_{mp} = \frac{0,05}{0,001}$$

$$V_{mp} = 50 \text{ cm}^3$$

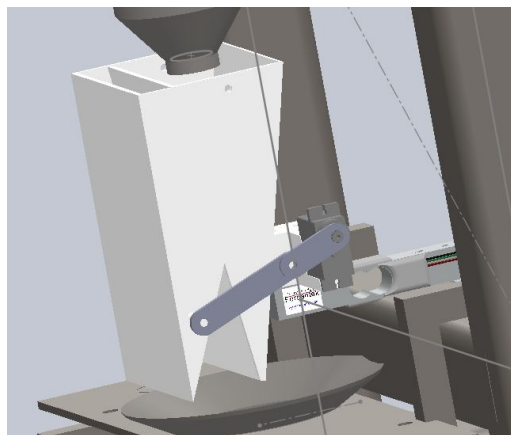
$$180,728 \text{ cm}^3 > 50 \text{ cm}^3$$

Con esto se comprueba que la balanza en forma de prisma triangular tiene la capacidad de almacenar los 50 g de masa de la funda más grande.

## Mecanismo de apertura

Para abrir la balanza una vez comprobada la masa correcta, se elige un mecanismo biela manivela por su simplicidad y porque no se necesita de alta precisión de apertura. Se define a la manivela con un largo de 2 cm ya que, es la distancia requerida cuando se abra la balanza para asegurar el libre paso del condimento, mientras que la biela tendrá un largo del doble de la manivela con 4 cm. El mecanismo de apertura se controla a través de un servomotor.

En la Figura 22 se muestra el diseño final.



**Figura 22:** Diseño 3D de la balanza

## Celda de Carga

Una celda de carga es un sensor que convierte una fuerza en una señal eléctrica. Sirve como base para el recipiente en forma de prisma y a su vez se une a la estructura a través de pernos. El dimensionamiento eléctrico de este componente se detalla en la sección de Diseño Electrónico.

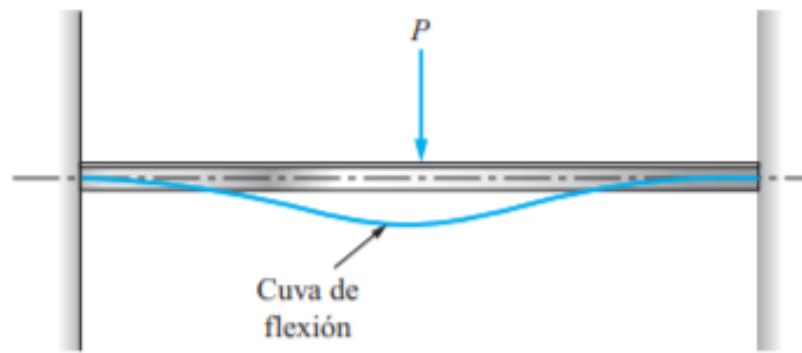
## Estructura de la Máquina

La estructura mecánica a diseñar considera a todos los componentes electrónicos y mecánicos que irán ensamblados, necesita un material resistente y que soporte el peso de los demás dispositivos, como se definió en el análisis de alternativas el material elegido es el acero negro.

Para la estructura principal se tienen varias opciones de materiales para su construcción, tubos redondos, cuadrados, rectangulares, etc. Se seleccionó un tubo cuadrado porque aparte de brindar facilidades de soldadura se pueden aprovechar las caras planas para sostener componentes de la máquina. Las deflexiones transversales de elementos estructurales y sus combinaciones, producidas por cargas de trabajo, no deben exceder los valores máximos permisibles. Se evaluará la viga con el peso máximo a soportar para la elección del tubo cuadrado a utilizar, la carga máxima a soportar resulta de la suma de los pesos de todo el sistema de formado de funda que incluye las placas superior e inferior, cuello formador, tubo de alimentación, ejes y soportes y el peso de la viga como se detalla en la Tabla 13, la suma de estas partes es de 71 N, esta viga soporta el peso combinado del apoyo de sistema de sellado, placa superior e inferior, ejes de unión de estas placas, tubo de alimentación, cuello formador, balanza, celda de carga y la masa propia de la viga. La estructura consta de 4 soportes verticales, 8 soportes transversales y 6 vigas horizontales, solo estas últimas soportan el peso de los componentes.

Según [31], para las vigas del marco soldado se aplica la teoría de vigas estáticamente indeterminadas en el caso específico de una viga con apoyos fijos en ambos extremos, es un diseño común en estructuras, ya que está diseñada para soportar cargas y evitar rotaciones. Los apoyos fijos en ambos extremos proporcionan estabilidad y resistencia a la viga, permitiéndole soportar las cargas que actúan sobre ella. Esta clase de viga con frecuencia se encuentra en la construcción de marcos de máquinas y estructuras, ya que proporciona altos niveles de estabilidad y resistencia, garantizando una mayor seguridad y durabilidad en la estructura, como se muestra en la Figura 23.





**Figura 23:** Viga con extremos empotrados [31]

En [31], se sugiere los siguientes límites máximos de deflexión:

Parte general de una máquina:  $y_{max}$  0,0005 a 0,003 in/in o mm/mm de longitud de viga.

Precisión moderada:  $y_{max}$  0,00001 a 0,0005 in/in o mm/mm de longitud de viga.

Alta precisión:  $y_{max}$  0,000001 a 0,00001 in/in o mm/mm de longitud de viga.

También se pueden expresar como:

$y_{max}/L$  0,0005 a 0,003 para la parte general de una máquina.

$y_{max}/L$  0,00001 a 0,0005 para precisión moderada.

$y_{max}/L$  0,000001 a 0,00001 para alta precisión.

Entonces para el diseño de la viga horizontal que soporta la mayor carga se toma como parte general, puesto que no requiere de alta precisión, queda en (9):

$$\frac{y_{max}}{L_v} = 0,003 \quad (9)$$

Donde:

$y_{max}$ : Deflexión máxima permisible para la viga horizontal, en  $\frac{mm}{mm}$ ;

$L_v$ : Longitud de la viga horizontal, en mm.

Remplazando la longitud de la viga que es de 26 cm y despejando  $y_{max}$  se tiene:

$$y_{max} = 0,003 \cdot 260$$

$$y_{max} = 0,78 \text{ mm}$$

Para seleccionar el tubo cuadrado, se calcula la inercia con la siguiente fórmula:

$$I = \frac{F \cdot L_v^3}{48 \cdot y_{max} \cdot E} \quad (10)$$

Donde:

$I$ : Momento de Inercia de la viga horizontal, en  $\text{m}^4$ ;

$F$ : Fuerza a soportar por la viga horizontal, en N;

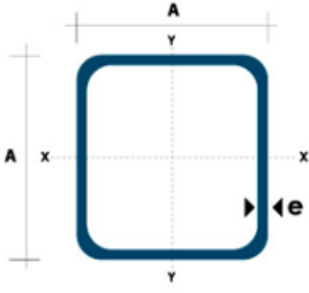
$E$ : Módulo de elasticidad del material de la viga horizontal, en GPa.

Remplazando en (10) se tiene que:

$$I = \frac{71 \cdot 0,260^3}{(48) \cdot (0,00078) \cdot (200)}$$

$$I = (166,6527) \cdot 10^{-12} \text{ m}^4 = 0,01666 \text{ cm}^4$$

Con los cálculos realizados se concluye que se requiere un tubo cuadrado que tenga una inercia mayor a  $0,01666 \text{ cm}^4$ . Para la selección del tubo comercial, se considera el catálogo de DIPAC que se presenta en la Figura 24.



Dimensiones			Área	Ejes X-Xe Y-Y		
A mm	Espesor mm (e)	Peso Kg/m	Área cm <sup>2</sup>	I cm <sup>4</sup>	W cm <sup>3</sup>	I cm <sup>3</sup>
20	1.2	0.72	0.90	0.53	0.53	0.77
20	1.5	0.88	1.05	0.58	0.58	0.74
20	2.0	1.15	1.34	0.69	0.69	0.72
25	1.2	0.90	1.14	1.08	0.87	0.97
25	1.5	1.12	1.35	1.21	0.97	0.95
25	2.0	1.47	1.74	1.48	1.18	0.92
30	1.2	1.09	1.38	1.91	1.28	1.18
30	1.5	1.35	1.65	2.19	1.46	1.15
30	2.0	1.78	2.14	2.71	1.81	1.13
40	1.2	1.47	1.80	4.38	2.19	1.25
40	1.5	1.82	2.25	5.48	2.74	1.56
40	2.0	2.41	2.94	6.93	3.46	1.54
40	3.0	3.54	4.44	10.20	5.10	1.52
50	1.5	2.29	2.85	11.06	4.42	1.97
50	2.0	3.03	3.74	14.13	5.65	1.94
50	3.0	4.48	5.61	21.20	4.48	1.91
60	2.0	3.66	3.74	21.26	7.09	2.39
60	3.0	5.42	6.61	35.06	11.69	2.34
75	2.0	4.52	5.74	50.47	13.46	2.97
75	3.0	6.71	8.41	71.54	19.08	2.92
75	4.0	8.59	10.95	89.98	24.00	2.87
100	2.0	6.17	7.74	122.99	24.60	3.99
100	3.0	9.17	11.41	176.95	35.39	3.94
100	4.0	12.13	14.95	226.09	45.22	3.89
100	5.0	14.40	18.36	270.57	54.11	3.84

**Figura 24:** Catálogo de tubos cuadrados DIPAC [32]

En la Figura 24 se observa que todos los tubos cuadrados del catálogo DIPAC soportan la inercia necesaria, por lo que, cualquier medida de tubo cuadrado de acero negro soportará la carga, con la finalidad de emplear la estructura como sostén de elementos se elige trabajar con tubos de 40 mm de lado y un espesor de 1,5 mm para todas las vigas y toda la estructura.

### **Análisis de Esfuerzos Presentes en la Estructura**

Para el resto de las vigas de la estructura que tienen una menor carga, el análisis estático de la máquina se realiza con software de diseño asistido por computadora que es una técnica común en la planificación y construcción de estructuras, ya que ofrecen una gran cantidad de herramientas y funciones para facilitar el diseño y la visualización de aplicaciones de cargas. Esto permite una mayor precisión y eficiencia en el proceso. y se simulan las cargas de todos los elementos que irán sobre la estructura, estas se muestran en la Tabla 13.

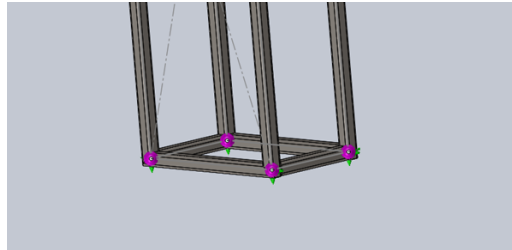
**Tabla 13:** Pesos de elementos de la máquina

Elemento	Cantidad	Masa(g)	Peso(N)	Peso Total(N)
Estructura	1	56500	554,1	554,10
Condimentos	1	5000	50	50,00
Tolva	1	2000	19,61	19,61
Cono salida tolva	1	100	0,9807	0,98
Balanza	1	300	2,942	2,94
Celda de carga	1	40	0,3923	0,39
Sostén sistema de sellado	2	70	0,6865	1,37
Placa superior	1	500	4,903	4,90
Eje placa cuello formador	2	450	4,413	8,83
Placa inferior	1	500	4,903	4,90
Cuello formador	1	1000	9,807	9,81
Tubo alimentación	1	1500	14,71	14,71
Base ajuste rodillos	1	200	1,961	1,96
Nema 17	4	400	3,923	15,69
Mordaza vertical	1	600	5,884	5,88
Mordaza horizontal	2	500	4,903	9,81
Otros	-	500	4,903	4,90
		70160	Total	711

Con estos datos se procede a la simulación estática en el programa SOLIDWorks.

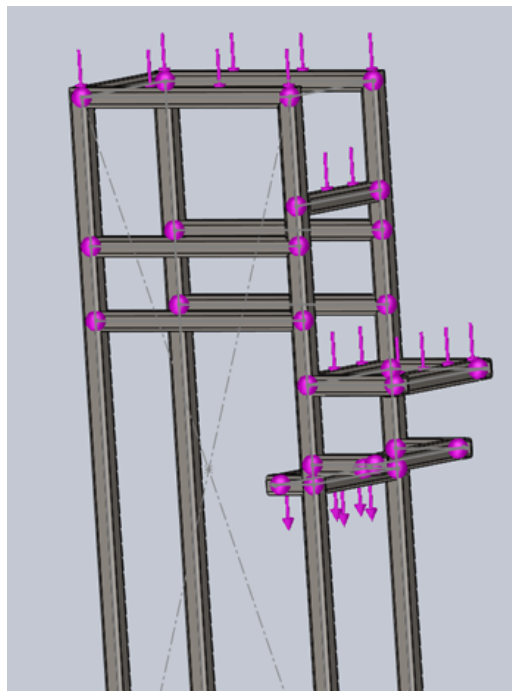
Se define inicialmente los puntos fijos de la estructura que se encuentran en la base y

están en contacto con el suelo. Esto se logra definiendo una geometría fija que limita el movimiento en los ejes y le quita los grados de libertad a los puntos seleccionados. Esto se muestra en la Figura 25.



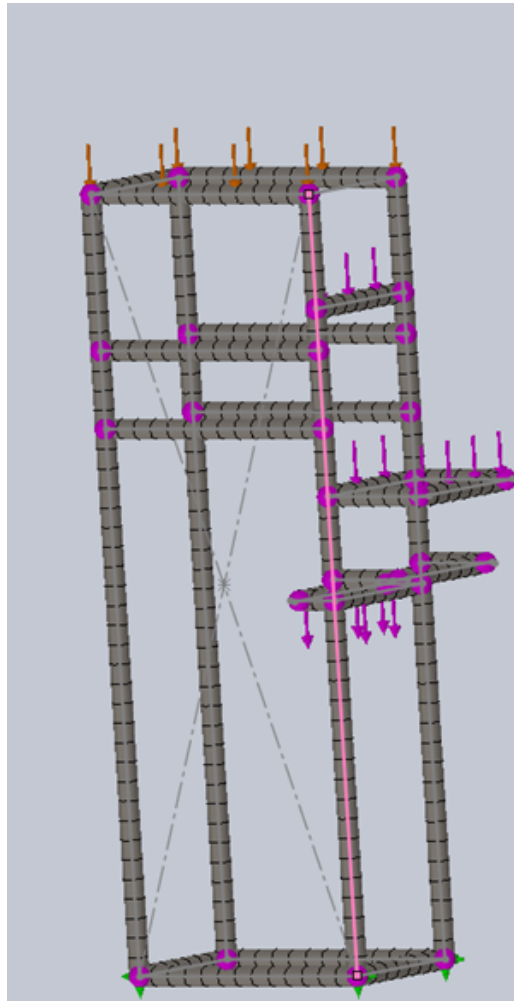
**Figura 25:** Puntos fijos de la estructura

Luego se colocó las fuerzas que intervienen en el sistema, generadas por los pesos de cada componente especificado en la Tabla 13. Para aplicar se define a los elementos de la estructura como vigas para que se distribuya la carga de los componentes de manera más realista como se ve en la Figura 26.



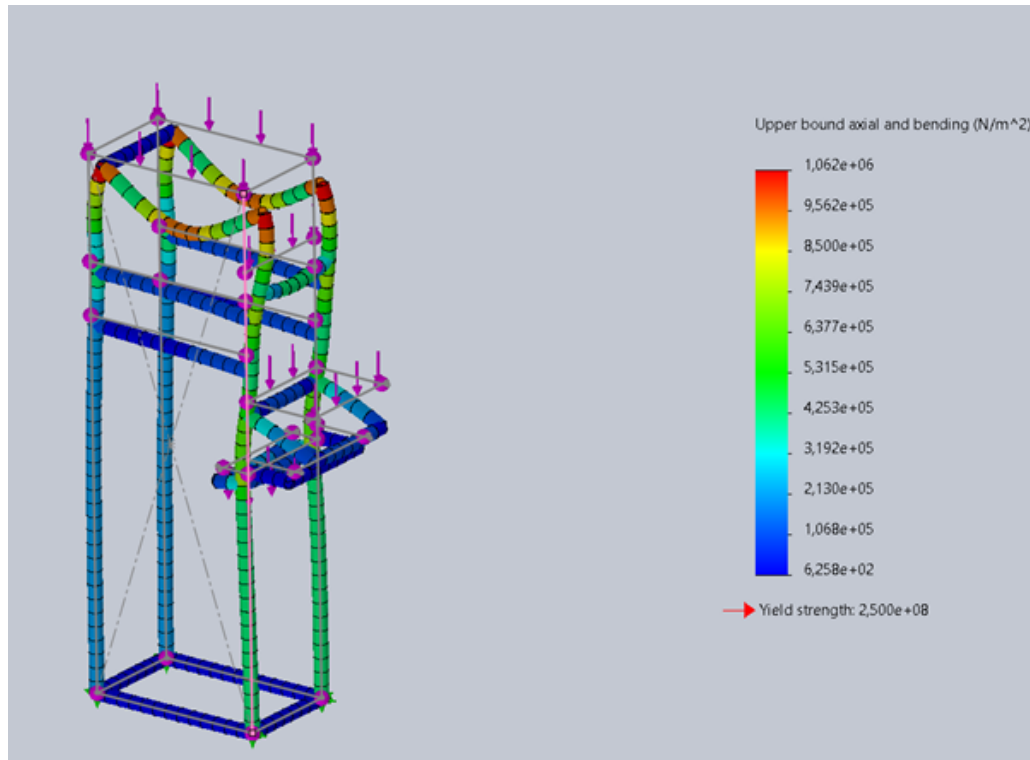
**Figura 26:** Fuerzas aplicadas en la estructura

Por último, se considera un mallado de la estructura para que el programa pueda resolver el problema a través de elementos finitos. La precisión y tamaño de los elementos se lo deja en un punto medio para tener resultados precisos sin requerir demasiado procesamiento. El mallado se puede observar en la Figura 27.

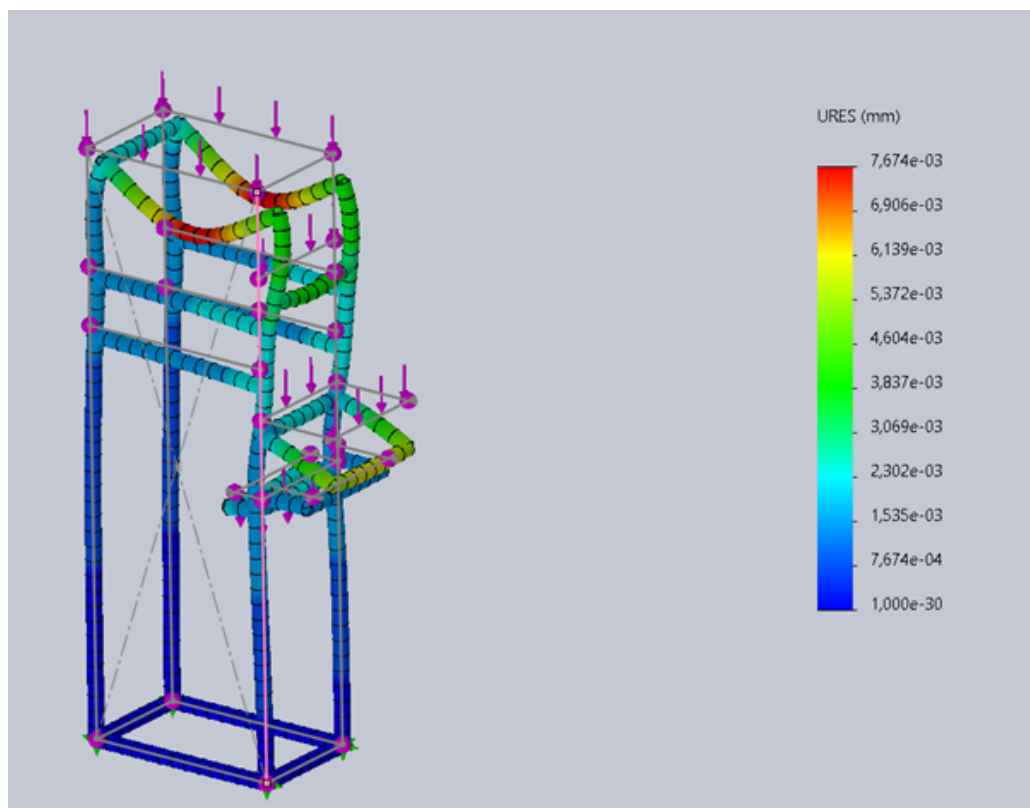


**Figura 27:** Mallado de la estructura para la simulación de elementos finitos

Los resultados obtenidos de la simulación de elementos finitos se muestran a continuación en las Figuras 28 y 29.



