



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA
ENERGÍA Y MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO**

**TEMA: REDISEÑO Y AUTOMATIZACIÓN DEL PROTOTIPO
DE MÁQUINA SECADORA DE CACAO, PROPIEDAD DE LA
EMPRESA CACAO 3H UBICADA EN EL CANTÓN CUMANDÁ,
PARA OBTENER LA MEJOR CALIDAD DE GRANO SECO EN
FUNCIÓN DE LA PRODUCCIÓN, MEDIANTE EL REDISEÑO
DE SUS SUBSISTEMAS MECÁNICO Y ELÉCTRICO Y LA
ADICIÓN DE UN SUBSISTEMA ELECTRÓNICO DE CONTROL**

AUTOR: LUIS CLINTON SEMANATE ESQUIVEL

DIRECTOR: ING. SYLVIA NATHALY REA MINANGO

LATACUNGA

2018



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA
ENERGÍA Y MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, ***“REDISEÑO Y AUTOMATIZACIÓN DEL PROTOTIPO DE MÁQUINA SECADORA DE CACAO, PROPIEDAD DE LA EMPRESA CACAO 3H UBICADA EN EL CANTÓN CUMANDÁ, PARA OBTENER LA MEJOR CALIDAD DE GRANO SECO EN FUNCIÓN DE LA PRODUCCIÓN, MEDIANTE EL REDISEÑO DE SUS SUBSISTEMAS MECÁNICO Y ELÉCTRICO Y LA ADICIÓN DE UN SUBSISTEMA ELECTRÓNICO DE CONTROL”*** realizado por el señor ***LUIS CLINTON SEMANATE ESQUIVEL***, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar al señor ***LUIS CLINTON SEMANATE ESQUIVEL*** para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 12 de marzo de 2018

ING. SYLVIA NATHALY REA MINANGO
DIRECTOR



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA
ENERGÍA Y MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **LUIS CLINTON SEMANATE ESQUIVEL**, con cédula de ciudadanía N°1716439763 declaro que este trabajo de titulación “**REDISEÑO Y AUTOMATIZACIÓN DEL PROTOTIPO DE MÁQUINA SECADORA DE CACAO, PROPIEDAD DE LA EMPRESA CACAO 3H UBICADA EN EL CANTÓN CUMANDÁ, PARA OBTENER LA MEJOR CALIDAD DE GRANO SECO EN FUNCIÓN DE LA PRODUCCIÓN, MEDIANTE EL REDISEÑO DE SUS SUBSISTEMAS MECÁNICO Y ELÉCTRICO Y LA ADICIÓN DE UN SUBSISTEMA ELECTRÓNICO DE CONTROL**” ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Latacunga, 12 de marzo de 2018

LUIS CLINTON SEMANATE ESQUIVEL

C.C.:1716439763



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA
ENERGÍA Y MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Yo, **LUIS CLINTON SEMANATE ESQUIVEL**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en el repositorio de la institución el trabajo de titulación **“REDISEÑO Y AUTOMATIZACIÓN DEL PROTOTIPO DE MÁQUINA SECADORA DE CACAO, PROPIEDAD DE LA EMPRESA CACAO 3H UBICADA EN EL CANTÓN CUMANDÁ, PARA OBTENER LA MEJOR CALIDAD DE GRANO SECO EN FUNCIÓN DE LA PRODUCCIÓN, MEDIANTE EL REDISEÑO DE SUS SUBSISTEMAS MECÁNICO Y ELÉCTRICO Y LA ADICIÓN DE UN SUBSISTEMA ELECTRÓNICO DE CONTROL”** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Latacunga, 12 de marzo de 2018

LUIS CLINTON SEMANATE ESQUIVEL

C.C.:1716439763

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación es dedicado a mi familia, a mis padres, hermanas quienes han sido parte fundamental para desarrollar este proyecto en todo este tiempo. A mis amigos y todos los que me prestaron su ayuda y guía, a ellos los que me dieron grandes enseñanzas siendo los principales protagonistas de este sueño tan anhelado.

Clinton.

AGRADECIMIENTO

Mis sinceros agradecimientos están dirigidos hacia QueveExport por su guía y colaboración desinteresada, a Mecánica Martínez, que me brindó información relevante y muy importante. A mi familia por siempre brindarme su apoyo, tanto sentimental como económico. Principalmente mis agradecimientos a mi tutora y amiga Nathaly Rea, gracias a ella se culminó con éxito este proyecto.

Gracias Dios, gracias padres y hermanos.

Clinton.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA	i
CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
ÍNDICE DE ECUACIONES	xiv
RESUMEN	xv
ABSTRACT	xvi
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Planteamiento del problema	2
1.3. Descripción resumida del proyecto	3
1.4. Justificación e importancia	4
1.5. Objetivos del proyecto.....	5
1.5.1. Objetivo general	5
1.5.2. Objetivos específicos	6
1.6. Hipótesis	6
1.7. Variables de la investigación.....	7

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO	8
2.1. El cacao en Ecuador	8
2.1.1. Definición	8
2.1.2. Características	9
2.1.3. Cosecha de cacao	10
2.1.4. Fermentación	11
2.1.5. Secado	11
2.1.6. Quemadores	14
A. Características de los quemadores.....	14
B. Tipos de quemadores	15
2.2. Gas licuado de petróleo (GLP).....	18
2.2.1. Propiedades físicas del GLP	18
2.2.2. Cilindros de GLP	21
2.2.3. Emisiones del GLP	21
2.2.4. Seguridad del GLP	22
2.3. Motorreductor	23
2.3.1. Funcionamiento.....	23
2.3.2. Torque en un motorreductor	25
2.3.3. Cálculo de la potencia necesaria en un motorreductor	26
2.3.4. Clasificación de los motorreductores	27
2.3.5. Variadores de velocidad.....	27
2.3.6. Sistema de recirculación	32
2.3.7. Recirculación del aire caliente	32
2.3.8. Filtros	33

CAPÍTULO III

DISEÑO MECATRÓNICO	36
3.1. Establecimiento y ponderación de requerimientos	36
3.1.1. Requisitos del cliente	37
3.1.2. Características técnicas	37
3.1.3. Análisis de resultados de la matriz QFD	39
3.2. Diseño Base	40
3.2.1. Componentes del secador	40
3.3. Rediseño y optimización	47
3.3.1. Rediseño de componentes mecánicos	47
3.3.2. Selección de los componentes eléctricos y electrónicos	52
3.3.3. Sistema de recirculación del aire	57

CAPÍTULO IV

IMPLEMENTACIÓN Y RECONSTRUCCIÓN	60
4.1. Estructura mecánica	60
4.2. Estructura del quemador	60
4.3. Estructura del contenedor	61
4.4. Estructura de paletas para remoción	63

CAPÍTULO V

PRUEBAS Y RESULTADOS	67
5.1. Validación de la Hipótesis	71
5.1.1. Hipótesis nula (Ho) y alternativa (H1)	72
5.1.2. Valores observados	72
5.1.3. Valores esperados	73

5.1.4. Estadístico de prueba	x	74
5.1.5. Consumo Energético.....		76
CAPÍTULO VI		
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		77
6.1. Conclusiones.....		77
6.2. Recomendaciones		79
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		80
ANEXOS		86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Clasificación de los quemadores atmosféricos	15
Tabla 2	Relación presión-temperatura del propano puro, butano y GLP. 19	
Tabla 3	Propiedades del propano, butano y mezcla de GLP 60:40.....	20
Tabla 4	Datos físicos para varios cilindros de GLP	21
Tabla 5	Clasificación de motorreductores	27
Tabla 6	Tipos de temporizadores.....	30
Tabla 7	Tipos de electroválvulas y funcionamiento	31
Tabla 8	Requisitos del cliente	37
Tabla 9	Características técnicas	37
Tabla 10	Valoración simbólica	38
Tabla 11	Despliegue de la matriz QFD	39
Tabla 12	Solución de sub-problemas de conceptos	42
Tabla 13	Comparación de los sistemas de alimentación del prototipo	44
Tabla 14	Comparación de contenedores para el grano	44
Tabla 15	Comparación de sensores de temperatura	45
Tabla 16	Comparación de sensores de humedad	45
Tabla 17	Comparación de tipos de calefactores	46
Tabla 18	Comparación de removedores de granos	47
Tabla 19	Sentido de las paletas en grados.....	48
Tabla 20	Resultados obtenidos por número de paleta	50
Tabla 21	Características del variador de frecuencia CFW100.....	53
Tabla 22	Tabla de resultados.....	70
Tabla 23	Tabla de valores observados	73
Tabla 24	Valores esperados	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Exportación total de cacao ecuatoriano	1
Figura 2	Cacao ecuatoriano	9
Figura 3	Cosecha del cacao	10
Figura 4	Secado natural de cacao	13
Figura 5	Esquema de una secadora de cacao artificial	13
Figura 6	Secadora de cacao industrial	14
Figura 7	Esquema de un quemador automático con aire presurizado	16
Figura 8	Diseños de cabezales del quemador presurizado	17
Figura 9	Presentación de cilindros de gas	22
Figura 10	Motorreductores Siemens	23
Figura 11	Relación de reducción por medio de ruedas	24
Figura 12	Componentes internos de un motorreductor	24
Figura 13	Motorreductor	25
Figura 14	Torque actuando en un motorreductor	26
Figura 15	Máquina de Corriente Continua (CC)	29
Figura 16	Efectos de la recirculación de aire	32
Figura 17	Esquema de circulación de aire con recuperación de calor	33
Figura 18	Partes de Filtro Secador	35
Figura 19	Método de despliegue QFD	36
Figura 20	Porcentaje de ponderación obtenido de matriz QFD	40
Figura 21	Secadora de cacao por combustión	43
Figura 22	Secadora de cacao por GLP	43
Figura 23	Removedor de paletas, a) diseño anterior y b) rediseño	48
Figura 24	Área de contacto de la paleta	49
Figura 25	Electroválvula para implementación	54
Figura 26	Temporizador de Siemens	54
Figura 27	Diagrama electrónico del circuito de control	55
Figura 28	Diagrama electrónico del circuito de potencia	56
Figura 29	Diagrama del diseño del sistema de recirculación de aire	57
Figura 30	Tubería de aluminio Thermaflow	58

Figura 31	Serie csr - filtros deshidratadores de núcleo sólido sustituibles .	58
Figura 32	Diseño propuesto del sistema	59
Figura 33	Componentes de la estructura mecánica del secador	60
Figura 34	Construcción del quemador.....	61
Figura 35	Adaptación del quemador.....	61
Figura 36	Contenedor reconstruido	62
Figura 37	Chumacera parte superior de la plancha perforada	62
Figura 38	Chumacera en la parte inferior de la plancha perforada	62
Figura 39	Recubrimiento contenedor a) parte posterior, b) parte frontal....	63
Figura 40	Tubos y bocines en acero inoxidable	63
Figura 41	Soldadura de eje con perno de acople para sujeción de paleta.	64
Figura 42	Ensamble estructural del sistema de paletas	64
Figura 43	Sistema de paletas en el contenedor a) antes, b) después	65
Figura 44	Colocación de canaletas para instalación eléctrica.....	65
Figura 45	Tablero de control interno a) antes b) después.....	66
Figura 46	Cacao en baba	67
Figura 47	Pulpa del cacao antes del secado.....	68
Figura 48	Medición inicial del Ph del grano de cacao	68
Figura 49	Tirilla Dirui.....	69
Figura 50	Secado del grano por horas de secado.....	69
Figura 51	Medición final del Ph del grano de cacao	69
Figura 52	Medición de la humedad.....	70
Figura 53	Pesaje del cacao	72
Figura 54	Muestras de granos de cacao seleccionados	73
Figura 55	Distribución de Chi-cuadrado con los valores obtenidos.....	75

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1	Torque en un motorreductor	25
Ecuación 2	Torque en función de potencia y revoluciones del motor	26
Ecuación 3	Potencia necesaria en un motorreductor	26
Ecuación 4	Torque entregado por la máquina	29
Ecuación 5	Área de contacto de la paleta	49
Ecuación 6	Masa de la iésima paleta	50
Ecuación 7	Fuerza de remoción de la iésima paleta.....	50
Ecuación 8	Torque de la iésima paleta	51
Ecuación 9	Torque total de remoción.....	51
Ecuación 10	Valores esperados.....	73
Ecuación 11	Estadístico de prueba	74
Ecuación 12	Grados de libertad	74
Ecuación 13	Estadístico de prueba chi-tabla	75
Ecuación 14	Consumo de electricidad	76
Ecuación 15	Consumo total de electricidad	76

RESUMEN

El contexto más amplio de la economía del sector energético y de la economía en su conjunto ha cambiado. El presente trabajo de investigación muestra una útil contribución al sector tecnológico enfocado a la automatización de una máquina secadora de cacao propiedad de la empresa Cacao 3H ubicada en el cantón Cumandá, como alternativa para la optimización de tiempos, reducción de mano de obra y del excesivo consumo de energía, esto con la finalidad de obtener la mejor calidad de grano seco en función de la producción, mediante el rediseño de sus subsistemas mecánico, eléctrico y electrónico. El proyecto aporta con información del diseño de un circuito electrónico de potencia para el control de velocidad del motor; muestra el diseño e implementación de un sistema de recirculación del aire caliente y el recubrimiento de la cámara de secado con una nueva fuente energética a base de GLP, que reemplaza el sistema de secado a base de niquelinas para mejorar su eficiencia. Adicionalmente en base a pruebas de funcionamiento y análisis se realiza la validación del rediseño y automatización de la máquina de acuerdo a parámetros establecidos por la empresa Cacao 3H. Como resultado de este trabajo, la máquina secadora de cacao es capaz de completar el proceso para 300 lb de cacao en 6 horas, con un consumo energético de 9.9 kWh, equivalente a una reducción del 52.9% con respecto al diseño anterior.

PALABRAS CLAVE:

- **SECADOR DE CACAO**
- **GAS LICUADO DE PETRÓLEO**
- **EFICIENCIA ENERGÉTICA**
- **VARIADOR DE VELOCIDAD DIFERENCIAL**

ABSTRACT

The broader context of the economy of the energy sector and of the economy as a whole has changed. This research work shows a useful contribution to the technological sector focused on the automation of a cocoa drying machine owned by the company Cacao 3H located in the canton Cumandá, as an alternative for optimizing time, reducing labor and excessive energy consumption, this in order to obtain the best quality of dry grain according to production, through the redesign of its mechanical, electrical and electronic subsystems. The project provides information on the design of an electronic power circuit for the control of engine speed; shows the design and implementation of a hot air recirculation system and the coating of the drying chamber with a new energy source based on LPG, which replaces the nickel-based drying system to improve its efficiency. Additionally, based on performance and analysis tests, the validation of the redesign and automation of the machine is carried out according to parameters established by the company Cacao 3H. As a result of this work, the cocoa drying machine is able to complete the process for 300 lb of cocoa in 6 hours, with an energy consumption of 9.9 kWh, equivalent to a reduction of 52.9% with respect to the previous design.

KEYWORDS:

- **CACAO DRYER**
- **PETROLEUM LIQUID GAS**
- **ENERGY EFFICIENCY**
- **DIFFERENTIAL SPEED VARIABLE**

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El cacao en el Ecuador es uno de los productos de exportación más importante; es considerado el mejor del mundo, debido a su calidad y aroma. Esto se refleja en el constante incremento de las exportaciones del sector, llegando a un crecimiento promedio anual del 13.80% como se muestra en la Figura 1. (ProEcuador, Ministerio de Comercio Exterior, 2015)

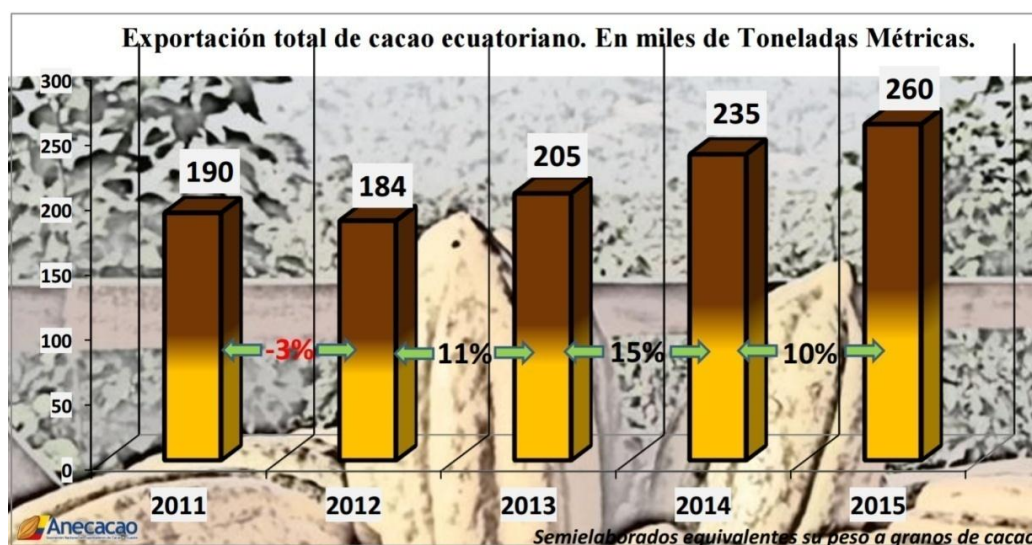


Figura 1 Exportación total de cacao ecuatoriano

Fuente: ANECACAO, (2015)

Ecuador se destaca como un productor neto de cacao, comparado con los otros países de la región, por lo cual su proceso de producción debe ser el más adecuado para cumplir con las normas de calidad INEN 175, 176 y 177 para su exportación. (ProEcuador, Ministerio de Comercio Exterior, 2015)

La empresa Cacao 3H ubicada en el sub-trópico de la provincia de Chimborazo, dedicada al cultivo de grano de cacao, ha pensado innovar el proceso de secado, el cual se lo realizaba en tendales, método principal de secado del producto, el mismo que tiene como desventaja el alto costo de la infraestructura, riesgo de robo, alto requerimiento de mano de obra y un secado no homogéneo de los granos.

