

Ejemplar para

Presidente del Tribunal.

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**PROYECTO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO EN INGENIERÍA
ELECTRÓNICA**

**“Diseño y construcción de un sistema de control
automático de temperatura y alimentación de
combustible para una secadora de productos
agrícolas”**

AUTORES:

CHRISTIAN GIOVANNY SAMANIEGO BURGOS

PABLO ALEJANDRO SEVILLA CORTÉZ

SANGOLQUÍ – ECUADOR

MAYO – 2005

CERTIFICACIÓN

Sangolquí, 31 de Mayo del 2005

Quienes al pie de la presente firmamos, damos fe y testimonio que el proyecto de grado, previo a la obtención del título en Ingeniería Electrónica, titulado como: **Diseño y construcción de un sistema de control automático de temperatura y alimentación de combustible para una secadora de productos agrícolas**, fue desarrollado íntegramente por los señores **Christian Giovanni Samaniego Burgos**, y **Pablo Alejandro Sevilla Cortéz**, bajo nuestra dirección y tutela.

Certificando lo antepuesto para su uso de la manera que se creyere conveniente, nos suscribimos,

Atentamente,

Ing. Hugo Ortiz T.

DIRECTOR

Ing. José Guasumba C.

CODIRECTOR

Agradece a la llama su luz,
pero no olvides el pie
del candil que constante
y paciente la sostiene
en la sombra.

Rabindranath Tagore

No hay secretos para triunfar.
En la práctica todas las
teorías se derrumban.
Todo se reduce a la suerte
de una larga paciencia.

André Maurois

El triunfo no está
en vencer siempre,
sino en nunca desanimarse.

Napoleón

Agradecimiento

De Christian

A Dios, a Cristo: la luz y el sendero de mi camino, la lección de mi vida, la fe en la lucha, la creencia en las utopías, y la esperanza de un mañana promisorio.

A mis adorados padres: Nelson y Rocío, por sus consejos, su cariño, y por el apoyo incondicional para el desarrollo y culminación del presente trabajo.

A mi ñañita Gabi, mi confidente, mi chiquita dulce: por su bondad y su sincero interés en la feliz realización de todo el proyecto.

A toda mi familia: mis abuelitos, tíos y primos, quienes se han mantenido en constante expectativa por el desarrollo de todo este trabajo.

A la Escuela Politécnica del Ejército: Cuna de mi formación profesional y testigo silente de mil y un vivencias de una etapa inolvidable de mi vida.

Al CICTE, auspiciante del presente proyecto en la persona del Dr. Nicoilai Espinoza PhD., maestro y amigo que siempre nos apoyó desinteresadamente a lo largo de todo este proceso. A sus colaboradores, Ing. Danny Sotomayor, Ing. Diego Arcos.

Al Ing. Hugo Ortiz T., guía, maestro y amigo; el gran tutor de nuestras últimas experiencias como estudiantes, por su sabio consejo, su certera guía, y su lección de paciencia y tolerancia ante las adversidades.

Al Ing. José Guasumba, codirector del proyecto por su aporte con la idea del mismo.

Al amigo, consejero, y compañero de tesis,,

Agradecimiento

De Pablo

A Dios, quien ha colmado de bendiciones infinitas a nuestra familia para poder culminar exitosamente la etapa formativa de mi vida.

A mis Padres Raúl y Mónica por todos los valores éticos-morales inculcados, por todo el apoyo incondicional brindado, por sus consejos para encarar la vida en momentos significativos, por la confianza y por el amor que siempre han estado presentes en nuestro hogar a lo largo de estos 22 años.

A mis hermanas Carlita y Pamelita, compañeras, amigas y confidentes íntimas con quienes he compartido dichoso el cobijo de nuestro hogar.

A mi familia en general, mis tíos, mis abuelos, mis primos quienes siempre han sido apoyo y pilar substancial en mi etapa instructiva moral y espiritual.

A las ilustres familias Romero, Romero-Grados, Montenegro-Arturo, por la calurosa acogida que tuve desde que llegue al lecho de su familia, por todo el afecto brindado en mi niñez y adolescencia, por toda la bondad revelada y por que han llegado a cultivar en mi corazón el sentimiento de concebirlas a ustedes como mi familia.

A mis amigos, Cristina, Myriam, Rita, Raquel, Christian S., Christian G., José Miguel, Roberto, Daniel, David, Fito, Rommel, Ramiro, Alex, Juan Pablo, por el tiempo compartido durante estos cinco inolvidables años de universidad, por ser verdaderos amigos, estando presentes en los instantes de alegría para disfrutar un triunfo, de desánimo para superar una dificultad, y de desconcierto para encontrar el rumbo propicio.

Dedicatoria

De Christian

A mi Papacito: Portento de sapiencia, la lección y el sustento de mi vida, centinela de mi bienestar y armonía; el silente sufridor de mis penas, y el eufórico trovador de mis conquistas. En él se justifican todos los méritos de la presente obra, y mi razón de empeño para que el presente trabajo resulte lo mejor posible.

A mi Mamacita: Mi mejor amiga y confidente, el paño que secó todas las lágrimas en mis momentos duros, y quien se alegró como ninguna con cada avance, con cada pasó. En ella se justifica todo el amor puesto en el proyecto, cada detalle, cada minucia tienen en mi razón de su realización, la evocación de su preocupación constante.

A mi ñaña, el lucero de mi familia: el ser

Dedicatoria

De Pablo

A mi madre Mónica, ejemplo de lucha, valor y sacrificio al desafiar las grandes dificultades que presenta la vida, por todas las enseñanzas difundidas, por el infinito amor recibido, por el apoyo y la confianza depositada.

A mi padre Raúl, por ser la persona más prodigiosa que Dios ha otorgado a mi vida, por ser la pilastra que ha forjado mi carácter y temperamento, por todo el apoyo incondicional brindado a lo largo de mi vida formativa, por el afecto, por sus consejos, por los valores y principios inculcados, por ser mi mejor amigo.

A mi hermano Vinicio, quien ya no está con nosotros, que se fue hace mucho tiempo, pero

PRÓLOGO

Este documento constituye el sustento teórico-técnico correspondiente al sistema desarrollado e implementado como proyecto de grado, llamado, “Diseño y Construcción de un sistema de control automático de temperatura y alimentación de combustible para una secadora de productos agrícolas” con el fin de obtener el título en Ingeniería Electrónica.

El sistema implementado nació de una propuesta de ejecución por parte del Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas del Ejército CICTE-ESPE, en su afán de ofrecer al sector agroindustrial Ecuatoriano una alternativa de modernización en procesos de secado, así como también, una opción de aprovechamiento energético en base a combustibles alternativos, no contaminantes.

El presente manuscrito se encuentra estructurado de manera general en tres fases: la primera constituida por el estudio análisis y asimilación del proceso, detallada en los tres primeros capítulos; la segunda fase conformada por el diseño del sistema automatizado que a futuro fue plasmado de manera exitosa, detallado en los dos capítulos consecuentes; la tercera y última fase compuesta por la implementación y el estudio de resultados arrojados luego de la implementación realizada, detallado en los dos últimos capítulos de este documento.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS.....	II
DEDICATORIAS	IV
PRÓLOGO.....	VI
CAPÍTULO 1	2
1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO.....	2
1.1 ANTECEDENTES.....	2
1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	4
1.3 OBJETIVOS.....	4
1.3.1 OBJETIVO GENERAL:	4
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:	4
1.4 ALCANCE DEL PROYECTO	5
1.5 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DEL PROYECTO.....	6
CAPÍTULO 2	8
2. GENERALIDADES	8
2.1 TRATAMIENTOS PRELIMINARES.....	8
2.1.1 HUMEDAD DE LOS GRANOS Y EL AIRE	8
2.1.2 HUMEDAD EN BASE HÚMEDA Y EN BASE SECA.....	9
2.1.3 MEDICIÓN DE LA HUMEDAD DE LOS GRANOS.....	9
2.1.4 MERMAS DE SECADO	12
2.1.5 MERMA DE VOLUMEN.....	12
2.1.6 PÉRDIDAS DE SECADO: SOBRESECADO.....	13
2.1.7 CONTENIDO DE HUMEDAD DE EQUILIBRIO	13
2.1.8 HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE.....	14
2.1.9 PSICROMETRÍA	16
2.2 DESCRIPCIÓN DE LA BIOMASA COMBUSTIBLE Y DE LOS GRANOS A SECAR.....	17
2.2.1 BIOMASA.....	17
2.2.1.1 APROVECHAMIENTO DE LA BIOMASA	18
2.2.1.2 VENTAJAS DE LA BIOMASA.....	19
2.2.1.2.1 MEDIOAMBIENTALES	19
2.2.1.2.2 SOCIOECONÓMICAS.....	19
2.2.1.3 PROPIEDADES DE LA CASCARILLA DE ARROZ.....	20
2.2.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS PRODUCTOS DE SECADO	22
2.2.2.1 COMPOSICIÓN FÍSICA DE LOS CEREALES	23

2.2.2.2	ESTRUCTURA FÍSICA DE LAS LEGUMINOSAS	23
2.3	TÉCNICAS DE SECADO	24
2.3.1	SECADO NATURAL	25
2.3.1.1	SECADO EN LA PLANTA Y EN SURCOS	25
2.3.1.2	SECADO EN TERRAZAS (ASOLEADEROS)	26
2.3.1.3	SECADO NATURAL EN SECADOR ROTATIVO	27
2.3.1.4	SECADO EN SECADORES SOLARES	28
2.3.2	SECADO ARTIFICIAL	30
2.3.2.1	SECADO A BAJAS TEMPERATURAS	31

CAPÍTULO 3 **33**

3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO **33**

3.1	INTRODUCCIÓN	33
3.2	GENERALIDADES	33
3.2.1	SECADORES A BAJAS TEMPERATURAS	34
3.2.2	SECADORES A ALTAS TEMPERATURAS	34
3.2.3	SECADORES ARTIFICIALES	35
3.2.3.1	COMPONENTES GENERALES	35
3.2.3.1.1	TORRE	36
3.2.3.1.2	VENTILADOR	36
3.2.3.1.3	HORNO	36
3.2.4	TIPOS DE SECADORES	37
3.2.4.1	SECADORES CONTINUOS	37
3.2.4.1.1	SECADOR ROTATORIO	38
3.2.4.1.2	SECADORES DE TÚNEL	38
3.2.4.1.3	SECADORES DE BANDA	39
3.2.4.2	SECADORES DISCONTINUOS	39
3.2.4.2.1	SECADOR DE QUEMADOR	39
3.2.4.2.2	SECADOR DE BANDEJAS	40
3.2.4.3	SECADORES ESTACIONARIOS	41
3.2.4.3.1	SECADOR CON AIRE MOVIDO POR CONVECCIÓN NATURAL	41
3.2.4.3.2	SECADOR DE LECHO FIJO	45
3.2.4.3.2.1	Dimensiones del secador	49
3.2.4.3.2.2	Construcción del secador	51
3.2.4.3.2.3	Funcionamiento y Mantenimiento del secador de Lecho Fijo	53
3.3	CAPACIDAD DE SECADO Y ENFRIAMIENTO	54
3.3.1	CAPACIDAD DE SECADO	54
3.3.2	CAPACIDAD DE ENFRIAMIENTO	55
3.4	OPTIMIZACIÓN DE SECADORES	56
3.4.1	TEMPERATURA Y CAUDAL DEL AIRE DE SECADO	57
3.4.2	REGULACIÓN DEL AIRE	58

3.4.3	RECUPERACIÓN DE CALOR.....	59
3.4.4	UNIFORMIDAD Y ESTABILIDAD DE LAS TEMPERATURAS.	60
3.4.5	CALOR LATENTE DEL VAPOR DE AGUA.	60
3.4.6	PRECALENTAMIENTO.....	61
3.4.7	AISLAMIENTO DE PAREDES	62
3.4.8	MÓDULOS DE SECADO	62
3.5	MANEJO DE SECADORES	62
3.5.1	PREPARACIÓN DE LA SECADORA Y SU LIMPIEZA	62
3.5.2	PUESTA EN MARCHA DE LA SECADORA	63
3.5.3	CONTROLES DE SEGURIDAD	65
3.5.4	LOS INCENDIOS	65
3.5.5	CAUSAS QUE FAVORECEN LOS SINIESTROS	66
3.5.6	MEDIDAS PARA EVITAR LOS INCENDIOS	67
3.5.7	ACCIONES A ENCARAR EN CASO DE INCENDIO.....	67
3.6	DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROTOTIPO DE IMPLEMENTACIÓN.....	68
3.6.1	SISTEMAS DEL MODELO.....	69
3.6.1.1	SISTEMA DE SECADO.....	70
3.6.1.1.1	FUNCIONAMIENTO	72
3.6.1.2	SISTEMA DE COMBUSTIÓN	72
3.6.1.2.1	FUNCIONAMIENTO	74
3.6.1.3	INTERCAMBIADOR DE CALOR.....	74
3.6.1.3.1	FUNCIONAMIENTO	76
3.6.1.4	SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE COMBUSTIBLE.....	76
3.6.1.4.1	FUNCIONAMIENTO	77
3.6.2	DESCRIPCIÓN GLOBAL DEL SISTEMA.....	78
CAPÍTULO 4.....		82
4. DISEÑO DE HARDWARE.....		82
4.1	INTRODUCCIÓN	82
4.2	REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA	82
4.2.1	LAZO DE CONTROL DE COMBUSTIÓN.....	82
4.2.2	LAZO DE CONTROL DE SECADO	84
4.3	REQUERIMIENTOS TÉCNICOS DEL HARDWARE	84
4.3.1	SOBRE EL SISTEMA DE COMBUSTIÓN.....	85
4.3.1.1	JUSTIFICACIÓN.....	87
4.3.2	SOBRE EL SISTEMA DE SECADO	87
4.3.2.1	JUSTIFICACIÓN.....	89
4.3.3	HARDWARE COMPLEMENTARIO.....	89
4.3.3.1	JUSTIFICACIÓN.....	90

4.4	DESCRIPCIÓN MODULAR DEL SISTEMA DE CONTROL	91
4.4.1	FUNCIONAMIENTO GLOBAL DEL SISTEMA	91
4.4.1.1	MÓDULO DE ALIMENTACIÓN.....	93
4.4.1.1.1	FUENTE DE ALIMENTACIÓN ABL7-RE2403.....	94
4.4.1.2	MÓDULO DE PROTECCIÓN	94
4.4.1.2.1	BREAKER PRINCIPAL EZC100N 30 20	94
4.4.1.2.2	GUARDAMOTOR GV2ME07	95
4.4.1.2.3	FUSIBLES DE PROTECCIÓN	96
4.4.1.3	MÓDULO DE CONTROL	96
4.4.1.3.1	CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE PLC TWD LDMA 20DRT	97
4.4.1.3.2	DISPLAY DE OPERADOR TWD XCP ODM.....	98
4.4.1.4	MÓDULOS DE INSTRUMENTACIÓN.....	99
4.4.1.4.1	MÓDULO DE ENTRADAS ANALÓGICAS TWD ALM 3LT	100
4.4.1.4.2	TERMOCUPLAS DE MEDICIÓN DE TEMPERATURA.....	100
4.4.1.5	ELEMENTOS FINALES DE CONTROL.....	101
4.4.1.5.1	VARIADOR DE VELOCIDAD ATV11HU18M2A.....	101
4.4.1.5.2	CONTACTOR LC1D09	104
4.4.1.5.3	CONTACTOR LG GMC-9	104
4.4.1.6	ACTUADORES	105
4.4.1.6.1	MOTOR TRIFÁSICO SIEMENS 1LA7	105
4.4.1.6.2	VENTILADOR TRANSMISOR DE CALOR.....	106
4.4.1.6.3	VENTEROL DE OXIGENACIÓN.....	106
4.4.1.7	ELEMENTOS ADICIONALES	107

CAPÍTULO 5 **109**

5. DESARROLLO DE SOFTWARE **109**

5.1	INTRODUCCIÓN	109
5.2	SOFTWARE	109
5.2.1	TWIDOSOFT V2.05.	109
5.2.1.1	LENGUAJES TWIDOSOFT	110
5.2.1.1.1	LENGUAJE LISTA DE INSTRUCCIONES.....	110
5.2.1.1.2	DIAGRAMAS LADDER LOGIC.....	111
5.2.1.1.3	LENGUAJE GRAFCET	111
5.2.1.2	MEMORIA DE USUARIO	112
5.2.1.3	MODOS DE FUNCIONAMIENTO	113
5.2.2	LOOKOUT V4.5	113
5.3	LÓGICA DE CONTROL.....	116
5.3.1	SISTEMA GENERAL	116
5.3.2	SISTEMA DE COMBUSTIÓN.....	119
5.3.2.1	LÓGICA DE FUNCIONAMIENTO	119

5.3.2.2	FILOSOFÍA DE CONTROL	119
5.3.2.3	ASIGNACIÓN DE VARIABLES	124
5.3.3	SISTEMA DE SECADO.....	125
5.3.3.1	LÓGICA DE FUNCIONAMIENTO	125
5.3.3.2	FILOSOFÍA DE CONTROL	126
5.3.3.3	ASIGNACIÓN DE VARIABLES	128
5.4	INTERFAZ DEL OPERADOR (HMI)	129
5.4.1	PANTALLA DE USUARIO	129
5.4.2	PANTALLA DE SUPERVISIÓN	131
5.4.3	PANTALLA DE SETEO.	132
5.4.4	PANTALLA DE HISTÓRICO	134
CAPÍTULO 6		136
6. IMPLEMENTACIÓN.....		136
6.1	INTRODUCCIÓN	136
6.2	METODOLOGÍA DE DISEÑO	136
6.2.1	DIAGRAMA UNIFILAR	137
6.2.2	DIAGRAMAS ESQUEMÁTICOS.....	137
6.2.2.1	DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE POTENCIA.....	137
6.2.2.2	DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE CONTROL.....	138
6.2.2.3	ESQUEMA DE ALAMBRADO.....	138
6.3	METODOLOGÍA DE CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL	139
6.3.1	GABINETE DE CONTROL.....	139
6.3.2	DISPOSICIÓN DE LOS ELEMENTOS	140
6.3.3	DISPOSICIÓN DE LAS CANALETAS Y RIELES DE MONTAJE.....	141
6.3.4	CABLE DE INTERCONEXIÓN.....	141
6.3.5	CONECTORES DEL SISTEMA.....	142
6.3.6	TOMAS DE PUESTA A TIERRA	142
6.3.7	ACCESORIOS Y ADICIONALES.....	143
CAPÍTULO 7		145
7. PRUEBAS Y RESULTADOS		145
7.1	INTRODUCCIÓN	145
7.2	METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN	145
7.2.1	LAZO DE CONTROL ON / OFF CON HISTÉRESIS.	145
7.2.2	LAZO DE CONTROL PROPORCIONAL	147
7.2.3	VARIADOR DE VELOCIDAD.....	151
7.3	PRUEBAS REALIZADAS.....	153
7.3.1	LAZO DE CONTROL ON / OFF CON HISTÉRESIS.	153

7.3.2	LAZO DE CONTROL PROPORCIONAL	153
7.3.3	VARIADOR DE VELOCIDAD.....	154
7.4	RESULTADOS.....	154
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		157
7.5	CONCLUSIONES.....	157
7.6	RECOMENDACIONES	159
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		II
ANEXOS.....		V
ANEXO 1. INFORMACIÓN TÉCNICA DE EQUIPOS		
ANEXO 2. ESQUEMAS ELÉCTRICOS – ELECTRÓNICOS		
ANEXO 3. PLANOS DEL MODELO DE IMPLEMENTACIÓN		
ANEXO 4. PRUEBAS EXPERIMENTALES		
ANEXO 5. DIAGRAMAS DE FLUJO		
ANEXO 6. PROGRAMA LADDER DEL PLC.		
ANEXO 7. MANUAL DE USUARIO.		
ANEXO 8. REGISTRO FOTOGRÁFICO		
ANEXO 9. NORMATIVA IP		
ANEXO 10. SIMBOLOGÍA PARA ESQUEMAS ELÉCTRICOS		
INDICE DE FIGURAS		VI
INDICE DE TABLAS		IX

CAPÍTULO 1

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

1.1 ANTECEDENTES

La Escuela Politécnica del Ejército, a través del Centro de Investigación Científica y Tecnológica del Ejército CICTE, se esfuerza constantemente en generar soluciones que optimicen y contribuyan con el desarrollo del sector productivo del país.

Los hechos que suscitaron el desarrollo de este proyecto datan del año 2002, tras una invitación de la empresa ENAC que se encontraba en proceso de liquidación, donde, conjuntamente con agricultores de Quevedo y Ventanas, se dictó una conferencia que versaba sobre nuevas tecnologías para el mejoramiento de los procesos de secado de productos agrícolas. Adicionalmente, se aprovechó de la oportunidad para inspeccionar los secaderos artesanales, los hornos que utilizan gas de tipo doméstico, así como también los sistemas térmicos de combustión de la cascarilla de arroz construidos por empresas colombianas.

El resultado de dicha inspección verificó un proceso de combustión de desechos sólidos de tipo vegetal para el secado de productos agrícolas deficiente, contaminante, improductivo y poco funcional, ya que producían altos índices de contaminación ambiental, se utilizaban deficientemente los combustibles, y se conseguía una baja eficiencia energética con regímenes de secado prolongados en cámaras sobredimensionadas.

Los resultados de dicha inspección, más la petición de los pequeños productores, condujeron al desarrollo y diseño de un sistema experimental, que permita dotar de eficiencia al proceso de combustión de la cascarilla de arroz, bajo la alimentación fraccionada y secuencial de la misma para el secado de productos agrícolas, El modelo termo físico, se constituye de un hogar de

combustión, un intercambiador de calor tipo S, con tubos distribuidos en forma triangular, y la cámara de secado de productos agrícolas de lecho fijo, tal como lo muestra la Figura 1.1. La admisión de oxígeno para la combustión se realiza mediante un extractor, y el aire necesario para el secado, lo suministra un ventilador centrífugo.

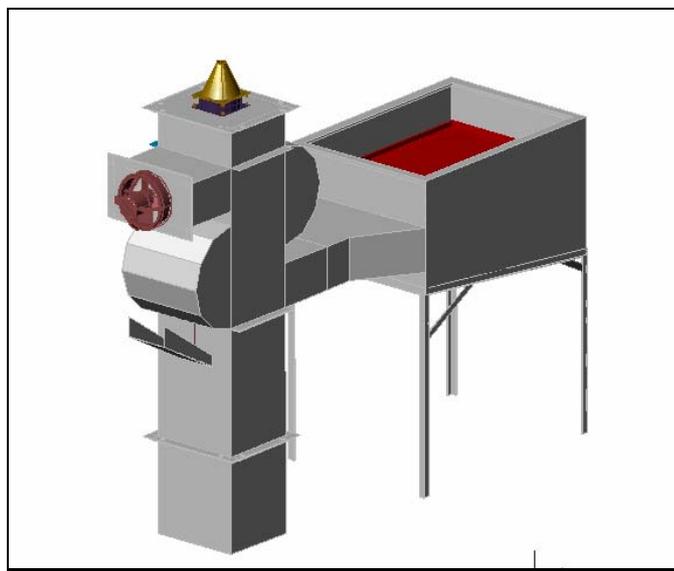


Figura 1.1 Secador de granos y sistema de combustión de cascarilla de arroz¹.

El desarrollo de este modelo ha permitido alcanzar una temperatura de lecho de 60°C, ideal para el secado de productos agrícolas, especialmente del morochillo, hecho que por sí solo ya determina un mejoramiento del proceso por cuanto las secadoras de granos inspeccionadas en la visita generaban temperaturas de alrededor de 40°C que originaban tiempos promedio de secado de los productos agrícolas de 8h.

El modelo termo físico desarrollado no cuenta con ningún sistema de control de soporte que garantice la eficiencia generada en el mismo. El sistema de alimentación del combustible sólido (cascarilla de arroz) es manual, se lo realiza por medio de taconeos en el ducto de alimentación que conecta la cámara de combustión con una tolva de suministro del combustible. Por otra parte, es necesario verificar constantemente, de manera visual, el proceso de combustión

¹ Guasumba, José, Ing., Diseño presentado en la VII Feria Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica realizada en Quito-Ecuador (2004)

de la cascarilla de arroz, ya que depende de ello la frecuencia de taconeos en el sistema de alimentación. Finalmente, un termómetro registra la temperatura del producto en la cámara de lecho fijo ya que temperaturas inferiores a las consignadas como ideales tornan lento el proceso de secado, mientras que, por el otro extremo, es decir, con temperaturas superiores, comenzaría a cocer el producto de secado, no existiendo ninguna acción de control automático sobre este proceso.

1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Tras la exposición de los antecedentes, y enfocando el desarrollo de la investigación desde el punto de vista de la automatización y control del mismo, el problema reside en generar una solución de ingeniería que preserve el desarrollo del proceso de secado de productos agrícolas mediante la combustión de desechos vegetales sólidos dentro de los parámetros óptimos de funcionamiento ya consignados por pruebas de experimentación sobre el prototipo construido, atendiendo a tres subprocesos del mismo: La combustión de los desechos vegetales sólidos (cascarilla de arroz), la alimentación del combustible, y el control de la temperatura de la cámara de secado.

1.3 OBJETIVOS.

Ha de citarse que los objetivos que se expondrán a continuación tratan específicamente sobre la optimización del proceso en cuanto a parámetros del control y automatización del mismo.

1.3.1 Objetivo General:

- Diseñar y construir un sistema de control automático de temperatura y alimentación de combustible (cascarilla de arroz) para una secadora de productos agrícolas (banano, mote, arroz, morochillo).

1.3.2 Objetivos Específicos:

- Investigar y seleccionar los dispositivos de medición (sensores), así como el dispositivo de control y actuadores adecuados para la implementación del sistema de control automático de temperatura y alimentación de la cascarilla de arroz del proceso de secado de productos agrícolas.

- Diseñar un sistema de control automático de temperatura para la cámara de lecho fijo, donde se produce el secado de los productos agrícolas (banano, mote, arroz, morochillo).
- Diseñar un sistema de control automático de alimentación de combustible (cascarilla de arroz) para el proceso de secado de productos agrícolas.
- Desarrollar la lógica de control a implementar sobre cada sistema a automatizar dentro del proceso de secado de productos agrícolas.
- Desarrollar una interfase gráfica (Software) que permita visualizar, monitorear y controlar de manera permanente y en tiempo real todo el proceso de combustión de la cascarilla de arroz para secado de productos agrícolas en cámaras de lecho fijo.
- Implementar en base a los criterios de selección y diseño anteriormente citados el sistema de control automático para la alimentación de la cascarilla de arroz y la regulación de temperatura de la cámara de lecho fijo del proceso de secado de productos agrícolas.
- Establecer ventajas y desventajas de la implementación del sistema de control automático para la alimentación de la cascarilla de arroz y la regulación de temperatura de la cámara de lecho fijo del proceso de secado de productos agrícolas.
- Documentar metódicamente todo el desarrollo del proceso.

1.4 ALCANCE DEL PROYECTO

De manera general el desarrollo y ejecución del proyecto global se esmera en lograr la optimización del modelo convencional de secado de productos agrícolas mediante la combustión de desechos vegetales, que actualmente funciona en diversas instalaciones del sector Agroindustrial costeño, y que adolece de varias ineficiencias sobre aspectos técnicos, energéticos y económicos.

El diseño y desarrollo de este proyecto proveerá los parámetros necesarios para que, a mediano plazo, la escalabilidad del mismo en estándares industriales genere el mejoramiento del sector industrial, la creación de fuentes de empleo y

haga realidad los esfuerzos de integración de la Universidad con el Sector Productivo para conseguir con ello un marco de cooperación mutua dentro de programas de desarrollo que gesten las condiciones idóneas para asumir competitivamente los retos de la globalización.

Desde el punto de vista de la automatización y control, la solución tecnológica que se pretende desarrollar y aplicar dentro del proyecto en tratamiento pretende optimizar los procesos mecánicos de funcionamiento de la máquina secadora de productos agrícolas, y controlarlos para que se mantengan dentro de los rangos más favorables de funcionamiento, de tal manera que se garantice la mejora del proceso en sus aspectos energéticos y económicos.

1.5 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DEL PROYECTO.

El mundo moderno que se mueve y funciona en base al uso irracional de los combustibles fósiles tales como carbón, petróleo y gas natural ha logrado acabar con las reservas existentes, así como también ha producido impactos ambientales de fatales consecuencias, a tal punto que en un futuro podrían afectar incluso la supervivencia del mismo ser humano sobre la faz del planeta.

Bajo estas premisas, países desarrollados como Alemania y España, invierten grandes recursos y aplican políticas de enmienda y conservación ambiental bajo la creación de nuevas tecnologías de alto rendimiento, orientadas a la producción limpia.

Por su parte, Latinoamérica, representada por países como Colombia, Costa Rica, Brasil, Perú, han desarrollado arduas investigaciones para generar soluciones que aprovechen la biomasa en procesos térmicos. Puntualmente, en el Ecuador, como una alternativa de solución, se propone realizar las investigaciones necesarias que generen un sistema eficiente que permita aprovechar la energía calórica proveniente de la combustión de los desechos vegetales como la cascarilla de arroz, para fines varios como el secado de productos agrícolas.

De manera general, el desarrollo e implementación del proyecto en mención se justifica por cuanto existe la necesidad de optimizar el proceso de secado de

productos agrícolas, reducir los tiempos y costos del proceso así como mejorar la calidad del mismo mediante la implementación de una tecnología eficiente en el aspecto energético, económico y ambiental.

Para el desarrollo del proyecto se cuenta con el personal técnico, capacitado y con el conocimiento necesario para impulsarlo además del respaldo de la empresa privada y los servicios especializados necesarios en la construcción.

Desde el punto económico financiero, se dispone la partida presupuestaria N°B100.01.03.1003.530605 cuyo valor asciende a UDS. \$ 24.773,17. Para el desarrollo de este nuevo sistema termo energético.

La eficiencia de este modelo termo físico no sería completa, si el mismo no dispondría de un sistema automático de control, que regule cada uno de los subprocesos incluidos en el sistema para mantenerlos dentro de los rangos y especificaciones establecidas en del estudio previo a su desarrollo. Es decir, se requiere garantizar un proceso de alimentación eficiente del combustible sólido (cascarilla de arroz); una combustión efectiva y constante durante el tiempo de secado de los productos agrícolas (banano, morochillo, arroz y mote); y que se mantenga la cámara de secado de lecho fijo en un rango de temperaturas idóneo para un secado efectivo de los productos en mención.

CAPÍTULO 2

GENERALIDADES

2.1 TRATAMIENTOS PRELIMINARES

El sustento teórico que aborda el tratamiento de todo lo relacionado con el secado de productos agrícolas resulta inmenso como para detallarlo dentro del presente documento teórico; ante ello lo que se presenta a continuación es una síntesis de algunos puntos relevantes sobre el secado de granos, algunas consideraciones sobre los productos de secado que se procesaran en éste trabajo, así como diferentes técnicas de secado. La información que se expone, constituye un tratamiento y recopilación de las fuentes que se apuntan dentro de la bibliografía de este texto para los temas que se señalaron anteriormente.

2.1.1 Humedad de los Granos y el Aire

El proceso de secado de granos persigue fundamentalmente los siguientes objetivos: inhibir la germinación de las semillas, impedir el crecimiento de hongos, y conservarlos sin que sufran deterioro alguno.

Desde el punto de vista técnico, la tarea de secado de granos puede ser definida como el acondicionamiento de los mismos mediante la eliminación del agua hasta el punto de equilibrio con el aire del ambiente en pro de preservar su aspecto, características alimenticias y nutritivas, y su viabilidad como semilla.

La consideración de un grano como "seco", depende principalmente de la humedad relativa del mismo, y de factores secundarios, pero no menos importantes, como el clima y la temperatura donde reside almacenado. Por ejemplo, para los cereales, una humedad del 15% se considera el límite para estimarlo como "seco". Para las regiones de clima frío, un cereal como el trigo puede preservarse a 15% de humedad, pero en una región de clima cálido, la humedad de conservación descenderá a 12 y 13%. En el caso de los granos oleaginosos, deben ser almacenados a humedades aún menores, a 10 y 11%.

2.1.2 Humedad en Base Húmeda y en Base Seca

La medición de la humedad sobre un grano está determinada por la llamada "base húmeda", que define la cantidad de agua que tiene el grano en total, es decir, sobre su peso de materia seca mas agua. Es el dato que dan los **humedímetros²** comunes usados en el comercio.

Desde el punto de vista técnico y científico, resulta más conveniente el uso de la humedad en "base seca", que es la cantidad de agua que tiene el grano en relación solamente a la cantidad de materia seca. Esta humedad será siempre mayor que la anterior.

Las relaciones entre ambas expresiones son las siguientes:

$$Hs = \frac{Hh}{100 - Hh} \times 100 \quad \text{Ecuación 2.1}$$

$$Hh = \frac{Hs}{100 + Hs} \times 100 \quad \text{Ecuación 2.2}$$

En donde:

Hh: Humedad en base húmeda expresada en porcentaje,

Hs: Humedad en base seca expresada en porcentaje.

2.1.3 Medición de la Humedad de los Granos

La importancia de una correcta medición de la humedad en los granos radica en la gran influencia en la comercialización, en el proceso de secado, en la conservación de los granos, etc.

En razón de lo expuesto, los aparatos medidores de humedad llamados "humedímetros", empleados durante el acopio de granos, deben estar correctamente calibrados.

² Humedímetro: Dispositivo utilizado para medir la humedad relativa de determinado elemento.



Figura 2.1 Humedímetro para granos Granomat.³

Un humedímetro con operación en función de la capacitancia eléctrica puede originar los siguientes errores:

Inadecuada calibración: Si el aparato, por ejemplo, señala 14% de humedad a la salida de la secadora, cuando en realidad el grano tiene 13%, significa que se está perdiendo un punto, que representa muchos quintales menos por un exceso de sobresecado y un desperdicio de energía.

Falta de corrección por temperatura de los granos: Si un grano está caliente, y no se corrige por temperatura, el valor que indica el humedímetro puede ser hasta un punto mayor que la realidad, implicando ello una pérdida de las características descritas anteriormente.

Por el contrario, si el grano está frío, el instrumento puede indicar un punto menor que la humedad real del grano con las consecuentes implicaciones de ello.

El avance tecnológico actual provee, afortunadamente, de nuevos medidores de humedad, más precisos y que hacen automáticamente la corrección por temperatura.

Falta de previsión en el revenido⁴ del grano. El término "revenido" se refiere a un proceso que se produce en los granos que han sido secados de manera artificial, y que es proporcional en su notoriedad con la severidad que haya sido

³ Cortesía de www.josebattaglia.com.ar/Medicion/medicion.htm

⁴ Revenido: Fenómeno de aumento de la humedad del grano luego de varias horas de haber pasado por el proceso de secado

aplicado dicha técnica. Puntualmente, consiste en un aumento de la humedad del grano después de varias horas de haber pasado por la secadora. De esto resulta que un grano, al salir de la secadora, y al medir su humedad, esta se encuentre en un 13,5%, pero al transcurrir unas horas, ésta se vea incrementada hasta en un 14,5%.

Este fenómeno se debe a que los humidímetros corrientemente empleados en el acopio de granos detectan principalmente la humedad superficial de la semilla y no la interna. Al realizar un secado rápido, lo que se pierde con una acción veloz es la humedad de las capas externas, mientras que las internas todavía conservan una humedad mayor. Con el transcurso del tiempo esa humedad interna migra hacia el exterior, y ello se refleja en la nueva medición del humidímetro.

Una solución para no cometer errores resulta realizar la medición de la humedad, al salir de la secadora, moliendo una muestra de granos y haciendo la determinación en una estufa de humedad, aunque ello implique mayor complejidad en la técnica de medición, mayor tiempo y el posible requerimiento de una estufa por un período de 24 horas.

Una solución sencilla y menos complicada resulta de guardar la muestra en un recipiente hermético (frasco de vidrio bien lleno y cerrado) y medir la humedad hasta no menos de 5 horas después; con ello se permitirá que el grano complete su proceso de equilibrio térmico y de humedad, para lograr mediciones más certeras.

La calibración de un humidímetro puede darse en forma aproximada mediante la consignación de una tabla de la diferencia entre dos mediciones: a la salida de la secadora y 10 horas después. Dicha tabla tendrá validez solo cuando los procesos de secado sean similares entre sí, estén despojados de variaciones entre las temperaturas del aire de secado, y sean afines en las humedades iniciales.

El revenido se puede evitar secando los granos con aire a menor temperatura o haciendo dos pasadas por la secadora con un período de descanso denominado "tempering".

En el acopio no resulta conveniente despachar el grano inmediatamente después del secado a causa del revenido, ya que puede llegar a destino con una humedad mayor que la convenida, con los consiguientes rechazos o descuentos.

2.1.4 Mermas de Secado

Se debe establecer en primera instancia una diferencia en los términos "merma" y "pérdida".

"Merma" es la porción de algo que se consume naturalmente o se subtrae de una cosa. Puntualmente para la aplicación que se trata dentro del presente proyecto, resulta la depreciación por pérdida de materia que se produce en los granos de toda clase transportados o almacenados.

Por su parte, "pérdida" es sinónimo de carencia, dono o menoscabo que se recibe o experimenta una cosa.

De ello debe entenderse el sentido de "merma" como una pérdida natural, normal que se establece de común acuerdo, mientras que "pérdida" como aquella ocasionada por error, mal uso o por acción delictuosa.

Finalmente, merma de secado es la reducción de una cantidad de grano almacenado por acción de la extracción de humedad, mientras que pérdida de secado se refiere a un secado excesivo, por debajo de una base admitida, problema que se conoce más puntualmente como "sobresecado".

2.1.5 Merma de Volumen

La reducción de humedad en los granos produce directamente la reducción o merma del volumen en los mismos. Como ejemplo el maíz, secado en base a una técnica artificial pierde entre 0,3 a 0,796% de su volumen total, por cada punto de reducción de humedad⁵.

⁵ Datos Proporcionados por: FOSTER, G.H., *Drying Cereal Grains*, American Association of Cereal Chemists, Inc., St. Paul, Minnesota, U.S.A. 1982

2.1.6 Pérdidas de secado: Sobresecado

El proceso de secado granos genera algunas pérdidas en el mismo: roturas, producción de polvo, constituyen algunas de ellas, aunque no resultan muy altas. La pérdida más importante en el proceso resulta el sobresecado. La justificación sobre su realización yace en una mayor seguridad para el almacenamiento del grano, y reducción de los problemas de revenido para casos de despacho inmediato del producto.

El sobresecado genera ventajas cuando el grano tiene destino lejano, ya que asegura al destinatario la llegada de un producto más seco, seguro, reducido profundamente en su contenido de agua, además de requerir menos volúmenes de transporte para un determinado tonelaje. El beneficio desde el punto de vista del vendedor radica en la fijación de un costo adicional por la tarea de sobresecado.

Desde el punto de vista técnico, el sobresecado incluye un costo adicional de energía cuya relación es inversamente proporcional al nivel de contenido de humedad final que se desee.

2.1.7 Contenido de Humedad de Equilibrio

El contenido de humedad en equilibrio se denomina a la condición en que un grano no absorbe ni pierde agua, es decir, se mantiene en equilibrio con el ambiente, mientras este se mantenga a una determinada humedad relativa y temperatura constantes.

Para el caso concreto del maíz, secado de manera natural, es decir, sin ningún método artificial, puede llegar a tener un contenido de humedad de equilibrio de entre 0,5 a 1% más elevado que aquel que pueda haber sido secado bajo técnicas artificiales. De esta manera, ambos colocados en el mismo ambiente pueden mantener humedades diferentes, por ejemplo 14,5% en el primer caso, y 13,8% para el segundo. Ello puede deberse a cambios en la composición del grano debidas a factores intrínsecos del proceso de secado artificial, particularmente cuando este ha sido sometido a temperaturas mayores a los 60°C.

Los granos que poseen un contenido de aceite alto como la soja y el girasol absorben menos agua que granos en los que predomina un **endosperma**⁶ harinoso como es el caso del maíz y trigo. Empero a esta situación, los granos como el como la soja y el girasol concentran el agua absorbida en un menor volumen del grano ya que el agua y el aceite no se mezclan. Ello obliga a conservar este tipo de granos en ambientes con menores contenidos de humedad.

2.1.8 Humedad relativa del aire

La humedad relativa del aire corresponde al porcentaje de humedad que este posee en ese momento, con relación al máximo contenido de humedad que podría tener bajo esas condiciones. Por ejemplo el aire a un 70% de humedad relativa, implica que requeriría un 30% para llegar al máximo de humedad. La máxima humedad que puede contener el aire depende de la temperatura a la que se encuentre. A mayor temperatura del aire, mayor cantidad de humedad capaz de aceptar.

Dentro del proceso de secado de granos, el aire caliente utilizado posee una humedad relativa sumamente baja (de 0,5 a 2%), lo que permite tomar la humedad de los granos hasta saturarse completamente y llegar al 100% de humedad relativa.

En función de estos conceptos, resulta importante conocer la humedad relativa y la temperatura del aire circundante a la secadora y silos de almacenamiento, ya que de ellos se puede prever diferentes comportamientos de la máquina además de valores adecuados de aireación de los granos en conserva.

La medición de la humedad relativa se realiza por medio de higrómetros o de psicrómetros, Estos aparatos determinan la humedad relativa a través de la dilatación o contracción que experimentan algunos elementos cuando entran en contacto con la humedad del ambiente que los circunda.

⁶ Endosperma: Parte interior del grano constituido casi en su totalidad por hidratos de carbono en forma de almidones.

Los higrómetros de tipo metálico o de espiral incluyen una pequeña espiral sensible de cinta de cobre recubierta por una película de una sustancia sumamente higroscópica.

Los higrómetros de cabellos incluyen un haz de cabellos desengrasados, uno de cuyos extremos es fijo y el otro se enrolla sobre una polea que acciona una aguja indicadora sobre un cuadrante (dial) graduado.

Por su parte los psicrómetros se forman de un armazón que sostiene dos termómetros idénticos, uno de bulbo seco y el otro de bulbo húmedo. Aquel de bulbo húmedo mantiene este, recubierto por una tela que siempre se mantiene húmeda por medio de una tira o cordel que la sostiene unida a un pequeño recipiente con agua.

Dentro de un ambiente seco, la tela de recubrimiento del bulbo evapora parte de su humedad, produciendo un enfriamiento del bulbo, lo que se registra en un descenso de la temperatura del termómetro. El bulbo seco registra la temperatura ambiente, la cual siempre es mayor que la del bulbo húmedo.

Una menor diferencia entre estas dos medidas indica una mayor humedad relativa del aire, y por el contrario, cuanto mayor sea la diferencia, menor es la humedad relativa. El psicrómetro resulta adecuado para medir la humedad relativa de aire en movimiento.

El higrómetro tiene la ventaja de emitir una lectura directa de la humedad relativa del aire, mientras que la lectura del psicrómetro requiere el empleo de diversas tablas.

La utilidad del psicrómetro está dada porque también proporciona la temperatura del ambiente en el termómetro del bulbo seco.

La humedad relativa del ambiente circundante al proceso no es muy importante cuando este se realiza con aire caliente, pero sí lo es en el secado con aire natural o a baja temperatura. Para el secado con aire caliente, resulta importante la humedad relativa del aire de secado.

2.1.9 Psicrometría

Dentro del tratamiento de procesos industriales, el aire es usado como un medio de transferencia de calor, una fuente o vertedero de vapor de agua, una fuente de oxígeno para combustión y un vehículo para vapores que han de eliminarse por ser considerados indeseables, o que se usan como medios de proceso.

El aire seco se compone de una serie de gases, principalmente oxígeno y nitrógeno, además de otros componentes menores como argón, dióxido de carbono, neón, etc. El peso molecular del aire seco es de 28.97.

El aire atmosférico normal es una mezcla de aire seco y vapor de agua, ya que el aire atmosférico no está nunca completamente seco. La psicrometría es el estudio de las propiedades termodinámicas del aire atmosférico. El gráfico psicrométrico es la representación gráfica de dichas propiedades. La Figura 2.2 expone un ejemplo de una tabla psicrométrica.

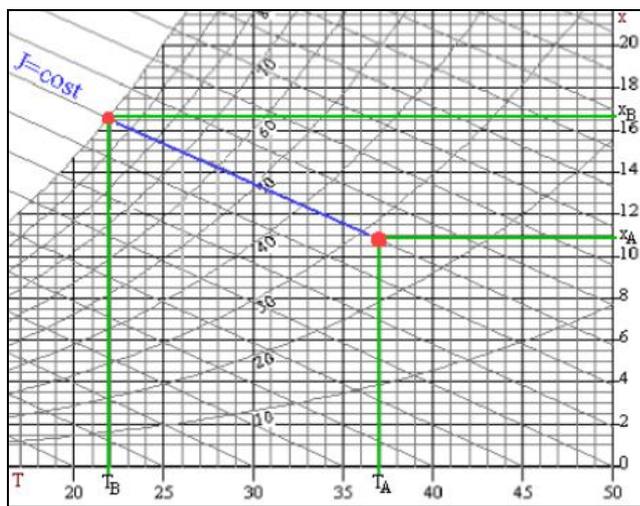


Figura 2.2 Ejemplo de una tabla psicrométrica.

Las relaciones que sostienen la humedad, temperatura y otras propiedades del aire se analizan mediante los cálculos psicrométricos.

Con la finalidad de facilitar la comprensión de dichos cálculos, se elaboran los diagramas psicrométricos, en los cuales también pueden analizarse los procesos

relacionados con los granos, como el secado, aireación, humedecimiento y otros, en los que intervienen el aire exterior y el vapor de agua.

El estudio temático del proceso de secado de granos finaliza con el conocimiento completo de las relaciones de los factores primordiales del proceso. Estas relaciones constituyen el fundamento de la psicrometría y de los fenómenos termodinámicos que afectan a los granos.

Propiedades adicionales que ejercen influencia sobre el proceso de secado de granos son: su área superficial, porosidad, calor de vaporización, conductividad térmica, calor específico, coeficiente de transferencia de calor, coeficiente de difusión de humedad, etc.

2.2 DESCRIPCIÓN DE LA BIOMASA COMBUSTIBLE Y DE LOS GRANOS A SECAR

El proceso de secado de granos contiene dos elementos protagónicos para su desarrollo y ejecución: el combustible que genera la energía del secado, y los productos de secado. El conocimiento de sus propiedades químicas, estructura física y características permite evidenciar factores intrínsecos del proceso que permiten formar las primeras pautas de su optimización y de la consecuente generación de un método eficiente de su utilización y desempeño. Los ítems que se apuntan a continuación anotan las características principales de estos elementos enfocados hacia el proceso que se desarrolla a lo largo de esta investigación.

2.2.1 Biomasa

La biomasa constituye toda la materia orgánica vegetal o animal, inclusive aquellos materiales que provienen de su transformación natural o artificial. La biomasa puede ser obtenida de multitud de materiales:

- Residuos forestales, procedentes de podas, limpiezas y cortas.
- Residuos agrícolas, integrados por restos de podas de cultivos leñosos, paja de cereales, zuros de maíz, restos de cultivos industriales, etc.

-
- Residuos de industrias agrícolas: residuos de aceituna, cascarilla de arroz, cáscara de frutos secos, restos de industrias envasadoras, etc.
 - Residuos de industrias forestales: recortes de madera, serrines, etc.
 - Cultivos energéticos, tanto leñosos como herbáceos.
 - Productos biodegradables de procedencia agroganadera.
 - Efluentes de la industria agroalimentaria.
 - Lodos de depuración de aguas residuales.
 - Emisiones de gas de vertederos controlados.
 - Excedentes agrícolas.
 - Aceites alimentarios usados.

Todo tipo de biomasa, independientemente de su procedencia, se genera mediante fotosíntesis vegetal. Este proceso consiste en utilizar la energía solar para formar sustancias orgánicas basadas en CO₂ y otros compuestos simples.

2.2.1.1 Aprovechamiento de la Biomasa

Para distintos tipos de biomasa, diferentes y variadas aplicaciones: refinamiento, fermentación, pirolisis, gasificación, etc.

Producción Térmica: Una de las aplicaciones más comunes de la biomasa es aquella que la aprovecha como combustible. De ello una típica aplicación se ve realizada cuando constituye alimento de calderas de calefacción.

Producción eléctrica: La generación de electricidad mediante biomasa se realiza mediante dos técnicas:

Combustión, proceso que se integra dentro de un ciclo de vapor, de donde se obtiene energía eléctrica con rendimientos de hasta 30% y potencias de generación de hasta 50MW.

Gasificación, que consiste en producir biogás a través de la fermentación natural de algunos productos de origen natural. El biogás se convierte en la sustancia vital que hace funcionar una central térmica generadora de la energía.

Elaboración de combustibles limpios:

Biodiesel: Utilizado como complemento o sustituto del gasoil, se obtiene a partir del aceite de materias oleaginosas (girasol, colza u otros), y de los aceites alimentarios ya usados. Estos aceites se esterifican con alcohol, y en el proceso se obtiene el biodiesel y glicerina.

Bioalcoholes: Procedentes de materiales azucarados como tubérculos, caña de azúcar o granos de cereal, se lo obtiene por fermentación para extraer etanol, que generalmente se lo utiliza mezclándolo con gasolina. Los bioalcoholes también pueden ser empleados para generar electricidad.

2.2.1.2 Ventajas de la Biomasa

2.2.1.2.1 Medioambientales

- Balance neutro en emisiones de CO₂. La combustión de biomasa realizada en las condiciones adecuadas, produce agua y CO₂, pero la cantidad emitida de este gas (principal responsable del efecto invernadero), ya es captada previamente por las plantas durante su crecimiento. Esto significa que, el CO₂ de la biomasa viva forma parte de un flujo cíclico natural entre la atmósfera y la vegetación, que elimina el incremento del gas invernadero en la atmósfera, claro esta, mientras la renovación de la vegetación se realice a la misma velocidad que su degradación.
- No produce emisiones sulfuradas o nitrogenadas, ni apenas partículas sólidas.
- El aprovechamiento energético de la biomasa implica convertir un residuo en un recurso ya que esta procede de residuos necesarios de eliminar.

2.2.1.2.2 Socioeconómicas

- Disminuye la dependencia externa del abastecimiento de combustibles.

- Favorece el desarrollo de los sectores rurales otorgando la oportunidad para el sector agrícola, de sembrar cultivos energéticos en sustitución de otros de tipo excedentarios.
- Viabiliza oportunidades de negocio a la industria, favorece la investigación y el desarrollo tecnológicos, e incrementa la competitividad comercial de los productos.

2.2.1.3 Propiedades de la cascarilla de arroz

De manera general la cascarilla de arroz cuenta con las siguientes propiedades: de una total del 100% de producción de arroz, el 27,22% resulta cascarilla del producto, que generalmente se desecha.

Las aplicaciones habituales de este producto son la fabricación de aglomerados, concretos de resistencia alta, y combustible para quemado en ladrilleras, más su utilización resulta pequeña y por demás insignificativa.

Su aprovechamiento como combustible resulta atractivo y tentador por cuanto se reduce notablemente los niveles de contaminación.

La optimización del proceso de su combustión permite generar procesos de secado de productos agrícolas como granos, fréjol, maíz, yuca, etc., logrando eficiencias de hasta 80% en dichos procesos. La optimización de este proceso, permite así mismo generar un poder calórico equivalente de $13,75 \times 10^{-3}$ TJ/TM, con una producción de ceniza de 17%. Finalmente, la ceniza generada por el proceso de combustión de la cascarilla contiene un alto porcentaje de carbono, y una humedad de 13,7%.

La Tabla 2.1 expone los principales componentes químicos de la cascarilla de arroz obtenidos después de realizar un análisis de la composición química de este producto.

Componente %	
Carbono	39.1
Hidrógeno	5.2
Nitrógeno	0.25
Oxígeno	37.2
Azúfres	0.43
Contenido de Cenizas	
Sílice	17.8
Humedad (H ₂ O)	8.9

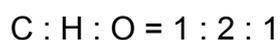
Tabla 2.1 Composición química de la cascarilla de arroz.⁷

De la tabla anterior se puede apreciar la presencia de nitrógeno y sulfuros en una mínima porción, y otros de carácter inerte en la reacción química de la combustión como las cenizas. En razón de ello, sólo se tomará en cuenta la presencia de carbono hidrógeno y oxígeno para obtener la fórmula química equivalente de la cascarilla de arroz. Para ello, se dividirá los porcentajes de su composición, por el peso molecular de cada uno de ellos y así determinar su cantidad molar. La tabla 2.2 muestra los resultados obtenidos:

Componente	Cantidad Molar
Carbono	3.2553
Hidrógeno	5.1592
Oxígeno	2.3251

Tabla 2.2 Composición molar fundamental de la cascarilla de arroz.

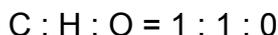
En función de estas cantidades se verifica la relación atómica de estos componentes dividiendo estas cantidades por la menor de ellas (oxígeno), así como también se redondea a cantidades enteras, en justificación de las leyes estequiométricas determinando la fórmula de la siguiente manera:



Los valores anotados corresponden al carbono, hidrógeno y oxígeno equivalentes, sin embargo, para las leyes estequiométricas de la combustión, el oxígeno equivalente debe ser sustraído del hidrógeno equivalente, y el hidrógeno

⁷ Datos proporcionados por experimentaciones desarrollados en el Departamento de Tolima, España

restante toma el nombre de hidrógeno neto. Así el carbono equivalente más el hidrógeno neto constituyen los elementos disponibles para el proceso de combustión. De allí la relación atómica para la cascarilla de arroz quedaría:



Esta relación permite establecer una fórmula empírica para la cascarilla de arroz de CH, aclarando que ella no resulta su fórmula molecular, por cuanto no se dispone del peso molecular de la cascarilla de arroz para la obtención de dicha fórmula. Cabe recalcar que la cascarilla de arroz no es un compuesto químico, sino un aglomerado de algunos compuestos. Sin embargo la obtención de esta fórmula empírica permite desarrollar un estudio cuantitativo y cualitativo de la reacción de la combustión de la cascarilla de arroz.

Para la realización de dicho estudio la combustión de la cascarilla de arroz dentro de un quemador se realiza a volumen constante siguiendo la primera ley de la termodinámica, se define la temperatura adiabática de llama, y se extraen las siguientes conclusiones:

Existe disociación de la cascarilla de arroz aunque en menor medida por el hecho de no alcanzar temperaturas tan elevadas de combustión como en el caso de otros materiales combustibles. Esta peculiaridad advierte una ventaja para el control de compuestos de tipo NO_x en los productos de la combustión.

Otra ventaja radica en los bajos niveles de compuestos de tipo SO_x que se obtienen de la combustión de la cascarilla de arroz por los bajos niveles de azufre que incluye el producto. Ello reduce significativamente el control del proceso de combustión, limitándolo a verificar el contenido de mezcla del producto por la posible aparición de CO y NO. Para ello resulta recomendable controlar la mezcla estequiométrica aire combustible con una relación de equivalencia entre 0.9 y 1.1, de tal suerte que no se generen emisiones contaminantes.

2.2.2 Características de los productos de secado

Básicamente los productos de secado pueden ser clasificados en dos tipos: cereales y leguminosas, en función de determinar la técnica y características propias del secado. Debe entenderse en primera instancia, que ambos tipos de

productos son seres vivos, y, como tales, cumplen con todas las fases del ciclo vital. De estas fases, la respiración resulta de capital importancia dentro del presente estudio, ya que mediante esta función, las plantas degradan el almidón de azúcar, consumen oxígeno, y liberan anhídrido carbónico, calor y agua.

2.2.2.1 Composición física de los Cereales

Los cereales se incluyen dentro de un grupo de plantas más grande: las gramíneas. Su principal característica es que la semilla y el fruto constituyen una misma estructura, que resulta ser el grano del cereal. Típicos ejemplos de cereales empleados, sobre todo, en la alimentación humana, son el trigo, el arroz y el maíz, y entre algunos menos conocidos tenemos la cebada, el centeno y la avena.

El grano del cereal, que resulta ser la parte comestible del mismo, constituye una semilla que se forma de varias partes: Una cubierta o envoltura externa, que se compone básicamente de fibras de celulosa que contienen vitamina B1. La envoltura suele ser retirada durante la molienda del grano y da origen al salvado.

Internamente en un grano de cereal se distinguen dos estructuras básicas: el germen y el núcleo. El germen incluye proteínas de alto valor biológico, grasas insaturadas ricas en ácidos grasos esenciales, vitamina E y B1. Estos componentes que usualmente se pierden en los procesos de refinado para obtener harina blanca.

Por su parte, el núcleo se compone de almidón, y puntualmente para el trigo, la avena y el centeno, este se forma de un complejo proteico denominado gluten que se forma básicamente de dos proteínas: gliadina y gluteína, responsables de la esponjosidad y textura del buen pan.

El cereal retirado su cubierta y germen se denomina refinado, caso contrario toma el nombre de integral.

2.2.2.2 Estructura física de las leguminosas

Grupo de plantas muy numeroso, que abarca cerca de 17.000 especies, las leguminosas se constituyen por especies de granos pertenecientes a la familia de

las Papilionáceas, cuya principal utilidad agrícola es el empleo de sus semillas en la alimentación animal y humana, debido principalmente a su alto contenido en proteínas. También se utiliza su paja en alimentación animal, y algunas especies suelen cultivarse para forraje o abonado en verde.

Las leguminosas constituyen un grupo muy diverso de plantas con una distribución que abarca todo el planeta. Existen especies herbáceas, así como también trepadoras, arbóreas, arbustivas, e incluso plantas acuáticas. Sus frutos, denominados legumbres, son los elementos que mejor caracterizan a estas plantas. La legumbre es una vaina aplanada con una sola cámara y dos suturas. Las semillas constan unidas longitudinalmente a una de las suturas. La legumbre puede ser indehiscente, es decir, que no se abre, tal como ocurre con el maní, que madura bajo tierra, o dehiscente de manera explosiva, tal como el altramuç. Los tamaños de las plantas leguminosas oscilan entre pocos milímetros hasta más de treinta centímetros. Pueden contener una semilla o muchas, y presentar colores vivos o apagados.

Las flores de las leguminosas son muy diversas, constan de un cáliz con cinco sépalos y una corona de 5 pétalos. Usualmente poseen 10 estambres que pueden mantenerse adheridos en una única estructura, o dispuestos en dos grupos: uno de 9 y otro de un solo estambre. Existen otras especies que presentan los estambres libres. El gineceo (verticilo floral interno) es súpero (es decir, está situado por encima de las demás piezas florales) y en la mayor parte de los casos consta de un único carpelo (estructura portadora del óvulo).

Las leguminosas se diferencian de otras familias por rasgos morfológicos importantes, como frutos contenidos en una vaina o legumbre y flores de variado tamaño y vistosidad. Los granos contenidos en vainas como el fréjol, la arveja, el haba, la lenteja, el chocho y la soya pertenecen a la familia de las leguminosas.

2.3 TÉCNICAS DE SECADO

El secado de granos constituye el punto medular dentro las fases de cosecha, secado y almacenamiento de los productos agrícolas. El método o técnica de secado determina la selección de otros componentes del sistema de manejo de granos. La gran mayoría de países subdesarrollados no disponen de sistemas

tecnificados de secado, tan solo se rigen a aprovechar la energía solar y el viento en un secado natural. La implementación de sistemas o técnicas de secado artificial requieren un gran esfuerzo y experiencia por parte del agricultor.

Las técnicas de secado artificial de granos pueden clasificarse, de manera general, en base a una criterio de alimentación de los granos dentro del proceso: por lotes, y continuo. La selección de cualquier técnica de secado depende del clima, economía, y hasta circunstancias sociales bajo las cuales van a ser utilizadas.

A continuación se describen algunas técnicas principales de secado de granos.

