

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

PROYECTO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO EN INGENIERÍA

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN HORNO
AUTOMÁTICO DE SECADO Y ENVEJECIDO DE
ARROZ PARA LA PROCESADORA DE PROYELEC
INGENIERÍAS. FASE I.

AUTOR:

SR. JUAN FERNANDO AGUIRRE CUEVA

SANGOLQUÍ-ECUADOR

2011

CERTIFICACIÓN

Certificamos que la presente Tesis de Grado, " DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN HORNO AUTOMÁTICO DE SECADO Y ENVEJECIDO DE ARROZ PARA LA PROCESADORA DE PROYELEC INGENIERÍAS. FASE I." fue realizada en su totalidad por el señor Juan Fernando Aguirre Cueva bajo nuestra dirección, como requerimiento parcial a la obtención del título de Ingeniero Electrónico con especialidad en Automatización y Control.

Ing. Paúl Ayala T.
DIRECTOR

Ing. Diego Morillo S.
CODIRECTOR

AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a Dios por cada día de vida que me ha brindado para poder para culminar mis estudios superiores.

A mis padres los cuales me brindaron el apoyo no solo económico, sino emocional en los momentos que más los necesitaba. Ellos han sido un pilar fundamental en mi formación profesional. Agradezco a mis hermanos Nathalí y Sebastián porque me han brindado todo su amor y gracias a ello he podido salir adelante de todos los obstáculos que encontré en mi carrera académica y en mi vida.

A mi novia Diana Ortiz por todas sus palabras de aliento y su amor. A mis amigos, especialmente a Julio el cual siempre fue un modelo a seguir por su perseverancia, constancia, dedicación y demás virtudes que fueron inculcadas en mi persona para salir adelante y superarme tanto académicamente y en mi forma de ser.

Al personal docente, que supo capacitarme y guiarme a través de mi formación académica, siempre con dedicación y certeza a la hora de satisfacer mis inquietudes. A mi director y codirector de tesis que con sus conocimientos me guiaron para la realización de este proyecto y por su don de gente.

Finalmente agradezco a la empresa PROYELEC INGENIERÍAS que me proporcionó el auspicio para la realización del proyecto.

DEDICATORIA

Dedico esta obra a mis padres Juan y Marlene por todo el apoyo que me han brindado en todas las decisiones que he tomado a lo largo de mi vida, y me han motivado y ayudado a superar todas las pruebas que se me han presentado.

Además han sido las personas que siempre desean lo mejor para mi vida y nunca me desearían nada malo.

Han sido un apoyo fundamental en cada paso que he dado en mi vida.

Juan Fernando Aguirre Cueva

PRÓLOGO

El presente proyecto de titulación abarca el diseño y el análisis de los componentes de la automatización de un horno para el secado y envejecido de arroz.

El arroz es uno de los principales componentes en la dieta de todos los ecuatorianos, ya que está al alcance de casi todos, es rico nutricionalmente, y se lo consume en todas las regiones del país; pero el consumo de este producto es diferente entre la Sierra y la Costa, por lo que en la Costa se consumen arroces frescos y en la Sierra arroces envejecidos.

Este arroz debe ser secado bajo ciertas condiciones que al mismo tiempo que reduce su humedad, transforma sus cadenas moleculares que mejoran notablemente su gusto al ingerirse.

Este proyecto se realizará por las siguientes razones:

Existe una gran demanda de arroz en la región Sierra por lo que se puede ingresar al mercado con poca competencia y ofertando un producto de gran calidad.

Al ser una procesadora automática se minimiza el error humano el cual afecta la calidad final del producto. Así mismo se puede procesar mayor cantidad de arroz en menor tiempo y con mayor calidad y limpieza.

La Procesadora de Proyelec Ingenierías quiere producir arroz de gran calidad en el menor tiempo posible para poder competir con los grandes industriales que comercializan arroz envejecido en la Sierra ecuatoriana.

El presente trabajo está organizado de la siguiente manera:

En el primer capítulo se da una breve introducción de los procesos de secado y envejecido. Además se describe la materia prima a ser utilizada.

En el segundo capítulo se resumen los términos y conceptos utilizados en la agricultura, así como variedades, tipos de arroz y zonas arroceras existentes en el Ecuador.

En el tercer capítulo se realiza el estudio del proceso de secado y envejecido de forma natural y de forma artificial.

En el cuarto capítulo se realiza una detallada descripción del proceso, desde que el arroz llegue a la procesadora hasta que salga para ser vendido.

En el quinto capítulo se detallan todas las partes que conforman el horno industrial, así como los materiales que los constituyen.

En el sexto capítulo se detallan los elementos de medición, elementos finales de control y características físicas de todos los elementos que se necesitan en el proceso.

En el séptimo capítulo se realiza la identificación de los parámetros de la planta, además se realiza el análisis para determinar el tipo de control a realizar.

En el octavo capítulo se detallan las especificaciones técnicas de los elementos requeridos para el proceso, además se detalla la cantidad de elementos

que se requieren y se realizan diagramas de ubicación de elementos tanto en el interior como en el exterior del armario de control.

En el noveno capítulo se describe la navegabilidad de la HMI, así como se detallan los elementos que debería tener cada pantalla.

El décimo capítulo recopila las gráficas obtenidas de las simulaciones, tanto del control on/off de humedad como del PID de temperatura.

En el décimo primer capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones del presente trabajo de titulación.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1.

INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES	2
1.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO	2
1.3 ARQUITECTURA BÁSICA DEL SISTEMA DE CONTROL	3
1.4 FUNCIONAMIENTO DE LOS PROCESOS.....	4

CAPÍTULO 2.

FUNDAMENTOS	7
2.1 ESTUDIO AGRONÓMICO	7
2.1.1 Introducción.....	7
2.1.2 Definición.....	7
2.1.3 Origen.....	8
2.1.4 Cultivo	9
2.1.5 Recolección	9
2.1.6 Variedades	10
2.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN LOS PROCESOS DE POSTCOSECHA DE GRANOS.....	11
2.2.1 Condiciones climáticas durante el periodo de madurez	11
2.2.2 Grado de madurez fisiológica.....	12
2.2.3 Daños mecánicos	13
2.2.4 Contenido de impurezas	13
2.2.5 Humedad.....	13
2.2.6 Temperatura.....	14
2.2.7 Microorganismos	15
2.2.8 Calidad del arroz.....	15
2.2.8.1 Muestreo.....	15
2.2.8.2 Humedad del grano	16
2.2.8.3 Impurezas.....	17
2.3 EL ARROZ EN EL ECUADOR	18

2.4 TIPOS DE ARROZ EN EL ECUADOR	23
2.4.1 Producción.....	24
2.4.2 Recolección	25
2.4.3 Secado.....	26
2.4.4 Tratamiento	26
2.4.5 Envejecido.....	27_Toc304280784
2.5 CONSUMO DE ARROZ EN PROVINCIAS DE LA SIERRA	29
2.5.1 Variedades de arroz de consumo en la Sierra	30

CAPÍTULO 3.

_Toc304280788

PROCESO DE SECADO Y ENVEJECIDO	31
3.1 SECADO DE ARROZ	31
3.1.1. Cuando secar	31
3.1.2. Métodos de secado.....	31
3.1.2.1. Secado natural.....	32
3.1.2.2. Secado artificial.....	32
3.1.2.2.1. Secado artificial con aire natural	33_Toc304280796
3.1.2.2.2. Secado artificial con aire caliente.....	33_Toc304280798
3.2. ENVEJECIMIENTO DE ARROZ	35
3.2.1. Efectos del envejecimiento de arroz.....	35
3.2.2. Envejecimiento controlado.....	35
3.2.3. Envejecimiento descontrolado.....	35
3.2.4. Envejecimiento natural	36
3.2.5. Envejecimiento artificial	36

CAPÍTULO 4.

TÉCNICOS	37
4.1 ANÁLISIS DE LA MATERIA PRIMA	37_Toc304280807
4.1.1. Humedad e impurezas	38
4.1.2. Manipulación del grano	38
4.1.3. Bodega de almacenamiento.....	39
4.2. CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO DE SECADO	39
4.2.1. Temperatura de secado.....	40

4.2.2.	Tiempo de secado	40
4.2.3.	Perdida de humedad del grano	43
4.2.4.	Peso de grano seco obtenido	43
4.2.5.	Flujo de aire de secado.....	44
4.2.6.	Presión estática	46
4.2.7.	Consumo de combustible.....	49
4.2.8.	Enfriamiento	49
4.3.	CARACTERISTICAS DEL PROCESO DE ENVEJECIDO	49
4.3.1.	Temperatura de envejecido	49
4.3.2.	Tiempo de envejecido	49
4.3.3.	Enfriamiento	50
4.4.	ENVASE DEL PRODUCTO.....	50

CAPÍTULO 5.

	DESCRIPCIÓN DEL HORNO INDUSTRIAL	51
5.1	DEFINICIONES.....	51
5.1.1	Tipos de hornos.....	51
5.1.2	Detalle del horno utilizado en el sistema de control	52
5.2	FUNCIONAMIENTO	54
5.3	ESPECIFICACIONES.....	54

CAPÍTULO 6.

	INSTRUMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL	59
6.1	ESTRATEGIAS Y PARÁMETROS PARA EL CONTROL AUTOMÁTICO	62
6.2	SENSORES Y TRANSMISORES.....	65
6.2.1	Sensores y transmisores de temperatura	65
6.2.1.1	Características y definiciones	66
6.2.1.2	Funcionamiento.....	66
6.2.1.2.1	Instrumentos de medición directa.....	66
6.2.1.3	Ubicación	72
6.2.2	Sensores y transmisores de humedad.....	73
6.2.2.1	Características y definiciones	74
6.2.2.2	Funcionamiento.....	74

6.2.2.2.1	Sensores de humedad en gases y aire	74
6.2.2.2.2	Sensores de humedad en sólidos	76
6.2.2.3	Ubicación	77
6.2.3	Transmisor de humedad absoluta y de temperatura	77
6.3	ELEMENTOS FINALES DE CONTROL	78
6.3.1	Válvulas de control	78
6.3.1.1	Características.....	79
6.3.1.2	Funcionamiento.....	80
6.3.2	Ventilador de velocidad variable.....	84
6.3.2.1	Características.....	84
6.3.2.2	Funcionamiento.....	85
6.3.3	Motor eléctrico	86
6.3.4	Quemadores	88
6.3.5	Variador de frecuencia.....	92
6.3.5.1	Características.....	92
6.3.5.2	Funcionamiento.....	93
6.3.5.3	Descripción del VFD.....	94
6.3.6	Motor de corriente continua con caja reductora	95
6.3.6.1	Componentes.....	96
6.3.6.2	Funcionamiento.....	96
6.3.6.3	Caja reductora	97

CAPÍTULO 7.

	DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL	98
7.1	CARACTERIZACION DEL PROCESO	99
7.1.1	Selección de la acción del controlador.....	99
7.1.2	Variaciones	100
7.1.3	Características del proceso y controlabilidad	101
7.1.4	Variable	102
7.1.5	Modelamiento matemático.....	103
7.2	MÉTODOS PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE CONTROL	109
7.2.1	Sistemas de control por retroalimentación.....	111
7.2.1.1	Control de encendido/apagado o control on/off	113
7.2.1.2	Controlador proporcional (P).....	115

7.2.1.3	Controlador integral (I)	116
7.2.1.4	Control derivativo (D)	117
7.2.1.5	Control proporcional-integral (PI)	118
7.2.1.6	Controlador proporcional-derivativo (PD)	119
7.2.1.7	Controlador proporcional integral derivativo (PID)	120
7.3	DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DE HUMEDAD Y TEMPERATURA DEL PROCESO	121
7.3.1	Diseño del sistema de control de humedad del grano	121
7.3.1.1	Consideraciones de diseño	121
7.3.2	Diseño del sistema de control de temperatura del horno	122
7.3.2.1	Consideraciones de diseño	122

CAPÍTULO 8.

	REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA	128
8.1	REQUERIMIENTOS GENERALES	128
8.2	REQUERIMIENTOS ESPECÍFICOS	129
8.2.1	Controlador lógico programable	129
8.2.1.1	Factores cuantitativos	130
8.2.1.2	Factores cualitativos	131
8.2.1.3	Especificaciones técnicas	132
8.2.2	Sensor de temperatura	134
8.2.3	Sensor de humedad	135
8.2.4	Válvula de paso de gas	136
8.2.5	Módulo controlador de encendido	137
8.2.6	Ventilador centrífugo	137
8.2.7	Motor monofásico 220V	138
8.2.8	Motor DC con caja reductora	138
8.2.9	Variador de frecuencia	139
8.2.10	Driver para el manejo de motores DC	140
8.2.11	Relés	140
8.2.12	Contactador	141
8.2.13	Fusibles	142
8.2.14	Relé termomagnético	144
8.2.15	Fuente de voltaje de 24VCC	144

8.2.16	Luces piloto.....	145
8.2.17	Pulsadores.....	146
8.2.18	Interruptor.....	147
8.2.19	Baliza.....	147
8.2.20	Borneras.....	148
8.2.21	Cable.....	148
8.2.22	Armario.....	149
8.3	ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES.....	149
8.4	DISTRIBUCIÓN DE LOS ELEMENTOS.....	151
8.5	UBICACIÓN DE LOS ELEMENTOS.....	152
8.6	CONEXIÓN DE LOS ELEMENTOS.....	154

CAPÍTULO 9.

	ESQUEMA DE LA INTERFACE HMI.....	158
9.1	FILOSOFÍA DE CONTROL.....	158
9.2	DESCRIPCIÓN DE LA INTERFACE.....	161
9.3	DESCRIPCIÓN DE LAS VENTANAS.....	162

CAPÍTULO 10.

	SIMULACIONES.....	173
10.1	SIMULACIÓN DEL CONTROLADOR ON-OFF.....	173
10.2	SIMULACIÓN DEL CONTROLADOR PID.....	174

CAPÍTULO 11.

	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	176
11.1	CONCLUSIONES.....	176
11.2	RECOMENDACIONES.....	177

	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	179
--	---------------------------------	-----

	ÍNDICE DE FIGURAS.....	¡Error! Marcador no definido.
--	------------------------	-------------------------------

	ÍNDICE DE TABLAS.....	¡Error! Marcador no definido.
--	-----------------------	-------------------------------

	GLOSARIO.....	¡Error! Marcador no definido.
--	---------------	-------------------------------

	ANEXOS.....	¡Error! Marcador no definido.
--	-------------	-------------------------------

ANEXO 1. SEMILLAS TECNIFICADAS INIAP

ANEXO 2. CURVA DE ENVEJECIDO DE ARROZ

ANEXO 3. REGISTRO DE HUMEDADES PROMEDIO EN EL SECADO DE ARROZ

**ANEXO 4. TABLA DE TEMPERATURA VS VOLTAJE DE LA TERMOCUPLA TIPO
K**

ANEXO 5. CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO DE LA TERMOCUPLA

**ANEXO 6. DATOS DE HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE TOMADOS EN EL
HORNO CON EL HIGRÓMETRO RESISTIVO**

ANEXO 7. CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO DEL HIGRÓMETRO RESISTIVO

**ANEXO 8. DIAGRAMA ELÉCTRICO DEL DRIVER PARA EL MANEJO DE
MOTORES DC**

ANEXO 9. FUNCION DE TRANSFERENCIA DE LA PLANTA

ANEXO 10. DIAGRAMA ELÉCTRICO DEL PANEL DE CONTROL

ANEXO 11. DIAGRAMA DEL CONTROL ON/OFF DE HUMEDAD EN SIMULINK

ANEXO 12. DIAGRAMA DEL CONTROL PID DE TEMPERATURA EN SIMULINK

**ANEXO 13. PROGRAMA PARA CALCULAR LAS CONSTANTES DEL
CONTROLADOR PID**

ANEXO 14. DIAGRAMA DE CARCAS

ANEXO 15. DIAGRAMA P&ID

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Los procesos de secado y envejecido de arroz son muy antiguos, antes se los realizaba de forma natural en tendales y al aire libre. Actualmente se utilizan hornos para realizar estos procesos de forma mucho más rápida, eficaz e higiénica.

Con estos procesos se consigue que el grano tenga una humedad final de 10%RH, con la cual no se permite el desarrollo de hongos, se previenen las reacciones de descomposición expresada en la respiración de los granos y de esta manera se garantiza la inocuidad y valor nutritivo de los mismos.

Sin importar el método de control que se utilice, lo que se busca es garantizar la temperatura en el interior del horno dependiendo del proceso que se realice, secado 50 °C y envejecido 120 °C, además se debe garantizar que cuando el grano alcance la humedad óptima 10% RH el proceso se detenga.

El horno en cuestión es un horno cerrado, en esta arquitectura, la masa de aire caliente nace en la base del horno, sube por las paredes laterales hasta llegar a la parte superior. Una vez aquí el aire pasa por el ducto de realimentación, parte del aire caliente sale hacia el ambiente por las compuertas y otra parte del aire ingresa nuevamente al horno reiniciando el ciclo.

1.1 ANTECEDENTES

Inicialmente Proyelec Ingenierías compraba el arroz listo para la venta. Pero observando los beneficios y la gran demanda del arroz en la Sierra decidieron realizar todo el proceso de secado y envejecido en sus instalaciones.

1.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

Existen dos procesos que nos permiten obtener el grano con la humedad óptima y listo para su consumo:

Proceso de secado. Se lo realiza a una temperatura de 50 °C, este proceso tarda más tiempo que el proceso de envejecido y se lo lleva a cabo cuando el arroz tiene un grado de humedad entre 22 y 20%RH. Este proceso termina cuando el grano tiene un grado de humedad de 10%RH

Proceso de envejecido. Este proceso se lo realiza a una temperatura de 120 °C, y se lo puede llevar a cabo siempre y cuando el arroz tenga un grado de humedad entre 14 y 16%RH. Este proceso termina cuando el grano tiene un grado de humedad de 10%RH.

Cabe resaltar que si se empieza con el proceso de secado se puede pasar al proceso de envejecido inmediatamente, siempre y cuando la humedad del grano este entre 14 y 16%RH y se terminará el proceso cuando el grano alcance una humedad de 10%RH.

En la Tabla 1.1 se muestra las características de cada proceso y del proceso combinado.

Tabla 1.1. Características de los procesos

Proceso	Temperatura del proceso	Duración del proceso	Humedad óptima de entrada del grano	Humedad requerida del grano
Secado	50 °C	Alto	22-20%RH	10%RH
Envejecido	120 °C	Bajo	16-14%RH	10%RH
Combinado	Inicial 50 °C, posterior 120 °C	Medio	H. inicial 22-20%RH H. posterior 16%RH	10%RH

1.3 ARQUITECTURA BÁSICA DEL SISTEMA DE CONTROL

El PLC será el cerebro encargado de controlar el proceso. El PLC tendrá conectado a sus entradas analógicas:

- Sensor de temperatura
- Sensor de humedad

Las salidas del PLC estarán conectadas a los siguientes elementos:

- Electroválvula
- Electrodo
- Motores DC
- Motor bifásico con ventilador centrífugo

El controlador va a estar comunicado con un HMI que se encontrará en una computadora. Esta comunicación establece al controlador como MASTER, y a la pantalla como SLAVE. De esta manera, la pantalla va a ser capaz de mostrar los registros existentes en el controlador, valores tales como; setpoint de temperatura, humedad de entrada en los procesos y setpoint de humedad.