En el proceso de secado de cacao tiene como parámetros críticos la temperatura, la cual debe alcanzar entre los 60 y 70 °C; la humedad, cuyo valor debe bordear el 7%; el flujo de aire, el tiempo y la remoción del grano. (Castrillón & Flores, 2016)

1.2. Planteamiento del problema

En la empresa Cacao 3H se desarrolló la tesis "Diseño y construcción de un prototipo de máquina secadora de cacao para la empresa Cacao 3H ubicada en el cantón Cumandá" elaborada por Felipe Flores y Andrés Castrillón en el año 2016, destinada a la optimización en los tiempos de secado del grano y a la reducción de mano de obra. Este prototipo funciona a base de resistencias eléctricas, las cuales provocan un alto consumo energético; cuenta con un removedor de paletas en la cámara de secado del grano, el cual es impulsado por un moto-reductor eléctrico controlado por un variador con control escalar, mismo que no provee el torque necesario para revolver los granos, dando como resultado un secado de baja calidad. Finalmente, la estructura del secador no posee un recubrimiento adecuado, lo cual permite la rápida disipación del calor, incrementando el consumo energético del sistema.

En vista de lo expuesto, la empresa ha incurrido en gastos innecesarios durante el proceso al mismo tiempo que produce cacao seco de baja calidad, lo que se traduce en pérdidas económicas, haciendo necesaria una reingeniería del prototipo de secadora de cacao que al momento no se encuentra en operación.

1.3. Descripción resumida del proyecto

El presente proyecto pretende automatizar el proceso de secado del cacao a partir del rediseño de un prototipo de secador ya existente en la empresa Cacao 3H, el cual funciona actualmente de forma semiautomática y su principal defecto es el consumo excesivo de energía eléctrica.

El rediseño del prototipo apunta a elevar su eficiencia energética y adicionar un sistema de control que permita la operación automática del mismo, reduciendo recursos humanos y económicos, ampliando la autonomía de la máquina y procurando un grano de excelente calidad para su posterior comercialización.

En función de las normas de calidad, se investigará y se obtendrá información sobre los métodos más apropiados de secado aplicables al cacao. El proyecto se basa en controlar las variables como la temperatura, humedad, tiempo y flujo de aire, para obtener un grano seco de mejor calidad para la exportación y elaboración del chocolate dentro y fuera del país.

En lo referente al rediseño del prototipo, se investigará e implementará un sistema de secado adecuado que cuente con una fuente de energía moderna, respetuosa del medio ambiente y de bajo costo, buscando elevar la eficiencia, rentabilidad del proceso y de la máquina, lo cual no se lograba con el sistema de secado a base de resistencias eléctricas. De esta manera

se pretende reducir de manera importante el consumo de recursos, convirtiéndose en la mejor opción para la empresa.

Otra etapa del rediseño del sistema mecánico consiste en una investigación sobre sistemas de recirculación de aire para su aplicación en el prototipo, además de la adición de un aislamiento térmico apropiado que procure una eficiencia energética considerable al reducir al mínimo el consumo, siendo amigable con el medio ambiente y a la vez, economizando recursos a la empresa.

Adicionalmente, se implementará un variador que controle el motorreductor, para que a muy bajas revoluciones se entregue el torque necesario, de tal forma que sea capaz de revolver los granos de cacao por medio de paletas dentro del secador, logrando un secado homogéneo y garantizando así la calidad en cada uno de los granos.

Finalmente, se implementará una matriz de sensores de humedad ubicados estratégicamente en la cámara de secado, para determinar cuando el cacao alcance la humedad requerida; de igual manera se contará con un sensor para adquirir los valores de temperatura y de esta manera controlar y obtener un valor de temperatura ideal, aportando a la autonomía y reducción de recursos.

1.4. Justificación e importancia

El desarrollo inevitable de la tecnología y la automatización ha conseguido reemplazar a los humanos, en actividades repetitivas y de riesgo, por máquinas o robots que realicen estas actividades pero con mayor precisión y seguridad, optimizando recursos. De esta manera las máquinas y robots se han posicionado en la industria como un factor indispensable en las diferentes áreas, como lo es en este caso en la agroindustria, para mejorar la calidad de los procesos.

En la empresa Cacao 3H existe una de estas máquinas diseñada para mejorar el proceso de secado del cacao, sin embargo no cumplía de forma eficiente con los requerimientos de la empresa, generando pérdidas en tiempo, calidad del grano y recursos económicos derivados del consumo excesivo de energía, lo cual no permitió establecer un precio competitivo con relación a las demás empresas del ramo.

Por tal motivo, la automatización del proceso de secado y el rediseño del prototipo de secador de cacao es la mejor alternativa para optimizar los tiempos, reducir la mano de obra, reducir el excesivo consumo de energía siendo amigable con el ambiente, de esta manera la empresa generaría un producto de mejor calidad, incrementaría la productividad y aumentaría sus ganancias, obteniendo reconocimiento y mejorando su competitividad.

Este proyecto aporta a la vez, al cumplimiento de los objetivos del gobierno como son la responsabilidad ambiental y cambio de la matriz productiva, al establecer nuevas tecnologías de producción agrícolas, optimizando la mayor parte de recursos en la empresa Cacao 3H.

1.5. Objetivos del proyecto

1.5.1. Objetivo general

Rediseñar y automatizar el prototipo de máquina secadora de cacao, propiedad de la empresa Cacao 3H ubicada en el cantón Cumandá, para obtener la mejor calidad de grano seco en función de la producción, mediante el rediseño de sus subsistemas mecánico y eléctrico y la adición de un subsistema electrónico de control.

1.5.2. Objetivos específicos

- Investigar y recolectar información acerca del procesamiento del cacao, las variables a controlar, los métodos de secado del mismo y fuentes de energía usadas en estos sistemas.
- Investigar sobre sistemas de recirculación de aire y remoción del grano de cacao, así como alternativas de materiales aplicables como aislamiento térmico.
- Redimensionar y sustituir los componentes mecánicos, eléctricos, electrónicos y del sistema de control para la optimización y automatización del prototipo.
- Diseñar el circuito electrónico de potencia para el control de velocidad del motorreductor procurando el torque suficiente, mediante la utilización de un variador de velocidad vectorial.
- Diseñar e implementar el sistema de secado con una nueva fuente energética en el prototipo, el cual reemplazará al sistema de secado a base de niquelinas.
- Diseñar e implementar un sistema de recirculación del aire caliente y el recubrimiento de la cámara de secado para mejorar la eficiencia energética del sistema.
- Validar el rediseño y automatización mediante pruebas de funcionamiento de acuerdo a los requerimientos de la empresa Cacao 3H.

1.6. Hipótesis

¿El rediseño y automatización del prototipo de secador de cacao permitirá mejorar la calidad del grano después del secado y aportará a la reducción del uso de recursos energéticos y económicos para la empresa Cacao 3H ubicada en el cantón Cumandá?

1.7. Variables de la investigación

- **Variable independiente:** Rediseño del prototipo de secado automático.
- **Variable dependiente:** Secado idóneo para la mejora de calidad en los granos de cacao para su exportación.

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1. El cacao en Ecuador

2.1.1. Definición

Theobroma cacao es el nombre del árbol del cacao o cacaotero (Theobroma en griego significa "alimento de los dioses"). Muchos afirman que este es originario de América del Sur, de la cuenca del río Orinoco o el río Amazonas y que desde ahí empezó a extenderse hasta el sureste de México. Mientras que otros, afirman que empezó en México y se extendió hasta la cuenca del río Amazonas, sin embargo, no se sabe con certeza. El cacaotero es un árbol que necesita de humedad y de calor. Es de hoja perenne y siempre se encuentra en floración, crece entre los 6 y los 10 m de altura. Requiere sombra, protección del viento y un suelo rico y poroso, pero no se desarrolla bien en las tierras bajas de vapores cálidos. Su altura ideal es, aproximadamente, a 400 m.s.n.m. El terreno debe ser rico en nitrógeno y en potasio, y el clima húmedo, con una temperatura entre los 20 °C y los 30 °C. (ANECACAO, 2015)

En el Ecuador actual se cultivan algunos tipos de cacao, pero la variedad conocida como Nacional es la más buscada entre los fabricantes de chocolate, por la calidad de sus granos y la finura de su aroma. Otro dato muy importante es que en el 2011, Ecuador recibió el premio como "mejor cacao por su calidad oral" y "mejor grano de cacao por región geográfica" en el Salón du Chocolate en París, Francia. (ANECACAO, 2015)

En la Figura 2 se muestran granos de cacao Nacional.



Figura 2 Cacao ecuatoriano

Fuente: Zauzich, (2016)

2.1.2. Características

El cacao es una fruta tropical, sus cultivos se encuentran mayormente en el Litoral y en la Amazonía. Es un árbol con flores pequeñas que se observan en las ramas y producen una mazorca que contiene granos cubiertos de una pulpa rica en azúcar. La producción de cacao se concentra principalmente en las provincias de Los Ríos, Guayas, Manabí y Sucumbíos. (Guerrero, 2015)

En el país se producen dos tipos de cacao: el Cacao CCN-51, conocido como Colección Castro Naranjal y el Cacao fino de aroma también denominado Cacao Nacional o Criollo. Es un Cacao Fino de Aroma conocido como 'Arriba', desde la época colonial. Ecuador es el país con la mayor participación en este segmento del mercado mundial (un 63% de acuerdo con las estadísticas de ProEcuador). (ProEcuador, Ministerio de Comercio Exterior, 2015)

2.1.3. Cosecha de cacao

La recolección de mazorcas se inicia cuando han logrado su madurez, la cual se identifica con el cambio de coloración de la cáscara. Para la recolección se utilizan tijeras manuales. (Will, 2013)

En la Figura 3 se muestra el proceso de cosecha de cacao.



Figura 3 Cosecha del cacao

Fuente: GONZALES, (2015)

La frecuencia de cosecha depende de la producción, así en la temporada principal, se debe cosechar cada 8 días. Una vez tumbadas las mazorcas del árbol, estas deben apilarse en algún lugar dentro de la huerta, cabe recomendar que en cada tumba se cambie el sitio de amontonamiento, donde se procede a la apertura de las mazorcas, tratando de no dañar las almendras. (Will, 2013)

2.1.4. Fermentación

Es el paso fundamental en el beneficio del cacao. En este proceso se desarrolla el sabor y el aroma del producto y contribuye a formar un producto "hinchado", de color marrón y de buena apariencia. Una adecuada fermentación origina un cacao que al ser convertido en chocolate, es agradable al paladar y al olfato, por el contrario una mala fermentación o ausencia de ella, puede desacreditar el producto de manera notable. El proceso involucra reacciones químicas, mediante las cuales los azúcares contenidos en la pulpa se transforman en productos como agua, alcohol etílico y ácido acético, entre otras sustancias, por la acción de las levaduras que son microorganismos de carácter anaeróbico, en cuyo proceso generan desprendimiento del calor. (CANACACAO, 2015)

El tiempo de duración de la fermentación depende del tipo de cacao, primero se inicia la fase anaeróbica donde el cacao permanece en reposo durante 3 días con remociones cada 24 horas, cuyo objetivo es liberar el CO₂ del grano. La fermentación dura alrededor de 5 o 6 días consecutivos. (Will, 2013)

2.1.5. Secado

Terminado el proceso de fermentación del grano de cacao, es necesario someterlo al proceso de secado, el cual consiste en reducir la humedad con que sale el grano de cacao una vez finalizada la etapa de fermentación (55% aproximadamente) hasta un contenido de humedad final máxima del 7%, que es la aceptada durante la fase de comercialización del grano de cacao seco, la cual permite conservar la calidad del grano durante el almacenamiento y sin riesgo de deterioro por aparición de hongos. (COPROAGRO, 2015)

El porcentaje máximo de humedad del cacao beneficiado será de 7,0% (cero relativo), el que será determinado o ensayado de acuerdo a lo establecido en la NTE INEN 173. (NTE INEN 176:2006, 2006)

Tipos de secado

a. Secado natural

El método de secado natural es el más común en los países productores que gozan de suficiente luz solar y un régimen de lluvia no excesivo. Los diversos factores que afectan la tasa de secado de las almendras de cacao están relacionados con la temperatura ambiental, la duración de los días lluviosos, la velocidad del viento, la superficie de secado, la humedad relativa del aire y el número de horas de insolación aprovechables para el secado. Durante el proceso continúa la disminución de la astringencia y amargor del cacao, claves para el sabor del chocolate y sus derivados. La reducción de la temperatura y la velocidad del viento pueden aumentar el número de días de secado que se necesitan. Por otra parte, temperaturas altas de secado, cercanas a 70°C, influyen de manera negativa al detener el desarrollo de las reacciones, que por la vía enzimática, producen un conjunto de compuestos químicos involucrados en el sabor y aroma final del cacao. Asimismo, la rápida reducción de la humedad inhibe también la actividad enzimática, debido a los cambios que son inducidos por la variación de la concentración de los ácidos orgánicos y del grado de acidez o alcalinidad (pH) en el grano de cacao. (Liendo, 2005)

En la Figura 4 se muestra el proceso de secado natural de cacao.



Figura 4 Secado natural de cacao
Fuente: CACAOFCAUG, (2014)

b. Secado artificial

El secado artificial produce la principal transformación del grano en la postcosecha y a su vez es el procedimiento que más atención requiere para no afectar la calidad, ya que de la energía utilizada en el proceso de producción de granos, el secado consume alrededor del 50 %, y tomando en cuenta factores de calidad y consumo energético, se puede apreciar la importancia que adquiere su correcta realización. Los objetivos principales del secado son: reducir la humedad de cosecha de los granos y semillas a niveles seguros para el almacenamiento y óptimos para su comercialización. (Tinoco & Ospina, 2010)

En la Figura 5 se muestra el esquema de una secadora de cacao artificial.

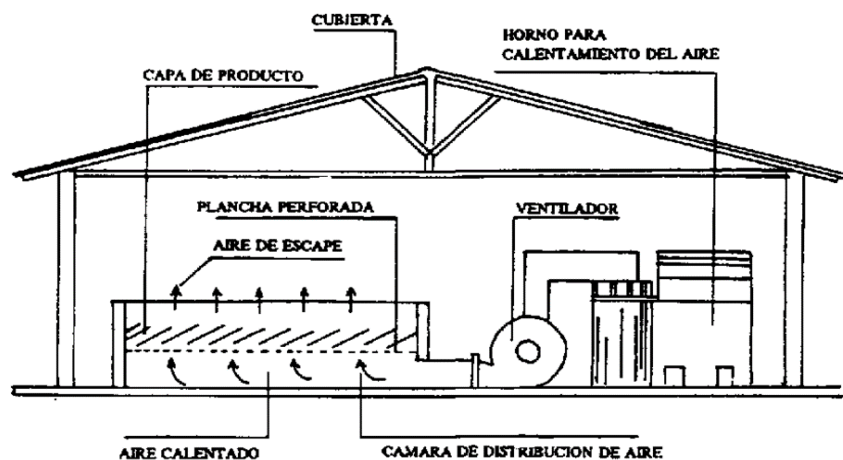


Figura 5 Esquema de una secadora de cacao artificial
Fuente: Food and agriculture Organization of the United Nations, (2000)

En la actualidad se pueden encontrar máquinas industriales de secado artificial para secar almendras de cacao en grandes cantidades. En la Figura 6 se muestra los elementos que conforman una secadora de cacao industrial.



Figura 6 Secadora de cacao industrial
Fuente: SIRCA, (2017)

2.1.6. Quemadores

Los quemadores de gas son aparatos diseñados para realizar la mezcla del combustible con el comburente y permitir la combustión controlada del gas. Los quemadores son equipos donde se realiza la combustión, por tanto deben contener los tres vértices del triángulo de combustión, es decir que deben lograr la mezcla íntima del combustible con el aire y además proporcionar la energía de activación. (García San José, 2001)

A. Características de los quemadores

Los quemadores están diseñados para cumplir con los siguientes requisitos, con la finalidad de trabajar en todo rango de potencias utilizadas:

- Llama estable.
- Mezcla gas - aire homogéneo.
- Cantidad de gas quemado adecuado a la potencia que se desea alcanzar.
- Combustión de gas completa.

B. Tipos de quemadores

En el mercado se pueden encontrar dos tipos de quemadores: atmosféricos y presurizados.

a. Quemadores atmosféricos

Los quemadores atmosféricos son aquellos en los que las mezclas de gas y aire se encuentran a presión atmosférica cuando se produce la combustión. (Full Mecánica, 2014)

Tabla 1
Clasificación de los quemadores atmosféricos

Quemadores atmosféricos	
Clasificación	Descripción
Quemadores de llama blanca	No realiza la mezcla previa de gas y aire. No tienen entrada de aire primario. Tiene orificios en forma de ranuras a fin de obtener llamas planas.
Quemadores de llama azul	Correcta combustión de gases de alto poder calorífico. Son estables y producen combustiones completas.
Quemadores infrarrojos	La llama se forma en las proximidades del extremo exterior de los pequeños canales de la placa cerámica que posee. Al calentarse la placa se pone al rojo y genera calor en forma de radiación infrarroja. Utilizados en estufas domésticas y en túneles de secado de pintura.
Quemadores catalíticos	La combustión se produce en el seno de una lana ignífuga. Posee un catalizador, que tiene la misión de favorecer la reacción química entre el combustible y el oxígeno del aire. La combustión se da a una temperatura sensiblemente más baja que en un quemador normal, sin llama visible, pero con desprendimiento de calor.

b. Quemadores automáticos con aire presurizado

Estos quemadores se caracterizan por disponer de un sistema de alimentación forzada de aire y unos dispositivos de regulación, control y seguridad que los ponen en marcha o paran automáticamente en función de los valores de determinados parámetros. Se utilizan en aparatos que requieren una potencia elevada con espacios presurizados. Los quemadores con aire presurizado forman un conjunto compacto, muy utilizados en calderas de calefacción central, calderas para la producción de agua caliente sanitaria o calentamiento de otros fluidos térmicos. También se emplean en aplicaciones industriales tales como hornos, secaderos o generadores de aire caliente. Están indicados especialmente para cámaras de combustión a baja o media temperatura (inferior a 600°C) o para cámaras de combustión presurizadas. (CONAIF SEDIGAS, 2008)

En la Figura 7 se muestra un esquema de un quemador automático con aire presurizado con sus principales componentes.

