

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**DISEÑO DE UNA MÁQUINA DE BAJO COSTO PARA EMPAQUETADO DE
GRANOS DE CAFÉ CON CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE 100 KG
PARA CULTIVOS TRADICIONALES DE PRODUCTORES INDEPENDIENTES EN
JUNÍN**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecatrónico

AUTOR:

Pedro Sebastian Jaimes Chacon

ASESOR:

Roberto Sumiyoshi Furukawa Fukuda

Lima, mayo del 2024

RESUMEN

El principal objetivo de la presente tesis es el de diseñar una máquina de bajo costo que permita realizar el empaquetado de granos de café de altura y que este pueda ser directamente comercializado por las familias productoras en el departamento de Junín. Primero, se define y explora la problemática, obteniendo información de primera mano mediante entrevistas llevadas a cabo a productores de café. Luego se detallan las tecnologías actuales de empaquetado de café, así como del dosificado y del uso de las válvulas desgasificadoras en las bolsas. Se explica el proceso en la producción de café, desde el cultivo hasta la postcosecha. Además, se explican las consideraciones a tener en cuenta para poder garantizar que el empaquetado sea de calidad y se mantenga la calidad del café. También se detallan los conceptos de solución planteados y se argumenta el concepto elegido; asimismo, se realiza el modelado 3D de las partes más críticas para poder analizarlas. Después se lleva a cabo el desarrollo de los subsistemas mecatrónicos que permitan el correcto funcionamiento del sistema. En conclusión, se identifican las razones de la deficiente productividad en el procesamiento de café en el departamento de Junín, además de que se determinan las condiciones y requerimientos para que se garantice que el empaquetado sea de calidad. Además, se lleva a cabo el diseño mecatrónico del sistema pasando por los diferentes subsistemas para poder integrarlos. De esta manera, se consigue conservar el café en granos, mejorar la productividad y brindarle a los caficultores un negocio rentable con un producto de calidad.

INDICE DE CONTENIDO

Pág.

RESUMEN.....	i
INDICE DE CONTENIDO.....	iii
INDICE DE TABLAS	v
INDICE DE FIGURAS	vi
LISTA DE SÍMBOLOS	vii
INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES.....	2
1.1 Problemática.....	2
1.2 Propuesta de Solución	21
1.3 Alcance.....	21
1.4 Objetivos	22
1.4.1 Objetivo general.....	22
1.4.2 Objetivos específicos	22
1.5 Metodología	23
DISEÑO CONCEPTUAL.....	25
2.1 Fundamento teórico.....	25
2.2 Estado del arte	35
2.3 Requerimientos del sistema.....	35
2.4 Black Box.....	35
2.5 Estructura de funciones	36
2.6 Matriz morfológica.....	36
2.7 Concepto de solución óptimo	36
2.8 Evaluación de los conceptos de solución	36
2.8.1 Evaluación técnica	36
2.8.2 Evaluación económica	36
2.8.3 Solución óptima	37
2.9 Diagrama de bloques	38
DISEÑO DEL SISTEMA MECATRÓNICO	40

3.1	Selección de sensores y actuadores	40
3.1.1	Módulo Wifi.....	41
3.1.2	Sensor de presencia.....	41
3.1.3	Sensor de peso.....	42
3.1.4	Actuador lineal.....	43
3.1.5	Motor paso a paso	44
3.1.6	Motor del transportador helicoidal.....	45
3.1.7	Motor del dosificador volumétrico	46
3.2	Diseño y cálculos mecánicos.....	47
3.2.1	Tolva de almacenamiento	48
3.2.2	Transportador helicoidal	53
3.2.3	Dosificadora.....	66
3.3	Diseño de control	72
3.3.1	Diagrama de flujo	72
3.3.2	Variables por monitorear	73
3.3.3	Estrategia de control	74
3.3.4	Software	76
3.3.5	Selección del controlador.....	77
3.4	Interfaz de usuario	77
3.4.1	Selección del Framework de desarrollo móvil.....	78
3.4.2	Visualización de la interfaz.....	78
3.5	Diseño electrónico.....	79
3.5.1	Cálculos electrónicos	79
3.5.2	Esquemático de circuitos electrónicos y de potencia.....	87
3.5.3	Diseño de tarjeta electrónica.....	91
3.6	Selección de fuentes de energía	93
3.6.1	Cálculos de potencia	93
ANÁLISIS DE COSTOS		96
4.1	Costos electrónicos.....	96
4.2	Costos mecánicos y de fabricación	97
4.2.1	Costos mecánicos.....	97
4.2.2	Costos de fabricación.....	97
4.3	Costos totales.....	97
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		98
BIBLIOGRAFÍA.....		100

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1: Comparación de técnicas basadas en modelo	3
Tabla 2.1: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx.....	7
Tabla 2.2: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx.....	8

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1: Fases del plan de capacidad	2
Figura 1.2: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	9
Figura 2.1: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	10

LISTA DE SÍMBOLOS

n	: Revoluciones por minuto [RPM]
δ	: Densidad [kg/m^3]
Q	: Flujo de material [kg/h]
P	: Potencia [W]
α	: Aceleración angular [rad/s^2]
J	: Momento de inercia [m^4]

INTRODUCCIÓN

La propuesta de tesis se origina debido a la necesidad de obtener los mejores parámetros de calidad en el café de altura para su comercialización, manteniendo su aroma, color y sabor. Para esto se diseñará un sistema de empaquetado de granos de café de altura con capacidad de 70 kg/día para mejorar la productividad actual de la producción de café de productores independientes en Junín, con capacidad de escalamiento de producción a alrededor de 5 productores. La alimentación se llevará a cabo mediante la toma de corriente, además de válvulas desgasificadoras para controlar los gases que expulsan los granos de café tostados. Para el desarrollo del trabajo, se tomaron en cuenta los parámetros climáticos de la región de Monobamba, Junín, siendo una zona a una altura de alrededor de 1650 msnm, cuya temperatura suele estar alrededor de 11°C durante la cosecha, además de tener una humedad que varía alrededor de 50%, lo que puede ser considerado como un clima seco, ya que el café absorbe la humedad.

El presente proyecto hace uso de información sobre proceso de dosificado de granos de café, sobre los materiales adecuados a utilizar en las bolsas, información de primera mano de productores de café de distintos departamentos de Perú, así como el proceso de llenado, sellado y cortado de las bolsas. De manera que se espera lograr resultados confiables en el

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

En este capítulo se explicará la problemática del presente documento, además de los objetivos, alcances y una explicación de la metodología de diseño a implementar para alcanzar el objetivo definido.

1.1 Problemática

El café es una de las principales materias primas comercializadas en el mundo, además de ser el primer producto agrícola peruano de exportación (Junta Nacional del Café, 2020); este posee alrededor de 400'000 hectáreas dedicadas al cultivo de café, siendo que alrededor de 200'000 familias de pequeños agricultores se dedican a la producción de café a nivel nacional. (El Peruano, 2021)

Tiene una historia que se remonta al Cuerno de África, más precisamente en Etiopía, donde se presume que su primera aparición tuvo lugar en la provincia de Kaffa. Los primeros establecimientos de café fueron lugares muy concurridos, siendo que estos se abrieron en Meca, llamados inicialmente “kaveh kanes”, y se extendieron rápidamente por todo el mundo árabe. El cultivo de café se extendió por el mundo, llegando a Asia, Europa y luego a las

Américas, siendo los holandeses los que primero empezaron a propagar el cultivo de café en América central y del Sur; pasando por Brasil, Jamaica y llegando finalmente al Perú (International Coffee Organization, s/f).

El café llegó al Perú hace alrededor de 200 años y hoy se cultiva en aproximadamente 230'000 hectáreas a lo largo de la cordillera de los Andes, ofreciendo trabajo a más de 117'000 familias, siendo que sus variedades son la Típica, Bourbon, Caturra y Catimor (Info Cafés, s/f).

Las dos especies más importantes de café, según la ICO, son la especie Arábica y la Robusta. La especie Arábica es un arbusto grande con hojas de color verde oscuro, además de ser diferente de las otras especies por tener cuatro series de cromosomas en lugar de solo dos. En la Figura 1 se puede apreciar el grano de este tipo de café.



Figura 1.1: *Café Arábica*

Nota. Reproducida de Coffea arabica: Café Arábica [Fotografía], de Cámara Café & Cacao (<https://camcafeperu.com.pe/ES/cafe-peru.php>).

Por otra parte, la especie Robusta es un pequeño árbol que puede llegar a crecer hasta 10 metros de altura. Tiene un fruto redondeado, alargado y suele ser más pequeño que la especie Arábica. En la Figura 2 se puede apreciar el grano de café Robusta.



Figura 1.2: *Café Robusta*

Nota. Reproducida de Coffea canephora: Café Robusta [Fotografía], de Cámara Café & Cacao (<https://camcafeperu.com.pe/ES/cafe-peru.php>).

Según el Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, en el Perú se cultiva el café de tipo arábico, como la Típica, Caturra, Borbón y Pache, los cuales son cultivados en la sombra y respetando al medio ambiente. En la Figura 3 se puede apreciar los tipos más importantes de café y en qué parte del mundo son cosechados.

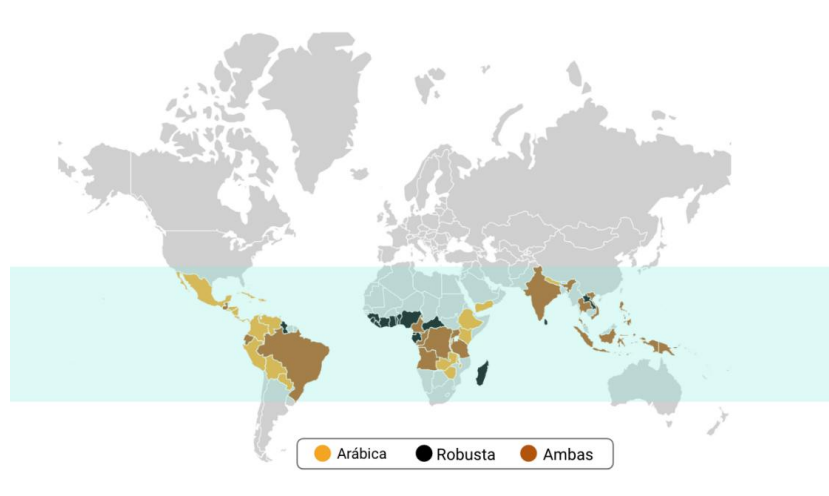


Figura 1.3: *Cinturón de café Árabe y Robusta*

Nota. Reproducida de Cinturón del Café [Ilustración], de Cámara Café & Cacao (<https://camcafeperu.com.pe/ES/cafe-peru.php>).

Este último año, el Perú se consolidó como uno de los principales exportadores de café en el mundo, llegando a alrededor de 44 mercados internacionales (El Peruano, 2021).

Durante el periodo de 2019-2021, la región de Junín se ha consolidado como la segunda principal región productora de café para exportación, como se puede apreciar en la Figura 4,

con casi 100'000 toneladas certificadas en lo que va del año, siendo que este cultivo involucra a los pequeños productores de la agricultura familiar (El Peruano, 2021).

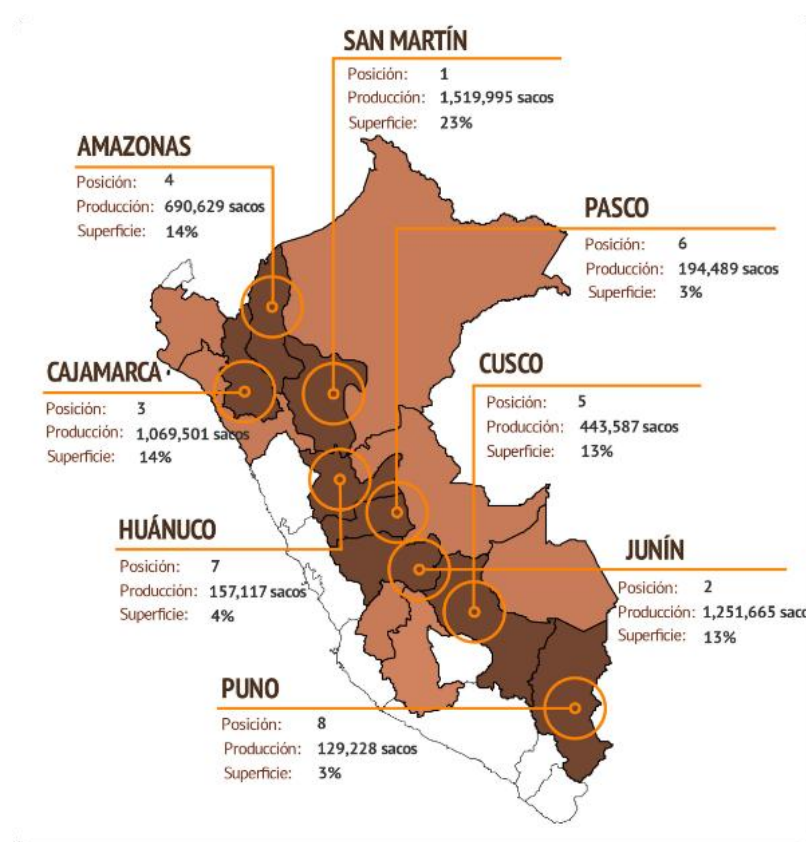


Figura 1.4: *Regiones Productoras de Café en el Perú*

Nota. Reproducida de Regiones de Café [Ilustración], de Cámara Café & Cacao (<https://camcafeperu.com.pe/ES/cafe-peru.php>).

Asimismo, los destinos de importación más importantes van desde EEUU, hasta el mercado europeo, con Suecia, Alemania, Reino Unido, Bélgica, España e Italia, además de Colombia, en América del Sur, como se puede apreciar en la Figura 5.



Figura 1.5: *Principales Destinos de Exportación de Café Peruano*

Nota. Reproducida de Principales Destinos del Café Peruano [Ilustración], de Cámara Café & Cacao (<https://camcafeperu.com.pe/ES/cafe-peru.php>).

El proceso de producción de café tiene ocho etapas, las cuales comienzan con la plantación, donde se da inicio al ciclo natural de ver crecer las semillas, después continúa con la cosecha, la cual se lleva a cabo anualmente cuando las cerezas de café ya se encuentran maduras; luego se lleva a cabo el procesado, donde se quita la pulpa y se seca; después se continúa con el curado, el cual consiste simplemente en eliminar la cáscara. Lo siguiente a realizar es el proceso de cata del café, donde se lleva a cabo la degustación para analizar la calidad. Después se tuesta para darle al café su sabor y aroma para poder ser molido después para finalmente pasar a la preparación, donde se llevan a cabo las bebidas para consumo humano (El auténtico café, 2019).

Si bien este año, la crisis del Covid-19 causó desequilibrios en el sector cafetalero nacional, haciendo prever a la Junta Nacional del Café que más del 20% de la producción cafetalera peruana, que se estima en más de 4 millones de sacos, se perderán (Junta Nacional del Café, 2020). El 80% de los agricultores de café exportan a través de compañías exportadoras, esto genera que estos no reciban el dinero necesario para dejar de usar los sistemas de cultivo tradicional y aplicar nuevas técnicas que mejoren su productividad. (Línea de Base del Sector

Café en el Perú, 2017) Dos de los grandes problemas de los caficultores es el costo de producción y el precio final del producto. Los costos de producción por kilogramo se estiman en S/. 9.30, pero el precio final recibido por el productor alcanza apenas alrededor de los S/. 6.00, siendo que en 2018 llegó a costar S/. 5.18 en el departamento de Junín, como se aprecia en la Tabla 1. En 2016 esto representó una pérdida acumulada de S/. 685 millones. Por otro lado, otra de los costos de producción significativos es el de vías de acceso, para poder trasladar el café hacia zonas de acopio, a la planta de procesamiento y al mercado de consumo (Cesar Labra Choquehuanca, 2018).

El precio de 1 kg café envasado en granos actualmente está alrededor de S/. 78.00 y el precio por 250 g de grano de café envasado está entre los S/. 23.00 y S/. 30.00, nacionalmente, por lo que se puede apreciar la gran diferencia de precios (Café Urbano, s/f).

Tabla 1.1: Producción De Café Pergamino 2018 – 2019 (Enero – Julio)

PRODUCCIÓN DE CAFÉ PERGAMINO 2018 – 2019				
ENERO - JULIO				
REGIONES	PRODUCCIÓN (QQ)		PRECIO (KILO)	
	2018	2019	2018	2019
AMAZONAS	33,906	34,601	6.36	6.33
AYACUCHO	2,993	2,088	5.18	5.18
CAJAMARCA	49,169	55,570	5.38	6.31
CUSCO	27,386	25,003	5.53	4.10
HUÁNUCO	8,384	9,050	5.36	5.60
JUNÍN	81,467	77,923	5.19	5.26
LA LIBERTAD	206	207	3.63	3.64
LAMBAYEQUE	1,143	785	6.62	7.00
PASCO	12,024	10,511	4.70	5.70
PIURA	3,022	3,661	5.93	5.08
PUNO	7,331	7,347	7.31	7.05
SAN MARTÍN	90,580	89,199	5.00	4.95
UCAYALI	8,325	22,092	6.48	6.50
TOTAL	325,936	338,037		

Fuente: Junta Nacional del Café (JNC)

Sin embargo, los precios, ya sea de exportaciones o para comercio nacional varían, dependiendo de si el café cuenta con una certificación orgánica. Prueba de esto es que en la Feria Internacional de Cafés Especiales de la Selva Central (Ficafe), en 2016, los caficultores

de 20 cooperativas contactaron con varios compradores nacionales e internacionales, por lo que, sin contar con empresas intermediarias que realicen la exportación, los productores resultarían más beneficiados. Algunos productores obtuvieron muy buenos puntajes y consiguieron vender su producto, con un precio de entre S/. 40.00 a S/. 45.00 por 1 kg de café tostado o molido, debido a que no contaban con la certificación orgánica; de igual forma, el precio de 1 kg de café pergamino, sin valor agregado, está alrededor de S/. 7.00, por lo que igualmente se puede identificar una gran diferencia en el precio.

Se puede apreciar la importancia de la certificación orgánica del café para la comercialización del mismo por parte de los mismos productores, por lo que es necesario entender que la certificación debe evaluar que se cumplan con las exigencias de las normas orgánicas de Europa CE 834/2007 y CE 889/2008, USDA/NOP 7 CFR Part 205 y Reglamento Técnico de Productos Orgánicos en el Perú DS-044-2006-AG (Pérez, Claudia, 2018).

Además, el proceso de certificación consta de los siguientes pasos:

1. Presentar una solicitud formal a la empresa certificadora.
2. La empresa realiza la oferta y presenta el presupuesto.
3. Se acepta el presupuesto.
4. La empresa estudia la documentación del sistema de gestión de calidad.
5. Se lleva a cabo una visita previa de la auditoría para resolver dudas y conocer la empresa.
6. Se envía el plan realizado por la auditoría, donde se indican fechas, equipo y planeamiento, a la organización.
7. Se aprueba el plan de la auditoría.
8. Se realiza la auditoría de certificación.
9. Se redacta un informe de auditoría, donde se muestran las desviaciones detectadas.
10. La organización corrige dichas desviaciones y presenta la solución a la empresa certificadora.

11. Se lleva a cabo una concesión del certificado por parte de la certificadora.

Al otorgarse la certificación se llevan a cabo auditorías de seguimiento para comprobar que el sistema de calidad cumple con los requisitos indicados a lo largo del periodo de vigencia del certificado (Osorio, Ulises, 2012).

Las ventajas más resaltantes de contar con la certificación orgánica son que se entra en un importante nicho de mercado en todo el mundo, lo que le brinda al caficultor más facilidades para exportar; además, el producto se diferencia de la competencia y se puede aumentar el precio entre un 10% a 40% (Holguín, Alfonso, s/f).

Prueba de ello es que la Asociación de Productores Ecológicos Agro Forestales Calle de Oro, del distrito de Perené en Chanchamayo en la región de Junín, logró subir el precio del quintal de café de S/. 300 a S/. 550 con solo el hecho de hacer certificado orgánicamente su producción de café (CAFELAB, 2018).

La problemática que enfrentan los pequeños productores de café son los bajos rendimientos por hectárea y el deterioro de los productos (Zapata, 2012, p. 3).

Por lo tanto, se deben dar alternativas de solución para integrar la tecnología en los pequeños agricultores y de esta manera mejorar el rendimiento, el cual se encuentra por debajo del promedio. La incorporación de la tecnología en la caficultura tendrá un impacto económico, social y ambiental (Cárdenas, Maribel, Alvitrez, Elizabeth, Aulla, Guillermo y Peña, Guillermo, 2017).

Según el trabajo de investigación de otros autores:

Los bajos niveles de producción mantienen el círculo de la pobreza, la falta de competitividad y la degradación ambiental. La baja productividad se debe principalmente a que las fincas tienen un deficiente manejo técnico. Los agricultores producen con sistemas tradicionales y son renuentes al cambio, tienen una escasa visión empresarial y ambiental, lo que determina una baja rentabilidad e impide la generación

de ingresos suficientes para aplicar nuevas técnicas y costear la mano de obra necesaria para su implementación. Al mismo tiempo, la disponibilidad de asistencia técnica es escasa. Por ello, muchos productores no disponen aún de infraestructura de cosecha y post cosecha, y prima una producción de cafés de baja calidad. Tampoco hay incentivos para mejorar la calidad de la producción: los acopiadores no pagan ni premian la calidad del grano. Las cooperativas no tienen recursos humanos especializados ni laboratorios para evaluar la calidad. Por otro lado, la promoción de la calidad es deficiente, no se garantiza la trazabilidad del producto, a lo que se suma la deficiencia en laboratorios y profesionales que apoyen este proceso. (Díaz y Carmen, 2017, p. 50)

Para facilitar ya sea el comercio exterior o la comercialización, el punto crítico radica en cómo debe de ser implementado el adecuado uso de los envases y embalajes. Se debe proteger al café tostado de aromas que podrían influir en el olor propio del producto o a una contaminación causada por agentes externos. De igual manera, si se piensa tratar directamente con un comercializador, se debe optar por envasar el producto para el consumidor final y de esta manera ser importado (Evangelista y Ruiz, 2018).

El envasado, siendo el que contiene al producto y lo protege, puede ser muy variado, por lo que se consideró el envasado con metal, vidrio, papel y cartón, blíster, tetra pack, flowpacks y plástico (Lezcano, 2021).

