

UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO



FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

TESIS

**Diseño de un sistema de control computacional de
una secadora de cacao**

**Para optar el Título Profesional de Ingeniero
Electrónico**

Elaborado por

Bach. Cardoza Alvarado, William Christian

Bach. Inoñán Sandoval, Aldo Gustavo

Asesor: Ing. Romero Cortez Oscar Ucchelly

**LAMBAYEQUE – PERÚ
2019**

TESIS

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL COMPUTACIONAL DE UNA
SECADORA DE CACAO.**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO ELECTRÓNICO**

ELABORADO POR:



**Bach. WILLIAM CHRISTIAN CARDOZA ALVARADO
AUTOR**



**Bach. ALDO GUSTAVO INOÑÁN SANDOVAL
AUTOR**



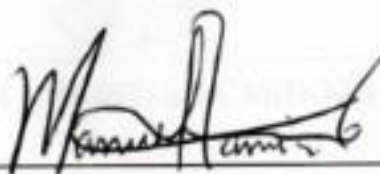
**Ing. ROMERO CORTEZ OSCAR UCHELLY
ASESOR**

TESIS

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL COMPUTACIONAL DE UNA
SECADORA DE CACAO.**

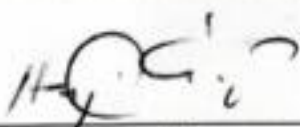
**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO ELECTRÓNICO**

APROBADO POR EL SIGUIENTE JURADO:



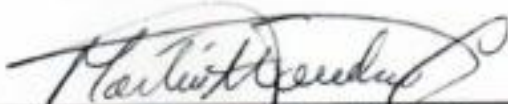
Ing. RAMÍREZ CASTRO MANUEL JAVIER

PRESIDENTE



Ing. CHICLAYO PADILLA HUGO JAVIER

SECRETARIO



Ing. NOMBRA LOSSIO MARTIN A.

VOCAL

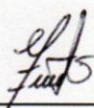
Declaración jurada de originalidad

Yo, Cardoza Alvarado William Christian e Inoñán Sandoval Aldo Gustavo investigadores y Romero Cortez Oscar Uccelly asesor del trabajo de investigación "Diseño de un sistema computacional de una secadora de cacao", declaramos bajo juramento que este trabajo no ha sido plagiado, ni contiene datos falsos. En caso se demostrara lo contrario, asumo responsablemente la anulación de este informe y por ende el proceso administrativo a que hubiera lugar, que puede conducir a la anulación del título o grado emitido como consecuencia de este informe.

Lambayeque, julio de 2019



Bach. WILLIAM CHRISTIAN CARDOZA ALVARADO



Bach. ALDO GUSTAVO INOÑÁN SANDOVAL



**Ing. ROMERO CORTEZ OSCAR UCCELLEY
ASESOR**

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, Agradezco a Dios por darme unos padres excelentes, agradecer a mis padres por su Apoyo constante e incondicional quienes siempre confiaron que lo lograría, a mis docentes y asesor por compartir su conocimiento que ha sido muy valioso para concretar mi meta.

DEDICATORIA

Esta tesis se la dedicamos a nuestro Dios, quién supo guiarnos por el buen camino, por darme las fuerzas para seguir adelante y no desmayar en los problemas que se presentaban. Por enseñarnos a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento.

A nuestras familias, ya que por ellos somos lo que somos. Para nuestros padres, que por su apoyo, consejos, comprensión, amor, ayuda en los momentos difíciles y por darnos los recursos necesarios para estudiar.

Nos han dado todo lo que somos como personas, valores, principios, carácter, empeño, mi perseverancia, coraje para conseguir mis objetivos.

RESUMEN

El proyecto de tesis consiste en el diseño e implementación de una secadora de cacao, basada en el microcontrolador PIC16F877A, que de forma general controla una resistencia calefactora, ventilador centrífugo, motor reductor y una termocupla K, y este ultimo es un sensor que permite medir y controlar la temperatura en los rangos adecuados para el proceso de secado.

En el capítulo I, se plantea la problemática de los pequeños y medianos productores de cacao y la importancia de dar una solución a rápida y a su medida en el tratamiento del proceso, que ayudará a mejorar producción y por ende, su calidad de vida.

El capítulo II, hace estudio del marco teórico, el cual detalla las principales variables físicas a conocer, para poder hacer el diseño del sistema, las cuales son: temperatura, humedad, estructura del sólido, curvas de secado y tipos de flujo de gas.

En el capítulo III hemos hecho el cálculo de los valores de las variables físicas dimensionadas para nuestro sistema, partiendo de la psicrometría, tiempo de secado, cálculo del calor requerido y consumido. Además hemos detallado el cálculo estructural del equipo, selección de los equipos de potencia y los circuitos de control empleados; como el circuito de sensado basado en el circuito integrado AD595 y la termocupla K, el circuito PID que emplea al microcontrolador PIC16F877A, el cual controla todo el correcto funcionamiento del sistema y el circuito del temporizador electrónico que emplea el microcontrolador PIC16F84A.

El capítulo IV detalla los costos de cada bloque usado para la implementación del sistema.

En el capítulo V se obtuvo las siguientes conclusiones:

Se realizó el proyecto en base al uso del controlador PID, que da un control individualizado de la temperatura, ya que es una variable analizada en el proceso.

Se logró que el controlador electrónico use microcontroladores PIC de gama baja, cumpliendo todos los requerimientos del sistema y que sea apto para cambiarse por otras tecnologías, según requerimientos del sistema, tales como Arduino, Raspberry Pi, DsPic, etc.

En el capítulo VI damos nuestras recomendaciones para poder contribuir con la mejora tecnológica de nuestra sociedad.

ABSTRACT

The thesis project consists of the design and implementation of a cocoa dryer, based on the PIC16F877A microcontroller, which generally controls a heating resistance, centrifugal fan, reducer motor and a K thermocouple, and the latter is a sensor that allows measuring and control the temperature in the appropriate ranges for the drying process.

Chapter I, discusses the problem of small and medium-sized producers of cocoa and the importance of giving a quick and tailor-made solution to the processing of the process, which will help to improve production and therefore, their quality of life.

Chapter II, makes a study of the theoretical framework, which details the main physical variables to know, to be able to make the system design, which are: temperature, humidity, solid structure, curves of drying and types of gas flow.

In chapter III, we have made the calculation of the values of the physical variables sized for our system, starting from the psychrometry, drying time, calculation of the required heat and consumed. We have also detailed the structural calculation of the equipment, selection of the power equipment and the control circuits used; as the sensing circuit based on the AD595 integrated circuit and the K thermocouple, the PID circuit that uses the PIC16F877A microcontroller, which controls all the correct operation of the system and the electronic timer circuit that uses the PIC16F84A microcontroller.

Chapter IV details the costs of each block used to implement the system.

In chapter V the following conclusions were obtained:

The project was carried out based on the use of the PID controller, which gives a control Individualized temperature, since it is a variable analyzed in the process.

It was achieved that the electronic controller use low-end PIC microcontrollers, fulfilling all the requirements of the system and that is apt to be changed by other technologies, according to system requirements, such as Arduino, Raspberry Pi, DsPic, etc.

In chapter VI we give our recommendations to be able to contribute with the technological improvement of our society.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIA	ii
RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE GENERAL	v
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABLAS	xii
INTRODUCCIÓN	xiii
CAPITULO I: ASPECTOS DE LA INVESTIGACIÓN	1
1.1. ASPECTO INFORMATIVO.....	1
1.1.1. TÍTULO	1
1.1.2. PERSONAL INVESTIGADOR.....	1
1.1.3. ÁREA DE LA INVESTIGACIÓN.....	1
1.1.4. LUGAR DE EJECUCIÓN	1
1.1.5. DURACIÓN	1
1.2. ASPECTO DE LA INVESTIGACIÓN	1
1.2.1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA	1
1.2.2. ESQUEMA GENERAL DEL PROYECTO.....	2
1.2.3. CROQUIS DEL SISTEMA	2
1.2.4. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS	3
1.2.5. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA CIENTÍFICO	6
1.2.6. OBJETIVOS.....	6
1.2.6.1. OBJETIVO GENERAL.....	6
1.2.6.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
1.2.7. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN	6
1.2.8. HIPÓTESIS	7
1.2.9. DISEÑO Y CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS	7
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO	8
2.1. CONCEPTO DE SECADO	8
2.2. VARIABLES	8

2.2.1. TEMPERATURA	8
2.2.2. HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE.....	8
2.2.3. EQUILIBRIO EN EL CONTENIDO DE HUMEDAD	9
2.2.4. VELOCIDAD DEL AIRE.....	9
2.2.5. ESTRUCTURA DEL SÓLIDO.....	9
2.2.6. MOVIMIENTO DE LA HUMEDAD.....	9
a) EN SÓLIDOS AMORFOS	9
b) EN SÓLIDOS CRISTALINOS.....	10
2.3. CURVAS DE SECADO.....	10
2.4. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES	11
• INDICADORES DE LA VARIABLE X	11
• INDICADORES DE LA VARIABLE Y	11
2.5. TRATAMIENTO DEL MATERIAL EN LOS SECADORES	12
2.5.1. ESTÁTICO.....	12
2.5.2. MÓVIL.....	13
2.5.3. FLUIDIZADO.....	13
2.5.4. DILUIDO	13
2.6. TIPOS DE FLUJO DE GAS CALIENTE EN LOS SECADORES	14
2.6.1. FLUJO PERPENDICULAR	14
2.6.2. FLUJO PARALELO	14
2.6.3. FLUJO DIRECTO.....	14
2.6.4. FLUJO DE GAS EQUICORRIENTE.....	15
2.6.5. FLUJO DE GAS CONTRACORRIENTE.....	15
2.6.6. FLUJO TRANSVERSAL DE GAS	15
2.7. CLASIFICACIÓN DE LOS SECADORES.....	15
2.7.1. SECADORES DIRECTOS	15
2.7.2. SECADORES DIRECTOS CONTINUOS	16
2.7.2.1. DE BANDEJAS	16
2.7.2.2. SECADORES DE MATERIAL DOSIFICADO EN CAPAS.....	17

2.7.2.3. SECADORES TRANSPORTADORES NEUMÁTICOS	17
2.7.2.4. ROTATORIOS.....	17
2.7.2.5. POR ASPERSIÓN	18
2.7.2.6. CIRCULACIÓN DIRECTA	18
2.7.2.7. TÚNEL	19
2.7.2.8. SECADORES DE LECHOS FLUIDOS	19
2.7.3. SECADORES DIRETOS POR LOTES.....	19
2.7.3.1. SECADORES DIRECTOS	19
2.7.3.2. SECADORES DIRECTOS DE BANDEJA Y COMPARTIMIENTO	20
2.7.3.3. LECHO FLUIDO	20
2.7.4. SECADORES INDIRECTOS.....	20
2.7.4.1. SECADORES INDIRECTOS CONTINUOS	21
2.7.4.2. SECADORES INDIRECTOS POR LOTES.....	21
2.7.5. SECADORES DIVERSOS	22
2.7.5.1. SECADORES DIELÉCTRICOS	22
2.7.5.2. SECADORES SOLARES.....	22
2.7.5.3. SECADORES INFRA ROJOS	22
CAPITULO III: DISEÑO.....	23
3.1. CÁLCULOS DE LAS VARIABLES FÍSICAS	24
3.1.1. PARÁMETROS DE SECADO POR AIRE CALIENTE	24
3.1.1.1. PSICROMETRÍA	24
3.1.1.2. TRANSFERENCIA DE CALOR USADA EN EL PROYECTO	24
3.1.1.3. CARACTERÍSTICAS DEL GRANO.....	25
3.1.1.4. DETERMINACIÓN DEL CALOR CONSUMIDO EN EL PROCESO DE SECADO	28
3.1.1.5. TIEMPO DE SECADO.....	30
3.1.1.6. ISOTERMA DE SORCIÓN.....	31
3.1.1.7. TEMPERATURA DEL PRODUCTO DURANTE EL SECADO (Tp)...	32
3.1.1.8. ANÁLISIS ENERGÉTICO DEL SECADOR.....	32

3.1.1.9. ENERGÍA DEL CALENTAMIENTO DEL AIRE	33
3.1.1.10. NOTAS	35
3.1.2. DIMENSIONAMIENTO SEGÚN LA CAPACIDAD DESEADA	35
3.2. SELECCIÓN DE LOS EQUIPOS DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA	36
3.2.1. ELEMENTOS ESTRUCTURALES	37
3.2.1.1. PLANCHA PERFORADA	37
3.2.1.2. PUENTE	38
3.2.1.3. BASTIDOR	39
3.2.2. GENERADOR DE CALOR POR RESISTENCIAS ELÉCTRICAS	41
3.2.2.1. AISLANTES TÉRMICOS	43
3.2.2.2. VENTILADOR CENTRÍFUGO	45
3.2.3. SELECCIÓN DEL MOTOR REDUCTOR	47
3.2.4. DISEÑO DEL EJE UNIFORMIZADO	50
3.2.4.1. FUERZAS ACTUANTES SOBRE EL EJE	50
3.2.4.2. DIMENSIONAMIENTO DEL DIÁMETRO DEL EJE	51
3.3. DISEÑO Y ESTRUCTURACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL ELECTRÓNICO	53
3.3.1. FUENTE DE VOLTAJE DE CORRIENTE DIRECTA	53
3.3.2. ADQUISICIÓN DE LA TEMPERATURA (SENSADO)	53
3.3.2.1. SENSOR DE TEMPERATURA: TERMOCUPLA K	53
3.3.2.2. CIRCUITO INTEGRADO COMPENSADOR AD595...	54
3.3.3. CONTROLADOR DE TEMPERATURA PID	55
3.3.3.1. DISEÑOS Y RESPUESTAS EN LAZO ABIERTO Y CERRADO	55
• DISEÑO DEL CONTROLADOR PID EN EL DOMINIO DE S...	55
• DISEÑO DEL CONTROLADOR PID ANÁLOGO EN LAZO CERRADO	57
• DISEÑO DEL CONTROLADOR DE TEMPERATURA PID DISCRETO DEL SISTEMA	58
3.3.3.2. IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR DE TEMPERATURA PID DISCRETO EN EL MICROCONTROLADOR	59

3.3.3.2.1. CONTROL DIGITAL DEL PID	60
• MODO DEL FUNCIONAMIENTO DEL PID	60
• CÓDIGO FUENTE	61
• LISTA DE COMPONENTES	69
3.3.3.2.2. ETAPA DE CONTROL DE LOS DISPAROS DEL TRIAC	71
• LISTA DE COMPONENTES	71
3.3.4. CIRCUITO TEMPORIZADOR.....	72
3.3.4.1. FUNCIONES	72
3.3.4.2. LISTA DE COMPONENTES.....	73
3.3.4.3. DIAGRAMA.....	74
3.3.4.4. PROGRAMA	75
3.3.5. CIRCUITO DE POTENCIA DEL SISTEMA	80
CAPITULO IV: COSTO DE DISEÑO.....	81
COSTOS	81
CAPITULO V: CONCLUSIONES.....	84
CONCLUSIONES.....	84
CAPITULO VI: RECOMENDACIONES	86
RECOMENDACIONES	86
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
REFERENCIAS WEBGRÁFICAS	87

ÍNDICE DE FIGURAS

ESQUEMA GENERAL.....	2
CROQUIS DEL SISTEMA	2
GRÁFICO 1: CINÉTICA DEL SONIDO.....	9
GRÁFICO 2: VELOCIDAD DE SECADO VS CONTENIDO DE HUMEDAD.....	10
GRÁFICO 3: ESTÁTICO.....	12
GRÁFICO 4: MÓVIL.....	13
GRÁFICO 5: FLUIDIZADO.....	13
GRÁFICO 6: DILUIDO	13
GRÁFICO 7: FLUJO PERPENDICULAR.....	14
GRÁFICO 8: FLUJO PARALELO	14
GRÁFICO 9: CIRCULAR DIRECTO.....	14
GRÁFICO 10: FLUJO DE GAS EQUICORRIENTE.....	15
GRÁFICO 11: FLUJO DE GAS CONTRA CORRIENTE	15
GRÁFICO 12: DE BANDEJA	17
GRÁFICO 13: ROTATORIOS.....	18
GRÁFICO 14: POR ASPERSIÓN.....	18
GRÁFICO 15: CIRCULACIÓN DIRECTA.....	18
GRÁFICO 16: TÚNEL	19
GRÁFICO 17: SECADORES DE LECHOS FLUÍDOS	19
GRÁFICO 18: SECADORES INDIRECTOS CONTINUOS	21
GRÁFICO 19: MODELO FÍSICO DEL ANÁLISIS DE SISTEMAS EN GENERAL	32
GRÁFICO 20: VOLUMEN DE CONTROL.....	33
GRÁFICO 21: BASTIDOR.....	37
GRÁFICO 22: DEFORMACIÓN DEL PUENTE.....	38
GRÁFICO 23: RELACIÓN DE ESPESOR DE PLANCHA CON LA ALTURA DEL CILINDRO	39
GRÁFICO 24: DEFORMACIÓN DEL BASTIDOR EN EL EJE Y.....	40
GRÁFICO 25: DEFORMACIÓN DEL BASTIDOR EN EL EJE Z (CRÍTICO).....	40
GRÁFICO 26: FACTOR DE SEGURIDAD DEL BASTIDOR	41
GRÁFICO 27: RESISTENCIAS CALEFACTORAS	41
GRÁFICO 28: RADIO CRÍTICO DE AISLANTE.....	43

GRÁFICO 29: VENTILADOR CENTRÍFUGO	46
GRÁFICO 30: CARACTERÍSTICAS DEL VENTILADOR	46
GRÁFICO 31: ELEMENTO DIFERENCIAL DE LA FUERZA PARA EL ARRASTRE DE GRANO	47
GRÁFICO 32: DISPOSICIÓN DE LAS PATAS DE ARRASTRE.....	48
GRÁFICO 33: REDUCCIÓN DE LAS FUERZAS DE LA PATA DE ARRASTRE SOBRE EL EJE.....	50
GRÁFICO 34: DCL DEL EJE YZ.....	52
GRÁFICO 35: DIAGRAMA DE FUERZAS CORTANTES.....	52
GRÁFICO 36: DIAGRAMA DEL MOMENTO FLECTOR	52
GRÁFICO 37: DIAGRAMA DEL MOMENTO TORSOR	52
GRÁFICO 38: FUENTE DC	53
GRÁFICO 39: DESCRIPCIÓN DE LA TERMOCUPLA	54
GRÁFICO 40: DESCRIPCIÓN DEL C.I. AD595	54
GRÁFICO 41: DIAGRAMA DEL BLOQUE DEL SENSADO Y SU TARJETA	55
GRÁFICO 42: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA	56
GRÁFICO 43: CURVA DE LA PLANTA A UNA ENTRADA DE ESCALÓN UNITARIO	56
GRÁFICO 44: MODELADO DE LA PLANTA.....	56
GRÁFICO 45: CONTROLADOR PID EN LAZO CERRADO.....	57
GRÁFICO 46: RESPUESTA DEL CONTROLADOR PID VS LA RESPUESTA NATURAL	58
GRÁFICO 47: DIAGRAMA DEL CONTROL ELECTRÓNICO DEL PID	69
GRÁFICO 48: DISTRIBUCIÓN DE COMPONENTES Y PISTAS DEL CIRCUITO DEL CONTROL ELECTRÓNICO PID.....	69
GRÁFICO 49: DIAGRAMA DEL CIRCUITO DEL DISPARO DEL TRIAC	71
GRÁFICO 50: DIAGRAMA DEL CIRCUITO TEMPORIZADOR.....	74
GRÁFICO 51: DISTRIBUCIÓN DE PISTAS Y COMPONENTES DEL CIRCUITO TEMPORIZADOR ELECTRÓNICO.....	74
GRÁFICO 52: DIAGRAMA GENERAL DEL SISTEMA.....	80

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: INDICADORES DE LAS VARIABLES	12
TABLA 2: CONTENIDO DE HUMEDAD CRÍTICA (ADAPTADO DE SHELTON)	26
TABLA 3: PARÁMETROS DE LA ECUACIÓN DE HALSEY	31
TABLA 4: CARACTERÍSTICAS DEL DOSIFICADOR.....	35
TABLA 5: CARACTERÍSTICAS DEL GENERADOR DE AIRE CALIENTE.....	36
TABLA 6: CARACTERÍSTICAS DE LA CÁMARA DE SECADO.....	36
TABLA 7: COEFICIENTE CONVECTIVO DEL AIRE EXTERIOR	44
TABLA 8: PROYECCIÓN DE LOS RADIOS REQUERIDOS	49
TABLA 9: RESULTADOS DE LAS FUERZAS SOBRE SUS PATAS	49
TABLA 10: FUERZAS RESULTANTES EN LOS BRAZOS DE LA PALETA DE UNIFORMIZADO	51
TABLA 11: PRESUPUESTO DE LA ESTRUCTURA METÁLICA	81
TABLA 12: PRESUPUESTO DE LA PLACA PID.....	81
TABLA 13: PRESUPUESTO DE LA PLACA DE SENSADO	82
TABLA 14: PRESUPUESTO DE LOS DISPAROS DEL TRIAC	82
TABLA 15: PRESUPUESTO DE LA PLACA TEMPORIZADOR	83
TABLA 16: PRESUPUESTO DE LOS EQUIPOS DE POTENCIA	84
TABLA 17: PRESUPUESTO TOTAL DEL PROYECTO	84

INTRODUCCIÓN

Nuestros pequeños y medianos productores cacaoteros dentro del país trabajan en forma artesanal, muchas veces, sin la mínima asistencia técnica de personal especializado, que va desde la siembra, cuidado, cosecha y post cosecha de su producción. Por tal motivo nos enfocamos sobre todo en apoyar durante el proceso de post cosecha, donde el pilar principal de este proceso radica en el tratamiento del grano para su respectivo secado, antes de ser distribuido y procesado para que llegue al cliente final.

