



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Rediseño y automatización de sistemas que conforman el proceso de empaque de alimentos con diseño e implementación de sistema de conformado de bolsas plásticas para máquina dosificadora

Pacheco Díaz, Bryan Paúl y Santillán Figueroa, Jerinthon David

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica

Msc. Tapia Zurita, Melton Edmundo

21 de noviembre del 2022



Tesis_Pacheco_Santillan.pdf

Scanned on: 20:40 November 22, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	67
Words with Minor Changes	36
Paraphrased Words	56
Omitted Words	0





Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: **"Rediseño y automatización de sistemas que conforman el proceso de empaque de alimentos con diseño e implementación de sistema de conformado de bolsas plásticas para máquina dosificadora"** fue realizado por los señores **Pacheco Díaz, Bryan Paúl y Santillán Figueroa, Jerinthon David**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 21 de noviembre del 2022

Firma:



Firmado electrónicamente por:
**MELTON
EDMUNDO TAPIA
ZURITA**

.....
Msc. Tapia Zurita, Melton Edmundo

C. C: 1708863954



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Pacheco Díaz, Bryan Paúl** con cédula de ciudadanía n° 1725123549, y **Santillán Figueroa, Jerinthon David** con cédula de ciudadanía n° 1725056319, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Rediseño y automatización de sistemas que conforman el proceso de empaque de alimentos con diseño e implementación de sistema de conformado de bolsas plásticas para máquina dosificadora** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 21 de noviembre del 2022

Firma

Pacheco Díaz, Bryan Paúl

C.C.: 1725123549

Santillán Figueroa, Jerinthon David

C.C.: 1725056319



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Autorización de Publicación

Nosotros, **Pacheco Díaz, Bryan Paúl** con cédula de ciudadanía n° 1725123549, y **Santillán Figueroa, Jerinthon David** con cédula de ciudadanía n° 1725056319, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Rediseño y automatización de sistemas que conforman el proceso de empaque de alimentos con diseño e implementación de sistema de conformado de bolsas plásticas para máquina dosificadora** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 21 de noviembre del 2022

Firma

Pacheco Díaz, Bryan Paúl

C.C.: 1725123549

Santillán Figueroa, Jerinthon David

C.C.: 1725056319

Dedicatoria

Bryan

Dedico este trabajo a mis padres Heraldo y Apolonia, a mis hermanos Fabricio y Silvana quienes han sido fundamentales durante toda mi vida, apoyándome en todo momento, y brindándome su amor y confianza.

Jerinthon

Este trabajo va dedicado a toda mi familia que siempre me apoyó en cada etapa de mi vida, especialmente a mis padres por brindarme la oportunidad de conseguir mis metas y haber depositado su confianza en mí.

Agradecimiento

Bryan

Agradezco a mis padres por el apoyo brindado durante toda mi vida, por sus consejos y por haberme inculcado valores de responsabilidad, respeto y dedicación.

A mis hermanos que han sido mi ejemplo a seguir, por sus enseñanzas, y por su apoyo incondicional en todo momento.

A mi compañero de tesis y a mi tutor quien nos brindó apoyo para concluir el trabajo.

Jerinthon

Agradezco a todos los seres que me apoyaron durante el trayecto para llegar a cumplir esta meta, especialmente a mi familia que siempre estuvieron como soporte para seguir.

Un agradecimiento especial a mi madre y a mi padre que me motivaron y guiaron en todo momento.

A mi tutor por haber habernos acogido y depositado su confianza en las capacidades de mi compañero y mías, al igual que agradezco a mi compañero.

Índice de Contenido

Reporte de verificación de contenido	2
Certificación	3
Responsabilidad de Autoría	4
Autorización de Publicación	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento	7
Índice de Contenido	8
Índice de Tablas.....	12
Índice de Figuras	14
Resumen	18
Abstract.....	19
CAPÍTULO I	20
Introducción	20
Antecedentes	20
Subsistema de alimentación y dosificación	22
Subsistema de sellado y corte.....	23
Subsistema de arrastre de manga plástica.....	24
Subsistema de control.....	24
Descripción del proyecto	24
Subsistema de alimentación y dosificación	27
Subsistema de arrastre de manga plástica.....	27

Subsistema de sellado y corte.....	28
Subsistema de automatización y control	29
Justificación.....	29
Definición del alcance.....	30
Componentes mecánicos.....	32
Componentes neumáticos.....	33
Componentes eléctricos y electrónicos	33
Componentes de automatización y control.....	33
Objetivos	36
Objetivo general	36
Objetivos específicos	36
CAPÍTULO II.....	37
Fundamentación teórica.....	37
Empacado	37
Introducción	37
Definición de empaçado.....	38
Empacadoras industriales	39
Procesos de máquinas empacadoras	42
Productos y materiales de empaque.....	53
Productos para empacar	53
Material de empaque	54

	10
CAPÍTULO III	64
Diseño y construcción	64
Generación de conceptos	64
Definición de subsistemas del proyecto	66
Concepto del conformado de la funda (Us22)	68
Concepto del sello horizontal (Us31).....	74
Concepto del arrastre de la funda (Us24).....	78
Diseño del sistema mecánico	82
Subsistema de dosificación (Us12)	82
Subsistema de sello y corte horizontal (Us23).....	85
Subsistema de arrastre de la funda (Us22)	89
Diseño del sistema eléctrico y electrónico (Us41).....	100
Selección del controlador	100
Sistema eléctrico y electrónico para el subsistema de dosificación	105
Sistema eléctrico y electrónico para el subsistema de sello y corte.....	109
Sistema eléctrico y electrónico para el subsistema de arrastre	111
Tablero eléctrico	115
Diseño del sistema de control (Us42)	119
Integración de sistemas	119
Modos de operación.....	121
Programación estructurada	121

Interfaz Hombre-Máquina (HMI).....	124
CAPÍTULO IV	129
Pruebas y resultados	129
Subsistema de alimentación y dosificación (Us1)	129
Experimento 1 – Exactitud y precisión.....	130
Experimento 2 y 3 – Linealidad y repetibilidad	133
Experimento 3.1 – Relación Volumen/Peso	135
Subsistema de arrastre (Us2).....	137
Experimento para validación de arrastre	139
Subsistema de sello y corte (Us3)	140
Experimento 1: Mordaza – Calibre 1.25	144
Experimento 2: Mordaza – Calibre 4	145
Experimento 3: Por impulso – Calibre 1.25	147
CAPÍTULO V	151
Conclusiones y recomendaciones.....	151
Conclusiones.....	151
Recomendaciones.....	153
Bibliografía.....	155

Índice de Tablas

Tabla 1	<i>Tabla de calibres en el mercado.....</i>	58
Tabla 2	<i>Ejemplo de datos para la selección de bolsa.....</i>	62
Tabla 3	<i>Requerimientos de la máquina empacadora de la empresa PROSERMEC.....</i>	64
Tabla 4	<i>Tabla de diseño de dimensiones de la bolsa.....</i>	69
Tabla 5	<i>Evaluación del concepto. Conformado de la funda.....</i>	74
Tabla 6	<i>Evaluación del concepto. Sello horizontal.....</i>	78
Tabla 7	<i>Evaluación del concepto. Subsistema de arrastre.....</i>	82
Tabla 8	<i>Evaluación de alternativas para el controlador de la máquina empacadora.....</i>	101
Tabla 9	<i>Características del PLC Siemens S7-1200.....</i>	102
Tabla 10	<i>Características del PLC Xinje XD3-24RT-E.....</i>	102
Tabla 11	<i>Evaluación de alternativas de PLC.....</i>	103
Tabla 12	<i>Entradas del PLC.....</i>	104
Tabla 13	<i>Salidas del PLC.....</i>	104
Tabla 14	<i>Características de la electroválvula.....</i>	110
Tabla 15	<i>Evaluación de alternativas para el motor del subsistema de arrastre.....</i>	114
Tabla 16	<i>Directrices e implementación de guía GEDIS en la interfaz.....</i>	126
Tabla 17	<i>Experimentos del subsistema de dosificación.....</i>	130
Tabla 18	<i>Datos obtenidos de pesos del maíz.....</i>	131
Tabla 19	<i>Datos obtenidos de peso de diferentes granos.....</i>	134
Tabla 20	<i>Alturas obtenidas para el sistema de arrastre.....</i>	138
Tabla 21	<i>Datos obtenidos de alturas de bolsas.....</i>	139
Tabla 22	<i>Tabla de factores y niveles para el diseño experimental.....</i>	143
Tabla 23	<i>Descripción de experimentos para el sistema de sellado.....</i>	143
Tabla 24	<i>Codificación del experimento 1.....</i>	144
Tabla 25	<i>Resultados numéricos del experimento 1.....</i>	144

Tabla 26 <i>Codificación del experimento 2</i>	146
Tabla 27 <i>Resultados numéricos del experimento 2</i>	146
Tabla 28 <i>Codificación del experimento 3</i>	148
Tabla 29 <i>Resultados numéricos del experimento 3</i>	148

Índice de Figuras

Figura 1 <i>Estado inicial de la máquina empaquetadora de alimentos</i>	21
Figura 2 <i>Diagrama del estado inicial de la máquina para sello y corte de empaques</i>	22
Figura 3 <i>Diagrama propuesta solución inicial</i>	26
Figura 4 <i>Etapa de alimentación y dosificación</i>	27
Figura 5 <i>Etapa de arrastre de manga plástica bolsas</i>	28
Figura 6 <i>Etapa de sellado y corte</i>	29
Figura 7 <i>Proyección de máquina empaquetadora</i>	31
Figura 8 <i>Estado inicial del sistema de dosificación</i>	32
Figura 9 <i>Resumen del alcance del proyecto</i>	35
Figura 10 <i>Operaciones básicas de una máquina VFFS</i>	41
Figura 11 <i>Operaciones básicas de una máquina HFFS</i>	42
Figura 12 <i>Dosificación por vasos volumétricos</i>	43
Figura 13 <i>Dosificación multicabezal por peso</i>	44
Figura 14 <i>Cuello formador</i>	46
Figura 15 <i>Cono formador</i>	47
Figura 16 <i>Empacado con manga plástica</i>	48
Figura 17 <i>Sellado por medio de mordaza transversal</i>	49
Figura 18 <i>Máquina de sellado por impulso</i>	50
Figura 19 <i>Relación entre la fuerza de arrastre y la rigidez del material</i>	51
Figura 20 <i>Sistema de arrastre por bandas</i>	52
Figura 21 <i>Sistema de arrastre por rodillos</i>	53
Figura 22 <i>Curva de sellado de empaques</i>	56
Figura 23 <i>Tipos de bolsas plásticas</i>	61
Figura 24 <i>Dimensiones referenciales de bolsa</i>	63
Figura 25 <i>Clasificación de subsistemas del proyecto</i>	67

Figura 26 <i>Diagrama funcional del proceso del proyecto</i>	68
Figura 27 <i>Cuello formador para conformado de fundas</i>	70
Figura 28 <i>Recorrido de la lámina plástica por el cuello formador</i>	71
Figura 29 <i>Cono formador para conformado de fundas</i>	72
Figura 30 <i>Recorrido de la lámina plástica por el cono formador</i>	72
Figura 31 <i>Manga plástica tubular de polietileno</i>	73
Figura 32 <i>Gráfica de temperatura vs tiempo de las mordazas de sellado horizontal</i>	75
Figura 33 <i>Sellado térmico continuo</i>	76
Figura 34 <i>Sellado por impulso eléctrico</i>	77
Figura 35 <i>Arrastre mediante mordazas sellado</i>	79
Figura 36 <i>Arrastre mediante rodillos vulcanizados</i>	80
Figura 37 <i>Arrastre mediante correas de deslizamiento</i>	81
Figura 38 <i>Rediseño del sistema de dosificación</i>	83
Figura 39 <i>Vaso volumétrico con escobillas</i>	84
Figura 40 <i>Espectro de tensiones de la placa inferior del subsistema dosificador</i>	84
Figura 41 <i>Factor de seguridad de la placa inferior del subsistema dosificador</i>	85
Figura 42 <i>Subsistema de sello y corte horizontal</i>	86
Figura 43 <i>Circuito neumático para el sello horizontal y corte</i>	86
Figura 44 <i>Subsistema de sello por impulso</i>	87
Figura 45 <i>Espectro de tensiones (base del sello por impulso)</i>	88
Figura 46 <i>Factor de seguridad (base del sello por impulso)</i>	89
Figura 47 <i>Subsistema de arrastre</i>	90
Figura 48 <i>Fuerza y distancia que intervienen para el cálculo del torque del motor</i>	91
Figura 49 <i>Geometría de las ruedas de neopreno</i>	92
Figura 50 <i>Geometría del eje para el sistema de arrastre</i>	92
Figura 51 <i>Concentrador de esfuerzos para eje redondo aplicando torsión</i>	93

Figura 52 <i>Espectro de tensiones (eje del sistema de arrastre)</i>	94
Figura 53 <i>Factor de seguridad (eje del sistema de arrastre)</i>	95
Figura 54 <i>Estructura del subsistema de arrastre</i>	96
Figura 55 <i>Espectro de tensiones de la estructura del subsistema de arrastre</i>	97
Figura 56 <i>Factor de seguridad de la estructura del subsistema de arrastre</i>	97
Figura 57 <i>Soporte del subsistema de arrastre</i>	98
Figura 58 <i>Espectro de tensiones del soporte del subsistema de arrastre</i>	99
Figura 59 <i>Factor de seguridad del soporte del subsistema de arrastre</i>	99
Figura 60 <i>Circuito de control y potencia del motor AC</i>	105
Figura 61 <i>Relé encapsulado de 8 pines</i>	106
Figura 62 <i>Placa de datos del motor monofásico</i>	106
Figura 63 <i>Contactador tripolar categoría AC3</i>	107
Figura 64 <i>Subsistema de dosificación (sensores, vasos volumétricos)</i>	108
Figura 65 <i>Convertidor reductor (buck)</i>	109
Figura 66 <i>Motor de inducción monofásico</i>	111
Figura 67 <i>Motor a pasos</i>	112
Figura 68 <i>Servomotor</i>	113
Figura 69 <i>Esquema de conexión entre el driver, motor y controlador de la máquina</i>	115
Figura 70 <i>Vista interior del tablero eléctrico</i>	116
Figura 71 <i>Vista exterior del tablero eléctrico</i>	117
Figura 72 <i>Etiquetas en el tablero eléctrico</i>	118
Figura 73 <i>Integración de subsistemas</i>	119
Figura 74 <i>Vista frontal de la máquina empacadora volumétrica</i>	120
Figura 75 <i>Vista isométrica de la máquina empacadora volumétrica</i>	120
Figura 76 <i>GEMMA del proceso de empaquetado volumétrico</i>	121
Figura 77 <i>Jerarquización de grafcet</i>	122

Figura 78 <i>Diagrama de flujo del proceso</i>	123
Figura 79 <i>Esquema general de la metodología de desarrollo de la interfaz</i>	124
Figura 80 <i>Pantallas de interfaz</i>	125
Figura 81 <i>Pantallas desarrolladas en la interfaz</i>	127
Figura 82 <i>Esquema de navegación de la interfaz</i>	128
Figura 83 <i>Variación de nivel de dosificación</i>	131
Figura 84 <i>Histograma de resultados en 3 niveles</i>	132
Figura 85 <i>Gráfica de interpretación de datos</i>	133
Figura 86 <i>Linealidad con diferentes granos</i>	134
Figura 87 <i>Empaques de diferentes granos (maíz, morochillo, haba y arveja)</i>	135
Figura 88 <i>Medidas para muestreo de granos</i>	136
Figura 89 <i>Resultados del volumen de los granos</i>	136
Figura 90 <i>Relación Volumen / Peso de grano según nivel de dosificación</i>	137
Figura 91 <i>Dimensiones para la altura de bolsa</i>	138
Figura 92 <i>Resultados de altura de bolsa</i>	140
Figura 93 <i>Prueba de tracción de sello por mordazas con resistencias eléctricas</i>	141
Figura 94 <i>Prueba de tracción de sello por impulso eléctrico</i>	141
Figura 95 <i>HMI de la máquina universal de ensayos (Datos de fuerza y desplazamiento)</i>	142
Figura 96 <i>Esquema de esfuerzo para sello de bolsa</i>	142
Figura 97 <i>Resultados gráficos del experimento 1</i>	145
Figura 98 <i>Empaques de polietileno calibre 4 mediante sellado por mordazas</i>	146
Figura 99 <i>Resultados gráficos del experimento 2</i>	147
Figura 100 <i>Empaques de polietileno calibre 1.25 mediante sellado por impulso eléctrico</i>	148
Figura 101 <i>Resultados gráficos del experimento 3</i>	149
Figura 102 <i>Comparativa del resultado de todos los experimentos</i>	150

Resumen

En la mayoría de industrias ecuatorianas para el proceso de empaçado de productos alimenticios se emplean máquinas importadas que no siempre cuentan con fiabilidad, garantía, repuestos y soporte técnico, por tal razón, el presente trabajo consiste en el rediseño y automatización de los sistemas que conforman el proceso de empaque de alimentos, según los requerimientos solicitados por la empresa auspiciante como la velocidad de producción, empaques de tipo almohada, uso de distintos tipos de plástico y para granos entre 5 y 25 mm de diámetro. Los subsistemas mecánicos fueron diseñados de tal manera que permitan un fácil ensamble y desensamble de sus componentes, mientras que los subsistemas eléctricos, electrónicos y de control fueron diseñados e implementados para integrar todos los componentes que conforman la máquina empacadora. Además, el sistema cuenta con una HMI y un tablero eléctrico intuitivo de fácil entendimiento para que el operario ponga en marcha el proceso de empaquetamiento. El funcionamiento de la máquina empacadora volumétrica se divide en las siguientes etapas: precalentamiento del subsistema de sello, calibración de altura del dosificador, configuración de parámetro en la HMI, ingreso de producto en la tolva, dosificación, arrastre de la manga plástica, llenado de la bolsa y finalmente sello y corte del empaque. La tasa de producción de la máquina es de 6 empaques por minuto.

Palabras clave: empaques de tipo almohada, polietileno, máquina empacadora, tasa de producción.

Abstract

In most Ecuadorian industries for the process of packaging food products imported machines are used that do not always have reliability, warranty, spare parts and technical support, for this reason, the present work consists of the redesign and automation of the systems that make up the food packaging process, according to the requirements requested by the sponsoring company such as production speed, pillow-type packaging, use of different types of plastic and for grains between 5 and 25 mm in diameter. The mechanical subsystems were designed in such a way that they allow easy assembly and disassembly of their components, while the electrical, electronic and control subsystems were designed and implemented to integrate all the components that make up the packaging machine. In addition, the system has an HMI and an intuitive electrical panel that is easy to understand so that the operator can start the packaging process. The operation of the volumetric packaging machine is divided into the following stages: preheating of the sealing subsystem, height calibration of the doser, parameter configuration on the HMI, product entry into the hopper, dosing, dragging of the plastic sleeve, filling of the bag and finally seal and cut the packaging. The production rate of the machine is 6 packages per minute.

Keywords: pillow-type packaging, polyethylene, packaging machine, production rate.

CAPÍTULO I

Introducción

En el presente capítulo, denominado “Aspectos generales”, se describe los antecedentes, para que el lector se encaje en el contexto del proyecto, una descripción y alcance para que se entienda sobre cómo se va a desarrollar, así como definir los límites impuestos en el proyecto para finalmente presentar los objetivos que se van a cumplir.

Antecedentes

La empresa PROSERMEC tiene como principal actividad el estudio, desarrollo y validación de maquinaria industrial. El objetivo final de esta empresa es tener la maquinaria de toda la línea de producción desde el ingreso de materia prima, pasando por la preparación, limpieza, clasificación, sellado, corte y almacenamiento para obtener un producto final listo para la venta.

Para la línea de empaclado se cuenta con una máquina, la cual al inicio de este proyecto se encontraba en desarrollo, implementado únicamente parte de sus componentes mecánicos; en la Figura 1 se muestra el estado inicial de la máquina mientras que en la Figura 2 un diagrama que muestra dos subsistemas independientes, de los cuatro necesarios para su funcionamiento:

1. Subsistema de alimentación y dosificación. (Implementado parcialmente)
2. Subsistema de sellado y corte.
3. Subsistema de arrastre (No implementado).
4. Subsistema de control (No implementado).

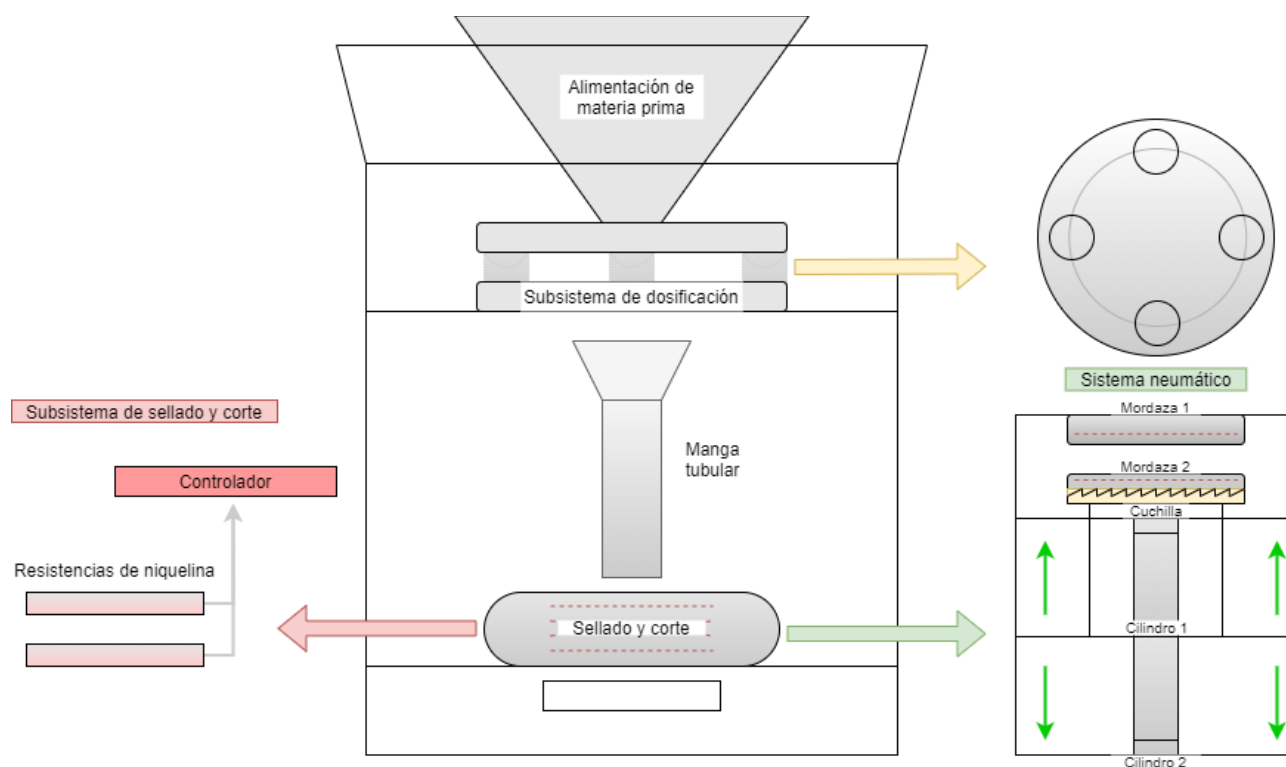
Figura 1

Estado inicial de la máquina empaquetadora de alimentos



Figura 2

Diagrama del estado inicial de la máquina para sello y corte de empaques



Subsistema de alimentación y dosificación

- Función

Se encarga de recibir la materia prima, a través de una tolva, para separarla en proporciones establecidas y enviarlas de manera sincronizada a la etapa de sello y corte.

- Elementos

El subsistema se compone de una tolva, un motorreductor, un juego de poleas y dos platos giratorios para una dosificación mediante vasos volumétricos.

- Estado inicial

El subsistema, es netamente mecánico y cabe recalcar que los platos giratorios para la dosificación por vasos volumétricos tienen defectos de manufactura, tal como se muestra en la Figura 8.

- Problemas que presentó inicialmente

Los defectos de manufactura no permiten una correcta regulación de volumen en los vasos para obtener proporciones iguales.

El subsistema de dosificación presenta dificultad para ensamble y desacople debido a la forma propuesta de los platos giratorios, esto resulta un problema importante ya que para los diferentes alimentos se necesitarán diferentes bandejas que se necesitará cambiar con frecuencia.

Se necesita una integración al control general de la máquina.

Subsistema de sellado y corte

- Función

Encargado de calentar las mordazas por medio de resistencias de niquelina a la temperatura adecuada, para el sello de fundas plásticas. Además, se encarga de cerrar las mordazas mediante cilindros neumáticos hasta que la bolsa llene la cantidad establecida, para posteriormente sellar y cortar las bolsas plásticas.

- Elementos

El subsistema se compone de 4 resistencias de niquelina, controlador PID, termopar tipo K, dos cilindros neumático simple efecto, una electroválvula de 24VDC y una válvula reguladora de caudal.

- Estado inicial

Los componentes del subsistema están funcionando de manera adecuada, sin embargo, no es operativo debido a que no se ha desarrollado el subsistema de control.

- Problemas que presenta

Se requiere un estudio térmico para obtener la temperatura real de las mordazas, para la correcta selección de instrumentación, así como su acondicionamiento.

La organización del cableado del subsistema de sellado y corte no es identificable.

Se necesita una integración al control general de la máquina.

Subsistema de arrastre de manga plástica

- Función

Mediante un mecanismo y fricción este debe arrastrar una manga plástica para que una vez que caiga el alimento este le dé la altura necesaria a la bolsa para que se selle y corte adecuadamente.

- Estado inicial

No se ha diseñado ni implementado.

Subsistema de control

- Función

En una integración de todos los subsistemas, este se encarga de que el proceso de empaquetado se lo lleve a cabo adecuadamente, al mismo tiempo que monitorea, recibe señales de sensores para enviar señales a actuadores de manera sincronizada y lograr un empaquetado de calidad.

- Estado inicial

No se ha diseñado ni implementado.

Descripción del proyecto

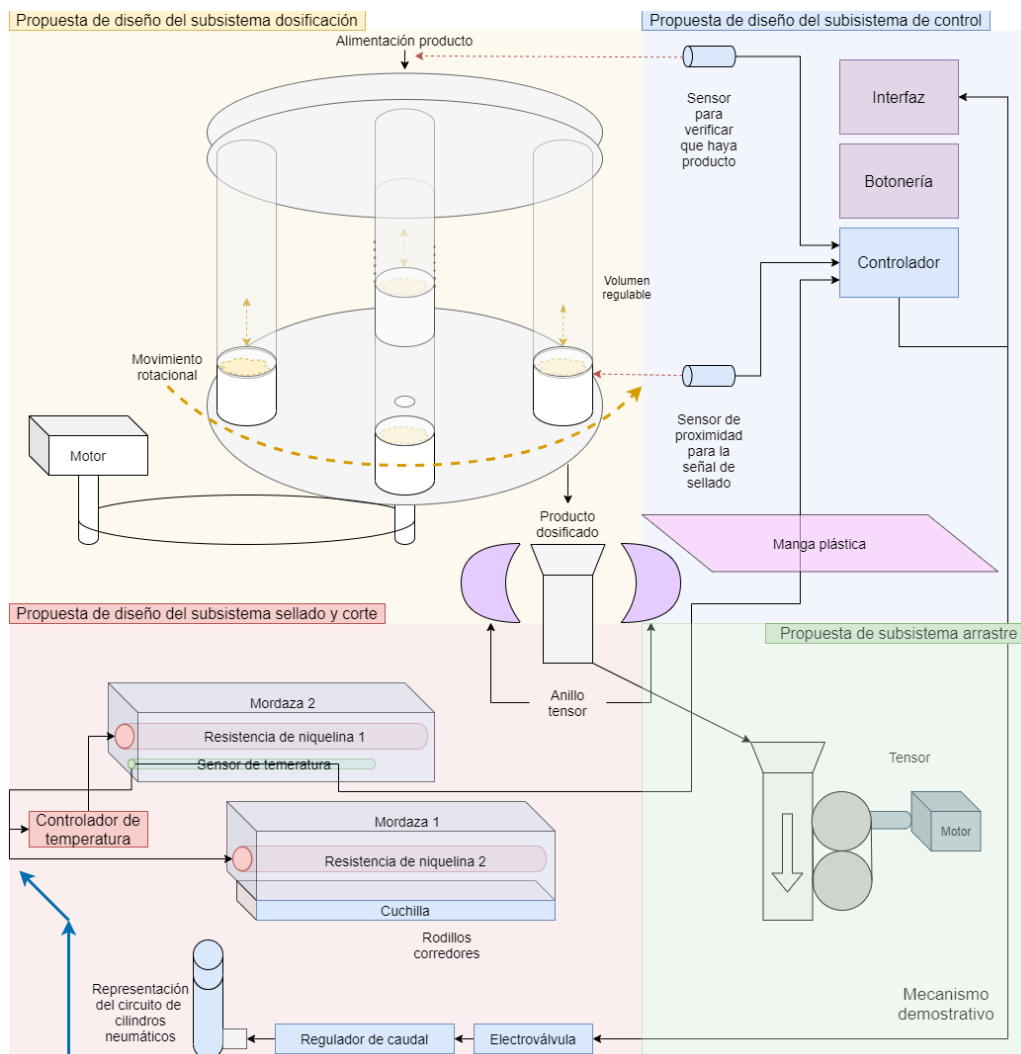
Desde una perspectiva general el presente proyecto consiste en el diseño y construcción de una máquina industrial empaquetadora de granos agrícolas para diferentes pesos, controlados por un proceso de dosificación mecánico.

El proceso al que se plantea llegar es que un operario tenga la posibilidad de calibrar diferentes parámetros mediante una HMI antes de iniciar el empaquetado, es decir, probar cada sensor, actuador, volumen de alimento, alto de bolsa, peso estimado de cada bolsa, número de bolsas a empacar y tiempo de sellado. Cuando tenga todo el sistema preparado se ingresa el alimento en grano por la tolva, este cae al mecanismo de dosificación, previamente configurado para el peso adecuado, en el cual sensores le informarán, tanto al subsistema de sellado y corte como al de arrastre que el alimento va en camino, entonces se realiza un primer sellado y corte de la manga plástica para que el material no se derrame. Posteriormente el sistema de arrastre se acciona para que la manga de plástico avance la altura de bolsa configurada e inmediatamente el alimento cae dentro de la bolsa para finalmente se realice un segundo sello y corte de la bolsa con el alimento dentro, este segundo sello y corte es usado como primer sello y corte de la siguiente bolsa para hacer un sistema continuo. El sistema se detiene cuando el operario de un fin de ciclo o el número de bolsas a empacar previamente configurado se haya completado.

Toda la máquina comprende un solo sistema general encargado de controlar los cuatro subsistemas principales como se muestra en la Figura 3, la cual describe una primera vista de la máquina a desarrollar.

Figura 3

Diagrama propuesta solución inicial

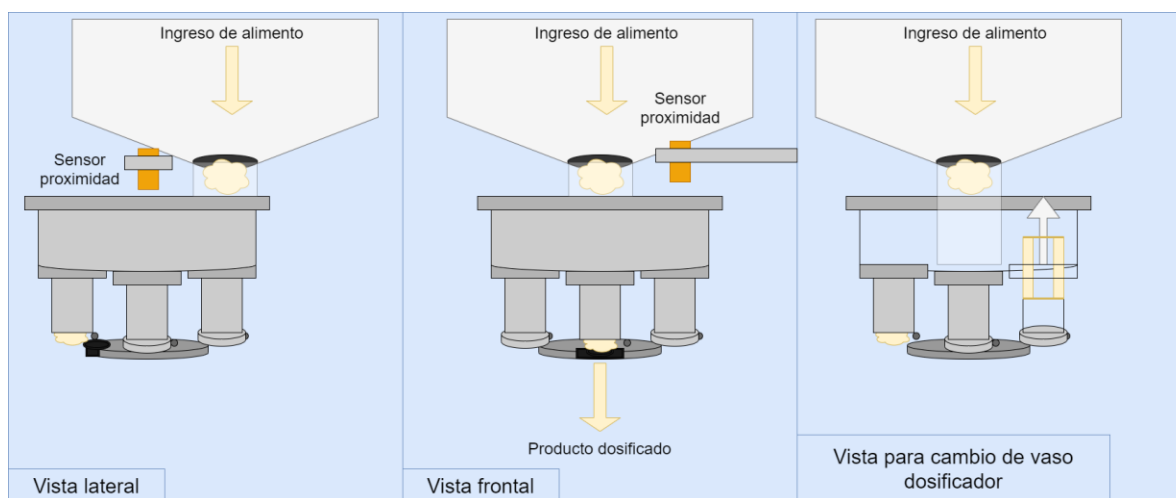


Subsistema de alimentación y dosificación

La primera etapa del proceso consiste en el abastecimiento de alimento a través de una tolva hacia un mecanismo dosificador. Tal como se muestra en la Figura 4 , se plantea que la tolva reciba hasta 50 kg, el cual será retenido por el mecanismo de dosificación hasta que este empiece a girar. Cuando este empiece su proceso con el giro de las bandejas de vasos volumétricos, a través de un sistema mecánico permitirá que se envíe producto dosificado a la siguiente etapa, además se plantea que este detecte en qué vasos hay comida para que en caso que no haya el proceso no continúe.