En empaque que se usa para el café juega un papel muy importante, así como la calidad de materia prima o del tostado, debido a que, si este presenta una pobre resistencia al deterioro, el número de ventas se verá altamente reducido debido a que se vería comprometida la calidad del mismo. Este es el motivo por el que las empresas suelen emplear empaques que reduzcan el costo, pero sin dejar de ofrecer el mayor beneficio en cuanto a la conservación de la frescura del grano de café (Pacheco, 2016).

Los principales factores que afectan la calidad del café son el oxígeno, siendo responsable no solo de la pérdida de compuestos aromáticos característicos, sino que también ocasiona aromas indeseables, al ser el café fácilmente oxidable; la humedad, lo que ocasiona la disipación y oxidación de compuestos aromáticos, siendo que esta perjudica mucho más rápido cuando el café se encuentra molido, ya que el café liofilizado muestra una mayor capacidad de captar moléculas de agua; la temperatura, la cual afecta la velocidad de añejamiento químico y físico del café, aunque su efecto es mejor que el de la humedad (Pacheco, 2016).

Se ha evidenciado recientemente que la tecnología ayuda con la permanencia en los cafés de calidad. El material del envase tradicional ha sido reemplazado por aluminio multicapa para mantener la frescura del café y garantizar la calidad natural. Asimismo, la válvula de escape de aire permite mantener el café libre de humedad que acelere la descomposición. A su vez, el sellado al vacío alarga la vida del café (Contreras y Olmedo, 2007).

Los requerimientos para tener un empaque óptimo para el café tostado, según Víctor Pacheco (2016), son los siguientes:

- Baja velocidad de transmisión de vapor de agua.
- Excelentes características de barrera de Oxígeno.
- Ser a prueba de grasa.
- Impermeabilidad a aromas y olores.
- Permitir salida de dióxido de carbono.
- Resistente (debe soportar manejo durante la distribución).
- No presentar dificultades en el formado del empaque mismo y durante el llenado.
- Bajo costo.

En la actualidad, los empaques más usados para la conservación del café tostado son multilaminados de polímero-aluminio, debido a su facilidad de uso (pp. 34 - 35).

Con respecto al consumidor, en cuanto al comercio nacional, la preferencia por el tipo de envase es el de bolsa trilaminada es de un 70,15% como se puede observar en la Tabla 2. Además, la presentación es importante porque es lo que atrae al consumidor; los consumidores concuerdan en que el empaque debe ser práctico y que asegure la durabilidad (Natividad y Tucto, 2019).

Las bolsas trilaminadas cuentan con 3 capas de protección, los cuales suelen ser de película flexible, una transparente, otra metalizada y una como capa sellante, a lo que adicionalmente se le puede agregar una válvula para mantener las propiedades aromáticas del café y un TinTie, para facilitar el cierre una vez abierta (Algier's Impresores, 2020).

Tabla 1.2: Empaque de preferencia para la compra de café para casa y/o trabajo

PRODUCCIÓN DE CAFÉ PERGAMINO 2018 – 2019				
ENERO - JULIO				
REGIONES	PRODUCCIÓN (QQ)		PRECIO (KILO)	
	2018	2019	2018	2019
AMAZONAS	33,906	34,601	6.36	6.33
AYACUCHO	2,993	2,088	5.18	5.18
CAJAMARCA	49,169	55,570	5.38	6.31
CUSCO	27,386	25,003	5.53	4.10
HUÁNUCO	8,384	9,050	5.36	5.60
JUNÍN	81,467	77,923	5.19	5.26
LA LIBERTAD	206	207	3.63	3.64
LAMBAYEQUE	1,143	785	6.62	7.00
PASCO	12,024	10,511	4.70	5.70
PIURA	3,022	3,661	5.93	5.08
PUNO	7,331	7,347	7.31	7.05
SAN MARTÍN	90,580	89,199	5.00	4.95
UCAYALI	8,325	22,092	6.48	6.50
TOTAL	325,936	338,037		

Fuente: Natividad y Tucto, 2019

Las condiciones de empaquetado, en cuanto a humedad y temperatura en Junín son óptimas para llevar a cabo este proceso, debido a que la temperatura en Perú está entre los 18 y 22 °C, por lo que son ideales para el desarrollo del cafeto y favorecen en la producción de alta calidad, siempre y cuando se realice una buena labor de cosecha; en cuanto a la humedad, esta

debe mantenerse menor o igual al 60% y mayor al 12%, debido a que esto influye en la calidad de café (Llanos, 2021).

Para la conservación del café, se toman en cuenta muchos factores, como la expulsión de gases en el proceso de tueste, por la cual se debe dejar reposar el café recién tostado por alrededor de ocho días para conseguir lo que se llama desgasificación; también se debe realizar un envasado al vacío para evitar la oxidación y considerar que la frescura del café depende enteramente del tostado, es decir, las propiedades de este empiezan a anularse a partir de los diez-quince días después del tostado. Finalmente, el consumidor debe tener cuidado del aire, humedad, calor y luz, debido a que estos son los factores que deterioran al café, por lo que una vez abierto, se debe guardar en frascos herméticos y opacos, alejados de la luz y con una temperatura que varíe entre los 14 y 20 °C (Cafés Siboney, 2020). Se debe tener en cuenta que el café tostado en grano se conserva muchísimo mejor que el café molido (Buen Provecho, s/f.). Por lo tanto, el tipo de café en el que se enfocará el presente trabajo es el café tostado en granos. Hay muchas tecnologías de envasado de café que en general son muy costosas, rondando los 9000 dólares, por lo que los agricultores no pueden hacer uso de ellas (Escobar, 2013). De esta forma, uno de los pilares de la industria 4.0 usado actualmente es el de Internet of Things (Iot), ya que les permite tener un mayor control del rendimiento de las cosechas, un incremento de la productividad o un mejor análisis y la obtención de información en tiempo real sobre el estado de los cultivos para el agricultor (Agraria, 2020).

Las aplicaciones para el Internet de las cosas en proceso productivo del café van desde recolectar, analizar y distribuir información, creando oportunidades de acceder a conocimiento, hasta el desarrollo de la llamada “agricultura de precisión”, lo que permitirá aplicar los tratamientos correctos a los cultivos en el espacio preciso y el tiempo indicado, esto les brinda a los agricultores un monitoreo en tiempo real de los parámetros de suelo o las

condiciones de las plantas, lo que reduce el riesgo a plagas y enfermedades, las cuales pueden ser atendidas remotamente (Grade, 2020).

La ventaja de utilizar el Internet de las cosas es la de disponer de información de valor detallada y en tiempo real sobre la producción, esto permite conocer cada momento de la situación de cada parte del proceso de envasado, lo que brinda una gran capacidad analítica para poder tomar medidas correctivas en tiempo real y a la vez anticipar los planes de acción que se llevarán a cabo ante cualquier inconveniente (Inycom, s/f).

El 30% de las familias caficultoras forman parte de cooperativas cafetaleras donde enfrentan mejores condiciones, debido a que presentan mayores fortalezas para crecer en el comercio nacional e internacional (García et al, 2009).

Actualmente en Junín hay varias organizaciones cafetaleras, como la Cooperativa Agraria de Mujeres Productoras de Café (CAMPC), Asociación de productores agrarios Agro Café, Cooperativa Agraria Cafetalera El Quinacho L-78 y Cooperativa Agroecológica Granos de Oro del Valle de Pangoa (COAGRO) (MIDAGRI, 2019) , que comercializan el café ya sea nacional como internacionalmente, además de realizar capacitaciones, escuelas de campo, visitas de intercambio y monitoreos continuos para mejorar la organización del trabajo e incrementar la productividad por hectárea, lo que debería traducirse como mayores ingresos para los pequeños caficultores (García et al, 2009).

La importancia del envasado y el empaque en el proceso de producción de café es porque se debe mantener al producto protegido y beneficiar al cliente final, como se puede apreciar en la Figura 6.

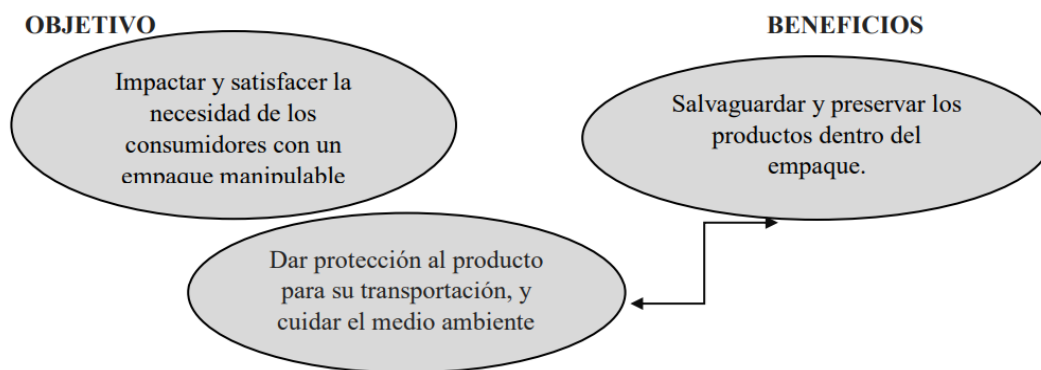


Figura 1.6: *Objetivo y Beneficios del Envasado de Café en Grano*

Nota. Reproducida de La Importancia Del Envasado Y El Empaque [Ilustración], de Mildred Ayala y Vanessa Cervantes, 2019 (<http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/47271/1/BINGO-ISCE-19P51.pdf#page=35&zoom=100,109,84>).

La mayor parte del valor agregado se le asigna a medida que el café avanza en la cadena de valor, siendo que las mejoras comunes son la mejora del producto, del proceso y la mejora funcional. Dicha mejor funcional hace referencia a utilizar empresas de procesamiento para transformar el café en productos más complejos, como el tostado o soluble, he incluso productos listos para beber. Por lo tanto, cuando el caficultor puede tostar su propio café y venderlo nacionalmente obtiene todos los beneficios ya que puede fijar el precio, evitar los costos de exportación y en muchas ocasiones, presentar un producto de mejor calidad (Perfect Daily Grind, 2021).

En la entrevista realizada a Martín Olano, ingeniero mecánico de Lima, que tiene 14 años de experiencia en la producción agrícola del café, organizador de la cooperativa de café de altura conocida como Amarurú, la cual se puede visualizar a detalle en el anexo, señaló que el procedimiento de empaquetado de café es altamente artesanal, no hay maquinaria involucrada, además, la mayoría de productores de café son los agricultores más pobres, siendo esta una actividad muy sacrificada y muy primitiva la producción; por cosecha se suelen recoger 2 o hasta 5 quintales por hectárea; asimismo, en el proceso de postcosecha, los granos se llevan a otras cooperativas que cuenten con procesadoras de café para seleccionar y separar el café, siendo que no se realizan empaquetados en sobres que vayan directamente al

consumo, ya que no es política del mercado darle valor agregado a la materia prima; los exportadores compran el café pergamino, el cual viene en sacos. Al ser parte de una economía mundial, se tiene que competir con el nivel de producción de otros países como Brasil, los cuales producen en promedio 50 toneladas diarias con muy pocas personas, en cambio en el Perú, se necesitan mucha más mano de obra para poder hacer una tonelada por día, esto debido a la alta mecanización tecnológica aplicada a la agricultura del café. También indicó que el empaquetado se realiza mediante microempresas que venden el empaque y se lleva a cabo artesanalmente; siendo que la tecnología es la clave para mejorar la producción, ya que, si se consiguen prototipos de maquinarias y se adaptan a la realidad cafetalera peruana, se puede darle valor agregado al café y darle más valor al productor; también se mencionó que el empaquetado es decisivo en la producción, así como se tuesta rápido, se debe empacar rápido, ya que si el productor realiza este proceso, va a competir precios de mercado porque el café es altamente rentable, siendo que se puede ganar hasta el 200%, pero el empaquetado se lleva a cabo de manera manual y es demasiado trabajo para ser de esta manera; una persona con experiencia puede embolsar en promedio 300 kg en 3 horas, no es como una máquina que puede realizar este proceso en grandes cantidades, se requiere de bastante experiencia por parte del personal que se dedica a esta actividad, además de que no se lleva un conteo de los paquetes producidos, se cuenta por la cantidad de kilos producidos y esto perjudica al productor. La falta de tecnologías aplicadas al empaquetado con la que si cuentan otros países es una gran problemática, ya que en el mercado se podría ingresar con precios de competencia y elevar los ingresos de los productores, siendo ejemplo de esto que el precio del kilo de café empaquetado podría rondar los S/. 60 u S/. 80, pero las presentaciones más vendidas son las de aproximadamente de 200g a 250g, considerando que, a la hora del tueste, 1 kg de café disminuye alrededor de 200g, mientras que el café exportado, el cual debe tener un 75% de rendimiento de grano y al 12% de humedad, vendido por quintal (100kg), suele rondar los

100\$, 200\$ o más, dependiendo de la bolsa de New York, la cual se actualiza constantemente (Olano, 2021).

Asimismo, en la entrevista realizada a Julia Beatriz Aramburú Aquino, productora independiente de café arábico de altura en MonoBamba, en la selva de Jauja a alrededor de 1650 msnm, en el departamento de Junín, la cual se puede visualizar a detalle en el anexo, señaló que el procedimiento de cosecha del café tarda alrededor de 3 años, para luego pasar a la postcosecha, la cual es la parte más importante donde se le da el valor agregado al café. Pasando por la despulpadora que realiza el pilado de café; el lavado, el tostado y luego el empaquetado, aunque también se produce el café molido, siendo esta producción para consumo directo nacional, debido a las trabas que les hacen a los pequeños agricultores para los documentos, sin pasar por intermediarios, ya que, debido a la venta de costales de alrededor de 60 kg, el precio era demasiado bajo, de alrededor de S/. 11.00 por kg, lo que causaba pérdidas y hacía la cosecha de café una actividad muy poco rentable. Por lo que la venta se realiza directamente a los consumidores. El café producido suele ser el tostado entero, debido a que la conservación de este café es mayor que la del café molido, para lo cual se usa una máquina piladora para seleccionar los mejores granos y el empaquetado se realiza en las mismas plantas procesadoras, por el motivo de quitarse ese trabajo de encima, la empresa lo entrega listo, ya que el envasado toma mucho trabajo y consume mucho tiempo. Los paquetes usados suelen ser los de ½ o 1 kg en sus presentaciones, con un precio de alrededor de S/. 35.00 por kilo de café de grano tostado con un puntaje de 92, cultivado a una altura de 1630 a 1800 msnm. Las condiciones para un buen empaquetado en cuanto a la temperatura y humedad suelen ser el ambiente, que en Junín es alrededor de 11°C durante la cosecha, con una humedad de alrededor de 50%, lo que se considera un clima seco, debido a que el café absorbe la humedad. Para el empaquetado, se debe esperar en el proceso hasta que el café se enfríe, debido a que, al envasarlo, esta suelta sus gases y el empaque termina

inflado. El empaquetado que se lleva a cabo es muy trabajoso, siendo que solía hacerse manualmente, pero debido a consumo de tiempo se derivó a una empresa procesadora, que tiene a muchos productores haciendo uso de sus servicios de postcosecha, yendo desde temprano para poder ser atendido, para lo cual es un costo aparte, de alrededor de S/. 2.40 por el kilo de café procesado, además de los costos de transporte del café a la empresa, lo cual también corre por cuenta del productor. En la Figura 7 se puede visualizar el tipo de empaque utilizado.



Figura 1.7: *Envase del Café en Grano*

Nota. Reproducida de Café Tostado y Molido al Por Mayor y Menor [Fotografía], de Venta de Café Chanchamayo, 2020 (<https://www.facebook.com/cafeorganicodechanchamayo/>).

Asimismo, en la Figura 8 se puede visualizar el empaque que sirve para mantener de una mejor forma la calidad del café, en comparación con el envase simple utilizado.



Figura 1.8: *Envase del Café en Grano que Garantiza una Mejor Calidad*

Nota. Reproducida de ¿Qué Conserva un Buen Empaque De Café? [Fotografía], de Érika Choperena, 2020 (<https://www.animalgourmet.com/2020/06/23/empaque-del-cafe-diferencias-beneficios/>).

Las tecnologías usadas por la máquina son máquinas que cuentan con obreros que revisan su funcionamiento, siendo hasta el mismo cliente testigo de todo el proceso. En cuanto a las condiciones de empaquetado, los envases deben estar limpios, se debe realizar en un ambiente aparte, además de considerar una adecuada limpieza de la máquina, mientras que para los envases se pueden utilizar los simples o las bolsas platinadas, las cuales cuestan alrededor de S/. 3.00 a S/. 4.00 soles cada una, siendo estas más costosas por su presentación. Finalmente, en cuanto a los registros tomados de la producción, estos no se toman en cuenta, solo se atienden por pedidos, haciendo lo necesario, pero no más debido a la demanda, siendo que el envasado es muy importante para lograr que el café se conserve. Se sabe que la cosecha más fuerte del año se lleva a cabo en mayo, donde se ve en realidad cuanto se produce, además de que en las primeras cosechas sale muy poco café y va en aumento, pero estas medidas son muy subjetivas, no se lleva un registro real de la cantidad de café producido, por lo que no se sabe si la producción es o no realmente rentable (Aquino, 2021).

El principal problema de la producción de café en Chanchamayo es el bajo nivel de competitividad y sostenibilidad social y ambiental en la cadena de valor del café, debido a eso se genera una pérdida de rentabilidad del cultivo, se reducen las exportaciones y a su vez se incrementa la pobreza y el desempleo. Se identificó que las causas de este problema son los bajos niveles de producción y de manejo técnico del cultivo, bajo nivel e inconsistencia de la calidad del café y la débil imagen del café peruano en los mercados tanto nacionales como internacionales; sin embargo, Junín es una zona cafetalera de gran potencial para generar grano de calidad (Llanos, 2021).

Según la Cámara Peruana del Café y el Cacao (2021), los cafés se encuentran en constante innovación, siendo que el logro de resultados son procesos que se soportan en tecnología, siendo los procesos de la postcosecha una pieza fundamental en la cadena de valor de café.

El envasado de café es casi tan importante como todo el proceso por el que pasa el grano antes de llegar a este, ya que marca una diferencia entre un aroma mediocre o que sus características se mantengan intactas para asegurar la buena calidad del mismo (Choperena, s/f).

Para la conservación es importante evitar la humedad y la oxidación, así como que no se genere una pérdida del aroma; debido a que el oxígeno provoca oxidación química del café, así como la degradación de muchos compuestos; el tiempo entre el tostado del grano y el consumo debe ser el menor posible; por último, la humedad es la causante de gran pérdida de la calidad del café, debido que al tostarlo este es altamente higroscópico, por lo que capta la humedad del ambiente. Por lo que un buen envase debe preservar al café de la humedad, aire, calor y luz; para lograr esto se deben utilizar los materiales correctos para conservación, así como también realizar en envasado al vacío, con válvulas desgasificadoras, materiales opacos y aislantes (Quiminet, 2011).

En base a las conversaciones con algunos productores y revisando información sobre la venta de café en el Perú, se requiere, para los pequeños productores que comercializan directamente, para los cuales la producción no es a gran escala, sin embargo, considerando que se puede escalar la producción para alrededor de 5 productores independientes si fuera necesario, diseñar un sistema de empaquetado en la presentación de 1 kg, ya que es un proceso crítico para la conservación, que garantice mejorar la productividad de la producción de café sin afectar la calidad de los granos y a su vez hacer uso de dispositivos de Internet de las Cosas (IoT por sus siglas en inglés) para realizar el monitoreo de la cantidad de paquetes hechos y de esta forma calcular las ganancias netas esperadas semanalmente, tomando en cuenta las consideraciones necesarias para que el empaquetado conserve el café en grano por más tiempo del que lo puede conservar un empaque que está actualmente siendo utilizado.

1.2 Propuesta de Solución

Como una posible solución se plantea desarrollar un sistema automático de costo para el envasado de granos de café, en la presentación de 1 kg, que reduzca la necesidad de mano de obra para los agricultores de Junín que realizan el proceso de cultivo de la manera tradicional, contando con una interfaz simple y entendible para facilitar el uso a personas sin amplios conocimientos en tecnología.

1.3 Alcance

El desarrollo del presente documento plantea la automatización del proceso de empaquetado de café con un volumen de producción de 70 kg/día para exportación y consumo local.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

El principal objetivo de la siguiente tesis es el diseño de una máquina de bajo costo para la realización del empaquetado de granos de café de altura que permita la comercialización directa por parte de las familias productoras en el departamento de Junín.

1.4.2 Objetivos específicos

- Determinación de la problemática y alcance de una propuesta de solución para las familias productoras de café en el departamento de Junín.
- Desarrollo de lista y estructura de funciones para el adecuado funcionamiento de la propuesta de solución para el empaquetado de granos de café de altura.
- Desarrollo, comparación y selección del concepto de solución óptima que satisfaga el correcto empaquetamiento de granos de café de altura.
- Desarrollo de un sistema mecánico que permita el empaquetado de granos de café de altura basado en un sistema de almacenamiento, traslado y dosificado de los granos de café para solventar la producción señalada en los requerimientos del proyecto, siendo esta de 70 kg/día.
- Diseñar el sistema electrónico que permita el proceso de empaquetado de granos de café a través de la implementación de sensores y actuadores en los sistemas de traslado y dosificado, los cuales operarán bajo un control proporcionado por una tarjeta electrónica diseñada a medida.
- Desarrollo de un algoritmo de control de los sensores y actuadores para la producción de los granos de café a través del empaquetado de los mismos.

- Diseñar el modelado del sistema mecánico en 3D de las partes más críticas para poder realizar un análisis de esfuerzos que permita verificar que los cálculos realizados son correctos.

1.5 Metodología

El presente proyecto hace uso de la metodología de diseño mecatrónico VDI 2221. Para su realización se llevaron a cabo los siguientes pasos:

- Para la definición de la problemática se llevarán a cabo entrevistas a productores independientes del café para obtener información de primera mano, además de la búsqueda de información sobre el proceso de cadena de valor del café de altura en Junín.
- Para el desarrollo del estado del arte se buscarán artículos comerciales que realicen el proceso de empaquetado, así como también trabajos de investigación y patentes sobre el proceso de empaquetado.
- Para la matriz morfológica se buscarán las diferentes tecnologías que permitan llevar a cabo cada parte del proceso de empaquetado.
- Los conceptos de solución planteados serán evaluados por un sistema de pesos en el apartado técnico y económico, obteniendo así un concepto de solución óptimo a desarrollar.
- El diseño mecánico se desarrollará mediante la herramienta de SolidWorks, en la cual se desarrollará una estructura que permita el almacenamiento de granos de café, así como también el traslado mediante motores y sistemas de transporte helicoidales, el dosificado y el empaquetado del mismo.
- El diseño de control se llevará a cabo mediante el software de Matlab, en el cual se llevará a cabo una simulación del algoritmo de control para verificar que sea el adecuado.
- El diseño electrónico se llevará a cabo en Kicad 8.0, en el cual se desarrollará una tarjeta para los componentes electrónicos a utilizar.