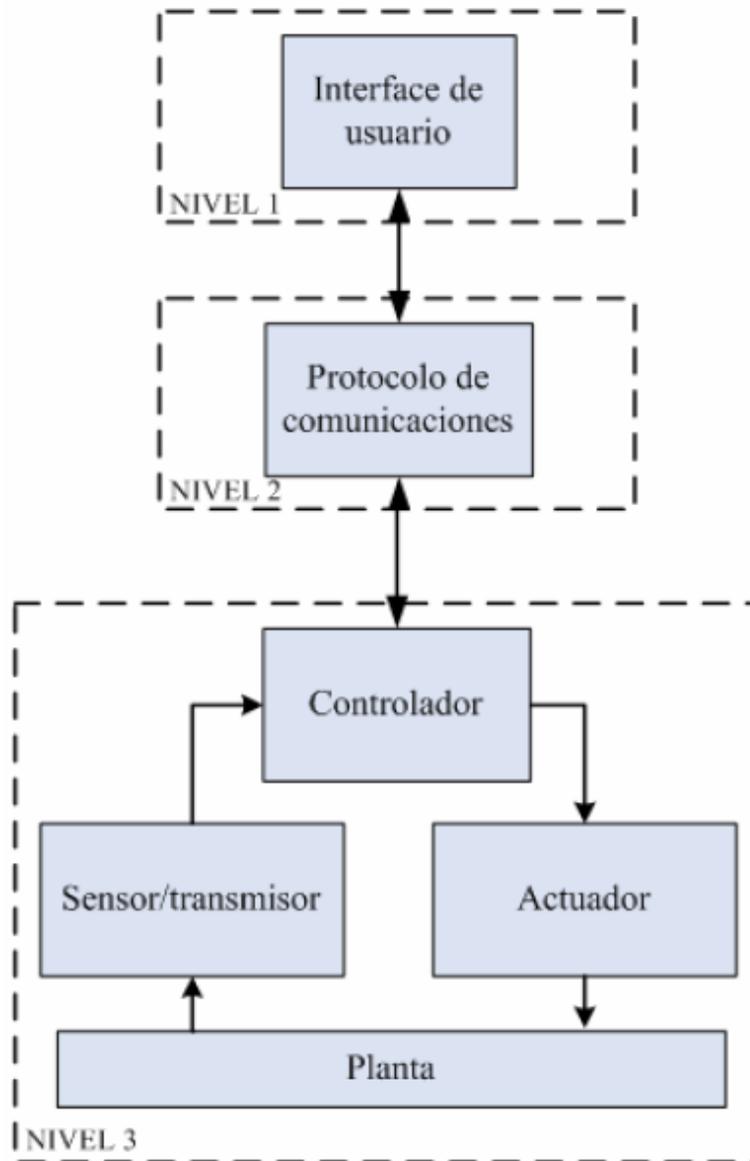


Figura 1.1. Arquitectura básica del sistema de control¹

1.4 FUNCIONAMIENTO DE LOS PROCESOS

Pueden existir 3 funcionamientos dependiendo del proceso seleccionado:

Secado. En el proceso de secado se realizan los siguientes pasos:

¹ C. Vallejo, "Diseño y Simulación del Sistema de Control y Monitoreo de Nivel y flujo de Agua para el Proceso de Perforación en la Fase de Exploración Minera del Proyecto IAMGOLD Quimsacocha", Pág. 130.

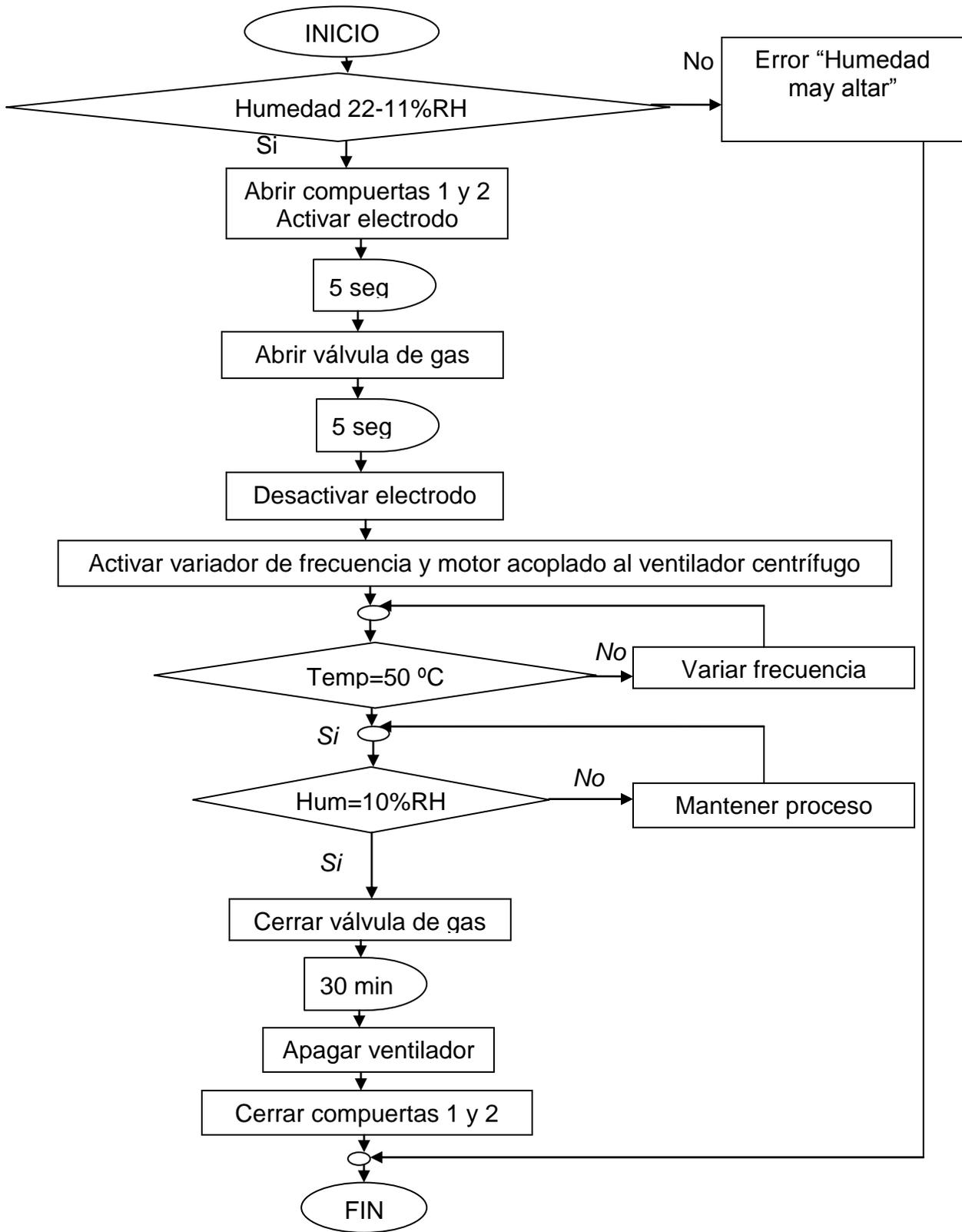


Figura 1.2. Diagrama de flujo del proceso de secado

Envejecido. En el proceso de envejecido solo cambia la humedad de entrada la cual debe estar entre 16-11%RH y la temperatura del proceso es 120 °C.

Combinado. En el proceso combinado primero se realiza el proceso de secado hasta conseguir una humedad de 16%RH y posteriormente se eleva la temperatura a 120 °C hasta conseguir un grano con 10%RH. Este proceso se realiza para tener un producto final en menor tiempo.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS

2.1 ESTUDIO AGRONÓMICO

2.1.1 Introducción

El arroz es un alimento que ha acompañado al hombre desde hace miles de años y que además hace parte de su dieta cotidiana. No solo por ser un cereal abundante sino también por su valor nutricional, su alto aporte calórico y sobre todo su economía.

El arroz es el cereal más importante para la alimentación humana, contribuye de forma muy efectiva al aporte calórico de la dieta. El arroz es responsable del aporte calórico de una quinta parte de las calorías consumidas en el mundo por los seres humanos.

2.1.2 Definición²

El arroz es el fruto en grano de la planta (*Oryza sativa*) que se muestra en la Figura 2.1. Su nutriente principal son los hidratos de carbono, aunque también aporta proteínas (7%), minerales y, en estado natural vitaminas. Se cultiva

² J. Barragán, "Diseño y construcción de un prototipo para el envejecimiento de arroz con capacidad 40Kg/día", Pág. 13.

ampliamente en los cinco continentes, en regiones pantanosas de clima templado o cálido y húmedo.



Figura 2.1. Planta de arroz (*Oryza sativa*)³

2.1.3 Origen

El cultivo de arroz comenzó hace 10.000 años en muchas regiones húmedas de Asia tropical y subtropical. El desarrollo del cultivo tuvo lugar en China, desde sus tierras bajas a sus tierras altas.

Su introducción en América Latina la hacen los portugueses en el Brasil en el año de 1685. El cultivo de arroz en términos de explotación es una actividad agrícola muy importante y conocida a nivel mundial; sin embargo, por ser un cultivo semiacuático tiene una particularidad en los sistemas de manejo que depende básicamente de la estación climática, disponibilidad de infraestructura de riego, tipo y clase de suelo, niveles de explotación y grados de tecnificación.

³ INIAP (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias del Ecuador)

2.1.4 Cultivo⁴

El arroz puede cultivarse de cuatro maneras diferentes:

- **Cultivos inundados.** Son aquellos que se realizan con la planta inmersa dentro del agua. Para ello necesitan tener alguna corriente de agua disponible o encontrarse en lugares con una pluviometría abundante. El terreno se divide en parcelas que quedan inundadas y donde se realiza la plantación generalmente a mano. El nivel de agua puede variar desde los 25cm a 5m, lo cual requerirá utilizar diferentes variedades.
- **Cultivos de arroz de aguas muy profundas.** Los cultivos de arroz que se dan en zonas muy profundas donde el agua puede alcanzar hasta los 5m. A diferencia del modelo anterior no existe parcelación del terreno ya que las continuas inundaciones lo impiden. La siembra se realiza con semillas esparcidas y las plantas presentan tallos muy alargados cuyas espigas suelen flotar por encima del agua.
- **Cultivos de regadío.** Se realizan mediante inundación o irrigación artificial de parcelas. La siembra se puede realizar a mano utilizando plantones o, lo más habitual, mediante semillas pre-germinadas que se esparcen a voleo o desde avionetas. Es el tipo de cultivo más productivo y el que ostenta la mayoría de la producción mundial al haber conseguido especies de poco porte pero con mucho grano.
- **Cultivos de secano.** Es aquel tipo de cultivo que se lleva a cabo en zonas no inundadas. Normalmente se realiza en valles fluviales cuando las aguas, después de las inundaciones se retiran. Es el tipo de cultivo menos productivo.

2.1.5 Recolección⁵

En cuanto a la recolección del arroz hemos de distinguir entre:

⁴ J. Barragán, " Diseño y construcción de un prototipo para el envejecimiento de arroz con capacidad 40Kg/día ", Pág. 19.

⁵ J. Barragán, " Diseño y construcción de un prototipo para el envejecimiento de arroz con capacidad 40Kg/día ", Pág. 22.

- **Recolección tradicional.** Es aquella que se lleva a cabo manualmente. Se comprueba la madurez del grano mordiéndolo y, si no se puede romper, es un indicio de que ya está maduro. Luego se corta la planta dentro de la parcela todavía inundada y se deja secar para su posterior tratamiento.
- **Recolección mecanizada.** Cuando se ha comprobado la madurez, se deja de inundar los campos y se recoge el grano con las cosechadoras.

2.1.6 Variedades⁶

Existen millares de variedades de arroz en todo el mundo, entre las más importantes mencionaremos las siguientes:

Según el tamaño del grano

- **Variedades de grano largo.** Notoriamente más alargadas que anchas (con una longitud superior a 6mm). Se cree que es la calidad superior del arroz.
- **Variedades de grano medio.** Son aquellos que no superan los 5mm de longitud. Son tipos de arroces muy pegajosos, con mucho almidón y que se deshacen muy fácilmente.
- **Variedades de grano corto.** Son variedades muy destacadas con mucha calidad y productividad.

Según el tipo del grano

- **Variedades integrales.** El arroz integral es aquel que no se le ha sometido al proceso de blanqueo, es decir que no se le ha quitado la cubierta externa o pericarpo del grano. Por lo tanto, presenta un color más oscuro consecuencia de los minerales que este posee. Es un arroz que requiere una cocción más larga aunque con una calidad alimentaria superior dado que la mayoría de los

⁶ D. Andrade, "Proyecto de envejecimiento artificial del arroz, para su comercialización en la Sierra", Pág. 3.

nutrientes esenciales se encuentran en esta capa del grano que se elimina al someterlo al blanqueo.

- **Variedades blancas o de cocción rápida.** El arroz blanco se obtiene a través de un proceso denominado blanqueo. Una vez descascarillado, se deben eliminar todas las capas que envuelven al grano de arroz. El resultado es lo que conocemos como arroz blanco, que está provisto de salvado y de germen. Una vez blanqueado el arroz se somete generalmente a una fase de pulido y abrillantado.
- **Variedades intermedias.** Son aquellas que en el proceso de tratamiento se les ha quitado parcialmente la cascara.
- **Variedades tratadas.** Son aquellas que son sometidas a algún tratamiento específico para resaltar su textura, sabor, tamaño, etc.

2.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN LOS PROCESOS DE POSTCOSECHA DE GRANOS

2.2.1 Condiciones climáticas durante el periodo de madurez⁷

El clima influye en la cosecha de los granos, en especial en la decisión de cuando esta deba realizarse, sin embargo si se cosecha un grano con un exceso de humedad se produce daños por amasamiento durante la poscosecha. Por otra parte cuando los granos presentan un bajo contenido de humedad pueden agrietarse o romperse durante el transporte, descarga, secado y almacenamiento.

Las condiciones climáticas influyen en el desarrollo vegetativo de los granos durante dos etapas de la maduración; la primera, cuando el grano se encuentra acumulando materia seca; para que esto ocurra se requiere la presencia de humedad en los suelos en cantidades favorables, sin esto la planta experimenta un estrés hídrico que provocaría la presencia de espigas con granos pobres en tamaño y peso. La segunda etapa se presenta cuando la semilla ha alcanzado su máximo

⁷ A. Bermeo, "Plan de mejoramiento de las operaciones poscosecha y sistema de secado de arroz en el Cantón Ventanas en la Provincia de Los Ríos", Pág. 16.

contenido de materia seca, comienza a disminuir su contenido de humedad para entrar en equilibrio con el ambiente.

2.2.2 Grado de madurez fisiológica⁸

Si la cosecha es realizada antes o después de la madurez fisiológica se obtiene un grano con menos potencial de almacenamiento, siendo susceptibles al ataque de insectos y microorganismos. Esto ocurre por dos razones, porque no han alcanzado su máxima capacidad de germinación o porque se ha dado inicio al proceso de deterioro.

Cuanto más alto es el contenido de humedad de los granos al momento de la cosecha, mayores son los riesgos de pérdidas debidas al ataque por hongos, insectos y a problemas en la germinación. De igual manera, cuanto más tiempo permanezcan los granos en el campo, mayores serán los riesgos de perdidas por caída espontanea de los granos, o por ataques de aves, roedores y otros animales dañinos.

Tabla 2.1. Contenido de humedad de varias especies de granos en madurez fisiológica⁹

ESPECIE	HUMEDAD (%)
AVENA	32
ARROZ	30
FRÉJOL	40
MAÍZ	33
RYEGRASS	40
TRIGO	32
SOYA	50

⁸ A. Bermeo, "Plan de mejoramiento de las operaciones poscosecha y sistema de secado de arroz en el Cantón Ventanas en la Provincia de Los Ríos", Pág. 16.

⁹ L. Velásquez, "Procesamiento de Semillas", Pág. 13.

2.2.3 Daños mecánicos¹⁰

Un grano puede sufrir daño mecánico en las siguientes operaciones.

Cosecha. Ocurre en el momento de la separación del grano de la espiga (trilla), en especial cuando la cosecha del arroz es manual y para liberar el grano de la planta se golpea la misma contra el suelo o un tronco, todo sobre una superficie lisa (sacos, trozos de tela, etc.) para su recolección.

Limpieza.- Cuando es manipulado por los agricultores o trabajadores, por el uso de maquinas de limpieza en mal estado de calibración.

Almacenamiento.- Deterioro de los granos que están debajo de una pila de sacos o de una cantidad considerable al granel, por efecto del peso que están soportando.

Transporte.- Por el tiempo que permanece el grano en el medio de transporte, las distancias hacia los centros de secado y comercialización, por la forma como son llevados al granel o sacos y por la mala manipulación por parte de personal o trabajadores al momento de la descarga.

2.2.4 Contenido de impurezas¹¹

Las impurezas son hongos y microorganismos que aceleran el deterioro de los granos, dificultan el almacenamiento debido a que aumentan la temperatura y humedad del grano y dificultan el secado obstruyendo la circulación del aire a través de los espacios entre granos durante el secado.

2.2.5 Humedad

¹⁰ A. Bermeo, "Plan de mejoramiento de las operaciones poscosecha y sistema de secado de arroz en el Cantón Ventanas en la Provincia de Los Ríos", Pág. 17.

¹¹ A. Bermeo, "Plan de mejoramiento de las operaciones poscosecha y sistema de secado de arroz en el Cantón Ventanas en la Provincia de Los Ríos", Pág. 18.

La conservación de los granos se ve influenciada por la humedad con la que se encuentran, debido a que es más fácil almacenar un grano seco por mucho más tiempo sin correr riesgo de su deterioro. Se considera un grano seco el que se encuentre con una humedad de 15%; sin embargo esta puede variar dependiendo de la zona en la que se esté trabajando. Para zonas cálidas y tropicales el rango de humedad se encuentra entre 12% a 13%

2.2.6 Temperatura

Es conocido que las altas temperaturas ayudan a la descomposición de los alimentos debido a que sirven de catalizadores para acelerar las reacciones químicas de los mismos como lo es la tasa de respiración. Mientras mayor sea la temperatura a la que se encuentra el grano, menor debe ser el contenido de humedad del mismo.

En la Tabla 2.2 se muestra los días de almacenamiento para granos en función a la temperatura y la humedad a la que se encuentren.

Tabla 2.2. Tiempo de almacenamiento en días para el arroz en función a la temperatura y humedad a la que se encuentre el grano en el ambiente¹²

DURACION DE ALMACENAMIENTO EN DÍAS						
HUMEDAD	TEMPERATURA					
	5°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C
13%				180	115	90
14%			160	100	50	30
15%			100	50	30	15
16%		130	50	30	20	8
17%		65	35	22	12	5
18%	130	40	25	17	8	2
19%	70	30	17	12	5	0
20%	45	22	15	8		
21%	30	17	11	7		
22%	23	13	8	6		
23%	17	10	7	5		
24%	13	8	4	4		
25%	10	3	6	3		

De Lucía y Assennato, 1993.

¹² L. Velásquez, " Procesamiento de Semillas ", Pág. 14.

2.2.7 Microorganismos¹³

Los microorganismos constituyen una de las principales causas de deterioro durante el almacenamiento de granos. Los hongos se propagan por medio de esporas, diseminándose y alojándose en cualquier parte de la planta de arroz como también en los lugares en donde se lo almacena.

Las condiciones idóneas para el desarrollo de hongos son: humedad relativa superior al 90% y temperatura entre los 20°C y 40°C.

2.2.8 Calidad del arroz¹⁴

Cuando el grano de arroz es cosechado con una adecuada madurez fisiológica, es necesario conservar la calidad con la que viene del campo. Para ello se debe eliminar todo material extraño que acompañe al grano desde la cosecha y proporcionar un control periódico durante todo el proceso de secado de grano, para mantener la calidad hasta que es almacenado y durante el tiempo que esto dure.

En el ANEXO 1 se pueden observar las características técnicas de las semillas que se deben utilizar para obtener buenos resultados.

2.2.8.1 Muestreo

El muestreo es la toma de pequeñas cantidades representativas de grano que luego conforman una muestra que representa un lote de granos en su totalidad.