El proceso de automatización de secado del grano de cacao para este tipo de productores, fue estudiado partiendo de su realidad socioeconómica, con materiales que se pueden encontrar en el mercado local, fáciles de implementar y sobre todo de bajo costo; lo que se traduce para el productor, la capacidad de poder costear el equipo. Además de su fácil manejo para que no dependan de la asesoría constante de un personal calificado para su operación y mantenimiento preventivo.

El segundo punto crítico de este proceso era hacer que en nuestro diseño se tome en cuenta la variable climática de la zona, que juega un rol muy importante para poder obtener un producto final de calidad, permitiendo que los productores ganen más, por ofrecer un producto de mejor calidad y en un lapso de proceso más reducido.

Como valor agregado al grano como producto de calidad, también se puede mencionar es que quedaría con menos impurezas y con mejores propiedades organolépticas.

CAPÍTULO I:

ASPECTOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Aspecto informativo

1.1.1. Título

Diseño de un sistema de control computacional de una secadora de cacao.

1.1.2. Personal Investigador

1.1.2.1. Autor

Bachiller William Christian Cardoza Alvarado.

1.1.2.2. Autor

Bachiller Aldo Gustavo Inoñán Sandoval.

1.1.2.3. Asesor

Ing. Romero Cortez Oscar Uchelly.

1.1.3. Área de Investigación

Ingeniería Electrónica – Automatización y Control Industrial.

1.1.4. Lugar de ejecución

Provincia de Jaén.

1.1.5. Duración

06 meses.

1.2. Aspecto de la investigación científica

1.2.1. Situación Problemática

Considerando que el Perú es uno de los países originarios del Cacao y posee el 60% de sus variedades en el mundo; sus productores que en su mayoría son pequeños y medianos (con volúmenes bajos de producción) tienen como única alternativa de secado de su producto, la forma artesanal, es decir secado natural con exposición al sol. Este método no es muy eficiente ya que compromete bastante tiempo en el proceso de secado que va de 5 a 7 días, pudiendo ser más si las condiciones climáticas no son favorables, esto encarece el proceso y trae consigo pérdidas económicas para el productor; sin considerar que la calidad del grano se ve comprometida, ya que el

secado no es uniforme, también hay exposición del grano a agentes contaminantes, compromete el uso de más áreas usada para los tendales, etc.

1.2.2 Esquema general del proyecto.

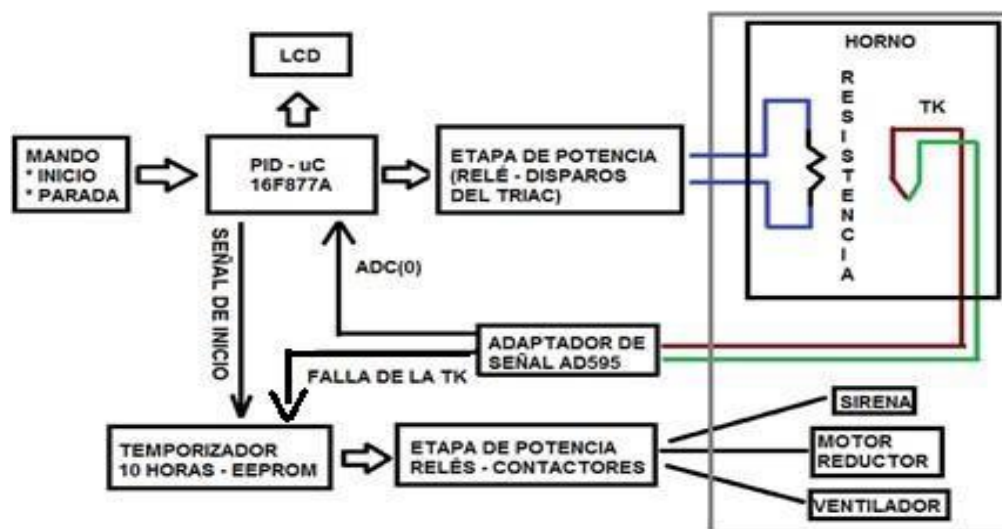
El proyecto está concebido para el siguiente fin: “cambiar el método del secado artesanal de cacao por un método de secado automatizado”.

ESQUEMA GENERAL DEL PROYECTO



1.2.3 Croquis del sistema

CROQUIS DEL SISTEMA



124. Antecedentes bibliográficos

- **Telecontrol de secadora de granos de cacao con energía solar y biogas.**

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación de la Escuela Superior Politécnica del Litoral.

Guayaquil – Ecuador, 2015

Resumen: En este estudio pretendemos brindar una alternativa al proceso convencional, aplicando automatización y telecontrol, ofreciendo controlar con mayor precisión el tiempo adecuado para el secado del grano. Utilizamos software y hardware de bajo costo sobre una estructura física ya existente, donde se realiza el secado del cacao de manera tradicional.

El proyecto consta de dos componentes importantes: la telemetría y el telecontrol. Con la ayuda de la telemetría queremos proveer a usuario de nuestro sistema la posibilidad de conocer los datos reales de mediciones ambientales que afectan al proceso de secado. Para eso haremos uso de sensores de temperatura, humedad y luminosidad; y mediante conexión remota mostraremos esa información a través de una aplicación Web.

El segundo componente es el telecontrol, parte del sistema y sus funciones de secado podrán ser activadas o desactivadas a través de nuestra aplicación utilizando conexión remota.

- **Automatización de un deshidratador de granos de cacao.**

Ingeniería Mecatrónica, Facultad de tecnologías de la Universidad Tecnológica de Pereira.

Pereira - Colombia, 2016

Resumen: El presente trabajo surge por la necesidad de analizar y proporcionar ideas que ayuden a solucionar los diferentes métodos de secado. De acuerdo con los avances tecnológicos que se vienen dando en Colombia, y la automatización de los procesos industriales; se planteó este proyecto con el fin ayudar a los pequeños cacaoteros del municipio de Tumaco. Donde se realizó el proceso de instrumentación y diseño de un prototipo de sistema de control, donde se controlará temperatura y

humedad para que la calidad del grano sea la mejor posible y de esta manera ayudar a los pequeños productores de la zona.

Esta idea surge de la necesidad de obtener un grano de cacao de calidad por medio de un sistema de control prototipo, de bajo costo y confiable, para asegurar que el cacao, en el momento que se está secando de manera solar, se pueda monitorear retirándolo en el momento exacto, en el cual su contenido de humedad es ideal, para su almacenamiento y posterior venta. El primer objetivo se manifiesta en el estado del arte del proceso de secado de cacao, incluyendo los diferentes métodos existentes, para así plantear las bases teóricas para el diseño de un sistema de control prototipo que monitorea el proceso de secado solar de cacao, con la ayuda de la información obtenida a través de la asociación de los cacaoteros de Tumaco Corpoteva. En el segundo objetivo se plantea el diseño y simulación en un software de diseño asistido por computador del deshidratador. Para el tercer objetivo se identificaron las variables físicas del sistema necesarias para controlar el proceso, y se realizaron los diagramas de flujo identificando todas las partes que componen la secuencia del sistema del prototipo control; y por último en el cuarto objetivo se hace referencia en cuanto al costo de elaboración o presupuesto del proyecto. El diseño de una máquina deshidratadora de granos de cacao es de gran ayuda para los pequeños productores que se beneficiarán de este, debido a que en su gran mayoría los cultivadores poseen pequeños y secan su cacao de forma solar.

El proceso de secado solar del cacao está en constante contacto con el ambiente durante un largo periodo de tiempo, donde se hace de vital importancia determinar en qué momento el producto deber ser agitado para garantizar un secado uniforme.

De esto dependen muchas familias de Colombia, teniendo en cuenta que la mayoría son pequeños cacaoteros secando su cacao de manera artesanal, este proyecto abarca un sector de 3.778Km², al cual se pretende inducir en procesos tecnológicos. En el municipio de Tumaco hay alrededor de 16000Ha (160000000m²) sembradas de cacao, por lo cual el desarrollo de este prototipo de deshidratador beneficiará a muchas familias que dependen de este producto.

- **“Desecación y deshidratación de vegetales” , manual y esquemas de las elaboraciones industriales.**

Cátedra de Industrias Agrarias – Departamento de Tecnología Agroindustrial de la Facultad de Ciencias Agrarias – Universidad Nacional de Cuyo, Almirante Brown 500(5505) – Chacras de Coria – Mendoza, Revisión 2013.

Resumen: Los vegetales y otros productos pueden ser conservados por disminución del contenido del agua de composición, a través de procesos tales como la concentración (productos finales fluidos), la criodeshidratación, la deshidratación o desecación (productos finales sólidos).

La elección del método de secado, dependerá fundamentalmente de la calidad del producto que se desee obtener, de la disponibilidad económica y de las condiciones climáticas de la zona geográfica de la cual se trate.

No obstante lo indicado anteriormente, las exigencias de calidad, trazabilidad, BPA, BPM y otras actuales normativas, hacen que el secado en hornos sea la tendencia de hoy, pues la condiciones estandarizadas del proceso aseguran tiempos de secados menores, bajo deterioro químico y sensorial, poca a nula contaminación del producto final y más homogeneidad en las distintas partidas o lotes.

- **“Diseño de una secadora de cacao para almacenaje con capacidad de 2t/día”**

Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

Lima – Perú, 2015.

Resumen: tiene la necesidad de conservar el cacao almacenado sin que la calidad de éste se vea afectado por la proliferación de bacterias y hongos.

Para ello, se diseñará un equipo secador capaz de procesar 2Tn/día de cacao seco con una alimentación periódica y que reduzca su humedad en un 10% a 15%, sin afectar la calidad del producto, utilizando para ello aire pre

calentado. Se analizarán alternativas para realizar esta tarea de manera que el producto no se vea afectado por agentes contaminantes y que su tránsito sea tal que no dañe físicamente al producto a la entrada y/o salida de la máquina.

Definir las condiciones adecuadas para un buen proceso lo cual contribuirá a mantener la calidad de la almendra del cacao, como son una temperatura y dirección de flujo adecuado; y evaluar los elementos mecánicos de transmisión necesarios para conseguir un secado uniforme.

1.25. Formulación del problema científico.

¿De qué manera le ayuda a los pequeños y medianos productores de cacao de la zona de Jaén, la implementación y uso de un sistema de Control computacional para una secadora de cacao?

1.26. OBJETIVOS

1.26.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar una secadora de cacao aplicando técnicas de control computacional.

1.26.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Los objetivos específicos son:

1. Estudiar las variables físicas que intervienen en el proceso de secado de cacao.
2. Dimensionar el sistema de secado para niveles de producción que vayan de acuerdo a la capacidad de los pequeños productores de las zonas de Jaén y Amazonas.
3. Hacer el cálculo estructural del sistema.
4. Diseñar el control computacional, que básicamente es un controlador PID del sistema del secador en base a microcontroladores PIC.

1.27. Justificación e importancia de la investigación.

Actualmente, existen en el mercado muchos modelos de secadores industriales de cacao. Todos ellos con precios inaccesibles para los pequeños productores cacaoteros, ya que están orientados para grandes productores. Sus diseños operan grandes

volúmenes de producción, también hay que considerar los costos de mantenimientos y mano de obra especializada para su operación.

1.28. Hipótesis

Si diseñáramos nuestra secadora de cacao, entonces reduciríamos el tiempo de secado, manteniendo la calidad del grano almacenado y la comercialización del producto sería más rápida.

1.29. Diseño y contrastación de la hipótesis

Después de hacer un estudio minucioso de todas variables que intervienen en el proceso y haber profundizado en la bibliografía pertinente, nos dimos cuenta que el proyecto apoya sustancialmente a la labor de los productores cacaoteros; principalmente porque es de bajo, haciéndose factible su adquisición.

CAPÍTULO II:

MARCO TEÓRICO

2.1. Concepto de secado

La operación de secado es un proceso que implica transferencia de masa entre un gas y un sólido, donde la humedad contenida en el sólido se transfiere por evaporación hacia la fase gaseosa. (Perry, 1984).

El secado se emplea para que los alimentos de origen orgánico puedan ser conservados por más tiempo, gracias a la disminución del contenido del agua de composición a través de procesos tales como la concentración (productos finales fluidos), la criodeshidratación, la deshidratación o desecación (productos finales sólidos).

Legalmente, el término deshidratación se reserva para cuando el proceso de evaporación de agua es forzado y asistido, mientras que el de desecación implica un proceso de evaporación del agua libre por vías naturales. Desde el punto de vista industrial suelen ser indistintos y no hay diferencias técnicas al respecto.

2.2. Variables

2.2.1. Temperatura

Acelera la eliminación de la humedad, debe subir de forma gradual y una vez alcanzada la temperatura máxima del sistema debe ser constante.

Para ello se tiene en cuenta lo siguiente:

- a) Temperatura del fruto seco.
- b) Temperatura superficial.
- c) Temperatura del bulbo húmedo.

2.2.2. Humedad relativa del aire

Es la razón de la presión de vapor de agua presente con respecto a la presión de saturación a esa temperatura.

$$\%XR = 100 (PA / PAS)$$

... Ecuación 1

PA: Presión parcial del vapor de agua

PAS: Presión del vapor de agua.



2.2.3. Equilibrio en el contenido de humedad

Es el equilibrio establecido entre la humedad y el vapor contenido en el agente de secado.

2.2.4. Velocidad del aire

Es la rapidez de transmisión de energía requerida para calentar el agua contenida en el material, para facilitar su eliminación y transportar la humedad saliente.

2.2.5. Estructura del sólido

Según las estructuras de sus cristales pueden ser:

- a) SÓLIDOS CRISTALINOS
- b) SÓLIDOS AMORFOS

2.2.6. Movimiento de la humedad

Pueden darse de dos modos dependiendo del tipo de material:

a) En sólidos amorfos

El movimiento de la humedad se da hacia la superficie por difusión molecular.

b) En sólidos cristalinos

El movimiento del líquido dentro del sólido se origina en una fuerza neta, debido a las diferencias de carga hidrostática y en los efectos de tensión superficial.

2.3. Curvas de secado

Es la representación gráfica del comportamiento de los sólidos en el proceso de secado, es medido como la pérdida de humedad en función del tiempo.

Como se puede observar en el gráfico, hay una caída muy rápida en el contenido de humedad y luego se va desacelerando y haciéndose asintótico. Esto quiere decir que, cuanto más baja es la humedad final, más dificultosa es su extracción del fruto tratado.

En general, la velocidad de secado se calcula mediante la ecuación:

$$V = (H_{\text{inicial}} - H_{\text{final}}) / (\text{Area} * \Delta T) \quad \dots \text{Ecuación 2}$$

Dónde:

V = Velocidad de secado

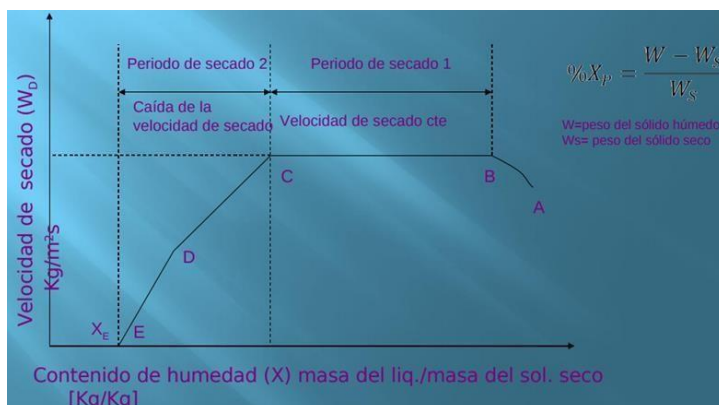
Hinicial = Humedad inicial

Hfinal = Humedad final

Área = Área de evaporación

ΔT = Intervalo de tiempo deseado

Gráfico 2: Velocidad de secado Vs Contenido de humedad



- **Etapa A-B:**

Es una etapa de calentamiento(o enfriamiento) inicial del sólido, normalmente de poca duración, en la cual la evaporación no es significativa por su intensidad ni por su cantidad.

- **Etapa B-C:**

Es el llamado el primer periodo de secado o periodo de velocidad de secado constante, donde se evapora la humedad libre o no ligada del material y predominan las condiciones externas. En este periodo el sólido tiene un comportamiento no higroscópico.

- **Etapa C-D:**

Es el segundo periodo de secado o periodo de velocidad de secado decreciente, donde se evapora la humedad ligada del material y predominan las condiciones internas y externas simultáneamente.

- **Etapa D-E:**

En esta etapa la evaporación ocurre desde el interior del sólido y se da hasta que no exista secado adicional.

2.4. Operacionalización de las variables

Después de hacer un estudio minucioso de las variables físicas presentes en el proceso, podemos citarlas para hacer un esquema de su operacionalización.

- **Indicadores de la variable X**

Los indicadores más representativos de esta variable son: determinación del periodo de secado a velocidad constante, determinación del periodo de secado a velocidad decreciente y el tiempo de secado total.

- **Indicadores de la variable Y**

Los indicadores más representativos de esta variable son: el decaimiento de la humedad del grano de cacao y el control de la temperatura en un rango ideal para no afectar su calidad.

Tabla 1: Indicadores de las variables

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIÓN	INDICADORES
VarX	Estudio del proceso de secado del grano de cacao para lograr la disminución del tiempo requerido en dicho proceso	Mejorar el proceso de secado del grano de cacao, haciendo que el tiempo se reduzca a diez horas y que sea independiente de las condiciones climatológicas que son determinantes en un secado natural	Cantidad	Periodo de velocidad constante
VarY	Control de los niveles de temperatura requeridos para el secado del cacao sin comprometer su calidad	Provocar la disminución de la humedad del grano a un nivel del 8%, insertando un flujo de aire caliente a una temperatura controlada que no supere los 65 ⁰ C	Tiempo	Periodo de velocidad decreciente
			Tiempo	Tiempo de secado total
			Grados Centígrados	Control de la temperatura
			Humedad relativa	Humedad del grano de cacao

2.5. Tratamiento del material en los secadores

El material para el secado puede estar estático, móvil, fluido o diluido.

2.5.1. Estático

Este es un lecho denso de sólidos en el cual cada partícula descansa sobre otras, debido a la densidad de la masa de la fase sólida. Es decir, no existe movimiento relativo entre las partículas sólidas.

GRÁFICO 3



2.5.2. Móvil

Este es un tipo de lecho de sólidos ligeramente restringido, en el cual las partículas están separadas apenas lo suficiente para fluir o deslizar unas sobre otras. Por lo común el flujo es descendente por acción de la fuerza de la gravedad; pero también se puede registrar un movimiento ascendente debido a la elevación mecánica o a la agitación generada dentro del equipo de proceso.