- Las conclusiones se realizarán considerando los objetivos de la presente tesis, verificando si es que llegaron a cumplirse además de la misma.

CAPÍTULO 2

DISEÑO CONCEPTUAL

En este capítulo se explicará el diseño conceptual del presente documento, empezando por el fundamento teórico, el estado del arte, los requerimientos del sistema, la estructura de funciones, la matriz morfológica, los conceptos de solución y una evaluación de dichos conceptos mediante el aspecto técnico y económico, decidiendo al final por la solución óptima de que nos permita obtener los objetivos establecidos.

2.1 Fundamento teórico

El café es nombre que recibe la semilla de un árbol llamado cafeto, el cual posee entre cuatro a seis metros de alto, con flores blancas y cuyos frutos son conocidos como cerezos, siendo dentro de estos donde se encuentra el café. (Definición.de, s/f)

Por extensión del mismo término, se conoce como café a la bebida que se caracteriza por exquisito sabor y por su combinación con otras bebidas, como la leche o el cacao, que da como resultado diferentes aromas y sabores. (Características, s/f)

Existen diferentes formas de preparación de café, entre las más comunes se encuentran las siguientes:

- Café express o expreso, el cual es el café común que todos conocemos.
- Café cortado, que consiste en agregarle un poco de leche al café preparado.
- Café latte, el cual se prepara con 1/3 de café y 2/3 de leche.
- Café americano, que es la forma de llamar al café expreso con más agua.

El proceso de producción del café consiste en las siguientes ocho etapas:

- Primero es la plantación, que es donde se inicia el ciclo natural de crecimiento de las semillas, donde se debe cuidar la forma de sembrado y el manejo del cultivo.



Figura 2.1: *Plantones de Cafeto en el Proceso de Elaboración*

Nota. Reproducida de Cómo se Planta un Cafeto [Fotografía], de Bonka (<https://www.bonka.es/amor-por-el-cafe/como-es-una-plantacion-de-cafe>).

- Segundo es la cosecha, la cual se produce anualmente cuando las cerezas de café ya están maduras, para lo cual existen dos métodos: El primero, conocido como Picking, se seleccionan las cerezas más maduras y se recolectan a mano; mientras que, en el segundo, llamado Stripping, la recolección se realiza mecánicamente, así que para evitar el recojo de cerezas no maduras, se realiza una inspección posterior.



Figura 2.2: *Cosecha del Cultivo de Café*

Nota. Reproducida de La Importancia de Una Cosecha Selectiva en el Café [Fotografía], de Artidoro Rodríguez, 2019 (<https://www.artidororodriguez.com/blog-cafe/procesos/la-importancia-de-una-cosecha-selectiva-en-el-cafe/>).

- Tercero es el procesamiento, donde se elimina la pulpa y se recolecta el café, a su vez existen dos métodos, el húmedo y el seco, siendo que el sabor depende del método que se utilice.



Figura 2.3: *Despulpado de Café*

Nota. Reproducida de Despulpado del Café Cereza [Fotografía], de Equipo Mundo Cafeto, 2019 (<https://mundocafeto.com/beneficiado/despulpado-del-cafe-cereza/>).

- Cuarto es el curado, donde se elimina la cáscara que cubre al grano de café para poder clasificarlo según el tamaño, forma y calidad.

- Quinto es la cata del café, donde se lleva a cabo la degustación del mismo para analizar la calidad del sabor.



Figura 2.4: *Cata de Café*

Nota. Reproducida de ¿A Qué Sabe El Café? [Fotografía], de Norka Peralta, 2018 (<https://cafelab.pe/2018/03/21/tiempo-de-cata-a-que-sabe-el-cafe/>).

- Sexto es el tueste, en el que el grano es sometido a altas temperaturas, las cuales pueden llegar a alcanzar los 200°C, donde se adquiere el color característico, el tamaño y el peso varía y adquiere su muy conocido aroma.



Figura 2.5: *Tostado de Café*

Nota. Reproducida de Tipos de Tueste del Café: ¿Cómo Afectan al Sabor? [Fotografía], de Candelas, 2016 (<https://www.cafescandelas.com/es/blog/tipos-tueste-caf%C3%A9>).

- Séptimo es el molido, donde se liofiliza al grano de café.



Figura 2.6: *Molido de Café*

Nota. Reproducida de Qué Necesitas y Cómo Debes Moler el Café para Obtenerlo Como Tú Quieres [Fotografía], de BigStock, 2020 (https://www.65ymas.com/personas-mayores/consejos-mayores/necesitas-moler-cafe-obtenerlo-quieres_12264_102.html).

- Octavo es la preparación, donde finalmente se determina la forma en la que se prepare la infusión, dependiendo de los gustos del consumidor.



Figura 2.7: *Preparación de Café*

Nota. Reproducida de Cómo Preparar un Café en Chemex [Fotografía] 2019 (<https://www.nestleprofessional.es/area-profesionales/noticias/como-preparar-un-cafe-en-chemex.html>).

Para el presente trabajo se asumirá el empaquetamiento después de la etapa de tostado de granos de café.

Entre los factores más determinantes que afectan la calidad del café tostado, según Riaño Campo (p. 104), se encuentra el oxígeno, el cual causa la oxidación del mismo, además de la

decoloración del empaque del producto, la descomposición por microorganismos y el daño causado por plagas. Además, los requisitos técnicos son exigente y son los siguientes:

- Protección del aroma y sabor del café.
- Adecuada barrera de humedad.
- Buena barrera de oxígeno.
- Buena barrera de luz.
- Otros, etc.

Asimismo, en la entrevista realizada a Martín Olano, señaló que las características de la cosecha para un buen café, aparte de la variedad del café, son las siguientes:

- Buenas tierras (ricas en potasio, calcio y fósforo).
- Bajas temperaturas adecuadas.
- Iluminación adecuada.
- Agua usada (PH no mayor de 7 de acides, que no sean servidas sino de manantial).
- Secado en carpas solares (en bosques nublosos se tapa cuando cae la llamada “escarcha”).
- Evitar que el café absorba de nuevo la humedad.

También mencionó que, por el problema de la roya (plaga), se perdieron casi el 90% del café nativo y que ahora hay semillas híbridas (catimoros, los cuales no son de alta tasa, número por el cual se califica la calidad del café, pero sí de gran producción). Si bien el Perú no suele consumir café, porque no conocen los beneficios que este trae, como el hecho de que es anticancerígeno, el café que se consume en la ciudad es el que los productores desechan (Olano, 2021).

De igual forma, según Riaño Campo (pp. 111-112), existen algunos métodos, para realizar el procedimiento de empaquetado, como los siguientes:

- **Envasado en atmósfera modificada:** Se reemplaza, mediante una mezcla de gases, el aire y gas carbónico. Sin embargo, la selección expulsa gas carbónico del café, las bacterias del empaque y a la baja permeabilidad del empaque.



Figura 2.8: *Envasado de Café en Atmósfera Modificada*

Nota. Reproducida de Desgasificación y Aroma Del Café [Fotografía] 2020 (<https://perfectdailygrind.com/es/2020/11/18/como-el-empaque-conserva-el-aroma-del-cafe/>).

- **Empacado al vacío:** También considerado como atmósfera modificada. Este tipo de envasado permite prolongar la vida útil de un producto y lo protege contra elementos externos. Consiste en colocar el recipiente en una cámara al vacío y eliminar el aire del residual producto, para luego sellar el recipiente.



Figura 2.9: *Envasado al Vacío de Café*

Nota. Reproducida de Envasado de Café de Vacío [Fotografía], de Toper (https://www.toper.com/es/urun_kategori/envasado-de-cafe-de-vacio/).

- **Envasado con secuestrantes de oxígeno, gas carbónico y agua:** Se retira ciertos compuestos de una mezcla de gases residuales en el recipiente, mediante sustancias sólidas. De esta manera solo queda el café atrapado.

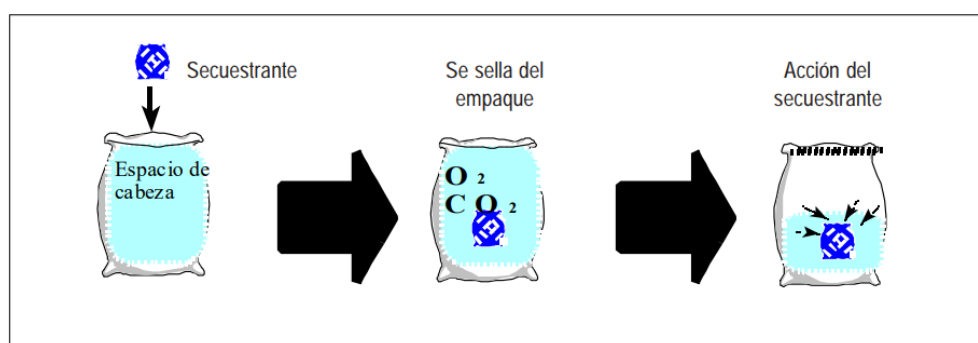


Figura 2.10: *Mecanismo de Acción en Empaques*

Nota. Reproducida de Mecanismo de Acción del Secuestrante de Oxígeno y Dióxido de Carbono en Empaques [Ilustración], Ageless, 1999 (<https://www.cenicafe.org/es/publications/arc050%2802%29145-165.pdf>).

- **Envasado vertical:** Este tipo de envasado, ya sea para granos de café o para café molido, carga el producto en el recipiente y lo cierra herméticamente.



Figura 2.11: *Envasado Vertical de Café*

Nota. Reproducida de Máquina de Envasado Automático de Café en Polvo [Fotografía], Alibaba (<https://spanish.alibaba.com/product-detail/best-vertical-packing-machine-automatic-coffee-powder-packaging-machine-of-low-price-1117038448.html>).

- **Envasado con válvulas desgasificadoras:** Estas válvulas se aplican al empaque y el mecanismo se activa por la diferencia de presión que se crea cuando el café expulsa sus gases. La válvula deja escapar dichos gases cuando la presión interna supera los 4.1 milibares.



Figura 2.12: *Envasado con Válvulas Desgasificadoras*

Nota. Reproducida de Válvula Desgasificadora [Fotografía], Catálogo del Empaque (<https://www.catalogodeempaques.com/ficha-producto/Valvula-desgasificadora+101371>).

- **Envasado horizontal:** Al igual que el envasado vertical, carga el producto en el recipiente y lo cierra herméticamente.



Figura 2.13: *Envasado Horizontal de Café*

Nota. Reproducida de Envasado Flow-Pack [Fotografía], IMCO (<https://imco.es/cafe-empacado/>).

- **Envasado en sobres y Stick-Pack:** Este tipo de envasado puede llegar a grandes cantidades de producción, siendo para café molido y soluble.

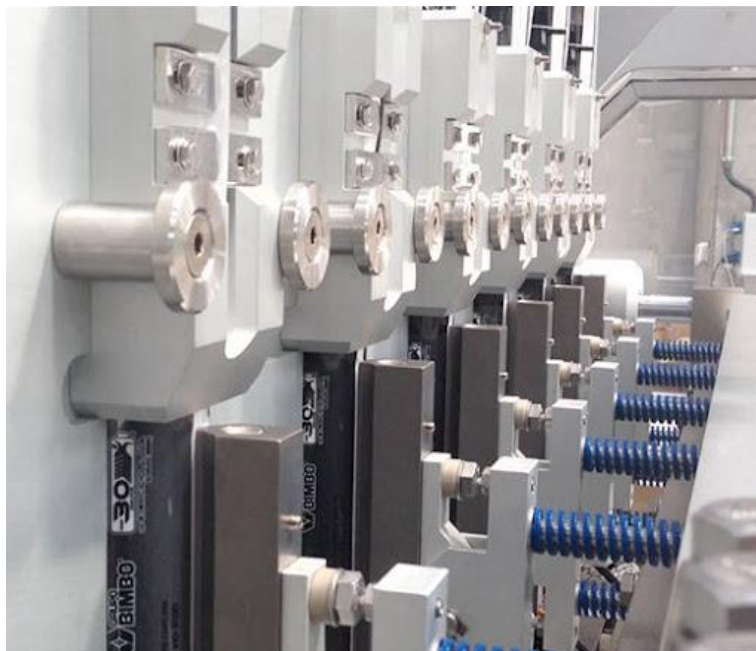


Figura 2.14: *Envasado de Café en Sobres y Stick-Pack*

Nota. Reproducida de Envasadora Stickpack Automática [Fotografía], Innoenvas (<http://www.innoenvas.com/envasadoras-stickpack.html>).

2.2 Estado del arte

En el estado del arte, se han encontrado tanto modelos de proyectos comerciales como de investigación. Para ver el estado del arte completo, ver Anexo D.

2.3 Requerimientos del sistema

En este apartado se explican los requerimientos sobre los cuales se basará el diseño del proyecto, donde se incluyen tanto las exigencias como los deseos del cliente. Para ver la lista de requerimientos completa, ver Anexo E.

2.4 Black Box

La función principal del sistema es el empaquetado de granos de café en sobres de 1 kg. En el Black-Box del proyecto solo se muestran las entradas (en el lado izquierdo) y las salidas (en el lado derecho) del sistema. Las líneas representan la energía, las señales y el material que entra y sale del sistema. Para ver el Black Box completo, ver Anexo F.

2.5 Estructura de funciones

En la estructura de funciones se explican las funciones parciales del sistema. Siendo estas divididas por dominios según la relación que guarden con el proceso. Para ver la estructura de funciones completa, ver Anexo G.

2.6 Matriz morfológica

La matriz morfológica incluye las alternativas de solución para cada uno de los dominios del sistema. Estas alternativas se han hallado considerando proyectos similares presentes en el Estado del Arte y por investigación adicional. Para ver la matriz morfológica completa, ver Anexo H.

2.7 Concepto de solución óptimo

En este apartado se presentan los bosquejos de solución de las cuatro alternativas de solución planteadas para la investigación. Para ver los conceptos de solución completos, ver Anexo I.

2.8 Evaluación de los conceptos de solución

En este apartado se presenta la evaluación de las cuatro alternativas de solución planteadas para la investigación.

2.8.1 Evaluación técnica

En cuanto a la evaluación técnica, se consideraron cinco criterios con pesos entre 1 y 4. Para ver la evaluación técnica completa, ver Anexo J.

2.8.2 Evaluación económica

En cuanto a la evaluación económica, se consideraron cinco criterios con pesos entre 1 y 4. Para ver la evaluación económica completa, ver Anexo K.

2.8.3 Solución óptima

De acuerdo con los puntajes asignados, se obtuvo la gráfica de Evaluación Técnica-Económica, la cual se puede observar en la Figura 23. Para elegir la mejor solución entre las 4 alternativas planteadas, se tomaron como referencia los criterios mencionados en la Tabla 3. Primero, se descartaron las soluciones por debajo del valor de 0.6. Luego se eligió la solución más cercada a la línea de solución ideal (Solución 4). Finalmente, se llegó a la conclusión de que esta solución tenía mejor desempeño que las demás y que se tomaría como base para diseñar la solución óptima.

Los beneficios de este prototipo en el mercado con respecto a lo encontrado en el estado el arte son que la utilización de las válvulas desgasificadoras permiten que el café se mantenga por mucho más tiempo y pueda ser comercializado con una mejor calidad; asimismo, el uso parcial de tecnologías existentes en las máquinas industriales hace que la productividad en cuanto a la producción actual de café en productores independientes en Junín aumente en un 400%, lo que permitiría que si hasta cinco productores independientes de café desean unir sus producciones, bastaría con un solo prototipo para poder solventar toda la producción; cabe resaltar que este prototipo no es de una máquina industrial, por lo que no puede ser comparado con tales niveles de producción que son llevados a cabo para cooperativas o empresas; además, el uso de un sensor para conteo y envío de información a la nube, además de poder ser visualizada en una interfaz de aplicación móvil, permite que la producción semanal o mensual se pueda medir, lo cual es muy importante para poder mejorar mediante indicadores, ya que lo que se mide puede ser comparado y optimizado.

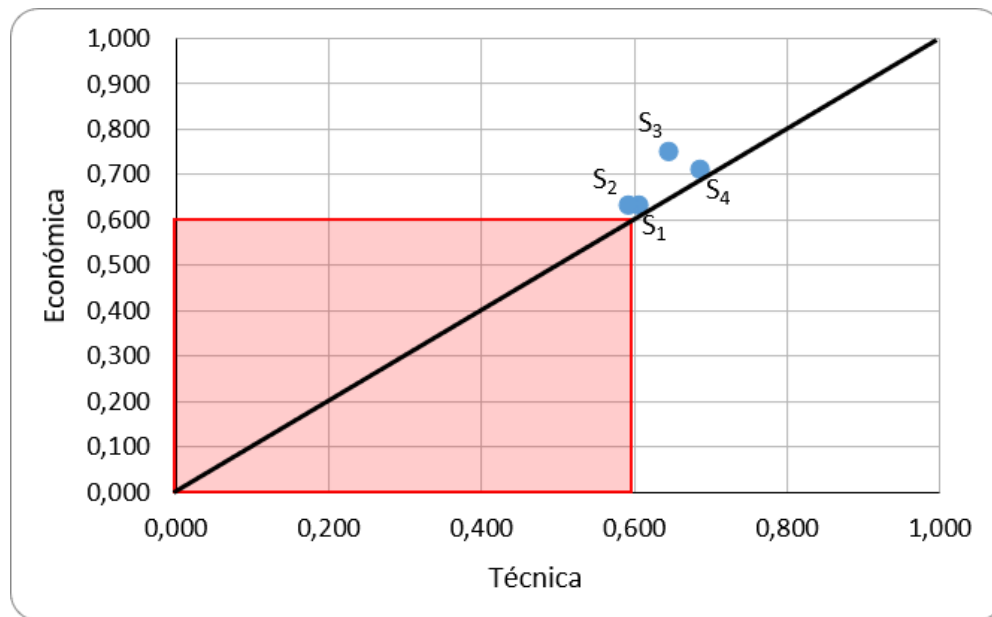


Figura 2.15: *Evaluación Técnico-Económica*

Tabla 2.1: Criterios para determinar la solución óptima

CRITERIOS PARA LA SOLUCIÓN:	ALTERNATIVAS
1.Desestimación de las soluciones con valor técnico/económico menor a 0.6	-
2.Alternativas que se acercan al valor ideal	S3 y S4
3.Alternativas que se encuentran cerca de la línea diagonal	S4

Fuente: Elaboración propia

2.9 Diagrama de bloques

La empaquetadora de café comprende la integración de los diferentes sensores y actuadores para los sistemas con los que cuenta. De la misma forma, la alimentación y comunicación entre componentes, siendo que el controlador se encarga de la recepción de señales de los sensores para poder procesarlas y determinar el movimiento de los actuadores. En la Figura 2.16 se puede visualizarla comunicación del hardware mediante un diagrama de bloques.

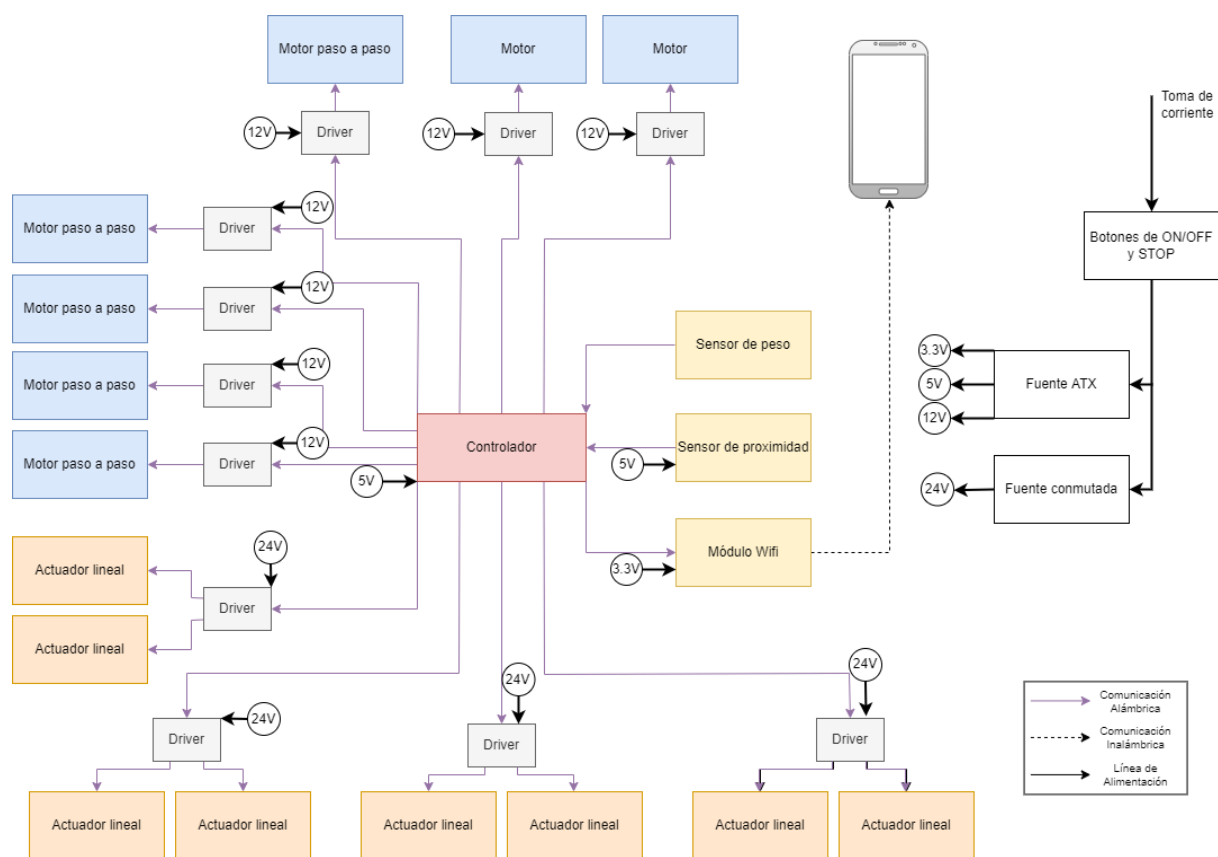


Figura 2.16: *Diagrama de bloques*

CAPÍTULO 3

DISEÑO DEL SISTEMA MECATRÓNICO

En este capítulo se explicará el desarrollo del diseño del sistema mecatrónico, lo cual abarca el desarrollo de los cálculos mecánicos, el modelado 3D, el diseño del sistema de control, el desarrollo de la interfaz de usuario, el desarrollo eléctrico y electrónico y la selección de la fuente de energía. El concepto de solución consiste en una tolva que almacena los granos de café, asimismo, los traslada y los eleva mediante un tornillo sin fin para luego depositarlos en la dosificadora, para que luego sean depositados en las bolsas que vienen de un rollo, donde se les coloca posteriormente la válvula desgasificadora y son formadas y selladas tanto vertical como horizontalmente. A continuación, se detalla el procedimiento para el diseño de la estructura y los subsistemas dentro del proyecto.