**Figura 28:** Resultado de esfuerzos producidos por las fuerzas aplicadas a la estructura



**Figura 29:** Deformaciones en la estructura

En la Figura 28 se observa los esfuerzos generados en base a las fuerzas aplicadas sobre la estructura, y se comprueba que ninguno supera el límite elástico de los tubos de

acero negro, por lo que, no se producirán fallos o roturas. La tensión máxima encontrada por la simulación de elementos finitos debe ser menor a la tensión del límite elástico para que no haya deformaciones permanentes que pongan en riesgo el funcionamiento de la máquina.

$$\sigma_{VM} < \sigma_{LE} \quad (11)$$

Donde:

$\sigma_{VM}$  : Esfuerzo de Von Mises máximo encontrado en la simulación, en N/m<sup>2</sup>;

$\sigma_{LE}$  : Esfuerzo del límite elástico del acero negro, en N/m<sup>2</sup>.

$$1,062 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 < 250 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$$

Se calcula el esfuerzo de diseño para que la estructura no falle con (12).

$$\sigma_d \geq \sigma_{VM}$$

$$\sigma_d = \frac{S_y}{N} \quad (12)$$

Donde:

$\sigma_d$ : Esfuerzo de diseño de la viga horizontal, en Pa;

$S_y$ : Resistencia a la flexión del material de la viga horizontal, en Pa;

$N$ : Factor de seguridad, adimensional.

Remplazando en (12) el valor de resistencia a la flexión del acero negro de 250 MPa y el factor de seguridad de 1,5:

$$\sigma_d = \frac{250}{1,5} = 166,67 \text{ MPa}$$

$$\sigma_d \geq \sigma_{VM}$$

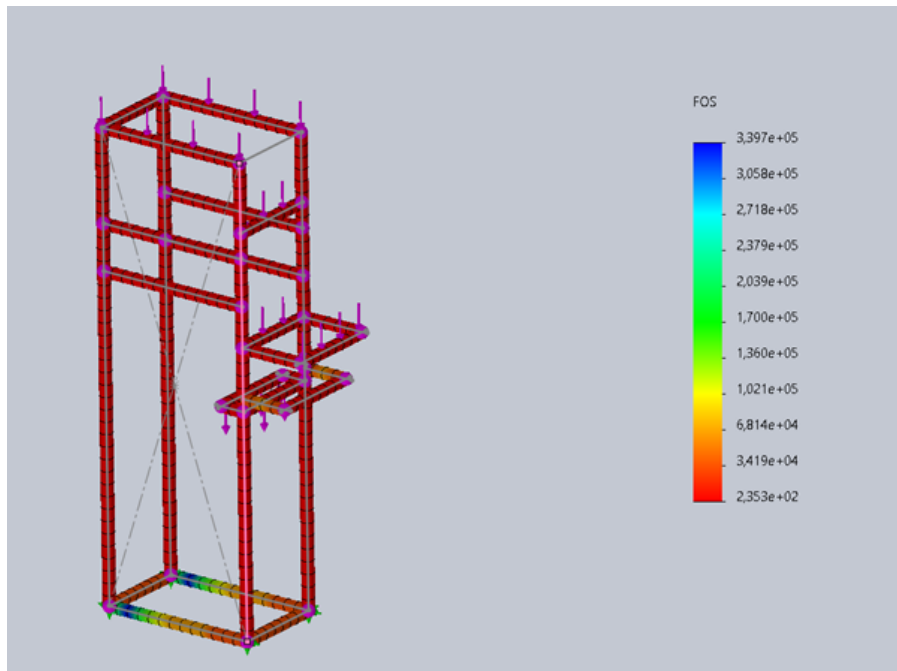
$$167 \text{ MPa} \geq 1,062 \text{ MPa}$$

Comprobando así que el esfuerzo de diseño máximo que la viga horizontal es capaz de soportar, es mayor que el esfuerzo máximo encontrado por simulación, por lo que, se puede concluir que la viga no fallará.

En la Figura 29 se muestran las deformaciones que sufre la estructura y se observa que



son mínimas y se pueden despreciar.



**Figura 30:** Estructura principal de la máquina dosificadora

En la simulación mostrada en la Figura 30 se evidencia que el factor de seguridad mínimo en la estructura es de  $2,35 \cdot 10^2$  con lo que se demuestra que no habrá fallas y que supera el factor de diseño de 1,5 especificado. Una vez comprobado que los tubos cuadrados seleccionados serán capaces de soportar el peso de los componentes de la máquina, se calculan las uniones soldadas.

### Uniones Soldadas

Hay varios tipos de soldadura disponibles, como las de ranura, las de filete y las de puntos. Entre ellas, las soldaduras de filete son ampliamente utilizadas en conexiones estructurales debido a su adaptabilidad con tubos cuadrados y placas que forman las partes. Estas soldaduras proporcionan una gran resistencia y unión segura, lo que las hace ideales para las estructuras de máquinas industriales. En esta máquina se empleará las soldaduras de punto y de filete, a las cuales se aplicará la teoría de esfuerzos en uniones soldadas sujetas a flexión en las vigas donde se apoyan los elementos. Para las uniones se utilizan las fórmulas de esfuerzo cortante primario (13) y el momento un esfuerzo cortante producido

por el momento (14) en las uniones soldadas.

$$\tau' = V / A_s \quad (13)$$

$$\tau'' = M \cdot c / I_s \quad (14)$$

Donde:

$\tau'$ : Esfuerzo cortante primario, en  $\text{m}^2$ ;

$\tau''$ : Esfuerzo cortante producido por el momento, en  $\text{m}^2$ ;

$A_s$ : Área del cordón de soldadura, en  $\text{m}^2$ ;

$c$ : Distancia entre los cordones de soldadura, en m;

$I_s$ : Segundo momento del área del cordón, en  $\text{kg.m.m}$ ;

$M$ : Reacción de momento producido por la fuerza en el tubo cuadrado, en N.m.

El segundo momento del área en (14) se basa en la distancia entre las dos soldaduras como se muestra en la Figura 31.



**Figura 31:** Esquema para el cálculo de soldadura [31]

Como se seleccionó en la primera sección del diseño de la estructura, el tubo es cuadrado con dimensiones de  $40 \text{ mm} = 0,04 \text{ m}$ , debido a esto  $x = y$  y  $b = d$ , gráficamente representados en la Figura 31. Con estos valores se realiza el cálculo de  $I_u$  para posteriormente determinar el segundo momento del área por medio de las fórmulas en la Figura 31.

$$I_u = \frac{d_s^3}{6} \quad (15)$$

Donde:

$I_u$ : Segundo momento unitario del área, en  $\text{m}^4$  ;

$d_s$ : Largo del cordón de soldadura , en m.

$$A_s = 1,414 \cdot h_s \cdot d_s \quad (16)$$

Donde:

$A_s$ : Área del cordón de soldadura, en  $m^2$ ;

$h_s$ : Cateto o altura del cordón de soldadura tipo filete, en m.

Remplazando en (15) el largo de cordón de soldadura que es igual a un lado del tubo cuadrado 40 mm.

$$I_u = \frac{0,04^3}{6}$$

$$I_u = 0,707 \cdot h_s \cdot I_u = 0,707 \cdot h_s \cdot 10,6667 \cdot 10^{-6}$$

$$I_u = 7,5413 \cdot 10^{-6} \cdot h_s \text{ m}^4$$

Remplazando en (16) el valor de el largo de cordón de soldadura, se obtiene el área de este:

$$A_s = 1,414 \cdot h_s \cdot d_s = 1,41 \cdot 0,04 \cdot h_s = 0,05656 \cdot 10^{-3} \cdot h_s \text{ m}^2$$

La fuerza ejercida sobre las vigas será el peso de los componentes, el peso máximo que soportará una viga es de 71 N, el momento producido por esta fuerza es:

$$M_v = \frac{F \cdot L_v}{8} \quad (17)$$

Donde:

$M_v$ : Momento producido en la viga horizontal, en N.m ;

$$M_v = \frac{71 \cdot 0,260}{8} = 2,3075 \text{ N.m}$$

Remplazando en (13) y (14)

$$\tau' = \frac{71}{0,05656 \cdot 10^{-3} \cdot h_s}$$

$$\tau' = \frac{1,2553 \cdot 10^6}{h_s}$$

$$\tau'' = \frac{2,3075 \cdot 0,04}{7,5413 \cdot 10^{-6} \cdot h_s}$$

$$\tau'' = \frac{12,2393 \cdot 10^3}{h_s}$$

Al combinar ambos esfuerzos se obtiene el esfuerzo total sobre el cordón de soldadura, para esto se hace una combinación vectorial:

$$\tau = \sqrt{\tau' + \tau''} \quad (18)$$

Donde:

$\tau$ : Esfuerzo máximo sobre el cordón de soldadura, en Pa;

$\tau'$ : Esfuerzo cortante primario, en  $m^2$ ;

$\tau''$ : Esfuerzo cortante producido por el momento, en  $m^2$ .

Remplazando (18) en los valores de  $\tau'$  y  $\tau''$ :

$$\tau = 1,1248 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{\frac{1}{h_s}}$$

El esfuerzo esta en función de la variable del cateto del cordón de soldadura de tipo filete. Este valor se obtiene en función del factor de seguridad, se lo observa en la Tabla 14.

**Tabla 14:** Comparativa de tipos de carga y que esfuerzos y factores de seguridad se aplican

Tipo de carga	Tipo de soldadura	Esfuerzo permisible	N*(factor de seguridad calculado bajo energía de distorsión)
Tensión	A tope	$0,60S_y$	1,67
Aplastamiento	A tope	$0,90S_y$	1,11
Flexión	A tope	$0,60-0,66S_y$	1,52-1,67
Compresión simple	A tope	$0,60S_y$	1,67

Aprendizaje Supervisado	Aprendizaje no Supervisado	Aprendizaje de Refuerzo	Aprendizaje de Refuerzo
Cortante	A tope o de filete	$0,30S_u t$	

Además, mediante (19) se obtiene el esfuerzo permisible:

$$N_e = \frac{\tau p}{\tau} \quad (19)$$

Donde:

$\tau p$ : Esfuerzo permisible del material de aporte, en Pa;

$\tau$ : Esfuerzo máximo sobre cordón de soldadura, en Pa;

$N_e$ : Factor de seguridad calculado bajo energía de distorsión, adimensional.

Para encontrar el esfuerzo permisible se selecciona el electrodo según la Figura 32.

Número de electrodo AWS*	Resistencia a la tensión, kpsi (MPa)	Resistencia a la fluencia, kpsi (MPa)	Elongación porcentual
E60xx	62 (427)	50 (345)	17-25
E70xx	70 (482)	57 (393)	22
E80xx	80 (551)	67 (462)	19
E90xx	90 (620)	77 (531)	14-17
E100xx	100 (689)	87 (600)	13-16
E120xx	120 (827)	107 (737)	14

**Figura 32:** Tipos de electrodos disponibles en el mercado [31]

Se selecciona el electrodo E60xx con una resistencia a la fluencia de 345 MPa, con un factor de 1,67, debido a que esta gama de electrodos es la más utilizada al trabajar con acero negro.

$$1,67 = \frac{345 \cdot 10^6}{1,1248 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{1}{h_s}}}$$

$$h_s = 5,4446 \text{ mm}$$

Con este cálculo se concluye que la soldadura de los tubos cuadrados será de tipo filete y el electrodo seleccionado es el E6013.

La estructura final se muestra en la Figura (33).



**Figura 33:** Estructura principal de la máquina dosificadora

### **Diseño del Sistema de Formado de Funda**

Para el formado de las bolsas se requiere de elementos que permitan que el polietileno que se encuentra en un rollo llegue a ser una funda sellada. El sistema deberá contar con 3 partes principales: el tubo de alimentación, su diámetro se calcula para el tamaño de funda, una capa de deslizamiento, que es la parte donde el plástico se mueve para llegar al tubo, y un cuello formador, que es la parte donde se hace el traslape del plástico para posteriormente sellarlo. El tamaño de la funda se calcula en función de las medidas y masa de los condimentos de venta al público.

### Diseño del Tubo de Alimentación

Si se conoce que la funda debe tener un ancho de 9 cm y una altura de 14 cm, basándose en fundas comerciales de 50 g siendo este la funda de condimento de mayor tamaño, se tiene según [13]:

$$P = l + l \quad (20)$$

Donde:

$P$ : Perímetro del ancho de la funda, en cm ;

$l$ : Ancho de la funda, en cm.

Al reemplazar los datos en (20) se obtiene el siguiente resultado:

$$P = 9 + 9 = 18 \text{ cm}$$

Con esto se puede calcular el diámetro del tubo formador a través de (21):

$$D_f = \frac{P}{\pi} \quad (21)$$

Donde:

$D_f$  : Diámetro del tubo formador de funda, en cm.

Reemplazando los datos se obtiene:

$$D_f = \frac{18}{\pi} = 5,7296 = 6 \text{ cm}$$

Se concluye que el tubo formador debe ser de un diámetro aproximado de 6 cm de diámetro tomando en cuenta los diámetros comerciales de tubos de acero.

### Diseño de la Bobina de Plástico

La estructura del rollo de plástico que se empleará para el empaquetado del condimentos se calcula con (22).

$$A_b = P + t_r \quad (22)$$

Donde:

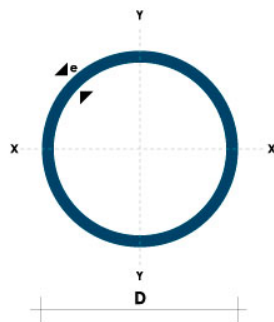
$A_b$ : Ancho de la bobina, en cm;

$t_r$ : Traslape de la funda, en cm.

Remplazando en (22) un valor de traslape promedio en fundas comerciales que es de 1 cm:

$$A_b = 18 + 1 = 19\text{cm}$$

Por último, para el diseño del tubo se elige un diámetro comercial de tubos de acero negro cercano al calculado y con este se recalcula el perímetro del polietileno, el tubo seleccionado tiene un diámetro de 6,35 cm elegido del catalogo DIPAC que se muestra en la Figura 34.



(D) Diámetro	Espesor	Peso	Área	I	W	I
Pulgadas	mm	Kg/m	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>
7/8"	1.50	0.77	0.98	0.53	0.47	0.73
1"	1.50	0.88	1.13	0.81	0.64	0.85
1 1/4"	1.50	1.12	1.43	1.63	1.03	1.07
1 1/2"	1.50	1.35	1.72	2.89	1.52	1.30
1 3/4"	1.50	1.59	2.02	4.67	2.10	1.52
2"	1.50	1.82	2.32	7.06	2.78	1.74
2 1/2"	1.50	2.29	2.92	14.05	4.42	2.19
3"	1.50	2.76	3.52	24.56	6.45	2.64
1"	2.00	1.15	1.47	1.01	0.80	0.83
1 1/4"	2.00	1.47	1.87	2.08	1.31	1.05
1 1/2"	2.00	1.78	2.27	3.71	1.95	1.29
1 3/4"	2.00	2.09	2.67	6.02	2.71	1.50
2"	2.00	2.41	3.07	9.14	3.60	1.73
2 1/2"	2.00	3.03	3.86	18.29	5.76	2.18
3"	2.00	3.66	4.66	32.11	8.43	2.62
2"	3.00	3.54	4.51	12.92	5.09	1.69
2 1/2"	3.00	4.48	5.70	26.15	8.24	2.14
3"	3.00	5.42	6.90	46.29	12.15	2.59

**Figura 34:** Tubo de alimentación [32]

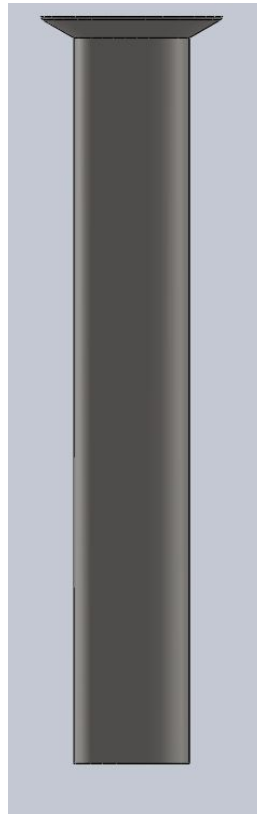
Recalculando los valores de perímetro de funda con (21) y ancho de bobina con (22) se tiene que:

$$D_f = \frac{P}{\pi}$$

$$P = D_f \cdot \pi = 6,35 \cdot \pi = 19,95 \text{ cm}$$

$$A_b = 19,95 + 1 = 20,95 \text{ cm}$$





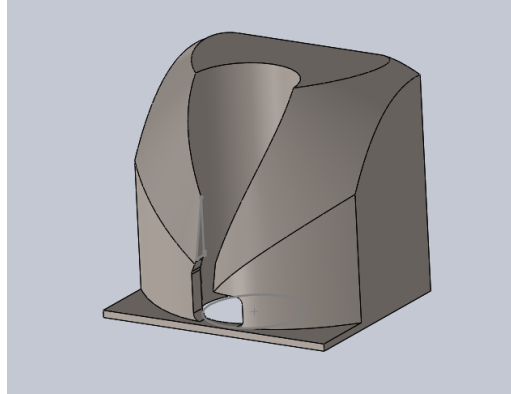
**Figura 35:** Tubo de alimentación

Con estos cálculos realizados se obtiene la medida de la bobina de polietileno capaz de envolver al tubo de alimentación dejando un traslape de 1 cm. El tubo queda definido en 6,35 cm de diámetro exterior, con un grosor de 2 cm y un largo de 40 cm brindando soporte al sellado vertical y dejando libre la parte del sellado horizontal.