2.3.1 Secado Natural

Esta técnica de secado aprovecha el movimiento del aire o el viento más la energía solar como medios que permitan evaporar la humedad de los granos. El secado natural tiene lugar en la propia planta del grano, al término de la maduración fisiológica del mismo, y luego en la cosecha, al extender todos los granos recolectados para exponerlos directamente al ambiente. Suelen construirse patios de secado que reducen el tiempo del proceso.

El uso de esta técnica de secado es frecuente en los países subdesarrollados, ya que los agricultores no disponen de los medios ni conocimientos de técnicas más especializadas para llevar a cabo el proceso, además de que el clima de las zonas agrícolas suele favorecer esta técnica con un mínimo de inversión.

Los factores de incidencia negativos en el desarrollo de esta técnica de secado suelen ser los insectos, pájaros, roedores, contaminación por microorganismos, el desgrane, las fisuras, e incurrancia de condiciones climáticas adversas, que pueden degenerar la calidad de secado y el grano.

2.3.1.1 Secado en la planta y en surcos

Una vez que el grano ha alcanzado su madurez fisiológica, este presenta un contenido de humedad alto, hecho que dificulta su cosecha y posterior almacenamiento. Ello obliga a que el producto permanezca en el campo hasta

que su contenido de humedad descienda y permita cosecharlo para luego ser almacenado.

Dentro de la planta el secado puede ser combinado con otra técnica si se desea generar ventajas en el proceso. Lo que sí se debe considerar es el contenido de humedad del producto a su llegada a la planta, de tal suerte que este coincida con aquel solicitado por la técnica de secado a emplear. El secado a temperatura elevada busca anticipar la cosecha al máximo, con el objetivo de reducir las pérdidas y permitir el inmediato uso del campo para otras actividades.

En el caso del maíz, por ejemplo, el proceso de secado resulta lento por lo que el grano queda expuesto al ataque de plagas más cualquier adversidad climática. Adicionalmente, la caída de las plantas contribuye a incrementar las pérdidas. Ante ello se suele cultivar simultáneamente fréjol para reducir las pérdidas. Actualmente está comenzando a difundirse técnicas de secado más modernas que permitan reducir las pérdidas en el campo.

2.3.1.2 Secado en terrazas (asoleaderos)

Esta técnica de secado natural toma como variante el hecho de esparcir el producto sobre un piso de concreto, o incluso una parcela de tierra apisonada, con una capa dura de menos de 10cm de espesor. El intercambio energético y de humedad entre el aire y el producto depende de la superficie de la capa del producto; ello obliga a revolver el grano periódicamente. La acción del viento extrae la humedad del producto a la capa de aire situada inmediatamente encima de él. La temperatura y la humedad relativa del ambiente, constituyen, entonces, factores determinantes en la tasa de secado del producto. Mediante la energía solar se acelera el proceso al aumentar la temperatura del producto y la capacidad del aire para absorber humedad.

El desarrollo de esta técnica resulta sumamente difundido por su sencillez de construcción, funcionamiento, bajo costo inicial y versatilidad. Como desventajas, esta técnica resulta ineficiente en cuanto a capacidad de secado por unidad de superficie, dependencia de las condiciones climáticas, necesidad de mano de obra de vigilancia continua y gran espacio para su construcción.

Un grano en tiempo de cosecha generalmente presenta contenidos de humedad de entre 60ny 70%. Ello obliga a que la capa de esparcimiento del grano en las terrazas de secado no supere los 3cm de espesor, ya que el proceso es lento, y un apilamiento del producto podría producir pérdidas y degeneraciones del mismo por su susceptibilidad para el desarrollo de hongos.

El cálculo del tiempo de secado en terrazas resulta complejo por el número de variables involucradas en el proceso. El cálculo aproximado de la superficie de la terraza requerida para secar una producción determinada puede obtenerse por medio de la siguiente ecuación:

$$S = \frac{20Vt}{n}$$

Ecuación 2.3

Donde:

S = Superficie de la terraza,

V= Volumen de producción

t= Tiempo de secado

n= Período de la cosecha

2.3.1.3 Secado natural en secador rotativo

Este tipo de secadores se compone de una caja rectangular cuyos lados son de madera, y el frente con el fondo, de malla de alambre, tal como lo indica la Figura 2.3.

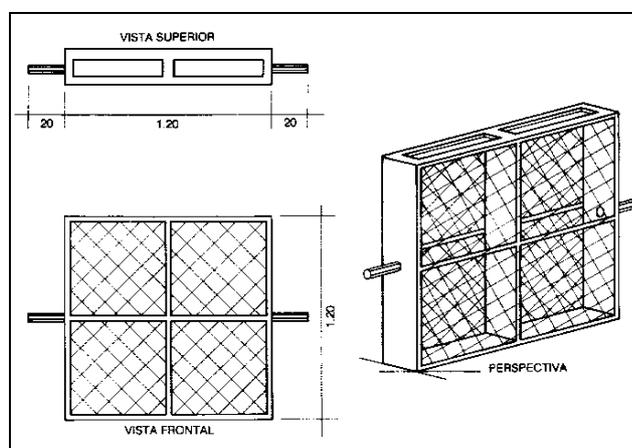


Figura 2.3 Esquemas de un secador rotativo.

Este secador posee una inclinación variable, ya que su eje de rotación está alineado en la dirección norte-sur. La variación de la inclinación permite posicionar el secador de la manera más adecuada para aprovechar mejor la energía solar. Ello resulta notablemente beneficioso en productos de superficie oscura como el café

El proceso puede describirse en función de las mismas variables que se anotan para los secaderos en terrazas, con la ventaja de que en este tipo de secadores se puede aprovechar mejor la energía solar y la acción del viento, ya que, en función de la dirección que tome el secador, el aire pasa a través de la capa del producto permitiendo el secado de toda la masa del mismo

El espesor de la capa del producto puede llegar, en este caso, hasta los 15cm, indicando siempre que un espesor menor permitirá una mejor penetración del aire. Así mismo cabe señalar que resulta beneficioso revolver constantemente el producto para que la humedad final del mismo sea uniforme.

2.3.1.4 Secado en secadores solares

Los secadores solares constituyen configuraciones que pretenden aprovechar al máximo el potencial del aire para un secado natural, calentándolo mediante la energía solar, para que de esa manera se favorezca el movimiento del mismo por convección natural y se optimice el proceso. Existen diferentes configuraciones, a continuación se describen las más importantes:

- Secador solar con precalentamiento de aire.
- Secador solar tipo invernadero.

En el primer caso, el aire se calienta previamente en un colecto para pasar luego a la cámara de secado. El producto se asienta sobre una malla de 1,5mm. Este tipo de configuración tiene la capacidad de almacenar la energía solar debido a un lecho de piedras negro opaco. Entonces, el aire ingresa por la abertura inferior del dispositivo, se calienta por la energía conservada en el lecho de piedras que se mantiene cubierto por un plástico transparente, asciende por convección natural a la cámara de secado, y extrae la humedad del producto. La Figura 2.4 muestra un esquema de esta configuración de secado.

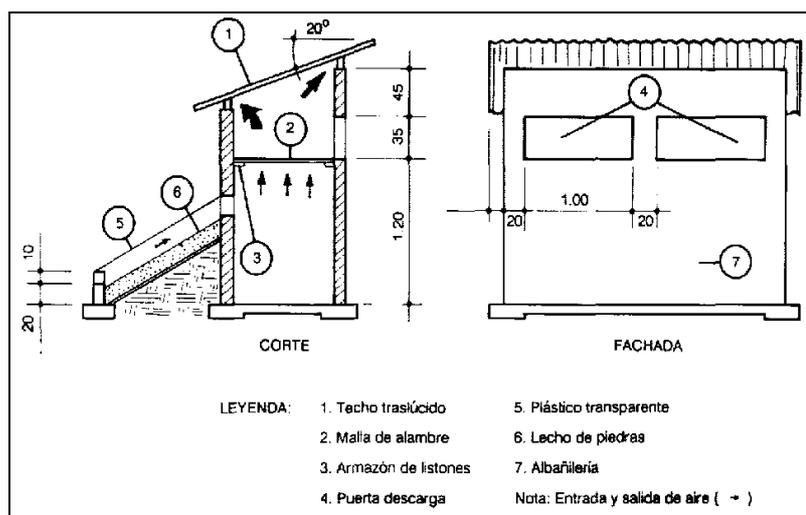


Figura 2.4 Esquema de un secador solar con precalentamiento de aire.

Por su parte, los secadores solares tipo invernadero se constituyen de un armazón de madera y plástico. La cara inclinada del secador se cubre con plástico transparente y se la orienta hacia el sol dentro del proceso. El resto de caras pueden ser cubiertas con un plástico de menor calidad, y el piso con uno sin orificios sobre el cual se coloca una capa de 1 a 1.5cm de grano para el secado. Se pueden proteger los bordes de la base con listones de 2cm de alto para evitar la entrada de agua de lluvia. La parte inferior de la cara inclinada, así como de las paredes laterales debe dejarse una abertura de 20 a 30cm que facilite la circulación del aire. Esa misma abertura debe quedar fijada en la parte superior de la cara opuesta a aquella inclinada, de tal manera que facilite la salida del aire.

Al entrar el aire por la base del secador se calienta simultáneamente aumentando su capacidad de secado, y mediante convección natural se provoca su salida en tanto extrae la humedad de los granos. La Figura 2.5 expone un modelo del secador.

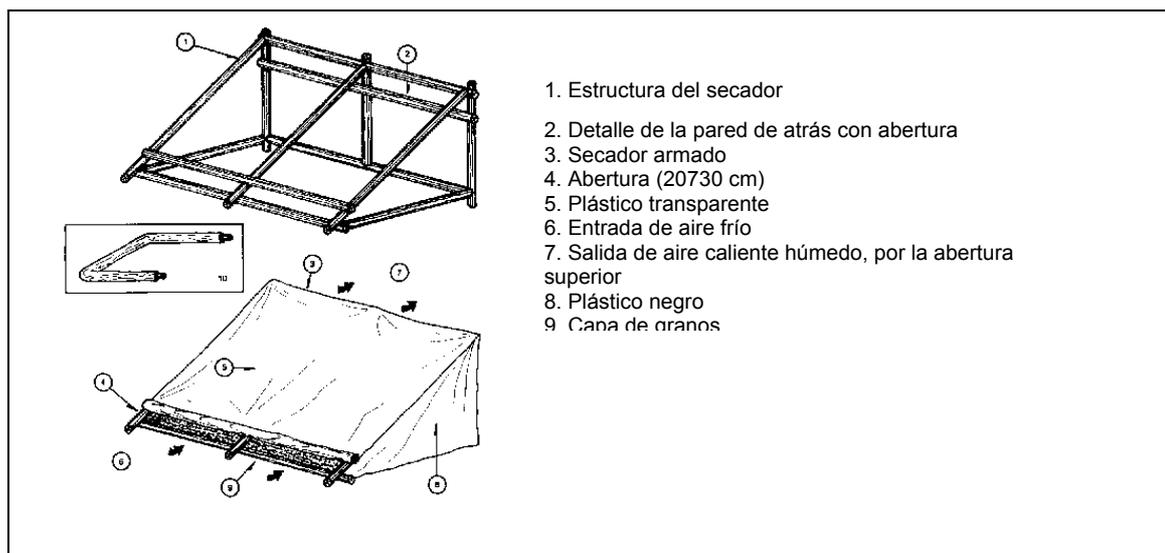


Figura 2.5 Esquema de un secador solar tipo invernadero

2.3.2 Secado Artificial

Las técnicas de secado artificial pueden ser clasificadas en base a las temperaturas de secado en: altas temperaturas (de 45 a 120°C o más), y en bajas temperaturas. El secado a bajas temperaturas, que opcionalmente utiliza calentamiento suplementario del aire, resulta un proceso de gran eficiencia energética que permite obtener un producto de óptima calidad, ya que la temperatura del aire utilizada resulta incrementada en pocos grados con respecto a aquella promedio de la ambiental.

En contraparte a esta ventaja, el inconveniente de la técnica de secado de granos a bajas temperaturas es el potencial riesgo de deterioración del producto por el largo tiempo del proceso. Ante ello el secado de granos a altas temperaturas resulta eficiente en términos de tiempo, pero deficiente en términos energéticos.

De manera general, un sistema de secado artificial está compuesto por un ventilador que impulsa aire a través de una masa de granos, una cámara o lecho de contención del grano, y un quemador cuya función consiste en aumentar la temperatura del aire de secado. Cuando el proceso disponga de un flujo de alimentación continuo, se deberán incorporar sistemas de llenado de los granos húmedos, y de vaciado de estos, cuando ya hayan sido secados. Para el caso de los secadores estacionarios o por lotes, estos se retiran del secador una vez

concluido el proceso. Cuando se realiza el secado mediante una técnica de bajas temperaturas, el grano puede ser almacenado en el mismo lugar del secado.

2.3.2.1 Secado a bajas temperaturas

La técnica de secado de granos a bajas temperaturas es aquella donde se utiliza aire natural o ligeramente calentado (2 a 5°C sobre la temperatura ambiente). Este proceso toma lugar en los mismos silos almacenadores donde el producto permanece luego de la operación de secado.

Existen algunas modificaciones sobre los silos de almacenamiento para que estos puedan ser utilizados en el proceso de secado. En primer lugar, el piso debe estar fabricado completamente de metal, con un mínimo de 10% de superficie perforada que permita una distribución uniforme del aire para asegurar el buen desarrollo del proceso. El ventilador debe proveer la suficiente cantidad de aire de tal forma que se logre el secado de toda la masa del grano sin deterioro alguno. De ahí que la potencia del ventilador está determinada por la altura y diámetro del silo contenedor del producto.

El proceso de secado a bajas temperaturas se caracteriza por ser un proceso lento con duración de semanas y hasta un mes. Ello se debe al bajo potencial de secado del aire para evaporar agua así como la pequeña cantidad de aire utilizado por unidad de masa de grano a secar. El potencial de secado del aire utilizado determina el contenido de humedad que alcanzará el producto luego del proceso. Así, una región de baja humedad relativa media poseerá mayor potencial de secado que aquellas regiones de alta humedad relativa.

Los ventiladores de secado elevan la temperatura del aire en un rango de 1 a 2°C, y de allí pueden utilizarse combustibles, resistencias eléctricas o colectores solares que completen la energía para reducir la humedad relativa del aire. Sin embargo el uso de estas alternativas está condicionado al potencial de secado de la región y al contenido de humedad final del producto requerido. El uso excesivo de estas fuentes suplementarias de energía puede producir problemas de secado excesivo sobre todo en las capas inferiores del producto.

La técnica de secado a bajas temperaturas resulta económica y técnicamente eficiente cuando es utilizada de manera adecuada. La calidad final del producto resulta mejor que la que se obtiene empleando cualquier técnica de secado con altas temperaturas, ya que la pérdida de humedad del producto es lenta y no sufre de choques térmicos, que producen tensiones internas en los granos y reducen su calidad. Adicionalmente, los sistemas de secado a bajas temperaturas estropean menos el producto por que no lo manipulan tanto como otros sistemas de secado.

La gran limitante de la técnica de secado a bajas temperaturas resulta la del contenido de humedad inicial, ya que cuanto mayor sea su grado, el deterioro del producto es más acelerado, en tanto ese nivel sea reducido hasta un punto seguro para el almacenamiento. Ello implica la necesidad de utilizar más aire para reducir ese contenido de humedad, e implícitamente con ello la necesidad de un ventilador más potente. Adicionalmente debe considerarse la temperatura media del aire ya que esta también acelera el proceso de deterioro. Es recomendable el uso de secado a bajas temperaturas cuando el producto mantiene contenidos de humedad inicial de alrededor del 22%, y en países de clima templado, hasta del 28%.

CAPÍTULO 3

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

3.1 INTRODUCCIÓN

El presente capítulo está destinado a la descripción del modelo mecánico general con cada uno de sus componentes y sus respectivas funciones dentro del proceso integral, luego se procederá a detallar el modelo mecánico de implementación final del sistema, basado en la estructura genérica, relacionando sus partes para finalmente realizar un análisis del prototipo de prueba.

El modelo mecánico representa un método de secado artificial, por lo que se detallarán las características generales acerca de esta técnica y de los parámetros a los que se rige.

3.2 GENERALIDADES

El secado es un método universal para acondicionamiento de granos, por medio de la eliminación del agua, hasta un nivel que permita su equilibrio con el medio ambiente, de tal forma que preserve su aspecto, sus características de alimentos, su calidad nutritiva y la viabilidad de semilla.

De manera general, existen dos técnicas para conseguir el secado: natural y artificial cada una con sus ventajas y desventajas, la tecnología ha aportado enormemente en el desarrollo de mejoras a cada una de estas técnicas y ha conseguido notables niveles de calidad en el producto final.

El secado artificial es la técnica que ha predominado, principalmente por la eficiencia del proceso tanto en la rapidez con la que se pueden obtener los niveles de humedad necesarios como por la calidad que se consigue en el producto final, el principal problema que involucra adaptarse a esta tecnología es la inversión que representa.

3.2.1 Secadores a bajas Temperaturas

Este tipo de secadores se caracterizan principalmente porque usan aire a temperatura ambiente o calentado de 3 a 5°C sobre la temperatura ambiente, como medio de transporte de humedad y energía. En esta técnica se emplean bajos flujos específicos de aire (2.0 – 5.0 m³/min) que junto con las condiciones del mismo hacen que el proceso de secado a bajas temperaturas sea típicamente lento y pueda tardar días o semanas en alcanzar la humedad deseada del producto. Por el contrario esta técnica es energéticamente eficiente y el producto final es de buena calidad, se la puede emplear para producciones tanto pequeñas como grandes, y sus puntos limitantes son las condiciones ambientales, la velocidad de cosecha del producto y el posible desarrollo de hongos.

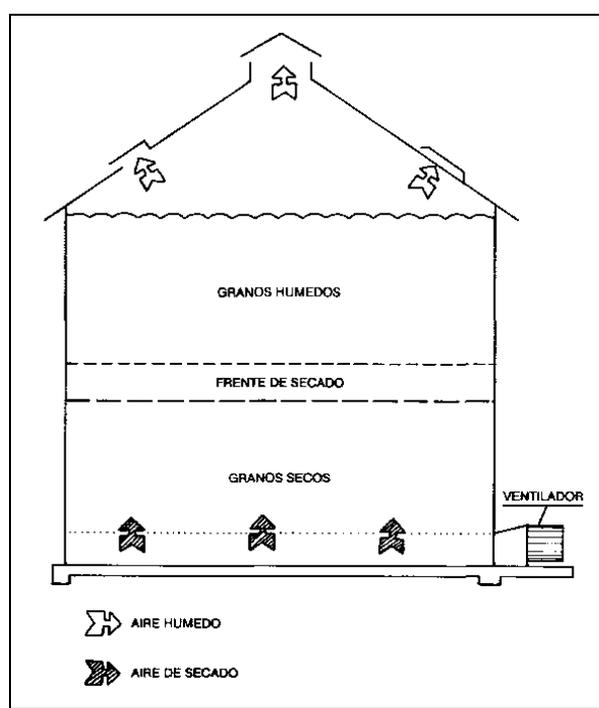


Figura 3.1 Bandas de distintos contenidos de humedad durante el secado de granos a bajas temperaturas.

3.2.2 Secadores a altas Temperaturas

Los secadores que usan procedimientos a altas temperaturas se caracterizan por el empleo de aire calentado por lo menos 10°C sobre la temperatura ambiente. Los flujos específicos del aire son mayores que en el caso anterior y por consecuencia la velocidad del secado es más alta. Así, el secado a altas

temperaturas se emplea en los predios en los que existen grandes producciones y la cosecha diaria es de un alto volumen.

Los procedimientos de secado a altas temperaturas exigen un manejo más cuidadoso y con mayor vigilancia, ya que el peligro de accidentes, principalmente incendios, es más grande y por que la posibilidad de que se dañe el producto también se acentúa.

Aun así, el correcto uso y operación de los secadores, han permitido que algunos productos se sequen hasta en 400°C sin alterar su calidad final. Si bien es cierto que no todos los tipos de secadores aceptan esa clase de manejo, el aumento de la temperatura del aire de secado, aunque por un lado exige mayor supervisión, por otro aumenta la eficiencia energética del procedimiento (menor consumo de energía por unidad de masa de agua evaporada). Esta característica de los procedimientos de secado a altas temperaturas se debe explorar bien e investigar mejor, especialmente en cuanto a los costos de energía.

3.2.3 Secadores Artificiales

Estas máquinas basan su funcionamiento en la captura de aire del medio ambiente, elevan su temperatura dentro de un rango adecuado al elemento en tratamiento por medio de una fuente de calor artificial, ocasionando la pérdida de humedad del aire, al circular este a través del producto agrícola inicia la recuperación de su característica física por medio del intercambio simultáneo de calor y masa con el grano en proceso, es decir, causa la reducción del contenido de humedad de este último y el equilibrio final del aire al retornar a su ambiente original, este proceso se repite de manera continua hasta que el grano alcance el nivel de humedad apropiado para su correcto tratamiento posterior.

3.2.3.1 Componentes Generales

Los componentes de una máquina secadora difieren por fabricante y por modelo de construcción pero todas contienen básicamente los siguientes componentes:

- Torre
- Ventilador
- Horno

3.2.3.1.1 Torre.

Es el lugar físico en el cual se coloca el producto a secar, consta básicamente de una serie de componentes que permiten el intercambio del aire caliente con el elemento agrícola, en este módulo el grano puede estar fijo o en movimiento dependiendo del tipo y método de secado que se use.

3.2.3.1.2 Ventilador

Este módulo es el encargado de impulsar el aire del ambiente externo por entre la masa de granos, debiendo considerarse dos características.

- El caudal de aire que arrojan, que esta en relación con el grano que se seca por hora.
- La presión del aire, que está en relación con el espesor de la masa del elemento agrícola a secar.

3.2.3.1.3 Horno

Es un quemador que calienta el aire impulsado por el ventilador previo a su paso a través del grano, con el fin de disminuir su humedad relativa, existen dos maneras para conseguir este propósito:

- Directo: En este método, el aire que se usa para el secado se mezcla con los productos de combustión originados en la llama, la principal ventaja es que todo el calor generado es transmitido a la masa de granos (alta eficiencia energética), pero su gran desventaja es que en el caso de existir combustión incompleta los productos de la misma se mezclan con el aire y pueden contaminar el producto.
- Indirecto: En este método los gases de secado circulan por tubos previamente calentados, su ventaja es que disminuye la posibilidad de contaminación del producto mientras que su desventaja radica en la pérdida

del poder calórico en el calentamiento previo de los tubos (baja eficiencia energética)

3.2.4 Tipos de Secadores

Existe una gran variedad en el diseño de secadores de productos, su nombre y clasificación varía dependiendo de características técnicas y del procedimiento que usen para conseguir el secado. Pero de manera general se pueden distinguir tres clases de secadores:

- Continuos
- Discontinuos
- Estacionarios

3.2.4.1 Secadores Continuos

Su característica principal es que el grano se carga y se descarga en forma continua o intermitente, permaneciendo constantemente llenas las secciones de secado y enfriamiento. Estas operaciones se efectúan en forma simultánea e ininterrumpida.

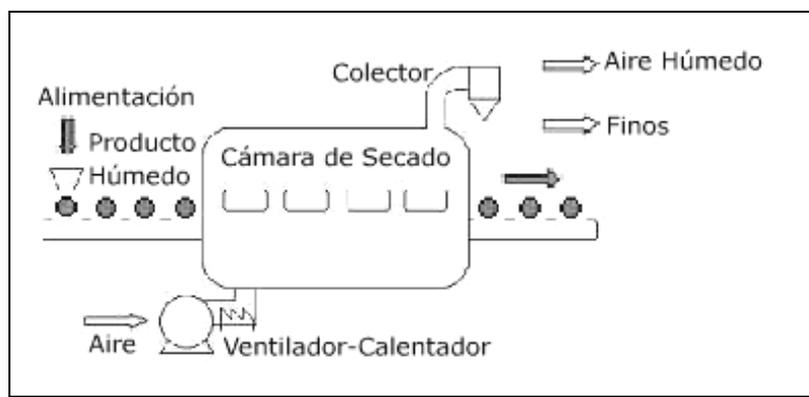


Figura 3.2 Visión esquemática de un secador continuo de aire caliente a presión atmosférica.

Existen de igual manera una gran variedad de secadores que usan esta técnica para el secado de productos agrícolas, en esta oportunidad distinguiremos dos clases:

3.2.4.1.1 Secador Rotatorio

Estos sistemas constan de un cilindro horizontal que rota alrededor de su eje principal, el producto húmedo ingresa por un extremo y se desplaza hacia delante por una combinación de la acción de la gravedad y el arreglo de baffles dentro del cilindro. A medida que este rota, el aire atraviesa al producto cuando cae.

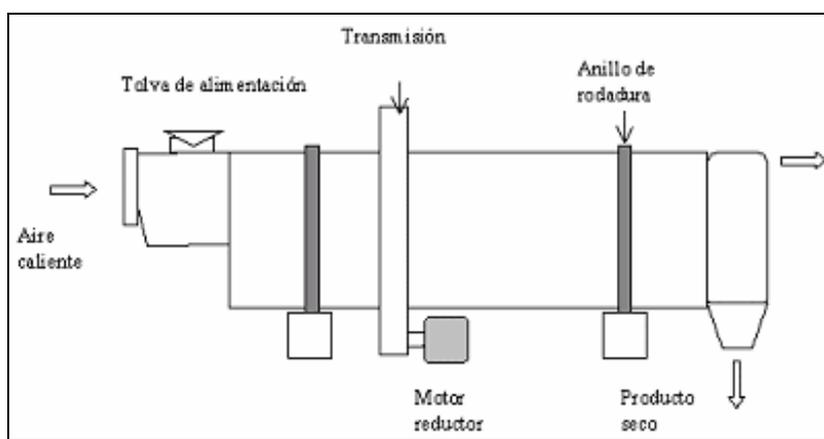


Figura 3.3 Secador rotatorio, flujo en paralelo.

Los alimentos que se secan en este equipo son generalmente polvos o granulados como el azúcar refinado, el almidón de maíz o el arroz paddy.

3.2.4.1.2 Secadores de Túnel

Los secadores de túnel son muy comunes en la deshidratación de alimentos, pueden configurarse en paralelo y contra corriente siendo la primera la más suave para el producto mientras que, en la segunda, el contacto del aire más caliente con el producto seco propicia el endurecimiento de su superficie.

Pueden alcanzar hasta 24m de longitud y consisten principalmente de una cabina en la que hay un mecanismo de rieles que mueven carros con producto a lo largo de ella.

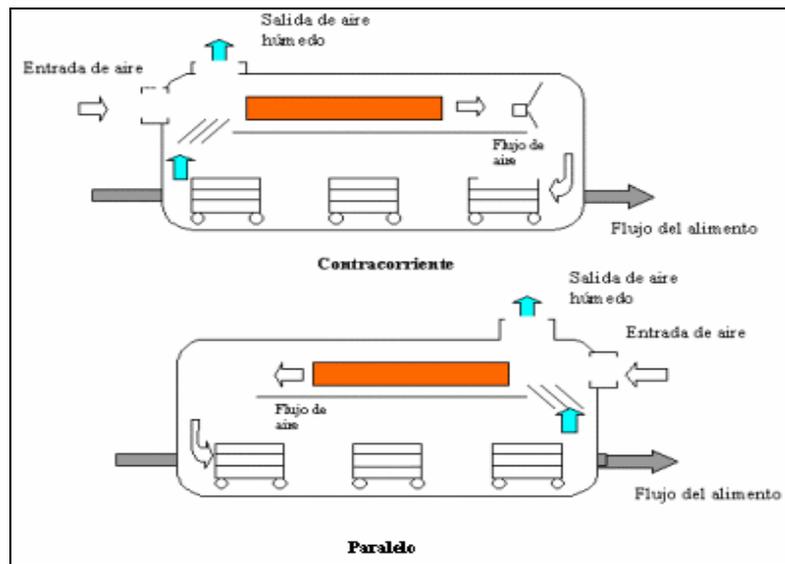


Figura 3.4 Secadores de túnel.

3.2.4.1.3 Secadores de Banda

Los sistemas que manejan este procedimiento se caracterizan porque el movimiento del producto se lo hace mediante una banda transportadora, la configuración más común es la de flujo transversal de aire.

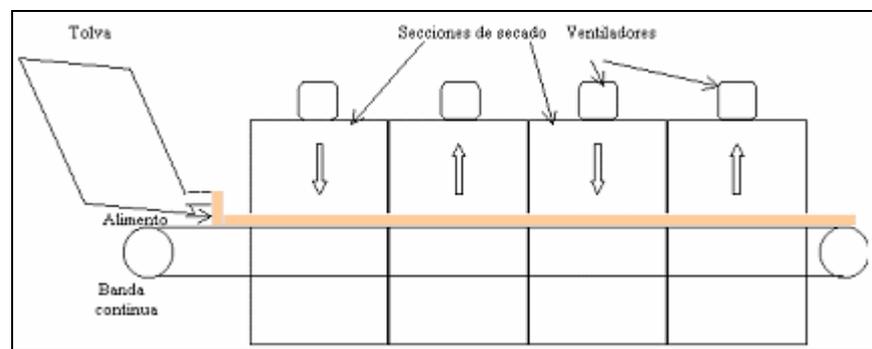


Figura 3.5 Secador de banda de flujo transversal.

3.2.4.2 Secadores Discontinuos

Se ubican principalmente dentro de este grupo dos tipos: el secador de Quemador y el secador de Bandejas.

3.2.4.2.1 Secador de Quemador

Estas máquinas son construcciones de dos cuerpos separados por una placa perforada. La parte superior es la sección de secado y mientras que en la parte

inferior se colocan los quemadores. Su aplicación principal es usada para granos y café principalmente.

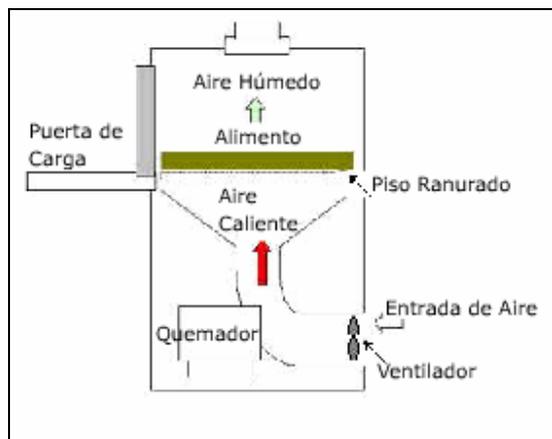


Figura 3.6 Configuración de un secador con quemador.

3.2.4.2.2 Secador de Bandejas

En estos sistemas el producto se coloca en bandejas que se ubican en un compartimiento aislado y expuesto únicamente a aire caliente y seco. La técnica de calentamiento puede ser directa o indirecta (serpentines a vapor, intercambiadores o resistencias eléctricas). Las velocidades de operación comunes en este sistema están entre 2 y 5m/s.

El funcionamiento de este secador se inicia cuando el aire se calienta y circula entre las bandejas en flujo cruzado como se indica en la Figura 3.7 o en flujo a través de bandejas perforadas (perpendicular al plano de ellas); parte del aire se recircula para un mejor aprovechamiento a costa de la eficiencia del secado.

El principal inconveniente que existe en los secadores de bandejas es la desuniformidad del secado entre bandejas de distintas ubicaciones. El alimento que va a ser secado debe ser colocado en capas delgadas (1 a 6cm. de espesor) por bandeja; puede estar en forma sólida (continua o discreta), viscoso o aún líquido.

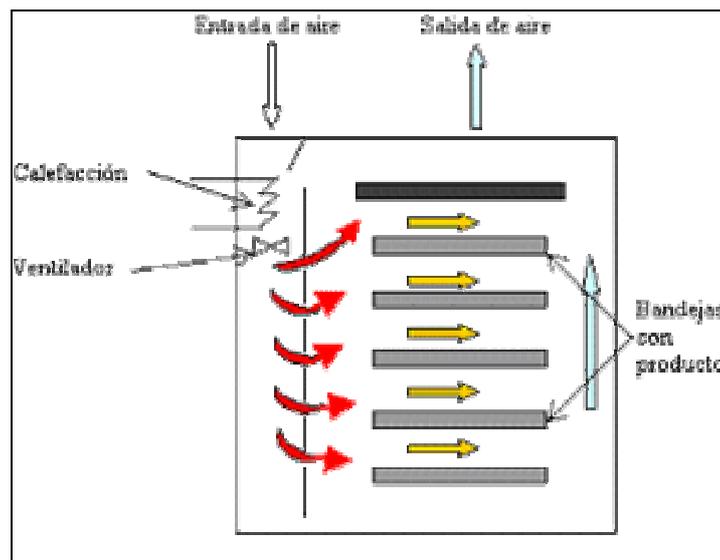


Figura 3.7 Secador de bandejas.

3.2.4.3 Secadores Estacionarios

Los secadores estacionarios se caracterizan principalmente porque el grano se encuentra en una superficie fija y lo que determina la característica del secado es el intercambio térmico entre el aire caliente, con sus características físicas (flujo, temperatura, velocidad, presión) y el producto.

Los modelos que mejor representan al grupo de los secadores estacionarios son el secador con aire movido por convección natural y el secador de lecho fijo, modelo seleccionado para la implementación del presente proyecto, razón por la cual se pondrá mayor énfasis en el análisis de este sistema.

3.2.4.3.1 Secador con aire movido por convección natural

Los secadores de aire movido por convección natural se caracterizan porque el aire es movido por la acción de las diferencias de presión, producidas por la diferencia de temperatura y humedad entre el aire de secado y el aire del medio ambiente.

El aprovechamiento de este fenómeno natural ha hecho que estos sistemas tengan gran éxito en países de África y Asia, ya que han visto beneficiados principalmente a agricultores de bajas producciones, con poca capacidad técnica y sin capital para adquirir equipos de secado.

Entre las principales ventajas que posee este modelo esta que se la puede construir con materiales característicos de la región, con personal poco especializado, no requiere de un ventilador para impulsar el aire, además de que utiliza como combustible leña o subproductos de la propiedad rural, tales como caña de maíz, corontas, paja y demás residuos agrícolas.

Un modelo de tales secadores que genero información sobre todo porque en su desempeño se obtuvieron inconvenientes, principalmente por la generación excesiva de gases contaminantes de combustión (Humo) que se inducía al producto, y de daños causados al mismo por calor excesivo, pues este queda directamente encima del fuego. Años posteriores este modelo sufrió algunas modificaciones lo cual conllevó al aparecimiento del secador "Brook" o de tipo T, Figura 3.8:

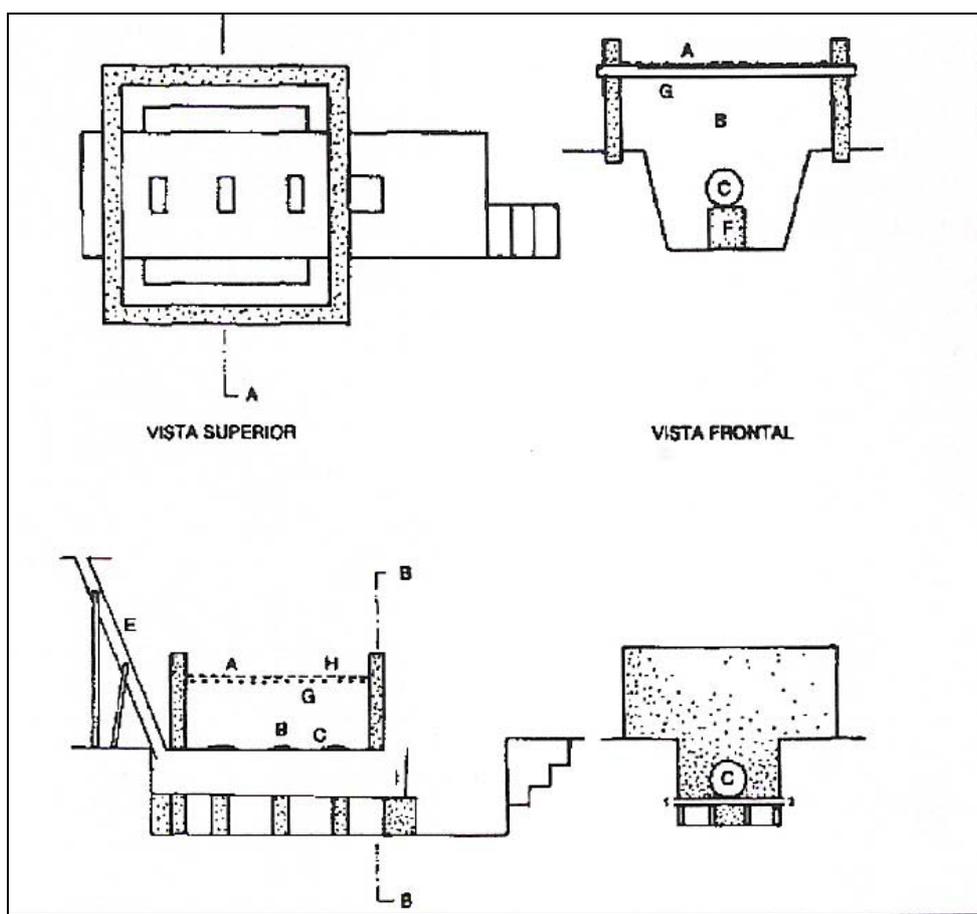


Figura 3.8 Esquema del secador movido por convección natural.

Sus componentes principales son:

- a) Cámara de secado.
- b) Cámara de uní-formación de la temperatura del aire caliente de secado.
- c) Quemador intercambiador de calor
- d) Chimenea para el escape de gases de combustión
- e) Entrada de aire
- f) Base de sustentación del piso perforado
- g) Piso perforado (malla de alambre galvanizado 1.5 mm x 15 m.)
- h) Puerta de entrada de la cámara de combustión

Las principales adaptaciones que se realizaron fueron:

- Adecuación de un intercambiador de calor;
- Se incremento la altura del piso perforado en rotación con el intercambiador, con el fin de obtener mayor uniformidad en la temperatura del aire de secado e impedir el deterioro del producto por acción del calor;
- Construcción de una chimenea para eliminación de los gases de combustión;
- Construcción de las paredes del secador en Adobe.

Otros investigadores propusieron la adaptación de intercambiadores de calor suplementarios, con el fin de aumentar la superficie de intercambio de calor, con lo que mejoraría la eficiencia térmica del secado (Figura 3.9).

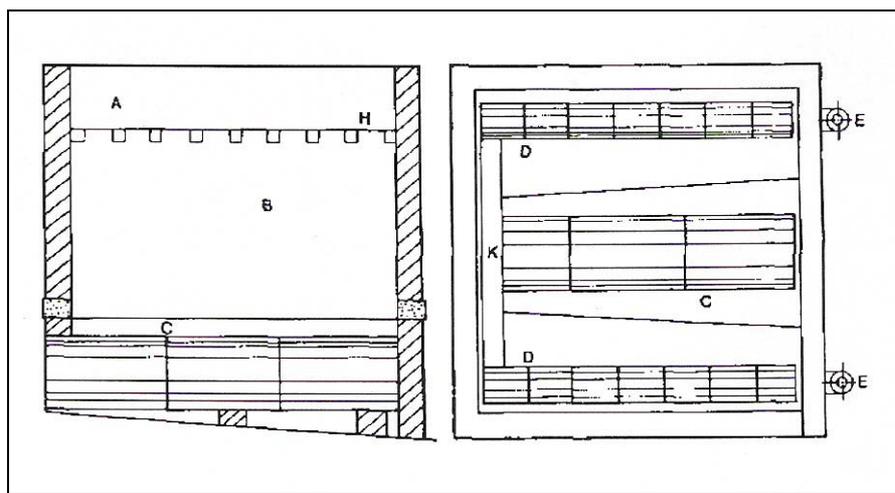


Figura 3.9 Adaptaciones al secador por convección natural.

- a) Cámara de secado.
- b) Cámara de uní-formación de la temperatura del aire caliente de secado.
- c) Quemador intercambiador de calor
- d) Intercambiadores de calor Adicionales.
- e) Chimenea para el escape de gases de combustión
- f) Base de sustentación del piso perforado
- g) Piso perforado (malla de alambre galvanizado 1.5 mm x 15 m.)
- h) Cámara de distribución de los gases de combustión.

Los parámetros que deben considerarse en el diseño y construcción de secadores del tipo Brook son:

- a) *Dimensiones de la entrada de aire.* La entrada de aire tiene un efecto significativo sobre el flujo de aire y se debe dimensionarla de manera que la velocidad del mismo en el punto de entrada sea inferior a 0.25m/s;
- b) *Espesor de la capa de granos:* El flujo de aire disminuye a medida que aumenta el espesor de la capa de granos;
- c) *Distancia entre el intercambiador de calor y el piso perforado que sostiene el producto:* El flujo de se comporta de manera lineal proporcional con la distancia entre el intercambiador y el piso perforado(se recomienda 0.8m)., y con la diferencia entre la temperatura del aire de secado y la del aire del medio ambiente ; y

- d) *Superficie de Intercambio de calor.* El aumento de esta superficie incrementa la eficiencia térmica del secador y reduce al mínimo la diferencia de temperatura del aire de secado bajo la capa de granos. Investigaciones complementarias señalan que la ubicación de una pirámide truncada sobre la cámara de secado (Figura 3.10) mejora significativamente el desempeño del secador en cuestión, pero dificulta la operación de revolver el producto.

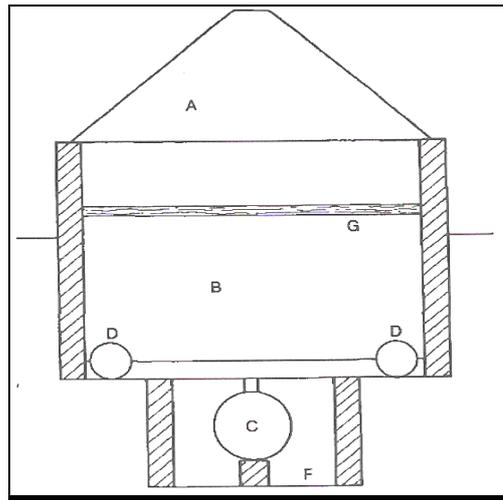


Figura 3.10 Parámetros en la construcción de secadores por convección.

3.2.4.3.2 Secador de Lecho fijo

Estos sistemas se componen básicamente de cuatro elementos principales los cuales se observan en la Figura 3.11:

- Sistema de calentamiento de aire.
- Ventilador
- Cámara de Distribución del aire o “plenum”
- Cámara de Secado

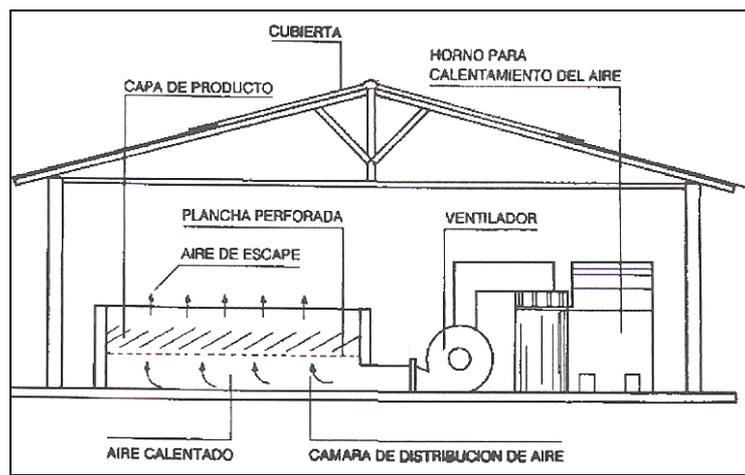


Figura 3.11 Secador de lecho fijo.

- a) *Sistema de Calentamiento de aire:* Debe estar dimensionado de tal forma que sea capaz de proporcionar aire caliente bajo dos condiciones:
 - Ser variable hasta los límites recomendados para cada producto.
 - Ser no contaminado por el aire que proviene de la fuente de calor.
- b) *Ventilador:* El ventilador generalmente es del tipo centrífugo, por la presión estática que se necesita para el correcto desempeño del sistema.
- c) *Cámara de Distribución de aire o "plenum":* Es la encargada de transformar la presión dinámica del aire en presión estática, lo que hace uniforme la distribución del aire dentro del secador.
- d) *Cámara de Secado:* El producto permanece estático en esta sección, mientras que el aire caliente, impulsado por el ventilador, pasa a través de la capa de producto, se produce el correspondiente intercambio térmico, y se reduce el contenido de humedad del grano.

Los secadores de capa fija, en la mayoría de los casos se proyectan para secar solamente una partida por día, ya que luego de culminado el proceso de secado el producto se enfría dentro del mismo secador, por lo cual se interrumpe el suministro de energía al sistema de calentamiento y se deja únicamente en actividad el ventilador.

Las variables que afectan al sistema de secado de partidas en lecho estacionario son:

- Espesor del lecho;
 - Contenido de Humedad inicial;
 - Flujo de aire;
 - Temperatura del aire; y
 - Tiempo de secado.
- a) *Espesor del lecho*, Idealmente debe estar entre 0.4 a 0.6 m cuando se trata de granos, los productos con alto contenido de humedad, como son los tubérculos, cortados en formas apropiadas para el secado, no se deben colocar en capas superiores a 0.4 m de espesor por la dificultad que representa moverlos. Las capas finas, lo mismo que el movimiento manual o mecánico del producto, sirven para prevenir el secado excesivo cerca de la entrada de aire y disminuir las diferencias de temperatura y humedad dentro del secador.
- b) *Contenido de humedad inicial*, Dependiendo del espesor del lecho, la diferencia entre la humedad del producto junto a la plancha perforada y la humedad del producto ubicada en la parte superior será excesiva y podría ocasionar serios riesgos al producto durante el almacenamiento, en especial si la bodega no tiene sistema de ventilación. Por tanto, para disminuir las diferencias de humedad, principalmente en lechos de mayor espesor y con temperaturas de aire más elevadas, es preciso revolver el producto a intervalos determinados.
- c) *Flujo de aire*, El flujo de aire influye, principalmente, en la tasa de secado y en la distribución de humedad, en relación con la profundidad de la capa de producto. Al aumentar el flujo de aire, aumenta la tasa de secado y disminuyen las irregularidades de humedad y temperatura en la capa de producto. El flujo de aire que normalmente se emplea en el secado de productos agrícolas en lecho fijo varía de 0.12 a 0.25 [m³/s].

- d) *Temperatura del Aire*, La temperatura de secado afecta directamente a la tasa de secado. Cuanto mayor sea la temperatura, mayor será la tasa de evaporación y la irregularidad del contenido final de humedad, si el producto no se revuelve. Con el aumento de la temperatura, la cantidad de granos con secado excesivo no varía mucho, pero la cantidad de granos con alto contenido de humedad es superior.
- e) *Tiempo de secado*, El tiempo de secado disminuye: en condiciones fijas de temperatura, espesor del lecho y flujo de aire, depende también de la humedad inicial y final del producto. Cuanto mayor sea el contenido inicial de humedad o menor sea el contenido final de humedad, mayor será el tiempo de secado.

Entre las principales ventajas que representa el uso del sistema de secado en capas fijas están:

- La capacidad del secador es variable;
- Dimensionamiento, construcción y funcionamiento relativamente simples;
- Menor inversión, en comparación con los secadores comerciales.

En la Tabla 3.1 aparecen algunas recomendaciones en cuanto a temperaturas, espesores del lecho e intervalos de tiempo para revolver el producto, para el secado en lecho fijo.

Recomendaciones para el secado de productos agrícolas en lecho fijo						
TEMPERATURA MÁXIMA DEL AIRE EN CONTACTO CON EL PRODUCTO DE ACUERDO CON SU USO FINAL				Espesor de la capa de producto (m)	Intervalo de tiempo para revolver el producto (h)	
					Semilla	Comercio
Productos	Semilla	Comercio	Alimentación animal			
Maní con cáscara	30	35	-	1.2-1.8	-	-
Arroz con cáscara	40	45	-	0.25-0.45	2	2
Avena	40	60	80	0.4-0.6	-	-
Café	-	-	-	0.4-0.5	-	2
Cebada	40	40	80	0.4-0.6	-	-
Fríjol en granel	40	45	-	0.4-0.5	-	-
Fríjol en rama.	40	45	-	0.6-1.0	-	2
Maíz desgranado.	40	55	80	0.4-0.6	-	2
Maíz en mazorca (sin cáscara)	40	55	80	1.5-6	-	2
Ralladura de Yuca	-	50	60	0.3-0.4	-	2
Soya	40	50	-	0.25-0.45	2	2
Sorgo	40	60	-	0.4-0.6	-	-
Trigo	40	60	80	0.4-0.6	-	-

Tabla 3.1 Recomendaciones para el secado de productos agrícolas en lecho fijo.

3.2.4.3.2.1 Dimensiones del secador

La capacidad del secador se determina normalmente para la producción máxima esperada. Las dimensiones óptimas de funcionamiento del mismo se pueden determinar matemáticamente mediante una simulación de secado, si se conocen los datos siguientes: tipo de producto y finalidad de su uso, contenidos de humedad inicial y final, y cantidad de producto que se va a secar. No obstante, en vista de la complejidad de dichos cálculos, se puede simplificar ese proceso si se conoce el valor de algunas variables del sistema. Así se consideran conocidos el espesor de la capa y el flujo de aire.

Luego, conociendo la masa de producto que se va a secar, por partida (m_p), el peso específico global del producto (p_p) y el espesor de la capa del producto (H), se calcula el área de la cámara de secado (A) con la ecuación:

$$A = \frac{m_p}{P_p H} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

El flujo de aire de secado (Q) se puede calcular en función del flujo de aire (Q_a), dado en $m^3/s.m$, y del área de la cámara de secado:

$$Q = Q_a A \quad \text{Ecuación 3.2}$$

La presión estática del ventilador se puede obtener sumando las pérdidas de carga del sistema. Estas pérdidas se producen por la disminución del aire al pasar por los conductos, ampliaciones, camas, válvulas y principalmente, al pasar a través de la capa de producto.

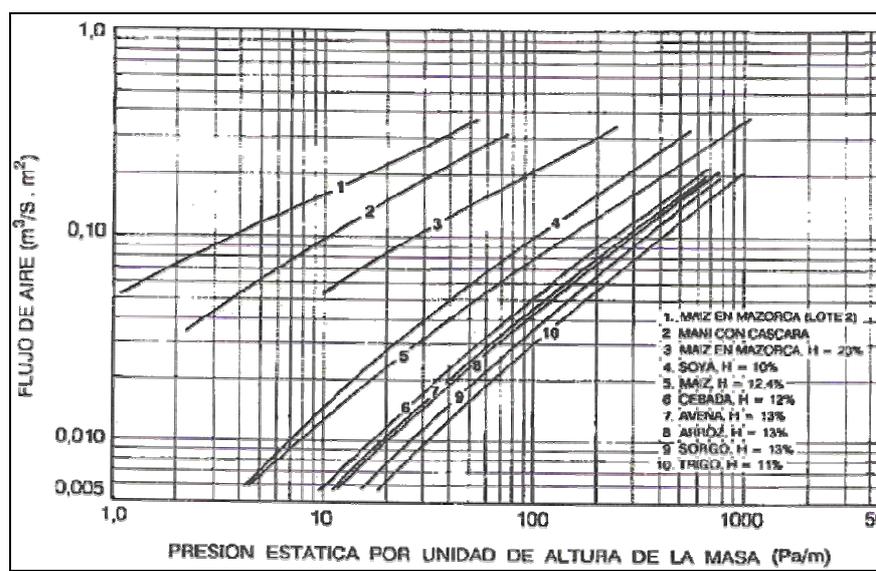


Figura 3.12 Resistencia de granos y semillas al paso del aire.

Las pérdidas de carga referentes al sistema de distribución del aire se pueden calcular por mecánica de fluidos. Las pérdidas de carga en virtud del paso del aire entre el producto se puede obtener con ayuda de gráficos técnicos, si se conoce el espesor de la capa de producto y el flujo de aire.

3.2.4.3.2.2 Construcción del secador

El secador debe estar construido en un lugar cubierto, de tal suerte que pueda funcionar inclusive en condiciones meteorológicas adversas. Debe cumplir con normas de seguridad que ayuden a salvaguardar la máquina, la producción agrícola, el personal de apoyo y el entorno.

Se pueden emplear diversos materiales en la construcción de conductos, cámaras de secado y distribución de aire. En el mercado existen silos metálicos apropiados para funcionar como cámaras de secado, con la ventaja de que al final de la cosecha sirven como silos de almacenamiento. Los secadores que emplean madera en su construcción también son viables, con la desventaja de que acarrearán un alto riesgo de incendio.

A continuación se detallarán ciertas recomendaciones de diseño respecto a algunos de los componentes del sistema:

- a) *Cámara de secado y cámara de distribución de aire.* La base de la cámara de secado debe ser metálica perforada, de modo que el área perforada sea por lo menos el 10% del área total, con el fin de evitar valores excesivos en la pérdida de carga. La cámara de secado puede ser rectangular o circular. Si la base es de forma rectangular debe tener una relación de 1.5 entre el lado mayor y el lado menor próximo. Si la base es de forma circular exige mayor cantidad de planchas para su construcción. Si la velocidad del aire que entra en la cámara de distribución es inferior a 1 m/s, la forma de la base deja de tener importancia para el buen desempeño. Con el fin de facilitar el mantenimiento de la base de la cámara de secado, y evitar elevadas pérdidas de carga, se puede utilizar una cámara de distribución de aire con una altura de 0.5m. Los agujeros de las planchas de metal perforadas deben ser tales que no permitan el paso del producto, teniendo en cuenta que el punto de mayor interés es un número mayor de orificios pequeños que pocos orificios de mayor diámetro.

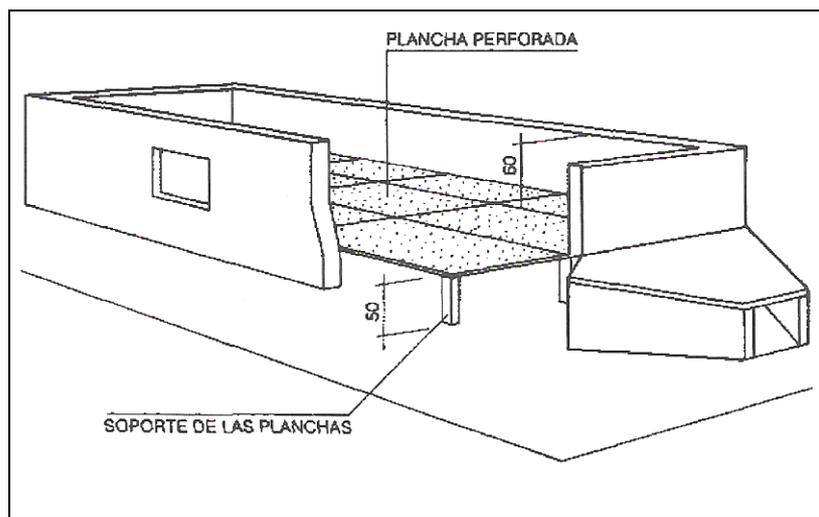


Figura 3.13 Cámara de secado y cámara de distribución del aire en el secador de lecho fijo.

La estructura, para soportar las planchas de metal perforadas y la masa del producto, puede usar distintos materiales como: albañilería y madera, hierro de construcción y perfiles metálicos. La cámara de secado debe contar con aberturas laterales para la descarga manual o mecánica del producto y un sistema de boquilla para facilitar el ensacado, en caso de ser necesario. La altura total del secado es de 1.2m aproximadamente, de los cuales 0.70m corresponden a la altura de la cámara de secado y 0.5m a la altura del “plenum”, Para facilitar la limpieza de la cámara de distribución de aire del secador, se puede construir la base de la cámara de secado de modo que una de las planchas perforadas se la pueda retirar.

b) Elemento de transición entre la cámara de distribución del aire y el ventilador.

El elemento de transición entre la cámara de distribución de aire y el ventilador sirve para uniformar el flujo de aire en el secador, el ángulo de abertura del elemento de transición, en relación con el eje de simetría del secador, debe ser mayor a 15° para que la pérdida de carga sea despreciable (Figura 3.14). Así la longitud de la transición dependerá del ángulo y de la disponibilidad de espacio para la construcción del secador. Los conductos de conexión del ventilador con el sistema de calentamiento deben tener dimensiones suficientes para que la velocidad del aire sea inferior a 5 m/s, es decir, 1m^2 de área de la sección del conducto por cada $5\text{m}^3/\text{s}$ de aire.

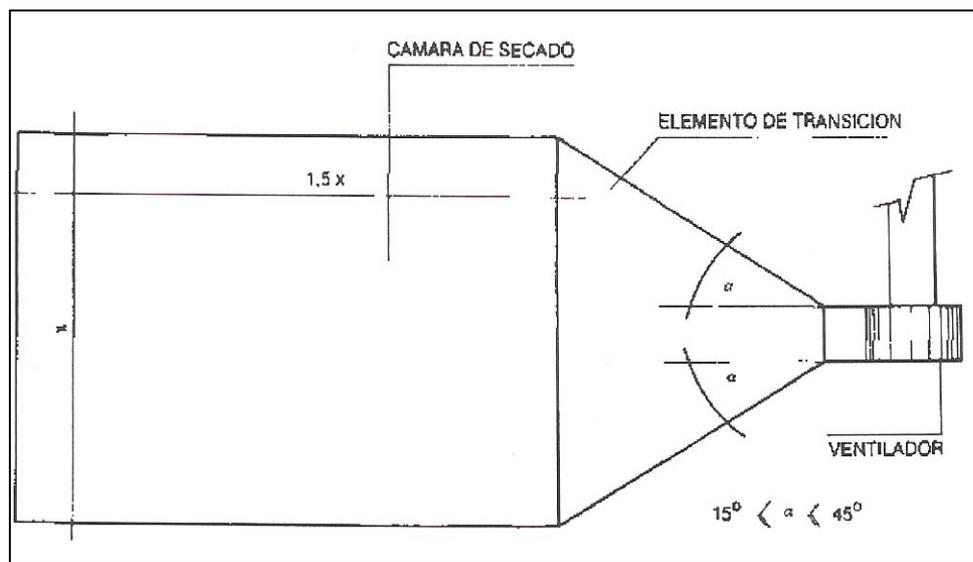


Figura 3.14 Ángulo de apertura del elemento de transición, entre la cámara de distribución del aire y el ventilador del secador de lecho fijo.

3.2.4.3.2.3 Funcionamiento y Mantenimiento del secador de Lecho Fijo

Con el objetivo de obtener mejores resultados con el uso del secador de capa fija, se debe observar las siguientes recomendaciones:

- Las temperaturas y los espesores de la capa, para varios productos, aparecen en la Tabla 3.1. El primer parámetro depende del fin o propósito que se le dará al producto.
- La superficie de la capa de producto debe ser nivelado con un rastrillo de madera, luego de cargar al secador, para evitar la irregularidad en el flujo de aire.
- Se debe evitar al máximo la compactación del producto.
- Se debe revolver el producto a intervalos predeterminados, para evitar la irregularidad en la humedad final del producto, principalmente con temperaturas superiores a 45°C . Para esto el operador debe desconectar el ventilador y mover el producto con una pala o rastrillo de madera.
- La culminación en la operación de secado depende de varios factores, tales como espesor de la capa, humedades inicial y final del producto, flujo de aire y temperatura de secado; el operador deberá contar con equipos capaces de

determinar el contenido de humedad final del producto. Si el producto está excesivamente seco, el productor perderá su inversión al comercializar sobre la base del peso húmedo, si este estuviese demasiado húmedo, quedará expuesto a deterioro durante su almacenamiento.