GRÁFICO 4



2.5.3. Fluidizado

Las partículas sólidas se sostienen por medio de fuerzas de arrastre provocadas por la fase gaseosa que pasa por los intersticios de las partículas, con una velocidad crítica dada.

GRÁFICO 5



2.5.4. Diluido

Esta es una condición de expansión total en la cual las partículas sólidas están tan separadas entre sí que prácticamente no ejercen ninguna influencia unas sobre otras.

GRÁFICO 6



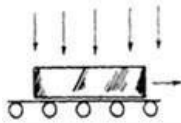
2.6. Tipos de flujo de gas caliente en los secadores.

El flujo de gas caliente puede ser:

2.6.1. Flujo perpendicular

La dirección de la corriente de gas es normal en la entre cara de las fases. El gas choca contra el lecho de sólidos, encontrándose también en este caso dicho lecho de manera estática.

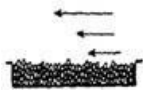
GRÁFICO 7



2.6.2. Flujo paralelo

La dirección del flujo del gas es paralela a la superficie de la fase sólida, el lecho de sólidos se encuentra generalmente en condición estática.

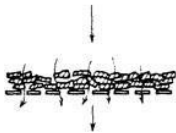
GRÁFICO 8



2.6.3. Circulación directa

El gas penetra y fluye directamente pasando a través de los intersticios de los sólidos, circulando de una manera más o menos libre entorno a las partículas individuales.

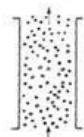
GRÁFICO 9



2.6.4. Flujo de gas equicorriente

La fase gaseosa y las partículas sólidas se desplazan en la misma dirección.

GRÁFICO 10



2.6.5. Flujo de gas contra corriente

La dirección del flujo de gas es exactamente opuesta a la que sigue el movimiento de los sólidos.

GRÁFICO 11



2.6.6. Flujo transversal de gas

La dirección de la corriente de gas se realiza según ángulos rectos en relación con el movimiento de los sólidos, a través del lecho de sólidos.

2.7. Clasificación de los secadores.

Los secadores se clasifican según el método de transmisión de calor a los sólidos húmedos y pueden ser:

2.7.1. Secadores directos

La transferencia de calor para la desecación se logra por contacto directo entre los sólidos húmedos y los gases calientes. El líquido vaporizado se arrastra con el medio de desecación, es decir, con los gases calientes. Los secadores directos se denominan también secadores por convección.

Características:

- El contacto directo entre los gases calientes y los sólidos se aprovecha para calentar estos últimos y separar el vapor.

- Las temperaturas de desecación varían hasta 10000K, que es la temperatura limitante para casi todos los metales estructurales de uso común.
- A temperatura de gases inferiores al punto de ebullición, el contenido de vapor del gas influye en la velocidad de desecación y el contenido final de humedad del sólido. A temperaturas superiores el efecto es mínimo, por lo tanto los vapores sobrecalentados del líquido que se está separando puede servir para desecar.
- Para desecaciones a temperaturas bajas y cuando las humedades atmosféricas son excesivamente elevadas, quizás sea necesario deshumidificar el aire de desecación.
- La eficiencia mejora al aumentarse la temperatura del gas de entrada, para una salida de gas constante.
- Las cantidades de gas para abastecer todo el calor de desecación, dependen de la temperatura de entrada del gas, la temperatura de desecación y la cantidad de materia a tratar.
- Se requiere equipos grandes cuando las partículas del sólido son pequeñas.

2.7.2. Secadores directos continuos

La operación es continua sin interrupciones, en tanto se suministre la alimentación húmeda. Es evidente que cualquier secador continuo puede funcionar en forma intermitente o por lotes, si así se desea.

Tipos de secadores directos continuos:

2.7.2.1. De bandejas

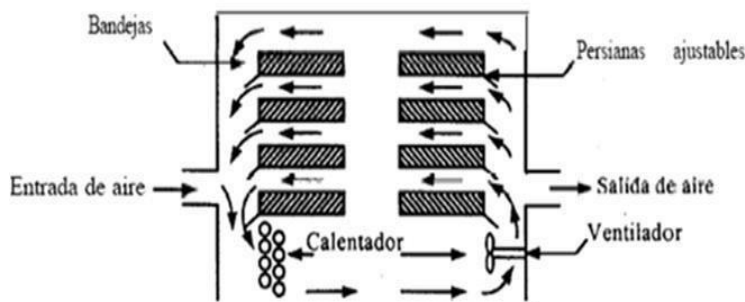
También se llama secador de anaqueles, de gabinete o de comportamientos. El material puede ser un sólido en forma de terrones o una pasta que se esparce uniformemente sobre un metal de 10 a 100mm de profundidad.

Un ventilador recircula aire calentado con vapor paralelamente sobre la superficie de las bandejas. También se usa calor eléctrico, en especial cuando el calentamiento es bajo. Más o menos del 10% al 20% del aire que pasa sobre las bandejas es nuevo y el resto es aire recirculado. Después del secado, se abre el gabinete y las bandejas se reemplazan por otras con más material para secado.

Una de las modificaciones de este tipo de secadores, es el de las bandejas con carretillas, donde las bandejas se colocan en carretillas rodantes que se introducen al secador. Esto significa un considerable ahorro de tiempo, puesto que las carretillas pueden cargarse y descargarse fuera del secador.

En ese caso de materiales granulares, el material se puede colocar sobre bandejas cuyo fondo es un tamiz. Entonces, con este secador de circulación cruzada, el aire pasa por un lecho permeable y se obtienen tiempos de secado más cortos, debido a la mayor área superficial expuesta al aire.

GRÁFICO 12



2.7.2.2. Secadores de material dosificado en capas

Se hace pasar por el secador una capa continua de material ya sea como tiras o en una lámina tensa y distendida sobre un marco de clavijas.

2.7.2.3. Secadores transportadores neumáticos

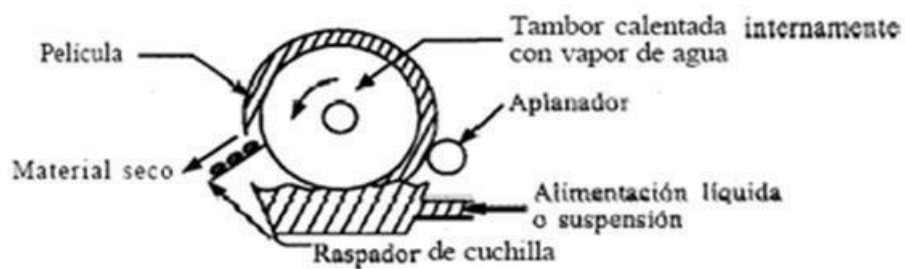
En este tipo, la desecación se realiza a menudo en combinación con la trituration. El material se transporta dentro de gases a la temperatura y velocidades elevadas hasta un colector de ciclón.

2.7.2.4. Rotatorios

Consta de un cilindro hueco que gira por lo general, sobre su eje, con una ligera inclinación hacia la salida. Los sólidos granulares húmedos se alimentan por la parte superior, tal como se muestra en la figura y se desplaza por el cilindro a medida que éste gira. El calentamiento se lleva a cabo por contacto directo con gases calientes mediante un flujo a contracorriente.

En algunos casos, el calentamiento es por contacto directo a través de la pared calentada del cilindro.

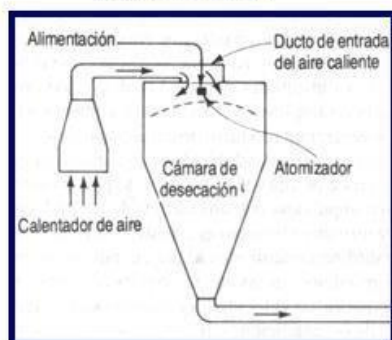
GRÁFICOS 13



2.7.2.5. Por aspersión

La alimentación al secador debe poderse atomizar, ya sea mediante un disco centrífugo o una boquilla.

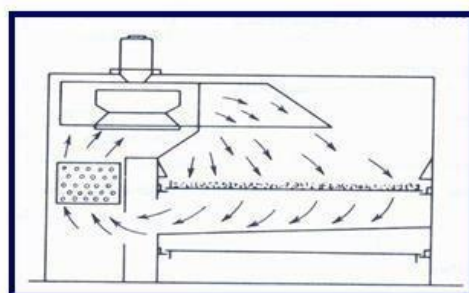
GRÁFICO 14



2.7.2.6. Circulación directa

El material se mantiene en un tamiz de transporte continuo, mientras se sopla aire caliente a través de él.

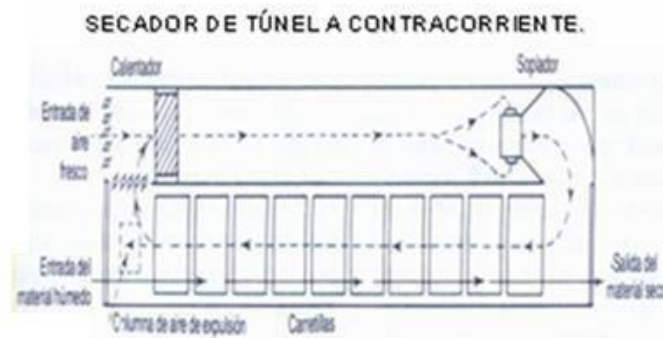
GRÁFICO 15



2.7.2.7. Túnel

El material colocado en carretillas se desplaza a través de un túnel en contacto con gases calientes.

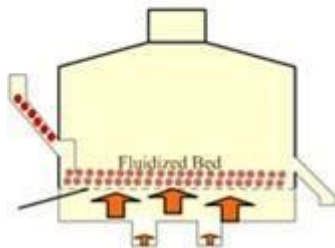
GRÁFICO 16



2.7.2.8. Secadores de lechos fluidos

Los sólidos se fluidifican en un tanque estacionario. También pueden tener serpentines de calor directo.

GRÁFICO 17



2.7.3. Secadores directos por lotes

Se diseñan para operar con un tamaño específico de lote de alimentación, para ciclo de tiempo dado. En los secadores por lote, las condiciones de contenido de humedad y temperatura varían continuamente en cualquier punto del equipo.

Tipos de secadores directos por lotes:

2.7.3.1. Secadores directos

El material se coloca en bandejas con base tamizada, a través de las cuales se sopla aire caliente.

2.7.3.2. Secadores directos de bandeja y compartimiento

El material se coloca en bandejas que pueden o no montarse en carretillas móviles. El aire se sopla sobre el material contenido en las bandejas.

2.7.3.3. Lecho fluido

Los sólidos se fluidifican en un carro estacionario sobre el cual va montado un filtro de polvo.

2.7.4. Secadores indirectos

El calor de desecación se transfiere al sólido húmedo a través de una pared de retención. El líquido vaporizado se separa independientemente del medio de calentamiento. La velocidad de desecación depende del contacto que se establezca entre el material mojado y las superficies calientes. Los secadores indirectos se llaman también secadores por conducción o de contacto.

Características de los secadores indirectos:

- El calor se transfiere al material húmedo por conducción a través de una pared de retención, casi siempre de índole metálica.
- Las temperaturas de superficie pueden variar desde niveles inferiores al de congelación, hasta mayores de 8000K, en el caso de secadores indirectos calentados por productos de combustión.
- Los secadores indirectos son apropiados para desecar a presiones reducidas y en atmósferas inertes, para poder recuperar los disolventes y evitar la formación de mezclas explosivas o la oxidación de materiales que se descomponen con facilidad.
- Los secadores indirectos que utilizan fluidos de condensación como medio de calentamiento son en general económicos, desde el punto de vista de consumo de calor.
- La recuperación de polvos y material finamente pulverizados se maneja de un modo más satisfactorio en los secadores indirectos que en los directos.

Clasificación de los secadores indirectos:

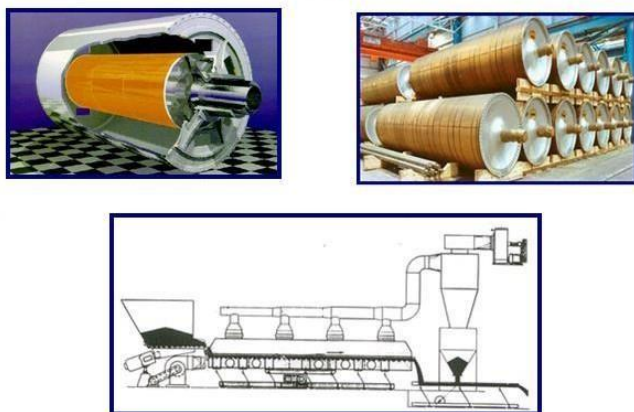
2.7.4.1. Secadores indirectos continuos

La desecación se efectúa haciendo pasar el material de manera continua por el secador y poniéndolo en contacto con las superficies calientes.

Tipos de secadores indirectos continuos:

- Secadores de cilindros para hojas continuas, como papel celofán, piezas textiles, etc. Por lo común, los cilindros se calientan con vapor y son rotatorios.
- Secadores de tambor, se pueden calentar con vapor o agua caliente.
- Secadores de transportador de tornillos, aunque son continuos pueden funcionar al vacío y permiten recuperar el disolvente durante el secado.
- Secadores rotatorios de tubos de vapor, se pueden utilizar vapor o agua caliente, es factible trabajar con una ligera presión negativa para permitir recuperar el disolvente durante el desecado.
- Secadores de bandejas vibradoras, el calentamiento se logra con vapor o agua caliente.
- Tipos especiales, como bandas de tejido continuas que se mueven en contacto estrecho con una platina calentada al vapor o agua caliente.

GRÁFICO 18



2.7.4.2. Secadores indirectos por lotes

En general los secadores indirectos por lotes se adaptan muy bien a operaciones al vacío. Se subdividen en tipos agitados y no agitados.

Tipos de secadores indirectos por lote:

- Secadores de artesas agitadas, estos pueden operar atmosféricamente o al vacío, manejando una producción pequeña de casi cualquier forma de sólidos húmedos, es decir, líquidos, lechadas, pastas o sólidos granulares.
- Secadores por congelación, el material se congela antes de desecarse y a continuación se realiza la desecación en ese estado al vacío.
- Secadores rotatorios al vacío, el material se agita bajo una cubierta horizontal estacionaria, no siempre es necesario aplicar vacío, el agitador se puede calentar con vapor, además de hacer lo mismo con la cubierta.
- Secadores de bandejas al vacío, el calentamiento se hace por contacto con parrillas calentadas con vapor o agua caliente, sobre las cuales se coloca el material. No interviene la agitación.

2.7.5. Secadores diversos

Se citan algunos tipos de secadores diversos:

2.7.5.1. Secadores dieléctricos

Operan sobre el principio de calor dentro de los sólidos, colocándolos dentro de un campo eléctrico de alta frecuencia.

2.7.5.2. Secadores solares

Operan sobre el principio de la energía solar para el secado de frutas y disecación al sol.

2.7.5.3. Secadores infra rojos

Dependen de la transferencia de energía radiante para evaporar la humedad. La energía radiante se suministra eléctricamente por medio de lámparas infrarrojas, resistencias eléctricas o refractarios incandescentes calentados por gas. Su aplicación principal es el horneado o la desecación de capas de pintura y el calentamiento de capas delgadas de materiales.

CAPÍTULO III:

DISEÑO DEL SISTEMA

La función principal del Sistema es controlar de forma automatizada la secadora de cacao, revisando parámetros físicos tanto internos del sistema, como externos del medio ambiente. Todo esto lo lograremos usando microcontroladores PIC, sensores comerciales de humedad relativa y temperatura.

Para ello primero definiremos los parámetros físicos aproximados del sistema, para modelar nuestro diseño propuesto en el presente trabajo de investigación, cuyo dimensionamiento de su estructura ha sido ideado convenientemente.

Los aspectos comprendidos en el dimensionamiento del secador seleccionado cubren dos grandes aspectos:

- La mecánica de la transferencia de calor para evaporar el contenido de líquido presente en el cacao y la mecánica de la transferencia de masa que se lleva en el interior del grano de cacao de forma simultánea y son independientes al tipo de secador que se pretenda dimensionar y diseñar.
- Los requerimientos termodinámicos que son aplicados una vez definidas las variables importantes de la cinética del proceso de secado. Estos requerimientos termodinámicos están vinculados a la aplicación de las leyes de conservación de masa y energía y a los fenómenos de transferencia de calor que permitirán definir que equipos son necesarios para nuestro diseño.

3.1. Cálculos de las variables físicas del sistema

3.1.1. Parámetros de secado por aire caliente

3.1.1.1. Psicrometría

- **Humedad relativa del aire (ϕ)**

Es el cociente de la presión parcial del vapor de agua en la mezcla (PV), entre la presión de saturación del vapor a la temperatura de la mezcla (PS).

$$\phi = PS / P_v = m_v / m_g \quad \dots \text{Ecuación 3}$$

- **Humedad específica (x)**

Se define como: “el cociente entre la masa de vapor m_v y la masa de gas seco m_g ”.

$$X = m_v / m_g \quad \dots \text{Ecuación 4}$$

$$X = 0.622(P_v/P_s) = 0.622(P_v/(P-P_v)) = 0.622\phi(P_s/(P-P_s)) \dots \text{Ecuación 5}$$

- **Temperatura del bulbo seco (TBS)**

Temperatura que indicaría un termómetro al ser colocado en una mezcla. Es la temperatura ordinaria del aire atmosférico.

- **Temperatura del bulbo húmedo (TBH)**

Es la temperatura indicada por un termómetro ubicado en contacto con los bulbos de cacao, que a su vez están inmersos en una corriente de aire húmedo y en casos prácticos es igual a la temperatura adiabática.

3.1.1.2. Transferencia de calor usada en el proyecto

La transferencia de calor se da entre dos puntos o materiales, de diferentes temperaturas.

Durante el proceso de secado se produce transmisión de calor para evaporar el líquido de los granos, dándose la transferencia de masas entre el cuerpo secado y el aire.

- **Por conducción**

Es la transmisión de calor de un medio a otro, debido al movimiento de las moléculas. Donde el flujo de calor se define matemáticamente por la siguiente expresión:

$$q_k = -kA [dT/dx] \quad \dots \text{Ecuación 6}$$

q_k : flujo de calor por conducción (W)

A: Área de la superficie de la transferencia de calor (m²)

$[dT/dx]$: Gradiente de temperatura en la dirección x (°C/m)

A: Conductividad térmica del material (W/m⁰C)

- **Por convección**

Es la transmisión de calor que tiene lugar entre una superficie y un fluido en movimiento que está en contacto con ella. Se define matemáticamente por la siguiente ecuación:

$$q_c = h_c A (T_s - T_\infty) \quad \dots \text{Ecuación 7}$$

q_c : flujo de calor por convección (W)

h_c : Coeficiente de transmisión por convección (W/m²C)

T_s : Temperatura de la superficie (°C)

T_∞ : Temperatura de referencia en el fluido (°C)

3.1.1.3. Características del grano

- **Contenido de humedad en base humedad**

Es la fracción de agua contenida en el sólido y se define por la siguiente ecuación:

$$X_h = m_w / (m_w + m_s) \quad \dots \text{Ecuación 8}$$

Dónde:

X_h : Contenido de humedad en base húmeda

m_w : Masa de agua contenida en el sólido

m_s : Masa de materia seca

- **Contenido de humedad en base seca**

Es el porcentaje entre la cantidad de agua al sólido seco y se define por la siguiente expresión:

$$X_s = 100 (mw / ms) \quad \dots \text{Ecuación 9}$$

- **Humedad de equilibrio**

Es la humedad que se obtiene cuando se alcanza el equilibrio entre el aire y el sólido húmedo. Se logran las condiciones de equilibrio cuando la presión parcial del agua que acompaña al sólido húmedo es igual a la presión de vapor del agua en el aire.

- **Humedad crítica**

Es el contenido de humedad en el que el proceso de secado inicia el periodo de velocidad decreciente de secado.

Como se puede observar para la temperatura de 65°C en el contenido de humedad crítica en base húmeda es aproximadamente 31%, valor que será utilizado en los cálculos pertinentes.

TABLA 2

Contenido de humedad crítica (adaptado de Shelton B.)