### **Diseño del Cuello Formador**

La idea de esta pieza es transicionar el film de plástico desde la bobina, donde el plástico está distribuido como lámina, a una forma de cilindro, es decir cambiando la sección transversal del plástico y así facilitar el sellado que terminará por darle forma de funda. En la industria para esta tarea existen piezas en forma de cono simple, pero la más utilizada es la que se configura de manera que la pared posterior de la pieza de una entrada al film plástico, pasando a las paredes interiores de la pieza, luego por arrastre el film plástico sale aproximándose de forma asintótica hacia el extremo inferior de la ranura de la pieza envolviendo al tubo de alimentación con una forma tubular o cilíndrica, dejando el plástico listo para el proceso de sellado [33]. El elemento formador seleccionado es de cuello circular,

con un diámetro interior superior al del tubo de alimentación pero lo suficientemente cercano para dirigir al film de plástico, que permite obtener un empaçado adecuado para los condimentos. El diseño se muestra en la Figura 36.



**Figura 36:** Cuello formador

### **Diseño del Mecanismo de Sellado**

Para este prototipo de máquina se construye una selladora automática y de esta forma la intervención del operador se reduzca a tareas de control y ajuste de la máquina. Para sellar existen diferentes técnicas como se muestra a continuación:

- **Sellado por Ultra Frecuencia**

En la industria del plástico la alta frecuencia se usa comúnmente para procesos de sellado de diferentes productos, su ventaja es que puede trabajar con cualquier tipo de plásticos, vinilos y PVC. El rango en el que funcionan estas selladoras es desde los 3 a los 30 MHz. Con esta frecuencia se utiliza la vibración en conjunto con una presión aplicada para unir las capas de plástico a sellar, la vibración genera la suficiente energía mecánica para calentar los plásticos hasta llegar al punto de sellado. Cuando se requiere hermetismo total como productos médicos o para almacenar plasma y sueros [2].

- **Sellado por Gas Caliente**

Este método para unir materiales plásticos utiliza el calor generado por un chorro de aire o gas inerte al cual previamente se le sube su temperatura, para el ablandamiento del plástico con la posterior aplicación de presión para lograr la soldadura. Puede

emplearse para armar los paneles laterales de plástico de construcciones agrícolas de peso ligero, tales como invernaderos y cobertizos [2].

- **Sellado por Resistencias Eléctricas**

Estos utilizan una o más resistencias que hace calentar el material de la parte que entra en contacto con el plástico para formar una unión. Estas partes pueden ser mordazas, barras, planchas o troqueles, las cuales tienen diferentes configuraciones y generalmente se cubren con una capa antiadherente o con un recubrimiento de teflón para evitar que el plástico se pegue a la herramienta caliente. [2]

- **Sellado por Impulso Eléctrico**

No se calientan continuamente las partes que entran en contacto con el plástico, sino que se genera calor sólo cuando un impulso de corriente pasa por ellos. Esta corriente eléctrica calienta el elemento un tiempo específico para llegar a la temperatura deseada. Para el proceso de sellado en fundas en la industria se utilizan mecanismos por impulso [2].

Para el presente proyecto, se considera el sistema de sellado con mordazas y resistencia eléctrica interna, debido a que la adquisición de estas pueden ser bajo pedido de forma que se defina potencia, diámetro y voltaje de operación acordes al prototipo. Además, es una de las opciones más económicas y fáciles de aplicar.

Al tener el film de plástico formado como un cilindro, se necesitan de dos sellados para que se cree la funda, uno vertical, en el cual se forma el traslape de la fundas. Y un sellado horizontal para las partes superior e inferior. Para el sistema longitudinal una mordaza vertical actuará a través de un mecanismo lineal piñón cremallera. Mientras para el sellado horizontal, se usan dos mordazas una fija y otra móvil juntándose cerca del centro y producir el sellado horizontal de la bolsa.

### **Diseño del Mecanismo de Sellado Vertical**

La mordaza vertical es un componente importante en el proceso de sellado de empaquetado, ya que se utiliza para producir el sello longitudinal. Esta herramienta aplica presión

y calor en un área específica del empaque. Este tipo de sellado es comúnmente utilizado en envases de alimentos y productos químicos, se ubicará de forma paralela al tubo formador, cuando se detenga el arrastre, esta mordaza se activa a través del mecanismo de actuación lineal dando el sello vertical. En el diseño de la mordaza vertical, se debe tener en cuenta que requiere ser más alta que la funda para cubrir un área más amplia. De esta manera, se garantiza que los bordes reciban un sello doble, asegurando que no quede ninguna área del plástico abierta. Este diseño es esencial para garantizar la integridad del producto y evitar fugas. Se requiere que el sellado vertical se localice en la posición adecuada para que actúe sobre el plástico, de tal manera que permita mantener las medidas se hace que la mordaza supere con 5 mm cada lado de la funda, por lo que se obtiene (23).

$$A_{mv} = A_f + 2 \cdot h_v \quad (23)$$

Donde:

$A_{mv}$ : Altura de la mordaza vertical de sistema de sellado, en mm;

$A_f$ : Altura de la funda, en mm;

$h_v$ : Sobrepaso por lado de altura de la funda, en mm.

Remplazando en (23), la altura de funda de 14 cm:

$$A_{mv} = 140 + 5 \cdot 2$$

$$A_{mv} = 150 \text{ mm}$$

Para definir el ancho de la mordaza vertical, se toma en consideración el traslape de 1 cm que equivale a 10 mm definido en la sección de Diseño de bobina de plástico, la parte de la mordaza que está en contacto con el empaque debe cubrir parcialmente el traslape. Esto es necesario para garantizar que el sellado sea efectivo y no quede ninguna área sin sellar. Para el diseño el diámetro de la resistencia eléctrica en el interior de la mordaza es de 10 mm, con esto se define que el valor de ancho de la mordaza vertical es de:

$$An_{mv} = D_r + 2 \cdot t_r \quad (24)$$

Donde:

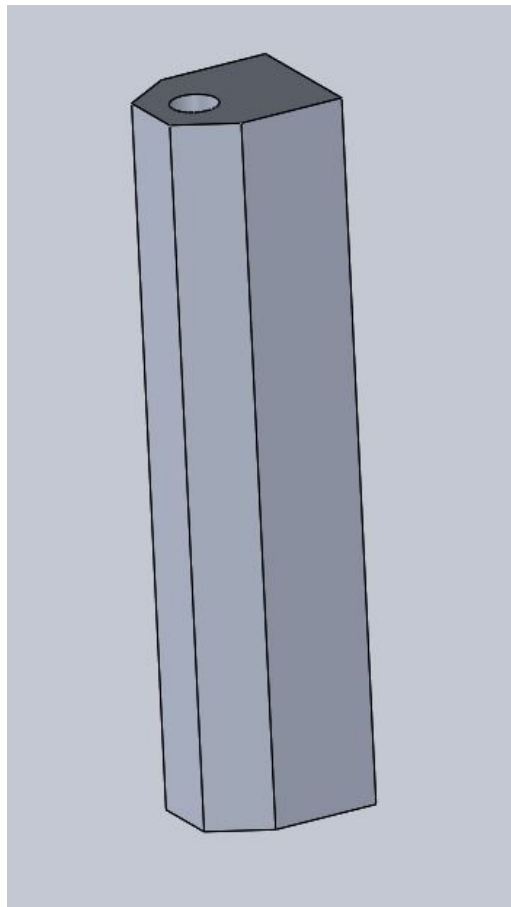
$An_{mv}$ : Altura de la mordaza vertical, en mm;

$D_r$ : Diámetro de la resistencia, en mm.

Remplazando en (24):

$$An_{mv} = 10 + 2 \cdot 10 = 30 \text{ mm}$$

se procede al diseño de la mordaza vertical de sellado con dimensiones de 150 mm, área de contacto de 15 mm, y un ancho de 30 mm, medidas que son usadas en la ecuación (25), su diseño 3D se muestra en la Figura 23.



**Figura 37:** Mordaza vertical

### **Cálculo de la Fuerza de Sellado Vertical**

Para el cálculo de fuerza empleada en el sistema de sellado vertical se utiliza las siguientes fórmulas, de acuerdo a [34], para determinar el área efectiva de sellado (25) y la fuerza de sellado (26).

$$As = a_{sv} \cdot L_{sv} \tag{25}$$

Donde:

$A_s$ : Área efectiva de sellado vertical, en  $\text{cm}^2$ ;

$a_{sv}$  : Ancho total del sellado vertical, en  $\text{cm}$ ;

$L_{sv}$  : Longitud total de sellado vertical, en  $\text{cm}$ .

Remplazando las medidas de la mordaza vertical diseñada en (25).

$$A_s = 1,5 \cdot 15$$

$$A_s = 22,5 \text{ cm}^2$$

Generalmente, con la temperatura de fusión del polietileno para un periodo de 2 a 5 s y la presión de mordaza de alrededor de  $0,0564 \frac{\text{Kgf}}{\text{cm}^2}$ , se obtiene un sellado satisfactorio de acuerdo a [17].

$$F_s = P_s \cdot A_s \quad (26)$$

Donde:

$F_s$ : Fuerza de sellado vertical de la funda, en  $\text{kgf}$ ;

$P_s$ : Presión de sellado vertical de la funda, en  $\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ ;

$A_s$  : Área efectiva de sellado vertical de la funda, en  $\text{cm}^2$ .

Remplazando el valor de presión sugerido en [17] y el área de la mordaza que entra en contacto con el plástico se tiene.

$$F_s = 0,0564 \cdot 22,5$$

$$F_s = 1,269 \text{ kgf} = 12,44464 \text{ N}$$

Se concluye que para el sellado vertical se necesita un fuerza aproximada de 12,4 N con la temperatura de fusión del polietileno.

### **Diseño del Mecanismo de Sellado Horizontal**

Para el sellado horizontal, en el diseño se consideran dos mordazas, una fija y otra móvil para producir el sello transversal de la funda, sellando tanto para la parte inferior y

superior de esta, su ubicación al tener una mordaza fija es cerca del centro del círculo del tubo formador y por debajo de la mordaza de sellado vertical para asegurar que el film de plástico haya sido traslapado en este eje.

Las dos mordazas están conectadas por dos ejes de 8 mm para asegurar un encaje perfecto al momento de unirse y formar el patrón de sellado. Para optimizar el diseño de la medida de la mordaza, se recurrió a una fuente especializada en el campo de la elaboración de máquinas empaquetadoras. En este caso, se consultó el Prontuario de EmpacMachine, y se establecieron los siguientes aspectos para garantizar un diseño óptimo:

$$L_{mh} = 1,2 \cdot A_{nf} \quad (27)$$

Donde:

$L_{mh}$ : Longitud de la mordaza horizontal, en mm;

$A_{nf}$ : Ancho de la funda, en mm.

Remplazando en (27):

$$L_{mh} = 1,2 \cdot 90$$

$$L_{mh} = 108 \text{ mm}$$

Con los valores encontrados se determinó que la longitud de las dos mordazas sea de 110 mm . Mientras que para el ancho de la mordaza horizontal, se tomó el diámetro de la resistencia eléctrica que se colocará dentro, el cual es de 10 mm. Para mantener una geometría y composición la mordaza, se tiene una distancia de 20 mm para que exista espacio suficiente. Con esto, se obtuvo que el ancho de la mordaza horizontal es de:

$$A_{nmh} = D_r + 2 \cdot d_e \quad (28)$$

Donde:

$A_{nmh}$ : Ancho de la mordaza horizontal, en mm;

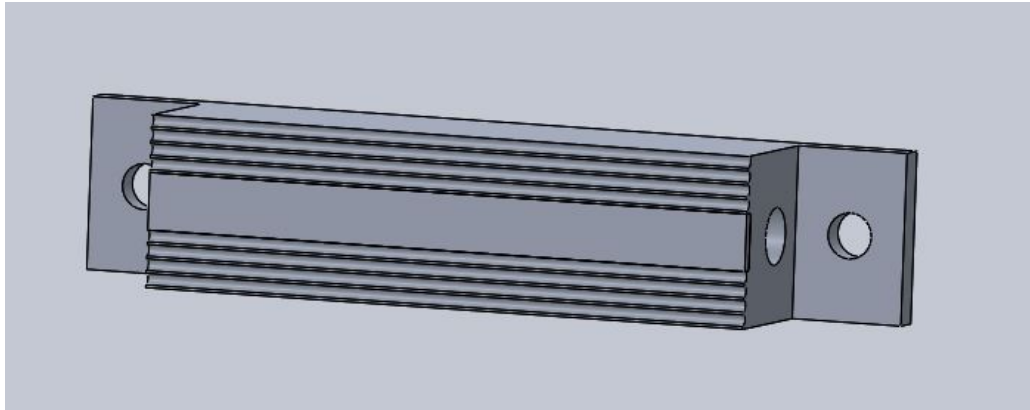
$D_r$ : Diámetro de la resistencia, en mm;

$d_e$ : Distancia extra entre la resistencia y las paredes de la mordaza, en mm.

Remplazando en (28):

$$A_{nmh} = 30 \text{ mm}$$

Con los cálculos realizados se determina que se emplearán dos mordazas horizontales cuyas dimensiones de 110 y 30 mm de ancho, la misma que se muestra en la Figura 38.



**Figura 38:** Mordaza horizontal de sellado

### Cálculo de la Fuerza de Sellado Horizontal

Una vez conocidas las medidas de las mordazas horizontales se procede al cálculo de la fuerza necesaria para un sellado eficiente como se definió en la sección Necesidades y Parámetros de Diseño, además de calcular el área de sellado efectivo de la mordaza.

$$A_{sh} = a_h \cdot L_h \quad (29)$$

Donde:

$A_{sh}$ : Área efectiva de sellado horizontal, en  $\text{cm}^2$ .

$a_h$ : Ancho total del sellado horizontal, en cm.

$L_h$ : Longitud total de sellado horizontal, en cm.

$$F_{sh} = P_{sh} \cdot A_{sh} \quad (30)$$

Donde:

$F_{sh}$ : Fuerza de sellado horizontal, en kgf;

$P_{sh}$ : Presión de sellado horizontal, en  $\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ ;

$A_{sh}$ : Área efectiva de sellado horizontal, en  $\text{cm}^2$ .



Remplazando en (30) las medidas de la mordaza y en (29) el valor de fuerza necesario descrito anteriormente se tiene.

$$A_{sh} = 3 \cdot 11 = 33 \text{ cm}^2$$

$$F_{sh} = 0,0564 \cdot 33 = 1,861 \text{ kgf} = 18,25018 \text{ N}$$

Por lo general, no se realiza una lectura de presión en máquinas envolvedoras o envasadoras, solo se busca utilizar un mecanismo de acción lineal que entregue la fuerza mínima que fue calculada en (26) y (30). El ajuste de presión correcto se determina según la experiencia y los resultados por las variaciones que se dan en la construcción e implementación. Si se obtiene una funda deficiente con el film de plástico, es posible que haya muy poca presión. Un sellado bueno en uno solo de los lados puede significar que hay una presión irregular. Si el film se rompe, la presión puede ser muy alta [17].

### **Diseño del Mecanismo lineal de movimiento**

Para que las mordazas actúen y realicen el sellado necesitan de un movimiento lineal, por lo que, se elige el mecanismo de piñón y cremallera que convierte el movimiento circular en un movimiento lineal continuo mediante la cremallera, que es una barra rígida con dientes. Una propiedad de este mecanismo es su reversibilidad, lo que significa que también se puede convertir el movimiento rectilíneo de la cremallera en un movimiento circular. Este mecanismo es utilizado en una variedad de aplicaciones, como la industria automotriz y sistemas de transmisión de potencia..

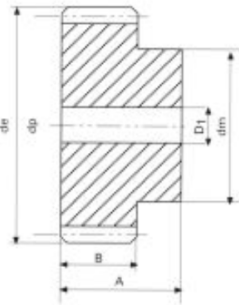
El mecanismo de piñón y cremallera es altamente eficiente en términos de costos, ya que permite reducir los gastos de producción sin afectar la funcionalidad de la máquina. Esto se debe a que es fácil de mantener y tiene una alta durabilidad, lo que permite una mayor rentabilidad a largo plazo, puesto que alternativas como cilindros neumáticos, tienen un elevado costo y necesitan de un sistema de alimentación externo.

El sistema de piñón cremallera se acopla a las mordazas para llevar a cabo el movimiento hacia delante de la cremallera que se utiliza para sellar el empaque y el movimiento hacia

atrás se utiliza para volver a la posición de inicio. Se emplea un mecanismo particular en la mordaza vertical y otro en la mordaza horizontal para lograr este propósito. Esto permite una operación precisa y eficiente del proceso de sellado.

Para empezar con el cálculo del torque requerido en el piñón para aplicar la fuerza calculada para el sellado, se necesita conocer el número de dientes del piñón y el paso de la cremallera. De acuerdo con las medidas de piñones generales tomadas de [35] y basándose en [36] en donde se define que un número de dientes óptimo para la transmisión de fuerza esta alrededor de 20, se encontró un piñón que se adapta al espacio para este mecanismo, cuenta con 23 dientes y un módulo 2 como se puede ver en la Figura 39.

**Engranajes diente recto**  
Angulo de presión 20°  
Nylon 6 FV, 25 %



Dientes Z	Mod. 1				Mod. 1,5				Mod. 2				Mod. 2,5				Mod. 3				Mod. 4	
	d <sub>e</sub>	d <sub>p</sub>	d <sub>m</sub>	D <sub>1</sub>	d <sub>e</sub>	d <sub>p</sub>	d <sub>m</sub>	D <sub>1</sub>	d <sub>e</sub>	d <sub>p</sub>	d <sub>m</sub>	D <sub>1</sub>	d <sub>e</sub>	d <sub>p</sub>	d <sub>m</sub>	D <sub>1</sub>	d <sub>e</sub>	d <sub>p</sub>	d <sub>m</sub>	D <sub>1</sub>	d <sub>e</sub>	d <sub>p</sub>
12	14	12	9	4	21	18	14	5	28	24	18	8	35	30	22	10	42	36	25	12		
13	15	13	10	4	22,5	19,5	16	5	30	26	18	8	37,5	32,5	22	10	45	39	25	12		
14	16	14	10	4	24	21	16	5	32	28	20	8	40	35	22	10	48	42	30	12		
15	17	15	10	4	25,5	22,5	18	5	35	30	20	8	42,5	37,5	22	10	51	45	30	12		
16	18	16	13	5	27	24	20	6	36	32	25	10	45	40	22	10	54	48	35	12	72	64
17	19	17	14	5	28,5	25,5	20	6	38	34	25	10	47,5	42,5	22	10	57	51	35	12	76	68
18	20	18	14	5	30	27	20	6	40	36	30	10	50	45	22	10	60	54	35	12	80	72
19	21	19	16	5	31,5	28,5	25	6	42	38	30	10	52,5	47,5	22	10	63	57	35	12	84	76
20	22	20	16	5	33	30	25	6	44	40	30	10	55	50	22	10	66	60	40	12	88	80
21	23	21	18	6	34,5	31,5	25	8	46	42	30	10	57,5	52,5	35	16	69	63	40	16		
22	24	22	18	6	36	33	28	8	48	44	30	10	60	55	35	16	72	63	40	16		
23	25	23	20	6	37,5	34,5	28	8	50	46	35	10	62,5	57,5	35	16	75	69	40	16		
24	26	24	20	6	39	36	28	8	52	48	35	10	65	60	35	16	78	72	45	16		
25	27	25	20	6	40,5	37,5	30	8	54	50	35	10	67,5	62,5	35	16	81	75	45	16		
26	28	26	22	8	42	39	30	10	56	52	40	16	70	65	35	16	84	78	45	16		
27	29	27	22	8	43,5	40,5	30	10	58	54	40	16	72,5	67,5	50	20	87	81	45	16		
28	30	28	22	8	45	42	35	10	60	56	40	16	75	70	50	20	90	87	45	16		
29	31	29	25	8	46,5	43,5	35	10	62	58	40	16	77,5	72,5	50	20	93	87	45	16		

**Figura 39:** Especificaciones técnicas de engranajes de módulo 1 a 2,5 [35]

Con la relación entre torque y fuerza obtenida de [36], se buscar encontrar el torque necesario para lograr la fuerza de sellado antes calculada para el sellado vertical y horizontal a través de (31).

$$T_N = \frac{F_N \cdot d_p}{2000} \quad (31)$$

Donde:

$T_N$ : Torque del piñón, en N . m;

$F_N$ : Fuerza tangencial de la cremallera, en N;

$d_p$ : Diámetro primitivo del piñón, en mm.