- **Muestreo simple.** Empleado para la toma de muestras en productos envasados, este instrumento está compuesto por un extremo metálico con una abertura, para recibir una cantidad definida de grano.

¹³ A. Bermeo, "Plan de mejoramiento de las operaciones poscosecha y sistema de secado de arroz en el Cantón Ventanas en la Provincia de Los Ríos", Pág. 19.

¹⁴ A. Bermeo, "Plan de mejoramiento de las operaciones poscosecha y sistema de secado de arroz en el Cantón Ventanas en la Provincia de Los Ríos", Pág. 20.

En la Tabla 2.3 se presenta el número de sacos que deben ser muestreados para obtener una referencia certera de un lote.

Tabla 2.3. Número de sacos a muestrear por tamaño de lote¹⁵

COMPOSICION DEL LOTE	SACOS DE LOS QUE SE TOMAN MUESTRAS
1 a 10 sacos	Todos
10 a 100 sacos	10 sacos escogidos al azar
Más de 100 sacos	Un número equivalente a la raíz cuadrada del número total de sacos

Arias, 1993.

- **Muestreo por sonda de alveolos.** Este equipo está compuesto por una estructura metálica que posee compartimentos para la toma de muestras a diversas profundidades, de una masa de granos al granel.

2.2.8.2 Humedad del grano

La humedad es la cantidad de agua que se encuentra formando parte del grano, la misma que es expresada en porcentaje. El agua se encuentra en los granos de dos maneras: agua libre localizada en la parte superficial y que es fácil de retirar por evaporación y el agua de constitución que se encuentra formando parte de la materia seca y que no se la puede eliminar sino solo por la calcinación

$$\%humedad = \frac{Pa}{Pt} * 100 \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde:

Pa = peso de agua

Pt = Peso total del grano (Peso de agua + peso materia seca de grano)

¹⁵ A. Bermeo, "Plan de mejoramiento de las operaciones poscosecha y sistema de secado de arroz en el Cantón Ventanas en la Provincia de Los Ríos", Pág. 18.

- **Humedad por método empírico.** Esta dada por la experiencia de los agricultores en el campo, los mismos que utilizan los sentidos (tacto, olfato, vista) para determinar de forma subjetiva la humedad del grano, sin embargo esto no proporciona una medida confiable.
- **Humedad por método directo.** Determina la humedad de los granos mediante el secado de una muestra representativa; para lo cual dicha muestra es pesada previamente, secada en una estufa durante un tiempo establecido y nuevamente pesada como último paso, determinándose al final el contenido de humedad por medio de la diferencia entre los pesos obtenidos al inicio y al final, aplicándose la siguiente fórmula.

$$\text{Humedad } \% = \frac{P_i - P_f}{P_i} * 100 \quad \text{Ec. 2.2}$$

Donde:

P_i = Peso de la muestra antes del secado (grano húmedo)

P_f = Peso de la muestra después del secado (grano seco)

- **Humedad por método indirecto.** Permiten determinar la humedad de una muestra de granos basándose en la capacidad eléctrica de los mismos.

2.2.8.3 Impurezas

Se considera como impurezas todo grano roto, granos de otras especies, partes de plantas (flores, hojas, corteza, etc.) y las materias extrañas (tierra, arena, piedras, objetos metálicos, etc.). Las impurezas influyen en la calidad de un lote de granos debido a que crean focos de infección que ayudan a la proliferación de hongos y por otra parte entorpecen los procesos poscosecha como el secado.

Para la determinación del contenido de impurezas se procede a tomar una muestra representativa de granos con un peso definido, se separa las impurezas y se

pesa las impurezas obtenidas de la muestra de granos; para concluir se establece el porcentaje de impurezas por medio de la siguiente fórmula:

$$\text{Impurezas \%} = \frac{I}{Ma} * 100 \quad \text{Ec. 2.3}$$

Donde:

I = Peso de impurezas

Ma = Masa de muestra de análisis

2.3 EI ARROZ EN EL ECUADOR¹⁶

En el Ecuador el cultivo del arroz se realiza tanto en el invierno o periodo lluvioso (denominado de seco) como en el verano (periodo seco) dependiendo exclusivamente del agua de riego.

El área cultivada de arroz en el Ecuador es de 324.875 hectáreas, el 53,6% en la provincia del Guayas, el 38% en la provincia de Los Ríos, el 3,6% de la superficie se cultiva en los valles cálidos de la Sierra y Amazonía y el 8,4% en otras provincias de la Costa.

¹⁶ J. Barragán, "Diseño y construcción de un prototipo para el envejecimiento de arroz con capacidad 40Kg/día", Pág. 15.

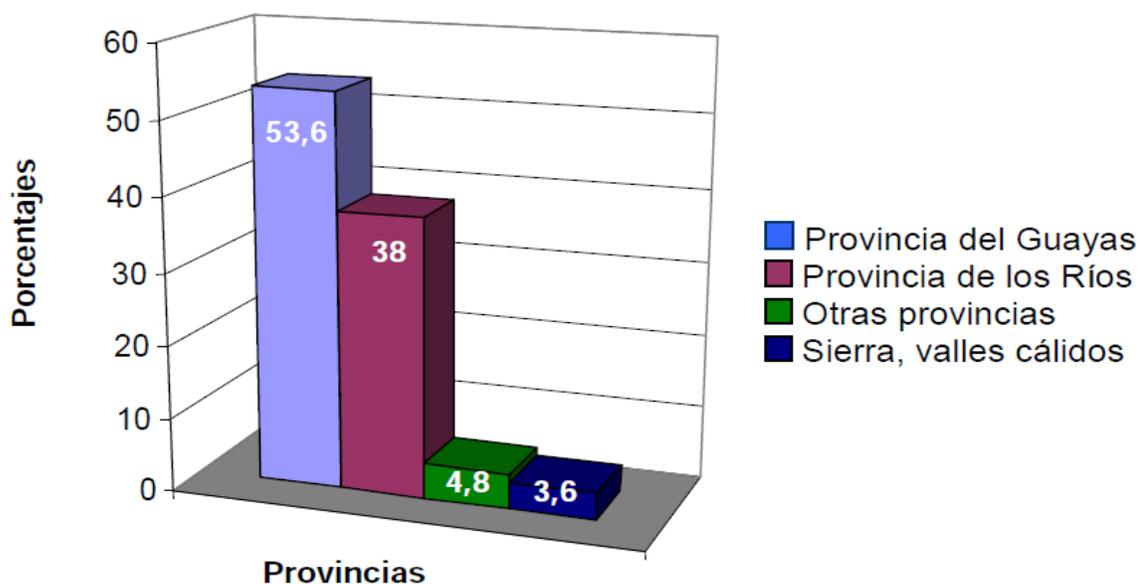


Figura 2.2. Zonas arroces¹⁷

El 63% de la producción anual se recoge entre los meses de abril y junio, correspondiente a la siembra de invierno, mientras que la producción restante sale a partir de septiembre hasta fines de año (siembra de verano). Los agricultores cultivan esta planta tomando en cuenta las siguientes condiciones:

- **Secano sin lámina de agua.** Se cultiva en Los Ríos el 80%, dependiendo del éxito o fracaso de la cantidad y la distribución de las lluvias de enero a abril de cada año, los campos arroceros se encuentran como indican la Figura 2.3

¹⁷ INIAP (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias del Ecuador)



Figura 2.3. Plantación de arroz en verano (Guayas, Boliche)¹⁸

- **El cultivo de arroz de secano estricto (de montaña o de meseta).** La tierra se presenta y se siembra en seco como se indica en la Figura 2.4. Las cosechas sufren a menudo de la falta de humedad y de tierras generalmente poco fértiles, por lo que, dependen de los sistemas de riego.

¹⁸ INIAP (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias del Ecuador)



Figura 2.4. Plantación de arroz en mesetas (Los Ríos, Montalvo)¹⁹

- **El cultivo del arroz inundado en aguas profundas.** La profundidad del agua se sitúa aproximadamente hasta 1,5 metros. El agua proviene de los ríos, lagos y de mareas en las desembocaduras (Figura 2.5). El arroz se siembra al voleo en un terreno no muy trabajado en los campos rara vez rodeados por pequeños diques, en las regiones donde el nivel del agua sube rápidamente.

¹⁹ INIAP (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias del Ecuador)



Figura 2.5. Plantación de arroz en zonas inundadas (Guayas, Juján)²⁰

- **Cultivo de arroz en pozas veraneras.** La principal zona arrocera esta bajo la cota de 10m sobre el nivel del mar con suelos arcillosos, profundos y fértiles, donde se realizan cultivos tecnificados y semitecnificados con riegos intermitentes. En este tipo de cultivo el terreno se llena de agua fresca durante los meses de lluvia (enero-abril). La producción en pozas veraneras es efectuada por pequeños agricultores utilizando una tecnología natural, lo que significa la adaptación del campesino arrocero a las condiciones naturales del terreno. Realizando la siembra de semilleros y trasplante en franjas conforme descenden los niveles de agua (Figura 2.6).

²⁰ INIAP (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias del Ecuador)



Figura 2.6. Plantación de arroz en pozas (Guayas, Daule)²¹

2.4 TIPOS DE ARROZ EN EL ECUADOR²²

En el país existen diferentes variedades de arroz que se siembran en las diferentes zonas productoras de arroz en cáscara. Las variedades difieren por las características propias que tiene cada tipo de arroz en cáscara como el tamaño del grano, porcentaje de humedad, cantidad de manchas que tiene, y las impurezas que tenga el arroz. En el Ecuador se los clasifica por el tamaño del grano, así se tienen los siguientes:

- **Blanco de grano largo.** Es el tipo de arroz que se produce en el Ecuador (Figura 2.7) y es reconocido en el mercado internacional por su altísima calidad.

²¹ INIAP (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias del Ecuador)

²² J. Barragán, "Diseño y construcción de un prototipo para el envejecimiento de arroz con capacidad 40Kg/día", Pág. 19.



Figura 2.7. Grano de arroz largo²³

- **Blanco de grano medio.** Es la variedad más consumida en el país por ser un grano completo de arroz, tiene una textura suave y tierna al ser cocido. Es de forma ligeramente redondeado y tiende a empastarse cuando se someten a una cocción demasiado prolongada.

2.4.1 Producción²⁴

La producción en el Ecuador está representada en la Tabla 2.4. Y hace referencia a la producción desde el año 1998 al 2006.

²³ INIAP (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias del Ecuador)

²⁴ J. Barragán, "Diseño y construcción de un prototipo para el envejecimiento de arroz con capacidad 40Kg/día", Pág. 21.

Tabla 2.4. Superficie sembrada y producción de arroz²⁵

ECUADOR: SUPERFICIE SEMBRADA Y PRODUCCIÓN DE ARROZ CÁSCARA 1998 - 2005			
Año	Superficie (Has.)	Producción Tm	Rend. (Tm/Ha)
1998	291.356	1'048.881	3,6
1999	324.476	1'168.113	3.60
2000	305.978	1'162.716	3,8
2001	310.288	1'179.094	3,8
2002	311.865	1'185.087	3,8
2003	316.948	1'204.402	3,8
2004	314.423	1'194.807	3,8
2005	358.094	1'360.757	3,8
2006	324.875	1'104.575	3,4

2.4.2 Recolección²⁶

El momento óptimo de recolección es cuando la panícula alcanza su madurez fisiológica (cuando el 95% de los granos tengan el color paja y el resto estén amarillentos como se ve en la Figura 2.8) y la humedad del grano sea del 20 al 27%.

²⁵ INIAP (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias del Ecuador)

²⁶ J. Barragán, "Diseño y construcción de un prototipo para el envejecimiento de arroz con capacidad 40Kg/día", Pág. 22.



Figura 2.8. Arroz listo para la cosecha (Los Ríos, Babahoyo)²⁷

2.4.3 Secado²⁸

Después del trillado el arroz presenta una humedad del 25 al 30%, por lo que debe realizarse un proceso conocido como secado hasta que el arroz alcance un grado de humedad inferior al 14%.

2.4.4 Tratamiento²⁹

La elaboración del arroz es una de las variables más importantes que influyen en la calidad. Su finalidad consiste en quitar la cascara mas externa y el germen, con el mínimo de roturas, dejando el grano, en la mayor medida posible, con su forma original.

²⁷ INIAP (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias del Ecuador)

²⁸ J. Barragán, "Diseño y construcción de un prototipo para el envejecimiento de arroz con capacidad 40Kg/día", Pág. 23.

²⁹ J. Barragán, " Diseño y construcción de un prototipo para el envejecimiento de arroz con capacidad 40Kg/día ", Pág. 23.

El grado o intensidad de elaboración debe ser la adecuada para obtener un producto de buen aspecto. Con una elaboración profunda se obtiene un arroz blanco brillante y poco harinoso.

2.4.5 Envejecido

Uno de los pasos finales para obtener un arroz de calidad es el envejecido el cual ayuda a un mejor rendimiento del mismo.

Durante el reposo del almacenamiento se verifica una lentísima respiración del producto, mediante la cual se consume una pequeña cantidad de azúcares con producción de anhídrido carbónico y agua. Las enzimas alfa y beta amilasa actúan sobre el almidón del grano y lo transforman parcialmente en dextrina y maltosa.

El envejecimiento disminuye la solubilidad, en el agua, del almidón y las proteínas; el tiempo necesario para la cocción aumenta, paralelamente con el incremento del volumen, la absorción de agua y la resistencia a la disgregación.

Como se puede apreciar en la Figura 2.9, el grano de arroz presenta diferentes capas de protección como lo son la cascarilla o cascara la cual mantiene al grano en una condición de impermeabilidad y termoestabilidad, además de poco contacto con el que pueda provocar la degradación de los componentes internos.

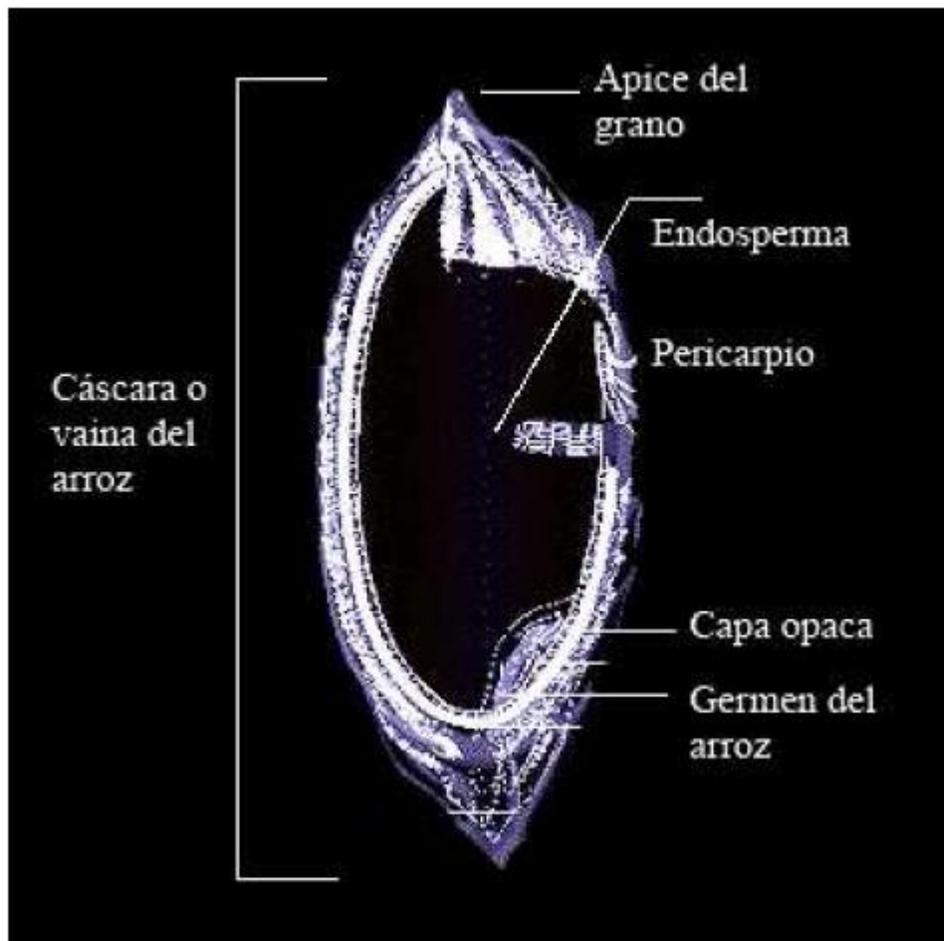


Figura 2.9. Grano de arroz³⁰

Seguido de esta cascarilla se encuentran varias capas entre las cuales se puede ver el pericarpio, una cubierta de semilla. Dichas capas y la parte del embrión o germen, constituyen lo que se conoce como salvado de arroz.

Examinando con detalle la Figura 2.9, observamos que el 72% del grano está representado por el endosperma, el 20% es cascarilla y el restante 8% es el pericarpio o salvado de arroz.

³⁰ INIAP (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias del Ecuador)

2.5 CONSUMO DE ARROZ EN PROVINCIAS DE LA SIERRA³¹

El consumo de arroz en la cada provincia del Ecuador varía de acuerdo a sus condiciones climáticas y a la densidad poblacional que tiene cada provincia.

Además, se considera el ingreso de cada individuo, ya que una persona con mayores ingresos puede consumir arroz de mejor calidad.

Casi todas las provincias de la Sierra tienen unas características similares, en cuanto a altitud, temperatura y consumo promedio; y albergan a más del 60% de la población del país. En la Tabla 2.5, se muestra el ejemplo de consumo de una de las provincias de la Sierra en base a la cual se realiza el estudio de consumo de arroz en toda la región.

Tabla 2.5. Consumo de arroz en Tungurahua³²

Provincia:	Tungurahua	
Capital	Ambato	
Altitud:	2.801 m.s.n.m	
Población:	441.034 habitantes	3,60%
Temperatura:	12,3°C	
Superficie:	2.896 km ²	
Consumo mensual per cápita:		2,9 kilos

Se ha considerado toda la población de las 10 provincias de la Sierra que tienen una población de 5.449.281 habitantes, en las cuales se consume en promedio 2,81 kilos por persona mensual, lo que representa alrededor de 340.000 quintales mensuales para satisfacer la demanda de la Sierra.

³¹ D. Andrade. "Proyecto de envejecimiento artificial del arroz, para su comercialización en la Sierra" Pág. 4.

³² INIAP (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias del Ecuador)

2.5.1 Variedades de arroz de consumo en la Sierra

Las variedades de arroz que se consumen en la Sierra son las que se muestran en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Variedades de arroz en el País³³

Variedad	Calidad
Conejo	Grano Largo
INIAP 12	Grano Largo
Arroz 1001	Grano Largo
Arroz 415	Grano Corto
INIAP 14	Grano Corto
INIAP 11	Grano Corto

³³ D. Andrade. "Proyecto de envejecimiento artificial del arroz, para su comercialización en la Sierra" Pág. 2.

CAPÍTULO 3

PROCESO DE SECADO Y ENVEJECIDO

3.1 SECADO DE ARROZ

El secado de granos se lo realiza para disminuir la humedad hasta un nivel que no permita el desarrollo de hongos, prevenir las reacciones de descomposición expresada en la respiración de los granos y de esta manera garantizar la inocuidad y valor nutritivo de los mismos. Este proceso se realiza cuando el arroz tiene un grado de humedad óptima entre 22% y 20%RH.

3.1.1. Cuando secar³⁴

Se realiza la cosecha una vez que los granos han alcanzado la madurez fisiológica. Se recomienda secar los granos inmediatamente después de haberse realizado la cosecha, con el objetivo de mantener la mayor cantidad de materia seca, reducir la humedad de los granos y evitar el ataque de microorganismos.

3.1.2. Métodos de secado³⁵

³⁴ A. Bermeo. "Plan de mejoramiento de las operaciones poscosecha y sistema de secado de arroz en el Cantón Ventanas en la Provincia de Los Ríos", Pág. 24.