Figura 4

Etapa de alimentación y dosificación

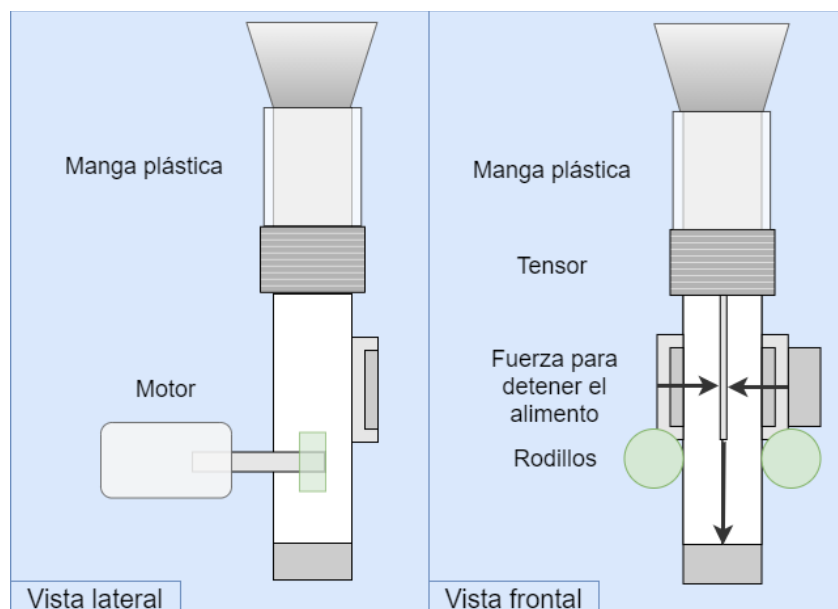


Subsistema de arrastre de manga plástica

Entre los factores a tomar en cuenta para este subsistema se encuentran: tensión del plástico, altura de la bolsa, tiempo de arrastre, tipo de plástico de empaquetado y fuerza para que soporte el peso de la comida dosificada. En la Figura 5 , se muestra un esquema simple de lo que se plantea desarrollar.

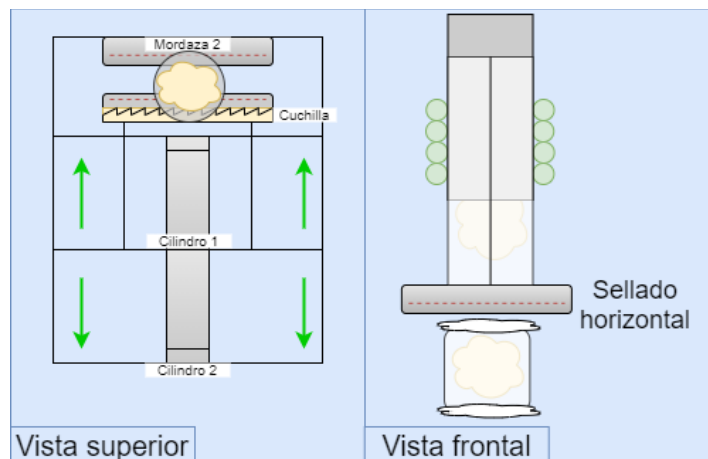
Figura 5

Etapa de arrastre de manga plástica bolsas.



Subsistema de sellado y corte

Esta es la última etapa por la que pasa el alimento, a través de la manga tubular cae el alimento y por medio de los rodillos permite que la bolsa baje para realizar un sellado y corte utilizando un solo juego de cilindros como se muestra en la Figura 6, esta etapa es muy importante ya las pruebas que presentan las normas se basan principalmente en un correcto sello, así que los parámetros de temperatura, tiempo y velocidad deben ser estudiados según el tipo de bolsa plástica que se plantea usar.

Figura 6*Etapa de sellado y corte****Subsistema de automatización y control***

El subsistema de integración de la máquina que controla todos los subsistemas a través de una interfaz HMI y botonería física, desde este se prueba todos los motores, cilindros neumáticos, niuelinas y sensores. Además, se debe poder ingresar parámetros como temperatura, tiempo de sello, velocidad de corte, etc. Toda la información dada, como la que recibida debe ser fácil de entender ante un operario con una simple capacitación.

Justificación

La innovación permite un incremento de productividad y competitividad mediante la aplicación de ideas, procesos, reformulación de conceptos, etc. con el fin de que los productos o servicios sean mejor elaborados.

La innovación del presente proyecto radica en mejorar conceptos existentes, como el subsistema de alimentación y dosificación, y la aplicación de nuevas ideas para diseñar e implementar los subsistemas de conformado de fundas y de control para el correcto funcionamiento de la máquina conforme a los requerimientos establecidos.

En el medio local, las empresas y/o personas no se dedican a la investigación y desarrollo de maquinarias como la que se presenta en este proyecto, limitándose a la importación y venta de las mismas, los costos de venta se pueden disminuir al realizarlo localmente, garantizando soporte técnico, servicio postventa, repuestos y optimización de los procesos.

Por otro lado, la automatización permite mejorar la productividad debido a la reducción de los costes de producción, mejorar la calidad de los productos, aumentar la seguridad de los operarios y reducción de tiempo de producción. La integración de los diferentes subsistemas de la máquina permite adaptar el producto a las características de cada alimento que se requiera empacar.

Es importante destacar que los costos de desarrollo inicial de prototipos y máquinas para producción son altos, pero es necesario realizarlo para dar solución a la problemática. El presente proyecto abarca la implementación del proceso completo de empacado de forma automática como prototipo.

El proyecto está orientado hacia el mercado local, por lo tanto, cumplirá con los requerimientos de los productos nacionales, además que, a diferencia de una máquina importada, esta debe contar con servicio postventa, disponibilidad de repuestos y garantía.

Definición del alcance

En el presente proyecto se realiza la implementación de una máquina automática para dosificación, sello y corte. A continuación, se definen requerimientos que se consideran críticos.

- Tipo de producto: para alimentos agrícolas en grano entre 5 y 25 mm de diámetro, principalmente maíz para tostar.
- Capacidad de alimentación de materia prima: definido en 50 kg.
- Cantidad de dosificación: ajustable entre un volumen referencial de 100 cm³ a 1500 cm³ o de ½ lb a 1 (Tomando el maíz como referencia).

- Hito de producción: 6 empaques por minuto
- Operaciones automatizadas: procesos de dosificación, llenado, sellado y corte.
- Fiabilidad/Confiabilidad: Debe garantizar fácil operación, mantenimiento, uso de componentes normados que existan en el mercado local, así como el cumplimiento de normas en el producto final como es la DIN 55529 que, valida la resistencia de la costura sellada, respectivamente.

En base a los requerimientos antes mencionados, utilizando las metodologías de diseño que correspondan, se pretende realizar el proceso de diseño, fabricación y validación hasta que el equipo quede completamente funcional, para conseguir lo propuesto, en la Figura 7 se muestra una proyección de la máquina empaquetadora, a continuación, se describe cada componente que interviene en el proyecto.

Figura 7

Proyección de máquina empaquetadora



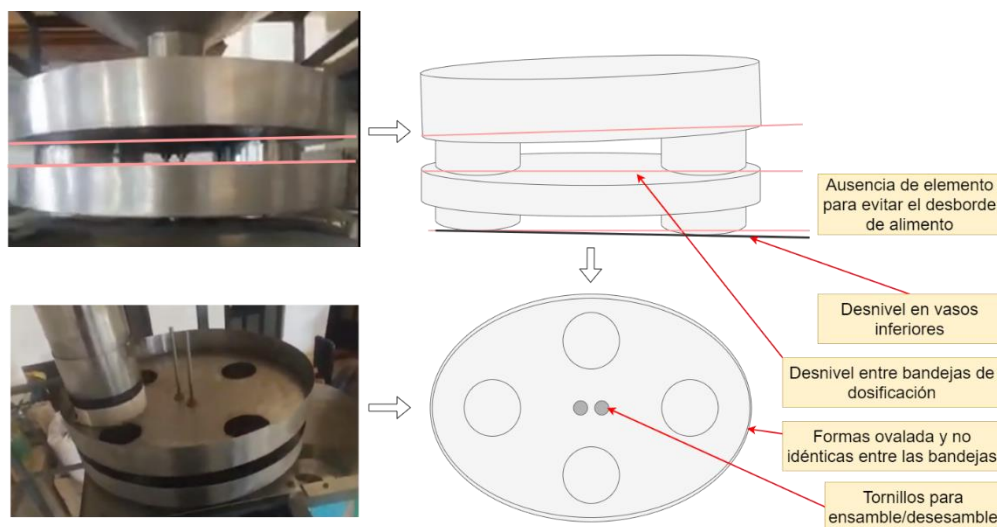
Componentes mecánicos

- Rediseño del mecanismo de dosificación:

En la Figura 8, se muestra los problemas actuales del sistema de dosificación, en los que se destaca el desnivel entre bandejas y vasos volumétricos que ocasiona fricción, desgaste, calentamiento y una dosis volumétrica no constante en todos los vasos, además que para cambiar de volumen es necesario hacerlo a través de tornillos sinfín ubicados en el eje, causando que se necesite en primer lugar quitar la tolva, haciéndolo muy poco práctico para el campo industrial. Por estas razones se pretende un rediseño mucho más simple pero preciso y efectivo, este se lo muestra en la Figura 4. Por lo tanto, es necesario el dimensionamiento de todos los elementos mecánicos, así como un estudio para la adaptación del nuevo sistema.

Figura 8

Estado inicial del sistema de dosificación.



- Subsistema de arrastre de bolsas:

En la Figura 5 se muestra un primer vistazo del sistema de conformado de bolsas en los que se requiere el diseño y construcción de:

- Estructura para tensionado de bolsa.
- Mecanismo de arrastre de bolsa.

- Estructura de fácil acceso para abastecer de manga plástica plástico para el empaquetado.

En la máquina se plantea el uso de un tablero de control, el cual debe estar propuesto adecuadamente de modo que sea ergonómico y de fácil acceso para el operador.

Componentes neumáticos

- Dimensionamiento y diseño del sistema neumático para conformado:

El sistema de conformado de bolsas requiere un estudio de dimensionamiento y validación de parámetros para el circuito neumático del mecanismo de sellado y corte.

Componentes eléctricos y electrónicos

- Diseño de tablero de control:

La máquina requiere un tablero de control el cual debe garantizar la seguridad tanto de los componentes como del operador, por lo tanto, se debe realizar un correcto dimensionamiento de todas las partes que lo conforman como elementos de control, elementos de señalización, botonería, relés, etc.

- Selección de elementos eléctricos y electrónicos para el subsistema de conformado de bolsas:

El arrastre de la manga plástica está propuesto por un mecanismo de rodillos que serán movidos por un motor que debe ser previamente estudiado para su selección.

- Montaje de tablero de control:

Implementación de los componentes en un tablero, correctamente ubicados tanto el circuito de potencia, como el circuito de control de acuerdo a normas establecidas y diagramas previamente realizados.

Componentes de automatización y control

- Dimensionamiento de instrumentación:

Para el sellado y corte se plantea un sistema de temperatura el cuál debe ser dimensionado, con una correcta selección de instrumentación con acondicionamiento, elaborar un estudio térmico y realizar el respectivo sistema de control.

El sistema neumático requiere una señal para asegurarse que existe producto en el mecanismo dosificador, así como un trabajo en sincronismo para saber cuándo accionarse, por lo tanto, se necesita la elección de sensores adecuados para proporcionar la señal mencionada.

- Integración de Subsistemas:

Los subsistemas actuales trabajan de forma independiente, entonces se pretende la integración en un solo sistema automatizado con el fin de poder controlar todos los procesos de la máquina de manera sincronizada y con la mínima intervención del operador a través de una interfaz HMI y botonería.

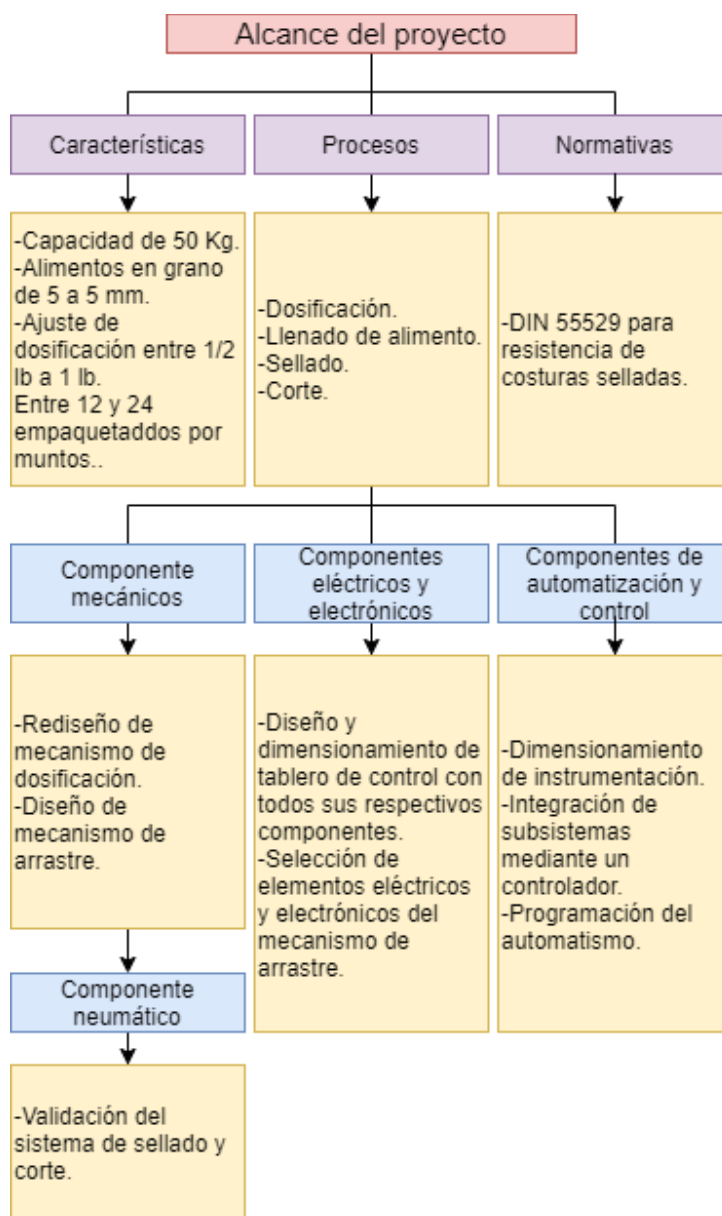
- Programación del automatismo:

Con el objetivo de utilizar un diseño apoyado en un estándar de automatización de sistemas de producción, los modos de marcha y paro se pretende estén basados en la guía Gemma, para el cumplimiento de las condiciones necesarias de seguridad y una comprensión gráfica y sencilla del proceso.

En la Figura 9, se presenta un breve resumen del alcance del proyecto, en donde se destacan los componentes mecánicos, eléctricos, electrónicos y de automatización. Las cuáles forman parte del perfil de un ingeniero mecatrónico.

Figura 9

Resumen del alcance del proyecto



Objetivos

Objetivo general

Rediseñar y automatizar los sistemas que conforman el proceso de empaque de alimentos en máquina dosificadora en la que se va a implementar un sistema de arrastre de manga plástica mediante integración de componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos, con el fin que dicha máquina dosifique, llene, selle y corte empaques de productos granulados, con la alternativa de cambiar la capacidad de dosificación por medio de vasos volumétricos.

Objetivos específicos

- Diseñar y fabricar los componentes mecánicos necesarios que el subsistema de dosificación se encargue de llenar los empaques con la cantidad correcta de producto, además que el ensamble y desacople de los componentes se realice lo más sencillo posible.
- Diseñar y dimensionar los componentes eléctricos, de control y neumáticos para que el control de los subsistemas trabaje de manera adecuada en un solo sistema automatizado integrado.
- Implementar e integrar los diferentes subsistemas que conforman la máquina para tener una empacadora completamente automática con el fin de adaptar el producto a las características de cada alimento granulado a empacar.
- Validar el proceso utilizando diseño experimental con el fin de verificar el cumplimiento de normas de sellado en productos alimenticios, así como los tiempos de producción establecidos.

CAPÍTULO II

Fundamentación teórica

En el presente capítulo se detalla toda la fundamentación teórica que se utiliza para desarrollar el proyecto.

Empacado

Introducción

La industria del empaquetado se ha consolidado fuertemente en el mercado mundial debido al incremento de la oferta y demanda además de la necesidad de empaquetar todo tipo de productos muy diferentes entre sí, por lo tanto, la tecnología e investigación que se invierte en este campo ha logrado diseñar, desarrollar y fabricar máquinas con gran capacidad de producción en menor tiempo de acuerdo a las normas que regulan el empaque de alimento. (García Reyes & González Santander, 2009)

En Ecuador la industria alimenticia, por lo general utiliza maquinaria extranjera para empaquetar alimentos producidos localmente. En el procedimiento se debe tomar en cuenta ciertos requisitos para mantener un alimento en óptimas condiciones para poder ser consumido después de ser empaquetado; Sin embargo, dichas condiciones son obtenidas en maquinaria extranjera para los productos producidos en el país donde fueron construidas. Las características de los alimentos, así como las condiciones climáticas y culturales son diferente alrededor del mundo. Por lo tanto, para obtener un producto de mejor calidad, lo más conveniente para el mercado local sería el uso de maquinaria construida en el país ya que esta presta los beneficios adecuados, además de asegurar garantía, capacitación de bajo costo y servicio postventa en corto tiempo. (Quintana, 2007)

Definición de empaçado

PPMA, es la Asociación de Maquinaria de Procesamiento y Empaque comercial del reino Unido para proveedores de maquinaria de procesamiento y empaque para los mercados nacionales e internacionales. Según esta el empaque es: “*La ciencia, el arte y la tecnología de encerrar o proteger productos para su distribución, almacenamiento, venta y uso*” o “proceso de diseño, evaluación y producción de empaques”. (PPMA, 2017)

Funciones del empaçado

Los materiales de empaque poseen cuatro funciones básicas que pueden proporcionar, las cuales son: protección, comunicación, conveniencia y contención (Robertson, 1993). Se dice que la trazabilidad y la indicación de manipulación son funciones secundarias de creciente importancia. (Ashwini, 2020)

- **Protección:** El principal objetivo del empaque de alimentos es brindar protección a los alimentos contra daños físicos, cambios químicos, cambios biológicos y deterioro.
- **Comunicación:** Debe proporcionar cualquier tipo de información al consumidor.
- **Conveniencia:** El producto empaçado debe ser de fácil acceso, mientras que el empaque se debe manejar, usar y eliminar sin problema.
- **Contención:** Hasta el momento de usar el producto que transporta, el empaque debe mantenerlo seguro.

Tipos de empaçado

Existen tres tipos de empaque, el primario, el cual es el material que está directamente en contacto con el producto. Puede ser una botella, bolsa de plástico o un cartón para líquidos.

El empaque secundario cubre al empaque primario, comúnmente para agruparlo y poderlo transportarlo por una cadena de distribución. Por ejemplo, una película retráctil, una bandeja o un cartón. Una característica importante de el empaque secundario es que se suele reciclarse una vez que cumple su función, pudiendo conservarlo o venderlo al granel. (PPMA, 2017)

El empaque terciario es utilizado para transportar el empaque secundario, tiene como objetivo proteger adecuadamente los envíos durante su tiempo de tránsito. Este no llega ni es visto por los consumidores. Por ejemplo, pallets, cartones corrugados y embalaje elástico para asegurar pilas de cajas. (García Reyes & González Santander, 2009)

Empacadoras industriales

Las empacadoras son máquinas, dirigidas principalmente a la industria, que realizan todas las actividades necesarias para almacenar un producto determinado, asegurando su higiene y conservación, con un grado distinto de automatización según sea conveniente. Todas tienen el mismo principio de funcionamiento iniciando el proceso con un material flexible, el cual es desenrollado hacia un cuello o cilindro formador, el cual le da forma de empaque para posteriormente pasar a la etapa de sellado que forma una manga que es llenada con el producto en periodos sincrónicos y finalmente es sellada completamente. Por otro lado, el producto inicia en una tolva o silo que pasa a un mecanismo dosificador que dispensa producto hacia la manga que ha formado la empacadora. (García Reyes & González Santander, 2009)

Clasificación de máquinas empacadoras

Máquinas de formado, llenado y sellado (FFS)

Formar, llenar y sellar (FFS) describe una operación de envasado en la que el "recipiente" se forma como parte de la línea de envasado (en lugar de fabricarse en otro lugar, como en una máquina formadora de botellas de vidrio) inmediatamente antes de que el producto lo llene y luego se cierra el contenedor lleno, generalmente mediante termosellado.

Los materiales de empaques flexibles utilizados se suministran en forma de bobina e incluyen termoplásticos, muchas veces combinados con papel, cartón y papel de aluminio, según las necesidades del producto. (Emblem, 2012)

Las máquinas FFS forman bolsas a partir de una hoja continua de material en rollo (envoltura de flujo), se pueden orientar en un plano vertical u horizontal. El tipo de formato depende de la naturaleza del producto alimenticio que se envasa. (Coles, 2003)

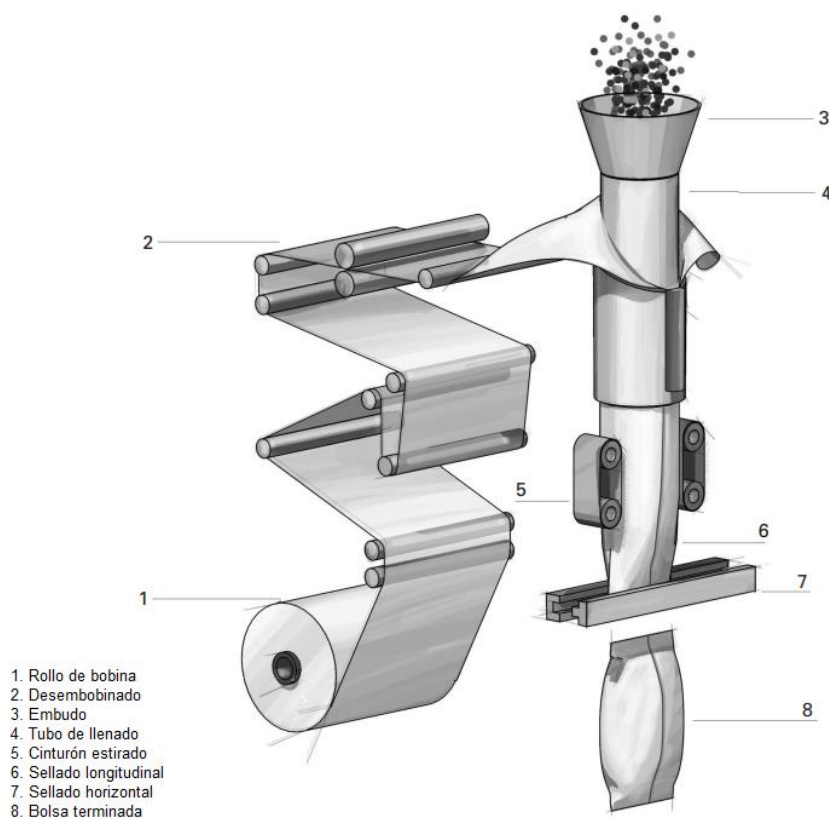
Máquina empacadora vertical (VFFS)

La característica principal de este tipo de máquina es la dirección del avance del material durante la formación de la bolsa, normalmente es usada para el empaque de líquidos, granos y polvos aprovechando la fuerza de la gravedad para llenar las bolsas, ubicando la tolva o silo en la parte superior de la máquina. Son construidas para empaques de tres y cuatros costuras. (Zapata, 2010)

En la Figura 10 se muestra las operaciones básicas que realiza una máquina VFFS. La bobina es ubicada en un carrete, para posteriormente seguir una trayectoria que le permita al material de empaque desenrollarse adecuadamente para poder entrar en un cuello formador (en este caso) que va a un tubo de llenado por donde pasa el producto alimenticio. El material de empaque es estirado hacia abajo por medio de un sistema de arrastre, para poder formar una manga con un sello vertical y finalmente empacar el producto con un sello horizontal. Alternativamente, se puede formar en una caja de formación con la forma adecuada para dar una sección transversal rectangular rígida con excelentes propiedades de "soporte" (por ejemplo, para líquidos) o los lados se pueden reforzar para mejorar el apilamiento de estantes y paletas. La rotación de las barras de sellado se puede utilizar para crear formas de tetraedro. (Emblem, 2012)

Figura 10

Operaciones básicas de una máquina VFFS



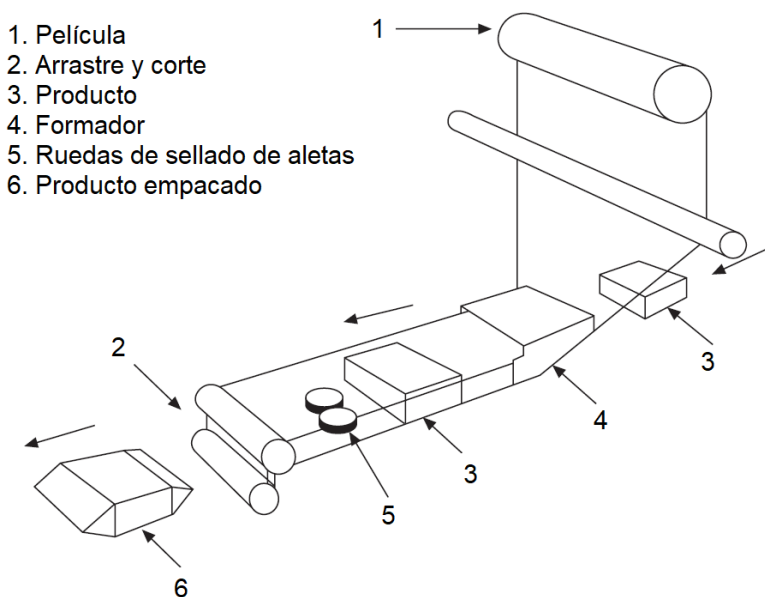
Nota. Adaptado de Basic operation of VFFS (p.515), por A, Emblem, 2012, Elsevier.

Máquina empacadora horizontal (HFFS)

Se utilizan cuando el producto es frágil y no puede soportar la caída por el tubo de llenado de una máquina vertical. Por ejemplo, barras de chocolate, pastel, helado o galletas. La película se alimenta a una caja de formación donde se le da la forma deseada, se sella continuamente a lo largo de los lados y se corta parcialmente para que comience a formar un contenedor individual. Como se muestra en la Figura 11. En este punto, el producto se introduce en el contenedor desde una cinta transportadora que utiliza barras de empuje o "paletas" para separar y dirigir cada producto a un solo contenedor. Luego, cada contenedor se sella en ambos extremos y luego se separa en paquetes individuales. (Emblem, 2012)

Figura 11

Operaciones básicas de una máquina HFFS



Nota. Tomado de “Basic operation of HFFS” (p.516), por A, Emblem, 2012, Elsevier.

Procesos de máquinas empacadoras

Dosificación

En la dosificación hay varios factores a considerar al seleccionar qué tipo de máquina usar. Éstos incluyen:

- Si el producto es sólido o líquido
- El tipo de contenedor requerido
- El nivel de precisión necesario en la operación de llenado.

Los productos sólidos se pueden categorizar de dos maneras:

- Elementos sólidos discretos, como tabletas, que a menudo se llenan contando un número determinado de elementos por contenedor
- Polvos que se pueden categorizar aún más por características tales como el tamaño de las partículas, el contenido de humedad y la densidad aparente.

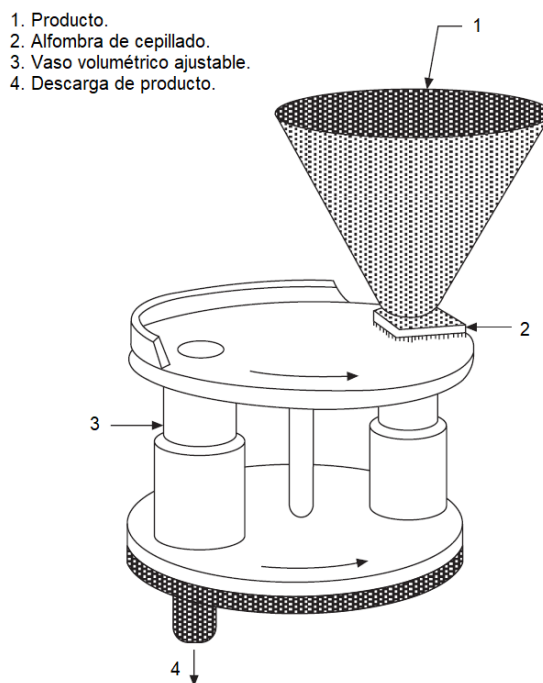
Los productos sólidos no discretos son llenados en contenedores por volumen, peso y conteo (para productos unitarios como tabletas).

Dosificación por volumen

Es la forma más sencilla de dosificar un producto no discreto, consiste en llenar vasos abiertos, previamente medidos según el volumen requerido y ayudados por la gravedad, que van inmediatamente después de una tolva. En la Figura 12, se muestra un esquema de ejemplo, donde se puede observar que se añade una “alfombra de cepillado” para lograr que todo el producto caiga en los vasos volumétricos, para finalmente descargar la porción dosificada hacia la siguiente etapa de la línea de empaclado.

Figura 12

Dosificación por vasos volumétricos



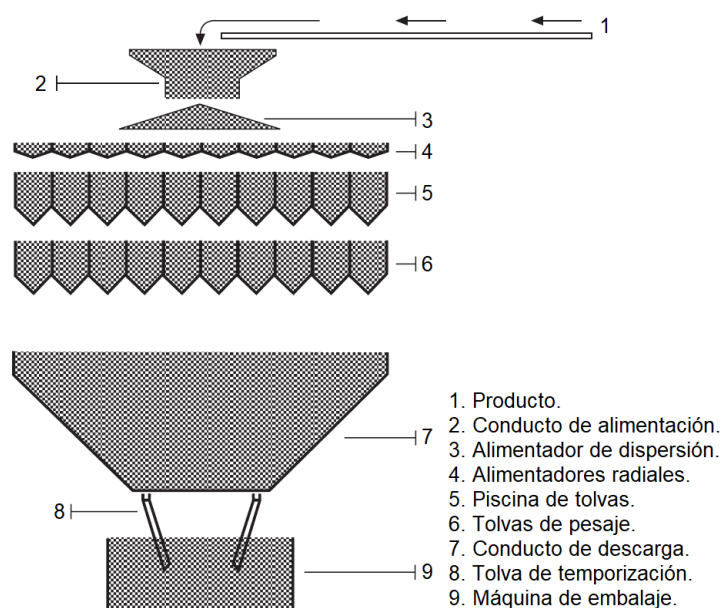
Nota. Tomado de Filling by volumen using a cup filler (p.496), por A, Emblem, 2012, Elsevier.

Dosificación por peso

Este tipo de dosificación generalmente utiliza receptáculos de pesaje. El producto se alimenta desde una tolva al balde. Una vez que se alcanza un cierto peso, la tolva se cierra y la cubeta vuelca el producto en un conducto de descarga o directamente en el contenedor. Un problema potencial con el pesaje es el riesgo de que el excedente de producto llegue al balde después de que el balde haya alcanzado el peso deseado, pero antes de que se haya detenido el flujo de producto, sin embargo, es el sistema más preciso de dosificación, pero hacen que el llenado por pesaje sea un proceso relativamente lento. Por otro lado, este método es el más sencillo de controlar, permitiendo disponer de un sistema más sofisticado y flexible. Un ejemplo se lo muestra en la Figura 13. (Emblem, 2012)

Figura 13

Dosificación multicabezal por peso



Nota. Tomado de Multi-head filling by weight (p.498), por A, Emblem, 2012, Elsevier.

Dosificación por conteo

Para productos dosificación discreta, en los que los artículos individuales como tabletas o cápsulas son un ejemplo. Las máquinas que llenan por conteo normalmente utilizan sistemas mecánicos o foto-electrónicos.

Los sistemas de conteo mecánico suelen colocar el producto sobre un plato con un número adecuado de orificios de tamaño adecuado. Una vez que se llena cada orificio, el exceso de producto se limpia de la placa y el producto contado por la placa se libera en el sistema de alimentación y en el contenedor.

Los sistemas de conteo foto-electrónicos generalmente implican hacer girar o hacer vibrar el producto para crear un flujo de artículos individuales que pasan por la fotocélula en una cinta transportadora para el conteo. También se pueden usar otros sistemas de detección electrónica (como la capacitancia). Los sistemas modernos también se pueden utilizar para crear conjuntos de diferentes elementos. Por ejemplo, mezclas de tornillos y tuercas para envasar en sobres. (Emblem, 2012)

Formador de bolsa

Es la pieza más importante y compleja de la formación de la bolsa donde se almacenará el producto, además de posicionarlo para poder realizar los sellos, La forma de esta pieza influyen en factores como la trayectoria de la película, tensión y fuerzas del sistema de arrastre.

