

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

Diseño de un sistema automatizado para el movimiento del grano de café durante el proceso de secado para una planta productora en el Ecuador

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del título de:

**Ingeniero en Electrónica y Automatización**

Presentado por:

Josué Steven Muñoz Cadena

Fernando Andrés Ruales Loayza

GUAYAQUIL-ECUADOR

AÑO 2020

# DEDICATORIA

En primer lugar, a Dios por bendecirme con la familia que tengo y por darme fuerzas cuando daba todo por perdido. A mis padres, pilares fundamentales en mi vida. A mis hermanos que siempre supieron animarme y estar conmigo cuando más los necesitaba. Y a las personas que siempre confiaron en mí y que supieron entenderme, ayudarme, apoyarme cuando más los necesité, ustedes saben quiénes son.

**Josué Steven Muñoz Cadena**

A Dios por su misericordia y sabiduría para permitirme cumplir este objetivo. A mi familia por su apoyo incondicional y amor sincero demostrado día a día. Y a todas las personas que creen en mí brindándome su confianza y soporte en todo momento.

**Fernando Andrés Ruales Loayza**

## **AGRADECIMIENTOS**

Gracias a Dios por las bendiciones derramadas día a día en nuestras familias, su bondad e infinita misericordia nos ha llevado a cumplir uno de tantos objetivos deseados.

Los más sinceros agradecimientos a nuestras familias que han sido pilar fundamental en nuestro desarrollo tanto personal como profesional.

Finalmente, al Ing. Leonardo Cardoso por su amistad sincera y valioso aporte para el desarrollo y finalización del presente trabajo. Muito obrigado irmão.

## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Josué Steven Muñoz Cadena y Fernando Andrés Ruales Loayza damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



---

**Josué Steven Muñoz Cadena**



---

**Fernando Andrés Ruales Loayza**

## EVALUADORES



---

**PhD. Wilton Agila Gálvez**  
PROFESOR DE LA MATERIA



---

**MBA. Damián Larco Gómez**  
PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

Durante la última década el Ecuador ha presentado un importante decrecimiento en los niveles de exportación de sacos de café marcado principalmente por la baja productividad y la sobreproducción extranjera. Dicha problemática ha generado en los últimos años una reorientación del sector cafetalero de la nación la cual se centra en la producción de café especializado que destaca por su alta calidad sensorial, despertando así, gran interés en mercados internacionales.

Para obtener dichos estándares de calidad en la producción de este tipo de café es necesaria la implementación de nuevas tecnologías dentro de los procesos involucrados. El presente proyecto busca implementar un sistema automatizado para el movimiento del grano de café durante el proceso de secado que garantice una deshidratación sostenida del grano y a su vez reduzca los niveles de pérdidas económicas debido a la reducción de contaminación del producto.

El desarrollo de este trabajo se basó en tres etapas: fase de levantamiento de información, fase de diseño y fase de seleccionamiento de equipos. Cada etapa permitió conocer la necesidad del usuario y adaptar la idea de la mejor forma posible para plasmar dichos requerimientos en la rutina de programación del sistema. Mediante el uso de un PLC y bajo el diseño de un rastrillo automatizado con un mecanismo de tornillo sin fin fue posible elaborar una propuesta adaptable a dichas necesidades ofreciendo al usuario un sistema personalizable y viable desde un punto de vista económico y práctico.

**Palabras Clave:** Café, Secado, Proceso, Sistema, Automatización.

## ABSTRACT

*During the last decade, Ecuador has presented a significant decrease in the levels of exports of coffee bags, mainly marked by low productivity and foreign overproduction. This problem has generated in recent years a reorientation of the nation's coffee sector which focuses on the production of specialized coffee that stands out for its high sensory quality, opening great interest in international markets.*

*To obtain these quality standards in the production of this type of coffee, it is necessary to implement new technologies within the processes involved. This project seeks to implement an automated system for the movement of the coffee bean during the drying process that guarantees a sustained dehydration of the bean and in turn reduces the levels of economic losses due to the reduction of product contamination.*

*The development of this work was based on three stages: the information gathering phase, the design phase, and the equipment selection phase. Each stage allowed knowing the user's need and adapting the idea in the best possible way to translate these requirements into the system's programming routine. By using a PLC and under the design of an automated rake with an endless screw mechanism, it was possible to develop a proposal adaptable to these needs, offering the user a customizable and viable system from an economic and practical point of view.*

**Keywords:** *Coffee, Drying, Process, System, Automation.*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	I
ABSTRACT .....	II
ÍNDICE GENERAL .....	III
ABREVIATURAS .....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS .....	XI
CAPÍTULO I .....	1
1. Introducción.....	1
1.1. Descripción del problema .....	2
1.2. Justificación del problema .....	3
1.3. Objetivos .....	4
1.3.1. Objetivo general .....	4
1.3.2. Objetivos específicos.....	4
1.4. Marco teórico.....	4
1.4.1. Proceso de transformación del café .....	4
1.4.2. Proceso de secado .....	7
1.4.2.1. Tipos de secado .....	8
1.4.2.2. Proceso de secado en el Ecuador.....	9
1.4.3. Automatización de un proceso de secado.....	10
CAPÍTULO II .....	11
2. Metodología.....	11
2.1. Fase de levantamiento de información.....	12
2.1.1. Principios de un correcto proceso de secado.....	15
2.1.2. Variables del proceso de secado .....	16
2.1.3. Movimiento del grano de café .....	17
2.1.4. Automatización de la mecánica de movimiento del café .....	18
2.1.5. Estructura de una marquesina .....	19
2.2. Fase de diseño.....	20

2.2.1. Posibles soluciones .....	20
2.2.1.1. Mesa vibratoria automatizada .....	21
2.2.1.2. Rastrillo automatizado con mecanismo de engranajes .....	23
2.2.1.3. Rastrillo automatizado con mecanismo de tornillo sin fin .....	26
2.2.2. Criterios de selección .....	29
2.2.3. Análisis de alternativas.....	30
2.2.3.1. Matriz de selección de alternativas .....	30
2.2.4. Definición de estrategia .....	32
2.2.4.1. Flujo del proceso de elaboración del prototipo .....	34
2.2.4.2. Dimensionamiento del mecanismo de movimiento .....	34
2.2.4.3. Materiales.....	37
2.3. Fase de seleccionamiento de equipos .....	42
2.3.1. Control PTO .....	43
2.3.2. Topología de equipos .....	44
2.3.3. Dimensionamiento de equipos .....	46
2.3.3.1. Motor STPR-MTR-17060.....	50
2.3.3.2. Driver DM542E .....	51
2.3.3.3. PLC S7-1200 1214C DC/DC/DC .....	53
2.3.3.4. HMI KTP400 Basic PN .....	54
2.3.3.5. Final de carrera AEP2G41Z11-1 .....	55
CAPÍTULO III .....	56
3. Resultados y análisis.....	56
3.1. Modos de operación .....	56
3.1.1. Diagrama de flujo .....	57
3.1.2. Tabla de variables .....	58
3.2. Diagrama de fuerza del sistema automatizado .....	59
3.3. Diagrama de control del sistema automatizado.....	60
3.4. Programación Ladder .....	61
3.5. Interfaz máquina-usuario.....	63
3.6. Análisis de costos.....	65
3.6.1. Costos de equipos de automatización.....	66
3.6.2. Costos de equipos y materiales de parte mecánica .....	67
3.6.3. Costos asociados a ingeniería .....	67

3.6.4. Costos indirectos adicionales .....	68
3.7. Resumen de costos y precios .....	68
3.8. Oferta al cliente .....	70
3.9. Matriz FODA.....	71
CAPÍTULO IV .....	72
4. Conclusiones y recomendaciones .....	72
4.1 Conclusiones.....	72
4.2 Recomendaciones.....	73
REFERENCIAS.....	74
APÉNDICES.....	77

## ABREVIATURAS

ANECAFE	Asociación Nacional de Exportadores de Café del Ecuador
AQ	Salidas Analógicas
CNC	Control Numérico Computarizado
CPU	Unidad Central de Procesamiento
CQI	Instituto de Calidad del Café
DC	Corriente Continua
DI	Entradas Digitales
DO	Salidas Digitales
DIN	Instituto Alemán para la Normalización
FODA	Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas
HMI	Interfaz Humano-Máquina
HSC	Encoder de alta velocidad
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
IP	Protección de ingreso
NC	Normalmente Cerrado
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
NO	Normalmente Abierto
NTE	Norma Técnica Ecuatoriana
PLC	Controlador Lógico Programable
PTO	Salida de Tren de Pulsos
TFT	Transistor de película delgada
TIA	Totally Integrated Automation
UX	Experiencia de Usuario

# SIMBOLOGÍA

A	Amperios
Cm	Centímetros
Ft	Pies
Kb	Kilobyte
KHz	Kilohertz
K	Kilohms
Kg	Kilogramos
MB	MegaByte
m	Metros
mA	Miliamperios
mH	Milihenrios
mm	Milímetros
Nm	Newton-metro
RPM	Revoluciones por Minuto
V	Voltaje
VDC	Voltaje Corriente continúa
VAC	Voltaje Corriente Alterna
W	Watts

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Flujograma de la cadena productiva de café.....	6
Figura 1.2. Secador mecánico rotativo tipo guardiola .....	8
Figura 1.3. Secado con exposición solar, movimiento por rastrillo .....	9
Figura 2.1. Fases de planificación del proyecto .....	11
Figura 2.2. Logo de hacienda Santa Gertrudis.....	12
Figura 2.3. Café de altura tipo geisha .....	12
Figura 2.4. Camas africanas – Hacienda Santa Gertrudis .....	13
Figura 2.5. Estaciones climáticas – Hacienda Santa Gertrudis.....	13
Figura 2.6. Granos de café en secadero – Hacienda Santa Gertrudis .....	14
Figura 2.7. Principios fundamentales para un correcto secado de café .....	15
Figura 2.8. Variables de un proceso de secado en marquesina.....	16
Figura 2.9. Rastrillo de madera en mal estado.....	18
Figura 2.10. Marquesina para secado de café .....	19
Figura 2.11. Etapas de planificación para selección de prototipo.....	20
Figura 2.12. Posibles soluciones para el prototipo .....	20
Figura 2.13. Mesa vibratoria para el movimiento del grano de café .....	21
Figura 2.14. Ventajas y desventajas – Posible solución A .....	22
Figura 2.15. Rastrillo automatizado con mecanismo de engranajes .....	23
Figura 2.16. Motor acoplado a engranaje central .....	23
Figura 2.17. Vista lateral – Sistema de engranajes .....	24
Figura 2.18. Sensor final de carrera y rastrillo automatizado .....	24
Figura 2.19. Ventajas y desventajas – Posible solución B .....	25
Figura 2.20. Rastrillo automatizado con mecanismo de tornillo sin fin .....	26
Figura 2.21. Motor acoplado a base lateral del sistema .....	27
Figura 2.22. Vista lateral – Sistema de tornillo sin fin.....	27
Figura 2.23. Ventajas y desventajas – Posible solución C .....	28
Figura 2.24. Criterios de selección de mejor alternativa.....	29
Figura 2.25. Descripción de criterios de selección .....	29
Figura 2.26. Puntuación para evaluación de posibles soluciones .....	30
Figura 2.27. Gráfico radial con evaluación de alternativas .....	31
Figura 2.28. Principios de diseño UX .....	32

Figura 2.29. Relación entre artefacto y usuario bajo diseño UX.....	32
Figura 2.30. Flujo de proceso para elaboración del prototipo .....	34
Figura 2.31. Cama africana – Hacienda Santa Gertrudis.....	34
Figura 2.32. Vista frontal – Prototipo de la estructura .....	35
Figura 2.33. Vista lateral – Prototipo de la estructura.....	36
Figura 2.34. Vista superior – Prototipo de la estructura .....	36
Figura 2.35. Malla sarán para secado de café .....	37
Figura 2.36. Prototipo de rastrillo automatizado .....	38
Figura 2.37. Soporte para bases del rastrillo automatizado .....	39
Figura 2.38. Prototipo de rastrillo dentado .....	39
Figura 2.39. Acople entre motor y tornillo sin fin .....	40
Figura 2.40. Armazón con barras de soporte y tornillo sin fin.....	40
Figura 2.41. Sensores finales de carrera acoplados a la mesa.....	41
Figura 2.42. Estructura metálica completa – Rastrillo automatizado.....	41
Figura 2.43. Esquema de funcionamiento de aplicación Motion Control .....	42
Figura 2.44. Señal cuadrada de modulación para control PTO.....	43
Figura 2.45. Relación entre velocidad de pulso y dirección .....	44
Figura 2.46. Esquema básico de control PTO.....	45
Figura 2.47. Filtros aplicados para selección de motor de paso.....	47
Figura 2.48. Topología de equipos y relación entre ellos .....	49
Figura 2.49. Motor paso a paso STPR-MTR-17060 .....	50
Figura 2.50. Driver controlador DM542E.....	51
Figura 2.51. Conexiones recomendadas entre PLC y driver.....	52
Figura 2.52. PLC Siemens SIMATIC S7-1200 – CPU 1212C DC/DC/DC....	53
Figura 2.53. SIMATIC HMI KTP 400 Basic .....	54
Figura 2.54. Final de Carrera – AEP2G41Z11-1 .....	55
Figura 3.1. Diagrama de flujo del sistema .....	57
Figura 3.2. Diagrama de fuerza del sistema automatizado .....	59
Figura 3.3. Diagrama de control del sistema automatizado .....	60
Figura 3.4. Modos de operación del sistema.....	61
Figura 3.5. Franja horaria del modo automático.....	62
Figura 3.6. Bloque PTO del sistema.....	62
Figura 3.7. Modos de operación – Interfaz HMI .....	63
Figura 3.8. Selección del tipo de café a secar.....	64

Figura 3.9. Modo temporizador – Interfaz HMI .....	64
Figura 3.10. Costos de inversión del proyecto .....	65
Figura 3.11. Diagrama de pastel – Costos de inversión del proyecto .....	68

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Matriz de selección de alternativas.....	31
Tabla 2.2. Principios de diseño aplicados al proyecto.....	33
Tabla 2.3. Medidas tomadas como referencia para dimensionamiento .....	35
Tabla 2.4. Posibilidades de conexión entre drive y encoder .....	44
Tabla 2.5. Especificaciones de motores paso a paso bipolares.....	46
Tabla 2.6. Par de retención sugerido acorde a filtros seleccionados .....	47
Tabla 2.7. Esfuerzo mecánico y par de retención del motor .....	48
Tabla 2.8. Datos técnicos – Motor STPR-MTR-17060 .....	50
Tabla 2.9. Datos técnicos - Driver DM542E .....	51
Tabla 2.10. Pines de control - Driver DM542E .....	52
Tabla 2.11. Datos técnicos – PLC S7-1200 CPU 1212C DC/DC/DC .....	53
Tabla 2.12. Datos técnicos - HMI KTP 400 Basic.....	54
Tabla 2.13. Datos técnicos – AEP2G41Z11-1.....	55
Tabla 3.1. Tabla de variables del sistema .....	58
Tabla 3.2. Costos de equipos de automatización.....	66
Tabla 3.3. Costos de equipos y materiales de parte mecánica .....	67
Tabla 3.4. Costos asociados a ingeniería .....	67
Tabla 3.5. Costos indirectos adicionales .....	68
Tabla 3.6. Precios indirectos adicionales .....	69
Tabla 3.7. Oferta presupuestal al cliente.....	70
Tabla 3.8. Matriz FODA.....	71

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

La producción del café en el Ecuador se distingue de otros países de la región debido a la ubicación geográfica y a los diversos ecosistemas presentes en la nación. Los diversos tipos de suelos, la altitud, el nivel de humedad y las diversas temperaturas existentes en Ecuador convierten al café ecuatoriano como uno de los mejores de América del Sur y con alta demanda en el continente europeo. Acorde a la norma ecuatoriana NTE INEN 285:2006 el café ecuatoriano se clasifica según la altitud de la zona de cultivo (café de estricta altura, café de altura, café estándar), por el método de beneficio (natural, lavado, honey) y finalmente de acuerdo a la especie (café arábica, café robusta). [1]

Dentro de la cadena productiva de la obtención del café para el consumo humano se encuentra el proceso de secado. En esta etapa se expone al grano de café a altas temperaturas (comúnmente exposición solar) para reducir el nivel de humedad relativa del embrión presente en la semilla a un nivel aproximado de  $11 \pm 0.5\%$  con respecto a la temperatura ambiente [2]. La importancia de esta etapa dentro del proceso determina en gran medida la calidad final del café y por consecuente define el mercado objetivo del producto.

En Ecuador este proceso se realiza comúnmente en estructuras de caña y plástico que forman pequeños invernaderos llamados “marquesinas” donde se realiza el secado de forma manual por aproximadamente treinta días [3]. Dicho proceso consiste en reposar los granos de café sobre bandejas denominadas camas africanas y dejarlos bajo la exposición solar durante el tiempo descrito. Sin embargo, cada variedad de café requiere de un tratamiento diferente de secado y a su vez una supervisión constante de la temperatura y humedad del grano de café. Mientras mayor sea el cuidado en esta etapa del proceso, la humedad y aspecto del grano será mejor y por tanto sus características sensoriales serán selectas para mercados internacionales que exigen productos con altos estándares de calidad.

## 1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Dado el potencial productivo de café que Ecuador ofrece muchas familias se dedican al cultivo y posterior venta de este producto, sea para consumo local o para exportación a mercados internacionales. Sin embargo, para alcanzar café de especialidad y con alta capacidad de exportación se necesitan alcanzar niveles de calidad que no todos los productores pueden tener.

Ante la falta de tecnificación en los procesos involucrados para la obtención del producto final y poco conocimiento del tratamiento requerido, cerca del 80% del café ecuatoriano únicamente llega a ser comercializado en el mercado local puesto que no alcanza estándares internacionales que permitan su exportación. Hoy en día, competir con el producto terminado de países como Colombia, Brasil o Vietnam es sumamente difícil debido a que el precio a pagar por estos mercados es muy bajo en comparación al valor por el cual se cotiza el café ecuatoriano. [4]

Según Pablo Pinoargote, gerente de ANECAFE, la producción del café en suelo ecuatoriano por hectárea llega a cuatro o cinco sacos; mientras que, la media de la región andina es de 35 a 40 sacos [5]. Esta es una de las razones por las que el precio por libra del café ecuatoriano muy difícil competirá con mercados considerados potencias y que abarcan gran demanda del mercado mundial, limitando así, la producción únicamente al mercado local.

En la última década, las exportaciones de sacos de café de 60 kilos han tenido un decrecimiento significativo respecto a décadas pasadas tanto para las exportaciones de café robusto, arábigo e industrializado. Según ANECAFE, a inicios de la actual década el país exportó alrededor de 1.2 millones de sacos generando así ingresos aproximados a los 172 millones de USD. Sin embargo, el año 2020 cierra sus cifras con alrededor de 300 mil sacos exportados equivalentes a 45 millones de USD [6]. La reducción de aproximadamente cuatro veces, tanto la cantidad de sacos importados como de ingresos per cápita en dólares FOB que entraron al país en la última década, es un problema serio y marca una tendencia negativa preocupante. Todo esto producto de la falta de innovación, oportunidades y reactivación económica de un sector con mucho potencial productivo pero muy poco aprovechado en el Ecuador.

## **1.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA**

Dada esta problemática se necesita una reorientación del sector cafetalero en el Ecuador en todas sus escalas; el buscar nuevos mercados objetivos ha sido una de esas propuestas por parte de los caficultores ecuatorianos que se afianza poco a poco como una tendencia que busca cambiar el nicho de mercado que existe actualmente en el país [7]. Para lograr esto, un cambio positivo radica en la tecnificación sostenida de la cadena productiva de elaboración del café con el propósito de elaborar café especializado de alta calidad y por el cual se llega a pagar muy bien en mercados internacionales como el mercado europeo o países asiáticos.

El presente trabajo busca ofrecer al sector cafetalero del Ecuador una solución práctica y automatizada para un eslabón importante dentro de la cadena productiva del café como lo es el proceso de secado; siendo específicos, en el movimiento del grano de café durante esta etapa. Una de las principales razones de la automatización durante dicho proceso de movimiento es ofrecer uniformidad y homogeneidad en el secado del grano de café. Con esto, se evita la generación de hongos en el producto lo cual puede llevar a contaminar el lote que está siendo procesado; generando así, pérdidas económicas muy significativas [8]. Sumado a esto, el no depender de una persona encargada únicamente para mover el producto disminuye los costos operativos y así mismo garantiza operabilidad y transparencia en el proceso.

La implementación de un sistema automatizado fácil de operar y adaptable a diferentes escenarios busca complementar otras técnicas presentes en este proceso que ya están siendo abarcadas poco a poco como lo son el control de la temperatura y la humedad bajo pequeñas centrales climáticas. La necesidad de producir café especializado de alta calidad ha generado la búsqueda de soluciones innovadoras que puedan garantizar sostenibilidad en los negocios; aumentando así, los ingresos de los pequeños y medianos productores en el país.

## **1.3. OBJETIVOS**

### **1.3.1. OBJETIVO GENERAL**

- Diseñar un sistema automatizado para el movimiento del grano de café durante el proceso de secado para una planta productora especializada en el Ecuador.

### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Establecer los modos de operación del sistema dependiendo de las necesidades del usuario final.
- Desarrollar un prototipo del sistema automatizado bajo principios de diseño orientados a mejorar la experiencia del usuario.
- Presentar una oferta presupuestal con equipos y materiales necesarios para la implementación del presente proyecto.

## **1.4. Marco Teórico**

### **1.4.1. Proceso de transformación del café**

El café al ser un producto de alto consumo requiere de un proceso de transformación de la materia prima a producto final muy exhaustivo, comenzando con el cultivo de la semilla el cual requiere cierto tipo de observaciones tales como: ambiente adecuado para su florecimiento, cosecha en suelos fértiles y ubicación de la planta bajo una sombra adecuada.

Para que la planta florezca deben pasar alrededor de 4 a 5 meses, luego la misma lleva a cabo un proceso de maduración en el cual el grano tarda de 6 a 8 meses en madurar para posteriormente los caficultores se encarguen de recoger directamente de las plantas el fruto ya listo para su proceso de fermentación [9]. Una vez recogida la fruta del árbol se pueden realizar tres procedimientos previos a la siguiente etapa: lavado, honey y natural.

- En el proceso lavado el fruto del café es colocado en una despulpadora manual la cual se encarga de expulsar la pulpa del fruto de la planta para obtener el grano de café envuelto en una cáscara llamada pergamino. Al realizar este proceso se encuentra una capa en el grano llamada mucilago la cual se desprende mediante la acción del grano con el agua en un proceso enzimático para finalmente obtener el grano pergamino de café con un sabor típico de origen.
- El proceso honey mantiene la base del lavado, a diferencia de no remover el mucílago, pasa directamente a la parte de secado del café con esta capa dentro del grano ya que la misma posee azúcares los cuales ayudarán a darle un sabor más dulce al café.
- En el proceso natural no se despulpa el fruto del café, sino que los mismos son secados directamente al sol, ocasionando que el mismo se deshidrate y que en el grano se concentren azúcares provenientes del fruto; se remueve la cáscara obteniendo sabores maduros o de frutos deshidratados [10].

La variedad de tipos de café y sus sabores al pasar los años han aumentado la experimentación e investigación de los distintos caficultores que cada vez juegan con los procedimientos dentro del proceso de café para obtener innovaciones en el sabor y aroma de este, lo cual es solicitado en gran cantidad por el mercado internacional.

Uno de los procesos implementados para los distintos tipos de café es la fermentación, es una etapa clave dentro de la cadena de producción del café, debido que es aquí donde se le pueden dar distintos tipos de sabores al grano dependiendo del tipo y tiempo de fermentación que queramos aplicar, existen dos tipos anaeróbica y aeróbica.

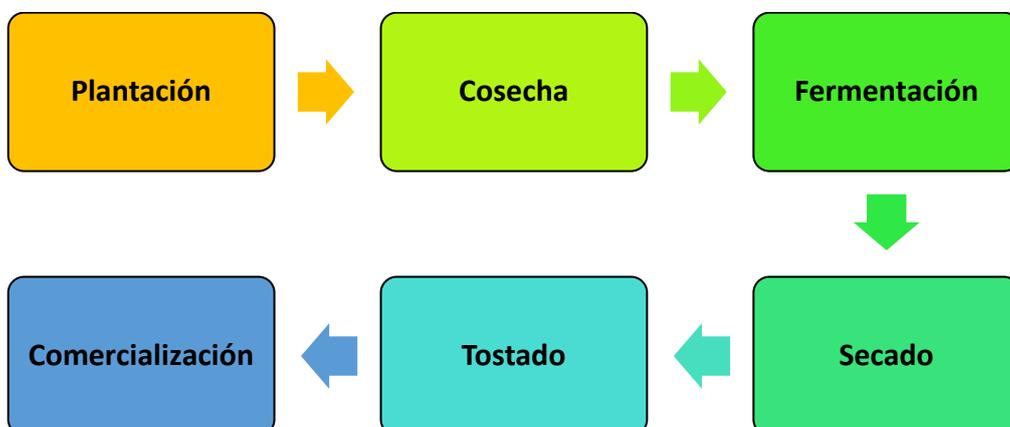
- El proceso anaeróbico no requiere de la presencia del aire para su ejecución, la materia prima es lavada y colocada en un tanque cerrado durante cierto tiempo, logrando que las bacterias que actúan en este tipo de ecosistemas ejerzan una acción oxidante al grano y así darle una nueva característica al mismo.

- El proceso aeróbico es realizado con la presencia de oxígeno a su alrededor, con la singularidad de ser sencillo el cual consiste en dejar los frutos reposar en agua y que por acciones de los propios microorganismos generados obtener cierto tipo de aroma o sabor dependiendo del tiempo que este se deja fermentar, el cual puede pasar de 14 a 24 horas elegido por el caficultor [11].

De la fermentación el grano del café llega con más del 50% de humedad y debe secarse para que se mantenga entre 10% a 12% el rango ideal de humedad para un grano de café, en esta etapa de secado la semilla se encuentra muy expuesta a volverse quebradiza, a ser atacada por hongos y bacterias, ocasionando que se presente un producto final de baja calidad, el propósito de este proceso es que el grano adquiera propiedades que aseguren la conservación del grano.

Si el grano presenta un 8% de humedad el café va a pesar menos por lo tanto perdería rentabilidad es decir afectaría monetariamente al caficultor, sin embargo, si el grano llega a un 15% de humedad o más afectará de manera directa a la calidad de este ocasionando que el caficultor sea “castigado” por sus clientes los cuales no comprarían este tipo de grano por su mala condición [12].

Finalmente pasa a un proceso de tostado en el cual se expone el grano a altas temperaturas para que el mismo se adapte a las características que requiere el caficultor para un tueste claro, medio y oscuro; en esta etapa la humedad, temperatura, densidad y tamaño del grano juegan un papel importante.



**Figura 1.1.** Flujograma de la cadena productiva de café

#### **1.4.2. Proceso de secado**

El secado es parte fundamental del proceso de producción del café debido a que en esta etapa se disminuye el nivel de humedad del grano de un 67% que viene de la etapa de fermentación a entre 10 y 12% de humedad [13]. Una alta humedad de café puede llegar a generar sabores herbales no deseados a diferencia de una baja humedad lo que ocasiona que el café pierda peso lo cual afecta de manera económica al caficultor.

El secado de café comúnmente se realiza exponiendo los granos a la luz solar y por tanto se encuentra sujeto a muchos factores externos tales como: luminosidad, precipitaciones, temperatura ambiente, entre otros. Sumado a que, durante el proceso de secado, este producto debe estar en constante movimiento cada cierto tiempo para asegurar uniformidad y evitar la generación de hongos principalmente en los primeros días. Para esto último, los caficultores emplean rastrillos de madera que lastiman al fruto dañando las propiedades físicas ideales que debería tener el grano antes de pasar a la siguiente etapa de producción.

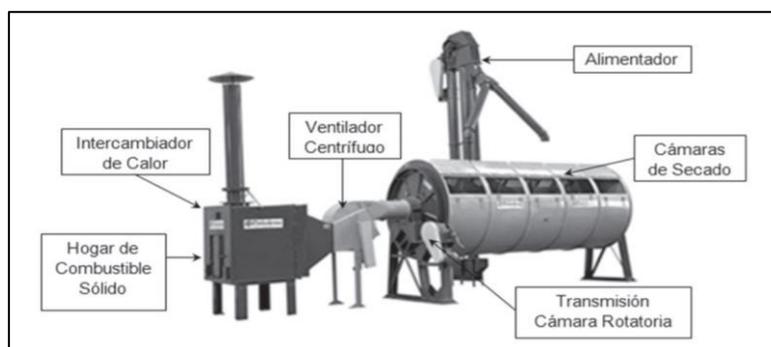
Cabe destacar que cuando la humedad del grano de café esta por fuera del rango ideal, por consecuencia de un secado no adecuado, puede llegar a que la semilla produzca hongos afectando la calidad del producto o, caso contrario, se muera el embrión debido a un secado excesivo produciendo así sabores herbales no deseados para la degustación.

Finalmente, un secado del grano de café no adecuado afecta a la cadena productiva de este bien. Una vez secado el café pasa a la etapa de tostado o “tueste” donde el café es sometido a altas temperaturas para transformar sus propiedades sensoriales y dejarlo listo para el consumo humano. Para esto se emplean “curvas de tueste” parametrizadas según el tipo de café y el grado de humedad presente en la semilla, por lo tanto, al no tener niveles de humedad dentro de los rangos deseados el café no será tostado correctamente afectando así la calidad del producto final y por tanto limitando su mercado [14].

### 1.4.2.1. Tipos de secado

Para realizar el secado del grano de café existen distintas prácticas que se realizan como el secado manual o solar, secado por marquesina también llamado secador parabólico y secado mecánico.

- En el secado manual los granos luego de la fermentación pasan a ser colocados en un material de reposo ya sea este una palma africana, carros secadores, elbas o patios de cementos para que luego se sequen por acción solar. Sin embargo, es indispensable tener mucho cuidado al realizar este trabajo porque al estar en contacto con exposiciones solares muy altas se puede afectar la consistencia del grano.
- El secado mecánico consiste en la utilización de estructuras metálicas cerradas, comúnmente de tipo silo, donde se ubican los granos de café para su proceso de secado. Estos sistemas intercambiadores de calor permiten regular la temperatura y la presión de aire al cual se encuentra sometido el producto y su implementación se enfoca en ambientes que posean un alto porcentaje de humedad y además que sean muy pluviosos.
- Por último, el secado mediante marquesina consiste en utilizar un invernadero o “marquesina” para almacenar los granos de café en bandejas y dejarlas bajo exposición solar por el tiempo de duración del secado. Debido a la naturaleza de este invernadero se llega a concentrar gran parte de la radiación solar en ella y los cambios de temperatura externos no son tan bruscos como el secado natural llegando a cuidar los granos de café [15].



**Figura 1.2.** Secador mecánico rotativo tipo guardiola [Nota. Adaptado de “Hacia la mejora del secado mecánico del café en Colombia” (p. 114), por Gutiérrez, Jhony; Copete, Henry, 2009, Tecno Lógicas, ISSN: 0123-7799]

#### 1.4.2.2. Proceso de secado en el Ecuador

El secado en el Ecuador se caracteriza por emplear comúnmente el secado manual o solar y el secado por marquesina también llamado secador parabólico. El secado mecánico no es tan utilizado debido a las características que se tiene dentro de la geografía del país, el impacto económico para implementar estas máquinas y sumado a que el volumen de café a secar no es considerable para optar por este método. Sumado a esto, existen varios estudios que reafirman la calidad del producto final basado en métodos tradicionales de secado [16].

El secado solar es realizado en la mayoría del país por la facilidad en su implementación, se basa en colocar el grano de café en una superficie la cual es expuesta a la luz solar para así lograr un secado más uniforme, las superficies utilizadas como reposo del grano pueden ser carros tipo cajones de madera o de acero, elbas, camas africanas, entre otras.

El secado por marquesina es realizado especialmente en lugares donde el ambiente es muy variable, es decir, que las condiciones climáticas del lugar no pueden determinarse con exactitud ocasionando que las mismas afecten al grano de manera directa es decir influyendo sobre la temperatura y humedad que se presentan en el ecosistema, como ejemplo podemos mencionar a la sierra ecuatoriana.