T °C	Hc% (BS)	Hc% (BH)
65	44	0,31
70	42	0,31
80	42	0,30

- **Calor latente de vaporización de agua contenida en los granos**

Es la energía requerida para realizar un cambio de fase. Se han desarrollado muchos modelos matemáticos que permiten dimensionar el calor latente a partir de las isotermas de equilibrio higroscópico, con esto se determinó la siguiente ecuación que se ajusta al cacao y al café pergamino:

$$Hfg=(2502.4-2.42958T)*[1+1.44408E(-21.5011X)]\dots \text{Ecuación 10}$$

Dónde:

Hfg: Calor latente de vaporización del agua contenida en los granos

T: Temperatura de la superficie del producto (°C)

X: Contenido de humedad del producto.

▪ **Determinación del calor específico del cacao**

Para los procesos de la transferencia de calor en este proceso de secado se debe determinar el calor específico del cacao en función del contenido de humedad de equilibrio en base seca:

$$C_p = 1.3556 + 5.7859 \text{ CHI} \quad \dots \text{Ecuación 11}$$

Dónde:

C_p : Calor específico del cacao, KJ/Kg-K.

CHI: Contenido de humedad decimal en base seca.

Haciendo uso de la ecuación de Hasley para la temperatura de ambiente (20°C)

$$\text{CHI} = 0.107\text{BH} = 0.12\text{BS} \quad \dots \text{Ecuación 12}$$

BH: Bulbo húmedo (adimensional)

BS: Bulbo seco (adimensional)

El calor específico resultante:

$$C_p = 1.3556 + 5.7859 (0.12) = 2.049 \text{ KJ/KgK}$$

▪ **Determinación de la cantidad de agua eliminada en los granos de cacao.**

La cantidad de agua que se debe retirar al cacao durante el proceso de secado, está asociada al contenido de agua presente en el cacao, cuando está en la cama de secado antes de que inicie el proceso.

Para el proceso de secado, tenemos:

$$\text{masa}_{\text{agua_inicial}} = X_i (\text{capacidad del secador}) \quad \dots \text{Ecuación 13}$$

$$\text{masa}_{\text{agua_inicial}} = 0.7 (200) = 140 \text{ Kg}$$

Para el contenido de materia seca en la cama de secado:

$$masa_{seca_cacao} = masa_{total_cacao} - masa_{agua_inicial}$$

... Ecuación 14

$$masa_{seca_cacao} = 200Kg - 140Kg = 60Kg$$

El proceso de secado se llevará a cabo hasta una humedad final del 10%, el contenido final de agua de ciclo de secado será:

$$masa_{agua_final} = (X_{final_masa_seca_cacao}) / (1 - X_{final})$$

... Ecuación 15

$$masa_{agua_final} = (0.1) (60Kg) / (1 - 0.1) = 6.667Kg$$

El agua que se debe de retirar del cacao en el proceso de secado, es decir el agua a evaporar y ser transportada por el aire en este proceso, es:

$$masa_{agua_retirada} = masa_{agua_inicial} - masa_{agua_final}$$

... Ecuación 16

$$masa_{agua_retirada} = 133.333 Kg$$

La cantidad de cacao al final del ciclo de secado es:

$$masa_{cacao_final_secado} = masa_{seca_cacao} + masa_{agua_final}$$

... Ecuación 17

$$masa_{cacao_final_secado} = 66.667Kg$$

3.1.1.4. Determinación del calor consumido en el proceso de secado.

Los cálculos para determinar el calor consumido en el proceso de secado están compuestos por el calor sensible para elevar la temperatura del grano de cacao, el calor sensible para elevar la temperatura del agua contenida en los granos de cacao y por el calor latente para evaporar el agua de la superficie de los granos de cacao.

Entonces, el calor sensible para elevar la temperatura de los granos de cacao de la cama de secado de 20°C (293K) a 65°C (338K) es:

$$Q_{\text{sensible}} = \text{masa}_{\text{cacao_final_secado}} (T_2 - T_1) C_{p_{\text{cacao}}} \dots \text{Ecuación 18}$$

Reemplazando datos:

$$C_{p_{\text{cacao}}} = 2.049 \text{ KJ/KgK} \text{ ---- } >>> Q_{\text{sensible}} = 6147.03 \text{ KJ} = 1469.14 \text{ Kcal.}$$

La ecuación para determinar el calor sensible necesario para elevar la temperatura del agua en los granos de cacao en la cama del secador desde 20°C a 65°C es:

$$Q_s = \text{masa}_{\text{agua_retirada}} (T_2 - T_1) C_{e_{\text{H}_2\text{O}}} \dots \text{Ecuación 19}$$

$$Q_s = 133.33 \text{ Kg} (65 - 20) ^\circ\text{C} \times 1 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{C}$$

$$Q_s = 5999.85 \text{ Kcal}$$

Finalmente, el calor latente para la evaporación del agua, producto de los fenómenos de transferencia de calor de la cinética de secado que se encuentran en la superficie de los granos de cacao en la cama de secado es:

$$Q_{\text{latente}} = \text{masa agua retirada} \times \text{CalorLatente}_{\text{H}_2\text{O}} \dots \text{Ecuación 20}$$

$$Q_{\text{latente}} = 133.33 \text{ Kg} \times 540 \text{ cal/g} = 71998.2 \text{ Kcal}$$

Los resultados parciales anteriores permitirán determinar el calor total necesario utilizado en este proceso de secado, de la siguiente manera:

$$Q_{\text{Total}} = Q_{\text{sensible}} + Q_s + Q_{\text{latente}} \dots \text{Ecuación 21}$$

$$Q_{\text{Total}} = 1469.14 \text{ KCal} + 5999.85 \text{ Kcal} + 71998.2 \text{ Kcal} = 79467.19 \text{ Kcal}$$

$$Q_{\text{Total(J)}} = 79467.19 \text{ Kcal} = 332490.72296 \text{ KJ}$$

Donde el tiempo de proceso es = 10 horas

$$P_{\text{Total(W)}} = Q_{\text{Total(J)}} / \text{tiempo}_{(s)} = 332490.72296 \text{ KJ} / (10 \times 3600) = 9.2359 \text{ KW} \quad \dots$$

Ecuación 22

3.1.1.5. Tiempo de secado

Durante el proceso de secado hay dos etapas fundamentales:

- **A velocidad constante (R_c)**

En esta etapa se produce una humectación más o menos completa de la superficie del producto y el secado se lleva a cabo por la evaporación sobre dicha superficie. La velocidad de secado está definida por la siguiente expresión:

$$R_c \geq (hC / H_{fg}) (T_a - T_s) \quad \dots \text{Ecuación 23}$$

Dónde:

T_a : Temperatura de secado ($^{\circ}\text{C}$)

Para flujo de aire perpendicular a la superficie:

$$h_c = 4.2G^{0.37} \quad \dots \text{Ecuación 24}$$

$$G = 3600V_a \rho_a \quad \dots \text{Ecuación 25}$$

Dónde:

G : Velocidad media del aire de secado (G/sm^2)

V_a : Velocidad del aire (m/s)

$\rho_a = 1.2 \text{ Kg}/\text{m}^3$ (Densidad del aire)

- **A VELOCIDAD DECRECIENTE (R_d)**

En esta etapa, la superficie del producto se encuentra totalmente seca, por lo que la velocidad de secado solo puede evaluarse por medio del transporte de la humedad desde el interior del sólido hacia la superficie. El contenido de humedad final del primer periodo, es el contenido de humedad crítica y aunque no se conoce la variación de la velocidad durante

esta etapa, se puede suponer que tiene una variación lineal hasta el final del proceso, matemáticamente se puede definir como:

$$R_d \geq R_c [(X_f - X_e) / (X_c - X_e)] \quad \dots \text{Ecuación 26}$$

Dónde:

X_f : Humedad final

X_e : Humedad de equilibrio

X_c : Humedad crítica

De esta manera se puede determinar el tiempo de secado (t_d) en este periodo:

$$t_d = M_s [(X_c - X_e) / (A_s R_c)] \dots \text{Ecuación 27}$$

Dónde:

M_s : Masa seca

3.1.1.6. Isoterma de sorción

Es la relación entre el porcentaje del líquido en el producto y el de su vapor a la presión de equilibrio, expresada por la humedad relativa del aire, se representa por las isotermas de sorción, a una temperatura dada.

Para hallar esta relación, se han propuesto diferentes modelos teóricos y empíricos para expresar el contenido de humedad de equilibrio en los granos. El que más se aproxima es la ecuación de Halsey.

$$rh = \exp[-(1/mc) \cdot \exp(A+B \cdot T)] \quad \dots \text{Ecuación 28}$$

Dónde:

T : Temperatura de secado

m : Contenido de humedad

rh : Humedad relativa del aire (%)

TABLA 3

Parámetros para la ecuación de Halsey

Commodity	Best fit equation	A	B	C
Cocoa	Halsey	4.218	-0.00904	2.469

3.1.1.7. Temperatura del producto durante el secado (t_p)

Para hallar la temperatura a la que se encuentra el producto (temperatura límite de enfriamiento) durante el proceso de secado, se hará uso de la carta psicrométrica, de donde se obtiene $T_p=30^{\circ}\text{C}$ para la temperatura 65°C (esta viene a ser la temperatura del bulbo húmedo).

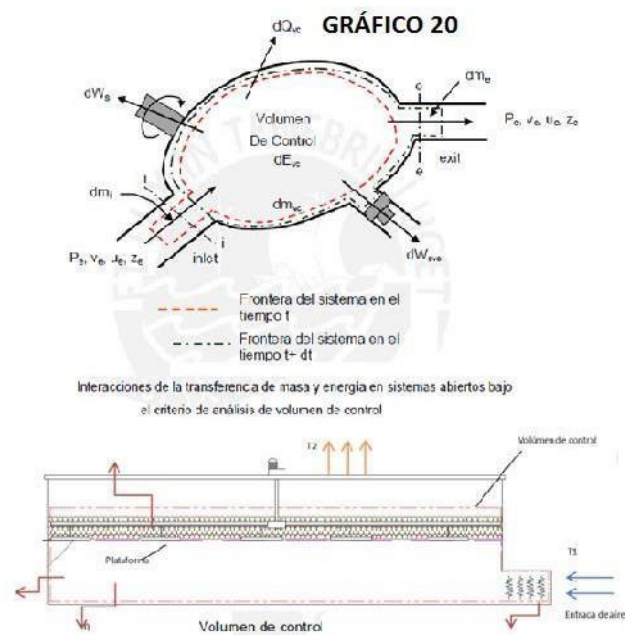
3.1.1.8. Análisis energético del secador

Este aspecto del estudio está regido por los principios termodinámicos, que explican las leyes de conservación de masa y energía.

En términos generales, el análisis termodinámico permite cuantificar las transferencias de energía a través de interacciones de calor y trabajo, así como las transferencias de masa cruzando sus fronteras, cuando el sistema se encuentra en un estado específico para su análisis.

El análisis aplicado a un sistema abierto (figura 19), también denominado volumen de control, desde el punto de vista termodinámico, establece las siguientes formulaciones para los principios de conservación de masa y energía respectivamente (figura 20)





Aplicando los criterios expuestos y con los datos obtenidos hasta el momento, se trabajaran las ecuaciones para el acondicionamiento del aire de secado, que corresponde a la cuantificación de agua eliminada y flujo másico de aire necesario.

$$\sum(\text{in})m_i - \sum(\text{out})m_e = dm_{vc}/dt \quad \dots \text{Ecuación 29}$$

$$Q + W_{net} + \sum(\text{in})m_i [h + 0.5v^2 + gz] - \sum(\text{out})m_e [h + 0.5v^2 + gz] = dm_{vc}/dt$$

... Ecuación 30

Para simplificar los cálculos, el estudio se delimita a los siguientes aspectos: las condiciones del aire y las condiciones del grano de cacao; para esto se realiza la aplicación de balances para la entalpía y humedad del aire, así como balances para la entalpía y humedad del grano.

3.1.1.9. Energía del calentamiento del aire

Determinación del flujo de aire necesario para cumplir los requerimientos del proceso de secado se realiza utilizando las condiciones del aire de entrada con el empleo de la carta psicrométrica de los contenidos de humedad crítica, según la tabla 2, aquí se obtienen las humedades específicas del proceso de secado cuando el aire pasa del punto inicial de 20°C y 85% de humedad relativa y es calentado hasta los 65°C, donde:

$$w_1 = w_2 = 0.0118 \quad \dots \text{Ecuación 31 (valores adimensionales)}$$

Este es introducido al proceso de secado donde el aire saturado abandona a una temperatura de 30°C con:

$$w_3 = 0.027 \quad \dots \text{Ecuación 32 (valor adimensional)}$$

Considerando:

$$masa_{agua_retirada} = 133.33 \text{ Kg} \quad \dots \text{Ecuación 33}$$

$$t_{secado} = 10h = 36000s$$

Con esos datos ahora determinamos el flujo másico con la siguiente ecuación:

$$m_a = masa_{agua_retirada} / [t_{secado}(w_3 - w_2)] \quad \dots \text{Ecuación 34}$$

Reemplazando con los valores:

$$m_a = 877.171 \text{ Kg/h} = 0.243659 \text{ Kg/segundo}$$

El caudal de aire necesario para el proceso de secado se determina calculando el volumen de aire específico teniendo en cuenta las siguientes expresiones y valores:

$$T_a = 20^\circ\text{C} = 293\text{K}$$

$$P_a = 1\text{atm} = 101325\text{Pa}$$

$$R_a = 286,9 \text{ J/KgK}$$

El volumen específico del aire:

$$V_a = R_a (T_a / P_a) (1 + 1.608w_1) \quad \dots \text{Ecuación 35}$$

Reemplazando valores:

$$V_a = 0.845366 \text{ m}^3/\text{Kg}$$

Se podrían usar uno o dos sopladores para distribuir mejor el caudal del aire, por lo que el caudal de aire por equipo será:

$$Q_a = V_a m_a \quad \dots \text{Ecuación 36}$$

Reemplazando los datos:

$$Q_a = 0.20598 \text{ m}^3/\text{s}$$

3.1.1.10. Notas

En los cálculos no estamos considerando la entalpía del aire, pérdidas por convección, caídas de presión en el sistema, ya que sus efectos para el volumen dimensionado no son muy significativos.

3.1.2. Dimensionamiento según la capacidad deseada

En el sistema de dosificación (cuyas características se describen en la Tabla 4), se deposita solamente granos de cacao fermentados, escurridos y sin su “corazón”. Se parte con una humedad de inicial aproximada de 70%. En la parte inferior del dosificador se aprovecha el efecto de la gravedad y la vibración para dosificar el flujo de granos de cacao de forma continua hacia la cámara de secado.

La generación de aire caliente (características detalladas en la Tabla 5) es realizada con una cámara de combustión que toma aire del ambiente y lo calienta por efecto de resistencias calefactoras, luego el aire calentado es enviado hacia el cilindro rotatorio.

TABLA 4: CARACTERÍSTICAS DEL DOSIFICADOR			
	MÍNIMO	MÁXIMO	TIPO
CAPACIDAD DE DOSIFICACIÓN	0.002Kg/s	0.02Kg/s	VIBRADOR
CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO	-----	200Kg	TOLVA

TABLA 5: CARACTERÍSTICAS DEL GENERADOR DE AIRE CALIENTE		
	MÍNIMO	MÁXIMO
DIAMETRO	-----	0.28m
LONGITUD	-----	0.53m
POTENCIA	9.2359KW	10.1595KW
FLUJO DE AIRE	0.2463Kg/s	0.8Kg/s
TEMPERATURA DE SALIDA	40 ⁰ C	75 ⁰ C

En el cilindro rotatorio se produce el secado del material (características detalladas en la Tabla 6), ahí se recibe los flujos de cacao y de aire caliente. En él se produce el efecto de transferencia de calor por convección, el grano avanza por efecto de la rotación del cilindro y de la velocidad del aire de secado. El tiempo de secado de cacao (tiempo de residencia) se estima en diez (10) horas para lograr alcanzar una humedad de 0.1 en base seca.

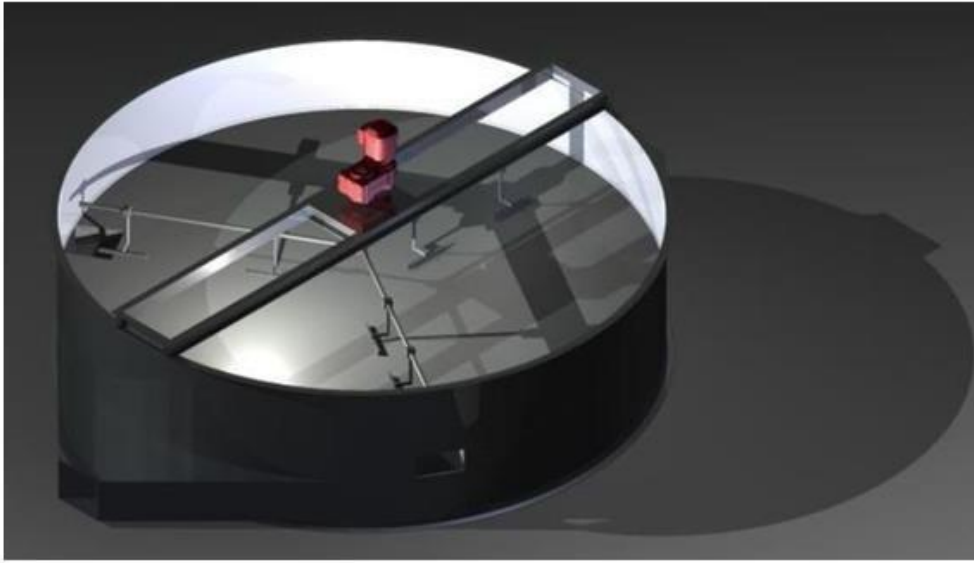
TABLA 6: CARACTERÍSTICAS DE LA CÁMARA DE SECADO			
	MÍNIMO	MÁXIMO	TIPO
VELOCIDAD DE ROTACIÓN	0.5RPM	4RPM	CILÍNDRICA
LONGITUD	-----	3.3m	-----
DIÁMETRO	-----	0.6m	-----

La planta estaría dimensionada para procesar una media diaria de 200Kg.

3.2. Selección de los equipos de transmisión de potencia

Para un secado uniforme, el sistema consta de elementos estructurales conformados por una plancha perforada, un puente y un bastidor. Además de un controlador electrónico que maneja el sistema de uniformizado y descarga, un motor con reductor, un calentador a base de resistencias eléctricas y un ventilador centrífugo.

GRÁFICO 21



3.2.1. Elementos estructurales

3.2.1.1. Plancha perforada

Haciendo uso de la ecuación:

$$Max\ y = \frac{3W\left(\frac{1}{p^3}-1\right).a^2}{16\pi.E.\frac{1}{p^3}.t^3} \quad \dots \text{ ECUACIÓN 37}$$

Dónde:

Max y: Máxima deflexión [m]

W: Peso total [Kg]

v: módulo de poisson [0,3]

a: radio de la plancha circular [m]

E: módulo de elasticidad del acero [2 100 00 kg/m²]

t: espesor de plancha [m]

Esa ecuación fue expuesta por Raymond Roark en su libro “Fórmulas for stressand strain” para plancha circular empotrada en sus bordes, se puede hallar la deflexión de la plancha.

Se obtiene que para un espesor de 3mm la deflexión es igual a 0.3m, mientras que para 5mm es de 6.7cm.

Para minimizar este efecto se colocarán perfiles en T radialmente y soldados al anillo interior para disminuir la flexión ocasionada por el peso del producto sobre la plancha perforada. Serán también de 2 x 2 x 1/8 pulgadas.

A su vez, estará apoyada en un poste central a base de un tubo cuadrado de 2 x 2 x 1.8 pulgadas.

De esta manera, haciendo uso de la fórmula de Roark para sectores circulares planos con carga uniforme, lados rectos apoyados y lado curvo fijo, tenemos:

$$Max y = \alpha \cdot \frac{w \cdot a^4}{E \cdot t^3} \quad \dots \text{ ECUACIÓN 38}$$

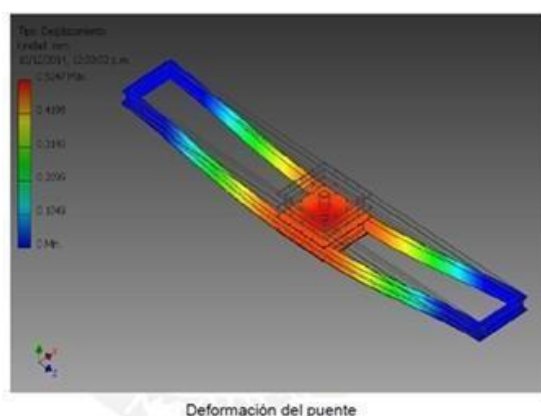
Siendo $\alpha = 0.0065$ para un ángulo de 600, se obtiene que para un espesor de 3mm la deflexión es de 10mm, mientras que para una plancha de 5mm es de 2.5mm.