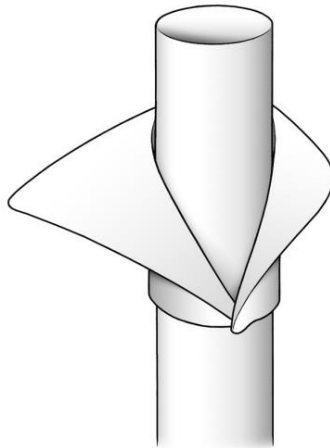
Cada máquina puede formar empaques de bolsas del tamaño que necesiten. Este tamaño es determinado por el tubo formador junto con un cuello formador o cono formador con anillos. La película se estira sobre este formador de forma plana hasta formar una manga tubular. Cada ancho de bolsa requiere sus propias piezas formadoras (Boch, 2014)

Cuello formador

Permite la transición al tubo formador, en el punto donde la red de la película se forma, como se muestra en la Figura 14, esta tiene la particularidad que la bobina, debe estar en la parte posterior de la máquina FFS, por lo que se necesita más esfuerzo en el sistema de arrastre.

Figura 14

Cuello formador



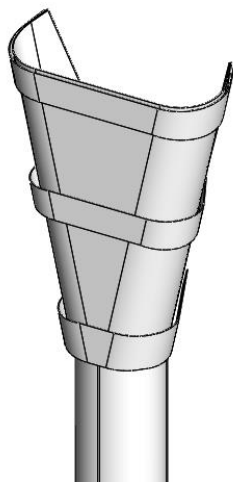
Nota. Adaptado de Forming shoulder and forming tube (p.23), por guide VFFS Boch, 2014

Cono formador con anillos

A diferencia del cuello formador, este tiene la característica que la bobina se puede ubicar en la parte superior de la máquina, como se muestra en la Figura 15, tiene la ventaja de reducir el esfuerzo para el sistema de arrastre.

Figura 15

Cono formador

***Con manga plástica***

Enfocado en máquinas empacadoras semiautomáticas o automáticas, este tipo de empaque es utilizado en entradas de centros comerciales para evitar el hurto de pequeños o como alternativa a las máquinas VFFS. Tiene como ventaja diseño simple de formador de bolsa y como desventaja el tiempo para cambiar de manga. En la Figura 16, se puede observar cómo va ubicada la manga plástica en un cilindro hueco por el que pasan los productos a ser empacados. (Wepack equipment, 2020)

Figura 16

Empacado con manga plástica



Nota. Tomado de “EMBALAJE PANDYNO IPER”, 2022, Ferplast (<https://www.ferplast.com/en/product/packing/bagging-machines/vertical-bagging-machines/pandyno-iper-detail>)

Sistema de sellado

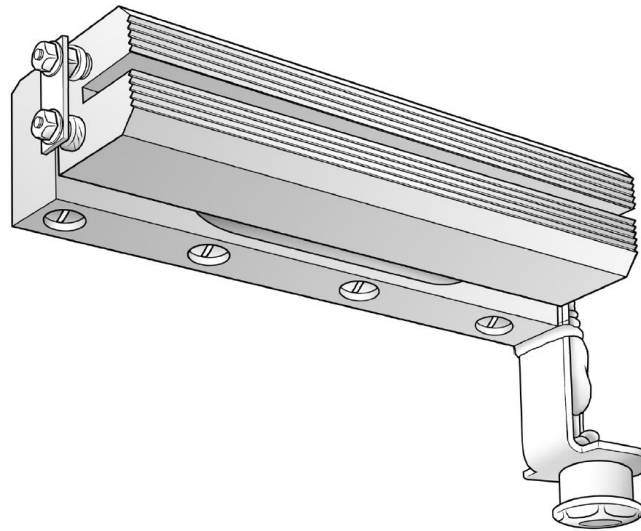
La bolsa es cerrada para mantener protegido al producto mediante sellado, usando el punto de fusión del polímero y deformándolo para un fácil transporte. Para lograrlo se calienta brevemente y comprime el material de empaque. En un periodo muy corto de tiempo el sellado se enfría estabilizando las costuras. (Boch, 2014)

Mordazas o temperatura constante

Como se muestra en la Figura 17, las niquelinas están presentes en el sellador o mordaza de sellado que alcanza la temperatura requerida para derretir el polietileno y también crea presión al juntar ambas mordazas para que un lado de la película se adhiera al otro lado de la película. La mordaza de sellado está hecha de acero inoxidable. El sensor de temperatura se coloca al final de la mordaza de sellado para controlar la temperatura. (Ashok, 2017)

Figura 17

Sellado por medio de mordaza transversal



Nota. Tomado de Sealing unit with cross seam sealing jaws (p.30), por guide VFFS Boch, 2014

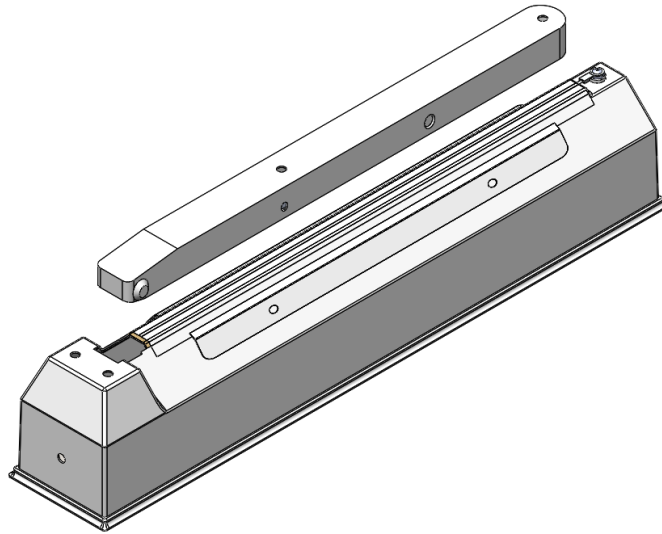
Por impulso

No posee una temperatura constante, se calienta la niquelina a través de impulsos regulados por periodos de corriente a través de la temporización. (Herrera & Lumbres, 2018)

En la Figura 18 se muestra un ejemplo.

Figura 18

Máquina de sellado por impulso

**Sistema de arrastre**

El material del empaque es halado o arrastrado mediante un sistema de arrastre, este es intermitente en funcionamiento y en cada ciclo el material es arrastrado la longitud vertical de la una bolsa. Los factores más importantes que afectan a este sistema son: las fuerzas de arrastre que debe soportar el motor y la tensión durante el desembobinado que depende en gran parte del formador de bolsa (cuello o cono formador).

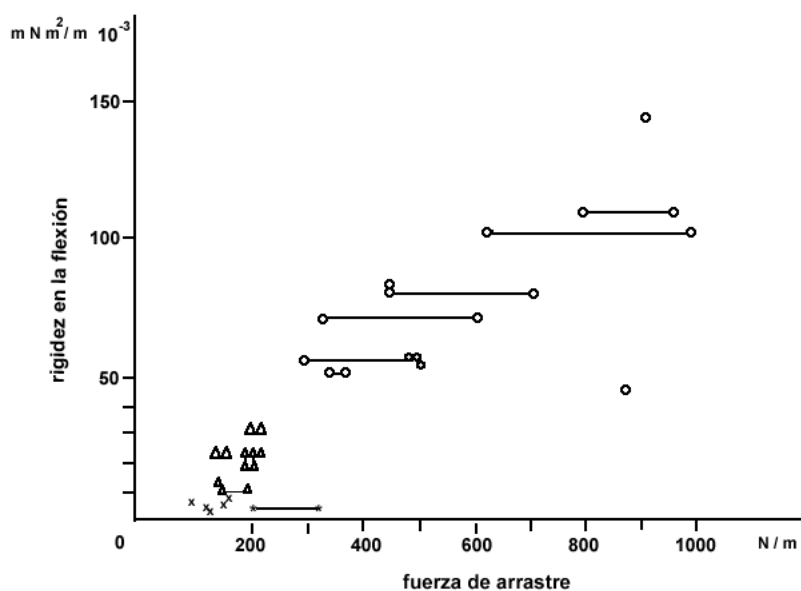
La fuerza producida por el motor en el sistema de arrastre influye en evitar la formación de pliegues longitudinales, así como la excesiva tensión. (Wilmer, 2019)

Fuerzas de arrastre

La fuerza de arrastre depende casi netamente de la rigidez del material en su capacidad de deformarse conforme esta se incrementa, como se muestra en la Figura 19. Esta nos describe que mientras menos capas tenga el material los resultados dieron fuerzas de arrastre menores.

Figura 19

Relación entre la fuerza de arrastre y la rigidez del material



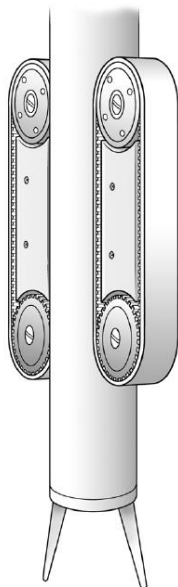
Nota. Tomado de Relación entre la rigidez a la flexión y la fuerza de arrastre, por Fraunhofer Institute, 2019, El empaque, (<https://www.elempaque.com/documenta/imagenes/136326/Relacion-entre-empacadora-material-de-empaque-y-producto-a-empacar-2-E2-arreglada.png>)

Por bandas

Se da a partir de un mecanismo caracterizado por correas o bandas como se muestra en la Figura 20, este es accionado por un actuador el cual deberá tener integrado un freno, así como su arranque suave para no dañar el material de empaque ya que gran parte de la banda está en contacto directo con el material de empaque. (Herrera & Lumbres, 2018)

Figura 20

Sistema de arrastre por bandas



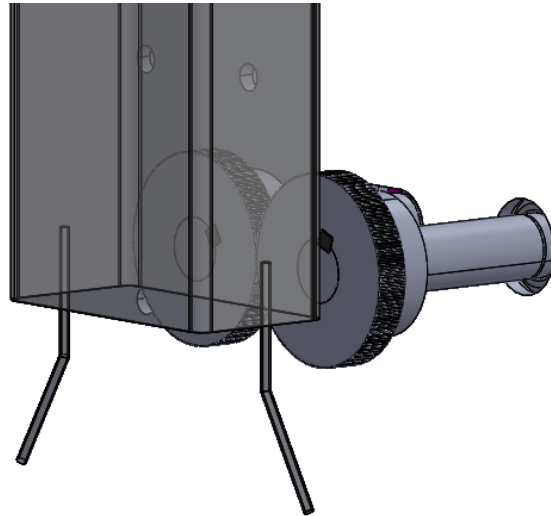
Nota. Tomado de Friction belts and vacuum belts (p.21), por guide VFFS Boch, 2014

Por rodillos

A diferencia del arrastre por bandas este tiene un único punto de contacto con el material de empaque, además de poseer un sistema de tracción de rodillos vulcanizados, comúnmente con neopreno, la correcta ubicación de estos es en el punto más bajo posible de la trayectoria del material de empaque. Posee flexibilidad para adaptarse a cualquier máquina VFFS. En la Figura 21 se muestra un ejemplo de un sistema de arrastre por rodillos.

Figura 21

Sistema de arrastre por rodillos



Productos y materiales de empaque

Productos para empacar

Según (Boch, 2014), las máquinas VFFS se adaptan a una amplia gama de productos que se pueden dividir en los siguientes cuatro grupos principales:

- Productos a granel como nueces, galletas y hasta pernos y tornillos;
- Polvos, como café molido, hierbas aromáticas y leche deshidratada;
- Granos o granulados, como detergente, productos agrícolas o frutas pequeñas;
- Líquidos, generalmente envases (porciones) de una sola vez, como salsas, aderezos para ensaladas o gel de baño.

Material de empaque

Alrededor del 70 % de los envases se utilizan para alimentos y bebidas, pero otros sectores, como el de la salud, los productos de belleza, los productos químicos, la ropa y los equipos eléctricos y electrónicos, necesitan envases para garantizar que permanezcan en condiciones aceptables desde el fabricante hasta el consumidor. La industria mundial de embalaje actual está valorada en más de 400 000 millones de dólares, dividida aproximadamente en 36 % de papel y cartón, 34 % de plásticos, 17 % de metales (acero y aluminio) y 10 % de vidrio, y el resto se compone de materiales como madera y textiles. (Emblem, 2012)

La selección del material del empaque depende de varios factores tales como condiciones ambientales, ya sea temperatura y humedad atmosférica; resistencia del empaque; presupuesto; especificaciones del comprador; etiquetado o estándares de regulación legal. (THE FOOD TECH, 2009)

Propiedades de materiales de empaque

La importancia de conseguir un rendimiento óptimo constante en una línea de empaque se debe a las propiedades del sellado ya que éstas afectan al material de empaque y por lo tanto al desempeño del sello para cumplir su objetivo de empaque. (Wilmer, 2018)

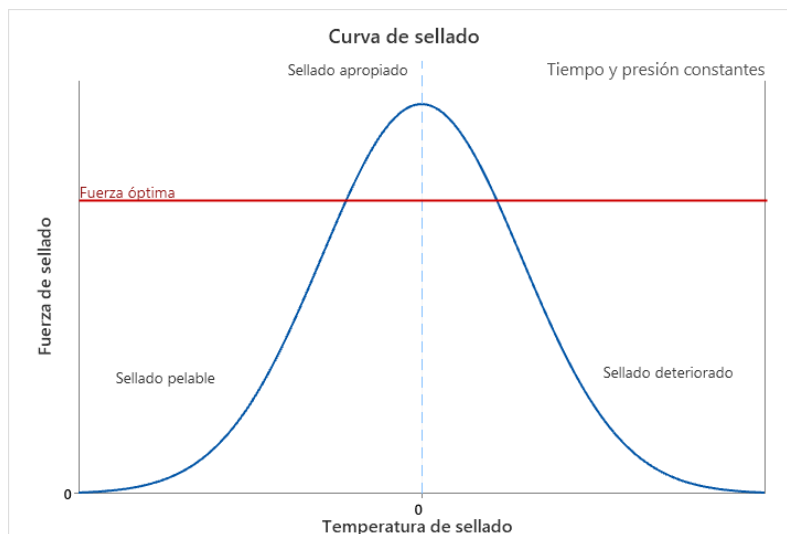
Las principales propiedades de sellado para materiales flexibles son:

- Temperatura de sellado: Existe la comúnmente llamada ITS (temperatura inicial de sellado), es la mínima temperatura de sellado para obtener un sello apropiado. Así como también existe la TMS (temperatura típica de sellado), la cual se refiere a la temperatura en la que el 60% al 80% del polímero se ha fusionado y deformado. (Wilmer, 2018)

- “El valor de sello apropiado”, es diferente según la aplicación y debe ser definido.
- Este valor viene de una correlación entre la temperatura de las mordazas, así como el tiempo que estas funden al polímero. Por lo que también sirve para determinar la velocidad de sellado de la máquina empacadora.
- Fuerza de sellado: La fuerza de sellado es definida en símil con TMS, en lugar de temperatura es determinada por la fuerza, se describe como [g/in] (gramos/pulgada). Según la norma ASTM F88 (ASTM, 2015), define la fuerza de sellado como la capacidad de un material fundido en forma de empaque a resistir la separación.
- Rango de sellado: Factor crítico que denota qué tan robusto trabaja el sellante (mordazas o filamento), en la línea de empaque. En la Figura 22 se muestra una curva de sellado, relacionando la fuerza y temperatura de sellado, dejando el tiempo de residencia y la presión constantes. Hay 3 zonas que muestran un sellado flojo, óptimo y deteriorado.

Figura 22

Curva de sellado de empaques



Nota. Adaptado de “Sellado de empaques flexibles”, Wilmer

(<https://www.elempaque.com/blogs/Sellado-de-empaques-flexibles,-descubra-el-exito-de-la-eficiencia-en-una-linea-empacadora+125405>).

- Presión de sellado: Es la presión que se debe ejercer entre las mordazas para formar el sello y poder fusionar mientras deforma el polímero. Esta debe ser uniforme, es medida en psi. Para comprobar su uniformidad se hace una prueba visual usando papel químico. (Wilmer, 2018)

Plásticos para empaçar

El empaque de plástico ha reemplazado ampliamente al empaquetado con vidrio y metal lo que ha permitido su crecimiento significativo a partir de la década de 1940. Esto se debe al desarrollo industrial de procesos con polímeros, gracias a su característica de bajo costo, amplio aprovechamiento de sus propiedades, reducción de peso, además de su flexibilidad de adaptación de necesidades. (Emblem, 2012) Las aplicaciones que presta el empaque con plásticos pueden ser:

- El reemplazo de envases de vidrio a polietileno tereftalato (PET) para agua embotellada, refrescos y demás bebidas.
- El cambio de recipientes de vidrio a polietileno de alta densidad (HDPE) para leche.
- El parcial reemplazo de latas de metal a bolsas de plástico flexible para alimentos para mascotas, sopas y salsas.

A continuación, se describe brevemente las principales características de los plásticos más utilizados en la industria.

Polietileno (PE)

El polietileno es uno de los plásticos más duradero, económico y resistente a productos químicos. Estas características causan que el PE sea el material plástico más utilizado para empaque. (Helmke, 2015)

Los empaques de polietileno suelen tener un aspecto opaco blanquecino, opaco o translúcido, según el antecedente térmico y el espesor de la película del material. El color del PE evita que la luz llegue al contenido del empaque, lo que ayuda a proteger los productos del daño de los rayos UV. (White, 2020)

El PE puede soportar temperaturas de hasta 115 °C, además de soportar una resistencia al frío de -80 °C. Por otro lado, tiene una excelente resistencia a la fatiga, desgarramiento y exposición química. Es un aislante eléctrico, pero se carga electrostáticamente con facilidad, propiedad que es compensada usando agentes antiestáticos o grafito. (White, 2020)

Algunos de los usos más comunes para el polietileno dependen de su densidad los cuales incluyen (ACG Colombiana S.A.S., 2021):

- HDPE (Polietileno de alta densidad): se utiliza para la fabricación de artículos para el hogar, juguetes, envases y botellas.

- LDPE (Polietileno de baja densidad): es ideal para la elaboración de bolsas, tuberías para riego y películas para invernaderos.
- LLDPE (Polietileno lineal de baja densidad): apto para el uso de bolsas, contenedores y recipientes para alimentos.
- m-LLDPE (Metaloceno lineal de baja densidad): se utiliza para mejorar las propiedades mecánicas, ópticas y de sellabilidad en las bolsas y empaques especiales.

El cambio de densidad presenta un cambio físico y este se nota principalmente en el calibre del plástico de polietileno natural, en la Tabla 1 se muestra una conversión de unidades de acuerdo a los calibres presentes en el mercado. (Plástico Negro, 2018)

Tabla 1

Tabla de calibres en el mercado

Tabla de calibres de polietileno natural y sus conversiones			
Calibre	Milímetros	Pulgadas	Milésimas
50	.0127	.0005	.5
70	.0178	.0007	.7
100	.0254	.0010	1
200	.0508	.0020	2
300	.0762	.0030	3
400	.1016	.0040	4
600	.1524	.0060	6
800	.2032	.0080	8
1000	.2540	.0100	10
1200	.3048	.0120	12
1500	.3810	.0150	15
2000	.5080	.0200	20

Nota. Recuperado de “Tabla de conversión para calibres de plástico”, 2018, Plástico negro

(<https://plasticonegro.mx/productos/tabla-conversion-calibres.php>)

Polipropileno (PP)

El polipropileno (PP) es el plástico con menor densidad utilizado para empaquetar lo que permite que sea altamente flexible, liviano y duradero, esta durabilidad le permite doblarse repetidamente en el mismo punto sin desgaste. Este presenta una gran transparencia, lo que facilita la visualización del artículo empaquetado. Se pueden agregar pigmentos al plástico para teñir el empaque. Los envases de PP también se pueden fabricar como translúcidos sin colorear.

El PP puede soportar altas temperaturas de hasta 170 °C y una baja resistencia al frío de 0 °C. A temperatura ambiente presenta una excelente resistencia a casi todos los disolventes, grasas orgánicas, agrietamiento, fatiga, ácidos y bases no oxidante. (White, 2020)

Algunas de las aplicaciones más comunes que presenta el PP son:

- Se usa generalmente para cintas de flejado, bolsas planas, bolsas con fuelles, cajas de polipropileno y flejes de polietileno.
- Debido a su resistencia a altas temperaturas, el polipropileno es muy adecuado para envases aptos para microondas.
- Los usos que no son de embalaje incluyen artículos para el hogar, juguetes, alfombras, tapicería y electrodomésticos.

Bolsas, bobina y costuras

Bobina

La bobina constituye la base para la forma del empaque, un rollo completo suele tener un diámetro de entre 350mm hasta 650mm para empaques relativamente pequeños en bobinas aun manipulables fácilmente. Sin embargo, existe bobinas con un diámetro de hasta 1000mm con un peso de más de 80 Kg, dependiendo del polímero usado.

Ancho de bobina

El ancho de la bobina debe ser un pedido personalizado según la bolsa de empaque que se espera, ya que la costura trasera, delantera y longitudinal dependen de eso. La bolsa tiene la mitad del ancho de la película, menos el ancho de la costura longitudinal. Expresado en una fórmula simple (Boch, 2014):

$$\frac{\text{ancho de película} - \text{ancho de costura longitudinal}}{2} = \text{ancho de bolsa}$$

Costura longitudinal

Normalmente se necesita desde 15mm hasta 25mm de película para la costura longitudinal para que tenga suficiente superficie para que agarre el sello y no lo suficiente para expandir el ancho de la bobina. (Boch, 2014)

Bolsas

Los paquetes correctamente diseñados, contruidos y sellados brindan una contención completa para el contenido, lo que evita fugas antiestéticas o peligrosas, o la pérdida de piezas. Esta contención debe garantizarse a lo largo de la vida esperada del producto, incluidas las numerosas etapas de manipulación desde el final de la línea de envasado hasta el uso final por parte del consumidor. La contención también significa mantener empacados juntos varios artículos iguales o diferentes, y esto se aplica a los paquetes primarios, secundarios y terciarios. (Emblem, 2012)

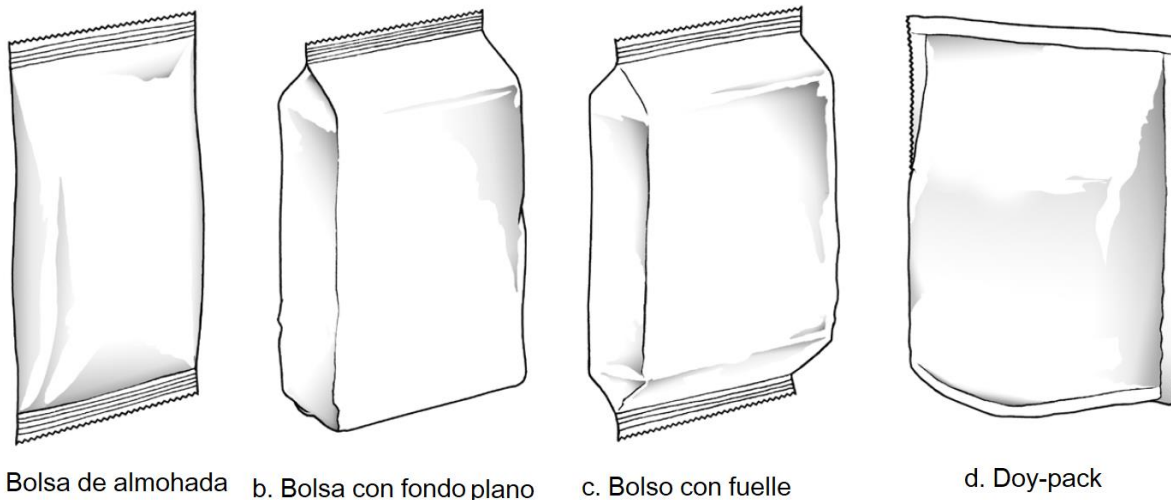
Tipos de bolsas

En principio, las máquinas VFFS producen tres tipos de bolsas. Dentro de estos tipos principales, existen innumerables variaciones posibles en modelo, largo y ancho (Boch, 2014).

- Los productos como las verduras frescas, las papas fritas o los dulces generalmente se envasan en una bolsa almohada. Esta forma de bolsa también se llama bolsa plana y es la forma más simple, normalmente se usa separadores en la parte inferior del tubo formador para evitar pliegues. Se muestra un ejemplo en la Figura 23.a.
- Una bolsa que se puede parar con un fondo plano, a menudo denominada bolsa con fondo de bloque y se puede usar para galletas o café. Ver Figura 23.b.
- Una variación común de la bolsa almohada es la bolsa de fuelle y generalmente se presenta en combinación con una caja de cartón o caja alrededor. Se utiliza comúnmente para envasar cereales para el desayuno. Ver Figura 23.c.
- La bolsa doy o “doy-pack” es otra forma de bolsa de pie y, a menudo, se la conoce como bolsa de pie. Ver Figura 23.d.

Figura 23

Tipos de bolsas plásticas



Nota. Adaptado de Bag types (p.9), por guide VFFS Boch, 2014

Datos técnicos de la bolsa

Para poder realizar una selección de las dimensiones de la bolsa, son necesarios factores, principalmente mecánicos de la máquina, para poder recopilar todos estos datos se presente en la Tabla 2 un ejemplo con los datos y características de la selección de una bolsa, así como sus dimensiones, la descripción gráfica de las dimensiones se muestran en la Figura 24.

Tabla 2

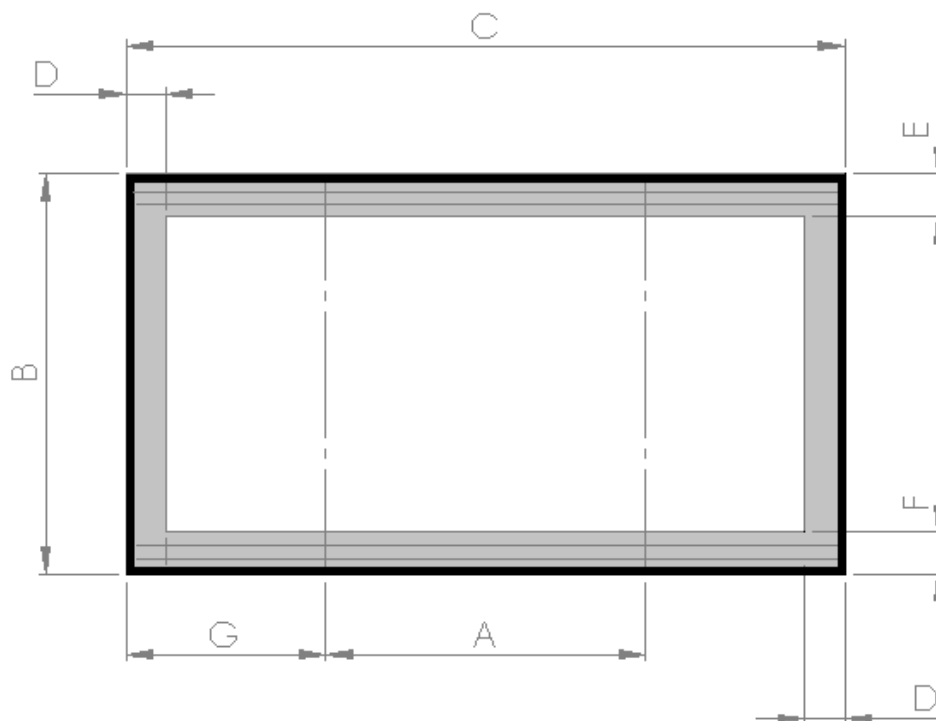
Ejemplo de datos para la selección de bolsa

Características de la bolsa	
Tipo de bolsa	Almohada / Con fuelle / Doy-pack
Tipo de película	Termosellado / m-LLDPE
Tipo de sello vertical (SV)	Aleta / Pestaña / NA
Dirección de plegado de SV	Izquierdo / Derecho
Medidas referenciales	
Ancho de bolsa	A
Alto de bolsa	B
Ancho de película	C
Ancho de sello vertical	D
Alto de sello superior	E
Alto de sello inferior	F
Compensación de película	G
Ancho de sello vertical	H

Nota. Adaptado de Pillow Bag - Fin Seal - Right (p.13), por guide VFFS Boch, 2014

Figura 24

Dimensiones referenciales de bolsa



Nota. Adaptado de Existing film dimensions (p.13), por guide VFFS Boch, 2014

CAPÍTULO III

Diseño y construcción

Generación de conceptos

Según (Weissman et al., 2009) para el proceso de diseño de un elemento electromecánico, en primer lugar se genera un documento de especificación de producto o PDS, este describiría la función del elemento y será una solución neutral y que no especifica los detalles de diseño, es decir, descripción de lo que debe hacer el producto pero no como lo hace.

De acuerdo a lo mencionado, y tomando en cuenta tanto los requisitos proporcionados por la empresa PROSERMEC, así como, la teoría consultada en el CAPÍTULO II, se presenta en la Tabla 3 un PDS con las especificaciones de diseño que servirán de guía para crear un modelo detallado del producto mediante la generación de conceptos.

Tabla 3

Requerimientos de la máquina empacadora de la empresa PROSERMEC

Especificaciones de diseño de producto: Empacadora volumétrica	
Requerimientos PROSERMEC	Parámetros invariables
Alimentación: 110 [VAC].	Tipo de empacadora: VFS (vertical-llena y sella).
Capacidad de ingreso de producto (tolva): 50 [kg].	Producto a empacar: Productos agrícolas granulados entre 5 y 25 mm de diámetro.
Capacidad de empaquetamiento: 6 [paquetes/min].	Tipo de bolsa: Tipo almohada.
Facilidad de montaje.	Tipo de dosificación: Por vasos volumétricos.
Dosificación ajustable.	Material de empaque: LDPE (Polietileno natural de baja densidad).
Alimento principal a empaquetar: Maíz para tostar.	Calibre de plástico: 1.25 y 4.
	Alto de bolsa: Variable según el nivel del dosificador (máximo de 260mm).

Especificaciones de diseño de producto: Empacadora volumétrica

Características de bolsa plástica

Tipo de bolsa: Almohada.

Tipo de película: Termosellado.

Tipo de sello vertical (SV): Sin especificar, depende del número de costuras.

Mantenimiento

Todas o la mayor parte de las piezas serán estandarizadas y se podrán conseguir en el mercado local.

Todos los componentes sujetos a desgaste deben ser reemplazados fácilmente con herramientas estándar y sin habilidades especiales por parte del operador.

El montaje de la máquina será sencillo y cada subsistema será modular para una fácil reparación y limpieza o para un reemplazo del mismo.

El diseño debe permitir que la máquina no necesite un mantenimiento considerable en al menos un año de uso.

Características físicas

Transporte: Con garruchas.

Acabado: Estético y duradero.

Altura máxima: 2.30m.

Resistente a golpes, polvo y vibraciones.

Debe funcionar a temperaturas entre 0 y 50°.

 Especificaciones de diseño de producto: Empacadora volumétrica

Requisitos políticos y legales

Estándar para ensayos de bolsas termosellados: NTE INEN 2890.

Norma DIN 55529 para determinación de resistencia de costuras selladas.

Todo el proyecto debe ser realizado cumpliendo las normas y leyes de: La Constitución de la República, Códigos y Bases Legales de la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE".

Requisitos financieros

Ajuste financiero para construcción, acorde a lo propuesto a PROSERMEC.

Durante el ciclo de vida: Mantenimiento referencial de \$100 cada año.

Fiabilidad: 5 años antes del primer fallo.

Facilidad de servicio: repuestos estándar, servicio postventas.

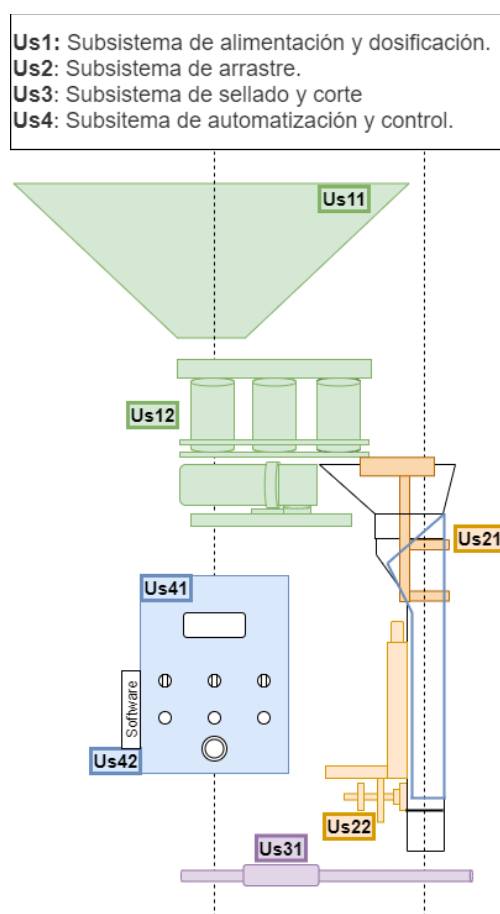
Una vez definidos los requerimientos de la máquina, se procede a desarrollar los conceptos de cada subsistema con la finalidad de escoger los conceptos con mejores características, tratando de reducir los costos para su posterior construcción.

Definición de subsistemas del proyecto

En la Figura 25 se muestra una clasificación del proyecto basado en las actividades que realiza una máquina VFFS y el control independiente de cada subsistema, antes de integrarlo.