3.1 Selección de sensores y actuadores





En esta sección se evaluarán en diferentes tablas comparativas los sensores y actuadores que han sido seleccionados como el módulo Wifi, el sensor de presencia, el sensor de peso, los

actuadores lineales, los motores paso a paso, el driver para el motor paso a paso, el driver para el actuador lineal y el driver del motor. A continuación, se evalúan cada uno.

3.1.1 Módulo Wifi

Para la selección del módulo wifi, el cual se encarga de la comunicación entre el celular con el aplicativo móvil y el microcontrolador, se muestran los diferentes modelos encontrados y algunos criterios para su adecuada selección en la Tabla 3.1

Tabla 3.1: Comparación entre modelos de módulos wifi

Características	Modelo	WEMOS D1 MINI ESP8266 WIFI	ESP-WROOM-32-ESP32 WIFI	ESP-01 ESP8266 WIFI- SERIAL	ESP-12E ESP8266 WIFI
	Requisitos				
Consumo de potencia	<1mW	0.75mW	0.7mW	0.8mW	-
Voltaje de alimentación (máx)	5 VDC	5 VDC	3.3 VDC	3.3 VDC	3.3 VDC
Corriente (mA)	300	215	215	215	215
Precio máximo (S/.)	Menor a 30	25	40	20	18





Fuente: Elaboración propia

En base a los requisitos seleccionados para el módulo wifi, de los cuales se puede apreciar que el único que no cumple es el segundo, se elige el tercer modelo por su bajo precio y su consumo de potencia dentro del rango.

3.1.2 Sensor de presencia

Para la selección del sensor de presencia, el cual se encarga de contabilizar la cantidad de paquetes que se han realizado, se muestran los diferentes modelos encontrados y algunos criterios para su adecuada selección en la Tabla 3.2

Tabla 3.2: Comparación entre modelos de sensores de presencia

Características	Fabricante	Naylamp Mechatronics	Naylamp Mechatronics	Naylamp Mechatronics	Naylamp Mechatronics
	Modelo	Sensor ultrasónico HC-SR04	Sensor de Proximidad Capacitivo LJC18A3-H-Z/BX (NPN-NO)	Sensor de proximidad Fotoeléctrico Infrarrojo E18-D80NK	Sensor de proximidad Fotoeléctrico Reflex E3F-R2N12
	Requisitos				
Corriente máxima de alimentación	< 20mA	15mA	20mA	20mA	20mA
Voltaje de alimentación (máx)	5VDC	5VDC	36VDC	5VDC	36VDC
Rango de medición	50cm	2cm - 450cm	1mm - 5mm	3cm - 80cm	2m (máx)
Precio máximo (S/.)	Menor a 30	8	40	28	60




Fuente: Elaboración propia

En base a los requerimientos seleccionados para el sensor de presencia, de los cuales se puede apreciar que el segundo y cuarto no cumplen, se elige el tercer modelo debido a que cumple con los requerimientos y es más robusto que el primer modelo; por lo demás ambos están dentro del rango aceptado.

3.1.3 Sensor de peso

Para la selección del sensor de peso, el cual se encarga de monitorear el peso de los granos de café que ingresan a la bolsa para poder ser empaquetados, se muestran los diferentes modelos encontrados y algunos criterios para su adecuada selección en la Tabla 3.3

Tabla 3.3: Comparación entre modelos de sensores de peso

Características	Fabricante	SAISAC Mecatrónica	INDUSTRIAS TEZLA	SAISAC Mecatrónica
	Modelo	CELDA DE CARGA 5 KG + HX711	Sensor de fuerza FSR405	CELDA DE CARGA 1 KG + HX711
	Requisitos			
Corriente máxima de alimentación	<1,5mA	1,5mA	1mA	1,5mA
Voltaje de alimentación (máx)	12VDS	12VDS	5VDS	12VDS
Rango de medición	>2kg	5kg	1kg	1kg
Precio máximo (S/.)	20 (máx)	19,5	\$ 29	20

Fuente: Elaboración propia

En base a los requerimientos seleccionados para el sensor de peso, de los cuales se puede apreciar que el segundo y tercero no cumplen, se elige el primer modelo debido a que cumple con los requerimientos de rango de medición, para que no haya problemas al momento de realizar el monitoreo.

3.1.4 Actuador lineal

Para la selección del actuador lineal, el cual se encarga de generar el movimiento traslacional utilizado en la máquina en diversos procesos, se muestran los diferentes modelos encontrados y algunos criterios para su adecuada selección en la Tabla 7.

Tabla 3.4: Comparación entre modelos de actuadores lineales

Características	Fabricante	MECO	LINAK	PROGRESSIVE AUTOMATIONS
	Modelo	VDS695935	ACTUATOR LA 14	PA-14P
	Requisitos			
Corriente máxima de alimentación	40mA	1,67A - 2,5A	4.2A	5A
Voltaje de alimentación (máx)	12VDC	12VDC	24VDC	12VDC
Extensión	100mm	200mm	130mm	760mm
Carga	100N	500N	750N	222N
Precio máximo (S/.)	120	170	150	575

Fuente: Elaboración propia

En base a los requerimientos seleccionados para el actuador lineal, de los cuales se puede apreciar que el primero y tercero no cumple con el requisito del costo, se elige el segundo modelo debido a que cumple con los requerimientos solicitados.

3.1.5 Motor paso a paso

Para la selección del motor paso a paso, el cual se encarga de generar el movimiento rotacional utilizado en la máquina en diversos procesos, se muestran los diferentes modelos encontrados y algunos criterios para su adecuada selección en la Tabla 8.

Tabla 3.5: Comparación entre modelos de motores paso a paso

Características	Fabricante	TT MOTOR	MotioKing	QuickSilver Controls
	Modelo	Motor DC GMP42-775PM	Nema 34 modelo bipolar 34H2A6840	Nema 24 QCI-DS028
	Requisitos			
Corriente máxima de alimentación (máx)	5A	16A	5A	3.5A
Voltaje de alimentación (máx)	24VDC	24VDC	55VDC	12VDC
Torque (N.m)	2 N.m	3	3.1	2.33
Peso (kg)	-	0.750	2	1.3
Precio máximo (S/.)	100	61	135	100




Fuente: Elaboración propia

En base a los requerimientos seleccionados para el motor paso a paso, de los cuales se puede apreciar que el primero y segundo no cumplen con los requisitos, se elige el tercer modelo debido a que cumple con los requerimientos solicitados.

3.1.6 Motor del transportador helicoidal

Para la selección del motor del transportador helicoidal, el cual se encarga de generar el movimiento rotacional utilizado por el tornillo sin fin para transportar y elevar los granos de café, se muestran los diferentes modelos encontrados y algunos criterios para su adecuada selección en la Tabla 9.

Tabla 3.6: Comparación entre motores DC para el transportador helicoidal

Características	Fabricante	Banebots	Banebots	Sick
	Modelo	Motoreductor PDX26	Motoreductor PDX16	3450U
	Requisitos			
Corriente máxima de alimentación (máx)	5A	1.5	1.5	5.3
Voltaje de alimentación (máx)	12VDC	12	12	12
Torque (N.m)	11.49 N.m	16.38	10.2	2.13
Velocidad de rotación con carga (rpm)	>10 rpm	900	1500	1500
Potencia entregada	> 12.03 W	184 W (eficiencia de 45.3%)	184 W (eficiencia de 45.3%)	20 W
Precio máximo (S/.)	100	89	89	95




Fuente: Elaboración propia

En base a los requerimientos seleccionados para el motor del transportador helicoidal, de los cuales se puede apreciar que el segundo y tercero no cumplen con los requisitos por el torque y la corriente máxima, respectivamente; se elige el primer modelo debido a que cumple con los requerimientos solicitados.

3.1.7 Motor del dosificador volumétrico

Para la selección del motor del dosificador volumétrico, el cual se encarga de generar el movimiento rotacional utilizado para girar el disco para dosificar los granos de café, se muestran los diferentes modelos encontrados y algunos criterios para su adecuada selección en la Tabla 10.

Tabla 3.7: Comparación entre motores DC para el dosificador volumétrico

Características	Fabricante	Banebots	Banebots	Sick
	Modelo	Motoreductor PDX26	Motoreductor PDX16	3450U
	Requisitos			
Corriente máxima de alimentación (máx)	5A	1.5	1.5	5.3
Voltaje de alimentación (máx)	12VDC	12	12	12
Torque (N.m)	7.26 N.m	16.38	10.2	2.13
Velocidad de rotación con carga (rpm)	>1 rpm	900	1500	1500
Potencia entregada	> 60.5W	184 W (eficiencia de 45.3%)	184 W (eficiencia de 45.3%)	20 W
Precio máximo (S/.)	100	89	89	95

Fuente: Elaboración propia

En base a los requerimientos seleccionados para el motor del dosificador volumétrico, de los cuales se puede apreciar que el tercero no cumple con los requisitos por el torque y la corriente máxima, se elige el primer modelo debido a que cumple con los requerimientos solicitados y no sobredimensiona la capacidad del motor como lo hace el segundo modelo.

3.2 Diseño y cálculos mecánicos

Los planos mecánicos del sistema se adjuntarán en el Anexo B, pero se presentará el diseño y el cálculo de cada sistema, desde la tolva de almacenamiento hasta el sistema de envasado, además de algunas verificaciones importantes como el factor de seguridad en el diseño de la

tolva. En la Figura 25 se puede visualizar el modelo estimado del sistema de dosificación de café.

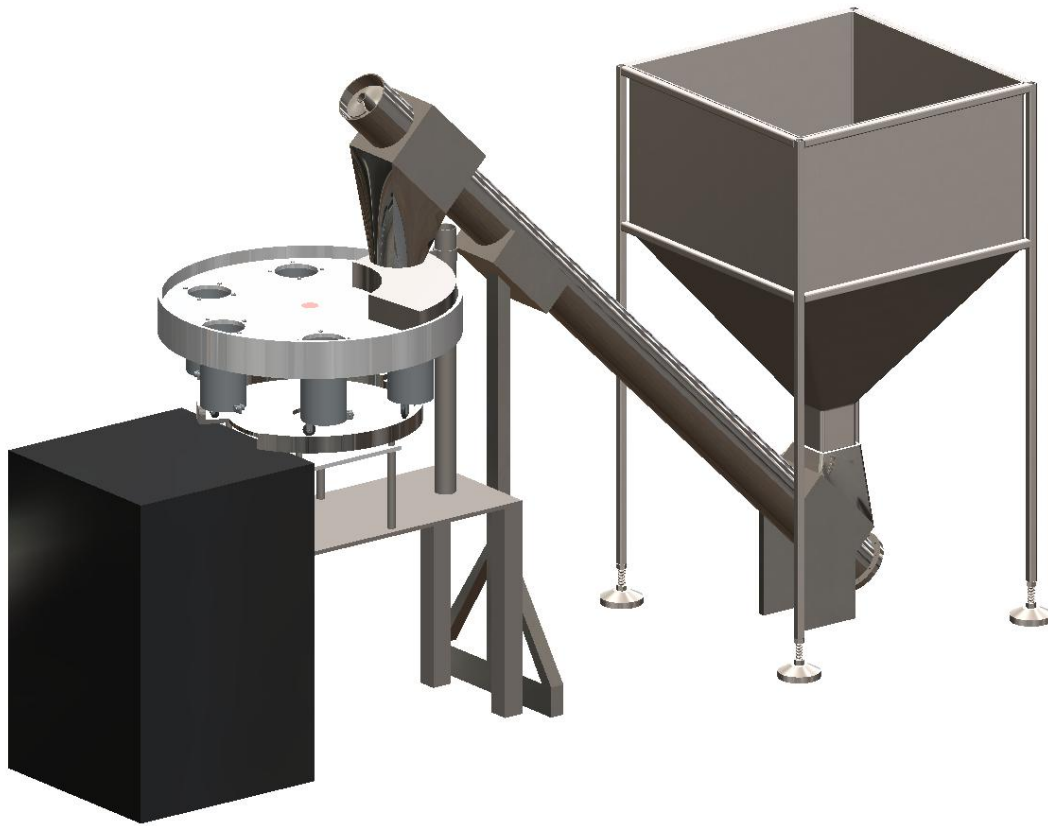


Figura 3.1: *Diseño 3D del sistema de empaquetado de café de altura*

3.2.1 Tolva de almacenamiento

Para el diseño de la tolva y que esta almacene sin problemas los 100kg de la producción semanal, expuesta en los requerimientos del sistema, se necesita saber la densidad del café comercial, la cual es el siguiente:

$$\delta_{cafe} = 715 \text{ kg} / \text{m}^3 \dots\dots\dots (1)$$

Considerando, según los requerimientos, que la masa del café es de 100kg

$$m_{cafe} = V_{tolva} \times \rho_{cafe} \dots\dots\dots (2)$$

$$100kg = V_{tolva} \times \rho_{cafe} \dots\dots\dots (3)$$

$$\rho_{cafe} = (1 - FEV) \times \delta_{cafe} \dots\dots\dots (4)$$

Consideramos el valor del FEV (Factor de espacios vacíos) para una tolva de gruesos debido a que serán granos de café.

$$FEV = 0.4 \dots\dots\dots (5)$$

$$\rho_{cafe} = (0.6) \times 715kg / m^3 \dots\dots\dots (6)$$

$$\rho_{cafe} = 429kg / m^3 \dots\dots\dots (7)$$

$$V_{tolva} = \frac{m_{cafe}}{\rho_{cafe}} \dots\dots\dots (8)$$

$$V_{tolva} = \frac{100kg}{429kg / m^3} \dots\dots\dots (9)$$

$$V_{tolva} = 0.2331m^3 \dots\dots\dots (10)$$

$$V_{tolva} = V_{paralelepipedo} + V_{tronco_de_piramide} \dots\dots\dots (11)$$

Para el diseño de las dimensiones se consideramos algunas simplificaciones, como el diseño cuadrado de la tolva, como se muestra en la Figura 26.

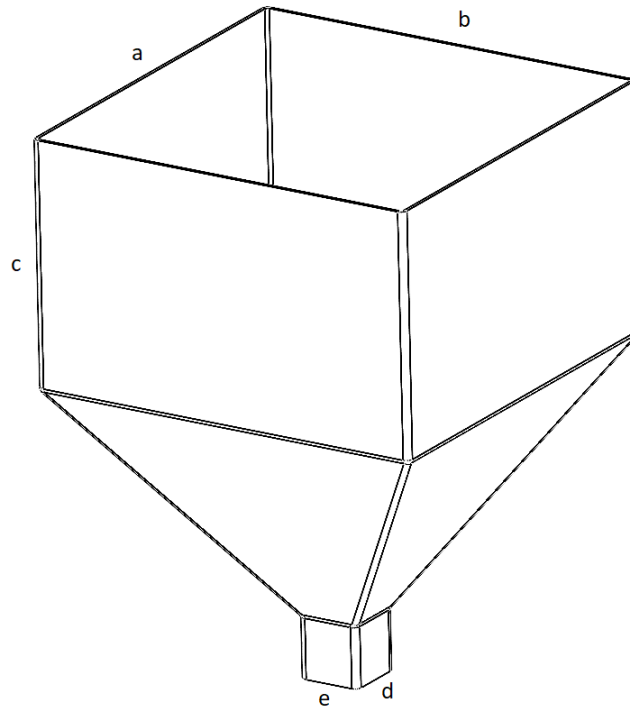


Figura 3.2: *Medidas generales de la tolva*

Se consideró que:

$$a = b$$

$$d = e$$

$$c = h$$

$$V_{tolva} = a \times b \times c + \frac{1}{3} \times h \times (a \times b + d \times e + a \times d) \quad \dots\dots (12)$$

$$V_{tolva} = a^2 \times c + \frac{1}{3} \times c \times (a^2 + d^2 + a \times d) \quad \dots\dots (13)$$

$$V_{tolva} = c \times \left(a^2 + \frac{1}{3} \times (a^2 + d^2 + a \times d) \right) \quad \dots\dots (14)$$

Definimos:

$$a = b = 0.65m$$

$$d = e = 0.1m$$

Para que no exceda la medida del prototipo definida en la lista de requerimientos.

Por lo tanto:

$$c = 0.3962m$$

Y con las medidas estimadas se realiza el modelado 3D de la tolva.

En cuanto al material de fabricación, se seleccionó el acero estructural A36, con un espesor de 5mm, debido a que tiene una alta resistencia por unidad de peso, lo que implica que el peso se reducirá, además de ser un material comercial para la fabricación de tolvas. Además de ser un material con una alta tenacidad, una gran facilidad para soldado, resistente a la fatiga y con una alta durabilidad. Es el material ideal para la fabricación de tolvas. En cuanto a la fabricación, se debe cortar y doblar una chapa de metal y luego pasar a colocar los cordones de soldadura.

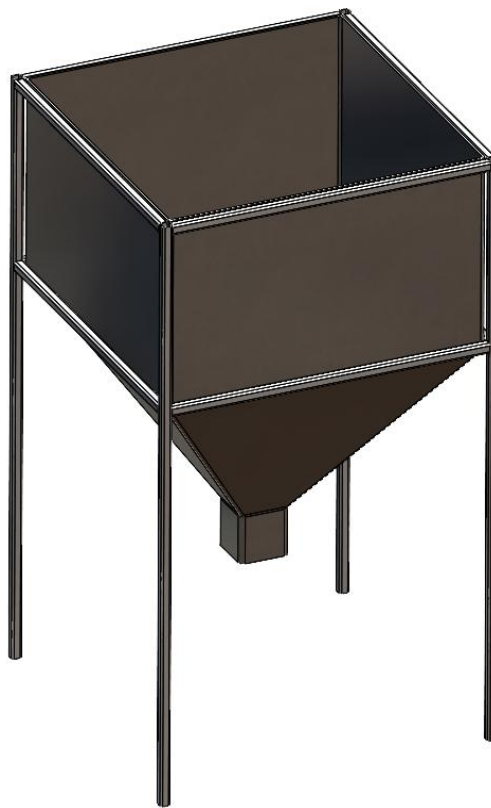


Figura 3.3: *Diseño 3D de la tolva*

Para el análisis de la resistencia de la tolva se llevó a cabo un análisis estático de esfuerzos, en la Figura 28 se puede visualizar dicho análisis.

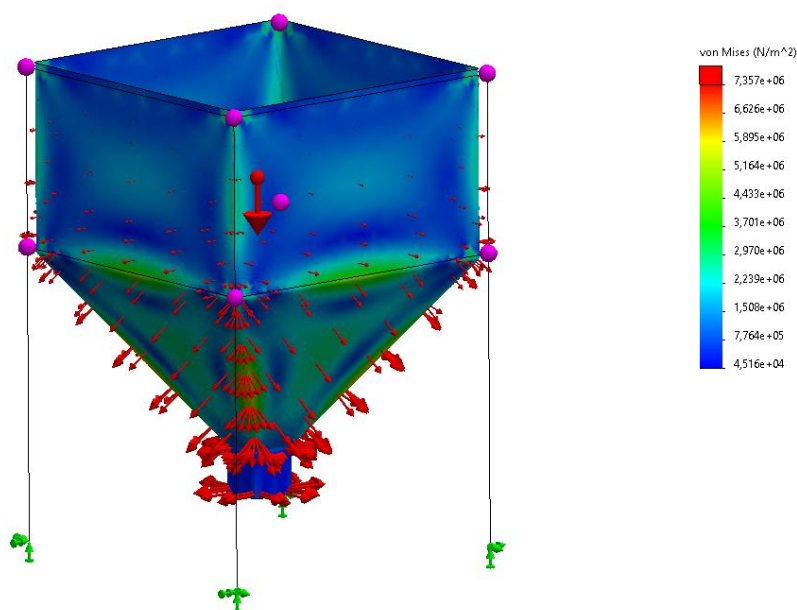


Figura 3.4: *Análisis estático de los esfuerzos*

Asimismo, en la Figura 29 se muestra el análisis del factor de seguridad (con escala corregida), donde según lo simulado, el valor más crítico tiene un factor de seguridad de 23.43, el cual se usó para saber si la tolva resistía utilizando la relación del límite de fluencia y el límite máximo.

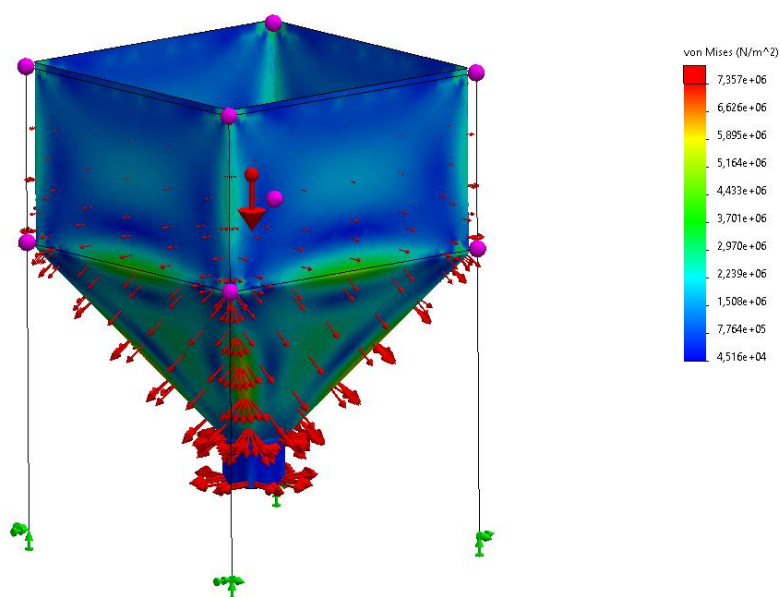


Figura 3.5: *Análisis estático de los esfuerzos*

Para la verificación, se debe tomar en cuenta la siguiente ecuación:

$$Lim_{max} \leq \frac{Lim_{fluencia}}{FS} \dots\dots (15)$$

$$200000 \leq \frac{7.357 \times 10^6 \text{ N/m}^2}{23.43} \dots\dots (16)$$

$$200000 \leq 313999.1464 \dots\dots (17)$$

Por lo tanto, de esta forma se realizó la verificación del diseño de la tolva de almacenamiento de granos de café para una capacidad de 100kg.