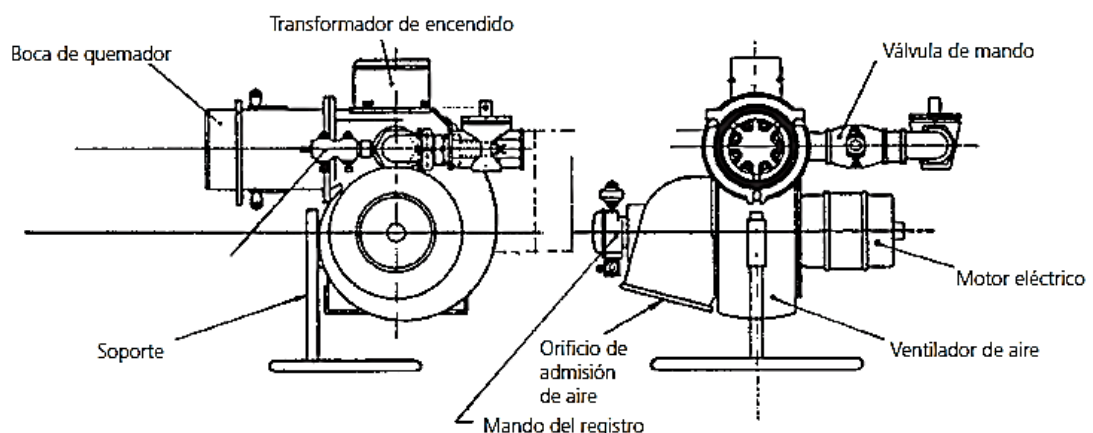


Figura 7 Esquema de un quemador automático con aire presurizado

Fuente: CONAIF SEDIGAS, (2008)

En la Figura 8 se muestran diferentes soluciones para el diseño del cabezal del quemador para efectuar la mezcla del aire con gas.

Los quemadores automáticos con aire presurizado están constituidos de los siguientes componentes:

- Conducciones de aire y gas.
- Ventilador tipo centrífugo.
- Sistema de ignición compuesto por un transformador de alta tensión.
- Sistema de detección de llama.
- Sistema automático de control de dispositivos de encendido, seguridad y regulación de caudales de aire y gas.
- Presóstatos de seguridad.
- Válvulas automáticas de seguridad, normalmente electromagnéticas.

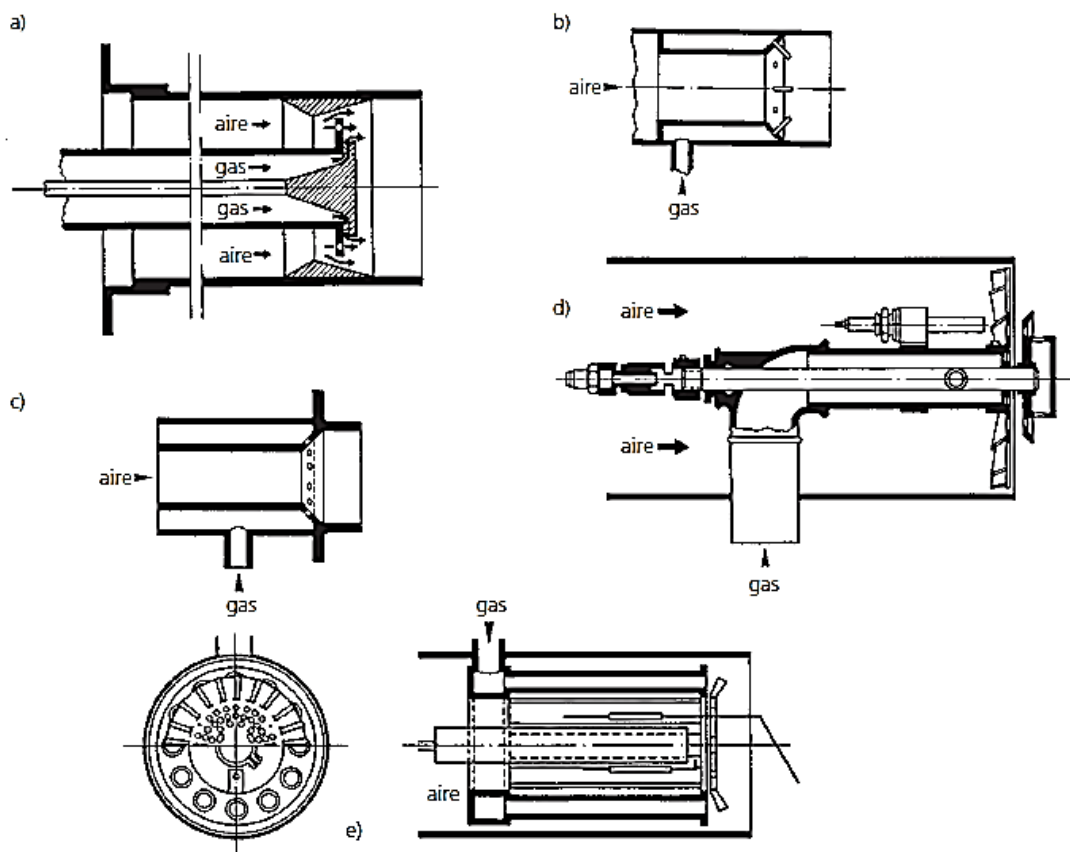


Figura 8 Diseños de cabezales del quemador presurizado

Fuente: CONAIF SEDIGAS, (2008)

2.2. Gas licuado de petróleo (GLP)

El GLP es una mezcla de varios gases que es generalmente llamado "propano" en referencia al principal ingrediente de la mezcla; cambia al estado líquido en las presiones moderadamente altas. El GLP se forma naturalmente, intercalado con depósitos de petróleo y gas. El gas natural contiene GLP, agua, vapor y otras impurezas que deben ser eliminadas antes de que pueda ser transportado en tuberías como producto. (Departamento de Energía de los EE. UU., 2003)

Durante el año 2016 el volumen de crudo procesado en las plantas de destilación de derivados del país alcanzó un volumen de 54.9 millones de barriles, con una variación positiva del 25% con respecto a lo producido al año 2015, lo cual obedece básicamente a un incremento en los niveles de producción de la refinería Esmeraldas. (Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero, 2016)

2.2.1. Propiedades físicas del GLP

Las propiedades de las mezclas de GLP se pueden calcular normalmente a partir de las propiedades de los constituyentes individuales (propano, butano, etc.) siempre que se conozcan las proporciones de los constituyentes. A continuación, se describen las propiedades físicas más importantes de las mezclas de GLP.

Densidad

El líquido GLP tiene una densidad de aproximadamente 0,54 kg/l a 15°C y por lo tanto es más ligero que el agua. Varía ligeramente con la composición de GLP y cada lote de GLP producido en una refinería tendrá

una densidad especificada a una temperatura dada. El líquido del GLP es bastante ligero, aproximadamente la mitad del peso del agua. El vapor de GLP tiene una densidad de aproximadamente 1,9 veces la del aire y por lo tanto es más pesado que este. Esto es importante al considerar los requisitos de ventilación, tiene influencia en el diseño de quemadores y ciertos medidores de flujo de vapor. (AFROX, 2015)

Presión de vapor

Un litro de gas líquido se vaporiza rápida y totalmente cuando se expone a presión atmosférica para formar aproximadamente 275 litros de vapor a 15°C. Dado que el GLP consiste en una mezcla de propano y butano, y el propano tiene una presión de vapor mucho mayor que el butano, la presión de vapor en un cilindro que contiene principalmente propano será mucho mayor que la de un cilindro que contiene principalmente butano. Esta relación entre la presión y la temperatura del propano puro, butano y GLP (mezcla 60:40) se ilustra en la Tabla 2. (AFROX, 2015)

Tabla 2
Relación presión-temperatura del propano puro, butano y GLP

Temperatura (°C)	Propano (kPa)	Butano (kPa)	GLP (kPa)
-20	150	0	±80
0	370	<5	±250
20	710	110	±500
40	1 250	280	±910
60	1 970	520	±1 550

Fuente: AFROX, (2015)

En la Tabla 3 se muestran las propiedades del propano, butano y mezcla de GLP 60:40.

Tabla 3
Propiedades del propano, butano y mezcla de GLP 60:40

Propiedad	Propano	Butano	Mezcla GLP
Peso molecular	44,09	58,12	49,7 (%)
Contenido de carbón (peso %)	81,72	82,66	82,15
Contenido de hidrógeno (peso %)	18,28	17,34	17,85
Carbón: relación de hidrógeno en peso	4,47	4,77	4,60
Densidad de líquido a 15 °C (kg/l)	0,510	0,575	0,536
Punto de ebullición del líquido a presión atmosférica. (°C)	-42,1	-0,5	-42,1 -0,5
Densidad del gas a 15 °C y a presión atmosférica. (kg/m3)	1,86	2,46	2,10
Relación de volumen de gas: líquido a STP*	274:1	233:1	258:1
Volumen de gas de 1kg líquido en STP* (l)	537	405	484
Relación de masa de gas: aire a 15°C y presión atmosférica	1,52:1	2,01:1	1,716:1
Calor latente de vaporización a 15°C(kJ/kg)	20,43	21,27	20,77
Presión de vapor a 20°C (kPa abs.)	710	110	500
Calor específico de vapor a presión atmosférica (cal/g.°C)	0,388	0,397	0,392
Valor calorífico neto a 25°C (MJ/kg)	46,0	45,6	45,8
Valor Calorífico Bruto a 25°C (MJ/kg)	49,8	49,4	49,6
Número Wobbe (Kcal/Nm3)	19 000	21 600	
Límites de inflamabilidad en el aire (vol.% gas)	2,2-10	1,8-9	1,8-10
Límites de inflamabilidad en el oxígeno (vol.% gas)	2-50	2-50	2-50
Temperatura máxima de la llama en el aire (°C)	1 930	1 900	1 900
Temperatura máxima de la llama en el oxígeno (°C)	2 740	2 700	2 700
Velocidad máxima de la llama en tubo de 25 mm (cm/s)	82	82	82
Aire requerido para la combustión en STP* (m3/kg GLP)	12,10	11,93	12,03
Relación de volumen aire: gas para la combustión a STP	22,5	29,5	24,9
Volumen de O2 para la combustión a STP* (m3/kg combustible)	2,56	2,51	2,54

*STP: Temperatura y presión estándar, definidas como 0°C y 100 kPa absolutas.

Fuente: AFROX, (2015)

2.2.2. Cilindros de GLP

Aunque un cilindro de GLP lleno contiene 85% de líquido, el volumen de vacío contendrá vapor a una presión que varía con la temperatura. A medida que la temperatura aumenta, se producirá más vaporización, lo que resulta en un aumento de la presión de vapor dentro del cilindro. Si la temperatura disminuye, parte del vapor se condensará y la presión de vapor disminuirá. En la Tabla 4 se muestran datos físicos de varios cilindros de GLP.

Tabla 4
Datos físicos para varios cilindros de GLP

Capacidad		Capacidad de agua (l)	Masa tara (kg)	Altura incluida válvula (mm)	Diámetro (mm)
GLP	Propano				
48	45,0	113,4	45,0	1 288	375
19,0	18,0	45,4	21,0	890	295
14,0	n/a	34,0	17,5	720	295
9,0	8,0	22,7	13,3	545	295
6,0			9,45	370	295

Fuente: AFROX, (2015)

2.2.3. Emisiones del GLP

Pequeñas cantidades de GLP pueden escapar a la atmósfera durante el reabastecimiento, pero estos vapores son 50% menos reactivos que los vapores de gasolina, por lo que tienen menos tendencia a generar ozono formador de smog. El contenido extremadamente bajo de azufre del GLP significa que el combustible no contribuye significativamente a la lluvia ácida. (Departamento de Energía de los EE. UU., 2003)

2.2.4. Seguridad del GLP

El propano es un gas inodoro, no venenoso que tiene el rango de inflamabilidad más bajo de todos los combustibles alternativos. Las altas concentraciones de propano pueden desplazar el oxígeno en el aire, causando potencial para la asfixia. Este problema se mitiga con la presencia del etil mercaptano, que es un odorante que se añade para advertir la presencia de gas. Mientras que el propio GLP no irrita la piel, el gas licuado se vuelve muy frío al escapar de un tanque de alta presión, y por lo tanto puede causar congelación, en caso de contacto con piel desprotegida. (Departamento de Energía de los EE. UU., 2003)

En la Figura 9 se observan presentaciones de gas en cilindros.



Figura 9 Presentación de cilindros de gas
Fuente: ENI Ecuador, (2017)

2.3. Motorreductor

2.3.1. Funcionamiento

Los reductores y motorreductores mecánicos de velocidad, se pueden contar entre los inventos más antiguos de la humanidad y aún en estos tiempos del siglo XXI se siguen utilizando prácticamente en cada máquina que se tenga a la vista, desde el más pequeño reductor o motorreductor capaz de cambiar y combinar velocidades de giro en un reloj de pulsera, cambiar velocidades en un automóvil, hasta enormes motorreductores capaces de dar tracción en buques de carga, molinos de cemento, grandes máquinas cavadoras de túneles o bien en molinos de caña para la fabricación de azúcar. Un motorreductor tiene un motor acoplado directamente, el reductor no tiene un motor acoplado directamente. La sencillez del principio de funcionamiento y su grado de utilidad en una gran variedad de aplicaciones es lo que ha construido la trascendencia de este invento al través de los siglos. (Monzón, 2017)

En la Figura 10 se muestran motorreductores de la marca Siemens.



Figura 10 Motorreductores Siemens

Fuente: SIEMENS, (2005)

A continuación, se exponen los principios básicos de un reductor o motorreductor de velocidad:

Al suponer que la rueda "A" de la Figura 11 (a) tiene un diámetro de 5 cm, su perímetro será entonces de 15.71 cm. Una rueda "B" de 15 cm de diámetro y 47.13 cm de perímetro está haciendo contacto con el perímetro de la rueda "A" Figura 11(b). En la Figura 11 (c), cuando gira la rueda "A" hará que a su vez gire la rueda "B" pero sucederá que por cada tres vueltas que dé "A", la rueda "B" solamente dará una vuelta, esto es, el diámetro de "B" dividido por el diámetro de "A" ($15/5 = 3$). Este número 3 será la relación de reducción de este reductor o motorreductor elemental y se indica como 3:1. (Monzón, 2017)

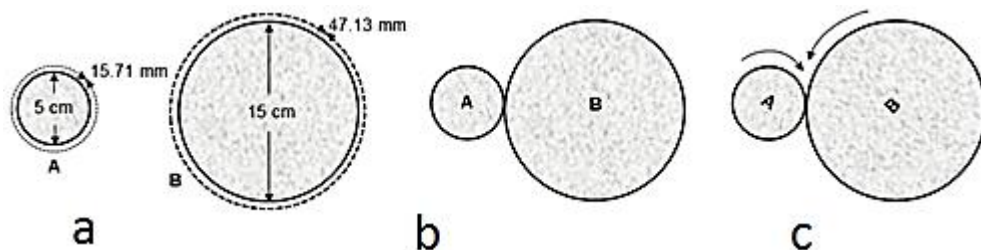


Figura 11 Relación de reducción por medio de ruedas

Fuente: Monzón, (2017)

En la Figura 12 se observan los componentes internos de un motorreductor.



Figura 12 Componentes internos de un motorreductor

Fuente: Arias Navia, (2016)

2.3.2. Torque en un motorreductor

El torque o par es una fuerza de giro de la flecha de salida del motorreductor. La Figura 13 muestra el par que se produce en un motorreductor.

Con la Ecuación 1 se puede calcular el torque en un motorreductor.

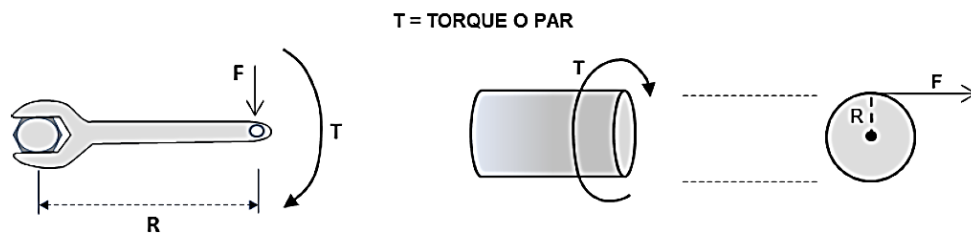


Figura 13 Motorreductor

Fuente: Monzón, (2017)

$$T = F \times R$$

Ecuación 1.

Donde:

T : Torque o par en kg.m.

F : Fuerza tangencial en kg.

R : Distancia al centro de giro en m.

El torque o par en función del tiempo de ejecución se convierte en potencia. Es precisamente el par lo que permitirá que pueda o no girar una determinada carga, cuanto más alto es el par más grande será la carga que se puede girar.

La combinación de potencia, par y velocidad en un motorreductor está regida por la siguiente fórmula:

$$T = \frac{HO \times 716}{RPM}$$

Ecuación 2.

Donde:

HO: Potencia en HP.

RPM: Velocidad de giro de la flecha del motor o reductor en r.p.m.

En la Figura 14 se observa el torque que actúa en un motorreductor.

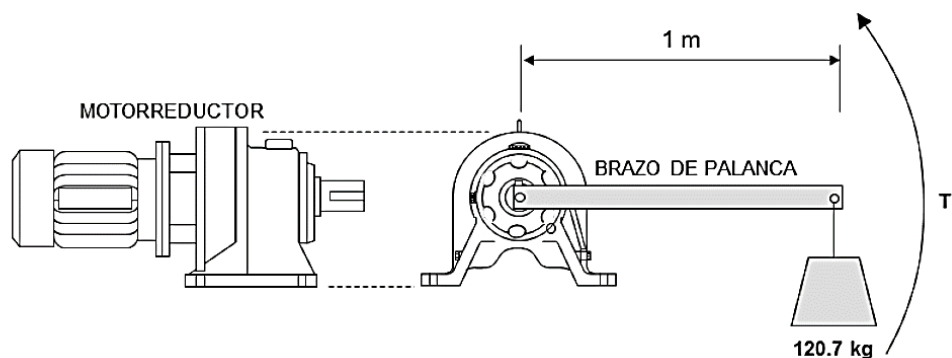


Figura 14 Torque actuando en un motorreductor

Fuente: Monzón, (2017)

2.3.3. Cálculo de la potencia necesaria en un motorreductor

Si se sabe qué par se necesita para mover la carga y a qué velocidad de giro se realiza adecuadamente el trabajo que se requiere, entonces se puede calcular el motorreductor y la potencia del motor necesario. (Monzón, 2017)

Despejando *HO* de la Ecuación 2 se obtiene la fórmula para calcular la potencia:

$$HO = \frac{T \times RPM}{716,2}$$

Ecuación 3.