- f) Al término del secado, se debe interrumpir el calentamiento del aire o abrir todas las entradas de aire frío en la fuente de calor y dejar el ventilador conectado hasta que la masa de granos alcance una temperatura próxima a la del ambiente. En los secadores con horno de albañilería se debe interrumpir el abastecimiento de leña cuando el contenido medio de humedad del producto llegue alrededor de uno a dos puntos, en porcentaje de humedad, por encima del valor recomendado para almacenarlo, y mantener el ventilador conectado haciendo pasar todo el aire por el horno. De este modo, se aprovecha la energía almacenada en las paredes de las tuberías y del horno para terminar el secado del producto, evitando choques térmicos de enfriamiento.
- g) Se debe limpiar el secador luego de secar cada partida, retirando los residuos de producto que queden sobre la plancha perforada.

3.3 CAPACIDAD DE SECADO Y ENFRIAMIENTO

3.3.1 Capacidad de secado

La expresión "Capacidad de secado" tiene una importancia fundamental, ya que es el parámetro más utilizado en el desempeño de las secadoras. Interviene en casi todos los cálculos, en los proyectos y en los costos de secado de granos.

En general, la capacidad de secado se expresa en unidades comunes como toneladas o quintales por hora, ya sea de grano seco o de grano húmedo. Expresar la capacidad de una secadora solamente en t/hora o q/hora puede llevar a cierta confusión, pues en realidad, una secadora no tiene una sola capacidad horaria, sino varias, que dependen de varios factores, como la humedad inicial del grano, la temperatura de secado y otros.

Es más lógico expresar la capacidad en quintales por hora y por punto de humedad, valor que se forma de multiplicar la capacidad en q/hora que indica el

fabricante por los puntos de humedad que también señala el mismo. Así, una secadora de 30t/h (300q/h) para secar maíz de 17 a 13,5% (3,5 puntos), tendrá una capacidad de:

$$300\text{q/h} \times 3,5 \text{ puntos} = 1\ 050\text{quintales-punto/hora}$$

Que se abrevia: 1 050qp/h

Conocido este valor es fácil calcular la capacidad horaria que tendrá la secadora con diferentes humedades iniciales. Si, por ejemplo, la máquina anterior debiera secar maíz de 23% a 13,5% de humedad (9,5 puntos de diferencia), la capacidad ahora sería:

$$1050\text{qp/h} / 9,5\text{p} = 11\text{q/h} = 11,1\text{t/h}$$

La humedad inicial del grano es entonces, el dato que decide la capacidad horaria de la secadora. Esta información no suele estar bien aclarada en los folletos o catálogos de los fabricantes, o a veces se encuentran diferencias entre los valores de unos y otros. Sin embargo, estos datos son muy importantes para los usuarios por razones obvias.

3.3.2 Capacidad de Enfriamiento

La capacidad de enfriamiento de una secadora tiene importancia, pues hay que tener presente que durante el periodo de enfriado los granos continúan secándose, aunque en menor proporción. Se calcula que puede evaporarse entre un 0,5 a 0,8% de humedad en esta zona. Esta cantidad es mayor cuanto mayor sea la temperatura del grano y menor sea el caudal de aire de enfriado. Las reglamentaciones vigentes exigen que la temperatura del grano que sale de la secadora no supere en 5°C la temperatura del aire ambiente, aunque este valor es relativo.

Se precisan por lo menos unos 30 a 40 minutos en ciertas secadoras en la sección de enfriamiento para enfriar el grano; si el secado dura menos, entonces el enfriamiento será insuficiente. En algunas secadoras se podrá cambiar, ante esta situación, la posición de las compuertas o divisores de distribución del aire caliente y del aire frío, dándole más volumen a este último. En otros casos se

deberá reducir la velocidad del proceso disminuyendo la descarga, pero al mismo tiempo habrá que disminuir la temperatura del aire de secado regulando el quemador.

Otra solución consiste en derivar ese grano demasiado caliente a un silo con aireación para enfriarlo, aprovechando las horas nocturnas, o si no volverlo a pasar por la secadora con los quemadores apagados. Al principio se producirá una cierta condensación de humedad, que deberá ser eliminada convenientemente.

La temperatura del grano que sale de la secadora es mayor durante las horas más cálidas del día que durante las horas nocturnas. Una secadora trabajando en las horas de calor con una temperatura exterior de 30°C, por ejemplo, puede dejar el grano con 35°C a la salida, pero en las horas de la noche, el grano puede salir a 20°C - 25°C. En el primer caso, se deberá tener mucho cuidado en el almacenamiento, y deberá ser enfriado con aireación nocturna. Sin embargo, el rendimiento de la secadora será bastante superior en las horas de calor comparado con las horas nocturnas, pues el aire tiene más temperatura y menos humedad relativa.

Del mismo modo, una secadora trabajando en zonas de clima cálido tendrá mayor rendimiento que la misma máquina en zonas de clima frío. Si la temperatura es muy cálida, no se podrá enfriar bien el grano, por lo cual, dentro de lo posible, convendrá realizar el secado durante la noche. Por el contrario, en regiones donde priman temperaturas exteriores muy frías, en las que exista el peligro de congelamiento de los granos, hay que permitir un leve calentamiento del aire al ingresar en la cámara de enfriamiento.

3.4 OPTIMIZACIÓN DE SECADORES

Bajo esta denominación se engloba a todo aquello que se puede realizar para mejorar el funcionamiento o desempeño de las secadoras. Este mejoramiento puede ser encarado desde dos aspectos: uno es aprovechar al máximo las posibilidades que ofrece la máquina tal cual ha sido fabricada, y el otro es efectuar distintas modificaciones o reformas en su diseño para modernizarla o perfeccionarla.

El primer aspecto será tratado al principio, y se refiere a las posibilidades que ofrece la secadora en su forma original, y que suelen estar indicadas no siempre en los manuales de instrucciones y manejo provistos por los fabricantes.

3.4.1 Temperatura y caudal del aire de secado

Cuando se desea aumentar el rendimiento de una secadora, entendiendo como tal el incremento de su capacidad de secado y de su eficiencia, tiene en general dos maneras:

- Aumentar la temperatura del aire de secado
- Aumentar el caudal de aire.

Comúnmente, pueden obtenerse las dos simultáneamente, siempre que se tengan en cuenta las recomendaciones sobre el deterioro de la calidad del grano.

El aumento de la temperatura del aire acelera el proceso de secado, pues reduce la humedad relativa del aire que adquiere, entonces, existe una gran capacidad secante. Es el argumento más empleado por los encargados de secadoras cuando se acumula gran cantidad, volúmenes de grano húmedo en las recepciones de la planta. Este aumento se consigue con una mayor inyección de combustible al quemador.

El aire se usa para dos objetivos en las secadoras. Existe un aire primario, que se emplea para la combustión. Y un aire secundario que es el encargado de secar y enfriar el grano. El aire caliente juega un doble rol, por un lado transporta calor hacia los granos, y por el otro arrastra vapor de agua hacia afuera, es decir, realiza una transferencia de calor y masa.

Experimentos en una secadora de caballetes arrojaron que al aumentar la temperatura del aire de secado de 60 a 120°C, se redujo el consumo específico de energía de 1.140kcal/kg a 1.025kcal/kg, y se aumentó la capacidad de secado en 155%, aunque también aumentó la temperatura del grano. Experimentos ofrecieron como resultado que el trabajo a altas temperaturas puede reducir el caudal, lo que disminuye la potencia necesaria en los ventiladores, y a su vez restringe la contaminación exterior.

De igual manera se realizaron experimentaciones con el incremento del caudal de aire en tres veces, esto produjo que el consumo específico de energía aumente en un 31%, y que la capacidad de secado crezca un 130%, aunque este último incremento fue proporcionalmente menor que el incremento de energía. La eficiencia es menor debido a las pérdidas de calor en el aire usado cuando el caudal aumenta.

Por el contrario, un caudal más débil reduciría el consumo de energía, pero se prolongaría el tiempo de secado. Esta reducción en el consumo se debe a una mejor saturación del aire usado. Para compensar la pérdida de capacidad de secado, además de aumentar la temperatura del aire, se debería aumentar el volumen de grano en toda la máquina.

3.4.2 Regulación del aire

Además de las indicaciones anteriores, es necesario regular el caudal cuando se secan granos de menor tamaño o más livianos, por el peligro de arrastrar producto con el aire usado. Este problema no existe en los sistemas que realizan el secado del producto en cámaras cerradas.

Los sistemas de regulación existen de varios tipos:

- Persianas destinadas a obstruir parcialmente la boca de aspiración del ventilador,
- De cambio de poleas en la transmisión del motor al ventilador (si fuese de este tipo),
- De paletas direccionables delante de la boca de aspiración del ventilador,
- Variadores electrónicos de velocidad a frecuencia variable y,
- Pequeñas persianas móviles que ciegan la entrada de aire caliente.

Los caudales de aire se expresan en m^3 por minuto y varían, para las secadoras comerciales, entre 400 y 5 000 m^3 /min, de acuerdo al tamaño de la máquina y potencia de los ventiladores. Los caudales específicos de aire se expresan en m^3 /min y por tonelada o por m^3 de grano, y se obtienen dividiendo los

caudales en m³/min por el volumen de grano en proceso; también se pueden indicar en m³/hora o por m³ por t.

Es conveniente que el motor que acciona al ventilador tenga una potencia nominal alrededor de un 30% superior a la potencia requerida por el ventilador, para que este posea una reserva suficiente de potencia.

3.4.3 Recuperación de Calor

En la mayoría de los sistemas de secado el aire que ya ha atravesado la masa de producto se expulsa hacia el exterior. Parte de este aire está caliente (unos 50°C) y poco saturado de humedad. Si fuera recirculado, es decir, si se lo utilizara nuevamente para aprovechar ese calor residual y esa escasa saturación incorporándolo a la corriente de aire que ingresa al ventilador o al quemador, o empleándolo para precalentar los granos húmedos, se puede conseguir una apreciable reducción del consumo energético, pues se elimina gran parte de la instauración de humedad del aire, permitiendo que éste sea expulsado bien saturado. En otras palabras más técnicas, la secadora se hace más eficiente térmicamente.

Se recomienda emplear mayores temperaturas del aire de secado en la primera etapa del proceso, donde el grano está más húmedo, y menores temperaturas en la segunda etapa, cuando este se encuentra más seco, refiriéndose en especial al maíz.

Cuando el grano está húmedo puede soportar un aire más caliente, pues de esa manera se produce una pérdida de humedad más rápida, y el grano no se calentará demasiado, ya que al evaporar agua se produce una absorción de calor y por ende un mayor enfriamiento. Por el contrario, cuando el grano ha perdido buena parte de su humedad, ya no existe tanta evaporación de agua, y el grano puede calentarse excesivamente con el consiguiente deterioro de su calidad.

El uso de esas temperaturas diferenciales otorga también un mejoramiento del rendimiento térmico de la secadora, que puede estar alrededor del 15%.

3.4.4 Uniformidad y estabilidad de las temperaturas.

Al hablar de temperaturas diferenciales, debe hacerse notar que si bien en una sección dada de la secadora puede convenir una temperatura menor que en otra sección, es fundamental que en un plano horizontal las temperaturas sean uniformes.

En secadoras convencionales, de un diseño no muy adecuado, se encuentran sectores en donde la temperatura puede llegar a 90°C, mientras que otros muy cercanos, en sentido horizontal, alcanzan a 140°C; sin embargo dicha secadora puede tener un termómetro que indica una temperatura "promedio" de 100°C.

Hay que mencionar, también, que existen secadoras que tienen varios quemadores a distintas alturas de la torre de secado, y que cada uno suministra una temperatura determinada y uniforme, que van descendiendo desde arriba hacia abajo, situación que favorece una mejor eficiencia de la máquina.

En ciertas secadoras sucede el siguiente problema: el aire exterior, cuando se encuentra con los gases muy calientes de la combustión, no tiene suficiente tiempo ni espacio para mezclarse uniformemente con dichos gases, de manera que al penetrar en la masa de granos, dicha mezcla tendrá diferentes temperaturas en distintos lugares, lo cual, por supuesto, no origina un secado uniforme. Esta situación puede mejorarse instalando una cámara de homogeneización que a su vez puede servir para conducir el aire caliente hacia la parte superior, como se aconseja.

Del mismo modo, las velocidades débiles del aire no son capaces de crear las necesarias turbulencias para asegurar una rápida mezcla de los filetes de aire a diferentes temperaturas, estado que se crea por fallas en el diseño de la secadora.

3.4.5 Calor latente del vapor de agua.

El aire usado en el proceso de secado es, en definitiva, una mezcla de gases, de aire caliente con una cierta cantidad de vapor de agua. Cuando se recicla el aire usado sólo se aprovecha el calor que lleva, pero no se utiliza el calor latente que porta el vapor de agua. Debe recordarse que el calor necesario para la

evaporación del agua constituye el rubro de mayor consumo en el requerimiento energético.

Este calor latente sólo puede ser recuperado por una condensación, es decir, licuarlo para obtener calor que pueda emplearse para calentar aire exterior antes de ingresar a la secadora. Para ello se requiere una batería de condensación, o el empleo de una bomba de calor, métodos que, sin embargo, no son todavía económicamente convenientes.

3.4.6 Precalementamiento

Otro procedimiento en la recuperación de calor es el precalementamiento del grano antes de entrar a la secadora, o el precalementamiento del aire exterior antes de entrar al quemador.

Se sugiere que el grano este en un predepósito especial, se conduzca el aire usado en el secado por medio de conductos apropiados, y se lo haga atravesar por la masa de éste. Se debe tomar en cuenta que el aire no debe estar muy saturado ni el grano muy frío, ya que se condensará la humedad sobre el producto y se requerirá energía para extraerla. En esta situación se ganará muy poca eficiencia.

El precalementamiento del grano húmedo es conveniente para mejorar la eficiencia del proceso. Esto se debe a que el grano precalementado favorece la uniformidad de humedades dentro del mismo, aportando así a una más rápida evaporación de la humedad. Afirma que se consigue mayor eficacia cuando el precalementamiento se produce por un flujo concurrente de aire caliente y grano frío en la parte superior de la secadora⁸.

Existen sistemas que utilizan un intercambiador ubicado antes del generador de aire caliente, donde el aire usado se calienta a unos 50°C, y sirve para elevar la temperatura del aire frío exterior. Es posible elevar así unos 20°C la temperatura del aire extrínseco. En estos sistemas siempre debe tenerse en

⁸ Toftdahl Olesen (1987)

cuenta un balance rentable, permitiendo de esta manera que la economía de energía compense los costos excesivos de inversión.

3.4.7 Aislamiento de paredes

Dentro de las causas que originan pérdidas de calor en las secadoras se encuentran los fenómenos de convección y radiación a través de las paredes. Este problema se presenta con mayor virulencia en países de clima frío, lo cuales, en su mayoría, producen secadoras con capas aislantes en las partes más expuestas. Experiencias realizadas señalan una pérdida total en el orden del 6%. La velocidad del viento tiene buena importancia en estos valores, pero hay que tener en cuenta que no todas las caras de la máquina están expuestas al efecto al viento en forma similar.

Los materiales aislantes que pueden usarse son varios: capas de lana de vidrio, de 3 a 6cm de espesor, espuma de poliuretano, amianto, capa de aire estático, etc.

Los componentes aislados en las pruebas fueron las cámaras de alimentación y homogeneización del aire caliente, los autores manifestaron que la inversión se podía recuperar en 900 horas de trabajo de la secadora.

3.4.8 Módulos de Secado

Una innovación tecnológica que se ha desarrollado en máquinas actuales, es la construcción de módulos independientes, de igual tamaño, que se puedan colocar uno encima del otro, para aumentar el volumen de la máquina y, en consecuencia, su capacidad horaria.

Pero también puede existir otro tipo de combinación de módulos, donde se acumulan secadoras en forma lateral en un mismo gran cuerpo, con lo que se consigue una gran capacidad de trabajo.

3.5 MANEJO DE SECADORES

3.5.1 Preparación de la secadora y su limpieza

Al empezar la temporada la secadora debe estar lista para trabajar, esto significa en primer lugar la limpieza total de la torre de secado. De no ser así, es

posible observar bajos rendimientos de la máquina, debido a menores cantidades de agua evaporadas en el aire usado. Una correcta limpieza, además, reduce mucho los riesgos de daño a la mercadería y los peligros de incendio.

La mayoría de problemas se deben a la acumulación en las columnas y caballetes de elementos gruesos de algunos centímetros de espesor constituidos por materiales rígidos como pedazos de hojas, de paja, de marlos, etc., que al aglomerarse, forman tapones que impiden el escurrimiento normal del grano, y que constituyen pasajes preferenciales para el aire caliente.

Es importante que la secadora tenga fáciles accesos a su interior a fin de poder efectuar los periódicos trabajos de limpieza y mantenimiento. Se aconseja que posea escaleras seguras para acceder a los diferentes lugares de la máquina.

También adquiere real importancia tener un buen programa de mantenimiento y reparaciones en época de trabajo. Si no fuera posible contar con todo el personal especializado para dichas tareas (electricistas, mecánicos, expertos en quemadores, etc.) se debe tener la seguridad de hacer arreglos previos para que aquellos puedan acudir de inmediato. Una secadora detenida muchas horas puede significar una gran pérdida de dinero.

Antes de ponerla en marcha debe verificarse el libre funcionamiento de los distintos mecanismos, como los ventiladores (haciéndolos girar varias vueltas para asegurarse que no haya roces), el descargador y otras partes móviles. Deben lubricarse todos los alemites y movimientos empleando las grasas y aceites que se recomiendan, para lo cual hay que consultar los respectivos manuales de los fabricantes.

Igualmente, la limpieza de los filtros, el estado del quemador y de la cámara de combustión o del horno resultan primordiales tareas previas a la iniciación del trabajo de la secadora.

3.5.2 Puesta en marcha de la secadora

Al comenzar el secado con la máquina llena de grano húmedo, el tercio inferior sale húmedo y otro tercio semi húmedo, dichos granos deben ser retransportados a la secadora.

Un mejor procedimiento es llenar la máquina con grano seco (dejarla llena el día anterior) para que de esta manera, una vez iniciado el proceso, los granos desciendan paulatinamente, dando lugar a que los granos húmedos que entrarán con posterioridad reciban el proceso de secado y enfriamiento y salgan adecuadamente secos.

En los manuales de cada secadora se encuentran las instrucciones para su puesta en marcha; en la mayoría de las máquinas, en primer lugar se prenden los ventiladores y posteriormente el quemador. Luego de unos 15-20 minutos de funcionamiento para permitir el calentamiento de toda la masa de grano, cámaras, torre, etc., se puede accionar el sistema de descarga, de modo de conseguir el paso de la cantidad deseada de granos.

Como existen tipos diferentes de secadoras, cada una tiene su método particular de puesta en marcha, por lo que se recomienda muy expresamente seguir las instrucciones del manual.

Siempre que sea posible la secadora debe funcionar sin interrupciones. Las detenciones repetidas pueden provocar la compactación del grano y resulta luego difícil ponerla nuevamente en movimiento y además afectan la eficiencia general de la máquina.

Por estas razones es necesario contar con una capacidad de almacenamiento de grano húmedo suficiente para mantener la secadora en funcionamiento sin interrupciones. Es trascendente que la máquina trabaje siempre llena, pues si no lo está su funcionamiento se resiente.

Las secadoras continuas pueden demorar hasta dos horas en alcanzar su régimen de trabajo normal. Algunas máquinas, al principio pueden producir nubes de humo blanco porque todavía la cámara de combustión o el horno están fríos, estas desaparecen cuando se ha alcanzado la temperatura suficiente.

Al finalizar el secado se debe apagar el quemador dejando los ventiladores funcionando unos 45 a 60 minutos, sobre todo si el grano va a permanecer en la secadora, con el fin de conservar el grano parcialmente seco en las distintas zonas.

3.5.3 Controles de seguridad

Además de las recomendaciones ya explicadas anteriormente se pueden mencionar otras como las siguientes:

Corte automático del suministro de calor si el movimiento del aire se detiene.

Válvula manual, de accionamiento rápido, ubicada en la línea de provisión de combustible, antes de la secadora y fuera de todo recinto o edificio.

Corte automático de combustible gaseoso a los pilotos en caso de que estos se apaguen.

Cuando se emplean combustibles gaseosos, un control debe permitir una preventilación de la cámara del plenum, antes del encendido

Los controles eléctricos deben estar separados de los controles de gas; estos últimos, como válvulas, filtros, válvulas de seguridad, no deben estar ubicados en la caja de controles eléctricos.

Los motores eléctricos deben estar protegidos, para evitar sobrecargas por fusibles, interruptores, relés térmicos o dispositivos similares.

El diseño y la fabricación de secadoras deben estar orientados hacia la seguridad de los operarios. Sin embargo, la naturaleza de las secadoras teniendo quemadores, equipo eléctrico de alto voltaje y elementos rotativos de gran velocidad, siempre presentan un peligro al personal, por lo que todas las medidas de seguridad deben ser atentamente cumplidas.

3.5.4 Los incendios

Cuando Francia, el país quizás líder en cuanto al diseño de secadoras modernas, construyó máquinas con recuperación de calor, temperaturas diferenciales y otros adelantos y al mismo tiempo comenzó a eliminar el intercambiador de calor, se notó un aumento considerable en los incendios de secadoras.

El hecho de enviar los gases de combustión directamente al aire de secado es una causa de la iniciación de los incendios. Las partículas que pueden llevar los

gases como basura, polvo y grasas que vuelan cerca de las secadoras y que absorben los ventiladores, se pueden inflamar y comenzar el fuego en el interior de la máquina.

Por esta razón hubo necesidad de agregar filtros que detuviesen las impurezas que arrastraba el aire usado que ya había atravesado el grano. Al respecto hay que recalcar que si se obstruyen los filtros, ellos mismos pueden transformarse en generadores de incendios.

Además se advirtió una tendencia a alejar la secadora del resto de las instalaciones de la planta de acopio, por lo menos unos 5 a 6 metros.

Posteriormente se han difundido los sensores que detectan elevaciones de temperatura en el aire usado y en el interior de la máquina. A medida que las secadoras son de mayor tamaño, las pérdidas por incendio se hacen más cuantiosas, no sólo por los daños físicos a reparar, sino también por el lucro cesante de una máquina detenida y los gastos de transporte para el tratamiento de los granos en otro centro de acopio.

3.5.5 Causas que favorecen los siniestros

Haciendo abstracción de los problemas ya mencionados, se pueden destacar las siguientes causas, en orden de prioridad:

- Falta de mantenimiento y limpieza del interior de la cámara de secado. A veces ello se produce por negligencia y en otras porque existen lugares de la máquina que son inaccesibles para los operarios de limpieza. En algunos sitios se produce acumulación de restos vegetales y basura, que se recalientan y auto-inflaman. En ocasiones, cuando se detiene la secadora por tiempo prolongado sin haberla vaciado previamente, al volver a funcionar se originan atascamientos que pueden iniciar el fuego.
- Ingreso a la secadora de grano muy sucio con restos vegetales, por la falta de limpieza previa de los granos. Estas impurezas se deshidratan completamente y se pueden inflamar con facilidad.

- Mal funcionamiento del quemador, por defectuosa pulverización del combustible debido a suciedad, falta de mantenimiento o regulación incorrecta de la temperatura.
- Producción de compuestos inflamables por elevadas temperaturas en granos oleaginosos especialmente, o por fermentaciones que originan alcoholes, ácidos grasos volátiles fácilmente combustibles.
- Aspiración de impurezas por los ventiladores, como se comentó antes.
- Corrosión excesiva de la cámara de combustión o del horno, que puede ocasionar partículas metálicas incandescentes.
- Alargamiento de la llama por bruscas variaciones del caudal de aire, por problemas del ventilador, cierre accidental de persianas, etc., llama que puede alcanzar hasta las columnas.

3.5.6 Medidas para evitar los incendios

- Realizar la limpieza previa del grano húmedo.
- Realizar la limpieza periódica de la secadora, del quemador y otras partes.
- Realizar un buen control en las temperaturas del aire de secado, y del aire usado que sale de la máquina.
- Trabajar con bajas temperaturas cuando se sequen granos peligrosos, como girasol y sorgo uranífero.
- Colocar mallas filtrantes en las bocas de los ventiladores o abertura de aspiración, y utilizar filtros de aire en secadoras con recirculación de calor.

3.5.7 Acciones a encarar en caso de incendio

- Detener todos los movimientos de grano, apagar los quemadores y los ventiladores.
- Bloquear todas las entradas de aire, como se dijo.

- En la mayoría de los casos no conviene descargar rápidamente las cámaras y columnas de secado, pues se puede agravar el problema al aumentar la emisión de aire y la provisión respectiva de oxígeno.
- Atacar los focos de incendio con extinguidores y mangueras de agua. En general, es mucho mejor arrojar el agua desde arriba de la máquina. Si se hace desde abajo, abriendo las puertas de la tolva inferior, se puede favorecer la propagación del fuego.

Ha de advertirse que todas estas acciones deben ser llevadas a cabo por personal de la planta, el que debe estar previamente capacitado para ello. Es muy conveniente instruir a todas las personas sobre estas medidas, para que sepan actuar con rapidez ante un incendio y no sean presas del pánico. Si el agravamiento requiere la intervención de los bomberos, hay que pensar que ello producirá importantes daños, además de la paralización de las instalaciones y de las pérdidas resultantes.

3.6 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROTOTIPO DE IMPLEMENTACIÓN

El prototipo de implementación esta basado en el diseño de secadores de lecho fijo y su estudio técnico se realizó en el apartado dos de este mismo capítulo, en este ítem se realizará una descripción general del ejemplar de ejecución con sus componentes y características técnicas.

En primera instancia se presenta el modelo en diagrama de bloques, su objetivo es el de comprender su operación global.

Básicamente el primer subsistema se basa en la cámara de combustión, la cual recibe la alimentación de oxígeno y combustible necesario para que la combustión pueda mantenerse en un entorno cerrado, adicional a esto se encuentra la chimenea de escape de gases de combustión la cual envía estos hacia el medio ambiente.

Complementariamente se dispone de otro subsistema el cual capta aire a temperatura ambiente por medio de un ventilador y lo transfiere a un sistema de tuberías en forma de S, los cuales se encuentran dentro de la chimenea de escape de gases de combustión, con el fin de producir el calentamiento del aire

que finalmente será el que circule por la cámara de secado y a través del producto.

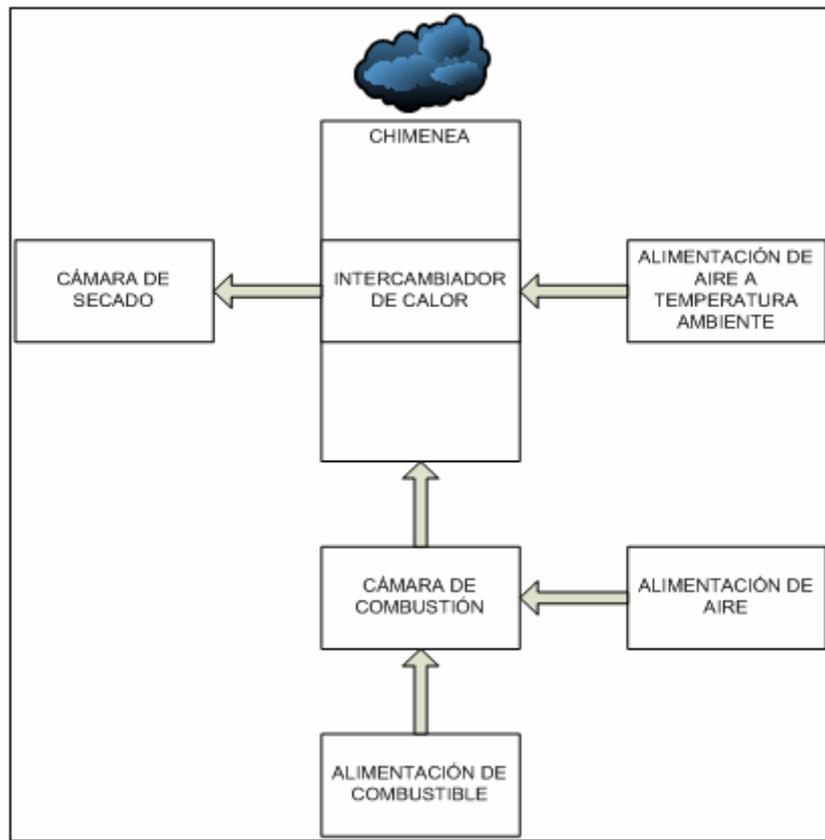


Figura 3.15 Diagrama de bloques de operación del modelo.

3.6.1 Sistemas del modelo

El prototipo consiste en un secador de lecho fijo y consta principalmente de los siguientes sistemas:

- Sistema de secado
- Sistema de combustión
- Intercambiador de calor
- Sistema de alimentación de combustible

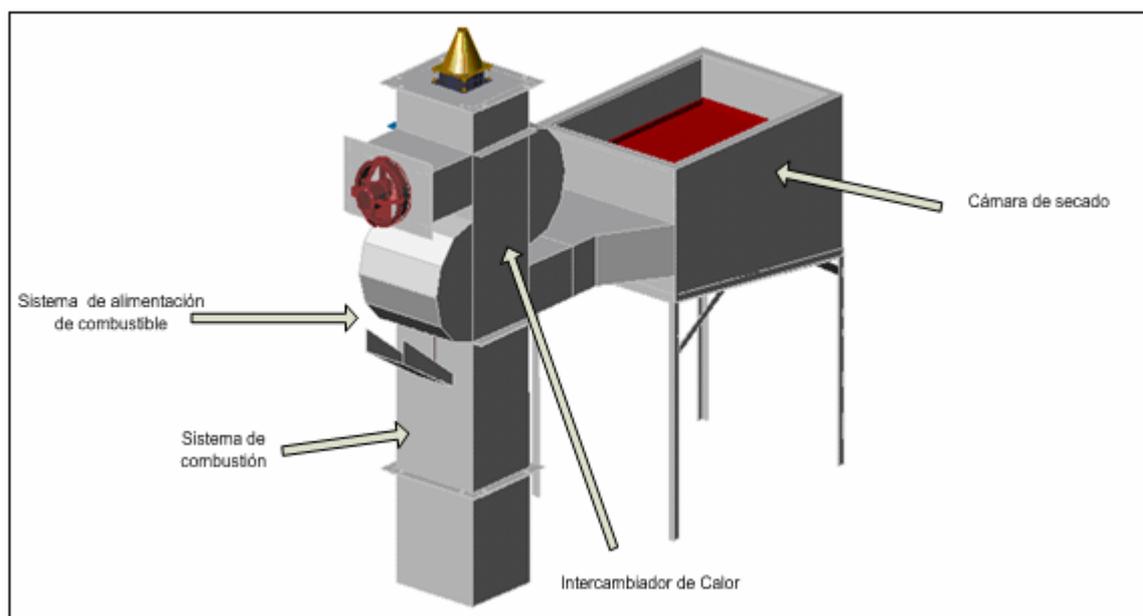


Figura 3.16 Componentes del prototipo

3.6.1.1 Sistema de secado

Elaborado en su mayor parte en acero inoxidable, en forma cúbica rectangular truncada de dimensiones 51cm X 73cm X 35cm, y con un volumen aproximado de 130305 cm³.

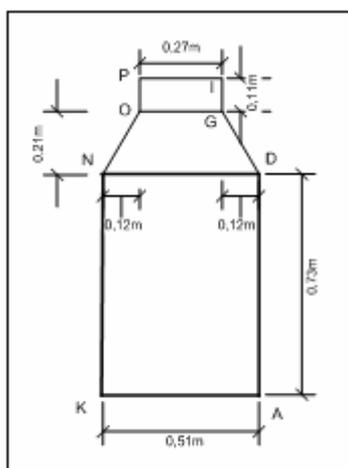


Figura 3.17 Cámara de secado – Vista frontal.

De manera general se compone de una estructura soporte la cual es base del lecho, bandejas de secado elaboradas dependiendo del producto, un conducto de alimentación de aire caliente y un conducto de salida y recolección de condensado. El truncamiento de la cámara de secado tiene el objetivo de facilitar

el drenaje hacia el exterior de agua producida por la condensación del aire, evitando que esta sea un limitante en el desempeño de la secadora (Figura 3.18).

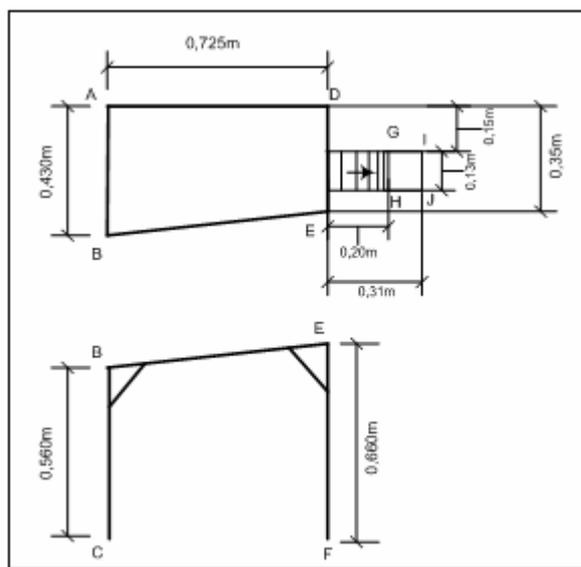


Figura 3.18 Cámara de secado - Vista lateral derecha.

En su parte media, como se mencionó antes, posee bandejas de secado aquí se coloca el producto en proceso, se caracteriza por ser del tipo malla, con el fin de que exista un flujo, en lo posible, proporcional de aire previamente calentado a través de todas las zonas de la cámara. Es un componente móvil, es decir que se pueden diseñar bandejas de secado dependiendo de las características del producto en tratamiento.

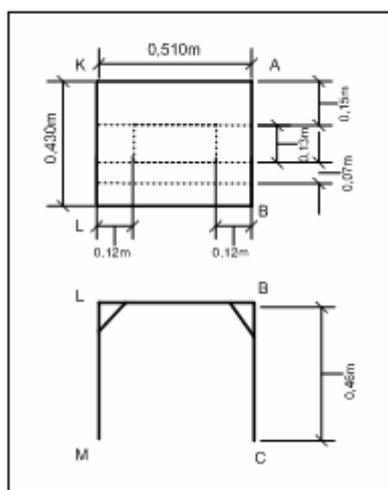


Figura 3.19 Cámara de secado - Vista lateral izquierda.

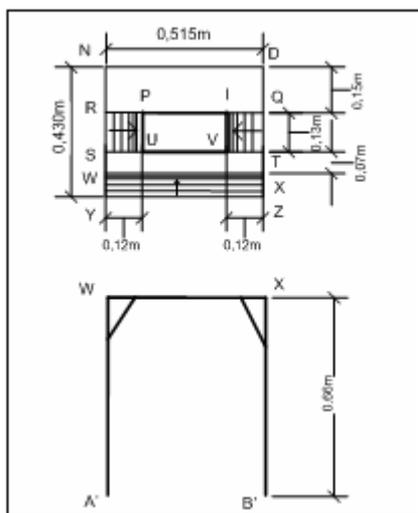


Figura 3.20 Cámara de secado - Vista superior.

3.6.1.1.1 Funcionamiento

En los secadores de tipo horizontal se pueden deshidratar diferentes tipos de productos tales como maíz pelado (mote), morochillo, arroz, banano, entre otras especies.

El aire para la calefacción de la cámara de secado proviene del sistema de combustión de cascarilla de arroz. Es importante mencionar que el secado de los productos se produce por evaporación del agua y por condensación en la parte interior de la cámara.

El secado se produce por intercambio térmico entre el aire caliente y el producto, el cual pierde su contenido de humedad (agua) en forma de vapor, depende del producto en tratamiento para establecer los valores de temperatura del aire y del tiempo de sometimiento.

3.6.1.2 Sistema de combustión

Construido en planchas de acero al carbono de forma cúbica rectangular, sus dimensiones aproximadas son 25 cm. X 28 cm. X 72 cm. lo que genera un volumen cercano a 50400cm^3 ; en la base de la cámara de combustión se deposita el combustible la cual está elaborada en malla de hierro fundido con el fin de tener circulación de oxígeno necesario para mantener la ignición y para el filtraje de restos de combustible consumido en la cámara de almacenamiento de ceniza.

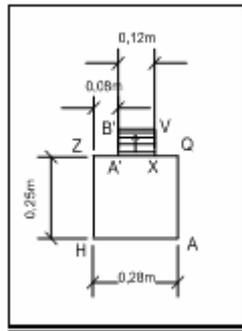


Figura 3.21 Sistema de Combustión – Vista superior.

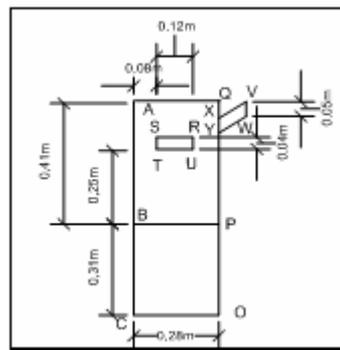


Figura 3.22 Sistema de Combustión – Vista lateral izquierda.

La cámara de almacenamiento de ceniza tiene como función principal la de capturar los residuos producidos por la combustión que se realiza en la cámara respectiva la cual esta ubicada justamente arriba de esta, es decir paralela a su cara superior en donde se desarrolla la ignición.

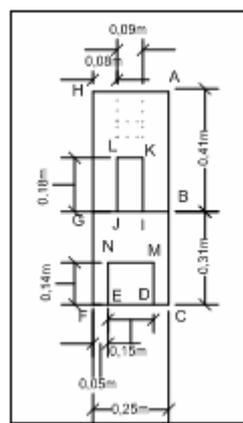


Figura 3.23 Sistema de combustión – Vista frontal.

Entre sus componentes están, un hogar en material refractario donde se realiza la combustión, una plancha de acumulación de combustible en hierro fundido, una

lámina de distribución de combustible la cual dispersa el mismo en toda la cámara, un conducto de ingreso de combustible, un conducto de admisión de aire, una chimenea y una cámara de evacuación de ceniza.

La base de la cámara de combustión es un componente móvil del sistema, y es del tipo malla aquí se desarrolla la ignición, sus características dependen única y exclusivamente de las propiedades del combustible empleado para el proceso de combustión.

Este componente también consta de un procedimiento de expulsión de gases, físicamente es un conducto que acarrea los vapores generados y los conduce a través del intercambiador hacia el medio exterior. Comúnmente se lo conoce como chimenea ya que su fin es únicamente el de desahogo.

3.6.1.2.1 Funcionamiento

En este sistema se pueden quemar una gran variedad de desechos vegetales entre los cuales mencionamos a la cascarilla de arroz, para este proceso se necesita de la alimentación forzada de aire controlado que permita mejorar las características de combustión reduciendo la emisión de humo, ceniza y CO así como la presencia de combustibles no quemados, además de la necesidad de la caída periódica del combustible hacia la cámara de ignición.

La energía generada en forma de calor es aprovechada para ser transferida al intercambiador térmico el cual generará el calentamiento del aire, el cual es aprovechado para el proceso de secado.

3.6.1.3 Intercambiador de calor

Elaborado en su mayor parte en planchas de acero al carbono (Tol Negro), técnicamente es un intercambiador tipo S de dimensiones aproximadas 28cm X 47cm X 60cm, consta de un conjunto de tubos doblados en forma de S que conecta la toma del aire del medio ambiente impulsado por el ventilador (y calentado por los vapores de combustión) hacia la cámara de secado.

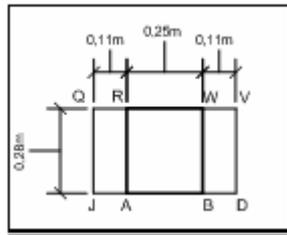


Figura 3.24 Intercambiador de calor – Vista Superior.

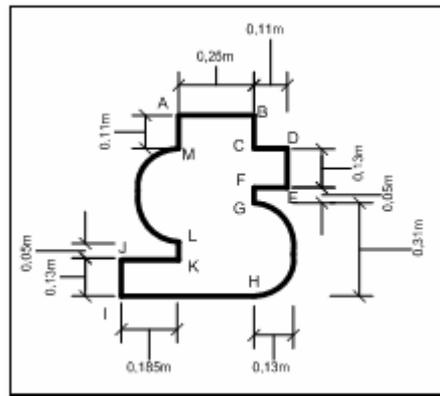


Figura 3.25 Intercambiador de calor – Vista Frontal.

Al momento de juntar los tubos del intercambiador con la cámara de secado se ve la necesidad del uso de un aislante que separe térmicamente el proceso de combustión con el proceso de secado. Adicional a esto el grupo de tubos esta protegido por láminas metálicas con el fin de acarrear los gases generados por la combustión a través de los mismos y de manera uniforme poder ser conducidos hacia su expulsión posterior.

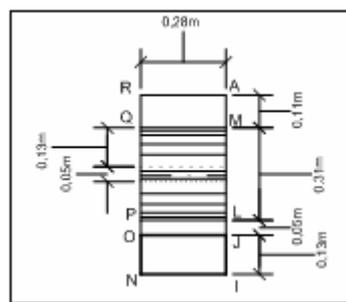


Figura 3.26 Intercambiador de calor - Vista lateral derecha.

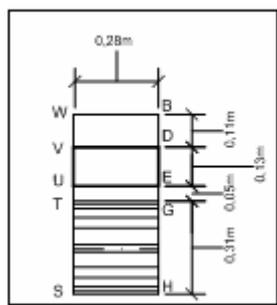


Figura 3.27 Intercambiador de calor – Vista lateral izquierda.

Entre sus principales componentes se encuentran la matriz de tubos cilíndricos los cuales están elaborados en tubería IPS de 1plg, la cámara de mezcla de aire tipo S, los elementos de sujeción de los tubos, el conducto de salida de aire caliente, y el conducto de alimentación de aire a temperatura ambiente.

3.6.1.3.1 Funcionamiento

El intercambiador de calor consiste en un conjunto de tubos colocados de forma horizontal y en tres pasos consecutivos con ingreso de aire por la parte superior y salida del aire caliente por la parte inferior hacia la cámara de secado. Esta distribución permite mejorar la transferencia de calor de los gases de escape hacia el aire del proceso. Este puede ser calentado desde una temperatura de 22°C hasta 125°C.

El aire que ingresa del medio ambiente sufre un incremento de temperatura al circular por los tubos del intercambiador que son constantemente calentados por los gases de combustión generados en la cámara respectiva, este aire es impulsado por un ventilador centrífugo que junto con la cantidad de calor generado en el proceso de combustión son los que determinarán el valor de la temperatura del aire de salida.

3.6.1.4 Sistema de alimentación de combustible

Este sistema esta elaborado en su mayor parte en planchas de acero al carbono (tol negro), de dimensiones aproximadas 50cm X 36cm X 46 cm., consta de un tornillo sin fin el cual suministra combustible hacia la cámara de combustión de manera periódica y en cantidades constantes.

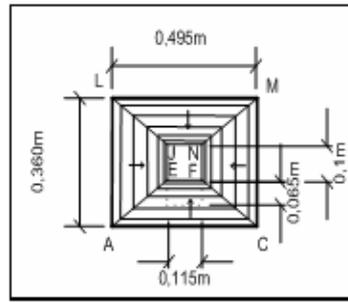


Figura 3.28 Sistema de Alimentación - Vista Superior.

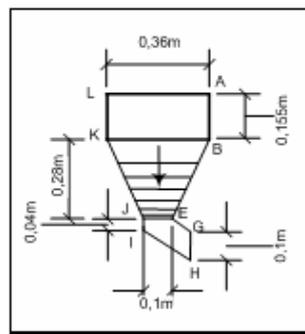


Figura 3.29 Sistema de alimentación - Vista lateral derecha.

Entre sus principales componentes se encuentra el alimentador de combustible, la tolva de carga, el conducto de alimentación, el mecanismo de suministro de combustible,

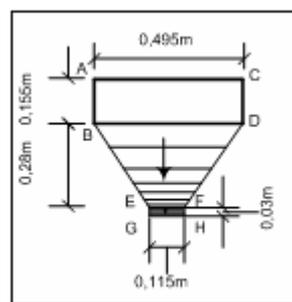


Figura 3.30 Sistema de alimentación - Vista frontal.

3.6.1.4.1 Funcionamiento

Este sistema es el encargado de suministrar combustible de manera periódica hacia la cámara de combustión. El desecho vegetal por efecto de la gravedad cae en la tolva de almacenamiento, y para introducirlo en la cámara es necesario aumentar la velocidad de desplazamiento mediante el uso de un tornillo sin fin que es controlado por un motor, este combustible debe ser alimentado, como se

menciono antes, en forma consecutiva de acuerdo a los requerimientos de una combustión óptima.

3.6.2 Descripción global del sistema.

En este ítem se describirá el funcionamiento colectivo del prototipo real de implementación (Figura 3.31) con el fin de aclarar el principio de acción del mismo.

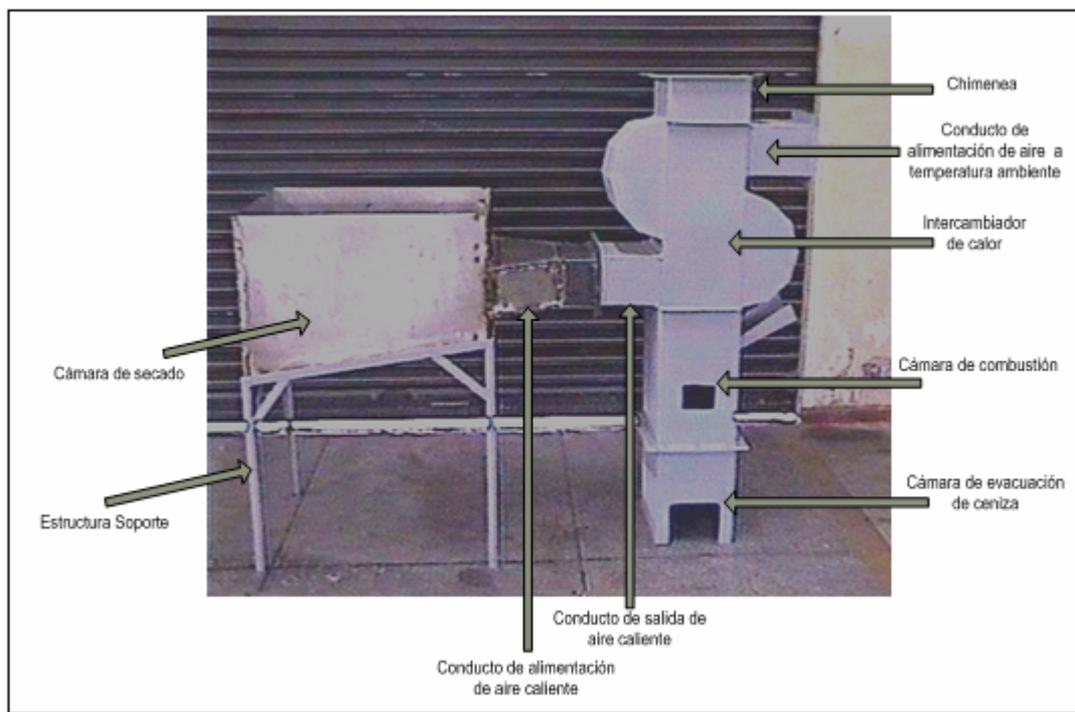


Figura 3.31 Prototipo real.

El proceso empieza con la ignición del combustible, de manera manual y en la cámara respectiva, del desecho vegetal (cascarilla de arroz), generalmente se la obtiene con la ayuda de un combustible líquido (diesel); el sistema debe permanecer alrededor de cinco minutos sin trabajar hasta que la ignición sea óptima y se obtenga una temperatura adecuada del aire en la cámara de secado.

Transcurrido este tiempo y bajo condiciones técnicas confirmadas, se procede a colocar el producto en el lecho de secado, de esta manera el proceso se inicia. Existen de manera general dos subsistemas los cuales deben ser supervisados y controlados de manera manual, el sistema de combustión y el sistema de secado.

El sistema de combustión está sometido a dos parámetros para que sea adecuado y lo más óptimo posible: la periodicidad y la cantidad con la que se alimenta el combustible vegetal a la cámara; esta no debe ser ni excesiva ya que se generaría gran cantidad de gases contaminantes (humo negro), ni limitante ya que terminaría con la combustión; y finalmente el flujo de aire entrante a la cámara el cual es necesario para mantener la ignición, de igual manera es controlado en base a una sopladora regulable en porcentaje de captación de aire.

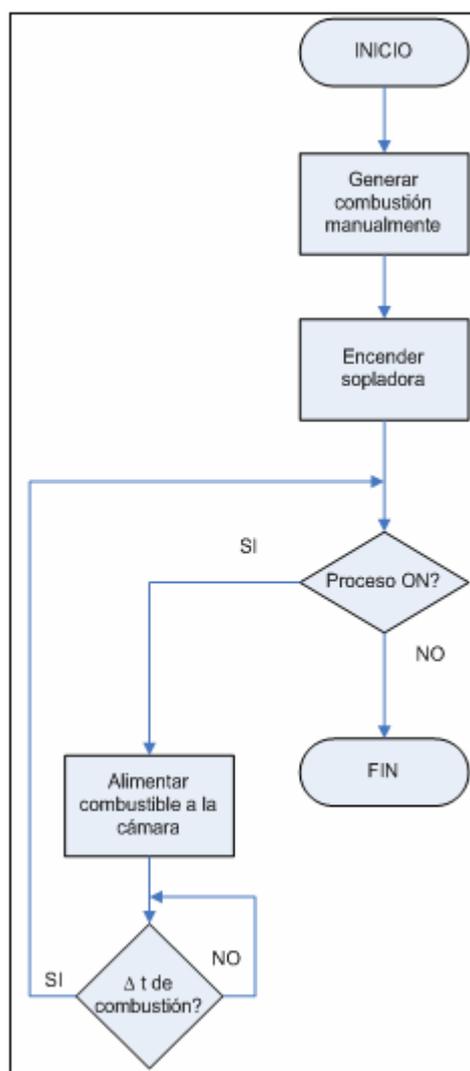


Figura 3.32 Diagrama de flujo - proceso de Combustión.

El sistema de secado es el que determina la temperatura en la cámara del lecho, básicamente su proceso inicia con el calentamiento de los tubos del intercambiador de calor por medio de los gases generados en la cámara de combustión, luego el ventilador ubicado en el conducto de captación obliga a la

circulación de aire a través de los tubos que dependiendo de la velocidad y de la distancia recorridos se genera aire a mayor o menor temperatura. Además hay que señalar que se debe revolver el producto en el lecho cada cierto período de tiempo con el fin de mejorar el secado en todos los sectores del grano.

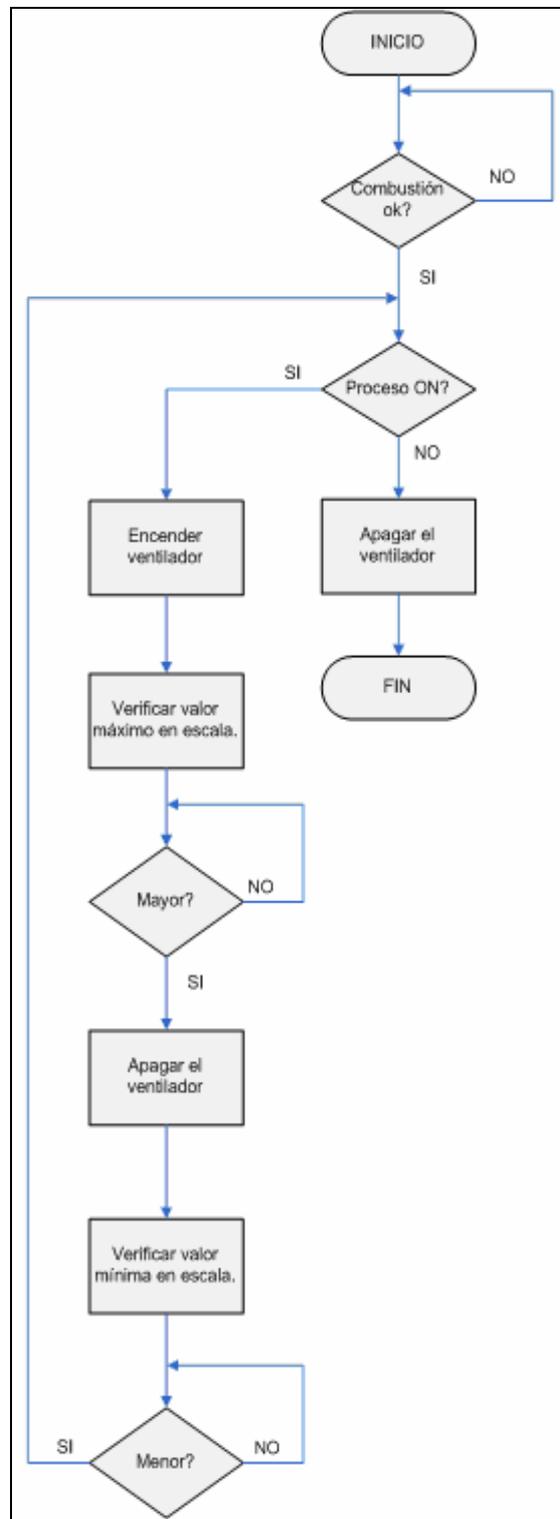


Figura 3.33 Diagrama de flujo – proceso de secado.

El rango de secado para cualquier producto está determinado por una banda de valores de temperatura con un valor máximo y uno mínimo, por ejemplo el arroz se seca a una temperatura de $50^{\circ}\text{C} \pm 4^{\circ}\text{C}$, es decir que se tiene un valor máximo de 54°C y uno mínimo de 46°C ., estas referencias son las que se deben controlar en el sistema de secado.

CAPÍTULO 4

DISEÑO DE HARDWARE

4.1 INTRODUCCIÓN

El capítulo que se desarrolla a continuación tiene como finalidad exponer el hardware de control y monitoreo seleccionado como fase preliminar del proyecto en tratamiento dentro de esta síntesis teórica. Se detallará, en primera instancia, los requerimientos técnicos del sistema, mismos que definirán las características técnicas de los componentes a ser usados en la implementación; se describirá técnicamente dichos elementos eléctricos y electrónicos con su respectiva funcionalidad dentro del proceso de control y monitoreo; finalmente se expondrá la técnica de control de procesos a tomar en el desarrollo con su respectiva implementación.

4.2 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA

En el Capítulo 3 se expuso la descripción del proceso a ser controlado y automatizado, cabe resaltar que se mencionó la existencia de dos subsistemas que operan independientemente pero de manera complementaria en el momento de cumplir su objetivo y función como sistema integral, ambos subsistemas serán tratados desde ahora como dos lazos de control, cuya interacción generará el sistema de control del proceso global.

4.2.1 Lazo de control de combustión

Como ya se indicó, el sistema de combustión provee del calor necesario para el secado mediante la combustión de los desechos vegetales sólidos. Su buen desempeño está sujeto a la correcta de alimentación del combustible (desechos vegetales sólidos), y a la adecuada oxigenación en la cámara cerrada de quemado de los desechos vegetales. Véase Figura 4.1.

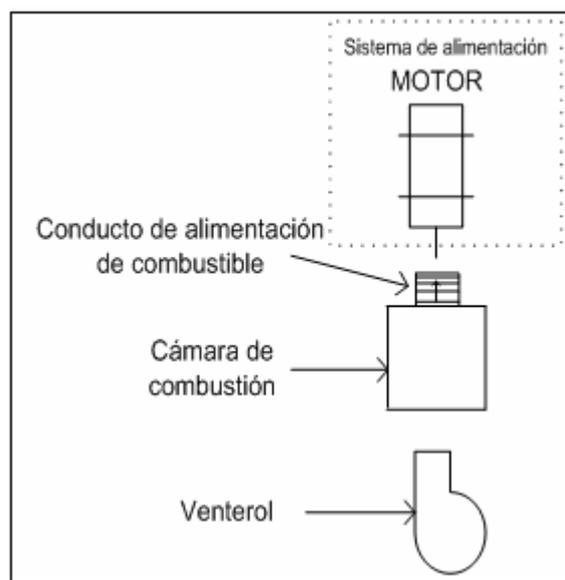


Figura 4.1 Sistema de combustión – Vista superior.

Para lograr una alimentación secuencial y continua de los desechos vegetales en la chimenea de combustión, se ha previsto adecuar un tornillo sin fin en la alimentadora de la máquina, cuya conexión a un motor controlado en su velocidad, regule el flujo de combustible necesario para mantener la temperatura del horno dentro de los valores consignados en las especificaciones técnicas del proceso (Ver anexo 4). Cabe señalar que la implementación del tornillo sin fin en la cámara de alimentación así como su respectivo acople con el motor de gobierno del mismo no cuentan como parte de la descripción de este tratamiento por cuanto esas tareas se rigen al desarrollo y desempeño mecánico de la máquina a automatizar y controlar, y salen de los propósitos de este proyecto.

La oxigenación necesaria para la combustión de los desechos vegetales se logra mediante un ventilador centrífugo, cuya inyección continua de aire provee de oxígeno para mantener viva la combustión de los desechos. Vale recordar que la cascarilla de arroz, elemento seleccionado como combustible en el proceso, resulta difícil para quemarla, pero una vez encendida en combustión, tarda no más de cuatro segundos en consumirse.

El sistema de ignición inicial del subproceso es manual, y cabe resaltar que ello reducirá las características autónomas del sistema. La automatización de esta parte del proceso no está contemplada en el alcance de este proyecto.

4.2.2 Lazo de control de secado

Descrito en el capítulo previo como el sistema encargado de transferir el calor generado por la combustión de los desechos vegetales sólidos hacia la cámara de lecho fijo de secado, este sistema está sujeto, para su buen desempeño, en primera instancia, por el buen desempeño de lazo de control de combustión, y en segunda instancia por el adecuado funcionamiento del intercambiador de calor cuya operación se remite a la activación del ventilador que incluye el dispositivo mecánico, que finalmente establece una temperatura idónea en la cámara de lecho fijo para el secado de los diferentes productos agrícolas. Véase figura 4.2.

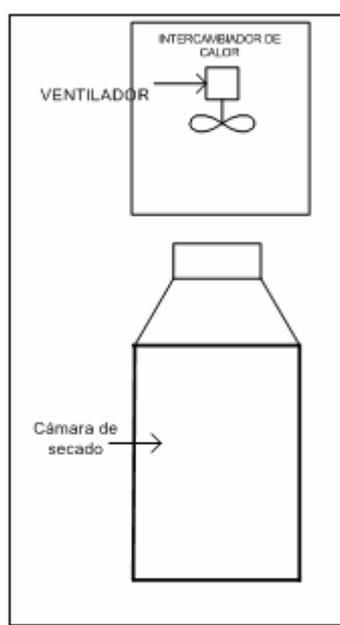


Figura 4.2 Sistema de secado – Vista superior.

El limitante en la eficiencia de este subsistema está dado porque el producto en la cámara de secado necesita ser mezclado periódicamente, actualmente este proceso se lo hace de manera manual, se podría diseñar una técnica que cumpla con este objetivo pero en el proyecto no se encuentra contemplado, de igual manera será un punto crítico en el momento de evaluar la autonomía del sistema.

4.3 REQUERIMIENTOS TÉCNICOS DEL HARDWARE

La selección de dispositivos de hardware para desarrollar el sistema de automatización y control de proceso descrito tiende un abanico de alternativas de distinta naturaleza: hidráulicas, neumáticas, mecánicas y eléctricas.

A manera de antecedentes, se debe recordar que algunos componentes como motores eléctricos están operando actualmente en el prototipo, razón por la cual se deben realizar las adecuaciones necesarias orientadas a los mismos, con el fin de no desecharlos.

La selección de la alternativa de control bajo esta premisa, indudablemente será de tipo eléctrica electrónica, además de justificarse por las siguientes razones:

- Velocidad de respuesta superior en comparación con sistemas de diferente naturaleza.
- Mayor flexibilidad en operación
- Menor tamaño
- Mejor precisión y exactitud de los elementos integrantes del sistema.
- Costo de inversión, operación y mantenimiento equivalentes menores que sistemas de control de diferente tipo.