3.2.2 Transportador helicoidal

Para el procedimiento del diseño para el transportador helicoidal se consideran los componentes del sistema tales como lo siguientes:

- Hélice y eje
- Carcasa
- Grupo motriz
- Velocidad de giro del tornillo
- Paso y diámetro del tornillo
- Capacidad de transporte
- Potencia de accionamiento

En la Figura 30 se pueden apreciar los principales componentes que constituyen el sistema de transporte por tornillo sin fin.

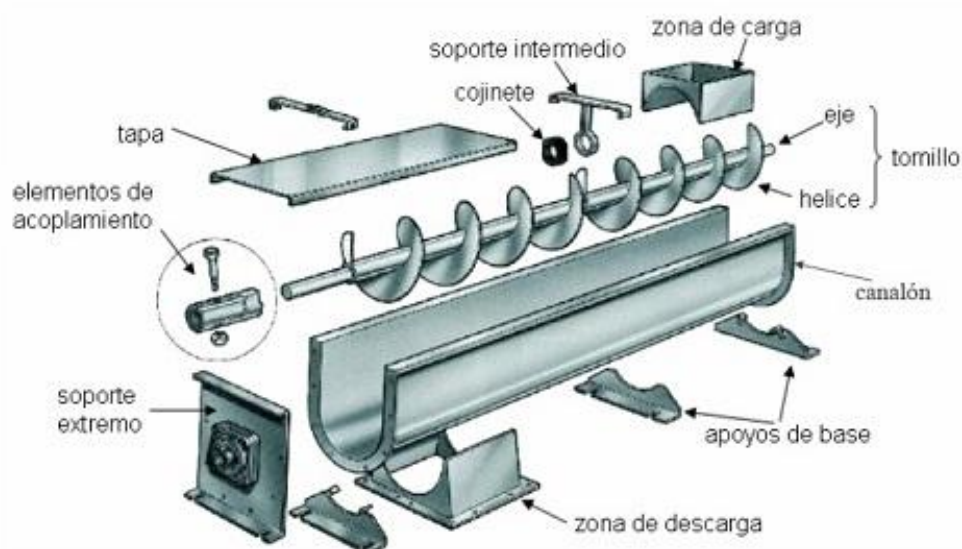


Figura 3.6: *Características del Transportador*

Nota. Cálculo de Transportadores de Tornillo Sin [Ilustración], de Ingemecánica (<https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn143.html>).

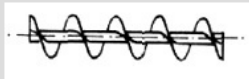
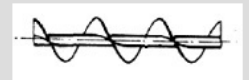
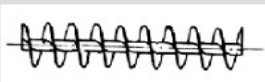


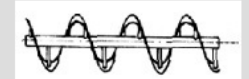


Para evitar las excesivas flexiones en el eje se suelen colocar cojinetes cada 3 o 4 metros, pero según las exigencias de geometría de la tesis, el tamaño del prototipo no puede exceder los 2.5 metros de largo, por lo que no se necesitarán de soportes extras.

En la Tabla 11 se pueden apreciar los tipos de hélices a seleccionar según el tipo de material a transportar, además de la funcionalidad. El tipo de hélice a utilizar es una continua, de paso igual a 0.5 veces el diámetro, debido a que no se necesitan consideraciones especiales para el transporte de granos de café, además de que este tipo de hélice es estándar y se puede conseguir con más facilidad.

En cuanto a la carcasa, el material que se suele usar es acero al carbono de 3 a 6 mm de espesor para los componentes de la estructura, pero cuando se trata de productos alimenticios el material utilizado para las paredes de la carcasa, el eje y las hélices es acero inoxidable por razones sanitarias, siendo el material más comercial el acero AISI 316.

El grupo automotriz está conformado por un motor y una caja reductora, además de la base donde se encuentran fijados los componentes. La potencia del motor es acorde a la distancia a recorrer y a el peso que se transportará.

Tabla 3.8: Criterios para selección de hélices

Tipo de Hélice	Tipo de Material para Transportar / Aplicación	Figura
Hélice continua, de paso igual al diámetro	Tipo de hélice normal para transporte de sólidos	
Hélice de gran paso, de 1,5 a 2 veces el diámetro	Se utiliza para productos que fluyen muy bien	
Hélice de pequeño paso, normalmente la mitad del diámetro	Se utiliza en tornillos sin fin inclinados hasta unos 20-25°, o cuando se quiere un prolongado tiempo de permanencia del producto en el transportador con el objeto de enfriarlo, secarlo, etc.	
Hélice de paso variable	Utilizado para compresión de productos, como es el caso de las prensas de tornillo.	
Hélice de diámetro variable	Se utiliza como extractor dosificador de sólidos de tolvas.	
Hélice de cinta	Tipo de hélice adecuada para productos que producen atascamiento.	
Hélice mezcladora, con dos hélices tipo cinta, uno a derecha y otro a izquierda	Se utiliza como equipo mezclador	
Hélice mezcladora, con eje provisto de paletas	Se utiliza como equipo mezclador	

Fuente: Ingemecánica

Para hallar el paso y el diámetro del tornillo, se considera que la dimensión del paso debe ser de entre 0.5 y 1 veces la medida del diámetro del mismo, además, el diámetro del tornillo suele ser determinado por el producto a transportar, siendo al menos 12 veces mayor que el tamaño del material a transportar en caso de materiales homogéneos como lo son los granos de café.

En la Figura 31 se puede visualizar las medidas aproximadas de un grano de café.

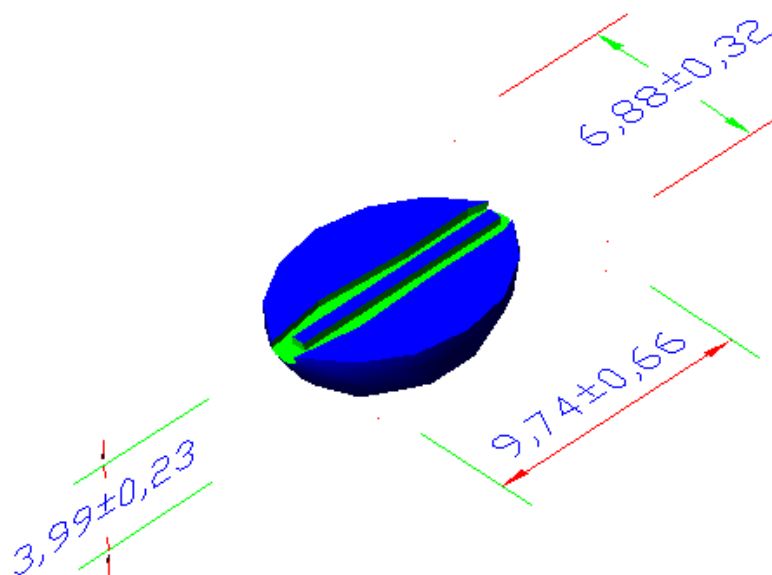


Figura 3.7: *Medidas aproximadas de un grano de café*

Nota. Dimensiones de un grano de café [Ilustración], de Felipe Santoyo (https://www.researchgate.net/figure/Figura-41-b-Dimensiones-de-un-grano-de-cafe_fig3_267747727).

Por lo que el valor aproximado del diámetro del tornillo debe ser de alrededor de 116.88 mm, por lo que se escoge el valor comercial de 100mm, cuyo valor en pulgadas es de 3.94 pulgadas, por lo que, según catálogo (Martin), el valor aproximado del diámetro del eje es de 1 pulgada, lo cual en milímetros da un eje de alrededor de 25.4mm, por lo que se escoge

como diámetro del eje 25mm, como se puede observar el modelo 3D en la Figura 32.



Figura 3.8: *Vista del tornillo helicoidal*

Asimismo, la velocidad de giro depende del material a transportar, en el caso de los granos de café y para el diámetro de tornillo seleccionado, la velocidad máxima es de 120 rpm, según la Tabla 12.

Tabla 3.9: Velocidad de giro recomendada para un tornillo según diámetro

Diámetro del tornillo (mm)	Velocidad máxima del café (r.p.m.)
100	120
200	110
300	100
400	90
500	80
600	75

Fuente: Elaboración propia

Para definir la capacidad de transporte, se debe hallar el área de relleno del canalón (S) utilizando el diámetro (D) del canalón del transportador en m, el cual es 2cm más que el diámetro del tornillo, y el coeficiente de relleno (λ) de la sección:

$$S = \lambda \times \frac{\pi \times D^2}{4} \dots\dots\dots (18)$$

Considerando al coeficiente de relleno de la sección en la Tabla 13, con un material abrasivo como lo son los granos de café (Flexicon, s/f), se reemplazan los valores:

$$S = 0.125 \times \frac{\pi \times (0.1 + 0.02)^2}{4} \dots\dots\dots (19)$$

$$S = 1.41 \times 10^{-3} m^2 \dots\dots\dots (20)$$

Tabla 3.10: Valores del coeficiente de relleno según el material a transportar

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

Fuente: Ingemecánica

Para la velocidad de desplazamiento (v) del transportador, se considera la siguiente expresión, la cual considera el paso del tornillo (p) en m y la velocidad de giro (n) en rpm, la cual es de 10 rpm debido a que no se necesita sobredimensionar la producción a la vez que se reducen costos en la selección del motor:

$$v = \frac{p \times n}{60} \dots\dots\dots (21)$$

Ya se había definido que el paso sería igual al diámetro, por lo que se toma el valor de diámetro comercial seleccionado y asimismo la velocidad escogida.

$$v = \frac{0.05 \times 10}{60} \dots\dots\dots (22)$$

$$v = 8.333 \times 10^{-3} m / s \dots\dots\dots (23)$$

Luego, para la determinación del flujo de material, se utiliza el área de relleno del transportador (S), la velocidad de desplazamiento (v), la densidad del café (ρ) y el

coeficiente de disminución de flujo debido a la inclinación del transportador, el cual puede ser seleccionado según la Tabla 14.

$$Q = 3600 \times S \times v \times \rho \times i \dots\dots\dots (24)$$

$$Q = 3600 \times 0.00141372 \times 0.008333 \times 0.715 \times 0.1$$

$$Q = 3.03 \times 10^{-3} \text{ t/h} \dots\dots\dots (25)$$

$$Q = 3.03 \text{ kg / h} \dots\dots\dots (26)$$

Lo cual corresponde al flujo de café necesario para cumplir con el nivel de producción requerido de 70kg/día, que se traduce en alrededor de 3kg/h.

Tabla 3.11: Valores del coeficiente de disminución de flujo según el ángulo

Inclinación del Transportador en grados °	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°
Coeficiente de disminución de flujo de material (i).	1	0.9	0.8	0.7	0.65	0.42	0.3	0.2

Fuente: Osorio, D.

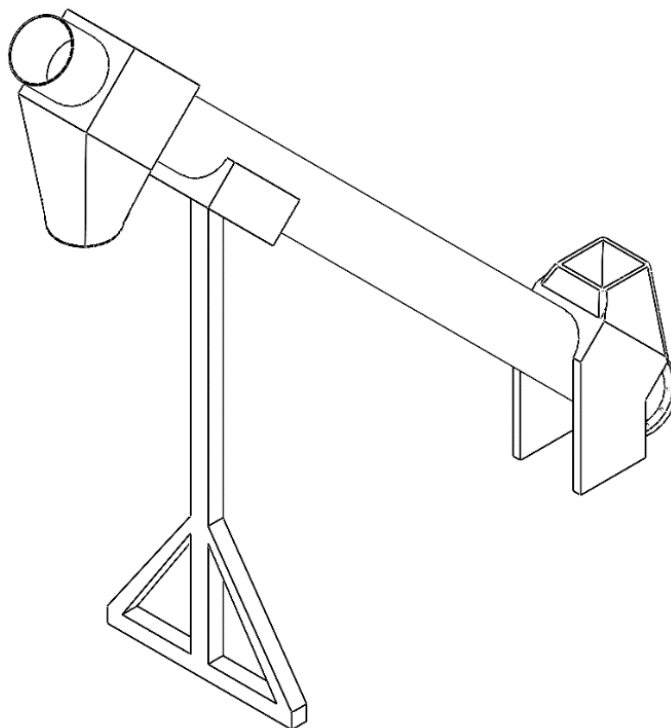


Figura 3.9: *Vista isométrica del tornillo helicoidal*

En cuanto a la potencia de accionamiento, esta depende de la potencia necesaria para el desplazamiento horizontal, el accionamiento al vacío y el desplazamiento inclinado.

$$P = P_H + P_N + P_i \dots\dots\dots (27)$$

La potencia de desplazamiento horizontal se calcula con la siguiente fórmula:

$$P_H = c_0 \times \frac{Q \times L}{367} \dots\dots\dots (28)$$

Se debe tener en cuenta la longitud del tornillo sin fin, para lo cual se puede visualizar en la Figura 34.

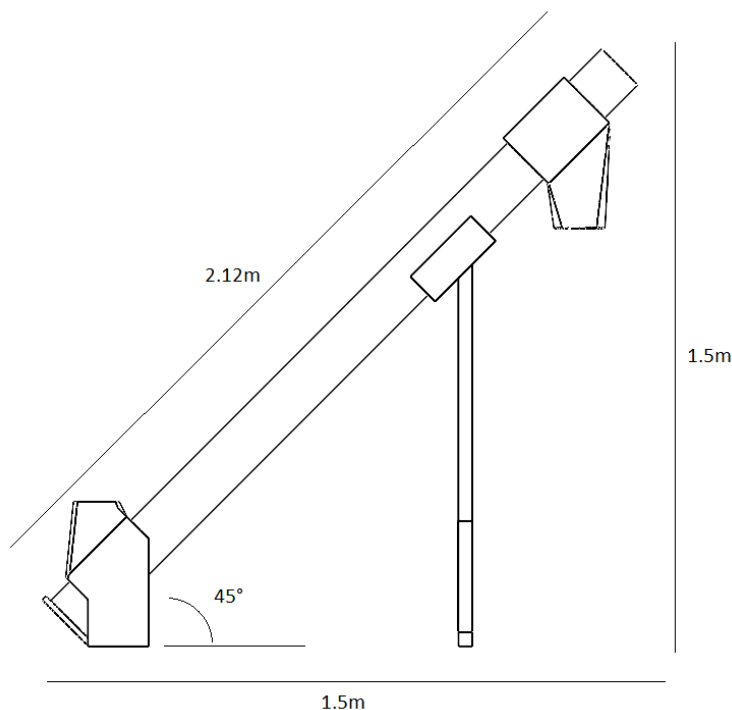


Figura 3.10: *Medidas generales aproximadas del transportador helicoidal*

Reemplazamos en la fórmula la medida máxima de 2m y el coeficiente de resistencia c_0 , seleccionado según la Tabla 15.

$$P_H = 1.2 \times \frac{3.032 \times 10^{-3} \times 2}{367} \dots\dots\dots (29)$$

$$P_H = 19.83 \times 10^{-3} W \dots\dots\dots (30)$$

Tabla 3.12: Valores del coeficiente de resistencia según el material transportado

Tipo de material	Valor de c_0
Harina, serrín, productos granulados	1,2
Turba, sosa, polvo de carbón	1,6
Antracita, carbón, sal de roca	2,5
Yeso, arcilla seca, tierra fina, cemento, cal, arena	4

Fuente: Ingemecánica

Para la potencia de accionamiento al vacío se utiliza la siguiente fórmula:

$$P_N = \frac{D \times L}{20} \dots\dots\dots (31)$$

$$P_N = \frac{0.12 \times 2}{20} \dots\dots\dots (32)$$

$$P_N = 12W \dots\dots\dots (33)$$

Finalmente, para la potencia de desplazamiento inclinado se utiliza la siguiente fórmula:

$$P_i = \frac{Q \times H}{367} \dots\dots\dots (34)$$

Si el máximo de largo del tornillo es de 2 m y está inclinado en un ángulo de 45°, entonces el alto del tornillo sin fin es de 1.4142m

$$P_i = \frac{3.03 \times 10^{-3} \times 1.41}{367} \dots\dots\dots (35)$$

$$P_i = 11.7 \times 10^{-6} kW \dots\dots\dots (36)$$

Finalmente se halla la potencia total (P)

$$P = 12.03 \times 10^{-3} kW \dots\dots\dots (37)$$

$$P = 12.03 \times 10^{-3} kW \times \frac{1.34 HP}{1 kW} \dots\dots\dots (38)$$

$$P = 0.016 HP \dots\dots\dots (39)$$

Las fuerzas que actúan sobre el tornillo helicoidal se pueden representar en la Figura 35, por lo que se calcula el torque que aplicado para lograr la rotación del tornillo con la siguiente fórmula:

$$T = 9550 \times \frac{N}{n} \dots\dots\dots (40)$$

Donde T es el torque o momento de giro, N es la potencia del motor hallada anteriormente (kW), y n es el número de revoluciones por minuto del motor (rpm).

$$T = 9550 \times \frac{0.012kW}{10rpm} = 11.49N \times m \dots\dots\dots (41)$$

Verificamos la aceleración angular del tornillo mediante el momento de torsión y el de inercia de la Figura 36 según las fuerzas presentes en la Figura 35:

$$T = I \times \alpha \dots\dots\dots (42)$$

$$\alpha = \frac{T}{I} = \frac{11.5N \times m}{3.56kg \times m^2}$$

$$\alpha = 3.23 rad/s^2 \dots\dots\dots (43)$$

Asimismo, hallamos la relación de diámetro del tornillo helicoidal:

$$u = \frac{da}{de} \dots\dots\dots (44)$$

Donde “da” es el diámetro de alimentación y “de” el diámetro de salida:

$$u = \frac{da}{de} = \frac{100mm}{126mm} = 0.79 \dots\dots\dots (45)$$

Considerando $S = 1.41 \times 10^{-3} m^2$

Se halla el momento de inercia polar J:

$$J = \frac{\pi \times D^4}{64} \times (1 - u^4) \dots\dots\dots (46)$$

$$J = \frac{\pi \times 0.12^4}{64} \times (1 - 0.794^4) \dots\dots\dots (47)$$

$$J = 6.14 \times 10^{-6} m^4 \dots\dots\dots (48)$$

Con el valor obtenido se calcula el Radio de Inercia (Ri):

$$Ri = \sqrt{\frac{J}{S}} \dots\dots\dots (49)$$

$$Ri = \sqrt{\frac{6.14 \times 10^{-6} m^4}{1.41 \times 10^{-3} m^2}} \dots\dots\dots (50)$$

$$Ri = 0.066m \dots\dots\dots (51)$$

Hallamos la carga repartida (q), considerando el peso del tornillo sin fin, que se puede ver en la Figura 36, calculado mediante el software de SolidWorks:

$$q = \frac{peso}{longitud} \dots\dots\dots (52)$$

$$q = \frac{10.6 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2}{2 \text{ m}} \dots\dots\dots (53)$$

$$q = 52 \text{ N/m} \dots\dots\dots (54)$$

Finalmente calculamos la deflexión máxima del tornillo sin fin:

$$df_{max} = \frac{5 \times q \times L^4}{384 \times E \times J} \dots\dots\dots (55)$$

$$df_{max} = \frac{5 \times 52 \text{ N/m} \times (1.33 \text{ m})^4}{384 \times 190 \times 10^9 \text{ Pa} \times 6.14 \times 10^{-6} \text{ m}^4} \dots\dots\dots (56)$$

$$df_{max} = 1.79 \times 10^{-6} \text{ m} \dots\dots\dots (57)$$

$$df_{max} = 1.79 \times 10^{-3} \text{ mm} \dots\dots\dots (58)$$

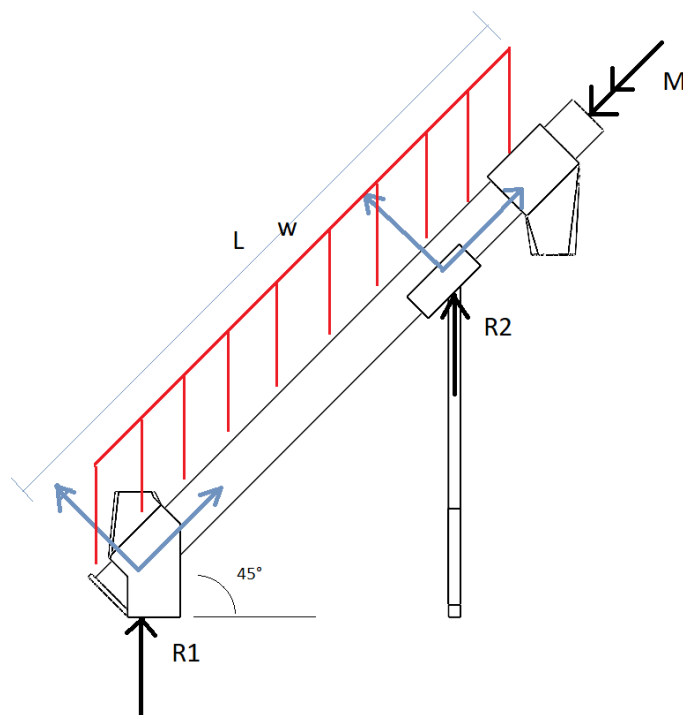


Figura 3.11: *Fuerzas presentes en el tornillo helicoidal*

Propiedades de masa de Tornillo Sin Fin		
Configuración: Predeterminado		
Sistema de coordenadas: -- predeterminado --		
Masa = 10.64 kilogramos		
Volumen = 0.00 metros cúbicos		
Área de superficie = 0.95 metros cuadrados		
Centro de masa: (metros)		
X = 0.01		
Y = 0.21		
Z = 3.00		
Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: (kilogramos * metros cuadrados)		
Medido desde el centro de masa.		
Ix = (0.00, 0.00, 1.00) Px = 0.01		
Iy = (0.71, -0.71, 0.00) Py = 3.56		
Iz = (0.71, 0.71, 0.00) Pz = 3.56		
Momentos de inercia: (kilogramos * metros cuadrados)		
Obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas de resultados. (Usando notación tensorial positiva.)		
Lxx = 3.56 Lxy = 0.00 Lxz = 0.00		
Lyx = 0.00 Lyy = 3.56 Lyz = 0.00		
Lzx = 0.00 Lzy = 0.00 Lzz = 0.01		
Momentos de inercia: (kilogramos * metros cuadrados)		
Medido desde el sistema de coordenadas de salida. (Usando notación tensorial positiva.)		
Ixx = 99.72 Ixy = 0.02 Ixz = 0.27		
Iyx = 0.02 Iyy = 99.26 Iyz = 6.61		
Izx = 0.27 Izy = 6.61 Izz = 0.47		

Figura 3.12: *Propiedades físicas del tornillo helicoidal*

Por lo tanto, se verifica que el transportador helicoidal funcionará sin ningún inconveniente de esfuerzos, torques o deflexiones.