3.2.1.2. PUENTE

El puente es donde se apoya el eje y el motor reductor cuyos pesos aproximados serían 5.4Kg y 90Kg respectivamente. Así mismo, se encuentra acoplado al eje, la extensión radial y los brazos que ayudarán a la descarga y uniformizarán el secado, siendo el peso total del conjunto 30.5Kg y todo esto aplicado en el centro del elemento. Además, sufre deformación por su propio peso, siendo este valor de 110.3Kg.

Para su construcción se utilizaron perfiles en U de 100x50x6 mm. Haciendo uso del programa Autodesk Inventor, se puede obtener la deflexión máxima asumiendo los extremos empotrados.

GRÁFICO 22



Se obtiene así, una máxima deflexión de 0.52mm en el centro, siendo este valor despreciable, considerando su longitud de 3706mm.

3.2.1.3. Bastidor

Una vez determinadas las cargas a las que estará sometido el bastidor, se procederá a diseñar el elemento, empezando por el espesor de la plancha de la cual estará estructurado.

▪ Espesor de la plancha

El bastidor es el cuerpo principal del secador y será construido en base a planchas de acero roladas y soldadas. Para la selección del espesor de plancha se hará uso de los parámetros establecidos por Ravenet en su libro “Silos. Teoría, Investigación y Construcción”, en el cual establece una relación entre el espesor de pared y la altura de los silos cilíndricos.

GRÁFICO 23



Se puede observar que para una altura menor a 10m y con un diámetro inferior a 4m el espesor requerido es de solo 2mm, sin embargo se seleccionará una plancha de espesor de 3mm ya que su uso será estructural.

▪ Perfiles estructurales

Para darle rigidez y estabilidad al cuerpo principal, se hizo uso de perfiles estructurales en L de lados iguales, siendo sus dimensiones en pulgadas 2 x 2 x 1/8, haciendo uso de las teorías de formas constructivas descritas en el libro de Hans Rognitz. Estos se rolaron y soldaron, formando un anillo que fue soldado en las partes superior e inferior externas del bastidor, así como internamente a medio metro del borde inferior a fin de sostener la plancha perforada.

▪ Cálculo estructural del bastidor

Para determinar la deformación del cuerpo principal, se redujeron las reacciones del puente sobre el bastidor, siendo la reacción en dos puntos diametralmente opuestos igual a 120Kgf cada uno. Se aplicó también el peso del cacao para determinar la deformación radial a plena carga.

Con estos datos, se procede a simular el caso con Autodesk Inventor, dando los siguientes resultados:

GRÁFICO 24

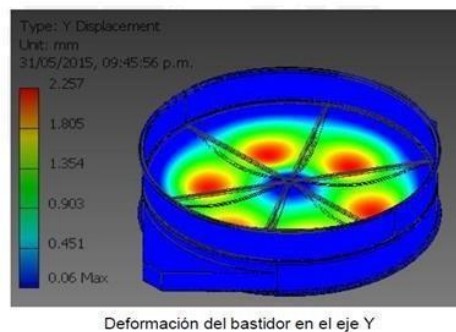
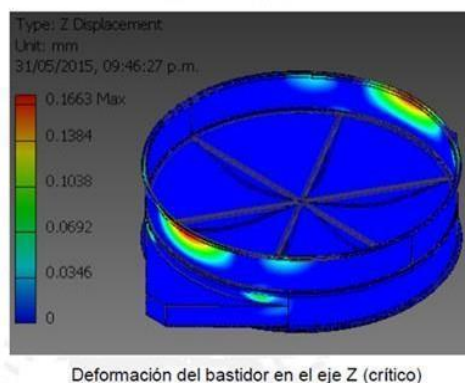


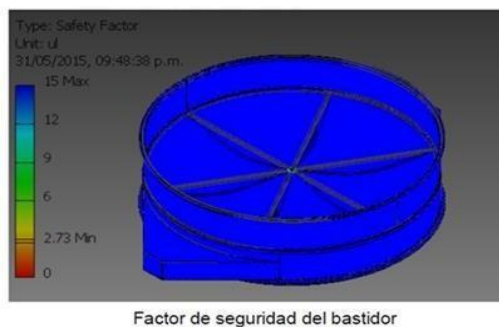
GRÁFICO 25



En la figura se puede ver una variación de la deformación de la plancha con lo hallado en la sección del cálculo de la plancha perforada, dando una variación de 0.25mm, por lo que se puede asumir que la aproximación matemática fue acertada. Se puede deducir que el diseño posee gran rigidez y es adecuado para su operación.

Del mismo modo es posible obtener el factor de seguridad del diseño:

GRÁFICO 26



Se observa que la mayor parte del bastidor posee un factor de seguridad de 15, mientras que el punto crítico es de 2.73, por lo que se concluye que el diseño es correcto.

Así pues, es posible percatarse de la rigidez de la estructura, sufriendo una deformación en los tres ejes despreciable para la operación a la que será sometida.

3.2.2. Generador de calor por resistencias eléctricas

Para evitar la contaminación del cacao, se usan resistencias eléctricas, teniendo en cuenta que para el cálculo de potencia de la cámara de generación de calor, se consideran variables como la temperatura a la que se necesita trabajar, dimensiones de la cámara, especificaciones del tipo de aislamiento. Todos los requerimientos anteriores se van a reducir como necesidad, si se seleccionan los elementos constructivos como conjunto, de tal manera que se direcciona directamente en el cálculo de las especificaciones de la cámara.

Estos calentadores pueden ser de sección rectangular o sección cuadrada:

GRÁFICO 27



Se debe tener en consideración que estos elementos se diseñan a pedido, según las necesidades requeridas, para ello se tiene en cuenta los requerimientos térmicos y el flujo de aire que previamente se ha calculado, para ello:

$$p = 0.349 Mq \Delta T \quad \dots \text{Ecuación 39}$$

Dónde:

p = potencia a instalar en KW (con un factor de seguridad de 1.2)

$Mq = 2181.35 \text{ Kg/h}$ (flujo másico de aire)

$\Delta T = 65^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C} = 45^{\circ}\text{C}$

Esta ecuación considera un 20% por pérdidas de transferencia de calor, tal como se halló en los cálculos realizados.

Reemplazando los datos:

$$p = 0.349 \times (2181.35 \text{ Kg/h}) \times 45^{\circ}\text{C} = 34.26 \text{ KW}$$

Usando dos intercambiadores de calor, tendríamos:

$$p' = 2p = 2 \times 34.26 \text{ KW} = 68.52 \text{ KW}$$

Con estos parámetros pedimos una resistencia calefactora estandarizada, la cual posee las siguientes características:

MODELO DE CARCASA: 6531

POTENCIA MÍNIMA: 0.25KW

POTENCIA MÁXIMA: 171KW

RESITENCIAS: TIPO ALETAS DE 25 x 50 mm

MODELO DE CAJÓN: 6535

LONGITUD: 75 A 1635 mm

ALTURA: 190 A 1540 mm

PROFUNDIDAD: 195 A 645 mm

MÍNIMO AIRE DE CARCASA: 1.5 m/s

MÁXIMO AIRE DE CARCASA: 7 m/s

FORMA: RECTANGULAR

PROTECCIÓN IP DE LA CAJA CONEXIONES: 30 Ó 55

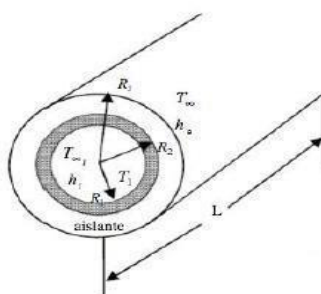
3.2.2.1. Aislantes térmicos

Los aislantes térmicos son materiales con bajo coeficiente de conductividad térmica, con los cuales se aísla térmicamente una superficie del medio exterior.

▪ Radio crítico de aislantes

Al colocar aislante a una superficie curva puede presentarse el caso en que el aislamiento favorezca a la transmisión de calor. El límite para este efecto es el radio crítico del aislamiento.

GRÁFICO 28



Radio crítico de aislante

$$r_c = Kt / h_e \quad \dots \text{Ecuación 40}$$

Dónde:

r_c : Radio crítico del aislante

K_t : Conductividad del tubo, en W/m-K

h_e : Coeficiente de convección externo, en W/m²-K.

▪ Coeficiente convectivo del aire exterior

Los parámetros para el cálculo del coeficiente convectivo exterior del aire (según Melgarejo, 2005) son:

TABLA 7

Estado de la superficie	v<5m/s			v>5m/s		
	a	b	n	a	b	n
Pulida	4,83	3,30	1	0	6,17	0,78
Rugosa	5,32	3,70	1	0	6,4	0,78

$$h = a + b \cdot (v^n) \left(\frac{\text{Kcal}}{\text{hm}^2\text{°C}} \right)$$

Asumiendo que el secador puede operar expuesto a condiciones ambientales y en espacios abiertos, se considera la velocidad crítica para la ecuación de 5 m/s y la superficie externa del secador como pulida, se obtiene: $h_e = 24.885 \text{ W/m}^2\text{K}$

Haciendo uso de este dato y considerando un aislante de lana de vidrio, cuyo coeficiente de conductividad es $0.04 \text{ W/m}^2\text{K}$, se obtiene un radio crítico de 0.0016m .

Esto quiere decir que cualquier espesor de aislante estaría ayudando a evitar la pérdida de calor en el volumen de control.

El flujo de calor exterior de un cilindro puede ser calculado mediante la ecuación:

$$q = \frac{T_{\infty i} - T_{\infty e}}{\frac{1}{2\pi r_i l h_i} + \frac{\ln(\frac{r_o}{r_i})}{2\pi k_c l} + \frac{\ln(\frac{r}{r_o})}{2\pi k_a l} + \frac{1}{2\pi r l h_e}} \quad \dots \text{Ecuación 41}$$

Dónde: k_c : conductividad del cilindro, en $\frac{\text{W}}{\text{m-K}}$

k_a : conductividad del aislante, en $\frac{\text{W}}{\text{m-K}}$

l : longitud del cilindro, en m

r : radio del aislante, en m

r_c : radio crítico del aislante, en m

r_o : radio externo del cilindro, en m

$T_{\infty i}$: Temperatura en el interior del cilindro, en °C

$T_{\infty e}$: Temperatura en el exterior del cilindro, en °C

El secador será diseñado con acero de 3mm de espesor, cuyo coeficiente de conducción $45\text{W/m}^2\text{°C}$.

La altura de la cámara de calentamiento es 0.5m y el espesor del cilindro es de 3mm . Para efectos del cálculo, se asumirá una temperatura superficial del aislante es de 25°C y se debe cumplir la siguiente relación de la ecuación mostrada:

$$\frac{T_{\infty i} - T_{se}}{\frac{1}{2\pi \cdot r_i \cdot l \cdot h_i} + \frac{\ln(\frac{r_o}{r_i})}{2\pi \cdot k_c \cdot l} + \frac{\ln(\frac{r}{r_o})}{2\pi \cdot k_a \cdot l}} = \frac{T_{se} - T_{\infty e}}{\frac{1}{2\pi \cdot r \cdot l \cdot h_e}} \quad \dots \text{Ecuación 42}$$

Reemplazando los valores en la expresión anterior se obtiene un radio de aislante $r = 1.807\text{m}$.

En la expresión gradual, la mayor área de transferencia se da entre la pared superior e inferior de 1m de longitud, paralelas entre sí. Para hallar el espesor de aislante entre paredes planas se tiene:

$$\frac{T_{\infty i} - T_{\infty e}}{\frac{1}{h_i} + \frac{e_{ducto}}{k_c} + \frac{e_a}{k_a} + \frac{1}{h_e}} = \frac{T_{se} - T_{\infty e}}{\frac{1}{h_e}} \quad \dots \text{Ecuación 43}$$

Dónde: e_{ducto} : espesor de la pared, en m
 e_a : espesor del aislante, en m

Remplazando los valores en la ecuación, se obtiene que el espesor requerido sea de 12mm. En el mercado, el valor de espesor menor para estos aislantes es de 25mm y es que se usa.

3.2.2.2. Ventilador centrífugo

Según los requerimientos de flujo de aire necesario para nuestro sistema, una opción a tener en cuenta fue usar un ventilador extractor centrífugo sin motor del fabricante Soler & Palau.

Dentro de sus características generales, según el catálogo del fabricante podemos mencionar que son ventiladores centrífugos de doble aspiración, fabricados en chapa de acero galvanizado, rodete de álabes hacia adelante y eje con salida por ambos lados para incorporar el motor a transmisión.

El modelo estandarizado e idóneo para nuestro sistema fuera el CBP-10/10, cuyas características son:

EQUIVALENCIA (mm) = 270/270

NÚMERO DE REVOLUCIONES (RPM) = 1300

VELOCIDAD MÁXIMA RECOMENDADA (RPM) = 1900

CAUDAL MÁXIMO (m³/h) = 7900

PESO (Kg) = 11

POTENCIA MÁXIMA ABSORBIDA (KW) = 0.32

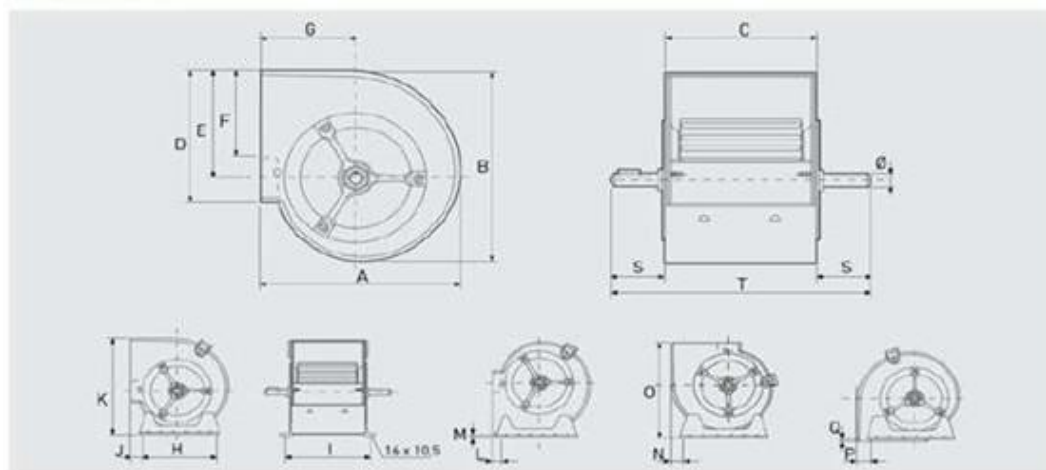
EFICIENCIA (%) = 68

GRÁFICO 29



GRÁFICO 30

DIMENSIONES [mm]



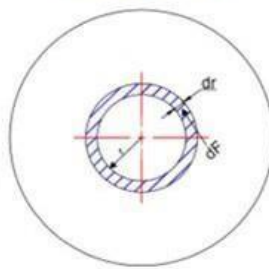
Modelo	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	S	T	Ø
CBF-1/7	307	321	232	222	180	146	146	227	209	20,6	329,3	17,5	4,3	32	309,3	14,5	4,7	49	330	23
CBF-5/7	380	392	232	210	218	180	184	294	259	68,5	395,5	68,5	39	34,5	382	34,5	4	79	390	23
CBF-5/9	380	392	300	210	218	180	184	294	327	18,5	395,5	68,5	39	34,5	382	34,5	4	40	420	23
CBF-10/9	422	441	266	289	247	213	201	339	293	67	450,5	67	40	39	427	39	8	62	390	23
CBF-10/10	422	441	333	289	247	213	201	339	360	67	450,5	67	40	39	427	39	8	63,5	460	23
CBF-12/9	493	524	311	341	293	240	229	407	338	69,5	528	69,5	38,4	40,6	494,4	41,4	4,5	59,5	430	25
CBF-12/12	493	524	376	341	293	240	229	407	423	69,5	528	69,5	38,4	40,6	494,4	41,4	4,5	70	536	23
CBF-15/15	573	613	473	433	343	270	267	494	499,5	62,5	625	68,5	37	44,5	575	48,5	8	71	615	25
CBF-18/18	685	743	554	479	418	290	314	408	585	44,2	751	52,5	44	91,4	689,4	91,4	4,4	48	692	25

323. Selección del motor reductor

El eje transmite torque a los brazos para el uniformizado, dispuestos de manera radial cada 120°. El uniformizado se realiza con la ayuda de las patas de arrastre del grano dispuestas a lo largo de los brazos, por lo que es necesario analizar el torque requerido.

Estas patas tienen una altura inferior a la de la cama de granos por lo que se forma un efecto de olas, en las que el producto no solo se mueve radialmente, sino que también lo hace verticalmente, dando lugar a que el fruto que inicialmente se encontraba en la parte superior del lecho, viaje hasta en donde tendrá un mejor contacto con el aire caliente, mejorando la transferencia de calor y uniformizando el secado.

GRÁFICO 31



Elemento diferencial de la fuerza para el arrastre de grano

De la figura se deduce:

$$dT = r \times Df \quad \dots \text{Ecuación 44}$$

Dónde:

r: radio de la pata de arrastre [m].

dF: Diferencial de la fuerza para el arrastre [N].

La fuerza de rozamiento se obtiene de la siguiente expresión:

$$F = N \times \mu \quad \dots \text{Ecuación 45}$$

Dónde:

μ : coeficiente de rozamiento

Fuerza [Normal en N] = $m \times g$

Se obtiene la ecuación:

$$dF = \mu \times g \times dm \quad \dots \text{Ecuación 46}$$

El diferencial de masa en función de un diferencial de volumen es:

$$dm = \rho \times dV \quad \dots \text{Ecuación 47}$$

$$dV = 2\pi \times h \times r \times dr \quad \dots \text{Ecuación 48}$$

Sustituyendo en la ecuación:

$$F = \int_{r_1}^{r_2} [2\rho \times g \times \mu \times \pi \times h \times r] \times dr \quad \dots \text{Ecuación 49}$$

Las constantes de la ecuación son:

$\rho = 520 \frac{Kg}{m^3}$: Densidad del Cacao

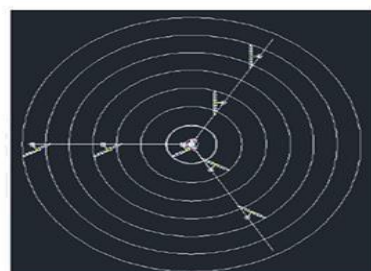
$\mu = 0.45$: coef. de rozamiento entre el cacao y el acero

$h = 0.033 \text{ m}$: altura del cacao arrastrado

$g = 9.81 \frac{m}{s^2}$: gravedad

En la siguiente figura se puede observar que las patas no están posicionadas radialmente si no que forman un ángulo de 300 con el radio del cilindro, por lo que

GRÁFICO 32



Disposición de las patas de arrastre

hubo que descomponer las fuerzas para el análisis.

Tabla 8: Proyección de los radios requeridos

		r₁ (mm)	r₂(mm)
Brazo 1	Pata 1	0	203.72
	Pata 2	740.28	1038.72
	Pata 3	1496.28	1795.72
Brazo 2	Pata 1	484.28	783.72
	Pata 2	1244.28	1543.72
Brazo 3	Pata 1	214.28	513.72
	Pata 2	994.28	1293.72

De esta manera para la fuerza aplicada sobre la pata 1 en el brazo 1, se tiene:

$F_1(\cos 300) \dots$ **Ecuación 50**

$$F_1 = p \times g \times \mu \times \pi \times h \times (r_{22} - r_{12}) = 9.877N$$

$$F_1 = 11.4 \text{ N}$$

Tabla 9: Resultados de las fuerzas sobre sus patas

F₂ (N)	F₃ (N)	F₄ (N)	F₅ (N)	F₆ (N)	F₇ (N)
145.89	270.88	104.34	229.41	59.55	188.27

El torque podrá ser hallado con el producto del coseno de la fuerza y el radio medio de cada una de las patas, obteniéndose un valor de 1040Nm. El trabajo a realizar por el sistema de uniformizado no requiere de gran velocidad angular, siendo como mucho 30 rpm para realizar la tarea. La potencia de trabajo puede ser hallada con la siguiente ecuación:

$$P = T \times W$$

... **Ecuación 51**

$$P = 1040 \text{ Nm} \times 30 \text{ (rev/min)} \times (1\text{min}/60\text{s}) \times (2\pi/\text{rev}) = 3267.25\text{W}$$

El factor de servicio proporcionado por el fabricante es $F_s = 1.2$ (Sew Eurodrive) por lo que la potencia requerida es de 3.92KW, seleccionando así un motor de 4KW con una velocidad de salida de 30RPM.