2.3.4. Clasificación de los motorreductores

Tabla 5
Clasificación de motorreductores

CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORREDUCTORES	
Tipos	Descripción
De velocidad Sin fin-Corona	Se compone de una corona dentada cuyo centro se encuentra embutido a un eje, la corona está en contacto permanente con un husillo en forma de tornillo sin-fin. Una vuelta del tornillo sin fin provoca el avance de un diente de la corona y en consecuencia la reducción de velocidad.
De velocidad de engranajes	La transmisión mecánica se realiza por pares de engranajes de cualquier tipo excepto los basados en tornillo sin fin. Sus ventajas son el mayor rendimiento energético, menor mantenimiento y menor tamaño.
Cicloidales	Tiene tres partes móviles: el eje de entrada de alta velocidad con un conjunto de cojinetes de rodillo, el disco cicloidal y el conjunto del eje de salida de baja velocidad. Todos los componentes que transmiten el par de torsión cicloidal ruedan y están dispuestos en forma simétrica alrededor del eje para una operación equilibrada, pareja y silenciosa.
De velocidad planetarios	El sistema tiene un engranaje principal llamado sol fijo a la sección delantera del motor, y una corona interna impulsada por un eje. El piñón está unido al eje de lo que se quiere mover y montado en ella una serie de piñones que cuando el eje gira, los piñones giran en torno al principal fijo a una velocidad reducida.

Fuente: EcuRed, (2017)

2.3.5. Variadores de velocidad

Un variador de corriente alterna C.A. es un dispositivo utilizado para controlar la velocidad de rotación de un motor de C.A. o de inducción. Este tipo de motores también se conocen como motores asíncronos o en jaula de ardilla. El variador de velocidad se coloca entre la red y el motor. El variador recibe la tensión de red a la frecuencia de red (50Hz) y tras convertirla y después ondularla produce una tensión con frecuencia variable. La velocidad de un motor es proporcional a la frecuencia. Además de cambiar la frecuencia, el variador también varía el voltaje aplicado al motor para asegurar que existe el par necesario en el eje del motor sin que surjan problemas de sobrecalentamiento. (García, 2009)

Tipos de variadores

Los variadores son convertidores de corriente encargados de regular la energía eléctrica que recibe el motor, en función de la potencia o la velocidad que se quiere obtener. (JMMC, 2011)

Los principales tipos de variadores son:

- Variadores mecánicos
- Variadores eléctrico-electrónicos

Principio del motor de CC (Corriente Continua)

El control vectorial se desarrolló para emular el comportamiento de la máquina de CC. El motor CC dominó las aplicaciones de velocidad variable, ya que el motor de CA de Jaula de Ardilla se consideraba una máquina de velocidad constante, al tener variaciones de velocidad de 2% a 5% entre vacío y plena carga. En la máquina de CC se distinguen dos partes eléctricas: el bobinado de campo y el de armadura. De esta forma, regulando la corriente de campo y armadura se puede controlar el motor. Por lo tanto, la regulación se hace de forma desacoplada, es decir, el control de la corriente de armadura es independiente de la regulación de la de campo, y viceversa. (Motortico, 2014)

La Figura 15 muestra una máquina de CC y su diagrama de conexión en configuración de excitación independiente.

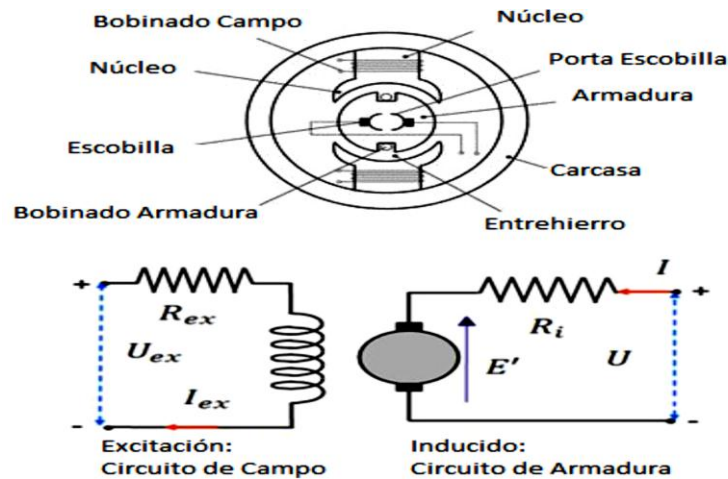


Figura 15 Máquina de Corriente Continua (CC)

Fuente: Motortico, (2014)

La operación típica del motor de CC es alimentar en primera instancia el circuito de excitación, y seguido se empieza a incrementar la corriente de armadura, con lo cual el motor empieza a girar, y se regula la velocidad según la necesidad. La entrega de torque en la máquina de CC lo establece la relación: (Motortico, 2014)

$$T = k_m I \phi_{ex} \quad \text{Ecuación 4.}$$

Donde:

T : Torque entregado por la máquina.

k_m : Constante de la máquina.

I : Corriente de armadura.

ϕ_{ex} : Flujo producido por la corriente de campo I_{ex} .

Control Vectorial de motores CA

La máquina de inducción de tipo jaula de ardilla, comenzó a utilizarse en aplicaciones de velocidad variable cuando los primeros variadores aparecen de forma comercial. Estos se basaron en elementos de conmutación forzada del tipo BJT, o similares. Con estos dispositivos fue posible regular

la velocidad de la máquina cambiando la frecuencia y voltaje de las señales aplicadas al estator. Sin embargo, estos controles no podían alcanzar la misma dinámica de respuesta que una máquina de CC con excitación independiente, y con control de corriente de armadura. Esto se debía a que el esquema de control escalar V/F regula sólo la magnitud del voltaje aplicado al estator, no el desfase de éste con la corriente. Por lo tanto al no existir control de fase no es posible desacoplar el control del torque y del flujo, pero en los años 80's aparecieron los primeros microprocesadores que podían ser utilizados en sistemas de control digital, como por ejemplo el INTEL 8080 y 8085 y el ZILOG Z80, así empezaron a surgir los primeros esquemas de control vectorial, con trabajos desarrollados por investigadores alemanes, que luego se extendieron al resto de países, y de fabricantes. (Motortico, 2014)

Temporizadores

Un temporizador es un tipo de relé que lleva a cabo la apertura o el cierre de un contacto después del transcurso de un intervalo de tiempo predeterminado al recibir la señal. En la Tabla 6 se exponen los tipos de temporizadores y principios de operación.

Tabla 6
Tipos de temporizadores

Tipos	Operación
Temporizador tipo motor	Temporizador en el cual un motor es impulsado por una señal eléctrica, y la espera del retraso de tiempo prescrito se realiza usando el movimiento mecánico de ese motor, y luego se realiza el cierre o la apertura de los contactos.
Temporizador analógico	Temporizador en el que el control del tiempo se puede realizar fácilmente mediante una simple configuración de marcación.
Temporizador digital	Permite una configuración de tiempo de alta precisión porque la operación se controla digitalmente. Incluso el ajuste de la hora se puede hacer fácilmente usando interruptores digitales, y también es posible visualizar digitalmente el tiempo transcurrido.
Temporizador tipo Damper	Temporizador que espera el tiempo de retardo prescrito utilizando el efecto de amortiguación de un fluido como aire o aceite, y luego abre o cierra los contactos usando una bobina electromagnética.

Fuente: (Chip1Stop, 2015)

Electroválvulas

Las electroválvulas se usan para controlar la velocidad de flujo, sistemas y motores de fluido y aire. Las lavadoras y las calderas de gas utilizan estas electroválvulas, así como las bombas hidráulicas y los martillos neumáticos, ya que son lo suficientemente diversas como para realizar tareas simples y complejas con facilidad. Las electroválvulas se pueden personalizar para satisfacer necesidades específicas y se pueden utilizar para controlar una variedad de medios como aire, electricidad, gas, vapor y aceite. La electroválvula más común es la válvula de dos vías. Una válvula de dos vías solo tiene dos puertos, mientras que los diseños más avanzados pueden tener tres o más, dependiendo de para qué se utilizará. Todas las electroválvulas, sin importar el diseño, se especifican para ser uno de dos tipos generales: ya sea una válvula de acción directa o una válvula operada por piloto. (ElectricPower, 2011)

En la Tabla 7 se muestra varios tipos de electroválvulas y su funcionamiento.

Tabla 7
Tipos de electroválvulas y funcionamiento

Válvulas de acción directa	En una electroválvula de acción directa, una bobina abre magnéticamente la válvula en una acción directa, levantando el eje y el asiento de la válvula sin depender de la presión exterior.
Válvulas operadas por piloto	En las válvulas accionadas por piloto, el émbolo abre la abertura del piloto mientras que la presión acumulada hace que la válvula se abra y se cierre.
Válvulas de dos vías	Cada uno de los dos puertos en una válvula de dos vías se usa alternativamente para permitir el flujo y cerrarlo. Una válvula de dos vías puede especificarse como "normalmente abierta" o "normalmente cerrada" en su funcionamiento.
Válvulas de tres vías	Las válvulas de tres vías vienen con tres puertos. Estos se usan comúnmente cuando se requieren presiones alternas y exhaustivas para el funcionamiento, como con una máquina de café o un lavavajillas.
Válvulas de cinco vías	Una válvula direccional de 5/2 vías del nombre en sí tiene 5 puertos equiespaciados y 2 posiciones de flujo. Se puede usar para aislar y al mismo tiempo eludir una vía de paso para el fluido que, por ejemplo, debería retraer o extender un cilindro de doble acción.

Fuente: (Wong, 2017)

2.3.6. Sistema de recirculación

Los sistemas de recirculación se han implementado con diferentes niveles de éxito en la industria del secado de granos. La idea es utilizar el calor residual en el aire y su capacidad de retención de humedad residual. El nivel óptimo de recirculación cambia a lo largo del proceso de secado, como se muestra en la Figura 16. (Uc Davis, 2009)

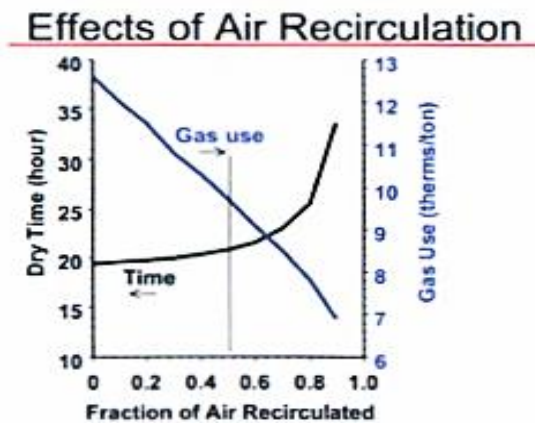


Figura 16 Efectos de la recirculación de aire
Fuente: Uc Davis, (2009)

2.3.7. Recirculación del aire caliente

La recuperación del calor del aire en las secadoras es justamente tomar parte del mismo, bajo determinadas condiciones propicias y recircularlo, aprovechando parte del calor que este ha adquirido al atravesar la cámara de secado. Es cierto que el aire ambiente al calentarse, toma parte de la humedad de los granos de cacao, por lo cual se necesita de un sistema de filtros para retener esta humedad. En la Figura 17 se muestra un ejemplo de recirculación de aire. (De Nardo, 2010)

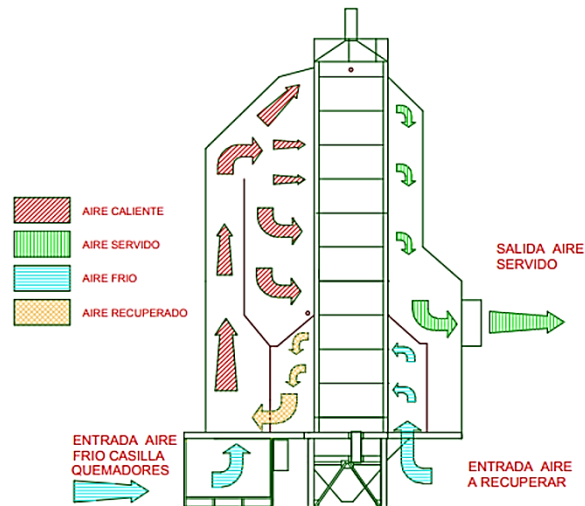


Figura 17 Esquema de circulación de aire con recuperación de calor

Fuente: De Nardo, (2010)

Es preciso considerar una limpieza del aire recirculado para evitar el ingreso de material extraño a la cámara caliente. Ahora bien vemos que en la Figura 17 de aire en la secadora queda cambiado pues la circulación que originalmente era 100 % aspirada o impulsada al exterior, ahora se limita a una circulación de las dos terceras partes y esto se debe a que el aire de enfriado una vez precalentado por la masa de granos se mezcla con el de la casilla generadora de aire caliente y conforman una masa que si es extraída al exterior en la mayoría de los casos llegando a un 60 % de la masa de aire original. (De Nardo, 2010)

2.3.8. Filtros

Los filtros aportan a mejorar la calidad del aire, en el que existen miles de partículas sólidas en suspensión que son difíciles de detectar y afectan a la salud. (MundoHVACR, 2018)

Actualmente los filtros de aire poseen distintas aplicaciones que pueden ir desde aire acondicionado, ventilación, campanas de cocina, hasta la industria alimenticia e incluso quirófanos. Para cada área existen diferentes tipos con propiedades únicas. (MundoHVACR, 2018)

Filtro Secador

Para asegurar un funcionamiento óptimo, el interior del sistema de circulación deberá estar limpio y seco antes de poner en marcha el proceso. Un filtro secador contiene un núcleo sólido formado por: (Zaragoza, 2012)

- Alúmina activada y una malla de poliéster insertada en la salida del filtro.
- Gel de sílice.
- Molecular sieves (tamiz molecular).
- El núcleo sólido es comparable a una esponja, “absorbe agua y la retiene en su interior”.
- El tamiz molecular y gel de sílice retienen el agua, mientras que la alúmina activada retiene el agua y los ácidos.
- El núcleo sólido, junto con la malla de poliéster, “actúa como filtro contra la suciedad”.
- El núcleo sólido retiene las partículas de suciedad grandes, mientras que la malla de poliéster atrapa las partículas pequeñas.
- El filtro secador es, por lo tanto, capaz de interceptar todas las partículas de suciedad de un tamaño superior a 25 micras. (Zaragoza, 2012)

En la Figura 18 se muestra las partes de un filtro secado.

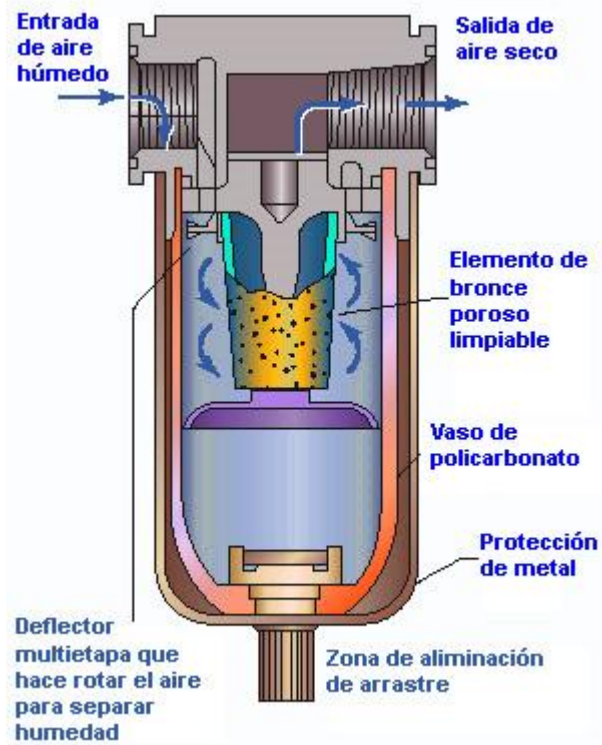


Figura 18 Partes de Filtro Secador

Fuente: (Sapiensman, 2015)

CAPÍTULO III DISEÑO MECATRÓNICO

En este apartado se desarrolla el diseño y rediseño de los elementos que forman parte de la máquina secadora de cacao; se presentan alternativas de selección, con la finalidad de dar solución al problema planteado, permitiendo determinar características de diseño en función de la calidad.

3.1. Establecimiento y ponderación de requerimientos

Por medio de la casa de la calidad (QFD) se realiza el análisis del proyecto basado en transformar los requerimientos del usuario en requisitos técnicos apropiados para el desarrollo de producto y de la producción, con la finalidad de aumentar la calidad, y por último ayudar al personal técnico sobre el funcionamiento de la máquina.

En la Figura 19 se muestra el despliegue del QFD.



Figura 19 Método de despliegue QFD

3.1.1. Requisitos del cliente

La empresa CACAO 3H solicita los siguientes requisitos mostrados en la Tabla 8 para la secadora del grano de cacao:

Tabla 8
Requisitos del cliente

Ítem	Requisitos del cliente	Prioridad (1:No relevante;5:Muy relevante)
1	Reemplazar el sistema de secado	5
2	Rediseñar el mecanismo de remoción	4
3	Bajo costo	3
4	Bajo consumo de energía	4
5	Preservar la calidad del cacao	5
6	Minimizar el tiempo de secado	5

3.1.2. Características técnicas

Luego de conocer los requisitos del cliente y su prioridad, se realiza el análisis de las características técnicas a ser consideradas para el diseño del prototipo, las mismas que son de carácter cuantitativo con la finalidad de satisfacer las necesidades del solicitante. En la Tabla 9 se muestra las posibles características técnicas.

Tabla 9
Características técnicas

Ítem	Características técnicas	Valor
1	Temperatura del aire caliente	40-60 °C
2	Humedad final de granos	7%
3	Velocidad del removedor	7 r.p.m.
4	Potencia de motores	1 HP
5	Energía	Energía Eléctrica y Combustible Fósil

Los requisitos del cliente y las características técnicas se analizan en la casa de la calidad (QFD), pues a través de esta matriz se podrá determinar las características técnicas finales de acuerdo a la mayor relevancia y prioridad para la ejecución del diseño.

Dentro del QFD se asignan valores de prioridad a las necesidades del usuario, para luego identificar por medio de símbolos el nivel de correlación entre los requerimientos del cliente y las características técnicas. Los símbolos y características son mostrados en la Tabla 10.