Figura 25

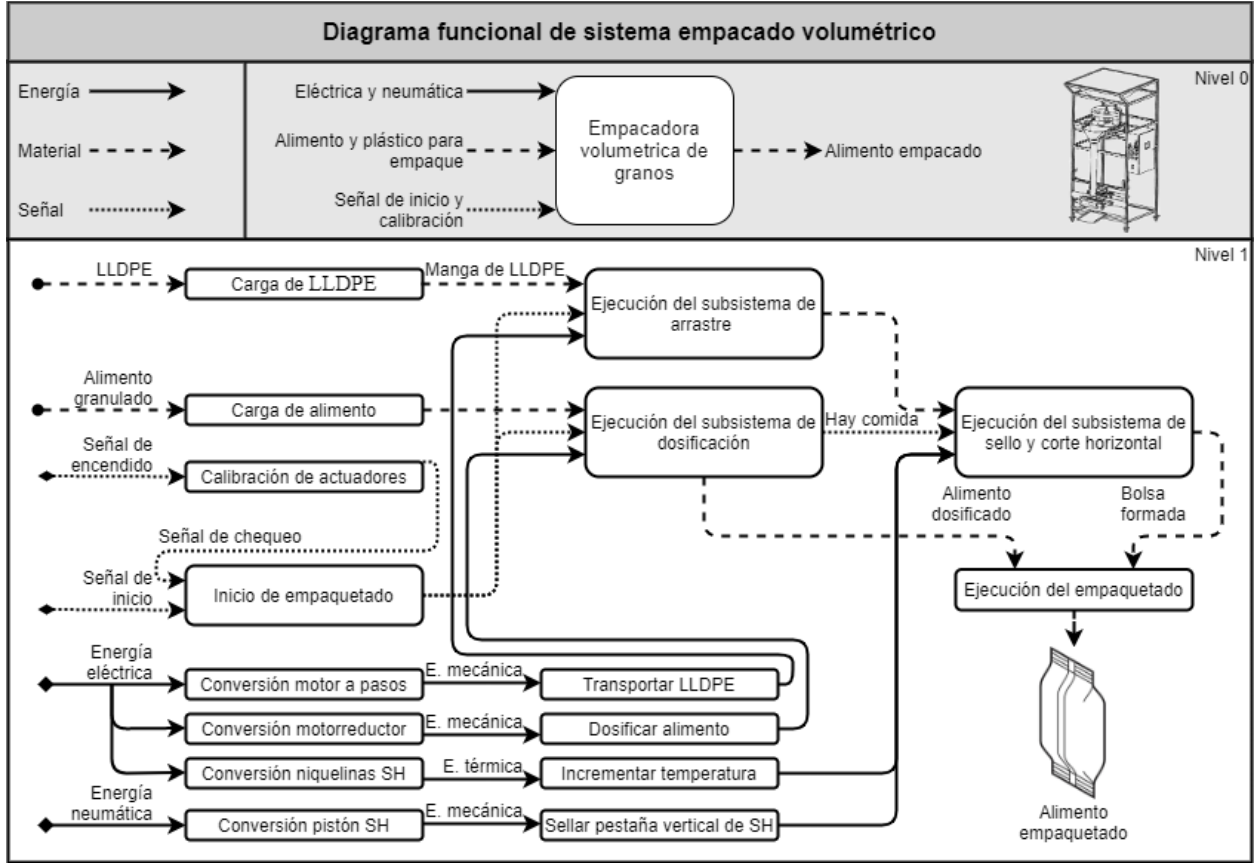
Clasificación de subsistemas del proyecto



A partir de esta clasificación se elabora un diagrama funcional que describe la representación gráfica del proceso de empaque que va a ejecutar la máquina del presente proyecto, esto se muestra en la Figura 26.

Figura 26

Diagrama funcional del proceso del proyecto



Concepto del conformado de la funda (Us22)

Se presentan 3 alternativas del tamaño de la bolsa en la Tabla 4, según las dimensiones en mm de la Figura 24 las cuales son referenciales para la generación de concepto del conformado de bolsa según (Boch, 2014).

Tabla 4

Tabla de diseño de dimensiones de la bolsa.

Dimensión	Referencia	Bolsa A	Bolsa B	Bolsa C
Ancho de bolsa	A	160	180	150
Alto de bolsa	B	300	200	250
Ancho de película	C	360	380	300
Ancho de sello vertical	D	20	10	0
Alto de sello superior	E	13	13	13
Alto de sello inferior	F	13	13	13
Compensación de película	G	100	100	75

Se tomó estas alternativas tomando en cuenta que cada una está orientada a un sistema diferente de conformado de bolsa. La bolsa A y B son tipo almohada de 3 costuras, la ciencia entre sí es el alto de bolsa, la bolsa A es para un conformado de bolsa por cono formador mientras que la bolsa B es para cuello formador. Por otro lado, la bolsa C es tipo almohada de dos costuras, es decir se sella a partir de una manga plástica ya formada.

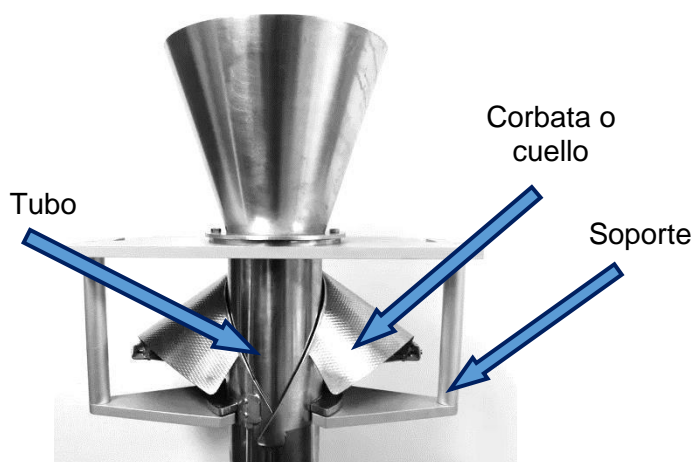
Para el conformado de las bolsas, se tiene 2 alternativas. La primera consiste en el conformado de la funda desde el desembobinado de la lámina plástica hasta adoptar la forma tubular para el posterior sellado vertical, dentro de esta opción, el empaque puede ser formado mediante cuello formador o cono formador que requiere una bobina de lámina plástica. La segunda alternativa para realizar empaques es a partir de una manga plástica tubular, esta no necesita un sellado vertical.

Cuello formador

En la Figura 27 se indica el cuello formador que se compone de 3 partes: corbata o cuello, tubo y soportes. El cuello formador se fabrica con acero inoxidable ya que se trabaja en el sector alimenticio y este material es ideal para la aplicación ya que presenta alta resistencia a la corrosión.

Figura 27

Cuello formador para conformado de fundas



Nota. Adaptado de “Tubos formadores para maquinaria de envasado”, IRTA Group (<https://irtagroup.com/accesorios-packaging/tubos-formadores/>)

Para este tipo de formado de la funda, la bobina se debe posicionar detrás y por debajo del cuello formador seguido de un sistema de tensión para mantener a la lámina plástica en una correcta posición (ver Figura 28).

Figura 28

Recorrido de la lámina plástica por el cuello formador



Nota. Recuperado de “Envolvedoras verticales (VFFS)”, ULMA

(<https://www.ulmapackaging.com/es/maquinas-de-ensado/vertical-vffs>)

Cono formador

En la Figura 29 se muestra el cono formador para que la lámina plástica proveniente de la bobina, adopte la forma tubular. Este formador es de tipo embudo y tiene anillos que permiten mantener a la funda en correcta posición, además de evitar arrugas durante su trayecto.

Figura 29

Cono formador para conformado de fundas



Nota. Recuperado de “Formador de fundas”, 2019, Saleem & sons engineering

(<http://www.saleemengineering.com/other-products.html>)

Luego del cono formador, se encuentra el tubo y finalmente un par de antenas que sirven para mantener la funda tensa para poder realizar el sello horizontal de manera correcta.

Figura 30

Recorrido de la lámina plástica por el cono formador



Nota. Recuperado de “Formador de fundas”, 2019, Saleem & sons engineering

(<http://www.saleemengineering.com/other-products.html>)

Manga plástica tubular

La manga plástica tubular comprende una sección de plástico continua (ver Figura 31), comercialmente se puede encontrar mangas de polietileno o polipropileno, de diferentes espesores, según requiera la aplicación. La gran ventaja que presenta una manga respecto a una bobina de lámina plástica es que se requiere de menos elementos mecánicos, actuadores y control para obtener un empaque.

Figura 31

Manga plástica tubular de polietileno



Nota. Recuperado de “Manga de polietileno”, 2019, Plásticos America

(<https://www.plasticosamerica.cl/producto/manga-de-polietileno-transparente-virgen-venta-por-kilo-10-a-50-cm-ancho/>)

Selección del concepto del conformado de fundas

En la Tabla 5 se realiza la evaluación de los conceptos propuestos para el conformado de fundas. La calificación tiene una ponderación de 1 a 3, donde 1 indica que el criterio no es aceptable, mientras que 3 indica la mejor puntuación.

Tabla 5*Evaluación del concepto. Conformado de la funda*

Criterios de selección	Peso	Concepto					
		Cuello formador		Cono formador		Manga plástica	
		Calif.	Evaluación ponderada	Calif.	Evaluación ponderada	Calif.	Evaluación ponderada
Costo (mayor costo/menor calificación)	30%	1	0.3	2	0.6	3	0.9
Elementos adicionales	20%	2	0.4	2	0.4	3	0.6
Peso (mayor peso/menor calificación)	15%	1	0.15	1	0.15	2	0.3
Facilidad de ensamble	20%	2	0.4	2	0.4	3	0.6
Espacio (mayor espacio/menor calificación)	15%	2	0.3	3	0.45	3	0.45
	100%		1.55		2		2.85

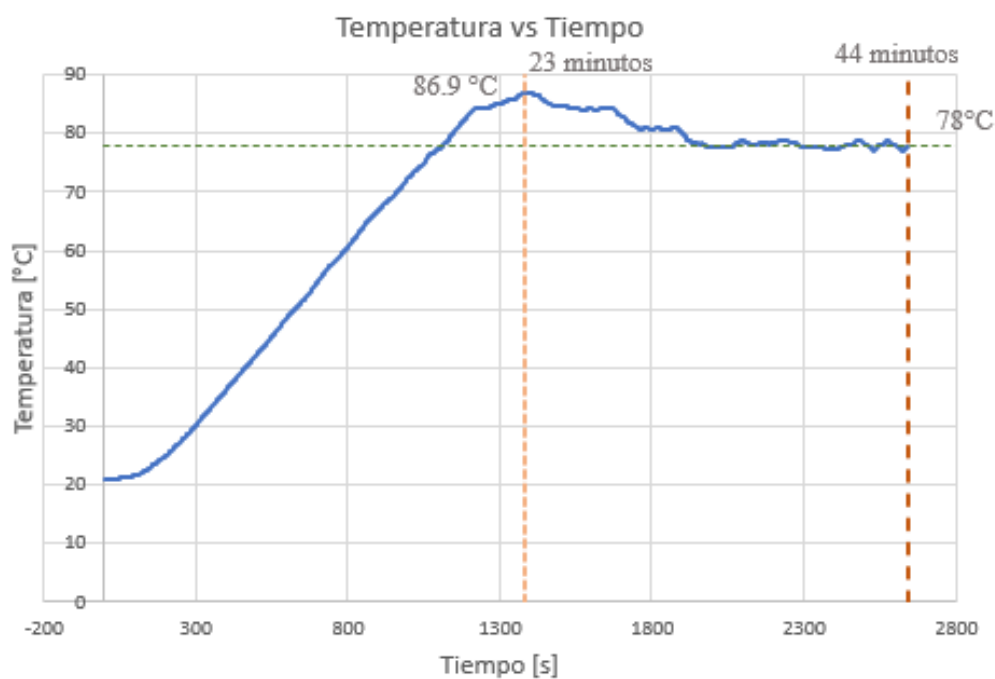
Una vez que se han evaluado los conceptos, se puede determinar que la mejor opción para formar las bolsas es a partir de una manga plástica, debido a las grandes ventajas como menor costo y sencillez que presenta respecto a los otros conceptos.

Concepto del sello horizontal (Us31)

En la máquina empacadora están implementadas mordazas para el sellado de las bolsas, este tipo de sello se realiza mediante resistencias eléctricas. En la Figura 32 se muestra la gráfica de temperatura vs tiempo, donde se puede observar claramente que un inconveniente de este tipo de sellado es el tiempo que requieren las mordazas para llegar a la temperatura adecuada para sellar, por lo que se plantea adicionar otro sistema de sellado mediante una técnica diferente a la que ya está implementada. A continuación, se presentan otras técnicas de sellado para posteriormente escoger la mejor opción.

Figura 32

Gráfica de temperatura vs tiempo de las mordazas de sellado horizontal



Sellado térmico continuo

Esta técnica de sellado se basa en bandas que se encuentran en movimiento, transportando la bolsa que será sellada (ver Figura 33). Además, tiene barras de sellado que están calientes de manera continua. Esta técnica para sellar sirve para materiales como polietileno, polipropileno, celofán y papel.

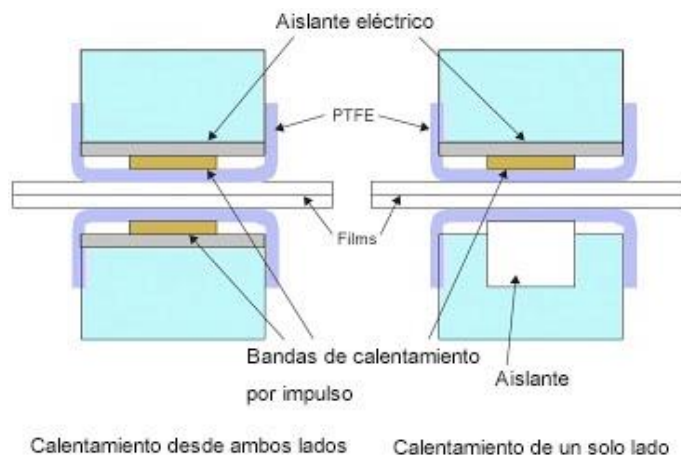
Figura 33*Sellado térmico continuo*

Nota. Recuperado de “Máquina de sellado continuo”, 2022, Embalajes Terra
(<https://www.embalajesterra.com/blog/como-funciona-una-maquina-de-sellado-continuo/>)

Sellado por impulso eléctrico

El sellado por impulso eléctrico genera calor para realizar el sellado únicamente cuando se va a realizar el sello. Los elementos de esta técnica son: niquelinas, caucho y teflón que actúa como material antiadherente.

Los materiales a sellar son presionados durante un periodo corto de tiempo, una corriente eléctrica caliente la niquelina durante un instante de tiempo para elevar la temperatura requerida. (Tecnología de los plásticos, 2013)

Figura 34*Sellado por impulso eléctrico*

Nota. Recuperado de “Termosellado”, 2013, Blogspot

(<https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2013/12/termosellado.html>)

Selección del concepto del sello horizontal

En la Tabla 6 se presenta los resultados de la evaluación de los conceptos referentes al sello vertical. La calificación tiene una ponderación de 1 a 3, donde 3 indica el criterio de mayor aceptación.

Tabla 6*Evaluación del concepto. Sello horizontal*

Criterios de selección	Peso	Concepto			
		Sellado continuo		Impulso eléctrico	
		Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada
Costo (mayor costo /menor calificación)	30%	2	0.6	3	0.9
Facilidad de implementar	20%	2	0.4	2	0.4
Energía (mayor energía /menor calificación)	15%	1	0.15	2	0.3
Mantenimiento	15%	2	0.3	2	0.3
Tiempo de precalentamiento (mayor tiempo / menor calificación)	20%	1	0.2	3	0.6
	100%		1.65		2.5

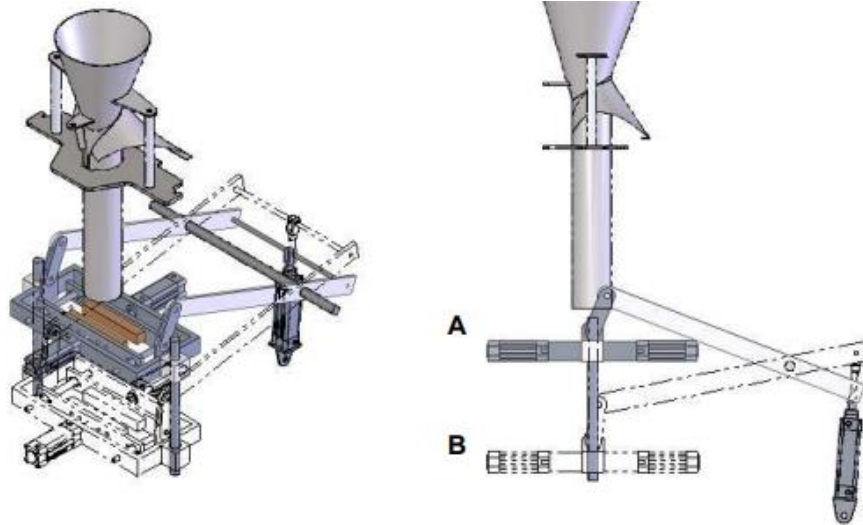
Por lo tanto, se puede concluir que el concepto que presenta mejores características es el sello mediante impulso eléctrico.

Concepto del arrastre de la funda (Us24)

El subsistema de arrastre es el encargado de halar la lámina plástica mediante un sistema mecánico y el tubo del subsistema de conformado de la funda. Existen 3 métodos para el arrastre de la funda: por acción de mordazas de sello horizontal, por rodillos y por correas de deslizamiento.

Arrastre por acción de mordazas de sellado

El sistema consta de un marco metálico en el cual se hallan las mordazas las cuales cumplen la función del sello horizontal y también ejercen la acción de arrastre, las mordazas actúan como pinzas que sujetan la funda y mediante un mecanismo accionado por un pistón neumático hala la lámina plástica, como se puede apreciar en Figura 35.

Figura 35*Arrastre mediante mordazas sellado*

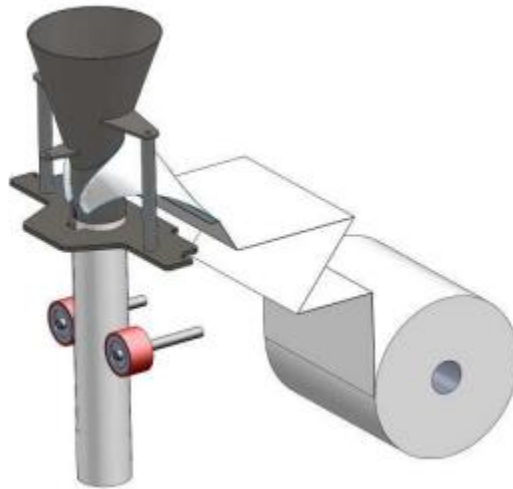
Nota. Recuperado de “Diseño de una máquina empacadora, dosificadora y selladora de fundas para arroz” (p. 78), por E. Moreno, 2010.

Arrastre mediante rodillos

La lámina plástica al atravesar el subsistema de conformado, es arrastrada por tracción de un sistema de rodillos vulcanizados, mismos que se encuentran en posición izquierda y derecha del tubo como se puede ver en la Figura 36

Figura 36

Arrastre mediante rodillos vulcanizados



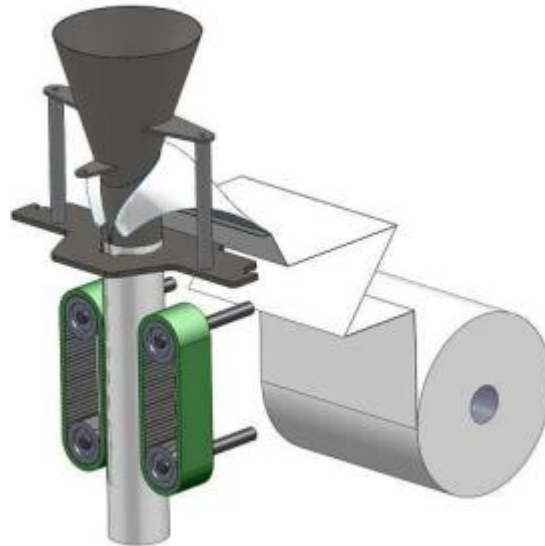
Nota. Recuperado de “Diseño de una máquina empacadora, dosificadora y selladora de fundas para arroz” (p. 79), por E. Moreno, 2010.

Arrastre mediante correas de deslizamiento

El funcionamiento de este sistema que se puede ver en la Figura 37 es similar al sistema de arrastre por rodillos, cuya acción motriz puede estar conformada por engranajes, cadena de transmisión y motor.

Figura 37

Arrastre mediante correas de deslizamiento



Nota. Recuperado de “Diseño de una máquina empacadora, dosificadora y selladora de fundas para arroz” (p. 80), por E. Moreno, 2010.

Selección del subsistema de arrastre

En la Tabla 7 se puede observar los resultados de la evaluación de los conceptos para el subsistema de arrastre.

Tabla 7*Evaluación del concepto. Subsistema de arrastre*

Criterios de selección	Peso	Concepto					
		Mordazas		Rodillos		Correas	
		Calif.	Evaluación ponderada	Calif.	Evaluación ponderada	Calif.	Evaluación ponderada
Costo (mayor costo /menor calificación)	25%	1	0.25	3	0.75	2	0.5
Facilidad de implementar	20%	1	0.2	2	0.4	2	0.4
Facilidad de manufactura	20%	2	0.4	3	0.6	2	0.4
Mantenimiento	15%	2	0.3	2	0.3	2	0.3
Espacio (mayor espacio / menor calificación)	20%	1	0.2	3	0.6	1	0.2
	100%		1.35		2.65		1.8

El concepto que obtuvo la mejor calificación respecto a los criterios de selección, es el subsistema de arrastre mediante rodillos

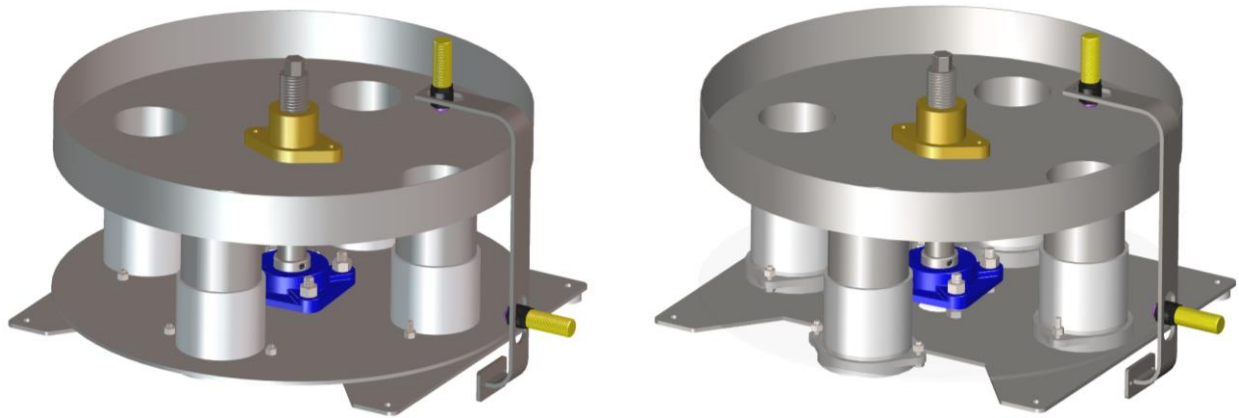
Diseño del sistema mecánico

Dentro del sistema mecánico se rediseña el sistema de dosificación debido a problemas de manufactura y se diseña el subsistema de arrastre, sello y corte horizontal.

A continuación, se detalla el diseño y construcción de cada subsistema

Subsistema de dosificación (Us12)

El principal problema que presentaba el subsistema de dosificación debido a la manufactura, era la inadecuada regulación de volumen de producto en los vasos, lo que desencadenaba en porciones diferentes en cada vaso.

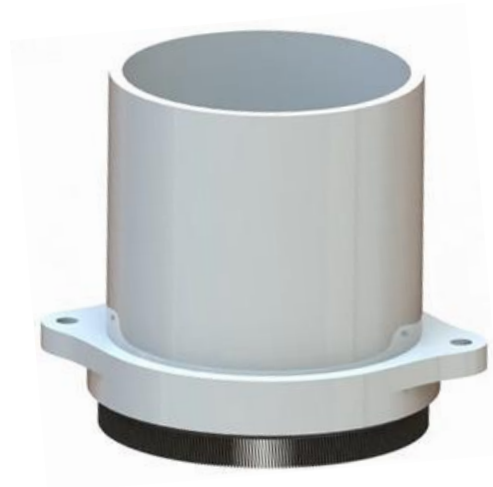
Figura 38*Rediseño del sistema de dosificación*

El subsistema se compone de un plato superior con agujeros por donde pasará el alimento proveniente de la tolva. Para regular la altura de los vasos volumétricos se tiene un tornillo sin fin, el cual tiene la posibilidad de desplazar el plato superior verticalmente para aumentar o disminuir el volumen de producto en los vasos. Tomando en cuenta que se requiere de precisión para ensamblar los componentes del subsistema de dosificación, el plato superior e inferior se realizó mediante corte láser y los vasos volumétricos mediante impresión 3D.

Además, los vasos volumétricos tienen escobillas (ver Figura 39), que sirven para recoger productos de tamaño pequeño o tipo granulado. Debido a la distancia que existe entre el plato inferior y la placa móvil, se decidió colocar escobillas en los vasos, de esta manera se asegura que toda la cantidad de producto llegue a la funda que posteriormente será sellada.

Figura 39

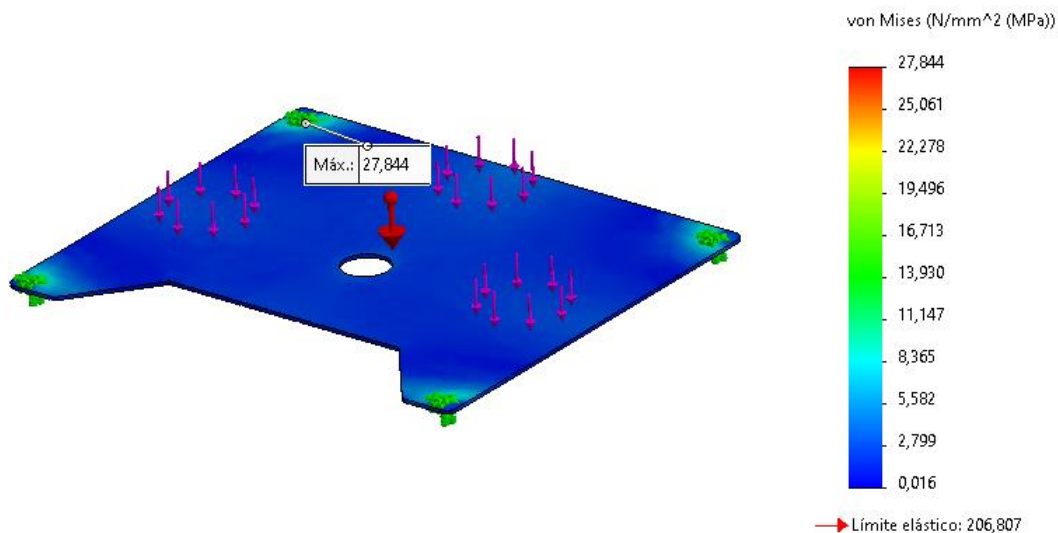
Vaso volumétrico con escobillas



En la Figura 40 se presenta el estudio de tensiones de la placa inferior del dosificador que es el elemento más crítico, ya que soporta el peso del producto alimenticio que será empaquetado. El material del dosificador, incluyendo la placa inferior es de acero inoxidable de grado alimenticio debido a que se está trabajando con granos como maíz, haba, arveja, etc.

Figura 40

Espectro de tensiones de la placa inferior del subsistema dosificador

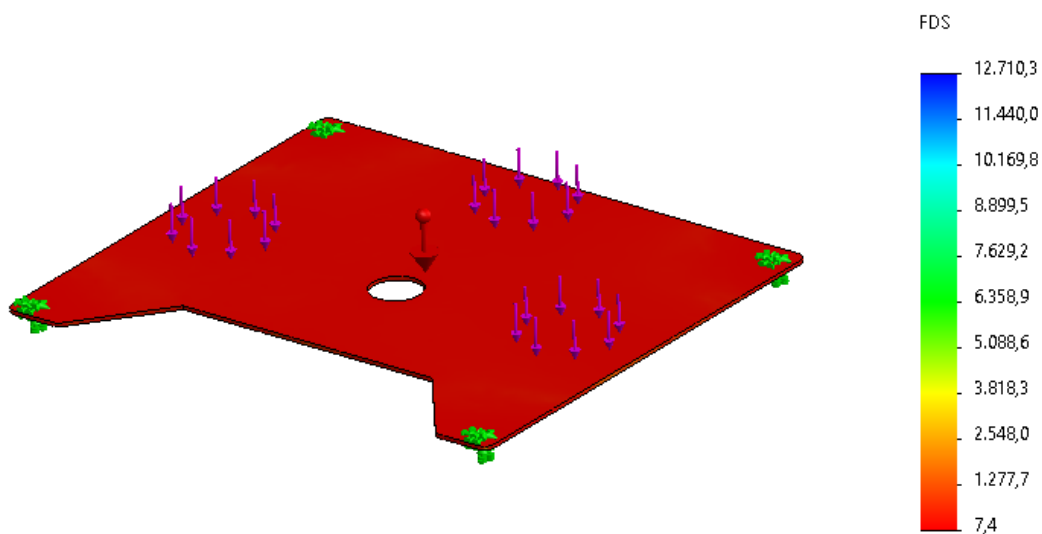


Luego de haber realizado el estudio de tensiones se obtuvo un esfuerzo máximo de $\sigma_{max} = 27.844 \text{ MPa}$, que se encuentra por debajo del límite elástico del material. Tomando en cuenta que el límite elástico del acero inoxidable es $S_y = 206 \text{ MPa}$, se puede determinar el factor de seguridad mínimo.

$$FS = \frac{S_y}{\sigma_{max}} \approx 7.39$$

Figura 41

Factor de seguridad de la placa inferior del subsistema dosificador



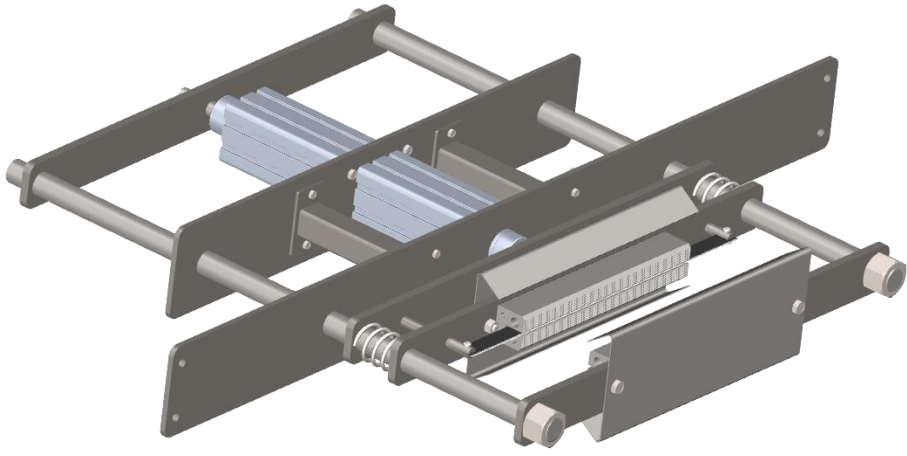
Los resultados arrojados por el software, indican un factor de seguridad mínimo de 7.4, que quiere decir que la estructura cumple con el criterio de demanda capacidad.

Subsistema de sello y corte horizontal (Us23)

El subsistema de sello horizontal actual de la máquina se puede observar en la Figura 42 cuenta con 2 cilindros neumáticos, ambos de diámetro 50 mm. Uno de los pistones se encarga de mover el mecanismo para sellar la funda horizontalmente, mientras que el segundo pistón realiza el corte de la funda mediante una cuchilla.

Figura 42

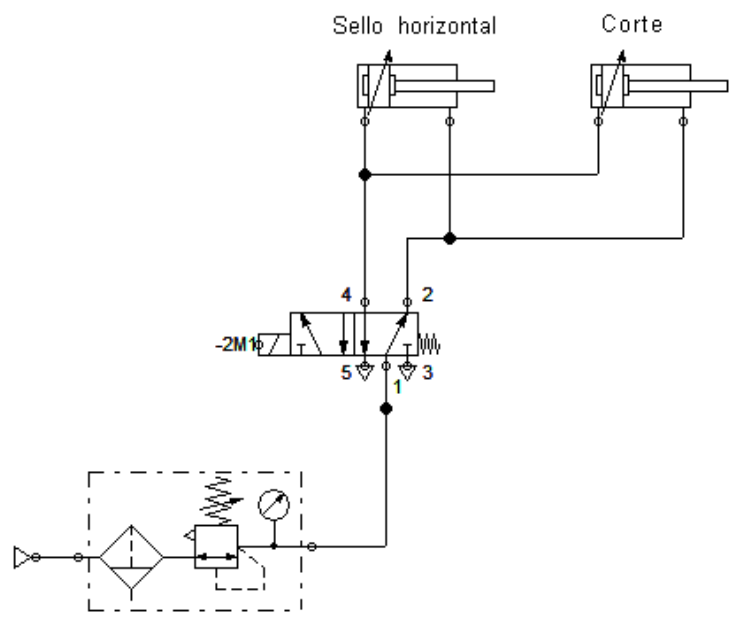
Subsistema de sello y corte horizontal



En la Figura 43 se muestra el circuito neumático para realizar el sello horizontal y corte de la funda. El sistema neumático tiene 2 pistones que se accionan por 1 válvula 5/2, los pistones se accionan al mismo tiempo, pero la diferencia se encuentra en el pistón que realiza la acción de corte, el mecanismo que acciona la cuchilla, tiene resortes que hacen que la velocidad de expansión del vástago sea menor que el pistón que sella horizontalmente.