4.3.1 Sobre el sistema de combustión

Tal como se anotó anteriormente, el sistema está regido por dos variables físicas, la velocidad de alimentación gobernada por el motor de suministro de combustible y la presencia de flujo de oxígeno en la cámara de combustión gobernada por el estado del ventilador centrífugo; acorde a estos dos parámetros se genera mayor o menor cantidad de calor en la chimenea de combustión.

Desde el punto de vista de ingeniería, el proceso exige especificar el siguiente hardware, con el objetivo de poder gobernar las variables antes mencionadas y que determinan al proceso, esto se describe de manera gráfica en la Figura 4.3.

El hardware para control y monitoreo debe cumplir con las especificaciones detalladas en la Tabla 4.1.

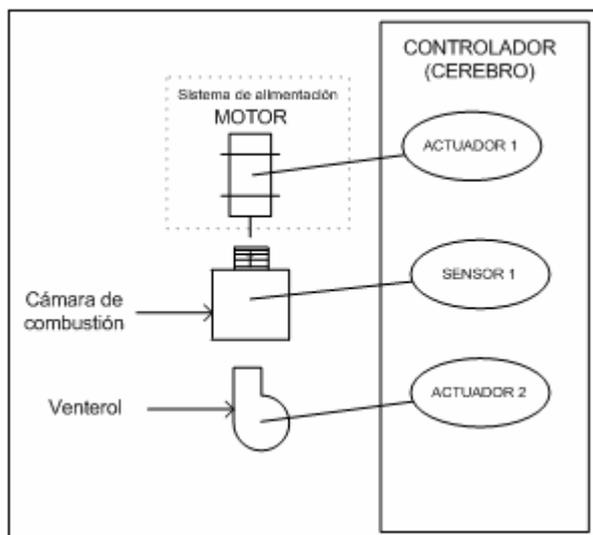


Figura 4.3 Sistema de combustión - Diseño de hardware.

HARDWARE	CARACTERÍSTICAS		E. F. C.	
Actuador 1: Variador de velocidad.	Alimentación	Monofásica 220Vac	Motor trifásico	
	Potencia de manejo	0,75HP	Potencia	0,75HP
	Protecciones	Intrínseca: sobre el variador y al motor	Tensión de alimentación	220Vac
	Frecuencia de conmutación	Alta	Velocidad de giro	4000rpm
	Algoritmo de control	Al menos PI		
	Comunicación	RS 485, protocolo MODBUS opcional		
Actuador 2: Contactor de conmutación.	Corriente asignada de empleo	9 A.	Venterol	
	Tensión máxima de empleo	200V	Corriente:	3/1.5 amp
	Corriente térmica convencional	25 A.	Tensión de alimentación	110/220v
	Conmutación	Media	Velocidad	3600 rpm
	Número de polos	3		
	Contacto auxiliar	1		
Sensor 1: Termocupla para cámara de combustión.	Rango De medición	0-2000°C	No aplicable	
	Diámetro de alambre	¼ mm		
	Tipo	C		
	Precisión y Exactitud	Baja 0,5 °C		
	Sensibilidad y Resolución	Baja 0,5 °C		

Tabla 4.1 Sistema de combustión - Especificaciones de hardware.

4.3.1.1 Justificación

El hardware detallado en la Tabla 4.1, fue especificado de acuerdo a los resultados arrojados en las pruebas realizadas al modelo de implementación final, éstos se detallan en el **anexo 4**.

En el caso del actuador 1, se escoge un variador de velocidad para el E. F. C. (elemento final de control, motor trifásico) ya que el sistema de alimentación es la parte crítica del proceso global, mantener la combustión dentro de la cámara respectiva depende en gran medida de la manera de suministrar el desecho vegetal, además de que por la gran variedad de combustibles que se usan en el proceso, el sistema necesita regular su velocidad de operación para cada uno de ellos.

Como actuador 2, se selecciona un contactor de conmutación para el E. F. C. (ventilador centrífugo) únicamente con el fin de que se lo pueda encender o apagar de manera remota, ya que, como se había previsto anteriormente, la oxigenación sobre el proceso de combustión tiene que ser constante. Las características técnicas de este elemento fueron especificadas acorde al E. F. C. que ya se usa en el prototipo de implementación.

Finalmente para este proceso se especifica al sensor 1 como una termocupla tipo K, su rango de medición es de 0-2000°C, valor que fue arrojado por las pruebas de campo, este componente será el encargado de hacernos conocer el estado de la cámara de combustión, compararlo con los requerimientos técnicos de operación y corregirlo al nivel necesario.

4.3.2 Sobre el sistema de secado

Este sistema, como se vio anteriormente, está regido por la variable física flujo. Su presencia se encuentra gobernada por el estado del ventilador ubicado en el conducto de captación de aire a temperatura ambiente, este permite tener la transferencia de energía en forma de calor a la cámara de secado y que acorde al producto en proceso se la debe controlar.

De igual manera, el proceso exige especificar el siguiente hardware con el fin de gobernar las variables antes mencionadas que rigen al proceso, este se describe de manera gráfica en la Figura 4.4.

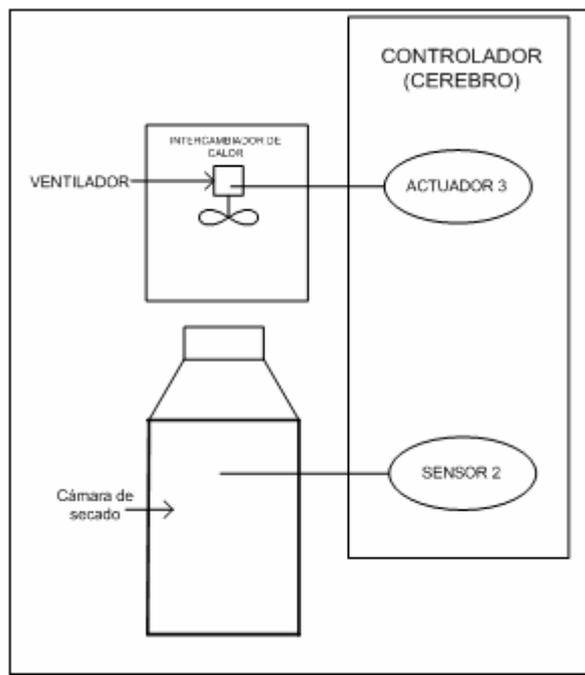


Figura 4.4 Sistema de secado – Diseño de Hardware.

El hardware detallado en la figura anterior debe satisfacer las siguientes especificaciones técnicas (Tabla 4.2).

HARDWARE	CARACTERISTICAS		E. F. C.	
Actuador 3: Contactor de conmutación.	Corriente asignada de empleo.	5 A.	Ventilador	
	Tensión máxima de empleo	200V	Potencia:	8W
	Corriente térmica convencional.	25 A.	Tensión de alimentación	110V
	Conmutación.	alta	Velocidad	330rpm
	Número de polos.	1		
	Contacto auxiliar.	1		
Sensor 2: Termocupla para cámara de secado	Rango de medición.	0-100°C	No aplicable	
	Tipo.	K		
	Precisión y Exactitud.	Media, 0,1 °C		
	Sensibilidad y resolución.	Media 0,1 °C		

Tabla 4.2 Sistema de secado – Especificaciones de Hardware.

4.3.2.1 Justificación

Del mismo modo el hardware especificado en la tabla anterior se encuentra detallado acorde a los resultados arrojados por las pruebas de campo realizadas al prototipo de implementación, estos valores se encuentran redactados en el anexo 4.

En el caso del actuador 3 se selecciona un contactor de conmutación para el E. F. C. (ventilador). Ello se justifica porque el control sobre este actuador solo radica en la conmutación del mismo. Se debe recordar que la temperatura es una variable física de cambio lento, y, los estados del motor (encendido y apagado) se sucederán en intervalos de tiempo considerables. Las especificaciones eléctricas técnicas detalladas corresponden al ventilador del intercambiador montado sobre el modelo actual de prueba.

Finalmente en el diseño básico de hardware, el proceso exige detallar al sensor 2 como una termocupla tipo K, de 0 – 100 °C, este componente será el encargado de dar a conocer el estado del sistema para compararlo con los requerimientos de producto en proceso y poder realizar las correcciones necesarias.

4.3.3 Hardware complementario

En los gráficos, Figura 4.3 y Figura 4.4, se detalla de manera general a un controlador “cerebro”, este será el encargado de gobernar sobre el proceso, razón por la cual se necesita establecer también sus características técnicas básicas previo a la adquisición del mismo. Posterior a esto se detallará también todo el hardware adicional necesario para el sistema eléctrico – electrónico y su respectiva justificación.

HARDWARE	CARACTERISTICAS	
Controlador: PLC	Entradas analógicas	2, termocupla B, K, 4-20ma, 0 – 10V
	Salidas	2, Relé
	Comunicación	Modbus, RS – 485
	Tipo	Modular
	Adicional	Lazos PID, Robusto
	Alimentación	110Vac/24Vdc
Breaker Principal	Corriente de soporte	20 A
Guardamotor Magnetotérmico	Rango de reglaje de disparadores térmicos	1,6 – 2,5 A.
	Corriente de disparo Magnético	33,5 A.
	Tipo de mando	Pulsadores
	Potencia normalizada del motor trifásico	0,75kW

Tabla 4.3 Sistema complementario – Especificaciones de Hardware.

4.3.3.1 Justificación

Las especificaciones del Hardware complementario, detallado en la Tabla 4.3, están acordes a las necesidades del sistema de control, eléctrico y electrónico ya sea por la técnica de control a seguir, recomendación del fabricante o por normativa de seguridad, el esquema general de hardware de control se detallara posteriormente.

Se ha elegido como cerebro principal de todo el proceso un controlador lógico programable PLC en función a sus condiciones de confiabilidad, robustez, flexibilidad, seguridad, facilidad de montaje configuración y uso, y modularidad, como alternativa de expansión. Las especificaciones anotadas obedecen al requerimiento de sensores, actuadores, métodos de control, y métodos de comunicación a emplearse en la construcción del proyecto.

El uso de un breaker principal obedece a condiciones de seguridad que siempre se deben dotar a los sistemas de control eléctrico por posible fallas de sobre tensión o cortocircuito.

La selección de un guardamotor magnetotérmico, busca proteger al motor de alimentación y al variador que controla su velocidad. Sus especificaciones están referidas al modelo en tratamiento.

La implementación total del sistema requiere adicionalmente de algunos materiales eléctricos necesarios para la conexión, dentro de los que se anotan los siguientes:

- PC de monitoreo
- Pulsadores de marcha – paro
- Luces piloto
- Selectores
- Porta-fusibles para control
- Display de operador
- Borneras de conexión.
- Conectores
- Rieles de sujeción
- Canaletas porta cables
- Gabinete de implementación
- Zumbadores

4.4 DESCRIPCIÓN MODULAR DEL SISTEMA DE CONTROL

Una vez analizados los requerimientos técnicos de hardware en función de las necesidades del proceso como tal, se procederá a describir el funcionamiento global del sistema, su composición modular o por bloques, y se detallará las especificaciones técnicas concretas de los equipos seleccionados.

4.4.1 Funcionamiento global del sistema

Básicamente el sistema está compuesto de dos lazos de control uno sobre el subsistema de combustión y otro sobre el subsistema de secado. La Figura 4.5 describe el diagrama PI&D simplificado del proceso.

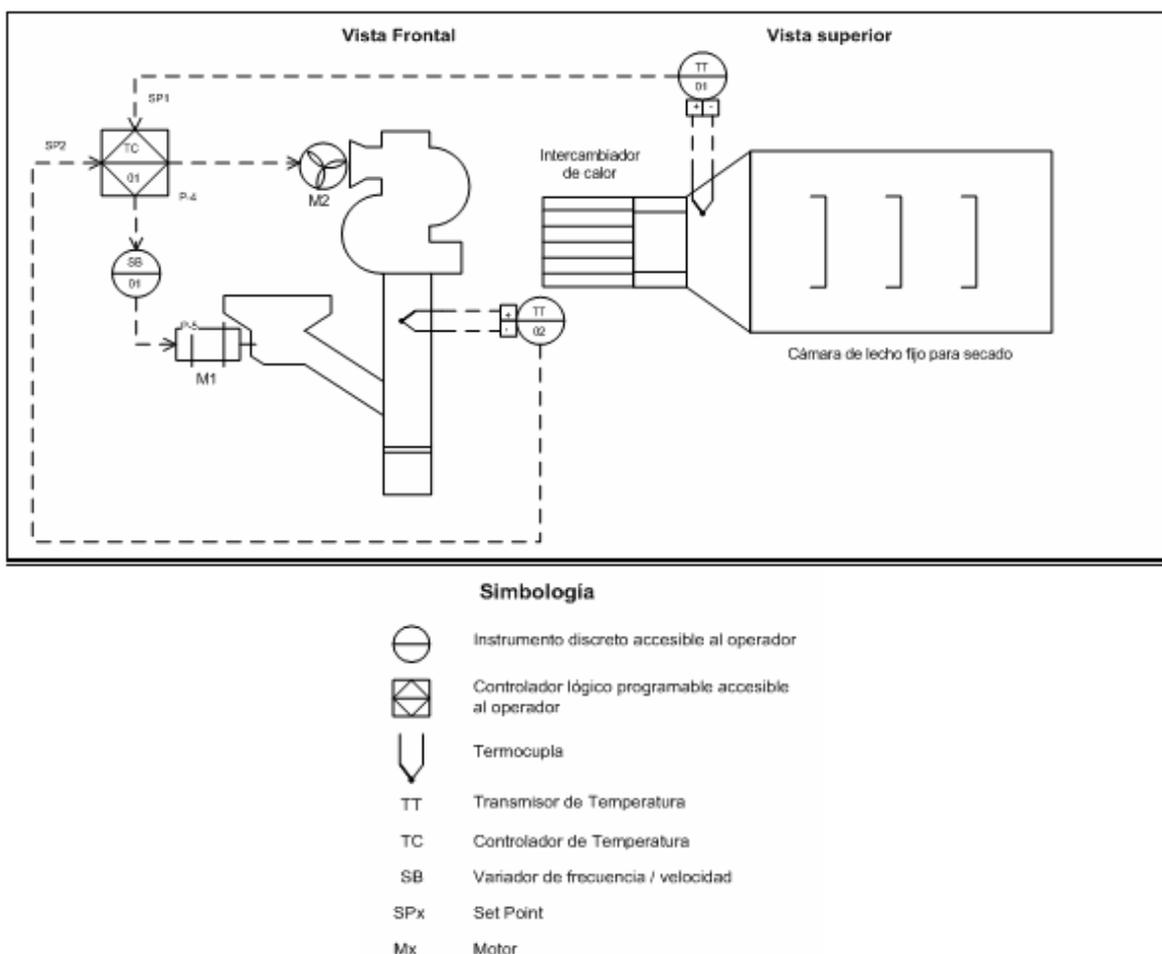


Figura 4.5 Diagrama PI&D Para el proceso de secado de granos.

El detalle de la explicación de este gráfico consta en el Capítulo 6 de la documentación de este proyecto, y obedece a razones de orden en el tratamiento de la información.

El sistema de control diseñado para la automatización y control de la máquina secadora de productos agrícolas se compone de un módulo de control central que gobierna todo el proceso y que actúa sobre tres elementos finales de control hacia los actuadores del sistema, que no son más que los motores de los diferentes subsistemas del equipo. El estado del proceso de secado se interpreta eléctricamente por los módulos sensores que notifican al módulo de control de ello, para que este, a su vez, tenga puntos de referencia sobre los cuales tomar las decisiones de control más adecuadas para el sistema.

De manera complementaria todo el sistema dispone de la alimentación eléctrica adecuada para cada caso, dosificada apropiadamente, además de las

protecciones respectivas en caso de fallos. Ello se ve reflejado en los módulos de alimentación y protección, respectivamente. La Figura 4.6 representa gráficamente lo aquí expuesto.

Los siguientes párrafos detallarán algunas características adicionales de cada módulo del diagrama en exposición, y enumerarán las características de los elementos eléctricos y electrónicos que incluyen.

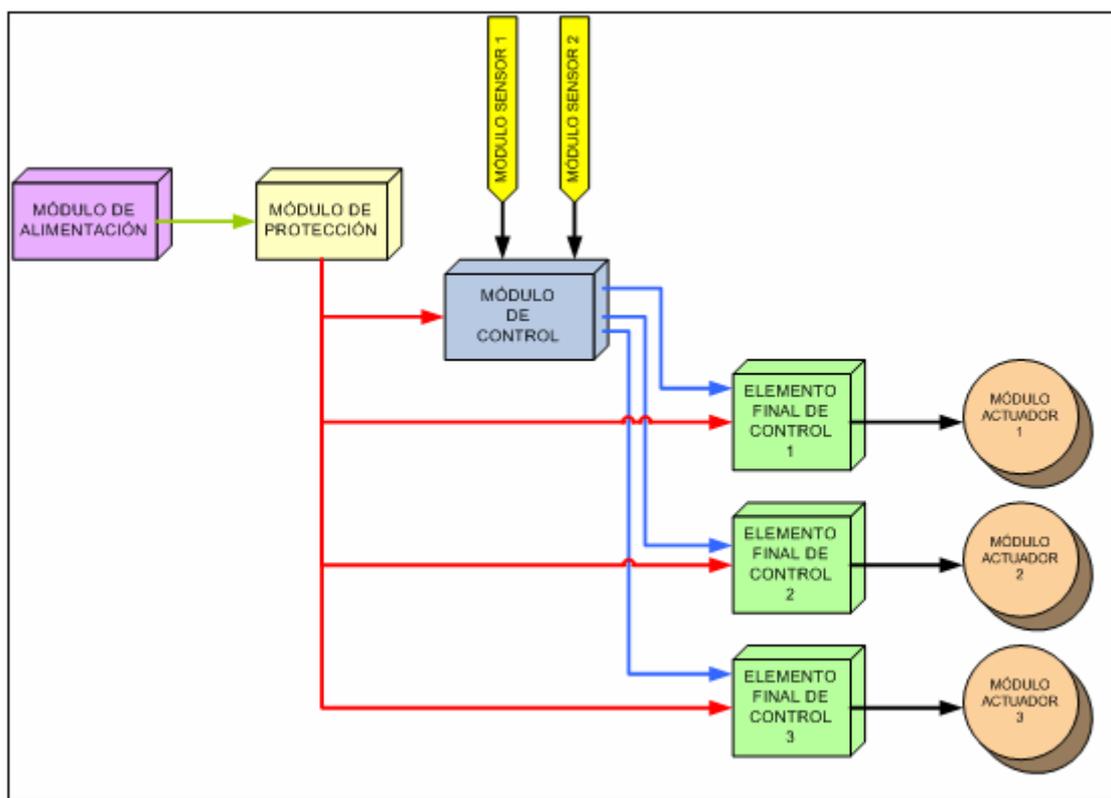


Figura 4.6 Diagrama de bloques de funcionamiento del sistema de control de secado de granos.

4.4.1.1 Módulo de Alimentación

La alimentación del sistema básicamente es de tres tipos: El primero consiste en una toma general de tipo monofásica de 220 Voltios en corriente alterna utilizada básicamente para energizar el variador de velocidad que se incluye dentro de uno de los módulos de elementos finales de control. Una segunda toma es de tipo 110 Voltios de corriente alterna monofásica, extraída de cualquiera de las fases que componen el sistema monofásico de 220Vac junto con la línea de neutro. Esta toma se utiliza para energizar el resto del sistema de control tanto en sus elementos finales de control, luces pilotos, zumbadores, motores monofásicos

y la fuente de energía del controlador lógico programable. Cabe recalcar que se ha usado ambas fases del sistema monofásico de 200Vac con la línea de neutro para obtener el sistema de 110Vac, y así mantener un equilibrio entre las fases utilizadas. Los sistemas de energía alterna poseen una frecuencia de 60Hz. Finalmente se dispone de alimentación de 24 Voltios en corriente continua para la alimentación del PLC conjuntamente con sus módulos de expansión, pulsadores y selectores del sistema. Esta alimentación se obtiene a través de una fuente de tensión de 24 Voltios ajustable con entrega de corriente de hasta 3 Amperios. Se detalla a continuación las características de esta fuente.

4.4.1.1.1 Fuente de alimentación ABL7-RE2403

Características		Unidad	Detalle
Tensión de entrada	Valores nominales	V	100 – 240 ac
	Valores permitidos	V	85 – 264 monofásicos
Rango de frecuencia		Hz	47 -63
Factor de Potencia			0.65 aproximadamente
Tensión nominal de salida		V	24 DC
Corriente nominal de salida		A	3
Precisión	Regulación de línea y carga		±3%
Protecciones	Cortocircuito		Prearranque/arranque/automático
	Sobrevoltaje		1.1 In
Grado de protección IP			IP20

Tabla 4.4 Fuente de Alimentación ABL7-RE2403: Características técnicas.

4.4.1.2 Módulo de Protección

El módulo de protección está diseñado para salvaguardar la integridad eléctrica de los equipos de todo el sistema, así como proteger las líneas de alimentación ante cualquier fallo interno del sistema. Básicamente se compone de tres accesorios que se describen a continuación:

4.4.1.2.1 Breaker principal EZC100N 30 20

Consiste en un interruptor para baja tensión en caja moldeada compacto, fácil de instalar, tripolar, capaz de soportar una tensión de servicio de hasta 550V y una de aislamiento de hasta 690V, soporta una corriente de corto circuito de 10kA bajo tensión de 220Vac, y está diseñado conforme a IEC947-1 , IEC947-2 y NEMA AB1. Se detalla a continuación las características de este elemento:

Características		Unidad	Detalle
	Polos		3 polos
	Tensión de aislamiento	V	690
	Tensión máxima de operación	V	550
	Regulación termomagnética		Fija
	Capacidad de interrupción @ 220/240V	kA	25
	Capacidad de ruptura en servicio Ics-(%Icu)		50%

Tabla 4.5 Breaker principal EZC100N 3020: Características técnicas.

Este elemento está dimensionado para soportar hasta una carga de 20A que es lo que a lo sumo consumiría en corriente todo el sistema de automatización y control de la máquina secadora de granos.



Figura 4.7 Codificación de los Breakers principales Merlin Gerin.

4.4.1.2.2 Guardamotor GV2ME07

Este tipo de disyuntores magnetotérmicos tripolares están adaptados para el mando y la protección de motores en apego a las normas IEC 947-2 y IEC 947-4-1. La protección de los motores se logra mediante los dispositivos magnetotérmicos incorporados. Los elementos magnéticos (protección contra cortocircuitos) tienen un umbral de disparo no regulable, aproximadamente 13 veces la intensidad de reglaje máxima de los disparadores térmicos.

Los elementos térmicos (protección contra sobrecargas) están compensados contra las variaciones de la temperatura ambiente.

Al añadir un disparador a mínimo de tensión se puede disparar el guardamotor en caso de falta de tensión. De esta manera, el usuario está protegido contra un re arranque intempestivo de la máquina a la vuelta de la tensión.

A continuación se detalla las características de este elemento:

	Características	Unidad	Detalle
	Potencia	kW	0.75
	Corriente de fallo soportada Icu	kA	>100
	Corriente de corto circuito de soporte Ics	En % de Icu	>100
	Rango de reglaje de los disparadores térmicos	A	1.6 – 2.5
	Corriente de disparo magnético Id±20%	A	33.5
	Corriente térmica convencional asignada máxima	A	0.16 – 32
	Grado de protección		IP20

Tabla 4.6 Guardamotor GV2-ME07: Características técnicas.

4.4.1.2.3 Fusibles de protección

El sistema está protegido finalmente con fusibles sobre las líneas de alimentación y sobre las líneas de salida del controlador lógico programable que actúan con los elementos finales de control 2 y 3. El sistema de automatización global está previsto y dimensionado para que consuma no más allá de 12 Amperios de corriente, sin embargo se protege el mismo con fusibles de 16 Amperios. En el caso de las líneas de salida del Controlador Lógico Programable se han instalado fusibles de 1 Amperio ya que alimentan las bobinas de los contactores que hacen de elementos finales de control.

	Características	Unidad	Detalle
	Tensión de operación	V	Hasta 500
	Corriente de fallo	kA	100
	Corriente de soporte	A	1, 16
	Dimensiones	Mm	10 x 38

Tabla 4.7 Fusibles: Características Técnicas.

4.4.1.3 Módulo de Control

Es el cerebro del sistema en operación. Este componente es el encargado de capturar todas las señales que intervienen en el proceso (sensores y HMI), manipular la información adquirida por medio de ellas, compararla con los requerimientos del usuario, para finalmente llevar al punto de operación necesario a las variables físicas que intervienen en el sistema por medio de los actuadores.

Desde el punto de vista técnico se compone de un Controlador Lógico Programable PLC, que gobierna todo el proceso de automatización. A continuación se detalla las características de este elemento:

4.4.1.3.1 Controlador Lógico Programable PLC TWD LDMA 20DRT

El autómata programable TWIDO de tipo modular es un dispositivo de alta capacidad de procesamiento, manejo de hasta 264 entradas/salidas, mayor posibilidad de cálculo que simplifica la programación (aritméticas, trigonométricas, tabla de instrucciones, conversiones), manejo de hasta 14 lazos de control PID fácilmente configurables con salidas analógicas o discretas (PWM), y funcionamiento bajo tensión de 24 voltios en corriente continua.

Su modularidad se adapta a las necesidades de la aplicación a partir de una base que admite hasta 4 o 7 módulos de ampliación de entradas/salidas TON o analógicas.

Dispone de módulos opciones que dotan de flexibilidad en igual manera que las plataformas de automatismos de mayor entidad, tales como cartuchos de memoria, reloj calendario, módulos de visualización o interfases serie, cada uno de los cuales admite a su vez un segundo puerto de comunicaciones RS 485 o RS 232C.

Se dispone de terminales tipo bornera para el cableado y un software de programación (Twido Soft) de fácil manejo con alternativas de programación en lenguaje lista de instrucciones, de elementos gráficos (Grafcats), o lógicas de contactos Ladder.

Características		Unidad	Detalle	
	Temperatura de operación	°C	0 - +55	
	Grado de Protección		IP20	
	Entradas discretas 24 VDC		12	
	Número y tipo de salidas		6 relay 2 transistor NPN	
	Capacidad de memoria para aplicaciones	Kb	3000 instrucciones	
	Tiempo de scan	Ms	1 para 1000 instrucciones lógicas	
	Memoria de datos	Bits internos		256
		Palabras internas		1024
		Temporizadores		32
		Contadores		16
	Tipo de puerto de comunicaciones		RS 485	
	Protocolos de comunicación		Modbus Master/slave RTU ASCII	
	Contadores	Canales		4
		Frecuencia		2 5KHz, 2 20KHz
		Capacidad		16 bits
	Entradas	Canales		12
Tensión de entrada		V	24 DC	
Salidas Transistor	Canales		2	
	Tipo		NPN	
	Tensión de salida	V	24DC	
	Corriente de salida	A	0.3	
Salidas Relé	Canales		6	
	Corriente de soporte	A	2	

Tabla 4.8 Base modular PLC TWD LDMA 20DRT: Características Técnicas.

4.4.1.3.2 Display de Operador TWD XCP ODM

Mediante este visualizador se tiene capacidad de controlar localmente el PLC, leer y escribir sus variables internas.

Características	Detalle	
	Designación	Módulo visualizador integrado
Número por cada base	1	
Pantalla	LCD retroiluminada 2 x 8 caracteres	
Emplazamientos para módulos opcionales	1 para adaptador interfase serie	

Tabla 4.9 Display de operador TWD XCP ODM: Características técnicas.

4.4.1.4 Módulos de Instrumentación

Encargados de capturar las señales del proceso, estos módulos comunican a su similar de control el estado de temperatura del sistema de secado y de combustión. Técnicamente, ello se logra mediante la acción de sensores de temperatura que con sus respectivos transmisores recogen el estado de las magnitudes de temperatura del proceso y las convierten en señales eléctricas estándares para el procesamiento de las mismas.

La selección de los elementos componentes de este sistema se sustenta en dos criterios: uno técnico y otro económico. Técnicamente se debe considerar que los rangos de medición en los procesos son relativamente amplios (0-100°C para el subsistema de secado, y 0 a 1200°C para el subsistema de combustión). No se requiere gran precisión en los procesos de medición, de hecho la temperatura de secado puede fluctuar en alrededor de 5°C sobre el valor consignado. Desde el punto de vista económico, el punto crítico de selección versa sobre el transmisor seleccionado, ya que una mala selección puede incrementar abruptamente los costos. Afortunadamente el PLC seleccionado, por ser de tipo modular, puede incluir algunas soluciones en cuanto a entradas, y precisamente dispone de módulos de entrada configurables para RTD o termocuplas que no requieren adicionar transmisor alguno en un valor de una fracción del costo de un transmisor lo que se traduce en grandes ventajas para el diseño de este módulo del sistema. La resolución de los canales de entrada resulta muy buena (12 bits) y se dispone además de una salida analógica configurable, que va a resultar muy útil como se verá más adelante. En función a la selección de este módulo de acoplamiento del PLC, la elección del elemento primario de medición se reduce a dos alternativas: un sensor de tipo termocupla, o un detector de temperatura de tipo resistivo (RTD). Los segundos son más costosos, de rango de medición más limitado, no son muy lineales y resultan frágiles en contraste con las termocuplas, que disponen de posibilidad de medir hasta 1250°C, son resistentes y mantienen una buena linealidad. De manera que finalmente se seleccionó termocuplas como elementos primarios de medición junto con los módulos de acople del PLC para que trabajen dentro del área de instrumentación del proceso.

A continuación se describen las características de los elementos seleccionados:

4.4.1.4.1 Módulo de entradas analógicas TWD ALM 3LT

Módulo de dos entradas de bajo nivel configurables a termocopladores de tipo K, J y T, o termosondas de 3 hilos de tipo Pt100 con rango de -100 a 500°C, más una salida analógica configurable para valores estándar de alto nivel de 0 a 10V en tensión o 4 a 20mA en corriente.

Características		Unidad	Detalle	
	Resolución		12bits	
	Entradas	Rango	°C	Tipo K: 0-1300
		Valor LSB		Tipo K: 0.325°C
		Duración máxima de muestreo	ms	50
		Repetición del muestreo	ms	50
		Período de adquisición	ms	100+duración de un ciclo de autómatas
	Precisión de medida	Error máximo a 25°C	%PE	0,2 + precisión de la compensación de la soldadura fría ($\pm 4^{\circ}\text{C}$ máx)
		Rechazo en modo común		-50dB
	Salida	Rango		0-10V o 4-20mA
		Resolución		4.096 (12bits)
Valor LSB			2,5mV o 4 μ A	
Tempo de estabilización		ms	20	
Precisión de la medida	Error máximo a 25°C	%PE	$\pm 0,2\%$	
	Incidencia de la temperatura	%PE	$\pm 0,015/^{\circ}\text{C}$	
	Error de salida	%PE	$\pm 1\%$	
	No linealidad	%PE	$\pm 0,2\%$	

Tabla 4.10 Módulo de entradas analógicas TWD ALM 3LT: Características técnicas.

4.4.1.4.2 Termocuplas de medición de temperatura

Las termocuplas de este subsistema estarán ubicadas en la salida del intercambiador de calor y dentro de la cámara de combustión, y se encargarán de definir para todo momento en el proceso, la temperatura de ambos puntos del sistema. Se requiere un rango de medición de 0 a 100°C para la cámara de lecho fijo, y de 0 a 1200°C para la cámara de combustión. En cuanto a la sensibilidad, no se requieren exigencias bajo el orden de 1°C, de hecho, en función a pruebas

realizadas en el proceso, la temperatura en la cámara de secado puede fluctuar hasta en 5°C, y para el caso del horno de combustión, la fluctuación aumenta a 10°C. Adicionalmente esa sensibilidad no debe descender de un valor de 0.29°C; recordemos que la entrada configurable del módulo captador de señales de termocupla tiene una resolución de 12bits; como veremos dentro de la tabla de características técnicas del sensor seleccionado el rango de medición del elemento disponible, en función de costos, fue de 0 – 1200°C para ambos casos, El rango de captación del registro de captura de la termocupla versa desde 0 hasta 4095 (unidades crudas); este rango en función de su relativo al elemento de medición establece la resolución de 0,29°C. A continuación se exponen las características técnicas de estos elementos.

	Características	Unidad	Detalle
	Tipo		K
	Rango de medición	°C	0-1200
	EMF en rango de medición	mV	0 - 48.828
	Inserción de junta		Tipo J 3mm
	Juntura caliente (Hot junction)		Aterrizada
	Cable de compensación		Tipo J blindado ANSI MC96.1
	Longitud del cable	mm	2000
	Manga de ajuste de compresión	“NTP	¼
	Tolerancia de error	°C / %	±2.2 / ±0.75 @ (0-1200°C)

Tabla 4.11 Termocuplas de medición K: Características técnicas.

4.4.1.5 Elementos finales de control

Dentro de este módulo se encuentran ubicados todos los transmisores de potencia que comunican a los actuadores sobre las decisiones que toma el controlador y la manera en que este pretende que los últimos se comporten. Su selección se basa en el tipo de control estipulado para cada parte del sistema, y su detalle se expone a continuación:

4.4.1.5.1 Variador de velocidad ATV11HU18M2A

Seleccionado para operar sobre el motor de alimentación de la cámara de combustión, el Altivar 11 es un convertidor de frecuencia de alimentación monofásica de 200 a 240V, para motores asíncronos trifásicos de jaula, con

potencias comprendidas entre 0,18 y 2,2kW. El Altivar 11 incorpora los últimos avances tecnológicos así como las funciones necesarias para las aplicaciones más usuales, como manutención horizontal (pequeñas correas de transporte), ventilación, bombas, controles de acceso, puertas automáticas, embalaje/acondicionamiento (encoladoras, etiquetadoras), máquinas especiales (mezcladoras, lavadoras, centrífugas).

Las principales funciones integradas al variador Altivar 11 son:

- Arranque y variación de velocidad.
- Inversión del sentido de marcha
- Desaceleración, aceleración, parada,
- Protecciones del motor y del variador
- Comando 2 hilos/3 hilos
- 4 velocidades preseleccionadas
- Memorización de la configuración del variador
- Inyección de corriente continua en la parada
- Conmutación de rampas
- Retoma al vuelo

Varias funciones pueden ser afectadas sobre una misma entrada lógica.

A continuación se exponen algunas características adicionales.

Características		Unidad	Detalle	
	Temperatura de operación	Almacenamiento	°C	-25 a +65
		Funcionamiento		-10...+40
	Grado de Protección			IP20
	Gama de frecuencias de salida		Hz	0...200
	Frecuencia de corte		kHz	2...16
	Gama de velocidad			1...20
	Sobre torque transitorio			150% del torque nominal del motor
	Torque de frenado			50% del torque nominal del motor
	Corriente transitoria máxima			150% de la corriente nominal de l variador durante 60s
	Ley tensión frecuencia			Control vectorial de flujo sin captor, con señal de comando del motor del tipo PWM
	Compensación de deslizamiento			Preajustado en fábrica, según calibre variador
	Alimentación		V	220ac monofásica
	Tensión de salida			Tensión trifásica igual a la tensión de alimentación
	Entrada analógica			Configurable: 0-5V 0-10V, 0-20mA 4-20mA
	Entradas lógicas	Número		4
		Características		Control 2 o 3 hilos 4 velocidades preseleccionadas Configurables lógica positiva o negativa
	Salida a rele (RA-RC)			1 Contacto NO abierto en falla
	Rampas de aceleración y desaceleración			Lineales 0,1 a 99,9s
Frenado de parada			Por inyección de CC automáticamente en la parada cuando la frecuencia es nula.	
Protecciones del variador			Térmica contra calentamientos excesivos Contra cortocircuitos entre las fases de salida Contra sobrecorrientes entre fases de salida y la tierra a la puesta en tensión Por sobre o subtensión de red	

	Protecciones del motor		Térmica integrada en el variador por cálculo permanente del I ² t.
	Resistencia de aislamiento a tierra	MΩ	>500 (aislamiento galvánico)
	Motor: potencia indicada en la placa	kW	0.75
	Corriente de línea máxima	A	9.9
	Corriente de salida permanente	A	4
	Corriente transitoria máxima	A	6
	Potencia disipada a carga nominal	W	40

Tabla 4.12 Variador de velocidad ATV11HU18M2A: Características técnicas.

4.4.1.5.2 Contactor LC1D09

Destinado a trabajar sobre el motor del venterol, éste contactor activará o desactivará dicho actuador durante el transcurso del tiempo de secado. Las características generales de este elemento son:

Características		Unidad	Detalle	
	Polos		3	
	Corriente asignada de empleo	A	9	
	Tensión asignada de empleo	V	110	
	Contactos auxiliares		1NC, 1NA	
	Límites de frecuencia	Hz	25...400	
	Corriente térmica convencional (I _{th}) θ ≤60°C	A	25	
	Potencia disipada por polo	W	0,20	
	Tensión asignada de circuito de control U _c 60Hz	V	110	
	Consumo medio 20°C ,60Hz, U _c , llamada	Bobina 50/60Hz	VA	70
		Cos φ	VA	0,75
	Consumo medio 20°C ,60Hz, U _c , mantenimiento	Bobina 50/60Hz	VA	7,5
		Cos φ	VA	0,3
	Tiempo de funcionamiento polos	Cierre NA	ms	12...22
		Apertura NC	ms	4...19

Tabla 4.13 Contactor LC1D09: Características técnicas.

4.4.1.5.3 Contactor LG GMC-9

Destinado a trabajar sobre el motor ventilador del intercambiador de calor, este contactor transmitirá la lógica de control impuesta por el PLC para el control de temperatura. Ha de anunciarse con esto, que el control seleccionado para este subsistema es de tipo ON/OFF con histéresis, una justificación para esta elección

radica en la velocidad de cambio lenta del proceso, y ahorro económico. Las técnicas de control utilizadas en el proyecto se detallarán en el capítulo destinado a software del sistema. Las características generales de este elemento son:

Características		Unidad	Detalle	
	Polos		3	
	Corriente asignada de empleo	A	20	
	Tensión asignada de empleo	V	110	
	Contactos auxiliares		1NC, 1NA	
	Frecuencia	Hz	60	
	Corriente térmica convencional (Ith) $\theta \leq 60^{\circ}\text{C}$	A	20	
	Tensión asignada de circuito de control U _c 60Hz	V	110	
	Corriente de consumo de bobina	mA	73	
	Tiempo de funcionamiento polos	Cierre NA	ms	11...18
		Apertura NC	Ms	6...9

Tabla 4.14 Contactor LG GMC-9: Características técnicas.

4.4.1.6 Actuadores

Finalmente los actuadores corresponden a los elementos cuya acción generan los cambios y el desarrollo del proceso. Existen tres elementos actuadores cuya descripción se anota a continuación:

4.4.1.6.1 Motor Trifásico Siemens 1LA7

Corresponde al actuador 1 que opera sobre el sistema de alimentación de la cascarilla de arroz en el sistema de secado. Es un motor trifásico asíncrono jaula de ardilla, controlado mediante el variador de velocidad antes descrito. Sus características eléctricas se describen a continuación:

	Características	Unidad	Detalle
	Servicio		S1
	Potencia	HP/kW	0.75 / 0,56
	Frecuencia	Hz	60
	Tensiones de soporte	V	220YY, 440YΔ
	Cos φ		0.79
	Corriente nominal In	A	2.4 YY, 1.2 YΔ
	Velocidad @ 60Hz	rpm	3430
	Grado de protección		IP55

Tabla 4.15 Motor trifásico Siemens 1LA7.

4.4.1.6.2 Ventilador transmisor de calor

Corresponde al actuador 2, gobernado por el contactor LG GMC-9, es el encargado de transferir el calor generado por la combustión de la cascarilla de arroz hacia la cámara de secado. Corresponde a un motor de inducción monofásico de las siguientes características:

	Características	Unidad	Detalle
	Potencia	W	8
	Tensión de soporte	V	110/220
	Frecuencia	Hz	60
	Corriente nominal In	A	0.69
	Velocidad @ 60Hz	rpm	3300

Tabla 4.16 Ventilador transmisor de calor: Características técnicas.

4.4.1.6.3 Venterol de oxigenación

Corresponde al actuador 3, gobernado por el contactor LC1-D09, encargado de oxigenar la cámara de combustión para mantener vivo el proceso. Se compone de un motor monofásico de las siguientes características:

	Características	Unidad	Detalle
	Tamaño	"	2 ½
	Tensión de soporte	V	110/220
	Frecuencia	Hz	60
	Corriente nominal In	A	3/1.5
	Velocidad @ 60Hz	rpm	3600

Tabla 4.17 Sopladora de oxigenación: Características técnicas.

4.4.1.7 Elementos adicionales

El sistema completo incluye algunos elementos adicionales cuya función es permitir la operación sobre el mismo por parte del usuario, informar al usuario, alertar, facilitar la interconexión de los componentes citados y proteger todo los elementos citaremos el listado de elementos adicionales a continuación:

Dentro de los dispositivos de comunicación e interfase con el usuario se tiene: pulsadores de marcha – paro, luces piloto, selectores, zumbadores.



Figura 4.8 Instrumentos de interfase HMI local

Dentro de los elementos de interconexión y montaje del sistema tenemos: porta-fusibles para control, borneras de conexión, barras de conexión común, conectores de alimentación, control y sensores, cable, rieles de sujeción, canaletas porta cables, tomas de señal, identificadores, bases adhesivas de guía de cables, amarras, espirales de protección de cables, y el gabinete de control diseñado para el sistema.

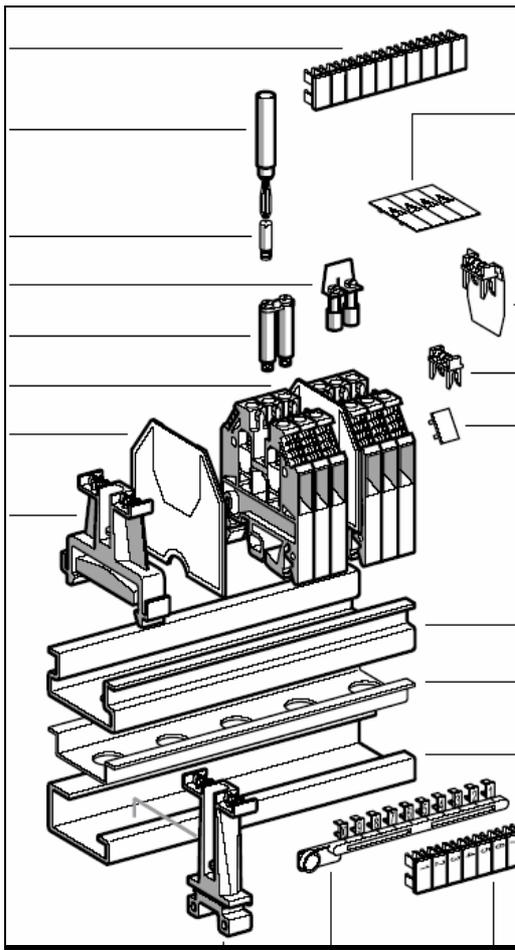


Figura 4.9 Algunos elementos de interconexión.

El detalle de utilización y algunas características de estos elementos se detalla en el capítulo de implementación del presente documento.

NOTA: El detalle técnico completo de los elementos descritos en este capítulo consta adjunto en el anexo 1.

CAPÍTULO 5

DESARROLLO DE SOFTWARE

5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se puntualizan principalmente la lógica de control programada para el sistema, involucrando la técnica de control usada, el desarrollo de todas las herramientas que posteriormente el operador será capaz de aprovechar basados en los requerimientos del cliente; así como también el desarrollo de la interfase de usuario HMI.

5.2 SOFTWARE

Para el desarrollo de la lógica de control, gobernada por el PLC, así como también de la interfaz de operador (HMI), ejecutada desde el computador, se usaron las herramientas TwidoSoft v 2.05 y Lookout v4.5 respectivamente, a continuación se da una breve descripción de ellos.

5.2.1 TwidoSoft v2.05.

TwidoSoft es un entorno de desarrollo gráfico mediante el cual se puede crear, configurar y monitorear aplicaciones destinadas exclusivamente a autómatas Twido.



Figura 5.1 Software de programación del PLC.

Sus múltiples lenguajes de programación (lista de instrucciones, Ladder Logic y lógica graficet), sus diversos asistentes de configuración, y sus modos de operación, facilitan el uso de cada una de las herramientas que dispone.

TwidoSoft es un software basado en Windows de 32 bits para una PC personal que opere en plataformas Microsoft Windows 98 segunda edición, Microsoft Windows 2000 Professional o Microsoft Windows XP; entre sus principales funciones se encuentran:

- Interfaz gráfica de usuario.
- Programación y configuración del autómata.
- Control, monitoreo y comunicaciones del controlador Twido.

El PC debe cumplir con las siguientes especificaciones mínimas con el fin de que TwidoSoft pueda operar satisfactoriamente:

- Procesador Pentium de 300Mhz.
- 128 MB de memoria RAM.
- 40 MB de espacio libre en disco duro

5.2.1.1 Lenguajes TwidoSoft

La flexibilidad que ofrece Twidosoft para crear programas ejecutados en autómatas Twido se ve reflejada en sus tres lenguajes de programación:

5.2.1.1.1 Lenguaje Lista de instrucciones

Se caracteriza por estar compuesto por una serie de instrucciones las cuales se ejecutan de manera secuencial en el autómata. Un ejemplo de este lenguaje se muestra en la Figura 5.2.

```

0 BLK %C8
1 LDF %I0.1
2 R
3 LD %I0.2
4 AND %M0
5 CU
6 OUT_BLK
7 LD D
8 AND %M1
9 ST %Q0.4
10 END_BLK
    
```

Figura 5.2 Lenguaje Lista de Instrucciones.

5.2.1.1.2 Diagramas Ladder Logic

Se caracterizan por emplear una representación gráfica similar a la usada en los esquemas de lógica de relé, empleando inclusive su misma lógica de funcionamiento. Aquí los elementos gráficos constituyen las instrucciones del programa. Un ejemplo de este lenguaje se muestra en la Figura 5.3.

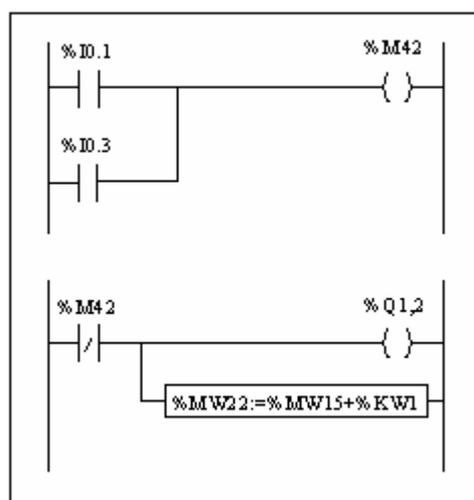


Figura 5.3 Lenguaje Ladder Logic.

5.2.1.1.3 Lenguaje Grafcet

El método analítico Grafcet puede interpretar de manera acertada cualquier sistema de control secuencial en una serie de pasos a los cuales se asocian acciones transiciones y condiciones para su ejecución. Un ejemplo de este lenguaje se muestra en la Figura 5.4.

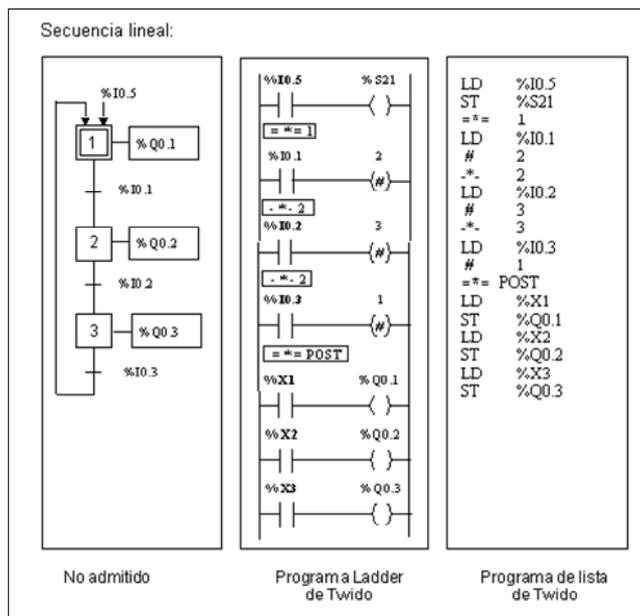


Figura 5.4 Lenguaje Grafcet (Ladder y Lista).

5.2.1.2 Memoria de Usuario

La memoria de usuario, a la cual se puede acceder exclusivamente por medio de la aplicación, se encuentra conformada por dos partes principales: la memoria de bit y la memoria de palabra.

La memoria de bit se localiza en la memoria RAM del controlador y contiene un mapa de 128 objetos de bit. Mientras que la memoria de palabra se divide a su vez en dos grupos, la memoria de palabra (16 bits con señal) y la memoria de palabras dobles (32 bits con señal), estas se encuentran distribuidas en todos los espacios de memoria del controlador dependiendo de su utilidad.

Si la memoria RAM, espacio físico donde se ejecuta normalmente el programa, ó la batería de respaldo se encontrasen en mal estado, TwidoSoft realizará automáticamente copias de seguridad del programa en ejecución así como también de la memoria de palabras, con el fin de que la aplicación no detenga su ejecución y por ende el proceso (Figura 5.5).

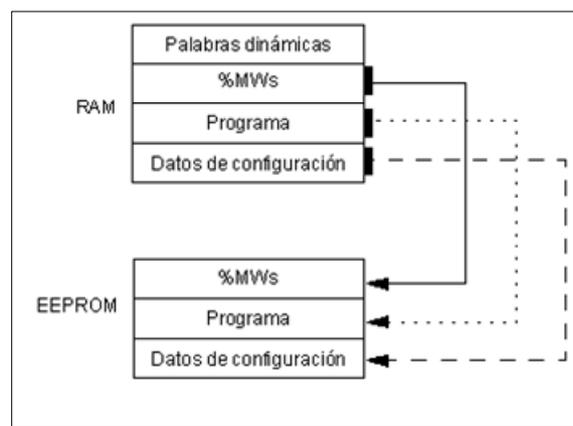


Figura 5.5 Copia de seguridad TwidoSoft.

5.2.1.3 Modos de Funcionamiento

TwidoSoft incorpora en su plataforma dos modos de funcionamiento: offline y online, diferenciados por la conexión entre el PC y el autómeta y la capacidad de uso de las herramientas del software.

En el modo offline el PC no se encuentra conectado con el controlador, toda aplicación que se realice en este modo se almacena en el computador, y para su ejecución en el autómeta debe ser primeramente transferido a este.

En el modo online el PC se encuentra conectado al autómeta, y se aprovecha este modo para depurar y realizar ajustes de funcionamiento en la aplicación. Hay que señalar que los cambios realizados se almacenan en la memoria del controlador directamente.

5.2.2 Lookout v4.5

Es un paquete fácil y poderoso de software, HMI (Human Machine Interface) y SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), destinado a la automatización industrial, que se ejecuta bajo plataformas de Windows con la capacidad de comunicarse con las entradas y salidas de PLC's, RTU's y otros dispositivos.

Entre las aplicaciones típicas de Lookout incluyen procesos de monitoreo continuo, supervisión y control, procesos discretos de manufactura, lotes de aplicación, y sistemas remotos.

Mediante la manipulación de objetos y eventos, Lookout es un paquete que no requiere programación, su uso es orientado a la creación de representaciones gráficas sobre la pantalla del computador personal las cuales luego se enlazarán virtualmente a los instrumentos de campo que estén gobernando el proceso por medio de controladores, tarjetas de adquisición u otros terminales; hay que señalar que para este proyecto la comunicación o enlace Lookout-Autómata se lo realiza por medio del bus de campo Modbus.

Lookout también ofrece múltiples herramientas complementarias, para el trabajo con el control de procesos estadísticos, requerimientos administrativos, manejo SQL, requerimientos de seguridad, manejo de usuarios, ejecución de múltiples procesos, métodos de animación, opción de alarmas local y a distancia (dial-up, network, tx-rx), además del intercambio dinámico de datos.

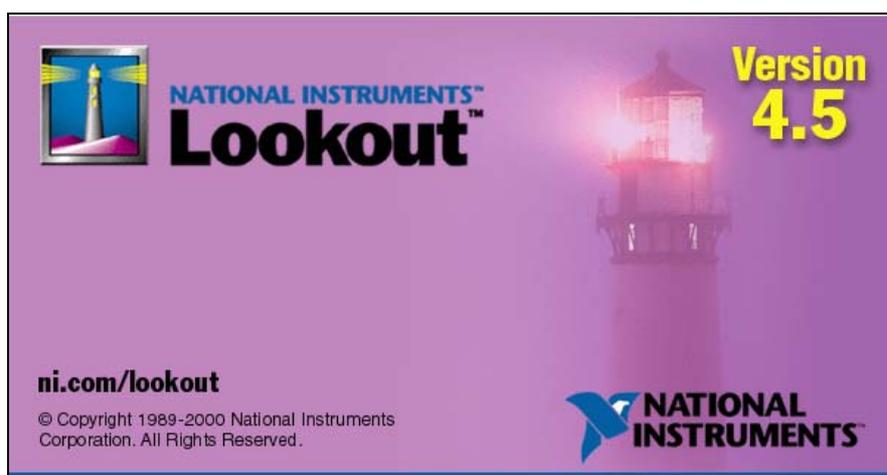


Figura 5.6 Lookout v4.05. Pantalla de Inicio.

Básicamente Lookout presenta un entorno típico de Windows, es decir, el dinamismo entre ventanas de aplicación, barras de herramientas, barras de estado y asistentes de configuración de componentes en la aplicación.

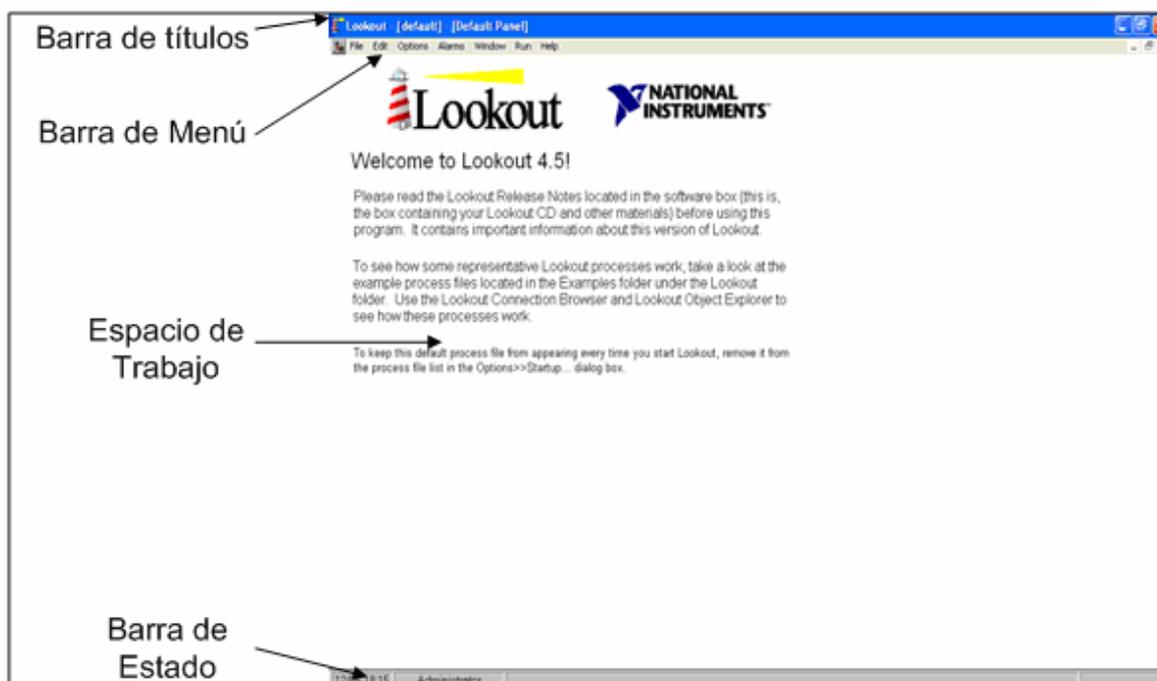


Figura 5.7 Entorno Lookout.

Para un adecuado funcionamiento, Lookout exige los siguientes requerimientos de hardware y software acerca del PC personal sobre el que este instalado.

- Procesador Pentium de 90Mhz
- Memoria RAM de 32MB
- 45MB en espacio de disco duro libre para ejecución, mas 100MB o mayor destinado para la base de la base de datos CITADEL.
- Plataforma Windows 95/98, NT o mayor.
- Tarjeta de red TCP/IP, si se desea adquirir las ventajas de Lookout trabajando sobre una red.

La eficiencia del software depende del número, tamaño y complejidad del proceso cuando este se encuentra en ejecución, mientras menor sea el requerimiento su labor será mas eficiente.

5.3 LÓGICA DE CONTROL

A continuación se detallan de manera general las filosofías de control empleadas para cada uno de los subsistemas que conformaron este proyecto, cabe señalar que se desarrollaron sistemas independientes pero complementarios, es decir que ambos deben actuar necesariamente.

5.3.1 Sistema General

El controlador del sistema Twido TWD LDMA 20DRT es un modelo modular, y el acceso a cada uno de los registros de entradas y/o salidas se ve diferenciado por una dirección lógica (Figura 5 – 8) asignada automáticamente por TwidoSoft cuando se agregan físicamente a los módulos complementarios.

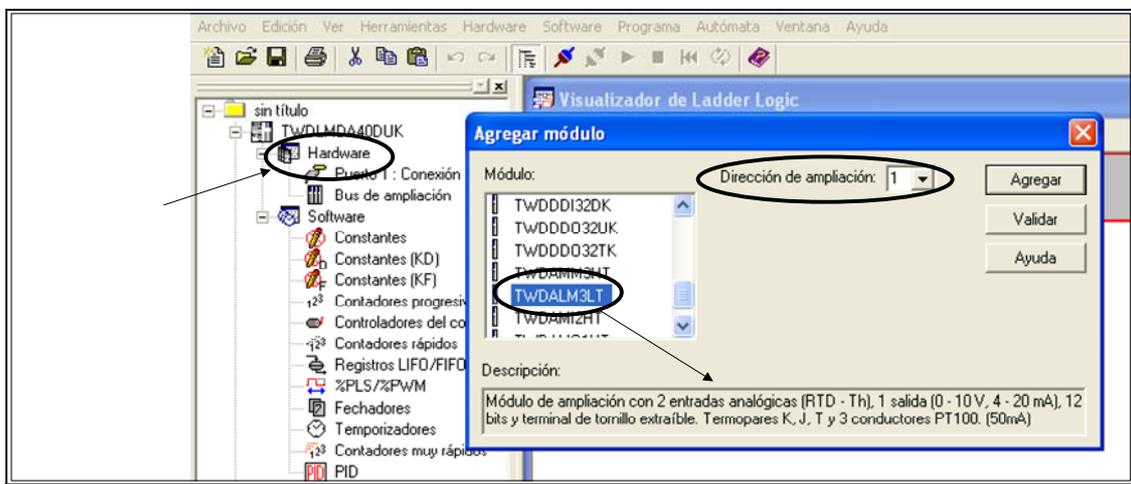


Figura 5.8 Configuración de Hardware.

Lookout por su parte, maneja un protocolo de comunicación genérico (MODBUS), el cual no tiene la capacidad de distinguir directamente la configuración del controlador, únicamente distingue los registros y variables lógicas de propósito general, para motivos de programación %MWXXX y %MXXX respectivamente, razón por la cual se debe realizar una copia de las variables de interés a cualquiera de las variables genéricas.

La lógica de operación global empleada para el sistema se encuentra resumida mediante el empleo de diagramas de flujo en el Anexo_5– Lámina 17; y de forma general se lo describe a continuación.