3.2.3 Dosificadora

Para el diseño del dosificador se deben tener en cuenta parámetros como la densidad y volumen del café. Asimismo, el material a usar es de acero inoxidable AISI 316, debido a que el café estará en contacto directo con este y este material es apto para trabajar con productos alimenticios. Cada vaso dosificador debe tener el volumen equivalente a 1kg de granos de café de altura, por lo que, teniendo la densidad del café se halla el volumen de cada vaso.

$$\delta_{cafe} = 715kg / m^3 \dots\dots\dots (59)$$

$$V_{vaso} = \frac{1kg}{715kg / m^3} = 1.39 \times 10^{-3} m^3 \dots\dots\dots (60)$$

$$V_{\text{vaso}} = \frac{\pi}{4} \times D^2 \times H \dots\dots\dots (61)$$

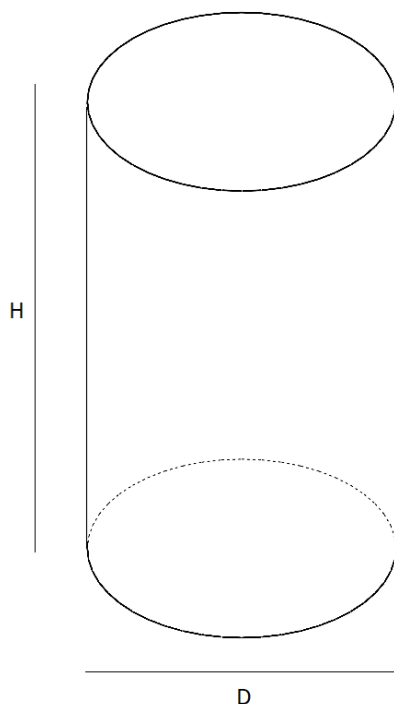


Figura 3.13: *Medidas generales del vaso dosificador*

Considerando como diámetro del vaso un valor de $D = 10\text{cm}$, se reemplaza para hallar la altura del vaso dosificador.

$$V_{\text{vaso}} = \frac{\pi}{4} \times D^2 \times H = 1.39 \times 10^{-3} = \frac{\pi}{4} \times 0.1^2 \times H \dots\dots\dots (62)$$

Despejamos el H y nos resulta una altura de:

$$H = 1.39 \times 10^{-3} \times \frac{4}{\pi \times 0.1^2} \dots\dots\dots (63)$$

$$H = 0.177\text{m} = 17.7\text{cm} \dots\dots\dots (64)$$

Definimos el diámetro máximo del disco dosificador a 0.6m, que contendrá los moldes volumétricos, considerando una distancia del borde de 100mm al centro del orificio del vaso dosificador.

Para calcular el número de vasos máximos, se calcula el ángulo de circunferencia que abarca la superficie de cada vaso:

$$\tan \frac{\theta}{2} = \frac{R_{vaso}}{R_{pos}} \dots\dots\dots (65)$$

$$\theta = 2 \tan^{-1} \left(\frac{R_{vaso}}{R_{pos}} \right) \dots\dots\dots (66)$$

$$\theta = 2 \tan^{-1} \left(\frac{100mm}{500mm} \right) \dots\dots\dots (67)$$

$$\theta = 22.61^{\circ} \dots\dots\dots (68)$$

Con el ángulo se halla en número máximo de vasos con la siguiente ecuación:

$$N_{vasos} = \frac{360^{\circ}}{2 \times \theta} \dots\dots\dots (69)$$

$$N_{vasos} = \frac{360^{\circ}}{2 \times 22.61^{\circ}} \dots\dots\dots (70)$$

$$N_{vasos} = 7.957^{\circ} \approx 7 \dots\dots\dots (71)$$

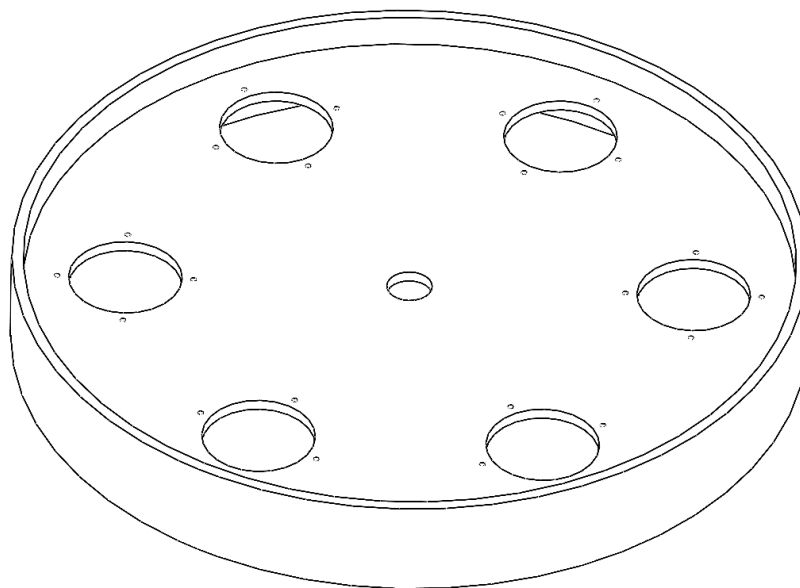


Figura 3.14: *Disco dosificador superior*

Para la potencia del motor se tomaron en cuenta parámetros como la densidad estimada del café, la cual es de $\delta_{café} = 715 \text{ kg} / \text{m}^3$.

Para poder continuar con los cálculos se encuentra el momento de inercia del eje con el disco, que es lo que tendrá que mover el motor, con un software de simulación, en este caso es el mismo SolidWorks.

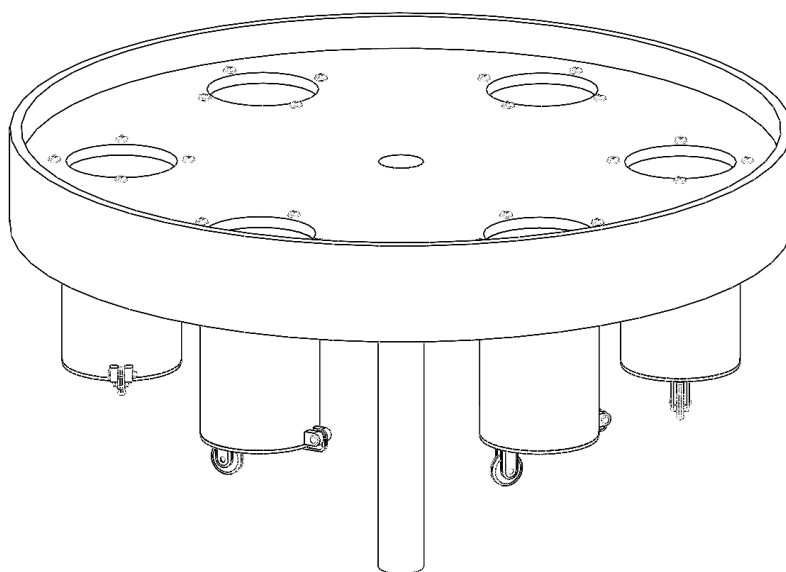


Figura 3.15: *Mecanismo dosificador para encontrar la inercia*

Para el cálculo de la inercia se considera a todo el mecanismo dosificador como conjunto, incluyendo los vasos dosificadores, las tapas y los tornillos de unión con el disco dosificador. Los datos obtenidos se pueden visualizar en la Figura 40.

Propiedades de masa de Dosificador Volumétrico_para editar	
Configuración: Predeterminado	
Sistema de coordenadas: -- predeterminado --	
Masa = 54.6657 kilogramos	
Volumen = 0.0069 metros cúbicos	
Área de superficie = 1.9892 metros cuadrados	
Centro de masa: (metros)	
X = 0.0434	
Y = 0.2672	
Z = 0.6554	
Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: (kilogramos * metros cuadrados)	
Medido desde el centro de masa.	
Ix = (0.9702, 0.0000, 0.2424)	Px = 2.2486
Iy = (0.2424, 0.0000, -0.9702)	Py = 2.2486
Iz = (0.0000, 1.0000, 0.0000)	Pz = 3.9509

Figura 3.16: *Datos del dosificador volumétrico*

Se utiliza el momento de inercia Px, el cual es igual al de Py por ser un mecanismo circular.

$$I_d = 2.25 \text{ kg} / \text{m}^2 \dots\dots\dots (72)$$

Con este dato se halla el valor de torsión requerido.

$$T = I_d \cdot \alpha \dots\dots\dots (73)$$

El α se halla considerando el nivel de producción propuesto, el cual es de 70kg/día, el cual sería el calculado para el transportador helicoidal.

$$T = 7.26 \text{ N.m} \dots\dots\dots (74)$$

No se tomará en cuenta el rozamiento debido a que los discos cuentan con ruedas para en su base para un mejor desplazamiento.

Por lo tanto, con el torque calculado se selecciona un motor que genera la potencia requerida.

Considerando n como las RPM del dosificador, las cuales serían de alrededor de $8.33 \times 10^{-3} rpm$, finalmente se halla la potencia total (P).

$$P = T \cdot n \dots\dots\dots (75)$$

$$P = 60.5 \times 10^{-3} kW \dots\dots\dots (76)$$

$$P = 60.5 \times 10^{-3} kW \times \frac{1.34 HP}{1 kW} \dots\dots\dots (77)$$

$$P = 0.081 HP \dots\dots\dots (78)$$

Para asegurarse de que los paquetes tengan un peso adecuado, se colocará un sensor se celda de carga en el disco de la base del dosificador, como se muestra en la Figura 41.

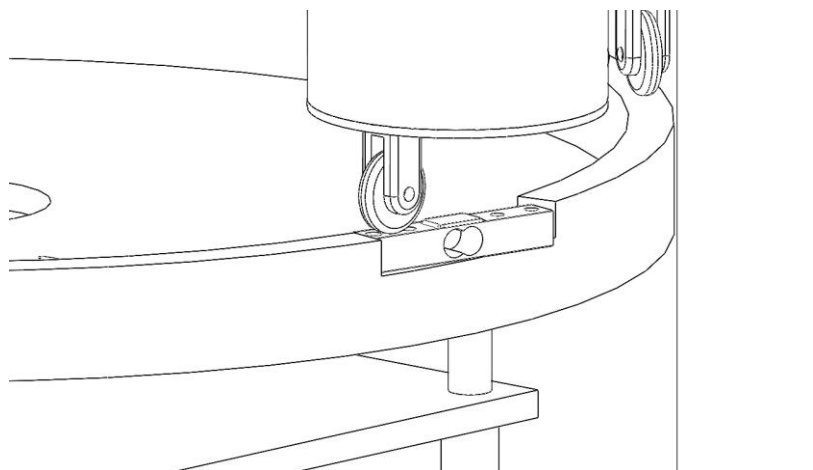


Figura 3.17: *Vista del sensor de celda de carga*

En la Figura 42 se muestra una vista general del dosificador volumétrico diseñado.

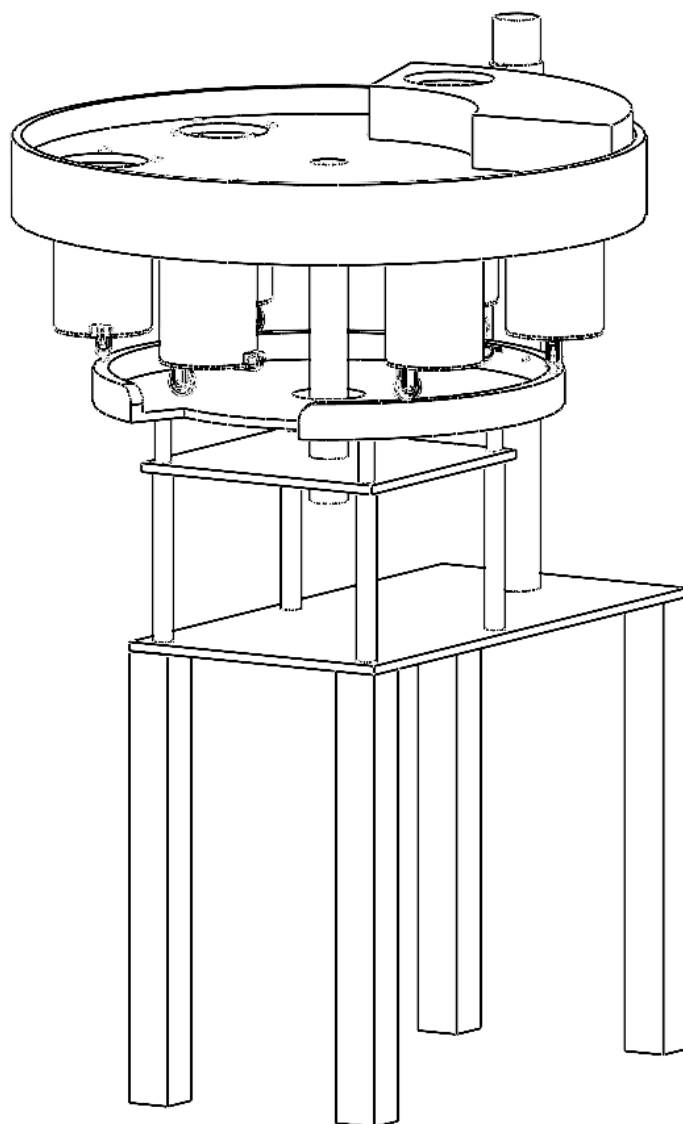


Figura 3.18: *Vista general de dosificador volumétrico*

3.3 Diseño de control

En este capítulo se realizará la selección del controlador, seleccionando primero la estrategia de control para las variables del sistema.

3.3.1 Diagrama de flujo

En la figura 43 se presenta el diagrama de flujo principal, el cual permite una descripción que facilite la comprensión del proceso.

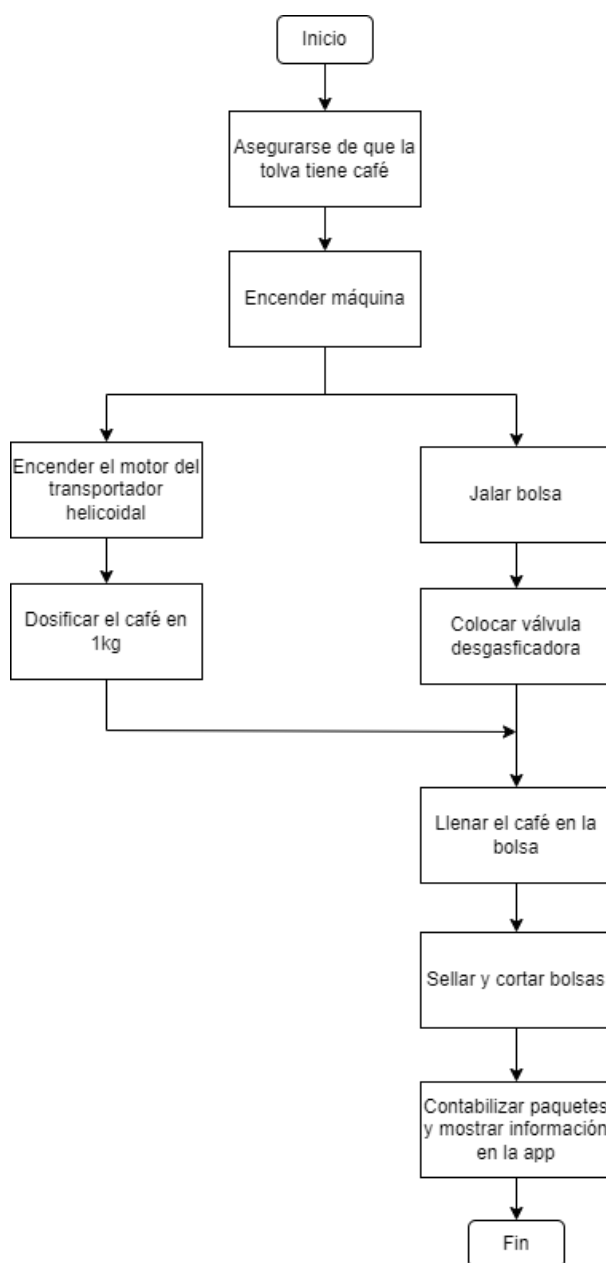


Figura 3.19: *Diagrama de flujo principal*

3.3.2 Variables por monitorear

A continuación, se presenta en la Tabla 16 todas las variables que el sistema debe controlar y monitorear.

Tabla 3.13: Variables del sistema que se deben controlar y monitorear

Variable	Objetivo	Unidades
Peso de café dosificado	Monitorear	kg
Giro de motor	Controlar	rad
Posición de motor paso a paso	Controlar	rad
Cantidad de paquetes hechos	Monitorear	Bolsas de café
Posición del actuador lineal	Controlar	Posición

Fuente: Elaboración propia

3.3.3 Estrategia de control

- Dosificación de café:

En la Figura 44 se presenta el diagrama de flujo del proceso de dosificación de café, el cual permite una descripción que facilite la comprensión del proceso.

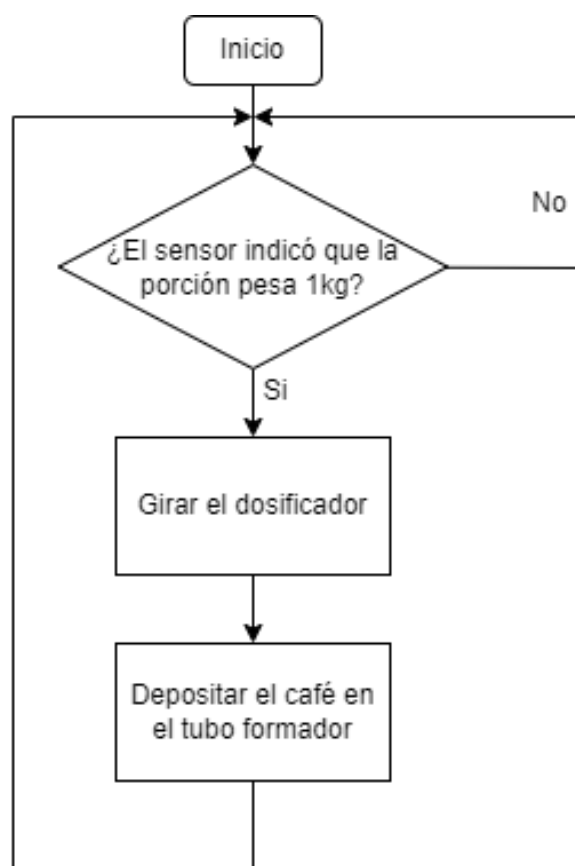


Figura 3.20: Diagrama de flujo de la dosificación de café

- Sellado y cortado de bolsas de café:

En la Figura 45 se presenta el diagrama de flujo del proceso de sellado y cortado de bolsas de café, el cual permite una descripción que facilite la comprensión del proceso.

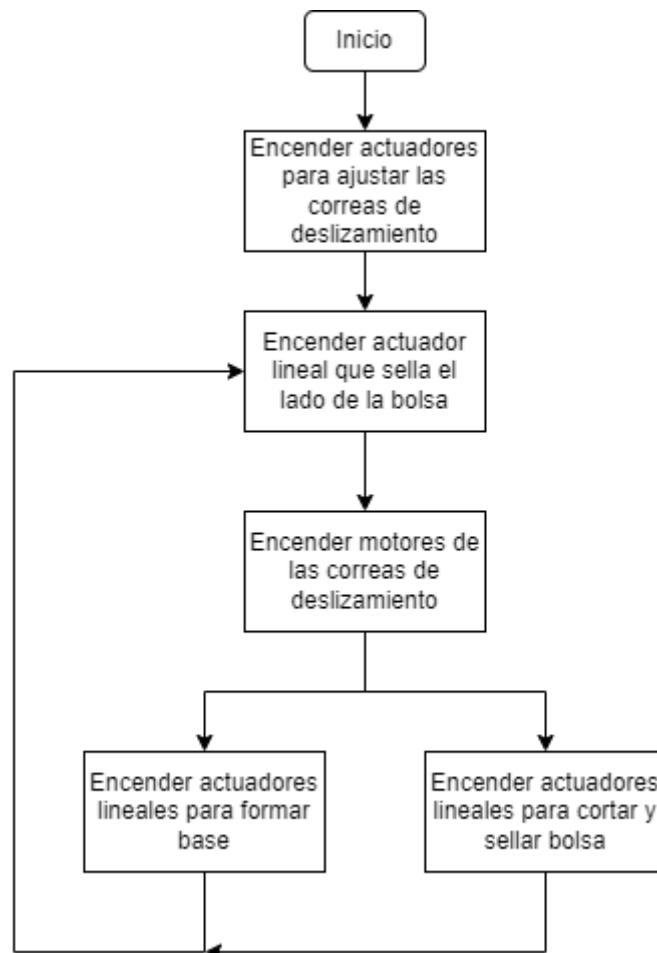


Figura 3.21: *Diagrama de flujo del sellado y cortado de bolsas de café*

- Conteo de paquetes y visualización en la App:

En la Figura 46 se presenta el diagrama de flujo del proceso de conteo de paquetes y la visualización en la App móvil, el cual permite una descripción que facilite la comprensión del proceso.