Figura 43

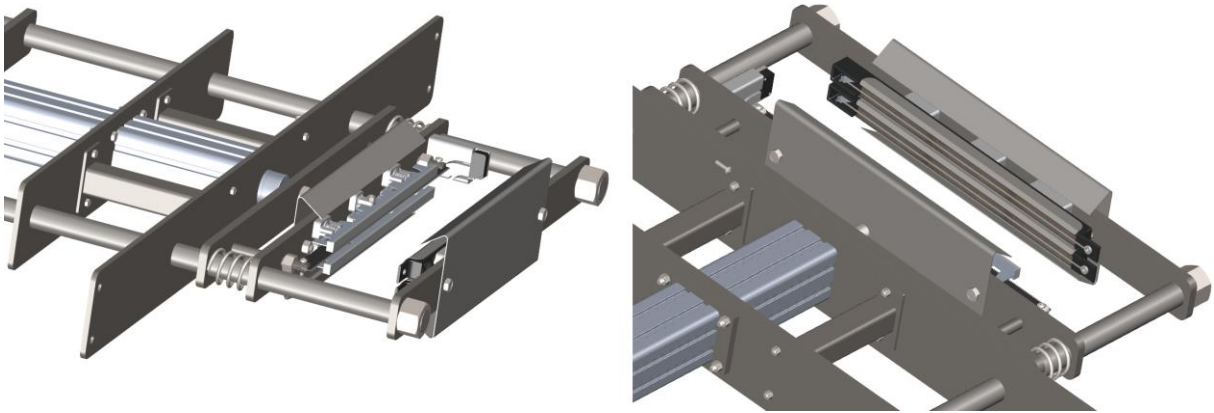
Circuito neumático para el sello horizontal y corte



Para el diseño del sello horizontal por impulso se ha adaptado el subsistema a la estructura existente que es accionada por un sistema neumático. Para el sello por impulso se dispone de niquelinas, cauchos y teflón para evitar que el plástico quede adherido a las niquelinas. Además, se cuenta con un fin de carrera que envía la señal al controlador de manera que activa las niquelinas para sellar la bolsa plástica.

Figura 44

Subsistema de sello por impulso



La fuerza que ejerce el pistón neumático se determina como se muestra a continuación:

$$F = P \cdot A$$

$$F = P \cdot \left(\frac{\pi \cdot d^2}{4} \right)$$

Donde: F : Fuerza

P : Presión

A : Área del pistón

d : Diámetro del pistón

$$F = 0.6 \text{ MPa} \cdot \left(\frac{\pi \cdot 0.050^2}{4} \right)$$

$$F = 1\,178.1 \text{ [N]}$$

$$F = 120.1 \text{ [kgf]}$$

Una vez que se ha determinado la fuerza que ejerce el pistón neumático, se realiza el análisis de tensiones de la base del sello por impulso donde se encuentra ensamblada la niquelina y teflón (ver Figura 45).

Figura 45

Espectro de tensiones (base del sello por impulso)

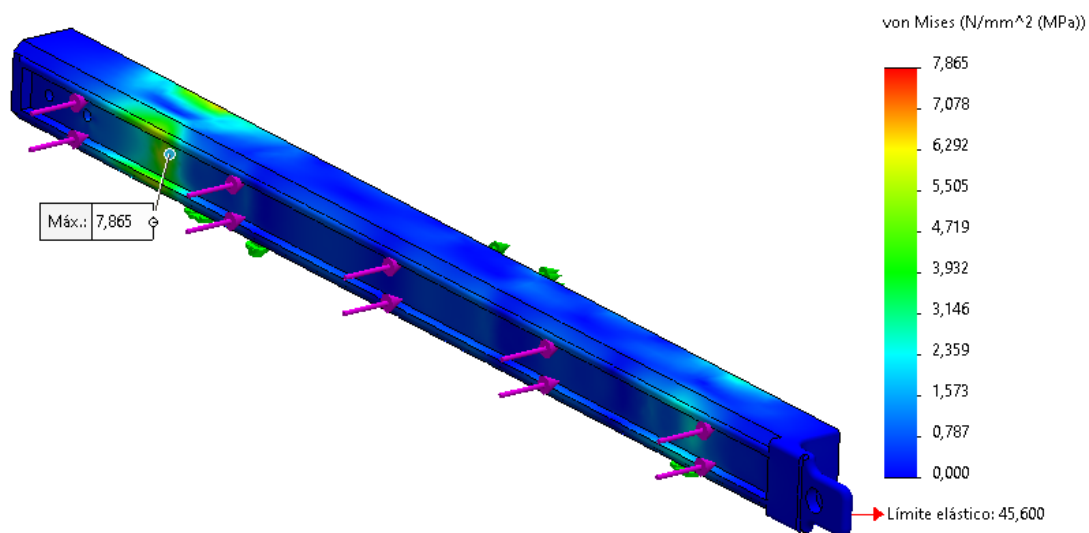
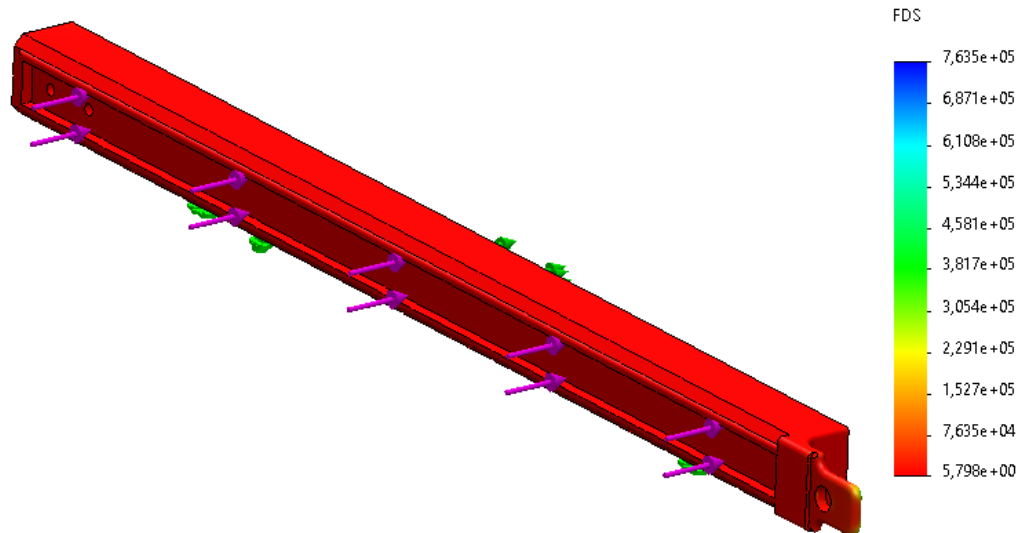


Figura 46

Factor de seguridad (base del sello por impulso)



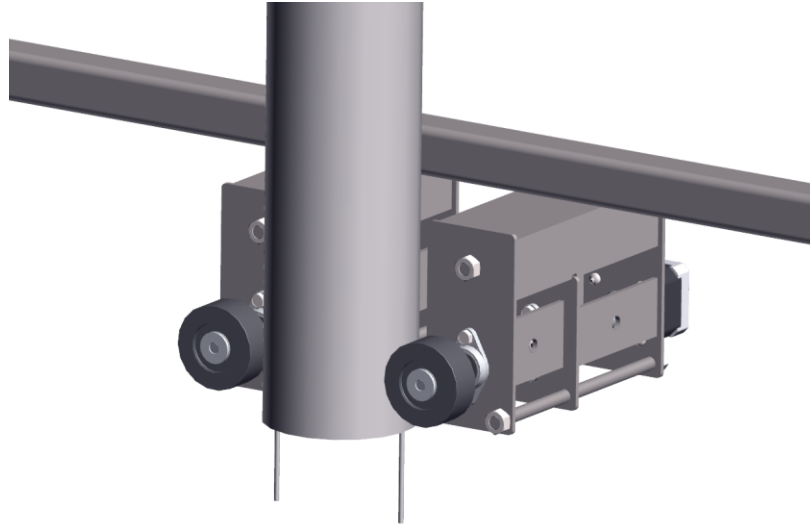
De la Figura 46 se puede observar un factor de seguridad mínimo de 5.79, es decir el elemento analizado resiste sin inconvenientes la fuerza que ejerce el pistón.

Subsistema de arrastre de la funda (Us22)

El subsistema de arrastre se compone de 2 motores, ejes, chumaceras, acoples flexibles y cilindros de neopreno para ejercer la acción de arrastre (ver Figura 47).

Figura 47

Subsistema de arrastre

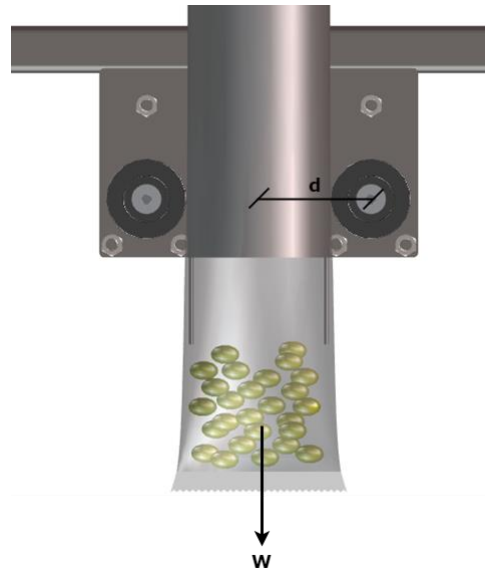


Cálculo del torque de los motores del subsistema de arrastre

Para seleccionar los motores para el sistema de arrastre se debe tomar en cuenta que estos tengan el torque necesario para soportar el peso que ejerce la funda con el producto alimenticio. A continuación, se realiza el cálculo del torque mínimo del motor:

Figura 48

Fuerza y distancia que intervienen para el cálculo del torque del motor



En la Figura 48 se puede observar cómo actúa el peso del producto alimenticio que está en la funda sobre las ruedas de neopreno del subsistema de arrastre, donde W representa el peso y d es la distancia. Entonces el torque se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$T = \frac{W}{2} \cdot d$$

$$W = 1 \text{ [kgf]} \quad d = 7.14 \text{ [cm]}$$

$$T = 3.57 \text{ [kgf} \cdot \text{cm]}$$

$$T = 0.35 \text{ [N} \cdot \text{m]}$$

Para la selección del motor se debe tomar en cuenta que este tenga un torque mínimo de $3.57 \text{ [kgf} \cdot \text{cm]}$.

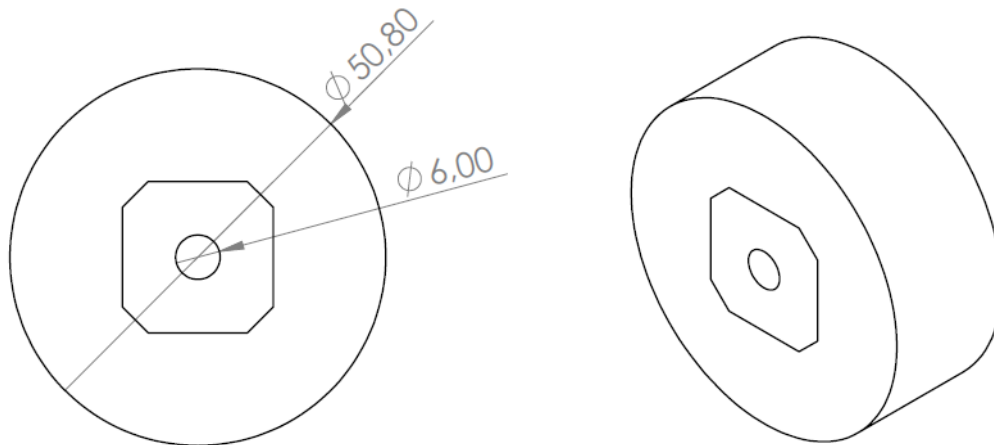
Diseño de los ejes

En la sección anterior se determinó el torque al que estará sometido el sistema de arrastre, con este valor se puede determinar el esfuerzo al que estarán sometidos los ejes debido a la torsión.

Para el diseño de los ejes se parte del diámetro que tienen las ruedas de neopreno comerciales para poder acoplarlas (ver Figura 49).

Figura 49

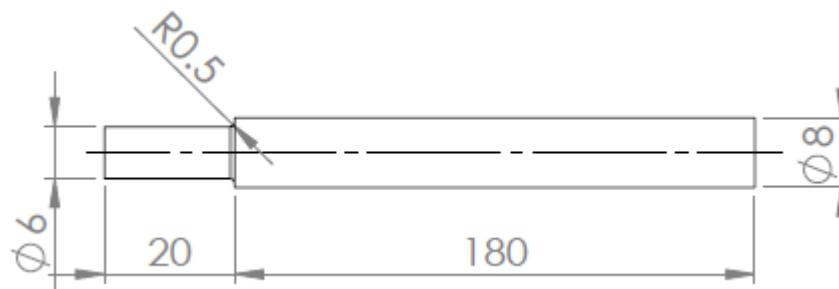
Geometría de las ruedas de neopreno



Comercialmente se dispone de varilla lisa de 8 mm de diámetro de acero al carbono, se decidió elaborar los ejes con la varilla lisa y se realizó un cilindrado hasta 6 mm para ensamblar con las ruedas de neopreno, tomando en cuenta que el eje deberá tener un redondeo en el cambio de sección para disminuir el concentrador de esfuerzos (ver Figura 50).

Figura 50

Geometría del eje para el sistema de arrastre



El esfuerzo debido a la torsión está definido por:

$$\tau = \frac{T \cdot r}{J}$$

Donde: T : Torque

r : radio del eje

J : Momento polar de inercia

El momento polar de inercia se calcula como se muestra a continuación:

$$J = \frac{\pi \cdot r^4}{2}$$

$$J = 1.272 \cdot 10^{-10} m^4$$

Reemplazando los datos, el valor del esfuerzo debido a la torsión es:

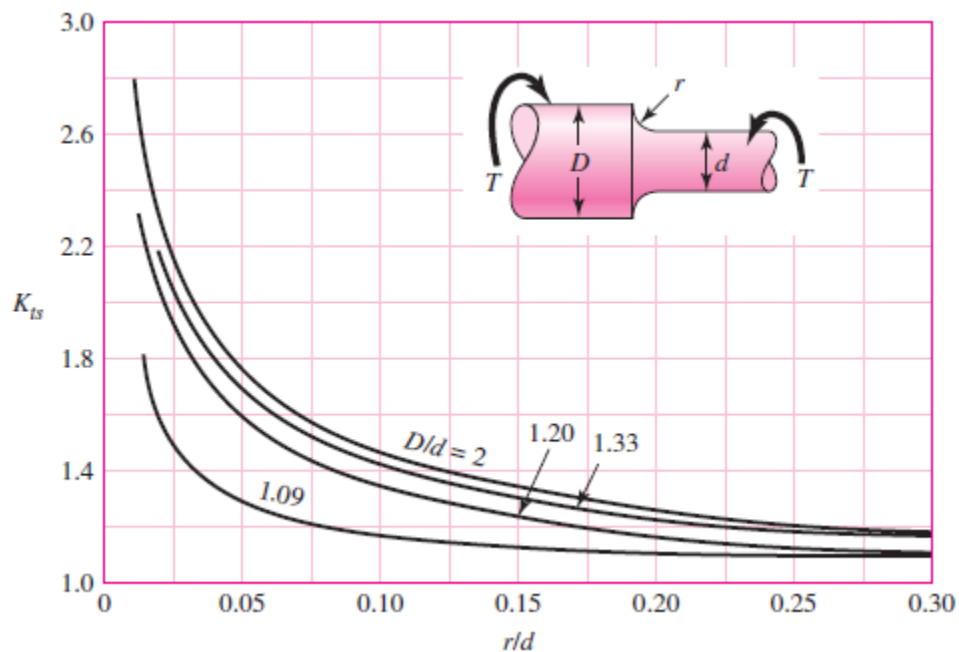
$$\tau = 8.25 MPa$$

Se debe considerar el concentrador de esfuerzos K_{ts} debido a que existe un escalón. El

valor de K_{ts} se obtiene de la figura que se muestra a continuación:

Figura 51

Concentrador de esfuerzos para eje redondo aplicando torsión



Nota. Recuperado de “Diseño en ingeniería mecánica de Shigley” (p. 1008), por R. Budynas, K. Nisbett, 2008, McGraw-Hill.

El valor de $r/d = 0.0833$ y $D/d = 1.33$ según la geometría que se indica en la Figura 50. Con los valores de r/d y D/d calculados se obtiene el valor K_{ts} mediante las curvas que se muestran en la Figura 51.

$$K_{ts} = 1.5$$

Por lo tanto, el esfuerzo máximo τ_{max} se obtiene de la siguiente manera:

$$\tau_{max} = \tau \cdot K_{ts}$$

$$\tau_{max} = 12.38 \text{ MPa}$$

En este caso el cortante es puro debido a la torsión, las tensiones normales son nulas. Aplicando la teoría de Von Mises el esfuerzo equivalente queda definido como se muestra a continuación:

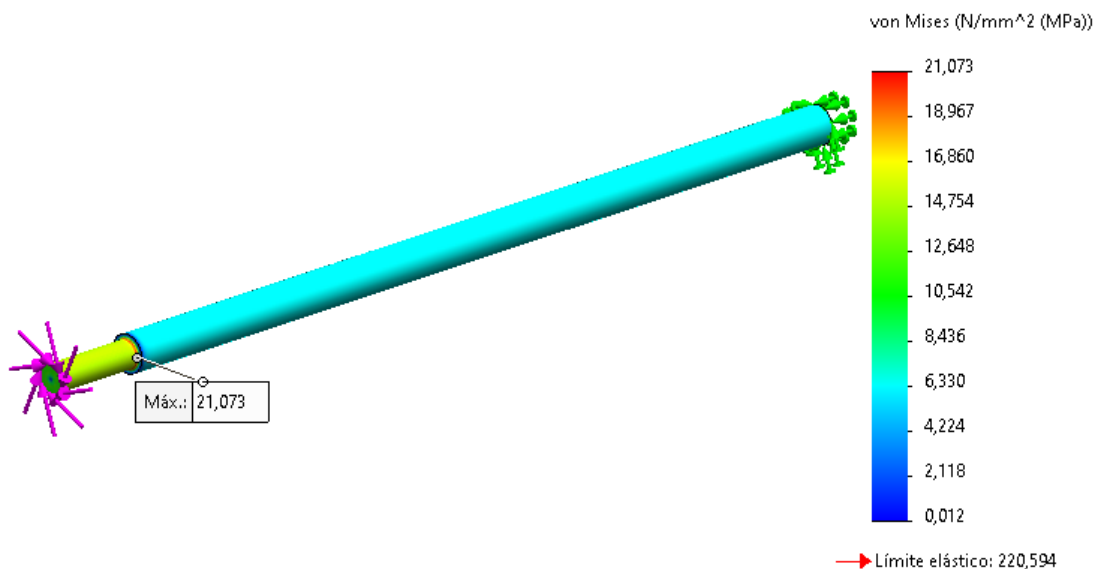
$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y^2 + 3 \cdot \tau_{xy}^2}$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{3} \tau_{max}$$

$$\sigma_{eq} = 21.44 \text{ MPa}$$

Figura 52

Espectro de tensiones (eje del sistema de arrastre)



Los cálculos realizados se corroboran con los resultados que arroja la simulación realizada en SolidWorks (ver Figura 52).

Una vez calculado el esfuerzo equivalente, se determina el factor de seguridad:

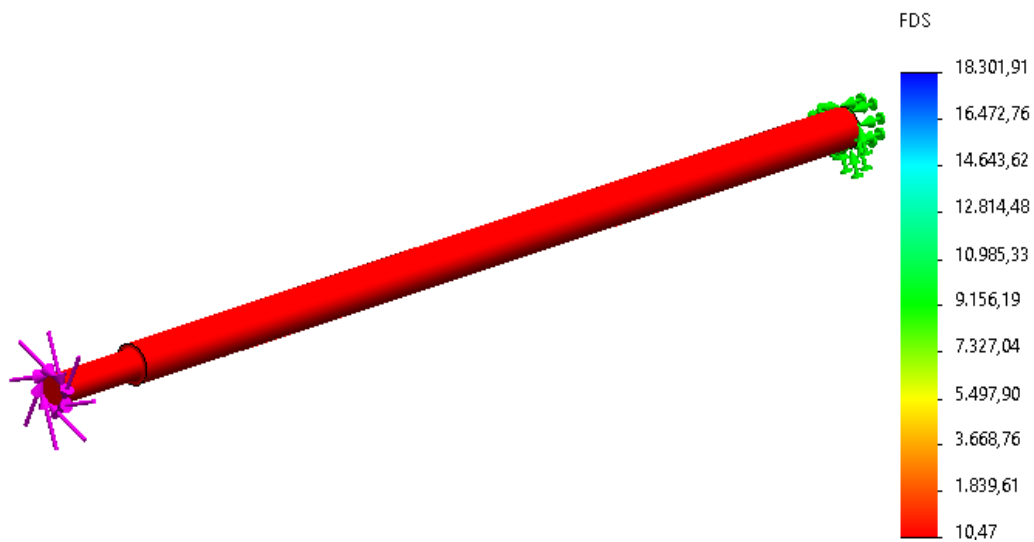
$$FS = \frac{S_y}{\sigma_{eq}}$$

$$FS = 10.26$$

El valor del factor de seguridad indica que el eje soporta el esfuerzo producido por la torsión.

Figura 53

Factor de seguridad (eje del sistema de arrastre)



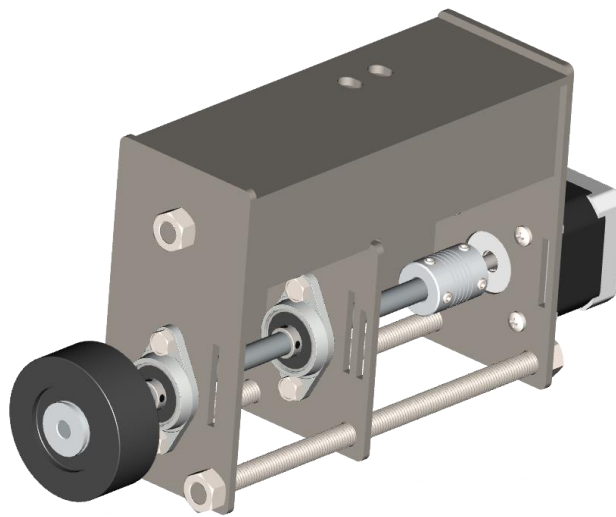
El factor de seguridad calculado coincide con el valor arrojado por la simulación, verificando que los cálculos se han realizado de manera correcta.

Diseño de las estructuras del subsistema de arrastre

La estructura de soporte para el motor, chumacera, eje y acople flexible se realizó en acero ASTM A36 mediante corte láser, con el fin de mantener el eje de las ruedas de neopreno y el eje del motor concéntricos. En la Figura 54 se presenta el diseño de la estructura para el sistema de arrastre, donde se evidencia los componentes antes mencionados.

Figura 54

Estructura del subsistema de arrastre



Para realizar el análisis de tensiones se consideró el peso del motor, aproximadamente de 0.25 kg, además del peso propio de la estructura (ver Figura 55).

Figura 55

Espectro de tensiones de la estructura del subsistema de arrastre

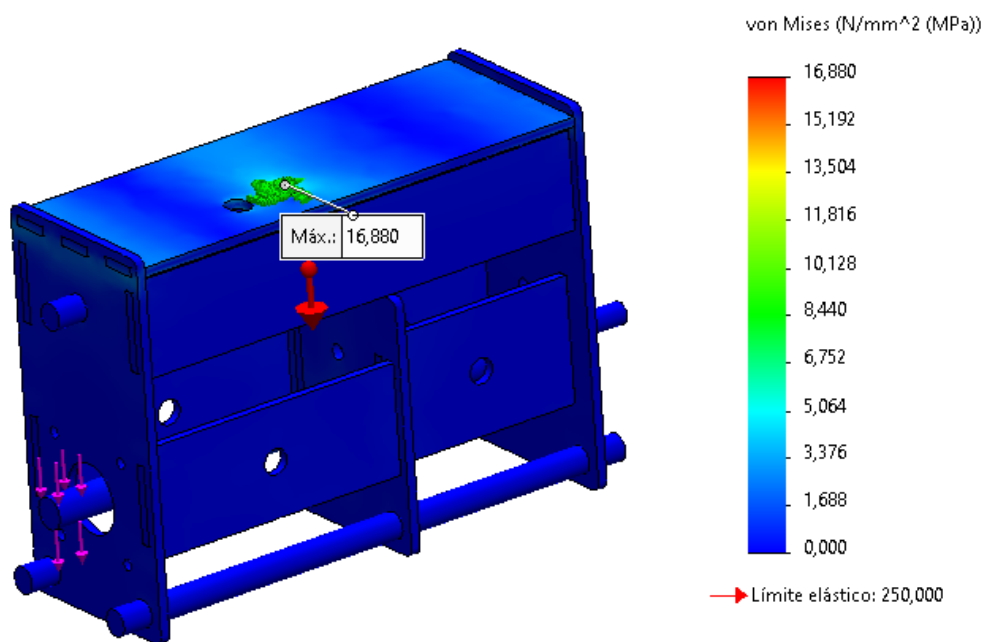
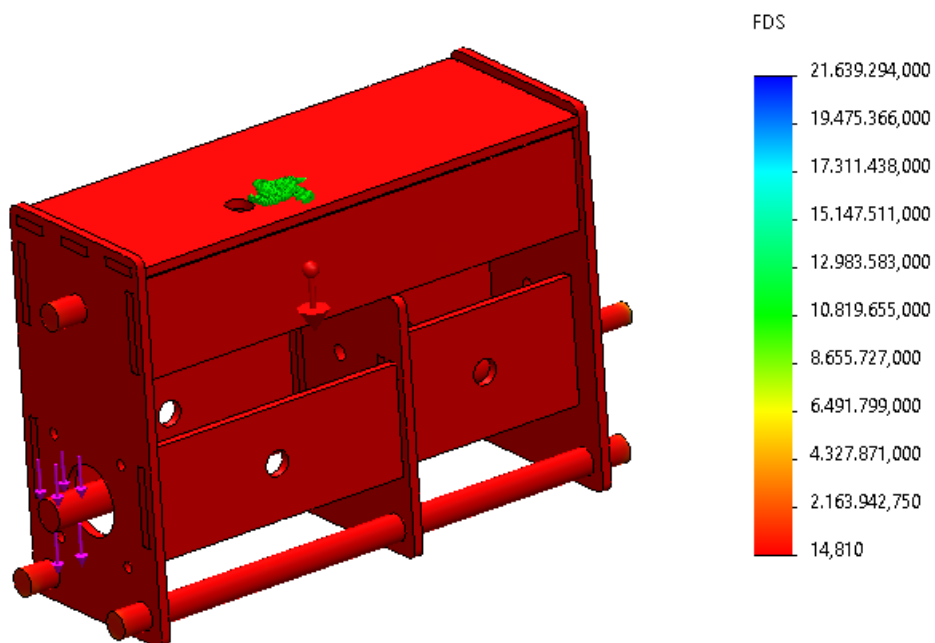


Figura 56

Factor de seguridad de la estructura del subsistema de arrastre



En la Figura 56 se muestra el espectro del factor de seguridad de la estructura, donde se tiene un valor mínimo de 14.81, lo cual indica que la estructura cumple con el criterio de demanda capacidad.

Además de la estructura que se muestra en la Figura 54, se requiere de un soporte para poder anclar a la máquina. Se empleó tubería cuadrada de 30 mm y 1.5 mm de espesor y pletina de 3 mm de espesor. El diseño del soporte se muestra en la Figura 57

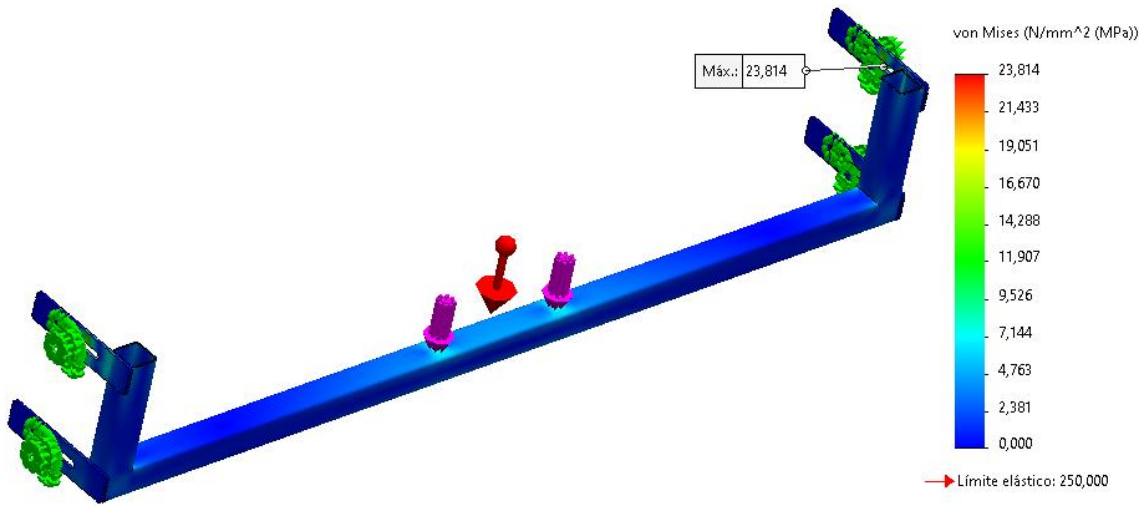
Figura 57

Soporte del subsistema de arrastre



Figura 58

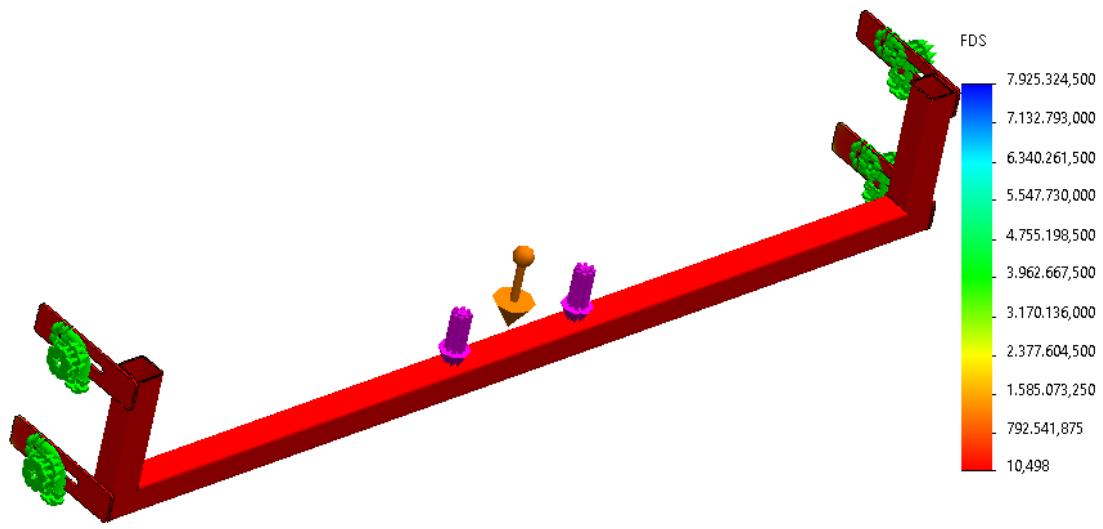
Espectro de tensiones del soporte del subsistema de arrastre



Luego de haber realizado el análisis de tensiones del soporte, se obtuvo un esfuerzo máximo de 23.81 MPa, valor que se encuentra por debajo del límite elástico del material.

Figura 59

Factor de seguridad del soporte del subsistema de arrastre



De la Figura 59 se tiene un factor de seguridad de 10.5, por lo tanto, el soporte del subsistema de arrastre resistirá sin inconvenientes las cargas a las que se encuentra sometido.

Diseño del sistema eléctrico y electrónico (Us41)

Una vez que se ha diseñado el sistema mecánico de la empacadora volumétrica, se debe realizar la integración con el sistema eléctrico y de control. En la presente sección se detalla la selección y dimensionamiento de los elementos que permiten automatizar la máquina.

Selección del controlador

Para el control de la máquina empacadora se propone el uso de un microcontrolador o un PLC, a continuación, se detalla acerca de estos dispositivos de control, así como ventajas y desventajas que presentan al ser utilizados en la industria.

Microcontrolador PIC

Los microcontroladores son circuitos electrónicos que pueden ser programadas para realizar las tareas que se requieran dentro del proceso. Es importante destacar que estos dispositivos son económicos, bajo consumo de energía y relativamente económicos. Una de las desventajas de los microcontroladores es que se necesita acondicionar entradas y salidas, para el ámbito industrial se requiere del diseño de la etapa de potencia, lo cual incrementa el costo por el uso de componentes adicionales. (Universidad La Salle, 2017)

PLC

Un PLC es una computadora industrial que sirve para controlar procesos dentro de plantas, fábricas, etc. El uso de estos dispositivos busca reducir la intervención humana dentro de las aplicaciones industriales que puedan resultar de alto riesgo a los operarios. Las ventajas que otorga un PLC es la facilidad de programación, son robustos y poseen alta confiabilidad y bajo mantenimiento. La desventaja de estos dispositivos es el costo, en muchos casos se requiere de módulos extra para adicionar el número de entradas y salidas.