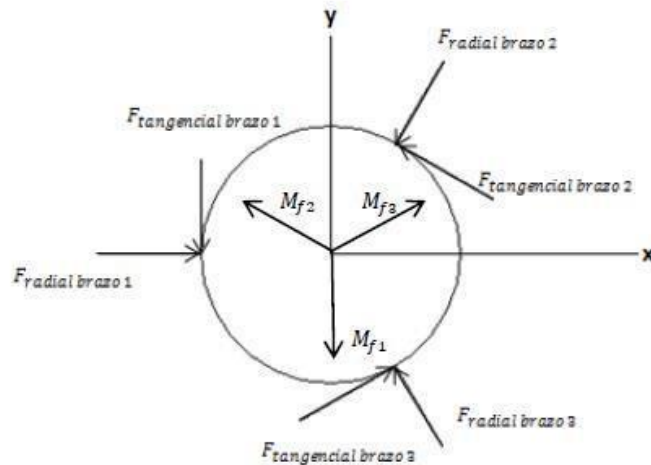
3.2.4. Diseño del eje uniformizado

Para el diseño del eje se hizo uso de técnicas vistas en materias de “Resistencia de materiales y elementos de máquinas”.

3.2.4.1. Fuerzas actuantes sobre el eje

Anteriormente se calculó las fuerzas que ejerce el cacao sobre las patas de arrastre, por lo que hubo que realizar la reducción de las fuerzas sobre el eje de la siguiente manera:

GRÁFICO 33



Reducción de las fuerzas de pata de arrastre sobre el eje

En la tabla anterior se muestran los valores de estas fuerzas.

Tabla 10: Fuerzas resultantes en los brazos de la paleta de uniformizado.

	TANGENCIAL	RADIAL
BRAZO 1	370.8	214.085
BRAZO 2	289.036	166.875
BRAZO 3	214.618	123.91

Las fuerzas de los brazos deben proyectarse sobre los ejes x e y sabiendo que forman ángulos de 600 y 300 para finalmente obtener las fuerzas resultantes sobre el eje:

$$F_x = F_{r1} - F_{t2} \cos 600 - F_{t2} \cos 300 + F_{r3} \cos 600 + F_{t3} \cos 300 = 128.15N$$

... Ecuación 52

$$F_y = -F_{t1} - F_{t2} \cos 300 + F_{t2} \sin 300 + F_{r3} \cos 300 + F_{t3} \sin 300 = -156.18N$$

... Ecuación 53

Al trasladar estas fuerzas se generan momentos flectores debido a la altura entre el punto de traslado de fuerzas en el eje (256.5mm) y las fuerzas radiales.

$$M_{f1} = F_{r1} \times 0.2565m = 54.91 \text{ Nm} \quad \text{... Ecuación 54}$$

$$M_{f2} = F_{r2} \times 0.2565m = 42.8 \text{ Nm} \quad \text{... Ecuación 55}$$

$$M_{f3} = F_{r3} \times 0.2565m = 31.78 \text{ Nm} \quad \text{... Ecuación 56}$$

Finalmente los momentos en el eje x e y serán:

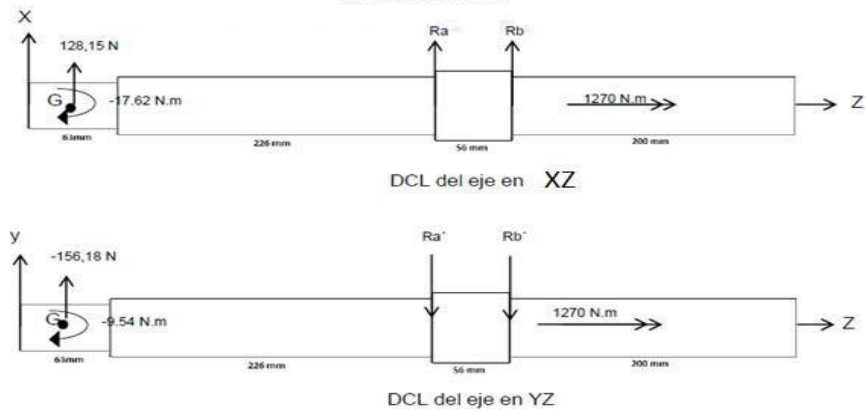
$$M_x = -M_{f2} \cos 300 + M_{f3} \cos 300 = -9.54Nm \quad \text{... Ecuación 57}$$

$$M_y = -M_{f1} + M_{f2} \sin 300 + M_{f3} \sin 300 = -17.62Nm \quad \text{... Ecuación 58}$$

3.2.4.2. Dimensionamiento del diámetro del eje.

Se analizará el eje en los planos XZ e YZ para graficar los diagramas de las fuerzas internas, de esta manera se tienen los siguientes DCL:

GRÁFICO 34



Haciendo un análisis desde el punto G, ubicado a 31.5mm del origen, se pueden obtener las siguientes ecuaciones y resultados:

$$R_a + R_b = 0128.15$$

$$0.2575 R_a + 0.3135 R_b = 17.62$$

$$R_a = 402.77 \text{ N}$$

$$R_b = -274.62 \text{ N}$$

Análogamente:

$$R_{a'} = 703.97$$

$$R_{b'} = -547.79$$

En base a estos resultados se muestran los diagramas de fuerzas internas del plano YZ, pues este es el más crítico:

GRÁFICO 35

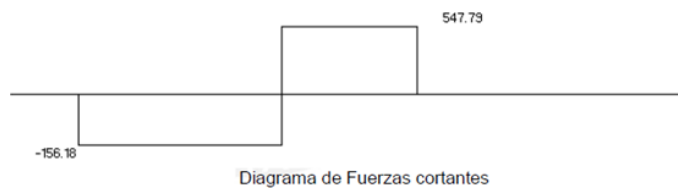


GRÁFICO 36

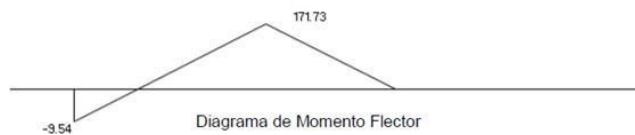
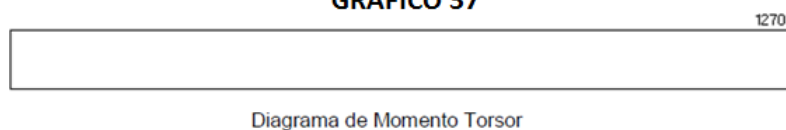


GRÁFICO 37



3.3. Diseño y estructuración del sistema de control electrónico.

De forma general, podemos señalar que la variable predominante, es la temperatura del sistema, cuyo valor, será adquirido por una termocupla tipo K con su respectivo compensador. Se debe resaltar que la segunda variable importante a tener en cuenta es la humedad relativa, la cual es calculada por las ecuaciones mostradas en el capítulo anterior para un dimensionamiento específico, nos dio el tiempo total de funcionamiento de nuestro sistema que debemos temporizar para secar el cacao según nuestras especificaciones.

331. Fuente de voltaje de corriente directa.

La fuente de alimentación a usarse sería una fuente de voltaje de corriente directa de 12V – 3A, la cual estará conectada a la línea de 220VAC y que alimentará a la tarjeta del controlador de temperatura PID, tarjeta de temporización y control de potencia.

GRÁFICO 38: FUENTE DC



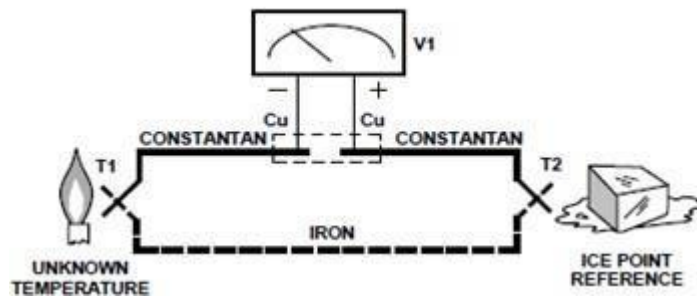
332. Adquisición de la temperatura (sensado).

Después del estudio de las hojas de datos correspondientes, se llegó a la conclusión que se utilizarían los siguientes elementos:

3.3.2.1. Sensor de temperatura: termocupla k.

Es un dispositivo construido en base a dos metales diferentes que están en contacto y se rigen en el siguiente principio físico: El número de electrones libres en una pieza de metal dependen de la temperatura y su composición, dos piezas de metal diferentes a una temperatura igual y en contacto exhibirán una diferencia de potencial que es una función repetible de temperatura. Además se caracterizan por ser económicas y robustas; tienen una razonable estabilidad. Además de su pequeño tamaño, ellas responden rápidamente, haciéndolas una buena elección donde la respuesta rápida es importante. Funcionan sobre rangos de temperatura que van desde la criogenia hasta altas temperatura, tienen una gran linealidad y exactitud.

GRÁFICO 39: DESCRIPCIÓN DE LA TERMOCUPLA



3.3.2.2. Circuito integrado compensador: AD595.

Es un amplificador de instrumentación completo y un chip monolítico que funciona como un compensador de termocupla de unión fría.

Combina una referencia de punto frío con un amplificador pre calibrado que entrega un alto nivel ($10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$) a la salida, directamente de la señal de la termocupla.

Sus características principales son:

- Baja impedancia con salida lineal de $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$
- Entrada diferencial de alta impedancia
- Punto de compensación en frío
- Fuente de alimentación de $+5\text{V}$ a $\pm 15\text{V}$
- Bajo consumo de potencia: $<1\text{mW}$ típico.
- Indicador de falla de la termocupla (abierta)
- Rango de temperatura de -55°C a 1000°C

GRÁFICO 40: DESCRIPCIÓN DEL C.I. AD595
FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

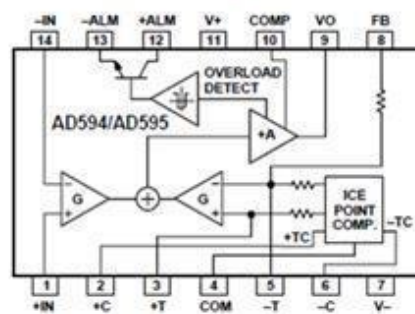
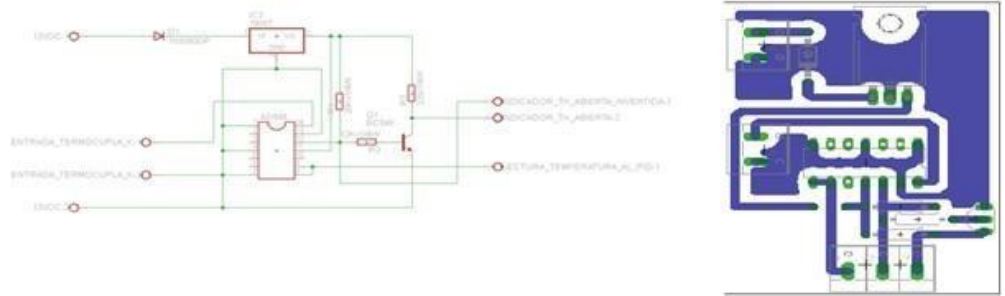


GRÁFICO 41: DIGRAMA DEL BLOQUE DEL SENSADO Y SU TARJETA



Lista de materiales:

- 1 C.I. AD595
- 1 Base para C.I. de 7x7
- 1 C.I. regulador de voltaje 7805
- 1 Transistor BC548
- 1 Diodo 1N4004
- 1 Borneras de dos pines.
- 1 Bornera de tres pines.
- 3 Resistencias de 1/4W

3.3.3. Controlador de temperatura PID.

La estrategia para implementar el controlador de temperatura, es un control PID, que es una de la más utilizada en los procesos industriales de forma general para minimizar el error entre la variable medida y el valor deseado a la salida del proceso.

3.3.3.1. Diseños y respuestas en lazo abierto y en lazo cerrado.

En lazo abierto, varios procesos que involucran a la variable temperatura pueden definirse según la siguiente función de transferencia descrita en la ecuación 59.

$$G(s) = \frac{Ke^{-sr}}{1+\gamma s} \quad \dots \text{Ecuación 59}$$

Donde los coeficientes se obtienen de la respuesta del sistema en lazo abierto a una entrada escalón. Se parte del sistema estabilizado en $y(t)=y_0$ y para $u(t)=u_0$. Se aplica una entrada escalón de u_0 a u_1 . El valor del escalón debe estar entre un 10%

y un 20% del valor nominal, frente a la señal, se registra la respuesta de la salida hasta que se estabilice en el nuevo punto de operación.

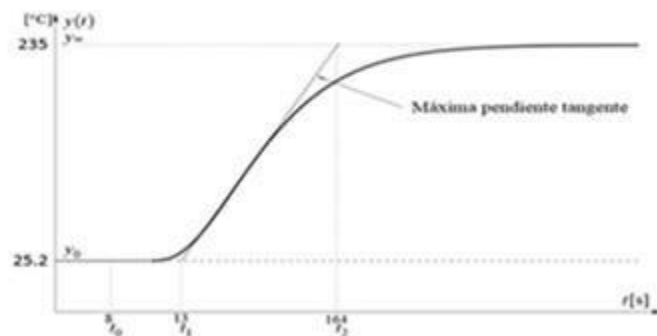
▪ **Diseño del controlador PID en el dominio de s**

En la figura se muestra la gráfica con los datos calculados en la planta secadora de cacao. Para calcular el controlador PID, se escogió el método de la curva de reacción de Ziegler-Nichols.



Excitando la planta con una función escalón unitario a la entrada, tenemos la siguiente curva de reacción:

GRAF 43: CURVA DE LA PLANTA A UNA ENTRADA DE ESCALÓN UNTARIO



Se procede a calcularlas constantes de la planta, donde:

$$K_o = (y_{\infty} - y_o) / (u_{\infty} - u_o) \dots \text{Ecuación 60}$$

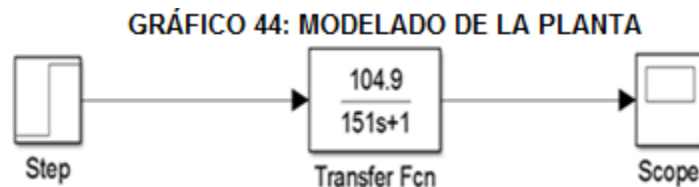
$$K_o = (235 - 25.2) / (2 - 0) = 104.9$$

$$\tau_o = t_1 - t_0 \dots \text{Ecuación 61}$$

$$\tau_o = 13 - 8 = 5$$

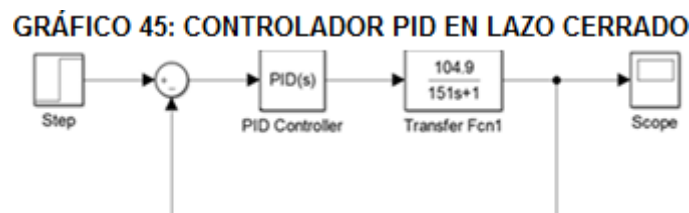
$$y = t_2 - t_1 \dots \text{Ecuación 62}$$

$$y = 164 - 13 = 151$$



▪ **Diseño del controlador PID análogo en lazo cerrado.**

Detallamos con diagramas de bloques el efecto del controlador PID, para proceder a calcular sus parámetros, tal como indica la siguiente figura.



El controlador PID según las ecuaciones de Ziegler y Nichols se define como:

$$PID = [K_p + K_d s + (K_i / s)] E(s) \dots \text{Ecuación 63}$$

A partir de las constantes de la planta obtenidas gracias a la curva de reacción a una función escalón a la entrada del sistema en lazo abierto se calcula los parámetros del controlador PID, según las ecuaciones 42, 43, 44 y 45.

$$K_p = (1.2 y) / (K_0 \tau) \dots \text{Ecuación 64}$$

$$K_p = 0.345$$

$$T_i = 2 \tau_0 \dots \text{Ecuación 65}$$

$$T_i = 10$$

$$T_d = 0.5 \tau_0 \quad \dots \text{Ecuación 66}$$

$$T_d = 2.5$$

Se obtiene el bloque $PID(s) = [0.345 + 2.5s + (10/s)]$

Definimos ahora el controlador PID como:

$$U(s) = PID(s) E(s) \quad \dots \text{Ecuación 67}$$

Dónde:

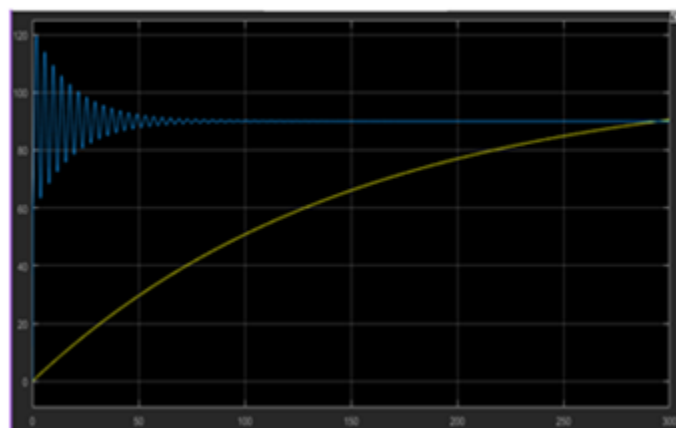
$E(s)$ es el error del sistema definido en el dominio de s como:

$$E(s) = R(s) - Y(s) \quad \dots \text{Ecuación 68}$$

Donde $R(s)$ es la referencia de entrada del sistema.

Simulando en Matlab el sistema de control PID aplicado a la planta vs la respuesta de la planta sin controlador y en lazo abierto, tenemos una respuesta como se muestra en la figura:

GRÁFICO 46: RESPUESTA DEL CONTROLADOR PID VS LA RESPUESTA NATURAL



- **Diseño del controlador de temperatura pid discreto del sistema**

Habiendo definido el controlador PID como $U(s) = [0.345 + 2.5s + (10/s)] E(s)$, aplicamos la transformada Z al controlador y se obtiene:

$$U(z) = K_p E(z) [1 + (T/T_i)/(1-z^{-1}) + (T_d/T) (1-z^{-1})] \dots \textit{Ecuación 69}$$

Simplificando la expresión:

$$U(z) / E(z) = a + b/(1-z^{-1}) + c (1-z^{-1}) \dots \textit{Ecuación 70}$$

Dónde:

$$a = K_p \dots \textit{Ecuación 71}$$

$$b = K_p (T/T_i) \dots \textit{Ecuación 72}$$

$$c = K_p (T_d/T) \dots \textit{Ecuación 73}$$

Reemplazando datos tenemos:

$$T < \tau_0 / 4$$

$$T = 0.1s \text{ (Periodo de muestreo)}$$

$$a = K_p = 0.345$$

$$b = K_p (T/T_i) = 0.345(0.1/10) = 0.00345$$

$$c = K_p (T_d/T) = 0.345 (2.5/10) = 0.08625$$

3.3.3.2. Implementación del controlador de temperatura PID discreto en el microcontrolador.

El controlador de temperatura PID está constituido por dos partes, la primera es la parte del control digital hecho con un micro controlador PIC16F877A (el cual cumple con los requerimientos de nuestro sistema, es de bajo costo y está presente en el mercado local) y la segunda parte es el control de fase que regula el funcionamiento de la resistencia calefactora a través de un TRIAC de potencia.