Menú configuración
de hardware

- El sistema debe iniciar seleccionando un modo de operación (local/remoto), mismo que se lo establecerá mediante el selector ubicado en el gabinete de control.
- Encender manualmente el combustible en la cámara de combustión.
- Enviar señal de inicio de secado al sistema.
- Seleccionar el producto a procesarse.
- Esperar que el sistema envíe señal de carga.
- Cargar el producto en el lecho de secado.
- Enviar señal de carga lista al sistema

Una vez cumplida con esta secuencia el proceso está iniciado, este finalizará cuando se cumpla el tiempo de secado del producto en tratamiento, o exista una petición de parada por alarma.

Las variables que determinan el funcionamiento de esta etapa se detallan en las Tablas 5.1, 5.2, y 5.3.

Entradas	Tipo	Definición
IN0(%I0.0)	Primera Entrada digital del modulo base del controlador	Pulsador Local de inicio del proceso.
IN1(%I0.1)	Segunda Entrada digital del modulo base del controlador	Pulsador Local de paro/emergencia del proceso.
IN2(%I0.2)	Tercera Entrada digital del modulo base del controlador	Selector manual de control Local/Remoto
IN3(%I0.3)	Cuarta Entrada digital del modulo base del controlador	Pulsador Local de carga
IN4(%I0.4)	Quinta Entrada digital del modulo base del controlador	Primera posición del selector local de producto (morochillo)
IN5(%I0.5)	Sexta Entrada digital del modulo base del controlador	Segunda posición del selector local de producto (mote)
IN6(%I0.6)	Séptima Entrada digital del modulo base del controlador	Tercera posición del selector local de producto (arroz)
IN7(%I0.7)	Octava Entrada digital del modulo base del controlador	Cuarta posición del selector local de producto (plátano)

Tabla 5.1 Variables de Entrada.

Variable	Definición
%MW20	Registro de temperatura máxima morochillo
%MW21	Registro de temperatura mínima morochillo
%MW22	Registro de tiempo de secado morochillo
%MW23	Registro de temperatura máxima mote
%MW24	Registro de temperatura mínima mote
%MW25	Registro de tiempo de secado mote
%MW26	Registro de temperatura máxima arroz
%MW27	Registro de temperatura mínima arroz
%MW28	Registro de tiempo de secado arroz
%MW29	Registro de temperatura máxima plátano
%MW30	Registro de temperatura mínima plátano
%MW31	Registro de tiempo de secado plátano
%M8	Indicador de Tiempo cumplido (proceso finalizado)
%M9	Indicador de señal de paro realizado
%M4	Indicador de carga Lista (proceso iniciado)
%M60	Indicador de morochillo en proceso
%M61	Indicador de mote en proceso
%M62	Indicador de arroz en proceso
%M63	Indicador de plátano en proceso
%M100	Señal cuadrada carga de producto
%M102	Señal cuadrada emergencia de nivel
%M110	Señal cuadrada fin de proceso
%M115	Señal cuadrada emergencia parcial

Tabla 5.2 Variables y registros generales.

Salida	Tipo	Definición
OUT5(%Q0.5)	Sexta Salida digital del módulo base del controlador	Luz indicador de proceso
OUT6(%Q0.6)	Séptima Salida digital del módulo base controlador	Sirena
OUT7(%Q0.7)	Octava Salida digital del módulo base controlador	Luz indicador de carga

Tabla 5.3 Variables de salida.

5.3.2 Sistema de Combustión

El grado de importancia que tiene este sistema dentro del proceso en general es vital, ya que primeramente es la piedra angular del sistema y el desempeño adecuado de este proveerá los rangos necesarios para un óptimo secado; motivo de este proyecto.

Este sistema debe estar presente desde que inicia el proceso de secado hasta su consecuente finalización, su labor fundamental es mantener una adecuada combustión de la cascarilla dentro de una temperatura preestablecida

5.3.2.1 Lógica de Funcionamiento

La lógica de funcionamiento exigida por el sistema es cómoda y simplemente su desempeño se remite desde que inicia hasta que finaliza el proceso. Una descripción rápida se ofrece mediante el uso de diagramas de flujo en el Anexo_5-Lámina 18, y de manera general se la describe a continuación.

- El sistema debe empezar su ejecución únicamente después de que se haya realizado el encendido manual del combustible en la cámara de combustión.
- El sistema debe esperar la señal de inicio del proceso.
- El sistema inicia.
- Únicamente cuando el tiempo de secado ha finalizado ó se ha realizado una petición de alarma, el proceso de combustión se detiene.

La lógica que se elaboró en esta etapa, fue relativamente sencilla, su presencia se vio restringida únicamente por el estado general del proceso (INICIADO/DETENIDO), su complejidad se vio evaluada en la configuración del modulo PID y su sintonización.

5.3.2.2 Filosofía de Control

Para este sistema se decide realizar el diseño programación e implementación de un control PID por las siguientes razones:

- Es un proceso continuo de tratamiento fino, ya que se deben controlar parámetros como eficiencia en el consumo de combustible, niveles de contaminación, eficiencia en el aprovechamiento energético, entre otros.
- Es un proceso de alta incidencia; a tal punto que si sale de su rango de operación puede producir la pérdida total o parcial del producto en tratamiento.
- Es un proceso de alto riesgo, este sistema puede generar incendios debido a una mala combustión, motivo por el cual debe ser controlado de la mejor manera.

Mediante el uso de este control se pretende llevar al sistema de combustión a un punto de operación tal que se puedan obtener resultados lo mas óptimos posibles en cuanto a la eficiencia en la combustión, así como también en la generación de energía necesaria y suficiente para el proceso de secado.

TwidoSoft dispone de 14 lazos de control PID, los cuales son configurables de acuerdo a la necesidad del proceso mediante un cuadro de diálogo de configuración, una explicación breve de su modo de seteo se ofrece en seguida.

Mediante el explorador del software se accede a la etiqueta PID y se ejecuta un doble clic; una vez accedido al cuadro de configuración se presenta el siguiente cuadro de diálogo, Figura 5.9.

En esta pestaña del cuadro de diálogo PID se debe establecer en configurado el número del PID a usarse y su modo de funcionamiento, para este caso se prefirió usar el modo PID.

Seguido de esto se encuentra la pantalla de Entrada donde se debieron establecer los parámetros de entrada al controlador, tal y como se muestra en la Figura 5.10.

En esta etapa existe la posibilidad de establecer niveles de conversión y alarmas, pero se prefirió realizar el control de estos parámetros con la herramienta Lookout.

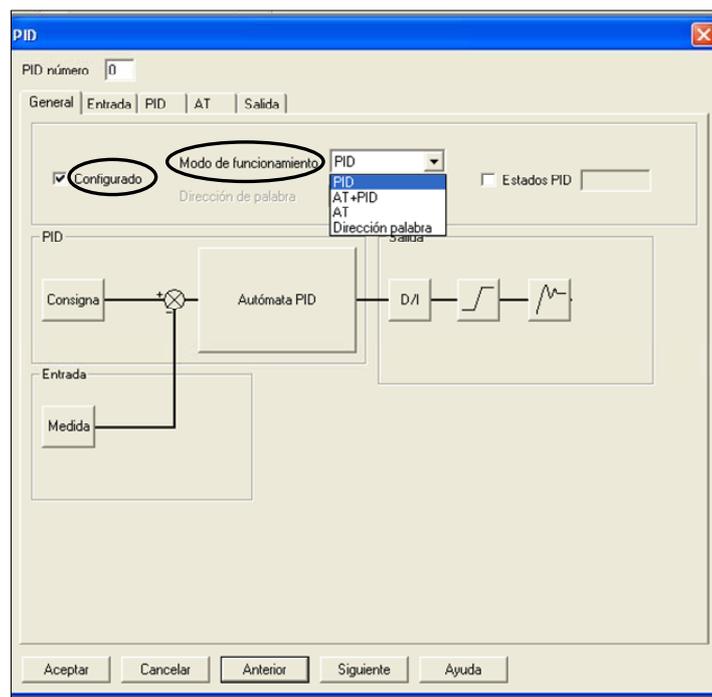


Figura 5.9 PID – General.

En este cuadro se debió ingresar únicamente el registro que interpreta la medida proporcionada por el sensor en un valor numérico, para este caso la entrada %IW1.0 que corresponde al primer módulo análogo digital localizado después del módulo principal y a su primera entrada analógica.

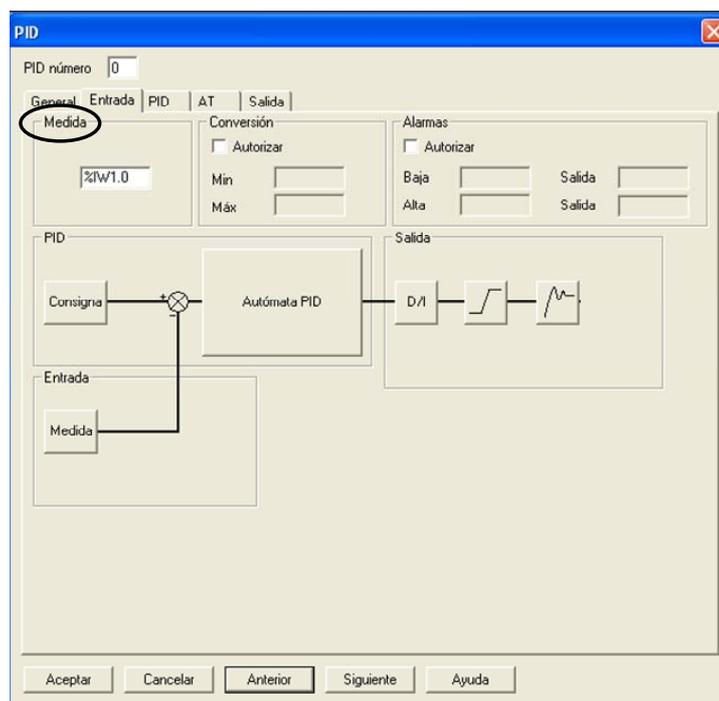


Figura 5.10 PID – Entrada.

La pestaña que sigue a continuación es la denominada PID, aquí se establecen los parámetros bajo los cuales el controlador PID debe operar; La Figura 5.11 muestra la pantalla de configuración.

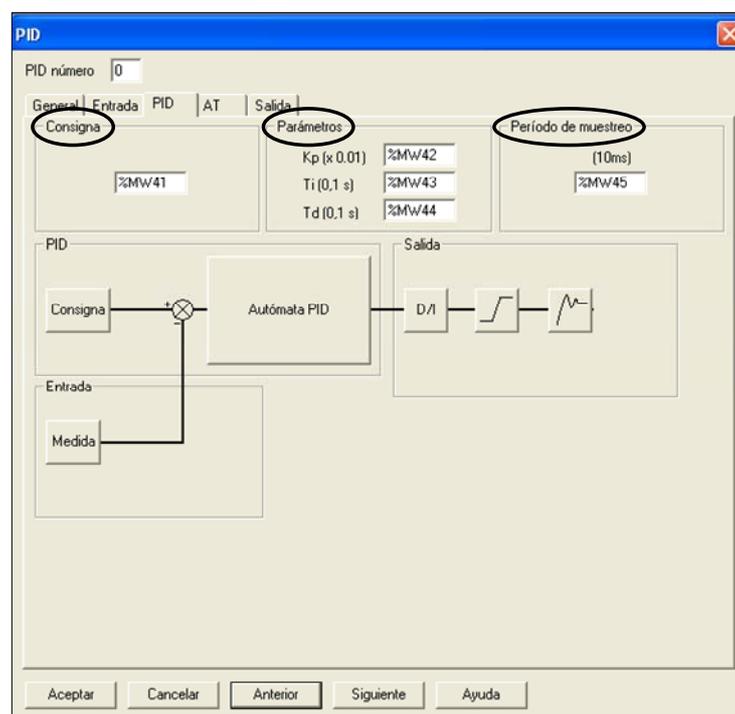


Figura 5.11 PID – PID.

Dichos parámetros son: la consigna o también conocida como “SetPoint” que es el valor en el cual el sistema deberá establecerse, los parámetros K_p , T_i y T_d necesarios para la sintonización del controlador y mediante los cuales se llevará el sistema al punto de operación que la consigna indique y el período de muestreo al cual deberá someterse para actualizar todos sus valores; los dos últimos definen la velocidad con la que el controlador responderá a un cambio en la consigna.

La pestaña que viene a continuación es la llamada AT, esta es una herramienta que proporciona el controlador para su auto-calibración, es decir que los parámetros de sintonización son ajustados de manera automática por si mismo, esta es una excelente herramienta para cualquier proceso sobre todo en los cuales el operador no disponga de una HMI. Cabe señalar que para uso el controlador debe ser tipo AT ó PID + AT; para este caso el lazo de control en uso es tipo PID.

El último paso previo al establecimiento de todos los parámetros de funcionamiento la muestra la Figura 5.12 en su ventana de salida, aquí se establecen todos los parámetros de salida a los que se debe someter el controlador PID durante su desempeño.

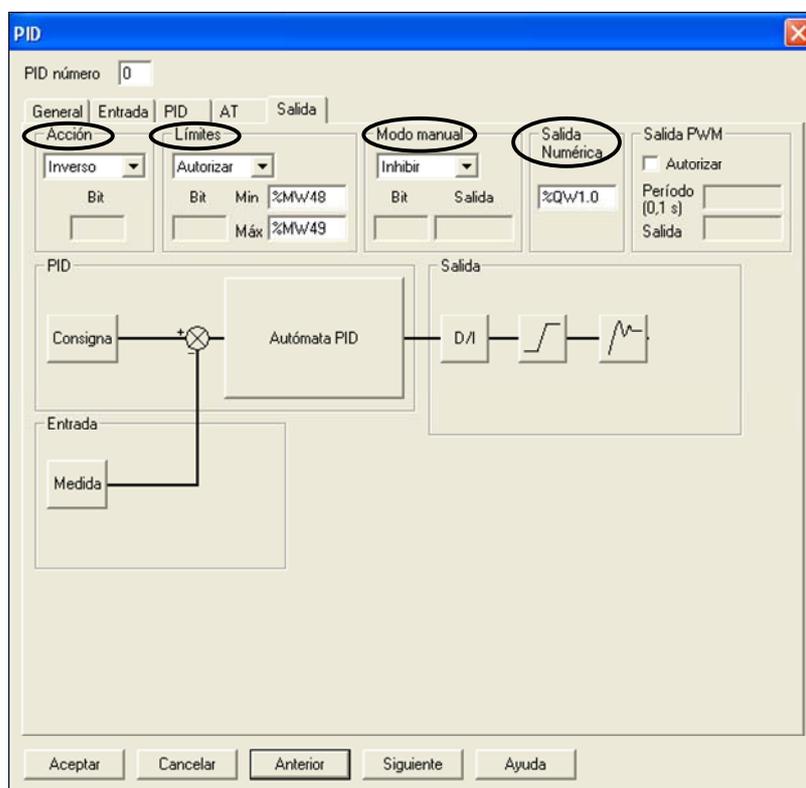


Figura 5.12 PID – Salida.

En primera instancia se muestra la acción del controlador, para el caso desarrollado es inversa, luego se establecen los límites que no deberá exceder el controlador en su salida y finalmente se debe inhibir la posibilidad de intervenir manualmente la salida numérica del controlador.

La lógica de programación que se debió implementar para esta etapa en TwidoSoft se muestra en la Figura 5.13.

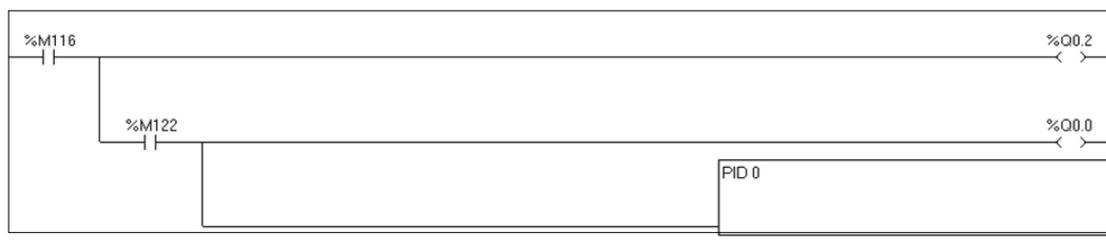


Figura 5.13 Lógica programada PID.

Una vez culminada la etapa de diseño y programación del lazo de control PID, se debe sintonizarlo mediante la manipulación de las constantes de sintonización K_p , T_i , y T_d , con el fin de que el sistema se comporte de la manera más adecuada ante las exigencias del proceso.

La manipulación de estas variables se la podrá realizar mediante la interfaz del operador, en su pantalla de HISTORICO.

Una recomendación de cómo realizar la sintonización para este controlador se la detalla en el capítulo 7.

5.3.2.3 Asignación de Variables

En las Tablas 5.4, 5.5, y 5.6, que se muestran a continuación se definen el significado de todas las variables usadas en el sistema de combustión, con su correspondiente descripción.

Variable	Definición
%M116	Variable lógica indicador de proceso iniciado.
%M122	Temporizador de arranque del variador de velocidad.
%MW41	Registro consigna del PID, Set Point
%MW42	Registro K_p del PID, parámetro de sintonización
%MW43	Registro T_i del PID, parámetro de sintonización
%MW44	Registro T_d del PID, parámetro de sintonización
%MW45	Registro Período de Muestreo del PID
%MW48	Registro Valor mínimo de la salida numérica PID
%MW49	Registro Valor máximo de la salida numérica PID

Tabla 5.4 Variables y registros generales.

Entradas	Tipo	Definición
CH1 (%IW1.0)	Entrada del canal 1 del sensor (PV)	Entrada del sensor de temperatura, Termocupla tipo K (0-1200°C)

Tabla 5.5 Variables de Entrada.

Salida	Definición
CH1 (%QW1.0)	Salida analógica (0-10 V) al variador de velocidad

Tabla 5.6 Variables de Salida.

5.3.3 Sistema de secado

El objetivo fundamental de este sistema es realizar el intercambio térmico entre el aire del ambiente y el calor generado por los gases de combustión, controlando que el producto en tratamiento se mantenga dentro de los niveles de temperatura de secado adecuados para su procesamiento final.

5.3.3.1 Lógica de Funcionamiento

Asumiendo que el sistema de combustión opera de manera adecuada y una vez establecidos los requerimientos del cliente y las posibles herramientas complementarias que este pueda tener mediante la automatización del proceso, tales como: asignar las temperaturas de secado para los productos en tratamiento, establecer los niveles de alarmas de temperatura extremadamente alta y/o baja, supervisión y monitoreo entre otras, se ha establecido la siguiente lógica normal de funcionamiento, la cual se resume mediante un diagrama de flujo en el Anexo5 – Lámina 19 y de manera general se la describe a continuación.

- Seleccionar modo de control.
- Enviar señal de inicio al sistema.
- Esperar que el sistema envíe la señal de cargar producto.
- Cargar producto.
- Enviar al sistema señal de carga realizada.

Una vez cumplida con esta secuencia el proceso inicia, y culminará cuando se cumpla el tiempo de secado del producto en proceso o se realice una parada de emergencia.

5.3.3.2 Filosofía de Control

Para la consolidación de este sistema se decide diseñar programar e implementar un sistema ON/OFF con histéresis, sometido a los siguientes razonamientos:

- El proceso basa su operación en una variable de cambio lento como es la temperatura; lo cual se adapta a un requerimiento para este control.
- El valor de temperatura al cual el producto en tratamiento es sometido, ofrece flexibilidad; aproximadamente ± 3 ° C.
- Es una filosofía de control económicamente más accesible y que cumple con los requerimientos planteados por el cliente.

La lógica de programación elaborada en TwidoSoft es relativamente más compleja que la diseñada para el sistema de combustión, aquí fue necesario la confección de un diagrama de flujo el cual facilite el desarrollo del programa y su adecuado funcionamiento; este se muestra en el Anexo5_Lámina 20 y se lo describe a continuación.

- Se debe enviar al sistema la señal de inicio.
- El lazo de histéresis empieza su ejecución.
- El valor de la temperatura en la cámara de secado debe alcanzar un valor mínimo.
- El sistema debe enviar una señal de carga autorizada.
- Cargar el producto
- Enviar al sistema la señal de carga realizada.

Una vez ejecutada la secuencia, el sistema debe esperar a que se cumpla el tiempo de secado requerido para el proceso, luego de lo cual este dejará de actuar.

Para la implementación de este control se vio la necesidad de programarlo línea a línea dependiendo de las condiciones preestablecidas con anterioridad, ya que TwidoSoft no ofrece ninguna herramienta de configuración rápida para esta técnica de control de procesos como ocurría con el control PID.

De manera general se puede indicar que el siguiente código resume el control on/off con histéresis implementado para el sistema de secado.

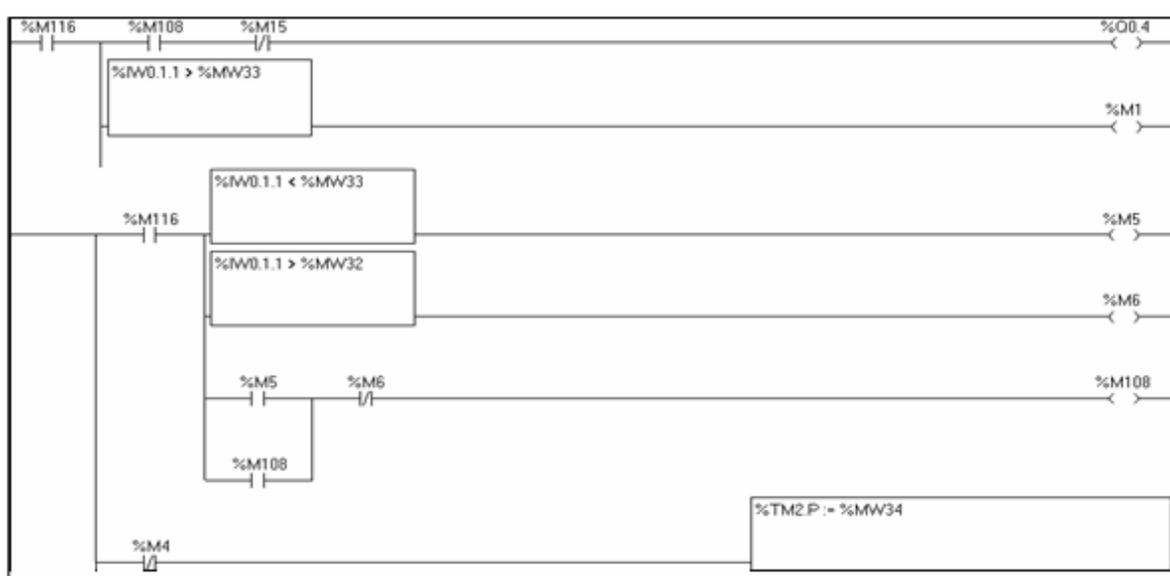


Figura 5.14 Lógica programada Control ON/OFF con Histéresis.

Como bien se conoce la lógica de funcionamiento que establece esta técnica de control, hace que la Figura 5.14 pueda ser comprendida de una manera intuitiva mediante la interpretación de las tablas que se muestran en el apartado 5.3.3.3.

Como último paso se conoce que la técnica de control empleada para este proceso exige establecer a su parámetro principal, la banda de histéresis (BH), en un valor adecuado.

Para ello se recomienda seguir el ejemplo de calibración de este sistema en el Capítulo 7.

La manipulación de este parámetro tiene total disponibilidad en la interfaz del operador en su pantalla de SETEO.

5.3.3.3 Asignación de Variables

Las Tablas 5.7, 5.8, y 5.9 contienen la definición de las variables que conforman el sistema de secado, y su correspondiente propósito.

Entradas	Tipo	Definición
CH2 (%IW1.1)	Entrada del canal 2 del sensor (PV)	Entrada del sensor de temperatura, Termocupla tipo K (0-1200°C)
IN0 (%IO.0)	Primera Entrada digital del modulo base del controlador	Pulsador de inicio del proceso.
IN3(%IO.3)	Cuarta Entrada digital del módulo base del controlador	Pulsador de carga lista.

Tabla 5.7 Variables de Entrada.

Variable	Definición
%MW32	Temperatura máxima del proceso en ejecución
%MW33	Temperatura mínima del proceso en ejecución
%MW34	Tiempo de secado del proceso en ejecución
%M8	Indicador de tiempo cumplido
%M1	Indicador de temperatura mínima alcanzada
%M5	Indicador de temperatura baja (control con histéresis)
%M6	Indicador de temperatura alta (control con histéresis)
%M9	Indicador de señal de paro activada
%M10	Indicador de primera vez presionado el botón de paro
%M4	Indicador de carga lista
%M21	Indicador de segunda vez presionado el botón de parada.
%M15	Indicador de primera vez presionado el botón de parada.
%M116	Auxiliar de proceso iniciado
%M108	Auxiliar para el control de histéresis

Tabla 5.8 Variables y registros generales.

Salida	Definición
OUT0 (%Q0.0)	Primera Salida a transistor, control a 2 hilos del variador de velocidad.
OUT1(%Q0.1)	Segunda Salida a transistor, control a 2 hilos del variador de velocidad.
OUT2(%Q0.2)	Primera Salida a relé, bobina del contactor del motor de alimentación.
OUT3 (%Q0.3)	Segunda Salida a relé, bobina del contactor de sopladora.
OUT4(%Q0.4)	Tercera Salida a relé, bobina del contactor del ventilador.

Tabla 5.9 Variables de Salida.

5.4 INTERFAZ DEL OPERADOR (HMI)

En este apartado se detalla el propósito de los elementos gráficos destinados a la acción y control general del proceso, los cuales intervinieron en el desarrollo de la interfaz del operador (HMI), así como también el detalle de los enlaces realizados al controlador del sistema.

5.4.1 Pantalla de Usuario

Su propósito principal es el de iniciar el proceso remotamente, si el selector manual de modo de control se encuentra en la posición "remoto", en la Figura 5.15 se resaltan los elementos que aquí intervienen.

Para el proceso en general se dispone de todos los elementos de mando virtuales, mediante los cuales se controla al sistema, entre los que se destacan los botones de INICIO, PARO, y CARGA, el selector del producto a tratarse, el estado de todas las variables en el tablero local y un estado general del proceso una vez iniciado.

Acerca del proceso de combustión esta pantalla dispone de: el valor de la temperatura en la cámara de combustión, la velocidad de giro aproximada del motor de alimentación, y el estado de las alarmas del proceso.

Finalmente, acerca del sistema de secado, las herramientas más importantes que se ubican en la pantalla son: el valor de temperatura actual en la cámara de secado, el estado de las alarmas, y el estado de los actuadores que gobiernan en el proceso.

El enlace que tienen todas estas variables al controlador se detallan en la Tabla 5.10.

Gráfica	Dirección Automata	Definición
A	%M22	Botón remoto de IINCIO de proceso
	%M23	Botón Remoto de producto cargado
	%M24	Botón Remoto de Paro/Emergencia
	%MW35	Registro remoto de producto seleccionado (1,2,3,4 respectivamente)
B	%MW36	Valor actual de temperatura en la cámara de secado.
	%MW37	Valor actual de temperatura en la cámara de combustión.
	%MW38	Valor de velocidad del motor de alimentación
C	%M0	Estado del pulsador INICIO en el gabinete local
	%M20	Estado de sirena en el gabinete local
	%M31	Estado del pulsador de PARO en el gabinete local
	%M2	Estado del pulsador de CARGA en el gabinete local
	%M10 - %M13	Producto seleccionado en el gabinete local
D	%M15	Indicador de pulsador de alarma activado.
	%M64	Alarma de temperatura alta en la cámara de combustión
	%M65	Alarma de temperatura baja en la cámara de combustión
	%M119	Alarma de temperatura alta en la cámara de secado.
	%M120	Alarma de temperatura baja en la cámara de secado.
E	%M0	Indicador luz INICIO HMI
	%M2	Indicador luz de carga HMI
	%M32	Estado del selector en el gabinete local
	%M60 - %M63	Producto en proceso de secado iniciado
	%MW34	Tiempo total de secado del proceso en ejecución
	%MW66	Tiempo restante de secado
	%M42	Estado del motor de alimentación
	%M43	Estado del motor, sopladora
	%M7	Estado del motor, ventilador

Tabla 5.10 Variables y registros generales.

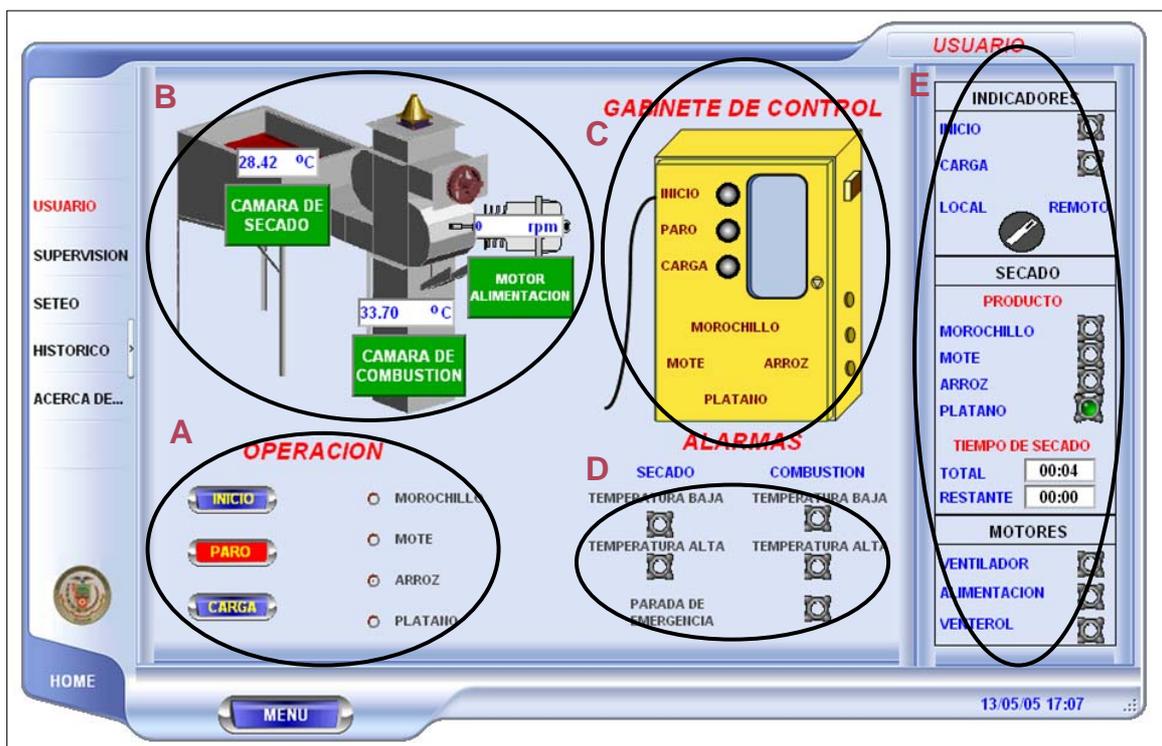


Figura 5.15 HMI – USUARIO.

5.4.2 Pantalla de Supervisión

En esta pantalla el operador únicamente podrá conocer sobre el proceso mas no podrá actuar sobre el, su misión es de carácter informativo; Figura 5 – 16.



Figura 5.16 HMI – USUARIO.

La información que aquí se presenta con relación al sistema de combustión, es la consigna de operación o SetPoint, el valor actual de temperatura en la cámara de combustión, y los valores en los niveles de alarmas máxima y mínima, así como también su estado de activación.

En tanto que para el sistema de secado se destacan, el Setpoint del proceso en marcha, el valor actual de temperatura en la cámara de secado y los valores en los niveles de alarmas máxima y mínima, así como también su estado de activación.

La Tabla 5.11 especifica los enlaces realizados para la captura de información presentada en esta pantalla.

Gráfica	Dirección Automata	Definición
A	%MW47	Valor de la consigna o SetPoint del Sistema.
	%MW37	Valor actual de temperatura en la cámara de combustión.
	%MW81	Valor de temperatura alta en la cámara de combustión
	%MW82	Valor de temperatura baja en la cámara de combustión
B	Expresión	Valor de la consigna o SetPoint del Sistema en marcha.
	%MW36	Valor actual de temperatura en la cámara de secado
	%MW39	Valor de temperatura alta en la cámara de secado.
	%MW40	Valor de temperatura baja en la cámara de secado

Tabla 5.11 Enlaces Gráficos – Pantalla de SUPERVISION.

5.4.3 Pantalla de SETEO.

En este modulo se ingresan todos los parámetros de interés correspondientes a cualquiera de los cuatros productos que el sistema es capaz de tratar, estos se resaltan en la Figura 5.17; cabe señalar que su acceso es restringido.

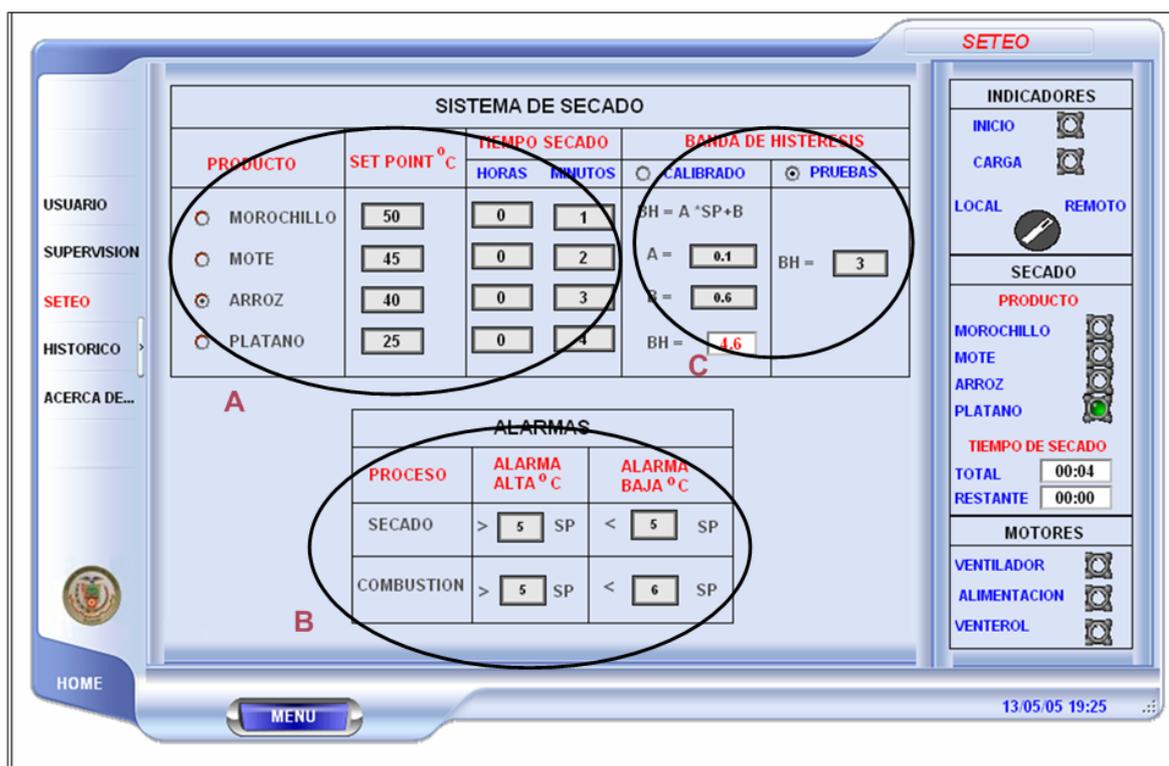


Figura 5.17 HMI – USUARIO.

En esta etapa se necesita especificar las temperaturas promedio de secado así como también el tiempo durante el cual deben estar sometidos cada uno de los productos en capacidad de ejecución.

Las representaciones gráficas que involucran al sistema de combustión en esta etapa son el establecimiento de los valores para las alarmas de nivel; mismas que se expresan en relación al Setpoint en proceso.

Con referencia al sistema de secado se especifican los valores para alarmas de nivel expresadas en relación del Setpoint del producto en ejecución además del establecimiento de la banda de histéresis bajo la cual operará el sistema; dependiendo de si se ha realizado o no la calibración de este parámetro bajo proceso.

La Tabla 5.12 especifica los enlaces realizados para la captura de información presentada en esta pantalla.

Gráfica		Dirección Autómata	Definición
A	SetPoint morochillo	%MW20 - %MW21	Registros de temperatura máxima y mínima para conmutación en la banda de histéresis
	SetPoint mote	%MW23 - %MW24	
	SetPoint arroz	%MW26 - %MW27	
	SetPoint plátano	%MW29 - %MW30	
	Tiempo secado morochillo	%MW22	Registros de tiempo de secado, sometidos a la temperatura especificada para el producto en proceso.
	Tiempo secado mote	%MW25	
	Tiempo secado arroz	%MW28	
	Tiempo secado plátano	%MW31	
B	Alarmas	%MW81	Valor del limite máximo de la temperatura cámara de combustión
		%MW82	Valor del límite mínimo de la temperatura cámara de combustión.
		%MW39	Valor de temperatura alta en la cámara de secado.
		%MW40	Valor de temperatura baja en la cámara de secado
C	Banda de Histéresis	Expresión	Sistema calibrado
		Expresión	Sistema de pruebas

Tabla 5.12 Variables de enlace – SETEO.

5.4.4 Pantalla de HISTORICO

Esta pantalla está destinada exclusivamente para ingeniería, captura de datos, análisis, realización de pruebas y calibraciones principalmente; se debe recordar que su acceso es restringido; Figura 5.18.

Para el proceso de combustión, los elementos que destacan en este panel son: el valor que tomarán las variables de sintonización del PID para su operación, y los límites máximos y mínimos de la salida analógica del sistema.

Para el sistema de secado la información gráfica que se destaca en esta pantalla es principalmente, el Setpoint del proceso en marcha, el valor actual de temperatura en la cámara de secado (PV), y el estado del elemento encargado del intercambio térmico (E.F.C.) el ventilador.

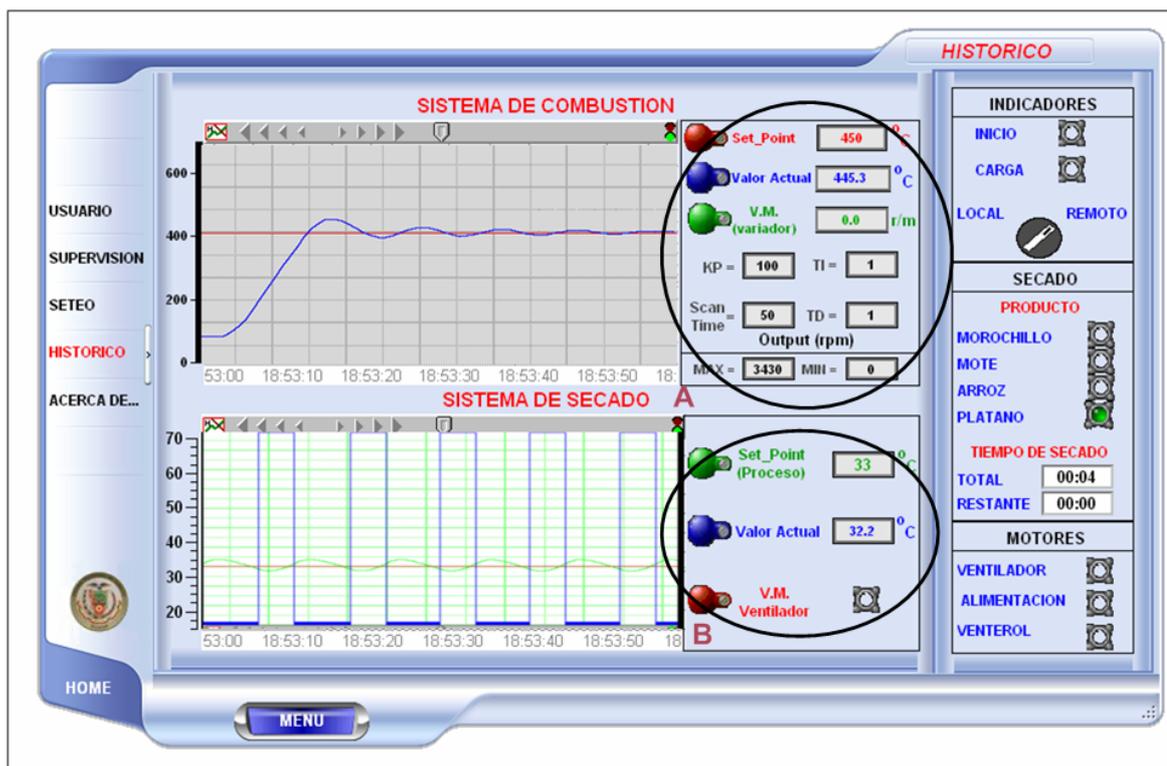


Figura 5.18 HMI – HISTORICO.

La Tabla 5.13 especifica los enlaces realizados para la captura de información presentada en esta pantalla.

	Gráfica	Dirección Automata	Definición
A	KP	%MW42	Valor KP, sintonización PID
	TI	%MW43	Valor KI, sintonización PID
	TD	%MW44	Valor KD, sintonización PID
	OUTPUT	%MW48	Valor mínimo de la salida PID
		%MW49	Valor máximo de la salida PID
B	SetPoint	Expresión	Temperatura estándar de secado del producto en proceso
	Valor_Actual	%MW36	Valor de la temperatura actual en la cámara de secado (PV).
	Ventilador (VM)	%M7	Estado del e.f.c, ventilador

Tabla 5.13 Enlaces Gráficos - Pantalla de Histórico.

CAPÍTULO 6

IMPLEMENTACIÓN

6.1 INTRODUCCIÓN

Una vez descrito todo el proceso de selección de equipos de control y la técnica de control plasmada dentro del área de software, este capítulo tiene como objetivo exponer toda la planificación de integración de los componentes, y los detalles de su interconexión. Para ello se pretende mostrar y explicar, en primera instancia, los esquemas eléctricos elaborados en función del diagrama de bloques planteado como modelo de funcionamiento del sistema, y de las características eléctricas de los elementos del equipo. Adicionalmente se detallará todos los aspectos tomados en cuenta para la construcción del gabinete que albergará los elementos, y, finalmente, se presentará el modelo de conexión y alambrado desarrollado para el sistema de control diseñado a lo largo de todo el tratamiento que se ha descrito en esta síntesis.

6.2 METODOLOGÍA DE DISEÑO

El desarrollo del modelo de funcionamiento eléctrico del sistema de control diseñado para la secadora de productos agrícolas toma sus bases de diseño en los modelos de funcionamiento de sistema modulares o por bloques, y en el esquema de flujo del proceso PI&D expuestos y detallados en el Capítulo 4 de éste documento.

Desde el punto de vista eléctrico, se debe entender que los esquemas de representación, ya sean explicativos o de realización, interpretan de manera simbólica el contenido de un aparato o instalación diseñada para un fin específico, e indican las relaciones o nexos que existen entre los diferentes componentes seleccionados así como el detalle de los medios de unión utilizados en la construcción.

“Un esquema eléctrico es la representación abreviada de un equipo eléctrico, puesto que no muestra todos sus componentes, sino aquellos importantes y

necesarios para su comprensión. En todo caso, es importante señalar que, los símbolos gráficos y métodos empleados para referenciar a cada uno de los componentes de un equipo sean estandarizados, de tal forma que se permita una lectura rápida por parte de los usuarios”⁹

En función de lo expuesto, se procederá a exponer y describir los tres diagramas principales desarrollados para este cometido: el Diagrama Unifilar, Los Diagramas Esquemáticos de Potencia y de Control, y el Diagrama de Interconexión o Alambrado.

6.2.1 Diagrama Unifilar

Dentro del Anexo 2, en la Lámina 3 se muestra el Diagrama Unifilar desarrollado para el sistema de control de de la máquina secadora de productos agrícolas. Como puede apreciarse, existe un interruptor principal para todo el sistema, mismo que incluye protecciones termomagnéticas. Cada motor del sistema dispone de un contactor de accionamiento, y para el caso especial del motor trifásico, dicho contactor se acompaña de un dispositivo guardamotor de protección adicional, más el variador de velocidad para su manejo. El controlador lógico programable del sistema se alimenta por una fuente regulada de tensión constante y gobierna el estado de dos luces pilotos y una sirena de alertas.

6.2.2 Diagramas esquemáticos

El detalle de interconexión de elementos eléctricos – electrónicos que se presentan en el diagrama unifilar, se desglosa en los diagramas esquemáticos de potencia y de control. Las características de estos esquemas se exponen a continuación:

6.2.2.1 Diagrama esquemático de Potencia

La Lámina 4 del Anexo 3 muestra el Diagrama Esquemático de Potencia desarrollado para el sistema de control de de la máquina secadora de productos agrícolas. Se puede apreciar en esta figura, con más detalle la interconexión de

⁹ Molina, M., Jorge, Ing., Apuntes de Control Industrial, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Unidad 3: Esquemas y Símbolos Eléctricos, Pg. 1.

los elementos presentados en el Diagrama Unifilar. Cabe resaltar de aquí la disposición de los elementos que comandan y protegen el motor trifásico junto con el variador de velocidad. Lo que se presenta en el diagrama, así como lo desarrollado en el Gabinete de control, es lo que sugiere el fabricante como sistema de interconexión y protección para esos equipos. También resulta válido destacar que las salidas de relé del controlador lógico programable manejan tensión monofásica de 110Vac.

6.2.2.2 Diagrama Esquemático de Control

La Lámina 5 del Anexo 3 muestra el Diagrama Esquemático de Control desarrollado para el sistema automático de la máquina secadora de productos agrícolas. Este diagrama presenta exclusivamente las líneas de control de los contactores desde el controlador lógico programable PLC, así como aquellas del variador de velocidad. Se destaca que las salidas de control para los contactores están protegidas con fusibles de 1.5A tal como lo recomienda el fabricante. Se escogieron las salidas a transistor para el gobierno del variador de velocidad verificando las impedancias de salida de las mismas en el PLC, así como las de entrada del variador, los niveles de tensión admisibles, y las corrientes de soporte. Para mayor referencia sobre el tema se puede verificar el detalle técnico de los equipos expuesto en el Capítulo 4, o el anexo 1 de las características de los mismos.

Se adiciona en este diagrama el módulo de entradas / salidas analógicas del controlador lógico programable PLC, por su importancia dentro del control del variador ya que su salida comanda la frecuencia a aplicar en el motor trifásico.

6.2.2.3 Esquema de Alambrado

La Lámina 6 del Anexo 3 presenta el esquema de alambrado total. Puede apreciarse que todos los conceptos de diseño plasmados dentro de los diagramas anteriores se desglosan en este esquema, y que la nomenclatura y simbología que concordaba en ocasiones anteriores con el estándar IEC, queda un poco desatendida para dar total comprensión del esquema de interconexión de los elementos. El esquema muestra revela la presencia de seis puntos comunes: 4 barras destinadas para Neutro, +24V_{DC}, -24V_{DC}, y tierra; 2 grupos de bornas, uno

para cada fase del sistema. Cabe recalcar que el módulo de entradas / salidas analógicas no aparece conectado a la base del Controlador Lógico Programable, y tampoco aparece el módulo de visualización del mismo. Se entenderá que estos módulos se interconectan por el propio bus de la estructura del PLC, que no se la muestra en este esquema por efectos de comprensión del gráfico.

Si bien el diagrama de alambrado expone minuciosamente todas las conexiones de los elementos que componen el sistema de control de la máquina secadora de granos, existen un sinnúmero de detalles que complementan el sistema para su adecuado empleo, desempeño y uso. Estos detalles van desde la selección de un gabinete en tamaño y material adecuado, hasta el tipo de conectores utilizado en cada uno de los acoples. Los siguientes párrafos están destinados a describir todos estos aspectos tomados en cuenta sobre la construcción real del equipo de control.

6.3 METODOLOGÍA DE CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

La implementación propia del sistema de control para la máquina secadora de productos agrícolas conlleva tomar en cuenta un sinnúmero de aspectos adicionales a los que se revelan en los diagramas y esquemas eléctricos. Dichos aspectos hablan sobre el tipo y tamaño de gabinete que albergará todos los elementos, el ordenamiento o distribución de los mismos, la presentación de luces, botones y selectores, el cable utilizado, y los conectores con su disposición para los acoples tanto de sensores como de actuadores. Cada detalle merece un análisis que facilita la implementación y el armado del equipo.

6.3.1 Gabinete de control

Luego de adquiridos los materiales del sistema de control de la máquina secadora de productos agrícolas, y verificadas las dimensiones de los mismos, se seleccionó un gabinete metálico rectangular de 40cm de ancho, 60cm de altura y 20cm de profundidad. Se tuvo precaución de que incorpore un doble fondo metálico sobre el que se desarrolla todo el armado de canaletas y rieles de montaje y de esa manera, no se estropee la cara posterior con los orificios de sujeción para tornillo. Se han ubicado las entradas de alimentación y las salidas de motores por los costados del mismo, evitando utilizar el costado superior para

prevenir que ingrese agua dentro del gabinete. Sobre la puerta del mismo se han dispuesto los orificios para luces, botoneras, selectores, acoples de sensores y cables de supervisión del sistema. Adicionalmente se ha dispuesto una ventanilla de visión que se ubica delante del controlador lógico programable, así como del variador de velocidad, ya que ambos equipos disponen de indicadores de estado y displays que muestran algunos parámetros del sistema.

La Figura 6.1 muestra el diseño de orificios y posicionamiento de conectores de motores y alimentación en el gabinete.

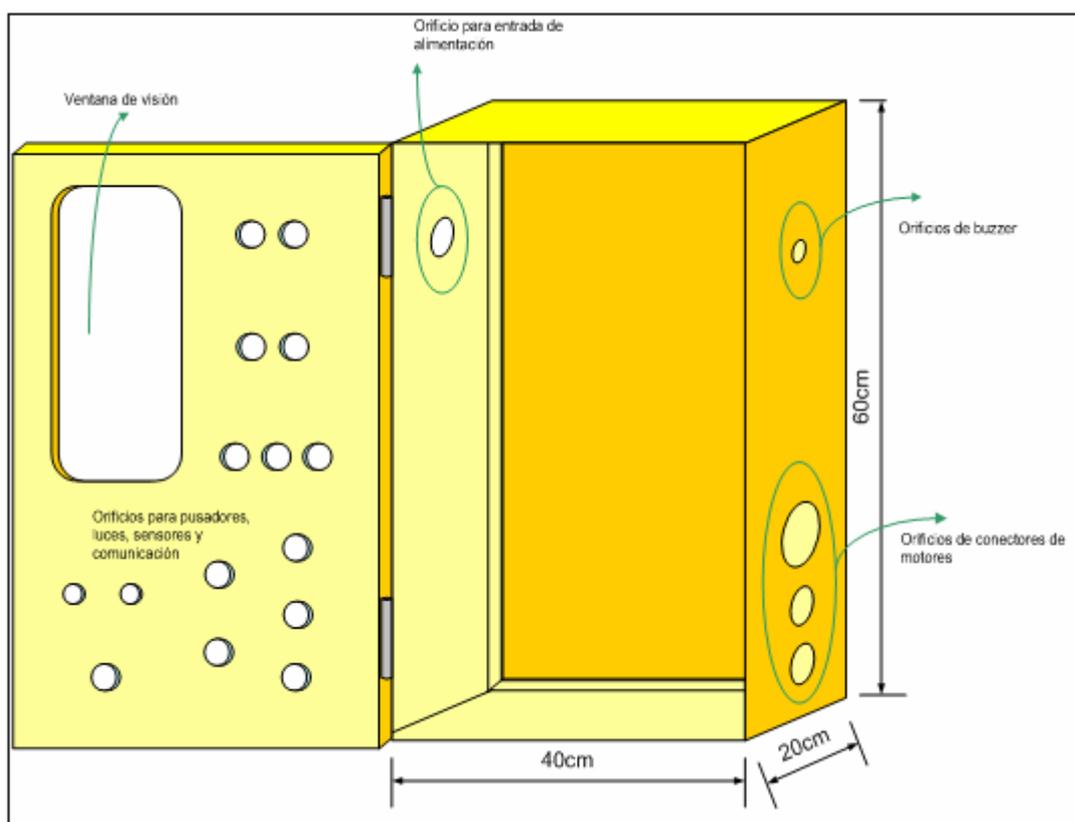


Figura 6.1 Gabinete de control, dimensiones, diseño de orificios para conectores y accesorios.

6.3.2 Disposición de los elementos

La disposición de los elementos busca cumplir con dos fines: facilitar la tarea de cableado y ubicar los elementos que incluyen un display justo detrás de la ventana de visión. Los elementos constan dispuestos en tres filas.

6.3.3 Disposición de las canaletas y rieles de montaje

Se han dispuesto canaletas por todos los márgenes del doble fondo, y entre cada fila de donde constarán los elementos. Cabe destacar que las filas no son del mismo alto entre ellas; su altura depende del elemento más grande que constará en la misma. Se ha incluido una canaleta adicional cercana al lugar donde se ubicarán las barras de conexión por la mayor densidad de cables que circulará por esos medios. Los rieles de montaje se ubican justo en la mitad de cada fila diseñada, previendo dejar libres los espacios para aquellos elementos que no se montan sobre el riel (breaker principal y variador de velocidad). La Figura 6.2 muestra una fotografía del diseño de rieles y canaletas en el doble fondo del gabinete



Figura 6.2 Ubicación de canaletas, rieles de montaje y barras de conexión sobre el doble fondo.

6.3.4 Cable de interconexión

El sistema de cableado está dispuesto en total apego a la norma establecida por el código de instalaciones eléctricas NEC. Existen diferentes tipos de cables de acuerdo a la aplicación o función que cumplen dentro del sistema, así como diferentes calibres y colores para su identificación y posteriores tareas de

mantenimiento. La Tabla 6.1 muestra un resumen de los diferentes cables utilizados en el sistema.

Circuito	Tipo	Calibre	Color
Fase 1	TFF (Flexible)	16 AWG	Azul
Fase 2	TFF (Flexible)	16AWG	Negro
Neutro	TFF (Flexible)	16 AWG	Blanco
Tierra	TFF (Flexible)	16AWG	Verde
+24V _{DC}	TFF (Flexible)	18AWG	Rojo
0V _{DC}	TFF (Flexible)	18AWG	Blanco
Control	TF (Sólido) TF (Sólido)	20AWG 20 AWG	Rojo Celeste
Alimentación	Sucre	3 x 14AWG	Conductores aislados: negro, verde, blanco Chaqueta: negro
Motor trifásico	Sucre	3 x 14AWG	Conductores aislados: negro, verde, blanco Chaqueta: negro
Sensores	Apantallado, protección térmica	3 x 0.5mm ²	Conductores aislados: negro, rojo, blanco Chaqueta: gris

Tabla 6.1 Tipos de cables utilizados en la conexión de elementos del gabinete de control.

6.3.5 Conectores del sistema

Se han utilizado conectores y tomas para la alimentación del sistema, las conexiones de los motores y las conexiones de los sensores. Las tomas de alimentación y energía se han seleccionado de acuerdo a lo establecido por las configuraciones de propósito general para conectores y tomacorrientes NEMA. La Tabla 6.2 muestra los tipos de tomas y conectores utilizados dentro del sistema de control de la máquina secadora de productos agrícolas.

Más información sobre los conectores utilizados puede encontrarse en el Anexo 1, puntualmente dentro del Anexo 1.7.

6.3.6 Tomas de puesta a tierra

Todos los equipos conectados en el sistema se han aterrizado en una barra de toma a tierra que de igual manera consta aterrizada a la carcasa del gabinete. Cómo se expone en la Tabla 6.1 el conductor de aterrizaje es de tipo TFF flexible 16AWG verde.

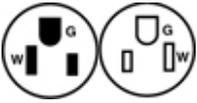
Aplicación	Terminal Macho	Terminal Hembra	Características	Figuras Macho / Hembra
Alimentación	NEMA 10-50P	NEMA 10-50R	50A, 125, 250V 3 polos 3 conductores	
Motor Trifásico	NEMA 10-20P	NEMA 10-20R	20A, 125, 250V 3 polos 3 conductores	
Blower / Ventilador	NEMA 5-15P	NEMA 5-15R	15A 125v 3 polos 3 conductores aterrizado	

Tabla 6.2 Tipos de conectores utilizados dentro del gabinete de control.

6.3.7 Accesorios y adicionales

Para lograr la máxima funcionalidad y estética en la construcción del gabinete se han tomado en cuenta algunos detalles para el armado, mismos que se anotan a continuación:

Los cables de conexión con el PLC, así como aquellos que salen del tablero hacia la puerta del gabinete se han agrupado con amarras y para el caso específico de los segundos, se los ha guiado por bases adhesivas protegiéndolos con espirales.

Las bornas de conexión, barras de puntos comunes, y contactores constan etiquetados y debidamente numerados para facilitar posteriores tareas de mantenimiento o readecuación.

Todas las entradas y salidas de cables en el gabinete están sujetas con prensa estopas de calibre 16 y 29.

La identificación de los botones y luces así como de todos los conectores se realizó con cinta adhesiva plástica grabada para soportar condiciones duras de trato y uso.

La Figura 6.3 muestra algunos accesorios utilizados dentro de la construcción del gabinete.

Para una mayor apreciación del montaje final del equipo se recomienda revisar el registro fotográfico que consta en el Anexo 8 de este documento.

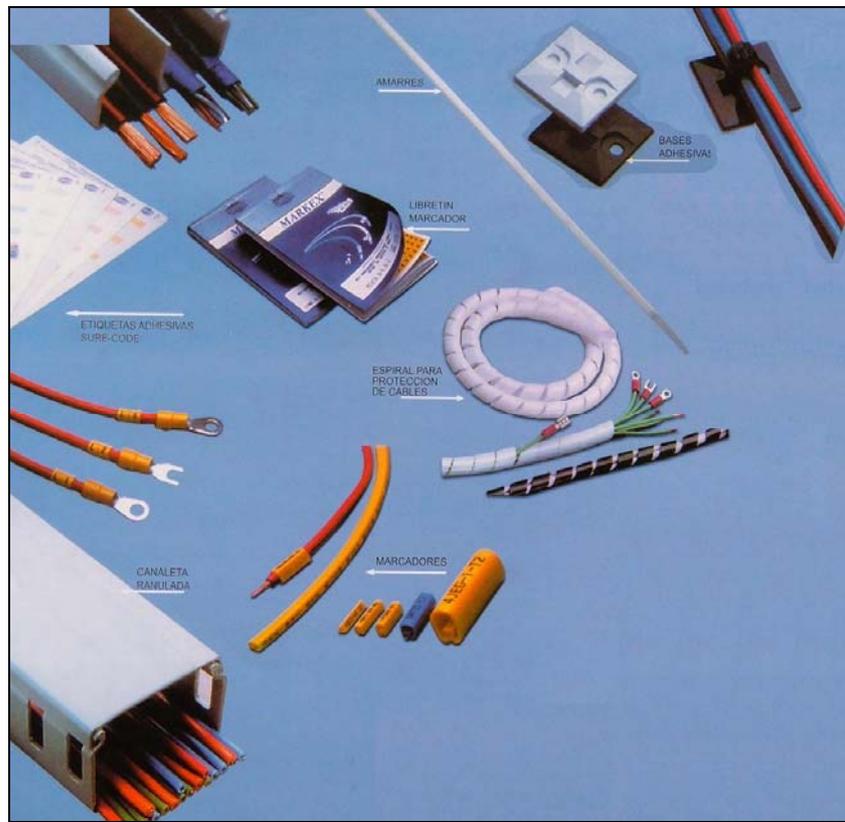


Figura 6.3 Elementos accesorios utilizados en la implementación del gabinete de control.