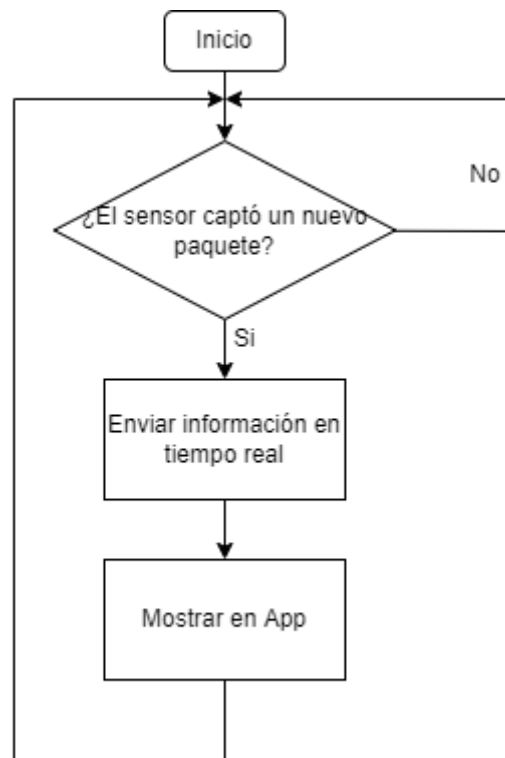


Figura 3.22: *Diagrama de flujo de contabilización de paquetes en tiempo real*

3.3.4 Software




Para la programación del algoritmo de control se consideraron las siguientes alternativas:

- Arduino Ide: Tiene como requisitos de sistema operativo un procesador de 32 o 64 bits.
- Code Composer: Tiene como requisitos de sistema operativo un procesador de 64 bits, 2.5GB como mínimo de espacio de almacenamiento para el programa, 4GB de memoria RAM y un procesador de mínimo 2.0Ghz.
- Stm32 Cube Ide: Tiene como requisitos de sistema operativo un procesador de 64 bits, 6GB como mínimo de espacio de almacenamiento para el programa y 2GB de memoria RAM.
- Matlab: Tiene como requisitos de sistema operativo un procesador de 32 o 64 bits, 3.1GB como mínimo de espacio de almacenamiento para el programa y 4GB de memoria RAM.

3.3.5 Selección del controlador

Para la selección del controlador, el cual se encarga del control de todos los sensores y actuadores del sistema de empaquetado, se muestran los diferentes modelos encontrados y algunos criterios para su adecuada selección en la Tabla 17.

Tabla 3.14: Comparación entre microcontroladores

Características	Fabricante	SAISAC Mecatrónica	Electrónica HI-FI SAC	Electrónica HI-FI SAC
	Modelo	ARDUINO DUE	Mega 2560 R3	Mega 2560 Pro
	Requisitos			
Corriente eléctrica máxima	130mA	130mA	40mA	40mA
Voltaje de alimentación	5V	3.3V	5V	5V
Cantidad de pines mínima	70	68	70	70
Velocidad del reloj	16MHz	84	16	16
Precio máximo	90	72	85	65

Fuente: Elaboración propia

En base a los requerimientos seleccionados para el controlador, de los cuales se puede apreciar que el segundo y el tercero cumplen satisfactoriamente los requerimientos, se elige el segundo modelo debido a que la distribución de pines es más fácil de acceder.

3.4 Interfaz de usuario

En este capítulo se realiza la implementación de la interfaz de usuario, la cual permite visualizar los datos entregados por el sensor de conteo sobre la cantidad de bolsas de café listas para su comercialización. Dicha interfaz será desarrollada mediante el desarrollo móvil, considerando las diferentes opciones se escoger.

3.4.1 Selección del Framework de desarrollo móvil

Para el desarrollo de la aplicación móvil es necesario un framework de trabajo, para el cual existen varias alternativas, como los enfocados en desarrollar aplicaciones nativas, aplicaciones que se ejecuten en el navegador y los frameworks para desarrollo de aplicativos multiplataforma. A continuación, se mencionan algunos actualmente utilizados por desarrolladores:

- Ionic
- Flutter
- React Native

En cuanto al software seleccionado, se escogió la alternativa del framework para aplicaciones multiplataforma, debido a que solo se necesitaría un código fuente que mantener en las dos plataformas de aplicativos móviles como lo son Android y iOS. Este framework está solo hace algunos años siendo utilizado, pero ha demostrado tener un gran rendimiento y aceptación por parte de los desarrolladores.

3.4.2 Visualización de la interfaz

Las páginas están divididas en dos ventanas, una donde se muestre el panel de control, donde se podrán ver algunos recursos de utilidad como la cantidad de paquetes terminados y el tiempo de operación. La otra es una ventana de las metas mensuales donde se mostrará la comparación entre los paquetes realizados por semana y la cantidad que se tiene como meta, así como el estimado de ganancias que se tendrán con las ventas de los paquetes de café. El botón central se utilizará para añadir un nuevo tipo de café que se planea empaquetar, con el objetivo de que el proyecto sea escalable.

En la Figura 47 se puede visualizar el Panel de Control de la interfaz y la ventana de metas mensuales.

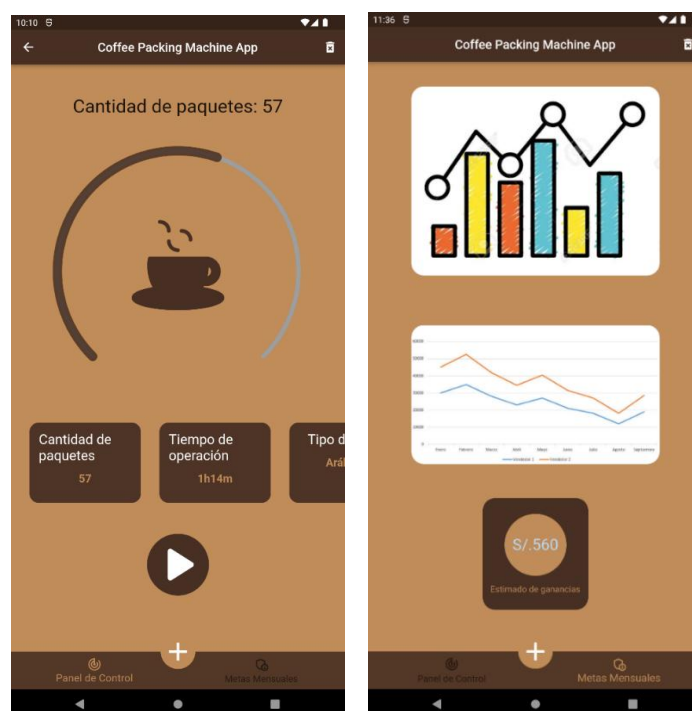


Figura 3.23: *Diseño de la interfaz de usuario*

3.5 Diseño electrónico

En este apartado se presenta el diseño del circuito electrónico que se utilizará para controlar la parte de potencia y de control del presente trabajo de tesis. Se plantearán los cálculos de potencia, así como las corrientes y voltajes necesarios para posteriormente hacer la correcta selección de la fuente de energía para el correcto funcionamiento del sistema de empaquetado.

3.5.1 Cálculos electrónicos

A continuación, se presentan los cálculos necesarios para diseñar el circuito electrónico que controlará el sistema de empaquetado de café.

En cuanto a la selección de los drivers para los motores, se consideraron de acuerdo a los voltajes y corrientes máximas:

- **Driver para el actuador lineal eléctrico**

Considerando que el actuador lineal escogido tiene un voltaje de operación máximo de 24VDC y una la corriente máxima de operación de 4.2A; pero tomando en cuenta una carga máxima necesaria de alrededor de 100N, lo cual es realmente sobredimensionar la cantidad de fuerza necesaria para presionar los componentes de la etapa de sellado, formado, corte, colocación de la válvula desgasificadora y presionado de la bolsa para un mejor agarre al momento de tirar de ella, se considerará, según la Tabla 18, la corriente máxima de 500mA, por lo que se seleccionó el driver para motores L293D, mostrado en la Figura 48, el cual tiene una capacidad de corriente de hasta 600mA, además de trabajar con motores de 4.5VDC – 36VDC, lo cual cumple con los requisitos.

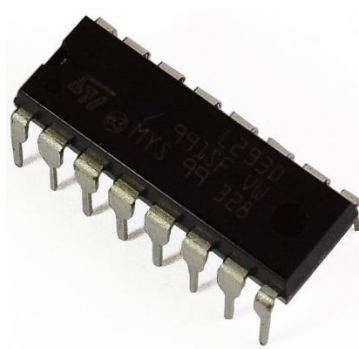
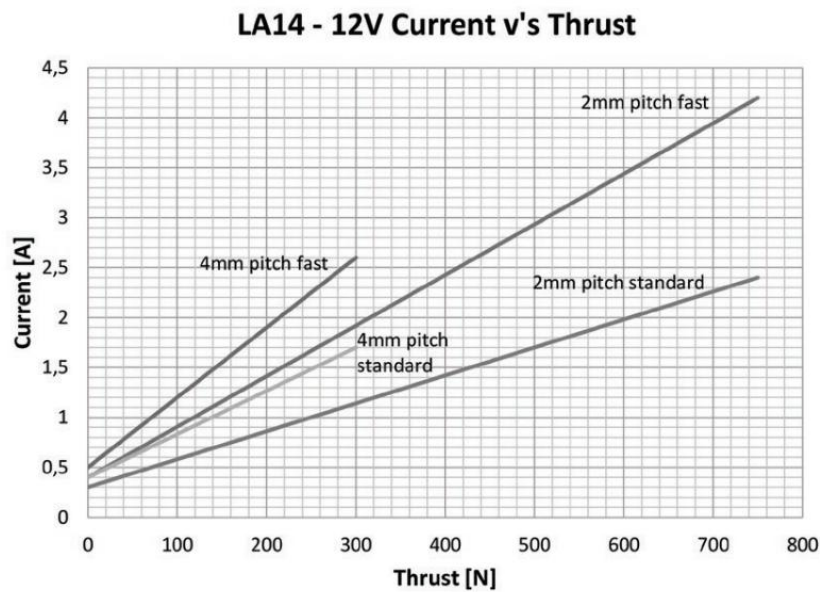


Figura 3.24: *Integrado L293D para control de motores*

Nota. Reproducida de Driver Puente H L293d 0.6A [Fotografía], Naylamp Mechatronics (<https://naylampmechatronics.com/drivers/223-driver-puente-h-l293d.html>).

Con este driver se pueden controlar dos motores DC de los actuadores ya que cuenta con dos puentes H, además de aislamiento de protección entre las señales de control y las corrientes altas con los que trabajan los motores.

Tabla 3.15: Gráfico de corriente y fuerza en el actuador lineal



Fuente: Actuator LA14 User Manual

- **Driver para motores paso a paso**

Considerando que los motores paso a paso escogidos tienen un voltaje de operación máximo de 12VDC y una la corriente máxima de operación de 3.5A, pero tomando en cuenta una carga máxima necesaria de alrededor de 100N, además de un toque de 2.33 N.m, se seleccionó el driver para motores paso a paso TB6600, mostrado en la Figura 49, el cual tiene una capacidad de corriente de hasta 4A, además de trabajar con motores de 9VDC – 42VDC, lo cual cumple con los requisitos.



Figura 3.25: *Driver TB6600 para el control de motores paso a paso*

Nota. Reproducida de TB6600 Stepper Motor Driver Features [Fotografía], ElectroPeak (<https://electropeak.com/learn/interfacing-tb6600-4a-4-5a-stepper-motor-driver-with-arduino/>).

Con este driver se pueden controlar un motor paso a paso de los actuadores ya que cuenta con un sistema muy robusto diseñado para trabajar con altas potencias, además de aislamiento de protección entre las señales de control y las corrientes altas con los que trabajan los motores.

- **Driver para motor del transportador helicoidal**

Considerando que los motores DC escogidos tienen un voltaje de operación máximo de 12VDC y una la corriente máxima de operación de 1.5A, pero tomando en cuenta un toque mínimo necesario de 11.49 N.m, además de un una velocidad de rotación mínima de 10 rpm y una potencia mínima de 12.03W, se seleccionó el driver para motor L298N, mostrado en la Figura 50, el cual tiene una capacidad de corriente de hasta 2A, además de trabajar con motores de 5VDC – 35VDC y entregar una potencia máxima de 25W, lo cual cumple con los requisitos.

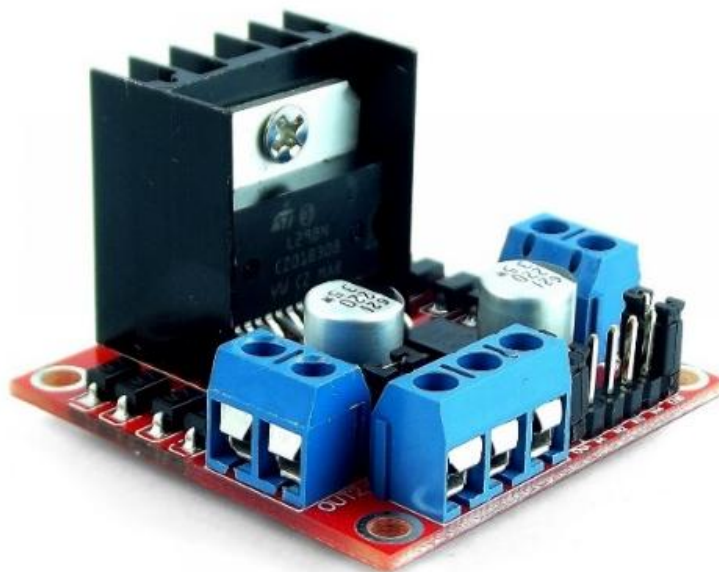


Figura 3.26: *Driver L298N para control de motor DC*

Nota. Reproducida de Driver Puente H L298N 2A [Fotografía], Naylamp Mechatronics (<https://naylampmechatronics.com/drivers/11-driver-puente-h-l298n.htm>).

Con este driver se pueden controlar dos motores DC de alta potencia ya que cuenta con un sistema de aislamiento de protección entre las señales de control y las corrientes altas con los que trabajan los motores.

- **Driver para motor del dosificador volumétrico**

Considerando que los motores DC escogidos tienen un voltaje de operación máximo de 12VDC y una la corriente máxima de operación de 1.5A, pero tomando en cuenta un toque mínimo necesario de 7.26 N.m, además de un una velocidad de rotación mínima de 1 rpm y una potencia mínima de 60.5W, se seleccionó el driver para motor IRF540N, mostrado en la Figura 51, el cual tiene una capacidad de corriente de hasta 30A, además de trabajar con motores de 5VDC – 24VDC y disipar una potencia máxima de 130W, lo cual cumple con los requisitos.

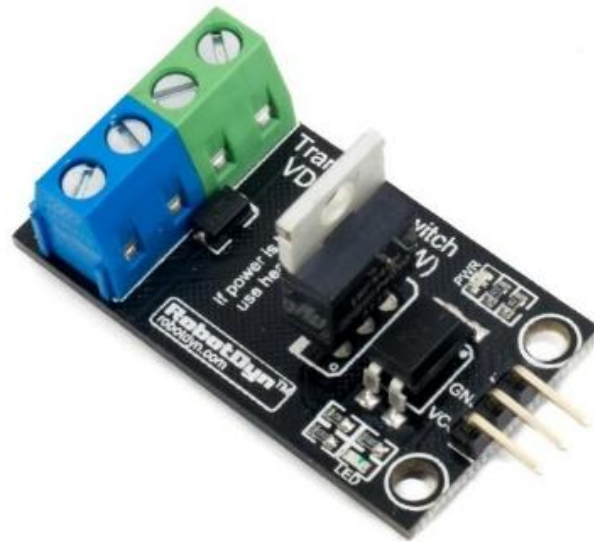


Figura 3.27: *Driver Mosfet IRF540N para control de motor DC*

Nota. Reproducida de Driver Mosfet IRF540N 30A [Fotografía], Naylamp Mechatronics (<https://naylampmechatronics.com/drivers/399-driver-mosfet-irf540-30a.html>).

Con este driver se pueden controlar dos motores DC de alta potencia ya que cuenta con un sistema de aislamiento de protección entre las señales de control y las corrientes altas con los que trabajan los motores.

- **Llave diferencial**

La corriente total a consumir por los componentes es de alrededor de 25A, por lo que se seleccionó una llave diferencial que soporte dicha corriente y que trabaje con un voltaje de alrededor de 220V, por lo que se escogió el interruptor diferencial 2x25A 30MA 230V Bticino 17243, mostrado en la Figura 52, de la empresa PROMART HOMECENTER, debido a que cumple con los requerimientos mencionados para el circuito de potencia.



Figura 3.28: *Llave diferencial de potencia*

Nota. Reproducida de Interruptor Diferencial 2x25A 30MA 230V [Fotografía], PROMART (<https://www.promart.pe/interruptor-diferencial-2x25a-30ma-230v-salvavita/p>).

Con esta llave diferencial, se protegerán a las personas de las fugas de corriente en el circuito. Además de agregar protección extra al mismo circuito.

- **Llave termomagnética**

La corriente total a consumir por los componentes es de alrededor de 25A, por lo que se seleccionó una llave termomagnética que soporte dicha corriente y que trabaje con un voltaje de alrededor de 220V, por lo que se escogió el interruptor termomagnético 2x25A 220V-10kA. Bticino 17243, mostrado en la Figura 53, de la empresa PROMART HOMECENTER, debido a que cumple con los requerimientos mencionados para el circuito de potencia.



Figura 3.29: *Llave termomagnética de potencia*

Nota. Reproducida de Interruptor Diferencial 2x25A 30MA 230V [Fotografía], PROMART (<https://www.promart.pe/interruptor-termomagnetico-2x25a-220v-10ka-btdin/p>).

Con esta llave termomagnética, se protegerán el circuito de los picos de corriente en el circuito. Además de agregar protección extra para los usuarios.

- **Contactor**

La corriente total a consumir por los componentes es de alrededor de 25A, por lo que se seleccionó un contactor que soporte dicha corriente y que trabaje con un voltaje de alrededor de 220V, por lo que se escogió el Contactor de Fuerza. 25A/40A 3P BOB. 220VAC 1NA+1NC, LC1D25M7, Schneider-Electric, mostrado en la Figura 54, de la empresa SEIN ELECTRICIDAD, debido a que cumple con los requerimientos mencionados para el circuito de potencia.



Figura 3.30: *Control de potencia*

Nota. Reproducida de Interruptor Diferencial 2x25A 30MA 230V [Fotografía], SEIN ELECTRICIDAD (<https://sein.com.pe/contactador-de-fza-25a-40a-3p-bob-220vac-1na-1nc-lc1d25m7-schneider-electric.html>).

3.5.2 Esquemático de circuitos electrónicos y de potencia

En la Figura 55 se puede observar el esquemático general diseñado en la herramienta Kicad 6.0, donde se consideraron las entradas y salidas necesarias para la conexión entre todos los sensores, actuadores, módulos y fuentes que conforma todo el diseño electrónico del sistema de empaquetado.

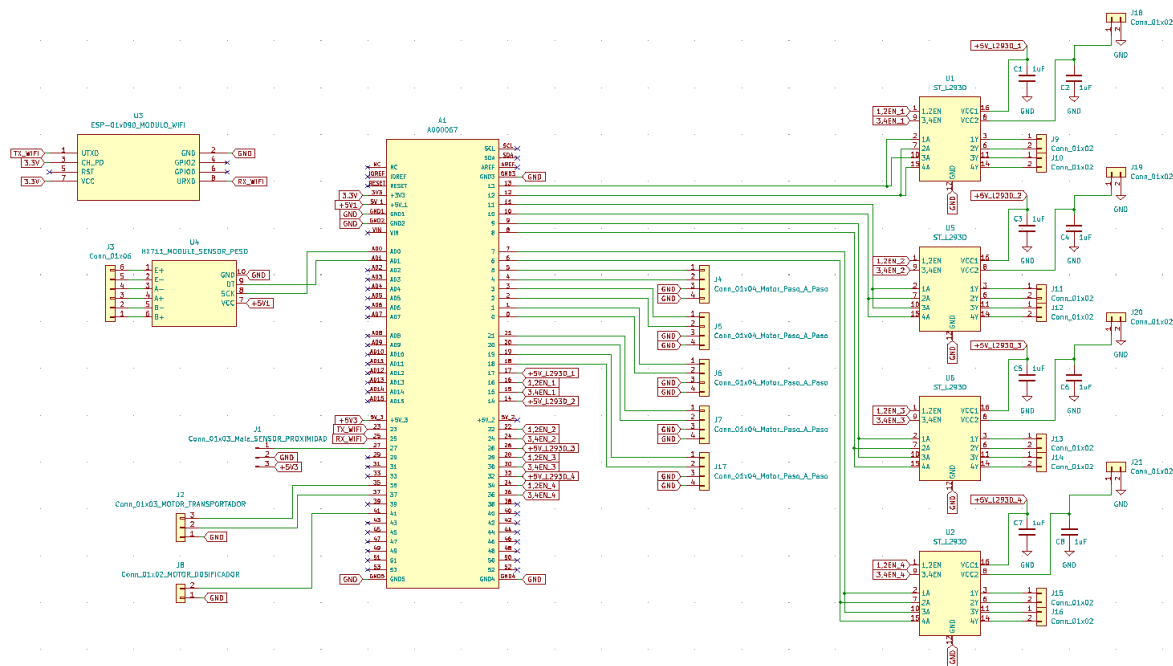


Figura 3.31: *Esquemático general del diseño electrónico de la empaquetadora*

Para el circuito de potencia se utilizó el software CADe_SIMU, debido a que además de dibujar circuitos de potencia, es posible simular dichas instalaciones, lo que permite verificar su correcto funcionamiento. En la Figura 56 se puede ver el diagrama de potencia considerado para la empaquetadora.