³⁵ A. Bermeo. "Plan de mejoramiento de las operaciones poscosecha y sistema de secado de arroz en el Cantón Ventanas en la Provincia de Los Ríos", Pág. 24.

El secado de granos es el eje primordial dentro del sistema cosecha-secado-almacenamiento. En los países en vías de desarrollo las tecnologías para el secado son limitadas, por lo que en la mayoría de las ocasiones el agricultor opta por el secado natural que resulta de la combinación de radiación solar y movimiento natural del aire.

Por otra parte el secado artificial se resume en dos maneras: los que trabajan por lotes de grano y en los que el grano es secado por medio de un flujo continuo del mismo. El objetivo del secado es reducir el grado de humedad entre un 22% y 20% a un 10%.

3.1.2.1. Secado natural

El secado natural es aquel que se realiza en campo usando aire suministrado por medio del viento y la energía (calor) proporcionado por la radiación solar.

Es de uso generalizado en países en vías de desarrollo por su bajo costo y fácil implementación; sin embargo tiene como desventajas la dependencia de las condiciones climáticas, mano de obra y grandes superficies de secado por lo que se utiliza para volúmenes pequeños de grano. Hace uso de patios o tendales en los que se esparce el grano formando capas de más o menos 10 centímetros de espesor.

3.1.2.2. Secado artificial

El secado artificial emplea altas temperaturas, alrededor de 45°C a 50°C dependiendo del uso. Este sistema de secado está constituido por un ventilador que suministra aire, este fluye a través de una cámara y posteriormente atraviesa una masa de granos; también emplea un quemador que proporciona la temperatura necesaria para realizar el secado.

3.1.2.2.1. Secado artificial con aire natural³⁶

La extracción de la humedad del arroz es efectuada mediante la circulación forzada de aire a temperatura natural con la intervención de ventiladores.

El depósito debe ser fuerte para soportar la presión del arroz almacenado y sin aberturas que permitan la penetración de humedad. Así mismo deberá ser de fácil carga y descarga y facilitar sin problemas los trabajos de inspección y limpieza.

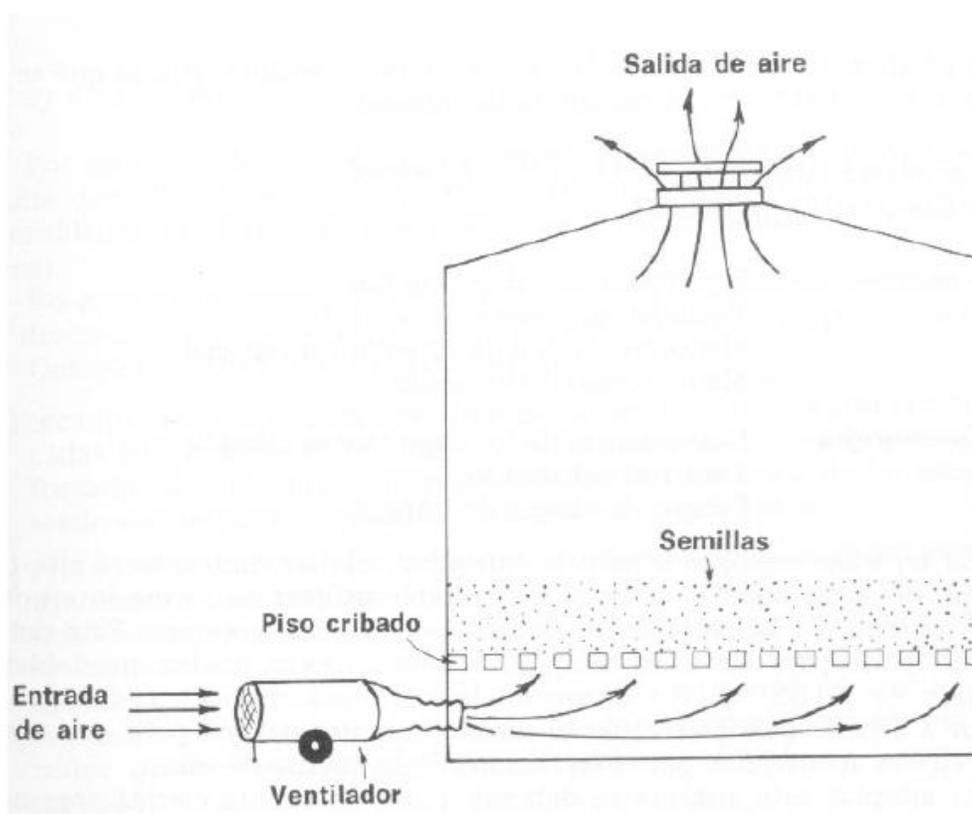


Figura 3.1. Depósito con dispositivo para secado de semillas con aire a temperatura ambiente³⁷

3.1.2.2.2. Secado artificial con aire caliente³⁸

³⁶ A. Bermeo. "Plan de mejoramiento de las operaciones poscosecha y sistema de secado de arroz en el Cantón Ventanas en la Provincia de Los Ríos", Pág. 25.

³⁷ L. Velásquez "Procesamiento de Semillas". Pág. 8.

³⁸ A. Bermeo. "Plan de mejoramiento de las operaciones poscosecha y sistema de secado de arroz en el Cantón Ventanas en la Provincia de Los Ríos", Pág. 26

Por este método el arroz es expuesto a corrientes de aire caliente mediante distintos sistemas que permiten regular en forma eficiente diferentes intensidades de flujo de aire y de temperaturas (ventiladores y calefactores). Dentro este grupo se puede disponer de:

- **Secadores por carga.** En el que el arroz es colocado en un depósito o cámara y expuestas a la acción de aire caliente forzado. Cuando el arroz alcanza el porcentaje de humedad deseado es retirado y reemplaza por un nuevo cargamento.
- **Secadores de movimiento continuo.** El arroz se mueve continuamente en dirección vertical, horizontal o inclinada, pero en sentido contrario al del aire caliente. Es decir que el arroz más seco se encuentra con el aire más caliente y más seco, mientras que el arroz más húmedo al aire más tibio y más cargado de humedad.

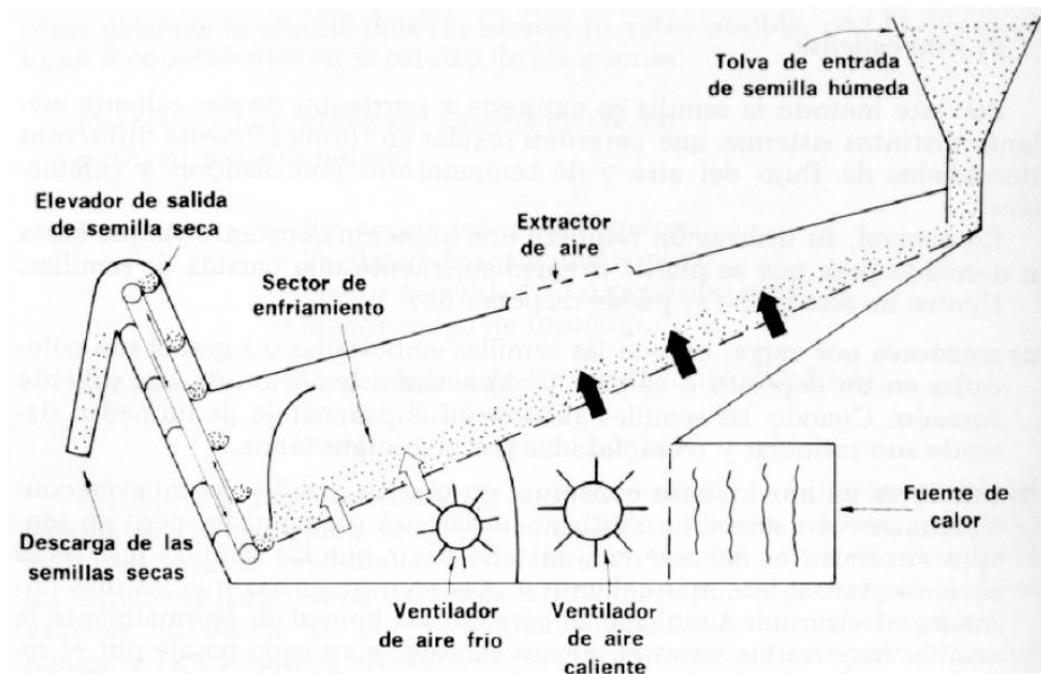


Figura 3.2. Secador continuo de aire caliente tipo cascada³⁹

³⁹ L. Velásquez "Procesamiento de Semillas". Pág. 9.

3.2. ENVEJECIMIENTO DE ARROZ⁴⁰

Este proceso se lo utiliza para conseguir que el arroz posea mejores características tanto visibles como de sabor. Este proceso solo se realiza si el arroz tiene un grado de humedad máxima entre 16 y 14%RH ya que si la humedad es superior el arroz podría quemarse.

3.2.1. Efectos del envejecimiento de arroz⁴¹

- El reposo (envejecido) del arroz afecta su textura.
- El efecto de envejecimiento de arroz puede ser el resultado de transformaciones físicas de soluciones coloidales de almidón y proteínas.
- Genera algunos cambios en el sabor.
- Los cambios físicos-químicos que el arroz experimenta durante el almacenaje dependen de la temperatura del almacenaje.
- La resistencia a la tracción del arroz aumenta con el reposo, al igual que la resistencia a la comprensión y a la ruptura.

3.2.2. Envejecimiento controlado

La aceleración del envejecimiento puede conseguirse por medio del calentamiento de arroz blanco con temperaturas hasta 120°C en recipientes herméticos para evitar la pérdida de humedad y la aparición de fracturas. El arroz envejecido artificialmente también denominado “curado” se asemeja al arroz envejecido naturalmente.

3.2.3. Envejecimiento descontrolado

⁴⁰ EDIAGRO

⁴¹ EDIAGRO

Este se produce durante el calentamiento espontaneo de arroz con contenido de humedad relativamente alto, a temperaturas superiores a 60°C, debido a la aceleración de la actividad microbial.

3.2.4. Envejecimiento natural⁴²

El antiguo método de envejecimiento conocido como envejecimiento natural, consiste en almacenar el arroz en cáscara o pilado, en bodegas o silos durante por lo menos siete meses, protegiéndolo de la humedad, lluvias, y controlando las plagas que pueden afectar al grano como el gorgojo, los roedores, y otros tipos de hongos y animales que puedan dañar el producto. Para evitar las plagas se utilizan distintos pesticidas durante el tiempo de almacenamiento del grano.

3.2.5. Envejecimiento artificial⁴³

El arroz envejecido artificialmente tiene similares características que el arroz envejecido natural o guardado; ya que mediante su proceso de producción se disminuye el grado de humedad y se obtiene un grano más seco. Mediante ambos procesos de envejecimiento se logra transformar la amilasa que es el almidón que tiene el grano de arroz y que determina la gelatinización del arroz cocinado, en amilopectina que son los carbohidratos pero modificados de tal manera que permita absorber mayor cantidad de agua y por ende mayor rendimiento de arroz cocido.

El proceso artificial se lo realiza en arroz pilado fresco, logrando disminuir su porcentaje de humedad a menos de un diez por ciento, utilizando hornos de calor, y luego enfriándolo mediante el reposo de la gramínea.

En el ANEXO 2 se puede observar una curva de envejecimiento de un horno real de arroz.

⁴² D. Barragán, "Diseño y construcción de un prototipo para el envejecimiento de arroz con capacidad 40Kg/día " Pág. 27.

⁴³ D. Andrade, "Proyecto de envejecimiento artificial del arroz, para su comercialización en la Sierra", Pág. 3.

CAPÍTULO 4

TÉCNICOS

4.1 ANÁLISIS DE LA MATERIA PRIMA

El grano de arroz llegará al centro de servicio de secado y envejecido en sacos, estos son pesados, y luego son contabilizados como se muestra en la Figura 4.1.



Figura 4.1. Recepción de arroz⁴⁴

El arroz que se empleará debe pasar el siguiente proceso de análisis realizado con los equipos de laboratorio; el cual se lo realizará mediante muestras tomadas a la

⁴⁴ INIAP (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias del Ecuador)

materia prima, para lo cual todo el análisis se lo puede realizar en menos de 5 minutos.

4.1.1. Humedad e impurezas⁴⁵

Para determinar el contenido de humedad se tomaran muestras al azar en distintos sacos al momento de la recepción, para esto se empleara un medidor de humedad MT-16 Grain, obteniendo el contenido de humedad promedio del grano de arroz. El arroz pilado fresco debe tener una humedad entre 26% y 30% para realizar el proceso de secado artificial y posterior a este debe tener un porcentaje de humedad menor a un 17% para realizar el proceso de envejecido artificial, ya que con la humedad mayor a esta, el arroz se quemará al momento de envejecerlo con los hornos, debido a que el proceso busca secar aun más el arroz.

Para la determinación del contenido de impurezas se realizara un análisis de pureza, para esto se tomaran muestras de 100g cada una y se procederá en el laboratorio a una clasificación manual para determinar:

Peso de grano puro. Grano de arroz en cascara y entero.

Peso de grano roto. Grano de arroz fisurado o partido.

Peso de materia inerte y extraña. Piedras, trozos de tallos, hojas, tierra, etc.

Posteriormente los pesos promedios que se obtendrán serán expresados en porcentajes. Para determinar el porcentaje de impurezas se aplica la ecuación 2.3.

4.1.2. Manipulación del grano

Una vez que el arroz llegue a la Procesadora, este debe ser colocado en tendales en capas de 3 a 4cm para que se realice un secado natural antes de efectuarse el artificial no desarrolle microorganismos.

⁴⁵ A. Bermeo. "Plan de mejoramiento de las operaciones poscosecha y sistema de secado de arroz en el Cantón Ventanas en la Provincia de Los Ríos", Pág. 54.

4.1.3. Bodega de almacenamiento⁴⁶

En la Procesadora se debe contar con una bodega en la cual se almacene el arroz en sacos que está en espera del proceso de secado y envejecido artificial.

Se debe tener un espacio adecuado entre las columnas de sacos de arroz que permitan la circulación de aire y de personal, en caso de un mal almacenamiento se puede dañar el grano por fermentación.

Se debe tener en cuenta que el arroz no puede permanecer mucho tiempo en espera del proceso de secado pues se pueden crear focos de calor y humedad entre el arroz.

Una bodega con características de tamaño adecuado para que no se produzcan focos de calor y humedad se muestra en la Figura 4.2. Donde en cada columna máxima deben apilarse 5 quintales.

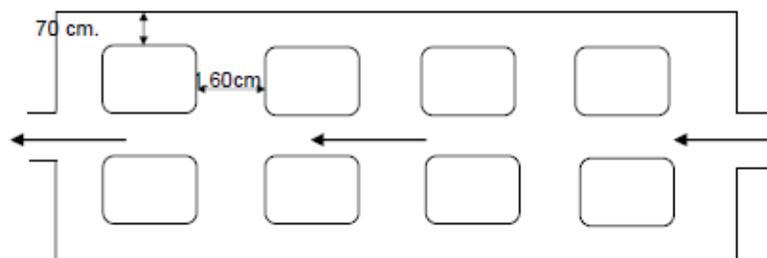


Figura 4.2. Distribución de las pilas de arroz en una bodega de almacenamiento de grano⁴⁷

4.2. CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO DE SECADO

El arroz debe tener una humedad máxima entre 22 y 20%RH para realizar el proceso de secado.

⁴⁶ A. Bermeo. "Plan de mejoramiento de las operaciones poscosecha y sistema de secado de arroz en el Cantón Ventanas en la Provincia de Los Ríos", Pág. 55.

⁴⁷ A. Bermeo. "Plan de mejoramiento de las operaciones poscosecha y sistema de secado de arroz en el Cantón Ventanas en la Provincia de Los Ríos", Pág. 55.

4.2.1. Temperatura de secado

La temperatura óptima para el proceso de secado de arroz varía de 45 °C a 50 °C, dependiendo del destino que tenga el grano, como se muestra en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Temperaturas de Secado⁴⁸

PRODUCTO	FINALIDAD O USO DE LOS GRANOS	
	SEMILLA	CONSUMO
Arroz	45° C	50 °C
Fréjol	40°C	45 °C
Maíz	40 °C	60 °C
Soya	40 °C	60 °C

Se debe tomar en cuenta que la temperatura óptima para el secado de arroz para consumo es de 50 °C. En el ANEXO 3 se puede observar el cambio de la humedad del grano a medida que pasa el tiempo.

4.2.2. Tiempo de secado

No existe un tiempo de secado específico para el arroz debido a que depende de la humedad a la que llega el grano de arroz.

Para determinar el tiempo de secado se realiza el siguiente procedimiento de cálculo:

- Como primer paso hay que definir la cantidad o capacidad del secador en sacos y dividir para el tiempo promedio que dura el secado

$$\text{Capacidad Técnica} = \frac{\text{Sacos}}{\text{hora}} \quad \text{Ec. 4.1}$$

⁴⁸ A. Bermeo. "Plan de mejoramiento de las operaciones poscosecha y sistema de secado de arroz en el Cantón Ventanas en la Provincia de Los Ríos", Pág. 59.

- Se establece una humedad promedio de 22% como el contenido de humedad a la que debería llegar el grano al secado, ha ese contenido de humedad se le debe restar 14% que es la humedad final que debe tener el grano una vez concluido el secado, con esto los puntos de humedad que hay que eliminar

$$22 - 14 = 8 \text{ puntos de humedad a eliminar} \quad \text{Ec. 4.2}$$

- Estos puntos de humedad se multiplican por la capacidad técnica de secado para obtener la capacidad de secado en función a los puntos de humedad a eliminar, expresado en $\frac{SP}{h}$ (sacos puntos/hora).

$$\frac{\text{Sacos}}{\text{hora}} * \text{Puntos de humedad} = \text{Capacidad de secado} \frac{SP}{h} \text{ (sacos puntos/hora)} \quad \text{Ec. 4.3}$$

- Si en la práctica al secador llega arroz con un contenido de humedad superior a 22% se determina los puntos de humedad a eliminar como se indico anteriormente y este valor se divide para la capacidad de secado en (sacos puntos/hora).

$$\frac{\frac{SP}{h}}{\text{Puntos humedad}} = \text{Sacos/hora} \quad \text{Ec. 4.4}$$

- Esta capacidad de secado se la transforma a toneladas por hora.

$$\frac{\text{Sacos}}{\text{hora}} * \frac{210\text{lbs}}{\text{Saco}} * \frac{1\text{Kg}}{2.2\text{lbs}} * \frac{1\text{Ton}}{1000\text{Kg}} = \frac{\text{Ton}}{\text{hora}} \quad \text{Ec. 4.5}$$

- Establecida la capacidad de secado se determina el volumen de grano a secar expresado en toneladas:

$$\text{Largo del secador m} * \text{ancho del secador m} * \text{altura de capa de grano m} = \text{m}^3$$

$$\text{Ec. 4.6}$$

$$\text{Masa de grano en } m^3 * 630 \frac{Kg}{m^3} * \frac{1\text{Tonelada}}{1000Kg} = \text{Masa de grano en toneladas}$$

Ec. 4.7

- Establecido esto se procede a la determinación del tiempo de permanencia en el secador o tiempo de secado.

$$TP = \frac{V(Ton)}{C(Ton/h)} = (Horas)$$

Ec. 4.8

Donde:

TP = Tiempo de permanencia.

V = Volumen de grano en el secador (toneladas).

C = Capacidad del secador (toneladas/hora).

No existe una capacidad de secado definitiva ya que esta se debe ajustar a la humedad con la que llega el grano del campo al secador artificial. Cabe señalar que durante el proceso de secado se forman zonas de grano seco y húmedo: en la zona inferior se presenta grano seco y frío, en la zona media o frente de secado, existe una transición de grano húmedo a seco y en la zona superior se encuentra grano húmedo.