Tabla 10
Valoración simbólica

⊕	Relación fuerte	9
○	Relación moderada	3
▲	Relación débil	1

Con los valores de correlación de la Tabla 10 se obtiene la ponderación de las características técnicas; esta información se la utiliza para el diseño y construcción del prototipo de máquina secadora de cacao. Además, se utiliza un patrón de símbolos con la finalidad de determinar el nivel de correlación entre las características técnicas y el efecto de cada una sobre las demás.

En la Tabla 11 se muestra el despliegue de la matriz QFD.

Tabla 11
Despliegue de la matriz QFD

Fila N	Valor Máximo de la Relación en la Fila	Peso Relativo	Peso / Importancia	Características de la Calidad (a.k.a. "Requerimientos Funcionales" o "Comos")	Column #				
					1	2	3	4	5
Dirección de Mejoramiento: Minimizar (▼), Maximizar (▲), u Objetivo (x)					▲	▲	▼	▼	▼
Calidad Exijida (a.k.a. "Requerimientos del Cliente" o "Qué")					Temperatura del aire caliente	Humedad final de granos	Velocidad del removedor	Potencia de motores	Consumo de energía
1	9	23,8	5,0	Reemplazar el sistema de secado	○	○	○		○
2	9	19,0	4,0	Rediseñar el mecanismo de remoción	○	▲			○
3	1	14,3	3,0	Bajo costo					▲
4	9	19,0	4,0	Bajo consumo de energía				○	○
5	9	23,8	5,0	Preservar la calidad del cacao	○	○	○		
Meta (Target) o Valor Limite					50-70°C	7%	7 rpm	1/2 HP	GLP y Energía Eléctrica
Dificultad (0=Facil de lograr, 10=Extremadamente Dificil)					2	2	7	3	2
Valor Máximo de la relación en la Columna.					9	9	9	9	9
Peso / Importancia					485,7	447,6	285,7	171,4	571,4
Peso Relativo					24,8	22,8	14,6	8,7	29,1

3.1.3. Análisis de resultados de la matriz QFD

En la Figura 20 se muestra el porcentaje de ponderación acorde a los resultados obtenidos de la matriz QFD, porcentaje que representa las características técnicas, información que se utiliza para el diseño y construcción del prototipo de la máquina secadora de cacao.

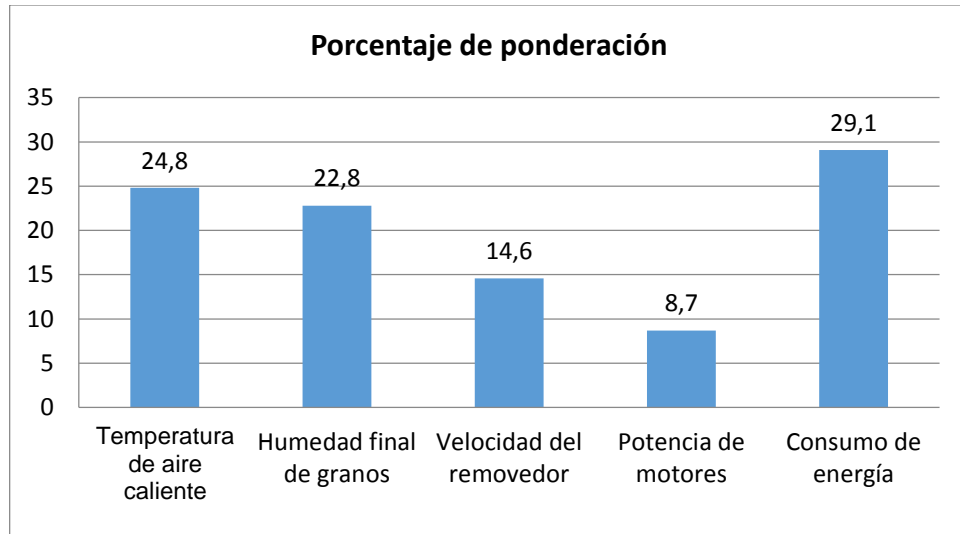


Figura 20 Porcentaje de ponderación obtenido de matriz QFD

Con un 29,10% de importancia el consumo de energía es el primer parámetro por el que inicia el diseño del prototipo. La segunda característica técnica es la temperatura del aire caliente con un 24,80% de importancia que se debe considerar para realizar un secado constante y sin tostar el grano de cacao. Estas dos características se relacionan entre sí, pues la fuente de energía a ser seleccionada debe cumplir con los parámetros de control de temperatura del flujo de aire caliente para un óptimo proceso de secado de grano.

3.2. Diseño Base

3.2.1. Componentes del secador

El prototipo de máquina secadora de cacao estaba conformado por los siguientes componentes:

- Estructura de soporte.

- Sistema de remoción por motorreductor.
- Contenedor abierto con superficie inferior micro perforada en acero inoxidable para tratamiento de alimentos.
- Sistema de inyección de flujo de calor (ventilador, resistencias).
- Elementos de control y de seguridad.

A continuación, se describe el proceso seguido para la generación de conceptos pertinentes al proyecto.

Aclaración del problema

Los problemas en la selección de concepto del prototipo de máquina secadora de cacao son:

- Tipo de secador.
- Energía de operación.
- Medio de transferencia de calor.
- Actuadores para removedor y ventilador.
- Ventilador de aire.

Exploración sistemática

Por medio de la Tabla 12 se realiza la exploración sistemática de las posibles soluciones correspondientes a cada sub-problema, todo esto basado en la solución de conceptos.

Tabla 12
Solución de sub-problemas de conceptos

SUB-PROBLEMAS	Alimentación del prototipo	Automatización y control	Sensores de temperatura	Sensor de humedad	Tipo de calefactor	Removedor de granos
ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN	Baterías	Temporizadores	Termocuplas tipo J,K	Sensor de humedad de granos tipo sonda	Resistencias eléctricas	Removedor de paletas
	Generadores a base de gasolina	Electroválvulas	Pt100	Sensor de humedad de granos portable FSR-04	Quemador de GLP	Removedor de turbina
	GLP		RTD		Intercambiador de calor	Removedor de hélice
	Energía solar		Termómetro			
	Energía eléctrica					

Selección de componentes para el prototipo de secadora de cacao

A continuación, se muestran tablas comparativas de diferentes componentes que forman parte de las posibles soluciones correspondientes a cada sub-problema del prototipo, a través de las cuales se realiza la selección de uno de estos, tomando en consideración los requerimientos solicitados por el cliente.

La selección se la realiza por medio de una ponderación considerando los criterios de 1: malo, 2: regular y 3: bueno.

- **Fuente de energía**

Las máquinas secadoras de cacao existentes en el mercado utilizan diferentes tecnologías, entre ellas se encuentran secadoras que consumen combustible por medio de cámaras de quemado e intercambiadores de calor como se muestra en la Figura 21, gas licuado de petróleo GLP por medio de quemadores industriales como se observa en la Figura 22.



Figura 21 Secadora de cacao por combustión
Fuente: Fundidora del Norte, (2014)



Figura 22 Secadora de cacao por GLP
Fuente: WILPAC, (2016)

De la Tabla 13 el GLP es el sistema de alimentación seleccionado para el quemador, debido a que es un combustible eficiente, limpio, versátil y accesible.

Tabla 13
Comparación de los sistemas de alimentación del prototipo

Componente	Descripción	Pond.
Baterías	Produce electricidad a partir de reacción química. Material problema en el flujo de residuos. Níquel y cadmio son tóxicos.	2
Energía Solar	Poder calorífico elevado. De transporte fácil. Bajo en carbono, no emite humo negro y no se derrama.	1
GLP	Sistemas de combustible herméticos. Vapores son 50% menos reactivos que los de gasolina. Reduce las emisiones de gases de efecto invernadero y protege el medio ambiente.	3
Energía Eléctrica	Forma de energía resultante del flujo de carga eléctrica. Produce más contaminación que cualquier otra industria. Impactos en el agua, la generación de desechos y la interrupción del uso de la tierra.	2

- **Contenedores para el grano**

En la Tabla 14 se muestran las opciones de diferentes tipos de contenedores para su selección.

Tabla 14
Comparación de contenedores para el grano

Componente	Descripción	Pond.
Tolva	Dispositivo en forma de cono en el que pueden colocarse sustancias tales como grano, carbón o alimento animal y desde donde pueden liberarse cuando se requiera.	2
Cernidero	Objeto con orificios en los que vierte un líquido para separar el líquido de sólidos en él.	1
Contenedor	Dispositivo que crea un espacio parcial o totalmente cerrado que puede usarse para contener, almacenar y transportar objetos o materiales.	3

El contenedor resulta conveniente de acuerdo a las condiciones que se necesita para el secado de granos de cacao.

- **Sensores de temperatura**

De acuerdo las características descritas en la Tabla 15, la termocupla tipo K es la más adecuada para la aplicación.

Tabla 15
Comparación de sensores de temperatura

Componente	Descripción	Pond.
Termocupla tipo K	Sensor de temperatura más común utilizado industrialmente. Al aplicar temperatura en la unión de los metales se genera un voltaje muy pequeño del orden de los milivoltios el cual aumenta con la temperatura. Se usa típicamente en fundición y hornos a temperaturas menores de 1300 °C.	3
Termómetro	El termómetro es un instrumento de medición de temperatura.	1
RTD	Trabaja según el principio de que en la medida que varía la temperatura, su resistencia se modifica, y la magnitud de esta modificación puede relacionarse con la variación de temperatura. La termorresistencia de platino se utiliza como estándar internacional de temperatura desde -260°C hasta 630°C.	2

- **Sensores de humedad**

De acuerdo las características que se requieren para la aplicación los sensores de humedad estáticos son los adecuados debido a la capacidad de variar la señal de salida, en la Tabla 16 se describen sus características.

Tabla 16
Comparación de sensores de humedad

Componente	Descripción	Pond.
Sensor de humedad tipo sonda	Máxima precisión en una amplia gama de Temperaturas. Al aumentar la temperatura aumenta su resistencia eléctrica. Costosos y mecánicamente no tan rígidos como los termopares, los superan especialmente en aplicaciones de bajas temperaturas. (-100 a 200 °). Entregar precisiones de una décima de grado con la ventaja que no se descompone gradualmente entregando lecturas erróneas, si no que normalmente se abre, con lo cual el dispositivo medidor detecta inmediatamente la falla del sensor y da aviso.	2
Sensor de humedad portable	Mide la humedad sin alterar la zona radicular. Responde inmediatamente a los cambios en el contenido de humedad.	1
Sensores de humedad estáticos	Indica la mayor o menor variación de la señal de salida por unidad de la magnitud de entrada. Cuanto mayor sea la variación de la señal de salida producida por una variación en la señal de entrada, el sensor es más sensible.	3

- **Calefactores**

El tipo de calefactor seleccionado para el prototipo es el quemador de GLP, debido a las características requeridas por el cliente y a la reducción de emisiones de gases contaminantes; en la Tabla 17 se muestran estas características y la selección del mismo por su valoración.

Tabla 17
Comparación de tipos de calefactores

Componente	Descripción	Pond.
Resistencias eléctricas	Oposición al paso de la corriente eléctrica. Se usan para calefacción localizada en los procesos que exigen control riguroso de temperaturas.	2
Quemador de GLP	Poder calorífico más alto que otros combustibles. Puede ser transportado fácilmente. Bajo en carbono, no emite humo negro y no se derrama. Usar GLP mejora la calidad de aire, reduce las emisiones de gases de efecto invernadero y protege el medio ambiente.	3
Intercambiador de calor	Transferir calor de un fluido a otro. Se emplean para procesos de calentamiento, ventilación, sistemas de acondicionamiento de espacios, radiadores en máquinas de combustión interna, calderas, condensadores, y pre-calentadores o enfriamiento de fluidos.	1

- **Removedores de grano**

De la Tabla 18 el removedor de paletas es el óptimo, ya que permite una mejor distribución de los granos para homogeneizar el secado, características requeridas por el cliente.

Tabla 18
Comparación de removedores de granos

Componente	Descripción	Pond.
Removedor de paletas	Giran a una velocidad comprendida entre los 5 y 150 r.p.m. A velocidades muy bajas produce una agitación suave. Giran a velocidades bajas o moderadas en el centro del tanque, impulsando al líquido radial y tangencialmente, sin que exista movimiento vertical respecto del agitador.	3
Removedor de turbina	Son eficaces para un amplio intervalo de viscosidades. En líquidos poco viscosos, producen corrientes intensas, que se extienden por todo el tanque y destruyen las masas de líquido estancado. Las corrientes principales son radiales y tangenciales.	1
Removedor de hélice	Opera con velocidad elevada y se emplea para líquidos pocos viscosos. Cortan o friccionan vigorosamente el líquido y son eficaces en tanques de gran tamaño. Se utilizan para líquidos inmiscibles y preparación de soluciones muy concentradas.	2

3.3. Rediseño y optimización

Se presenta el rediseño del prototipo de secador de cacao con removedor, el cual se realizó tomando en cuenta los parámetros de desempeño más importantes.

Estos parámetros considerados para su rediseño fueron: costo de implementación, rendimiento, sistema de secado, mecanismo de remoción y calidad del grano de cacao.

3.3.1. Rediseño de componentes mecánicos

Removedor de paleta o pala

Estos removedores son de tipo industrial y giran a una velocidad entre 5 y 150 r.p.m. Las paletas se dimensionaron a una altura del lecho de granos de 4 cm, y posicionadas estratégicamente como se observa en la Figura 23,

además ahora con el correcto dimensionamiento se puede remover los granos en su totalidad garantizando el secado homogéneo y es posible cambiar el sentido de posición de las mismas mediante una palanca ubicada en la parte superior, permitiendo así la remoción y la evacuación del grano seco hacia los saquillos de almacenamiento. Los modos de funcionamiento de muestran en la Tabla 19.

Tabla 19
Sentido de las paletas en grados

Sentido de las Paletas en grados	Función
45°	Remoción del grano hacia el centro
90°	Remoción del grano
135°	Remoción del grano hacia afuera

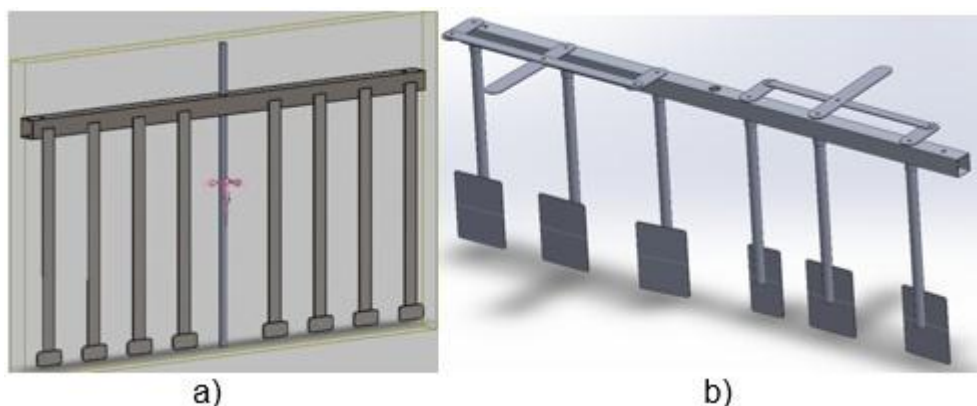


Figura 23 Removedor de paletas, a) diseño anterior y b) rediseño

- **Resultado del torque que ejercen las paletas**

Al momento de rediseñar los agitadores se deben calcular nuevamente el torque necesario para la remoción de los granos de cacao y poder seleccionar el motor adecuado. En la Figura 24 se muestra el área de contacto entre el grano y cada una de las paletas para calcular el torque necesario.

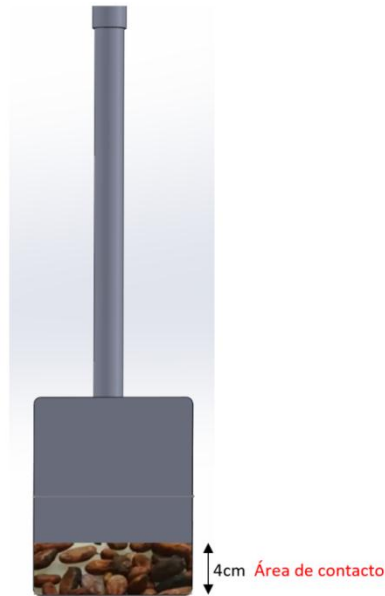


Figura 24 Área de contacto de la paleta

Potencia del motor

Para el cálculo de la potencia del motor se considera una masa de 300 lb y un área de contacto de 4cm.

$$A_p = b * h$$

Ecuación 5.

$$A_p = (4cm)(12cm)$$

$$A_p = 48 \text{ cm}^2$$

$$A_p = 0,0048 \text{ m}^2$$

Donde:

A_p : Área de contacto de la paleta.

En la Tabla 20 se muestran los resultados del volumen de remoción del cacao.

Tabla 20
Resultados obtenidos por número de paleta

N°. Paleta	Radio (m)	Área (m ²)	Perímetro (m)	Volumen (m ³)
1	0,20	0,0048	1,256	0,0060288
2	0,44	0,0048	2,7646	0,01327008
3	0,68	0,0048	4,2725	0,020508

Con el volumen de remoción obtenido se calcula la masa de cacao a remover como se detalla a continuación:

$$m_i = \rho_{cacao} * V_i \quad \text{Ecuación 6.}$$

$$m_1 = \rho_{cacao} * V_1$$

$$m_1 = (480)(0,0060288)$$

$$m_1 = 2,8938224 \text{ kg}$$

$$m_2 = \rho_{cacao} * V_2$$

$$m_2 = (480)(0,01327008)$$

$$m_2 = 6,3696384 \text{ kg}$$

$$m_3 = \rho_{cacao} * V_3$$

$$m_3 = (480)(0,020508)$$

$$m_3 = 9,84384 \text{ kg}$$

$$F_i = m_i * g \quad \text{Ecuación 7.}$$

$$F_1 = m_1 * g$$

$$F_1 = 28,3884 \text{ N}$$

$$F_2 = m_2 * g$$

$$F_2 = 62,4861 \text{ N}$$

$$F_3 = m_3 * g$$

$$F_3 = 96,5676 \text{ N}$$

Ecuación 8.

$$T_i = F_i * r_i$$

$$T_1 = F_1 * r_1$$

$$T_1 = 5,67768 \text{ N.m}$$

$$T_2 = F_2 * r_2$$

$$T_2 = 27,493884 \text{ N.m}$$

$$T_3 = F_3 * r_3$$

$$T_3 = 65,665968 \text{ N.m}$$

$$T_T = \sum_{i=1}^8 T_i$$

$$T_T = T_1 + T_2 + T_3$$

$$T_T = 98,837532 \text{ N.m}$$

Ecuación 9.

$$HO = \frac{T_T * RPM}{716,2}$$

$$HO = \frac{98,837532 * 7}{716,2}$$

$$HO = 0,966 \text{ HP}$$

$$HO \approx 1 \text{ HP}$$

Donde:

m_i = masa de la *i*ésima paleta, (kg)

V_i = volumen de la *i*ésima paleta, (m^3)

ρ_{cacao} = densidad del cacao, $480 \text{ kg}/m^3$. (Tinoco & Yomali, 2010)

F_i = fuerza de remoción de la *i*ésima paleta, (N)

g = aceleración de la gravedad, $9,81 \text{ m}/s^2$

T_i = torque de la *i*ésima paleta, (N.m)

r_i = radio de momento de la *i*ésima paleta, (m)

T_T = torque total de remoción (N.m)

Selección del motor

- **Alimentación del motor**

Las principales características que identifican una red eléctrica son la tensión y la frecuencia. Para la aplicación del removedor y secador de cacao se dispone a usar una red bifásica de 220VAC y una frecuencia normalizada de 60Hz.