CAPÍTULO 7

PRUEBAS Y RESULTADOS

7.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo tiene como objetivo describir algunas recomendaciones que pueden tomarse para calibrar los controladores implementados una vez que los lazos de control se cierran en el proceso. Se describirán algunas pruebas realizadas con calibraciones en frío, manteniendo los lazos de control abiertos, con el único propósito de verificar el adecuado comportamiento de los controladores. Se añade finalmente la descripción del proceso de calibración, pruebas y resultados conseguidos sobre el variador de velocidad, ya que este elemento final de control dispone de algunas funciones y opciones de configuración.

7.2 METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN

Las exposiciones que se detallan a continuación constituyen recomendaciones sobre como calibrar cada uno de los lazos de control. Las técnicas de calibración pueden variar de acuerdo a la experiencia de la persona encargada de dicha tarea, así como de las características intrínsecas del sistema.

7.2.1 Lazo de control ON / OFF Con Histéresis.

Tal como se describe en el Capítulo 5, la calibración de este sistema se ve sometida al establecimiento de su parámetro principal, la banda de histéresis (BH), la cual determinará la frecuencia de conmutación del actuador del sistema (ventilador).

Es así que si un producto debe ser secado a una temperatura media de $40^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$, esto dictaría que el rango de variación de temperatura en la cámara de secado deberá oscilar entre 37°C y 43°C .

Esto de igual manera haría asumir en primera instancia que la banda de histéresis de del proceso equivaldría a 6°C , (3°C por arriba del SetPoint y 3°C por

abajo del Setpoint) tal como señalaría la exigencia del cliente, pero ello no toma en cuenta la inercia del proceso como tal, que hace que el valor de carga en el registro de manejo de dicha banda se vea reducido. La técnica de ajuste del valor de la banda de histéresis se puede realizar en base a pruebas experimentales para varias consignas de temperatura (Setpoint) posibles a actuar dentro del rango de trabajo impuesto al equipo, con calibraciones manuales del mismo.

El establecimiento de dichos valores permite obtener una línea de tendencia entre el Setpoint y la banda de histéresis, la misma que debe ser fijada en su registro asignado.

Así por ejemplo, si un proceso opera entre los 40°C y 60°C y se requiere una calibración para una banda de histéresis de $\pm 2^\circ\text{C}$, podrían obtenerse datos de calibración para cada punto en una manera similar a la mostrada en la Tabla 7.2.

Set Point [°C]	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60
BH [°C]	1.25	1.2	1.1	1.04	0.96	0.88	0.76	0.66	0.58	0.52	0.48

Tabla 7.1 Calibración de la banda de histéresis.

Estos datos permiten establecer alguna relación entre el Setpoint y la banda de histéresis, misma que se aprecia en la gráfica de dichos valores. Se expone adicionalmente la curva de ajuste lineal para la Tabla 7.1, con la ecuación correspondiente Figura 7.1.

Tal como se describió en el Capítulo 5 esta relación se la puede especificar dentro de las pantallas de configuración de registros bajo el software de supervisión o monitoreo, o manipulando los registros relacionados desde el software de programación.

Adicionalmente cabe recalcar que la conmutación del proceso podría verse reducida disminuyendo el valor de la energía que el sistema de combustión proporciona para el intercambio térmico, cuidando de que sea suficiente y de que no provoque que la combustión en la cámara se extinga.

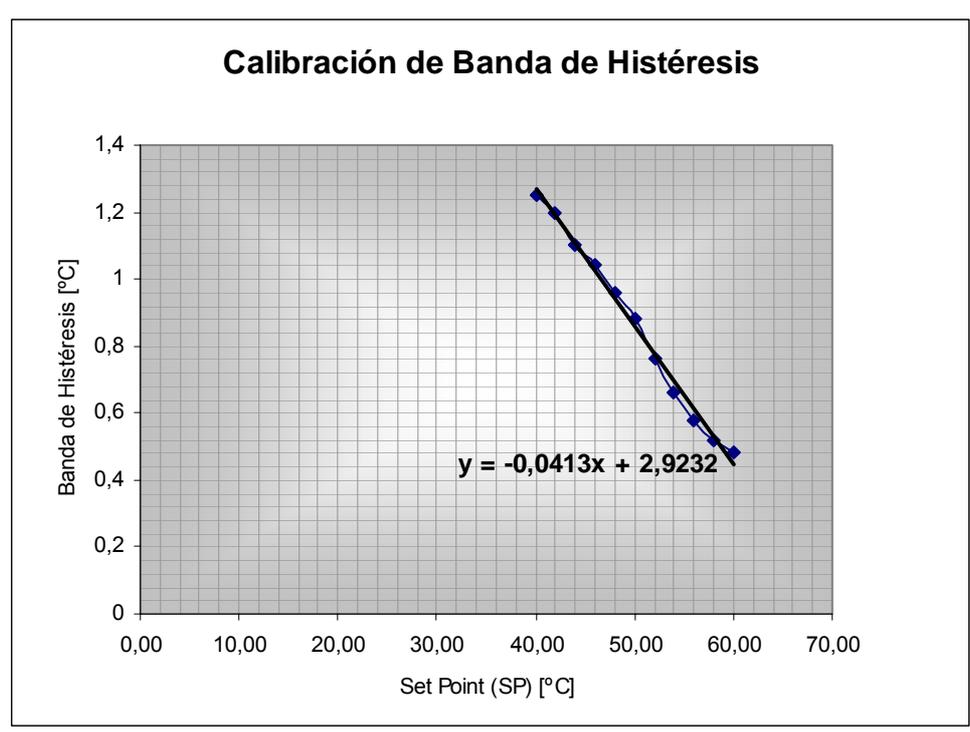


Figura 7.1 Ajuste lineal en función de la banda de histéresis.

7.2.2 Lazo de control Proporcional

Los requerimientos de calibración para este sistema, se ven establecidos por la elección de una metodología de sintonización PID; para tal propósito se dispone de algunas herramientas entre las que se puede mencionar la técnica de Ziegler Nichols, el método de la curva de respuesta, método prueba error entre otros.

En los párrafos consecuentes se describirá la técnica de sintonización de Ziegler Nichols, como una herramienta para determinar los valores de K_p (Banda Proporcional), T_d (rapidez de desviación) y T_i (La rapidez de ajuste) de sintonización del controlador y que decretarán el comportamiento de este sistema.

Este método se lleva a cabo siguiendo los pasos indicados a continuación:

Utilizando solo control proporcional ($T_D = T_i = 0$), comenzando con un valor de Banda Proporcional elevado, disminuir proporcionalmente la banda hasta que el proceso comience a oscilar de forma periódica.

Para obtener el período de dicha onda se usa el cursor de la gráfica de parámetros de la interfaz HMI con lo cual se puede conseguir el tiempo en que se presentan dos máximos consecutivos.

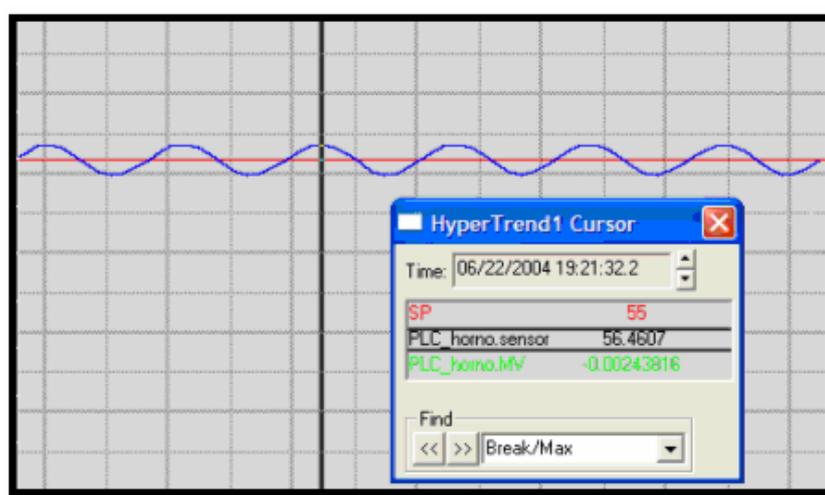


Figura 7.4 Tiempo de un máximo en la amplitud de la señal.

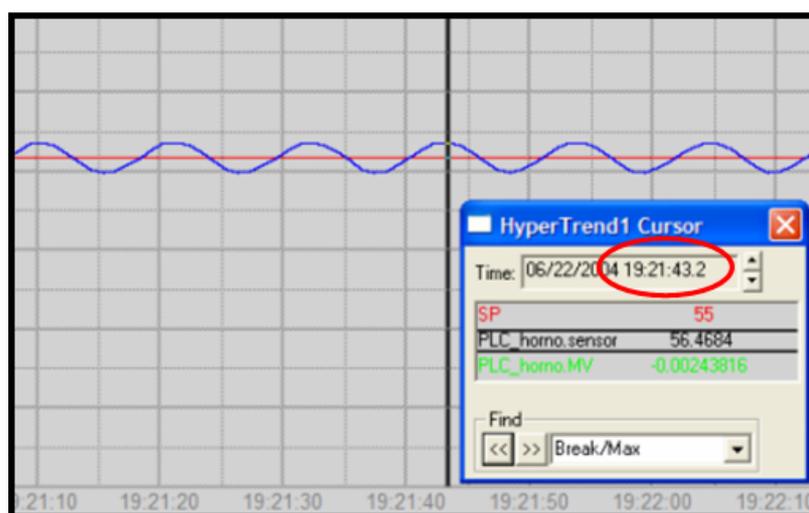


Figura 7.5 Tiempo de un máximo siguiente en la amplitud de la señal.

Se observa que la diferencia de los tiempos en el ejemplo da como resultado 11 segundos siendo este el período de oscilación de la señal.

A partir de los datos proporcionados por el sistema de prueba se tiene que:

$P_c = 11_seg$; Donde P_c es el período crítico de oscilación del sistema

$PB_c = 5$; Donde PB_c representa la banda crítica del controlador el cual produjo que el sistema entre en oscilación.

Encontrando los parámetros que el método de sintonización requiere a partir de K_c y PB_c mediante la propuesta de la Tabla 7.1 se tiene:

- Banda Proporcional:

$$K_c = \frac{100}{PB_c} \quad \text{Ecuación 7. 1}$$

De la ecuación 7.1 se tiene:

$$PB_c = 5 \quad K_c = \frac{100}{PB_c} = \frac{100}{5} = 20$$

Donde K_c representa la ganancia crítica del sistema, y según la Tabla 7.1 se tiene que:

$$K_p = 0.6 * K_c \quad \text{Ecuación 7. 2}$$

De donde se tiene:

$$K_p = 0.6 * K_c = 0.6 * 20 = 12$$

- Reset Time:

$$T_i = 0.5 * P_c \quad \text{Ecuación 7. 3}$$

La ecuación 7.3 indica:

$$T_i = 0.5 * P_c = 0.5 * 11 = 5.5 \frac{\text{seg}}{\text{rep}}$$

Donde T_i representa la rapidez de ajuste de sintonización del controlador o también conocida como constante de integración.

- Rate Time

$$T_D = \frac{P_c}{8} \quad \text{Ecuación 7. 4}$$

La ecuación 7.4 indica que:

$$T_D = \frac{P_C}{8} = \frac{11}{8} = 1.37 \frac{\text{seg}}{\text{rep}}$$

Donde T_D representa la rapidez de desviación de sintonización del controlador o también conocida como constante de derivación.

Al ingresar los datos calculados mediante la interfaz HMI el resultado esperado sería como se muestra en la Figura 7.5.

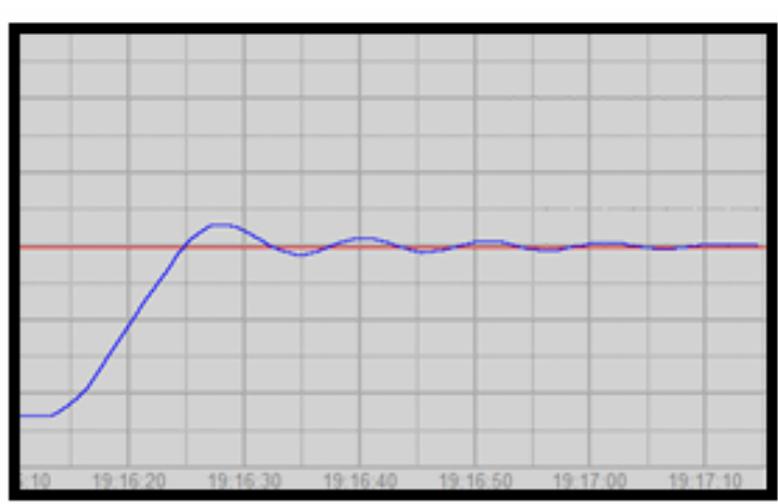


Figura 7.6 Señal de salida sintonizada.

Se observa que la señal mostrada en la figura anterior es la que se esperaría del proceso en buen funcionamiento.

7.2.3 Variador de velocidad

Como bien se detalló a este elemento anteriormente, es el encargado del control del motor de alimentación de cascarilla al sistema de combustión, y el establecimiento adecuado de sus parámetros de operación ayudará a un mejor desempeño del sistema en conjunto.

Este modelo dispone de una gama de parámetros de configuración cada uno con su propósito específico, pero para la operación adecuada en este sistema se exige el siguiente comportamiento para los siguientes parámetros.

Rango de velocidad de funcionamiento; permite determinar los 2 límites de frecuencia que definen el rango de velocidad autorizado por la máquina en condiciones reales de funcionamiento. Establecer 0 y 60 HZ.

Tiempo de la rampa de aceleración y desaceleración; permite determinar tiempos de rampa de aceleración y desaceleración en función de la aplicación y de la cinemática de la máquina.

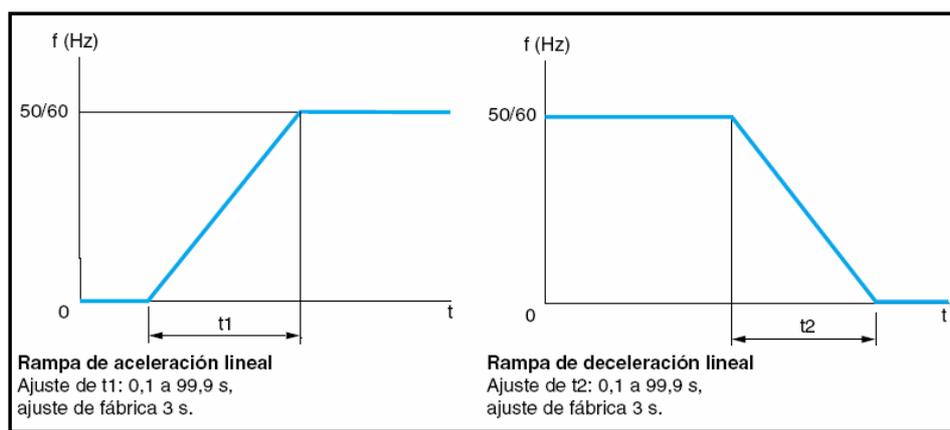


Figura 7.7 Rampas de aceleración y desaceleración.

Se recomienda que este parámetro sea establecido definitivamente bajo proceso, ya que se puede obtener un mejor funcionamiento del sistema ajustándolo en un valor adecuado.

Configuración de la entrada analógica; Establece el tipo de señal que controlará al variador. Establecer 0 – 10 Voltios.

Sentido de Marcha; Establecer el control a 2 hilos para LI1 y LI2.

Parada controlada por corte de tensión; permite los modos de parada del variador por un fallo de corte de red. Establecer este parámetro en "rueda libre".

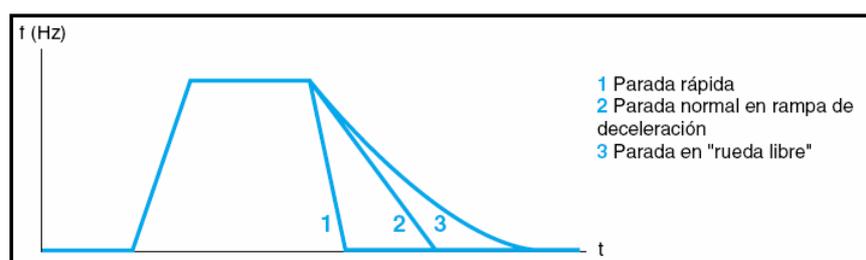


Figura 7.8 Parada controlada por corte de tensión.

Estos parámetros pueden ser establecidos mediante la guía del Anexo 1.

7.3 PRUEBAS REALIZADAS

Es indispensable señalar que las pruebas realizadas con el gabinete de control diseñado para la máquina secadora de productos agrícolas se han ejecutado con la intención de verificar que todos los esquemas de hardware y software diseñados operen correctamente, que las consignas de control actúen conforme lo establecido, y que el comportamiento del sistema genere una mejora en el manejo del equipo mecánico, eleve los niveles de eficiencia, y optimice el proceso y los recursos energéticos. De estas últimas consignas, su verificación ya solo podrá estar determinada porcentual y numéricamente con la implementación del sistema sobre la propia máquina secadora, más ello no se desarrolla bajo este proyecto.

7.3.1 Lazo de control ON / OFF Con Histéresis.

Dentro de este Lazo de control la intención de las pruebas realizadas consistió en verificar el correcto comportamiento del mismo para los estados de temperatura, y el respeto de la banda de histéresis. Para ello se sometió al sensor de temperatura relativo al Lazo en cuestión, a la exposición de temperaturas superiores a la impuesta por un Set Point definido en un término manejable (25°C) e inferiores a la misma. Este elemento de medición se expuso a agentes de influencia directa en la temperatura del medio (llama y hielo). No se pudo apreciar el trabajo del sistema de control bajo la consigna de respeto a la inercia del proceso, ya que esta es propia del sistema y sólo quedará determinada una vez realizada la implementación sobre la máquina, pero sí se comprobó la acción de los registros estructurados para este propósito imponiendo una ecuación como la mostrada en la Figura 7.1 y verificando la ventana de histéresis para algunos puntos.

7.3.2 Lazo de control Proporcional

La prueba de funcionamiento del lazo de control proporcional consistió en verificar la salida del controlador en su intención por alcanzar el valor seteado (SetPoint) bajo la filosofía de control proporcional. No se impuso ningún criterio de ajuste de los parámetros T_i o T_d porque cómo se explico anteriormente ello solo

se puede sintonizar en lazo cerrado en la implementación propia del proceso. De manera similar a las pruebas realizadas con el lazo de control ON / OFF con histéresis, el sensor del éste lazo se lo sometió a variaciones de temperatura, bajo consignas del Setpoint sobre y bajo el valor emitido por este sensor. Se buscó apreciar la intención del controlador por acercarse proporcionalmente hacia la consigna del Setpoint en función con el error entre este con el valor registrado por la salida del sensor.

7.3.3 Variador de velocidad

Las pruebas del variador se realizaron en dos partes, una independiente que buscaba confirmar la capacidad de gobierno del mismo por parte del PLC, y otra como elemento final de control dentro del lazo de control proporcional, donde reflejara las órdenes del controlador al incrementar o decrementar los niveles de energía transmitidos.

Las pruebas de comando del variador desde el PLC y su calibración como tal, consistieron desde encenderlo mediante la bobina controlada por el PLC, hasta variar el registro del canal analógico de salida del PLC para verificar la respuesta del variador al acelerar o desacelerar el motor trifásico de la alimentación del sistema. Adicionalmente se manipularon los registros de configuración de tiempos para las rampas de aceleración y desaceleración del variador para verificar su funcionamiento.

7.4 RESULTADOS

De manera general, todos los sistemas del gabinete de control superaron las pruebas de funcionamiento y trabajaron acorde a lo planeado bajo los esquemas de diseño de hardware y software antes descritos. Las pruebas realizadas sobre los lazos de control permitieron, además, verificar el funcionamiento de las alarmas de niveles de temperatura excesivos, siendo este un valor agregado del sistema importante para su seguridad y buen desempeño.

El lazo de control ON / OFF con histéresis trabajó adecuadamente bajo las pruebas desarrolladas, pudiéndose comprobar la correcta conmutación de la salida de dicho controlador en su travesía por la ventana de histéresis.

De la misma manera se pudo comprobar la efectiva acción de los registros diseñados para la calibración de este sistema bajo la técnica que busca respetar la inercia del sistema para mantener una ventana de histéresis acorde a las exigencias del cliente.

Y finalmente, bajo las consignas de sensibilidad del sensor de temperatura del lazo, y la capacidad de de conmutación del controlador la mejora en la eficiencia de control del sistema resulta indiscutible. Si se analizan las tablas del Anexo 4 de pruebas experimentales desarrolladas bajo una conmutación manual del sistema, podemos apreciar de las ventanas de histéresis se sitúan entre 15 a 20°C sin conseguir un control eficiente. Bajo la implementación de este sistema se pueden lograr ventanas de histéresis de hasta 1°C¹⁰, logrando, además, una estabilización de la temperatura del mismo, completamente superior a la que demuestran las pruebas de campo. Ello se traduce finalmente en Confiabilidad y Eficiencia para el sistema. Los porcentajes alcanzados con respecto a estas variables tendrán que ser determinados mediante pruebas desarrolladas con la implementación final de todo el equipo.

Con respecto al Lazo de control proporcional se pudo apreciar su correcta operación en base a la consigna de control.

La Figura 7.9 muestra los históricos para ambos lazos ante cambios de valores de señales de temperatura y Setpoint como pruebas para verificar el estado de funcionamiento de los controladores. Puntualmente, para el controlador tipo PID se puede apreciar la proporcionalidad del nivel de la salida para una señal de error generada intencionalmente.

En lo que se respecta al variador de velocidad, su respuesta ante las pruebas realizadas fue completamente adecuada. Su operación bajo la salida analógica del PLC mantuvo la proporcionalidad con la velocidad del motor trifásico. Y su paro y marcha se consiguieron controlar adecuadamente desde el controlador.

¹⁰ La estimación de la ventana de histéresis que se anota no toma en cuenta la inercia del proceso, y empero de su mínimo de diferencia con respecto a la imposición del valor de SetPoint, generaría una excesiva conmutación. Se recomienda verificar los máximos valores permisibles para la ventana de histéresis en el proceso.

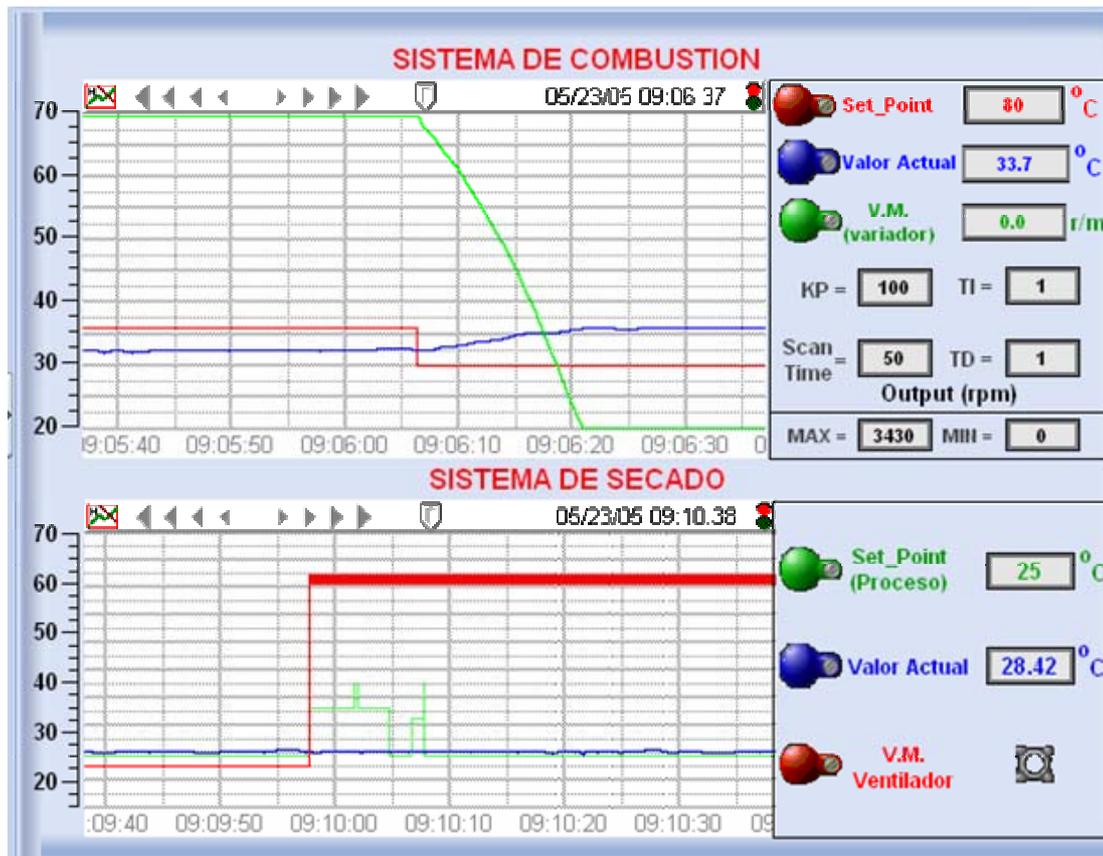


Figura 7.9 Registros históricos que revelan el comportamiento de los controladores bajo las pruebas realizadas

De la misma manera, las rampas de aceleración y desaceleración funcionaron acorde las explicaciones del fabricante, pero se debe recalcar que dentro del proceso de calibración de todo el sistema también habrá que atender estos puntos para conseguir un sistema de control más eficiente y de mejor calidad.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Una vez desarrollado el proyecto, se presentan las siguientes conclusiones y recomendaciones:

7.5 CONCLUSIONES

- Se ha diseñado y construido un sistema de control automático de temperatura y alimentación de combustible para una secadora de productos agrícolas, adaptado a cuatro opciones: Plátano, Mote, Arroz y Morochillo. La solución desarrollada permite crecer hasta en 5 opciones adicionales de productos de secado, y resulta escalable para máquinas secadoras de hasta 40 quintales de capacidad.
- Se ha desarrollado una investigación metódica sobre las opciones disponibles para seleccionar los dispositivos de instrumentación, controladores, elementos finales de control, y actuadores más convenientes que se ajusten a la implementación del sistema de control automático de temperatura y alimentación de cascarilla de arroz del proceso de secado de productos agrícolas.
- Se ha diseñado e implementado un sistema de control automático de temperatura para la cámara de lecho fijo de secado de productos agrícolas (plátano, mote, arroz, morochillo). El sistema ha demostrado otorgar niveles de eficiencia que superan hasta en 20 veces aquella lograda mediante un control manual de los actuadores de la máquina secadora.
- Se ha diseñado e implementado un sistema de control automático de alimentación de combustible vegetales sólidos (cascarilla de arroz) dentro del proceso de secado de productos agrícolas. El sistema goza de capacidad de ser implementado en alimentadores más grandes para secadoras de hasta 40 quintales de producto para el secado y se

encuentra en capacidad de generar una alimentación secuencial y continua de los desechos vegetales sólidos para la combustión.

- Se ha desarrollado e implementado una lógica de control flexible, expandible y adaptable sobre los sistemas de alimentación de combustibles y secado de productos agrícolas. Ello se ha logrado gracias a la modularidad del sistema controlador del equipo.
- Se ha desarrollado una interfase gráfica para usuario con capacidad de monitoreo y control de manera permanente y en tiempo real de todo el proceso de secado de productos agrícolas, incluyendo el sistema de combustión de la cascarilla de arroz, y la temperatura de la cámara de lecho fijo.
- Se ha implementado cuidadosamente el sistema de control automático para la alimentación de la cascarilla de arroz y la regulación de temperatura de la cámara de lecho fijo del proceso de secado de productos agrícolas, con apego a criterios de modularidad, y a lo establecido por las normas pertinentes sobre instalaciones industriales para gabinetes de control.
- El desarrollo de ingeniería de control automático sobre el proceso de secado de productos agrícolas en base a la transferencia térmica producida por la combustión de desechos vegetales sólidos agrega una ventaja energética al aprovechamiento de estas energías alternativas: Una elevación de los niveles de eficiencia del proceso, y aprovechamiento energético del recurso, mejores rendimientos de la máquina como tal, mejores resultados en la calidad del secado, y una reducción de costos beneficio promedio.
- Se ha documentado metódicamente todo el desarrollo del proyecto.

7.6 RECOMENDACIONES

A continuación se exponen las siguientes recomendaciones:

- Dada la condición del proceso cómo tal, resulta recomendable la implementación de un sistema de ignición más sofisticado sobre la cámara de combustión, que incluso tenga alternativas de ser automatizado.
- De la misma manera, es recomendable implementar sistemas de redundancia con respecto al proceso de combustión, para su verificación y monitoreo, mismos que actúen directamente sobre la llama generada en la combustión de la cascarilla de arroz.
- Un mejor control sobre la combustión de la cascarilla de arroz en el proceso de secado de productos agrícolas puede obtenerse también mediante la detección y monitoreo de las emanaciones de gases producidas en la combustión de la cascarilla de arroz.
- La eficiencia del proceso de combustión puede ser mejorada mediante la implementación de un sistema de extracción automático de la ceniza producida por la combustión de la cascarilla de arroz.
- La eficiencia y rendimiento del proceso puede ser mejorada si se atiende de el estado del producto en el curso del secado del mismo. La utilización de humidímetros que verifiquen las condiciones de humedad directamente sobre el producto mejorarían la solución planteada.
- Se recomienda la implementación de un sistema de mezclado proporcional y continuo del producto a secar en la cámara de lecho fijo, ya que la distribución de energía térmica no es uniforme a lo largo de toda la cámara, con ello se conseguiría mejorar la calidad del secado del producto, y elevar los niveles de eficiencia del proceso.
- La fase de optimización del proceso podría involucrar consignas de control de mayor calidad y precisión que el implementado sobre el intercambiador de calor para la cámara de lecho fijo; por ello, resultaría interesante evaluar

técnica y económicamente las ventajas y réditos que produciría dicha migración.

- El monitoreo desde una interfase HMI de mejor desempeño sobre el Controlador Lógico Programable PLC seleccionado resultaría un beneficio y optimización de la lógica de programación establecida, al poseer mayor capacidad de acción y monitoreo sobre los registros del PLC.
- Es recomendable que las tareas de calibración y seteo de parámetros en el sistema de control se desarrolle por personal conocedoras del proceso, y que entiendan y estén familiarizados con las filosofías de control implementadas.
- Se recomienda el diseño e implementación de un sistema de detección, control y prevención de incendios dada la aguda incidencia de siniestros de este tipo en dispositivos secadores de granos.
- Es recomendable desarrollar un sistema de mantenimiento preventivo y correctivo sobre el proceso. El tratamiento teórico precedente, expone en el Capítulo 3 algunas consideraciones al respecto.
- Finalmente, la revisión del manual de usuario para la operación del sistema siempre resultará positivo para reducir los riesgos de daños personales, sobre el sistema, y ocurrencia de accidentes lamentables.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOLTON, Williams, **Mecatrónica, Sistemas de Control Electrónico en la Ingeniería Mecánica y Eléctrica**, 2ª. Ed., Ed. Alfaomega, México D.F, 2001,537 Pgs.
- FOSTER, G.H., **Drying Cereal Drains**, American Association of Cereal Chemists, Inc.. St. Paul, Minnesota, U.S.A.
- MOLINA, M, Jorge, Ing., **Apuntes de Control Industrial**, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica, 168 Pgs.
- MUJUMDAR, Arun, S., **Handbook of Industrial Drying**, 2nd. Ed., Mc Hill University, USA,1995, 1366 Pgs.
- ORTIZ, T., Hugo, R., **Instrumentación y Sistemas de Control**, Escuela Politécnica del Ejército, 1998, 155 Pgs.
- <http://www.schneider-electric.ca/>, *PLC, Variador de velocidad y Software*
- <http://www.telemecanique.com/>, *PLC Variador de Velocidad y Software*
- www.SquareD.com, *PLC*
- <http://www.paginadigital.com.ar/articulos/sica.html>, *Guardamotor*
- www.zoloda.com.ar, *Guardamotor*
- <http://www.lt-automation.com/>, *Variador de velocidad*
- <http://www.control-industrial.com.ar/masinfo.htm>, *Variador de velocidad*
- <http://www.caipe.com/presenta.htm>, *Variador de velocidad*
- <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4070035/lecciones/cap7.htm>, *Secado de productos*
- <http://sleekfreak.ath.cx:81/3wdev/VLIBRARY/X0027S/X0027S00.htm>, *Secado de granos*
- <http://www.fao.org/docrep/x5058s/x5058S00.htm>, *Secadoras de granos*
- <http://pdf.rincondelvago.com/secadoras-de-granos.html>, *Secadoras de granos*

-
- <http://www.aaprotrigo.org/guia/guiapagina.htm>, *Secado artificial*
 - <http://www.agroconnection.com.ar/secciones/almacenaje/S023A00002.htm>, *Poscosecha de granos*
 - http://www.bendig.co.cr/products/espanol/optional/sis_secado_01.htm, *Sistemas de secado*
 - <http://www.uvg.edu.gt>, *Secado de alimentos*
 - <http://www.fao.org/inpho/vlibrary/x0028s/Contents>), *Seca – Aireación de granos*
 - <http://www.biopsychology.org/apuntes/>, *Termodinámica Elemental*
 - http://www.drcalderonlabs.com/Investigaciones/Cascarilla_Caolinizada/La_Cascarilla_Caolinizada.htm, *Cascarilla de arroz*
 - <http://www.colciencias.gov.co/agenda/pn16.html>, *La cascarilla de arroz como combustible*
 - <http://www.fao.org/docrep/x5058s/x5058S00.htm>, *Secado de granos, natural, solar y a bajas temperaturas*
 - <http://www.energias-renovables.com/paginas/index.asp?id=13&Nombre=Panorama>, *Biomasa energía renovables*
 - http://www.schneider.co.uk/products/auto/automation/auto_hmi/hmi_general.htm, *Productos de manejo interfase operador*
 - <http://www.electricidadlynch.com/novedadatv11.htm>, *Variador de velocidad*
 - http://www.schneider-electric.cl/productos/control/variadores_frecuencia/altivar11.cfm, *Variador de velocidad*
 - http://www.siemens.com.co/SiemensDotNetClient_Andina/templates/PortalRender.aspx?channel=73&parentid=71, *Motor trifásico*
 - http://www.schneider-electric.com.pe/productos/de/easypact/easypact_ctecnicas.cfm, *Breaker principal*

-
- http://www.schneider-electric.com.pe/productos/de/easypact/easypact_cgerais.cfm, *Software control de variadores de velocidad*
 - <http://www.schneiderelectric.com.tr/html/en/download/catalogues/pcp/pcp.htm>, *Software control de variadores de velocidad*
 - <http://www.schneiderelectric.com.tr/html/en/download/catalogues/pcp/pcp.htm>, *Software control de variadores de velocidad*
 - <http://www.schneiderelectric.com.tr/html/en/download/catalogues/pcp/pcp.htm>
 - <http://twido.schneiderelectric.es/Twido/descargar/twido3234.pdf>, *controlador lógico programable*
 - http://www.steveneng.com/Tech_Support/PDFs/45PTWIDO.pdf, *controlador lógico programable*
 - [http://www.squared.com/us/products/machine_control.nsf/unid/D0901B205178E75A85256EBE0050B9EE/\\$file/autocomponentsFrameset.htm](http://www.squared.com/us/products/machine_control.nsf/unid/D0901B205178E75A85256EBE0050B9EE/$file/autocomponentsFrameset.htm), *controlador lógico programable*
 - <http://www.temperatures.com/stds-tcs.html>, *Estándares funcionamiento termocuplas*
 - http://www.sintebros.com.sg/gmc9_22.htm, *Contactor LG*
 - http://wire-cable.globalspec.com/Specifications/Electrical_Electronic_Components/Wires_Cables/AC_Power_Cords, *Conectores*
 - <http://www.leviton.com/sections/techsupp/nema.htm>, *Conectores*
 - <http://frentzandsons.com/Hardware%20References/plugandreceptacleconfiguratio.htm>, *Conectores*
 - http://www.cooperwiringdevices.com/catalog/PDF/A_CWD_Straightblade_Receptacle.pdf
 - **Biblioteca de Consulta Microsoft ® Encarta ® 2004. © 1993-2003 Microsoft Corporation. Reservados todos los derechos.**

ANEXOS

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Secador de granos y sistema de combustión de cascarilla de arroz.....	3
Figura 2.1 Humedímetro para granos Granomat.	10
Figura 2.2 Ejemplo de una tabla psicrométrica.....	16
Figura 2.3 Esquemas de un secador rotativo.....	27
Figura 2.4 Esquema de un secador solar con precalentamiento de aire.	29
Figura 2.5 Esquema de un secador solar tipo invernadero.....	30
Figura 3.1 Bandas de distintos contenidos de humedad durante el secado de granos a bajas temperaturas.....	34
Figura 3.2 Visión esquemática de un secador continuo de aire caliente a presión atmosférica.	37
Figura 3.3 Secador rotatorio, flujo en paralelo.....	38
Figura 3.4 Secadores de túnel.	39
Figura 3.5 Secador de banda de flujo transversal.	39
Figura 3.6 Configuración de un secador con quemador.	40
Figura 3.7 Secador de bandejas.	41
Figura 3.8 Esquema del secador movido por convección natural.....	42
Figura 3.9 Adaptaciones al secador por convección natural.	44
Figura 3.10 Parámetros en la construcción de secadores por convección.....	45
Figura 3.11 Secador de lecho fijo.	46
Figura 3.12 Resistencia de granos y semillas al paso del aire.....	50
Figura 3.13 Cámara de secado y cámara de distribución del aire en el secador de lecho fijo.	52
Figura 3.14 Ángulo de abertura del elemento de transición, entre la cámara de distribución del aire y el ventilador del secador de lecho fijo.	53
Figura 3.15 Diagrama de bloques de operación del modelo.	69
Figura 3.16 Componentes del prototipo	70
Figura 3.17 Cámara de secado – Vista frontal.....	70
Figura 3.18 Cámara de secado - Vista lateral derecha.	71
Figura 3.19 Cámara de secado - Vista lateral izquierda.	71

Figura 3.20 Cámara de secado - Vista superior.	72
Figura 3.21 Sistema de Combustión – Vista superior.	73
Figura 3.22 Sistema de Combustión – Vista lateral izquierda.	73
Figura 3.23 Sistema de combustión – Vista frontal.	73
Figura 3.24 Intercambiador de calor – Vista Superior.	75
Figura 3.25 Intercambiador de calor – Vista Frontal.	75
Figura 3.26 Intercambiador de calor - Vista lateral derecha.	75
Figura 3.27 Intercambiador de calor – Vista lateral izquierda.	76
Figura 3.28 Sistema de Alimentación - Vista Superior.	77
Figura 3.29 Sistema de alimentación - Vista lateral derecha.	77
Figura 3.30 Sistema de alimentación - Vista frontal.	77
Figura 3.31 Prototipo real.	78
Figura 3.32 Diagrama de flujo - proceso de Combustión.	79
Figura 3.33 Diagrama de flujo – proceso de secado.	80
Figura 4.1 Sistema de combustión – Vista superior.	83
Figura 4.2 Sistema de secado – Vista superior.	84
Figura 4.3 Sistema de combustión - Diseño de hardware.	86
Figura 4.4 Sistema de secado – Diseño de Hardware.	88
Figura 4.5 Diagrama PI&D Para el proceso de secado de granos.	92
Figura 4.6 Diagrama de bloques de funcionamiento del sistema de control de secado de granos.	93
Figura 4.7 Codificación de los Breakers principales Merlin Gerin.	95
Figura 4.8 Instrumentos de interfase HMI local.	107
Figura 4.9 Algunos elementos de interconexión.	108
Figura 5.1 Software de programación del PLC.	109
Figura 5.2 Lenguaje Lista de Instrucciones.	111
Figura 5.3 Lenguaje Ladder Logic.	111
Figura 5.4 Lenguaje Grafcet (Ladder y Lista).	112
Figura 5.5 Copia de seguridad TwidoSoft.	113
Figura 5.6 Lookout v4.05. Pantalla de Inicio.	114

Figura 5.7 Entorno Lookout.	115
Figura 5.8 Configuración de Hardware.	116
Figura 5.9 PID – General.	121
Figura 5.10 PID – Entrada.	121
Figura 5.11 PID – PID.	122
Figura 5.12 PID – Salida.	123
Figura 5.13 Lógica programada PID.	124
Figura 5.14 Lógica programada Control ON/OFF con Histéresis.	127
Figura 5.15 HMI – USUARIO.	131
Figura 5.16 HMI – USUARIO.	131
Figura 5.17 HMI – USUARIO.	133
Figura 5.18 HMI – HISTORICO.	135
Figura 6.1 Gabinete de control, dimensiones, diseño de orificios para conectores y accesorios.	140
Figura 6.2 Ubicación de canaletas, rieles de montaje y barras de conexión sobre el doble fondo.	141
Figura 6.3 Elementos accesorios utilizados en la implementación del gabinete de control.	144
Figura 7.1 Ajuste lineal en función de la banda de histéresis.	147
Figura 7.2 Ziegler Nichols.	148
Figura 7.3 Oscilaciones periódicas del sistema.	148
Figura 7.4 Tiempo de un máximo en la amplitud de la señal.	149
Figura 7.5 Tiempo de un máximo siguiente en la amplitud de la señal.	149
Figura 7.6 Señal de salida sintonizada.	151
Figura 7.7 Rampas de aceleración y desaceleración.	152
Figura 7.8 Parada controlada por corte de tensión.	152
Figura 7.9 Registros históricos que revelan el comportamiento de los controladores bajo las pruebas realizadas.	156

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Composición química de la cascarilla de arroz.....	21
Tabla 2.2 Composición molar fundamental de la cascarilla de arroz.....	21
Tabla 3.1 Recomendaciones para el secado de productos agrícolas en lecho fijo.....	49
Tabla 4.1 Sistema de combustión - Especificaciones de hardware.....	86
Tabla 4.2 Sistema de secado – Especificaciones de Hardware.	88
Tabla 4.3 Sistema complementario – Especificaciones de Hardware.	90
Tabla 4.4 Fuente de Alimentación ABL7-RE2403: Características técnicas.....	94
Tabla 4.5 Breaker principal EZC100N 3020: Características técnicas.....	95
Tabla 4.6 Guardamotor GV2-ME07: Características técnicas.....	96
Tabla 4.7 Fusibles: Características Técnicas.....	96
Tabla 4.8 Base modular PLC TWD LDMA 20DRT: Características Técnicas.....	98
Tabla 4.9 Display de operador TWD XCP ODM: Características técnicas.	98
Tabla 4.10 Módulo de entradas analógicas TWD ALM 3LT: Características técnicas.....	100
Tabla 4.11 Termocuplas de medición K: Características técnicas.	101
Tabla 4.12 Variador de velocidad ATV11HU18M2A: Características técnicas.....	104
Tabla 4.13 Contactor LC1D09: Características técnicas.....	104
Tabla 4.14 Contactor LG GMC-9: Características técnicas.....	105
Tabla 4.15 Motor trifásico Siemens 1LA7.	106
Tabla 4.16 Ventilador transmisor de calor: Características técnicas.	106
Tabla 4.17 Sopladora de oxigenación: Características técnicas.	107
Tabla 5.1 Variables de Entrada.	117
Tabla 5.2 Variables y registros generales.....	118
Tabla 5.3 Variables de salida.....	118
Tabla 5.4 Variables y registros generales.....	124
Tabla 5.5 Variables de Entrada.	125
Tabla 5.6 Variables de Salida.	125

Tabla 5.7 Variables de Entrada.	128
Tabla 5.8 Variables y registros generales.....	128
Tabla 5.9 Variables de Salida.	129
Tabla 5.10 Variables y registros generales.....	130
Tabla 5.11 Enlaces Gráficos – Pantalla de SUPERVISION.....	132
Tabla 5.12 Variables de enlace – SETEO.	134
Tabla 5.13 Enlaces Gráficos - Pantalla de Histórico.....	135
Tabla 6.1 Tipos de cables utilizados en la conexión de elementos del gabinete de control.	142
Tabla 6.2 Tipos de conectores utilizados dentro del gabinete de control.	143
Tabla 7.1 Calibración de la banda de histéresis.	146
Tabla 7.2 Parámetros de Ajuste para sintonización de controladores Predictivos mediante Ziegler Nichols.....	148

Elaborado por:

Sangolquí, Junio del 2005.

CHRISTIAN GIOVANNY SAMANIEGO BURGOS

PABLO ALEJANDRO SEVILLA CORTÉZ

Autoridades:

SR. TNTE. CRNL. MARCELO GÓMEZ.
DECANO
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

SR. DR. JORGE CARVAJAL
SECRETARIO ACADÉMICO
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



DIAGRAMA PI&D DE PROCESO

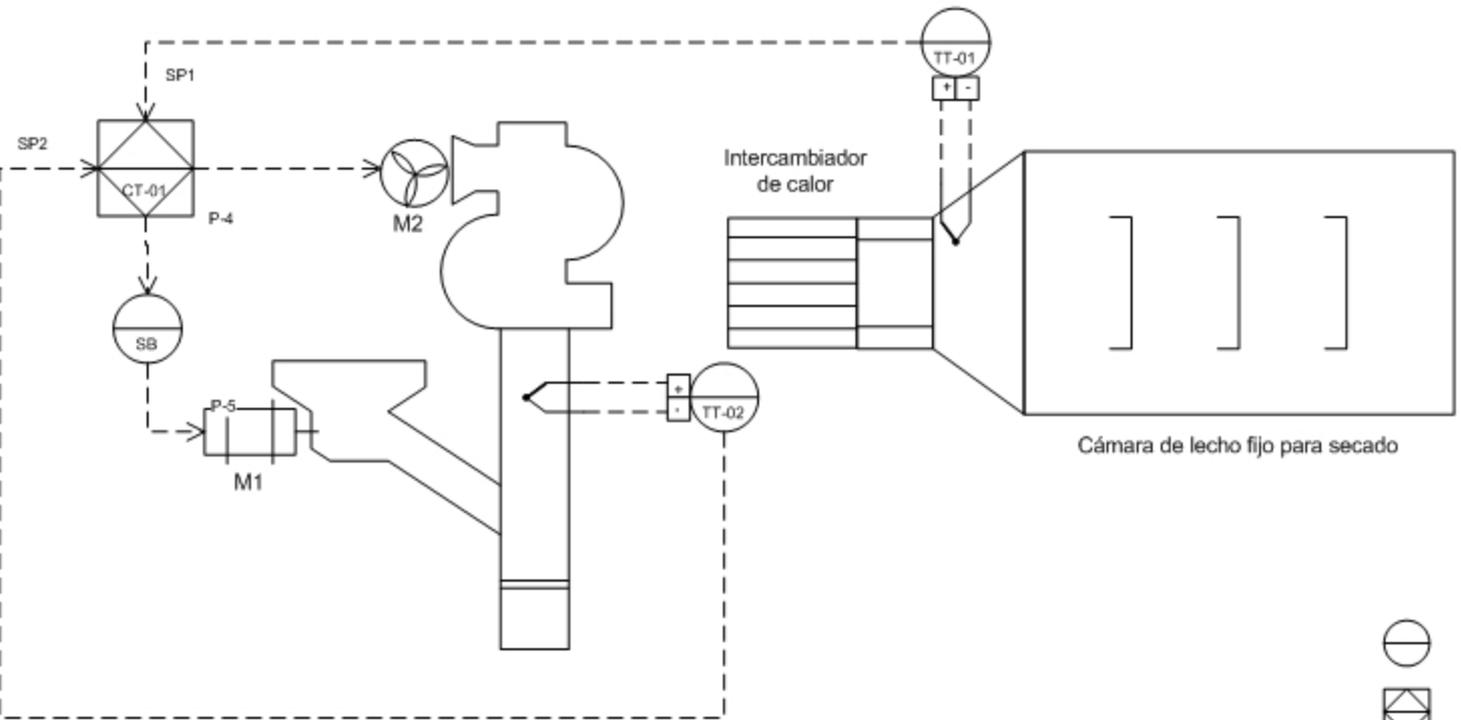
Christian Samaniego Burgos
 Patricio Sevilla Cortez
 Ing. Hugo Ortiz T.
 Ing. José Guasumba C.

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
 CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA
 DEL EJÉRCITO CICTE

2005-Abr-13 1 N/A

Vista Frontal

Vista superior



Simbología

-  Instrumento discreto accesible al operador
-  Controlador lógico programable accesible al operador
-  Termocupla
- TT Transmisor de Temperatura
- CT Controlador de Temperatura
- CT Variador de frecuencia / velocidad
- SPx Set Point
- Mx Motor



DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO

Christian Samaniego Burgos,
Pablo Sevilla Cortez,
Ing. Hugo Ortiz T.,
Ing. José Guasumba C.

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA
DEL EJÉRCITO CICTE

2005-Abr-13 2 N/A

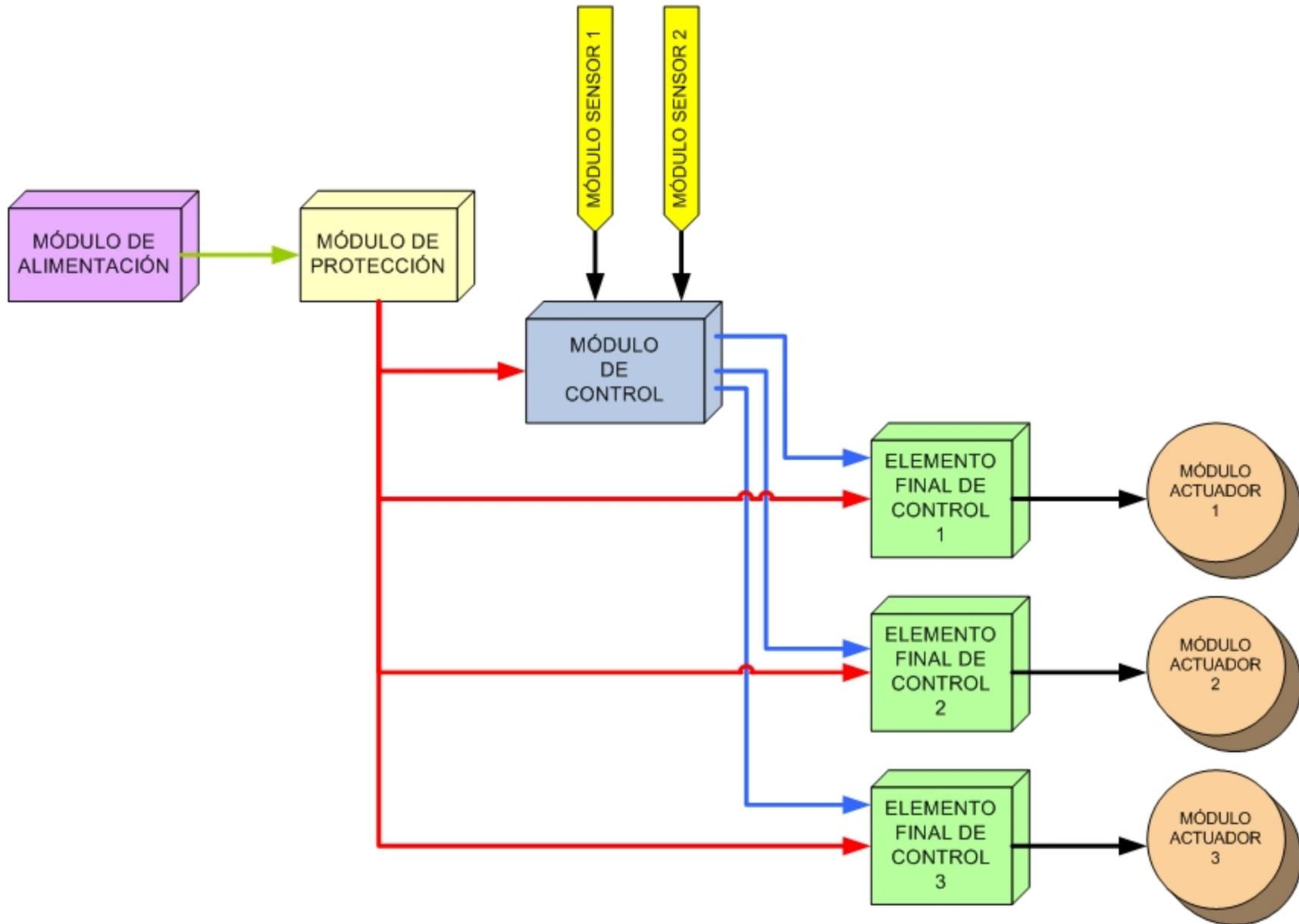


DIAGRAMA UNIFILAR



Christian Samanego Burgos
Pablo Sevilla Cortez
Ing. Hugo Ortiz T.
Ing. José Guasumba C.

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA
DEL EJÉRCITO CICTE

2005-Abr-13

3

N/A

1 ~ 60 Hz 220V

MS1

F1-2

1 ~ 60 Hz
110V
H
01-02

1 ~ 60 Hz
110V

E1

24 Vdc

2 ~ 60 Hz
220V

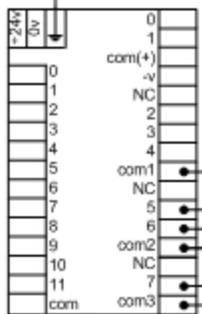
V

CB1

1 ~ 60 Hz
110V

1 ~ 60 Hz
110V

PLC
BASE UNIT



H 05

H 08

H 06

K1

K2

K3

H 04

H 03

M3

M2

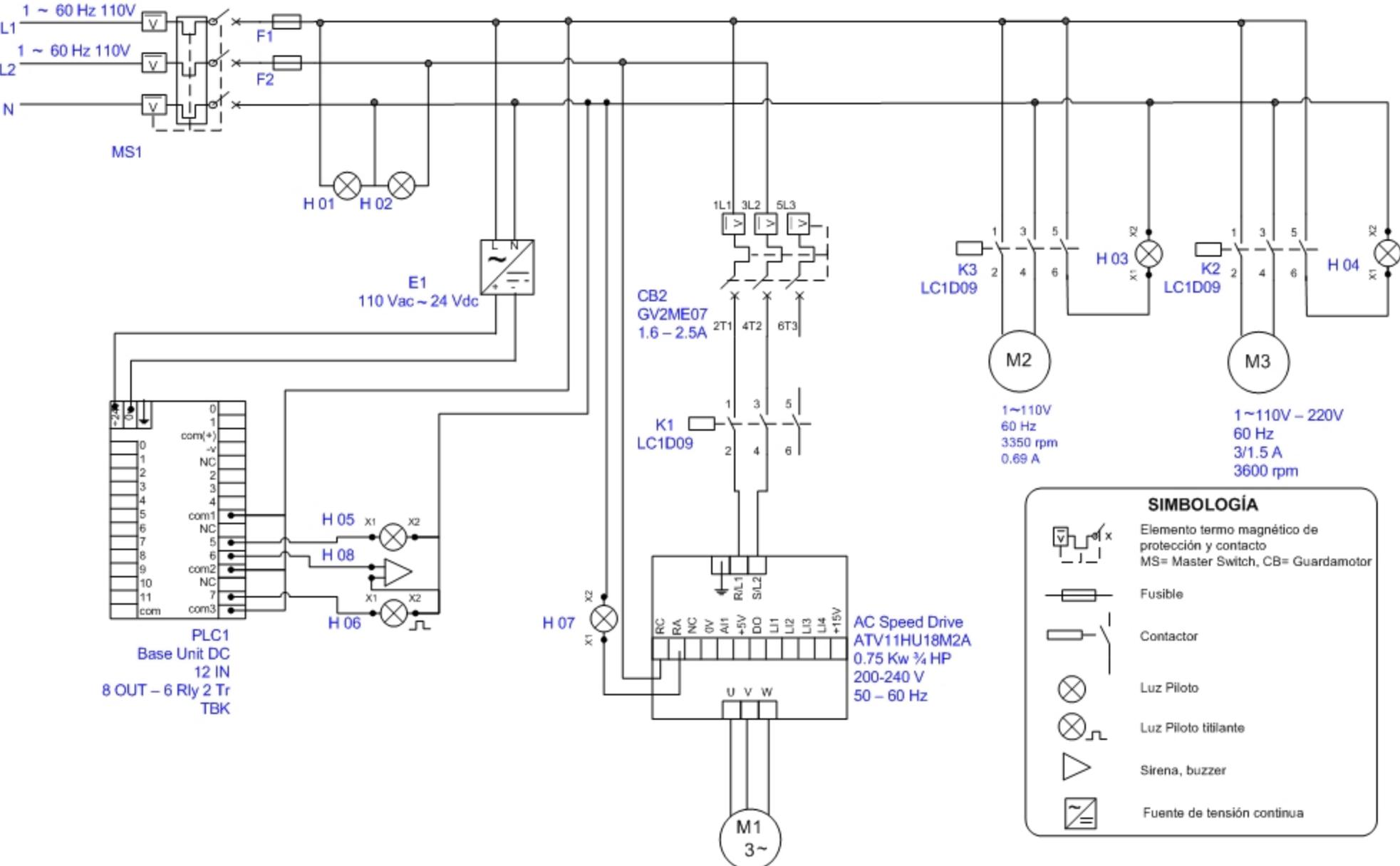
H 07

AC Speed drive
ATV11

M1
3 ~

SIMBOLOGÍA

- Elemento termo magnético de protección y contacto
MS= Master Switch, CB= Guardamotor
- Fusible
- Contactor
- Luz Piloto
- Luz Piloto titilante
- Sirena, buzzer
- Fuente de tensión continua



SIMBOLOGÍA

- Elemento termo magnético de protección y contacto
MS= Master Switch, CB= Guardamotor
- Fusible
- Contactor
- Luz Piloto
- Luz Piloto titilante
- Sirena, buzzer
- Fuente de tensión continua

PLC1
 Base Unit DC
 12 IN
 8 OUT – 6 Rly 2 Tr
 TBK

AC Speed Drive
 ATV11HU18M2A
 0.75 Kw 3/4 HP
 200-240 V
 50 – 60 Hz

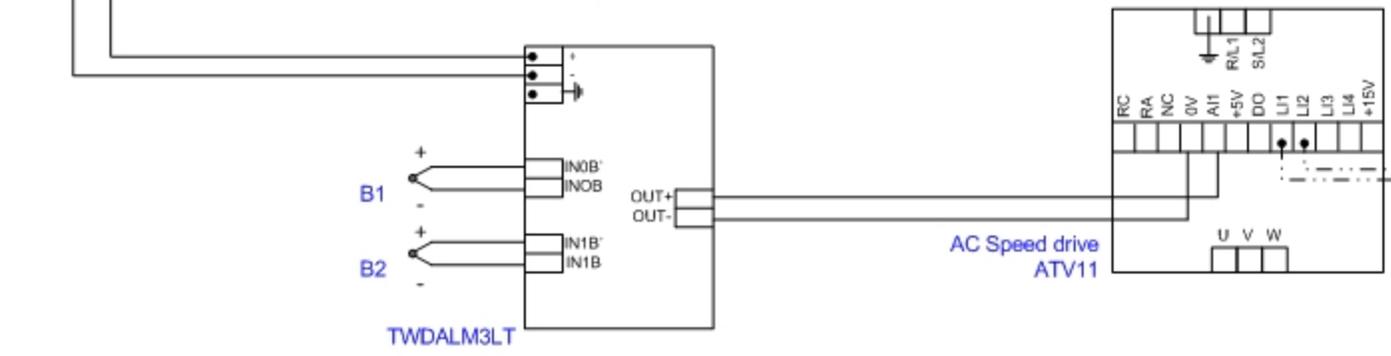
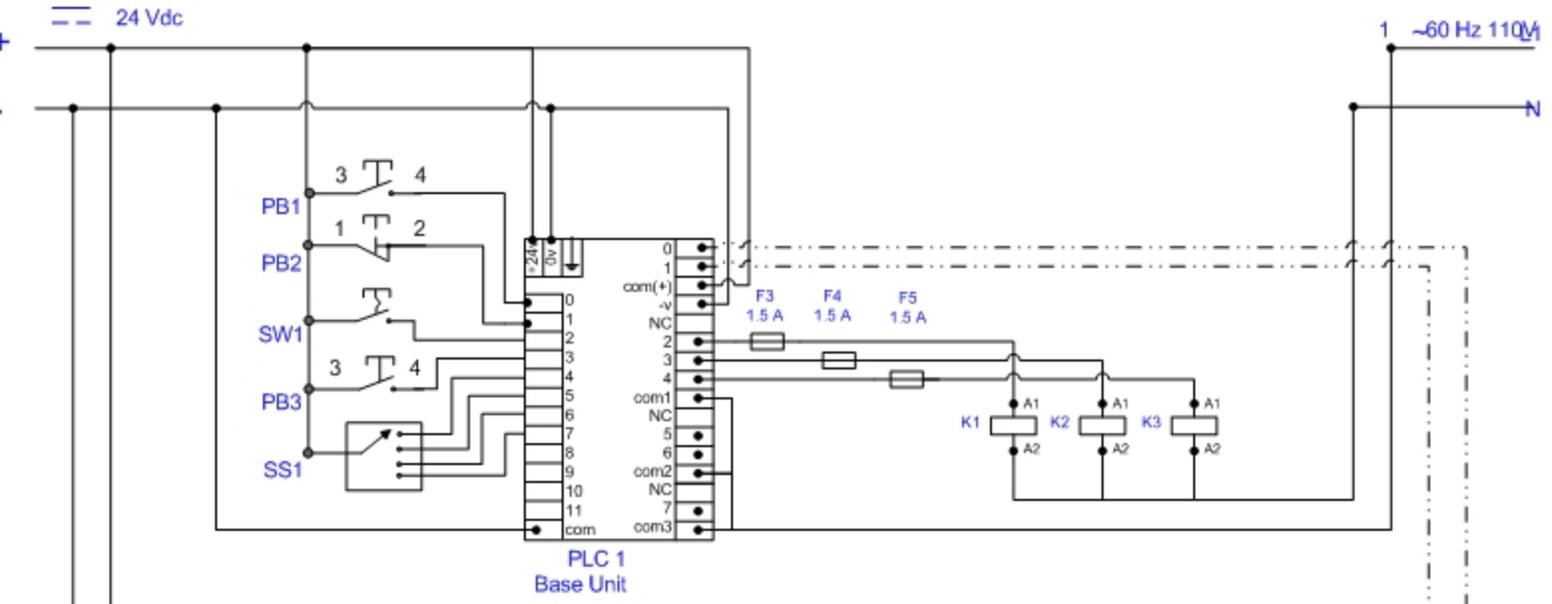
DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE CONTROL



Christian Samaniego Burgos,
Pablo Sevilla Cortez,
Ing. Hugo Ortiz T.,
Ing. José Gussamba C.