3.3.3.2.1. Control digital del PID.

▪ Modo del funcionamiento del bloque PID

- El usuario al iniciar el proceso deberá ingresar a través del teclado a un menú de configuración, en el cual se fijaran los parámetros de temperatura mínima y temperatura máxima con los que se desee trabajar durante el ciclo del proceso.
- Al ingresar los parámetros, estos quedarán automáticamente grabados en la memoria EEPROM del microcontrolador, pudiendo ser modificados por el mismo menú de configuración para procesos posteriores.
- Una vez hecho esto, el microcontrolador del control PID (16F877A) le envía un pulso de inicio al microcontrolador de temporización a través del pin PORTC.0, para que este inicie la temporización de su ciclo normal de trabajo de diez (10) horas.
- Luego el microcontrolador del control PID empezará a sensor la temperatura gracias a la termocupla tipo K y al circuito integrado compensador AD595 que acompaña a la termocupla en el bloque de sensado. Se debe mencionar de forma breve que la función en sí del circuito integrado AD595 es primero de amplificar la señal que proporciona la termocupla tipo K del orden de microvoltios al orden de milivoltios, eliminar la distorsión de las lecturas por causa de las propiedades físicas de la termocupla, hacer el proceso de linealización de los valores

obtenidos y dar un pulso de advertencia si se presentaran fallas en las conexiones de la termocupla.

- Ya obtenidas las lecturas de temperatura, éstas van al microcontrolador del control PID a través del canal A0 (puerto análogo) para ser procesadas en las ecuaciones del PID escritas en el PIC.
- Después de efectuarse el procesamiento de datos, a través del puerto PORTC.2, se envía la señal de control, a través de pulsos PWM al bloque de potencia conformada principalmente por el TRIAC que alimenta a la resistencia calefactora.

▪ **Código fuente.**

El código a implementar está hecho en CCS compiler, presente en el microcontrolador, que realiza todas las funciones arriba descritas, se detalla:

```
#INCLUDE<16F877A.h>

#FUSES XT,NOWDT,PUT,NOWRT

#USE DELAY(CLOCK=4000000)

#include<lcd.c>

#BYTE TRISA=0x85
#BYTE TRISB=0x86
#BYTE TRISC=0x87
#BYTE TRISD=0x88
#BYTE PORTA=0x05
#BYTE PORTB=0x06
#BYTE PORTC=0x07
#BYTE PORTD=0x08
```

```

//DECLARACION DE ENTRADAS

#BIT SELECCION=0X06.0

#BIT MENU=0X06.1

#BIT UP=0X06.2

#BIT DOWN=0X06.3

#BIT ON_PID=0X07.0

char menus=3;

char item;

int DATOS_GRABADOS;

float temp_min;

float temp_max;

float temp_tope;

enum funciones{rejec,rmin,rmax};

void ejecutar(void)

{ while(TRUE)

    { ON_PID=1;

      int16 valor;

      int16 control;

      float a,b,c;

      float temp_limt;

      float rT,eT,iT,dT,yT,uT,iT0,eT0,iT_1,eT_1;

      temp_limt=65.0; //TEMPERATURA A ALCANZAR

      iT_1=0.0;

      eT_1=0.0;

      a=0.345; //0.1243;

      b=0.00345; //0.0062;

```

```

c=0.08625; //0.6215;

//CONFIGURACIÓN DEL PWM A 1ms

setup_timer_2(t2_div_by_4,249,1);

setup_ccp1(ccp_pwm);

setup_adc_ports(all_analog);

setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL);

set_adc_channel(0);

valor=read_adc();

yT=valor*(5000.0/1024.0);

rT=temp_limt;

eT=rT-yT;

iT=b*eT+iT0;

dT=c*(eT-eT0);

uT=iT+a*eT+dT;

if(uT>temp_max)

    {uT=temp_max;}

else

    {if(uT<temp_min)

        {uT=temp_min;}

    }

control=uT;

set_pwm1_duty(control);

iT0=iT;

eT0=eT;

LCD_PUTC('\f');

LCD_GOTOXY(1,1);PRINTF(LCD_PUTC,"EN PROCESO");

```



```

        PRINTF(LCD_PUTC, "\nT: %04.2f", uT);

        DELAY_MS(100);

    }

}

void rtmin(void)

{LCD_GOTOXY(2,1);PRINTF(LCD_PUTC,"FIJAR");

while(TRUE)

    {LCD_GOTOXY(1,2);PRINTF(LCD_PUTC,"TMIN:
%04.2f",temp_min);

    if(input(UP)==1)

        {if(temp_min>1 && temp_min<temp_tope-2)

            {temp_min=temp_min+1;

            write_EEPROM(1,temp_min);

            delay_ms(200);

            }

        }

    if(input(DOWN)==1)

        {if(temp_min>2)

            {temp_min=temp_min-1;

            write_EEPROM(1,temp_min);

            delay_ms(200);

            }

        }

    if(input(SELECCION)==1)

        {delay_ms(200);

        ejecutar();

        }

```

```

    }

}

void rtmax(void)

{LCD_GOTOXY(2,1);PRINTF(LCD_PUTC,"FIJAR");

while(TRUE)

    {LCD_GOTOXY(1,2);PRINTF(LCD_PUTC,"TMAX:
%04.2f",temp_max);

    if(input(UP)==1)

        {if(temp_max>1 && temp_max<temp_tope)

            {temp_max=temp_max+1;

            write_EEPROM(2,temp_max);

            delay_ms(200);

            }

        }

    if(input(DOWN)==1)

        {if(temp_max>3)

            {temp_max=temp_max-1;

            write_EEPROM(2,temp_max);

            delay_ms(200);

            }

        }

    if(input(SELECCION)==1)

        {delay_ms(200);

        ejecutar();

        }

    }

}

```

```

void run_func(int numfunc)

{switch(numfunc)

{case rejec:

ejecutar();

break;

case rmin:

rtmin();

break;

case rmax:

rtmax();

break;

}

}

void main()

{//INICIALIZA LCD

LCD_INIT();

DELAY_MS(100);

//LIMPIA PANTALLA

LCD_PUTC("\f");

//CONFIGURO MIS PUERTOS COMO ENTRADAS Y SALIDAS

TRISB=0x0F; // PUERTO B

TRISC=0x01; // PUERTO C COMO SALIDA (PIN C2 - PWM)

TRISD=0x00; // PUERTO D COMO SALIDA (PANTALLA)

//INICIALIZO MIS PUERTOS

```

```

PORTB=0X00;

PORTC=0x00;

PORTD=0X00;

////////////////////

LCD_PUTC("\f");

LCD_GOTOXY(1,1);PRINTF(LCD_PUTC,"INICIANDO SECADO");

LCD_GOTOXY(1,2);PRINTF(LCD_PUTC,"ESPERE POR FAVOR");

DELAY_MS(3000);

LCD_PUTC("\f");

temp_min=read_EEPROM(1);

temp_max=read_EEPROM(2);

ON_PID=0;

while(true)

{if (temp_min!=0 && temp_max!=0)

    {write_EEPROM(3,1);} //DETECTO SI HAY DATOS GRABADOS

else

    {write_eeprom(3,0);} //DETECTO SI NO HAY DATOS
GRABADOS

    DATOS_GRABADOS=read_EEPROM(3);

    if(DATOS_GRABADOS==0)

        {//PARÁMETROS NO GRABADOS

            LCD_GOTOXY(1,1);PRINTF(LCD_PUTC,"DEFINA
PARAMETROS");

            delay_ms(3000);

            LCD_PUTC("\f");

            item=1;

            run_func(item);

```

```

    }
else
{
    while(true)
    {
        //TESTEO TECLADO
        IF(INPUT(MENU)==1) //SI PRESIONA LA TECLA MENÚ
        {
            item=item+1;
            delay_ms(300);
            lcd_putc('\f');
        }
        IF(item>(menus-1))
        {
            item=0;
        }
        SWITCH(item)
        {
            case 0: //EJECUTAR
                ejecutar();
                break;
            case 1: //TEMPERATURA MÍNIMA
                rtmin();
                break;
            case 2: //TEMPERATURA MÁXIMA
                rtmax();
                break;
        }
        if(input(SELECCION)==1)
        {
            delay_ms(200);
            run_func(item);
        }
    }
}

```

```

    }
  }
}
}

```

▪ **Lista de componentes.**

- 1 C.I. PIC 16F877A.
- 1 C.I. Regulador de voltaje 7805.
- 1 Pantalla LCD Hitachi de 2x16.
- 3 Borneras de dos pines.
- 1 Diodo 1N4004.
- 1 Cristal de 4MHz.
- 2 Condensadores de 22pF.
- 4 Resistencias de 10KOhm x /4W
- 4 Pulsadores normalmente abiertos.
- 1 Resistencia de 220 Ohm.
- 1 Base para C.I. de 20x20
- 1 Tira de espadines hembra y macho
- 1 Trimpot de 5KOhm

GRÁFICO 47: DIAGRAMA DEL CONTROL ELECTRÓNICO DEL PID

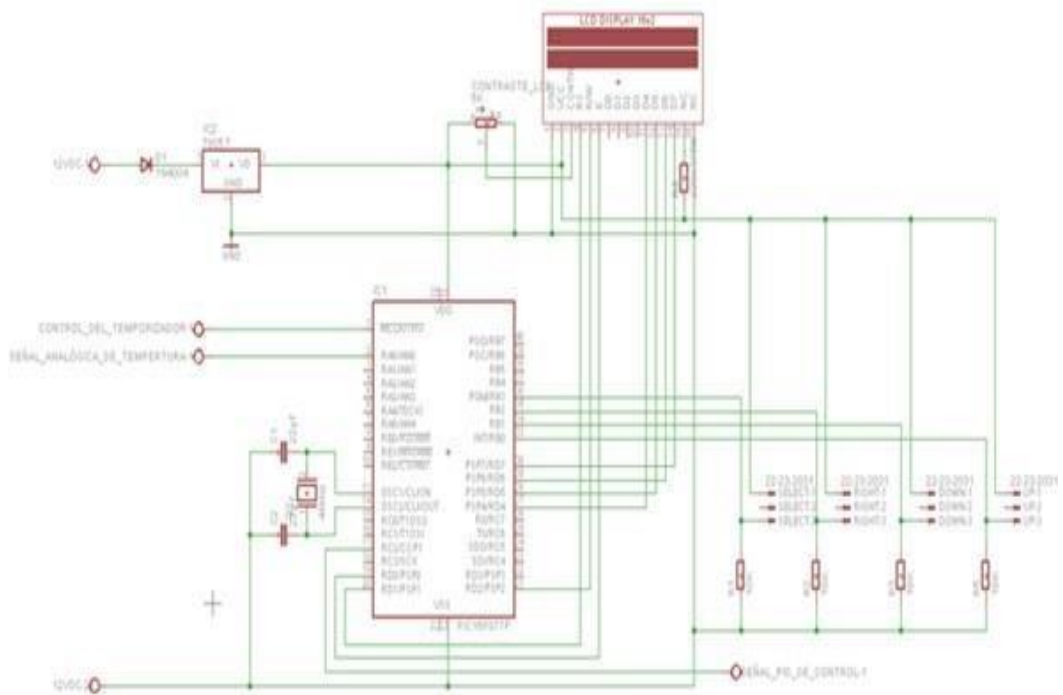
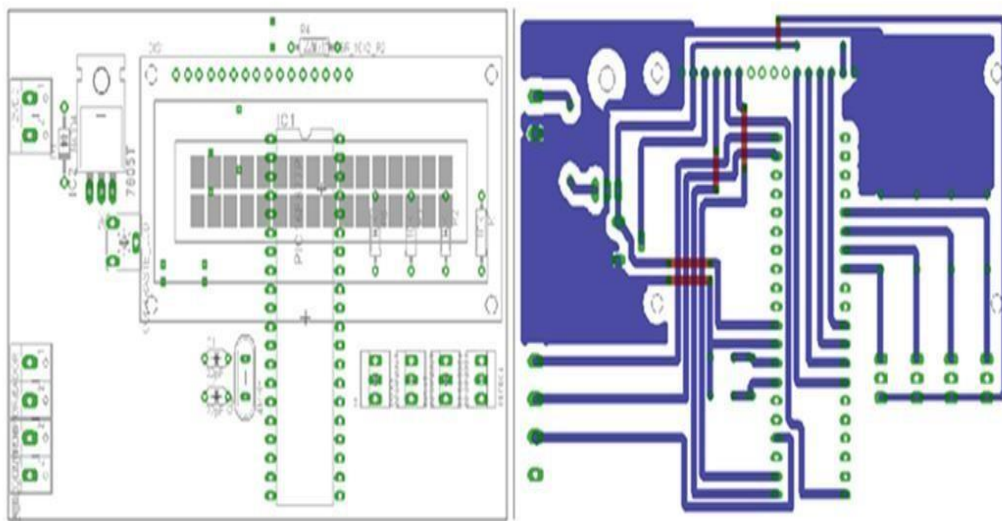


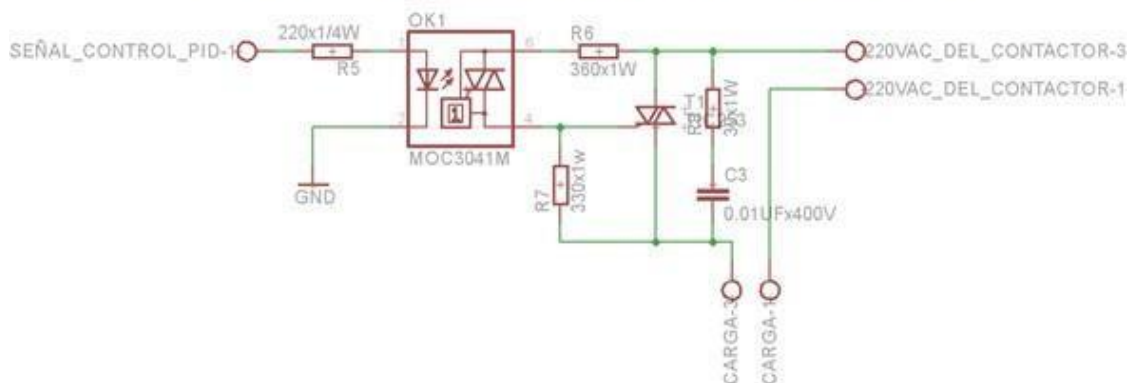
GRÁFICO 48: DISTRIBUCIÓN DE COMPONENTES Y PISTAS DE LA PLACA DEL CONTROL ELECTRÓNICO PID



3.3.3.2.2. ETAPA DE CONTROL DE LOS DISPAROS DEL TRIAC

La etapa de control de los disparos del SCR capta la señal del control PID que proporciona el microcontrolador a través de un OPTOTRIAC MOC3041 (este aísla la etapa de control digital de la etapa de potencia, su voltaje típico de disparo es de 20 VAC) y las convierte en señales que van modificando el ciclo de trabajo de la carga que va conectada a las líneas de potencia a través de un TRIAC SK500A.

GRÁFICO 49: DIAGRAMA DEL CIRCUITO DEL DISPARO DEL TRIAC



▪ **Lista de componentes:**

- 3 Borneras de dos pines.
- 1 C.I. MOC 3041.
- 1 Resistencia de 220 Ohm x 1/4W
- 1 Resistencia de 330 Ohm x 1W
- 1 Resistencia de 360 Ohm x 1W
- 1 Resistencia de 30 Ohm x 1W
- 1 Condensador de 0.01uF x 400V
- 1 Triac BCR50GM

3.3.4. Circuito temporizador.

3.3.4.1. Funciones

- Testear cuando el usuario presiona el botón de iniciar el proceso de secado, para que dé el pulso de inicio del proceso al circuito del controlador PID y a partir de ese momento te
- Testear si el usuario en algún momento del proceso presiona el botón de apagado de emergencia, detiene el ciclo de trabajo del sistema.
- Una vez iniciado el ciclo de trabajo, activa primero a tres relés, que éstos a su vez energizan a las bobinas de sus respectivos contactores, esto primero como medida de seguridad ante posibles fallos del sistema, por el tema eléctrico y segundo que permite el redimensionamiento de las capacidades de los componentes del sistema, ya que sólo aumentando la capacidad de los contactores bastaría, ya que estos son operados a través de la activación de sus bobinas.
- La función de cada relé junto a su respectivo contactor se detalla a continuación:
 - El primer contactor será como protección, el cual conecta la línea de alterna proveniente del circuito de disparo del TRIAC con la resistencia calefactora del horno.
 - El segundo contactor será para energizar el ventilador que permite generar el flujo de aire requerido en el sistema.
 - El tercer contactor será para energizar el motor reductor que va en el puente que maneja el dispensador.
 - Además hay un cuarto relé que activa a una sirena alimentada a 220VAC, siempre y cuando se den dos casos:
 - Cuando los terminales de la termocupla se abran en uno o en ambos de sus extremos que van conectados al circuito integrado compensador AD595.

- Al finalizar el proceso de secado se activará la sirena por un lapso determinado (10 segundos) en la programación del microcontrolador.

3.3.4.2. Lista de componentes:

Se presenta el diagrama del circuito de control electrónico del temporizador hecho el programa EAGLE 6.2, que luego será integrado a la tarjeta de control principal y a la parte de potencia.

- 1 C.I. Pic 16F84A.
- 1 Cristal de 4 MHz.
- 2 Condensadores de 22pF.
- 1 C.I. Regulador de voltaje 7805
- 5 Leds de 5mm
- 1 Base para C.I. de 9x9.
- 4 Transistores BC548.
- 4 Relés de 12VDC.
- 13 Resistencias de 5K6 Ohm x 1/4W.
- 4 Resistencias de 470 Ohm x 1/4W.
- 1 Resistencia de 220 Ohm x 1/4W.
- 3 Borneras de 2 pines.
- 4 Borneras de 3 pines.
- 2 Pulsadores normalmente abiertos.
- 1 C.I. 7408 (Compuertas AND)
- 1 C.I. 7432 (Compuertas OR)
- 1 Diodo 1N4004

3.3.4.3. Diagrama.

Se presenta el diagrama del circuito de control electrónico del temporizador hecho el programa EAGLE 6.2, que luego será integrado a la tarjeta de control principal y a la parte de potencia.