Remplazando el diámetro primitivo y la fuerza necesaria para el sellado vertical en (31).

$$T_N = \frac{12,45 \cdot 46}{2000}$$

$$T_N = 0,29 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Remplazando el diámetro primitivo y la fuerza necesaria para el sellado horizontal en (31).

$$T_N = \frac{18,25 \cdot 46}{2000}$$

$$T_N = 0,41 \text{ N} \cdot \text{m}$$

El paso de la cremallera se puede calcular a partir de las características del piñón:

$$P_c = \frac{\pi \cdot d_p}{D_{pi}} \quad (32)$$

Donde:

$P_c$ : Paso de la cremallera, en mm;

$D_{pi}$ : Dientes del piñón, adimensional;

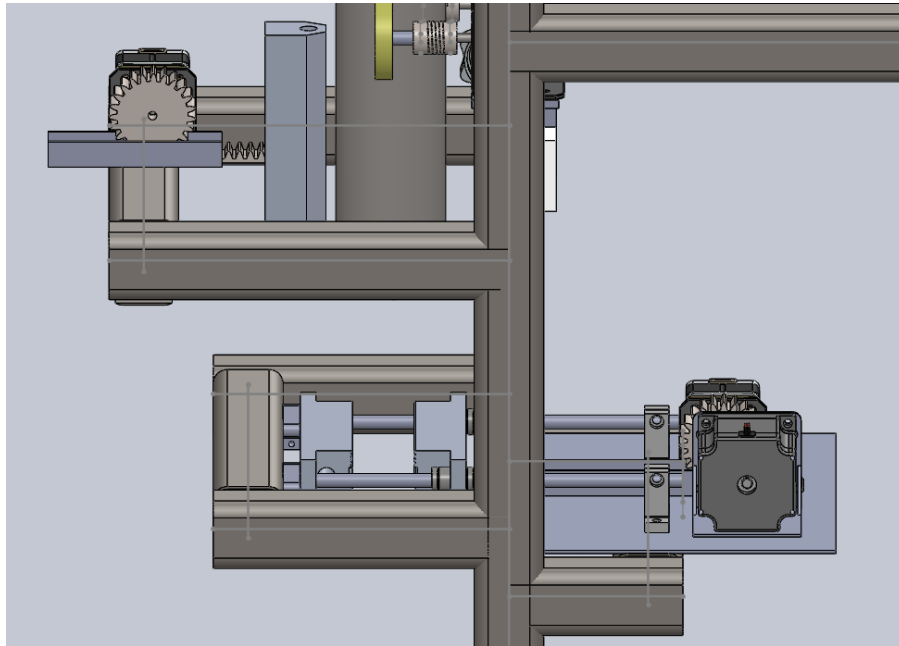
Remplazando el diámetro primitivo y la fuerza necesaria para el sellado vertical en (32).

$$P_c = \frac{\pi \cdot 46}{23}$$

$$P_c = 6,28 \text{ mm}$$

Con esto se puede definir mecanismo lineal de movimiento del sellado vertical y horizontal con un piñones de 23 dientes, diámetro primitivo de 46 mm y cremalleras con paso 6,28 mm.

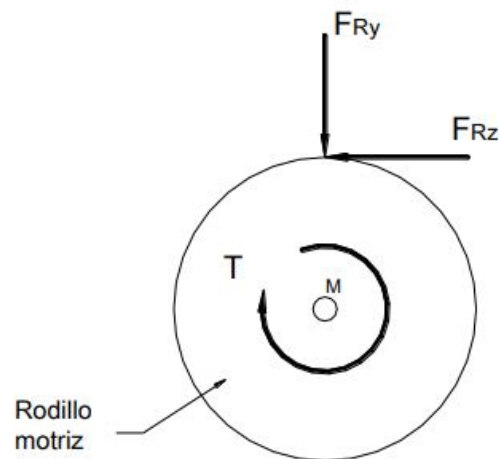
El sistema de sellado se muestra en su totalidad en la Figura 40.



**Figura 40:** Sistema de sellado con mordazas vertical y horizontales

### **Diseño Mecanismo de Arrastre de la Bolsa**

El mecanismo de arrastre se compone de dos rodillos revestidos con caucho, lo que permite la adherencia del polietileno y genera su avance alrededor del tubo alimentador. Este mecanismo es esencial para el correcto funcionamiento de la máquina empaquetadora, ya que garantiza que la película plástica sea transportada de manera eficiente y continua. Al tener un rodillo a cada lado del tubo de alimentación se necesita un movimiento sincronizado y a la misma velocidad para lograr que el film baje de forma uniforme y no se produzcan arrugas en la funda final, se debe emplear dos motores idénticos para cada rodillo y sus funciones de control y activación sean las mismas para garantizar un óptimo proceso de empaquetado del producto.



**Figura 41:** Diagrama de cuerpo libre de rodillo de arrastre [37]

En base al diagrama de cuerpo libre de la Figura 41, y conociendo el valor del radio de giro que está dado por el radio de la bobina de plástico que es igual a 4 cm, se determina el momento de inercia con (33).

$$I_m = m_r \cdot r_g^2 \quad (33)$$

Donde:

$I_m$ : Momento de inercia de la masa del rollo de plástico, en  $\text{kg} \cdot \text{mm}^2$ ;

$r_g$ : Radio de giro del rollo plástico, en mm;

$m_r$ : Masa del rollo de plástico, en kg.

$$I_m = 0,45 \cdot 40^2$$

$$I_m = 720 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$$

Se calcula la velocidad con la que debe desenrollar la bobina los 14 cm del largo de la funda con (34) y este valor se transforma a velocidad angular con (35).

$$V_b = \frac{A_f}{t_{de}} \quad (34)$$

Donde:

$V_b$ : Velocidad de la bobina, en  $\frac{\text{mm}}{\text{s}}$ ;

$t_{de}$ : Tiempo de desenrollado del rollo de plástico, en s.

Definiendo un tiempo para desenrollar en 1,5 s debido a que se necesita formar 110 fundas en una hora y cada funda debe finalizar su proceso en menos de 33 s y el proceso de dosificación y sellado tardan alrededor de 30 s. Reemplazando la altura de la funda en (34), se tiene:

$$V_b = \frac{140}{1}$$

$$V_b = 140 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

Ahora se transforma a velocidad angular con (35).

$$\omega = \frac{V_b}{r_g} \quad (35)$$

Donde:

$\omega$ : Velocidad angular de la bobina, en  $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$ .

$$\omega = \frac{140}{40}$$

$$\omega = 3,5 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Se calcula la aceleración angular necesaria con (36)

$$\alpha = \frac{\omega}{t_{de}} \quad (36)$$

Donde:

$\alpha$ : Aceleración angular de la bobina, en  $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$ .

$$\alpha = \frac{3,5}{1}$$

$$\alpha = 3,5 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

Luego se procede a calcular la fuerza de resistencia de la bobina con (37), esta fuerza se opone al avance del polietileno, se toma el 100 por ciento extra de la inercia que debe superar el rodillo de polietileno debido al rozamiento en el eje que lo sostiene, y se considera

un 30 por ciento más por cada rodillo de tensión según [2].

$$F_{arr} = \frac{2 I_m \alpha}{D_b} 2,6 \quad (37)$$

Donde:

$F_{arr}$ : Fuerza de arrastre de bobina, en N ;

$D_b$ : Diámetro de bobina, en mm;

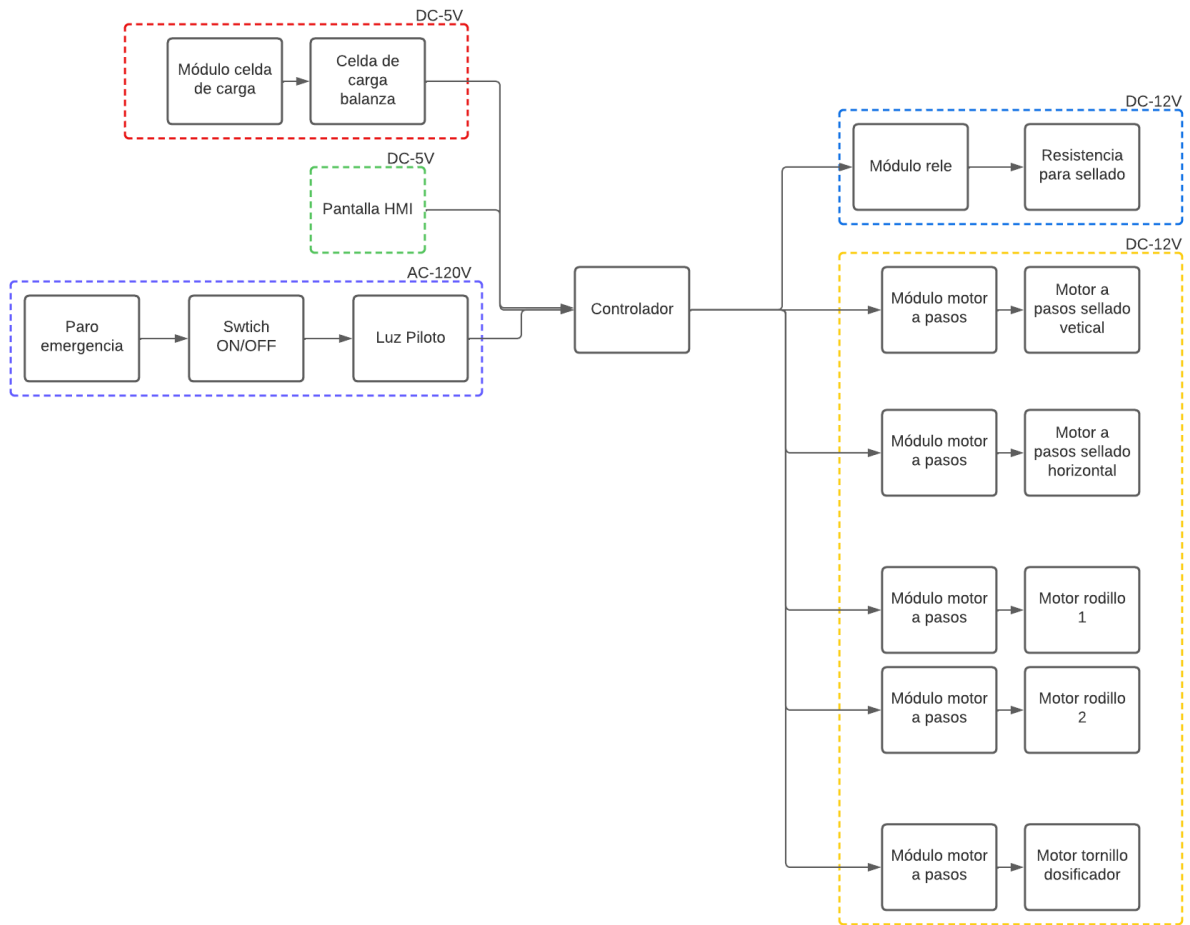
$$F_{arr} = \frac{2 \cdot 720 \cdot 3,5}{80} 2,6$$

$$F_{arr} = 1,21 \text{ N}$$

Al contar con dos rodillos de arrastre cada uno debería tener por lo menos una fuerza de 0,6 N, para superar la fuerza de arrastre necesaria.

## 7.2. Diseño Electrónico

Una vez que se ha diseñado la estructura y componentes mecánicos de la máquina dosificadora y empacadora de condimentos en polvo, se requiere dimensionar y seleccionar todos los componentes electrónicos que permitan realizar la automatización y control, por lo cual, en la Figura 42, se presenta un diagrama de bloques de todos los dispositivos eléctricos y electrónicos que se emplearán en el proyecto.



**Figura 42:** Diagrama de bloques para dimensionamiento electrónico

### Requerimiento de Señales de Entradas y de Salidas

A continuación se realiza un análisis de las entradas y salidas que requiere el prototipo para la automatización, este análisis se presenta en la Tabla 15.



**Tabla 15:** Análisis de I/O

I/O	Descripción	Señal
I	Señal Data del módulo HX711	Digital
I/O	Conexión de pantalla del HMI	HDMI-Digital
O	Señal Clock del módulo HX711	Digital
O	Señal de activación motor sellado vertical	Digital
O	Señal de sentido de giro del motor de sellado vertical	Digital
O	Señal de activación motor sellado horizontal	Digital
O	Señal de sentido de giro del motor de sellado horizontal	Digital
O	Señal de activación motor tornillo dosificador	Digital
O	Señal de activación motores rodillos	Digital
O	Señal de activación relé de resistencias de sellado	Digital
O	Señal servomotor balanza	Digital

Con esto se define que se necesita de un controlador que disponga de 1 pin de entrada digital, una conexión HDMI y de 9 pines de salida digital. Además se requiere de un controlador que pueda brindar un voltaje de 3 V, para los pines lógicos y alimentar el módulo HX711, y un voltaje de 5 V para alimentar el servomotor.

### **Dimensionamiento y Selección de la Unidad Central de Control**

La unidad central de control a emplear permitirá captar las señales de entrada y enviar las acciones de control a las señales de salida. Entre los controladores se pueden considerar microcontroladores como PIC, Arduino, Raspberry o PLC (Controladores Lógicos Programables). En el presente proyecto se ha considerado que el controlado sea un microcontrolador debido a que no se trabaja con potencias elevadas. Las características o requerimientos que debe cumplir son el desarrollo de un HMI y conexión a internet para la base de datos y los requerimientos de señales de entradas y salidas. En el mercado existen varias alternativas como las que se presentan en la Tabla 16.

**Tabla 16:** Comparativa controladores

Controlador	I/O	Compatibilidad HMI	Compatibilidad Base de datos	Voltaje de alimentación	Precio(USD)
Raspberry Pi 4	21	SI	SI	5.1 V DC	300
Arduino Mega	54	SI	SI	7-12 V DC	25
PLC S7 1200	14/10	SI	NO	120 V AC	700
PIC 16f877a	33	NO	NO	5.5 V DC	8

De acuerdo a las alternativas presentadas, se elige un Raspberry Pi 4. Es un controlador económico que viene en un formato compacto, principalmente utilizado para el desarrollo de proyectos pequeños o en prototipos que contengan partes de informática y electrónica. Cuenta con:

- Un procesador quad-core de 64 bits a 1,4 GHz.
- LAN inalámbrica de doble banda.
- Bluetooth 4.2.
- salida HDMI que puede conectarse a pequeñas pantallas LCD táctiles lo que facilita la implementación de un HMI.

Además, este controlador permite trabajar con varios lenguajes de programación y conectarse a base de datos en línea para actualizar los registros y que estos puedan ser accedidos desde diferentes dispositivos [38]. El controlador seleccionado se muestra en la Figura 43.



**Figura 43:** Raspberry pi 3b+ [39]

## **Pantalla HMI**

Un HMI es una interfaz hombre-máquina, que conecta al usuario con el sistema o dispositivo. Es ampliamente utilizado en aplicaciones industriales para monitorear y controlar procesos y maquinaria. La HMI proporciona una interfaz gráfica amigable para el usuario, GUI, que permite la visualización de datos en tiempo real, así como la entrada de parámetros de control y configuración. [40].

Para el prototipo se busca una pantalla que tenga autonomía energética, que sea táctil y tenga una buena respuesta, brinde colores claros, tenga una fácil conexión con el controlador seleccionado para simplificar el diseño del circuito y sea lo suficientemente grande para visualizar la información con facilidad.

En el mercado existen pantallas de diferentes características de las cuales se muestran las opciones más importantes en la Tabla 17.

**Tabla 17:** Alternativas Pantallas HMI

Descripción	Ventajas	Desventajas	Precio(USD)
Pantalla touch 3.5 in con puntero	Económico	Conexión utilice varios pines, necesita de un puntero, tamaño	25
Pantalla 7 in Waveshare Tft	Conexión HDMI y no necesita puntero	Precio alto y exterior abierto	100
Pantalla touch HDMI 7 in, con case	Protección externa, conexión HDMI y botones laterales	Precio	150

Se elige una pantalla táctil capacitiva de 7 in marca Waveshare con Tft y resolución de 1024 . 600. Esta se conecta al Raspberry Pi 3 a través de un cable HDMI y cuenta con su propia fuente de alimentación. La misma se muestra en la Figura 44.



**Figura 44:** Pantalla Waveshare de 7 in [41]

### Dimensionamiento y Selección de Motores

Para el control de los mecanismos de la máquina, se requiere emplear diferentes actuadores. En este proyecto se contempla el uso de 5 motores para los siguientes sistemas: dosificación, arrastre, sellado vertical y horizontal. Cada uno de estos sistemas necesita de precisión, mover mecanismos lineales hasta distancias definidas y que el control de su velocidad sea simple. En la Tabla 18 se muestran las alternativas.

**Tabla 18:** Alternativas Motores

	<b>Motor DC</b>	<b>Servomotor</b>	<b>Motor a pasos</b>
Voltaje(V)	12	120	12
Rotación(°)	360	180	1,8
Torque(Nm)	1,5	2,39	0,7
Velocidad(rpm)	100	3000	200
Precio(USD)	20	740	15
Precisión	Baja	Alta	Alta
Dificultad de Control	Alta	Media	Baja

Los motores DC no tienen un control preciso de posición integrado y los servomotores tienen un rango limitado de movimiento y presentan un costo elevado con torques altos. Por lo tanto, todos los motores que se seleccionan serán a pasos, los mismos que requieren de un driver para su control.

### **Dimensionamiento del Motor del Tornillo Dosificador**

Debido a que el presente proyecto no cuenta con inclinación en el tornillo sin fin del dosificador con (38) obtenida de [17], se calcula la potencia total requerida para el motor del dosificador.

$$P_t = \frac{c_o \cdot Q \cdot L_t}{367} + \frac{D \cdot L_t}{20} \quad (38)$$

Donde:

$P_t$ : Potencia requerida del tornillo dosificador, en kW;

$Q$ : Flujo del material, en  $\frac{\text{ton}}{\text{h}}$ ;

$c_o$ : Coeficiente de resistencia del material, adimensional.

$L_t$ : Longitud del embudo de la tolva, en m;

Sabiendo que el coeficiente de resistencia para elementos similares a los condimentos sal, azúcar y pimienta que son harina, aserrín y productos en polvo similares, se tiene un valor de 1,2 y se reemplaza en (38):

$$P_t = \frac{1,2 \cdot 0,05336 \cdot 0,031}{367} + \frac{0,047 \cdot 0,031}{20}$$

$$P_t = 0,0039 \text{ kW} = 3,90 \text{ W} = 0,005237 \text{ HP}$$

Con este y los cálculos realizados en la sección de Diseño Mecánico, se busca un motor a pasos con las siguientes características:

- Velocidad de 200 rpm.
- Potencia mínima 0,005 HP.
- Paso de máximo 3° de precisión.