**Figura 1.3.** Secado con exposición solar, movimiento por rastrillo [Nota. Adaptado de “Como medir la humedad en los granos de café verde y pergamino” [Fotografía], por Trinidad Coffee Estate, 2019, Perfect Daily Grind (<https://perfectdailygrind.com/es/2019/04/01/como-medir-la-humedad-en-los-granos-de-cafe-verde-y-pergamino/>)]

### **1.4.3. Automatización de un proceso de secado**

En la actualidad la implementación de la tecnología dentro del proceso de secado se ha caracterizado en desarrollar secaderos mecánicos donde se controla la temperatura y la presión dentro de un intercambiador de calor. Sin embargo, si bien se obtienen buenos resultados empleando este tipo de secado, la mejor técnica de secado se realiza mediante el secado natural bajo la exposición solar.

En la actualidad la automatización dentro de una marquesina radica en lograr mantener un control de la temperatura y humedad dentro de este invernadero. Para esto la implementación de un sistema con sensores y actuadores permitirán mantener un monitoreo en tiempo real de las condiciones ambientales del invernadero [17]. En plantas pequeñas suelen optar por el uso de humidificadores para extraer la humedad contenida dentro de la marquesina y así mismo suelen tener pequeñas estaciones meteorológicas, tanto internas como externas, para conocer el estado actual de las variables controlables en este proceso.

La automatización de una marquesina permite mantener las variables del proceso entre los rangos de operaciones requeridos para asegurar la calidad de la materia prima final. Como todo proceso automático, el reducir la intervención del personal permite reducir los costos operativos ofreciendo así transparencia para todas las acciones requeridas.

Entre los beneficios de la automatización aplicada a una marquesina para el proceso de secado de café se destaca:

- ✓ Monitoreo en tiempo real de las variables controlables del proceso.
- ✓ Disminución de la intervención del personal humano dentro de la marquesina.
- ✓ Optimización del proceso de secado del grano de café convirtiéndolo en un producto especializado de exportación.
- ✓ Disminución de pérdidas económicas debido a sanciones por calidad del producto final.
- ✓ Incremento de la productividad de los cultivos brindando así apertura a nuevos mercados nacionales e internacionales.

# CAPÍTULO II

## 2. Metodología

En este capítulo se presentan las tres fases de planificación e investigación a seguir para el correcto desarrollo del proyecto.

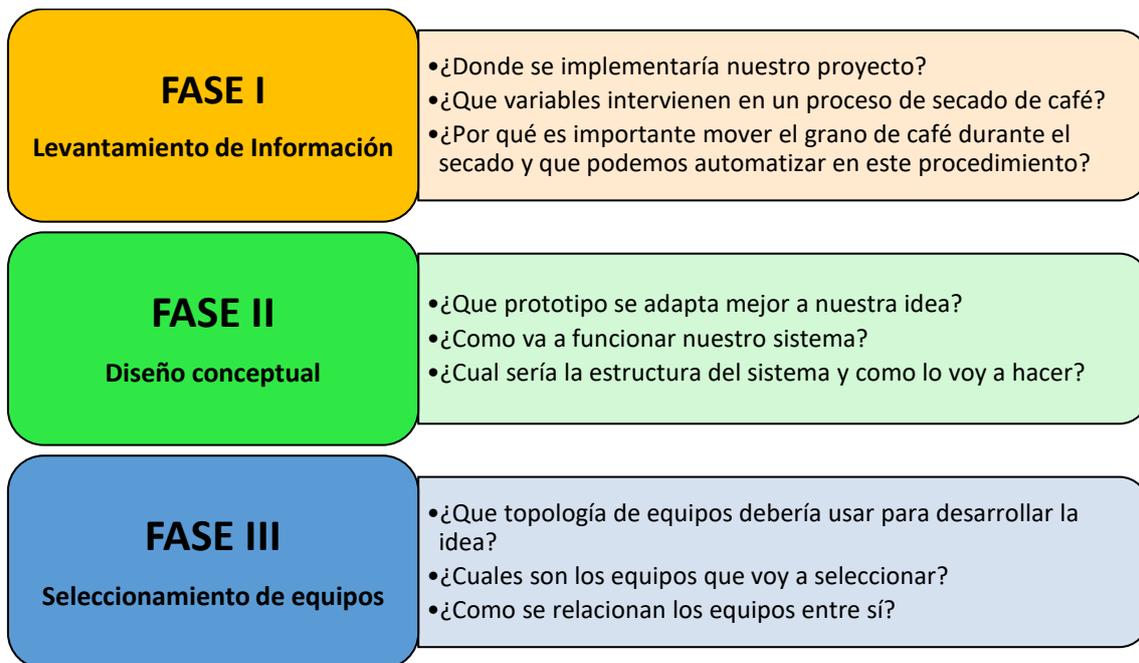


Figura 2.1. Fases de planificación del proyecto

La figura 2.1. muestra la ejecución de manera secuencial de las tres fases o etapas con sus respectivas directrices. En cada etapa hemos planteado nuestras preguntas de investigación que nos ayudaron a segmentar y definir el alcance de cada fase.

- En la **FASE I** se ha profundizado la problemática planteada y a su vez se acudió a especialistas que nos explicaron detalles y consejos para desarrollar la idea de proyecto
- En la **FASE II** se evaluaron posibles prototipos para el sistema y una vez seleccionado el mejor se procedió con la etapa de diseño y modelado.
- En la **FASE III** se estableció la topología de equipos a usar y a su vez se seleccionaron acorde a los requerimientos de nuestro sistema.

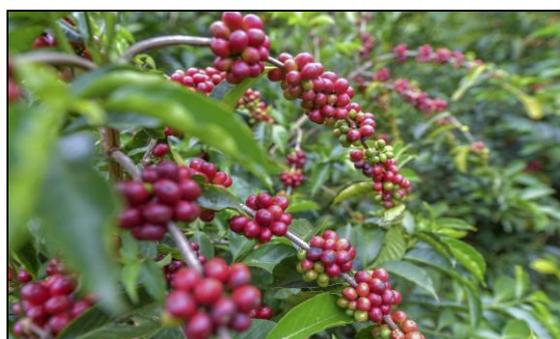
## 2.1. Fase de levantamiento de información

Para llevar a cabo esta etapa logramos contactarnos con la Hacienda Santa Gertrudis ubicada en Vilcabamba, provincia de Loja, donde se dedican al cultivo y procesamiento de café de alta especialidad. Su propietario, José Luis Eguiguren, nos explicó y detalló como en esta última década el poder reorientar su producción hacia los productos especializados lo ha llevado a poder exportar su café a lugares como: Dubái, Australia y Estados Unidos logrando sostener su empresa familiar y a su vez ser una fuente de generación de empleo [18].



**Figura 2.2.** Logo de hacienda Santa Gertrudis [Nota. Adaptado de “Hacienda Santa Gertrudis” [Fotografía], por @HSantaGertrudis, 2019, Facebook (<https://es-la.facebook.com/HSantaGertrudis>)]

En esta hacienda de aproximadamente 30 hectáreas se cultiva y cosecha café de altura, o denominado geisha, el cual después de un proceso de transformación personalizado a las necesidades del cliente final, es exportado al exterior en sacos para un posterior tostado y refinado. Este tipo de café tiene la particularidad de que el grano es muy especial, tanto en contextura como en su sabor, y por tanto se cotiza muy bien en el mercado. Su origen se remonta a los años 30 en un pueblo llamado Geisha, al sureste de Etiopía. Así mismo, la producción de este tipo de café en esta hacienda se da de forma ideal puesto que su calidad aumenta a medida que es cultivado a alturas elevadas [19].



**Figura 2.3.** Café de altura tipo geisha [Nota. Adaptado de “¿Ya probaste el café más caro del mundo?” [Fotografía], por Luis Acosta/AFP, 2020, National Geographic (<https://www.ngenespanol.com/gastronomia/ya-probaste-el-cafe-mas-carro-del-mundo/>)]

Con respecto al proceso de secado de los granos de café, esta hacienda posee una marquesina de aproximadamente 30x20 m<sup>2</sup> con cuatro camas africanas donde se seca café de tipo honey, lavado y natural.



**Figura 2.4. Camas africanas – Hacienda Santa Gertrudis**

Debido a que se dedican al cultivo y tratamiento de café especializado su propietario ha optado por ciertas herramientas tecnológicas que lo han ayudado a tener un registro de la temperatura y humedad tanto en el interior como en el exterior del secadero por medio de pequeñas centrales climáticas. Si bien no tienen ningún tipo de control, el poder visualizar las principales variables controlables les permite tomar acciones como abrir las puertas del secadero ante temperaturas muy elevadas o encender humidificadores en caso de existir excesiva humedad dentro del invernadero.



**Figura 2.5. Estaciones climáticas – Hacienda Santa Gertrudis**

Con respecto al movimiento del café José Luis nos supo manifestar que posee una persona únicamente para mover los granos durante todo el día. Sin embargo, esto le preocupa debido a que este procedimiento depende únicamente de esta persona y a su vez esto le genera un costo fijo durante el mes. Sumado a que no puede mantener un control sobre la persona y su responsabilidad asignada debido a otras tareas que realiza.



**Figura 2.6. Granos de café en secadero – Hacienda Santa Gertrudis**

Por otro lado, nos logramos contactar con el barista internacional de nacionalidad mexicana Dr. Manuel Diaz. Con cerca de 3 décadas dedicado a la investigación y desarrollo en nuevas tecnologías para la producción pre y post cosecha de café, el Dr. Diaz ha contribuido con sus estudios a importantes centros de investigación en el mundo como el CQI, Coffee Quality Institute, organización con alrededor de 18 países en el mundo y dedicada a optimizar la calidad del café y a su vez mejorar la calidad de vida de los pequeños y medianos productores [20].

En una pequeña reunión vía videoconferencia nos manifestó la importancia y consideraciones a tomar durante el proceso de secado del café sumado a importantes aportes a tomar para el desarrollo de nuestro proyecto.

Entre esos puntos importantes a destacar se encuentran los siguientes:

- El principio de secado consiste en la deshidratación sostenida de la semilla de café viva. Esto involucra una actividad metabólica dentro de la semilla con procesos de respiración acelerada y procesos de dominancia, mantener un control paulatino de estos procesos es la clave de un secado correcto.
- Un correcto secado se caracteriza por preservar la integridad de la semilla asegurando así la calidad sensorial del producto final. Cerca del 40% de los defectos en la cadena productiva del café se debe a la falta de limpieza y normas de aseo involucradas en esta. El contacto con el suelo, manipulación con superficies contaminadas y poco cuidado son factores que pueden llegar a generar fácilmente hongos en los granos de café.

### 2.1.1. Principios de un correcto proceso de secado

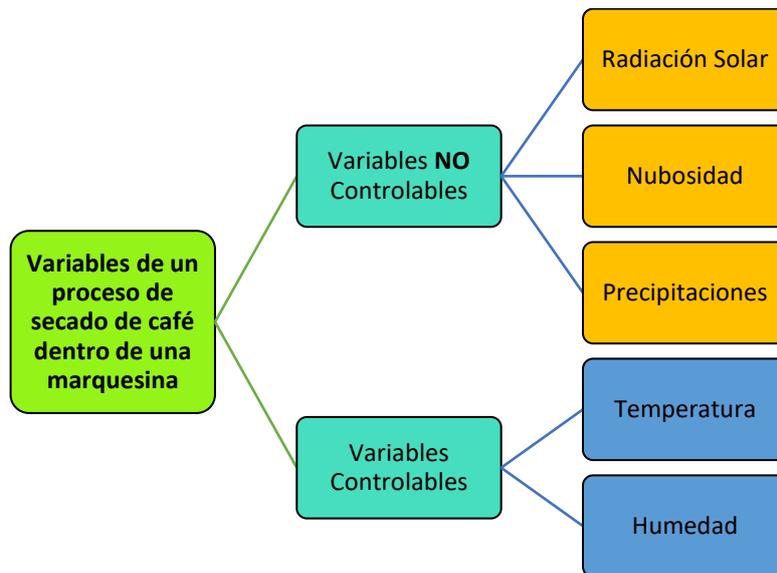
Junto con los actores mencionados anteriormente y con una investigación previa por parte de nosotros logramos debatir y aprender con los especialistas los principios fundamentales de un correcto proceso de secado de café.

El secado consiste en la pérdida de humedad de la semilla, misma que se realiza por medio de la transferencia de la humedad por capas	Altas temperaturas durante este proceso conllevan a excesivas tasas de deshidratación y por tanto se produce la muerte del embrión de la semilla	El factor clave es encontrar una curva de secado que cumpla con una presión superficial y una presión osmótica acorde al tipo de café a tratar
El secado de café NO es lineal, esta sujeto a varios procesos tanto externos como internos a la semilla	Acorde a investigaciones se debe dejar descansar el grano de café en las noches, para esto algunos caficultores suelen recoger el café y guardarlos en sacos	Tanto el inicio como el final del secado son las etapas claves y las mas problemáticas puesto que aquí se define en gran parte la calidad del producto final
Después de la fermentación y previo al secado siempre es bueno una etapa de descanso que consiste en el escurrimiento y oreado de los granos de café	No es bueno bajar del 11% de humedad del grano de café, el punto óptimo es de 11.5%. Mientras que, la temperatura ideal no debe sobrepasar los 35 grados	El índice de actividad de agua ideal es de 0.67, un grano con un índice mayor a 0.7 puede estar sujeto a contaminación mas fácilmente

**Figura 2.7. Principios fundamentales para un correcto secado de café**

### 2.1.2. Variables del proceso de secado

Dentro del proceso de secado podemos destacar dos grandes grupos de variables: no controlables y controlables. Agentes externos tales como la radiación solar, las precipitaciones, nubosidad, entre otros afectan de manera directa el secado natural del grano de café dentro de una marquesina y por tanto pueden ser catalogadas como variables no controlables. Sin embargo, dentro de este invernadero existen dos variables controlables que juegan un papel muy importante dentro del secado: la temperatura y la humedad.



**Figura 2.8.** Variables de un proceso de secado en una marquesina

Previo al secado del café, en la etapa de fermentación, la semilla del grano de café posee un porcentaje de humedad cercano al 50% y es aquí donde el secado juega un rol importante; puesto que, el objetivo es erradicar el nivel de agua dentro del embrión hasta alcanzar un nivel de humedad aproximado del 11%. Para lograr esto, la temperatura dentro de una marquesina en condiciones ideales no debería superar los 40° para garantizar un secado óptimo [21].

El monitoreo y control, tanto de la temperatura como de la humedad, durante el proceso garantiza un secado óptimo y acorde a un producto que cumpla una alta sensibilidad y calidad previo a la etapa de tostado. Un café especial de exportación se caracteriza por el cuidado en esta etapa logrando secar la semilla a un punto óptimo tal que conserve sus propiedades químicas y sensoriales.

### **2.1.3. Movimiento del grano de café**

Pese a que no viene a ser catalogado como una variable dentro del proceso de secado, el movimiento del grano de café juega un rol muy importante durante esta etapa. Dicho movimiento debe realizarse de forma cuidadosa y en determinados tiempos, mismos que son establecidos por el tipo de café cultivado y condicionados a su vez a la exposición solar a la cual está sujeta el grano.

Los primeros días de secado suelen ser lo más complejos dentro del cronograma establecido, puesto que, aquí los granos en general poseen un alto nivel de agua y se debe garantizar una pérdida de humedad controlada de forma natural para no perder las características sensoriales provenientes de la etapa de fermentación. Aquí el movimiento del grano de café es vital puesto que al mover la semilla constantemente y al entrar en contacto con la luz solar se produce dicha pérdida controlada de agua asegurando la uniformidad y homogeneidad en todos los granos del lote que está siendo secado [22].

En el secado de café honey el movimiento permite que la “miel” de la semilla no se concentre en la superficie del grano pudiendo ocasionar la formación de concentraciones pegajosas que pueden llegar a dañar lotes enteros. Para esto la mecánica del movimiento debe realizarse de extremo a extremo sobre toda la extensión de la superficie donde reposan los granos de café.

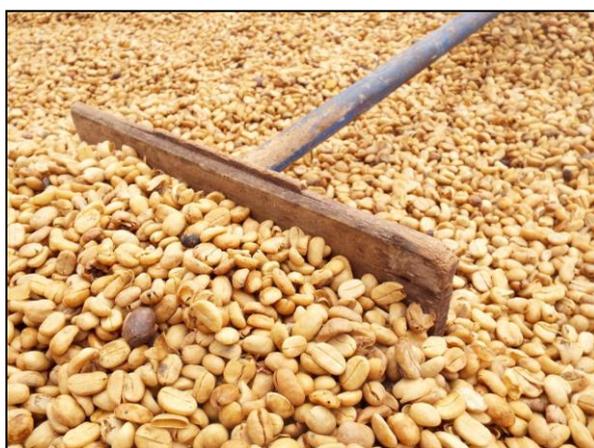
Por otro lado, para secar café lavado se debe tener sumo cuidado en no realizar movimientos bruscos que puedan romper el pergamino presente en los exteriores de la semilla. En dicho pergamino se concentran propiedades químicas que otorgan características sensoriales únicas a este tipo de café. La mecánica del movimiento para este tipo de café debe ser suave para evitar aplastar el grano que se encuentra suave debido a la alta cantidad de agua.

#### 2.1.4. Automatización de la mecánica del movimiento del café

Para mover el café durante el proceso de secado suelen emplearse rastrillos de madera con puntas no afiladas o a su vez rastrillos de madera o de plástico con puntas curvadas para mejorar la tracción del movimiento. Sin embargo, ambos instrumentos se encuentran sujetos a la intervención del personal humano para operarlos lo cual provoca dos inconvenientes: la recurrencia en la intervención de la persona y así mismo la fuerza con la que opera el rastrillo.

Este movimiento comúnmente se realiza de 4 a 5 veces en un día y con duración promedio aproximada de diez minutos. En términos ideales, el movimiento debería realizarse sobre toda la extensión no dejando ningún grano sin movimiento y con la debida fuerza uniforme por parte del operario [23]. No obstante, esto no se cumple provocando en algunos casos lotes con un porcentaje significativo de pérdidas que luego son sancionados económicamente.

El presente proyecto busca implementar un rastrillo automatizado para una cama africana dentro de una marquesina. Dicho sistema podrá ser configurado para operar de manera autónoma en determinadas franjas horarias y a ciertas velocidades de traslación. En otras palabras, la mecánica del movimiento puede ser configurada por el usuario o en su defecto se pueden seleccionar modos de operación previamente establecidos dependiendo el tipo de café a secar.



**Figura 2.9.** Rastrillo de madera en mal estado [Nota. Adaptado de “Los procesos de café: Lavado, Honey y Natural” [Fotografía], 2017, Animal Gourmet (<https://www.animalgourmet.com/2019/01/31/procesos-cafe-honey-natural/>)]

### 2.1.5. Estructura de una marquesina

La marquesina se caracteriza por ser un espacio físico con dimensiones aproximadas de  $10 \times 15 \text{ m}^2$  recubierto por un material plástico negro en su superficie externa para concentrar la radiación solar. Su esqueleto está compuesto de madera, caña o guadua y en estructuras más tecnificadas con bases de acero. Dicha constitución de materiales brinda un tiempo determinado de uso de entre a 5 a 10 años, debido a que se encuentran en constante exposición al ambiente.

Por lo general su longitud es basada en la cantidad de granos de café a secar y según lo planificado por el caficultor, una ventaja que tienen este tipo de estructuras es que pueden ser modificadas según se tenga la necesidad, ya sea en longitud o en amplitud, su punta es parabólica en su mayoría para que se genere una mejor absorción de la luminosidad solar. De igual manera que el secado manual o solar se necesita que se le dé movimiento al grano evitando que este se pegue a las camas africanas y asegurando así uniformidad de movimiento en toda la superficie. Para esto, suelen emplear rastrillos de madera o palas de plástico que terminan lastimando al grano ocasionando que la calidad del producto final se vea afectada.

Lo que se busca en este método es controlar la temperatura y la humedad dentro de la estructura, asegurando que el resultado sea entre el 10 y 12% de humedad, logrando que las variables mencionadas sean constantes mediante acción de ventiladores, sopladores (blowers) y/o humidificadores, ajenos al proceso y sin la necesidad de que el exterior afecte al interior del cuarto cerrado.



**Figura 2.10.** Marquesina para secado de café [Nota. Adaptado de “Marquesinas para un buen secado del café” [Fotografía], 2019, Swisscontact (<https://www.swisscontact.org/es/noticias/marquesinas-para-un-buen-secado-del-cafe>)]

## 2.2. Fase de diseño

Luego de conocer la importancia del movimiento del grano de café y su impacto durante el proceso de secado se procedió con la fase de diseño, tanto conceptual como estructural, de nuestro prototipo de un sistema para el movimiento del grano de café.

Para mantener un proceso ordenado se procedió a segmentar esta fase en cuatro etapas que nos permitieron analizar y filtrar cada posible solución con el fin de seleccionar la mejor alternativa.

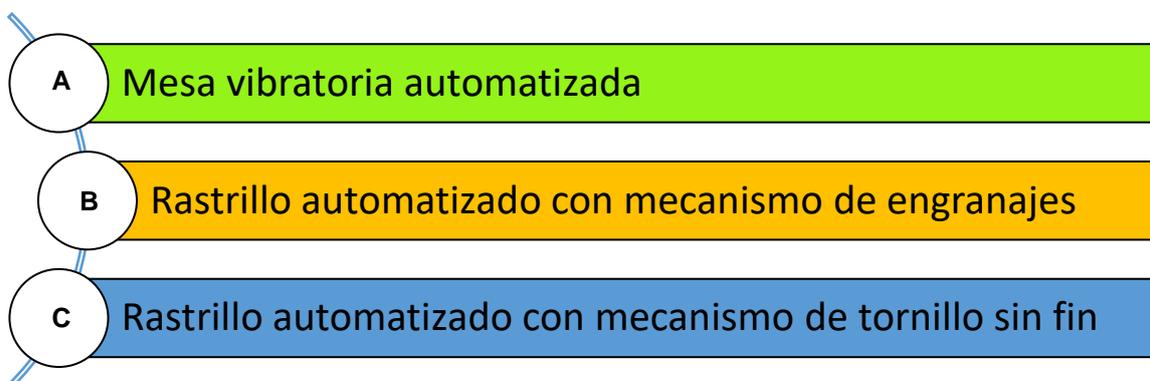


**Figura 2.11.** Etapas de planificación para selección de prototipo

Una vez evaluadas las posibles soluciones bajo criterios de selección establecidos se escogió un sistema con potencial aplicación donde se procedió a definir la estrategia de solución para seguir con la siguiente fase.

### 2.2.1. Posibles soluciones

Para la selección del prototipo final se evaluaron tres posibles soluciones las cuales se detallan a continuación:



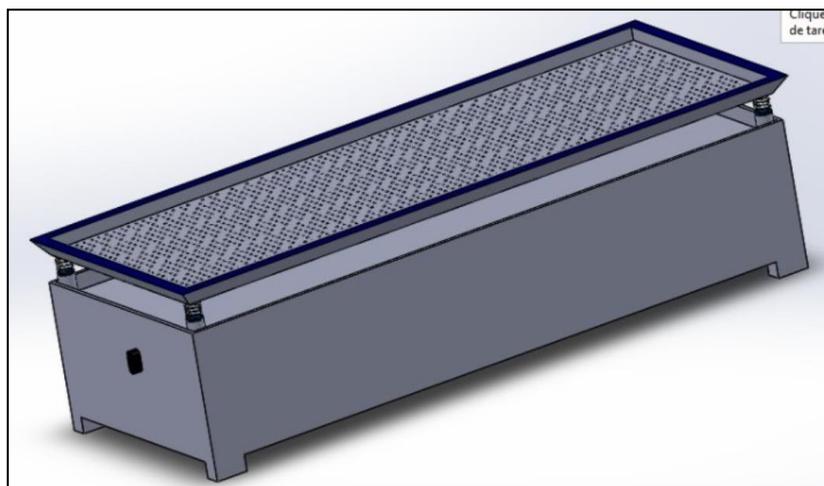
**Figura 2.12.** Posibles soluciones para el prototipo

Empleando el software de modelado mecánico “SolidWorks” se diseñó un prototipo de cada posible solución ayudando así la visualización para la decisión de cual mecanismo se adapta mejor a nuestra idea.

### 2.2.1.1. Mesa vibratoria automatizada

Nuestra primera opción fue emplear una mesa vibratoria para el movimiento del café durante el proceso de secado. El objetivo de este sistema es provocar un pequeño movimiento oscilatorio en los granos e inclusive poder inyectar aire por debajo de las mallas de la cama africana con la finalidad de mantener fresco el producto.

El diseño estructural realizado en SolidWorks se muestra a continuación:



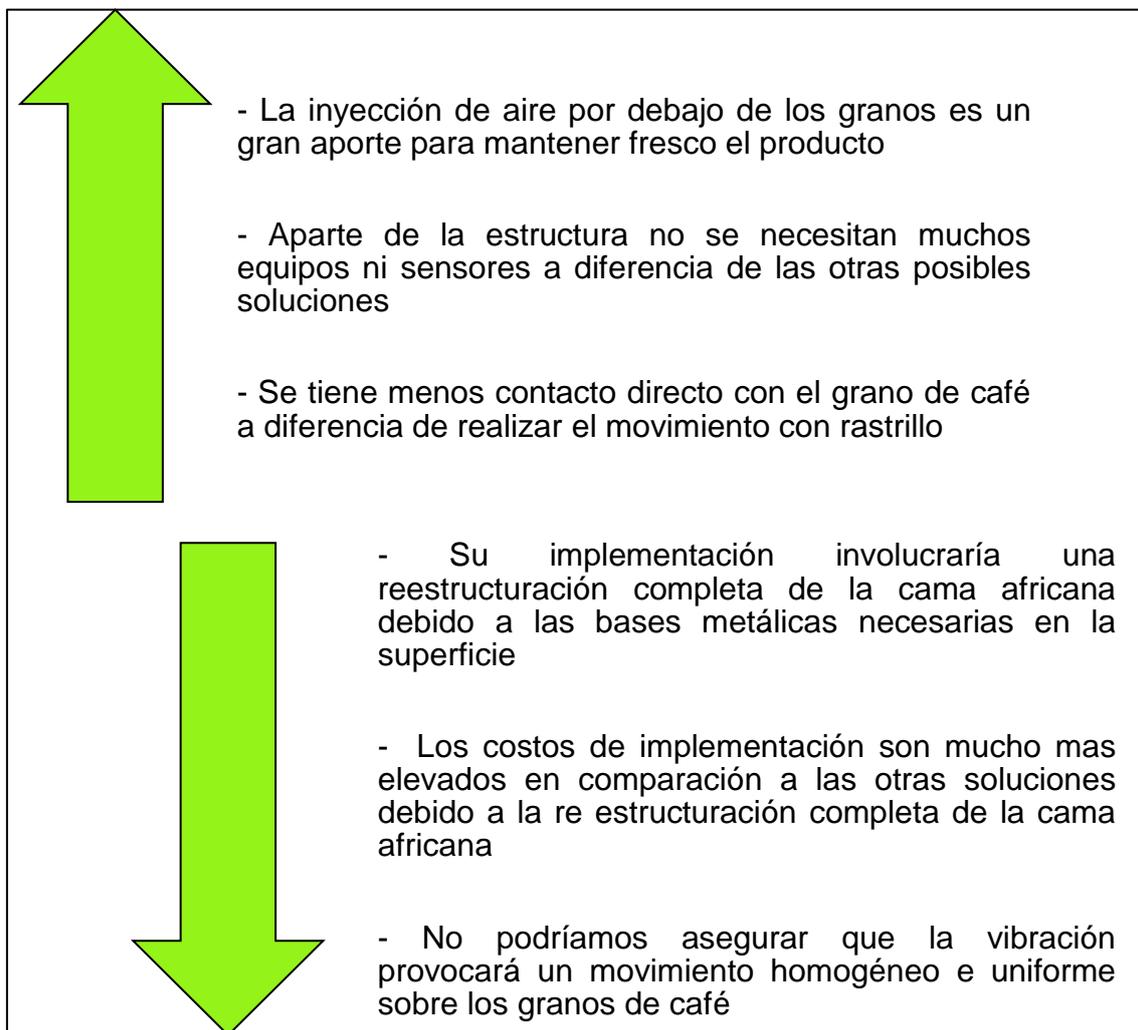
**Figura 2.13.** Mesa vibratoria para el movimiento del grano de café

Bajo este prototipo es necesario una reestructuración de la cama africana puesto que se necesita una base superficial de acero lo suficientemente rígida para soportar la vibración. Dado esto, la actual estructura de madera no sería útil y se requiere la construcción de tanto la mesa como de las bases y el soporte de esta.

El principio de funcionamiento se basa en un motor de vibración acoplado en la parte baja de la mesa lo cual provoca un movimiento oscilatorio que con la ayuda de resortes acoplados en los extremos de la superficie provocan que se origine el movimiento en la estructura.

Por otro lado, el poder inyectar aire por debajo de la mesa al mismo tiempo que se produce el movimiento lograría mantener los granos de café frescos y evitando sobrecalentamientos no deseados en la superficie externa de los granos de café. Para lograr esto, se deberá instalar un sistema de válvulas por debajo de la mesa y conectadas a una central de aire externa por medio de una bomba. Dicho sistema de inyección de aire deberá estar sincronizada para ser encendida al mismo tiempo de la acción de vibración en la mesa.

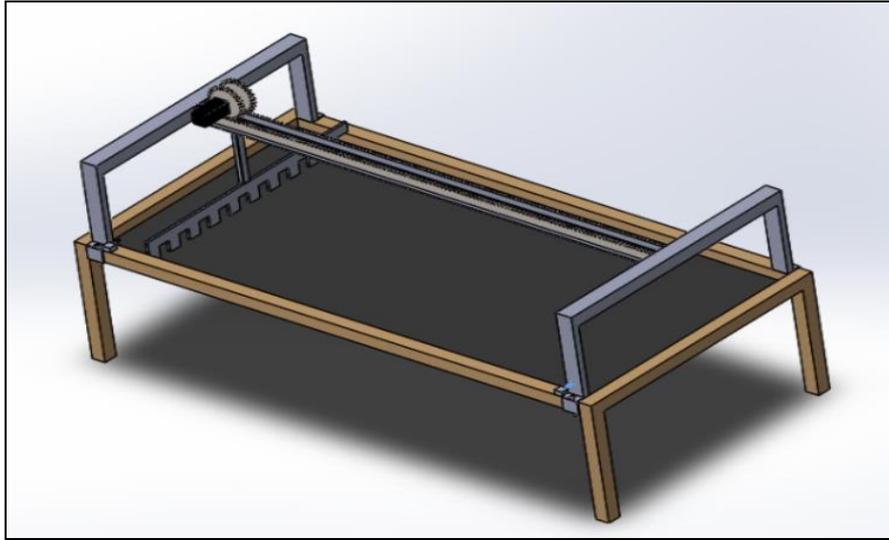
A continuación, se enlistan las ventajas y desventajas de una posible aplicación de esta primera opción.



**Figura 2.14. Ventajas y desventajas – Posible solución A**

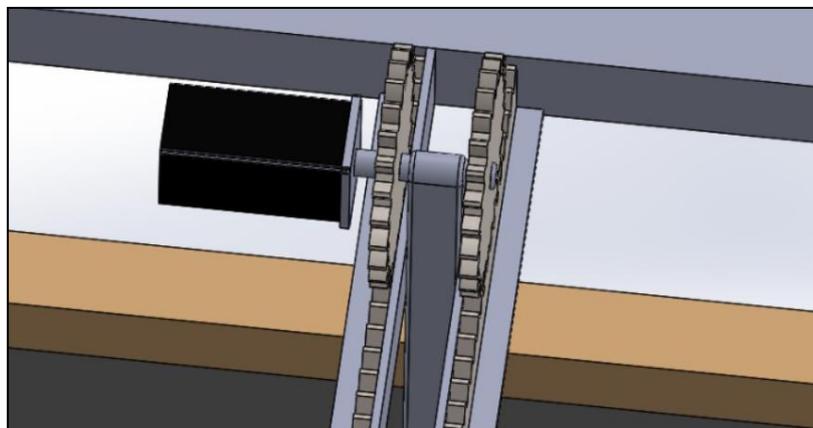
### 2.2.1.2. Rastrillo automatizado con mecanismo de engranajes

Como segunda opción se consideró utilizar un mecanismo de un rastrillo electromecánico que pueda ser controlado y configurable por el usuario con el propósito de mover el café en toda la extensión de la cama africana. Para lograr mover el rastrillo se emplearía un sistema de engranajes con cadenas de extremo a extremo similar al prototipo mostrado a continuación:



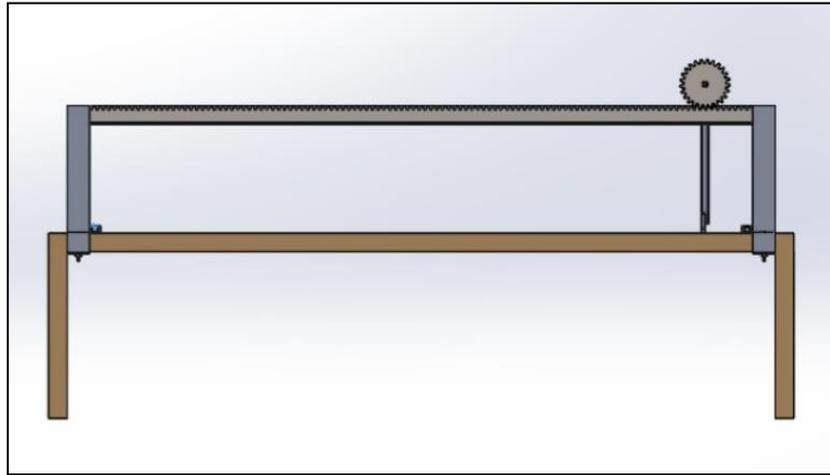
**Figura 2.15.** Rastrillo automatizado con mecanismo de engranajes

El sistema posee un motor acoplado en el eje del engranaje central con el cual se produce la traslación sobre la mesa. La extensión, tanto en longitud como en anchura, de las barras que montan la superficie depende de las dimensiones de la cama africana.