- **Potencia del motor**

La potencia calculada del motor fue de $P=0.966$ HP. Por lo tanto, se seleccionó un motor reductor trifásico de 1 HP a 21 r.p.m. y un factor de servicio de 1,2.

3.3.2. Selección de los componentes eléctricos y electrónicos

Selección del Variador de Frecuencia

Para seleccionar el variador de frecuencia primeramente se realizaron los cálculos respectivos para la selección del motor, siendo el motor de 1HP de potencia el seleccionado debido a que con esta potencia se puede incrementar la capacidad para remover más granos y disminuir la velocidad de remoción. Con el variador de frecuencia con control vectorial seleccionado se obtiene el torque adecuado para la remoción de grano, de esta manera se logra remover hasta 300lb de cacao húmedo con una velocidad de 7 r.p.m. sin tener inconvenientes de ningún tipo.

En la Tabla 21 se muestran las características del variador de frecuencia seleccionado. En el Anexo 1 se encuentran más detalles de las características del variador de frecuencia CFW100.

Tabla 21
Características del variador de frecuencia CFW100

	Producto y Serie	Identificación del modelo			Grado de protección	Versión de Hardware	Versión de Software
		Tamaño	Corriente Nominal	N° de Fases			
	CFW100	A	01P6	S	2	20	...
Opciones disponibles		A	01P6=1,6A	S= alimentación monofásica	2=200...240V		En blanco= Estándar
	CFW100	B	02P6=2,6A				Sx= Software especial
		C	04P2=4,2A				
				20=IP20			En blanco= Estándar Hx= Hardware especial

Selección de la electroválvula

Se seleccionó la electroválvula para realizar el cierre del paso de gas automáticamente mediante un temporizador, con un voltaje de 24V DC debido a la existencia en el tablero de control de una fuente que genera el mismo voltaje. La medida de la entrada de la electroválvula se eligió de ¼" con entrada ntp por la maguera de salida de la válvula del tanque de gas.

La selección de este componente electrónico se lo realizó en base al sistema de automatización que se quiere implementar, al uso general (aire, agua, aceite), al presupuesto y a la existencia del mismo en el mercado.

Las características de la electroválvula a 24V DC seleccionada para la implementación en la máquina secadora de cacao son las siguientes:

- Presión máxima de trabajo: 235 psi hasta ¼" – 150 psi hasta 1-1/2".
- Presión mínima de trabajo: 0 psi-puede trabajar en vacío.
- Temperatura máxima: 120 °C.
- Material del cuerpo: acero inoxidable 304SS.

- Sellos: Viton.
- Grado de protección: IP65.

En la Figura 25 se muestra la electroválvula seleccionada para la implementación en la máquina secadora de cacao. En el Anexo 2 se encuentran las especificaciones de la electroválvula.



Figura 25 Electroválvula para implementación

Selección del temporizador

Se seleccionaron los temporizadores para automatizar mediante tiempos todo el proceso de secado del grano de cacao, las características principales por las cuales fueron elegidos son: tienen la posibilidad de entrada de voltaje de 24V DC y 220V AC, la primera es para controlar la electroválvula, y la segunda para controlar todo el sistema.

En la Figura 26 se muestra una imagen del temporizador utilizado. Las características técnicas se muestran en el Anexo 3.



Figura 26 Temporizador de Siemens

Circuito de control

Mediante un rediseño del circuito de control se incrementó un temporizador y una electroválvula mediante los cuales se realiza la automatización del cierre del paso del GLP hacia la cámara de secado, Figura 27. La alimentación de este circuito de control viene dada por una fuente de corriente continua de 24V a 8A.

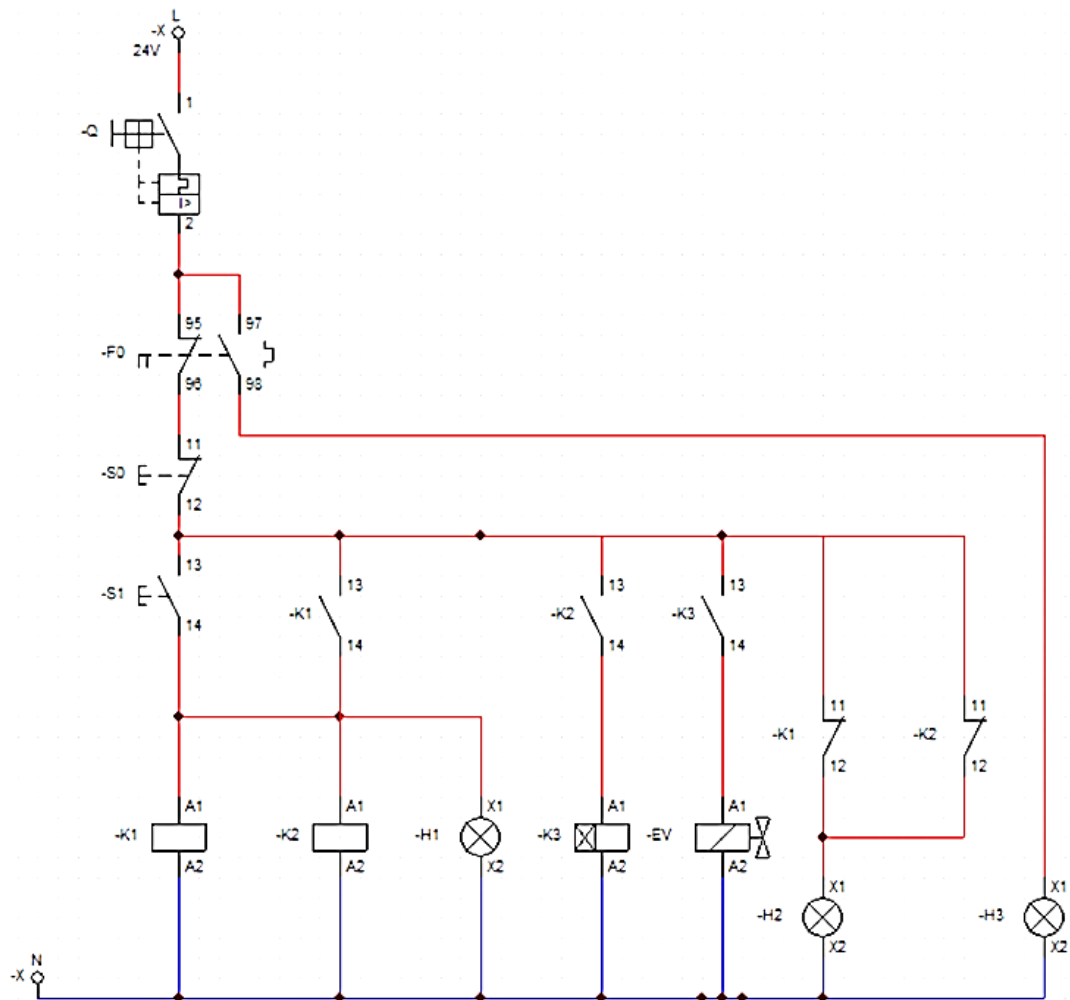


Figura 27 Diagrama electrónico del circuito de control

Circuito de potencia

En el circuito de potencia se añadió un temporizador K4 a 220V que desactivará todo el sistema automatizándolo de manera que se apague cuando termine el proceso de secado, además se cambió el variador de frecuencia siendo antes de control escalar y ahora de control vectorial.

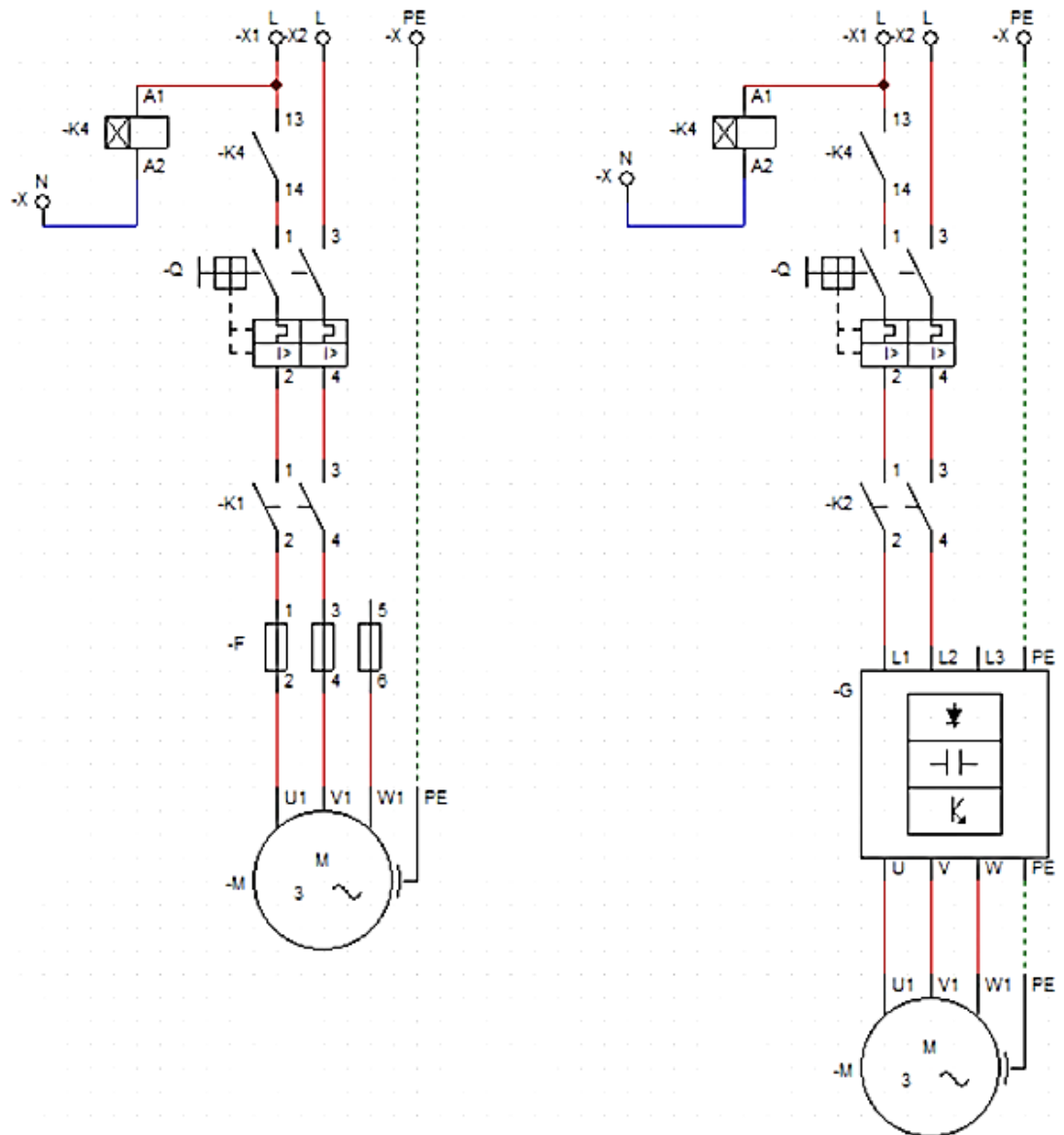


Figura 28 Diagrama electrónico del circuito de potencia

3.3.3. Sistema de recirculación del aire

Para el diseño de este sistema se consideró seleccionar los conductos del aire caliente por donde va a circular y los filtros para retener la humedad del mismo, los cuales deberán seguir el esquema propuesto que se muestra en la Figura 29.

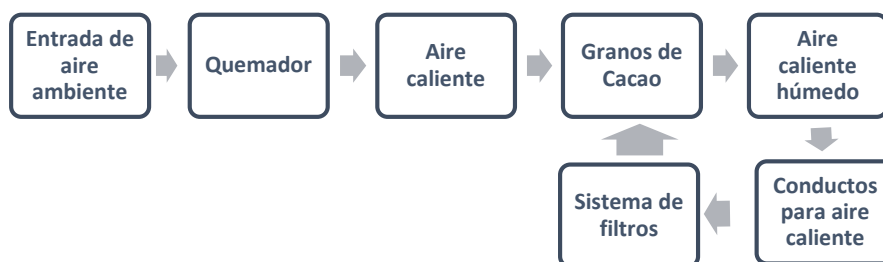


Figura 29 Diagrama del diseño del sistema de recirculación de aire

Selección de los conductos

Para los conductos del sistema recirculación se seleccionó una tubería flexible de aluminio aislado (Thermaflow), Figura 30, el cual posee las siguientes características:

- Un flexible A101.
- Un aislante térmico de lana de vidrio (25 mm - 16 kg/m³).
- Una barrera de vapor (lámina de aluminio reforzada por una rejilla de fibra de vidrio y una lámina de poliéster). (Chimenorte, 2012)



Figura 30 Tubería de aluminio Thermaflow
Fuente: Chimenorte, (2012)

Estas características son las adecuadas para el proceso de secado ya que involucra emisiones de gas.

Selección de los filtros

Para este caso, el cual el aire caliente contiene humedad, necesariamente se debe elegir el filtro secador con núcleo sólido (Figura 31), para realimentar directamente hacia los granos de cacao, optimizando así el consumo de GLP.



Figura 31 Serie csr - filtros deshidratadores de núcleo sólido sustituibles
Fuente: Trane, (2018)

Este tipo de filtro poseen las siguientes características:

- Alúmina activada y una malla de poliéster insertada en la salida del filtro.
- Gel de sílice.
- Molecular sieves (tamiz molecular).
- El núcleo sólido es comparable a una esponja, “absorbe agua y la retiene en su interior”.
- El tamiz molecular y gel de sílice retienen el agua, mientras que la alúmina activada retiene el agua y los ácidos.
- El núcleo sólido, junto con la malla de poliéster, “actúa como filtro contra la suciedad”. (Trane, 2018)

En la Figura 32 se puede observar el diseño propuesto del sistema de recirculación de aire caliente.



Figura 32 Diseño propuesto del sistema de recirculación de aire caliente.

Fuente: Dickens, (2016)

Por requerimiento de la empresa Cacao 3H, el sistema de recirculación de aire se limitó a la elaboración de la propuesta de diseño y la selección de materiales, ya que la implementación de dicho sistema involucraba mayor cantidad de recursos económicos que en este momento la empresa no puede cubrir, por lo tanto, se decidió dejar la implementación para un trabajo futuro.

CAPÍTULO IV

IMPLEMENTACIÓN Y RECONSTRUCCIÓN

4.1. Estructura mecánica

El prototipo de máquina secadora de cacao se encuentra conformada mecánicamente por un conjunto de estructuras como se muestra en la Figura 33.

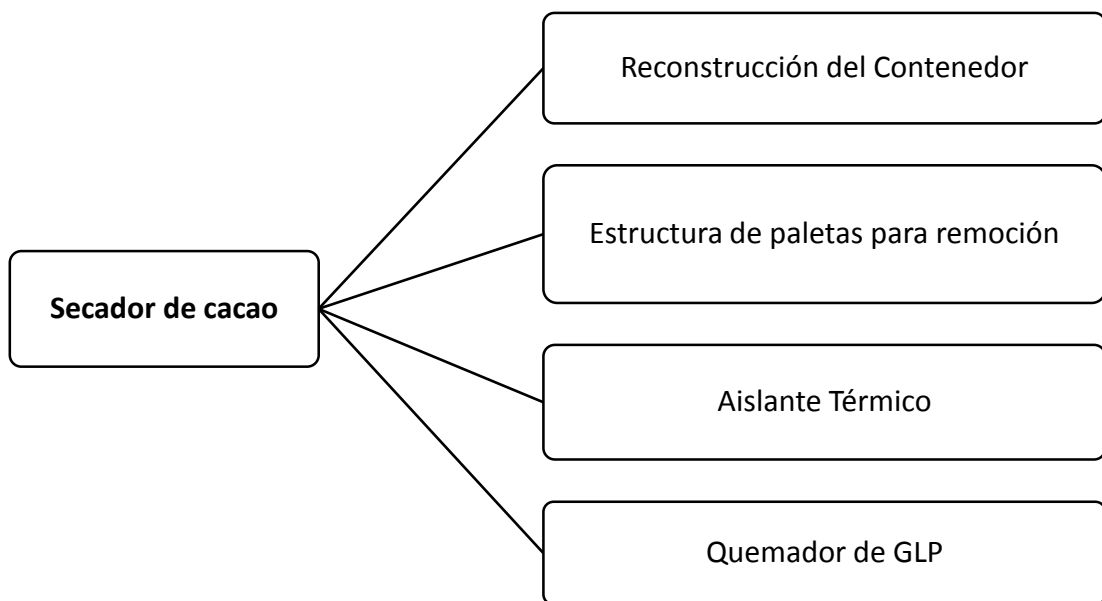


Figura 33 Componentes de la estructura mecánica del secador

4.2. Estructura del quemador

En la Figura 34 se muestra el proceso de construcción del quemador y los elementos que lo componen.



Figura 34 Construcción del quemador

En la Figura 35 se muestra el quemador adaptado al sistema de secado.