Se selecciona un motor Nema 17 con código 42HD8011 con las siguientes características:

- Motor a pasos bipolar de 4 cables.
- Paso de 1,8° de alta resolución.
- Corriente 1,5 A.
- Voltaje 12 V.
- Torque 0,7 Nm.
- 30 W.
- Velocidad 200 rpm variable.

### **Dimensionamiento de los Motores de Arrastre de Film Plástico**

El sistema de arrastre cuenta con dos rodillos que trabajan por fricción y son controlados por motores eléctricos a pasos iguales que cumplen con la tarea de desenrollar el polietileno y llevarlo a través del cuello formador hasta el sistema de sellado.

Como se calculó en la sección de diseño mecánico se sabe que cada motor requiere:

- Fuerza mínima de 0,6 N por motor.
- Velocidad de giro  $3,5 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$  es decir 33 rpm.

Por esto se eligen dos motores Nema 17 con código 42HD8011 con las siguientes características:

- Motor a pasos bipolar de 4 cables.

- Paso de  $1,8^\circ$  de alta resolución.
- Corriente 1,5 A.
- Voltaje 12 V.
- Torque 0,7 Nm.
- Velocidad 200 rpm variable.

### **Dimensionamiento de los motores de sellado**

Como se cálculo en el Dimensionamiento Mecánico, se requieren dos motores con las siguientes características:

- Torque mínimo de 0,41 N por motor.

Por esto se eligen dos motores Nema 17 con código 42HD8011 con las siguientes características:

- Motor a pasos bipolar de 4 cables.
- Paso de  $1,8^\circ$  de alta resolución.
- Corriente 1,5 A.
- Voltaje 12 V.
- Torque 0,7 Nm.
- Velocidad 200 rpm variable.

### **Selección del Driver del Motor a Pasos**

Para el driver de los motores a pasos se necesita que este pueda proporcionar a los motores con una corriente de 2 A, que brinde protecciones a los motores y que se realice cambios de velocidad y dirección con facilidad. Por esto se presentan 3 alternativas en la Tabla 19.

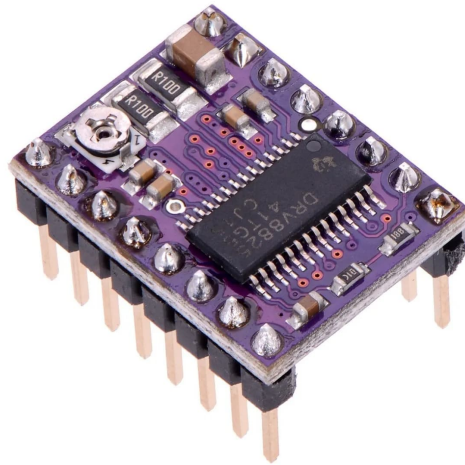
**Tabla 19:** Alternativas drivers motores a pasos

Modelo	Características	Precio(USD)
L9110s	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Controlar la velocidad y dirección de un motor a pasos</li> <li>■ Diodos de protección internos</li> <li>■ Corriente pico máxima 1,5 A</li> <li>■ Puede ser operado desde 2,5 V a 12 V</li> </ul>	5
A4988	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Controlar la velocidad y dirección de un motor a pasos</li> <li>■ Capacidad de “micro-stepping”</li> <li>■ Corriente pico máxima 2 A</li> <li>■ Puede ser operado desde 8 V a 35 V</li> <li>■ Protección por sobre-temperatura, bajo voltaje, corto y otras condiciones de error comunes</li> </ul>	3,50
DRV8825	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Controlar la velocidad y dirección de un motor a pasos</li> <li>■ Capacidad de “micro-stepping”</li> <li>■ Corriente pico máxima 2,5 A</li> <li>■ Puede ser operado desde 8,2 a 45 V</li> <li>■ Protección por sobre-temperatura, bajo voltaje, corto y otras condiciones de error comunes</li> </ul>	4,70

Se selecciona el driver DRV8825 por tener un mayor número de protecciones, ser capaz de brindar 2 A a los motores y tener una regulación de corriente máxima. Esta placa de conexión para controlar motores paso a paso bipolares de micro pasos, tiene una limitación de corriente ajustable, protección contra temperaturas elevadas causadas por corrientes elevadas, además de resoluciones de micro pasos de hasta 1/32. Funciona desde 8,2 V hasta 45 V y puede dar 1,5 A. El controlador en cuestión tiene una configuración de pines y



una interfaz similar al del controlador A4988, lo que permite el uso del DRV8825 como un sustituto con mejores prestaciones. [42]. El driver se muestra en la Figura 45



**Figura 45:** Driver para control motor a pasos DRV8825 [43]

### **Dimensionamiento de la Celda de carga**

Este dispositivo transductor convierte una señal mecánica, como la fuerza, en una señal eléctrica medible. Se utilizan comúnmente en aplicaciones de medición de cargas y pesaje.

La conversión se realiza de forma indirecta, utilizando un proceso de dos etapas. La primera etapa implica el uso de un dispositivo mecánico, en este caso una galga extensiométrica, que deforma en proporción a la fuerza medida. Esta galga convierte el desplazamiento o deformación en señales eléctricas proporcionales que son luego amplificadas y procesadas por un puente de Wheatstone hecho de 4 galgas. [44]. La señal eléctrica generada por el transductor suele ser de baja magnitud, por lo que se requiere de un amplificador de instrumentación para aumentar su nivel antes de ser utilizada. Esta señal amplificada es luego conectada a un algoritmo programado en el controlador del proceso para calcular la fuerza medida por el transductor. [45].

Existen 3 tipos de celdas de carga y cada una se utiliza para casos diferentes.

- Tipo barra

Son utilizadas en aplicaciones de baja capacidad, como en joyas o balanzas de alimentos, aunque también existen modelos capaces de medir cargas de 50 kg. Estas

celdas deben ser montadas con pernos en cada extremo y la fuerza debe ser aplicada en la dirección indicada por la flecha en la parte frontal.

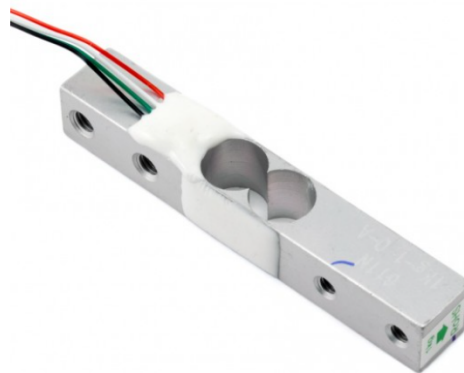
- Tipo botón

Para obtener una medición precisa, es importante aplicar la fuerza de manera tangencial, es decir, directamente hacia abajo sobre la superficie donde está montada la celda de carga.

- Tipo S

Puede ser usada en procesos de compresión o tensión.

Para este proyecto se elige una celda de carga tipo barra de 1 kg de capacidad de medida, la cual se muestra en la Figura 46.

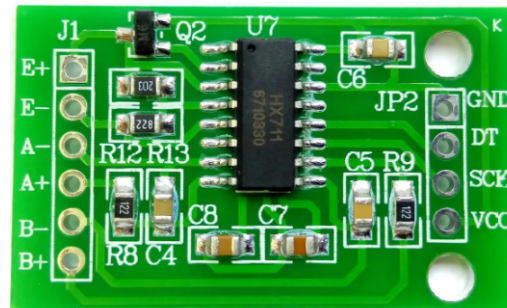


**Figura 46:** Celda de carga [46]

Para leer los datos de esta celda se utiliza un módulo HX711 que se usa entre una celda de carga y un microcontrolador, permitiendo leer la masa de manera sencilla. Es compatible con las celdas de carga de varios pesos desde 1 kg hasta celdas de 50 kg. La celda de carga es un componente comúnmente utilizado en sistemas automatizados y de control industrial. Su diseño integra un conversor A/D que permite la lectura de la señal eléctrica generada por el puente Wheatstone de la celda de carga, así como un conversor ADC de alta precisión de 24 bits. La comunicación serial de 2 pines, Clock y Data, permite una comunicación rápida y fiable con el microcontrolador. Además, también es común en la industria médica para medir cargas y peso.

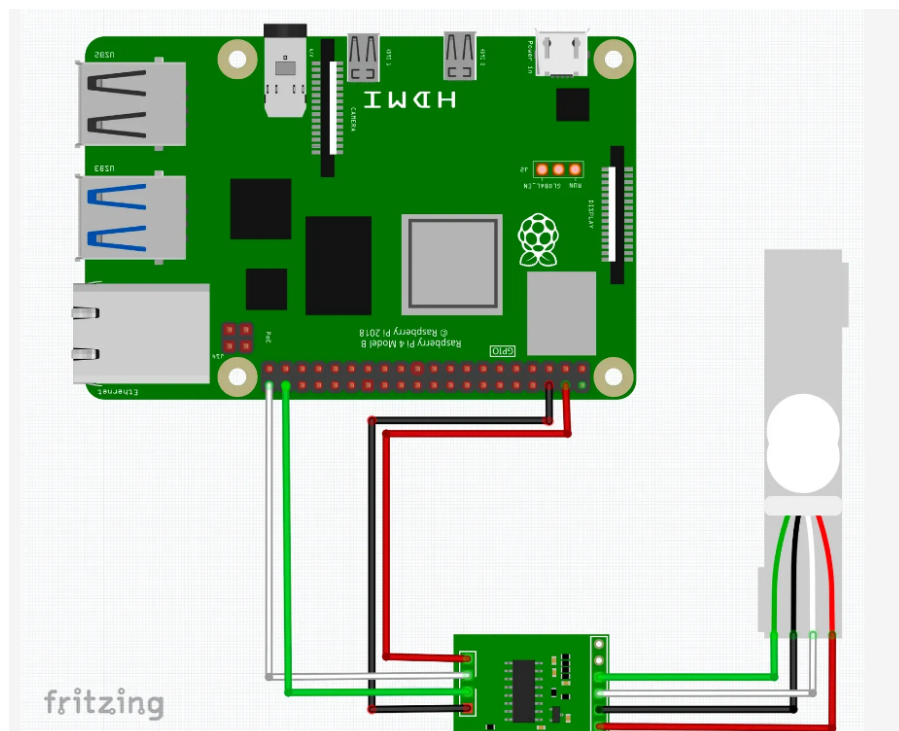
Generalmente, es utilizado en sistemas de medición automatizada, procesos industriales, industria médica. Además, posee internamente un conversor A/D, permitiendo la lectura

del puente Wheatstone formado por la celda de carga y también un conversor ADC de 24 bits. Se comunica con el microcontrolador por medio de una interfaz serial de 2 pines (Clock y Data) similar al I2C [46]. Este se puede observar en la Figura 47.



**Figura 47:** Módulo HX711 [47]

Un diagrama de la conexión entre la celda, el módulo HX711 y el Raspberry se muestra en la Figura 48.



**Figura 48:** Conexión celda de carga, HX711 y Raspberry [48]

### Selección del Pulsante de Emergencia

Un botón de parada de emergencia es un elemento de seguridad diseñado para detener de manera inmediata el funcionamiento de una máquina y garantizar la seguridad del operario en caso de una situación de emergencia. Detener la maquinaria de manera rápida

en situaciones de riesgo para evitar lesiones o interrumpir el flujo de procesos cuando se presenten fallas en la cadena de producción es parte de sus aplicaciones. Las tres clases de pulsantes de emergencia más comunes son:

- Empuje-Tracción

El botón se activa al ser presionado y se desactiva al ser liberado mediante una tracción hacia atrás.

- Liberación por giro

El botón se activa al ser presionado y se desactiva al ser liberado mediante un giro.

- Liberación con llave

El botón se activa al ser presionado y solo se desactiva mediante llave única.

En el mercado existen las alternativas mostradas en la Tabla 21:

**Tabla 20:** Alternativas pulsadores de emergencia

<b>Modelo</b>	<b>Marca</b>	<b>Precio(USD)</b>
Pulsador 22 mm, liberación por empuje, plástico	HBAN	4,50
Pulsador 22 mm, liberación por giro, plástico	HBAN	5,50
Pulsador 22mm, liberación por giro, metálico	HBAN	8,70

El botón seleccionado para el paro de emergencia es uno de liberación por giro que bloquea el paso de corriente hasta que el operador gire el botón y la máquina vuelva a encenderse, además, este es color rojo lo que lo hace notorio para el operador y pueda usarlo en caso de un accidente. En la Figura 49 se presenta el botón seleccionado.



**Figura 49:** Pulsador de emergencia 22mm tipo hongo de liberación por giro [49]

### Selección Luz Piloto

Es necesario colocar una luz piloto que sirva como indicador de que la máquina esta encendida. En el mercado existen las alternativas mostradas en al Tabla ??.

**Tabla 21:** Alternativas pulsadores de emergencia

Modelo	Marca	Precio(USD)
Luz piloto verde 22 mm, 12 V	HBAN	2,50
Luz piloto verde 22 mm, 110 V	HBAN	2,50
Luz piloto verde 22 mm, 110 V, buzzer incluido	HBAN	10

La luz seleccionada funciona con un voltaje de 110 V y tienen un diámetro de 22 mm, se muestra en la Figura 50 la luz piloto seleccionada.



**Figura 50:** Luz piloto verde, 22 mm, 110 V [50]

## Resistencia de Sellado

Las resistencias eléctricas utilizadas para regular la temperatura en los procesos de sellado se encuentran en las mordazas tanto de sellado vertical como horizontal. Estas resistencias son del tipo cartucho y tienen forma de cilindro, lo que les permite tener una vida útil larga y evitar la oxidación del hilo calefactor incluso a altas temperaturas. Este tipo de resistencia es especialmente adecuado para procesos que requieren precisión en cambios de temperatura, como en máquinas de empaquetado, etiquetado e inyección en moldes. Se necesita que las mordazas vertical y horizontal se calienten hasta el punto de fusión del polietileno que son 110 °C.

Definiendo el voltaje de trabajo de la resistencia en 110 V AC, teniendo un diámetro de 10 mm y el material de la mordaza es aluminio 1100 por ser un buen conductor térmico, se procede a calcular la potencia necesaria de las resistencias con (40) obtenida de [51].

$$C_r = \frac{P_m \cdot c_e \cdot T_p}{860 \cdot t_c \cdot E_f} \quad (39)$$

Donde:

$C_r$ : Potencia requerida por la resistencia, en kW;

$P_m$ : Peso de la mordaza, en kg;

$c_e$ : calor específico de la mordaza, en  $\frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$ ;

$T_p$ : Temperatura de fusión del polietileno, en °C.

$t_c$ : Tiempo de calentamiento de la resistencia, en h;

$E_f$ : Eficiencia, adimensional.

Es difícil calcular la eficiencia de forma precisa porque varía según la retención de calor, el aislamiento y la disposición de las resistencias, pero el valor adecuado es generalmente de 0,2 a 0,5, según [51].

Para la mordaza vertical se reemplaza en (40):

$$C_r = \frac{0,357 \cdot 0,55 \cdot 110}{860 \cdot 0,05 \cdot 0,2}$$

$$C_r = 2,51 \text{ kW}$$

Para la mordaza horizontal se reemplaza en (40):

$$C_r = \frac{0,257 \cdot 0,55 \cdot 110}{860 \cdot 0,05 \cdot 0,2}$$

$$C_r = 1,80 \text{ kW}$$

Con esto se procede a calcular la densidad de Watts, que se refiere a la tasa de flujo de calor o se puede entender como el número de Watts por centímetro cuadrado del área de la superficie calentada.

$$D_w = \frac{C_r}{\pi \cdot D_r \cdot L_r} \quad (40)$$

Donde:

$D_w$ : Densidad de Watts, en  $\frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$ ;

$L_r$ : Largo de la resistencia, en cm.

El largo de la mordaza vertical es de 15 cm y el largo de la mordaza horizontal es de 11 cm.

Para la mordaza vertical se reemplaza en (40):

$$D_w = \frac{2510}{\pi \cdot 1 \cdot 15}$$

$$D_w = 53,29 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$$

Para la mordaza horizontal se reemplaza en (40):

$$D_w = \frac{1800}{\pi \cdot 1 \cdot 11}$$

$$D_w = 52,11 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$$

Se multiplica la densidad de Watts por el largo de cada resistencia y se tiene que estas tienen un diámetro de 10 mm, longitud igual al de las mordazas que las contienen y una potencia de 800 W para la vertical y 550 W para la horizontal, trabajando a 110 V AC y con cables de un largo de 5 cm. Estas son fabricadas según los requerimientos presentados y su precio varía.

## Resumen de Componentes Electrónicos Seleccionados

A continuación se muestra a detalle los componentes electrónicos seleccionados para este proyecto en la Tabla 22.

**Tabla 22:** Componentes electrónicos seleccionados

Descripción	Cantidad	Voltaje(V)	Amperaje(A)
Motores Nema 17	3	12	1,5
Motores Nema 23	2	12	2
DRV8825	5	5	1,5
Raspberry Pi 3B+	1	5	0,5
Niquelinas	2	12	2
Celda de carga	1	5	0,240
Módulo HX711	1	3,3	0,240
Pulsador paro de emergencia	1	110	4
Luz Piloto	1	110	4
Pantalla táctil 7 in	1	5	0,5

## Dimensionamiento de la Fuente de Alimentación

La fuente de alimentación es el dispositivo responsable de proporcionar la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento de los motores, componentes electrónicos y niquelinas. El prototipo va conectado a una toma AC de 120 V y usa una serie de adaptadores para alimentar los diferentes elementos electrónicos. El Raspberry Pi 3 y la pantalla tienen cada uno su propio adaptador, para los motores a pasos Nema 17 se utiliza otro adaptador y para las niquelinas una fuente de voltaje DC.

En la Tabla 23 se detallan los adaptadores, los voltajes, corrientes y a que componentes alimentan.

**Tabla 23:** Voltajes de alimentación

Adaptador	Voltaje	Corriente	Potencia	Componentes
1	5 V	2 A	10 W	Raspberry Pi 3, celda de carga, HX711, DRV8825
2	12 V	1 A	12 W	Resistencias de sellado
3	12 V	2 A	24 W	Motores a pasos
4	5 V	1 A	5 W	Pantalla

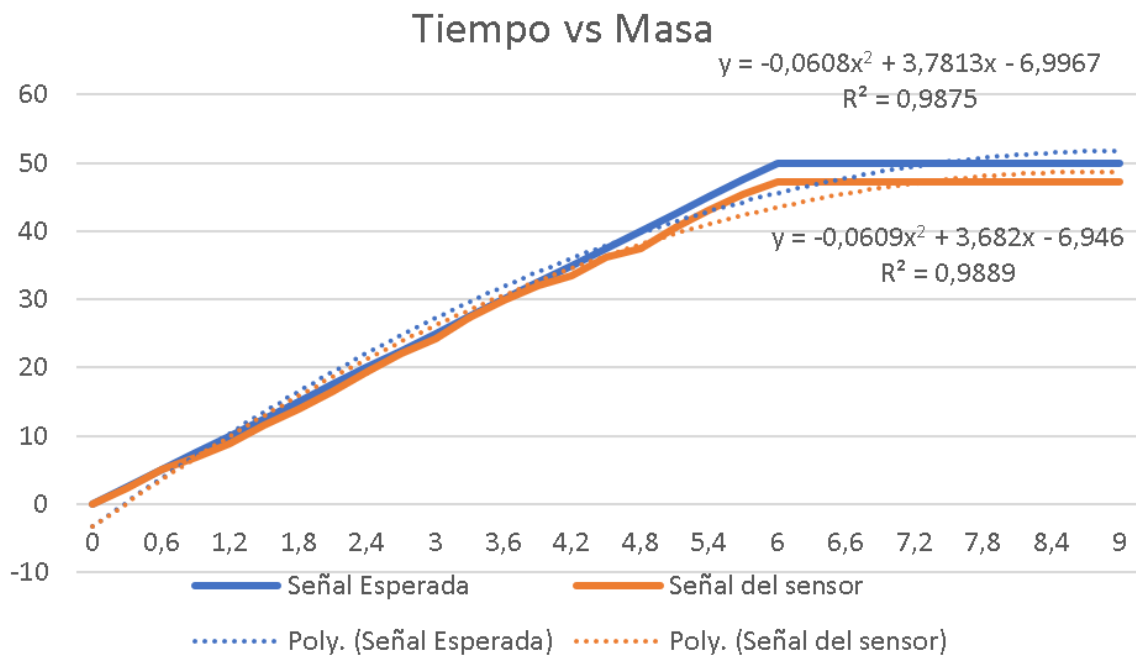
La suma de potencias da un total de 51 W y si se define un tiempo de trabajo diario de 6 horas, se tiene que por día se registra un consumo de 0,306 kWh, que por 20 días



laborables del mes dan 6,12 kWh.