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA
DEL EJÉRCITO CICTE

2005-Abr-13 5 N/A



SIMBOLOGÍA

- Pulsador normalmente abierto NA
- Pulsador normalmente cerrado NC
- Switch de dos posiciones
- Selector de dos posiciones.
- Fusible
- Contactor, bobina
- Termocupla
- Línea de salida de 24VDC transistorizada

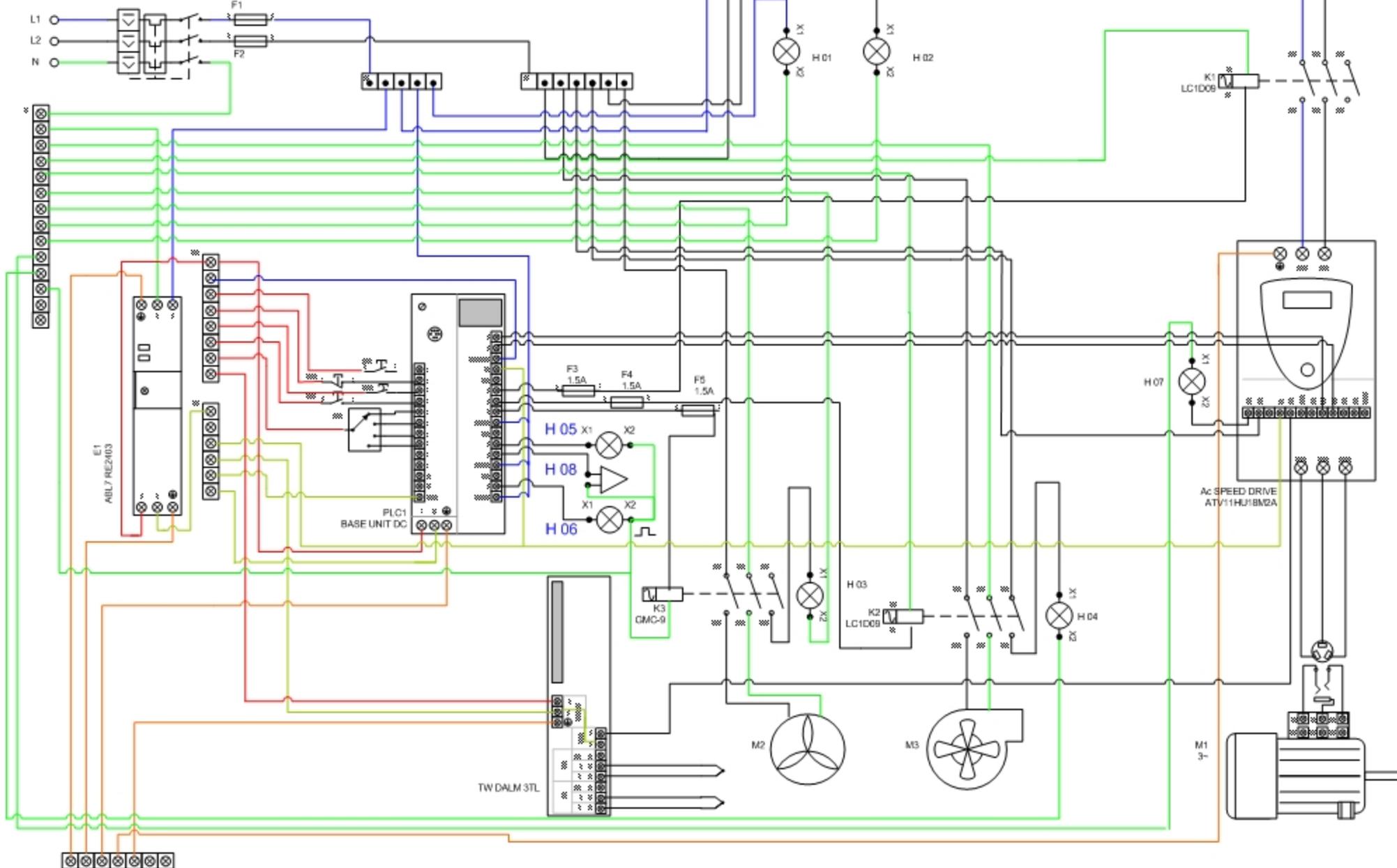
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO DE TEMPERATURA Y ALIMENTACIÓN DE COMBUSTIBLE PARA UNA SECADORA DE PRODUCTOS AGRICOLAS

DIAGRAMA DE ALAMBRADO



Cristian Samaniego Burgos
Pablo Sevilla Cortez
Ing. Hugo Ortiz T.
Ing. José Guasumba C.

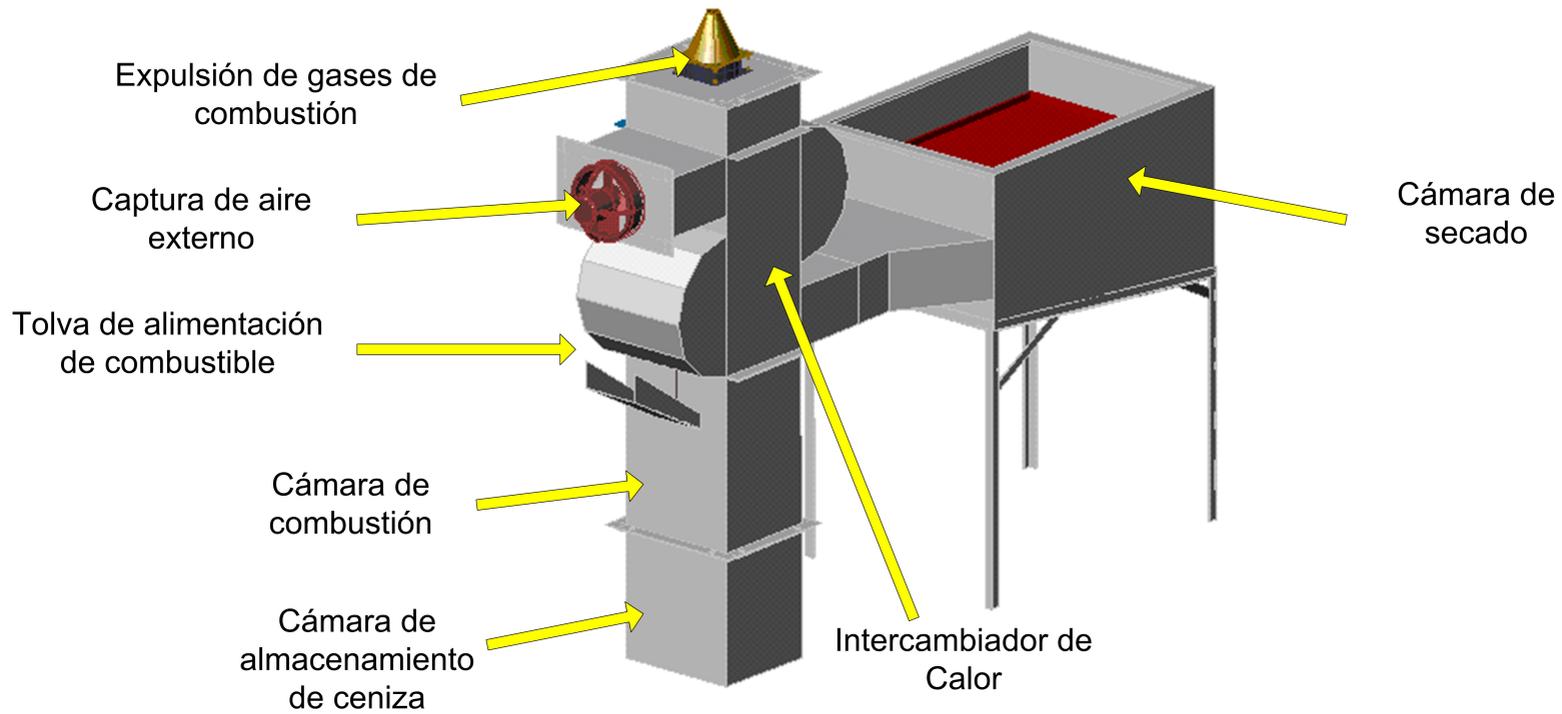
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA
DEL EJÉRCITO CICTE
2005-Abr-13 6 N/A



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO DE TEMPERATURA Y ALIMENTACIÓN DE COMBUSTIBLE PARA UNA SECADORA DE PRODUCTOS AGRÍCOLAS



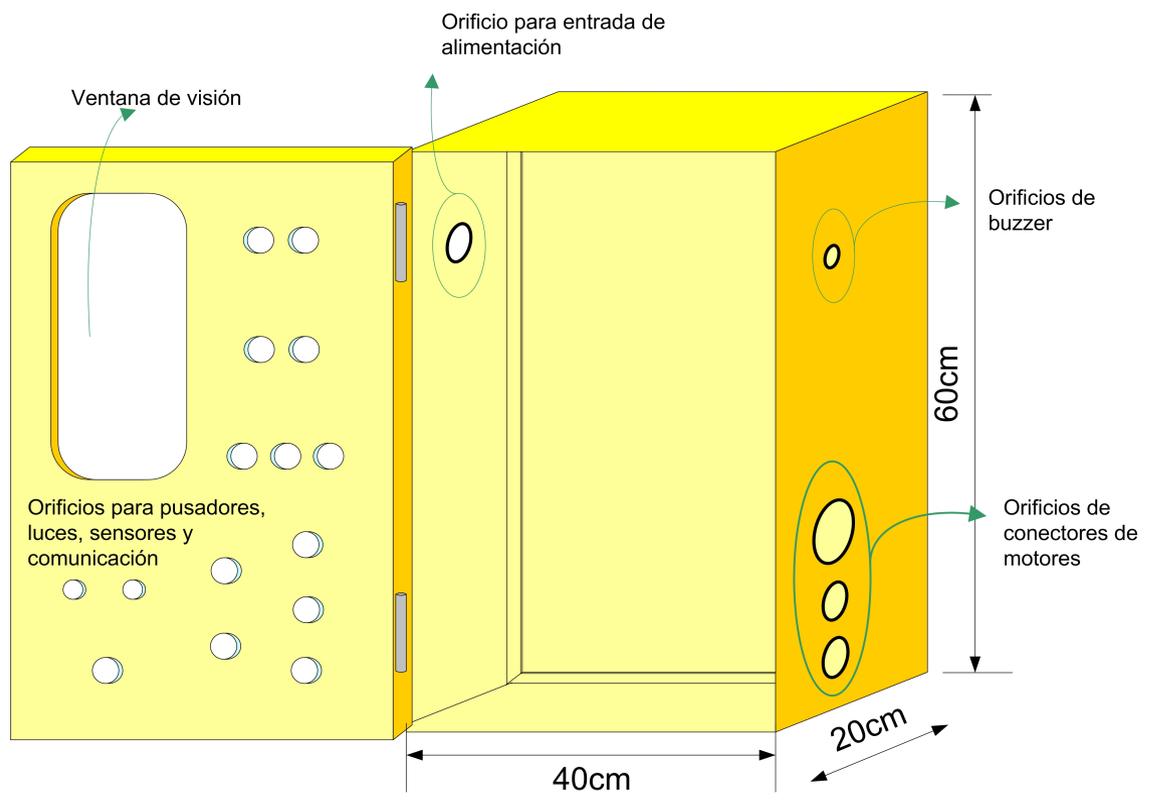
TÍTULO DIAGRAMA DE PARTES DE LA MÁQUINA			
AUTORES Christian Samaniego Burgos. Pablo Sevilla Cortez.		INSTITUCIÓN ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA DEL EJÉRCITO CICTE	
DIRECTORES Ing. Hugo Ortiz T. Ing José Guasumba C.		FECHA 2005-Abr-13	LÁMINA 7
		ESCALA N / A	



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO DE TEMPERATURA Y ALIMENTACIÓN DE COMBUSTIBLE PARA UNA SECADORA DE PRODUCTOS AGRÍCOLAS



TÍTULO	GABINETE DE CONTROL, DIMENSIONES - DISEÑO		
AUTORES	Christian Samaniego Burgos Pablo Sevilla Cortez.		
DIRECTORES	Ing. Hugo Ortiz T. Ing José Guasumba C.		
INSTITUCIÓN	ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA DEL EJÉRCITO CICTE		
FECHA	2005-Abr-13	LÁMINA	8
ESCALA	N / A		





PLANOS SECADORA - CÁMARA DE SECADO

Christian Samaniego Burgos
Pablo Sevilla Cortez
Ing Hugo Ortiz T.
Ing José Guasumba C.

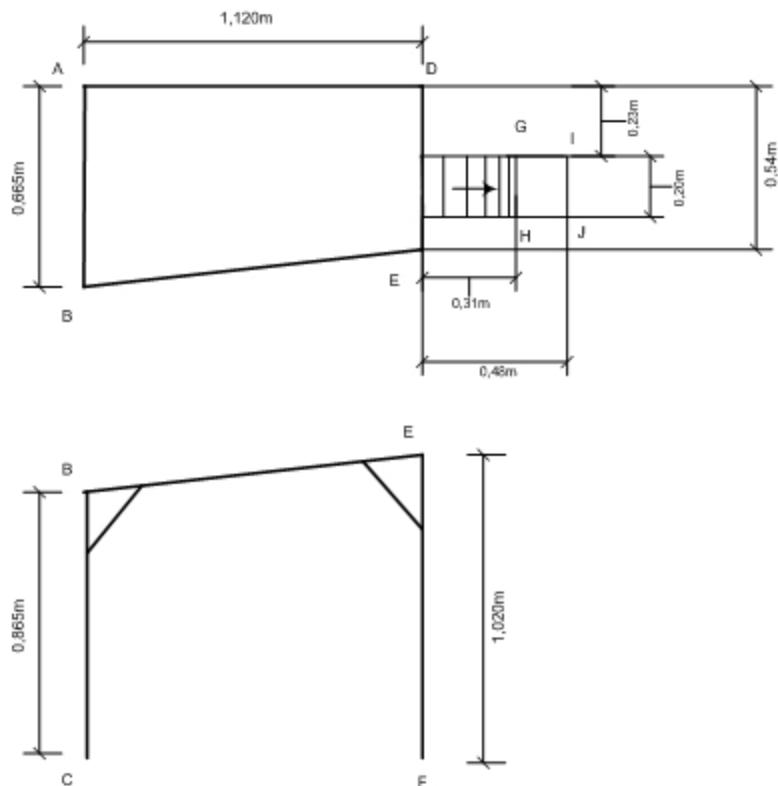
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA DEL
EJÉRCITO CICTE

2005-Mayo-16

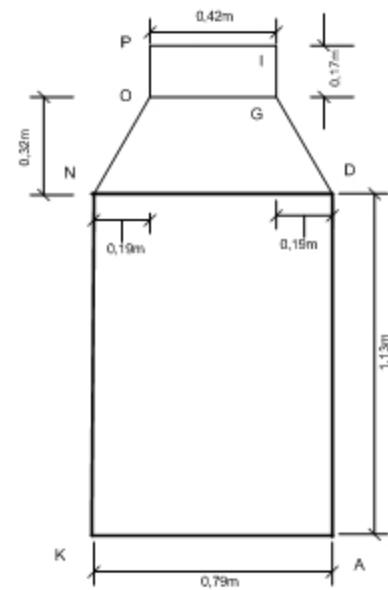
9

N/A

VISTA FRONTAL



VISTA SUPERIOR





PLANOS SECADORA - SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

Christian Semanigo Burgos,
Pablo Sevilla Cortez,
Ing. Hugo Ortiz T.,
Ing. José Guasumba C.

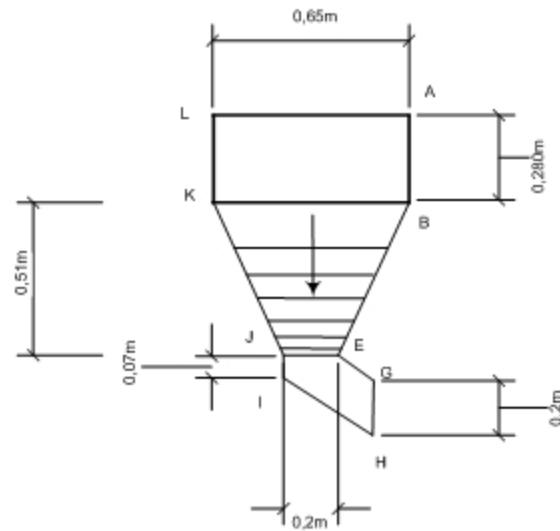
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA DEL
EJÉRCITO CICTE

2005-Mayo-16

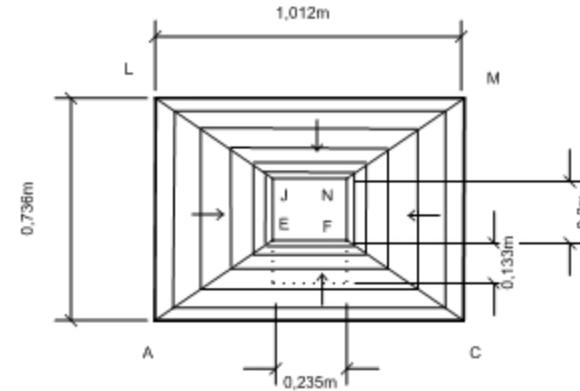
11

N/A

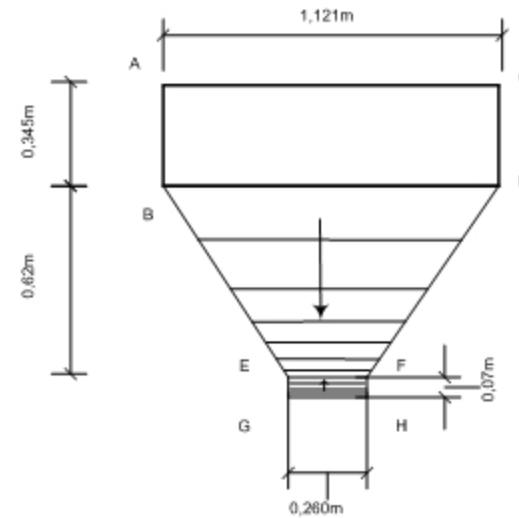
VISTA LATERAL DERECHA



VISTA SUPERIOR



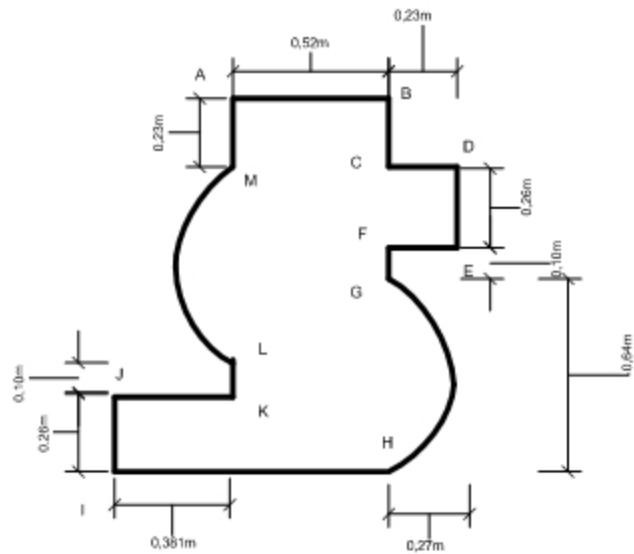
VISTA FRONTAL



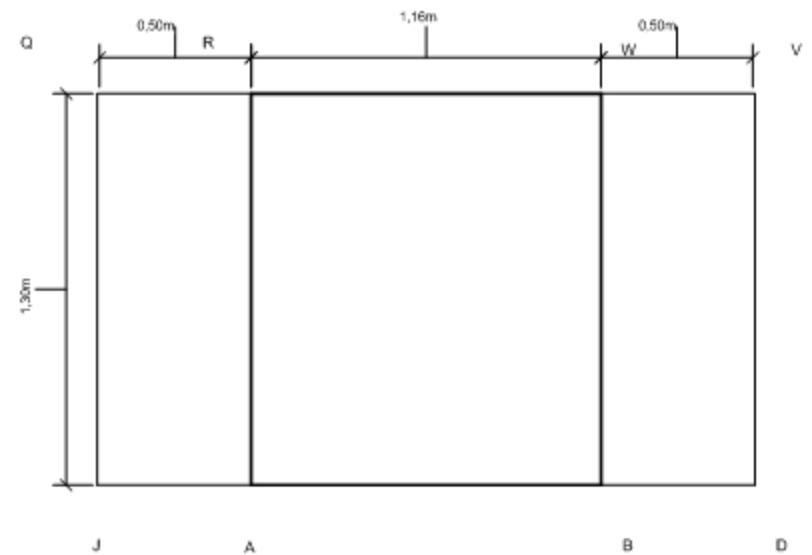


PLANOS SECADORA – INTERCAMBIADOR DE CALOR		
Christian Samaniego Burgos. Pablo Sevilla Cortez.	ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA DEL EJÉRCITO CICTE	
Ing. Hugo Ortiz T. Ing. José Guasumba C.	2005-Mayo-16	12 N/A

VISTA FRONTAL



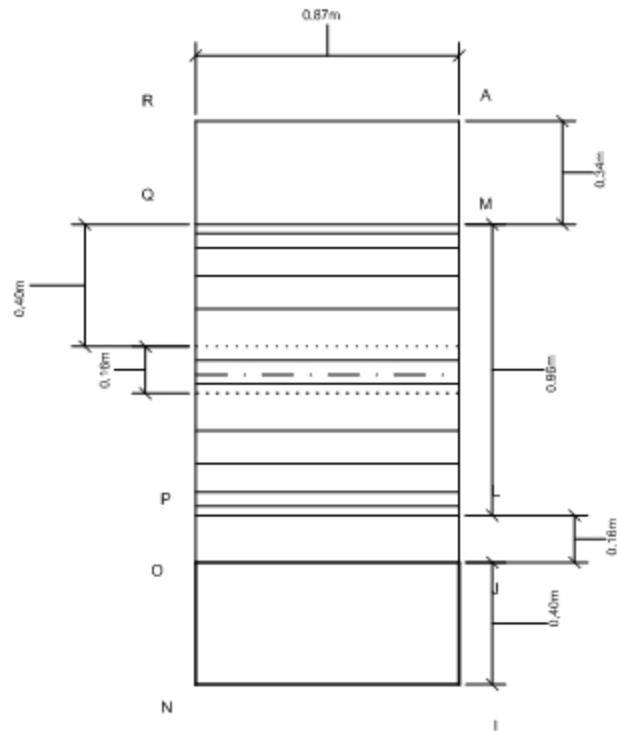
VISTA SUPERIOR



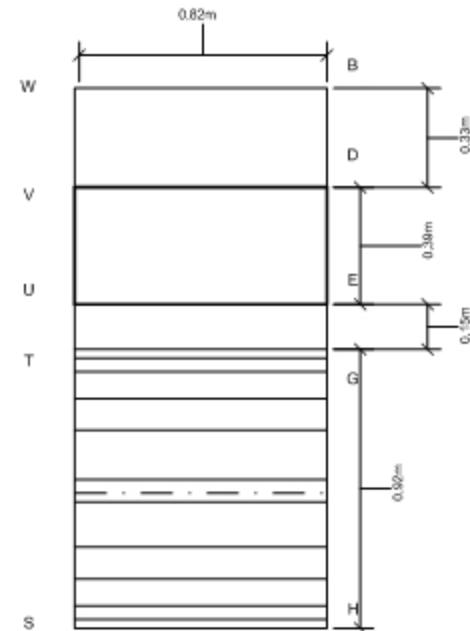


PLANOS SECADORA – INTERCAMBIADOR DE CALOR		
Cristian Semanigo Burgos. Pablo Sevilla Cortez. Ing. Hugo Ortiz T. Ing. José Guasumba C.	ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA DEL EJÉRCITO CICTE	
2005-Mayo-16	13	N/A

VISTA LATERAL DERECHA



VISTA LATERAL IZQUIERDA





PLANOS SECADORA – CÁMARA DE COMBUSTIÓN

Christian Samaniego Burgos,
Pablo Sevilla Cortez,
Fg. Hugo Ortiz T.,
Ing José Guasumba C.

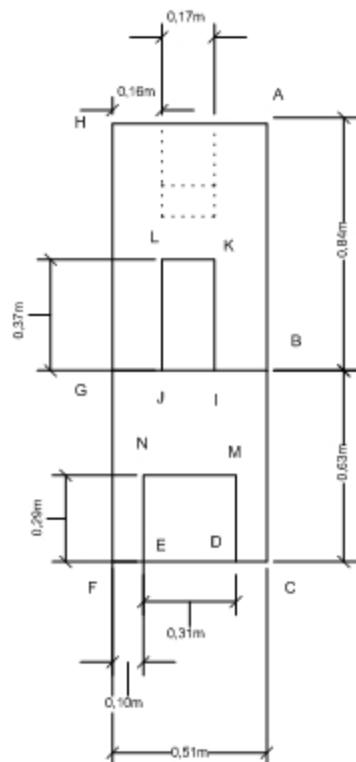
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA DEL
EJÉRCITO CICTE

2005-Mayo-16

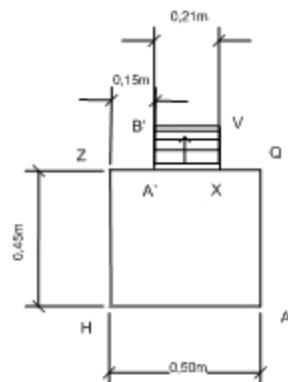
14

N/A

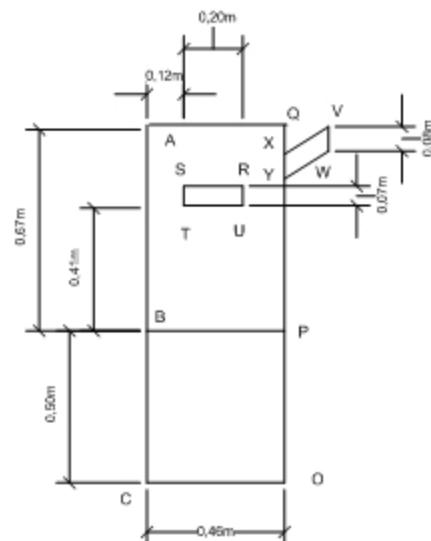
VISTA FRONTAL



VISTA SUPERIOR



VISTA LATERAL IZQUIERDA



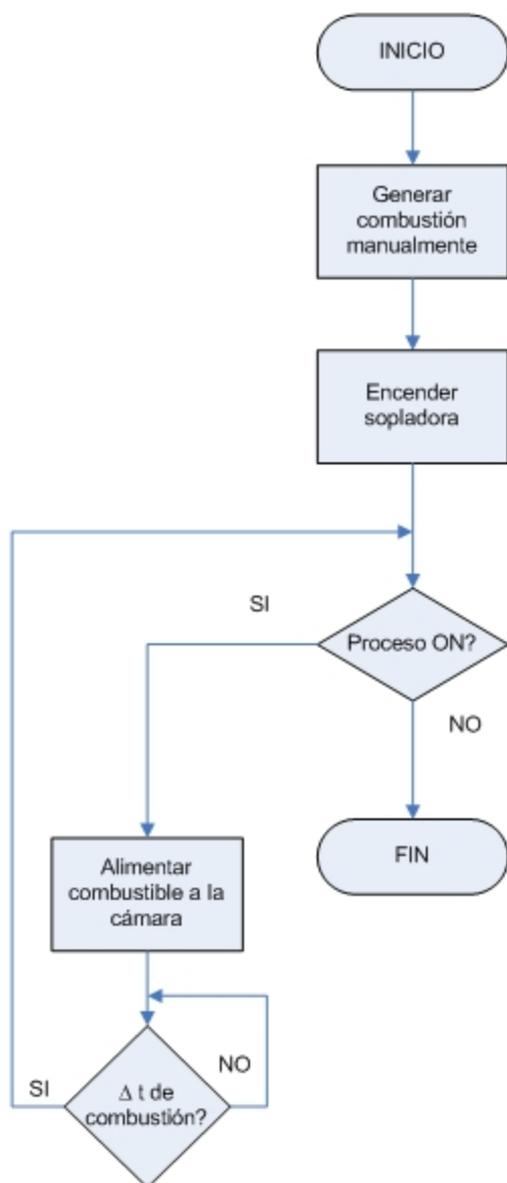
FLUJO –SISTEMA DE COMBUSTIÓN PASADO

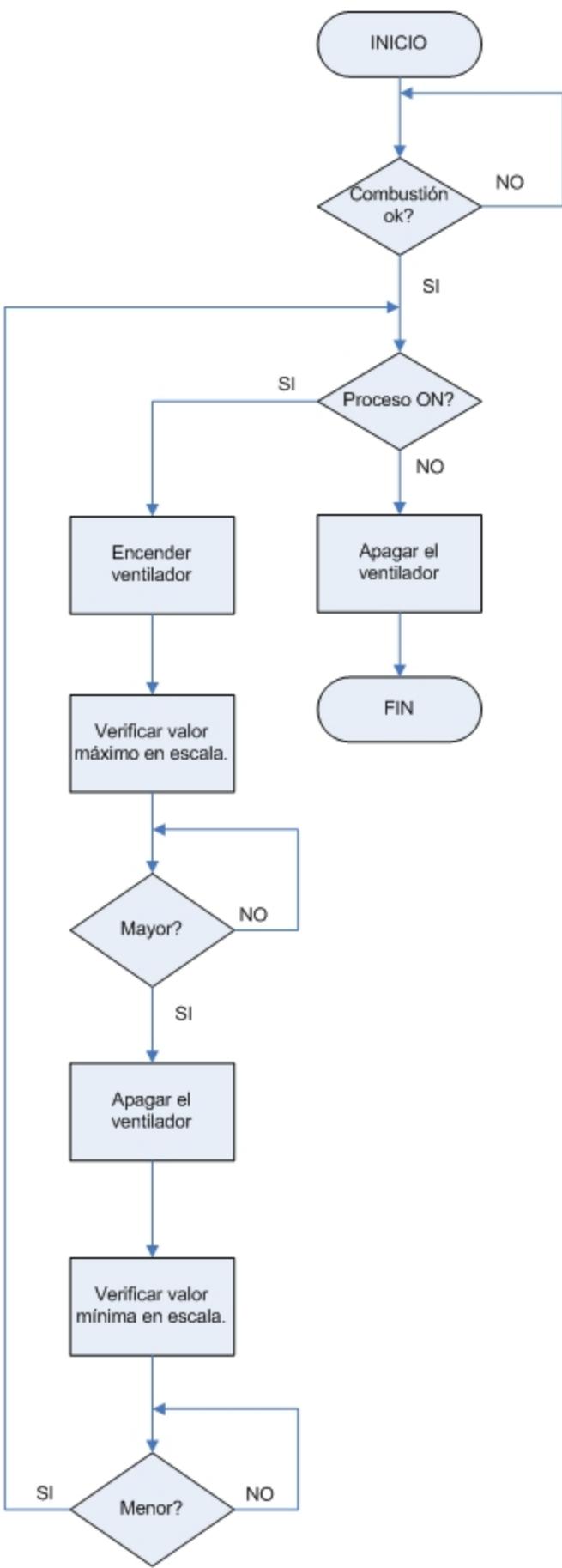


Christian Sarmiento Burgos
Pablo Sevilla Cortez
Ing. Hugo Ortiz T.
Ing. José Guasumba C.

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA DEL EJÉRCITO CICTE

2005-Mayo-16 15 N/A





FLUJO - FUNCIONAMIENTO GLOBAL PROCESO

Christian Samaniego Burgos,
Pablo Sevilla Cortez,
Ing. Hugo Ortiz T.
Ing. José Guesumba C

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA
DEL EJÉRCITO CICTE

2005-Mayo-16 17 N/A



INICIO

Seleccionar modo de control Local / Remoto.

Encender cámara de combustión manualmente

Presionar el Pulsador / Botón INICIO

Seleccionar el Producto a procesarse

Señal de Carga?

Señal de cargado?

Proceso Iniciado

Proceso normal?

Tiempo cumplido?

Señal de Proceso Finalizado.

FIN

Dependiendo del modo de control Local / Remoto, El cual puede cambiarse indistintamente durante la etapa de inicio del proceso

Dependiendo del modo de control Local / Remoto, mediante el selector manual 4 posiciones o HMI - pantalla de usuario respectivamente.

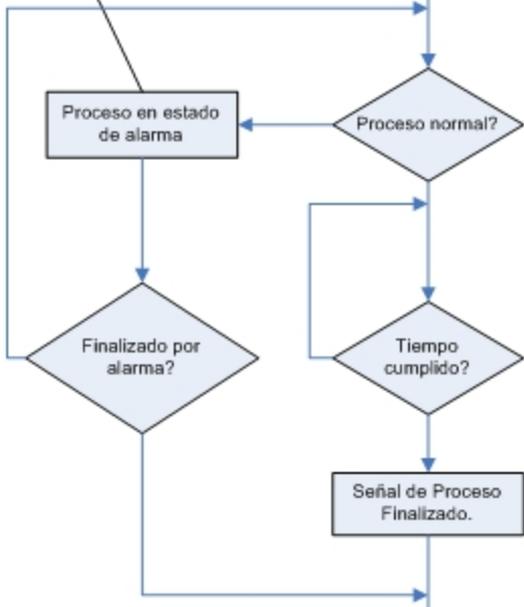
Enviada por el sistema, Vea estados del proceso en la sección 3.3.3

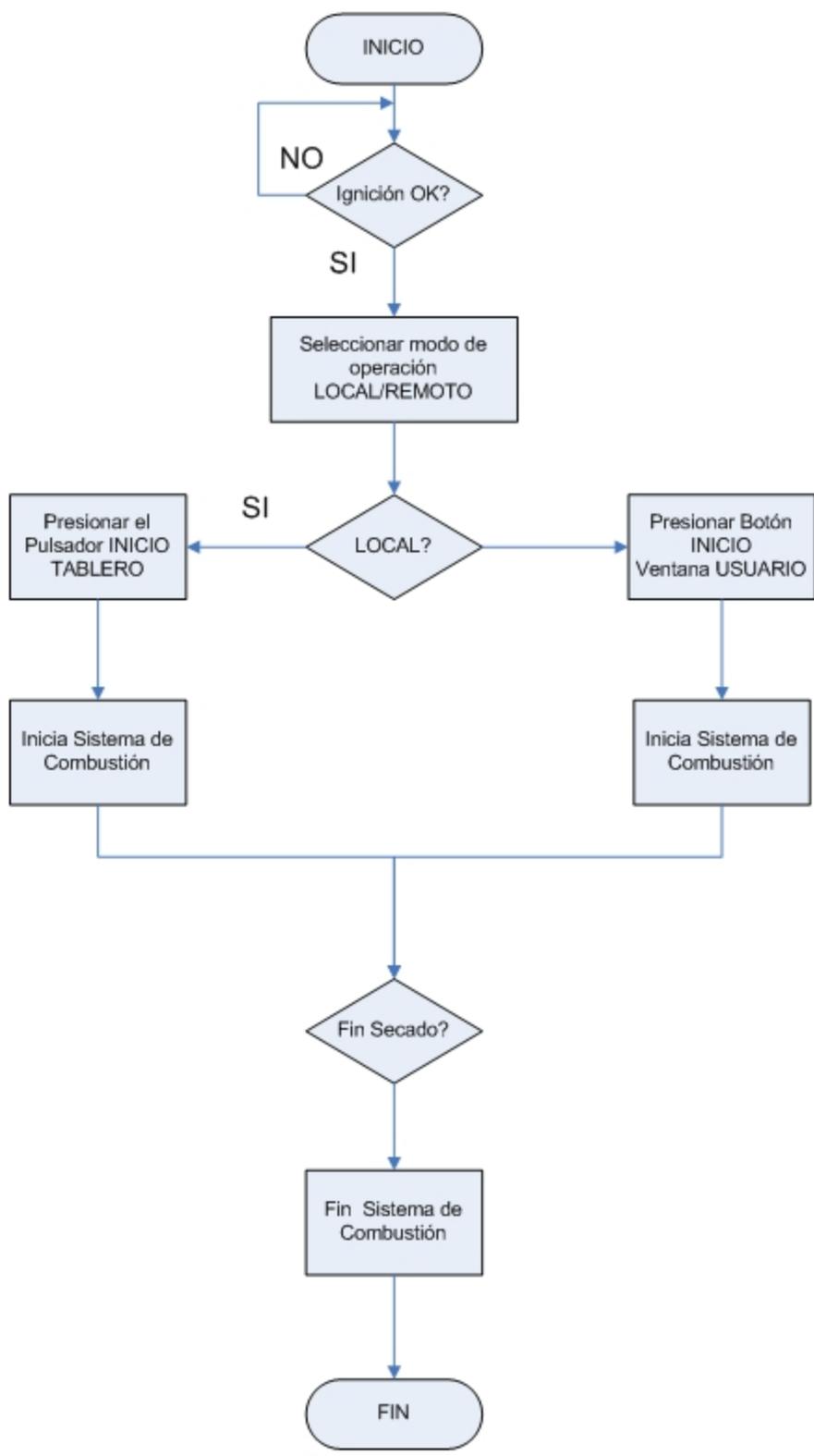
Enviada por el operador, una vez que el producto se encuentra en la cámara de secado, a través del pulsador / botón de carga.

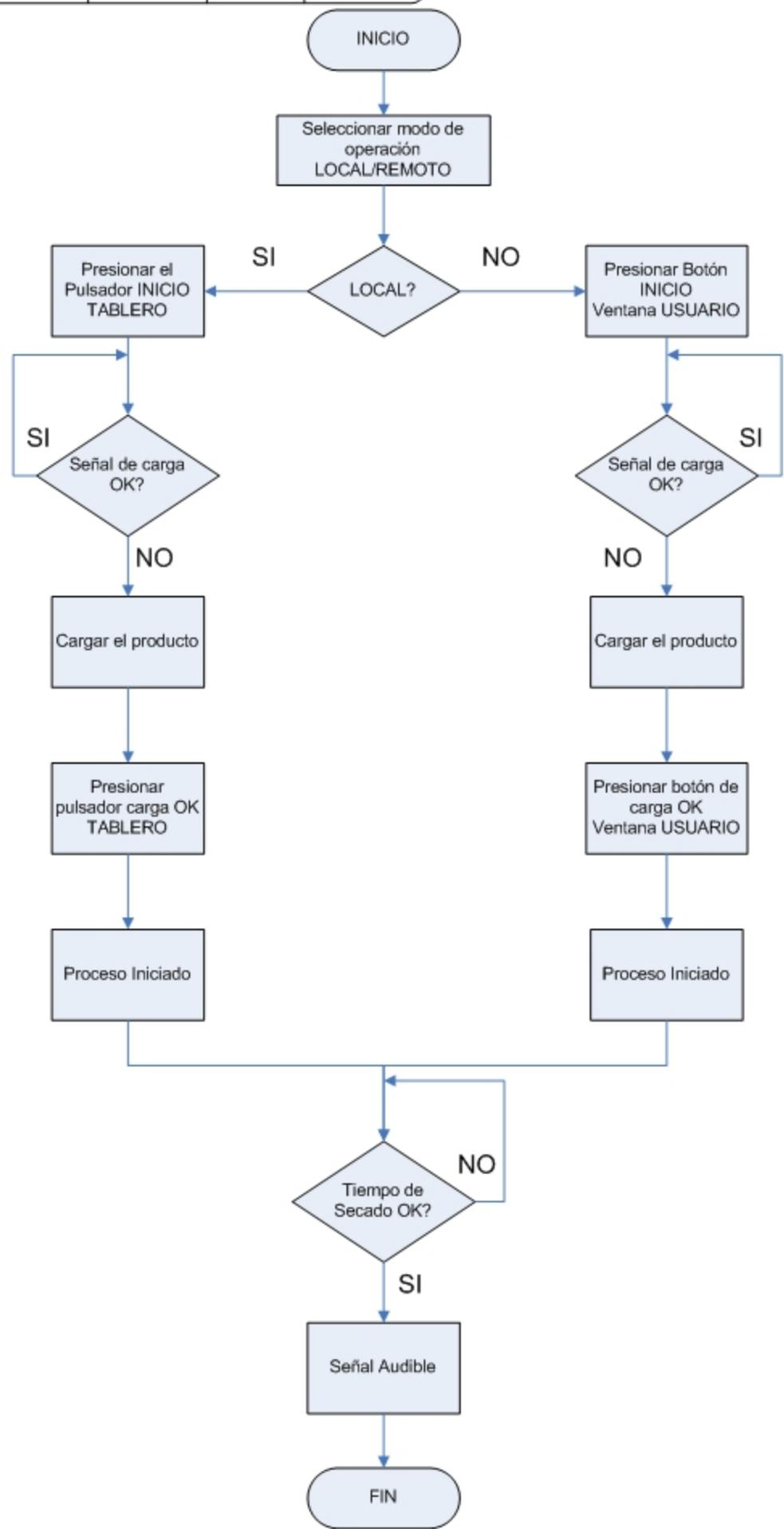
Vea comportamiento del sistema en estado de alarma sección 3.3.3

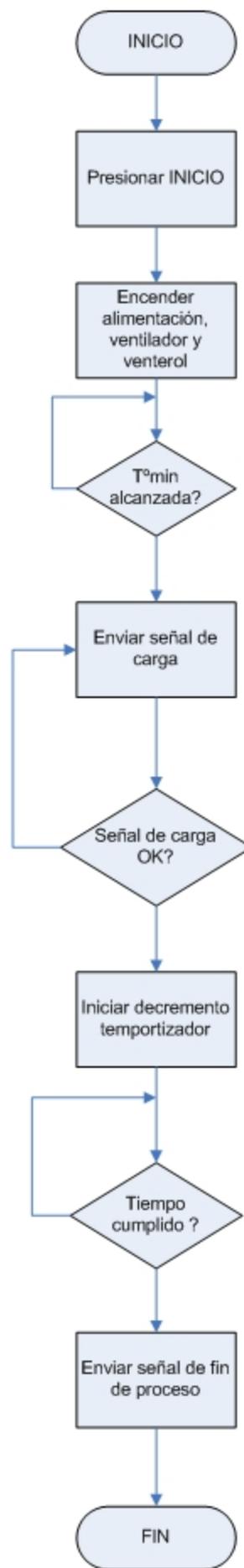
Proceso en estado de alarma

Finalizado por alarma?









PRUEBAS EXPERIMENTALES – MODELO DE IMPLEMENTACIÓN

SECADO DE BANANO			
tai [°C] =	26		
Pesos [lbs]			
Casarilla i =	22,05		
Casarilla f =			
Banano i =	20,35		
Banano f =	13,6		
Hora de INICIO			
9:55			
Tiempo	T Pared [°C]	T Banano [°C]	OBSERVACIONES
11:02:51	75	28	
11:04:04	87		
11:04:31	89		
11:06:10	86	40	
11:09:51	86	40	virado
11:16:26	80		
11:24:20	84	43	
11:28:19	116	45	
11:30:37	112	52	
11:32:27	113	56	virado
11:33:47	118	54	
11:35:10	123	55	
11:37:11	118	56	
11:39:05	113	58	
11:41:23	110	54	virado
11:44:19	110	64	
11:46:47	111		
11:49:02	122	58	virado
11:52:14	120	61	
11:54:02	126	60	
11:55:12	131		
11:56:52	131		
11:58:23	130	70	virado
12:00:32	138	80	
12:01:53	146		
12:03:23	150	82	
12:05:27	143	70	virado
12:07:52	136	78	
12:10:14	132	80	
12:11:51	121		
12:13:32	105	74	
12:15:20	93	70	
12:17:51	84	56	virado
12:19:59	84	70	

12:22:18	102	82	
12:24:57	118	86	
12:28:14	113	84	
12:30:48	108	80	virado
12:33:55	139	80	
12:34:46	146	98	Se retira termometro de temperatura del grano
12:35:27	152		
12:42:53	184		
12:48:51	168		
12:53:53	130		Se retira alimentación de cascarilla (enfriado)
12:55:37	114		
12:58:03	93		
13:00:51	70		
13:03:09	58		
13:04:15	55		
13:05:27	53		
13:06:15	52		
13:07:10	50		

SECADO DE ARROZ			
tai [°C] =	22		
Pesos [lbs]			
Cascarilla i =	9		
Cascarilla f =	4,65		
Arroz i =	16,25		
Arroz f =	16,9		
Hora de INICIO			
8:37			
Tiempo	T Pared [°C]	T Banano [°C]	OBSERVACIONES
8:39:11	29		
8:39:58	39		
8:40:12	47		
8:40:29	43		Se apaga
8:41:24	36	28	
8:43:25	35		Se enciende
8:44:21	36	27	
8:45:15	37		
8:45:39	38		
8:46:37	39		
8:49:55	44	27	
8:52:11	48	28	
8:53:58	51	28	
8:55:32	54		
8:57:22	59	29	
8:59:11	60	29	Primera muestra 21,5%
9:01:37	63	30	
9:02:21	64	30	

9:03:40	67	30	
9:06:13	62	32	
9:08:11	55		
9:10:12	57	32	
9:11:52	61	32	
9:13:12	61	33	
9:14:10	62		
9:15:15	61	33	Segunda muestra 18%
9:16:54	64	33	
9:17:34	66	33	
9:18:55	70	33	
9:20:37	72	34	
9:21:48	63	34	Se desconecta al ventilador superior
9:22:45	62	33	
9:23:10	62	33	Se conecta al ventilador
9:24:10	66	34	
9:26:39	67	34	Se desconecta al ventilador superior
9:28:07	65	34	
9:29:11	62	35	
9:30:55	60	35	Tercera muestra 15.4% superior
9:33:58	66		
9:35:49	63	36	
9:37:27	61	35	
9:38:33	60	35	
9:39:15	61	35	Se prende ventilador
9:39:56	66	36	se retira alimentación de cascarilla
9:43:09	64	35	
9:45:50	66	35	Cuarta muestra 14,6%
9:49:48	56	35	
9:56:15	44	30	
10:01:12	39	30	
10:07:43	35	27	Quinta muestra 13,6%
			Se descarga el grano del secador

SECADO DE ARROZ	
tai [°C] =	31
tfa [°C] =	34
Pesos [lbs]	
Casarilla i =	13,85
Casarilla f =	6,25
Arroz i =	26,6
Arroz f =	22,55
Humedad i =	24%
Humedad f =	9,20%
Hora de INICIO	
17:20	

Tiempo	T Pared [°C]	T Banano [°C]	OBSERVACIONES
17:23:12	32	30	
17:24:18	38		
17:24:49	43		
17:25:02	44		
17:25:14	46		
17:25:34	48		
17:25:47	49		
17:26:14	50		
17:26:29	51		
17:26:41	52	30	
17:27:19	54		
17:28:49	54		Se apagó
17:30:25	48	31	
17:31:11	54		Se normaliza
17:31:24	58	32	
17:31:53	66		
17:32:37	75	32	
17:33:17	81		
17:33:44	84		
17:34:12	85		
17:34:40	86		
17:34:50	91	34	
17:35:35	101		
17:36:50	100	38	
17:38:27	99	39	
17:40:06	96	40	
17:41:26	98	40	
17:43:07	95	40	
17:44:27	91		
17:45:28	90	39	
17:48:59	87	39	
17:52:04	88	40	
17:57:34	97	40	
18:01:07	96	44	
18:01:43	95		
18:03:10	93	45	
18:05:07	94		
18:08:05	89	47	
18:09:48	98	47	
18:10:14	101		
18:10:42	104		
18:11:13	109		
18:11:35	111	48	
18:12:10	116		
18:12:49	120	50	
18:13:39	126	54	
18:14:28	129	56	
18:15:00	127	58	
18:15:27	127	60	Termina alimentación

18:17:18	125	64	
18:18:00	125	66	se apaga la llama
18:20:32	120	63	inicia el enfriamiento con el ventilador
18:23:20	109	62	
18:25:20	100		
18:28:47	72		
18:34:48	55		

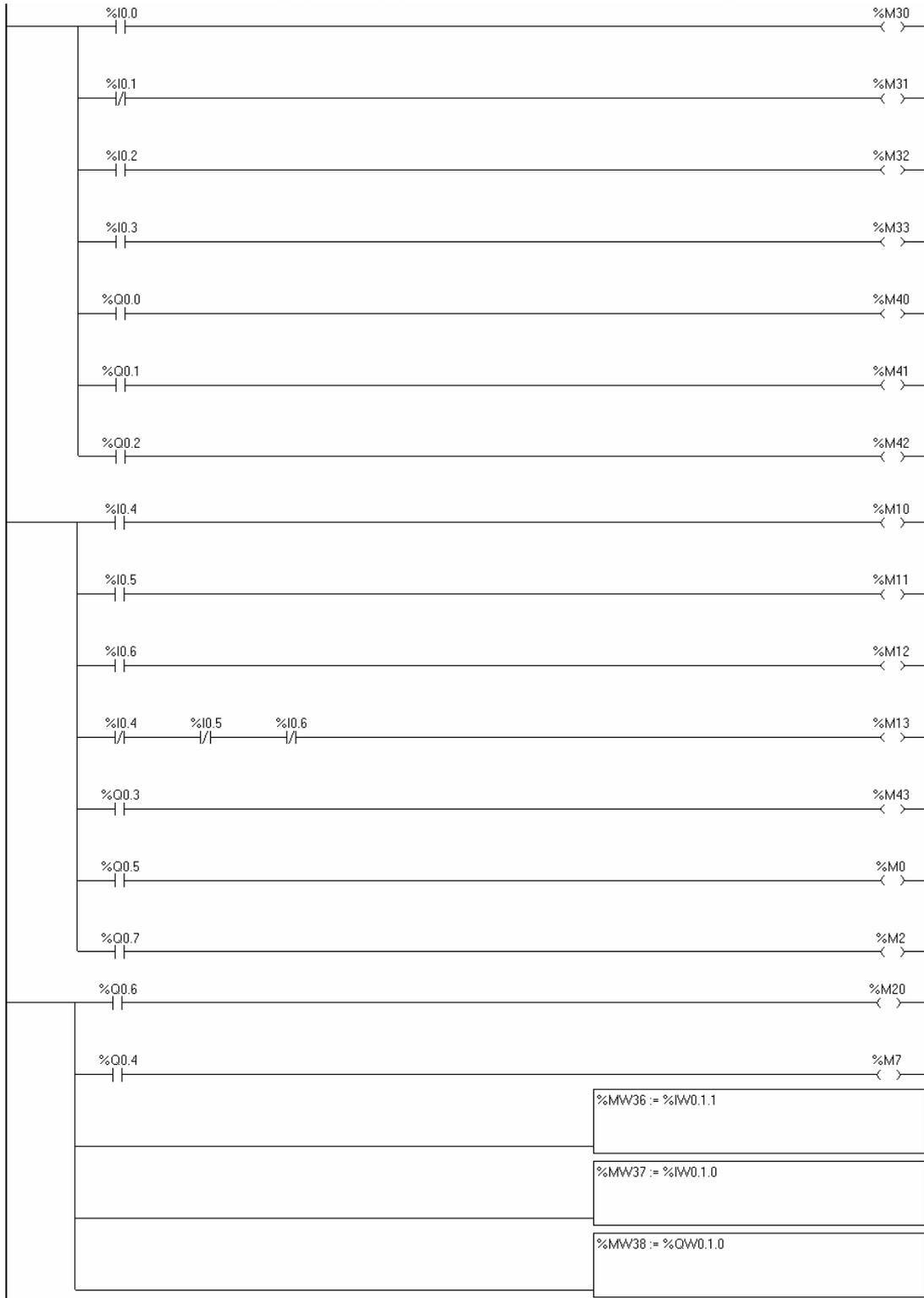
SECADO DE MOROCHILLO		
tai [°C] =		23
tfa [°C] =		34
Pesos [lbs]		
Casarilla i =		39
Casarilla f =		22
Arroz i =		26,6
Arroz f =		22,55
Humedad i =		22,50%
Humedad f =		13,20%
Hora de INICIO		
9:00		
Tiempo	T Banano [°C]	OBSERVACIONES
9:07:00	31	
9:09:00	38	
9:11:00	40	
9:11:44	41	
9:12:10	42	
9:12:20	43	
9:12:40	44	
9:13:08	45	
9:13:40	46	
9:13:59	47	
9:14:10	48	
9:14:32	49	
9:14:44	50	
9:15:12	51	
9:15:31	52	
9:16:00	53	
9:16:15	54	
9:16:56	53	
9:17:40	55	
9:19:29	52	
9:21:02	53	
9:21:08	55	
9:21:58	56	
9:22:27	57	
9:22:51	58	
9:23:28	59	

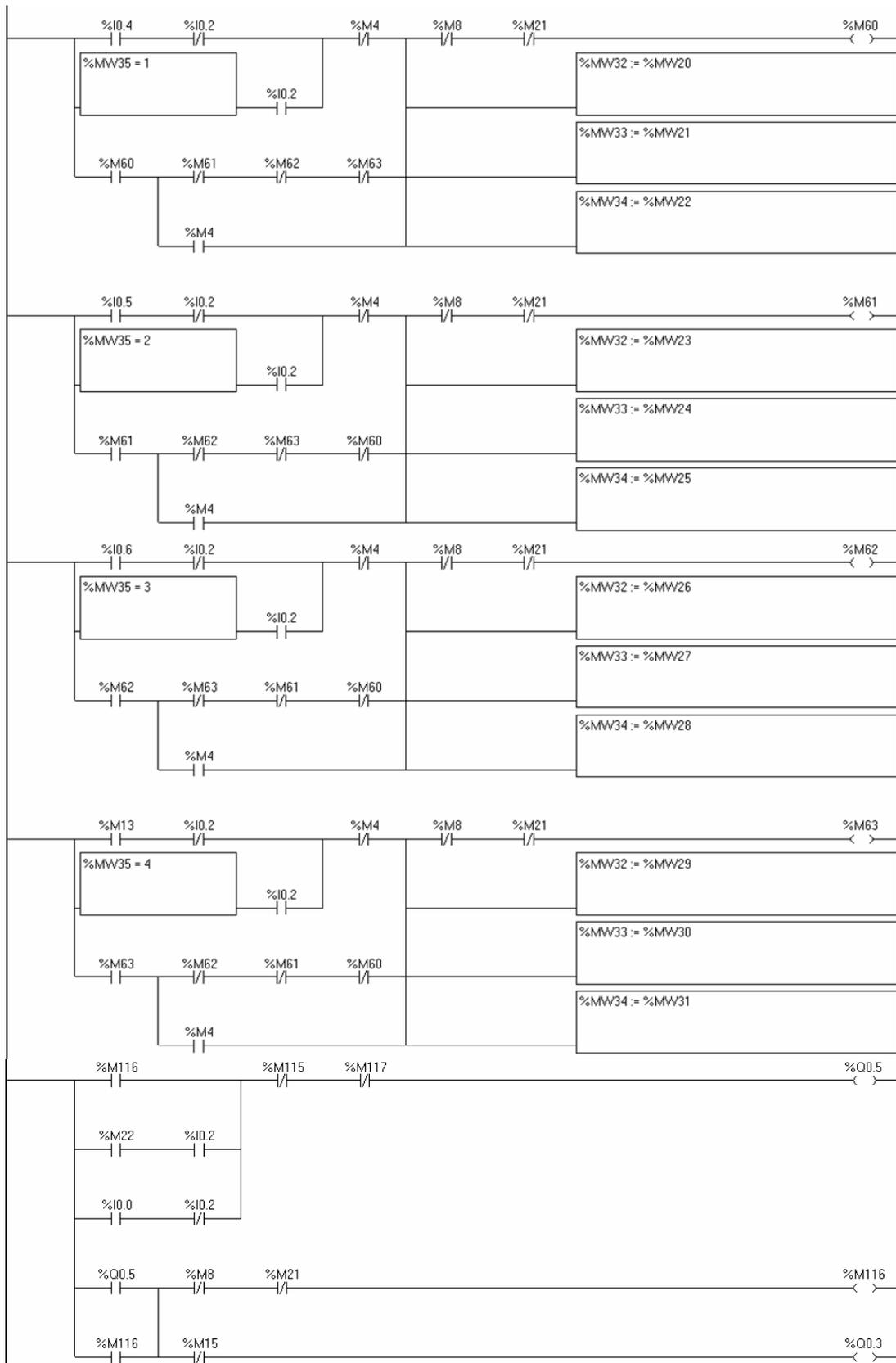
9:23:58	60	
9:24:15	61	
9:24:32	62	
9:25:04	63	
9:25:20	64	
9:25:35	65	
9:35:14	61	
9:35:26	62	
9:37:15	61	
9:39:40	60	
9:40:00	59	
9:42:28	59	
9:44:31	58	
9:45:26	59	
9:47:00	59	
9:48:50	59	
9:50:22	59	
9:52:34	59	
9:52:57	60	
9:54:09	60	
9:55:10	60	
9:56:21	60	
9:57:04	60	
9:58:00	61	