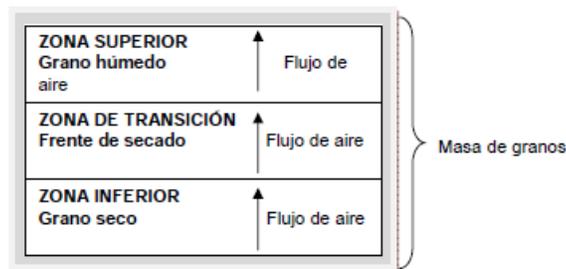


Figura 4.3. Representación grafica de frente de secado⁴⁹

⁴⁹ A. Bermeo. "Plan de mejoramiento de las operaciones poscosecha y sistema de secado de arroz en el Cantón Ventanas en la Provincia de Los Ríos", Pág. 61.

El espesor de estas zonas depende de la altura de lecho, lo que a su vez influye en el tiempo de secado.

4.2.3. Pérdida de humedad del grano

La pérdida de humedad que se da en el grano se obtiene en base a la formula:

$$Merma = \frac{Hi-Hf}{100-Hf} * 100 \quad \text{Ec. 4.9}$$

Donde:

Hi = Humedad inicial.

Hf = Humedad final.

4.2.4. Peso de grano seco obtenido⁵⁰

Durante el proceso de secado debido a la eliminación de humedad se experimenta una pérdida de peso en la masa de grano. Para determinar el peso del grano seco se utiliza la siguiente fórmula:

$$Qs = Qh * \frac{100-hi}{100-hf} \quad \text{Ec. 4.10}$$

Donde:

Qs = Peso de grano seco (Ton)

Qh = Peso de grano humeo (Ton)

hi = humedad inicial

hf = humedad final

⁵⁰ A. Bermeo. "Plan de mejoramiento de las operaciones poscosecha y sistema de secado de arroz en el Cantón Ventanas en la Provincia de Los Ríos", Pág. 62.

Para determinar el número de quintales que se obtienen se aplica la siguiente fórmula:

$$\text{Grano seco Ton} * \frac{1000\text{Kg}}{1\text{Ton}} * \frac{2,2\text{lb}}{1\text{Kg}} * \frac{1\text{qq}}{100} = \text{Grano seco (quintales)} \quad \text{Ec. 4.11}$$

4.2.5. Flujo de aire de secado

Para el proceso de secado existe un flujo de aire y una presión estática recomendada para secadores, en función a su tamaño. El flujo de aire se calcula siguiendo el siguiente procedimiento:

- Determinar la cantidad de grano que se va a secar en toneladas de la siguiente manera:

$$\text{Largo del secador m} * \text{ancho del secador m} * \text{altura de capa de grano (m)} = \text{m}^3 \quad \text{Ec. 4.7}$$

$$\text{Masa de grano en m}^3 * 630 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * \frac{1\text{Tonelada}}{1000\text{Kg}} = \text{Masa de grano en toneladas} \quad \text{Ec. 4.8}$$

Donde:

$$630\text{Kg/m}^3 = \text{densidad del arroz paddy (arroz en cascara)}$$

- Determinar la cantidad de agua extraída de la masa de grano, para esto se debe conocer la humedad inicial del grano y la humedad final que debe ser de 14%.

$$\text{Cantidad de agua extraida} = 100 * \frac{Hi-Hf}{100-Hi} \quad \text{Ec. 4.12}$$

Donde:

$$Hi = \text{humedad inicial del grano}$$

H_f = humedad final del grano (14%)

El porcentaje obtenido se debe restar de la masa de grano que se va a secar de donde se establecerá la cantidad de grano seco.

- Determinar el poder de evaporación aplicando la siguiente fórmula:

$$\frac{Q_s}{t} * \frac{h_i - h_f}{100 - h_i} = \frac{Kg \text{ agua}}{\text{hora}} \quad \text{Ec. 4.13}$$

Donde:

Q_s = Peso de grano seco (Ton)

t = Tiempo promedio de secado (horas)

El poder de evaporación se expresa en Kg de H₂O vaporada/minuto.

- Conociendo la temperatura ambiente y la de bulbo húmedo y utilizando la carta psicrométrica se establece la cantidad de agua absorbida por el aire de secado de la siguiente manera:

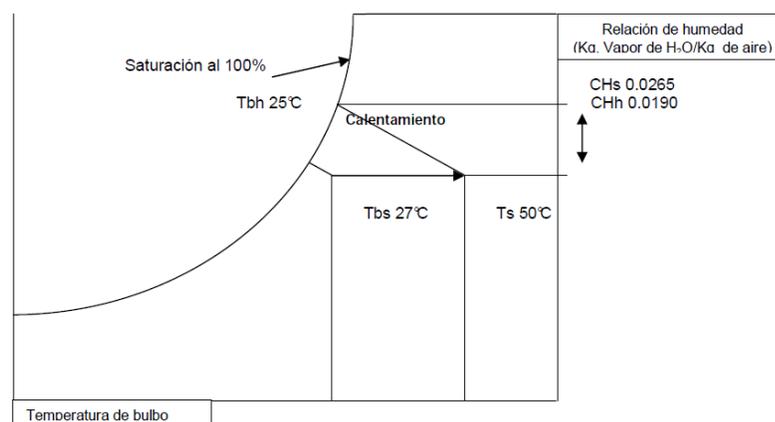


Figura 4.4. Carta Psicométrica⁵¹

⁵¹ A. Bermeo. "Plan de mejoramiento de las operaciones poscosecha y sistema de secado de arroz en el Cantón Ventanas en la Provincia de Los Ríos", Pág. 65.

Donde:

Tbh = Temperatura de bulbo húmedo.

Tbs = Temperatura de bulbo seco.

Ts = Temperatura de secado para el arroz (50°C)

CHh = Relación de humedad de aire húmedo (Kg de vapor de agua/ Kg de aire húmedo)

CHs = Relación de humedad de aire seco (Kg de vapor de agua/ Kg de aire seco)

- Determinar la cantidad de agua absorbida por el aire de la siguiente manera:

$$\text{Cantidad de H}_2\text{O absorbida} = CHs - CHh \quad \text{Ec. 4.14}$$

- Dividir el poder de evaporación para la cantidad de agua absorbida por el aire.

$$\text{Flujo de aire} = \frac{\frac{\text{Kg H}_2\text{O}}{\text{min}}}{\text{Kg Aire seco}} \quad \text{Ec. 4.15}$$

- Por último dividir el flujo de aire obtenido para la densidad del aire y de esta forma se determina el caudal de aire que se requiere.

$$Q = m + G \quad \text{Ec. 4.16}$$

Donde:

Q = Caudal de aire seco m³/min

m = Flujo de aire seco (Kg Aire seco/min)

G = Densidad del aire (1.23 Kg/m³)

4.2.6. Presión estática⁵²

⁵² A. Bermeo. "Plan de mejoramiento de las operaciones poscosecha y sistema de secado de arroz en el Cantón Ventanas en la Provincia de Los Ríos", Pág. 67.

Es la presión que se ejerce en un punto de un fluido cuando este fluido esta en reposo (estático). Para determinar la presión estática que debe vencer el flujo de aire de secado se realiza el siguiente procedimiento de cálculo:

- Dividir el flujo de aire de secado para la cantidad de grano a secar.

$$\frac{\text{Flujo aire } m^3/\text{min}}{\text{masa grano Ton}} = m^3/\text{min}/\text{Ton} \quad \text{Ec. 4.17}$$

- Multiplicar el flujo de aire de secado en $m^3/\text{min}/\text{Ton}$ por la cantidad de grano por las toneladas por metro cuadrado de superficie de secado para obtener un flujo de aire en $m^3/\text{min}/m^2$.

$$\frac{m^3}{\text{min}/\text{Ton}} * \frac{\text{Ton}}{m^2} = \frac{m^3}{\text{min}/m^2} \quad \text{Ec. 4.18}$$

- Con este ultimo valor se hace uso de la grafica de SHEDD y se ubica dicho valor en el eje de las ordenadas donde se muestra el caudal de aire en $m^3/\text{minuto}/m^2$, el mismo que debe intersecarse con la curva del arroz deshidratado a 14%, una vez encontrado el punto de corte se baja verticalmente hasta el eje de las abscisas para determinar la presión estática en milímetros de columnas de agua. A este valor de presión estática se le debe sumar el 25% por concepto de perdidas por presencia de impurezas en la masa de grano.

En la Figura 4.5 se muestra la Grafica de SHEDD. Presión Estática en milímetros de columnas de agua por metro de profundidad de masa de granos.

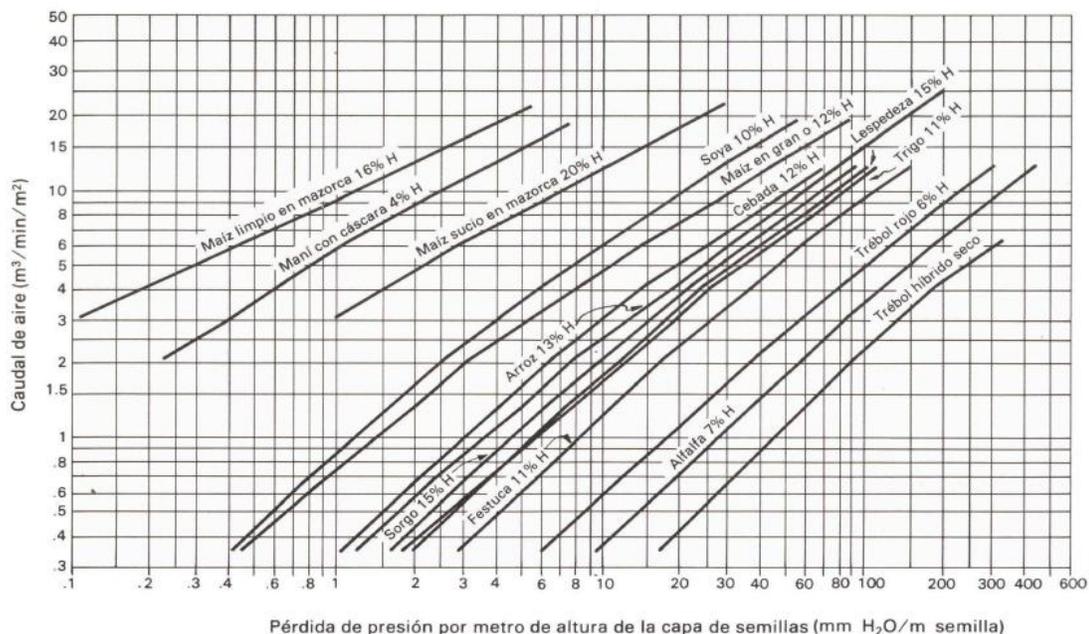


Figura 4.5. GRÁFICO DE SHEDD, Resistencia de las semillas al paso⁵³

En la Tabla 4.2 se muestran ejemplos de flujos de aires y presiones estáticas para secadores de diferentes tamaños.

Tabla 4.2. Flujo de aire y presión estática, recomendada para un secador tipo rectangular según su tamaño⁵⁴

VENTILADOR						
TAMAÑO DEL SECADOR		Espesor máximo de la capa de granos (m)	Flujo de aire (m ³ /min.m ³ de grano)	Flujo total de aire(m ³ /min)	Presión Estática (mm de columna de agua)	Potencia del Motor Eléctrico del ventilador (Hp)
L (largo)	A (ancho)					
6	4	0,5	20	240	80	10
5	4	0,5	20	200	80	7,5
6	3	0,5	20	180	80	7,5
5	3	0,5	20	150	80	5
4	3	0,5	20	120	80	5
4	2,5	0,5	20	100	80	4

⁵³ A. Bermeo. "Plan de mejoramiento de las operaciones poscosecha y sistema de secado de arroz en el Cantón Ventanas en la Provincia de Los Ríos", Pág. 67.

⁵⁴ A. Bermeo. "Plan de mejoramiento de las operaciones poscosecha y sistema de secado de arroz en el Cantón Ventanas en la Provincia de Los Ríos", Pág. 67.

Estos flujos de aire están en función a un motor ventilador con una eficiencia del 50% y tomado como referencia arroz en cascara.

4.2.7. Consumo de combustible

El consumo de combustible depende estrictamente del quemador que sea utilizado, se debe contar con una cámara para garantizar una buena combustión de gas licuado de petróleo GLP y por lo tanto evitar la pérdida de calor hacia el ambiente.

4.2.8. Enfriamiento

El enfriamiento después del proceso de secado requiere entre 30 a 40 minutos con el ventilador encendido, pero sin la fuente de calor. El enfriamiento puede disminuir la humedad del grano en 0,5 a 0,8% y se lo realiza con el ventilador encendido pero sin la fuente de calor.

4.3. CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO DE ENVEJECIDO⁵⁵

Para realizar el proceso de envejecido la humedad máxima del arroz debe ser de 16%RH.

4.3.1. Temperatura de envejecido

La temperatura óptima para el proceso de envejecido de arroz es de 120 °C.

4.3.2. Tiempo de envejecido

Depende de los puntos de humedad a ser eliminados.

⁵⁵ D. Barragán, "Diseño y construcción de un prototipo para el envejecido de arroz con capacidad 40Kg/día", Pág. 102.

4.3.3. Enfriamiento

Es el mismo procedimiento que en el enfriamiento de secado con la diferencia que en este proceso tarda entre 45 a 50 minutos.

4.4. ENVASE DEL PRODUCTO⁵⁶

Una vez que el arroz se enfríe totalmente se debe envasar el producto en los quintales. Después de colocar el arroz en los quintales, se debe realizar el pesaje para que todos los quintales tengan 100libras.

Posteriormente se debe realizar el sellado o cosido de los quintales para terminar con el proceso de envase.

⁵⁶ D. Andrade, "Proyecto de envejecimiento artificial del arroz, para su comercialización en la Sierra", Pág. 6.

CAPÍTULO 5

DESCRIPCIÓN DEL HORNO INDUSTRIAL

5.1 DEFINICIONES⁵⁷

Un horno es un dispositivo que genera calor y que lo mantiene dentro de un compartimento cerrado. Se utiliza generalmente en la cocina para calentar, cocer o secar alimentos.

La energía calorífica utilizada para alimentar un horno puede ser suplida directamente por combustión (leña, gas), radiación (luz solar), o indirectamente por medio de electricidad (horno eléctrico), esto es lo que permite determinar los diferentes tipos de horno.

5.1.1 Tipos de hornos

- **Horno de leña.** Funcionan a partir de materiales forestales, lo cual representa un grave riesgo ecológico en la actualidad.
- **Horno de gas.** Son una buena opción ya que tienen una cocción similar a la de los de leña. En cuanto a las implicaciones ecológicas es aun mejor ya que estos no mandan al ambiente gases de una combustión no controlada.

⁵⁷ D. Rúales, "Diseño e implementación de un sistema de control automático para un horno industrial ahumador de carne ", Pág. 9.

- **Horno eléctrico.** Aun cuando los hornos eléctricos son totalmente automatizados, la cocción no es la óptima y el consumo de electricidad es alto.
- **Horno solar.** Su principal funcionamiento radica en el máximo aprovechamiento de los recursos solares para obtener energía calorífica.
- **Horno de microondas.** Funciona mediante la generación de ondas electromagnéticas, las cuales interactúan con las moléculas de agua, contenidas en los alimentos.
- **Horno atmosférico.** La arquitectura de este horno facilita el flujo de las masas de aire caliente, cocinando uniformemente los productos que se encuentran en su interior.

5.1.2 Detalle del horno utilizado en el sistema de control

El sistema de control será instalado en un horno a gas, construido a base de planchas de acero inoxidable de 0.9mm, recubierto con planchas de aluminio y sus medidas son 3 m de alto, 3 m de ancho por 4 m de profundidad. En la parte posterior del horno se encuentra el blower que ingresará el aire caliente producido por el quemador.

El horno se halla formado por cinco partes fundamentales que se consideran como piezas independientes y que han sido concebidas por separado para su análisis y estudio por parte de los encargados de la construcción del horno.

En la Figura 5.1 se muestra el horno con las partes más importantes del mismo.

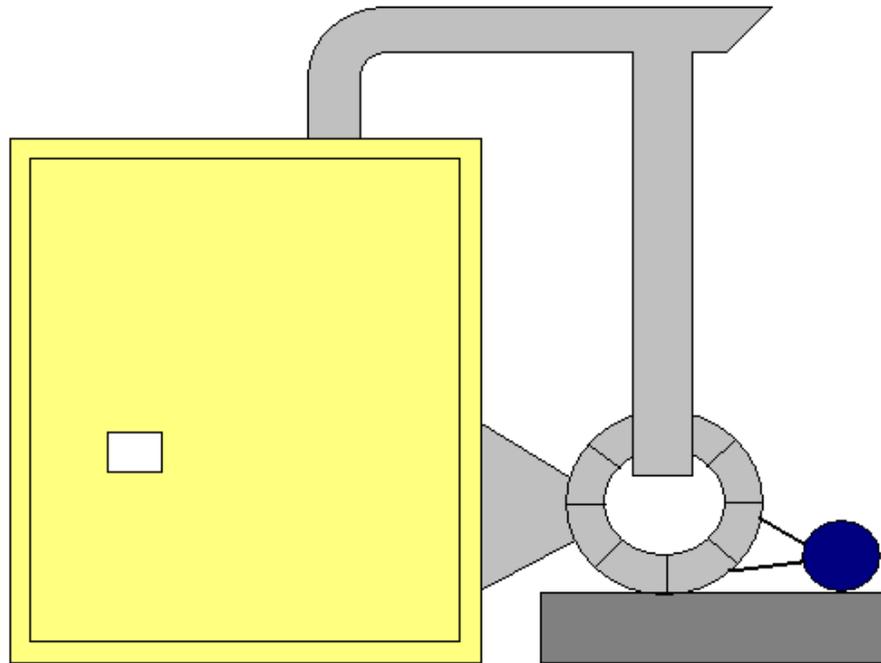


Figura 5.1. Composición del horno industrial

- **La caja del horno.** Es el horno en sí, la parte más externa cuyas medidas corresponden al tamaño total del horno. Posee una estructura metálica para la recirculación del aire y la eliminación de la humedad.
- **La base del horno.** Es una estructura metálica en forma de rieles que se utiliza para ubicar los contenedores del arroz
- **Contenedores de bandejas.** Es una estructura construida a base de rejillas que dispone de compartimentos en donde se colocan las bandejas con el arroz. Posee ruedas para su fácil desplazamiento.
- **Bandejas.** Son estructuras metálicas con pequeños orificios en sus bases por los cuales circula el aire caliente y en los cuales se coloca el arroz.
- **Blower y quemador.** Son los elementos encargados de calentar el aire e ingresar el mismo al horno.

5.2 FUNCIONAMIENTO⁵⁸

Por medio del quemador el cual funciona a base de gas se produce el aire caliente el cual es ingresado al interior del horno por medio del blower. El aire caliente atraviesa las bandejas que contienen el arroz y la humedad se transfiere desde el grano hacia el aire caliente. Este aire caliente sube hasta llegar al techo del horno y sale por el ducto de realimentación. El aire caliente y húmedo regresa hacia el ambiente y el aire que no se encuentra muy húmedo vuelve a ingresar hacia el horno para repetir el ciclo.

Las compuertas que tiene el ducto sirven para que el aire caliente y húmedo salgan hacia el ambiente y también para que el producto se enfríe después de haber culminado el proceso.

5.3 ESPECIFICACIONES

El horno industrial se halla formado por las siguientes partes principales:

a. Caja del horno. Su forma se puede apreciar en la Figura 5.2 y se halla constituido por las siguientes partes:

1. Caja del horno
2. Ducto de realimentación
3. Compuertas
4. Campana
5. Piso
6. Puertas
7. Ventanillas

⁵⁸ D. Rúales, "Diseño e implementación de un sistema de control automático para un horno industrial ahumador de carne ", Pág. 12.