### 7.3. Diseño del Control

Para los sistemas de control de lazo cerrado, se utiliza un medidor que realimenta la información al controlador y mantiene la variable en cuestión en un valor específico. Este valor deseado se conoce como Setpoint y puede ser modificado por el usuario. En este proyecto, el control se lleva a cabo en el dosificador, utilizando una balanza como medidor y ajustando los giros del tornillo para alcanzar el peso adecuado. Para encontrar la función de transferencia primero se recolectó los datos de peso medidos y se encontró las ecuaciones de las gráficas obtenidas como se muestra en la Figura 51.



**Figura 51:** Gráfica Tiempo vs Masa de la señal esperada y la señal obtenida de la balanza

Como se puede evidenciar el mayor error se encuentra en la parte estacionaria por lo que se procede a diseñar un controlador tipo PI.

La señal esperada queda definida por:

$$y_1 = -0,0608 \cdot x_t^2 + 3,7813 \cdot x_t - 6,9967 \quad (41)$$

Donde:

$y_1$ : Función esperada, en g;

$x_t$ : Variable de tiempo, en  $s$ .

La señal de la balanza queda definida por:

$$y_2 = -0,0609 \cdot x_t^2 + 3,682 \cdot x_t - 6,946 \quad (42)$$

Donde:

$y_2$ : Función real, en  $g$ .

Una vez se han obtenido las entradas y salidas del sistema, se determina la relación matemática entre ellas, conocida como función de transferencia, la cual se representa con  $H(s)$  donde  $s$  es la variable compleja de la transformada de Laplace. Conocer la función de transferencia permite entender cómo el sistema responde a diferentes entradas y así poder mejorar su rendimiento, cuando las condiciones iniciales son iguales a cero en el tiempo  $x_t = 0$ , lo cual aplica a este proyecto.

La transformada de Laplace de la señal esperada es:

$$L(y) = -0,0608 \cdot \frac{2}{s^3} + 3,7813 \cdot \frac{1}{s^2} - 6,9967 \cdot \frac{1}{s}$$

La transformada de Laplace de la señal de la balanza es:

$$L(y) = -0,0609 \cdot \frac{2}{s^3} + 3,682 \cdot \frac{1}{s^2} - 6,946 \cdot \frac{1}{s}$$

Donde:

$s$ : Variable compleja de Laplace.

Dividiendo la salida para la entrada del sistema la función de transferencia es:

$$H(s) = \frac{-0,0609 \cdot \frac{2}{s^3} + 3,682 \cdot \frac{1}{s^2} - 6,946 \cdot \frac{1}{s}}{-0,0609 \cdot \frac{2}{s^3} + 3,682 \cdot \frac{1}{s^2} - 6,946 \cdot \frac{1}{s}}$$

$$H(s) = \frac{s^2 - 0,54 \cdot s + 0,017}{s^2 - 0,53 \cdot s + 0,017}$$

Donde:

$H(s)$ : Función de transferencia del sistema, adimensional.

Para poder encontrar las constantes proporcional e integral del controlador PI, se aplica

el método de Ziegler–Nichols de lazo cerrado. Lo primero es encontrar la ganancia crítica asignando una ganancia  $K$  a la función de transferencia y aplicando el criterio de Routh-Hurwitz para encontrar su valor.

Donde:

$K$ : Ganancia de la función de transferencia, adimensional.

$$H(s)_{LC} = \frac{\frac{s^2 - 0,54 \cdot s + 0,017}{s^2 - 0,53 \cdot s + 0,017}}{1 + \frac{s^2 - 0,54 \cdot s + 0,017}{s^2 - 0,53 \cdot s + 0,017}}$$

$$H(s)_{LC} = \frac{K \cdot (s^2 - 0,54 \cdot s + 0,017)}{s^2 - 0,53 \cdot s + 0,017 + K \cdot (s^2 - 0,54 \cdot s + 0,017)}$$

Donde:

$H(s)_{LC}$ : Función de transferencia del sistema en lazo cerrado, adimensional.

$$P(s) = (K + 1) \cdot s^2 + (-0,54 \cdot K - 0,53) \cdot s + 0,017 \cdot K + 0,017$$

Donde:

$P(s)$ : Polinomio característico del sistema, adimensional.

$s^2$	$K + 1$	$0,017K + 0,017$
$s^1$	$-0,54K - 0,53$	$0$
$s^0$	$b1$	

Donde:

$b1$ : coeficiente de  $s^0$ , adimensional.

$$b1 = \frac{(-0,54 \cdot K - 0,53) \cdot (0,017 \cdot K + 0,017)}{-0,54 \cdot K - 0,53}$$

$$b1 = 0,017 \cdot (K + 1)$$

$$-0,54 \cdot K - 0,53 > 0$$

$$K < -\frac{0,53}{0,54}$$

$$K > 0$$

$$0,017 \cdot (K + 1) > 0$$

$$K > -1$$

$$K > 0$$

$$K_c = 0$$

$$P(s) = s^2 - 0,53 \cdot s + 0,017$$

$$s = jw$$

Donde:

$j$ : Parte imaginaria, adimensional;

$w$ : Frecuencia de oscilación, en Hz.

$$P(s) = (jw)^2 - 0,53 \cdot (jw) + 0,017$$

$$-w - 0,53 \cdot (jw) + 0,017$$

$$-w + 0,017$$

$$w = 0,017 \text{ Hz}$$

$$w = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot \pi \cdot \frac{1}{P_c}$$

$$P_c = 2 \cdot \pi \cdot \frac{1}{0,017} + 3696$$

Donde:

$P_c$ : Periodo de oscilación, en s.

Utilizando las definiciones de la Figura 52, se encuentran las constantes  $K_p$  y  $T_i$ .

Controlador	$K_p$	$\tau_i$	$\tau_d$
<b>P</b>	$0.5K_u$	$\infty$	0
<b>PI</b>	$0.45K_u$	$\frac{1}{1.2}P_u$	0
<b>PID</b>	$0.6K_u$	$0.5P_u$	$0.125P_u$

**Figura 52:** Constantes de control [52]

$$K_p = 0,45 \cdot K_c = 0$$

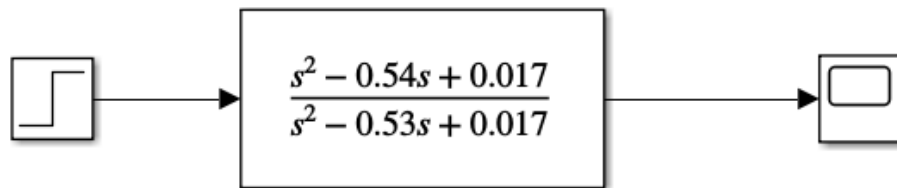
$$T_i = \frac{P_c}{1,2} = 308$$

Donde:

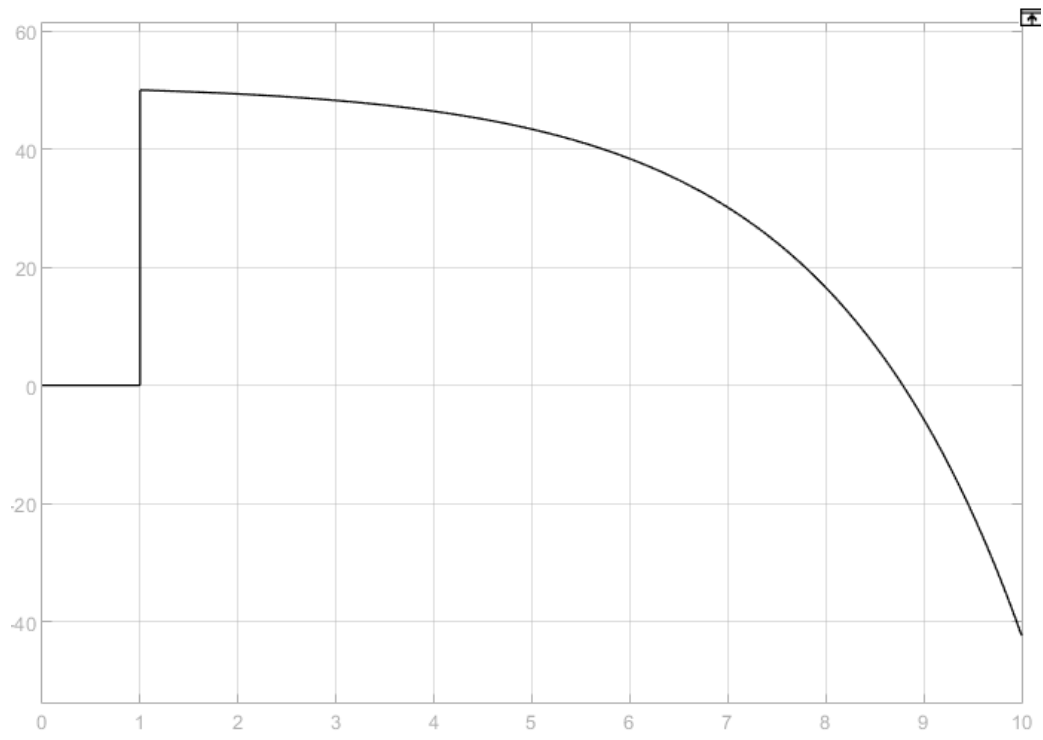
$K_p$ : Constante proporcional de control, adimensional;

$T_i$ : Constante integral de control, adimensional.

Con estas constantes se procede a simular en Simulink con la función de transferencia encontrada, primero se muestra la función en lazo abierto, en la Figura 53 el diagrama de bloques y la gráfica resultante se muestra en la Figura 54 donde se ve que el valor deseado no se mantiene.

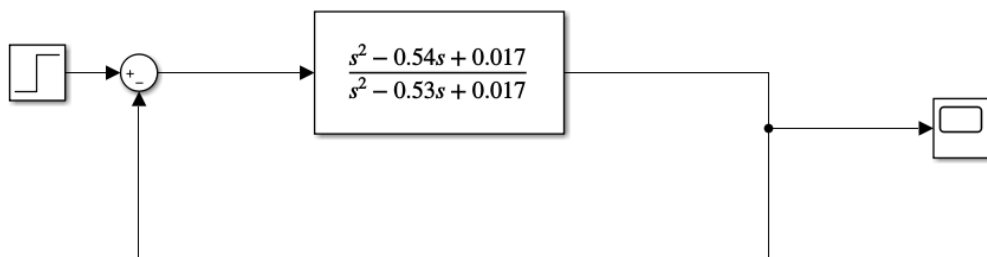


**Figura 53:** Simulación sistema de control lazo abierto



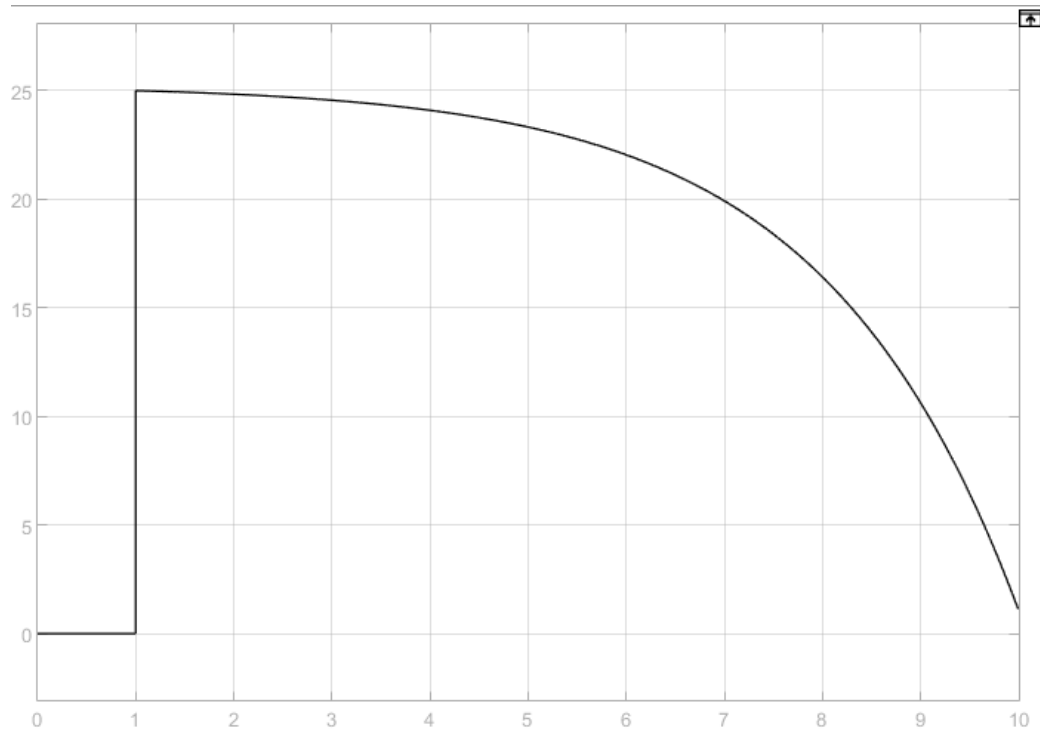
**Figura 54:** Simulación sistema de control lazo abierto gráfico

Luego en la Figura 55 se muestra el sistema en lazo cerrado sin control, donde se ve que no llega al valor deseado y se comporta de manera similar al lazo abierto donde no se mantiene un valor estable.



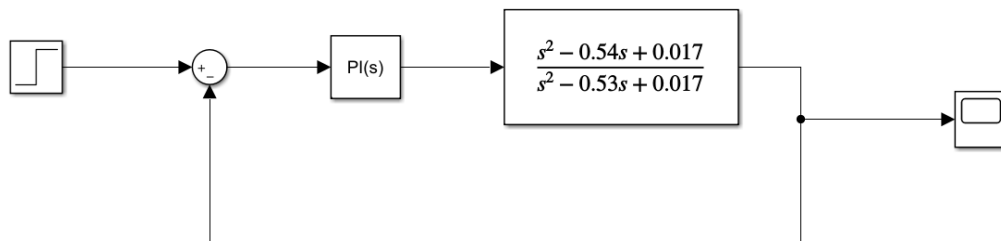
**Figura 55:** Simulación sistema de control lazo cerrado sin control

Y la gráfica resultante se muestra en la Figura 56

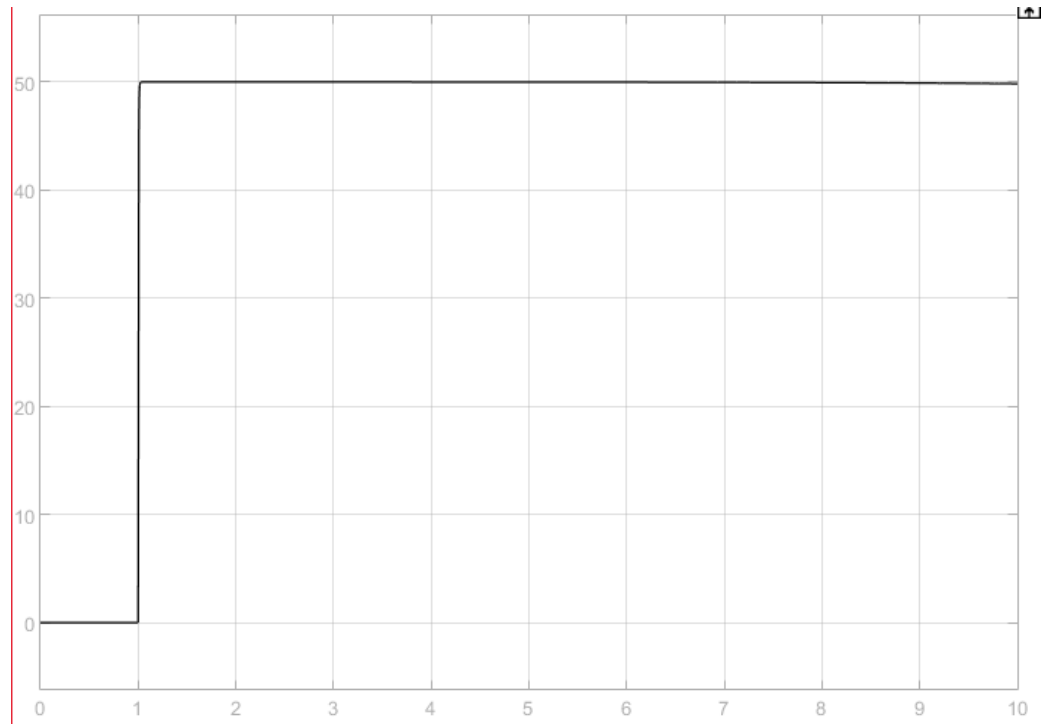


**Figura 56:** Simulación sistema de control lazo cerrado sin control gráfico

Por ultimo se coloca el controlador PI diseñado a través de un bloque de control PID, como se muestra en la Figura 57 y su gráfica en la Figura 58. En esta se observa que se llega al valor deseado y este se estabiliza.