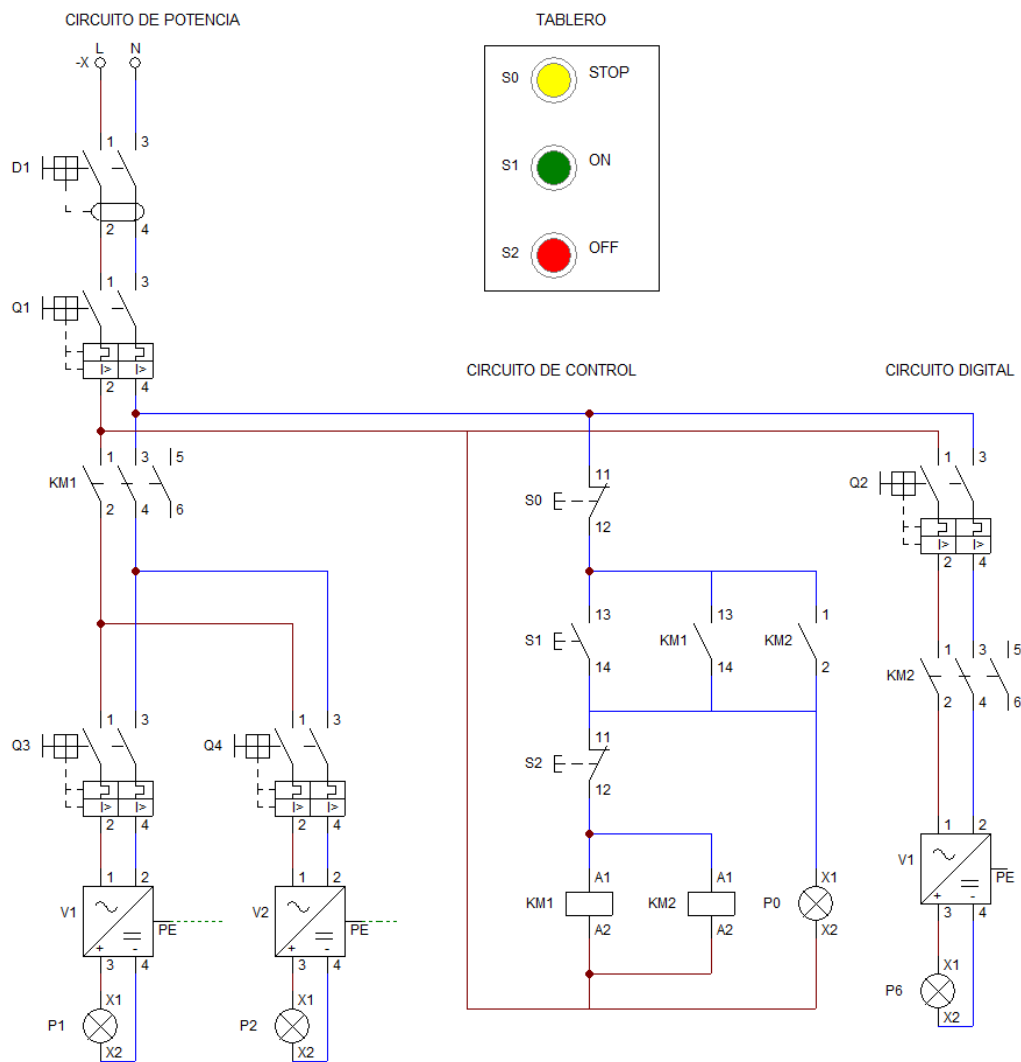


Figura 3.32: *Esquemático general del diseño de potencia de la empaquetadora*

Para su simulación se consideraron a los drivers y a los motores como cargas que son alimentadas con ambas fuentes, además de una carga que representa el circuito electrónico, se diseñó un circuito de enclavamiento para que el contactor se mantenga funcionando correctamente y se colocó una carga que representa que el circuito se encuentra en funcionamiento. En la figura 57 se puede visualizar cómo empieza la simulación del circuito de potencia. Las llaves diferenciales y termomagnéticas se encuentran cerradas, por lo que deben ser activadas solo una vez.

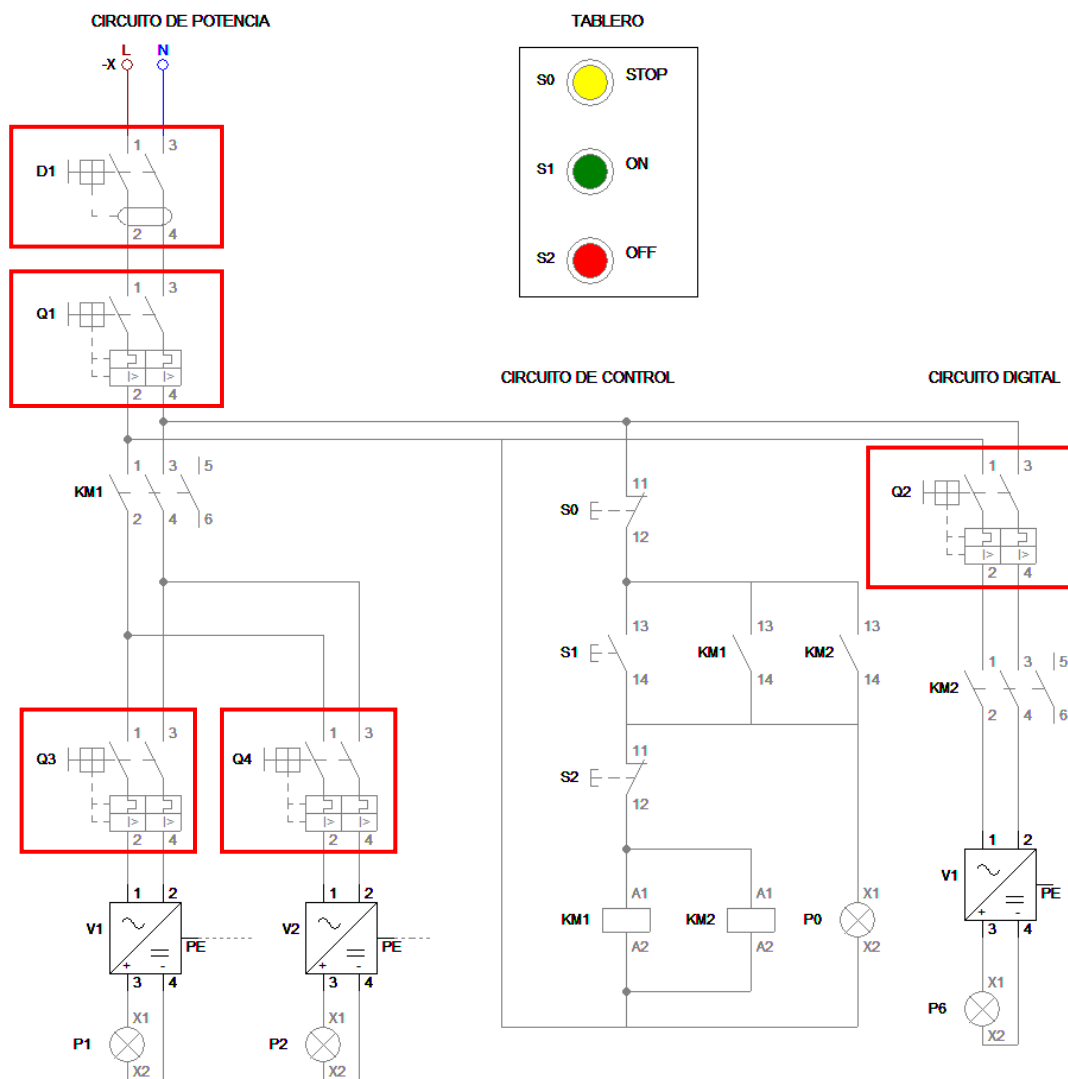


Figura 3.33: *Simulación del circuito de potencia*

Luego de encender las llaves, se puede presionar el botón ON (verde) para que el sistema inicie, y se puede visualizar que todas las cargas se encuentran encendidas, lo cual se puede visualizar en la Figura 58. Asimismo, si se presionase el botón de OFF (rojo) o el de STOP (amarillo), se apagarían todas las cargas, ya que este botón representa la parada de emergencia.

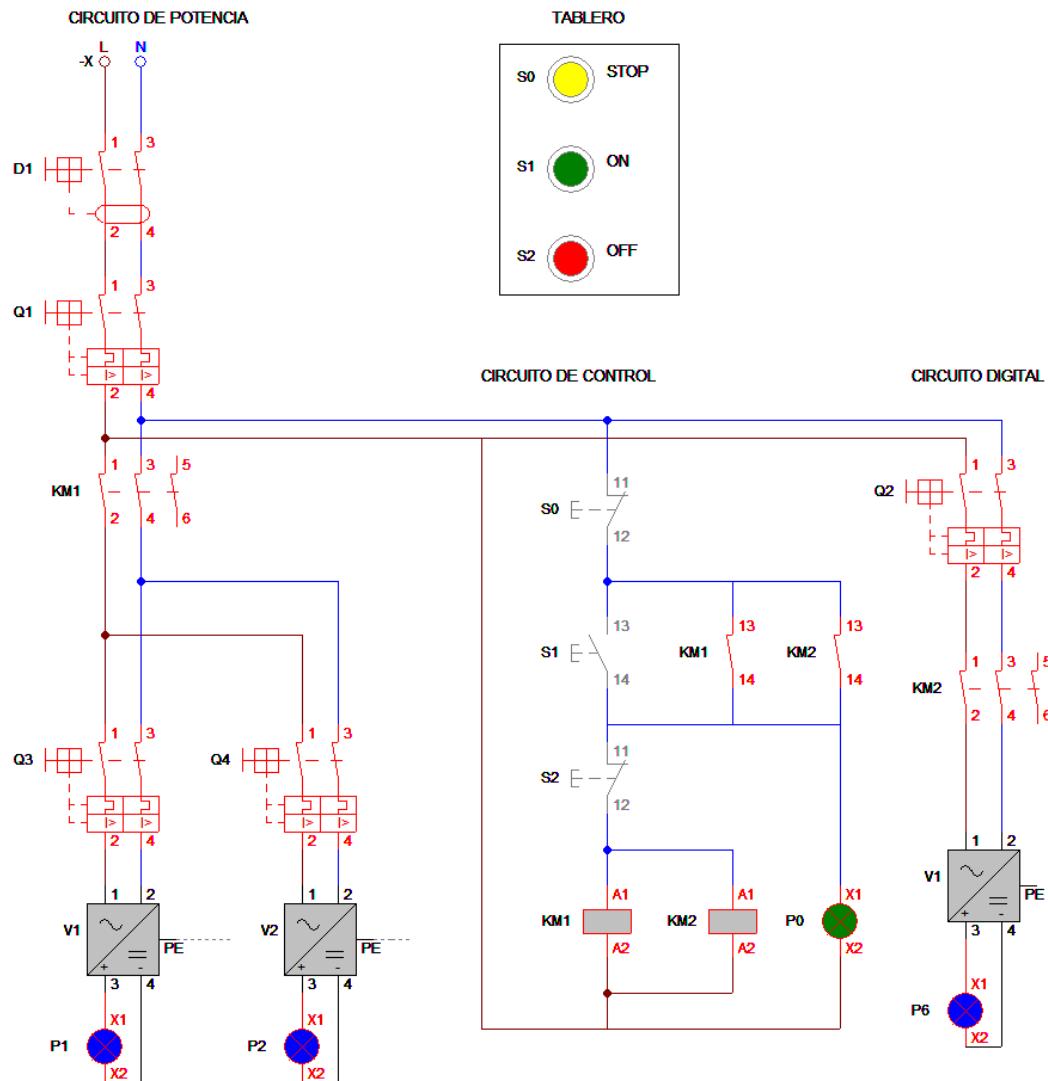


Figura 3.34: *Esquemático general del diseño de potencia de la empaquetadora*

Las cargas encendidas representan los drivers y sus respectivos motores siendo alimentados, por lo que se demuestra el correcto funcionamiento en la simulación. Dicho circuito deberá ser ensamblado a futuro en una caja de control, donde puedan entrar todos los componentes y se puedan visualizar los botones por fuera de la caja.

3.5.3 Diseño de tarjeta electrónica

Como se puede observar, en esta sección se llevó a cabo el diseño de la tarjeta electrónica, la cual se muestra en la Figura 59, la cual cuenta con el microcontrolador, los drivers, los módulos para los sensores y las borneras para las conexiones de potencia. En la Figura 60 se

pueden visualizar los componentes de la placa ya soldados; además, en la Figura 61 se puede visualizar el modelo 3D de la placa electrónica.

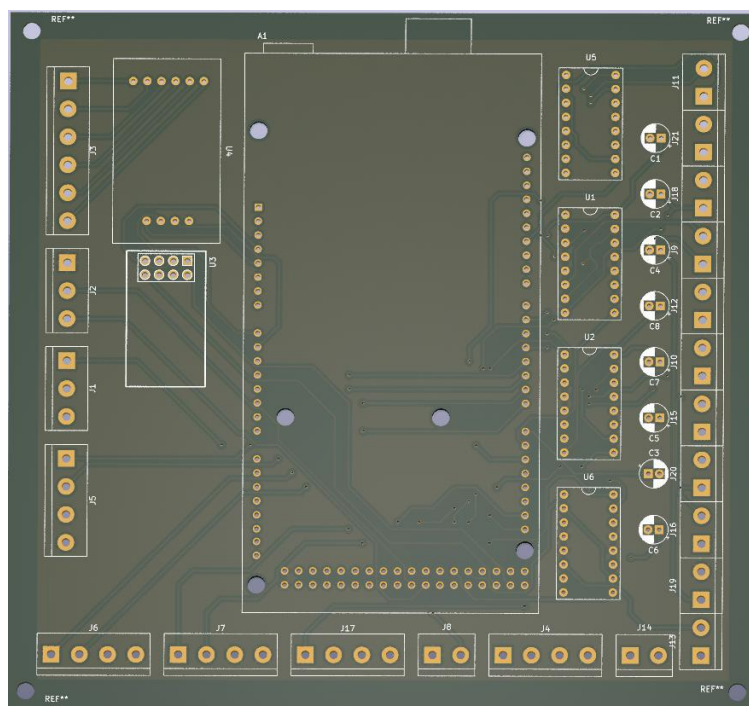


Figura 3.35: *PCB diseñada en Kicad 6.0*

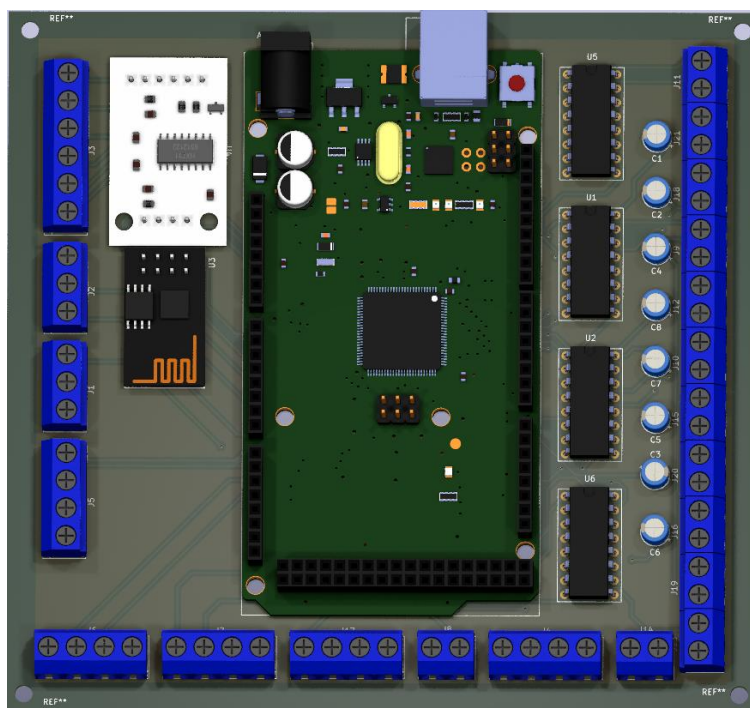


Figura 3.36: *PCB diseñada con los componentes soldados*

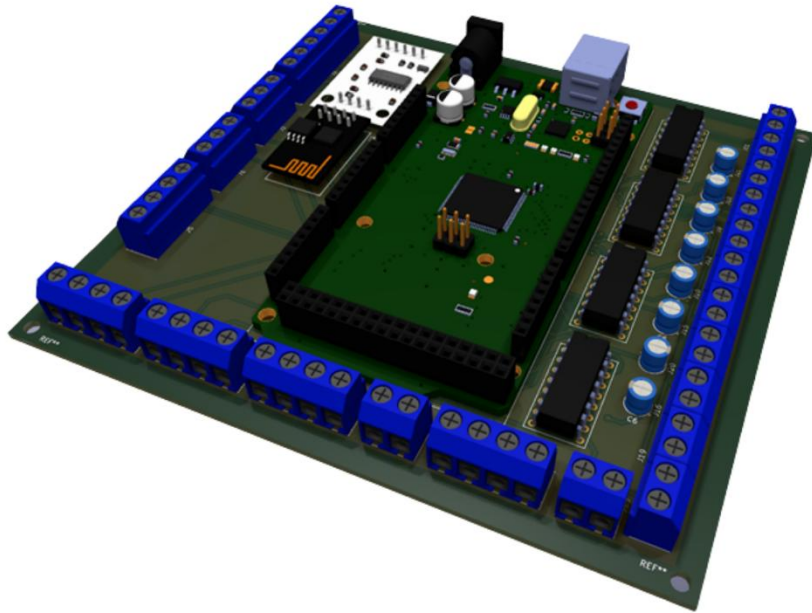


Figura 3.37: *PCB diseñada en visualización 3D*

3.6 Selección de fuentes de energía

En este apartado se llevarán a cabo la selección de la fuente de energía tomando en consideración los datos calculados en el apartado anterior, para seleccionar fuentes óptimas, ya que, en todo proyecto mecatrónico, se depende mucho de la correcta selección del sistema de alimentación del proyecto.

3.6.1 Cálculos de potencia

Para el cálculo de la fuente de alimentación se tomará en cuenta que todos los componentes funcionan simultáneamente, para considerar el caso más crítico y evitar un posible fallo posterior en el sistema durante su funcionamiento, a continuación, se presenta el cuadro de potencias del sistema en la Tabla 19.

Tabla 3.16: Cálculos de la potencia necesaria para la selección de fuentes

Componente	Cantidad	Corriente(A)	Voltaje(V)	Corriente total(A)
Microcontrolador	1	0.04	5	0.04
Motor paso a paso	5	3.5	12	17.5
Motor DC - transportador	1	1.5	12	1.5
Motor DC - dosificador	1	1.5	12	1.5
Actuador lineal	8	0.5	24	4
Sensor de peso	1	0.0015	12	0.0015
Sensor de proximidad	1	0.02	5	0.002
Módulo Wifi	1	0.22	3.3	0.22
Corriente total (3.3V)				0.22
Corriente total (5V)				0.042
Corriente total (12V)				20.5015
Corriente total (24V)				4

Fuente: Elaboración propia

Con los requerimientos señalados, se elige una fuente de alimentación ATX, debido a que esta genera diferentes salidas de voltaje, desde 3.3V, 5V y 12V, por lo que se decide por esta fuente para ahorrar espacio y dinero. En la Figura 62 se puede observar una fuente de alimentación ATX. Asimismo, para la tensión de 24V, se utilizará una fuente conmutada de 24V y una corriente de 6A, considerando el factor de seguridad para la corriente requerida de 4A. En la Figura 63 se puede ver una fuente conmutada con estas características.



Figura 3.38: Fuente de alimentación ATX

Nota. Reproducida de Las Fuentes De Alimentación De Pc [Fotografía], Prometec (<https://www.prometec.net/las-fuentes-de-alimentacion-de-pc/>).



Figura 3.39: *Fuente conmutada de 24V*

Nota. Reproducida de Fuente De Alimentación Conmutada AC/DC 120W 24V 5A [Fotografía], Naylamp Mechatronics (<https://naylampmechatronics.com/fuentes-switching-ac-dc/829-fuente-de-alimentacion-conmutada-acdc-120w-24v-5a.html>).

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE COSTOS

En este capítulo se explicarán los costos del sistema, incluyendo los materiales y un estimado de los costos de fabricación, además de los componentes utilizados en el diseño de la electrónica del sistema de empaquetado.

4.1 Costos electrónicos

Considerando todos los componentes electrónicos utilizados en el diseño de la máquina, tales como los actuadores, los sensores o el microcontrolador, se realizó la Tabla 21 con dichos valores.

Tabla 4.1: Tabla de costo de componentes de la empaquetadora

Presupuesto de los componentes de empaquetadora			
Componente	Cantidad	P. unit (S/.)	Total (S/.)
Arduino Mega 2560 Pro	1	S/.65,00	S/.65,00
ESP-01 ESP8266 WIFI-SERIAL	1	S/.20,00	S/.20,00
Sensor de Proximidad Fotoeléctrico Infrarrojo E18-D80NK	1	S/.28,00	S/.28,00
Celda de carga 5kg + HX711	1	S/.19,50	S/.19,50
Actuador LA14 de Linak	8	S/.150,00	S/.1.200,00
Nema 24 QCI-DS028	5	S/.100,00	S/.500,00
Motorreductor PDX26	2	S/.89,00	S/.178,00
Integrado L293D	4	S/.6,00	S/.24,00
Driver TB6600	5	S/.42,00	S/.210,00
Driver L298N	1	S/.15,00	S/.15,00
Driver Mosfet IRF540N	1	S/.14,00	S/.14,00
Llave diferencial 220V/25A	1	S/.184,00	S/.184,00
Llave termomagnética 220V/25A	4	S/.42,90	S/.171,60
Contactador 220V/25A	2	S/.309,03	S/.618,06
Fuente De Alimentación Conmutada AC/DC 120W 24V 5A	1	S/.55,00	S/.55,00
Fuente de alimentación ATX	1	S/.64,90	S/.64,90
Total			S/.3.367,06

Fuente: Elaboración propia

4.2 Costos mecánicos y de fabricación

Tomando en cuenta todas las piezas diseñadas para la fabricación de los componentes mecánicos como la tolva, el transportador helicoidal y el dosificador volumétrico, se realizó la Tabla 20 con los valores correspondientes.

4.2.1 Costos mecánicos

4.2.2 Costos de fabricación

4.3 Costos totales

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones se detallan a continuación:

- El sistema apunta a ser funcional al llevar a cabo la implementación y poder ser escalable incluso a mayor capacidad de la requerida, debido a que los actuadores seleccionados tienen un factor de seguridad alto que permitiría el aumento en la producción con la correcta programación.
- Se verificó y profundizó sobre la problemática, al obtenerse información de primera mano de productores independientes, lo que respalda la propuesta de solución, que considera todas las restricciones de la lista de requerimientos y apunta a solventar un paso muy importante en la generación de valor agregado al café.
- Si bien el costo del sistema es elevado, sigue siendo un diseño de bajo costo en comparación con las máquinas del mercado que no cumplen con las mismas funciones.

- Las simulaciones que se llevaron a cabo mostraron el correcto funcionamiento del circuito de potencia, además del análisis de esfuerzos en las partes más críticas, lo que permitió la verificación y validación de los mismos.

Las recomendaciones se detallan a continuación:

- Realizar el modelado 3D completo del sistema de empaquetado para poder mostrar más visualmente y tener una mejor retroalimentación de los clientes, lo que permitirá más probabilidades de financiamiento.
- Para proyectos en los que sea necesaria la comunicación vía Wifi, lo más recomendable es utilizar un controlador que tenga integrado el módulo Wifi, esto debido a que permite una mayor facilidad en la programación y un ahorro de espacio en el diseño de la tarjeta electrónica.
- Llevar a cabo prototipos funcionales para demostrar el funcionamiento es mucho más recomendable que realizar simulaciones debido a que normalmente hay variables que no se consideran en las simulaciones que están presentes en las pruebas reales.
- El microcontrolador utilizado es considerado como uno de pruebas, por lo que se recomienda utilizar uno industrial a futuro.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Ruiz del Solar, “Robotics-Centered Outreach Activities: An Integrated Approach”, in IEEE Transactions on Education, 2010, Vol. 53, No. 1, pp. 38 – 45
- [2] S. M. Papert, Mindstorms: Children, Computers, and Powerful Ideas, 2nd Edition. New York: Basic Books, 1999.