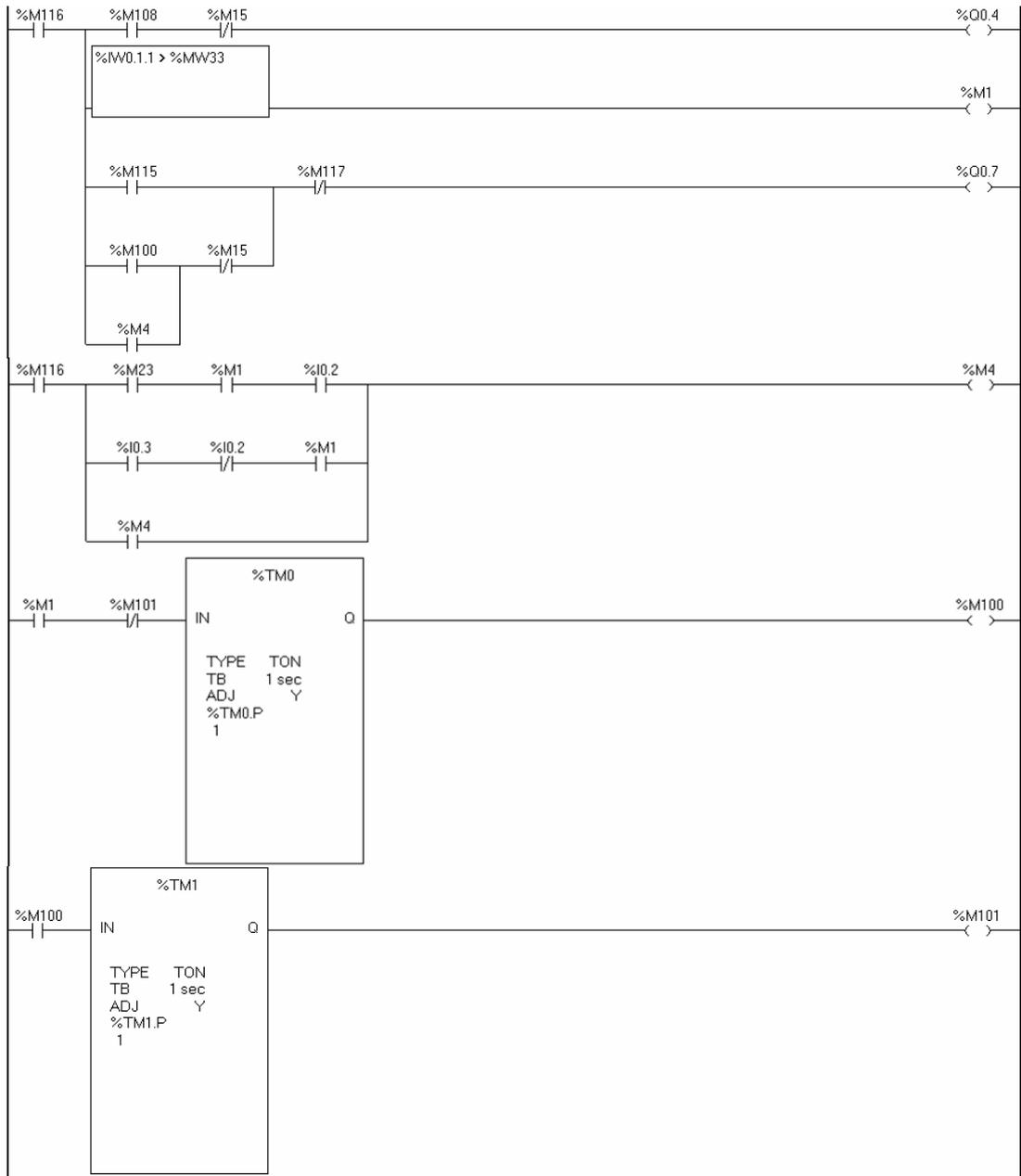
COMBUSTION DE CASCARILLA			
ITEM	HORA	T [°C]	OBSERVACIONES
1	5:14:00	57	Sin carga de producto
2	5:16:00	48	Ta = 27°C
3	5:18:25	60	
4	5:20:00	71	
5	5:22:00	80	
6	5:23:50	90	Temperatura del aire de calefacción
7	5:24:00	95	
8	5:33:00	53	carga de morochillo
9	5:34:18	55	chi=25%
10	5:35:00	56	
11	5:35:55	57	chf=18%
12	5:36:21	58	
13	5:37:08	59	Tiempo de secado 30 min
14	5:40:00	60	
15	5:38:50	60	Peso =23lbs
16	5:39:08	61	
17	5:40:05	62	
18	5:41:16	62	
19	5:41:45	63	
20	5:42:11	62	

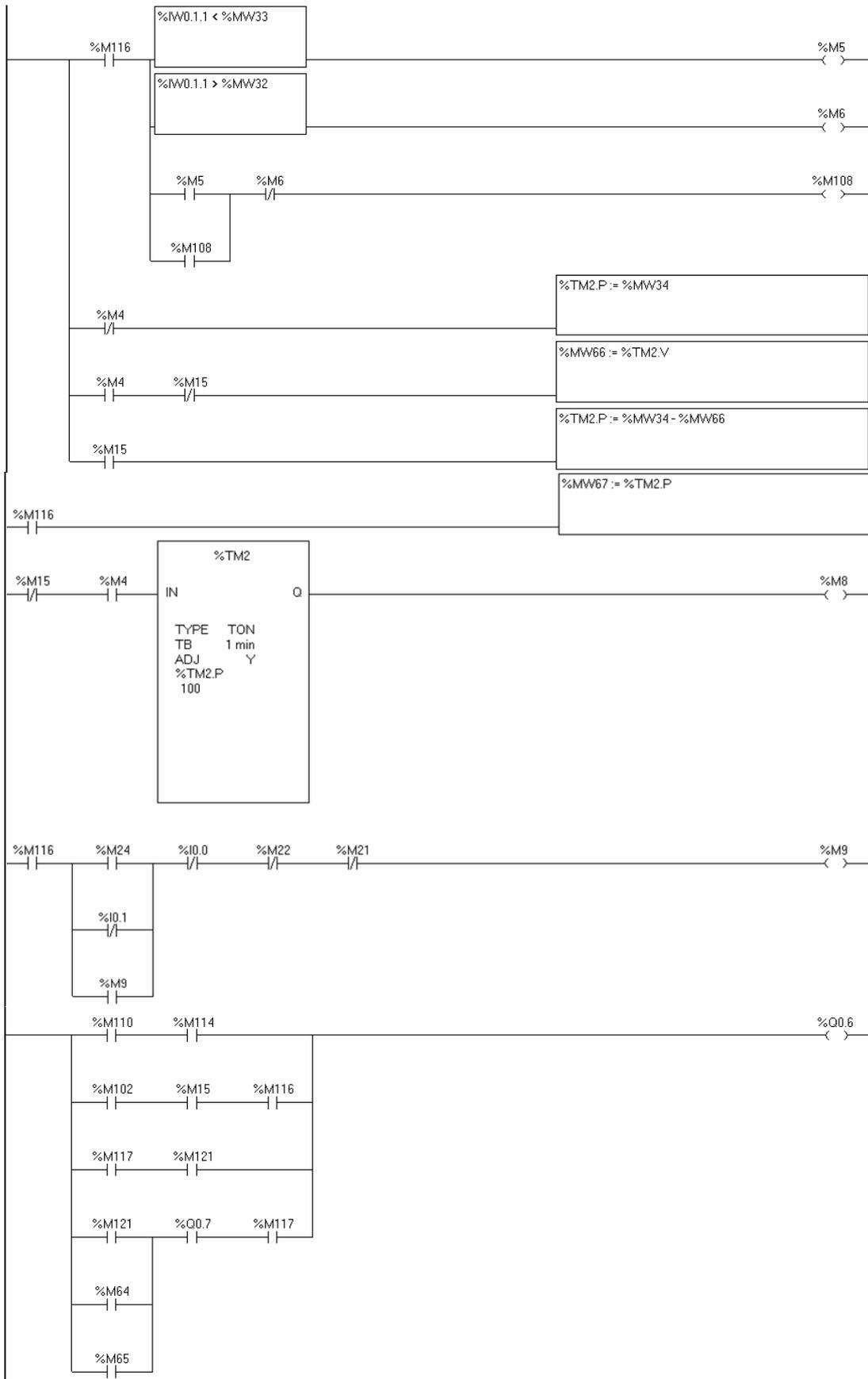
21	5:43:00	63	
22	5:44:54	62	
23	5:45:30	63	
24	5:46:23	64	
25	5:47:26	65	
26	5:48:10	66	
27	5:48:53	66	
28	5:49:43	66	
29	5:50:48	67	
30	5:53:26	68	
31	5:54:50	69	
32	5:56:00	66	
33	5:57:10	64	
34	5:58:00	63	
35	6:00:00	63	
36	6:01:24	63	
37	6:03:00	63	

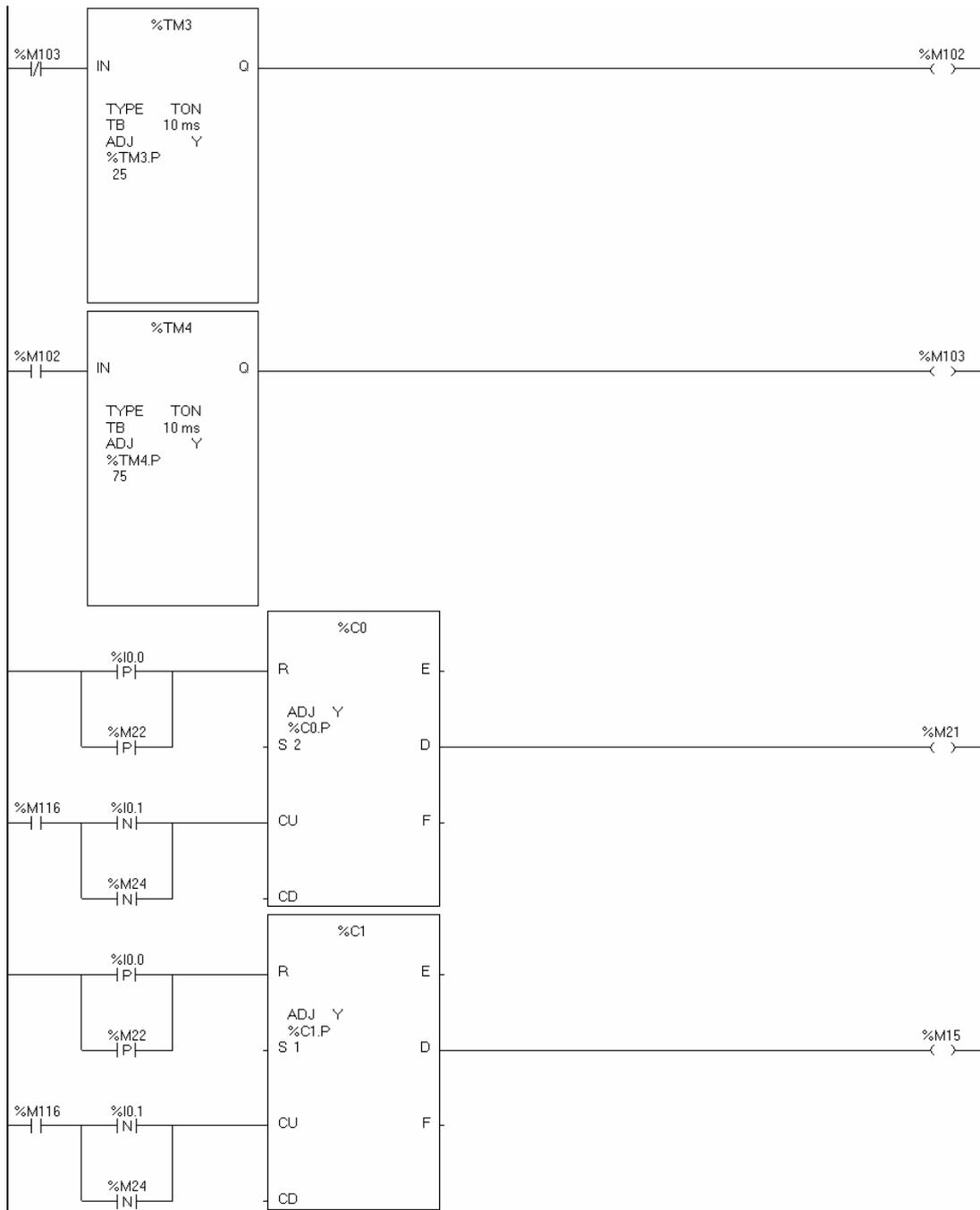
ANEXO 6: PROGRAMA LADDER DEL PLC

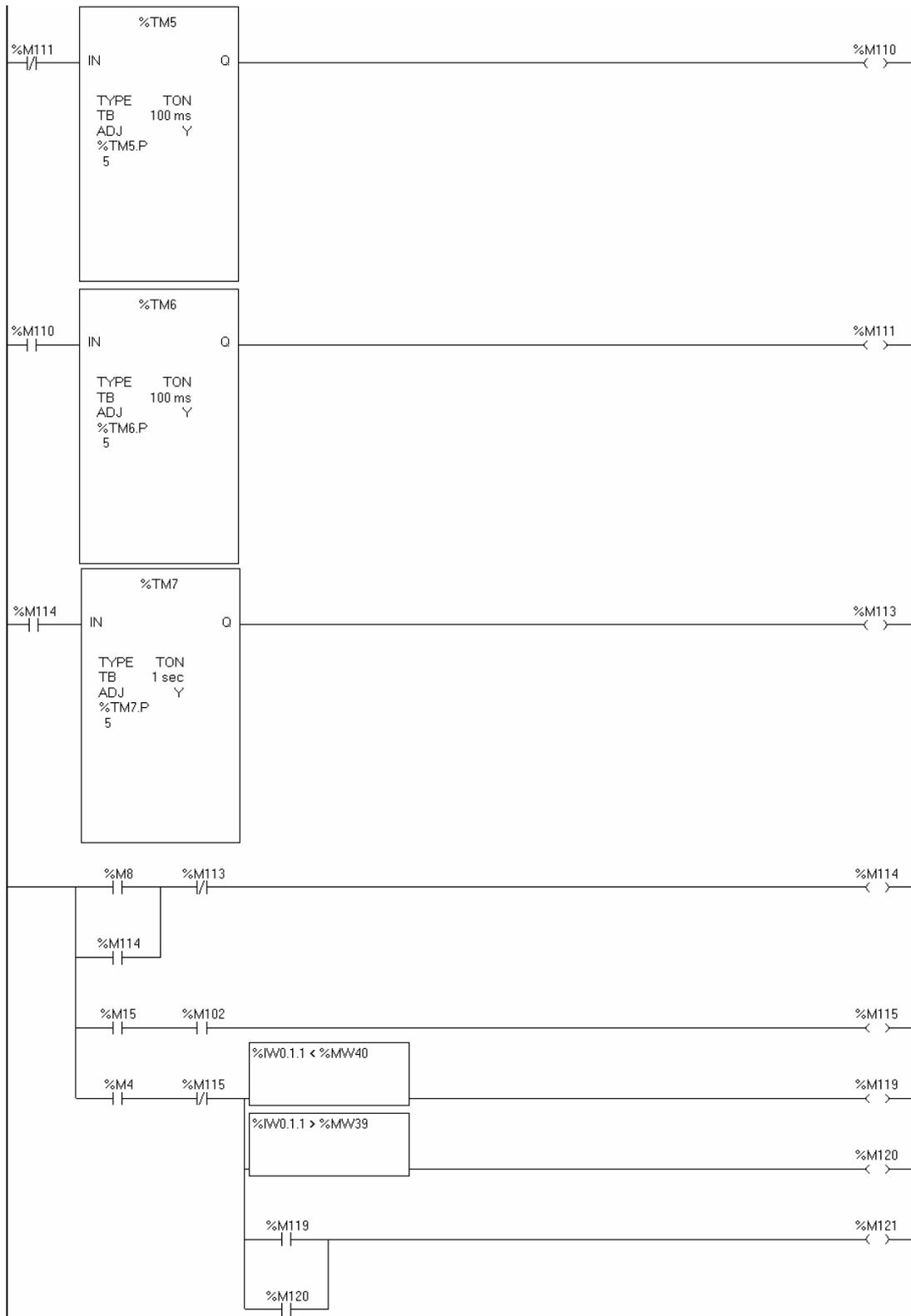


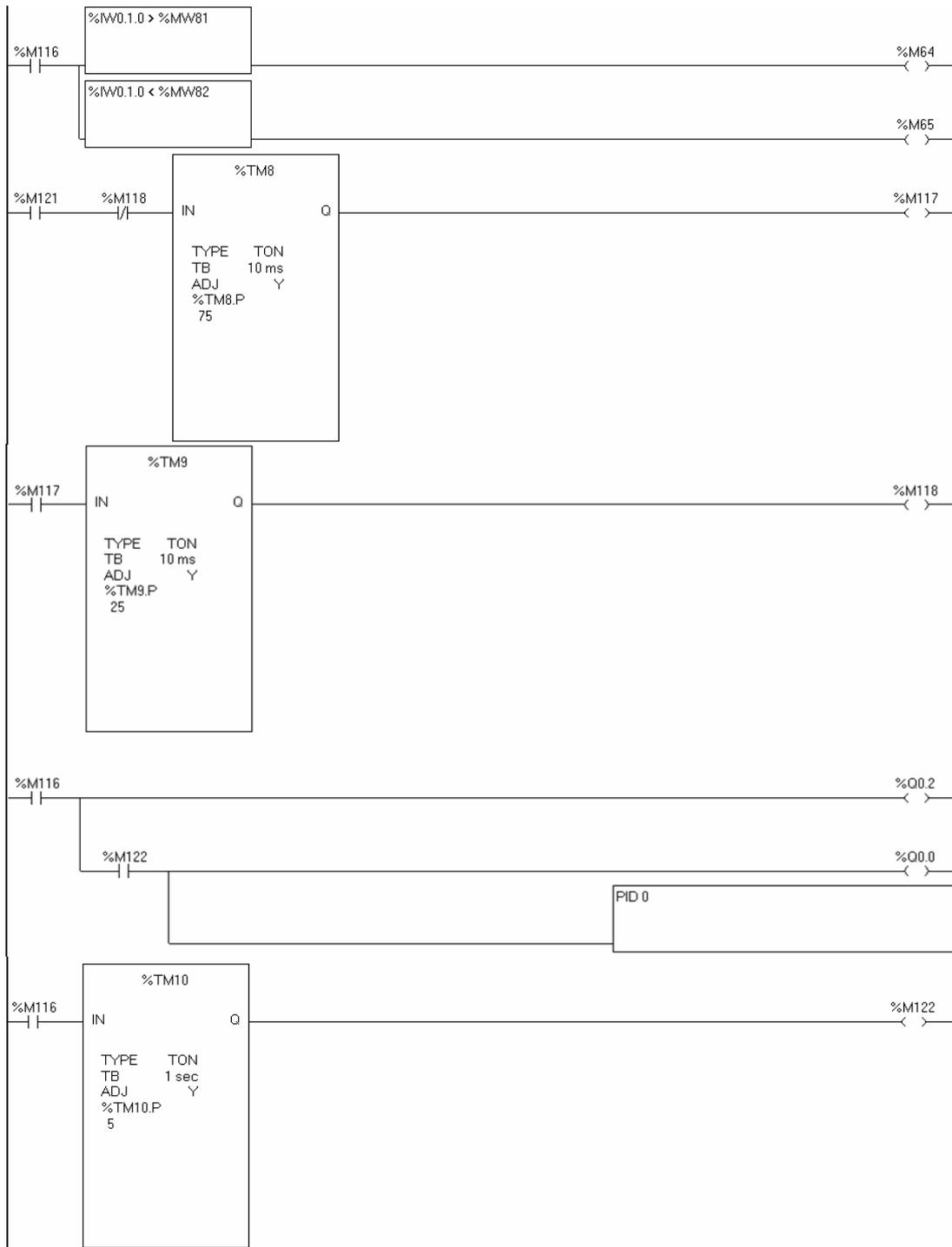






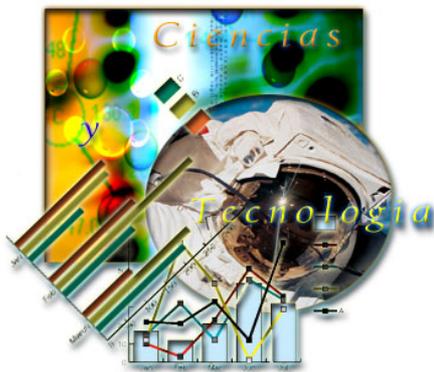






GABINETE DE CONTROL

MANUAL DE USUARIO



ESPE 2005

INDICE DE CONTENIDOS

1.	DESCRIPCIÓN GENERAL	3
2.	PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA.....	5
3.	ESTADOS DEL SISTEMA.....	6
4.	ALARMAS DEL SISTEMA.....	7

1. Descripción General

El gabinete de control, está destinado a que el operador pueda iniciar, detener, y conocer el estado del proceso en ejecución ya que cuenta con total autonomía sobre la interfaz de operador.

Es así que el gabinete dispone de las siguientes herramientas para cumplir con los objetivos antes mencionados; Figura 1.

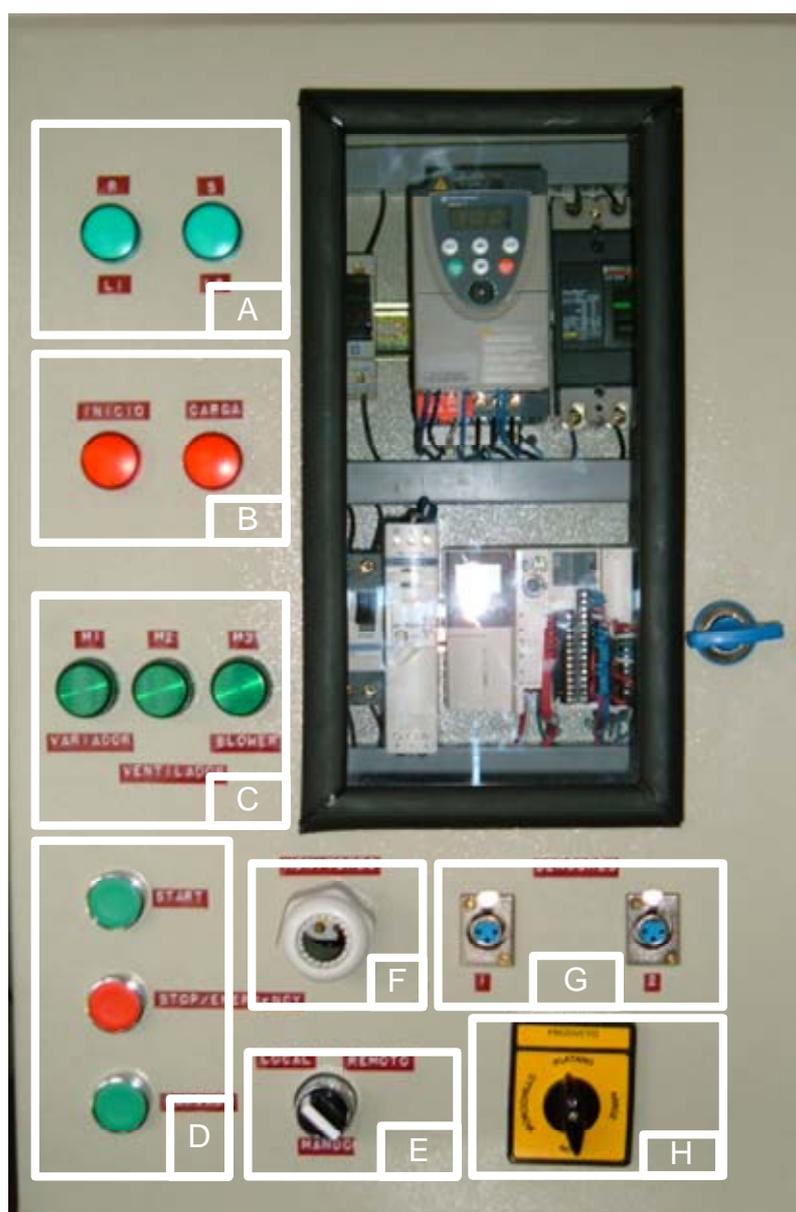


Figura 1 Componentes del Gabinete de control

A. Líneas de Alimentación.

Estas luces etiquetadas como L1 y L2, tienen la función de informar al operario, sobre el estado de las dos líneas de 110V que energizan al modulo de control; indicando un adecuado funcionamiento al estar encendidas.

B. Luces de estado.

Estas luces etiquetadas como INICIO y CARGA, tienen la función de informar al operario, sobre el estado en el que se encuentra el proceso; una descripción detallada de estos estados se da en punto 3, de este manual

C. Motores del Sistema.

Estas luces etiquetadas como M1, M2 y M3, tienen la función de informar al operario, sobre el estado en el que se encuentra los motores que gobiernan el proceso; indicando el estado de encendido cuando las luces se encuentran encendidas.

D. Pulsadores de Acción.

Estos pulsadores etiquetados como START, PARO y CARGA conforman las herramientas de acción sobre el sistema, mediante ellos se puede iniciar y detener el proceso de secado

E. Selector de control

Este el único elemento encargado de seleccionar el modo de operación del sistema (desde el gabinete o desde la interfaz de operador); es decir que para que el sistema pueda ser gobernado desde el gabinete el selector debe estar en la posición LOCAL.

F. Orificio de Comunicación.

El propósito de este orificio es exclusivamente el de permitir el acceso del cable de comunicación de la interfaz de operador al controlador del sistema (PLC).

G. Conexión de sensores.

Estos elementos constituyen la interfaz física de conexión de los sensores que provienen de las cámaras de combustión y secado de la máquina secadora (etiquetados 1 y 2 respectivamente).

H. Selector de Producto

Es el elemento encargado de seleccionar el producto que se va a procesar; así tenemos MOROCHILLO, MOTE, ARROZ Y PLATANO.

2. Puesta en Marcha del Sistema.

Una vez que todos los parámetros de operación ya se han establecido mediante la interfaz de operador y se ha comprobado su funcionamiento se deben seguir los siguientes pasos para iniciar el sistema.

- 1. Seleccionar el modo de operación del sistema en local mediante el selecto de control.*
- 2. Seleccionar el producto a procesarse mediante el selector de producto cuatro posiciones.*
- 3. Iniciar la combustión de la cascarilla o cualquiera que sea el combustible de manera manual en la cámara respectiva.*
- 4. Presionar el pulsador de START, indicando el inicio del secado.*
- 5. Esperar que el sistema ingrese en el estado de petición de carga de producto.*

6. *Cargar el producto en la cámara de secado*
7. *Presionar el pulsador de CARGA.*
8. *Esperar hasta que el sistema envíe señal de proceso finalizado.*
9. *Descargar producto.*

Nota: El incumplimiento de esta secuencia podría ocasionar que se imposibilite el arranque del sistema, o se lo haga de manera equivocada.

Una vez iniciado el proceso de secado, este puede ser únicamente detenido pulsando dos veces el pulsador/botón de paro indistintamente (desde la HMI o desde el gabinete); una vez realizado esto el proceso deberá iniciarse nuevamente.

3. Estados del sistema.

Los estados del sistema se encuentran definidos por tres variables del gabinete de control: las luces etiquetadas como INICIO y CARGA en la parte frontal y la sirena ubicada en la parte lateral derecha.

Los estados del sistema se detallan en la tabla 1:

ESTADO	GABINETE		
	INICIO	CARGA	SIRENA
OFF	OFF	OFF	OFF
INICIO	ON	OFF	OFF
CARGAR PRODUCTO	ON	PULSANTE	OFF
SECADO	ON	ON	OFF
ALARMA DE NIVEL	PULSANTES ALTERNADOS		PULSANTE
ALARMA ACTIVADA POR PARO	PULSANTES SECUENCIALES		PULSANTE
FIN DE SECADO	OFF	OFF	PULSANTE

Tabla 1 Estados del gabinete de control

Cuando el sistema ingresa al estado de alarma de nivel el proceso continua, pero con las señales enviadas constantemente mientras perdure las deficiencias en los rangos de temperatura.

Mientras que cuando el sistema ingresa al estado de alarma activada por paro, el proceso se detiene parcialmente y puede continuar si se presiona el pulsador de START, caso contrario mientras el sistema se encuentre en este estado corre el riesgo de que se extinga la combustión en la cámara por carencia de combustible.

Si realmente se desea finalizar el proceso se debe presionar por segunda vez el pulsador de paro.

4. Alarmas del Sistema

El sistema puede entrar en estado de alarma fruto de cualquiera de las siguientes dos condiciones:

- Alarmas por nivel de temperatura excesivamente alta o excesivamente baja en cualquiera de las dos cámaras del sistema (combustión - secado).
- Alarma por paro solicitado por el operador del proceso desde cualquiera de las dos alternativas de activación.

El operador debe familiarizarse con el comportamiento del gabinete cuando este ingrese al estado de alarma con el propósito de saber distinguir cual es la causa que la originó.

La sirena ofrece señales de frecuencia distintas para cada alarma, se recomienda la familiarización del operador con ellas para saber distinguirlas.

INTERFAZ DE OPERADOR

MANUAL DE USUARIO

MANUAL DE USUARIO



ESPE 2005

INDICE DE CONTENIDOS

1. Descripción del Sistema.....	3
2. Descripción de la Interfaz.....	3
3. Configuración del sistema.....	10
3.1 Puntos de Operación de los sistemas	10
3.1.1 Sistema de Combustión.....	10
3.1.2 Sistema de Secado	11
3.2 Parámetros de secado de los productos.....	11
4. Puesta en Marcha del Sistema.....	11
5. Estados del sistema.....	12
6. Alarmas del Sistema.....	13

1. Descripción del Sistema

El software HMI desarrollado permite controlar, supervisar y monitorear el sistema secador de productos agrícolas, Para cumplir con este objetivo el sistema cuenta con dos controladores.

El primero, denominado sistema de combustión el cual registrará la temperatura actual en la cámara de combustión y enviará aceleraciones o desaceleraciones por medio del variador de velocidad al motor de alimentación de combustible de manera que se tenga una combustión eficiente y la temperatura en el valor deseado y establecido por el supervisor del sistema.

El segundo, denominado sistema de secado el cual registrará la temperatura actual en la cámara asociada y enviará estados al ventilador (ON/OFF) de tal modo que se tenga un valor de temperatura acorde a valores establecidos por el supervisor del sistema y durante todo el tiempo de ejecución.

2. Descripción de la Interfaz

Al ejecutar el software HMI se despliega la pantalla inicial de la interfaz, ilustrada en la Figura 1, la cual está conformada de dos partes principales.



Figura 1 HMI - PRESENTACION.

A. Botón MENÚ: Al presionar este botón se despliega la pantalla de menú, aquella que contiene los botones de navegación para acceder a las demás pantallas de la interfaz; Figura 2.

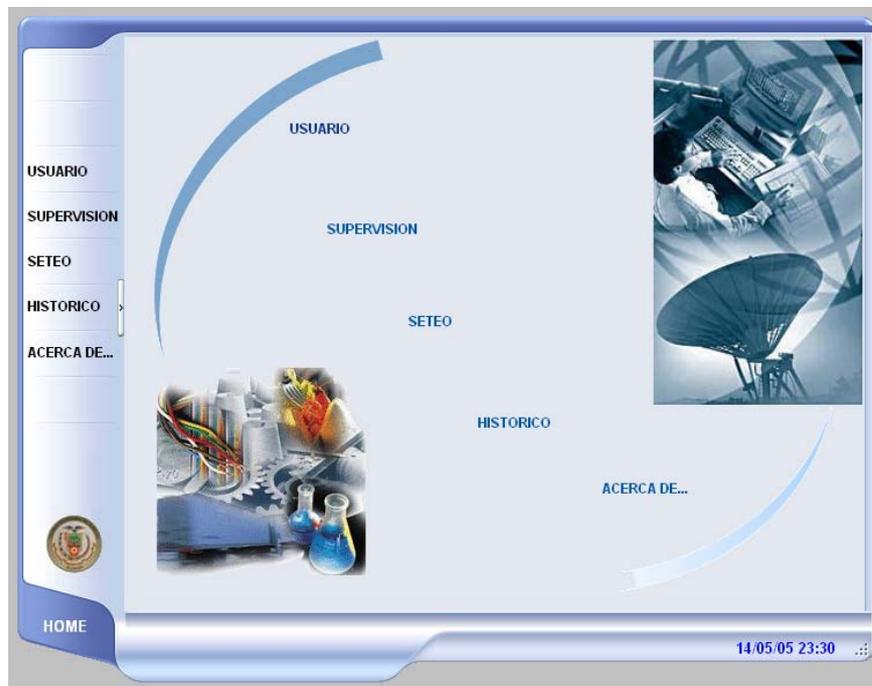


Figura 2 HMI - Menú de Navegación.

B. En esta zona se despliega la fecha y la hora del sistema.

③. Zona de despliegue de pantallas: En este sector se desplegarán todas las pantallas del sistema, descritas a continuación, mediante el uso del navegador mostrado al presionar el botón MENÚ.

a. Pantalla de Usuario: Esta pantalla se despliega al presionar el botón con la leyenda USUARIO, ubicado en el menú navegador. Esta se presenta a continuación en la Figura 3.

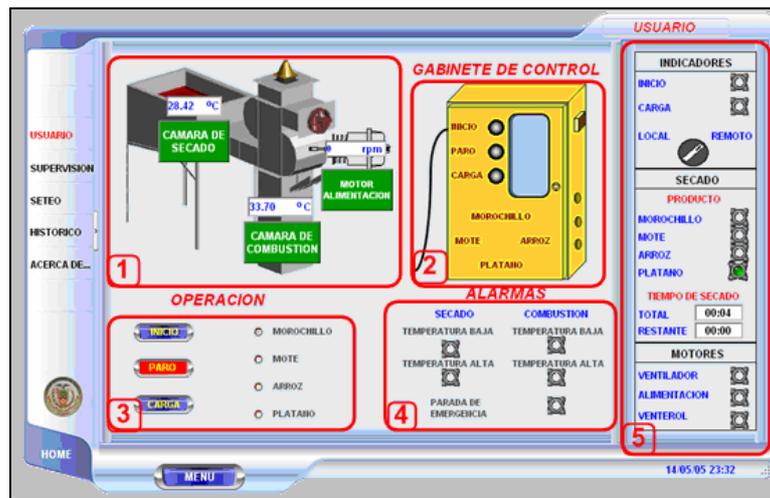


Figura 3 Área que conforma el área principal.

1. Variables físicas: En esta área se visualizan el valor de las variables físicas que intervienen en el proceso, así tenemos el valor de temperatura en la cámara de combustión, cámara de secado y la velocidad de alimentación de combustible a la cámara.
2. Estado del Gabinete Local: En esta área se visualiza el estado de las variables en el gabinete local, generalmente ubicado relativamente cerca del módulo secador, así tenemos, los estados de los pulsadores de START, PARO/EMERGENCIA y CARGA; además del producto seleccionado mediante el selector manual de producto.

3. **Control Remoto de Inicio:** Esta área contiene todas las herramientas necesarias para arrancar el sistema de manera remota, si el selector de mando se encuentra en mencionada posición. Así tenemos los botones remotos START, PARO, CARGA así como también el selector remoto de producto a procesarse.

4. **Alarmas del Sistema:** Esta área contiene el estado de todas las alarmas del sistema, entre las cuales tenemos: alarmas de nivel alto y bajo en los sistemas de combustión y secado, además del indicador de parada de emergencia realizada por medio del botón/pulsador asignado para este propósito.

5. **Monitoreo del sistema Iniciado:** En esta área se indican los parámetros bajo los cuales el sistema se encuentra operando, estos no cambiarán, indistintamente del modo de control o el estado de las variables de entrada, mientras el sistema no culmine su proceso ó sea detenido por paro de emergencia.

Así se muestran: el estado del proceso mediante las luces de INICIO/CARGA, el modo de control del proceso LOCAL/REMOTO, el producto que se encuentra en tratamiento (MOROCHILLO, MOTE, ARROZ, PLATANO), el tiempo total de secado y el tiempo restante y el estado de los motores que gobiernan el proceso (ALIMENTACION, VENTEROL Y VENTILADOR).

b. **Pantalla de Supervisión** Esta pantalla, presentada en la Figura 4. se despliega al presionar el botón con la leyenda SUPERVISION ubicado en el menú navegador del sistema.

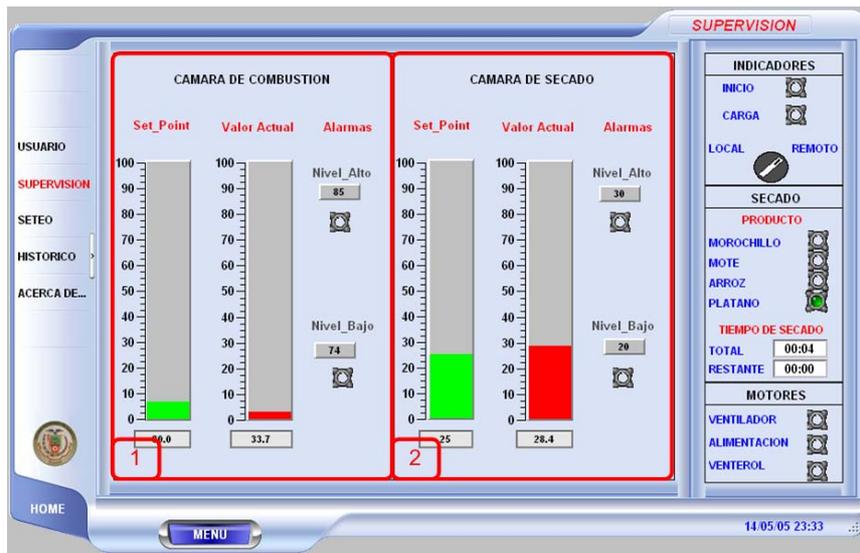


Figura 4 Área que conforma la pantalla de SUPERVISION

Esta pantalla permite distinguir dos módulos:

1. **Supervisión Sistema de Combustión:** En esta área se indican los parámetros bajo los cuales este sistema se encuentra operando, así tenemos: el valor de temperatura que debe tender en la cámara de combustión (SetPoint), el valor de temperatura actual en la cámara, y el valor de los niveles de alarma del sistema así como también su estado.
2. **Supervisión Sistema de Secado.** En esta área se indican los parámetros bajo los cuales este sistema se encuentra operando, así tenemos: el valor de temperatura que debe tender en la cámara de secado (SetPoint), el valor de temperatura actual en el lecho, y el valor de los niveles de alarma del sistema así como también su estado.

- c. **Pantalla de SETEO.** Esta pantalla, presentada en la Figura 5. se despliega al presionar el botón con la leyenda SETEO ubicado en el menú de navegador del sistema, su acceso es restringido.

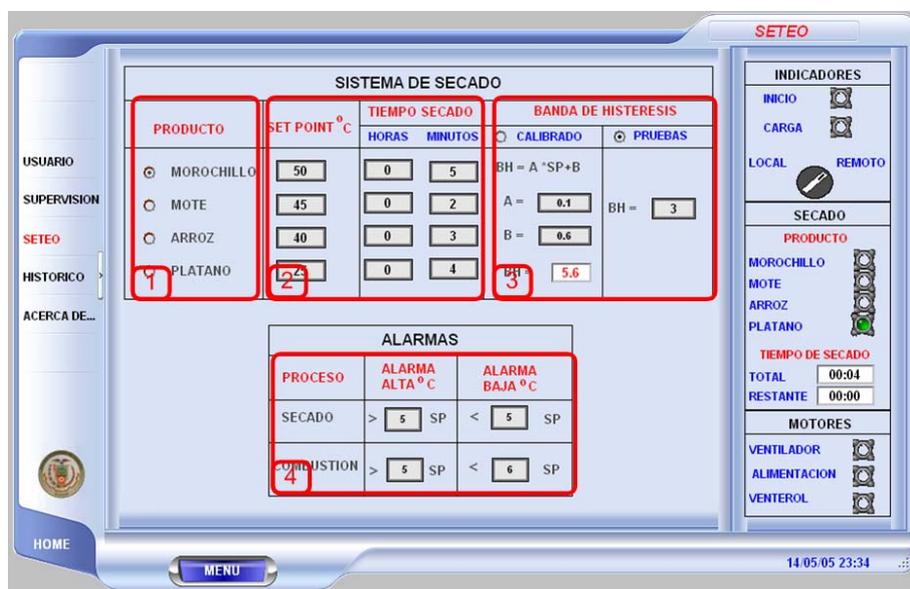


Figura 5 Área que conforma la pantalla de SETEO

Aquí se pueden distinguir cuatro módulos:

1. **Producto en Proceso.** En esta área se selecciona el producto a ser procesado.
2. **Parámetros de Secado** En esta área se establecen los parámetros físicos (temperatura y tiempo) a los cuales debe registrarse cada producto cuando este en procesamiento.
3. **Banda de Histéresis** Aquí se establece la metodología con la que operará el sistema de secado, dependiendo de los resultados obtenidos en el proceso de calibración del sistema, o de una posible expectativa de funcionamiento.
4. **Alarmas:** Aquí se establece los rangos de alarmas de ambos sistemas a partir de la temperatura que corresponde al proceso en ejecución, para el caso del sistema de secado, y a partir del

setpoint establecido en la pantalla de histórico para el sistema de combustión.

- d. **Pantalla de HISTORICO** Esta pantalla se despliega al presionar el botón con la leyenda HISTORICO, en el menú navegador, su acceso es restringido.

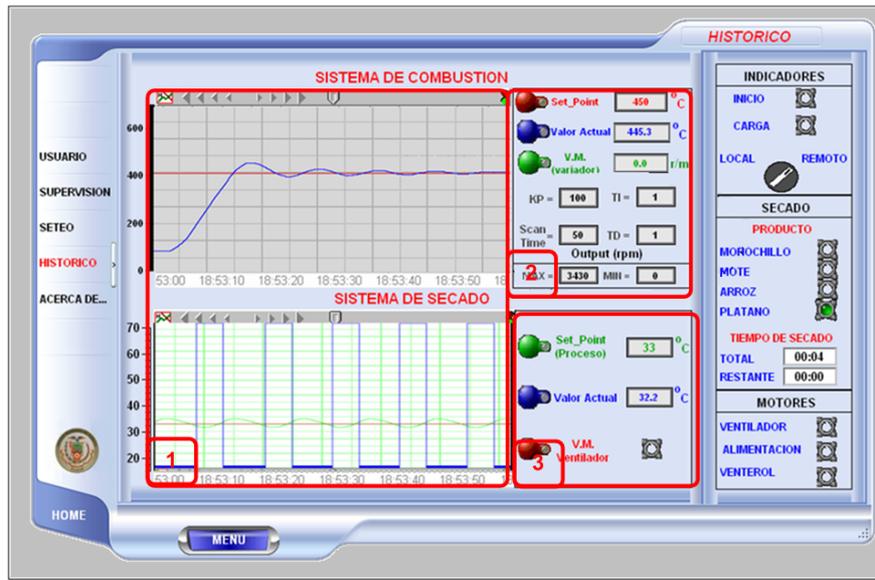


Figura 6 Área que conforma la Pantalla de HISTORICO

Aquí podemos distinguir tres módulos:

1. **Área de Gráficas:** En esta área se realiza la representación gráfica de las principales variables que intervienen el proceso de monitoreo, su función principal es la de ser una herramienta de análisis para calibración y/o estudio del comportamiento del mismo.
2. **Área de Configuración Sistema de Combustión,** En esta área se establecen los parámetros de funcionamiento del sistema de combustión, tales como su temperatura estándar de operación, los parámetros de sintonización y los límites de operación del motor de alimentación, así como también se dispone de

información adicional sobre el comportamiento de las variables manipulada y temperatura actual en la cámara asociada.

3. Área de Monitoreo Sistema de Secado, *En esta área se visualizan el comportamiento de las variables principales que intervienen en la técnica de control ON/OFF con histéresis, así tenemos el punto de operación del proceso en ejecución, el valor de la temperatura en la cámara de secado, y el comportamiento del actuador (ventilador).*

3. Configuración del sistema

En este apartado, se redactan todos los parámetros que en el sistema deben establecerse y especificarse previo a su operación.

3.1 Puntos de Operación de los sistemas

Se deben establecer todos los parámetros técnicos de operación de los lazos de control PID y ON/OFF con histéresis para los sistemas de combustión y secado respectivamente, con el fin de que su funcionamiento sea exitoso.

3.1.1 Sistema de Combustión

El sistema de combustión está basado en un control PID, al mismo que debe especificarse la siguiente información:

- Punto de temperatura de operación (setpoint) en la pantalla de Histórico del HMI sección 2.
- Establecer alarmas de nivel en la pantalla de SETEO sección 4-
- Para los parámetros restantes, se recomienda que sean establecidos por personas especializadas en la tarea de sintonización.

3.1.2 Sistema de Secado

Como se recuerda este sistema basa su funcionamiento en una lógica de control ON/OFF con histéresis, al mismo que se le debe especificar la siguiente información.

- Establecer la banda de histéresis del controlador y su modo de funcionamiento, se recomienda que esta calibración sea realizada por técnicos especializados en el proceso y en el sistema de control.
- Establecer alarmas de nivel en la pantalla de SETEO sección 4.

3.2 Parámetros de secado de los productos.

Se debe especificar mediante el uso de la pantalla de SETEO sección 2 las temperaturas estándar de secado y el tiempo de sometimiento a estas, para cada uno de los productos especificados en la misma pantalla sección 1.

4. Puesta en Marcha del Sistema.

Una vez que todos los parámetros de operación ya se han establecido y se ha comprobado su funcionamiento se deben seguir los siguientes pasos para iniciar el sistema.

- 1. Seleccionar el modo de operación del sistema en remoto mediante el selector ubicado en el gabinete de control.*
- 2. Seleccionar el producto a procesarse mediante los radiobuttons en la HMI – Pantalla de Usuario.*
- 3. Iniciar la combustión de la cascarilla o cualquiera que sea el combustible de manera manual en la cámara respectiva.*

4. *Presionar el botón de START del sistema, HMI – USUARIO sección 3.*
5. *Esperar que el sistema ingrese en el estado de petición de carga de producto.*
6. *Cargar el producto en la cámara de secado*
7. *Presionar el botón de carga de producto realizado, HMI – USUARIO sección 3.*
8. *Esperar hasta que el sistema envíe señal de proceso finalizado.*
9. *Descargar el producto del lecho se secado.*

Nota: El incumplimiento de esta secuencia podría ocasionar que se imposibilite el arranque del sistema, o se lo haga de manera equivocada.

Una vez iniciado el proceso de secado, este puede ser únicamente detenido pulsando dos veces el pulsador/botón de paro indistintamente. Una vez realizado esto el proceso deberá iniciarse nuevamente.

5. Estados del sistema.

Los estados del sistema se encuentran definidos por tres variables en la HMI de operador, etiquetadas como INICIO y CARGA en la sección 5 de la pantalla de USUARIO y una sirena que se visualizará, cuando esta se active, en la parte superior derecha del gabinete de la sección 2 de la misma pantalla.

Los estados del sistema se detallan en la siguiente tabla:

ESTADO	Interfaz de Operador		
	INICIO	CARGA	SIRENA
OFF	OFF	OFF	OFF
INICIO	ON	OFF	OFF
CARGAR PRODUCTO	ON	PULSANTE	OFF
SECADO	ON	ON	OFF
ALARMA DE NIVEL	PULSANTES ALTERNADOS		PULSANTE
ALARMA ACTIVADA POR PARO	PULSANTES SECUENCIALES		PULSANTE
FIN DE SECADO	OFF	OFF	PULSANTE

Cuando el sistema ingresa al estado de alarma de nivel el proceso continua, pero con las señales enviadas constantemente mientras perdure las deficiencias en los rangos de temperatura.

Mientras que cuando el sistema ingresa al estado de alarma activada por paro, el proceso se detiene parcialmente y puede continuar si se presiona el botón de START, caso contrario mientras el sistema se encuentre en este estado corre el riesgo de que se extinga la combustión en la cámara, por carencia de combustible.

Si realmente se desea finalizar el proceso se debe presionar por segunda vez el botón de paro.

6. Alarmas del Sistema

El sistema puede entrar en estado de alarma fruto de cualquiera de las siguientes dos condiciones:

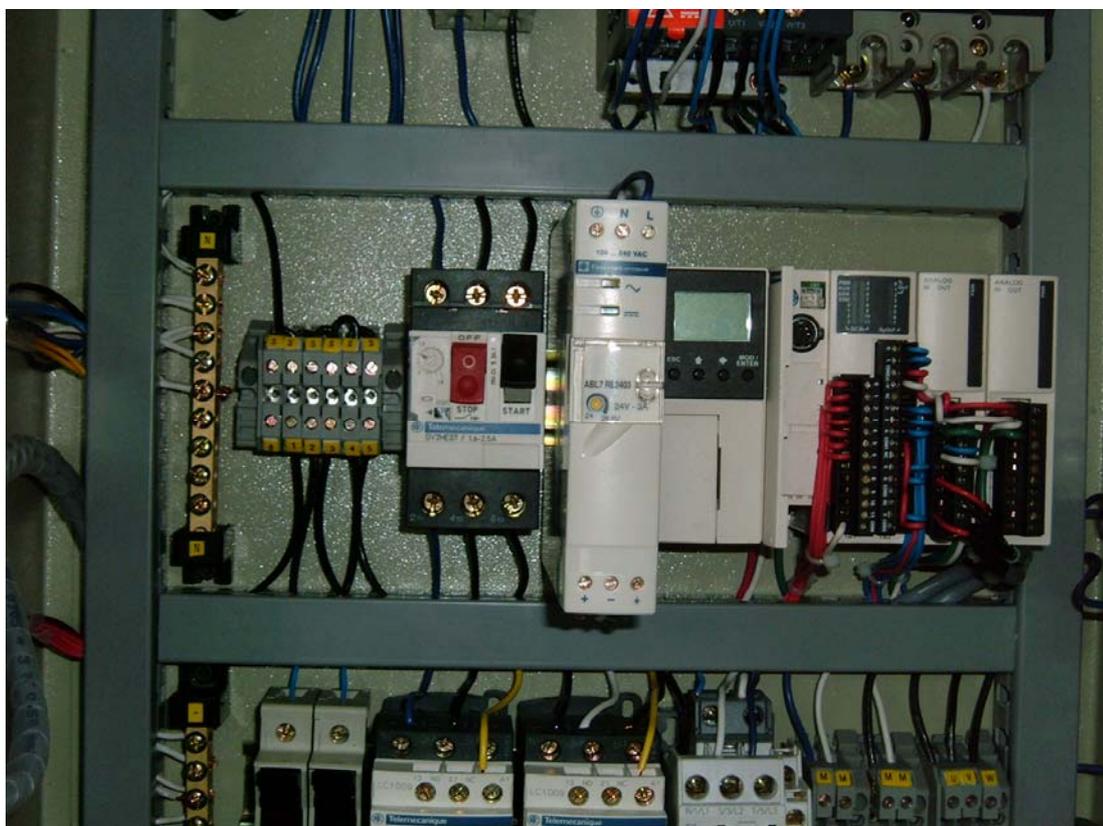
- Alarmas por nivel de temperatura excesivamente alta o excesivamente baja en cualquiera de las dos cámaras del sistema (combustión - secado).
- Alarma por paro solicitado por el operador del proceso desde cualquiera de las dos alternativas de activación.

El operador debe familiarizarse con el comportamiento del sistema y de la HMI cuando este ingrese al estado de alarma con el propósito de saber distinguir cual es la causa que la originó.

ANEXO 8: REGISTRO FOTOGRÁFICO



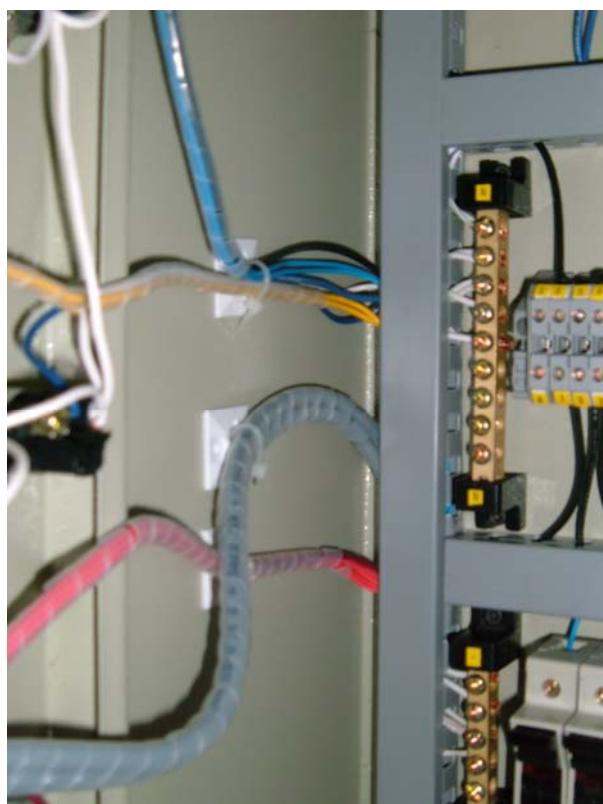
Fotografía 1 Conexiones del PLC



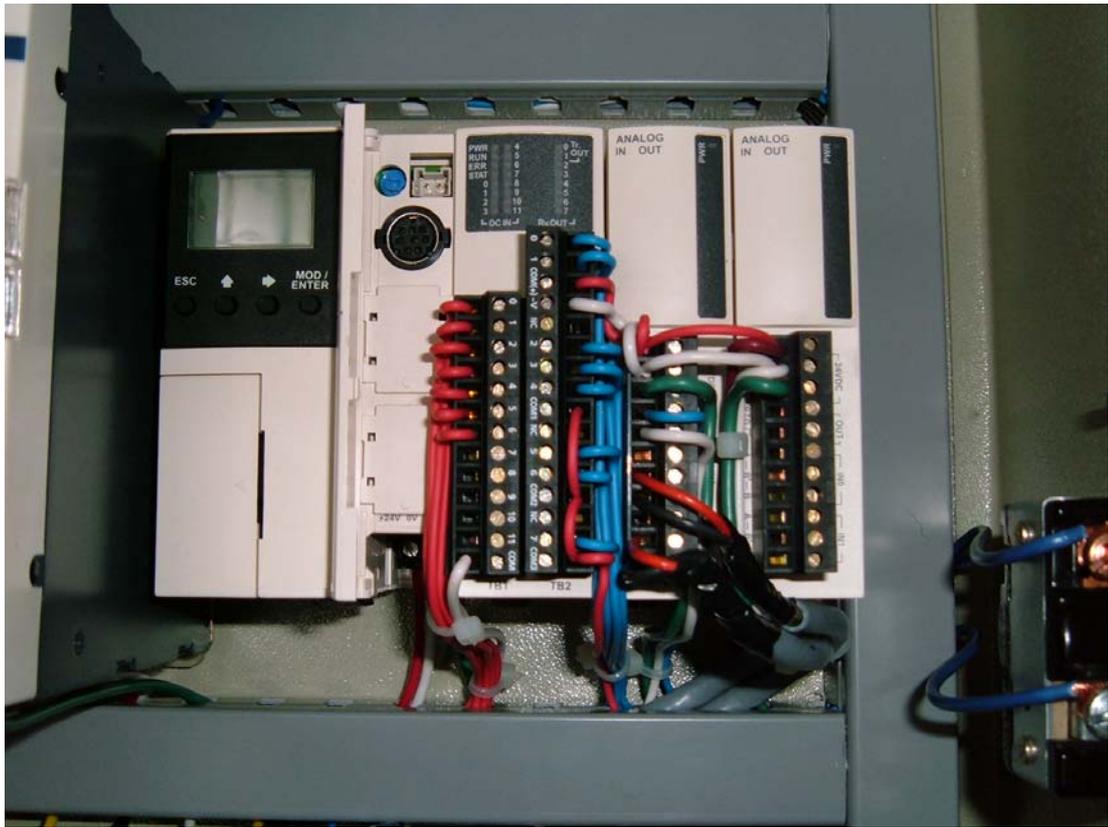
Fotografía 2 Conexiones área del Controlador



Fotografía 3 Conexiones preliminares del gabinete a la puerta del mismo.



Fotografía 4 Sujeción de cables con bases adhesivas, amarras y cintas envolventes.



Fotografía 5 Conexión final del controlador lógico programable PLC.



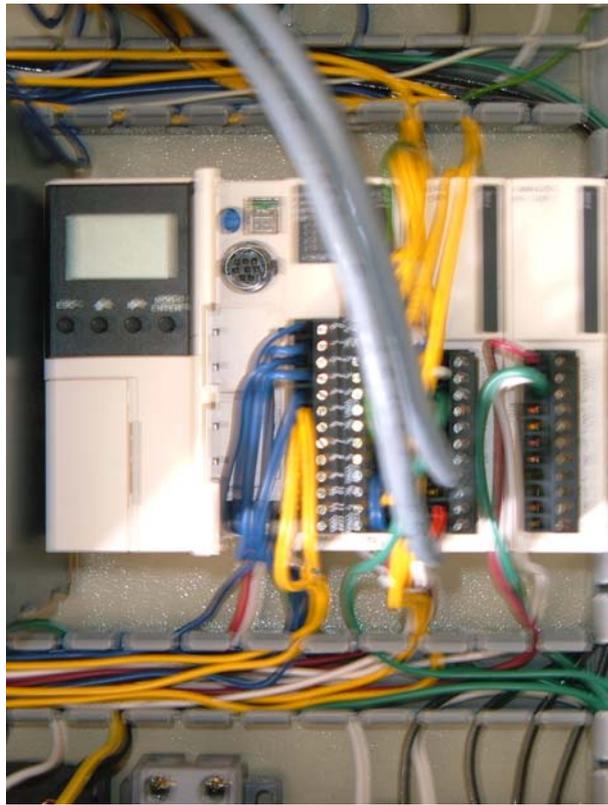
Fotografía 6 Una primera aproximación del gabinete de control terminado.



Fotografía 7 Gabinete de control, vista lateral



Fotografía 8 Vista de alambrado total; primera aproximación.



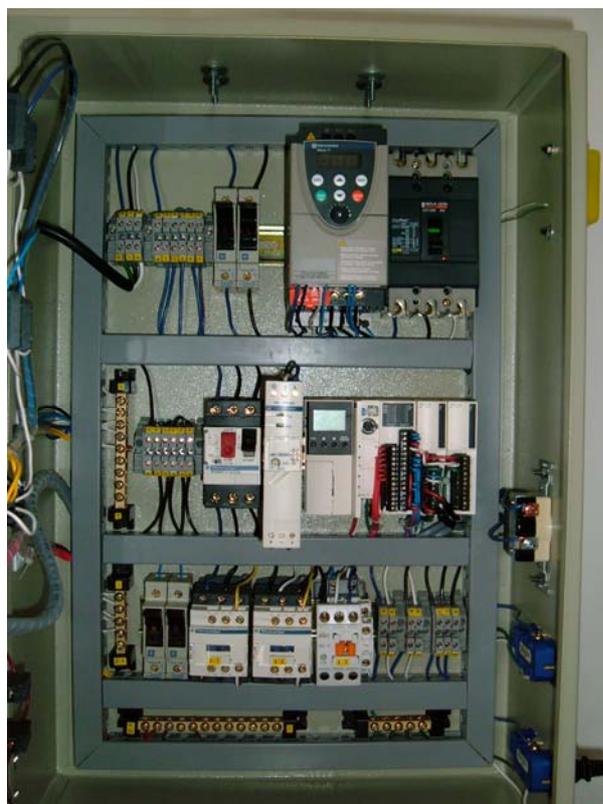
Fotografía 9 Ejemplo de una conexión desorganizada sobre el PLC.



Fotografía 10 Gabinete de control terminado. Vista frontal



Fotografía 11 Gabinete de control terminado. Vista de conectores laterales.



Fotografía 12 Vista de conexiones interiores terminado.



Fotografía 13 Cableado de la puerta final.



Fotografía 14 Máquina secadora de productos agrícolas. Prototipo. Vista frontal.



Fotografía 15 Máquina secadora de productos agrícolas. Prototipo. Vista lateral.



Fotografía 16 Máquina secadora de productos agrícolas. Prototipo. Chimenea de combustión.