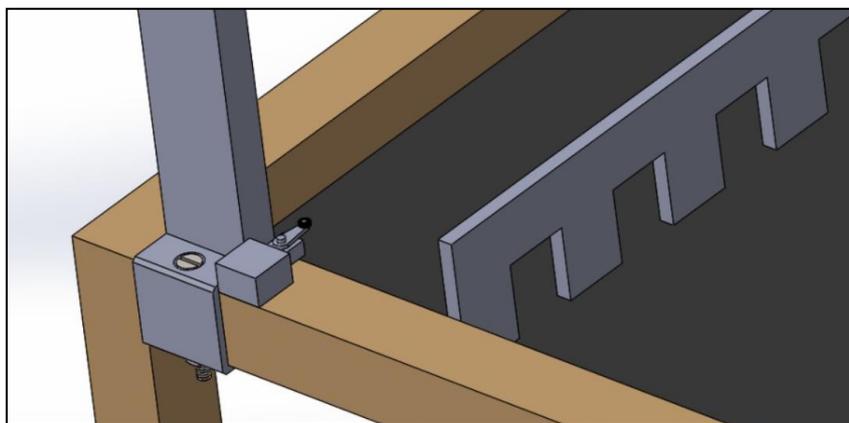
**Figura 2.16.** Motor acoplado a engranaje central

El movimiento se da sobre una base rectangular dentada donde el engranaje principal rota produciendo la mecánica del movimiento. Cabe destacar que dicho movimiento debe ser suave y controlado; puesto que, se debe priorizar preservar la integridad del grano de café. Por otro lado, tanto el diámetro del disco motriz principal como el de la base dentada, son calculadas dependiendo del par mecánico requerido y de la potencia demandada por el motor.



**Figura 2.17. Vista lateral – Sistema de engranajes**

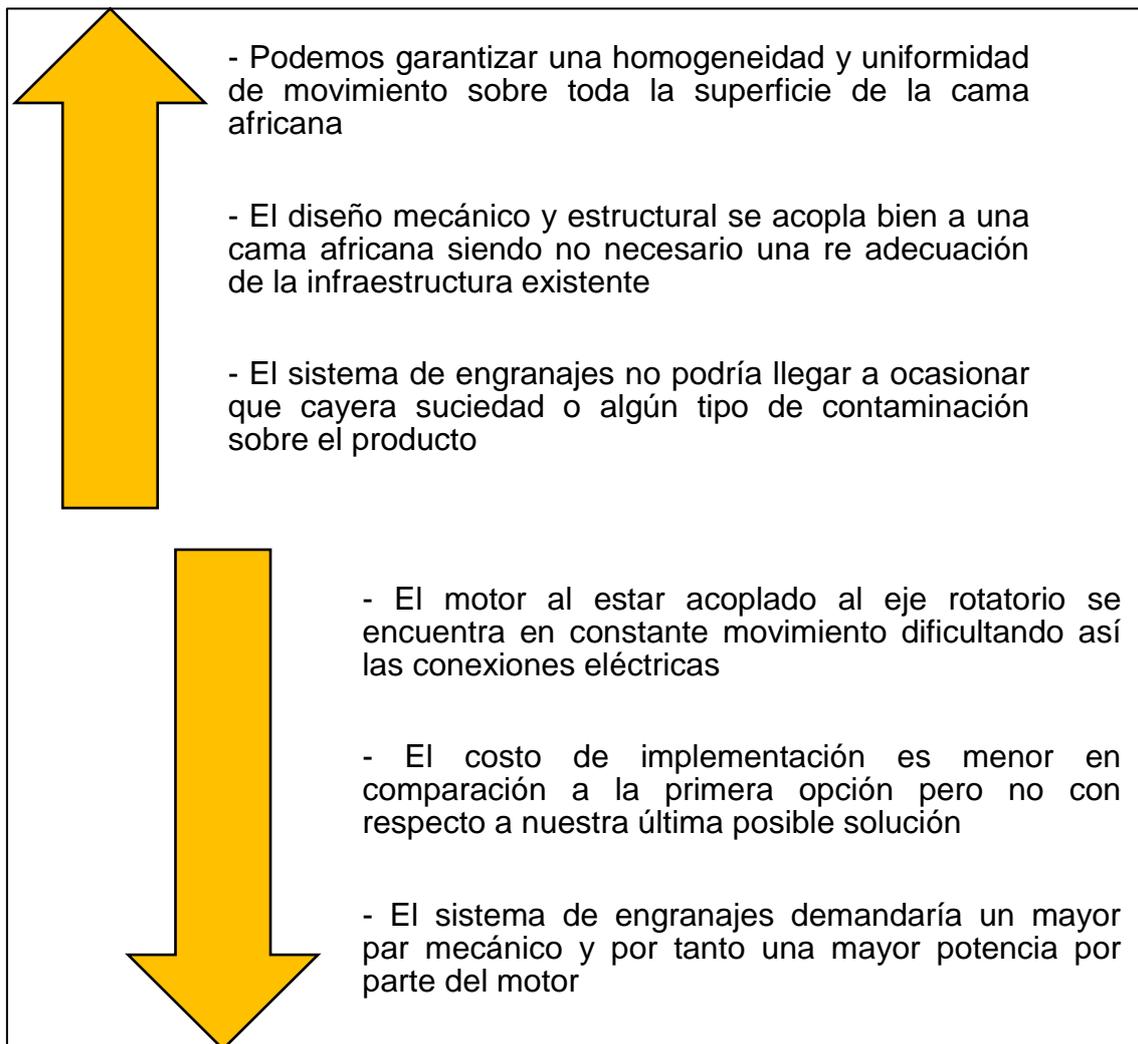
Así mismo en cada extremo de la mesa se ubican sensores finales de carrera con los cuales el rastrillo retornaría produciendo así un movimiento continuo de extremo a extremo. Dichas señales eléctricas serán enviadas al sistema de control con el que contará el equipo y provocará el cambio de sentido de giro del motor.



**Figura 2.18. Sensor final de carrera y rastrillo automatizado**

Finalmente resaltar que el desplazamiento del rastrillo sobre los granos de café se deberá realizar de forma paulatina y con sumo cuidado puesto que el objetivo de este sistema es garantizar la integridad de la semilla. Adicional a que el material de fabricación del rastrillo deberá ser resistente al agua, polvo e inclusive resistente a la exposición solar para evitar que se generen hongos en el material que puedan llegar a contaminar el producto final.

Entre las principales ventajas y desventajas de una posible aplicación de esta segunda opción podemos destacar:



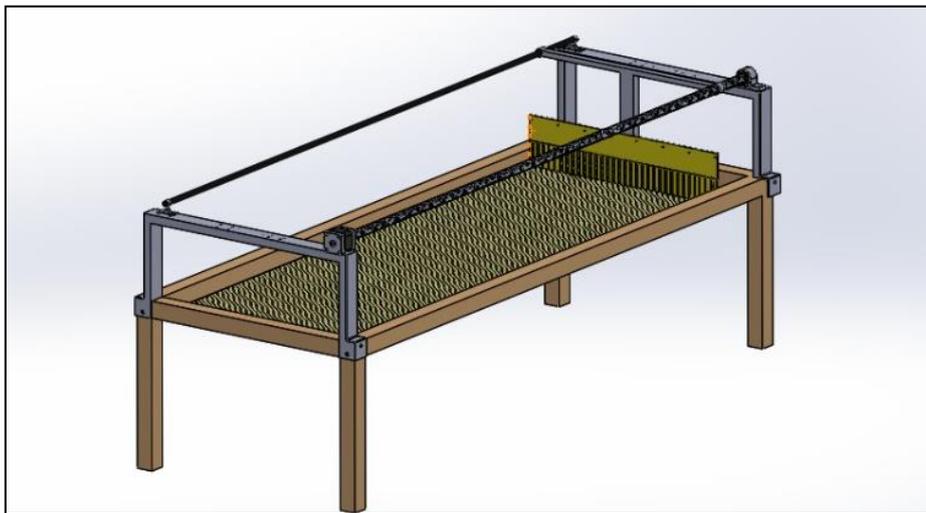
**Figura 2.19. Ventajas y desventajas – Posible solución B**

### 2.2.1.3. Rastrillo automatizado con mecanismo de tornillo sin fin

Como última posible solución se tomó el concepto del rastrillo automatizado de la segunda solución, pero cambiando su mecanismo de movimiento. Para esto, el diseño consistió de un tornillo sin fin acoplado al eje del motor logrando así mantener estático el equipo y a su vez permitiendo un desplazamiento mucho más sencillo a comparación de la segunda posible solución.

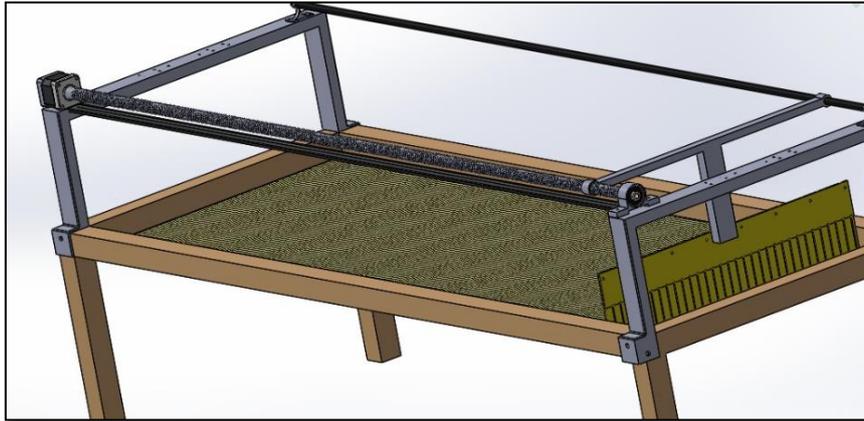
El tornillo sin fin forma parte de un sistema de transmisión mecánica que se acopla al eje del motor provocando así el movimiento longitudinal del rastrillo a lo largo del tornillo. Para esto se emplean dos barras equidistantes y paralelas al tornillo que sirven para dar estabilidad al sistema.

A continuación, se muestra el prototipo diseñado para esta posible solución:



**Figura 2.20.** Rastrillo automatizado con mecanismo de tornillo sin fin

Con una estructura bastante similar a la segunda posible solución, este prototipo emplea el mecanismo del tornillo sin fin para lograr el movimiento del rastrillo de extremo a extremo. Una gran ventaja que este sistema posee es el lograr tener el motor en una posición fija y a su vez, la transmisión del movimiento por medio del tornillo sin fin es mucho más sencilla de implementar a comparación del sistema de engranajes.



**Figura 2.21. Motor acoplado a base lateral del sistema**

Por otro lado, la mecánica del movimiento debido a la aplicación de un tornillo sin fin se torna más suave, silenciosa y nos ofrece una dinámica precisa para nuestro rastrillo [24]. Cabe destacar que este prototipo también cuenta con los sensores de final de carrera en los extremos de la cama africana para invertir el sentido de giro del motor y así provocar el retorno del rastrillo.

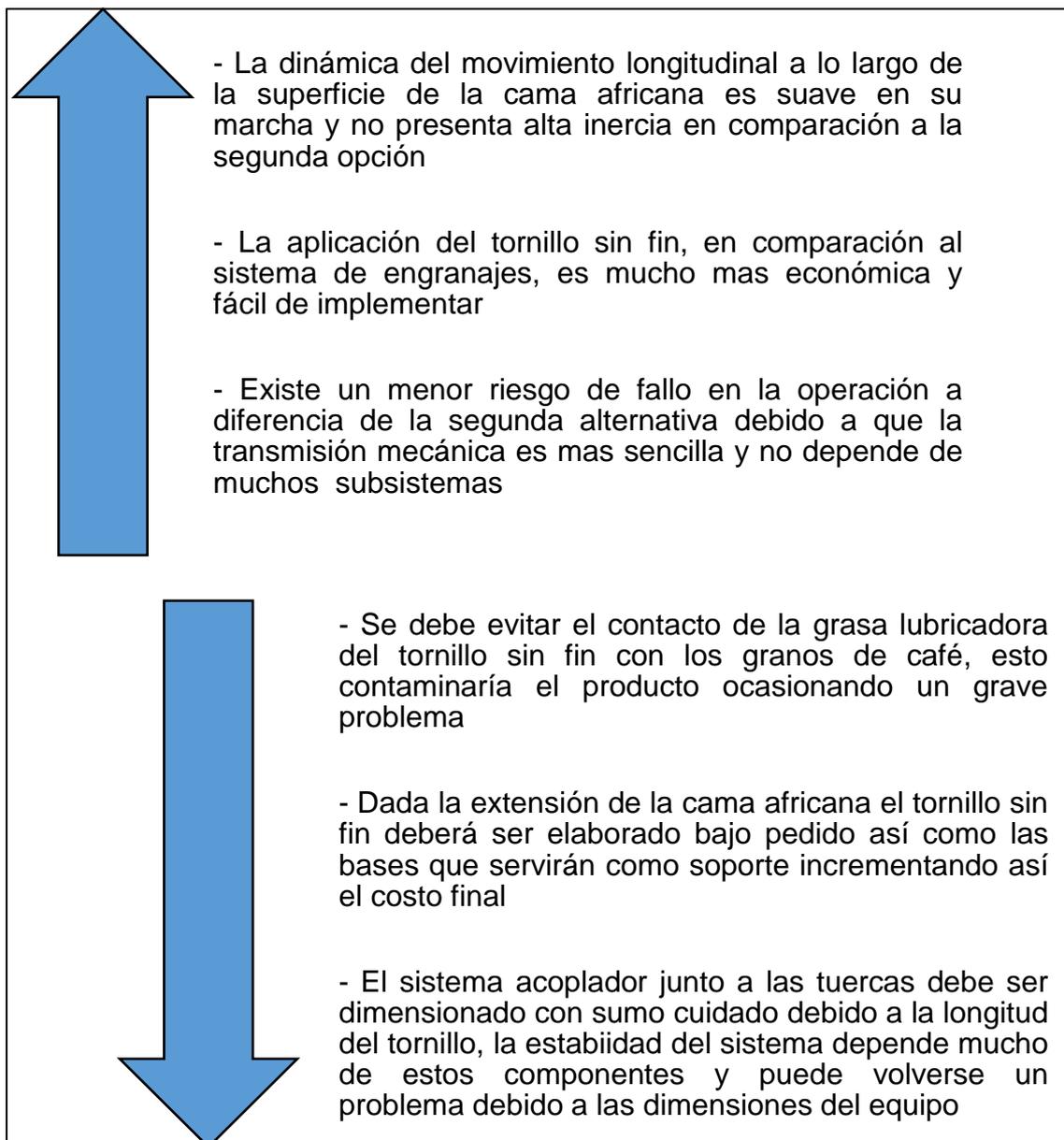


**Figura 2.22. Vista lateral – Sistema de tornillo sin fin**

Así mismo es importante resaltar que un potencial riesgo de esta aplicación está en la grasa lubricante necesaria para el funcionamiento del tornillo sin fin. Esta sustancia viscosa garantiza una traslación suave del tornillo y al mismo tiempo alarga la vida útil del mismo; sin embargo, el problema radica en que esta grasa no puede entrar en contacto con los granos de café provocando así un alto riesgo de contaminación.

Cabe destacar también que entre el eje del motor y el tornillo sin fin se requiere de un sistema acoplador el cual debe ser dimensionado acorde el diámetro del tornillo y del motor. Dicho sistema mecánico consta de un juego de tuercas y rodamientos de acero que permiten asegurar la transmisión mecánica entre el motor y el tornillo sin fin provocando la traslación de este.

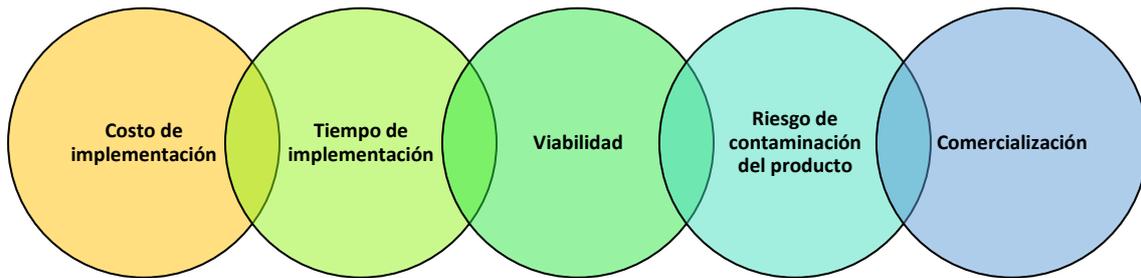
Finalmente se describen las ventajas y desventajas de una posible aplicación de este prototipo:



**Figura 2.23. Ventajas y desventajas – Posible solución C**

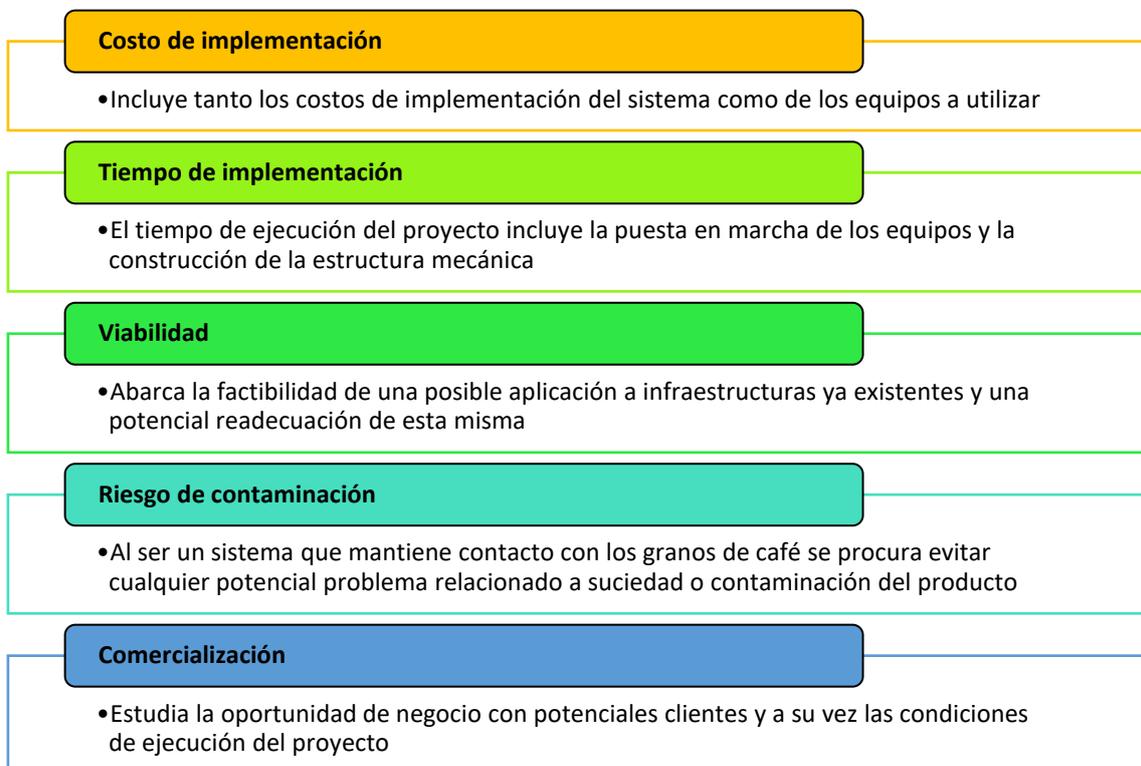
### 2.2.2. Criterio de selección

Una vez evaluadas las eventuales ventajas y desventajas de cada una de las posibles soluciones se definieron cinco criterios de selección que nos ayudaron a filtrar las alternativas para la siguiente etapa. Dichos criterios fueron seleccionados con la ayuda de nuestros colaboradores priorizando sus necesidades y posibles restricciones que puedan presentarse en el camino.



**Figura 2.24. Criterios de selección de mejor alternativa**

Tal como se describe en la gráfica adjunta, estos cinco criterios fueron la base para la toma de nuestra decisión en la etapa de análisis de alternativas. A continuación, se describen brevemente:



**Figura 2.25. Descripción de criterios de selección**

### 2.2.3. Análisis de alternativas

En esta etapa se contrastaron las tres posibles soluciones ante los cinco criterios previamente establecidos. Para esto empleamos una herramienta de calidad denominada matriz de selección de alternativas, o llamada también matriz de priorización [25].

Esta herramienta con enfoque de análisis multicriterio analiza cada alternativa con los criterios bajo calificaciones sean cuantitativas o cualitativas. Para este caso hemos empleado calificaciones cuantitativas con el propósito de tener una sumatoria total y al final tener una idea clara de cual solución se acopla mejor a las necesidades del usuario final.

Por último y no menos importante se destaca que los cinco criterios de selección establecidos tienen un mismo peso ponderado; puesto que, bajo nuestra visión y la de nuestros colaboradores son los aspectos claves a considerar para el desarrollo de nuestro proyecto.

#### 2.2.3.1. Matriz de selección de alternativas

Empleando una matriz de selección de alternativas utilizamos indicadores numéricos para simular una tabla de puntuación con la cual se pudo evaluar cuantitativamente cada posible solución y a su vez tener una referencia para la selección de nuestro prototipo final. Cabe destacar que la calificación asignada a cada posible solución fue contrastada tanto por nosotros como por nuestros colaboradores.



**Figura 2.26.** Puntuación para evaluación de posibles soluciones

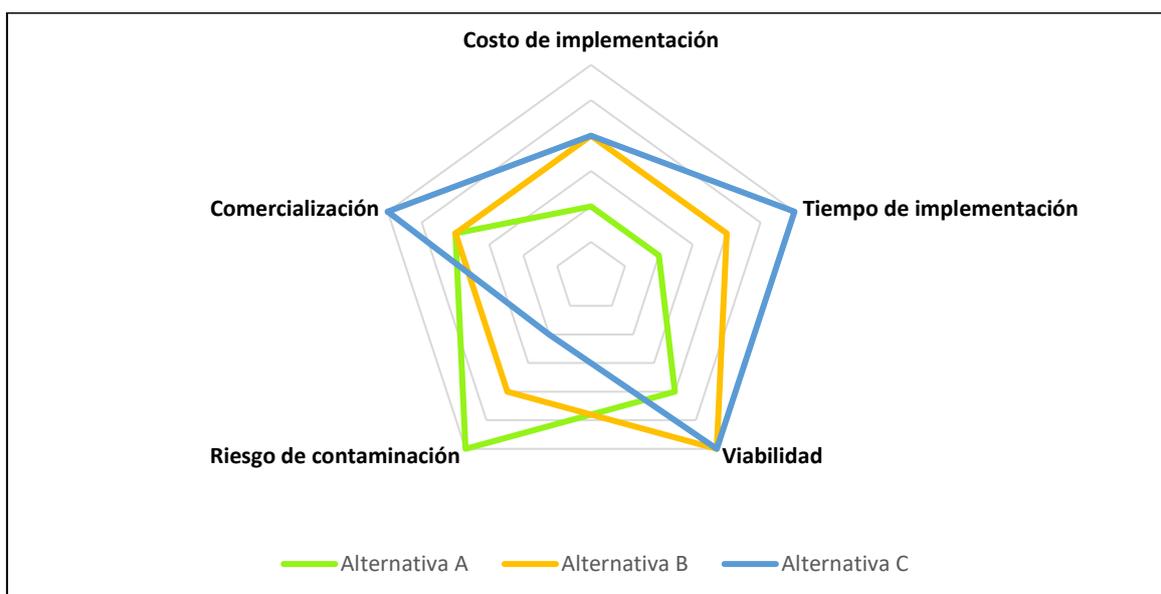
La matriz de selección de alternativas quedó de la siguiente manera:

CRITERIO	ALTERNATIVAS		
	A	B	C
Costo de implementación	1	2	2
Tiempo de implementación	1	2	3
Viabilidad	2	3	3
Riesgo de contaminación	3	2	1
Comercialización	2	2	3
<b>TOTAL</b>	<b>9</b>	<b>11</b>	<b>12</b>

**Tabla 2.1.** Matriz de selección de alternativas

Acorde a nuestra matriz de selección de alternativas y con una puntuación total de **12** puntos la opción **C** “rastrillo automatizado con mecanismo de tornillo sin fin” es considerada la mejor opción bajo los criterios previamente establecidos. Junto a nuestros colaboradores hemos seleccionado dicha opción como nuestro prototipo base para iniciar con la selección de equipos y posterior dimensionamiento de la estructura.

Con esto se pudo construir un gráfico radial para poder visualizar la correlación existente entre cada alternativa con los criterios ya planteados.

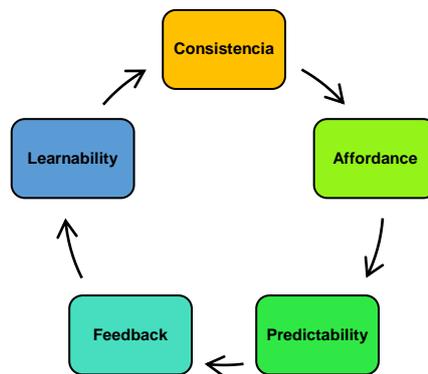


**Figura 2.27.** Gráfico radial con evaluación de alternativas

## 2.2.4. Definición de estrategia

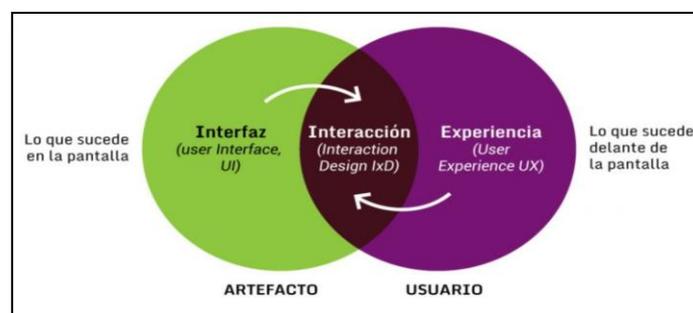
Acorde a la evaluación de las alternativas, análisis de ventajas y desventajas y bajo los criterios de selección establecidos optamos por diseñar nuestro sistema de movimiento de los granos de café bajo la tercera alternativa: rastrillo automatizado con mecanismo de tornillo sin fin.

Para esto hemos empleado los cinco principios de diseño UX (User Experience) para el prototipado de nuestro sistema tanto en su estructura como en la topología y programación de los equipos [26].



**Figura 2.28.** Principios de diseño UX

Estos principios de diseño estratégico tienen como propósito crear valor en un producto o servicio con el propósito de que los usuarios puedan sentirse atraídos a consumirlo. Aquí no solo se evalúa el aspecto visual del producto o sistema, sino que también se establecen directrices para brindarle al cliente la mejor experiencia de usuario tanto en cómo se ve, como funciona y como se siente utilizar el producto.



**Figura 2.29.** Relación entre artefacto y usuario bajo diseño UX [Nota. Adaptado de "UI, UX, IxD: ¿Cuál es la diferencia? [Fotografía], 2014, Kambrica (<https://www.kambrica.com/ui-ux-ixd-cual-es-la-diferencia/>)]

A continuación, una breve explicación de cada principio de diseño junto a la solución planteada por nosotros:

PRINCIPIO	DEFINICIÓN	SOLUCIÓN
<b>Consistencia</b>	Se basa en que todos los elementos de un conjunto cumplen su función asignada y al mismo tiempo pueden acoplarse a los requerimientos o funcionalidades que otro componente requiera de este	Bajo una topología de equipos bien estructurada y con una lógica de programación ordenada se asignan las funciones a cada uno de los equipos y se definen las relaciones entre ellos
<b>Capacidad (Affordance)</b>	Trata acerca de la intuición que el producto o sistema puede ofrecerle al usuario mejorando así la experiencia al utilizarlo	Todo el cableado será estructurado en un panel de control/fuerza y el sistema será operado bajo una interfaz HMI con una lógica ordenada e intuitiva para el usuario final
<b>Previsibilidad (Predictability)</b>	Se relaciona con la claridad y lógica que tiene el producto para ser operado por el usuario	El usuario dispondrá de dos modos de operación los cuales siguen un flujograma de decisiones acorde a las acciones que el usuario disponga tomar empleando la interfaz HMI
<b>Retroalimentación (Feedback)</b>	El producto debe ofrecer una razón del porque suceden las cosas o a su vez alertar sobre la toma de decisiones por parte del usuario	La programación de los equipos está orientada para seguir una secuencia ordenada de pasos dependiendo la selección del usuario. En caso de retroceder o salir al menú principal toda acción previa queda anulada y se vuelve a inicializar el sistema desde cero
<b>Capacidad de Aprendizaje (Learnability)</b>	El usuario debe tener la capacidad de conocer las funcionalidades del sistema y poder manipularlo bajo una curva de aprendizaje rápida y sin muchas dificultades	La mecánica del movimiento es sencilla y el usuario bajo la interfaz HMI deberá establecer el modo de operación e ingresar los parámetros de funcionamiento. Para esto se tiene un manual guía de usuario y a su vez una asistencia constante para los operarios del sistema

**Tabla 2.2. Principios de diseño aplicados al proyecto**

### 2.2.4.1. Flujo de proceso de elaboración del prototipo

Para proceder con el prototipado se consideró la selección de materiales, la adaptabilidad del sistema a infraestructuras ya existentes y la topología de equipos que se va a considerar junto al seleccionamiento respectivo.

A continuación, se describen las etapas que se consideraron para la elaboración del prototipo:

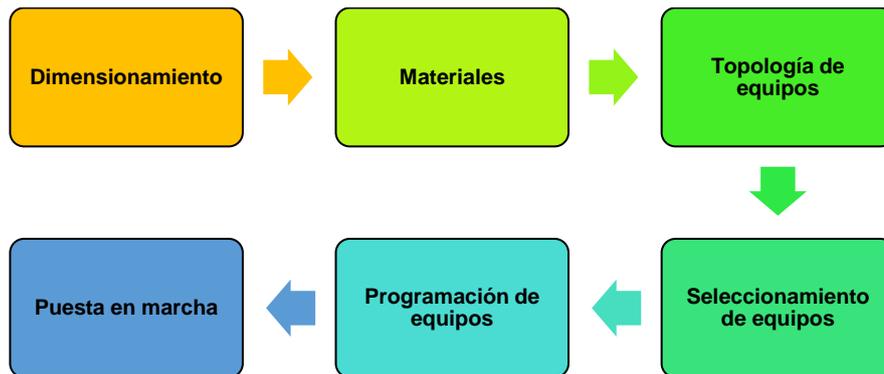


Figura 2.30. Flujo de proceso para elaboración del prototipo

### 2.2.4.2. Dimensionamiento del mecanismo de movimiento

Para esta etapa hemos tomado como referencia una cama africana promedio de una marquesina. La imagen adjunta pertenece a la hacienda Santa Gertrudis con una longitud aproximada de 4 metros.