En la Tabla 8 se presenta los resultados de la evaluación para la selección del dispositivo para controlar la máquina. Como se puede observar, el PLC obtuvo la mejor calificación, siendo la facilidad de programación el criterio de mayor relevancia.

Tabla 8

Evaluación de alternativas para el controlador de la máquina empacadora

Criterios de selección	Peso	Concepto			
		Microcontrolador		PLC	
		Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada
Costo (mayor costo/menor calificación)	20%	2	0.4	1	0.2
Fiabilidad	20%	2	0.4	3	0.6
Facilidad de programación	30%	2	0.6	3	0.9
Robustez	15%	1	0.15	3	0.45
Mantenimiento	15%	2	0.3	3	0.45
	100%		1.85		2.6

Selección del PLC

Para seleccionar el PLC, se debe definir los requerimientos del sistema, los cuales se enlistan a continuación:

- Alimentación: 110 [VAC]
- Entradas digitales: 8 a 24 [VDC]
- Salidas digitales: 6 tipo relé
- Salidas digitales: 1 tipo transistor
- Compacto

PLC Siemens S7 1200

En la Tabla 9 se presenta las características del PLC S7-1200, el modelo presentado tiene la capacidad de ampliación de "Signal Board" que se requiere para enviar las señales de pulso al controlador del motor pasos.

Tabla 9*Características del PLC Siemens S7-1200*

Marca	Siemens
Modelo	S7-1200
CPU	1215C
Versión	AC/DC/Relé
Alimentación	110/220 VAC
Memoria de trabajo	125 KB
Memoria de carga	4 MB
Entradas digitales (DI)	14DI a 24VDC
Salidas digitales (DO)	10 DO tipo Relé
Entradas analógicas (AI)	2AI
Salidas analógicas (AO)	2AO(V/mA)

Nota. Recuperado de “Lista de Precios Productos Industriales Eléctricos”, 2022, Siemens.

PLC Xinje

En la Tabla 10 se muestra las características del PLC Xinje, modelo XD3-24RT-E, tiene la particularidad de tener salidas tipo relé y tipo transistor sin la necesidad de añadir módulos al PLC.

Tabla 10*Características del PLC Xinje XD3-24RT-E*

Marca	Xinje
Modelo	XD3-24RT-E
Alimentación	90 - 260 VAC
Memoria de trabajo	256 KB
Entradas digitales (DI)	14DI a 24VDC
Salidas digitales (DO)	8 DO tipo Relé y 2 transistor
Módulos de expansión	Máximo 10
Contador de alta velocidad	3

Nota. Recuperado de “XD series PLC”, Xinje.

En la Tabla 11 se puede observar los resultados para seleccionar el PLC que permite el control y automatización de la máquina empacadora. El PLC de la marca Xinje presenta las mejores características, en especial el precio y la más importante es que este PLC tiene salidas digitales, tanto de tipo relé, como de tipo transistor, a diferencia del modelo S7-1200 de Siemens que requiere de un módulo extra para poder enviar señales de tipo pulso.

Tabla 11

Evaluación de alternativas de PLC

Criterios de selección	Peso	Concepto			
		Siemens S7-1200		Xinje XD3-24RT-E	
		Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada
Costo (mayor costo/menor calificación)	30%	1	0.3	3	0.9
Fiabilidad	25%	3	0.75	2	0.5
Disponibilidad	15%	3	0.45	2	0.3
Memoria de trabajo	15%	2	0.3	3	0.45
Capacidad de ampliación de módulos	15%	2	0.3	3	0.45
	100%		2.1		2.6

Entradas y salidas del PLC

Las entradas del PLC admiten un voltaje de 24 [VDC], en la Tabla 12 se presenta a mayor detalle la función de cada entrada. Los sensores infrarrojos requieren de una alimentación de 5 V por lo que requieren acondicionamiento para el correcto funcionamiento.

Tabla 12*Entradas del PLC*

Entradas		
No.	Denominación	Alimentación
1	Sensor infrarrojo para detectar vaso	5 VDC
2	Sensor infrarrojo para detectar comida	5 VDC
3	Interruptor de inicio/paro	24 VDC
4	Interruptor de modo de marcha	24 VDC
5	Botón paro de emergencia	24 VDC
6	Botón manual motor AC	24 VDC
7	Botón manual motor a pasos	24 VDC
8	Botón manual electroválvulas	24 VDC

Las salidas del PLC son alimentadas con 24 [VDC], de la Tabla 13 se puede observar que la mayoría de actuadores requieren de una alimentación de 24 [VDC] por lo tanto, para activar el motor monofásico se requiere de un relé que tenga una bobina que admita 24 [VDC], al igual que el controlador de sello por impulso y sus contactos soporten 110 [VAC].

Tabla 13*Salidas del PLC*

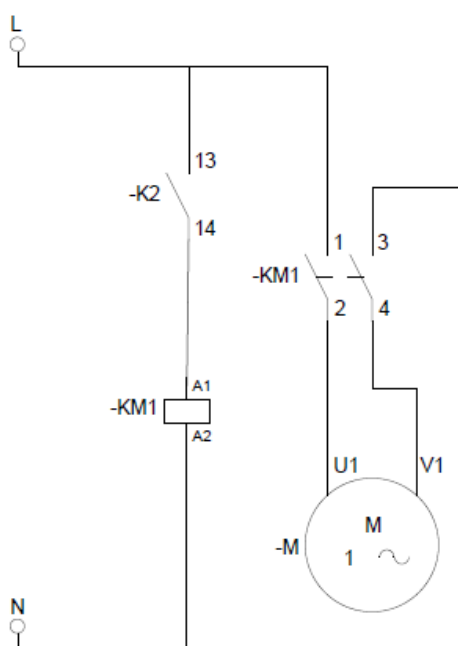
Salidas		
No.	Denominación	Alimentación
1	Motor a pasos	24 VDC
2	Luz verde de funcionamiento	24 VDC
3	Luz azul de paro	24 VDC
4	Luz roja de emergencia	24 VDC
5	Motor monofásico AC	110 VAC
6	Electroválvula del sello horizontal	24 VDC
7	Controlador sello por impulso	110 VAC

Sistema eléctrico y electrónico para el subsistema de dosificación

El actuador encargado de la dosificación de producto alimenticio de la empacadora volumétrica es un motor monofásico que trabaja a 110 VAC. Para activar y desactivar el motor se emplea un relé con alimentación a 24 VDC debido a que las salidas del PLC seleccionado van a trabajar con dicho voltaje. Mientras que para el arranque del motor se emplea un contactor que trabaje con un voltaje mínimo de 110. Además, este subsistema tiene 2 sensores para detectar la presencia o ausencia de comida, y la detección del vaso para iniciar el proceso.

Figura 60

Circuito de control y potencia del motor AC



Relé para el control del motor monofásico

En la Figura 61 se presenta el relé que sirve para la activación y desactivación del motor monofásico. Se seleccionó un relé encapsulado debido a que este componente no estará en constante activación/desactivación.

Figura 61

Relé encapsulado de 8 pines



Nota. Recuperado de “Reles encapsulados”, Electro SERTEC,

(<http://electrosertec.com/reles/630-mk2p-reles-encapsulados-camsco-8-pines.html>)

Contactor para el motor monofásico

De la placa del motor monofásico se tiene el valor de intensidad nominal igual a 3.12 [A] que se puede observar en la Figura 62

Figura 62

Placa de datos del motor monofásico

weg		W12		15740033		18DELZ2020		1057406590		HECHO EN BRAZIL		IEC 60034-1		QR CODE	
W63		SERV.S1		AISL F		DIS		1- AMB 40°C		ALT 1000m		IP54		IC 411	
		V		Hz	A		HP	RPM							
1		110	220	80	3.06	1.53	0.25	1705							
2		120	240	80	3.12	1.56	0.25	1720							
		FP	FS	AFS		Rend IE		η 100%							
1		0.98	1.15	-	-	-	-	54.5%							
2		0.96	1.15	-	-	-	-	50.0%							
DIAGRAMA DE CONEXIÓN: G												D:6201-ZZ T:6201-ZZ			

Partiendo del dato de la corriente, se realiza el cálculo para dimensionar el contactor.

$$I_{\text{contactor}} = I_{\text{nominal}} \cdot 1.25 = 3.9 \text{ [A]}$$

Comercialmente, el contactor que maneja menor corriente es el contactor tripolar de 9 A. En la Figura 63 se puede observar el contactor seleccionado para el arranque del motor AC.

Figura 63

Contactor tripolar categoría AC3



Selección de sensores para detección de vaso y comida

El uso de sensores es para detectar cuando hay alimento para que el proceso sepa si seguir o no, entonces, no es necesario saber la distancia, sólo si existe un objeto en el vaso. Por lo tanto, se plantea una doble confirmación de sensores de proximidad para saber si hay un vaso y en el momento que hay un vaso saber si hay comida dentro del vaso.

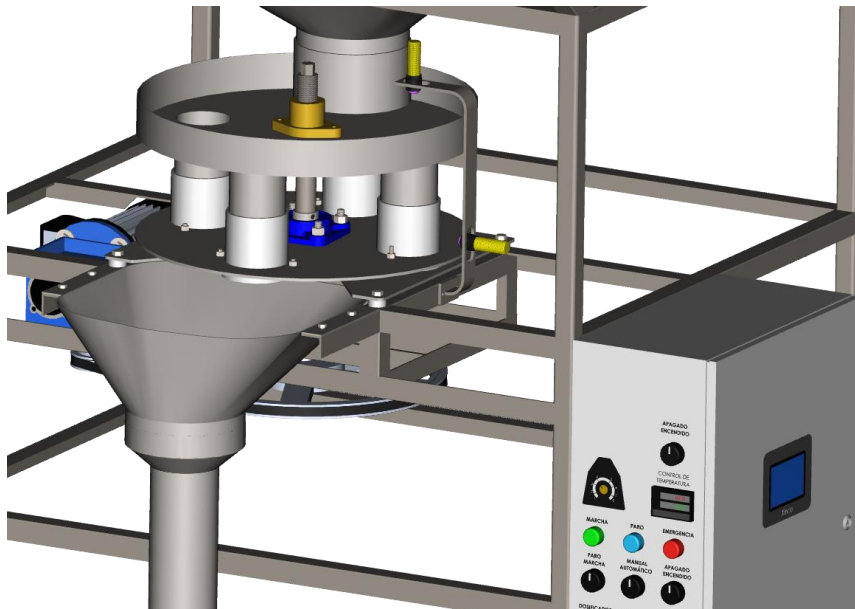
Se elige dos sensores infrarrojos por las siguientes razones:

- Envía una señal binaria, fácil de interpretar mediante compuerta lógicas.
 - (Comida & Vaso) -Proceso continua.
 - (No comida & Vaso) – Proceso se detiene.
 - (Comida & No vaso) – Intermedio entre vasos.
- Detecta cualquier sólido independientemente de su material, ya que debe detectar metal (plato de dosificación), material orgánico (el alimento granulado) y plástico (vasos volumétricos).

- Fácil acondicionamiento, de bajo costo y muy común en el mercado local.

Figura 64

Subsistema de dosificación (sensores, vasos volumétricos)



En la Figura 64 se aprecia el subsistema de dosificación con los dos sensores infrarrojos implementados ubicados de manera que sirvan para detectar un vaso y dar inicio al proceso de sellado, y un segundo sensor que sirve para detectar la presencia de producto dentro del vaso, en caso de no existir producto, la máquina no realiza la acción de arrastre de la manga, tampoco sella y corta la bolsa, con el propósito de no desperdiciar la manga plástica ante la ausencia de producto alimenticio.

Los sensores infrarrojos seleccionados necesitan de una alimentación de 5 VDC y al disponer de una fuente de 24V se necesita de un convertidor reductor (Buck) para alimentar ambos sensores. En la Figura 65 se muestra el convertidor reductor que transforma el voltaje DC en una salida de menor tensión. Básicamente este dispositivo se compone de transistor, diodo, inductor y un capacitor. (Solectro, 2022)

Figura 65

Convertidor reductor (buck)



Nota. Recuperado de “Convertidores Buck/Boost”, Solectro,
(<https://solectroshop.com/es/blog/convertidores-buckboost-step-upstep-down-n82>)

Sistema eléctrico y electrónico para el subsistema de sello y corte

Para sellar y cortar las fundas se requiere del control del sistema de sellado por resistencias, sistema de sellado por impulso y la integración con el sistema neumático.

Controlador PID y relé para el sistema de sello por resistencias

Para garantizar una temperatura estable en las mordazas se emplea un controlador PID que se encarga de controlar las resistencias mediante la retroalimentación del sensor de temperatura.

El relé seleccionado para operar la parte de potencia es un relé de estado sólido debido a que este componente estará en constante activación y desactivación por lo que requiere de una alta velocidad de conmutación.

Relé para el sistema de sello por impulso

Para el sellado por impulso lo que se va a activar y desactivar son las niquelinas mediante un controlador que cuenta con niveles de regulación de tiempo según el tipo de material y calibre que se esté empleando. Para llevar a cabo esta acción se realiza mediante un relé encapsulado (ver Figura 61) que se activará mediante la correspondiente señal del PLC. El relé seleccionado tiene una bobina que se alimenta con 24 VDC y sus contactos de potencia manejan una tensión alterna de 110 VAC.

Electroválvula para el sistema neumático

Las características de la electroválvula seleccionada se presentan en la Tabla 14

Tabla 14

Características de la electroválvula

Electroválvula	
Marca	XCPC
Modelo	4V210-08DC2
Tipo	5/2 retorno por muelle
Rango de presión	0.15 - 0.8 MPa
Resistencia a la presión garantizada	1.2 MPa
Temperatura de funcionamiento	5 - 50°C
Alimentación	24 VDC
Grado de protección	IP65
Frecuencia máxima	5 ciclos/s

Nota. Recuperado de “SDA Series Compact Cylinder”, 2017, china-pneumatic

(<http://www.china-pneumatic.com/4V-3V-200-4A-3A-100-Series.html>)

Además, se requiere de los siguientes componentes para realizar las conexiones neumáticas y eléctricas para el correcto funcionamiento del sistema:

- Electroválvula 5/2 a 24 VDC
- Regulador de flujo 1/8 x 8 mm
- Racor Codo 1/8 x 8 mm
- Silenciador de bronce

Sistema eléctrico y electrónico para el subsistema de arrastre

Selección del motor para el sistema de arrastre

Para accionar el sistema de arrastre de la funda se requiere de 2 motores que permitan el giro de las ruedas de neopreno. Para la selección del motor se debe tener en cuenta que se requiere de un torque mínimo de 3.57 [kgf · cm]. A continuación, se presentan las alternativas para la elegir el motor.

Motor de inducción monofásico

En la Figura 66 se muestra un motor monofásico de inducción, se propone este tipo de motores debido a que es de baja potencia, requieren menos mantenimiento que un motor trifásico, además del bajo costo. Una desventaja que presenta para la aplicación es la elevada velocidad, por lo que requiere de un variador de frecuencia o un sistema mecánico reductor de velocidad, lo cual eleva el precio final de todo el sistema.

Figura 66

Motor de inducción monofásico



Nota. Recuperado de “Motor monofásico”, 2022, Direct Industry, (<https://www.directindustry.es/prod/fujian-mindong-electric-co-ltd/product-126201-1570023.html>)

Motor a pasos

En la Figura 67 se puede observar un motor a pasos, este tipo de motores emplean corriente continua. Por lo general, se divide en 200 pasos, lo que resulta en que cada paso gira 1.8° . La principal ventaja es que son precisos y el control del motor resulta sencillo, otorga alto torque a baja velocidad. Además, poseen un amplio rango de velocidad, ya que esta depende de la frecuencia de los pulsos enviados por el controlador.

Figura 67

Motor a pasos



Nota. Recuperado de “Motor a pasos”, 2020, Oriental Motor, (<https://www.orientalmotor.com/stepper-motors/technology/stepper-motor-overview.html>)

Servomotor

Un servomotor (ver Figura 68) funciona bajo el concepto de las señales PWM, el controlador se encarga de enviar una onda tipo cuadrada que varía en el tiempo según la posición que se requiera. Dentro de las ventajas al igual que los motores a pasos es que proporcionan un control preciso respecto a la velocidad y posición angular. Una de las desventajas de los servomotores es el elevado costo si son comparados con los motores de inducción o motores a pasos.

Figura 68*Servomotor*

Nota. Recuperado de “Servomotores”, 2022, CLR, (<https://clr.es/blog/es/servomotor-cuando-se-utiliza/>)

En la Tabla 15 se presenta los resultados para la selección del motor del subsistema de arrastre, donde 3 indica el criterio de mayor aceptación. La evaluación de los 3 tipos de motores resulta en que un motor a pasos es la mejor opción para ser implementada.

Se decidió usar motores a pasos debido a que este tipo de motores no presenta un elevado consumo de corriente al arrancar, además por la sencillez para controlarlo.

Tabla 15

Evaluación de alternativas para el motor del subsistema de arrastre

Criterios de selección	Peso	Concepto					
		Inducción		Motor a pasos		Servomotor	
		Calif.	Evaluación ponderada	Calif.	Evaluación ponderada	Calif.	Evaluación ponderada
Costo (mayor costo /menor calificación)	30%	2	0.6	2	0.6	1	0.3
Facilidad de control	20%	1	0.2	3	0.6	3	0.6
Precisión	20%	2	0.4	3	0.6	3	0.6
Mantenimiento	10%	2	0.2	2	0.2	2	0.2
Espacio (mayor espacio / menor calificación)	20%	1	0.2	3	0.6	3	0.6
	100%		1.6		2.6		2.3

Dado el torque que requiere el sistema de arrastre, se selecciona el motor NEMA 17 y tiene las siguientes características:

- Torque: 0.42 [Nm] – 4.28 [kgf · cm]
- Voltaje nominal: 24 [VDC]
- Corriente nominal: 1.5 [A]
- Peso: 0.25 [kg]
- Pasos por revolución: 200
- Ángulo de paso: 1.8°

Controlador del motor para el sistema de arrastre

El motor a pasos para el sistema de arrastre necesita de un controlador que envíe los pulsos para la puesta en marcha. El modelo del controlador el motor es TB 6560 que tiene las siguientes características:

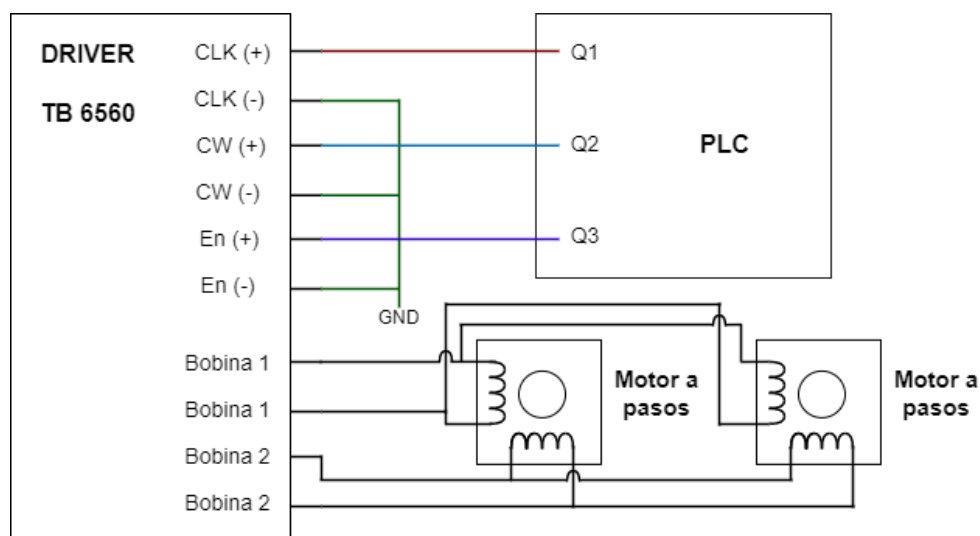
Alimentación: 24 VDC

Corriente máxima: 3 A

El esquema de conexión del controlador con el motor se muestra en la Figura 69. El pin llamado *CLK* es la señal de pulso que recibe el motor, dependiendo de la frecuencia del tren de pulso la velocidad de rotación variará. El pin denominado *CW* sirve para definir el sentido de giro, sea horario o antihorario y el pin llamado *En* es la señal que sirve para habilitar el controlador.

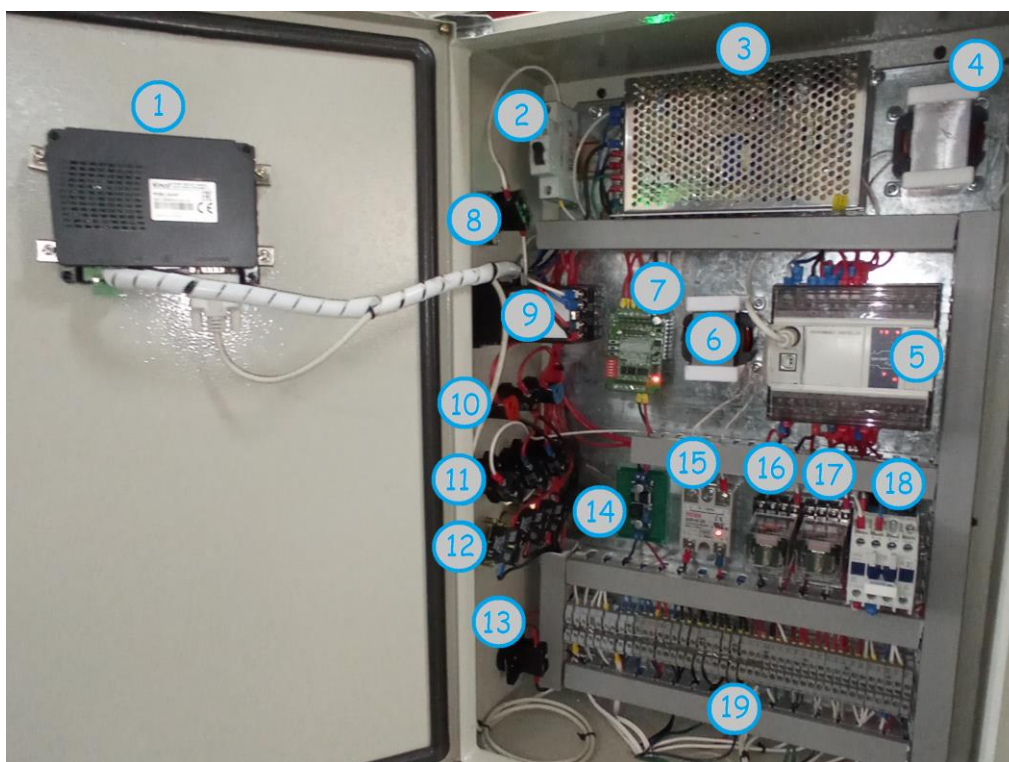
Figura 69

Esquema de conexión entre el driver, motor y controlador de la máquina



Tablero eléctrico

En la presente sección se muestra la disposición de los componentes eléctricos y electrónicos para la puesta en marcha de la máquina empacadora. En la Figura 70 se puede observar en detalle el tablero eléctrico.

Figura 70*Vista interior del tablero eléctrico*

De la Figura 70 se puede observar los dispositivos de conexión, control, señalización, mando y protección que se enlistan a continuación:

1. HMI
2. Disyuntor
3. Fuente de poder 24 V
4. Transformador para niquelina del sello por impulso superior
5. PLC
6. Transformador para niquelina del sello por impulso inferior
7. Driver TB 6560
8. Interruptor general (encendido/apagado)
9. Controlador de las resistencias eléctricas
10. Luces piloto

11. Interruptores
12. Botones para accionar los actuadores
13. Paro de emergencia
14. Convertidor reductor (Buck)
15. Relé de estado sólido
16. Relé encapsulado (Controlador por impulsos)
17. Relé encapsulado (Motor AC)
18. Contactor
19. Borneras

Figura 71

Vista exterior del tablero eléctrico



En la Figura 71 se tiene la disposición de los dispositivos de mando y señalización del tablero eléctrico y se describen a continuación:

20. Controlador del sello por impulso

21. Luz piloto de marcha
22. Luz piloto de paro
23. Luz piloto de paro de emergencia
24. Selector de marcha/paro
25. Selector de modo manual/automático
26. Interruptor para encender/apagar las resistencias eléctricas
27. Botón para activar el motor AC
28. Botón para activar el motor a pasos
29. Botón para activar la electroválvula

Para una mejor comprensión de los dispositivos de mando y señalización se colocaron etiquetas para diferenciar claramente la función de cada dispositivo (ver Figura 72)

Figura 72

Etiquetas en el tablero eléctrico



Diseño del sistema de control (Us42)

En el PDS, presentado en la Tabla 3, se muestran los requerimientos generales del proyecto y a través del desarrollo de generación de conceptos se obtuvo los elementos y requisitos del proyecto específicos, estos proporcionan toda la información sobre cómo va a actuar cada subsistema identificado, así como su interacción.

Una vez disponibles, se inicia el proceso de desarrollo de diseño de control identificando los modos de operación mediante GEMMA y aplicando GRAFCET en diseño y programación.

Integración de sistemas

Para poder realizar un eficiente control se parte estableciendo la secuencia del proceso y la evolución de este a través de la máquina. En la Figura 73, se muestra la interacción y clasificación del subsistema de automatización y control (Us4) con el resto de subsistemas. En la Figura 74 y Figura 75 se puede apreciar la integración de todos los subsistemas que conforman la máquina empacadora.

Figura 73

Integración de subsistemas

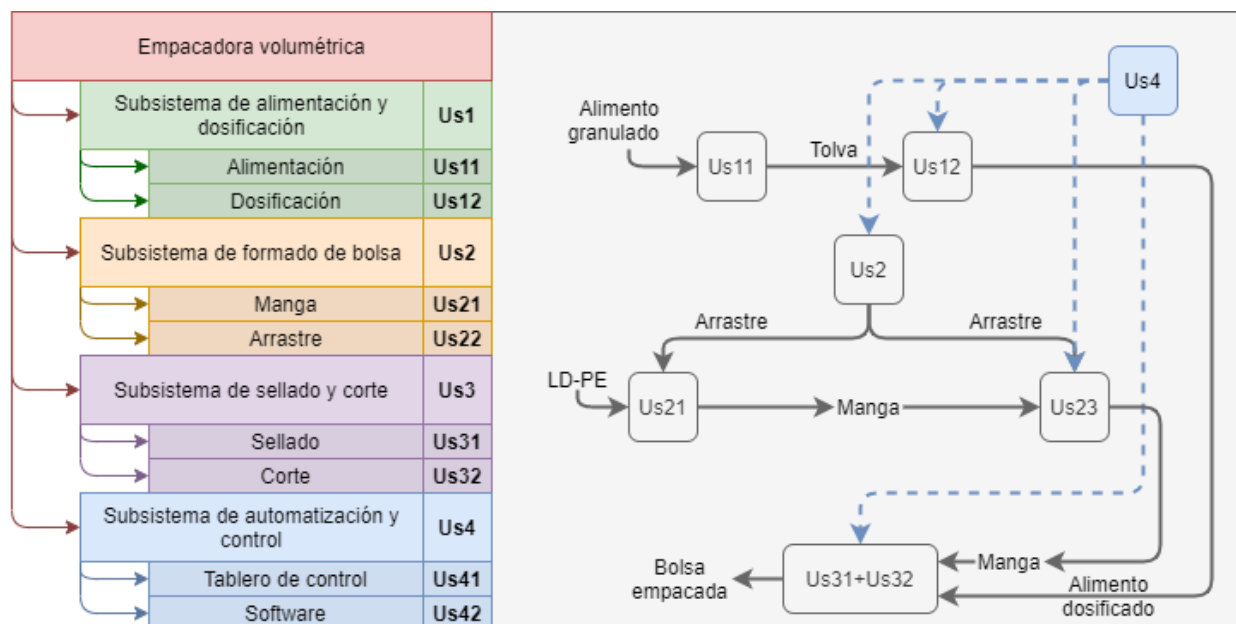


Figura 74

Vista frontal de la máquina empacadora volumétrica

**Figura 75**

Vista isométrica de la máquina empacadora volumétrica



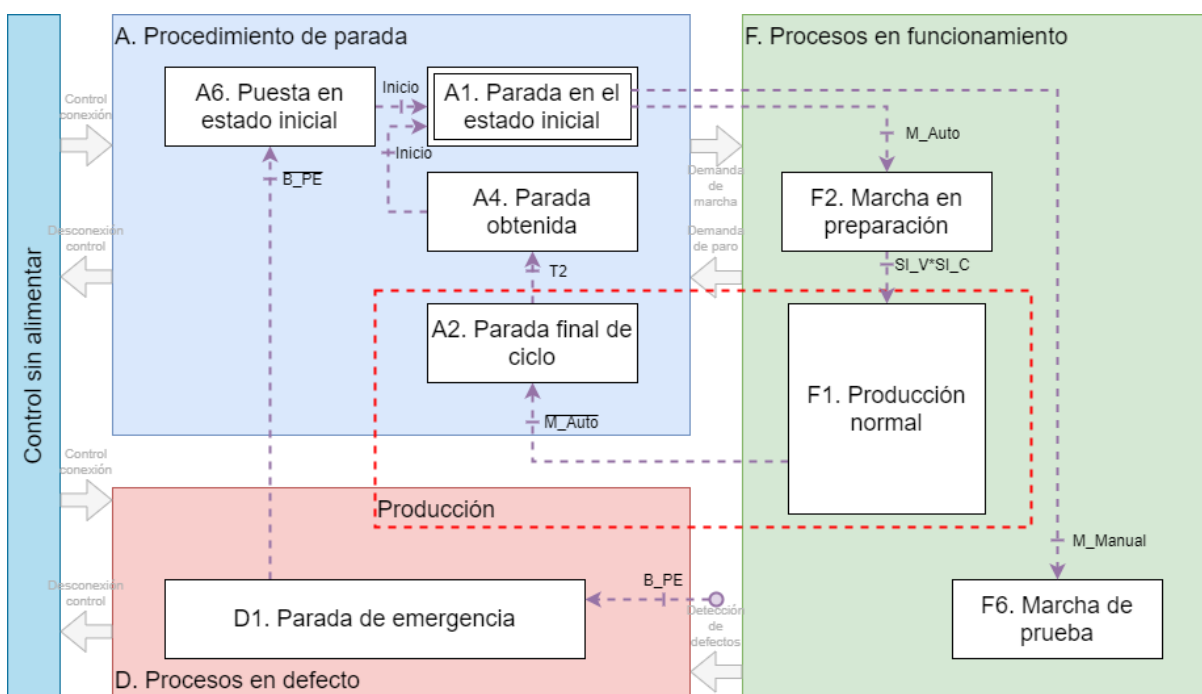
Modos de operación

La guía GEMMA fue desarrollada por ADEPA (Agence pour le Développement of Appliquée Productique). Esta es una herramienta gráfica que permite generar de manera sencilla y comprensible, todos los estados en los que puede evolucionar un proceso automatizado y así se asegura evitar inconsistencias e imprevistos. (Alvarez et al., 2012)

Para identificar la forma de operación del proceso, en la Figura 76 se muestra los modos de marcha que se utilizan para los procesos del proyecto actual, basados en la guía GEMMA.

Figura 76

GEMMA del proceso de empaquetado volumétrico



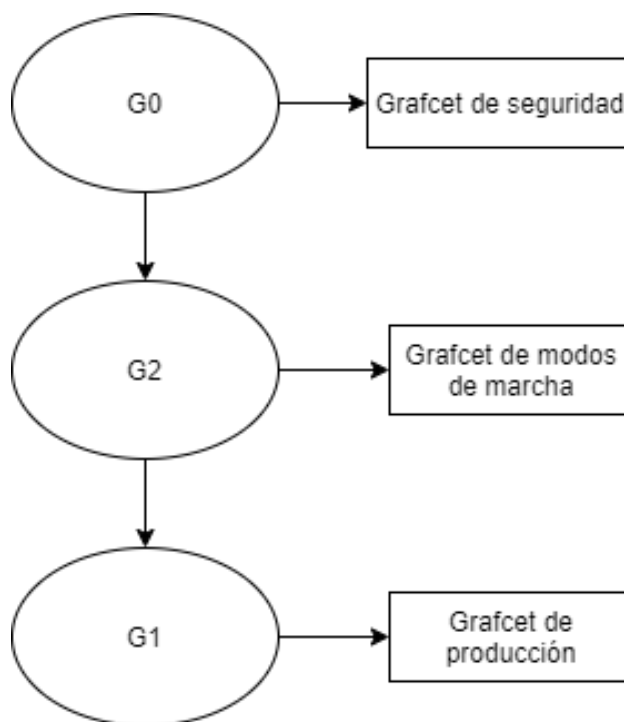
Programación estructurada

Para poder traducir lo mostrado en la Figura 76, se debe definir detalladamente el ciclo de producción, emergencia y fallas del proceso teniendo en cuenta todos los modos de operación identificados y jerarquizar su control.

Por razones de claridad y simplificar el entendimiento del proceso al momento de programar el controlador, se va a utilizar una “programación estructurada”, para permitirse dividir las tareas principales modularmente, llamados bloque de programa (Balcells & Romeral, 1997). En la Figura 77, se muestra la jerarquización que se va a utilizar en la programación estructurada del presente proyecto, el cual se lo realizará en lenguaje Ladder.