Figura 35 Adaptación del quemador

4.3. Estructura del contenedor

Al contenedor de la máquina construida anteriormente para la empresa Cacao 3H se le realizó un proceso de reconstrucción, por medio de un tecele y cadenas se le dio la forma redonda que se requiere para evitar que el grano se traslade hacia la parte inferior de la cámara de secado, ya que su forma no era completamente cilíndrica, con aberturas en su contorno; además se realizó una modificación en la puerta de salida del grano seco, aumentando una ceja para la evacuación del grano en acero inoxidable. En la Figura 36 se muestra el contenedor ya reconstruido.



Figura 36 Contenedor reconstruido

La chumacera de la parte inferior de la plancha perforada fue removida y soldada para un mejor diseño que permite el aprovechamiento del espacio y mejora la estética. La Figura 38 se muestra el posicionamiento de la chumacera en la parte inferior de la plancha perforada.



Figura 37 Chumacera parte superior de la plancha perforada



Figura 38 Chumacera en la parte inferior de la plancha perforada

Una vez reconstruido el contenedor se realizó el recubrimiento del mismo con lana de vidrio, la finalidad de esto es reducir las pérdidas del calor producidas por el sistema durante el proceso de secado; además se adicionó una cubierta de malla para evitar que la lana se desprenda, esto se puede observar en la Figura 39.



a) b)
Figura 39 Recubrimiento contenedor a) parte posterior, b) parte frontal

4.4. Estructura de paletas para remoción

Para fabricar la estructura de paletas de remoción fue necesario utilizar el proceso de corte, fresado, perforado y soldadura por electrodo revestido.

En la Figura 40 se muestran los tubos cortados y bocines de acero inoxidable que permitirán el movimiento de las paletas de remoción.



a) Tubos b) Bocines
Figura 40 Tubos y bocines en acero inoxidable

En los tubos se realiza la suelda de un eje para colocar un perno que permitirá la sujeción de la paleta y proporcionará el movimiento al sistema de paletas. En la Figura 41 se muestra la soldadura del eje con un perno de acople para sujeción de la paleta.



Figura 41 Soldadura de eje con perno de acople para sujeción de paleta

Se realiza el ensamble del sistema estructural de paletas de remoción para luego acoplarlo al contenedor. En la Figura 42 se muestra el sistema de paletas ensamblado.



Figura 42 Ensamble estructural del sistema de paletas

Ya culminado el sistema de paletas de remoción se procede a su ubicación en el contenedor para verificar que se acople de manera satisfactoria y establecer la posición adecuada del mismo.

En la Figura 43 se muestra el ensamble del contenedor y el sistema de paletas del antes y después.

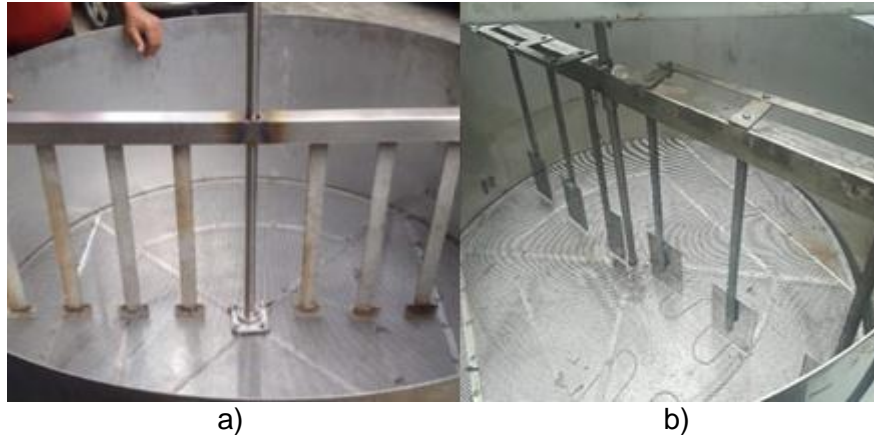


Figura 43 Sistema de paletas en el contenedor a) antes, b) después

Finalmente se realiza la colocación de canaletas para la instalación eléctrica. En la Figura 44 se muestra la máquina secadora de cacao culminada, lista para realizar las respectivas pruebas de funcionamiento.



Figura 44 Colocación de canaletas para instalación eléctrica

En la parte eléctrica se sustituyó el variador de frecuencia con control escalar por uno de control vectorial para incrementar el torque a bajas velocidades, así como también los temporizadores y termocupla. En la Figura 45 se muestra el tablero de control interno.



1. Breaker o disyuntor de protección
2. Terminales para 220V AC
3. Terminales para 24V DC
4. Contactores Eléctricos
5. Relé SSR
6. Variador de Frecuencia Escalar
7. Fuente

b)



1. Breaker o disyuntor de protección
2. Terminales para 220V AC
3. Terminales para 24V DC
4. Contactores Eléctricos
5. Relé SSR
6. Variador de Frecuencia Vectorial
7. Temporizador a 220V AC
8. Temporizador a 24V DC
9. Canaletas
10. Fuente

a)

Figura 45 Tablero de control interno a) antes b) después

CAPÍTULO V

PRUEBAS Y RESULTADOS

En este capítulo se presenta el proceso de pruebas de funcionamiento de la máquina secadora de cacao y los resultados obtenidos por horas de secado. Se realiza el análisis del grano antes y después del proceso de secado, con la finalidad de determinar la validación del sistema concluido.

El proceso de pruebas de calidad se basa en 5 ensayos con muestras de cacao en baba. Todas estas pruebas realizadas con el procedimiento que se describe a continuación:

- Se coloca el cacao en lonas para escurrir la baba y se lo fermenta por 4 días, luego de esto el grano se traslada hacia la secadora para comenzar el proceso.
- La remoción se realizó con éxito al igual que el secado obteniendo como resultado el cacao seco en 6 horas y con aproximadamente 10Kg de un tanque de gas industrial para una muestra de 300lb.

En la Figura 46 se observa el cacao en baba que se va a utilizar para las pruebas respectivas.



Figura 46 Cacao en baba

En la Figura 47 se puede observar la pulpa del grano de cacao antes de haber ingresado al proceso de secado.

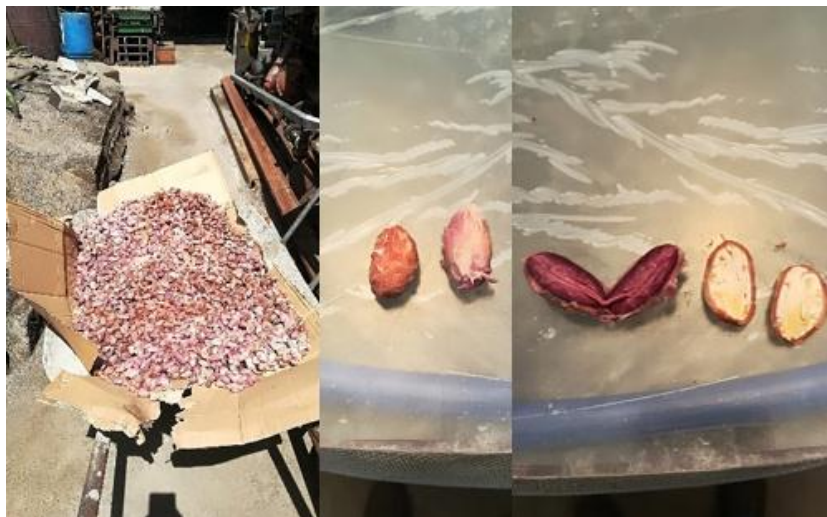


Figura 47 Pulpa del cacao antes del secado

En la Figura 48 se puede observar la medición inicial del Ph del grano de cacao, se obtuvo un Ph=4 utilizando el método de la tirilla Dirui que indica la valoración de acuerdo al color.



Figura 48 Medición inicial del Ph del grano de cacao

En la Figura 49 se muestra la Tirilla Dirui utilizado para medir el Ph.



En la Figura 50 se puede observar los granos a la (a) segunda, (b) tercera y (c) cuarta hora de secado.

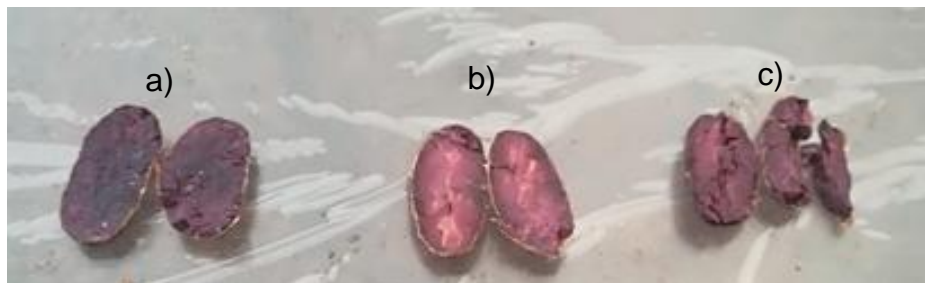


Figura 50 Secado del grano por horas de secado

Posteriormente se realiza la prueba final del Ph dando como resultado 5 en base al color. En la Figura 51 se muestra la medición final del Ph.

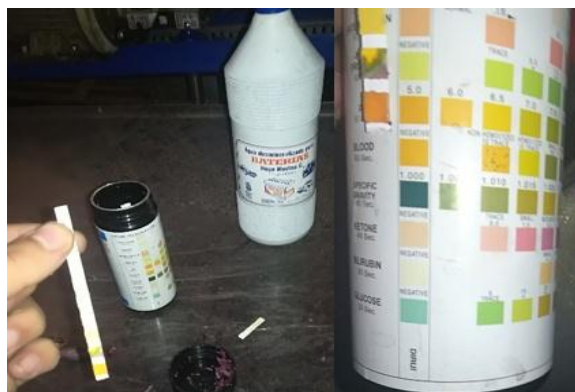


Figura 51 Medición final del Ph del grano de cacao

En la Figura 52 se muestra la medición de la humedad del cacao mediante el instrumento electrónico Samap H40. La medición inicia colocando los granos de cacao en el contenedor de la parte superior; con un separador se evita que ingresen hacia la cámara de medición hasta que se complete la inicialización del equipo, luego de lo cual se retira dicho separador, dejando caer los granos hacia la cámara donde se mide la humedad, obteniéndose una lectura con error de +0.5% de humedad.



Figura 52 Medición de la humedad

En la Tabla 22 se muestra una tabla general de los resultados obtenidos de las 5 pruebas realizadas.

Tabla 22
Tabla de resultados

Cacao CCN51	Libras	Fermentación	Ph Inicial	Humedad Inicial	Tiempo de secado aire caliente	Tiempo de secado solo aire	Consumo de GLP (Kg)	Ph Final	Humedad Final
Prueba 1	50 lb	4 días	4	50%	2 horas	0.5 h	3	5	7,5%
Prueba 2	100 lb	4 días	4	50%	3 horas	1 h	6	5	7,5%
Prueba 3	100 lb	4 días	4	50%	3 horas	1 h	6	5	7,5%
Prueba 4	100 lb	4 días	4	50%	3 horas	1 h	6	5	7,5%
Prueba 5	300 lb	4 días	4	50%	4 horas	2 h	10	5	7,5%

En la Tabla 22 se puede observar el Ph inicial y final de los granos, con estos datos se puede deducir la calidad del grano, pues al obtener un Ph de 5, significa que el grano seco es de excelente calidad según Álvarez, (2012), por lo que se puede afirmar que la máquina es adecuada para este tipo de proceso de secado de cacao.

En las pruebas de funcionamiento se puede analizar lo siguiente:

La diferencia entre el secado natural y artificial en cuanto a tiempo es abismal, ya que en el primero se necesita al menos 4 días de sol (Relief, 2018), mientras que con el segundo método como indican los resultados en la Tabla 22 solo se necesitan 6 horas para una cantidad de 300 lb, además de conservar la calidad del grano por la remoción lenta y constante a una temperatura entre 40 y 60 °C.

La estructura del contenedor ahora tiene una forma redonda sin espacios en los bordes, evitando de esta manera la pérdida de granos durante el proceso.

El removedor de paletas ahora es más eficiente logrando ubicar en posiciones adecuadas las paletas para un mejor secado del grano mejorando el sistema anterior que no podía remover de forma correcta el cacao, además con este nuevo sistema se puede evacuar hacia costales los granos de forma autónoma.

5.1. Validación de la Hipótesis

Siempre es menester comprobar que la hipótesis planteada se cumpla, mediante un método confiable en este caso se eligió la prueba estadística de chi-cuadrado (ji cuadrado), de esta manera demostrar que los datos son reales y no al azar.

5.1.1. Hipótesis nula (Ho) y alternativa (H1)

Según (Navidi, 2006) por convención, Ho es siempre una hipótesis de igualdad. Usualmente lo que se busca es evidencia para poder rechazar Ho. La H1 presenta que el efecto que indica la muestra es verdadero, por lo que representa a toda la población.

- Ho: El rediseño del prototipo no aporta para obtener un grano de cacao de mejor calidad.
- H1: El rediseño del prototipo aporta para obtener un grano de cacao de mejor calidad.

5.1.2. Valores observados

Después de establecer las hipótesis, se realiza la tabla de observaciones donde incluyen los valores obtenidos en las pruebas realizadas, estos valores contienen 5 poblaciones distintas, es decir se escogen muestras de granos de cacao de las 5 tandas. En la Figura 53 se muestra el pesaje del cacao para la selección de las muestras.



Figura 53 Pesaje del cacao



Figura 54 Muestras de granos de cacao seleccionados

En la Tabla 23 se muestran los valores de observaciones obtenidos en las pruebas realizadas. Tomando en consideración Ph bajo (<5), Ph adecuado (=5), Ph alto (>5).

Tabla 23
Tabla de valores observados

	Ph			Total(granos)
	Bajo	Adecuado	Alto	
Tanda 1	2	37	3	42
Tanda 2	1	63	1	65
Tanda 3	3	86	2	91
Tanda 4	1	42	2	45
Tanda 5	5	26	3	34
Total(granos)	12	254	11	277

5.1.3. Valores esperados

$$E_{ij} = \frac{o_i o_j}{o_{..}}$$

Ecuación 10.

Dónde:

O_i : Es el valor del total de la fila de la tabla

O_j : Es el valor del total de la columna de la tabla

$O_{..}$: Es el valor del total de todas las muestras de la tabla

En la Tabla 24 se muestran los valores esperados obtenidos en las pruebas realizadas. Los valores de esta tabla fueron obtenidos de acuerdo a la ecuación 12; por ejemplo, para el caso del valor correspondiente a la tanda 1 con Ph bajo:

$$Tanda_{11} = \frac{(12)(42)}{277} = 1.82$$

Tabla 24
Valores esperados

	Ph			Total
	Bajo	Adecuado	Alto	
Tanda 1	1,82	38,51	1,67	42,00
Tanda 2	2,82	59,60	2,58	65,00
Tanda 3	3,94	83,44	3,61	91,00
Tanda 4	1,95	41,26	1,79	45,00
Tanda 5	1,47	31,18	1,35	34,00
Total	12,00	254,00	11,00	277,00

5.1.4. Estadístico de prueba

$$x^2 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \frac{(O_{ij} - E_{ij})^2}{E_{ij}} \quad \text{Ecuación 11.}$$

$$x^2 = 16,32$$

- **Estadístico de prueba chi-tabla**

Para hallar el chi-tabla es necesario calcular los grados de libertad (Navidi, 2006), por lo tanto, se tiene la siguiente ecuación:

$$gdl = (M - 1)(N - 1) \quad \text{Ecuación 12.}$$

En este caso se tiene 5 filas y 3 columnas, el resultado sería:

$$gdl = (5 - 1)(3 - 1) = 8$$

Con un nivel de 95% de confianza se tiene $\alpha = 0.05$, la significancia para este valor es de $x_{\alpha}^2 = 15,51$, este dato se compara con el estadístico de prueba:

$$x^2 \leq x_{\alpha}^2$$

Ecuación 13.

$$16,32 \leq 15,51, \text{ no se cumple.}$$

En la Figura 55 se muestra la distribución de Chi-cuadrado con los valores obtenidos.

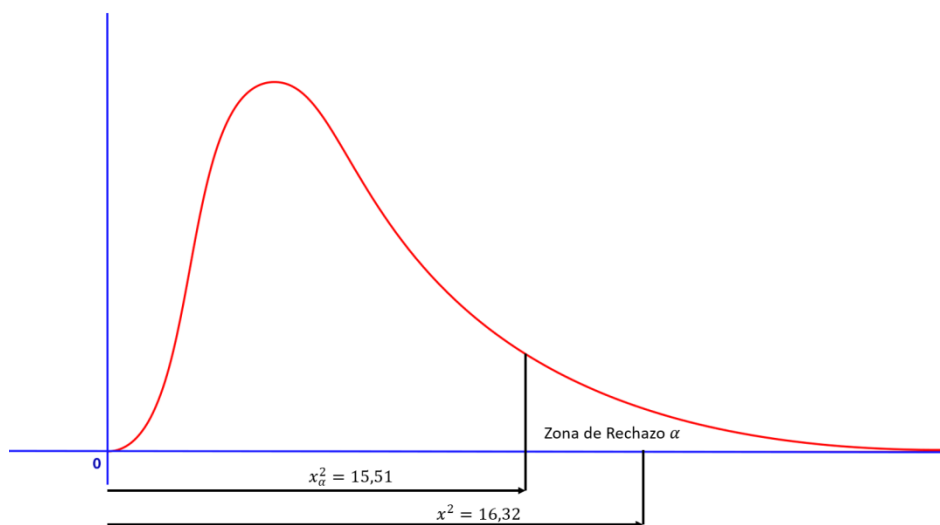


Figura 55 Distribución de Chi-cuadrado con los valores obtenidos

Como se observa en la anterior relación, el valor se encuentra en la zona de rechazo, por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula, por lo tanto se comprueba que el rediseño de la máquina secadora de cacao aporta para obtener un grano de cacao de mejor calidad.

5.1.5. Consumo Energético

Para calcular el impacto del rediseño de la máquina secadora de cacao en lo relativo a consumo energético e impacto financiero, se procede a realizar una comparación entre el sistema antiguo y el presentado en este trabajo.

Para el cálculo del costo de energía se utilizará la tasa de 0.12 USD por kWh aplicada en el cantón Cumandá (Flores & Castrillón, 2016).