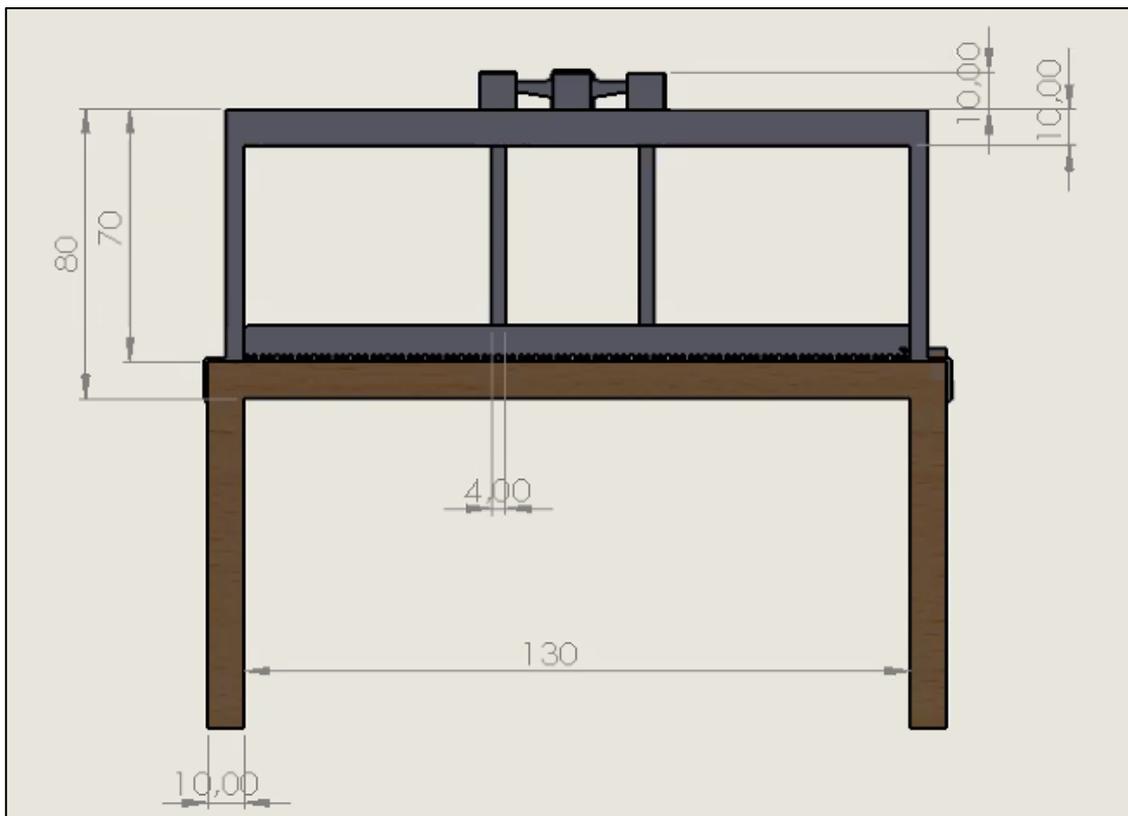
Figura 2.31. Cama africana – Hacienda Santa Gertrudis

Las dimensiones aproximadas que se han considerado como base para el dimensionamiento de nuestro equipo se describen en la siguiente tabla:

Dimensión promedio de una cama africana	
Largo	4 metros
Ancho	1.5 metros
Profundidad	0.10 metros
Altura	1 metro

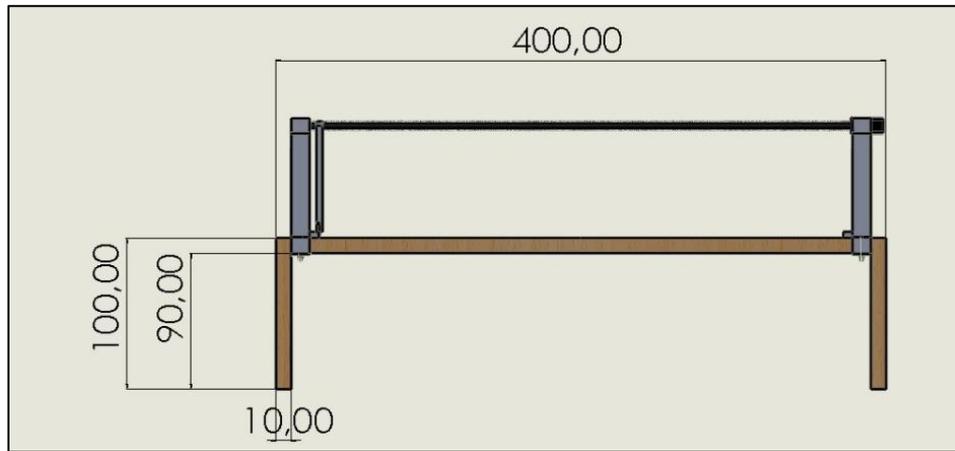
**Tabla 2.3.** Medidas tomadas como referencia para dimensionamiento

En la vista frontal del mecanismo se procedió a dimensionar el espesor de la estructura encargada del movimiento con un ancho de 1.50m. Así mismo, la altura de este mecanismo es de 70cm desde la base de la mesa. Por otro lado, las dos barras paralelas del rastrillo que se acoplan a la pista superior de apoyo tendrán un ancho aproximado de 4cm siendo equidistantes entre sí.



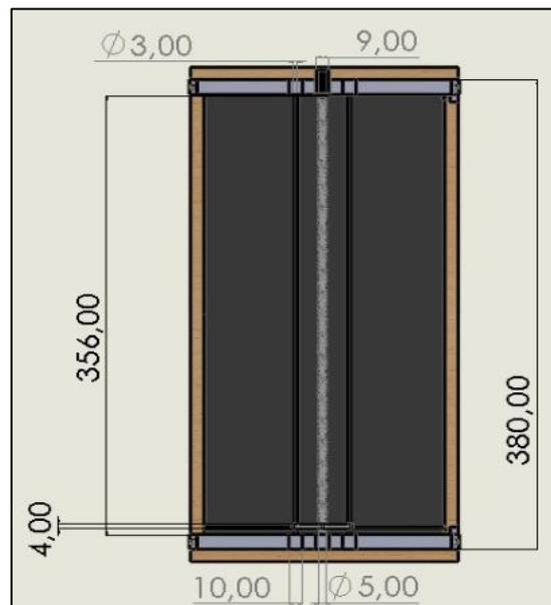
**Figura 2.32.** Vista frontal – Prototipo de la estructura

Con una vista lateral se puede observar la base de 1m de altura del piso a la mesa y con un largo aproximado de 4m. Sobre la superficie de la mesa esta la estructura metálica donde se coloca la malla sarán y donde reposan los granos de café.



**Figura 2.33.** Vista lateral – Prototipo de la estructura

Finalmente, por medio de una vista superior se puede observar que el tamaño de la malla sarán es de 3,80 metros y la distancia entre los soportes es de 3,56 metros, de igual manera se presentan el tamaño del motor, el diámetro del tornillo sin fin de 5 cm, para finalmente observar los 10 centímetros de dos barras de aluminio para soporte del rastrillo.



**Figura 2.34.** Vista superior – Prototipo de la estructura

### 2.2.4.3. Materiales

La estructura completa cuenta con una malla sarán encima de la base en la cual se colocarán los granos de café, este tipo de material evita el daño tanto en la corteza del grano como en la naturaleza química que este pudiera sufrir ante el contacto con algún otro agente externo presente en la cama africana. Así mismo esta malla poli sombra garantiza indicadores de calidad que se exigen bajo normas de calidad enfocadas en las buenas prácticas para el procesamiento de los granos de café [27].



**Figura 2.35.** Malla sarán para secado de café [Nota. Adaptado de “Proceso de secado bajo sombra” [Fotografía], por Luis Ramón Obregón, 2016, Revista El Cafetalero (<http://www.revistaelcafetalero.com/proceso-de-secado-bajo-sombra.html>)]

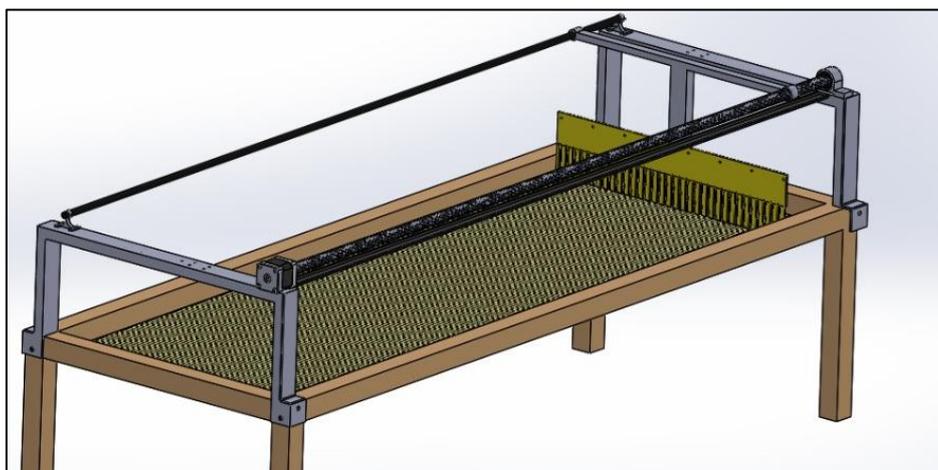
El rastrillo será de un plástico tipo polietileno en vista de que dicho material cuenta con una gran resistencia a altas y bajas temperaturas, a la abrasión, al impacto y desgaste; además de la propiedad de flexibilidad la cual ayudará a no dañar la superficie del grano al momento de pasar sobre estos mientras ocurre el movimiento [28].

La estructura metálica está en su mayoría compuesta por aluminio, debido a la alta resistividad con la que cuenta respecto al peso ejercido sobre ella, entre sus características químicas más importantes se encuentra la alta resistencia a la corrosión tanto por agua, aire y productos químicos en general logrando que pueda mantenerse intacta al pasar los años [29]. El peso que esta estructura ejercerá sobre la mesa evitará cualquier problema con el daño de la base, ocasionando que toda su implementación sea más barata y eficiente que algún otro material como el acero.

La inclusión de materiales como la madera y el acero, harían que la estructura se vuelva robusta y financieramente inviable, en el caso de la madera puede que la misma no perdure tanto tiempo como el deseado teniendo que cambiar de estructura cada vez que la misma sufra daños inesperados. Por otro lado, el acero es utilizado de manera industrial o estructuras en la construcción, en este caso tenemos la necesidad de que la estructura sea sólida y se puede lograr con el aluminio, quedándonos dentro del presupuesto y cumpliendo de manera adecuada con la viabilidad del proyecto.

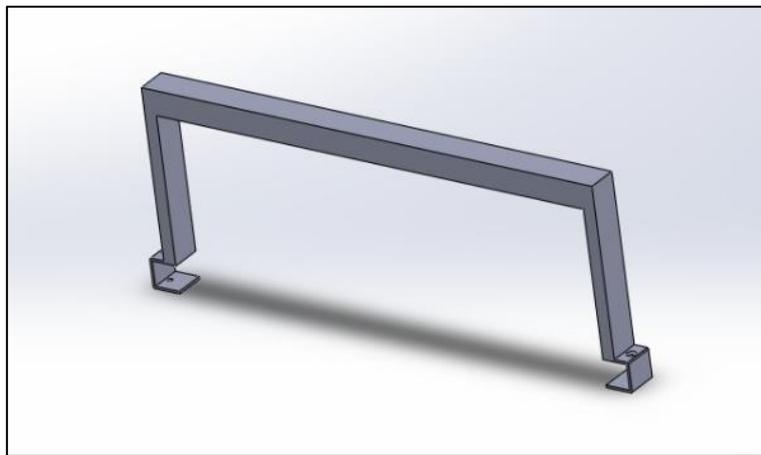
La estructura completa del prototipo está dividida en cuatro partes; la primera parte es la base o también llamada mesa, cuyo material dominante es la madera, el grano de café se localizará en una malla sarán que se encontrará acoplada a la base. La segunda parte es la estructura metálica la cual se encuentra encima de la mesa, esta armazón estará hecha de aluminio; la tercera parte incluye el movimiento formado por el rastrillo y su eje de acoplamiento, el primero mencionado será de plástico y el segundo estará constituido en su totalidad por acero; teniendo como última parte la red de sensores de finales de curso colocados en las extremidades de la mesa para indicar cuando el rastrillo termina su trayectoria.

Se observa la estructura completa con la base, la estructura metálica, la parte mecánica y los sensores finales de curso, logrando un resultado integral, automatizado y eficiente.



**Figura 2.36. Prototipo de rastrillo automatizado**

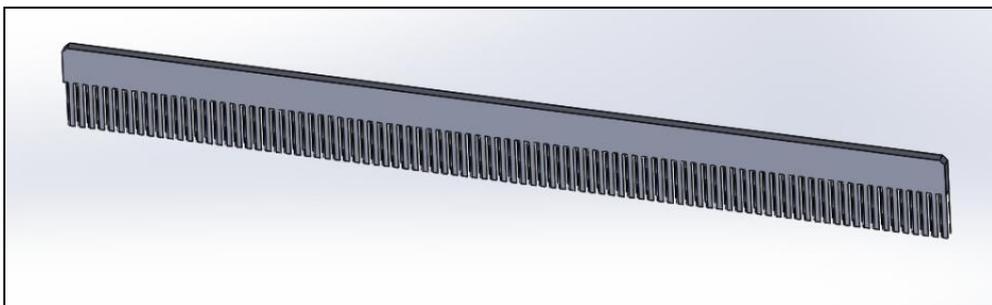
Se observa la estructura metálica sobre la cual se colocarán las barras paralelas que sirven como soporte para el tornillo sin fin y a su vez del rastrillo. Cabe destacar que esta estructura que sirve como soporte debe acoplarse a la cama africana de tal manera que garantice el peso y al mismo tiempo ofrezca la estabilidad para la dinámica del movimiento del tornillo sin fin.



**Figura 2.37. Soporte para bases del rastrillo automatizado**

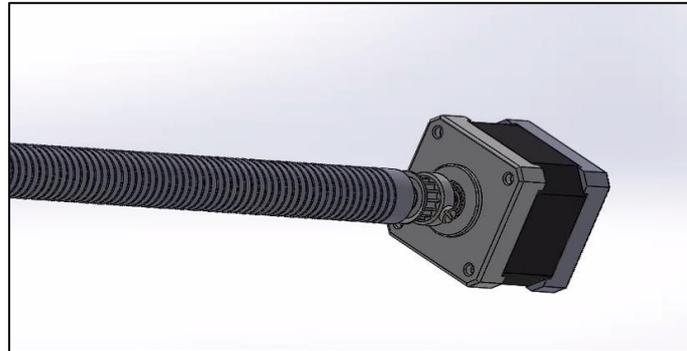
El rastrillo será de plástico y con puntas curvadas para no provocar un movimiento brusco sobre el producto. El contacto entre el rastrillo y el grano de café deberá darse de forma suave y al mismo tiempo debe garantizar la uniformidad y homogeneidad de movimiento sobre toda la superficie de la mesa.

Cabe destacar que la longitud del rastrillo depende de la extensión de la cama africana en la cual operará; así mismo, la velocidad de movimiento será parametrizada para ofrecer al usuario valores límites y no poner en riesgo tanto la funcionalidad del sistema como la integridad de los granos de café.



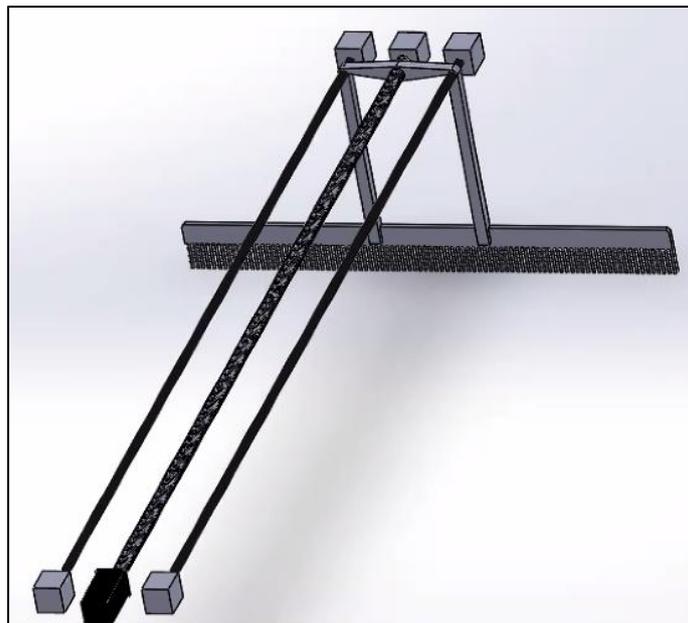
**Figura 2.38. Prototipo de rastrillo dentado**

Por otro lado, se muestra el motor acoplado al tornillo sin fin para lograr mover el rastrillo producto de la traslación longitudinal de este. Dicho tornillo se acopla al eje del motor gracias a un sistema acoplador con tuercas que se dimensiona dependiendo la longitud del tornillo y a su vez del eje del motor.



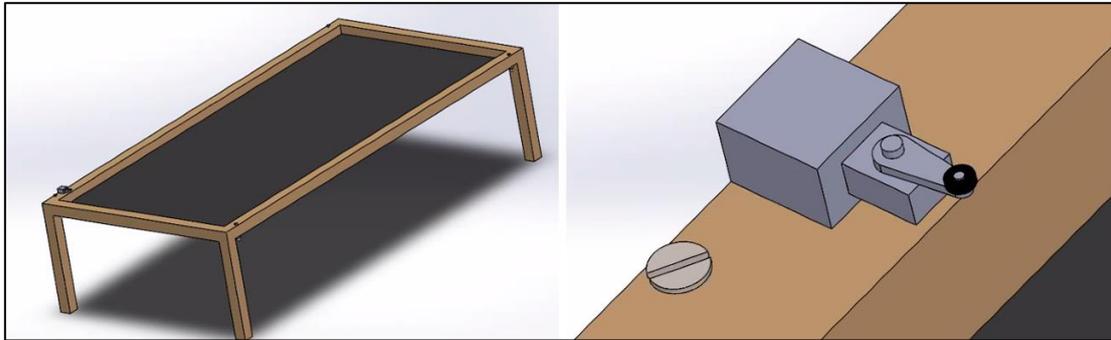
**Figura 2.39.** Acople entre motor y tornillo sin fin

Se observa también el armazón del movimiento que está constituido con dos barras de aluminio y la respectiva barra de traslación acoplada al tornillo sin fin y cuyo elemento terminal es el rastrillo. Dichas barras brindan la estabilidad del sistema y al mismo tiempo permiten facilitar la dinámica del movimiento del tornillo.



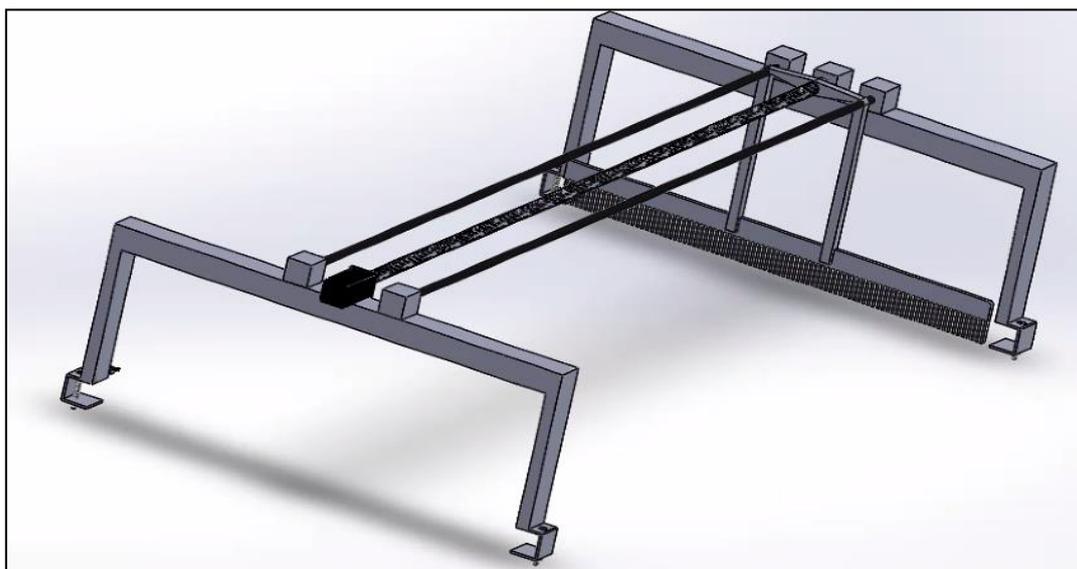
**Figura 2.40.** Armazón con barras de soporte y tornillo sin fin

En la cama africana se adaptarán los sensores finales de carrera ubicándolos estratégicamente dependiendo de la zona de operación del rastrillo. Estos equipos permiten la ida y vuelta del mecanismo garantizando así la uniformidad del movimiento sobre toda la superficie de la mesa.



**Figura 2.41. Sensores finales de carrera acoplados a la mesa**

Finalmente, se presenta toda la estructura del armazón completo que se acoplará a la cama africana mediante el uso de pernos que deberán ser asegurados cuidadosamente. Las dimensiones propuestas en el presente proyecto son referenciales y considerando una cama africana promedio con medidas proporcionadas por nuestros colaboradores; sin embargo, este sistema puede ser dimensionado para operar en distintas camas africanas, pero conservando el principio de funcionamiento.



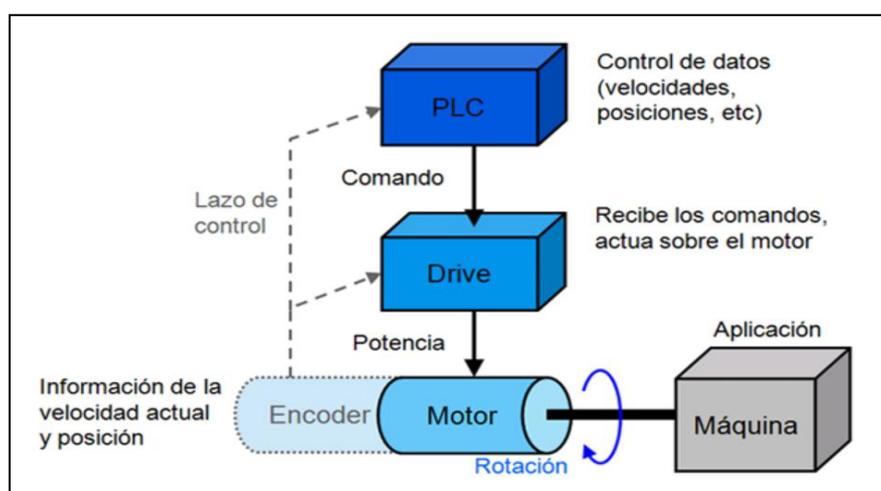
**Figura 2.42. Estructura metálica completa – Rastrillo automatizado**

### 2.3. Fase de seleccionamiento de equipos

Para llevar a cabo la mecánica del movimiento del rastrillo automatizado hemos empleado un controlador lógico programable habilitando una salida digital PTO (Pulse Train Output) para modular la velocidad y posicionamiento del eje de un motor paso a paso o también llamado motor de paso (stepper) bajo una aplicación de Motion Control.

La tecnología denominada “Motion Control” es un campo de la automatización que se caracteriza por su alta velocidad de procesamiento para tareas de control de posición, velocidad y sincronización de ejes especialmente en servomotores y motores paso a paso. Para esto, la interfaz física entre el controlador que envía la señal de accionamiento y el motor que responde a dicha señal se le denomina “drive” pudiendo ser este una controladora bajo modulación de ancho de pulso, un variador de frecuencia, entre otras [30].

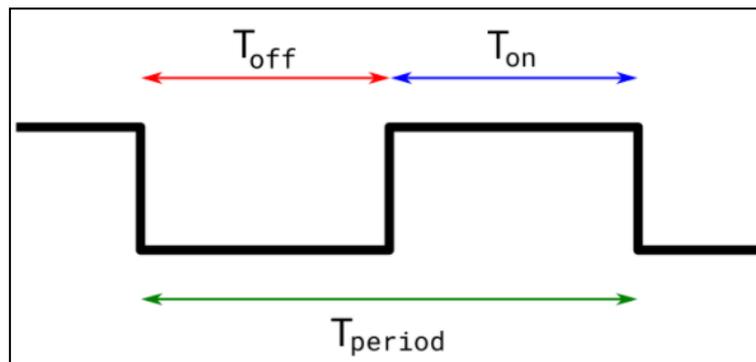
Dicho control puede ser realizado a lazo abierto donde únicamente el controlador envía las instrucciones al motor sin tener conocimiento del estado actual de las variables del proceso. Así mismo también puede realizarse un control a lazo cerrado con una retroalimentación donde se emplean comúnmente encoders, este sensor de posición envía la posición absoluta del eje del motor empleando altas velocidades de procesamiento hacia el controlador para la toma de decisiones en tiempo real.



**Figura 2.43.** Esquema de funcionamiento de aplicación Motion Control [Nota. Adaptado de “Nueva librería Motion Control PS552-MC basada en PLCopen” [Fotografía], 2019, ABB (<https://www.infopl.net/noticias/item/1385-nueva-libreria-motion-control-ps552-mc-basada-en-plcopen>)]

### 2.3.1. Control PTO

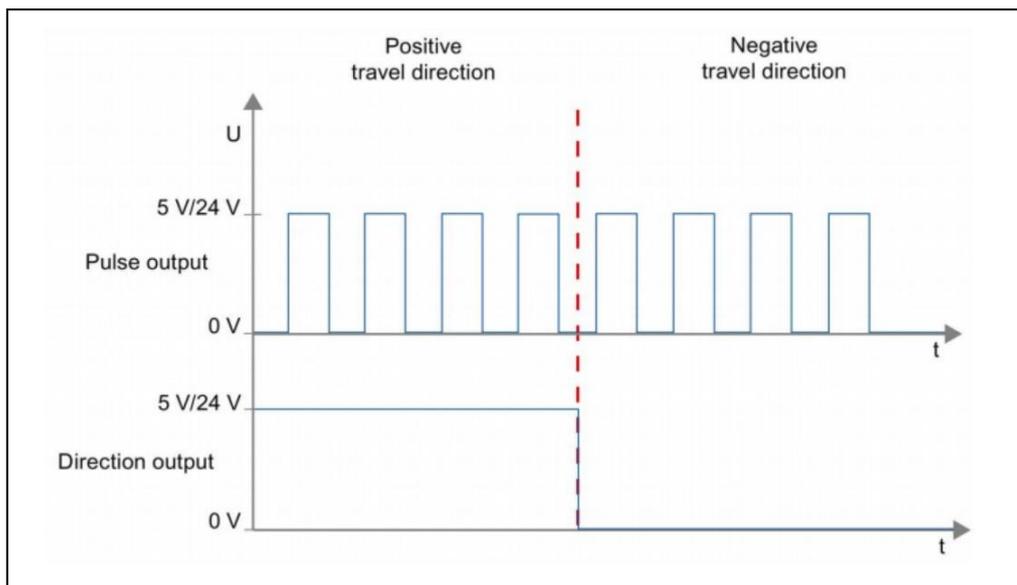
El control por interfaz de tren de impulsos, o llamado simplemente PTO, es una técnica de modulación que consiste en la variación de la frecuencia de operación manteniendo constante el ciclo de trabajo al 50% (relación de 50/50 entre  $T_{on}$  y  $T_{off}$ ). Este tipo de control se caracteriza por ser relativamente sencillo y es ampliamente usado preferencialmente para control a lazo abierto de motores paso a paso y servomotores [31].



**Figura 2.44.** Señal cuadrada de modulación para control PTO [Nota. Adaptado de “Pulse Width Modulation & Pulse Train Output” [Fotografía], 2015, Mesidas (<https://mesidas.com/pwm-pto-la-gi/>)]

Emplea dos señales para la salida de interfaz de pulsos una para los impulsos y otra para el sentido de giro. El uso de estas dos señales bajo un control PTO requiere emplear 2 salidas de pulsos por eje (impulso/dirección); sin embargo, la mayoría de los drivers cuentan con una salida digital para inversión de giro la cual puede ser habilitada bajo orden del controlador. Con esto, se optimizan los recursos del controlador y al mismo tiempo podemos emplear dichas señales PTO para controlar otros ejes adicionales.

Para la realización de este proyecto únicamente empleamos 1 salida PTO (de las 4 con las que cuenta el PLC seleccionado) para modular la velocidad de trabajo del rastrillo. Por otro lado, se asociaron los sensores finales de carrera a la señal de activación de cambio de giro (DIR) de la controladora para lograr el desplazamiento del rastrillo sobre toda la superficie de la mesa de trabajo. Por otro lado, hay que destacar que se seleccionó un controlador lógico programable con salidas por transistor y así prescindir de módulos adicionales para lograr tener salidas DC habilitadoras conectadas al driver.



**Figura 2.45.** Relación entre velocidad de pulso y dirección [Nota. Adaptado de “S7-1200 Motion Control V6.0 in TIA Portal V15” [Fotografía], 2017, Function Manual ([https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/109754206/s71200\\_motion\\_control\\_function\\_manual\\_en-US\\_en-US.pdf](https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/109754206/s71200_motion_control_function_manual_en-US_en-US.pdf))]

### 2.3.2. Topología de equipos

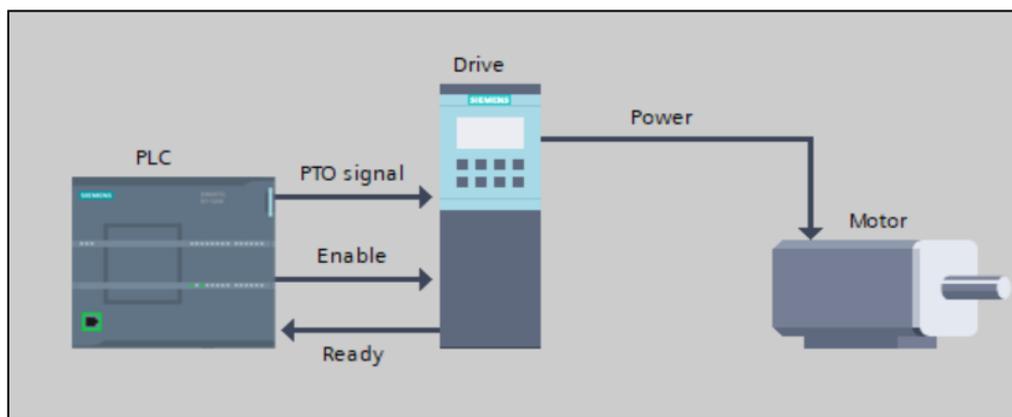
Se empleó tecnología SIEMENS junto a su biblioteca de Motion Control V6.0 para los controladores industriales PLC SIMATIC S7-1200 donde para este tipo de aplicaciones la configuración topológica de equipos se puede realizar de tres posibles maneras:

Conexión Drive	Lazo de control del eje	Conexión Encoder
PTO (Pulse Train Output)	Lazo abierto	NO encoder
Analog Output (AQ)	Lazo cerrado	Encoder de alta velocidad (HSC) Encoder en módulo tecnológico Encoder bajo PROFINET
PROFINET	Lazo cerrado	Encoder propio del drive Encoder de alta velocidad (HSC) Encoder en módulo tecnológico Encoder bajo PROFINET

**Tabla 2.4.** Posibilidades de conexión entre drive y encoder [Nota. Adaptado de “S7-1200 Motion Control V6.0 in TIA Portal V15” [Tabla], 2017, Function Manual ([https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/109754206/s71200\\_motion\\_control\\_function\\_manual\\_en-US\\_en-US.pdf](https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/109754206/s71200_motion_control_function_manual_en-US_en-US.pdf))]

Tal como se ilustra en la tabla 2.4. para realizar la rutina de Motion Control se puede optar por estas alternativas. Para nuestro caso, puesto que no requerimos de un control de posicionamiento del rastrillo, no fue necesario contar con una configuración de lazo cerrado con encoder, por esto basta con una configuración bajo tren de pulsos PTO y como accionamiento un motor de paso.