Figura 77

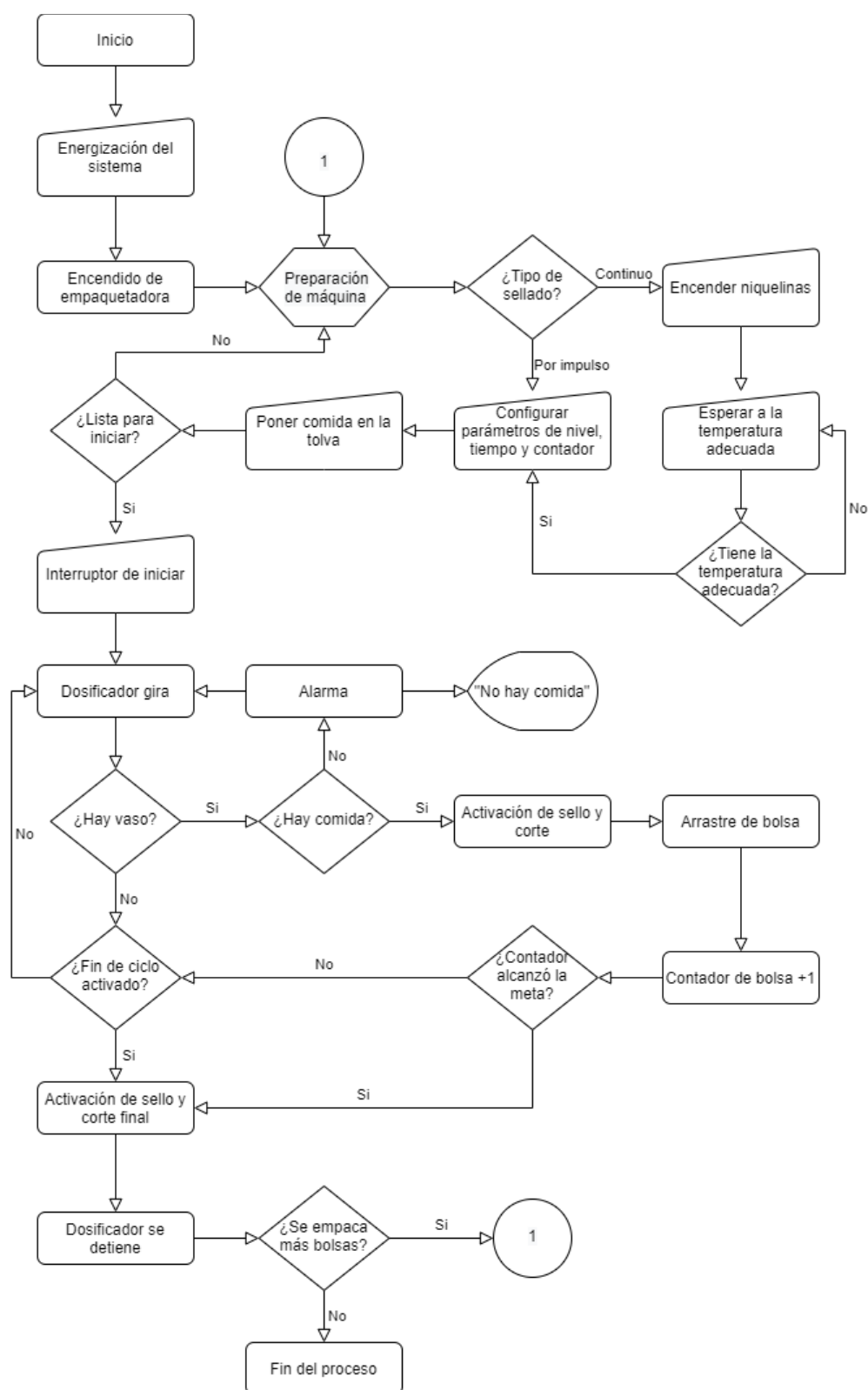
Jerarquización de grafcet



Mediante el uso de un diagrama de flujo, mostrado en la Figura 78, se expone el tanto el funcionamiento del proceso como la programación de la máquina. Es importante seguir el flujo en el orden establecido para obtener un óptimo funcionamiento de la empacadora, así como evitar daños en el operador y la máquina.

Figura 78

Diagrama de flujo del proceso



Interfaz Hombre-Máquina (HMI)

La interfaz debe tener la característica de ser de fácil operación y simple de entender al mismo tiempo que de toda la información necesaria además de permitir una manipulación de parámetros. Por lo tanto, se usa la metodología propuesta para la guía ergonómica de diseño de interfaces de supervisión (GEDIS), para esto se deben establecer los factores más importantes tomando en cuenta los indicadores de evaluación presentados en la Figura 79. (Pere Ponsa, 2015)

Figura 79

Esquema general de la metodología de desarrollo de la interfaz



Nota. Recuperado de “Diseño de pantallas: Guía GEDIS” (p. 3), por A. Pere Ponsa, 2015.

Los factores más importantes que se establecen, acorde al proceso y máquina son:

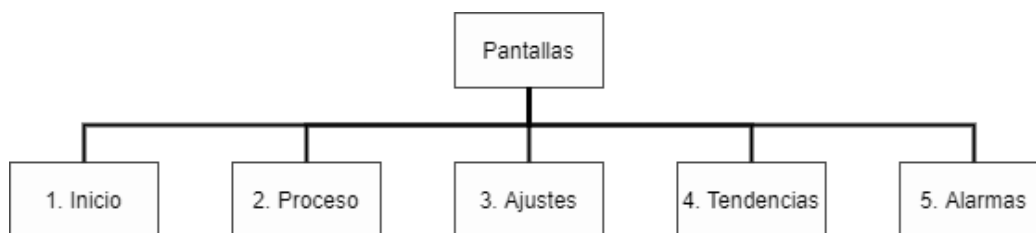
- Estado del proceso y equipos en tiempo real.
- Comandos de modo manual.
- Ajuste de parámetros como el tiempo de sellado, contador y nivel de dosificación.
- Representación visual del histórico de bolsas empacadas, así como la información de los granos empacados.

- Alarmas de notificación para cuando no hay comida o hay cambio en los ajustes y alarma de paro de emergencia.

Como solución ante los requerimientos del proceso se plantean el desarrollo de las pantallas descritas en la Figura 80.

Figura 80

Pantallas de interfaz



Una vez que se tiene los requerimientos del proceso, factores más importantes y como distribuirlos en una interfaz se aplican las directrices propuestas por la guía GEDIS, estos se describen en la Tabla 16.

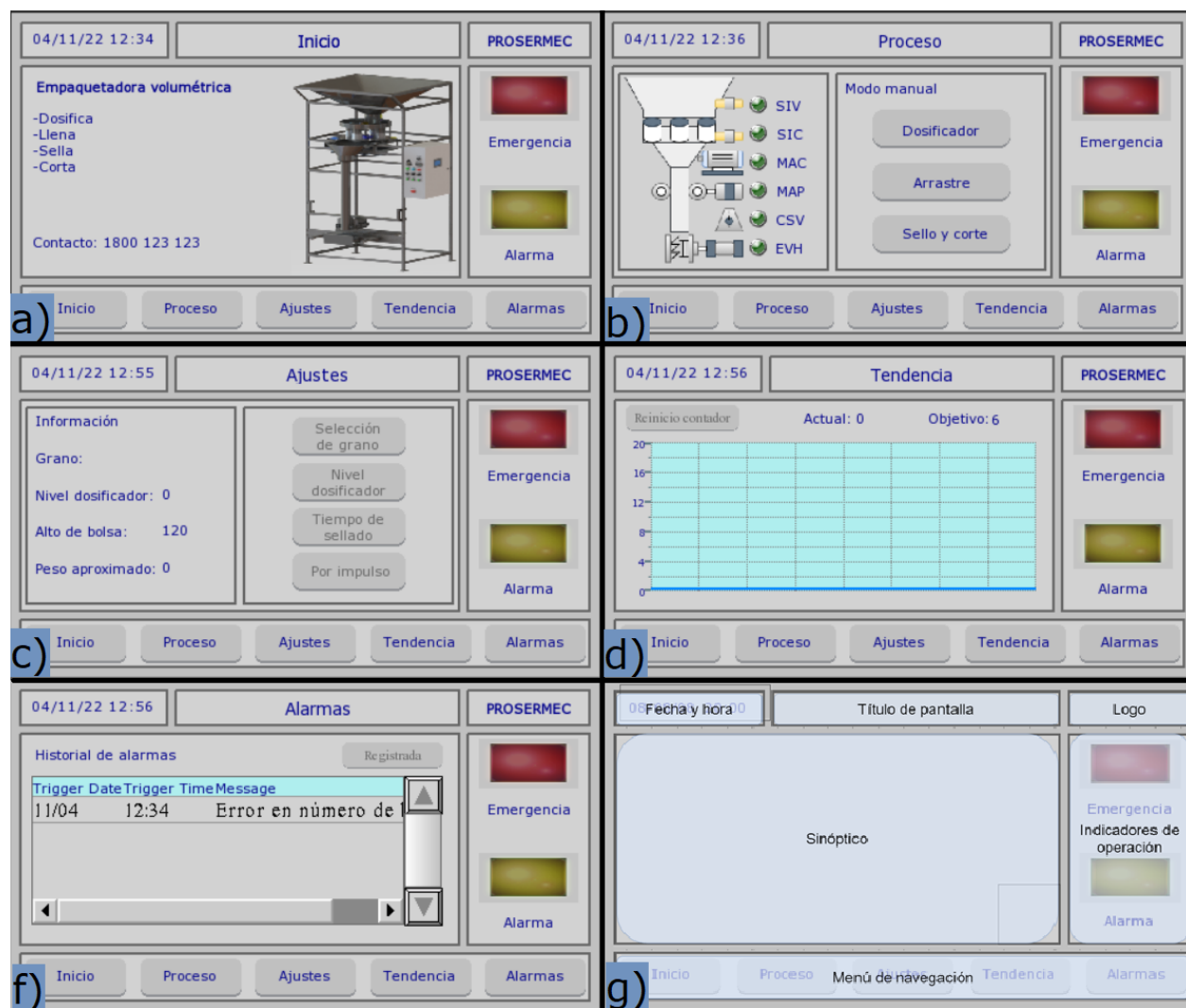
Tabla 16*Directrices e implementación de guía GEDIS en la interfaz*

Directriz	Concepto	Implementación
Arquitectura y Navegación	La arquitectura se refiere a las pantallas que se va a usar, mientras que la navegación se refiere a la jerarquización de estas y como moverse entre ellas.	Arquitectura: En la Figura 80 se muestran las pantallas que se van a usar. Navegación: En la Figura 82, literal g, se muestra la navegación de la interfaz.
Distribución	Se refiere a la distribución de información en la pantalla.	En la Figura 81 se muestra la plantilla utilizada con la distribución de la interfaz.
Color y texto	El color y texto deben ser estandarizados para que el operario entienda fácil y evitar la fatiga óptica.	Color: Una paleta de 2 colores pastel para el fondo de pantalla, un color para el texto, un color para información gráfica y 3 colores para lámparas (activación, alarma y emergencia). Texto: Fuente Ms Reference Sans Serif, tamaño 8 para texto general y tamaño 10 para títulos de pantalla.
Equipos y comandos	Muestra información para presentar el estado de los sensores y actuadores del proceso, además se considera la botonería para su manipulación.	En la Figura 82, literal b, se muestra la implementación de equipos y comandos.
Valores, tablas e ingreso de datos	Muestra las directrices para implementar información del proceso en forma numérica o gráfica.	En la Figura 82, literal d, se muestra la implementación de valores e ingreso de datos en forma de tendencias.
Alarmas	Muestra las directrices para presentar una alerta de anomalías o eventualidades en el proceso que requieran intervención del usuario.	Hay una alarma para falta de comida, dos alarmas para cambio de ajustes, una para contador completo y una para paro de emergencia.

En la Figura 81 se muestran todas las pantallas desarrolladas según los criterios expuestos en la Tabla 16, además de la plantilla con la distribución de información en la pantalla.

Figura 81

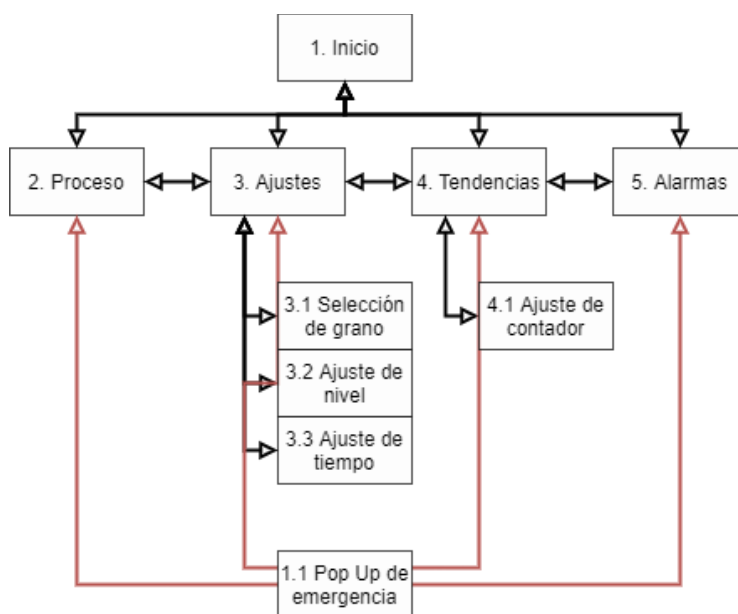
Pantallas desarrolladas en la interfaz



Para entender cómo moverse en la interfaz en la Figura 82 se presenta un esquema de navegación.

Figura 82

Esquema de navegación de la interfaz



CAPÍTULO IV

Pruebas y resultados

En el presente capítulo se exponen las pruebas realizadas a partir de experimentos, así como su interpretación en los resultados.

Para validar el proyecto se va a realizar pruebas de cada subsistema (Us1, Us2, Us3 y Us4) por separado, utilizando métodos experimentales acordes

Subsistema de alimentación y dosificación (Us1)

La función de este subsistema es dosificar alimento granulado continuamente en proporciones iguales, por lo tanto, se considera un instrumento de medición que debe tener propiedades de confiabilidad como: Exactitud, precisión, estabilidad y linealidad.

Según (General Motors Corporation, 2010), cualquier característica que permita dar conocimiento si el sistema es o no aceptable hay que definirla operativamente en caso de que no exista.

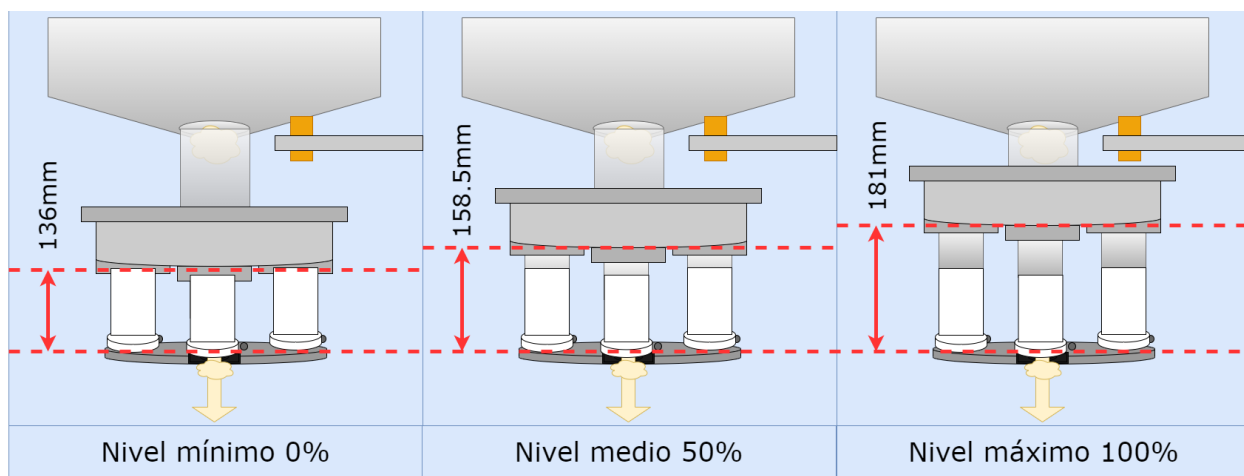
Las principales características para poder realizar esta definición son exactitud, precisión, repetibilidad y estabilidad. Para validar estas propiedades se va a caracterizar el instrumento utilizando herramientas de estadística descriptiva planteando 3 experimentos expuestos en la Tabla 17.

Tabla 17*Experimentos del subsistema de dosificación*

N°	Propiedad	Método de muestreo	Grano	Descripción
1	Exactitud y precisión	20 muestras por nivel	Maíz	Se toma 20 muestras continuas de un grano en niveles referenciales
2	Linealidad	20 muestras 3 niveles de dosificación del mismo grano	Maíz Haba, Arveja, Morochillo	Se toma muestra de 4 granos distintos en niveles referenciales
3	Repetibilidad			Se analiza el cambio de peso según el grano del experimento 2
3.1	Sensibilidad al volumen del grano	10 muestras de alto y ancho de los 4 granos analizados		Se toma muestras de dimensiones de granos para analizar la sensibilidad.

Experimento 1 – Exactitud y precisión

Para el análisis de exactitud y precisión, se realiza un experimento utilizando 20 libras de maíz para tostar, ya que este es el grano referencial con el que se diseñó la máquina, como en el nivel máximo de dosificación se estima una libra entonces se tomaran 20 muestras en 3 niveles de referencia, como se muestra en la Figura 83. Los datos obtenidos se muestran en la Tabla 18.

Figura 83*Variación de nivel de dosificación***Tabla 18***Datos obtenidos de pesos del maíz*

Muestra	Máximo [g]	Medio [g]	Mínimo [g]
1	458	383	332
2	457	386	328
3	457	384	335
4	455	390	332
5	459	388	322
6	457	393	330
7	456	392	333
8	454	394	329
9	454	393	337
10	453	392	331
11	456	388	326
12	449	388	330
13	449	389	337
14	458	389	330
15	449	390	330
16	461	389	329
17	456	389	328
18	454	380	327
19	454	393	336
20	453	392	330

Resultados de exactitud y precisión

En la Figura 84 se muestran los correspondientes gráficos de histogramas con ajuste de cada nivel realizados en el software Minitab.

Para entender la interpretación de estos datos, se presenta en la Figura 85, una gráfica de dispersión de puntos con el bias y la desviación estándar, debido a que según más pequeño sea el bias más exacto es el instrumento, así mismo mientras más pequeña es la variabilidad de medias (desviación estándar), más preciso es el instrumento.

Figura 84

Histograma de resultados en 3 niveles

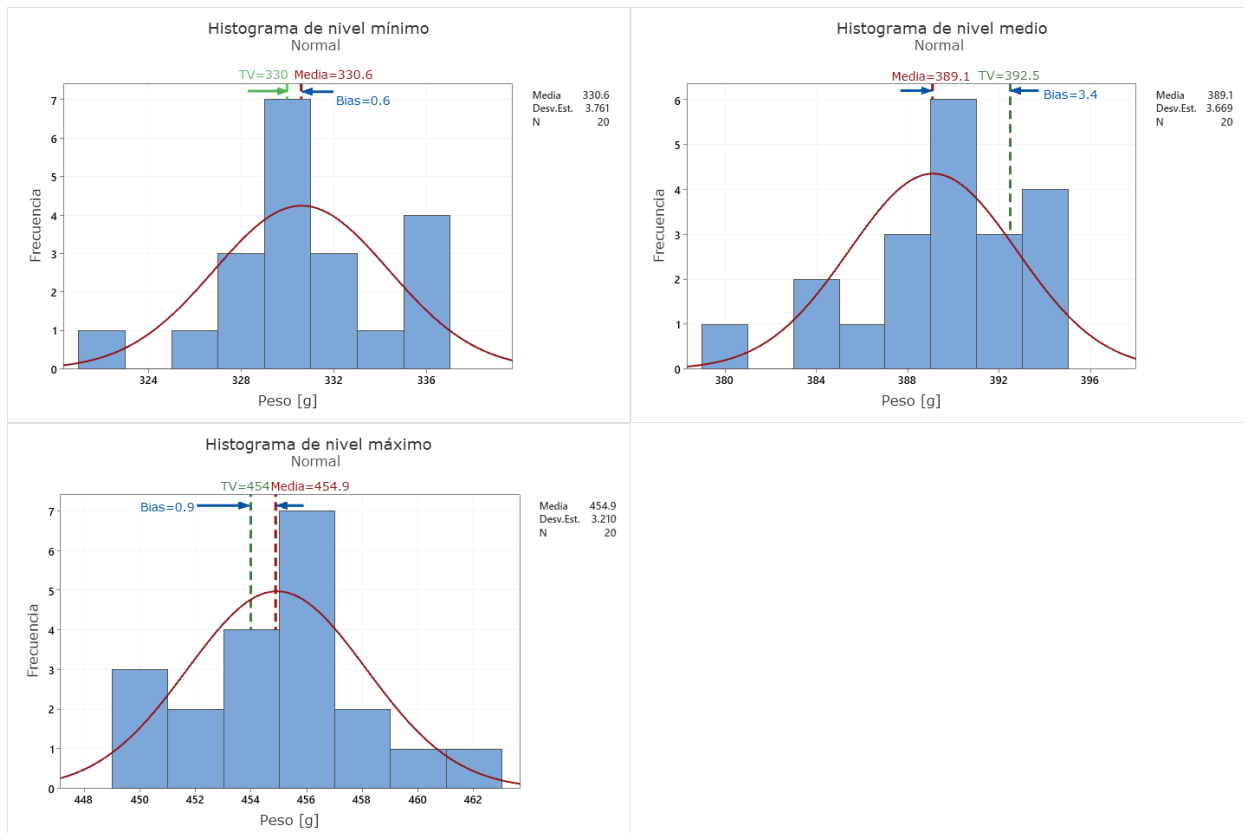
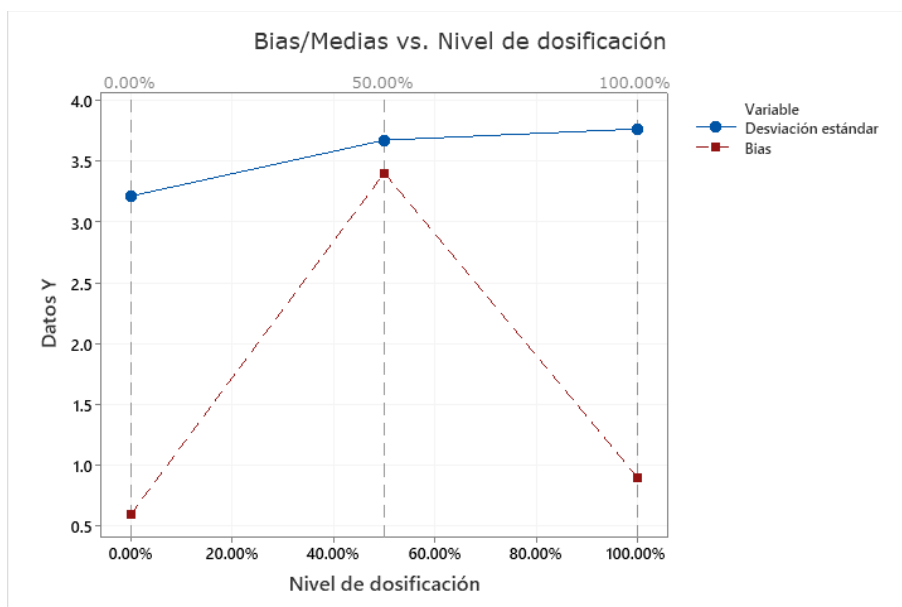


Figura 85

Gráfica de interpretación de datos



Se concluye que mientras más sube el nivel del dosificador la precisión mejora.

Mientras que conforme se acerca al centro del nivel de dosificador la exactitud tiene una notable decadencia. Es decir, el instrumento trabaja mejor en el nivel 0% y 100%. El peso de interés de los empaques es de 1 libra, donde se obtuvo un error de 0.20% que es considerado como alta exactitud del dosificador, mientras que la desviación estándar es de 3.21 gramos que se traduce en un 0.7% de error.

Experimento 2 y 3 – Linealidad y repetibilidad

Se realizó un experimento en conjunto para validar la linealidad y repetibilidad, se toman muestras de diferentes granos en los niveles referenciales (0%, 50% y 100%) para observar su linealidad y cómo esta varía el peso según el grano utilizado. Los datos obtenidos se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19

Datos obtenidos de peso de diferentes granos

Nivel	Altura	Maíz [g]	Haba [g]	Arveja [g]	Morochillo [g]
0%	136mm	331	295	490	455
50%	158.5mm	389	346	557	517
100%	181mm	455	390	646	607

En la Figura 86, se muestra una gráfica de dispersión con diferentes granos, debido a que el dosificador es volumétrico el peso varía según la densidad y tamaño del grano, por lo tanto, se tomó 4 granos de diferentes tamaños. Como se observa la linealidad de las gráficas se aprecia constante y para la baja variabilidad se tomó la relación entre el máximo y mínimo valor obteniendo resultados muy cercanos mostrados en la parte derecha de la misma gráfica.

Figura 86

Linealidad con diferentes granos

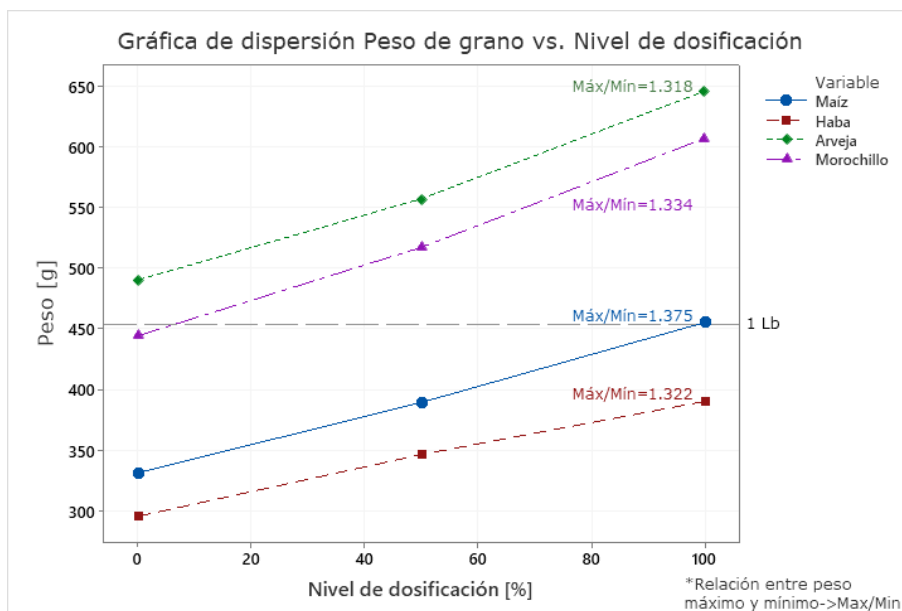


Figura 87

Empaques de diferentes granos (maíz, morochillo, haba y arveja)

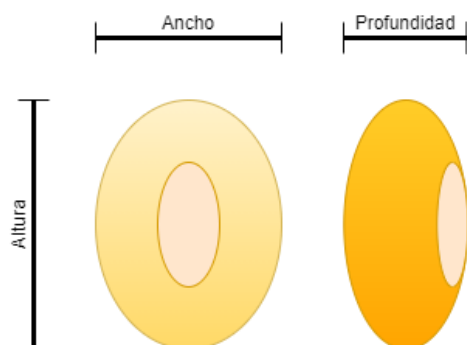


Experimento 3.1 – Relación Volumen/Peso

Para complementar el experimento 3, se toman 10 muestras de la altura, ancho y profundidad de los granos utilizados, como se muestra en la Figura 88 , a excepción de la arveja (casi esférica) de la cual sólo se toma una medida, esto se realiza con el fin de obtener la relación entre el peso que tiene cada grano según el nivel de dosificación y su volumen.

Figura 88

Medidas para muestreo de granos



En la Figura 89 se muestra los resultados del volumen de los granos utilizados, mientras que en la Figura 90 se muestra la relación de volumen con el peso que da cada grano en cada nivel de dosificación.

Figura 89

Resultados del volumen de los granos

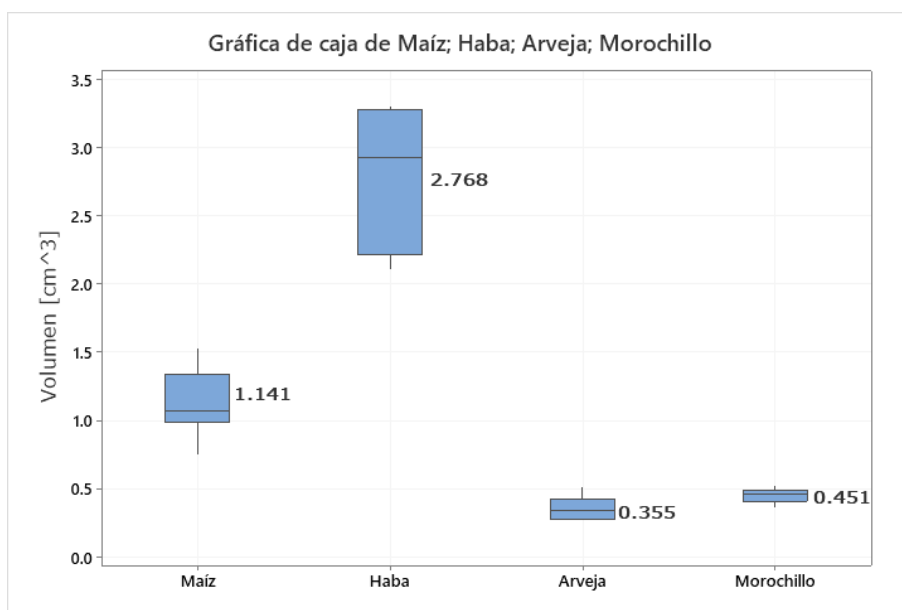
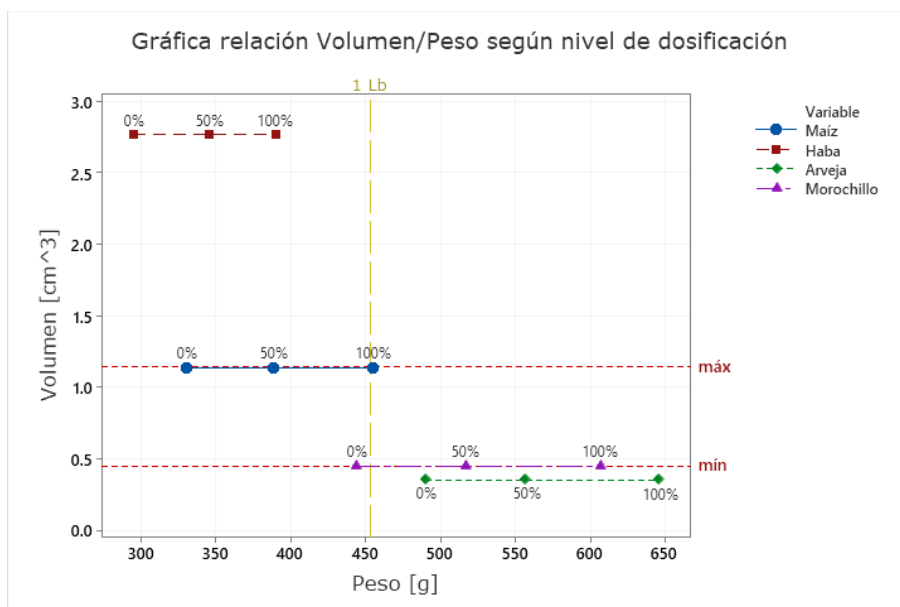


Figura 90

Relación Volumen / Peso de grano según nivel de dosificación



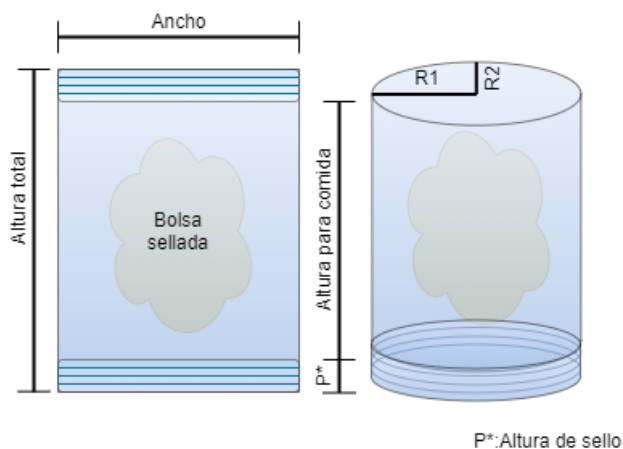
La información que obtenemos es que, si queremos dosificar una libra de alimento granulado, el grano tiene que tener una media de volumen entre 0.45 y 1.1 cm³. Es decir, el grano debe ser igual o más grande que un morochillo y menor o de igual tamaño que un maíz, cuando se requiera dosificar una libra de alimento.

Subsistema de arrastre (Us2)

En la Figura 91 se muestran las dimensiones a considerar para la altura que debe recorrer el sistema de arrastre según el volumen de comida que cabe en la bolsa.