Con el rediseño de la máquina se obtuvo un consumo de 9.9kWh por cada ciclo de secado con 300lb de cacao. Con el diseño anterior, basado en resistencias (niquelinas) se obtenía un consumo de 90 kWh en dos ciclos de secado con una masa de 100lb de cacao cada uno.

$$\text{Consumo de Electricidad (Actual)} = 9.9\text{kWh} * 0.12 \frac{\text{USD}}{\text{kWh}} = 1.188 \text{ USD} \quad \text{Ecuación 14.}$$

$$\text{Consumo de Electricidad (Anterior)} = 135\text{kWh} * 0.12 \frac{\text{USD}}{\text{kWh}} = 16.20 \text{ USD}$$

En el sistema rediseñado debe considerarse también el valor del GLP consumido durante el secado, para lo cual se utiliza el valor de 29.00 USD para cada tanque de GLP industrial de 45Kg. A partir de los datos mostrados en la Tabla 22 se calcula el valor correspondiente a consumo de gas para el secado de 300lb de cacao.

$$\text{Valor del GLP(consumido)} = \frac{29\text{USD}}{45\text{Kg}} * 10\text{Kg} = 6.44 \text{ USD}$$

$$\text{Consumo Total (Actual)} = \text{Consumo de Electricidad} + \text{Consumo de GLP}(10\text{Kg}) \quad \text{Ecuación 15.}$$

$$\text{Consumo Total (Actual)} = 1.188 \text{ USD} + 6.44 \text{ USD} = 7.63 \text{ USD}$$

En conclusión, se logró una reducción del 52.90% en recursos económicos siendo el rediseño de la máquina secadora de cacao un mejoramiento significativo para la empresa.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

Después de haber rediseñado la máquina secadora de cacao se describen a continuación las conclusiones obtenidas:

- Es posible obtener la misma calidad en los granos de cacao mediante secado natural (Sol) que al usar el método artificial con la máquina presentada en este trabajo, asegurando que este último método es factible de ser aplicado en este tipo de procesos, además de reducir recursos.
- Al usar la máquina se logró reducir el tiempo de secado a 6h (300lb de cacao), conservando la calidad para la elaboración de chocolate; además de tener la ventaja de no tener que depender del clima, ya que se necesitan al menos 4 días de Sol para un secado natural.
- El sistema de remoción (paletas) rediseñado logró incrementar la eficiencia al remover el grano con mayor facilidad, colocando las paletas en ángulos adecuados de acuerdo a la conveniencia del proceso, ya sea para remover o para evacuar el grano.
- Mediante cálculos se evidenció la necesidad de cambiar de componente eléctrico como es el motor, ya que el anterior de 0.5HP no lograba satisfacer las necesidades del proceso de remoción. Al cambiar el motor por uno de 1HP se logró incrementar la capacidad de la máquina para impulsar hasta 300lb de granos de cacao y disminuir la velocidad en el proceso de remoción.

- A través del rediseño del circuito electrónico se alcanzó el torque adecuado para la remoción de los granos de cacao se seleccionó un variador de frecuencia con control vectorial, el cual permite incrementar el torque al momento de disminuir la velocidad, de esta manera se logró remover sin problemas 300lb de cacao húmedo con una velocidad mínima de 7 r.p.m.
- En la automatización de la máquina de secado fueron incluidos elementos como temporizadores, una electroválvula y otros elementos electrónicos, los cuales aportaron autonomía al proceso, además de ser elementos de bajo costo y alta disponibilidad en el mercado.
- Para el sistema de secado con una nueva fuente energética, se construyó un quemador tipo mechero a base de GLP adaptado entre la cámara de secado y el ventilador, ubicado estratégicamente para aprovechar al 100% la llama generada por el mismo, logrando una temperatura de secado en un rango de 50 y 60°C.
- Después de realizar las pruebas de funcionamiento del sistema y a su vez los cálculos relativos al consumo de recursos energéticos, se obtuvo una reducción del 52.9%, utilizando el valor referencial del tanque de GLP industrial, el cual no posee subsidio. La reducción en términos económicos sería aún mayor en el caso de utilizar tanques de GLP doméstico, los cuales tienen un valor referencial de USD 1.60, llegando a un ahorro mayor al 80% del costo de producción actual.
- En el caso del sistema de recirculación de aire en el prototipo está diseñado pero no fue implementado debido a que se requiere adquirir un sistema de filtros y conductos de aire, por la humedad y alta temperatura propia del proceso; lo cual implica una inversión considerable que la empresa no puede cubrir en este momento.

6.2. Recomendaciones

- Se sugiere al operario tener un equipo de seguridad que conste de gafas, guantes, mandil y zapatos punta de acero, de esta manera evitar algún accidente futuro.
- El operario debe tener en cuenta el posicionamiento de las paletas al inicio y al final del proceso (Tabla 19), para un secado uniforme y la evacuación del grano de cacao respectivamente.
- Revisar periódicamente si existen fugas de gas, el estado de la manguera, asegurando la integridad del operario y de las personas cercanas a la máquina.
- Implementar el sistema de recirculación de aire, para reutilizar el aire húmedo caliente generado durante el proceso de secado, con el objetivo de optimizar recursos. Se debería analizar un sistema de filtros como método de eliminación de la humedad del aire para que éste pueda ser realimentado directamente al proceso.
- Se sugiere automatizar la rotación individual de las paletas por medio de servomotores para cambiar el modo de operación automáticamente al final de cada etapa del proceso de secado y remoción.
- Se recomienda como futura investigación complementar el sistema con una segunda función de tostadora de granos, analizando la adición de un sistema adecuado que permita alcanzar la temperatura necesaria para este efecto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABB LV Motors. (27 de Octubre de 2008). *Motores Eléctricos Trifásicos - 50 y 60 Hz*. Recuperado el 16 de Septiembre de 2017, Obtenido de <http://www2.electron.frba.utn.edu.ar/archivos/Motores.pdf>

AFROX. (17 de Diciembre de 2015). *Manual de referencia del producto Afrox*. Recuperado el 8 de Septiembre de 2017, Obtenido de Gas de petróleo licuado: http://www.afrox.co.za/internet.global.corp.zaf/en/images/Section%205%20-%20%20%20%20%20%20%20%20LPG266_154562.pdf?v=2.0

Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero. (2016). *Boletín estadístico*. Ecuador.

ANECACAO. (2015). *Asociación de Exportadores de Cacao Ecuador*. Recuperado el 7 de Septiembre de 2017, Obtenido de <http://www.anecacao.com/index.php/es/quienes-somos/cacao-en-ecuador.html>

Arias Navia, M. F. (25 de Junio de 2016). Recuperado el 20 de Diciembre de 2017, Obtenido de <http://mafercitamaliya.blogspot.com/2016/07/motorreducotr-y-puente-h.html>

CACAOFCAUG. (1 de Julio de 2014). Recuperado el 20 de Diciembre de 2017, Obtenido de <https://cacaofcaug.wordpress.com/2014/07/01/proceso-de-secado-del-cacao/>

CANACACAO. (2015). *Asociación de Camara Nacional de Cacao*. Recuperado el 18 de Diciembre de 2017, Obtenido de <http://www.canacacao.org/cultivo/fermentacion/>

Castrillón, A., & Flores, F. (27 de Mayo de 2016). Diseño y construcción de un prototipo de máquina secadora de cacao para la empresa CACAO 3H ubicada en el cantón Cumandá. Sangloquí, Pichincha, Ecuador.

Chimenorte. (2012). *Especiales en conductos*. Recuperado el 14 de Diciembre de 2017, Obtenido de <http://www.chimenorte.com/index.php/accesorios-para-aparatos-de-lena/accesorios-especiales-para-instalaciones-de-chimeneas/accesorios->

para-distribuir-el-aire-caliente

Chip1Stop. (2015). Recuperado el 5 de Enero de 2018, Obtenido de <http://www.chip1stop.com/web/KOR/en/tutorialContents.do?page=080>

CONAIF SEDIGAS. (24 de Octubre de 2008). *Especificaciones técnicas CONAIF-SEDIGAS para la certificación de instaladores de gas. Materias comunes Tipos A, B y C*. Recuperado el 12 de Septiembre de 2017, Obtenido de https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=13&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiAgYOtgrTWAhUHYiYKHQ8SBZYQFghfMAw&url=https%3A%2F%2Ftemariosformativosprofesionales.files.wordpress.com%2F2013%2F01%2Fquemadores-de-gas.pdf&usg=AFQjCNF5M_A-Hh59b

COPROAGRO, R. M. (2015). *Fundación para el desarrollo socioeconómico y restauración ambiental*. Recuperado el 05 de Noviembre de 2017, Obtenido de <http://www.fundesyram.info/biblioteca.php?id=3213>

De Nardo, D. (19 de Enero de 2010). *Agrolluvia.com*. Recuperado el 7 de Marzo de 2018

Departamento de Energía de los EE. UU. (10 de Septiembre de 2003). *Gas licuado de petróleo*. Recuperado el 13 de Septiembre de 2017, Obtenido de https://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/basics/jtb_lpg.pdf

DIALNET. (10 de Septiembre de 2011). Recuperado el 12 de Septiembre de 2017, Obtenido de Determinación de parámetros y simulación matemática del proceso de secado del cacao(*Theobroma cacao*): <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4902786.pdf>

Dickens, A. (2016). *Flor prohibida*. Recuperado el 1 de Marzo de 2018, Obtenido de <http://www.florprohibida.com/blog/extraccion-aire-ventilacion-cultivo-marihuana/>

DirectIndustry. (2017). Recuperado el 1 de Marzo de 2017, Obtenido de <http://www.directindustry.es/prod/msc-software/product-6042-493371.html>

EcuRed. (17 de Septiembre de 2017). *EcuRed*. Recuperado el 17 de Septiembre de 2017, Obtenido de Conocimiento con todos y para todos: https://www.ecured.cu/Reductor_de_velocidad#Clasificaci.C3.B3n_por_tipo

_de_engranajes

ElectricPower. (2011). Recuperado el 3 de Enero de 2018, Obtenido de <https://www.doityourself.com/stry/5-different-types-of-solenoid-valves-explained>

ENI Ecuador. (2017). *ENI ECUADOR*. Recuperado el 10 de Septiembre de 2017, Obtenido de http://www.eniecuador.ec/images/provi_tankes.png

Flores, F., & Castrillón, A. (2016). *Diseño y construcción de un prototipo de máquina secadora de cacao para la empresa CACAO 3H ubicada en el cantón Cumandá*. Latacunga, Cotopaxi, Ecuador.

Food and agriculture Organization of the United Nations. (2000). *Secado de granos y secadoras*. Recuperado el 2 de Septiembre de 2017, Obtenido de <http://www.fao.org/docrep/X5028S/X5028S1K.GIF>

Full Mecánica. (2014). Recuperado el 21 de Diciembre de 2017, Obtenido de <http://www.fullmecanica.com/definiciones/q/272-quemadores-atmosfericos-de-gas>

Fundidora del Norte. (10 de Octubre de 2014). Recuperado el 1 de Enero de 2018, Obtenido de <https://fundidoradelnorte.com/productos/secadora-rotativa-pa-sr3-35/>

García San José, R. (28 de Noviembre de 2001). *Quemadores*. Recuperado el 5 de Septiembre de 2017, Obtenido de <http://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiAgYOtgrTWAhUHYiYKHQ8SBZYQFggrMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.registrocdt.cl%2Fregistrocdt%2Fwww%2Fadmin%2Fuploads%2Fdoctec%2F9351252421213133561c.08.04.01-8.pdf&usg=AFQj>

García, J. M. (10 de Septiembre de 2009). *Manual para variadores de velocidad*. Recuperado el 23 de Octubre de 2017, Obtenido de www.etitudela.com/profesores/jmgn/DSMR/.../teoriadelosvariadoresdevelocidad.doc

GONZALES, J. (18 de Noviembre de 2015). *PRODUCCIÓN DE CACAO*. Recuperado el 1 de Septiembre de 2017, Obtenido de <http://produccioncacao.blogspot.com/2015/11/cosecha-de-cacao.html>

Guerrero, G. (2015). *El Comercio*. Recuperado el 12 de Noviembre de

2017, Obtenido de <http://www.revistalideres.ec/lideres/cacao-ecuatoriano-historia-empezo-siglo.html>

I. R. (26 de Julio de 2016). *SCRIBD*. Recuperado el 12 de Noviembre de 2017, Obtenido de <https://es.scribd.com/document/319348255/1-MOTORES-ELECTRICOS-Y-VARIADORES-DE-VELOCIDAD-pdf>

JMMC. (26 de Octubre de 2011). Recuperado el 12 de Noviembre de 2017, Obtenido de https://conbotassucias.files.wordpress.com/2011/10/variadores-de-velocidad_jmmc.pdf

Liendo, R. J. (Septiembre de 2005). *El secado del cacao*. Recuperado el 20 de Diciembre de 2017, Obtenido de http://sian.inia.gob.ve/inia_divulga/divulga_05/rid5_liendo_24-26.pdf

Monzón, E. (3 de Mayo de 2017). *Explicación de motorreductores TRANSCYKO*. Recuperado el 15 de Septiembre de 2017, Obtenido de <http://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=0ahUKEwjtx46ysqDWAhVF5SYKHQZ6CowQFgggUMAI&url=http%3A%2F%2Fwww.potenciaelectromecanica.com%2Fwp-content%2Fuploads%2F2013%2F04%2FEXPLICACION%2520DE%2520MOTORREDUCTORES%2520TRANSCYKO.pdf&u>

Motortico. (5 de Agosto de 2014). *WWW.MOTORTICO.COM*. Recuperado el 15 de Septiembre de 2017, Obtenido de <http://www.motortico.com/biblioteca/MotorTico/2014%20AGO%20-%20Control%20Vectorial%20en%20Variadores.pdf>

MundoHVACR. (2018). *Filtros*. Recuperado el 10 de Septiembre de 2017, Obtenido de <https://www.mundohvacr.com.mx/2011/05/filtros-tipos-y-funciones/>

Navidi, W. (2006). *Estadística para ingenieros y científicos*.

Norton L, R. (2011). *Diseño de máquinas*. (L. Cruz Castillo, Ed., & A. Enríquez Brito, Trad.) Naucalpan de Juárez, México, México: Prentice Hall.

NTE INEN 176:2006. (2006). *CACAO EN GRANO REQUISITOS* (Primera Edición ed.). Quito, Pichincha, Ecuador.

ProEcuador. (2015). *Ministerio de Comercio Exterior*. Obtenido de

<http://www.proecuador.gob.ec/wp-content/uploads/2014/07/PERFIL-DE-CACAO-Y-ELABORADOS.pdf>

ProEcuador. (2015). *Ministerio de Comercio Exterior*. Recuperado el 13 de Junio de 2017, Obtenido de <http://www.proecuador.gob.ec/wp-content/uploads/2014/07/PERFIL-DE-CACAO-Y-ELABORADOS.pdf>

Relief, L. W. (27 de 01 de 2018). *Caja de Herramientas para Cacao*. Obtenido de <http://cacaomovil.com/>

Reynier. (22 de Noviembre de 2013). *EcuRed*. Recuperado el 15 de Septiembre de 2017, Obtenido de Conocimientos con todos y para todos: <http://www.catalogodebombasdeagua.com/images/galerias/reductores-helicoidales-de-velocidad-nord/reductores-de-velocidad-helicoidales-01.jpg>

Sapiensman. (2015). *Aplicaciones Industriales*. Recuperado el 12 de Septiembre de 2017, Obtenido de http://www.sapiensman.com/tecnoficio/mecanica/neumatica_accesorios.php

SIEMENS. (14 de Marzo de 2005). *Geared motors*. Recuperado el 17 de Septiembre de 2017, Obtenido de <http://www.novec.ru/catalog/novosibirsk/catalog/siemens/geared.pdf>

SIRCA. (2017). Recuperado el 18 de Septiembre de 2017, Obtenido de SECADORAS INDUSTRIALES CON INTERCAMBIADOR DE CALOR SIRCA: <https://ec.all.biz/img/ec/catalog/7210.jpeg>

Tinoco, H. A., & Ospina, D. Y. (Julio de 2010). Recuperado el 20 de Diciembre de 2017, Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/eia/n13/n13a05.pdf>

Trane. (2018). *Emea Parts*. Recuperado el 19 de Diciembre de 2017, Obtenido de <http://www.traneparts-emea.com/es/trane/refrigeration-components/filter-driers/csr-series-replaceable-solid-core-filter-driers/>

UnyClima. (2014). *Proyectos de Aire acondicionado*. Recuperado el 17 de Diciembre de 2017, Obtenido de <http://www.unyclima.com/images/lindustrial/Accesorios%20de%20Montaje%20para%20Equipos%20Centrifugos/filtrosveco/FILTROS%20EFICIENCIA%20BAJA.pdf>

Will. (6 de Octubre de 2013). *Agropecuarios*. Recuperado el 1 de Enero

de 2018, Obtenido de <http://agropecuarios.net/procesos-del-cultivo-de-cacao-a-la-cosecha.html>

WILPAC. (5 de Septiembre de 2016). *Maquinarias y Soluciones Industriales*. Recuperado el 1 de Enero de 2018, Obtenido de <http://www.induwilpac.com/>

Wong, S. (24 de Octubre de 2017). Recuperado el 3 de Enero de 2018, Obtenido de <https://www.linkedin.com/pulse/5-different-types-solenoid-valves-explained-sherry-huang>

Yacuzzi, E. (2008). *QFD: Conceptos, aplicaciones y nuevos desarrollos*. Universidad del CEMA.

Zaragoza, A. a. (2012). *Reparaciones de Filtros de Humedad en Zaragoza*. Obtenido de <https://www.airesacondicionadoszaragoza.es/reparaciones/filtros-de-humedad/>

Zauzich, I. (25 de Enero de 2016). *IMPAQTO*. Recuperado el 3 de Enero de 2018, Obtenido de <http://www.impacto.net/chocolate-organico-impacto-social>

ANEXOS



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por el señor: **LUIS
CLINTON SEMANATE ESQUIVEL**

En la ciudad de Latacunga, a los **12 días del mes de marzo de 2018.**

Aprobado por:



Ing. Sylvia Nathaly Rea Minango
DIRECTOR DEL PROYECTO



Ing. Vicente Hallo
DIRECTOR DE CARRERA



Dr. Francisco Waca
SECRETARIO ACADÉMICO