Para el presente proyecto optar por la opción de un servomotor bajo control AQ o bajo PROFIDRIVE empleando un variador de frecuencia volvería costoso el proyecto y a su vez se desperdiciarían recursos puesto que únicamente necesitamos tener control de la dirección de giro del motor y de la velocidad de este. Cabe destacar que las salidas de control PTO del PLC pasan a la etapa de potencia o “drive” el cual es el medio físico que relaciona la etapa de modulación (PLC) con la etapa de accionamiento (motor paso a paso). En la figura 2.46 se ilustra la relación entre estas tres etapas:



**Figura 2.46.** Esquema básico de control PTO [Nota. Adaptado de “S7-1200 Motion Control V6.0 in TIA Portal V15” [Fotografía], 2017, Function Manual ([https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/109754206/s71200\\_motion\\_control\\_function\\_manual\\_en-US\\_en-US.pdf](https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/109754206/s71200_motion_control_function_manual_en-US_en-US.pdf))]

Finalmente, por el lado del controlador S7-1200 a partir del firmware V.4. se tiene hasta 4 salidas PTO con canales Q0.0 a Q0.3 a una frecuencia de 100 kHz en todos los CPU S7-1200 con salidas DC. Dichas salidas pueden ser empleadas dependiendo el número de señales por canal PTO a utilizar: (1) en el caso de solo modular pulso y (2) en caso de modular pulso y dirección [32].

### 2.3.3. Dimensionamiento de equipos

Antes de seleccionar la controladora de potencia (drive) necesaria se procedió con la selección del motor de paso para nuestra aplicación del rastrillo automatizado. Para esto, nos centramos en la selección bajo dos criterios: el torque (par) de retención y la corriente necesaria para realizar tal acción.

- i. **Par motor de retención:** Se mide en  $[N \cdot m]$  o  $[N \cdot cm]$  e indica la “fuerza” por unidad de desplazamiento de acción con la cual el motor logra mantenerse en un paso ante la inercia presente.
- ii. **Corriente:** Se mide en  $[A]$  e indica el valor máximo de intensidad nominal que puede circular por el motor sin dañarlo, a mayor corriente mayor par.

El cálculo del mínimo par de un motor de paso está basado en cálculos dependiendo la masa del eje a mover, la transmisión empleada, el rozamiento, entre otros factores que, en cierta forma, llegan a complicar el cálculo y dimensionamiento. Por esto, empleando una guía de usuario y un configurador en línea de la marca de motores paso a paso SURE STEP seleccionamos el motor que mejor se acopla a nuestro proyecto [33].

En dicho manual guía de selección se categorizan a los motores paso a paso bajo los siguientes criterios:

Tipo de eje	Nivel de torque	Montaje de Encoder
Simple	Bajo	No disponible
Doble	Alto	Opcional
	Muy Alto	Preinstalado
	Elevado – Alto voltaje	

**Tabla 2.5.** Especificaciones de motores paso a paso bipolares [Nota. Adaptado de “Stepping system motors” [Tabla], 2017, Function Manual (<https://cdn.automationdirect.com/static/specs/surestepmotors.pdf>)]

Acorde a nuestros requerimientos y en base a los filtros aplicados necesitamos un motor de paso con eje simple, un nivel de torque medio-alto y sin montaje de encoder. En base a dicha preselección el último parámetro que debemos seleccionar es el torque de retención deseado, en la figura 2.47 se muestran las posibles opciones de motor de paso:

**Filtered Results** (Select motor here; compatible accessories shown on next page): ⓘ

Motor Part Number	Price	Amperage Rating	Holding Torque (N-m)	Rotor Inertia (g-cm <sup>2</sup> ) ⓘ	Shaft Type	NEMA Size	Drive Voltage ⓘ	Protection Rating ⓘ	Select
STP-MTRL-14026	\$23.00	0.35A	0.06	0.0549	Single	14	DC	IP40	Select
STP-MTRL-14034	\$29.00	0.8A	0.14	0.0640	Single	14	DC	IP40	Select
STP-MTR-17040	\$19.50	1.7A	0.43	9.14	Single	17	DC	IP40	Select
STP-MTR-17048	\$23.50	2A	0.59	12.8	Single	17	DC	IP40	Select
STP-MTR-17060	\$38.50	2A	0.81	18.3	Single	17	DC	IP40	Select
STP-MTR-23055	\$38.50	2.8A	1.17	49.4	Single	23	DC	IP40	Select
STP-MTR-23079	\$50.00	2.8A	1.95	87.8	Single	23	DC	IP40	Select
STP-MTRH-23079	\$56.00	5.6A	2.02	87.8	Single	23	DC	IP40	Select
STP-MTR-34066	\$119.00	2.8A	3.06	256	Single	34	DC	IP40	Select
STP-MTRH-34066	\$133.00	6.3A	3.06	256	Single	34	DC	IP40	Select
STP-MTRH-34097	\$151.00	6.3A	5.65	496	Single	34	DC	IP40	Select
STP-MTRH-34127	\$178.00	6.3A	9.09	733	Single	34	DC	IP40	Select

**Figura 2.47.** Filtros aplicados para selección de motor de paso [Nota. Adaptado de “Stepper System Selector” [Fotografía], 2021, Function Manual (<https://www.automationdirect.com/selectors/steppers>)]

Descartando los motores NEMA 14 (bajo par) y NEMA 34 (elevado par) nos quedamos con los motores NEMA 17 y 23 considerados de par medio-alto. Ahora mediante unos pequeños cálculos y en base a los torques de retención descritos en la tabla escogeremos un motor de paso adecuado para nuestra aplicación.

Observamos que el rango de par de retención mostrado, descartando a los motores previamente citados, es el siguiente:

<b>Par de retención [N · m]</b>	0.43	0.59	0.81	1.17	1.95
---------------------------------	------	------	------	------	------

**Tabla 2.6.** Par de retención sugerido acorde a filtros seleccionados

Por tanto, llevando dichos valores a unidades de Kilogramo-fuerza por metro (unidad de trabajo mecánico) tendríamos una idea mucho más clara de cuál es el trabajo realizado por el motor al desplazar la carga por una distancia de un metro.

Conociendo que:

$$1 \text{ KgF} \cdot \text{m} = 9.80665 \text{ [m]}$$

y convirtiendo todos los valores de la tabla 2.6 tenemos lo siguiente:

<b>Par de retención [N · m]</b>	0.43	0.59	0.81	1.17	1.95
<b>Trabajo mecánico [KgF · m]</b>	0.0438	0.0601	0.0825	0.119	0.198
<b>Trabajo mecánico [KgF · cm]</b>	4.38	6.01	8.25	11.9	19.8

**Tabla 2.7.** Tabla de esfuerzo mecánico en base a par de retención del motor

Considerando que la transmisión se da mediante el eje lineal de un tornillo sin fin y que la “carga” y fricción serían los granos de café el par de retención de nuestro motor no debe ser tan elevado. Hemos considerado el par de retención de 0.81 [N · m] como una buena medida para asegurar la transmisión mecánica sobre toda la superficie.

El motor de paso seleccionado es el motor NEMA 17 que trabaja a 2 [A] y que posee un trabajo mecánico de 8.25 kilogramos fuerza por cada centímetro desplazado sobre un eje lineal. Acorde a la hoja técnica dicho motor puede trabajar hasta con un máximo de carga de empuje/radial neta de 2.7 [Kg] lo cual se adapta bastante bien a nuestra carga empleada, aquí es importante resaltar que la interacción entre el rastrillo y los granos de café es tan solo superficial y no requiere de un esfuerzo de movimiento de masa considerable.

Finalmente hay que destacar que bajo investigaciones previas y dada la dificultad del cálculo de dimensionamiento de un motor de paso el motor seleccionado se adapta muy bien a nuestro proyecto dadas las consideraciones de par de retención. En dichas investigaciones de aplicaciones para impresoras 3D y máquinas CNC se destaca que para aplicaciones de carga media a pesada se recomiendan motores de paso con par de retención mayor a 50-60 [N · cm] por lo que la selección realizada esta acorde a estos criterios [34].

Por otro lado, una vez seleccionado el motor de paso se procedió con la selección del driver de potencia acorde a las sugerencias por parte del configurador en línea y en base al amperaje máximo que puede llegar a consumir el motor. La controladora de potencia seleccionada es capaz de entregar una corriente de salida al motor de 4.2 [A] y posee entradas digitales a 5 [V] que estarán vinculadas a las salidas PTO por parte del PLC.

A continuación, se presenta una vista topológica de los equipos de automatización y fuerza empleados en el sistema:

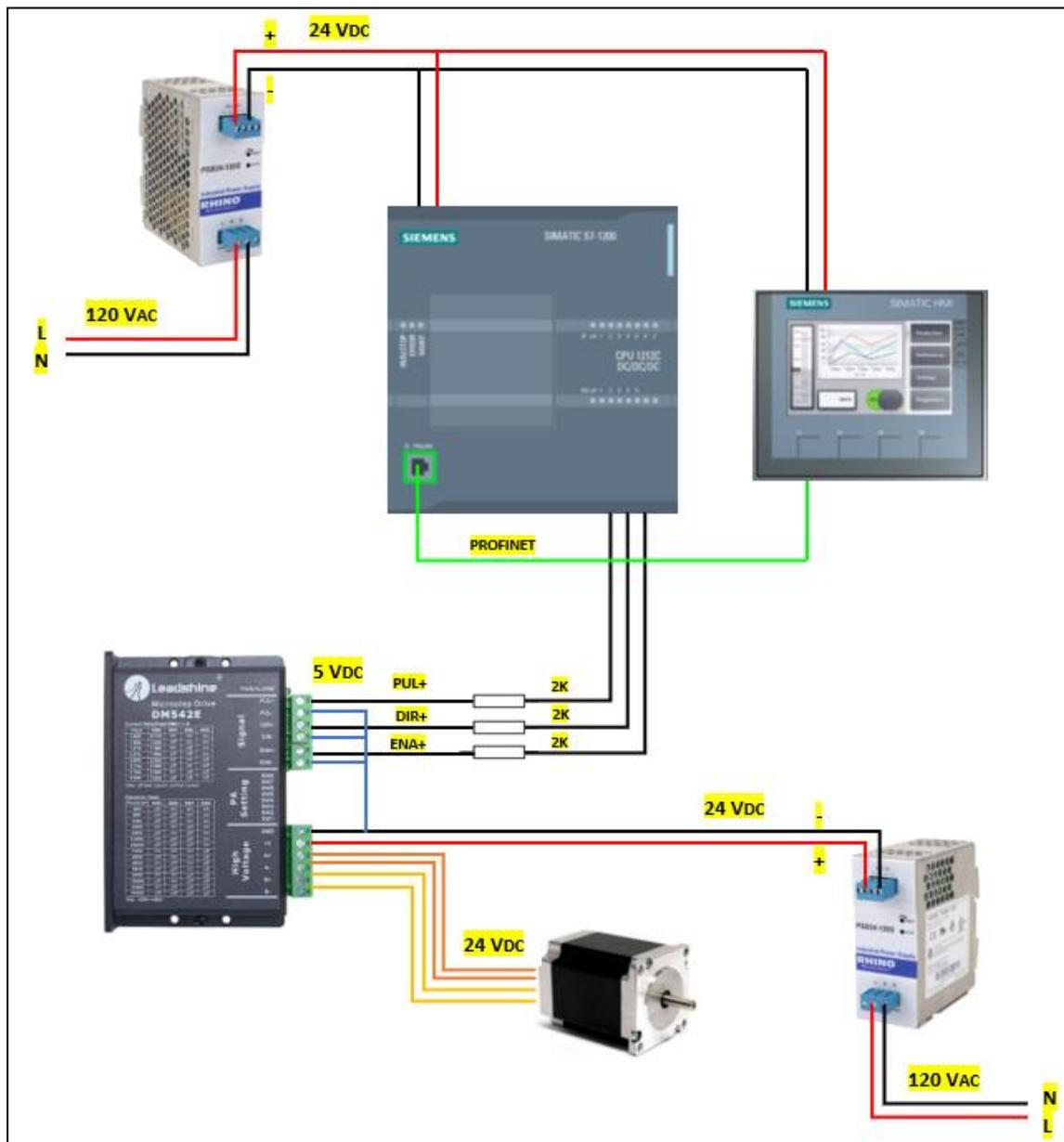


Figura 2.48. Topología de equipos y relación entre ellos

### 2.3.3.1. Motor STPR-MTR-17060

El Motor STPR-MTR-17060 es un motor NEMA 17 de paso bipolar caracterizado por su versatilidad en el mundo industrial debido a las grandes aplicaciones en las que es utilizado (sistemas de traslación lineal y rotatoria, máquinas CNC, impresoras 3D, entre otras). Es un motor de eje simple con dos fases que posee un ángulo de paso de  $1.8^\circ$  y trabaja a 2 [A] de corriente por fase.

Posee un torque de retención máximo de 0.81 [N · m] el cual se acopla de buena manera para nuestra aplicación. Finalmente hay que destacar que este motor puede llegar a soportar cargas radiales o de empuje de hasta 6 [lb].



Figura 2.49. Motor paso a paso STPR-MTR-17060

Especificaciones técnicas	
Voltaje	24 [V]
Corriente	2 [A]
Torque máximo de retención	0.81 [Nm]
Ángulo de paso	$1.8^\circ$
Pasos por revolución	200
Número de fases	2
Velocidad máxima	1200 [rpm]
Grado de protección	IP40
Inductancia por fase	3.3 [mH]
Peso del Motor	0.4 [Kg]
Resistencia por fase	0.38 [ohms]
Inercia del rotor	0.10 Kg/cm <sup>2</sup>

**Tabla 2.8. Datos técnicos – Motor STPR-MTR-17060 [Nota. Adaptado de “Stepping system motors” [Tabla], 2017, Function Manual (<https://cdn.automationdirect.com/static/specs/surestepmotors.pdf>)]**

### 2.3.3.2. Driver DM542E

El driver es el elemento encargado de enviar las señales de accionamiento desde controlador hacía el motor de paso, también conocido como interfaz de potencia, dará las indicaciones al motor de cómo será utilizado dentro del proceso; esto es, cambiar la velocidad, invertir el sentido de giro, entre otros.

Esta controladora cumple con las características tanto electrónicas y mecánicas adaptables al motor implementado en la solución propuesta para el correcto funcionamiento del movimiento de los granos de café.



Figura 2.50. Driver controlador DM542E

Especificaciones técnicas	
Fuente de alimentación	24 – 48 [VDC]
Voltaje entradas digitales	5 [V]
Protecciones	Sobre voltaje, bajo voltaje, sobre corriente y cortocircuitos.
Corriente de salida	1 [A] mínima – 4.2 [A] pico
Pasos por revolución	400 - 25600
Control de tipo de bobinado	Bipolar
Frecuencia de pulso de entrada	0 - 200 [kHz]

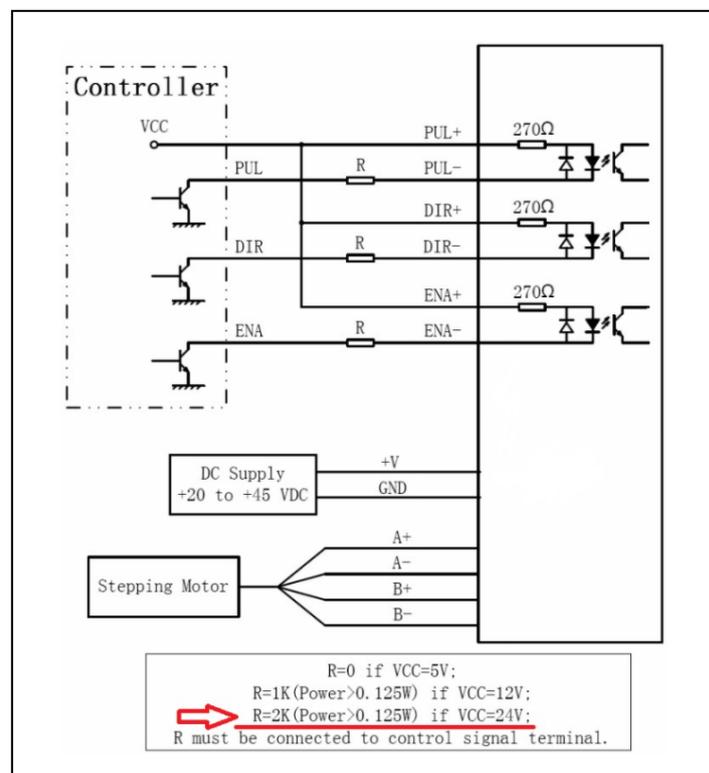
Tabla 2.9. Datos técnicos - Driver DM542E [Nota. Adaptado de “Leadshine Stepping Drives” [Tabla], 2017, Function Manual (<https://cdn.automationdirect.com/static/specs/leadshineDM542E.pdf>)]

Dentro del driver para su funcionamiento se encuentra la lista de pines que se relacionan tanto en la entrada recibiendo señales del PLC como en la salida para el accionamiento del motor.

Principales pines dentro del driver	
PUL+, PUL-	Indican la señal de pulso, la configuración de pulso y dirección de la entrada
DIR+, DIR-	Indica los niveles de voltaje ya sean altos o bajos en los cuales se representará las direcciones a las que el motor se moverá
ENA+, ENA-	Esta señal es utilizada para habilitar el funcionamiento del driver

**Tabla 2.10. Pines de control - Driver DM542E**

Así mismo, dado que las entradas del driver son de 5V y las salidas digitales del PLC son de 24V es necesario el uso de resistencias limitadoras dependiendo de la alimentación. Para nuestro caso el uso de resistencias de 2K en cada entrada permite limitar la corriente que llega al driver que posee un pequeño circuito auto acoplador para la etapa de control y fuerza.



**Figura 2.51. Conexiones recomendadas entre PLC y driver [Nota. Adaptado de "Control of the stepping motor by using S7-1200" [Fotografía], 2020, Function Manual (<https://automationtop.com/control-of-the-stepping-motor-by-using-s7-1200-configuration-of-the-motion-control/>)]**

### 2.3.3.3. PLC S7-1200 1212C DC/DC/DC

El controlador lógico programable es elemento fundamental dentro del proceso de automatización debido a que se encargará de controlar las variables, entradas y salidas que formen parte del sistema. Para realizar la programación y puesta en marcha del PLC empleamos el software de integración TIA PORTAL de propiedad de Siemens, en esta plataforma se realizó la parametrización del eje para la aplicación de motion control y toda su rutina de programación.

Este controlador de uso universal se caracteriza por ofrecer al usuario una amplia gama de posibilidades en una unidad compacta y fácil de manejar. Para aplicaciones de motion control posee librerías ya establecidas que facilitan la programación de los equipos a emplear. El CPU seleccionado en específico puede admitir hasta 4 ejes de motores paso a paso con salida PTO.



Figura 2.52. PLC Siemens SIMATIC S7-1200 – CPU 1212C DC/DC/DC

Especificaciones técnicas	
Salidas PTO	4
Tensión de alimentación	20, 4 – 28.8 [VDC] 24 [VDC]
Intensidad nominal	400 [mA]
Tipos de entradas/salidas	DC
Frecuencia de conmutación	100kHz
Número de entradas/salidas digitales	8/6

Tabla 2.11. Datos técnicos – PLC S7-1200 CPU 1212C DC/DC/DC [Nota. Adaptado de “Hoja de datos 6ES7212-1AE40-0XB0” [Tabla], 2021, Function Manual (<https://mall.industry.siemens.com/mall/es/WW/Catalog/Product/6ES7212-1AE40-0XB0>)]

### 2.3.3.4. HMI KTP400 Basic PN

El interfaz humano máquina, es el dispositivo que se encargará de la manipulación del sistema por parte del usuario, es decir que tendrá relación directa entre el proceso y la programación, con la capacidad de manejar y observar en la pantalla las distintas opciones a ser controladas.

Variedad de fabricantes ofrecen distintas ventajas en sus equipos, sin embargo, por sintonía de equipos y adaptabilidad se eligió la KTP400 Basic PN de Siemens, su tamaño y fácil implementación fueron factores importantes para su elección. Su tamaño y practicidad hacen de la interfaz un sistema invaluable dentro de la automatización del proyecto, el fácil acceso y manejo, hacen que los usuarios tengan una plataforma de amplio desarrollo práctico.



Figura 2.53. SIMATIC HMI KTP 400 Basic

Especificaciones técnicas	
Dimensión	4.3 [pulgadas]
Ancho	95 [mm]
Largo	53.9 [mm]
Resolución	480 x 272 [píxeles]
Número de teclas	4
Tensión de alimentación	19.2 – 28.8 [VDC] 24 [VDC]
Intensidad nominal	125 [mA]
Memoria para data	10 [Mbyte]

Tabla 2.12. Datos técnicos - HMI KTP 400 Basic [Nota. Adaptado de "Hoja de datos 6AV2123-2DB03-0AX0" [Tabla], 2021, Function Manual (<https://mall.industry.siemens.com/mall/es/WW/Catalog/Product/6AV2123-2DB03-0AX0>)]

### 2.3.3.5. Final de carrera AEP2G41Z11-1

Los sensores finales de carrera serán los encargados de detectar el término de la trayectoria del rastrillo, para así indicar al controlador el accionamiento del cambio de giro del motor, debido a esto se encontrarán posicionados en las dos extremidades del sistema.

El sensor AEP2G41Z11-1 tiene la precisión y repetibilidad necesarias para la aplicación con lo cual se obtendría una mejor eficiencia en el sistema a implementar. Teniendo como lado positivo que el dispositivo cuenta con una estructura resistente ante la corrosión y humedad, logrando que el uso diario no afecte la utilidad de este e incluso que sea duradero.



Figura 2.54. Final de Carrera – AEP2G41Z11-1

Especificaciones técnicas	
Tipo de actuador	Palanca giratoria lateral con rodillo de nailon de 14mm
Tipo de contacto	(1) N.O. / (1) N.C.
Mínimo torque de contacto	0.8 Nm
Extensión cable	1 [m]
Grado de protección	IP67
Ancho del cuerpo	35 [mm]

Tabla 2.13. Datos técnicos – AEP2G41Z11-1 [Nota. Adaptado de “Hoja de datos AEP2G41Z11-1” [Tabla], 2021, Limit Switches (<https://cdn.automationdirect.com/static/specs/aepsiderotlever.pdf>)]

# CAPÍTULO III

## 3. Resultados y análisis

En el presente capítulo se da a conocer el funcionamiento del sistema junto a una breve explicación de la programación de los equipos empleados y los respectivos diagramas de fuerza y control necesarios para su implementación. Además, se muestra la interfaz gráfica del panel operador HMI con los distintos modos de operación y su respectivo funcionamiento.

Finalmente, se realizó el análisis de costos y rentabilidad del presente proyecto y se estudió la oportunidad de negocio para una posible aplicación dentro de la pequeña y mediana industria cafetalera en el Ecuador.

### 3.1. Modos de operación

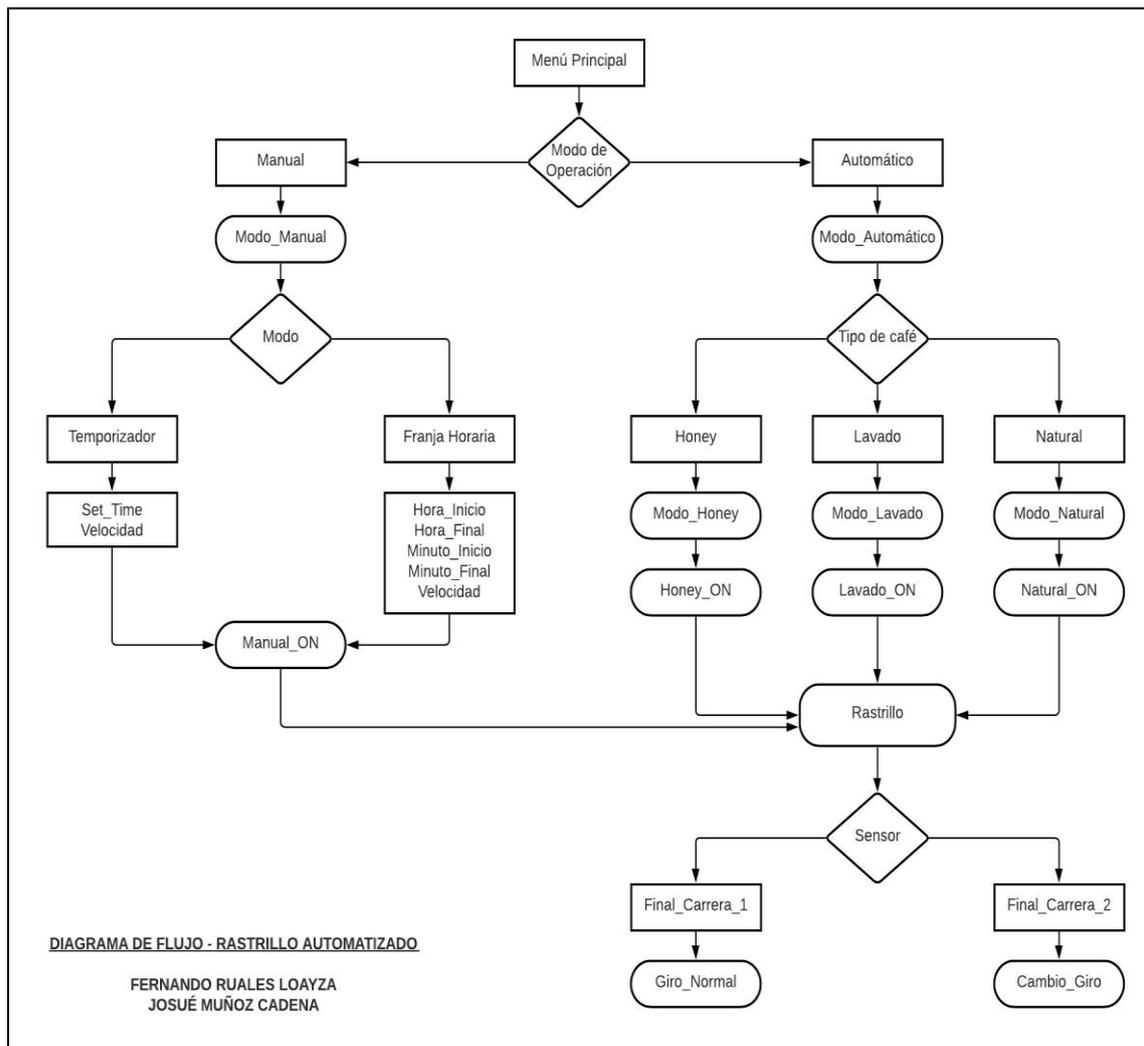
A nivel funcional el sistema cuenta con dos modos de operación previamente establecidos: Modo Manual y Modo Automático. Bajo estas dos opciones el usuario podrá establecer el funcionamiento del equipo y a su vez parametrizarlo acorde a sus necesidades.

En el modo manual el usuario tendrá la posibilidad de operar al rastrillo bajo un tiempo programado de encendido mediante un temporizador; o bien, estableciendo una franja horaria definida en horas y minutos en el cual el equipo se encontrará operativo. Además, en cualquiera de estas opciones el usuario podrá establecer la velocidad de desplazamiento del rastrillo bajo las opciones: velocidad baja, velocidad media y velocidad alta siendo estas ya parametrizadas con valores por defecto y con las debidas precauciones para no alterar ni el funcionamiento del equipo ni la integridad del producto.

Por otro lado, en el modo automático el usuario dispone de tres opciones de maniobra las cuales están relacionadas al tipo de café a secar: café honey, café lavado y café natural. En dichas opciones el usuario ya tiene preestablecida bajo cuatro franjas horarias la rutina de movimiento diaria para el proceso de secado y se distinguen entre sí por la duración de funcionamiento y velocidad dependiendo del grano de café a mover.

### 3.1.1. Diagrama de flujo

Dada la breve explicación del funcionamiento de los dos modos de operación a continuación se detalla el flujograma del programa considerando las variables utilizadas al momento de realizar la programación en TIA Portal.



**Figura 3.1. Diagrama de flujo del sistema**

Dentro de los modos manual y automático el usuario dispone de opciones de personalización acorde a su preferencia. Cabe destacar que las variables que ya poseen valores predeterminados, como el caso de las franjas horarias en el modo automático, dichos parámetros fueron considerados previa conversación con nuestros colaboradores en base a su experiencia y recomendación acorde cada tipo de café que entra al proceso de secado.

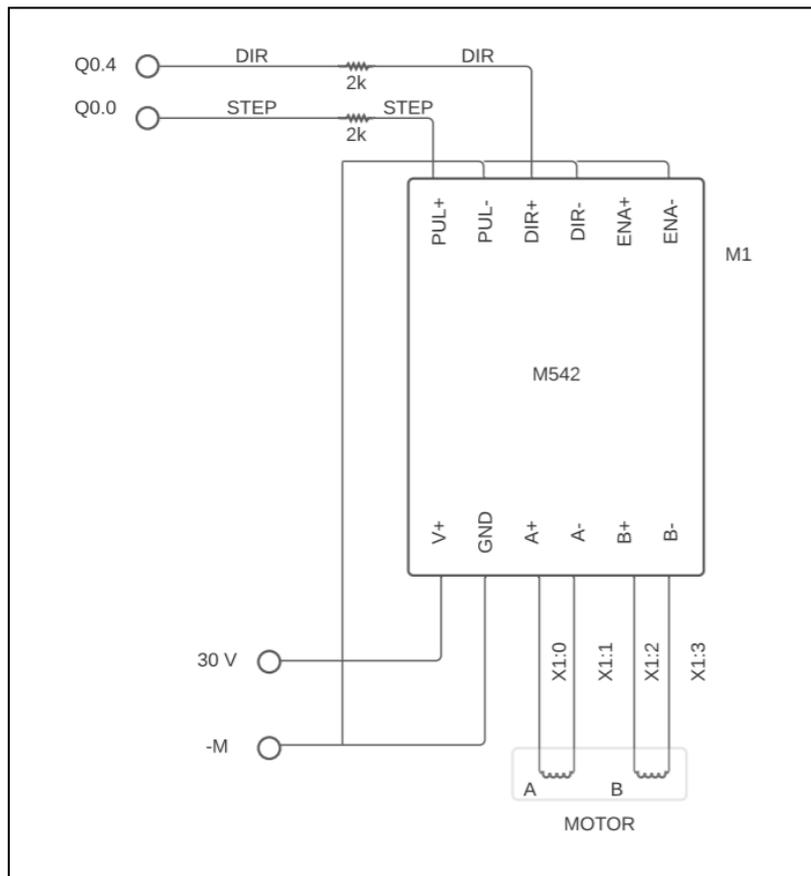
### 3.1.2. Tabla de variables

A continuación, se presenta una breve explicación de las variables mostradas en el diagrama de flujo:

Variable	Descripción
Menú Principal	Interfaz principal
Modo de Operación	Condicional para establecer el modo de operación del rastrillo
Manual	Activador del modo manual
Automático	Activador del modo automático
Modo_Manual	Se ingresa al modo manual
Modo	Condicional para establecer modo de operación en modo manual
Temporizador	Activador para modo temporizador en modo manual
Franja Horaria	Activador para modo franja horaria en modo manual
Set_Time/Velocidad	Permite establecer el tiempo de operación y la velocidad dentro del modo temporizador
Hora_Inicio/Hora_Final Minuto_Inicio/Minuto_Final Velocidad	Parámetros de entrada para establecer la franja horaria de funcionamiento dentro del modo Franja Horaria
Manual_ON	Se pone en marcha el modo manual
Modo_Automático	Se ingresa al modo automático
Tipo de café	Condicional para seleccionar el tipo de café a secar
Honey	Se ingresa al modo Honey
Lavado	Se ingresa al modo Lavado
Natural	Se ingresa al modo Natural
Modo_Honey	Activador para la función de programación Modo_Honey
Modo_Lavado	Activador para la función de programación Modo_Lavado
Modo_Natural	Activador para la función de programación Modo_Natural
Honey_ON	Se pone en marcha el modo Honey
Lavado_ON	Se pone en marcha el modo Lavado
Natural_ON	Se pone en marcha el modo Natural
Rastrillo	Activador para puesta en marcha del rastrillo
Sensor	Condicional para establecer sentido de giro del rastrillo
Final_Carrera_1	Sensor final de carrera vinculado al giro normal del rastrillo
Final_Carrera_2	Sensor final de carrera vinculado al cambio de giro del rastrillo
Giro_Normal	Activador para mover el rastrillo en un sentido de giro horario
Cambio_Giro	Activador para invertir el sentido de giro del rastrillo

**Tabla 3.1. Tabla de variables del sistema**

### 3.2. Diagrama de fuerza del sistema automatizado



**Figura 3.2. Diagrama de fuerza del sistema automatizado**

La etapa de fuerza del sistema se encuentra en el driver de potencia que envía la señal de accionamiento hacia el motor. Tal como se observa en la figura 3.2 la controladora requiere una alimentación externa la cual es independiente de la alimentación del sistema de control debido a la demanda de corriente del motor.