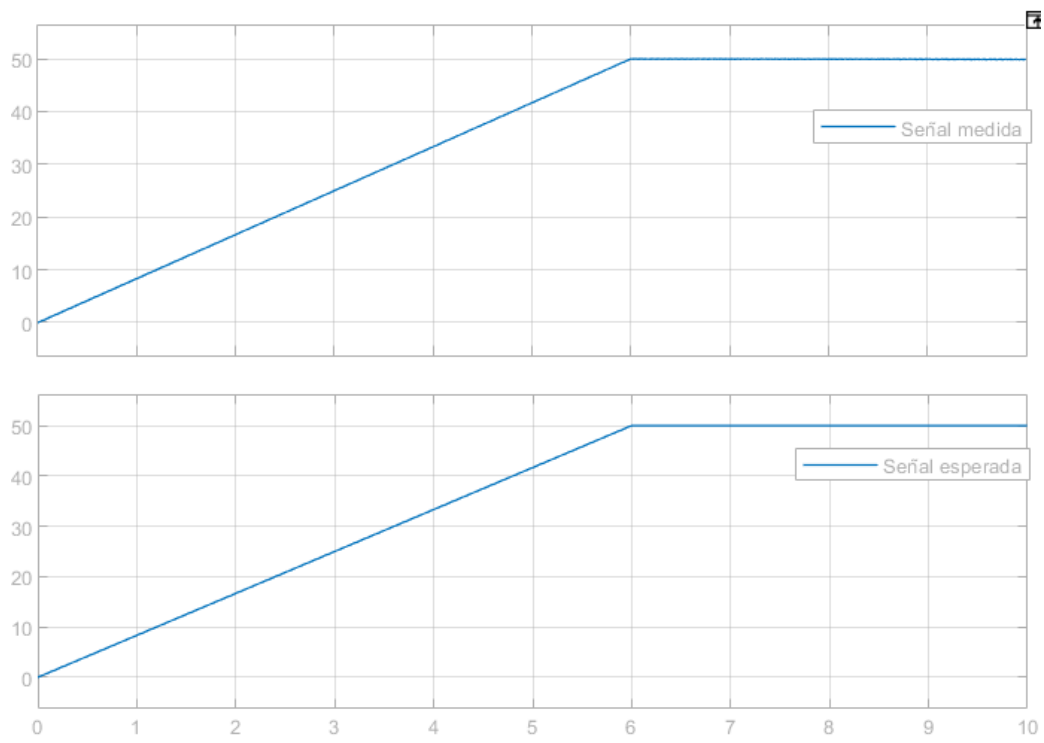


**Figura 57:** Simulación sistema de control PI en Simulink



**Figura 58:** Simulación sistema de control PI en Simulink

Para comprobar que este es el mejor tipo de controlador se prueba la opción tune del bloque PID en Simulink, y se ve que los valores recomendados son los de un controlador tipo I igual que el diseñado como se ve en la Figura 59, con esto se descartan controladores tipo PD y PID ya que no presentan una mejora en los resultados.



**Figura 59:** Gráficas de las señales de control



Este controlador es un sistema en tiempo continuo que requiere ser discretizado antes de su implementación en un entorno industrial debido a que la retroalimentación de información entre el proceso y el controlador se lleva a cabo en tiempos discretos y no de manera continua. Con las pruebas de un control de retroalimentación simple desde la balanza hacia el dosificador, combinado con un cálculo proporcional para encontrar el número de pasos requeridos del motor del dosificador, es suficiente para alcanzar resultados satisfactorios, por lo que el controlador PI se encuentra en un nivel de simulación y su aplicación puede ser una mejora en futuras versiones del prototipo.

#### **7.4. Diseño de la Programación**

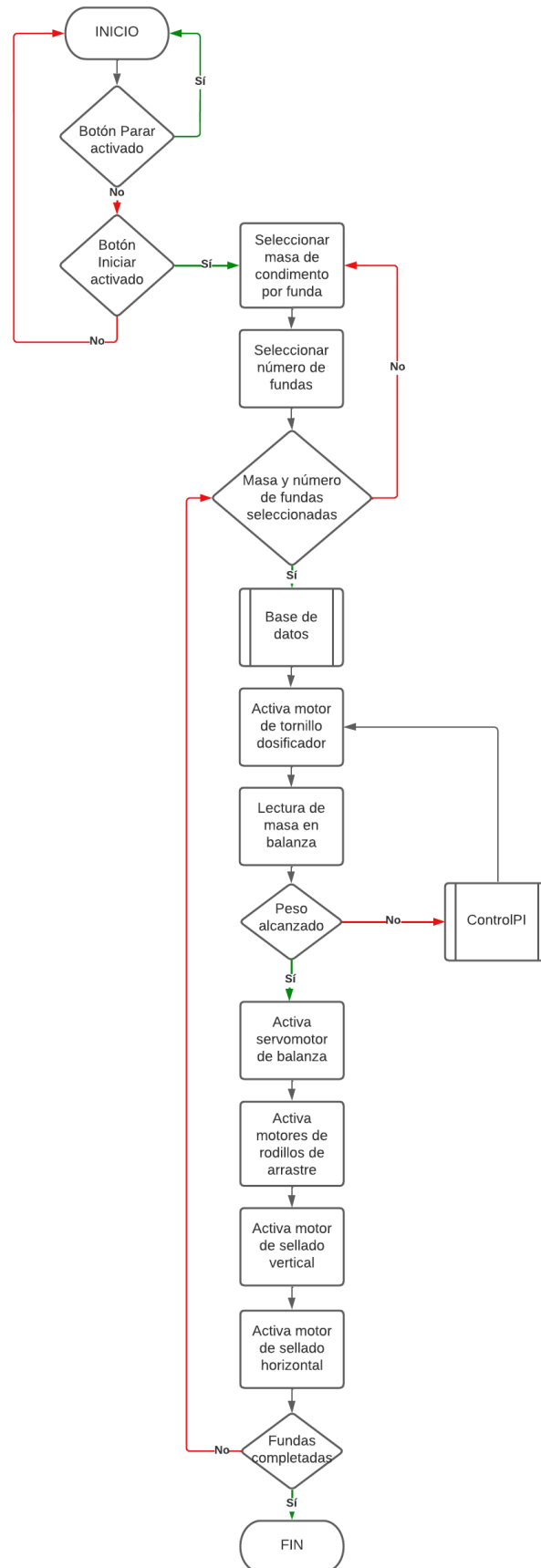
En esta sección se busca explicar la programación realizada para el proceso general, el HMI y la base de datos. Lo que se busca lograr es que cuando la máquina este encendida el HMI brinde al usuario una pantalla que le permita ingresar los parámetros de producción como son la masa, número de fundas y el condimento seleccionado. Una vez que inicie el proceso se registra en la base de datos los valores seleccionados más la fecha y hora en la que empezó el proceso. Además, existe una pantalla donde se puede ver en que parte del proceso se encuentra el programa.

#### **Selección del Lenguaje de Programación**

Al trabajar con el Raspberry se puede utilizar Java, Python o C++ como lenguajes de programación. Por la variedad de librerías para trabajar con el módulo HX711 y para crear entornos gráficos, se elige el software Python 3.7.

#### **Programación del proceso**

La programación del proceso está diseñada para que se ejecute de manera secuencial y repetitiva, completando las tareas de dosificación en orden y de forma automatizada. En la Figura 60 se presenta un diagrama de flujo de las actividades que el microcontrolador realiza para cumplir con la producción de fundas de condimento.



**Figura 60:** Diagrama de flujo para el control de la máquina

El proceso inicia cuando se presiona el botón del HMI de inicio y todos los parámetros

como masa, número de fundas y tipo de condimento se han elegido. Luego el dosificador entrega la cantidad de condimento seleccionada lo cual es verificado por la balanza, una vez que la balanza comprueba que la masa es la correcta se abre con el servomotor. Se pasa por último al proceso de sellado vertical y horizontal.

Todo esto se repite hasta que se fabriquen el número de fundas seleccionadas o hasta que en el HMI se active el botón de paro.

## Diseño HMI

El desarrollo del GUI que se proyectará en la pantalla y se programa en Python con la librería Pysimplegui. El GUI se divide en 3 pantallas principales:

La primera donde se puede ingresar la masa deseada y el número de fundas a fabricar por la máquina. Además de botones de inicio y alto del proceso con indicadores en pantalla, estos muestran si la máquina esta en funcionamiento. La pantalla puede ser visualizada en la Figura 61.



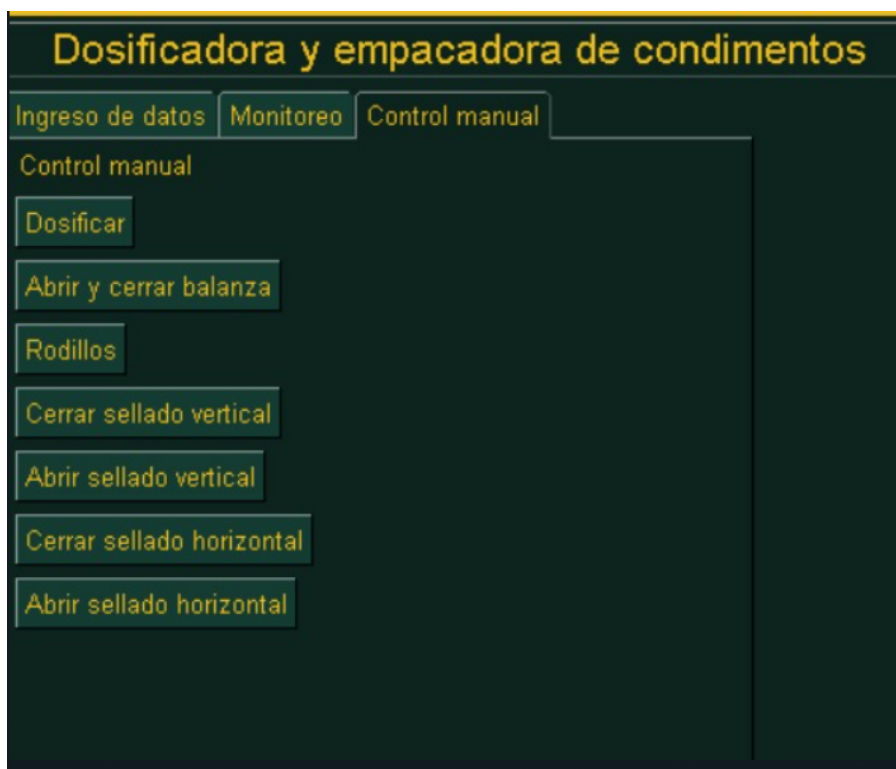
**Figura 61:** Pantalla 1 del GUI del prototipo

La segunda pantalla para el de monitoreo del proceso, donde se puede observar un imagen dependiendo de la parte en la que se encuentra el proceso, además, cuenta con una barra de progreso de la masa dosificada. La pantalla se puede ver en la Figura 62.



**Figura 62:** Pantalla 2 del GUI del prototipo

Por último, existe una pantalla de control manual, donde se muestra una serie de botones para controlar cada parte de la máquina de forma separada como se muestra en la Figura 63.



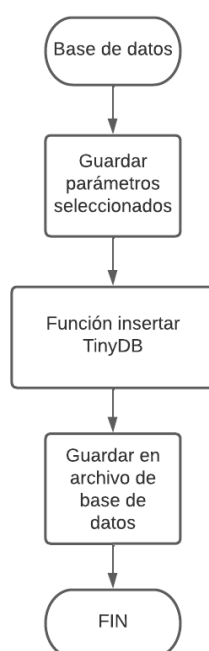
**Figura 63:** Pantalla 3 del GUI del prototipo

## Programación Base de Datos

Se busca crear una base de datos donde se almacenen la masa, número de fundas y condimento de cada proceso que realice la máquina, que incluirá la fecha y hora en que se llevó a cabo el proceso de dosificación y empaquetado de un determinado condimento en polvo. Una de las mejores alternativas al momento de trabajar con prototipos controlados por Raspberry y Python es TinyDB, es una base de datos que utiliza pocos recursos y esta orientada, optimizada y escrita en Python. Además, no tiene dependencias de librerías externas. Esta pensada para aplicaciones pequeñas donde la aplicación de un servidor de base de datos externo sería innecesaria.

Considerando que aplicar una base de datos SQL requiere de la adquisición de servidores externos, se necesita de programas de conexión entre Python y Mysql, y que en este caso solo se debe guardar datos específicos de un solo proceso, esta librería es la mejor alternativa.

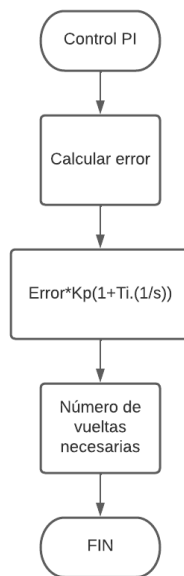
Dentro del programa principal los datos se guardan cada vez que el botón de iniciar proceso se activa, y los datos seleccionados en el HMI se guardan. Un diagrama del proceso se muestra en la Figura 64.



**Figura 64:** Diagrama de flujo para base de datos

## Control

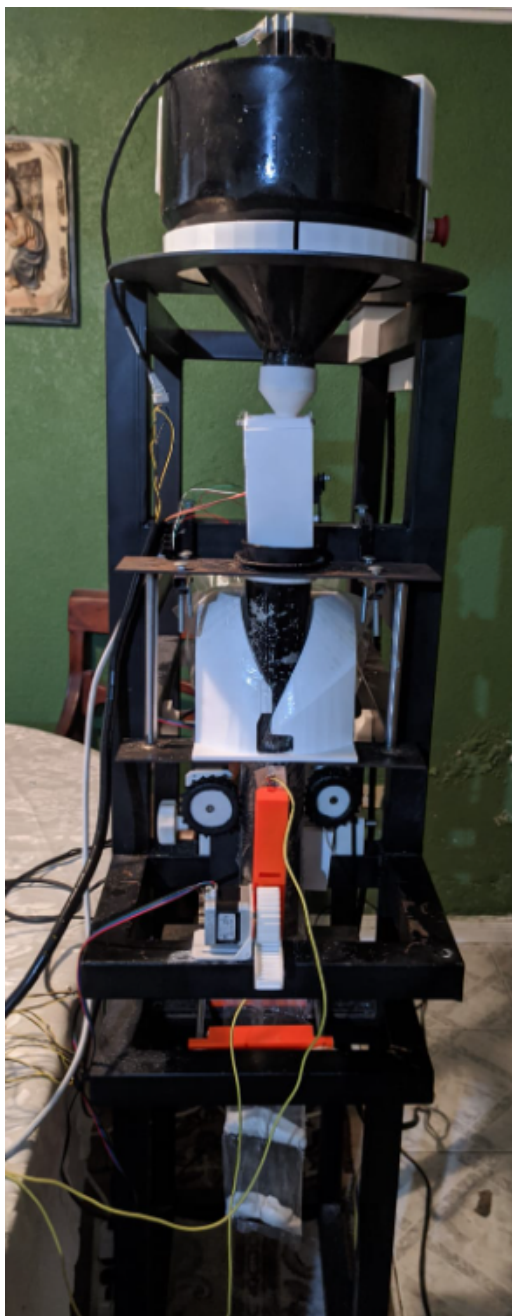
El control se lo realiza después de que el tornillo dosificador haya terminado su proceso y la balanza haya medido la masa. Se resta del valor esperado el valor medido y se obtiene el error que es multiplicado por la función de control PI calculada anteriormente, el resultado de esta muestra cuantos segundos más debe dosificar el tornillo para llegar al valor de masa deseado. Un diagrama del proceso se muestra en la Figura 65.



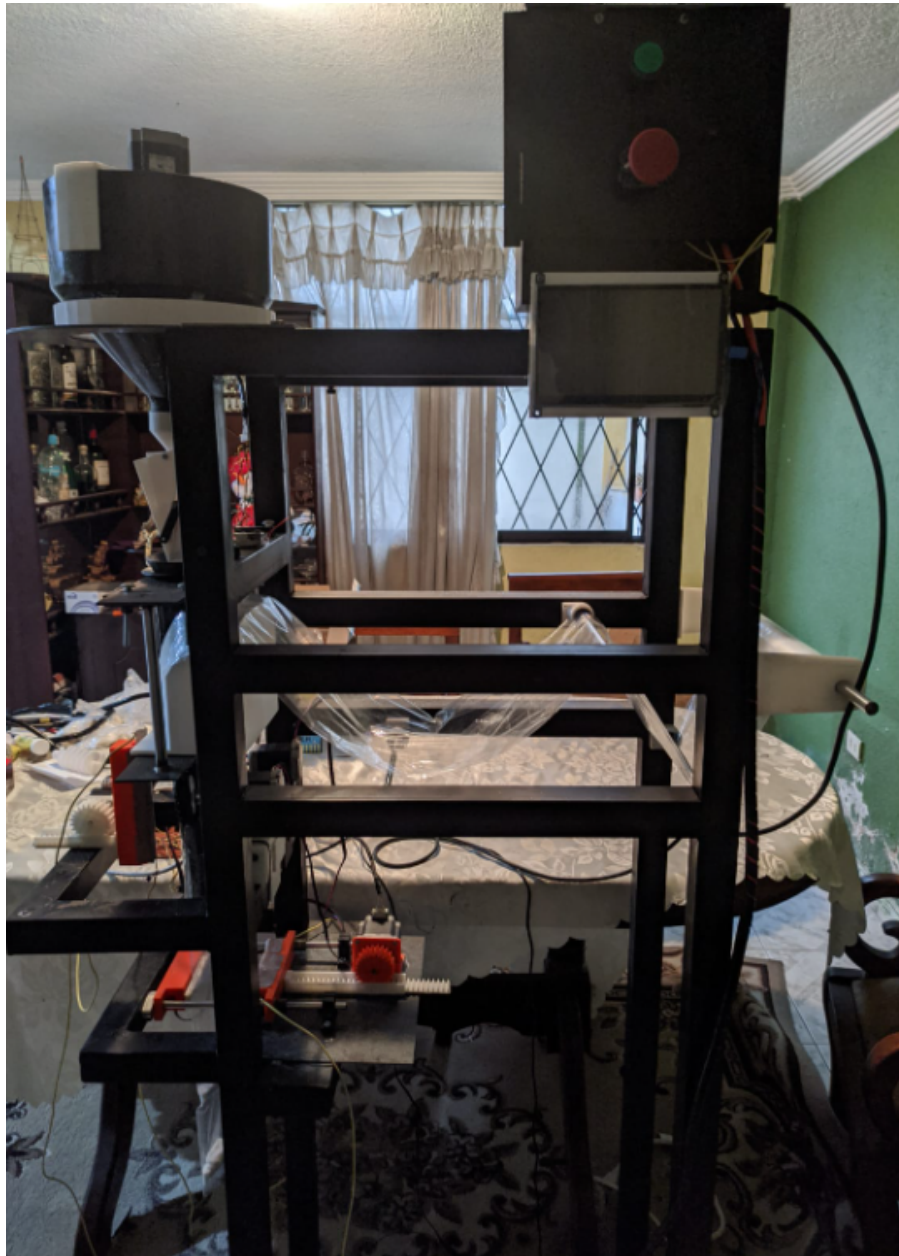
**Figura 65:** Diagrama de flujo para control PI

## 8. Construcción del Prototipo

Para poder construir el prototipo, teniendo en cuenta limitaciones económicas que se presentan, se realizan las piezas en acero negro A32, en vez de acero inoxidable. Además, las mordazas de sellado deben estar hechas de aluminio y mecanizadas por CNC, en vez de esto se imprimen en PETG y se utilizan niquelinas de selladoras manuales para el sellado. Con estas aclaraciones se reúnen los componentes mecánicos y eléctricos, los cuales se ensamblaron e integraron en la estructura principal utilizando pernos, tornillos y técnicas de soldadura. Una vez colocados todos los componentes, se probó la funcionalidad de los mecanismos y se realizaron los ajustes necesarios. Finalmente, el prototipo fue pulido y terminado con pintura para protegerlo de la oxidación. El prototipo se muestra en la Figura 66 y en la Figura 67.



**Figura 66:** Prototipo final vista frontal



**Figura 67:** Prototipo final vista lateral

## **9. Pruebas y Resultados de Funcionamiento**

En este capítulo, una vez construida la máquina con todos los elementos mecánicos y electrónicos, se verificará el correcto funcionamiento, evaluando el empaquetado, tiempo por funda y masa.