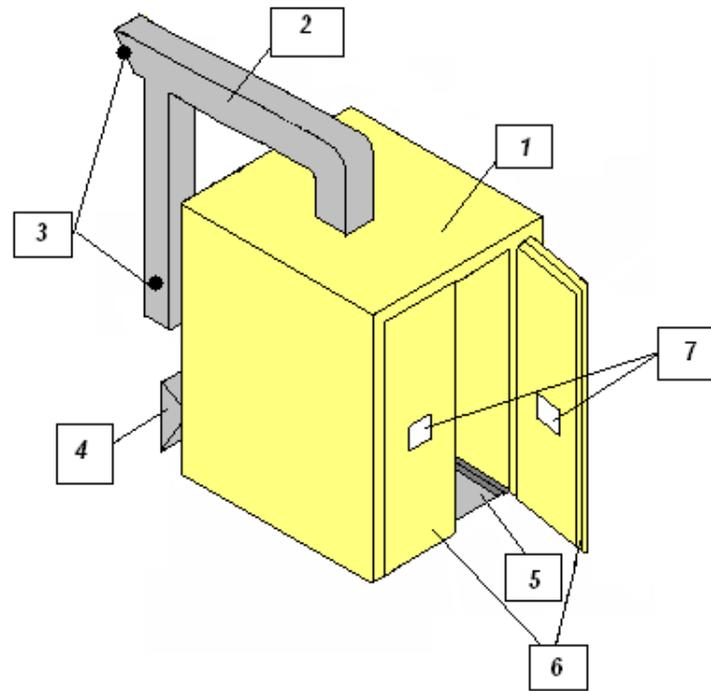


Figura 5.2. Descripción del horno

b. Base del horno. Tiene la forma que se aprecia en la Figura 5.3 y consta de las siguientes partes:

1. Base propiamente dicha
2. Rieles

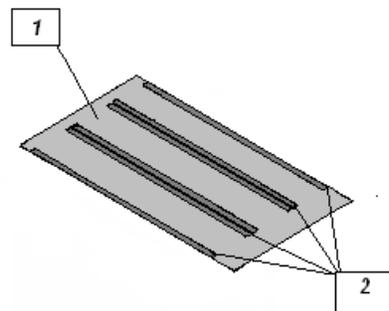


Figura 5.3. Base del horno

c. Contenedor de bandejas. Tiene la forma que se aprecia en la Figura 5. y consta de las siguientes partes:

1. Porta bandejas
2. Garruchas
3. Estructura
4. Pasamanos
5. Bandeja recolectora

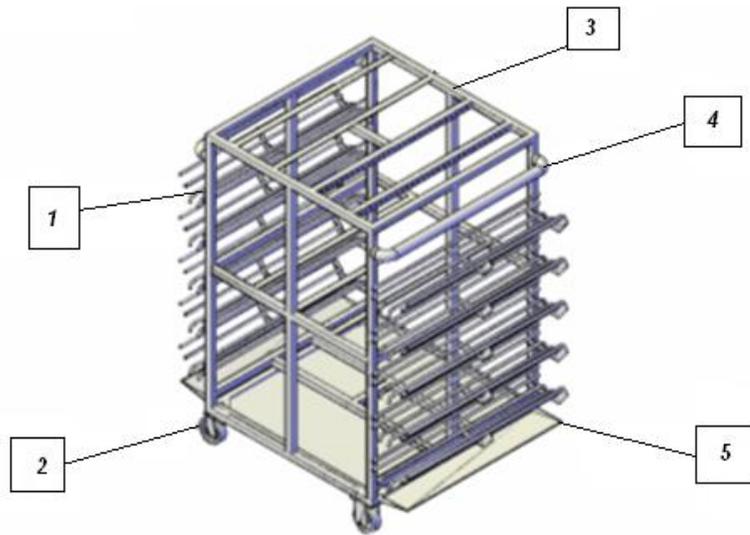


Figura 5.4. Contenedor de bandejas

d. Bandejas. Las bandejas son las estructuras metálicas de forma cuadrada en las cuales se coloca el arroz y tienen la forma de la Figura 5.5.

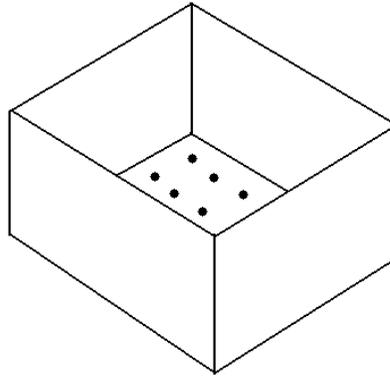


Figura 5.5. Bandeja

e. **Blower y quemador.** Tienen la forma que se aprecia en la Figura 5.6 y constan de las siguientes partes:

1. Blower
2. Quemador



Figura 5.6. Quemador y blower⁵⁹

A continuación se presenta la Tabla 5.1 que especifica las dimensiones del horno de secado y envejecido de arroz.

⁵⁹ INIAP (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias del Ecuador)

Tabla 5.1. Dimensiones y capacidad del horno

ESPECIFICACIONES DEL HORNO			
Largo	Ancho	Profundidad	Volumen
[m]	[m]	[m]	[m ³]
3	3	4	36

Por otra parte, en la Tabla 5.2 se muestran las dimensiones, materiales y especificaciones físicas de cada una de las partes que conforman el horno.

Tabla 5.2. Especificaciones de las partes que conforman el horno

ESPECIFICACIONES DE LAS PARTES DEL HORNO			
Elemento	Acero	Espesor	Dimensiones
Caja interior horno	ANSI 304	1[mm]	2.97x2.97x3.97[m]
Caja exterior horno	ANSI 430	1[mm]	3x3x4[m]
Ducto de realimentación	ANSI 304	2[mm]	2.74x2.70x0.30[m]
Contenedor de bandejas	ANSI 304	1.2[mm]	2.44x0.90x1.95[m]
Bandejas	ANSI 304	0.8[mm]	0.37x0.42x0.17[m]

CAPÍTULO 6

INSTRUMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

Es este amplio campo tecnológico, el que brinda múltiples opciones en el desarrollo de nuestros sistemas de control, monitoreo de variables y las diferentes tareas que se puedan obtener al contar con una buena instrumentación, que garanticen el correcto funcionamiento de los procesos, en concepto de confiabilidad y eficiencia, para obtener mayores y mejores resultados en la calidad de la producción final.

Es parte importante dentro de la instrumentación de un proceso, conocer las normas con las cuales se va a escoger los dispositivos del sistema que se está diseñando. Estas normas están aplicadas en las características de los instrumentos, tanto de medición como los de actuación y se estandarizan de acuerdo con las normas SAMA (Scientific Apparatus Makers Association), PMC20. Las características estáticas que se deben tomar en cuenta para escoger los instrumentos de medición son⁶⁰:

Campo de medida o Rango. Es el conjunto de valores dentro de los límites superior e inferior de medida, en los cuales el instrumento es capaz de trabajar en forma confiable.

⁶⁰ A. Cañar, "Diseño e implementación de un SCADA para la Central Hidroeléctrica La Península", Pág. 26.

Alcance o Span. Es la diferencia entre el valor superior e inferior del campo de medida del instrumento.

Error. Es la diferencia que existiría entre el valor que el instrumento indique y el valor que realmente tenga esta variable en ese momento.

Precisión. Es la mínima división de escala de un instrumento indicador. Generalmente esta se expresa en porcentaje del Span.

Zona Muerta. Es el máximo campo de variación de la variable en el proceso real, para el cual el instrumento no registra ninguna variación en su indicación, registro o control.

Sensibilidad. Es la relación entre la variación de la lectura del instrumento y el cambio en el proceso que causa este efecto.

Repetibilidad. Es la capacidad de un instrumento de repetir el valor de una medición, de un mismo valor de la variable real en una única dirección de medición, considerando las mismas condiciones de funcionamiento.

Histéresis. Similar a la repetibilidad, pero en este caso el proceso de medición se efectuará en ambas direcciones.

Campo de medida con supresión de cero. Es aquel rango de un instrumento cuyo valor mínimo se encuentra por encima del cero real de la variable.

Campo de medida con elevación de cero. Es aquel rango de un instrumento cuyo valor mínimo se encuentra por debajo de cero de las variables.

Por otra parte, las características dinámicas de los instrumentos de medida es otro parámetro que se debe tomar en cuenta para realizar la instrumentación del sistema. La descripción del comportamiento del sensor se hace en este caso mediante las denominadas respuestas dinámicas, error dinámico y velocidad de respuesta o retardo.

El error dinámico es la diferencia entre el valor indicado y el valor exacto de la variable medida, siendo nulo el error estático. Este describe la diferencia en la respuesta del sensor a una magnitud de entrada según esta sea constante o variable en el tiempo.

La velocidad de respuesta indica la rapidez con que el sistema de medida responde a los cambios de la variable de entrada.

Para poder determinar las características dinámicas de un sensor, se debe aplicar a su entrada una magnitud variable. Esta puede ser de formas distintas, pero lo normal y suficiente para un sistema lineal es estudiar la respuesta, frente a una entrada transitoria como un impulso, un escalón o una rampa periódica o aleatoria. La elección de una u otra depende del tipo de sensor.

Las características dinámicas de los sensores pueden estudiarse entonces por cada señal de entrada aplicada, agrupándolos de acuerdo con el orden de la función de transferencia que lo describe. Normalmente no es necesario emplear modelos de orden superior a dos. Según las funciones que realizan los diferentes instrumentos se los puede clasificar:

Instrumentos ciegos. Son aquellos que no tienen indicación visible de la variable medida pero cumplen una acción reguladora en el proceso.

Instrumentos indicadores. Son aquellos que tienen un indicador visual de la variable del proceso, pueden ser analógicos y/o digitales.

Instrumentos registradores. Estos pueden ser de tipo mecánico o también de tipo electrónico, como por ejemplo los registradores digitales que por medio del puerto serial se conectan a una computadora donde aparece gráficamente en pantalla las estadísticas de medición.

Elementos primarios de medida. Son aquellos que están encargados de medir directamente la variable a controlar, estos entran en contacto directo con la variable del proceso.

Transmisores. Son todos aquellos que transmiten la variable a distancia en forma de señal eléctrica, neumática, hidráulica, o electromagnética.

Transductores. Son aquellos que modifican, convierten, o acondicionan la señal de entrada.

Receptores. Son aquellos instrumentos que reciben la señal enviada por los transmisores.

Controladores. Son los encargados de encontrar el error entre la variable medida y la referencia, y efectúan una acción para corregir dicho error.

Elemento final de control. Son los instrumentos que reciben la señal de corrección del controlador y actúan sobre el proceso para corregir el error. Este instrumento está en contacto directo con el proceso en línea.

6.1 ESTRATEGIAS Y PARÁMETROS PARA EL CONTROL AUTOMÁTICO

La automatización y control se lleva a cabo, una vez que todos los parámetros del proceso han sido reconocidos para cumplir con el alcance y los objetivos del proyecto. Uno de los avances del proyecto es considerar las estrategias que convienen para un funcionamiento óptimo del sistema, englobando todas las variables que se involucren dentro del proceso y seleccionando los recursos con los que se va a lograrlo. Con este criterio, se muestran en la Tabla 6.1, los parámetros y sus respectivas estrategias que se vienen utilizando en el diseño del proyecto.

Tabla 6.1. Estrategias y parámetros para el Control Automático del Sistema

PARÁMETRO	ESTRATEGIA
Temperatura en el interior del horno	Diseñar un sistema de control en lazo cerrado de temperatura, que mantenga la temperatura adecuada para cada proceso en el interior de horno. Este controlador debe tener un tiempo de establecimiento pequeño, un sobre pico del 20% y un error de estado estacionario mínimo.
Humedad del grano	Diseñar un control on-off de humedad para suspender el paso de gas hacia el

	quemador cuando se cumpla con la humedad requerida
Monitoreo y manejo de las variables de operación	Diseñar una interface que este orientada a la supervisión de control y adquisición de datos, que sea flexible en sus parámetros de diseño, de arquitectura abierta a posibles expansiones o modificaciones y que garantice los resultados finales esperados.
Instrumentación y conexiones	Desarrollar un diseño en donde las unidades de medición y control, equipos electrónicos y conexiones estén protegidas de las hostilidades en las que ocurre el proceso industrial, tomando medidas de prevención.
Análisis técnico y de manejo del sistema	Lograr un diseño eficiente y confiable que cumpla con los parámetros técnicos para su funcionamiento, que brinde una interface amigable al operador y que represente el comportamiento del proceso.

En el ANEXO 15 se muestra el diagrama P&ID del sistema.

Las estrategias de control más reconocidas dentro de los procesos industriales son las siguientes⁶¹:

Control en cascada. Consiste en incluir uno o más lazos de control interno dentro de otro externo, con el objetivo de anular perturbaciones, impidiendo que las

⁶¹ A. Cañar, "Diseño e implementación de un SCADA para la Central Hidroeléctrica La Península", Pág. 30.

perturbaciones secundarias afecten al sistema principal. Básicamente el controlador externo se encarga de la variable principal, mientras que los controladores internos se encargan de las perturbaciones más frecuentes.

Control de relación. Consiste en analizar y mantener una proporcionalidad entre dos o más elementos (actuadores) dentro de un proceso continuo. Se usa comúnmente cuando se tiene que ingresar dos líquidos a un tanque y donde la cantidad del primer líquido debe mantener una relación respecto con la del segundo.

Control de rango dividido. Es aplicado a sistemas con una sola variable controlada y dos o más variables manipuladas, las cuales afectan de igual forma a la variable controlada. Requiere compartir la señal de salida del controlador con varios elementos actuadores.

Control selectivo. Consiste en ejercer control sobre dos variables de un proceso, relacionadas entre sí de tal modo que una u otra pueda ser controlada por la misma variable manipulada. La acción de control se logra conectando la salida de los controladores a un switch selector.

Control inferencial. Consiste en efectuar la medición de la variable controlada a través de otra variable relacionada, considerada variable secundaria (pero dependiente de la principal). Los componentes de este sistema son los mismos que los de un sistema de control realimentado más una unidad de computo llamada estimador.

Compensación de tiempo muerto. El tiempo muerto es el intervalo de tiempo de respuesta desde que se ingresa una señal en la entrada a un componente o un sistema, y el comienzo de una señal de respuesta por la salida del sistema. El tiempo muerto presenta la principal dificultad en los diseños de sistemas de control estable. Como una regla práctica puede adoptarse la siguiente regla; si el tiempo muerto de un proceso es mayor que 1.5 veces su constante de tiempo, se requiere un compensador de tiempo muerto. Esta constante, es el tiempo necesario para que un proceso de primer orden alcance una respuesta igual al 63.2% de su respuesta final, cuando se le somete a un estímulo escalón.

6.2 SENSORES Y TRANSMISORES⁶²

El elemento primario de medición o sensor, es aquel que detecta el valor de la variable medida. Los sensores y transmisores realizan todas las operaciones de medición en los procesos de control; en el sensor se produce un fenómeno físico, relacionado con una variable del proceso, que puede ser de tipo eléctrico, mecánico, electrónico o una combinación de estos varios. Por otra parte, el transmisor convierte este fenómeno que se produce en el sensor, en una señal que se pueda transmitir, y por lo tanto esta tiene relación con la variable que se mide en el proceso. Existe una clasificación de sensores por su tipo, dependiendo de las propiedades físicas en las que se desarrolla el proceso y de sus características de funcionamiento:

Sensores de contacto. Son aquellos que realizan la medida en contacto directo, real y físico con el producto o materia.

Sensores de no contacto. Se basan en propiedades físicas de los materiales, son más exactos, pero propensos a interferencias del medio ambiente.

Sensores digitales. Trabajan con señales digitales, en código binario, pueden representar la codificación de una señal analógica, o también la representación de dos estados on-off, por ejemplo los sensores tipo switch.

Sensores analógicos. Proporcionan medidas continuas, los rangos típicos son de 0 a 20mA, 4 a 20mA, 0 a 5v, 1 a 5v y dependiendo del tipo de proceso existen rangos especiales, por ejemplo los sensores capacitivos o los sensores piezoresistivos.

Sensores mecánicos. Son aquellos que traducen la acción física del elemento medido, en un comportamiento mecánico, típicamente de movimiento o calor, por ejemplo el barómetro o el termómetro de mercurio.

Sensores electro-mecánicos. Este tipo de sensor emplea un elemento mecánico elástico combinado con un transductor eléctrico, por ejemplo los sensores resistivos o los sensores magnéticos.

6.2.1 Sensores y transmisores de temperatura⁶³

⁶² A. Cañar, "Diseño e implementación de un SCADA para la Central Hidroeléctrica La Península", Pág. 32.

Cuando se trabaja con sistemas en los cuales se debe medir temperatura se tienen algunas opciones para escoger los sensores. Así por ejemplo, si se requiere medir temperatura con un sensor que produzca voltaje y se necesita medir temperaturas entre 75 °C y 600 °C, entonces la selección podría ser una termocupla. Si a la señal del sensor requerida es un cambio de resistencia, entonces el sensor podría ser un detector resistivo de temperatura (RTD) o un termistor. Si la señal del sensor requerida es una corriente proporcional, entonces la selección podría ser un sensor de temperatura de estado sólido.

6.2.1.1 Características y definiciones

La temperatura es una variable muy importante en los procesos, ya que está vinculada a la operación del equipo. No existe un instrumento o medidor universal que sea aplicable a todos o la mayoría de los casos, cada situación debe ser cuidadosamente analizada, ya que existe un sin número de condiciones a tener en cuenta como el tipo de materia a medir, agresividad física o química, entre otros.

6.2.1.2 Funcionamiento

6.2.1.2.1 Instrumentos de medición directa⁶⁴

- **Termocupla.** La termocupla es un sensor de temperatura que entrega una pequeña señal de voltaje en el rango de 10 a 80mV. La termocupla está constituida por la conexión de dos metales diferentes en un terminal que forma una junta. Si la junta que no está siendo calentada se la deja en circuito abierto, aparecerá en los terminales de los alambres un pequeño voltaje proporción a la cantidad de calor que se esté entregando a la otra junta.

Tipos de termocuplas. En el diseño de los sensores de temperatura, un problema es ajustar el rango de un sensor específico para que funcione

⁶³ A. Cañar, "Diseño e implementación de un SCADA para la Central Hidroeléctrica La Península", Pág. 39.

⁶⁴ A. Cañar, "Diseño e implementación de un SCADA para la Central Hidroeléctrica La Península", Pág. 40.

adecuadamente para un rango de temperatura a ser medidas: Esto implica que no existe un buen sensor que con precisión mida temperaturas bajo 0 °C y 1000 °C. Por esta razón se requiere una amplia de termocuplas para su utilización en diferentes rangos de temperatura. La Figura 6.1 muestra un grafico en el cual se puede observar diversos rangos de temperatura para los diferentes tipos de termocuplas.