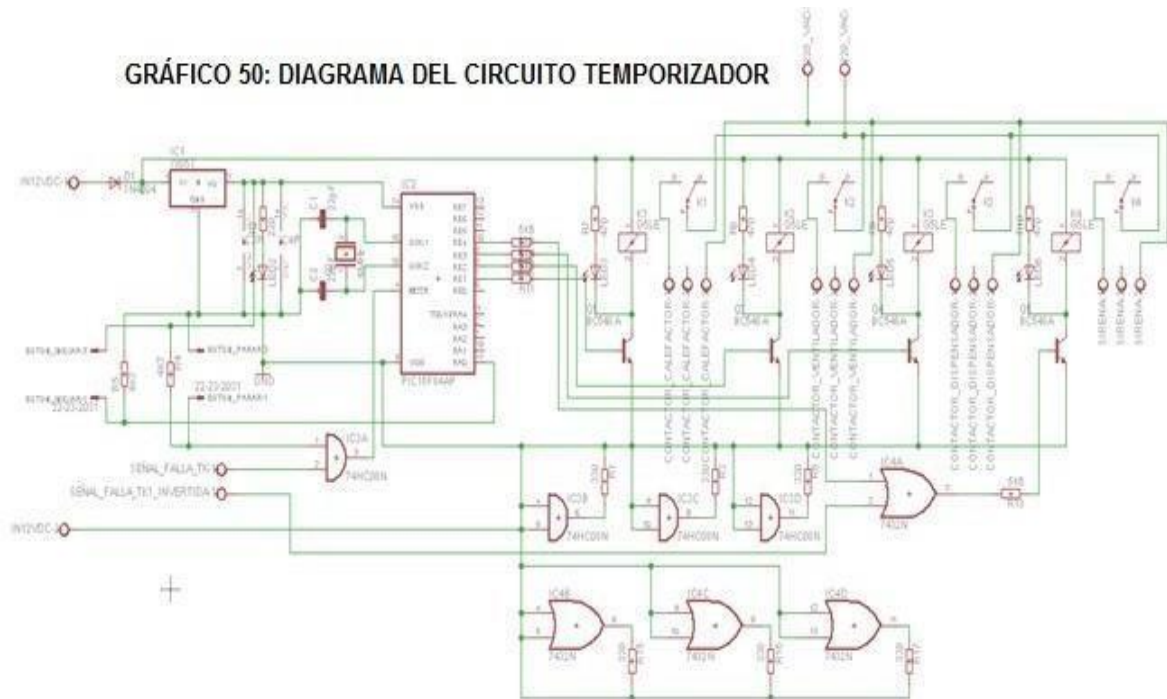
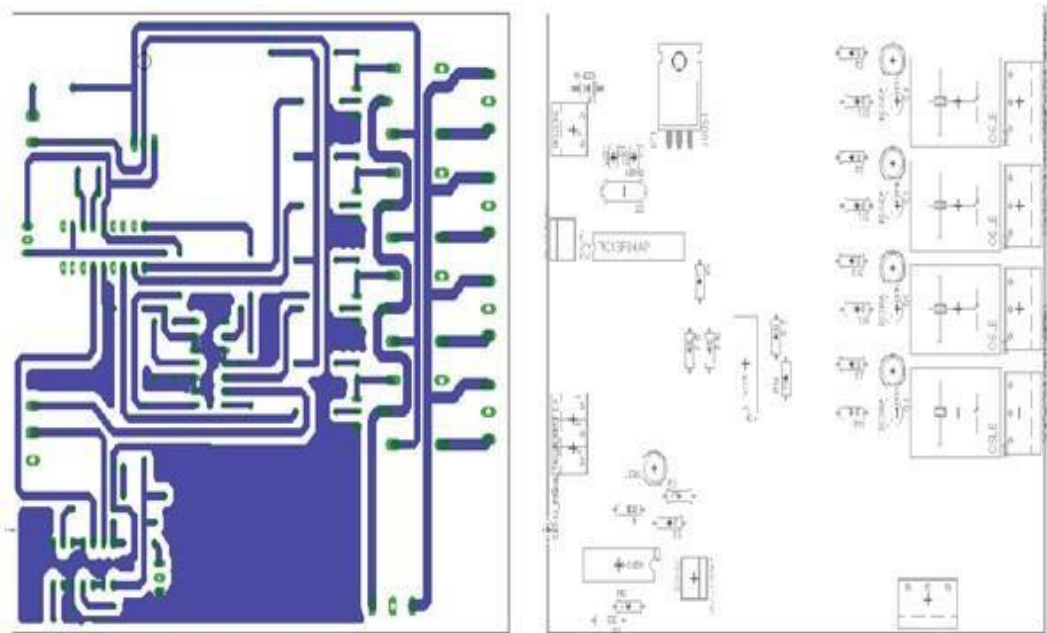


GRÁFICO 51: DISTRIBUCIÓN DE PISTAS Y COMPONENTES DEL CIRCUITO TEMPORIZADOR ELECTRÓNICO



3.3.4.4. Programa.

El programa del microcontrolador PIC16F84A está hecho en lenguaje de PICBASIC PRO de MICROCODE STUDIO, el programa se muestra a continuación:

DEFINE OSC 4

CHORAS CON 10

'TIEMPO DE SECADO ESTIMADO

AUX VAR BIT

DG VAR BIT

HORAS VAR BYTE

MINUTOS VAR BYTE

SEGUNDOS VAR BYTE

I VAR BYTE

J VAR BYTE

K VAR BYTE

'DETALLE DE LOS PINES DE ENTRADA

SYMBOL PULSO_INICIO=PORTA.0

'DETALLE DE LOS PINES DE SALIDA

SYMBOL CALEFACTOR=PORTB.1

SYMBOL VENTILADOR=PORTB.2

SYMBOL DOSIFICADOR=PORTB.3

SYMBOL SIRENA=PORTB.4

.....

TRISA=%00001 'DECLARACIÓN DE ENTRADAS

TRISB=%00000000 'DECLARACIÓN DE SALIDAS

.....

PORTB=0 'INICIALIZACIÓN DE SALIDAS

AUX=0

DG=0

I=0

J=0

K=0

.....

INICIO:

IF PULSO_INICIO=1 THEN AUX=1

IF AUX=1 THEN GOTO DATOS_GRABADOS

PAUSE 20

GOTO INICIO

DATOS_GRABADOS:

READ 0,DG

IF DG=0 THEN

GOTO EMPEZAR

ELSE

GOTO CONTINUAR

ENDIF

GOTO DATOS_GRABADOS

CONTINUAR:

LEO LA MEMORIA EEPROM

READ 1,HORAS

READ 2,MINUTOS

READ 3,SEGUNDOS

SEGUNDOS=SEGUNDOS-1

IF SEGUNDOS=0 THEN

SEGUNDOS=60

MINUTOS=MINUTOS-1

IF MINUTOS=0 THEN

MINUTOS=60

HORAS=HORAS-1

IF HORAS=0 THEN

GOTO FIN

ENDIF

ENDIF

ENDIF

GOTO CONTINUAR

EMPEZAR:

AUX=0

```

'BANDERA DE INICIO DE CICLO

WRITE 0,1

'ENCIENDO EL PID

HIGH RESET_PID

'ENCIENDE EL SISTEMA DE POTENCIA

HIGH CALEFACTOR

HIGH VENTILADOR

HIGH DOSIFICADOR

'CRONOMETRIZA DIEZ HORAS

FOR I=1 TO CHORAS

    FOR J=0 TO 59

        FOR K=0 TO 59

            CALL GRABA_TIEMPO

            PAUSE 1000

        NEXT K

    NEXT J

NEXT I

FIN:

'BANDERA DE FIN DE CICLO

WRITE 0,0  'LIMPIO VARIABLES DEL TIEMPO

CALL LIMPIA_MEMORIA

'APAGO EL PID

```

```

LOW RESET_PID

'APAGA EL SISTEMA DE POTENCIA

LOW CALEFACTOR

LOW VENTILADOR

LOW DOSIFICADOR

'ENCIENDE LA SIRENA POR 10 'SEGUNDOS,

'INDICANDO EL FIN DEL 'PROCESO

HIGH SIRENA

PAUSE 10000

LOW SIRENA

GOTO INICIO

LIMPIA_MEMORIA:

WRITE 1,0

WRITE 2,0

WRITE 3,0

RETURN

GRABA_TIEMPO:

WRITE 1,I

WRITE 2,J

WRITE 3,K

RETURN

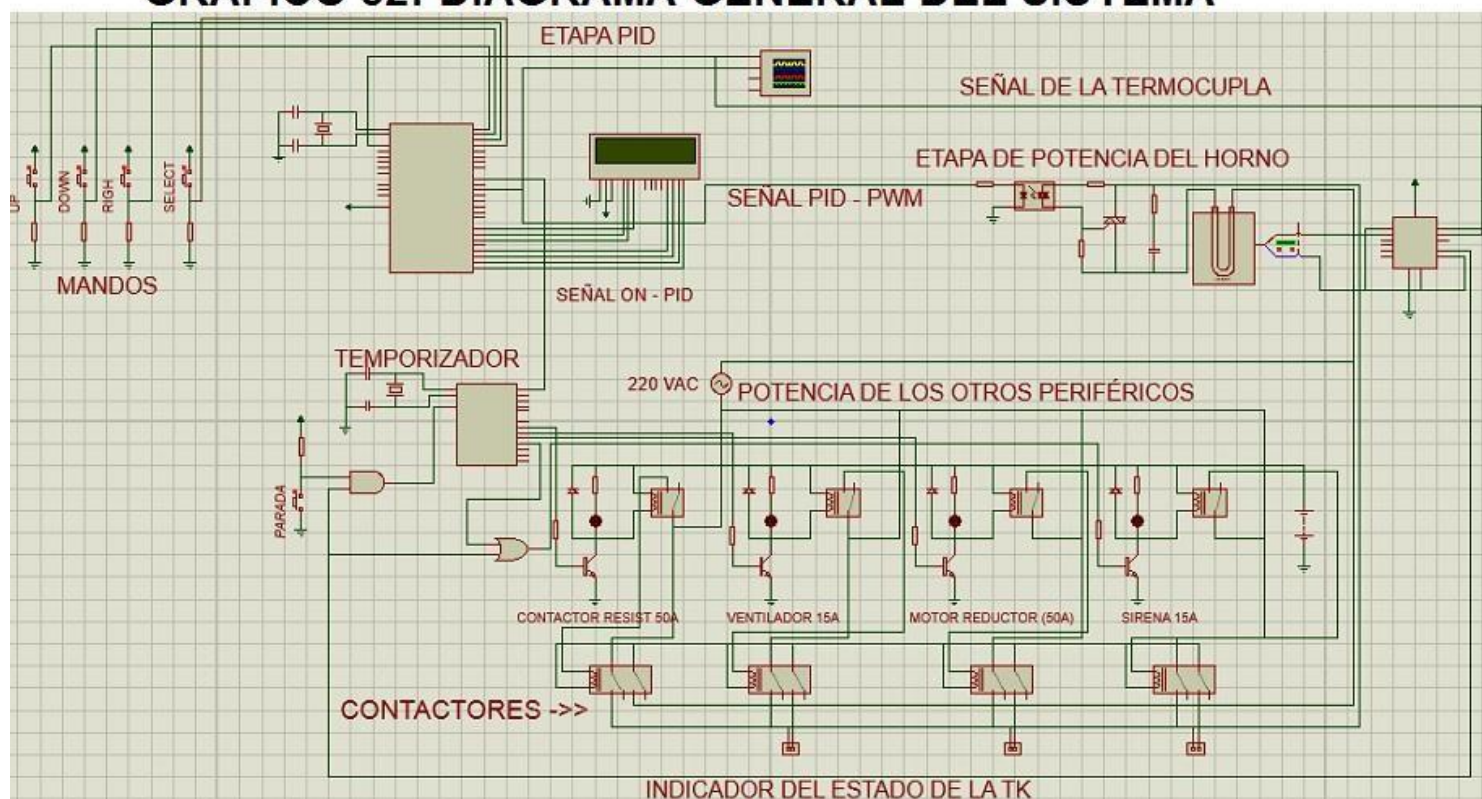
END

```


335. Circuito de potencia del sistema.

Esta etapa está constituida por los contactores que manejan a los componentes de potencia, hay que recordar que el control de estos contactores se da por la activación de relés (del bloque de temporización) que energizan a sus respectivas bobinas.

GRÁFICO 52: DIAGRAMA GENERAL DEL SISTEMA



CAPÍTULO IV:

COSTO DEL DISEÑO

TABLA 11: PRESUPUESTO DE LA ESTRUCTURA METÁLICA				
DETALLE	Cantida	U.M	Precio Unitario	Subtotal
Planchas de acero quirúrgico y fundición para el tambor cilíndrico	2	Unidad	S/ 3000.0	S/ 6000.0
Planchas de acero (varias)	1	Unidad	S/ 3000.0	S/ 3000.0
Ángulos, platinas, tubos, barras, soldadura y otros.	1	Unidad	S/ 1000.0	S/ 1000.0
Servicio de rolado, soldado y armado.	1	Unidad	S/ 3000.0	S/ 3000.0
Otros	1	Unidad	S/ 1000.0	S/ 1000.0
Sub-Total Tabla 11				S/ 14000.0

TABLA 12: PRESUPUESTO DE LA PLACA PID				
Detalle	Cantidad	U.M	Precio Unitario	Total
Lcd de 2x16	1	Unidad	S/ 14.0	S/ 14.0
Pic 16f877a	1	Unidad	S/ 16.0	S/ 16.0
Espadín macho	1	Unidad	S/ 2.0	S/ 2.0
Resistencias de 1/4w	5	Unidad	S/ 0.05	S/ 0.25
Regulador 7805	1	Unidad	S/ 1.0	S/ 1.0
Trimpot 5k	1	Unidad	S/ 0.5	S/ 0.5
Cristal de 4mhz	1	Unidad	S/ 1.0	S/ 1.0
Condensadores de 22pf	2	Unidad	S/ 0.1	S/ 0.2
Base de 20x20	1	Unidad	S/ 1.5	S/ 1.5
Borneras de 2 pines	2	Unidad	S/ 0.5	S/ 1.0
Pulsadores	4	Unidad	S/ 0.5	S/ 2.0
Quemado de la tarjeta	1	Unidad	S/ 25.0	S/ 25.0
Sub-Total Tabla 12				S/ 64.45

TABLA 13: PRESUPUESTO DE LA PLACA DE SENSADO				
Detalle	Cantidad	U.M	Precio Unitario	Subtotal
Borneras de 2 pines	2	Unidad	S/ 0.5	S/ 1.0
Bornera de 3 pines	1	Unidad	S/ 0.8	S/ 0.8
Base de 7x7	1	Unidad	S/ 0.8	S/ 0.8
Termocupla tipo k de grado industrial, más cable de extensión	1	Unidad	S/ 90.0	S/ 90.0
C.i. Ad595	1	Unidad	S/ 90.0	S/ 90.0
Regulador 7805	1	Unidad	S/ 1.0	S/ 1.0
Diodo 1n4004	1	Unidad	S/ 0.1	S/ 0.1
Resistencias de 1/4w	3	Unidad	S/ 0.05	S/ 0.15
Transistor bc548	1	Unidad	S/ 0.3	S/ 0.3
Quemado de la placa	1	Unidad	S/ 15.0	S/ 15.0
Sub-Total Tabla 13				S/ 199.15

TABLA 14: PRESUPUESTO DE LA PLACA DE LOS DISPAROS DEL TRIAC				
Detalle	Cantidad	U.M	Precio Unitario	Subtotal
Borneras de 2 pines	3	Unidad	S/ 0.5	S/ 1.5
Resistencia de 220 ohm x 1/4w	1	Unidad	S/ 0.05	S/ 0.05
Resistencia de 360 1w	3	Unidad	S/ 0.2	S/ 0.6
Condensador de 0.01uf x 400v	1	Unidad	S/ 0.8	S/ 80.0
Placa, quemado y laqueado	1	Unidad	S/ 15.0	S/ 15.0
C.I. Moc3041	1	Unidad	S/ 1.0	S/ 1.0
Triac BCR50GM	1	Unidad	S/ 76.0	S/ 76.0
Sub-Total Tabla 14				S/ 174.15

TABLA 15: PRESUPUESTO DE LA PLACA TEMPORIZADOR

Detalle	Cantidad	U.M	Precio Unitario	Subtotal
Borneras de 2 pines	3	Unidad	S/ 0.5	S/ 1.5
Regulador 7805	1	Unidad	S/ 1.0	S/ 1.0
Resistencias 1/4w	18	Unidad	S/ 0.05	S/ 0.9
C.i. 7408	1	Unidad	S/ 1.5	S/ 1.5
C.i. 7432	1	Unidad	S/ 1.5	S/ 1.5
Pic 16f84a	1	Unidad	S/ 10.0	S/ 10.0
Cristal de 4mhz	1	Unidad	S/ 1.0	S/ 1.0
Condensadores de 22pf	2	Unidad	S/ 0.1	S/ 0.2
Leds	5	Unidad	S/ 0.2	S/ 1.0
Diodo 1n4001	1	Unidad	S/ 0.1	S/ 0.1
Borneras de 3 pines	4	Unidad	S/ 0.8	S/ 3.2
Reles	4	Unidad	S/ 1.5	S/ 6.0
Transistores bc548	4	Unidad	S/ 0.3	S/ 1.2
Quemado de la placa	1	Unidad	S/ 20.0	S/ 20.0
Sub-Total Tabla 15				S/ 49.1

TABLA 16: PRESUPUESTO DE LOS EQUIPOS DE POTENCIA				
Detalle	CANTID	U.M	PRECIO	SUBTOTAL
Contactores Siemmens trifásico (15A)	2	Unidad	S/ 45.0	S/ 90.0
Contactor Siemmens trifásico (50A).	2	Unidad	S/ 450.0	S/ 900.0
Alambre indeco calibre 12	50	Metros	S/ 2.0	S/ 100.0
Ventilador axial	1	Unidad	S/ 400.0	S/ 400.0
Resistencias calefactoras a pedido	1	Unidad	S/ 800.0	S/ 800.0
Llave termomagnética monofásica Bticino	1	Unidad	S/ 60.0	S/ 60.0
Llave termomagnética trifásica	1	Unidad	S/ 155.0	S/ 155.0
Otros	1	Unidad	S/ 200.0	S/ 200.0
Sub-Total Tabla 16				S/ 2705.0

TABLA 17: PRESUPUESTO TOTAL DEL PROYECTO	
(SUMA DE SUBTOTALES DE TABLAS)	
Subtotal Tabla 11	S/ 14000.0
Subtotal Tabla 12	S/ 64.55
Subtotal Tabla 13	S/ 199.15
Subtotal Tabla 14	S/ 174.15
Subtotal Tabla 15	S/ 49.1
Subtotal Tabla 16	S/ 2705.0
Total Presupuesto	S/ 17191.95

CAPÍTULO V:

CONCLUSIONES

- Se comprobó que el sistema desarrollado ayuda a mejorar el proceso de secado de los pequeños y medianos productores de cacao de la zona de Jaén, cumpliendo tranquilamente con las especificaciones planteadas de 200Kg por cada proceso, con un secado uniforme y sin dañar las virtudes del grano.
- Se realizó el proyecto en base al uso del controlador PID, que da un control individualizado de la temperatura, ya que es una variable analizada en el proceso.

CAPÍTULO VI:

RECOMENDACIONES

- El diseño del sistema puede ser escalable, para ello primero se debe tener en cuenta la parte estructural, definida por la cantidad de grano a procesar, dicha cantidad no debe sobrepasar las dimensiones consideradas en este diseño, ya que el peso y volumen harán que la estructura colapse. Recalcular los nuevos tiempos del proceso, además se debe rehacer el cálculo del PID y de todo el control electrónico, para que soporte las nuevas exigencias.
- Se recomienda que para complementar el proyecto se puede tener en cuenta el monitoreo remoto del proceso a través de internet (si lo hubiera en el sitio) y/o de manera local a través de una pc o dispositivo móvil.

Referencias bibliográficas

- J. Acedo Sanchez, Control Avanzado De Procesos Teoría Y Practica
- Antonio Creus Sole , Instrumentacion Industrial (7ª Edicion); Editorial Marcombo, S.A
- Elonka, Michael. Operación De Plantas Industriales.Mc Graw-Hill
- Richard C. Dorf, Robert H. Bishop; Sistemas de Control Moderno; 2005; 10º Edición; Editorial Pearson – Prentice Hall.
- Katsuhiho Ogata; Ingeniería de Control Moderna; 2003; 4º Edición; Editorial Pearson – Prentice Hall.
- Benjamin C. Kuo; Sistemas de control Automático; 1996; 7º Edición; Editorial Prentice Hall.
- Electrónica de Potencia: Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones. Tercera Edición de Muhammad H. Rashid.
- Carlos A. Smith y Armando B. Corripio; Control Automático de Proceso. Teoría y Práctica; 1991; 1º Edición; Editorial LIMUSA.
- Compilador C CCS y simulador PROTEUS para microcontroladores PIC de Eduardo García Breijo. Editorial Alfaomega.
- Basic para microcontroladores PIC de Christian Bodington Esteva Ingeniero en Electrónica.

Referencias Webgráficas

- [Https://sites.google.com/site/tiristorescircuitos/triac-dsparos](https://sites.google.com/site/tiristorescircuitos/triac-dsparos)
- [Http://Neutron.Ing.Ucv.Ve/Revista-E/No4/Rci.Html](http://Neutron.Ing.Ucv.Ve/Revista-E/No4/Rci.Html)
- [Http://Www.Monografias.Com](http://Www.Monografias.Com)
- [Http://Www.Fao.Org/Docrep/T0848s/T0848s06.Htm#Topofpage](http://Www.Fao.Org/Docrep/T0848s/T0848s06.Htm#Topofpage)
- [Http://Www.Monografias.Com/Trabajos19/Canales/Canales.Shtml](http://Www.Monografias.Com/Trabajos19/Canales/Canales.Shtml)
- [Http://Sisbib.Unmsm.Edu.Pe/Bibvirtualdata/Tesis/Ingenie/](http://Sisbib.Unmsm.Edu.Pe/Bibvirtualdata/Tesis/Ingenie/)
- [Http://Members.Tripod.Com/Jaimevp/Electricidad/Arranque_De_Motores.Html](http://Members.Tripod.Com/Jaimevp/Electricidad/Arranque_De_Motores.Html)
- <http://deborahmontoya.over-blog.es/article-que-para-que-utiliza-molino-bolas-85861912.htm>