### 9.1. Prueba Sellado

Dado que la calidad del sellado depende de tres condiciones: temperatura, presión y el tiempo, se realiza las pruebas con el objetivo de encontrar un tiempo de acción adecuado de las mordazas ya que la temperatura y presión, que fueron previamente calculadas e implementadas a través de las resistencias y los mecanismos piñón cremallera. En la Tabla 24 se muestra los diferentes tiempos de prueba en que la niquelina caliente entra en contacto con el polietileno y se evaluó la calidad del sellado verificando que el empaquetado de condimento en polvo no presente fugas, es decir que no se abra con facilidad y no se queme el polietileno.

En la Tabla 24 se muestran los resultados de sellado obtenidos dependiendo del tiempo de acción de las mordazas en contacto con el polietileno.

**Tabla 24:** Pruebas sellado

Tiempo(s)	Evaluación	Observaciones
1	Insatisfactorio	No se unieron las capas de polietileno
2	Insatisfactorio	Se unieron las capas de polietileno pero se separan con mucha facilidad y presentan fugas.
3	Satisfactorio	Se unieron las capas de polietileno, presentan una resistencia adecuada y no existen fugas
4	Insatisfactorio	Se unieron las capas de polietileno pero se llego a quemar y se presentan fugas

En la Figura 68 se muestra un sellado insatisfactorio de 2 segundos y en la Figura 69 se muestra un sellado satisfactorio con 3 segundos de contacto.



**Figura 68:** Sellado insatisfactorio 2 segundos



**Figura 69:** Sellado satisfactorio 3 segundos

Con esto se establece que el tiempo adecuado de actuación de las mordazas de sellado es de 3 s.

## **9.2. Prueba Masa**

Para comprobar que la realimentación y el calculo proporcional para la masa, a través de la balanza está funcionando, se mide la masa de 10 fundas de 50 g de cada condimento, como se muestra en la Tabla 25.

**Tabla 25:** Pruebas masa

Funda	Masa azúcar(g)	Masa sal(g)	Masa pimienta(g)
1	51,2	49,2	50,7
2	49,8	50,5	50,1
3	50,5	51,2	49,4
4	50,3	49,2	50,3
5	49,2	50,6	50,1
6	49,3	51	50,9
7	50,1	49,9	50,2
8	51	49,8	50,1
9	50,9	49,2	50,7
10	48,7	50,2	50

El pesaje de una funda de pimienta negra de 50 g se muestra en la Figura 70.



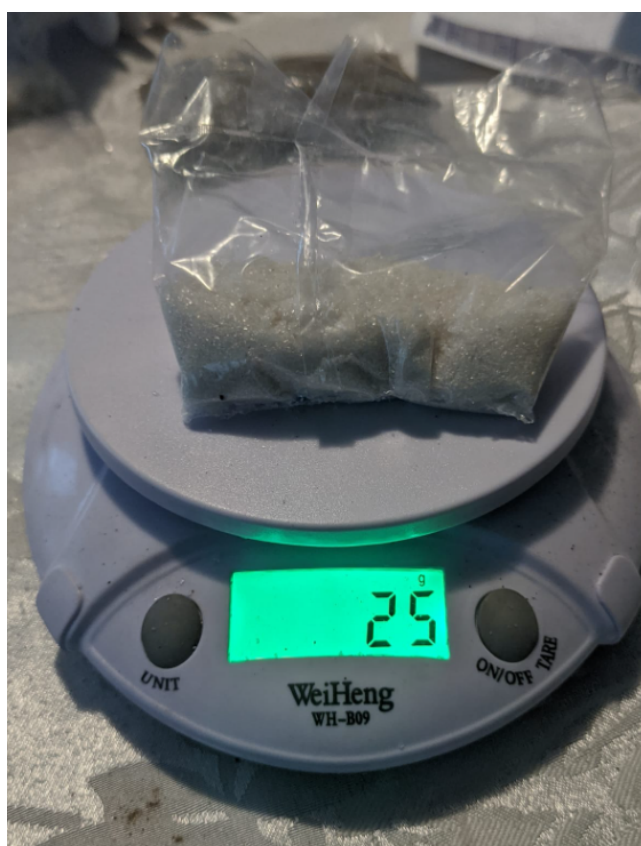
**Figura 70:** Pesaje de funda de pimienta negra de 50 gramos

De igual forma se realizan mediciones para 10 fundas de 25 g de cada condimento, como se muestra en la Tabla 26.

**Tabla 26:** Pruebas masa

Funda	Peso azúcar(g)	Peso sal(g)	Peso pimienta(g)
1	24,2	24,2	24,7
2	24,8	24,5	25
3	25,1	25,1	24,8
4	25,3	25,2	25,2
5	24,9	24,6	25,1
6	25,4	24,8	24,9
7	24,6	25,3	25,2
8	25,3	24,8	24,4
9	25,9	24,2	24,7
10	24,7	24,9	25,4

El pesaje de una funda de azúcar de 25 g se muestra en la Figura 71.

**Figura 71:** Pesaje de funda de azúcar de 25 gramos

Como se puede observar el peso de las fundas esta dentro del rango de tolerancia de  $\pm 2\%$ , por lo que, se concluye que el control con el cálculo proporcional funciona y se cumple el objetivo de producir fundas dentro de la tolerancia de masa.

### 9.3. Prueba tiempo (fundas por hora)

Por último, se busca comprobar que la máquina es capaz de producir 110 fundas de 25 g por hora, para esto se evalúa el tiempo que demoran 10 fundas de cada condimento, tomando en cuenta que para cumplir con el objetivo ninguna funda debería demorar más de 33 s. Los tiempos medidos se muestran en la Tabla 27.

**Tabla 27:** Pruebas tiempo de producción de fundas de 25 g

Funda	Tiempo azúcar(s)	Tiempo sal(s)	Tiempo pimienta(s)
1	32	39	33
2	33	36	32
3	32	34	33
4	31	34	33
5	34	33	32
6	32	34	35
7	32	35	32
8	32	33	33
9	33	33	33
10	34	36	34

Si se toma el promedio de los tiempos que es de 33 s, se logra cumplir con un empaquetado de 110 fundas/hora para el azúcar, sal y pimienta.

### 9.4. Base de datos

Una vez realizadas las pruebas se puede evidenciar la creación de la base de datos creada por TinyDB, y con el documento creado, se utilizan comandos de consulta para evidenciar la utilidad y correcta creación de cada registro como se muestra en la Figura 72, la primera consulta muestra todos los procesos con pimienta negra, la segunda muestra el total de procesos hechos con sal y la última consulta muestra el total de procesos realizados desde la creación de la base de datos.

```

==== RESTART: C:/Users/renol/OneDrive - Universidad Internacional del Ecuador/Escritorio.
>>> db.search(Todo.Condimento == 'Pimienta')
[{'Condimento': 'Pimienta', 'Numfundas': '3', 'Peso': 25, 'Fecha': '29/11/2022 12:05:19'},
 {'Condimento': 'Pimienta', 'Numfundas': '2', 'Peso': 25, 'Fecha': '29/11/2022 12:19:07'}, {'Condimento': 'Pimienta', 'Numfundas': '1', 'Peso': 25, 'Fecha': '01/12/2022 13:17:45'}, {'Condimento': 'Pimienta', 'Numfundas': '2', 'Peso': 25, 'Fecha': '01/12/2022 13:38:49'}, {'Condimento': 'Pimienta', 'Numfundas': '2', 'Peso': 25, 'Fecha': '02/12/2022 08:32:32'}, {'Condimento': 'Pimienta', 'Numfundas': '2', 'Peso': 25, 'Fecha': '02/12/2022 08:32:32'}]
>>> db.count(Todo.Condimento == 'Sal')
40
>>> len(db)
187

```

**Figura 72:** Consulta de procesos

## 10. Análisis de costos

Para determinar el costo total de la producción de la máquina dosificadora y empaquetadora de condimentos, se hace una separación de los gastos en dos categorías: los costos directos y los costos indirectos.

### 10.1. Costos Directos

Los costos directos incluyen los gastos relacionados con la adquisición de materiales, equipos y mano de obra necesarios para la producción de la máquina dosificadora y empaquetadora de condimentos. Los mismos que se describen a continuación en la Tabla 28.

**Tabla 28:** Costos directos

Descripción	Cantidad	Precio(USD)
Motores Nema 17	3	20
Motores Nema 23	2	16
DRV8825	5	4,25
Placa de cobre	2	4
Ácido férrico	2	1,75
Estructura	1	270
Corte laser placas	1	45
Tubo de alimentación	1	10
Rollos PLA	4	23
Raspberry Pi 3B+	1	240
Tolva	1	30
Niquelinas	2	4
Bobina de plástico	1	35
Ejes 8 mm	2	3,25
Rollo PTEG	1	32
Cables	1	5,50
Espadines hembra	4	3,50
Celda de carga	1	5
Módulo HX711	1	5
Pernos	15	0,15
Pulsador paro de emergencia	1	7
Pantalla táctil 7 in	1	150
Horas de armado de la máquina	60	12
Horas de programación	20	20
Horas de diseño mecánico	21	10
Horas de instalación electrónica	26	10
<b>Total</b>		<b>2678</b>

## 10.2. Costos Indirectos

Los costos indirectos se producen por el traslado en la ciudad para la adquisición de partes, componentes electrónicos e información, también por el traslado de la estructura, y por inconvenientes durante la construcción e instalación del prototipo. Estos valores suman un aproximado de 120 USD.



### 10.3. Costo Total

La suma de costos directos e indirectos dan un total de 2798 USD, considerando que las máquinas industriales de similares características que se encuentran a la venta se comercializan a un valor aproximado de 6200 USD, como es el caso de la empacadora EM-A4DP Duqpacking [53], una comparación general se muestra en la Tabla 29.

**Tabla 29:** Comparativa EM-A4DP vs Prototipo Construido

EM-A4DP	Prototipo Construido
Automática	Automática
Acero inoxidable	Acero Negro
220 V	110 V
Azúcar, Maíz, Lenteja	Azúcar, Pimienta, sal
480 fundas/hora	110 fundas/hora
220 V	110 V
Dosificación volumétrica	Dosificación tornillo sin fin
2-200 g	25-50 g
No cuenta con base de datos	Base de datos
Pantalla LCD	HMI

Se puede decir que la máquina brinda una alternativa atractiva económicamente y que cumple con los estándares mínimos para pequeños y medianos productores.

## 11. Conclusiones

- El prototipo se desarrollo en base a normativas y mecanismos existentes para la dosificación y sellado de productos granulares.
- Se diseñaron y dimensionaron los componentes mecánicos, electrónicos y de control para el ensamblaje y posterior funcionamiento del prototipo.
- Se diseñó un HMI con 3 pantallas para ingreso de datos, monitoreo y control manual de la máquina.

- Se implementó una base de datos que guarda la fecha, hora, condimento y número de fundas producidas.
- Se desarrolló un control PI para el sistema de dosificación y pesaje a nivel de simulación. Y se implementó una retroalimentación de la balanza en conjunto con un calculo proporcional para realizar el control del peso dosificado.
- Se construyó un prototipo de una máquina dosificador y empacadora de condimentos en polvo, cuyas dimensiones son dimensiones 1,79 . 0,86 m, y permite empaquetar 110 fundas por hora de sal, azúcar y pimienta.
- Para que la construcción del prototipo fuera posible, debido a limitaciones económicas, se utilizó acero galvanizado en vez de acero inoxidable, además de utilizar niquelinas de selladora en lugar de mordazas de aluminio con resistencias tipo cartucho, por esto el prototipo no puede ser utilizado para productos de venta al público.
- Se realizaron pruebas de funcionamiento para comprobar un sellado adecuado de las fundas, donde se encontró que el tiempo de contacto entre la niquelina y el polietileno para un sellado satisfactorio es de 3 segundos, y pruebas para comprobar el correcto dosificado de los condimentos, donde tomando el peso promedio de fundas de 50 y 25 g la masa por funda esta dentro del rango de  $\pm 2\%$ .
- Se logró una la tasa de empaquetado de 110 fundas por hora, con una velocidad promedio por funda de 33 s para fundas de 25 g.

## 12. Recomendaciones

- Por tratarse de alimentos es necesario las consideraciones de la higiene que se debe mantener tanto en la máquina como en el ambiente a trabajar.
- Dependiendo del calibre de polietileno utilizado se deberá ajustar el tiempo de sellado.
- Cada vez que la máquina se mueva de lugar se debe realizar un proceso de calibración de la balanza.

- Al recargar el rollo de polietileno se debería correr un ciclo de sellado de la máquina sin condimento en la tolva para lograr el primer sellado horizontal.
- Si la luz piloto verde se encuentra encendida y la máquina esta en funcionamiento se debe tener precaución con las mordazas y no manipularlas.
- Para lograr que la máquina sea utilizable en el ambiente industrial se requiere que todos los elementos que estén en contacto con los condimentos sean de acero inoxidable, además de que las mordazas deben estar hechas de aluminio y tener las resistencias tipo cartucho diseñadas.
- Antes de utilizar el prototipo por primera vez se debe leer el manual de usuario del mismo, donde se detallan los pasos a seguir para un correcto funcionamiento.
- Para mejorar el sistema de dosificación se puede discretizar el controlador diseñado y aplicarlo al prototipo.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. H. P. FAJARDO and H. D. SÁNCHEZ, “Diseño, Modelamiento Y Simulación De Máquina Dosificadora De Alimento Granulado Para Animales,” p. 146, 2006.
- [2] E. Pruna, “Diseño e implementación de un sistema de clasificación y empaquetado automático de helados para una micro empresa mediante inteligencia artificial,” pp. 1–133, 2018.
- [3] G. Fopadi, “Solución para dosificar tus productos.”
- [4] Acrison, “Dosificadores Gravimétricos,” 2022.
- [5] Equiper SL, “Dosificador gravimétrico Plastic Systems DGB - Plástico y Caucho - Dosificador gravimétrico.”
- [6] Acrison, “Dosificadores Volumétricos,” 2021.
- [7] Span SL, “Dosificador Volumétrico - Maquinaria de envasado.”
- [8] OPTIMA, “Dosificadores de tornillo sinfín de OPTIMA para el llenado estéril y no estéril,” 2022.
- [9] KINCON, “Envasadora vertical | Dosificador de tornillo | Kincon.”
- [10] Coara, “DOSIFICADOR POR PESO 1 BALANZAS,” 2022.
- [11] Plydispensing, “Dosificadores de tiempo/presión,” 2022.
- [12] Polydispensing, “Dosificadores de tiempo/presión - Poly Dispensing.”
- [13] V. Marcela, ““DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA MÁQUINA ENFUNDADORA DE CHOCOLATE CON CONTROL EN LA DOSIFICACIÓN DEL PESO PARA LA EMPRESA KEICOS,” *Innovacion para la Exelencia*, pp. 1–80, 2021.
- [14] RYUSAC, “Selladora de Bolsas de Pedal PFS-DD400 - RYU • RYUSAC.”
- [15] Peruselladoras, “selladora de mordaza importada.”
- [16] Vtps, “Máquinas envasadoras de forma, llenado y sellado vertical | VTOPS-VFFS.”

- [17] Z. Jessica, “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA AUTOMÁTICA PARA EL PESAJE Y SELLADO DE FUNDAS DE HARINA DESDE 0.5 HASTA 2 LIBRAS, CON SUPERVISIÓN REMOTA PARA EL COMERCIAL JACQUELINE, UBICADO EN LA CIUDAD DE AMBATO,” 2019.
- [18] Bortopack, “Balanza Multicabezal.”
- [19] P. L. Molina, “Dosificador Llenadora por Peso Empaquetadora Control Peso Proceso Básculas Balanzas Electronicas,” 2019.
- [20] Flluideco, “¿Qué aportan los sistemas de dosificación a la industria alimentaria? - Fluideco.”
- [21] M. Honarpour and Koederitzr, “Bulk Density and Tapped Density of Powders,” *World health organization*, vol. XXXIII, no. 2, pp. 81–87, 2012.
- [22] August Mink, “La nueva generación de los rodillos despleadores - Plástico.”
- [23] SYNDA, “VFFS 600 | VFFS Machine | VFFS Packaging Machine | Synda Pack.”
- [24] Everplast, “Máquina de unidad de arrastre de rodillos - COMERCIAL ANDEXPORT.”
- [25] AmcorPackaging, “VFFS Continuous Motion Machine - Food Service Packaging Equipment,” 2020.
- [26] SUMITEC, “ACERO ESTRUCTURAL A36.”
- [27] R. L. Mott, *Diseño de Elementos de Máquinas*. 2006.
- [28] I. M. A. B. RAMÍREZ, *SISTEMA MILIDOSIFICADOR DE POLVOS: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN*. PhD thesis, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, 2010.
- [29] Vtops Machinery, “Some Problems You Will Meet When Picking an Auger Filler.”
- [30] Hermenegildo Rodriguez Gabarro, “Cálculo de Transportadores de Tornillo Sin Fin.”
- [31] K. J. BUDYNAS, RICHARD G. NISBETT, “Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley,” *Igarss 2014*, no. 1, pp. 1–5, 2014.

- [32] DIPAC, “Tubo Estructural Cuadrado Negro.”
- [33] PATENTADOS, “Hombro formador y dispositivo para la fabricación de bolsas. . .,” 2014.
- [34] A. Villalba Márquez, “Escuela politecnica nacional,” p. 167, 2010.
- [35] Rodalsa, “ENGRANAJES DE MÓDULO DIENTE RECTO.”
- [36] Apex Dynamics, “Calculate a rack and pinion drive, how do you do that?.”
- [37] J. Carvajal, “*DISEÑO DE UNA MÁQUINA AUTOMÁTICA PARA LA FABRICACIÓN DE RESORTES HELICOIDALES DE COMPRESIÓN Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE ENROLLADO PARA LA EMPRESA VYMSA*”. PhD thesis, ESPE, 2005.
- [38] Hattersley Lucy, “Raspberry Pi 3B+ Specs and Benchmarks — The MagPi magazine,” 2021.
- [39] Javier Pastor, “Raspberry Pi 3 B+, análisis: review con características, precio y especificaciones,” 2019.
- [40] Inductiveautomation, “What is HMI? | Inductive Automation,” 2018.
- [41] ExpTech, “Waveshare 7 Inch HDMI LCD 1024×600 mit IPS kapazitivem Touchscreen für Raspberry Pi | EXP Tech.”
- [42] Pololu, “Pololu - DRV8825 Stepper Motor Driver Carrier, High Current,” 2019.
- [43] Eletrogate, “Driver Motor de Passo DRV8825 - Eletrogate | Robótica, IoT, Apostilas e Kits.”
- [44] H. Pincay and O. Tigrera, “Diseño Y Construcción De Báscula De Pesaje Dinámico Para Dosificación De Materia Sólida,” pp. 1–174, 2013.
- [45] Omega MX, “Celdas de carga.”
- [46] Naylampmechatronics, “Módulo HX711 Transmisor de celda de carga.”
- [47] All Top Notch, “HX711 Digital Weight Pressure Sensor Module | All Top Notch.”

- [48] Togeis, "Printer Spool Scale (HX711) por togeis | Descargar modelo STL gratuito | Printables.com."
- [49] Autonics, "Botón pulsador de parada de emergencia - SF2ER Series - Autonics."
- [50] Improselec, "LUZ PILOTO VERDE CAMSCO 22MM."
- [51] MISUMI, "Cartridge heaters - overview."
- [52] S. Castaño, " Todo sobre Ziegler Nichols - Sintonia de Control PID," 2020.
- [53] Duqpacking, "Sacheteadora Empacadora Envasadora Dosificadora Granos Polvo | MercadoLibre."