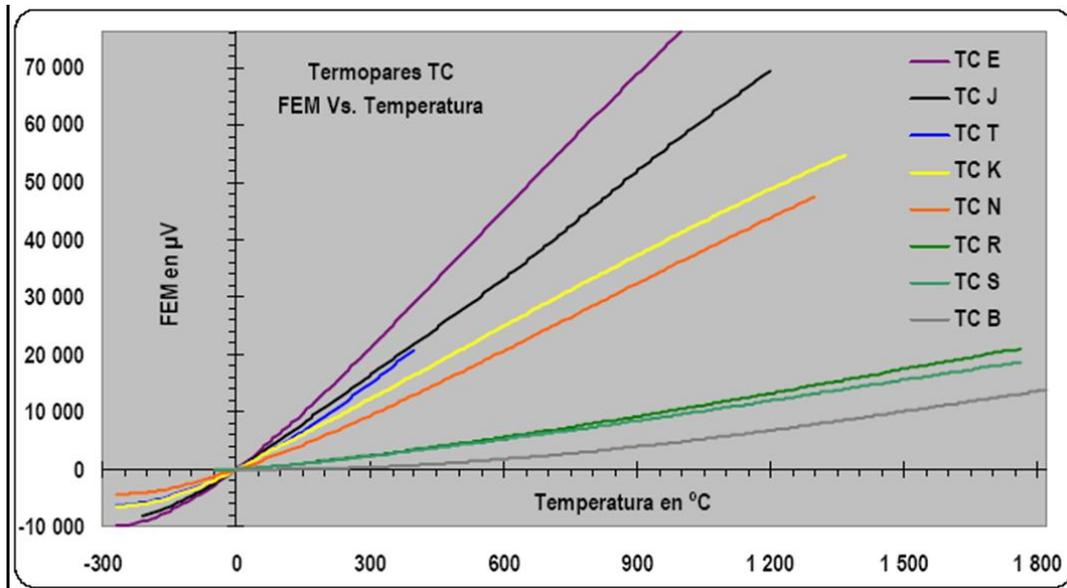


Figura 6.1. Fem en uV Vs Temperatura⁶⁵

En la Figura 6.2 y 6.3 se pueden observar las características de las termocuplas, como naturaleza de los metales, temperatura normal de utilización, código de colores, etc.

⁶⁵ A. Cañar, "Diseño e implementación de un SCADA para la Central Hidroeléctrica La Península", Pág. 41.

SÍMBOLOS	NATURALEZA DE LOS METALES		Temperatura normal de utilización °C	Fuerza electromotriz a 100°C en mV	CODIGO DE COLOR (3) (4)		
	+	-			IEC 584-3 (1989)	ANSI / MC 96-1 (5) (1964)	JIS C 1610 (1995)
T	Cobre	Cobre-Niquel T	- 200°C a + 350°C	4.277			
J	Hierro	Cobre-Niquel J	- 40°C a + 750°C	5.268			
E	Niquel-Cromo	Cobre-Niquel E	- 150°C a + 800°C	6.317			
K	Niquel-Cromo	Niquel-Aleado	- 150°C a + 1100°C	4.095			

Figura 6.2. Características de las termocuplas⁶⁶

N	Niquel-Cromo-Silicio	Niquel-Silicio	- 150°C a + 1100°C	2.774			
R	Platino 13 % Rodio	Platino	0°C a + 1600°C	0.647			
S	Platino 10 % Rodio	Platino	0°C a + 1550°C	0.645			
B	Platino 30 % Rodio	Platino 6 % Rodio	- 600°C a + 1700°C	0.033			
W	Tungsteno	Tungsteno Renio 26 %	0°C a + 2600°C	(a 1000°C) 14.500			
W3	Tungsteno Renio 3 %	Tungsteno Renio 25 %	0°C a + 2100°C	(a 1000°C) 18.257			
W5	Tungsteno Renio 5 %	Tungsteno Renio 26 %	0°C a + 2600°C	(a 1000°C) 18.226			

Figura 6.3. Características de las termocuplas⁶⁷

⁶⁶ A. Cañar, "Diseño e implementación de un SCADA para la Central Hidroeléctrica La Península", Pág. 41.

Las sondas de termocuplas se suministran con uno de los tres tipos de unión:

Puesta a tierra. En la junta de una sonda de unión puesta a tierra, los hilos de la termocupla están físicamente unidos al exterior de la pared de la sonda. Esto da lugar a una buena transferencia térmica desde el exterior, a través de la sonda a la unión de la termocupla. Este tipo se recomienda para la medida de temperaturas de líquidos y gases corrosivos estáticos o en circulación y para aplicaciones de alta presión.

No puesta a tierra. En una sonda no puesta a tierra, la unión de la termocupla está separada de la pared de la sonda. El tiempo de respuesta es inferior al modelo anterior, pero ofrece un elevado aislamiento eléctrico. Se recomienda para las medidas en ambientes corrosivos, en donde sea deseable tener la termocupla electrónicamente aislado de, y protegido por, la cubierta exterior.

Expuesta. La termocupla en forma de unión expuesta sobresale fuera de la junta de la cubierta y queda expuesta al entorno circundante. Este tipo ofrece el mejor tiempo de respuesta, pero está limitado su uso a temperatura de gases conocidos.

- **RTD's (Resistance Temperature Detector).** La medida de temperatura utilizando RTD's, conocidos también como sondas de resistencia, depende de las características de resistencia en función de la temperatura que son propias del elemento de detección. El elemento consiste usualmente en un arrollamiento de hilo muy fino del conductor adecuado bobinado entre capas de material aislante y protegido con un revestimiento de vidrio o de cerámica. El material que forma el conductor se caracteriza por el llamado coeficiente de temperatura de resistencia que expresa a una temperatura especificada, la variación de la resistencia en ohmios del conductor por cada grado que cambia la temperatura.

⁶⁷ A. Cañar, "Diseño e implementación de un SCADA para la Central Hidroeléctrica La Península", Pág. 41.



Figura 6.4. RTD

La variación de la resistencia puede ser expresada de manera polinómica como sigue a continuación. Por lo general, la variación es bastante lineal en márgenes amplios de temperatura.

$$R = R_0 * (1 + \alpha * \Delta T) \quad \text{Ec. 6.1}$$

Donde:

R_0 = es la resistencia a la temperatura de referencia T_0

ΔT = es la desviación de temperatura respecto a T_0 * ($\Delta T = T - T_0$)

α = es el coeficiente de temperatura del conductor especificado a 0°C , interesa que sea de gran valor y constante con la temperatura

Los materiales que forman el conductor de la resistencia deben poseer las siguientes características:

1. Alto coeficiente de temperatura de la resistencia, ya que de este modo el instrumento de medida será muy sensible.
2. Alta resistividad, ya que cuanto mayor sea la resistencia a una temperatura dada tanto mayor será la variación por grado.
3. Relación lineal resistencia-temperatura.

4. Rigidez y ductibilidad, lo que permite realizar los procesos de fabricación de estirado y arrollamiento del conductor en las bobinas de la sonda, a fin de obtener tamaños pequeños (rapidez de respuesta).
5. Estabilidad de las características durante la vida útil del material.

Los materiales que se usan normalmente en los RTD's son el platino y el níquel. En general los RTD's de platino utilizados en la industria tienen una resistencia de 100 ohmios a 0°C.

El cobre tiene una variación de resistencia uniforme, es estable y barato, pero tiene el inconveniente de su baja resistividad. En la Tabla 6.2 a continuación se indican las características de los RTD's de platino, níquel y cobre.

Tabla 6.2. Características de los RTD's⁶⁸

METAL	RESISTIBILIDAD	COEFICIENTE DE TEMP.	INTERVALO UTIL DE TEMP.	COSTO RELATIVO	RESISTENCIA A 0°C
Platino	9.83	0.00385	-200 a 950°C	Alto	25,100,130 ohmios
Níquel	6.38	0.0063 a 0.0066	-150 a 300°C	Medio	100ohmios
Cobre	1.56	0.00425	-200 a 120°C	Bajo	10ohmios

- **Termistores.** Los termistores son semiconductores electrónicos con un coeficiente de temperatura de resistencia negativo de valor elevado, por lo que presentan unas variaciones rápidas y extremadamente grandes para los cambios relativamente pequeños en la temperatura.

La relación entre la resistencia del termistor y la temperatura viene dado por la expresión:

⁶⁸ A. Cañar, "Diseño e implementación de un SCADA para la Central Hidroeléctrica La Península", Pág. 43.

$$R_t = R_0 e^{\beta \left(\frac{1}{T_t} - \frac{1}{R_0} \right)}$$

Ec. 6.2

Donde:

R_t = Resistencia en ohmios a la temperatura absoluta T_t

R_0 = Resistencia en ohmios de un intervalo de temperaturas

β = Constante dentro de un intervalo de temperaturas

Hay que señalar que para obtener una buena estabilidad en los termistores es necesario conectarlos a puentes de Wheastone convencionales o a otros circuitos de medida de resistencia. En intervalos amplios de temperaturas, los termistores tienen características no lineales.

Al tener un alto coeficiente de temperatura poseen una mayor sensibilidad que los RTD's y permiten incluso intervalos de medidas de 1°C (span). Son de pequeño tamaño y su tiempo de respuesta depende de la capacidad térmica de la masa del termistor variando entre fracciones de segundo a minutos.

Los RTD's son los más estables y precisos de los dispositivos considerados. Entre sus desventajas se puede anotar que son más caros. Las ventajas de los termistores son que tienen una gran variación en su salida ante pequeños cambios en la temperatura medida y son rápidos en su reacción ante el cambio. Las desventajas son su no linealidad, tienen un rango de temperatura muy limitado y son frágiles.

6.2.1.3 Ubicación

Se podría pensar que el flujo de las masas de aire caliente determinaría diferentes tipos de temperatura en cada nivel del horno, pero pruebas realizadas demostraron que se puede considerar una temperatura única en el interior del horno, y para apreciación de la misma por parte del sistema de control de temperatura, solo será necesario colocar un sensor de temperatura en la parte central superior del horno puesto que las temperaturas no varían considerablemente a partir de este punto.

Esta arquitectura está diseñada para aprovechar eficientemente los flujos de aire caliente y mantener una temperatura constante en todo el horno. De este modo se puede aprovechar de mejor forma el espacio interno en donde se colocan las bandejas con el arroz, pues todo el producto que se encuentra en el interior del horno se debe secar o envejecer al mismo ritmo y con la misma intensidad sin importar en que parte del porta bandejas se encuentre. En la Figura 6.5 se muestra los puntos y las temperaturas tomadas en las diferentes zonas del horno.

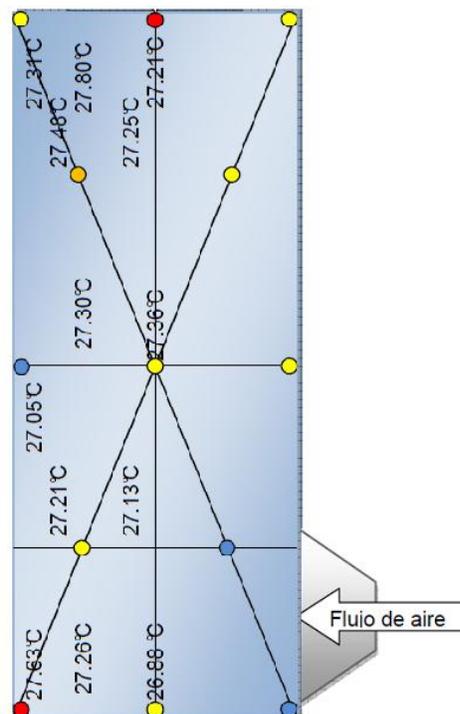


Figura 6.5. Temperatura promedio de secado en cada punto de control

6.2.2 Sensores y transmisores de humedad

Cuando se trabaja con sistemas en los cuales se debe medir humedad se puede obtener instrumentos de medida de humedad en gases y también de humedad en sólidos. Es así que se dispone de higrómetros resistivos los cuales varían su resistencia con el cambio de humedad, también hay sicométricos que se basan en medir la temperatura.

Existan varias clases de medidores de humedad como los de radiación, infrarrojos, conductividad, sensores de polímero, etc. Estos diferentes sensores trabajan en varios rangos por lo que se debe establecer el rango de trabajo del proceso para seleccionar el sensor adecuado.

6.2.2.1 Características y definiciones⁶⁹

Se define como humedad la medida del contenido de agua en la atmósfera. La atmósfera contiene siempre algo de agua en forma de vapor. La cantidad máxima depende de la temperatura; crece al aumentar esta: a 4,4 °C, 1000kg de aire húmedo contienen un máximo de 5kg de vapor; a 37,8 °C, 1000kg de aire contienen 18kg de vapor.

- **Humedad Absoluta.** Es el peso del vapor de agua contenido en un volumen de aire y se expresa en unidades de masa de agua por unidades de masa o volumen de aire seco. Frecuentemente se utiliza la medida de gramos de vapor de agua por metro cúbico de aire.
- **Humedad Relativa.** Es la razón entre el contenido efectivo de vapor en la atmósfera y la cantidad de vapor que saturaría el aire a la misma temperatura. Si la temperatura atmosférica aumenta y no se producen cambios en el contenido de vapor, la humedad absoluta no varía mientras que la relativa disminuye. Una caída de la temperatura incrementa la humedad relativa produciendo rocío por condensación del vapor de agua sobre las superficies solidas.

6.2.2.2 Funcionamiento

6.2.2.2.1 Sensores de humedad en gases y aire⁷⁰

⁶⁹ L. Hernández, "Sistema de control de humedad y temperatura para invernaderos", Pág. 4.

⁷⁰ Cátedra de Instrumentación y Sensores dictada por el Ingeniero Segovia

- **Higrómetro de pelo.** Se basan en la expansión y contracción lineal de ciertos materiales sensibles a las variaciones de humedad como por ejemplo cabellos naturales, fibras de nylon. Tienen una precisión de +/- 3% a +/- 5%. Su rango de funcionamiento es de 15 a 95%RH.

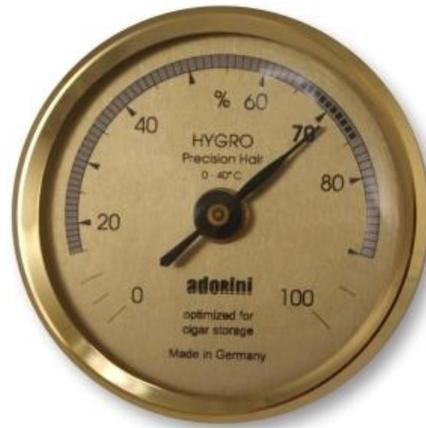


Figura 6.6. Higrómetro de pelo⁷¹

- **Sicrómetro.** Se basa en la captación de la temperatura seca y la temperatura húmeda. Se pueden utilizar RTD's o termistores. Con la medida de la temperatura se debe realizar una lectura en el diagrama sicométrico. Son muy precisos en valores cercanos al 100% RH, pero tienen una mala precisión en valores < 20% RH.
- **Higrómetro resistivo.** Es un elemento cuya resistencia cambia con los cambios en la humedad relativa del aire en contacto con el elemento. Los higrómetros resistivos generalmente consisten en dos electrodos de cinta metálica en una forma de plástico. Los electrodos no se tocan, y están aislados eléctricamente entre ellos por la forma de plástico. Se usa entonces una solución de cloruro de litio para recubrir por completo todo el dispositivo. A medida que la humedad relativa del aire circundante aumenta, la película de cloruro de litio absorbe más vapor de agua del aire. Esto hace que su

⁷¹ Cátedra de Instrumentación y Sensores dictada por el Ingeniero Segovia

resistencia disminuya marcadamente. La resistencia entre las terminales puede relacionarse entonces con la humedad relativa

Tiene una precisión de +/- 2 a +/-3 % RH y tiene un rango de trabajo de 5 a 95% RH.

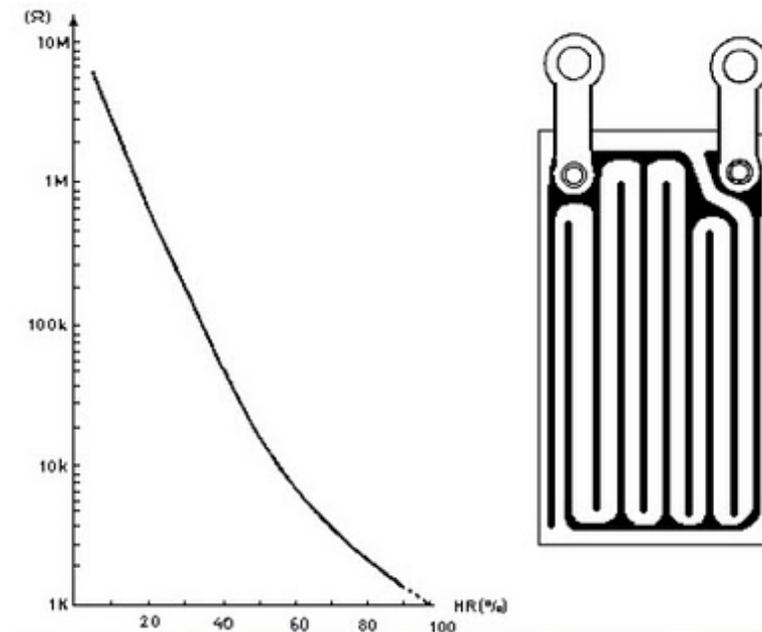


Figura 6.7. Higrómetro resistivo⁷²

- **Sensor de polímero.** Formado por una rejilla conductora con una base de poliestireno tratada con ácido sulfúrico. Tiene un rango de trabajo de 30 a 90% RH. Este sensor cambia la resistencia debido a que el radical sulfato (SO_4) libera o absorbe iones de H^+ de la humedad del ambiente. La característica más importante de este sensor es que es lineal.

6.2.2.2.2 Sensores de humedad en sólidos⁷³

⁷² Cátedra de Instrumentación y Sensores dictada por el Ingeniero Segovia

⁷³ Cátedra de Instrumentación y Sensores dictada por el Ingeniero Segovia

- **Medidor de secado térmico.** Consiste en aplicar calor al material sólido, granular, fibroso, hasta que no pueda liberarse más agua a no ser que se aumente la temperatura.
- **Medidor de conductividad.** Se basa en la medida de la conductividad de una muestra del producto al pasar una corriente a través de los electrodos en contacto con el mismo. Se acondiciona con puente de Wheatstone.
- **Medidor de infrarrojos.** Se basa en aplicar un haz de rayos hacia la superficie del material objeto de la medición. La onda esta seleccionada de modo que el agua contenida en el objeto absorbe la máxima radiación infrarroja y el objeto la mínima. Un detector capta la radiación que atraviesa el material e indica el % RH.

6.2.2.3 Ubicación

El sensor de humedad será colocado junto al sensor de temperatura en el centro del horno en la parte alta, sujeto al techo del horno. Al igual que la temperatura la humedad no varía considerablemente en todos los puntos del horno gracias a la arquitectura del mismo.

6.2.3 Transmisor de humedad absoluta y de temperatura



Figura 6.8. Transmisor de humedad absoluta y de temperatura

El HD3817T y el HD38V17T son transmisores activos de humedad absoluta y de temperatura de doble canal con salidas de corriente 4...20mA o de tensión 0...10Vdc, respectivamente.

Los transmisores pertenecientes al grupo HD3817T...se emplean en el control de la humedad en los materiales durante el proceso de secado o desecación. Cuando los materiales son secados mediante calefacción o a través de un flujo de aire caliente, el aumento de la humedad absoluta del aire, es directamente proporcional a la cantidad de agua que ha perdido el material.

Este tipo de sensor es inmune a la mayor parte de agentes contaminantes de naturaleza física o química. Los rangos de medición máximos son: 0...130g/m³ para la humedad absoluta y -50...200°C para la temperatura.

6.3 ELEMENTOS FINALES DE CONTROL⁷⁴

Los elementos finales de control son los dispositivos encargados de transformar una señal de control en un flujo de masa o energía (variable manipulada). Es esta variable manipulada la que incide en el proceso causando cambios de la variable controlada. Para ajustar el flujo de fluidos en una línea existen básicamente dos mecanismos:

- Modificar la energía entregada al fluido (bombas y ventiladores de velocidad variable)
- Modificar la resistencia al paso del fluido (válvulas, registros en ductos de gases)

6.3.1 Válvulas de control

⁷⁴ L. Hernández, "Sistema de control de humedad y temperatura para invernaderos", Pág. 45.

6.3.1.1 Características

La válvula de control es básicamente un orificio variable por efecto de un actuador. Constituye el elemento final de control en más del 90% de las aplicaciones industriales. Estos elementos utilizan una señal externa que puede ser neumática o eléctrica y posteriormente transformada en una tipo mecánica que incide en el dispositivo de control de la válvula, como se muestra en la Figura 6.9.