En las entradas del driver se tienen las señales de accionamiento (pulso, dirección y habilitadora) que provienen del PLC y mediante un circuito interno compuesto por optoacopladores permiten enviar dichas señales hacia los terminales del motor que puede ser unipolar o bipolar dependiendo el caso.

Así mismo cabe destacar que entre las entradas del driver y las salidas del PLC se conectan resistencias en serie de 2 [KΩ] para lograr obtener los 5 [V] necesarios en la entrada de la controladora.

### 3.3. Diagrama de control del sistema automatizado

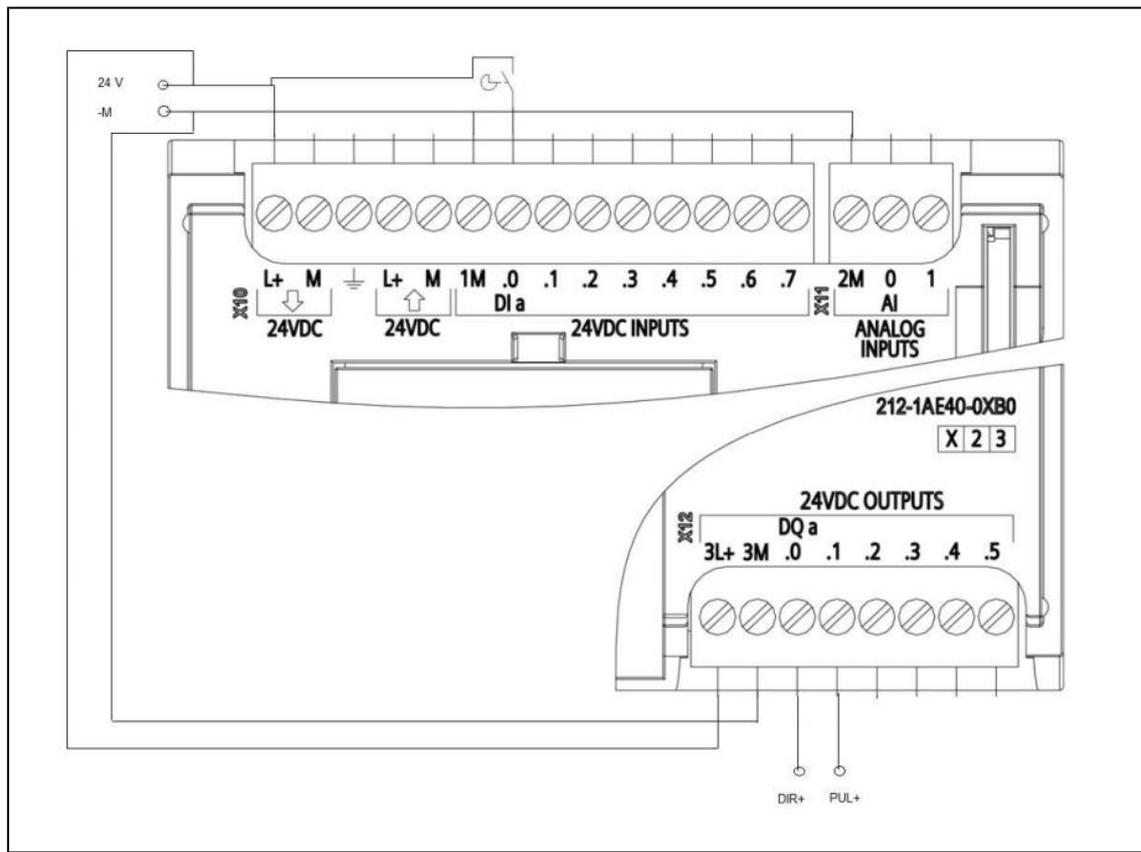


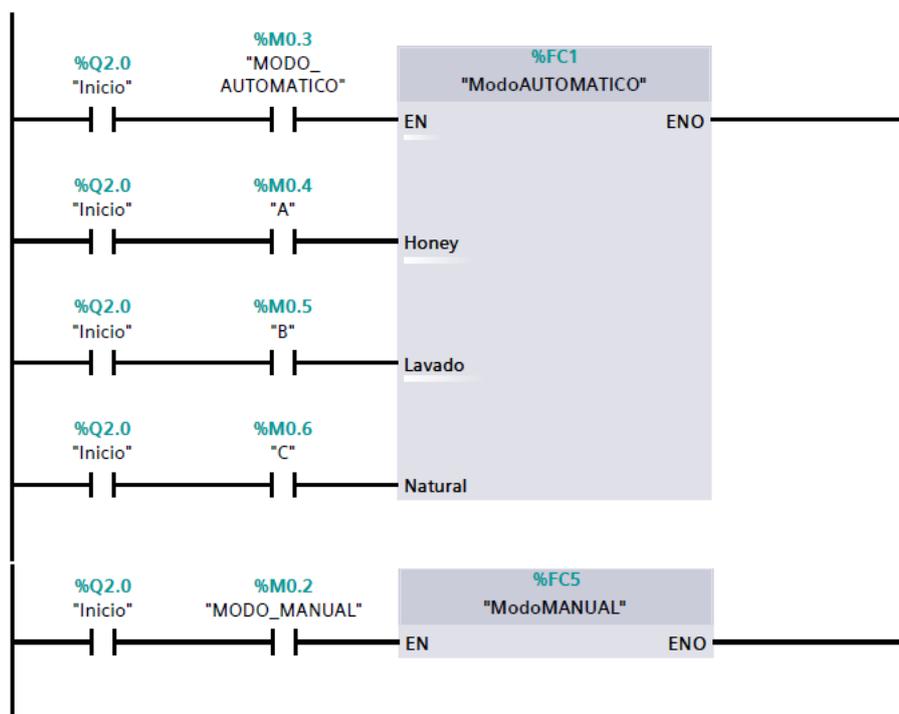
Figura 3.3. Diagrama de control del sistema automatizado

Por otro lado, en el diagrama de control tenemos el PLC que posee en sus entradas las señales provenientes de los finales de carrera y como salidas los canales PTO habilitados que envían las señales de accionamiento hacia el driver. La asignación de dichos puertos se realiza al momento de la programación recordando que el modelo de CPU que vamos a utilizar contiene 4 posibles salidas PTO configurables.

En nuestro sistema tan solo se utiliza una salida PTO la cual permite modular el pulso (velocidad) del motor. Para el cambio de giro se emplea directamente una salida digital vinculada a los finales de carrera, que a su vez, está conectada a la entrada DIR+ del driver que se encarga de invertir el sentido de giro del motor.

### 3.4. Programación Ladder

La programación del PLC se encuentra realizada en el lenguaje Ladder en el software TIA Portal de Siemens, la cual se encuentra dividida en distintos bloques para una mejor implementación del prototipo. En el programa principal se realiza una lógica de contactos para obtener un Start y Stop al sistema, luego se le da la opción al usuario de elegir el modo de funcionamiento, ya sea automático o manual, para finalmente dirigir hacia el bloque en el que se encuentran las opciones ya configuradas para la manipulación del sistema.

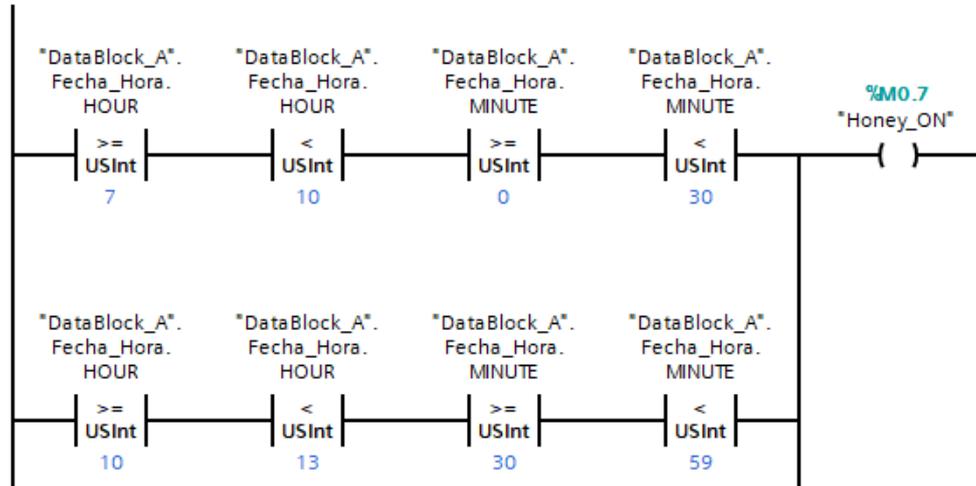


**Figura 3.4. Modos de operación del sistema**

Cada bloque creado contiene un proceso del sistema, los cuales se diferencian por las características empleadas en cada uno para crear el funcionamiento adecuado en los distintos modos de trabajo, tales como velocidad, franjas horarias, entre otras, para finalmente obtener como salida de cada proceso el movimiento del motor.

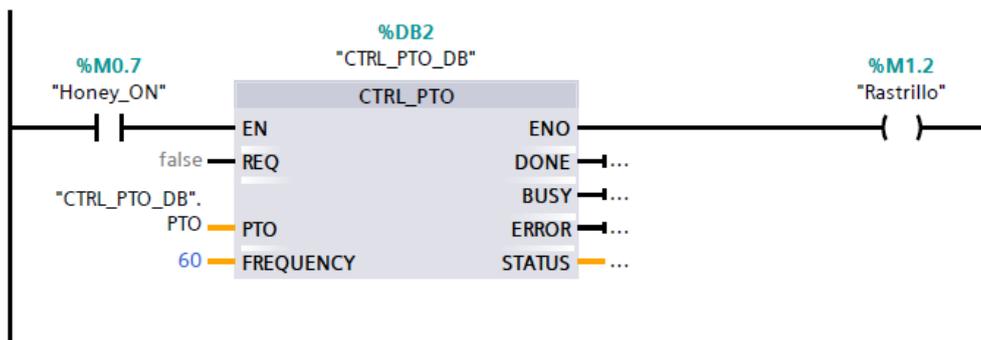
Para realizar las franjas horarias tanto en el modo automático como manual se utilizaron bloques de datos en los cuales se encuentran la fecha y hora en sus respectivos tipos de datos, para poder trabajar con las variables de horas y

minutos, para así lograr una comparación entre los datos colocados de manera automática por el programador y los datos ingresados de manera manual por el usuario.



**Figura 3.5. Franja horaria del modo automático**

Mientras que el movimiento del motor fue realizado con un señales PTO, en el cual se seleccionó las frecuencias adecuadas para cada proceso y movimiento de cualquier tipo de café, se habilitará cuando la hora y minuto se encuentren dentro de la franja establecida para el movimiento.



**Figura 3.6. Bloque PTO del sistema**

Tal como se observa en la figura 3.6 este bloque permite habilitar la salida de pulsos hacia el motor cuya variable de salida se denominó “Rastrillo”. Así mismo el habilitador de este bloque proviene de la selección tanto del modo de operación (manual, automático) como del café a secar (honey, lavado o natural).

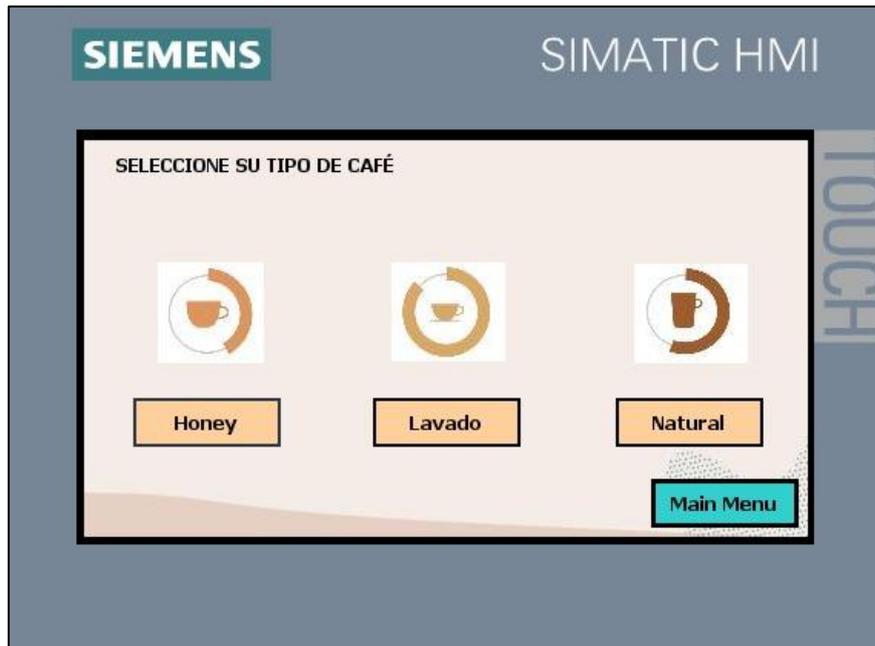
### 3.5. Interfaz máquina-usuario

Se implementó una HMI para que el usuario obtenga una mejor experiencia con el sistema, se encuentran varias pantallas que guiarán al mismo a medida que va seleccionando las opciones deseadas para el desarrollo del proceso. En la pantalla principal y tal como se ilustra en la figura 3.7 el usuario puede seleccionar el modo de operación (automático o manual) del sistema, dependiendo de la elección del usuario se abrirá la siguiente pantalla.



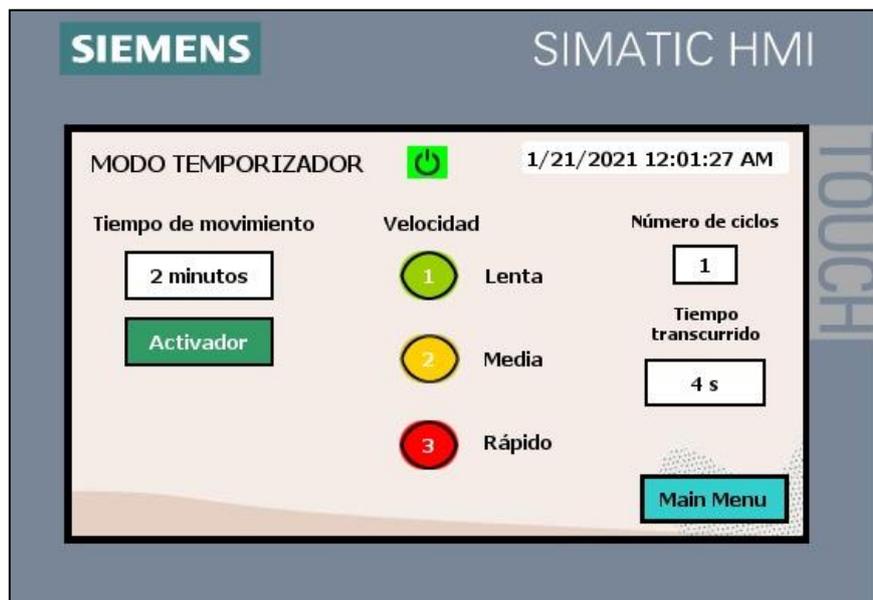
**Figura 3.7. Modos de operación – Interfaz HMI**

Dentro del modo automático el usuario deberá seleccionar el tipo de café a secar y a su vez cada tipo posee franjas horarias de operación previamente establecidas y que empiezan a correr una vez que se entre a dicha pantalla. Sumado a las franjas horarias se encuentran velocidades previamente establecidas para cada modo dependiendo la exigencia de movimiento del tipo de grano.



**Figura 3.8.** Selección del tipo de café a secar

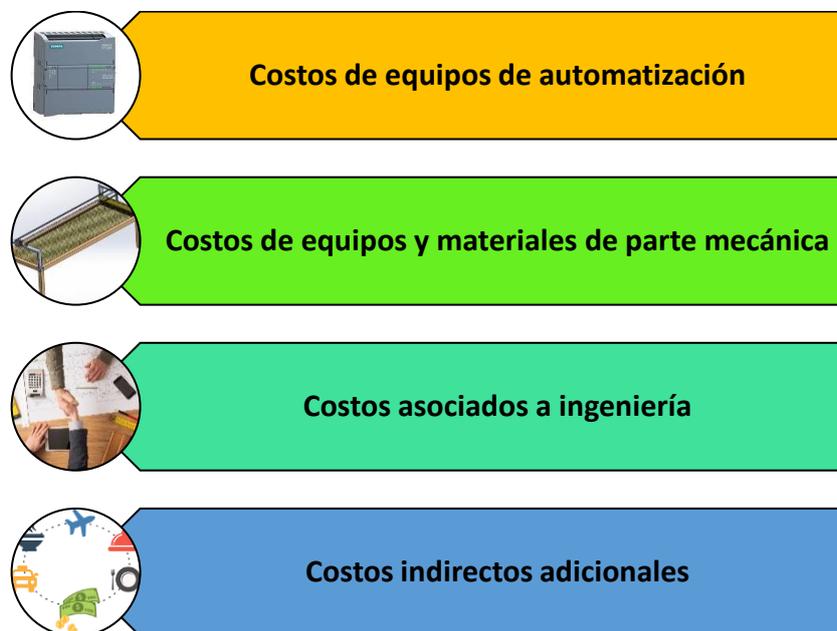
Dentro del modo de operación manual el usuario podrá seleccionar el modo temporizador o franja horaria para ingresar parámetros de su interés. Por ejemplo, en el modo franja horaria el usuario puede seleccionar el intervalo de tiempo en horas y minutos que desea poner a funcionar el sistema; mientras que, tal como se ilustra en la figura 3.9 el usuario dentro del modo temporizador puede ingresar el tiempo que desea que el rastrillo se mueva.



**Figura 3.9.** Modo temporizador – Interfaz HMI

### 3.6. Análisis de costos

Dentro del plan de ejecución del proyecto se consideraron los siguientes costos de inversión los cuales se detallan a continuación:



**Figura 3.10.** Costos de inversión del proyecto

Estos costos de inversión, también denominados “costos preoperativos”, son todos aquellos a los que se acude en las etapas de desarrollo de ingeniería, planificación y posterior ejecución y puesta en marcha del proyecto. Una vez que el proyecto sea funcional, se denominan “costos operativos” a todos los que se incurre para la normal ejecución del proyecto tales como: salarios del personal, mantenimientos, gastos administrativos, entre otros.

Cabe destacar que dentro de estos costos no están incluidos ningún tipo de margen de ganancia puesto que únicamente se detallan costos brutos, tanto de equipos, materiales u horas de servicio e ingeniería en campo, en el apartado resumen de costos y precios (sección 3.7) se presentan los márgenes de ganancia aplicados a determinados costos y a su vez en la sección presupuesto final (sección 3.8) se da a conocer el precio final del presente proyecto, mismo que se presentará al cliente.

### 3.6.1. Costos de equipos de automatización

Aquí se incluyen todos los equipos necesarios tanto para la etapa de fuerza y control del sistema. La adquisición de los equipos SIEMENS se cotizó en el mercado local; mientras que, para el resto de los equipos se realizó una cotización internacional con el distribuidor AUTOMATION DIRECT y por tanto se calculó un porcentaje adicional referente a la importación de los equipos.

1. COSTOS DE EQUIPOS DE AUTOMATIZACIÓN						
ITEM	DESCRIPCIÓN	REFERENCIA	CANT	UND	Costo Unitario (USD)	Costo Total (USD)
1.1	<b>SIMATIC S7-1200, CPU 1212C</b> , CPU compacta, DC/DC/DC, I/O integrada: 8 DI DC 24V; 6 DO 24V DC; 2 AI 0-10V DC, alimentación: DC 20,4-28,8V DC, Memoria de programas/datos 75 KB	6ES7212-1AE40-0XB0	1	PZ	322,92	322,92
1.2	<b>SIMATIC HMI, KTP400 Basic</b> , Basic Panel, Manejo con teclado/táctil, pantalla TFT de 4", 65536 colores, Interfaz PROFINET, configurable a partir de WinCC Basic V13/STEP 7 Basic V13, incluye software Open Source, que se cede gratuitamente ver CD adjunto	6AV2123-2DB03-0AX0	1	PZ	758,00	758,00
1.3	<b>SIMATIC, perfil DIN 35mm</b> , Longitud 483 mm para armarios de 19"	6ES5710-8MA11	1	PZ	39,90	39,90
1.4	<b>SureStep stepper motor, NEMA 17 frame</b> , IP40, single shaft, 2A, 115 oz-in holding torque, 1.8-degree step angle, 200 steps per revolution, bipolar.	STP-MTR-17060	1	PZ	42,78	42,78
1.5	<b>SureStep extension cable</b> , 4-pin connector to pigtail, 10ft cable length. For use with SureStep MTR series stepper motors.	STP-EXT-010	1	PZ	13,89	13,89
1.6	<b>Leadshine DC microstepping stepper drive</b> , 4.2A per phase, 2-phase output, 24-48 VDC, bipolar, position mode, 400 to 25600 steps per revolution.	DM542E	1	PZ	40,00	40,00
1.7	<b>RHINO SELECT PSB series switching power supply</b> , 22-28 VDC output, 5A, 120W, 120/240 VAC or 120-375 VDC nominal input, 1-phase, enclosed, aluminum housing, 35mm DIN rail mount, removable screw terminal, hazardous location rated.	PSB24-120S	2	PZ	91,11	182,22
1.8	<b>Quabbin continuous flexing profinet bus cable, Profinet Type B/C</b> , Ethernet/IP CAT 5e, Type PLTC-ER and Type CM, 4 conductors, 22 AWG, shielded, TPE jacket, green, cut to length.	Q5099-1	20	ft	1,24	24,80
1.9	<b>Field wireable connector, RJ45 4-pole Ethernet male axial</b> , accepts cable diameter size 4.5-9mm, 26-22 AWG, insulation displacement (IDC) connection, shielded, IP20. Exceeds Category 5E specifications.	7000-74001-0000000	2	PZ	17,78	35,56
1.10	<b>Compact limit switch</b> , side rotary lever with 14mm nylon roller, (1) N.O./ (1) N.C. contact(s), snap action, 35mm wide body, plastic, pigtail, 3.2ft/1m cable length, bottom exit.	AEP2G41Z11-1	2	PZ	17,78	35,56
<b>COSTO TOTAL DE EQUIPOS DE AUTOMATIZACIÓN (USD)</b>					<b>1.495,63</b>	

Tabla 3.2. Costos de equipos de automatización

### 3.6.2. Costos de equipos y materiales de parte mecánica

En este apartado se incluyeron los costos de la estructura mecánica que se acopla a la infraestructura existente. Así mismo aquí se incluyeron los rubros de los equipos y materiales para la transmisión mecánica del tornillo sin fin.

2. COSTOS DE EQUIPOS Y MATERIALES DE PARTE MECÁNICA						
ITEM	DESCRIPCIÓN	REFERENCIA	CANT	UND	Costo Unitario (USD)	Costo Total (USD)
2.1	Estructura mecánica de aluminio (Base + soportes)	Estructura	1	U	300,00	300,00
2.2	Acoplador mecánico para eje lineal	Drive Coupling	1	PZ	80,00	80,00
2.3	Eje lineal	Shaft	1	PZ	180,00	180,00
2.4	Herramientas varias	Otros	1	U	40,00	40,00
2.5	Rastrillo + Acople	Rastrillo	1	PZ	50,00	50,00
COSTO TOTAL DE EQUIPOS Y MATERIALES DE PARTE MECÁNICA (USD)					650,00	

Tabla 3.3. Costos de equipos y materiales de parte mecánica

### 3.6.3. Costos asociados a ingeniería

Dentro de los costos de ingeniería se incluye el desarrollo de la idea del proyecto, programación y comisionamiento de los equipos en campo. Aquí se incluyen las horas de servicio en las instalaciones del cliente para la instalación y puesta en marcha del sistema automatizado.

3. COSTOS ASOCIADOS A INGENIERÍA						
ITEM	DESCRIPCIÓN	REFERENCIA	CANT	UND	Costo Unitario (USD)	Costo Total (USD)
3.1	Desarrollo del programa e ingeniería asociada	Diseño	2	personas	280,00	560,00
3.2	Servicio técnico especialista en campo	Servicio	40	h	20,00	800,00
3.3	Capacitación sobre operación en campo	Servicio	6	h	20,00	120,00
COSTO TOTAL DE INGENIERÍA (USD)					1480,00	

Tabla 3.4. Costos asociados a ingeniería

### 3.6.4. Costos indirectos adicionales

Por último, se detallan los costos adicionales para llevar a cabo el proyecto entre los cuales se destaca el traslado del personal técnico al lugar de instalación del sistema, hospedaje, alimentación, viáticos, entre otros rubros.

4. COSTOS INDIRECTOS ADICIONALES						
ITEM	DESCRIPCIÓN	REFERENCIA	CANT	UND	Costo Unitario (USD)	Costo Total (USD)
4.1	Transporte terrestre (ida y vuelta)	Transporte	2	boletos	25,00	50,00
4.2	Viáticos	Viáticos	5	días	25,00	125,00
4.3	Hospedaje	Hospedaje	6	noches	40,00	240,00
COSTO TOTAL DE ADICIONALES (USD)					415,00	

Tabla 3.5. Costos indirectos adicionales

### 3.7. Resumen de costos y precios

En la figura 3.11 se presenta un resumen de los costos preoperativos del proyecto, así como sus proporciones con respecto al costo total.

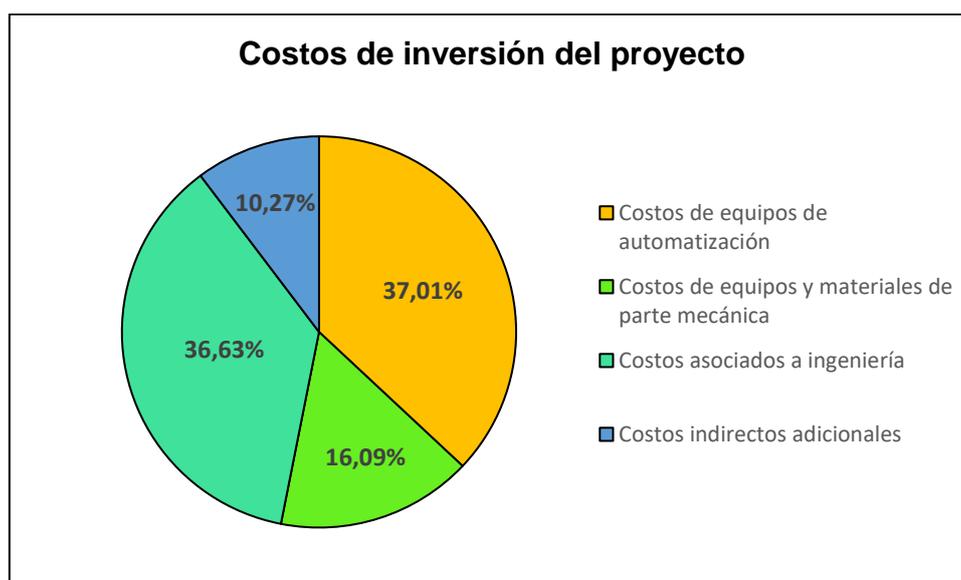


Figura 3.11. Diagrama de pastel - Costos de inversión del proyecto

Cabe destacar que para calcular los precios ofrecidos al cliente se tomaron como base estos costos y a su vez se incluyó el margen de ganancia deseado. En el caso de los costos de equipos de automatización y costos de equipos y materiales de la parte mecánica no se incluyó ningún porcentaje de margen puesto que únicamente se adquieren los bienes en base a cotizaciones ya realizadas a los distribuidores.

Por otro lado, los costos indirectos adicionales dependen del lugar al cual nos debamos trasladar para llevar a cabo la implementación del proyecto. Acorde conversaciones con la “Hacienda Santa Gertrudis” ellos nos ofrecen hospedaje, alimentación y viáticos necesarios para nuestra estadía durante la implementación del sistema (alrededor de 1 semana). Sin embargo, dependiendo el caso y locación, estos costos pueden variar.

Finalmente, a los costos de ingeniería si se le incluyó un margen de ganancia de 30% a cada rubro tal como se detalla a continuación:

3. PRECIOS ASOCIADOS A INGENIERÍA							
ITEM	DESCRIPCIÓN	REFERENCIA	CANT	UND	Costo Unitario (USD)	Precio Unitario (USD)	Precio Total (USD)
3.1	Desarrollo del programa e ingeniería asociada	Diseño	2	personas	280,00	400,00	800,00
3.2	Servicio técnico especialista en campo	Servicio	40	h	20,00	29,00	1.160,00
3.3	Capacitación sobre operación en campo	Servicio	6	h	20,00	29,00	174,00
PRECIO TOTAL DE INGENIERÍA (USD)						2.134,00	

**Tabla 3.6. Precios indirectos adicionales**

Dichos precios unitarios calculados en base a los costos unitarios se dan bajo la relación:

$$\text{Precio de venta} = \frac{\text{costo}}{1 - \text{margen de ganancia}}$$

En donde nuestro beneficio directo en estos rubros es del 30% tal como se detalla.

### 3.8. Oferta al cliente

Una vez detallados todos los costos y precios se presenta a continuación una tabla resumida con el presupuesto en firme del presente proyecto a ser presentado ante el cliente:

PROYECTO DE SISTEMA AUTOMATIZADO PARA MOVIMIENTO DEL GRANO DE CAFÉ					
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT	UNIDAD	Precio Unitario (USD)	Precio Total (USD)
1	<b>EQUIPOS DE AUTOMATIZACIÓN</b> <b>INCLUYE:</b> - (13) equipos para la etapa de control y fuerza del sistema	1	Equipos	1.495,63	1.495,63
2	<b>ESTRUCTURA MECÁNICA</b> <b>INCLUYE:</b> - Estructura mecánica de aluminio (base + soportes) - Juego de transmisión mecánica para eje lineal - Rastrillo prefabricado junto a acoples	1	Estructura	650,00	650,00
3	<b>PUESTA EN MARCHA</b> <b>INCLUYE:</b> - Desarrollo de la rutina de programación del sistema - Configuración y puesta en marcha de los equipos en las instalaciones del cliente - Servicio técnico especialista en campo durante (5) días laborables de (8) horas diarias - Capacitación sobre operación del sistema durante (6) horas diarias	1	Servicio	2.134,00	2.134,00
4	<b>ADICIONALES *</b> <b>INCLUYE:</b> - Traslado de (2) técnicos especialistas hacia las instalaciones del cliente - Hospedaje - Alimentación - Viáticos	1	Adicional	415,00	415,00
<b>PRECIO TOTAL DE LA OFERTA (USD)</b>				<b>4.694,63</b>	
<b>PRECIO TOTAL DE LA OFERTA SIN ADICIONALES (USD)</b>				<b>4.279,63</b>	

**Tabla 3.7. Oferta presupuestal al cliente**

Cabe destacar que el rubro de adicionales puede ser omitido dado que el cliente nos puede ofrecer estadía en sus instalaciones y a su vez el pago del traslado. \*

### 3.9. Matriz FODA

Dentro del análisis de resultados se incluye también el uso de la herramienta de la matriz FODA de nuestro proyecto y su posible implementación en la hacienda “Santa Gertrudis” acorde conversaciones con su propietario.

FORTALEZAS	OPORTUNIDADES
<b>Practicidad</b> , porque el café va a mantenerse en constante movimiento logrando ser de fácil uso para el usuario en este caso el caficultor o el operador.	<b>Adaptabilidad</b> , puesto que tanto la estructura mecánica como el sistema automatizado pueden adaptarse a cualquier infraestructura ya existente.
<b>Economía</b> , porque es una inversión en un sector agroindustrial que impactará directamente en las futuras ventas del productor.	<b>Expansión</b> , del sistema hacia nuevos procesos del café dada la posible incorporación de sensores y actuadores al PLC existente.
<b>Calidad</b> , con el movimiento constante el grano va a preservar su calidad por la uniformidad en el proceso de secado.	<b>Innovación</b> , puesto que abre mercado y competencia entre productores de café especializado en el mercado local e internacional.
DEBILIDADES	AMENAZAS
<b>Distancia</b> , dado que la implementación de este sistema se da en lugares remotos del Ecuador y con poco acceso a recursos tecnológicos.	<b>Poco interés</b> , para aprender acerca del funcionamiento del sistema y resistencia para automatizar el proceso de secado.
<b>Inversión</b> , puesto que el presente proyecto puede significar costoso para determinados sectores, sobre todo aquellos emergentes.	<b>Asistencia</b> , en caso de fallas del sistema solo se podría contar con soporte remoto dificultando la operatividad del sistema.
<b>Falta de información</b> , sobre el impacto de un mal movimiento del grano de café y como esto influye en la calidad del producto final.	<b>Clima</b> , dado que puede llegar a afectar de manera directa a los equipos electrónicos debido a la alta humedad y temperatura.