Figura 91

Dimensiones para la altura de bolsa



$$Altura_{comida} = \frac{Volumen_{comida}}{\pi * r_1 * r_2}$$

$$r_1 + r_2 = \frac{2 * Ancho_{manga}}{\pi}$$

$$Longitud_{arrastre} = Altura_{comida} + 2 * Altura_{sello} = Altura_{comida} + 26mm$$

Se han definido 3 alturas de bolsa según el nivel de dosificación (0%, 50% y 100%), debido al cambio de volumen en el dosificador provoca que se cambie también el volumen de las bolsas y la dimensión que se puede manipular es la altura. En la Tabla 20 se muestra el volumen de los vasos volumétricos en cada nivel de dosificación, así como el volumen de la bolsa con el cambio de altura que debería tener.

Tabla 20

Alturas obtenidas para el sistema de arrastre

Nivel dosificación [%]	Volumen vaso [cm ³]	Altura total [mm]
0	600.83	189
50	700.23	221
100	799.63	249

Experimento para validación de arrastre

Se tomó las 20 muestras del Experimento 1 del subsistema de dosificación y se midió la altura neta de estas. Los resultados se muestran en la Tabla 21.

Tabla 21

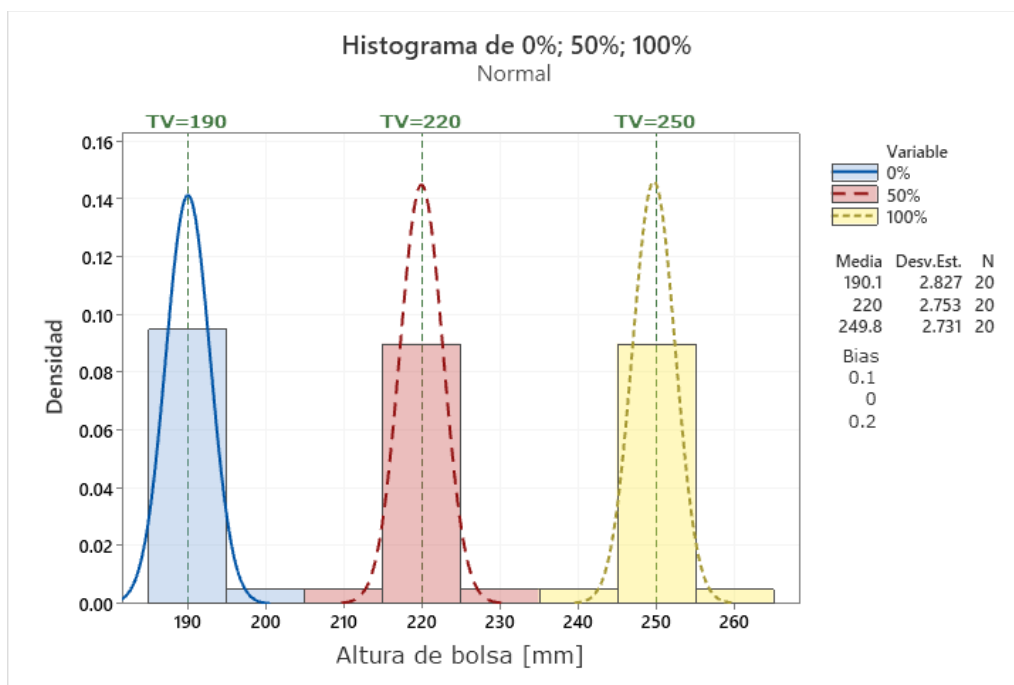
Datos obtenidos de alturas de bolsas

Muestra	Máximo [mm]	Medio [mm]	Mínimo [mm]
1	188	218	248
2	190	218	248
3	194	220	250
4	185	225	252
5	194	219	250
6	190	220	254
7	190	218	247
8	188	218	244
9	191	221	250
10	190	220	248
11	186	224	250
12	190	220	245
13	190	216	250
14	188	214	250
15	193	220	250
16	190	224	255
17	186	221	250
18	195	220	250
19	194	224	254
20	190	220	250

En la Figura 92 se muestran los resultados que presentan un bias muy pequeño que se traduce a un arrastre muy exacto, característica de los motores a pasos, y una desviación estándar de entre 2.7 y 2.8 que nos dice que el sistema tiene una alta precisión.

Figura 92

Resultados de altura de bolsa



Subsistema de sello y corte (Us3)

La norma DIN 55529 da como referencia que el parámetro para validar el sello de una bolsa es la fuerza que esta presenta al ser sometido a un esfuerzo de tracción como se muestra en la Figura 96. (DIN, 2012). Por lo tanto, todos los experimentos de esta sección serán realizados en una máquina universal de ensayos, usando tracción y el valor máximo obtenido. En la Figura 93 se puede apreciar el ensayo de tracción del sello por mordazas, mientras que en la Figura 94 se realizó el ensayo del sello por impulso, y en la Figura 95 se muestran los datos de fuerza y desplazamiento en la HMI de la máquina universal de ensayos.

Figura 93

Prueba de tracción de sello por mordazas con resistencias eléctricas

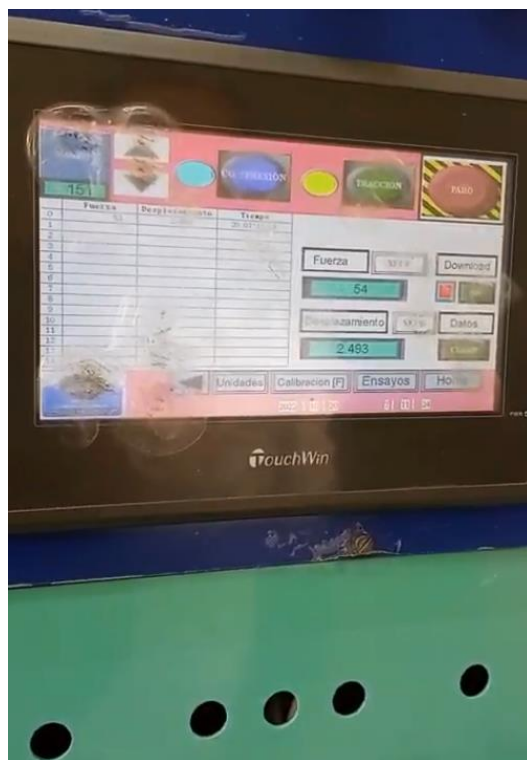
**Figura 94**

Prueba de tracción de sello por impulso eléctrico

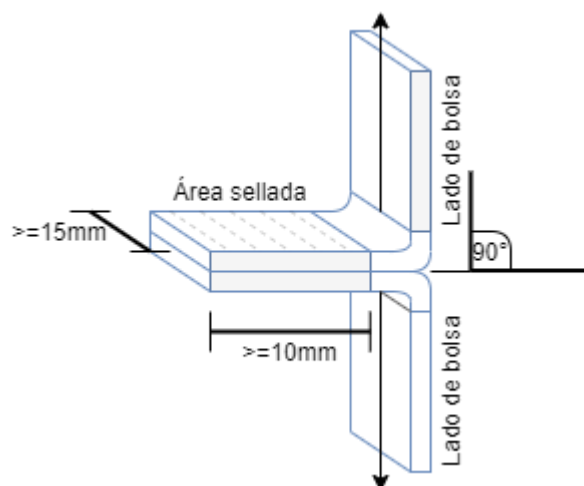


Figura 95

HMI de la máquina universal de ensayos (Datos de fuerza y desplazamiento)

**Figura 96**

Esquema de esfuerzo para sello de bolsa



Debido a que se tiene varios factores que afectan el sello en la máquina se plantea llevar a cabo un diseño experimental (DOE) determinar los valores óptimos que den un mejor sello. Los factores y niveles se muestran en la Tabla 22, se destaca que el factor de presión actúa como un ruido en el experimento, debido a que es un factor no controlable ya que la máquina será sometida a la fuente neumática que el cliente tenga disponible. Así que se va a recomendar la presión con la que se obtiene un sello de mayor calidad. Además, se observa que se va a tener diferentes factores según el sistema de sello que utilice.

Tabla 22

Tabla de factores y niveles para el diseño experimental

Tipo de sello	Factores de sellado	Tipo	Niveles
Sello por mordazas	Temperatura	Controlable	4
	Tiempo	Controlable	2
	Presión	No controlable	3
Sello por impulso	Tiempo	Controlable	3
	Presión	No controlable	2

Como se plantea sellar en bolsas de plástico de diferente calibre y con diferentes tipos de sello en la Tabla 23 se muestra un resumen de los experimentos de validación para cada uno.

Tabla 23

Descripción de experimentos para el sistema de sellado

N°	Tipo de sello	Calibre de plástico	Descripción
1	Por mordaza	1.25	Diseño experimental DOE, Taguchi L8 con niveles mixtos, con la presión como ruido.
2	Por mordaza	4	Diseño experimental DOE, Taguchi L8 con niveles mixtos, con la presión como ruido.
3	Por impulso	1.25	Diseño experimental DOE, Taguchi L9 con niveles mixtos.

Experimento 1: Mordaza – Calibre 1.25

Para este experimento se codifican los valores para más fácil compresión, los valores se muestran en la Tabla 24.

Tabla 24

Codificación del experimento 1

	Temperatura [°C]			Tiempo [seg]		Presión [bar]			
1	77	3	79	1	2	1	4	3	6
2	78	4	80	2	3	2	5		

Los resultados obtenidos del experimento se muestran en la Tabla 25, la salida fue medida en libra-fuerza. En la que se observa que se forma un sello de mejor calidad a una presión de 6 bares, una temperatura de 79°C y un tiempo de dos segundos.

Tabla 25

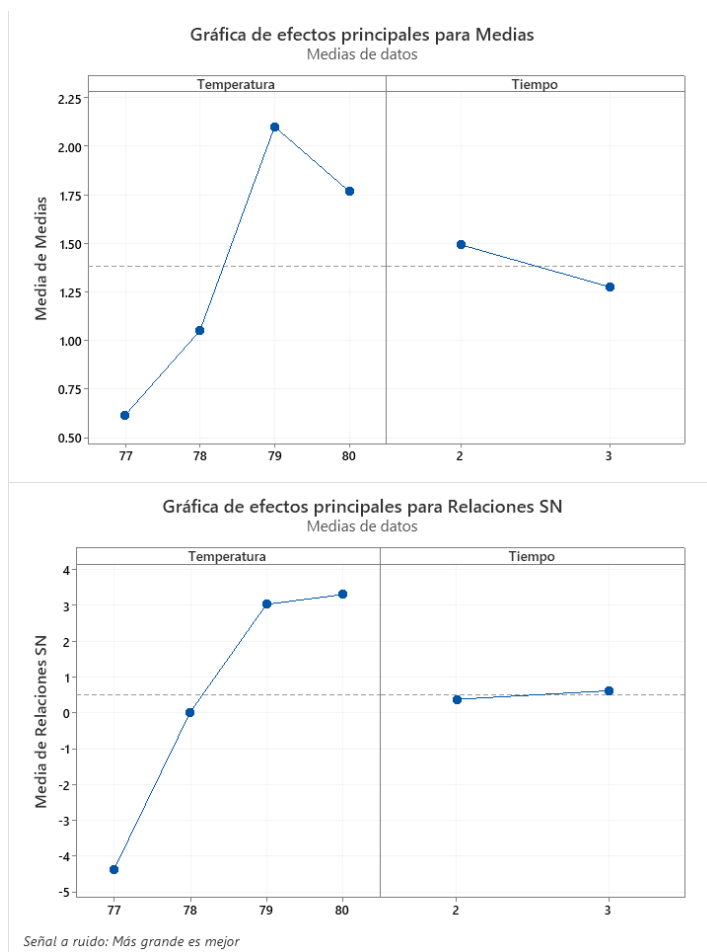
Resultados numéricos del experimento 1

Corridas	Factores controlables		Factores no controlables			Salida
	Temperatura	Tiempo	Presión			
			1	2	3	
1	1	1	0.5	0.6	0.7	
2	1	2	0.7	0.6	0.6	
3	2	1	0.8	1.2	0.8	
4	2	2	1	1.1	1.4	
5	3	1	1	1.6	4.5	[lbf]
6	3	2	1	1.5	3	
7	4	1	1.4	1.3	3.5	
8	4	2	1.3	1.1	2	

En la Figura 97 se muestran los resultados graficados de los cuales deducimos que, utilizando el sellado por mordazas, con un plástico de LDPE de calibre 1.25 se obtiene un mejor sello a una temperatura de 79°C y un tiempo de 2 segundos de sellado, por otro lado, observamos que el cambio de tiempo no tiene efecto, mientras que la temperatura tiene gran efecto, siendo la temperatura de 80°C el que más efecto tiene.

Figura 97

Resultados gráficos del experimento 1



Experimento 2: Mordaza – Calibre 4

Para este experimento se codifican los valores para más fácil compresión, los valores se muestran en la Tabla 26, en este se excluye el tiempo debido a que en el experimento 1 se concluyó que el tiempo no tiene efecto en el resultado. También se excluyó a la presión de 4 bares ya que con menos de 5 bares no se obtiene un sello.

Figura 98

Empaques de polietileno calibre 4 mediante sellado por mordazas

**Tabla 26**

Codificación del experimento 2

	Tiempo [°C]				Presión [bar]	
1	80	3	82	1	5	
2	81	4	83	2	6	

Los resultados obtenidos del experimento se muestran en la Tabla 27, la salida fue medida en libra-fuerza. En la que se observa que se forma un sello de mejor calidad a una presión de 6 bares y una temperatura de 81°C.

Tabla 27

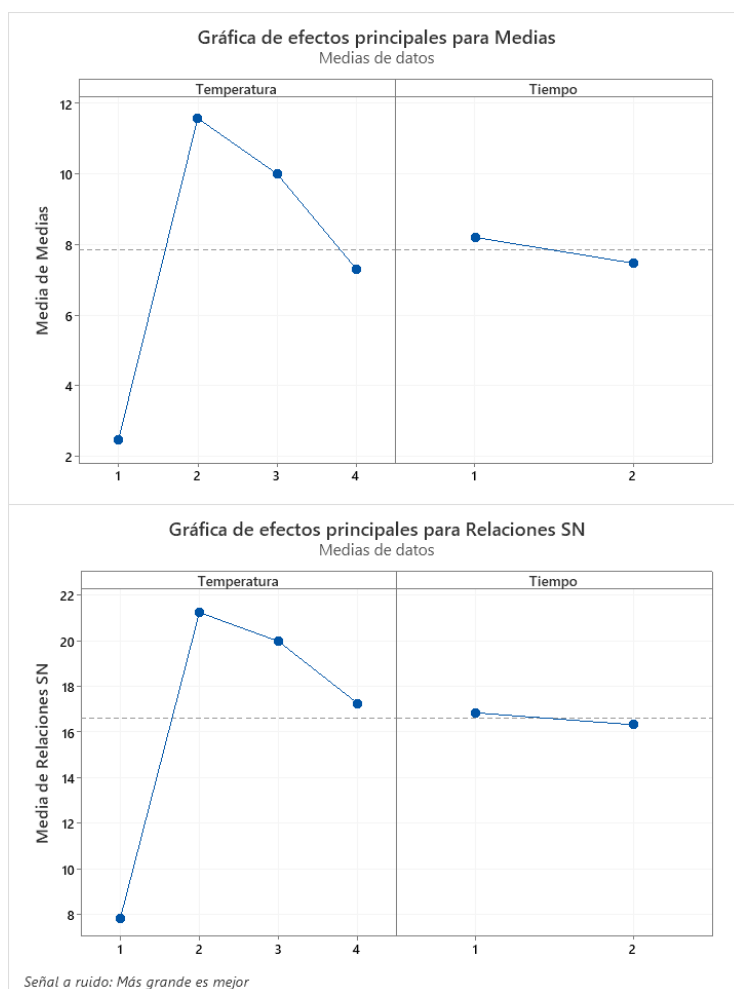
Resultados numéricos del experimento 2

Corridas	Temperatura	Presión		Salida
		1	2	
1	1	2.47	2.47	
2	2	10.57	12.59	
3	3	9.22	10.79	[lbf]
4	4	6.97	7.64	

En la Figura 99 se muestran los resultados graficados de los cuales deducimos que, utilizando el sellado por mordazas, con un plástico de LDPE de calibre 4 se obtiene un mejor sello a una temperatura de 81°C y una presión de 6 bares, por otro lado, observamos que el cambio de presión tiene poco efecto, mientras que la temperatura tiene gran efecto.

Figura 99

Resultados gráficos del experimento 2



Experimento 3: Por impulso – Calibre 1.25

Para este experimento se codifican los valores para más fácil comprensión, los valores se muestran en la Tabla 28.

Figura 100

Empaques de polietileno calibre 1.25 mediante sellado por impulso eléctrico

**Tabla 28**

Codificación del experimento 3

		Tiempo [Nivel]		Presión [bar]	
1	2	3	3	1	5
2	2.5			2	6

Los resultados obtenidos del experimento se muestran en la Tabla 29, la salida fue medida en libra-fuerza. En la que se observa que se forma el sello de mejor calidad a una presión de 6 bares y a un nivel de temperatura de 3.

Tabla 29

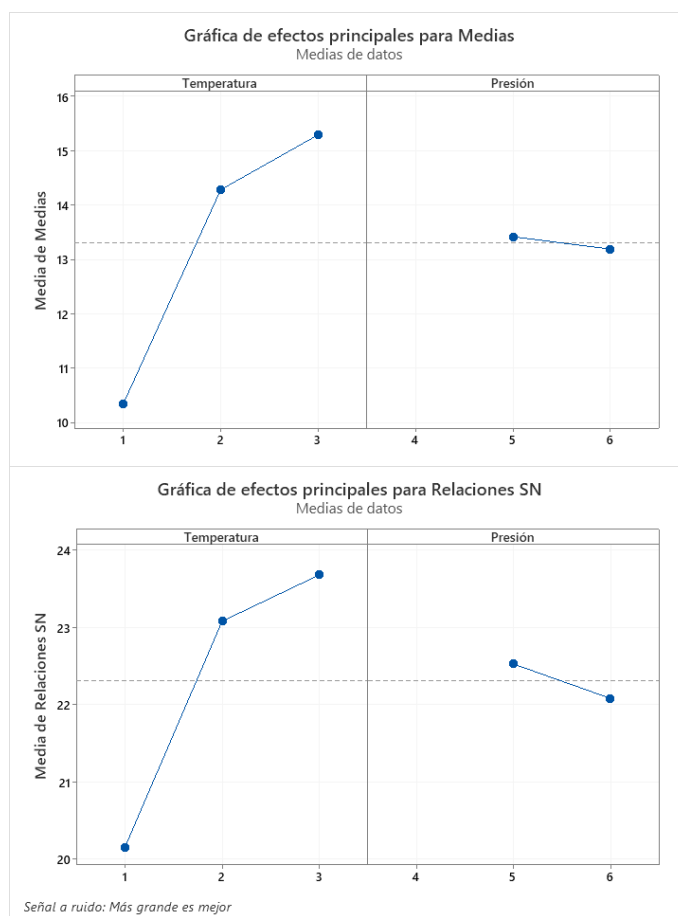
Resultados numéricos del experimento 3

Corridas	Factor controlable		Factores no controlables		Salida
	Tiempo		Presión		
			1	2	
1	1		12.14	8.54	
2	2		13.49	15.06	[lbf]
3	3		14.61	15.96	

En la Figura 99 se muestran los resultados graficados de los cuales deducimos que, utilizando el sellado por impulso, con un plástico de LDPE de calibre 1.25 se obtiene un mejor sello a un nivel de temperatura 3 y una presión de 5 bares, por otro lado, observamos que el cambio de presión tiene un efecto regular, mientras que la temperatura tiene gran efecto.

Figura 101

Resultados gráficos del experimento 3

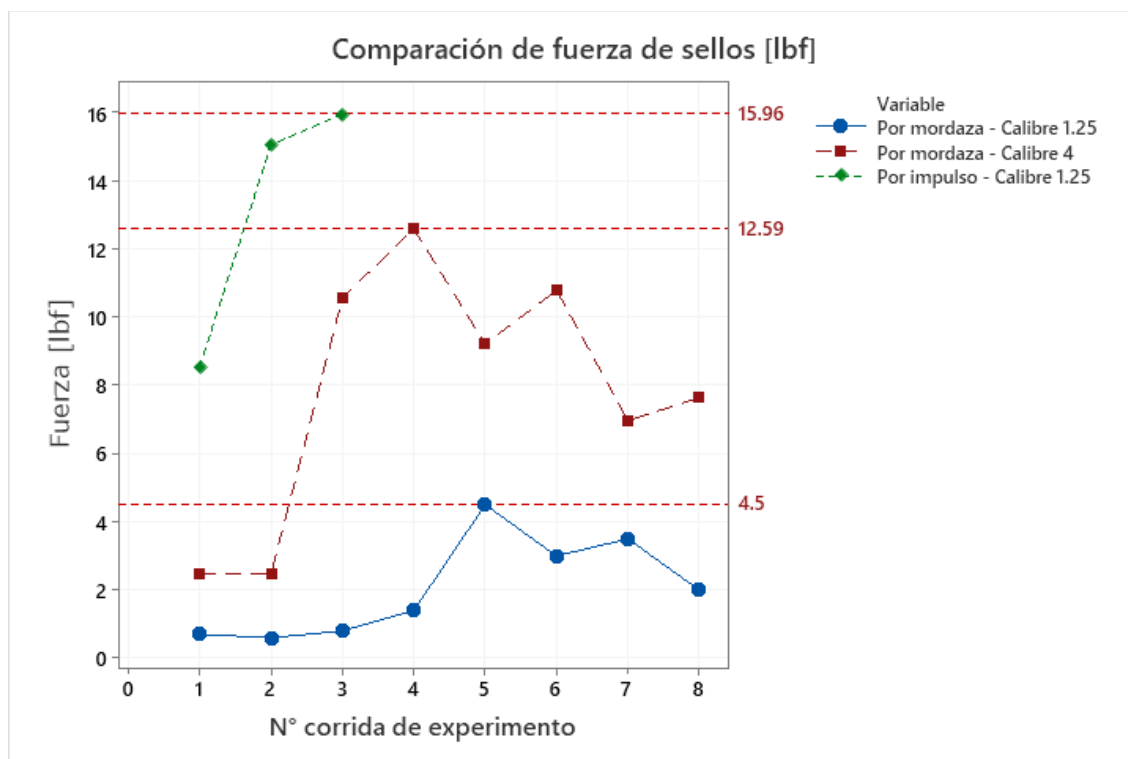


Comparativa

En la Figura 101, se muestra gráfica recopilando los datos de todos los experimentos a una presión de 6 bares, ya que fue la que mejor funcionó en todos los experimentos. Se deduce que el sello más fuerte se obtiene con el sello por impulso con un nivel de 3 con un plástico LDPE de calibre 1.25, mientras que el sello de menor calidad se lo obtiene con el sello por mordazas con el plástico LDPE de calibre 1.25.

Figura 102

Comparativa del resultado de todos los experimentos



CAPÍTULO V

Conclusiones y recomendaciones

En el presente capítulo se detallan los resultados obtenidos en el proyecto de titulación, tomando como referencia los objetivos planteados, además de recomendaciones para un óptimo funcionamiento de la máquina.

Conclusiones

Se ha complementado el diseño, construcción e implementación de la máquina empacadora de productos granulados según las especificaciones dadas por la empresa PROSERMEC. Donde se destaca que se ha cumplido con el hito de producción de 6 empaques por minuto, uso de distintos calibres de polietileno de baja densidad, obteniendo una bolsa tipo almohada de dos costuras, empacando grano entre 5 y 25 mm de diámetro, así como la opción variar con facilidad el nivel de dosificación a través de vasos volumétricos.

El rediseño del subsistema de dosificación de la máquina empacadora satisface los requerimientos del cliente, los resultados se corroboran con las pruebas realizadas en el apartado de la página 129 (Validación del Subsistema de alimentación y dosificación (Us1)), donde se obtuvo una exactitud de 0.20% de error para una libra de maíz, que es el requerimiento de peso y alimento que se pretendió alcanzar. Respecto a la precisión, la desviación estándar es de 3.21 gramos que se traduce en un error de 0.70%. Además, se observó una linealidad constante para los 4 tipos de productos granulados analizados.

Se diseñó el sistema eléctrico, electrónico y de control satisfactoriamente integrando los diferentes subsistemas que conforman la máquina, realizando el correcto dimensionamiento y selección de los dispositivos de control y protección que permitieron automatizar la empacadora volumétrica. El uso de PLC redujo en gran medida el número de dispositivos de conexión, control y maniobra en el tablero eléctrico con la ventaja de flexibilidad que proporciona de realizar cualquier cambio en la programación, para un trabajo futuro. Además de la implementación de una interfaz hombre máquina (HMI), que permite el ajuste de parámetros como el tiempo de sellado, nivel de dosificador, configurar el número de bolsas a empacar y un modo manual para preparar la máquina antes de iniciarla.

La validación del proceso se realizó mediante pruebas de la costura de sello de los empaques de diferentes calibres de plástico, descritos en el apartado de la página 140 (Subsistema de sello y corte (Us3)), así como de los 2 tipos de sellado, por mordaza con resistencias eléctricas y mediante sello por impulso. Se realizaron las pruebas de tracción con la máquina universal de ensayos del sello según lo establece la norma DIN 55529, donde se concluye que el sello más resistente se obtiene mediante el sello por impulso, utilizando polietileno de calibre 1.25, con un valor de 15.96 lbf y un nivel de temperatura de 3 mientras que el máximo valor obtenido usando sello continuo por mordazas es de 12.59 lbf a una temperatura de 81°C, para polietileno de calibre 4 y de 4.5 lbf para un calibre de 1.25 a una temperatura de 79°C, todos los valores fueron obtenidos a una presión de 6 bares y son lo suficientemente fuertes para evitar que la una libra de grano se derramen de la bolsa empacada, estos datos se pueden observar en la Figura 102.

Recomendaciones

La máquina alcanzó los hitos planteados por la empresa auspiciante en los que se encontraba el empaclado de granos entre 5 y 25 mm de diámetro, sin embargo si se plantea sellar una bolsa de una libra se recomienda únicamente usar granos que sean de mayor o igual tamaño que un morochillo (con una media 8 mm de diámetro) y de menor o igual tamaño que un maíz (con una media de 11.5 mm de diámetro), usando el máximo nivel de dosificación para los granos de tamaño similar a un maíz y un nivel mínimo de dosificación para los granos de tamaño similar al de un maíz.

Para una correcta dosificación de producto granulado, se recomienda calibrar la altura del dosificador antes de cargar la tolva con material. Es necesario realizar una previa calibración antes de iniciar el proceso debido a que el peso cambia según el tamaño de grano y su densidad.

La máquina fue probada y usada durante una jornada laboral, sin embargo, se recomienda siempre quitar la energía cuando está no esté en uso y así evitar accidentes. Así mismo cuando la máquina se encuentre en modo de marcha no se debe intervenir por ningún motivo en el proceso de empaque, en caso de que ocurra un imprevisto que obligue a detener el proceso no usar el interruptor de marcha/paro para detener la máquina de forma repentina, ya que al cambiar el interruptor de marcha hacia paro este tiene la funcionalidad de fin de ciclo, es decir se detendrá después de sellar la última bolsa, se debe utilizar únicamente el botón de paro de emergencia para apagar todos los actuadores.

Se recomienda una preparación de la máquina antes de iniciar el proceso de empaque, esta preparación cambia según el tipo de sellado que se pretende usar. Para un sellado mediante mordazas (continuo), se recomienda encender las niquelinas y configurar el controlador en un valor de 79°C para polietileno de calibre 1.25 y un valor de 81°C para un calibre de 4 y esperar a que este se estabilice, en ambos casos ajustar un tiempo de 3 segundos de sellado. Por otro lado, para el sellado por impulso se recomienda hacer un precalentamiento de tres accionamientos separados por un intervalo de 5 segundos el momento antes de empezar a sellar, ajustar el tiempo de sellado entre 1.5 y 3 segundos. Para todas las opciones de sello se recomienda una presión de 6 bares en la alimentación del sistema neumático.

Bibliografía

- ACG Colombiana S.A.S. (2021). *PE / Polietileno, de ACG Colombiana S.A.S.* Catálogos de empaques. <https://www.catalogodeempaques.com/ficha-producto/PEPolietileno+116005>
- Alvarez, M. L., Burgos, A., Sarachaga, I., Estévez, E., & Marcos, M. (2012). GEMMA based approach for generating PLCopen Automation projects. *IFAC Proceedings Volumes*, 45(4), 230-235. <https://doi.org/10.3182/20120403-3-DE-3010.00067>
- Ashok, K. R. (2017). *Design and Force Analysis of Slider Crank Mechanism for Film Transport Used In VFFS Machine*. 04(12), 8.
- Ashwini, M. (2020, noviembre). Agriculture & Environment eNewsletter. *Food Packaging and Packaging Machineries*, 1(3), 60-68.
- ASTM. (2015, diciembre 29). *Standard Test Method for Seal Strength of Flexible Barrier Materials*. https://www.astm.org/f0088_f0088m-09.html
- Balcells, J., & Romeral, J. L. (1997). *Automatas programables* (1.ª ed.). Marcombo Boixareu Editores.
<https://books.google.com.mx/books?id=xfSjADge70C&printsec=copyright#v=onepage&q&f=false>
- Boch. (2014). *Guide to Vertical Form-Fill-Seal Baggers*. Bosch Packaging Technology, Inc.
- Coles, R. (Ed.). (2003). *Food packaging technology*. Blackwell Publ. [u.a].
<http://www.ucarecdn.com/ad92a553-a70b-442a-8256-b905b39c466c/>
- DIN. (2012). *DIN 55529:2012-09, Verpackung_ - Bestimmung der Siegelnahtfestigkeit von Siegelungen aus flexiblen Packstoffen*. Beuth Verlag GmbH.
<https://doi.org/10.31030/1910633>
- Emblem, A. (2012). *Packaging Technology: Fundamentals, Materials and Processes*. Elsevier.

- García Reyes, F. J., & González Santander, A. J. (2009). *ELABORACIÓN Y AUTOMATIZACIÓN DE UNA MÁQUINA EMPACADORA INDUSTRIAL A ESCALA* [Proyecto, Universidad Pontificia Bolivariana].
https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/595/digital_18219.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- General Motors Corporation. (2010). *MEASUREMENT SYSTEMS ANALYSIS*. 4, 241.
- Helmke, R. (2015, enero 20). How Polyethylene Packaging Can Benefit You [Blog]. *Plastic Ingenuity*. <https://www.plasticingenuity.com/blog/how-polyethylene-packaging-benefits-you/>
- Herrera, E., & Lumbres, R. (2018). *DISEÑO DE UNA MÁQUINA VERTICAL EMPACADORA, DOSIFICADORA Y SELLADORA DE ACCIONAMIENTO MECÁNICO – NEUMÁTICO CONTROLADO POR UN PLC PARA FUNDAS DE ARROZ*. Universidad señor de Sipán.
- Pere Ponsa, A. G. (2015). *Diseño de pantallas: Guía GEDIS (1º)*. Universidad Politécnica de Catalunya.
- Plástico Negro. (2018). *Tabla de conversion para calibres de plastico*. Ventas plástico negro.
<https://plasticonegro.mx/productos/tabla-conversion-calibres.php>
- PPMA. (2017). *Machinery Explained*. Explicación de la maquinaria.
<https://www.ppma.co.uk/ppma/machinery-finder/machinery-explained.html>
- Quintana, J. (2007, octubre). *Análisis y Diseño de Empaques Flexibles para Alimentos*. 20(1), 11-18.
- Robertson, G. L. (1993). *Food Packaging: Principles and Practice, Third Edition (3.^a ed.)*. CRC Press. <https://www.routledge.com/Food-Packaging-Principles-and-Practice-Third-Edition/Robertson/p/book/9781439862414>

- THE FOOD TECH. (2009, enero 12). *La importancia del empaque y embalaje en la exportación*. The Food Tech. <https://thefoodtech.com/historico/la-importancia-del-empaque-y-embalaje-en-la-exportacion/>
- Weissman, A., Gupta, S. K., Fiorentini, X., Sudarsan, R., & Sriram, R. D. (2009). *Formal representation of product design specifications for validating product designs* (NIST IR 7626; 0 ed., p. NIST IR 7626). National Institute of Standards and Technology. <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.7626>
- Wepack equipment. (2020). *MÁQUINA EMPAQUETADORA DE PELÍCULA DE TUBO LT400*. <https://www.wepack.com.cn/productinfo/1010432.html>
- White, J. (2020, junio 16). Polyethylene vs. Polypropylene Packaging. *Printex Transparent Packaging*. <https://www.ptpackaging.com/blog/polyethylene-vs-polypropylene-packaging/>
- Wilmer. (2018, mayo 3). *Sellado de flexibles: Cómo lograr eficiencia en una línea empacadora*. El empaque. <https://www.elempaque.com/blogs/Sellado-de-empaqués-flexibles,-descubra-el-exito-de-la-eficiencia-en-una-linea-empacadora+125405>
- Wilmer. (2019, marzo 21). *Relación entre empacadora, material de empaque y producto a empacar*. El empaque. <https://www.elempaque.com/blogs/La-interrelacion-entre-maquina-empacadora-material-de-empaque-%96-producto-a-empacar-segunda-parte+129824>
- Zapata, E. P. M. (2010). *DISEÑO DE UNA MÁQUINA EMPACADORA, DOSIFICADORA Y SELLADORA DE FUNDAS PARA ARROZ*. [Industrial]. Escuela politécnica nacional EPN.