**Tabla 3.8. Matriz FODA**

# CAPÍTULO IV

## 4.1. CONCLUSIONES

- La automatización del proceso de secado del grano de café se realizó en base a las consideraciones de uniformidad y homogeneidad requeridas para garantizar la calidad de un café de alta especialidad, disminuyendo así, los inconvenientes de incubación de hongos que pueden llegar a afectar la calidad sensorial del producto. Con esto, se logra garantizar un proceso tecnificado que aumenta la calidad del café y por consecuente eleva la capacidad de exportación hacia mercados internacionales.
- Para llevar a cabo la implementación del presente proyecto se debe optar por un motor de inducción monofásico o trifásico, dependiendo la alimentación eléctrica existente en la zona, dada la potencia y robustez que este tipo de motor puede ofrecer para la aplicación. Así mismo, se requeriría el uso de un variador de frecuencia para modular la velocidad del motor asegurando así una correcta transmisión mecánica del rastrillo sobre la superficie existente.
- Para tener un control de un correcto funcionamiento del motor es necesario contar con alarmas de sobre corriente y tensión que permitan conocer en tiempo real los fallos existentes. Para esto se debe incorporar alarmas dentro de la HMI con señales provenientes del driver o, en su defecto, del variador de velocidad a utilizar.
- El diseño del sistema automatizado, tanto en su parte mecánica como en la interfaz HMI, fue realizada bajo principios de diseño enfocados en mejorar la experiencia del usuario. El operario de forma intuitiva y bajo un autoaprendizaje asistido puede llegar a manipular el sistema sin mayores inconvenientes dada la practicidad y organización implementada en la programación de los equipos.

## 4.2. RECOMENDACIONES

- Para disminuir el riesgo de contaminación del producto se debe colocar el sistema mecánico del tornillo sin fin a un lado de la cama africana para evitar el contacto de la grasa lubricadora con los granos de café. De esta manera se puede contar con un sistema de goteo de lubricación autónomo que pueda garantizar una correcta operación del sistema y a su vez no preocuparse por posible contacto del lubricante con el producto final.
- Adaptar los materiales a utilizarse en el sistema mecánico al área o lugar de trabajo para que los mismos tengan un alto potencial de durabilidad asegurando la calidad y continuidad del proceso; logrando así, una comunicación directa entre el fabricante y el usuario mediante canales de comunicación que permitan dar una constante asistencia técnica al personal a cargo en cada uno de los lugares en los cuales se implementó el sistema.
- Ampliar la capacidad operativa del PLC incorporando nuevos procesos de la cadena productiva del café tales como el proceso de fermentación o el proceso de tueste incorporando los equipos necesarios en dichos casos. Así mismo, incorporar sensores para llevar un registro de la temperatura y humedad dentro de la marquesina complementando así los mecanismos manuales con los que se cuentan en las marquesinas.
- Expandir el prototipo propuesto para habilitar el control de motores adicionales recordando que el CPU seleccionado puede soportar hasta cuatro canales PTO. Para esto se debe manipular la programación realizada y a su vez incorporar ciertos equipos adicionales en las etapas de fuerza y control del sistema, sumado a la estructura mecánica adicional requerida.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN, «Café verde en grano. Clasificación y requisitos,» INEN, Quito, 2006.
- [2] D. F. R. Carvajal, «La humedad en el café,» Forum del Café, Huila, Colombia, 2018.
- [3] Ministerio de Agricultura y Ganadería, «Sembramos Futuro,» Comunicamos, Noticias, 22 Mayo 2019. [En línea]. Available: <https://www.agricultura.gob.ec/construyen-marquesinas-para-lograr-un-secado-de-calidad-del-cafe-en-loja/>.
- [4] G. Lizarzaburo, «Los precios suben, pero Ecuador no tiene café,» *Diario Expreso*, 26 02 2020.
- [5] K. Pesantes, «Ecuador se enfoca en el café de especialidad, ante los bajos precios en el mercado mundial,» *Primicias*, 14 Junio 2019.
- [6] Asociación Nacional de Exportadores de Café (ANECAFÉ), «anecafe.org.ec,» Septiembre 2020. [En línea]. Available: <https://www.anecafe.org.ec/wp-content/uploads/exportacion-variedad-2020.pdf>.
- [7] F. Cisneros, «5 Razones por las que el café de especialidad está emergiendo en Ecuador,» PERFECT DAILY GRIND, Quito, Ecuador, 2017.
- [8] J. Alvarez Hernandez, R. López Alzate y A. Gallo Cardona, «Centro Nacional de Investigaciones del Café (CENICAFÉ),» Diciembre 1978. [En línea]. Available: <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/874/1/avt0084.pdf>.
- [9] J. A. Pulgarín, «Sistemas de producción de café en Colombia,» de *Capítulo 2. Crecimiento y desarrollo de la planta de café*, Chinchiná, Colombia, Blanecolor Ltda, 2010, pp. 21-60.
- [10] M. Regalado, «Del grano a la taza: ¿Cómo cultivan café los productores?,» PERFECT DAILY GRIND, El Salvador, 2018.
- [11] I. L. Petrich, «Fermentación: ¿Qué es y como mejora la calidad del café?,» PERFECT DAILY GRIND, Brasil, 2018.
- [12] T. Pashley, «¿Por qué es importante el contenido de humedad del grano de café?,» PERFECT DAILY GRIND, Reino Unido, 2017.
- [13] M. G. Roa y G. J. Álvarez, «ceniface.org,» Febrero 2014. [En línea]. Available: <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/882/5/4.%20Secado%20del%20cafe%20C3%A9.pdf>.
- [14] J. Giner, «El tueste de café,» [En línea]. Available: [https://www.forumdelcafe.com/sites/default/files/biblioteca/f-37\\_tueste\\_de\\_cafe.pdf](https://www.forumdelcafe.com/sites/default/files/biblioteca/f-37_tueste_de_cafe.pdf).

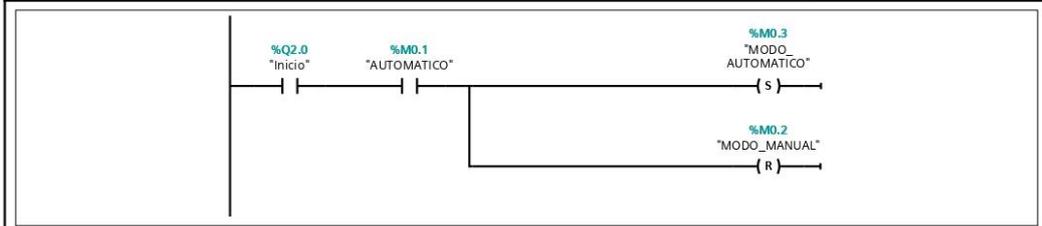
- [15] Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, «Secado del café pergamino,» [En línea]. Available: [https://www.cenicafe.org/es/publications/cartilla\\_21.\\_Secado\\_del\\_cafe.pdf](https://www.cenicafe.org/es/publications/cartilla_21._Secado_del_cafe.pdf).
- [16] International Coffee Organization, «Good Hygiene Practices along the coffee chain,» FAO.
- [17] A. B. Botella, «scl.es,» 8 Noviembre 2016. [En línea]. Available: <https://scl.es/blog/medir-y-controlar-la-humedad-en-la-produccion-de-cafe/>.
- [18] M. P. d. C. d. Loja, «Lot 9: Hacienda Santa Gertrudis,» [En línea]. Available: <https://www.bestofloja.com/en/lots/hacienda-santa-gertrudis>.
- [19] L. Acosta, «¿Ya probaste el café más caro del mundo?,» AFP, 3 Febrero 2020. [En línea]. Available: <https://www.ngenespanol.com/gastronomia/ya-probaste-el-cafe-mas-car-del-mundo/>.
- [20] COFFEE QUALITY INSTITUTE, «Manuel Diaz,» 2014. [En línea]. Available: [https://www.coffeeinstitute.org/q\\_instructors/manuel-diaz-2/](https://www.coffeeinstitute.org/q_instructors/manuel-diaz-2/).
- [21] A. K. M. Ospina, «Recomendaciones para proteger el café durante el secado y almacenamiento,» PERFECT DAILY GRIND, Colombia, 2017.
- [22] A. K. M. Ospina, «¿Cómo mejorar la calidad al secar cafés lavados?,» PERFECT DAILY GRIND, Colombia, 2017.
- [23] Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, «Rastrillo revolvedor para el secado solar del café pergamino,» CENICAFÉ, Colombia, 1991.
- [24] P. Landín, «Tornillo sin fin: descripción y aplicaciones,» 12 Febrero 2018. [En línea]. Available: <http://pelandintecno.blogspot.com/2018/02/tornillo-sin-fin-descripcion-y.html>.
- [25] N. R. Tague, «¿What is a decision matrix?,» American Society for Quality, 2005. [En línea]. Available: <https://asq.org/quality-resources/decision-matrix>.
- [26] J. Grass, «The 5 key UX design principles you need to know,» 5 Junio 2019. [En línea]. Available: <https://careerfoundry.com/en/blog/ux-design/5-key-principles-for-new-ux-designers/>.
- [27] C. E. Olivares Tascón y A. Álvarez Valencia, «Cosecha manual de café utilizando mallas plásticas,» Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (CENICAFÉ), Chinchiná, Colombia, 2006.
- [28] RAJA, «PACK abc,» [En línea]. Available: <https://www.abc-pack.com/noticias/diferencias-entre-polipropileno-y-poli-etileno/#:~:text=Por%20su%20parte%2C%20el%20polietileno,al%20impacto%20y%20al%20desgaste..>
- [29] JWWINCO, «Prons and Cons of Aluminum,» [En línea]. Available: <https://www.jwwinco.com/es-mx/technical/engineering-tips/pros-and-cons-of-aluminum>.

- [30] Motion Control Online Marketing Team, «What is Motion Control,» 9 Marzo 2019. [En línea]. Available: <https://www.motioncontrolonline.org/blog-article.cfm/What-is-Motion-Control/91>.
- [31] R. Marquiss, «Pulse Control Basics for Motion Control,» 4 Octubre 2019. [En línea]. Available: <https://www.machinedesign.com/mechanical-motion-systems/article/21838204/pulse-control-basics-for-motion-control>.
- [32] SIEMENS, «S7-1200 Motion Control V6.0 in TIA Portal V.15,» Diciembre 2017. [En línea]. Available: [https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/109754206/s71200\\_motion\\_control\\_function\\_manual\\_en-US\\_en-US.pdf](https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/109754206/s71200_motion_control_function_manual_en-US_en-US.pdf).
- [33] SURE STEP, «Stepping System Motors,» 2019. [En línea]. Available: <https://cdn.automationdirect.com/static/specs/surestepmotors.pdf>.
- [34] S. U. Posadas, «Motores paso a paso en impresión 3D (II): Criterios de selección de motores y drivers,» 30 Enero 2015. [En línea]. Available: <http://www.dima3d.com/motores-paso-a-paso-en-impresion-3d-ii-criterios-de-seleccion-de-motores-y-drivers/>.

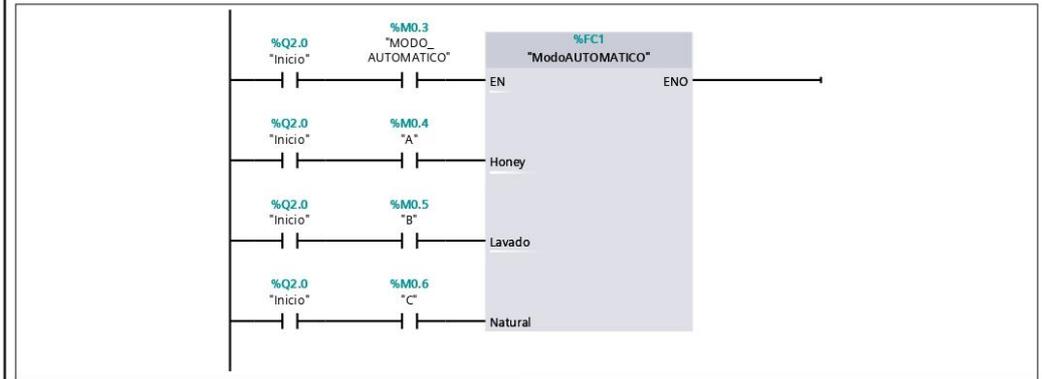
# APÉNDICES

## APÉNDICE A – PROGRAMACIÓN LADDER DEL PROYECTO

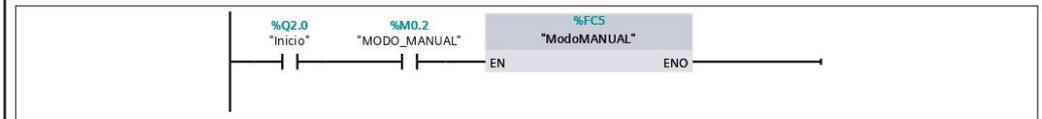
Totally Integrated Automation Portal		
<b>Rastrillo_Automatizado / Controlador [CPU 1212C DC/DC/DC] / Program blocks</b>		
<b>Main [OB1]</b>		
<b>Main Properties</b>		
<b>General</b>		
<b>Name</b>	Main	<b>Number</b> 1
<b>Language</b>	LAD	<b>Type</b> OB
		<b>Numbering</b> Automatic
<b>Information</b>		
<b>Title</b>	"Main Program Sweep (Cycle)"	<b>Author</b>
<b>Family</b>		<b>Version</b> 0.1
		<b>Comment</b>
		<b>User-defined ID</b>
<b>Main</b>		
<b>Name</b>	<b>Data type</b>	<b>Default value</b>
<b>Input</b>		
Initial_Call	Bool	
Remanance	Bool	
Temp		
Constant		
<b>Network 1:</b>		
<b>Network 2: ENCENDIDO DEL MODO MANUAL</b>		
<b>Network 3: ENCENDIDO DEL MODO AUTOMÁTICO</b>		



**Network 4: BLOQUE DEL MODO AUTOMÁTICO Y SELECCIÓN DEL TIPO DE CAFÉ**



**Network 5: BLOQUE DEL MODO MANUAL**



Totally Integrated Automation Portal		
--------------------------------------	--	--

**Rastrillo\_Automatizado / Controlador [CPU 1212C DC/DC/DC] / Program blocks**

**ModoAUTOMATICO [FC1]**

ModoAUTOMATICO Properties					
General					
<b>Name</b>	ModoAUTOMATICO	<b>Number</b>	1	<b>Type</b>	FC
<b>Language</b>	LAD	<b>Numbering</b>	Automatic		
Information					
<b>Title</b>		<b>Author</b>		<b>Comment</b>	
<b>Family</b>		<b>Version</b>	0.1	<b>User-defined ID</b>	

ModoAUTOMATICO			
Name	Data type	Default value	Comment
▼ Input			
Honey	Bool		
Lavado	Bool		
Natural	Bool		
Output			
InOut			
Temp			
Constant			
▼ Return			
ModoAUTOMATICO	Void		

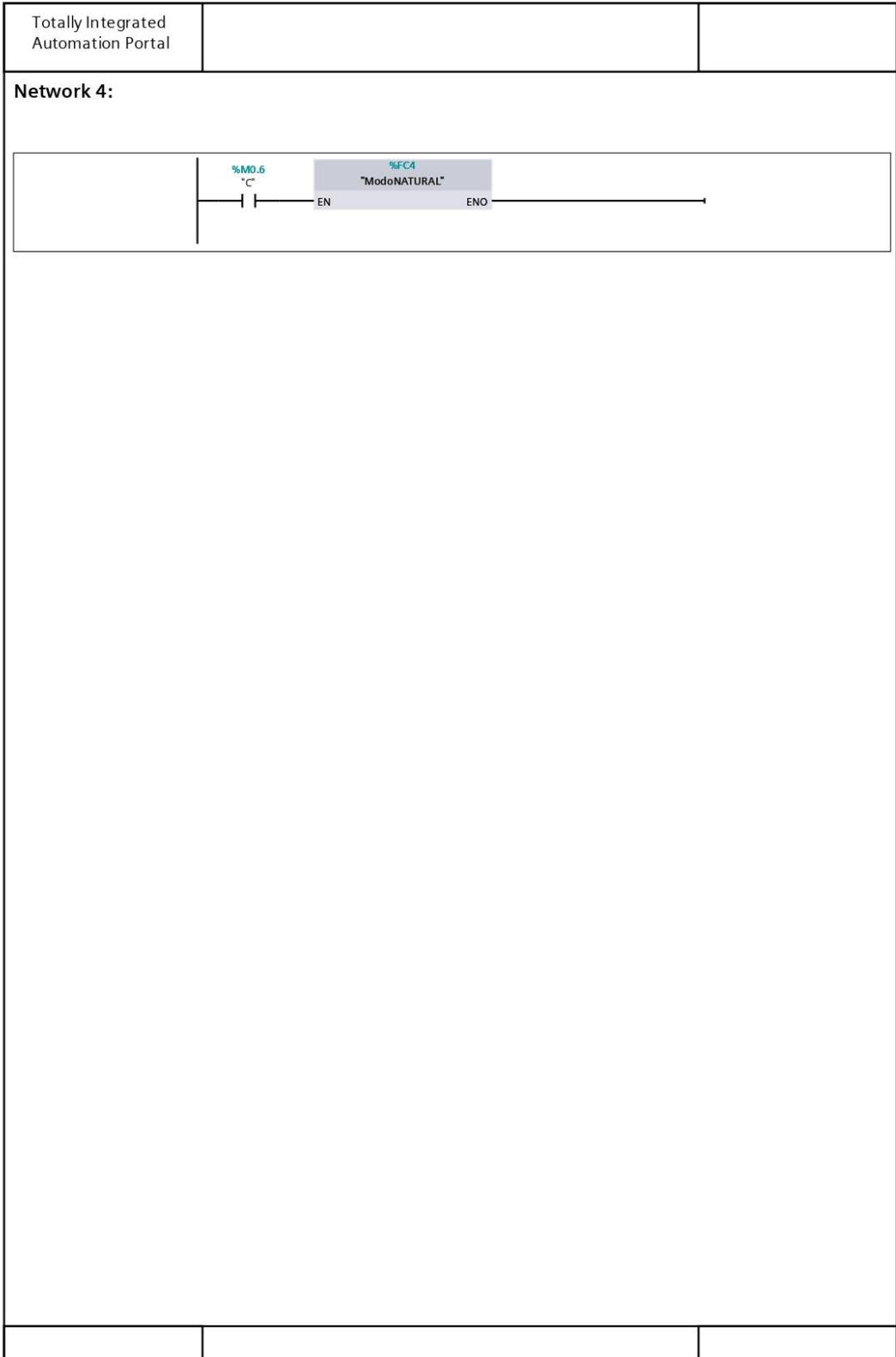
**Network 1:**

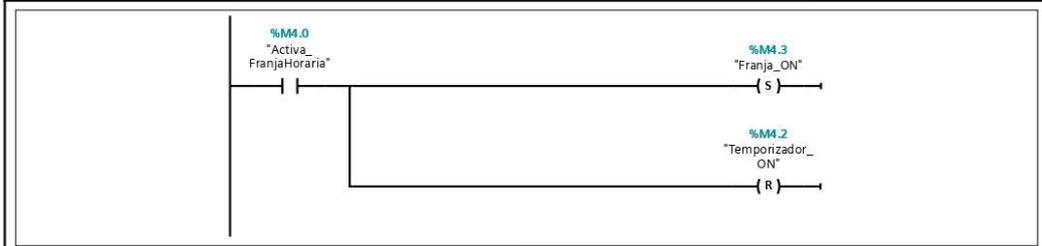
**Network 2:**

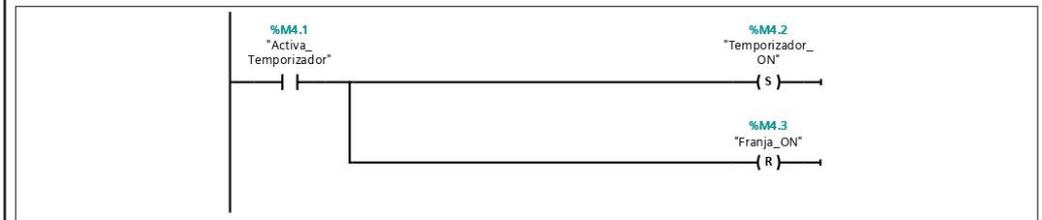
**Network 3:**



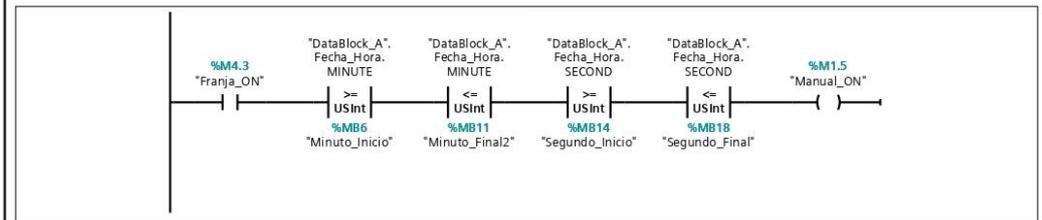
Totally Integrated Automation Portal																																																																																																		
<p><b>Rastrillo_Automatizado / Controlador [CPU 1212C DC/DC/DC] / Program blocks</b></p> <p><b>ModoMANUAL [FC5]</b></p> <p><b>ModoMANUAL Properties</b></p> <p><b>General</b></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 25%;"><b>Name</b></td> <td style="width: 25%;">ModoMANUAL</td> <td style="width: 25%;"><b>Number</b></td> <td style="width: 25%;">5</td> <td style="width: 25%;"><b>Type</b></td> <td style="width: 25%;">FC</td> </tr> <tr> <td><b>Language</b></td> <td>LAD</td> <td><b>Numbering</b></td> <td>Automatic</td> <td></td> <td></td> </tr> </table> <p><b>Information</b></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%;"><b>Title</b></td> <td style="width: 33%;"></td> <td style="width: 33%;"><b>Author</b></td> <td style="width: 33%;"></td> <td style="width: 33%;"><b>Comment</b></td> <td style="width: 33%;"></td> </tr> <tr> <td><b>Family</b></td> <td></td> <td><b>Version</b></td> <td>0.1</td> <td><b>User-defined ID</b></td> <td></td> </tr> </table> <p><b>ModoMANUAL</b></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 40%;">Name</th> <th style="width: 20%;">Data type</th> <th style="width: 20%;">Default value</th> <th style="width: 20%;">Comment</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Input</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Output</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>InOut</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>▼ Temp</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>  MINUTO_CONV</td><td>USInt</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>  MINUTO_CONV2</td><td>USInt</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>  SEGUNDO_CONV</td><td>USInt</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>  SEGUNDO_CONV2</td><td>USInt</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>  Franja</td><td>Bool</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>  Minutos_</td><td>DInt</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>  Conversion</td><td>Time</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>  ContandoM</td><td>Int</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>  Tiempo_Actual</td><td>Time</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>  tiempo_dn</td><td>Time</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>  Constant</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>▼ Return</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>  ModoMANUAL</td><td>Void</td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table> <p><b>Network 1:</b></p> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin: 10px 0;"> </div> <p><b>Network 2: ENCENDIDO DE FRANJA HORARIA</b></p>			<b>Name</b>	ModoMANUAL	<b>Number</b>	5	<b>Type</b>	FC	<b>Language</b>	LAD	<b>Numbering</b>	Automatic			<b>Title</b>		<b>Author</b>		<b>Comment</b>		<b>Family</b>		<b>Version</b>	0.1	<b>User-defined ID</b>		Name	Data type	Default value	Comment	Input				Output				InOut				▼ Temp				MINUTO_CONV	USInt			MINUTO_CONV2	USInt			SEGUNDO_CONV	USInt			SEGUNDO_CONV2	USInt			Franja	Bool			Minutos_	DInt			Conversion	Time			ContandoM	Int			Tiempo_Actual	Time			tiempo_dn	Time			Constant				▼ Return				ModoMANUAL	Void		
<b>Name</b>	ModoMANUAL	<b>Number</b>	5	<b>Type</b>	FC																																																																																													
<b>Language</b>	LAD	<b>Numbering</b>	Automatic																																																																																															
<b>Title</b>		<b>Author</b>		<b>Comment</b>																																																																																														
<b>Family</b>		<b>Version</b>	0.1	<b>User-defined ID</b>																																																																																														
Name	Data type	Default value	Comment																																																																																															
Input																																																																																																		
Output																																																																																																		
InOut																																																																																																		
▼ Temp																																																																																																		
MINUTO_CONV	USInt																																																																																																	
MINUTO_CONV2	USInt																																																																																																	
SEGUNDO_CONV	USInt																																																																																																	
SEGUNDO_CONV2	USInt																																																																																																	
Franja	Bool																																																																																																	
Minutos_	DInt																																																																																																	
Conversion	Time																																																																																																	
ContandoM	Int																																																																																																	
Tiempo_Actual	Time																																																																																																	
tiempo_dn	Time																																																																																																	
Constant																																																																																																		
▼ Return																																																																																																		
ModoMANUAL	Void																																																																																																	



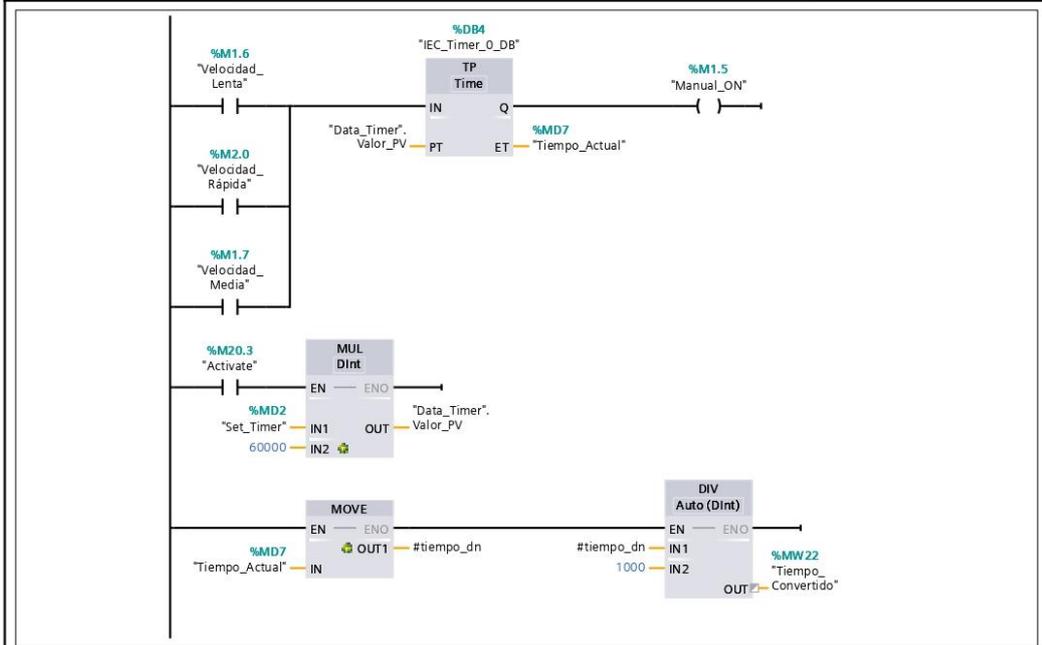
**Network 3: ENCENDIDO DE TEMPORIZADOR**



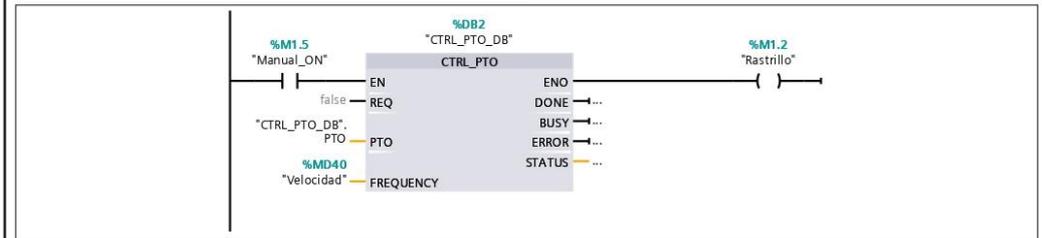
**Network 4:**



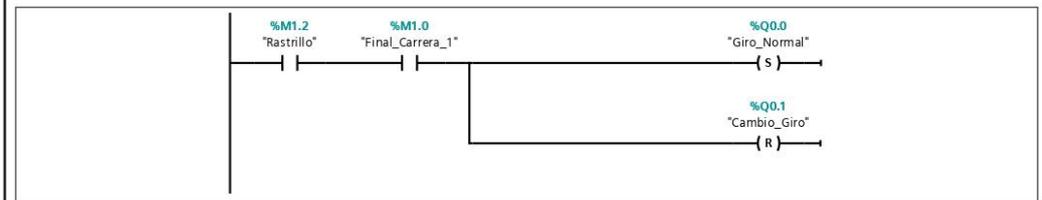
**Network 5:**



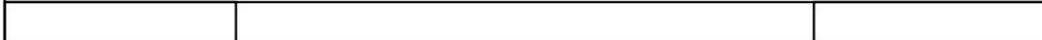
Network 6:

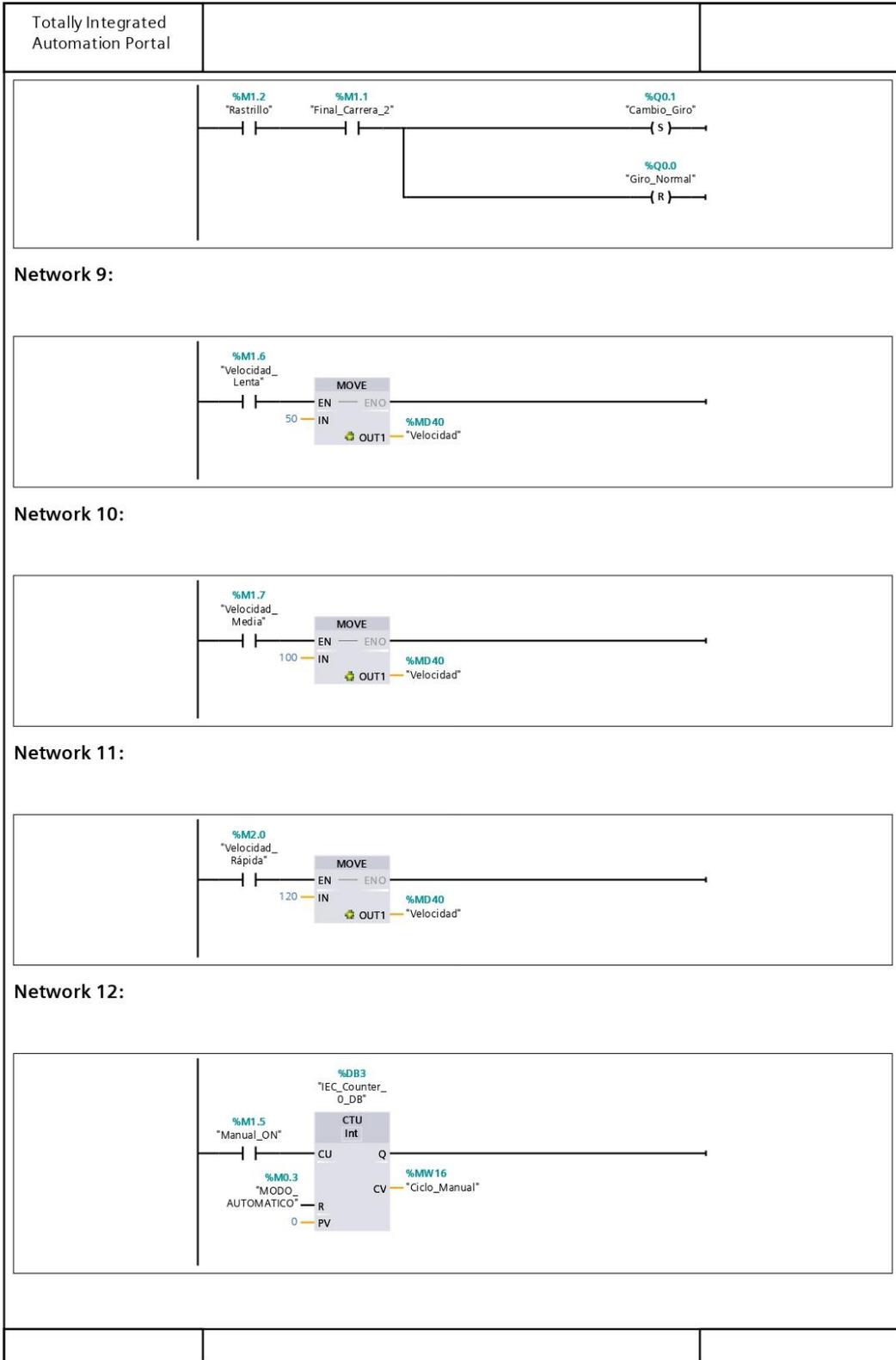


Network 7:



Network 8:





Totally Integrated Automation Portal		
--------------------------------------	--	--

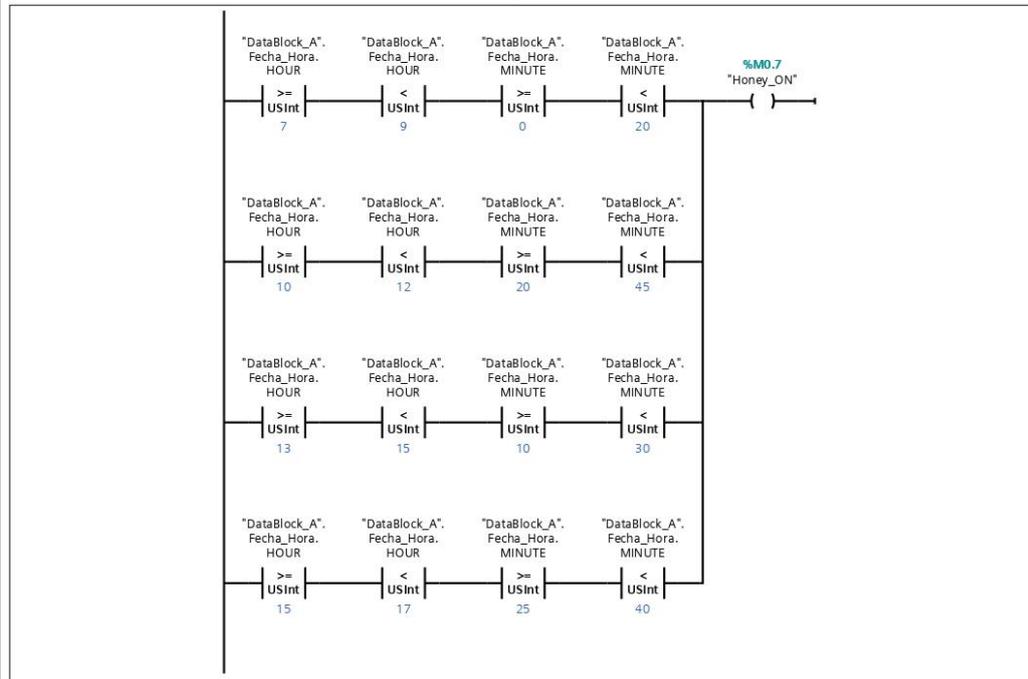
## Rastrillo\_Automatizado / Controlador [CPU 1212C DC/DC/DC] / Program blocks

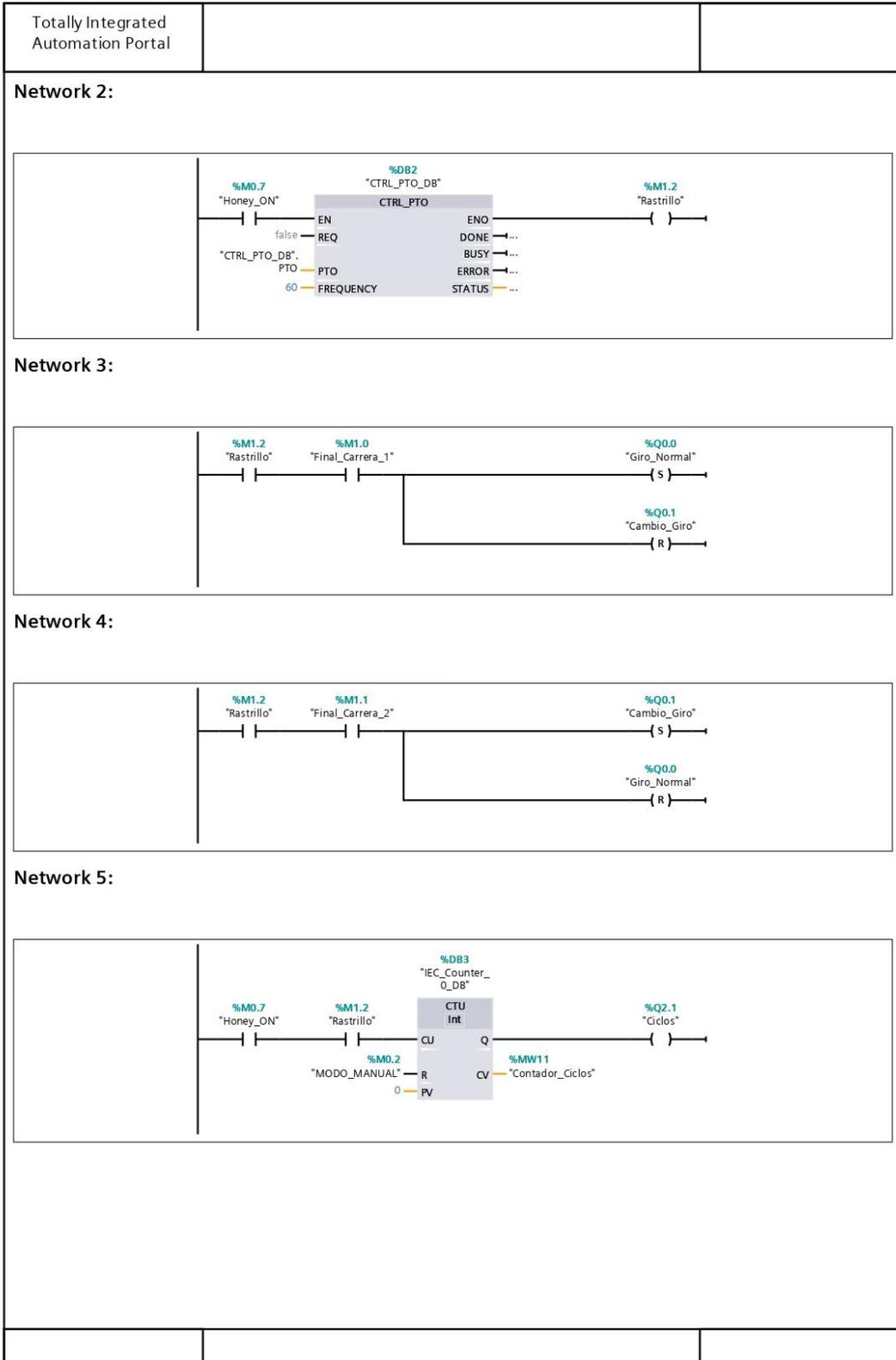
### ModoHONEY [FC2]

ModoHONEY Properties					
General					
Name	ModoHONEY	Number	2	Type	FC
Language	LAD	Numbering	Automatic		
Information					
Title		Author		Comment	
Family		Version	0.1	User-defined ID	

ModoHONEY			
Name	Data type	Default value	Comment
Input			
Output			
InOut			
▼ Temp			
Contando	Int		
Constant			
▼ Return			
ModoHONEY	Void		

### Network 1:





Totally Integrated Automation Portal		
--------------------------------------	--	--

## Rastrillo\_Automatizado / Controlador [CPU 1212C DC/DC/DC] / Program blocks

### ModoLAVADO [FC3]

#### ModoLAVADO Properties

##### General

<b>Name</b>	ModoLAVADO	<b>Number</b>	3	<b>Type</b>	FC
<b>Language</b>	LAD	<b>Numbering</b>	Automatic		

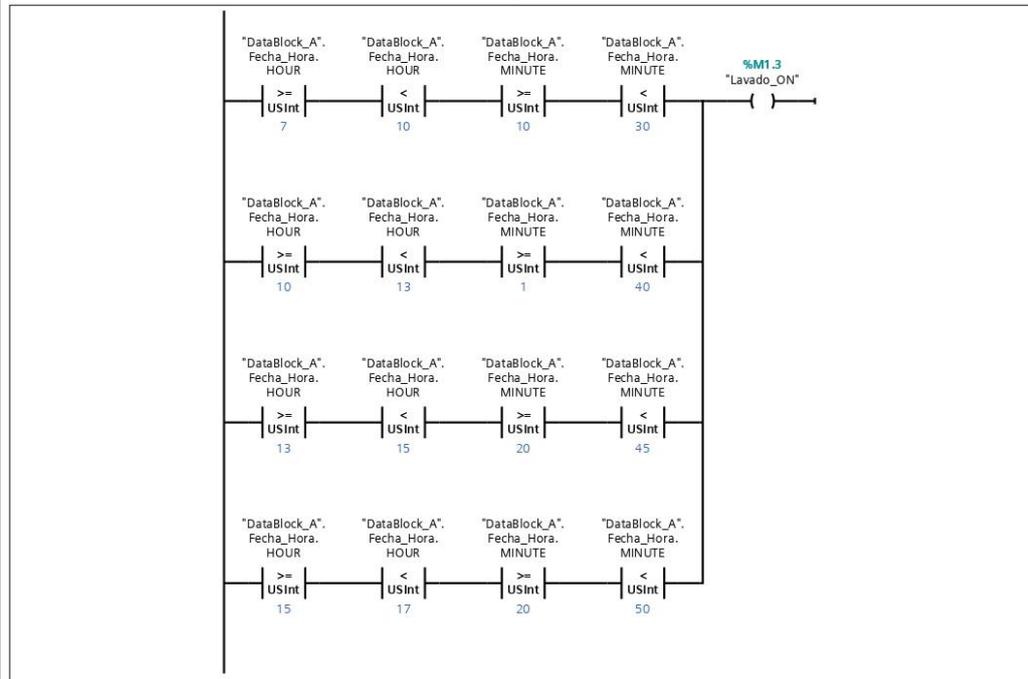
##### Information

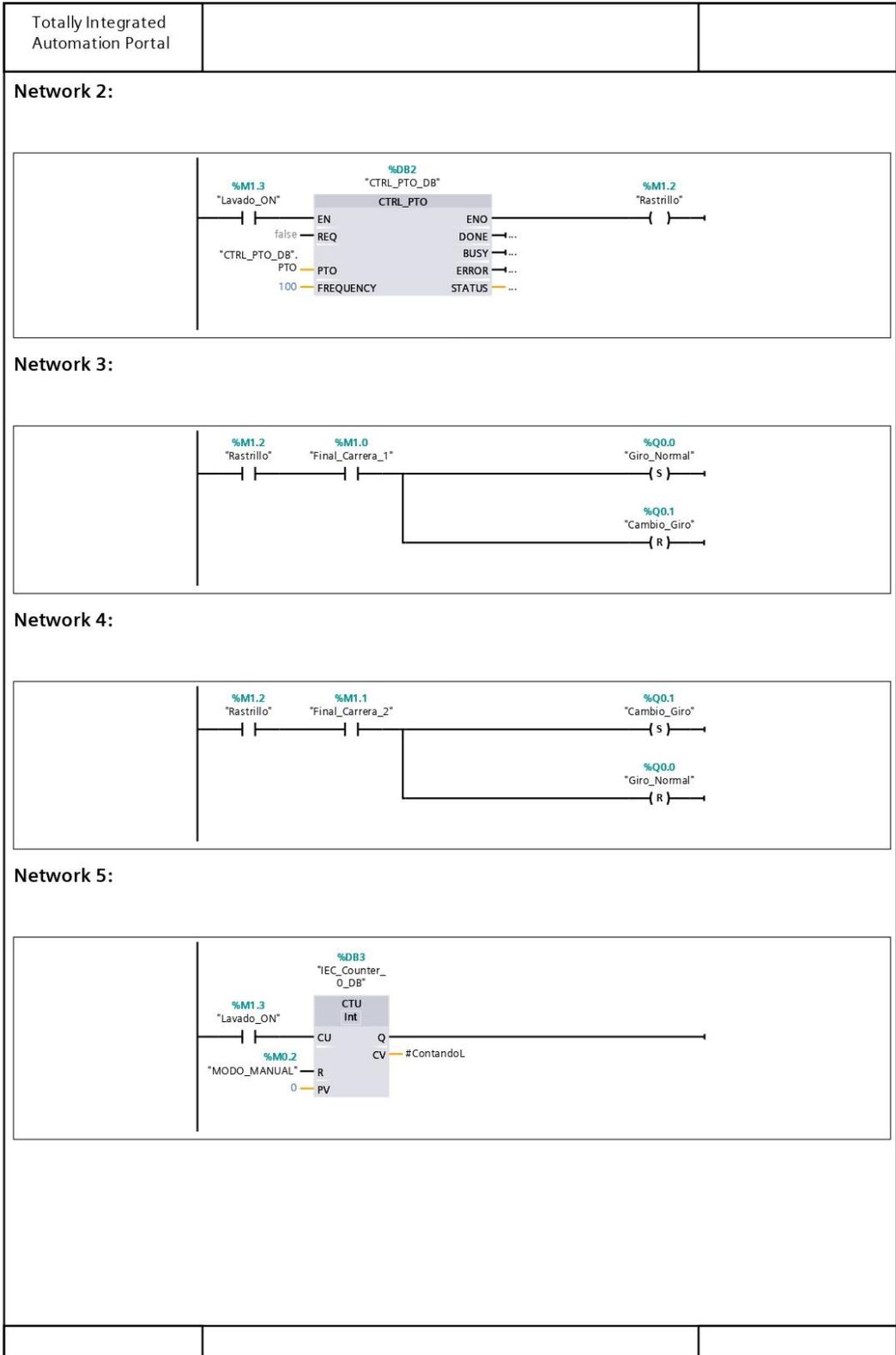
<b>Title</b>		<b>Author</b>		<b>Comment</b>	
<b>Family</b>		<b>Version</b>	0.1	<b>User-defined ID</b>	

#### ModoLAVADO

Name	Data type	Default value	Comment
Input			
Output			
InOut			
▼ Temp			
ContandoL	Int		
Constant			
▼ Return			
ModoLAVADO	Void		

#### Network 1:





Totally Integrated Automation Portal		
--------------------------------------	--	--

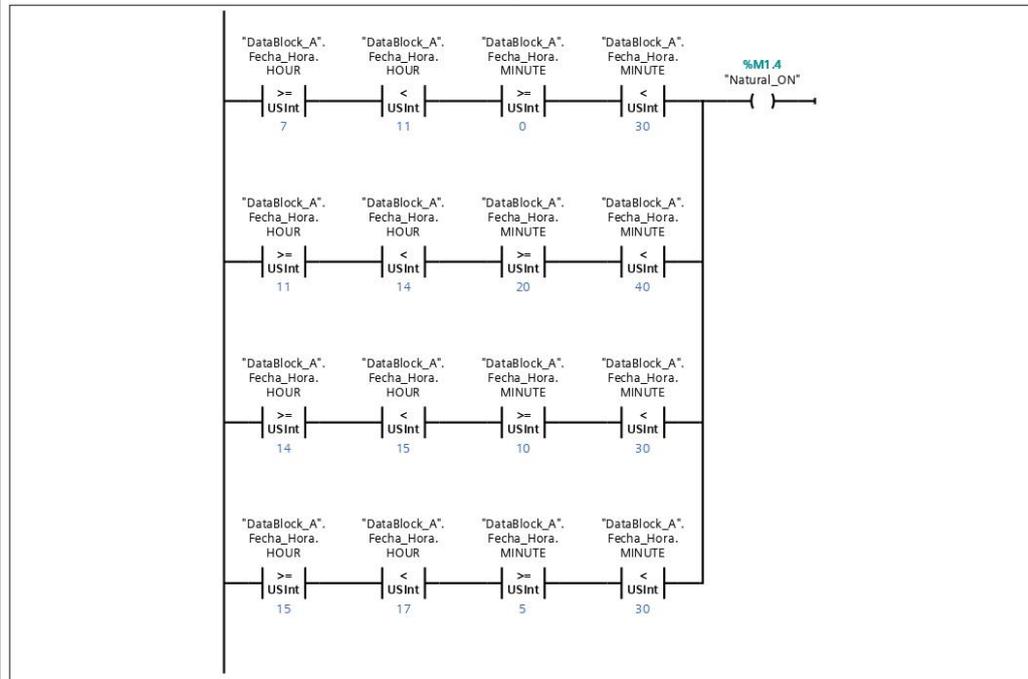
## Rastrillo\_Automatizado / Controlador [CPU 1212C DC/DC/DC] / Program blocks

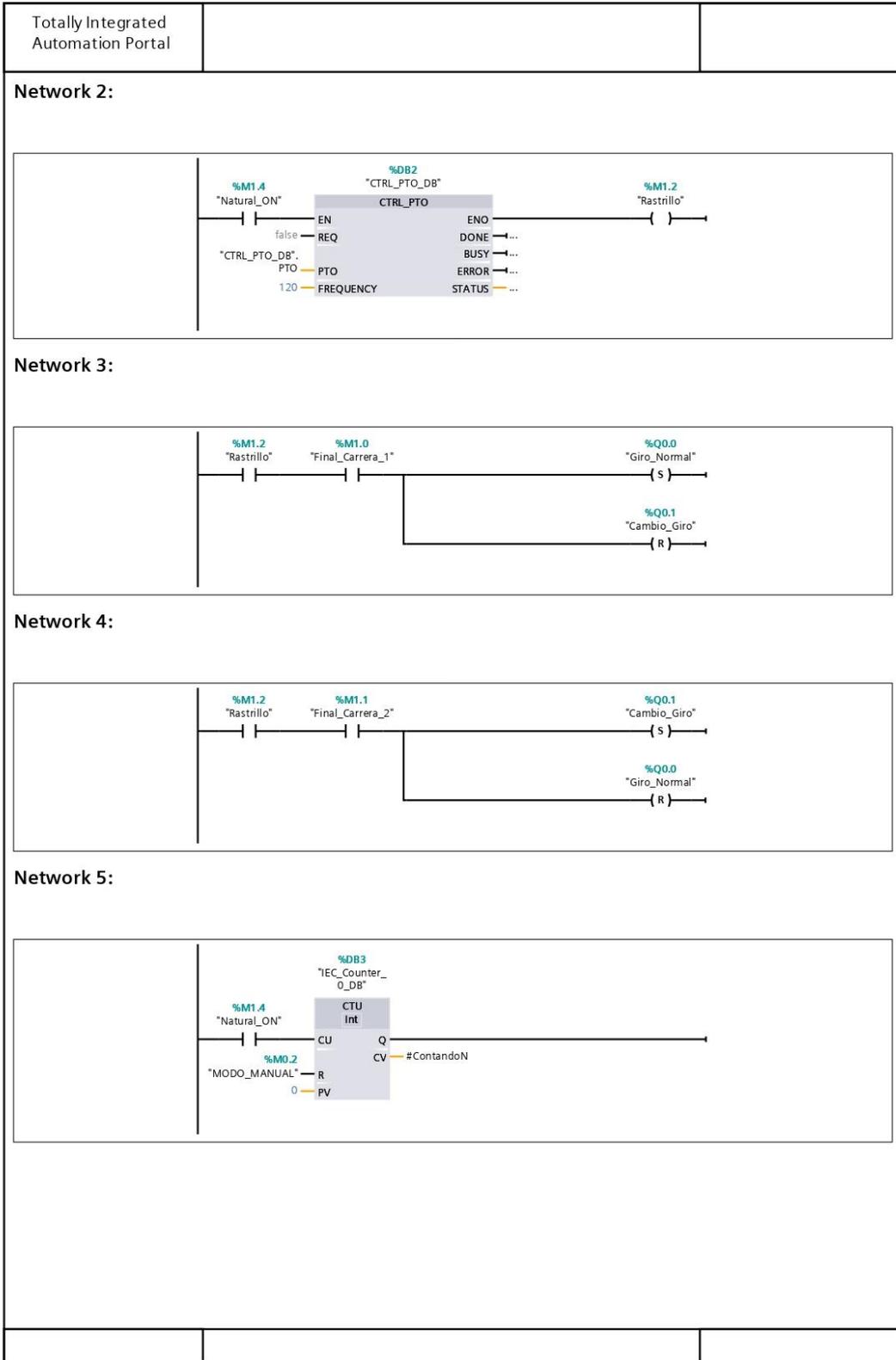
### ModoNATURAL [FC4]

ModoNATURAL Properties					
General					
Name	ModoNATURAL	Number	4	Type	FC
Language	LAD	Numbering	Automatic		
Information					
Title		Author		Comment	
Family		Version	0.1	User-defined ID	

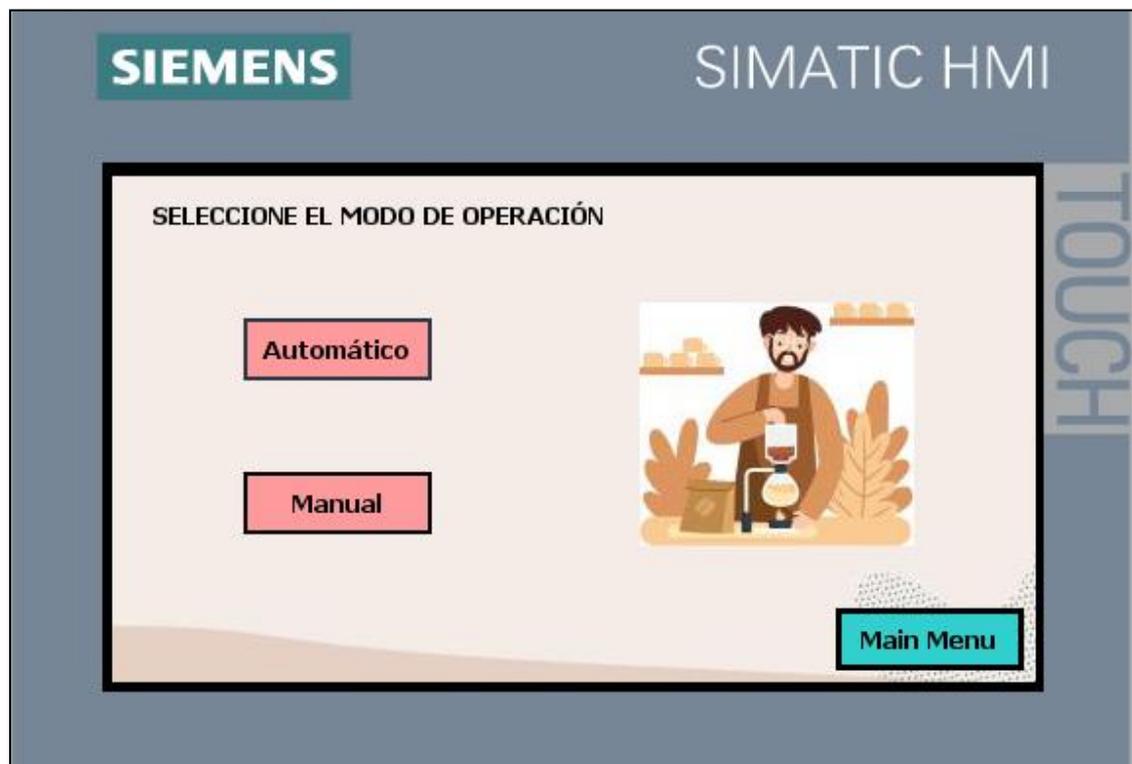
ModoNATURAL			
Name	Data type	Default value	Comment
Input			
Output			
InOut			
▼ Temp			
ContandoN	Int		
Constant			
▼ Return			
ModoNATURAL	Void		

### Network 1:





## APÉNDICE B – INTERFAZ HMI



SELECCIONA SU TIPO DE CAFÉ



Honey



Lavado



Natural

Main Menu

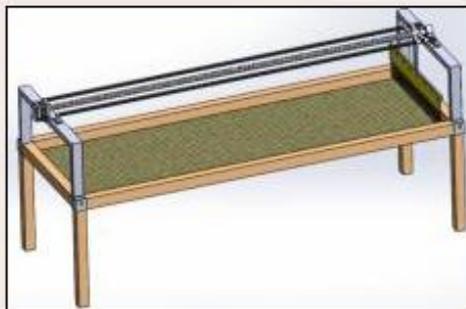
PROCESO DE SECADO

2/8/2021 8:17:59 AM

CAFÉ TIPO HONEY

CICLOS PROGRAMADOS

07:00 - 08:00  
10:00 - 11:00  
13:00 - 14:00  
16:00 - 17:00



Número de ciclos

1

Main Menú

PROCESO DE SECADO

2/8/2021 8:18:28 AM

CAFÉ TIPO LAVADO



CICLOS PROGRAMADOS

- 07:00 - 08:00
- 10:00 - 11:00
- 13:00 - 14:00
- 16:00 - 17:00



Número de ciclos

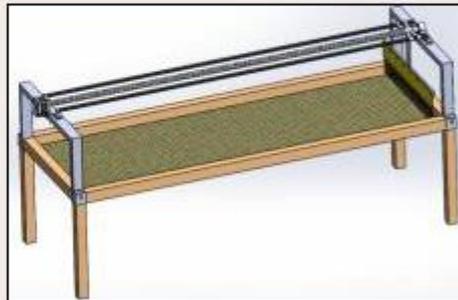
1

Main Menú

PROCESO DE SECADO

2/8/2021 8:18:55 AM

CAFÉ TIPO NATURAL



CICLOS PROGRAMADOS

- 07:00 - 08:00
- 10:00 - 11:00
- 13:00 - 14:00
- 16:00 - 17:00



Número de ciclos

1

Main Menú

SELECCIONE EL TIPO DE OPERACIÓN

Franja Horaria

Temporizador



Main Menu

Franja Horaria

2/8/2021 8:19:20 AM

Tiempo de Encendido

Hora Minuto

0 : 0

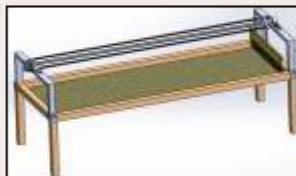
Tiempo de Apagado

Hora Minuto

0 : 0

Intervalo

1 veces



Velocidad

1 Lenta

2 Medio

3 Rápido

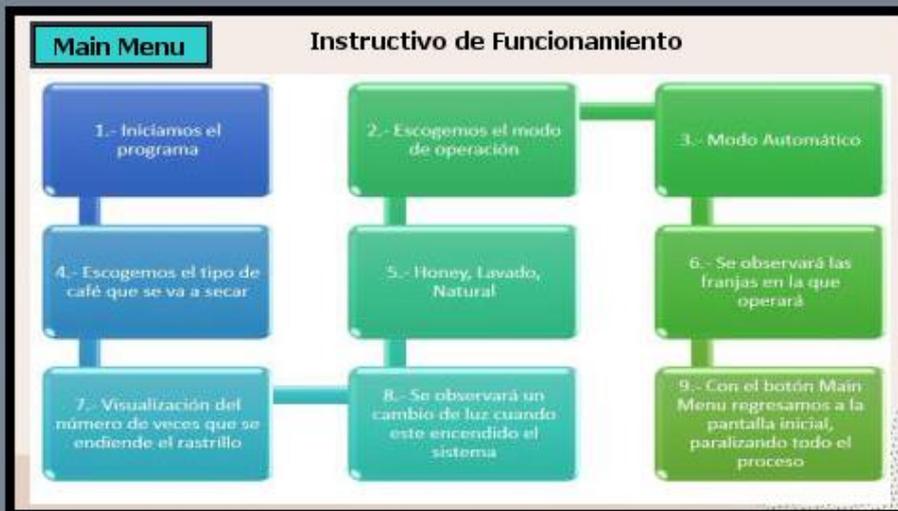


Main Menu

MODO TEMPORIZADOR  2/8/2021 8:19:47 AM

Tiempo de movimiento	Velocidad	Número de ciclos
0 minutos	 Lenta	1
<b>Activador</b>	 Media	Tiempo transcurrido
	 Rápido	0 s

**Main Menu**



**Main Menu**

**Instructivo de Funcionamiento**



**Main Menu**

**Instructivo de Funcionamiento**



## APÉNDICE C – COTIZACIÓN DE LOS EQUIPOS

No.	Referencia	Cantidad	Pr.Unitario		
1	<b>6ES7212-1AE40-0XB0</b>	1 pieza			
	SIMATIC S7-1200, CPU 1212C, CPU compacta, DC/DC/DC, I/O integrada: 8 DI DC 24V; 6 DO 24V DC; 2 AI 0-10V DC, alimentación: DC 20,4-28,8V DC, Memoria de programas/datos 75 KB		Precio unitario Oferta	322,92 USD	<b>322,92 USD</b>
	Price Group	_F			
	Regulaciones de control de exportación	AL:N/ ECCN:EAR99H			
	Commodity code	85371091			
	Peso neto (kg)	0,340			
	País de origen	CN			
	F.entrega NO vinculante	25.03.2021 (Fecha creación de la oferta 07.02.2021)			
	Non-binding delivery days	33 días			
2	<b>100286477</b> <b>6AV2123-2DB03-0AX0</b>	1 pieza			
	SIMATIC HMI, KTP400 Basic, Basic Panel, Manejo con teclado/táctil, pantalla TFT de 4", 65536 colores, Interfaz PROFINET, configurable a partir de WinCC Basic V13/ STEP 7 Basic V13, incluye software Open Source, que se cede gratuitamente ver CD adjunto		Precio unitario Oferta	758,00 USD	<b>758,00 USD</b>
	Price Group	PX			
	Regulaciones de control de exportación	AL:N/ ECCN:EAR99H			
	Commodity code	85371098			
	Peso neto (kg)	0,459			
	País de origen	CN			
	F.entrega NO vinculante	09.02.2021 (Fecha creación de la oferta 07.02.2021)			
	Non-binding delivery days	1 día			
3	<b>6ES5710-8MA11</b>	1 pieza			
	SIMATIC, perfil DIN 35mm, Longitud 483 mm para armarios de 19"		Precio unitario Oferta	39,90 USD	<b>39,90 USD</b>
	Price Group	_F			
	Regulaciones de control de exportación	AL:N/ ECCN:N			
	Commodity code	76169990			
	Peso neto (kg)	0,440			
	País de origen	DE			
	F.entrega NO vinculante	30.04.2021 (Fecha creación de la oferta 07.02.2021)			
	Non-binding delivery days	59 días			
				<b>Precio Total</b>	<b>1.120,82 USD</b>



**AUTOMATIONDIRECT.COM, INC.**

**QUOTATION**

**REMIT PAYMENTS TO:**  
 P.O. BOX 402417  
 ATLANTA, GA 30384-2417  
 MAIN: 800-633-0405/770-889-2858  
 FAX: 770-889-7876

Quote# 6417181GBGF	
QUOTE DATE	PAGE
February 7, 2021	1 of 2
Pricing is valid for 30 days	

**QUOTATION FOR:**

**SHIPPING ADDRESS:**

_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____

**CUSTOMER ID: GUEST**  
**CUSTOMER EMAIL:**

**PREPARED BY: ONLINE**

ITEM CODE	DESCRIPTION	PRICE	QUANTITY	STOCK STATUS	TOTAL
STP-MTR-17060	SureStep stepper motor, NEMA 17 frame, IP40, single shaft, 2A, 115 oz-in holding torque, 1.8-degree step angle, 200 steps per revolution, bipolar. Requires STP-EXT-xxx cable.	\$38.50	1	In Stock	38.50
STP-EXT-010	SureStep extension cable, 4-pin connector to pigtail, 10ft cable length. For use with SureStep MTR series stepper motors.	\$12.50	1	In Stock	12.50
DM542E	Leadshine DC microstepping stepper drive, 4.2A per phase, 2-phase output, 24-48 VDC, bipolar, position mode, 400 to 25600 steps per revolution.	\$36.00	1	In Stock	36.00
PSB24-120S	RHINO SELECT PSB series switching power supply, 22-28 VDC output, 5A, 120W, 120/240 VAC or 120-375 VDC nominal input, 1-phase, enclosed, aluminum housing, 35mm DIN rail mount, removable screw terminal, hazardous location rated.	\$82.00	2	In Stock	164.00
7000-74001-0000000	Field wireable connector, RJ45 4-pole Ethernet male axial, accepts cable diameter size 4.5-9mm, 26-22 AWG, insulation displacement (IDC) connection, shielded, IP20. Exceeds Category 5E specifications.	\$16.00	2	In Stock	32.00
AEP2G41Z11-1	Compact limit switch, side rotary lever with 14mm nylon roller, (1) N.O./ (1) N.C. contact(s), snap action, 35mm wide body, plastic, pigtail, 3.2ft/1m cable length, bottom exit.	\$16.00	2	In Stock	32.00

**SUB TOTAL: \$315.00**