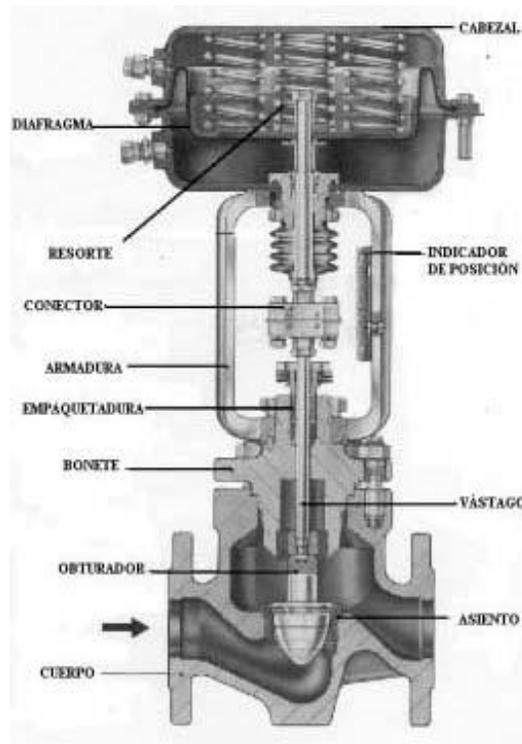


Figura 6.9. Partes de una válvula de control⁷⁵

A estos elementos los podemos considerar constituidos por dos partes:

Actuador. Recibe la señal del controlador y la transforma en un desplazamiento (lineal o rotacional) merced a un cambio en la presión ejercida sobre el diafragma.

⁷⁵ L. Hernández, "Sistema de control de humedad y temperatura para invernaderos", Pág. 46.

Cuerpo. El diafragma está ligado a un vástago o eje que hace que la sección de pasaje del fluido cambie y con esta el caudal. Con un diagrama de bloques, como se ilustra en la Figura 6.10, se puede representar a la válvula como un sistema en serie.

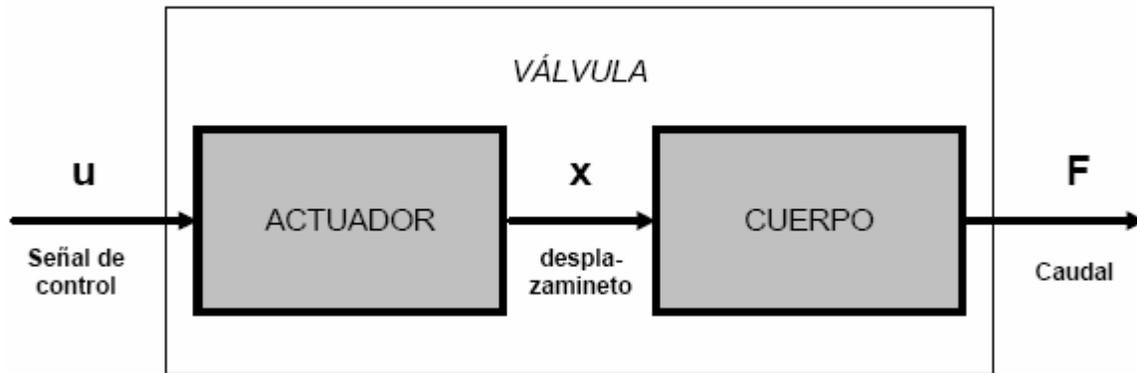


Figura 6.10. Representación en diagrama de bloques de una válvula de control⁷⁶

6.3.1.2 Funcionamiento

Existen diversos tipos de cuerpos, que se adaptan a la aplicación, considerándose por estas características, válvulas de movimiento lineal y de movimiento rotatorio.

Cabe señalar que las válvulas de control pueden ser on-off y proporcionales.

- **Válvula tipo globo.** Su aplicación está limitada para fluidos con partículas en suspensión y sus diámetros llegan hasta las 24 pulgadas. Está disponible en diversos modelos como simple y doble asiento, guiado en caja, entre otras. Las de simple asiento requieren de un actuador de mayor tamaño de tal modo que el obturador cierre en contra de la presión diferencial del proceso, como se ilustra en la Figura 6.11. Estas se utilizan cuando la presión del fluido es

⁷⁶ L. Hernández, "Sistema de control de humedad y temperatura para invernaderos", Pág. 46.

baja y se necesita que las fugas en cierre sean bajas. Las válvulas de doble asiento se utilizan cuando se precise alta presión diferencial en el fluido.

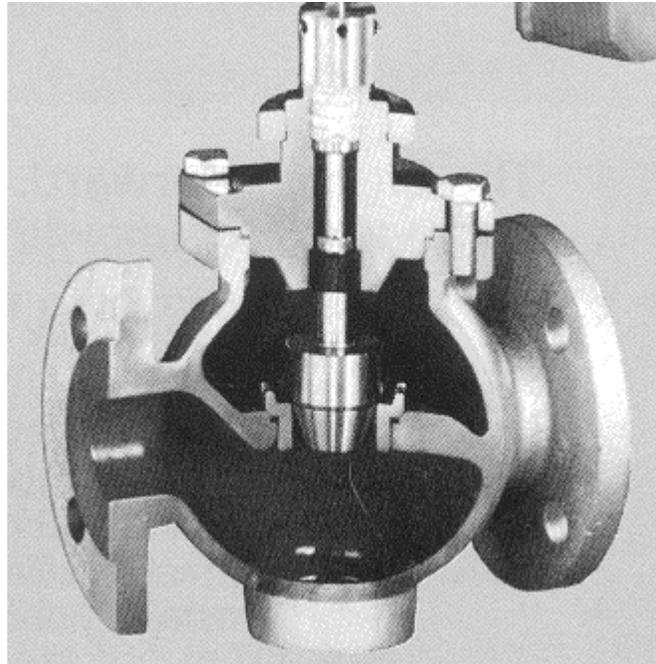


Figura 6.11. Válvula tipo globo⁷⁷

- **Válvula tipo mariposa.** Este elemento tiene un cuerpo en forma de anillo cilíndrico y en su interior gira un disco circular, cuyo eje de giro es controlado por un servomotor, como muestra la Figura 6.12. Existe una buena disponibilidad para diferentes diámetros desde 2 hasta 150". Las desventajas de estos elementos son su susceptibilidad a cavitación, ruido y el cierre hermético requiere de recubrimientos especiales. Su ventaja es la baja pérdida de carga dentro del proceso.

⁷⁷ L. Hernández, "Sistema de control de humedad y temperatura para invernaderos", Pág. 48.



Figura 6.12. Válvula tipo mariposa⁷⁸

- **Válvula tipo esférica.** Este tipo de elemento tiene cuerpo esférico que alberga un obturador en forma de esfera, cuyo corte gira transversalmente bajo la acción de un servomotor, como se observa en la Figura 6.13. Esta válvula es apta para el manejo de suspensiones muy viscosas o con fibras y sólidos y utilizada por lo común en control todo o nada, su rangeabilidad típica es de 50:1 y su desventaja es que necesita ser extraída de la línea del proceso para su mantenimiento.



Figura 6.13. Válvula tipo esférica⁷⁹

⁷⁸ L. Hernández, "Sistema de control de humedad y temperatura para invernaderos", Pág. 48.

- **Válvula tipo tapón.** Este tipo de elemento efectúa su movimiento de obturación con un disco plano, que se mueve verticalmente al flujo del fluido como se ilustra en la Figura 6.14. Requiere de motores de gran tamaño y de posicionadores para su funcionamiento y por su disposición es generalmente adecuada para control todo o nada porque en posiciones intermedias tiende a bloquearse. Su rangeabilidad también se encuentra en 50:1.

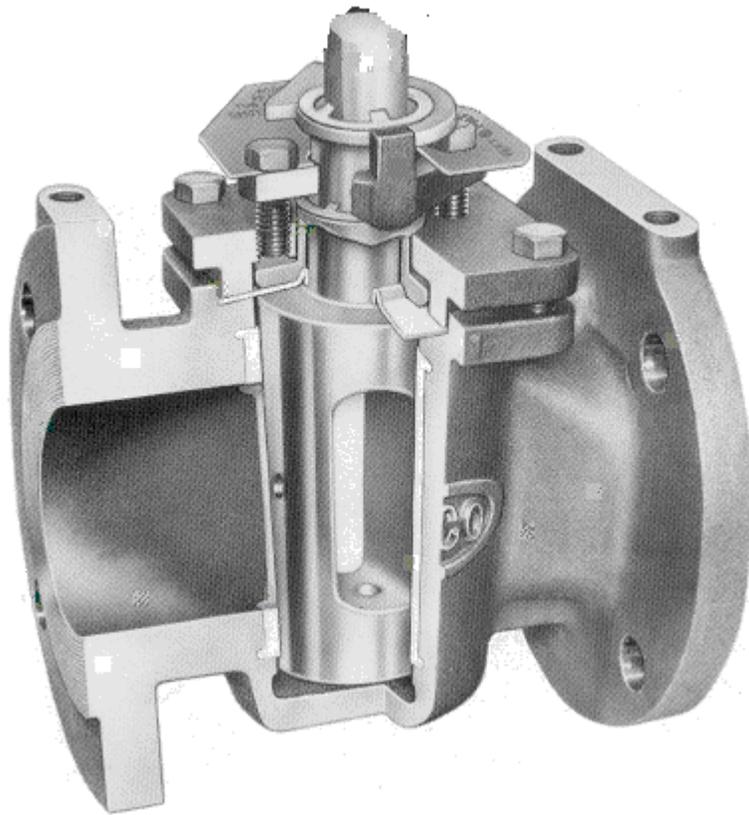


Figura 6.14. Válvula tipo tapón⁸⁰

- **Válvula tipo Saunders.** Este elemento es ampliamente usado para el manejo de fluidos corrosivos o erosivos. Su construcción es simple y consiste en un diafragma que mueve un pistón, contiene un cierre hermético y las partes móviles no tienen contacto con el fluido, como se muestra en la Figura 6.15.

⁷⁹ L. Hernández, "Sistema de control de humedad y temperatura para invernaderos", Pág. 49.

⁸⁰ L. Hernández, "Sistema de control de humedad y temperatura para invernaderos", Pág. 49.

Su rango está limitado para presiones y temperaturas de trabajo elevadas y su rangeabilidad se encuentra entre 3:1 a 15:1.

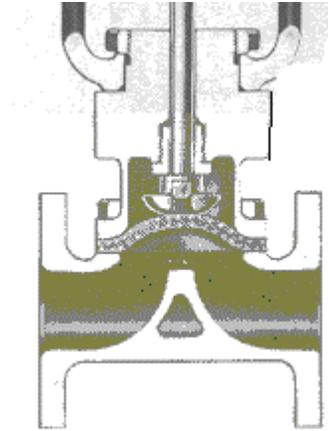


Figura 6.15. Válvula tipo Saunders⁸¹

6.3.2 Ventilador de velocidad variable⁸²

6.3.2.1 Características

Un ventilador es una máquina rotativa que pone el aire, o un gas, en movimiento. Se puede definir también como una turbomáquina que transmite energía para generar la presión necesaria para mantener un flujo continuo de aire.

Dentro de una clasificación general de máquinas, los ventiladores son turbomáquinas hidráulicas, tipo generador, para gases. Un ventilador consta en esencia de un motor de accionamiento, generalmente eléctrico y un propulsor giratorio, en este caso centrífugo, en contacto con el aire, al que le transmite energía. Este propulsor adopta la forma de rodete con alabes, en el caso del tipo centrífugo, o de una hélice con palas de silueta y un número diverso, en el caso de los axiales. El

⁸¹ L. Hernández, "Sistema de control de humedad y temperatura para invernaderos", Pág. 50.

⁸² www.unet.edu.ve/~maqflu/doc/LAB-1-128.htm, Ventilador de velocidad variable

conjunto, o por lo menos el rodete o la hélice, van envueltos por una caja con paredes de cierre en forma de espiral para los centrífugos.

6.3.2.2 Funcionamiento

El ventilador recibe la energía mecánica del motor al que se encuentra acoplado y produce una corriente de aire mediante un rodete con alabes que giran produciendo una diferencia de presiones.

Ventiladores centrífugos. En los ventiladores centrífugos la trayectoria del fluido sigue la dirección del eje del rodete a la entrada y esta perpendicular al mismo a la salida. Si el aire a la salida se recoge perimetralmente en una voluta, entonces se dice que el ventilador es de voluta.

Estos ventiladores tienen tres tipos básicos de rodetes:

1. Alabes curvados hacia adelante
2. Alabes rectos
3. Alabes inclinados hacia atrás/curvados hacia atrás

En la Figura 6.16 puede observarse la disposición de las alabes.

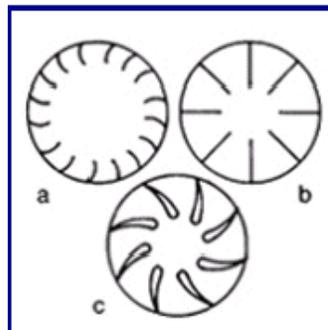


Figura 6.16. Ventiladores centrifugados de alabes curvados hacia adelante, radiales y atrás⁸³

⁸³ www.unet.edu.ve/~maqflu/doc/LAB-1-128.htm, Ventilador de velocidad variable

1. **Ventiladores de alabes curvados hacia adelante.** (también se llaman de jaula de ardilla) tienen una hélice o rodete con las alabes curvadas en el mismo sentido que la dirección de giro. No es recomendable utilizar este tipo de ventilador con aire polvoriento, ya que las partículas se adhieren a los pequeños alabes curvados y pueden provocar el desequilibrio del rodete.

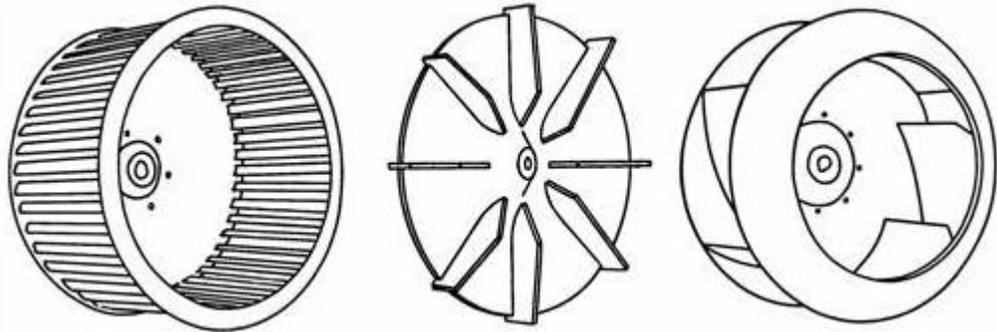


Figura 6.17. Ventiladores centrífugos con alabes curvados⁸⁴

2. **Ventiladores centrífugos radiales.** Tienen el rodete con las alabes dispuestas en forma radial. La carcasa está diseñada de forma que a la entrada y a la salida se alcancen velocidades de transporte de materiales. Este tipo de ventilador es el comúnmente utilizado en las instalaciones de extracción localizada en las que el aire contaminado con partículas debe circular a través del ventilador.
3. **Ventiladores centrifugados de alabes curvados hacia atrás.** Tienen un rodete con las alabes inclinadas en sentido contrario al de rotación. Este tipo de ventilador es el de mayor velocidad periférica y mayor rendimiento con un nivel sonoro relativamente bajo y una característica de consumo de energía del tipo "no sobrecargable".

6.3.3 Motor eléctrico⁸⁵

⁸⁴ www.unet.edu.ve/~maqflu/doc/LAB-1-128.htm, Ventilador de velocidad variable

⁸⁵ L. Hernández, "Sistema de control de humedad y temperatura para invernaderos", Pág. 55.

Estos motores son máquinas eléctricas que convierten la energía eléctrica de alimentación del motor en energía mecánica que es entregada en su eje. Los motores de los ventiladores son generalmente de tipo asíncrono, y más concretamente de jaula de ardilla. El principio de funcionamiento de los motores asíncronos está basado en la producción de un campo magnético giratorio. Estos motores eléctricos están formados por un rotor, que corresponde a la parte móvil y un estator, que es la parte fija del motor y el campo del estator.

En estos motores el par de arranque es proporcional al cuadrado de la tensión, aumenta cuando la tensión es más elevada. La intensidad en el arranque es proporcional a la tensión de alimentación.

La velocidad en los motores asíncronos no está influenciada por las variaciones de tensión siempre que el motor este en vacío, pero si es proporcional a la frecuencia e inversamente proporcional al número de polos que constituye el estator.

$$N = \frac{60*f}{P} \quad \text{Ec. 6.3}$$

Donde:

N = Representa la velocidad de sincronismo [r.p.m]

f = Representa la frecuencia [Hz]

P = Representa el número de pares e polos

Para las frecuencias industriales de 50Hz y 60Hz, las velocidades de rotación del campo giratorio o de sincronismo, en función del número de pares de polos del estator, se representa en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3. Velocidades de rotación del campo giratorio⁸⁶

P	50Hz	60Hz
1	3000 r.p.m	3600 r.p.m
2	1500 r.p.m	1800 r.p.m
3	1000 r.p.m	1200 r.p.m
4	750 r.p.m	900 r.p.m
5	600 r.p.m	720 r.p.m
6	500 r.p.m	600 r.p.m

6.3.4 Quemadores⁸⁷

Los quemadores son los equipos donde se realiza la combustión, por tanto deben contener los tres vértices del triángulo de combustión, es decir que deben lograr la mezcla íntima del combustible con el aire.

Por la forma en que toman el aire de combustión se distinguen dos tipos de quemadores:

1. Quemadores atmosféricos
2. Quemadores mecánicos

1. **Quemadores Atmosféricos.** Únicamente se emplean para combustibles gaseosos. Una parte del aire necesario para la combustión (aire primario) se induce en el propio quemador por el chorro de gas salido de un inyector (efecto Venturi); el aire restante (aire secundario) se obtiene por difusión del aire ambiente alrededor de la llama.

⁸⁶ L. Hernández, "Sistema de control de humedad y temperatura para invernaderos", Pág. 56.

⁸⁷ R. García, "QUEMADORES", Pág. 3

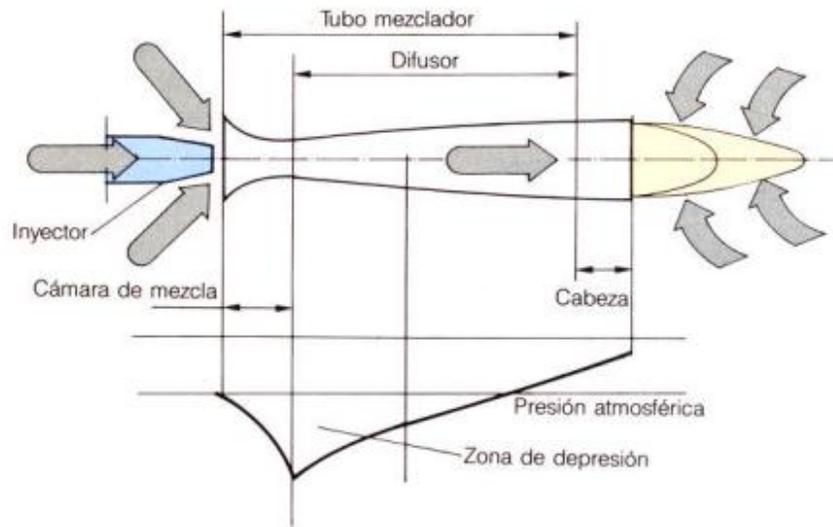


Figura 6.18. Esquema de funcionamiento de un quemador atmosférico⁸⁸

La principal ventaja de este sistema es su simplicidad y bajo coste. Aunque se pueden fabricar para potencias unitarias altas.

La regulación del aire (con gas a presión constante) se puede conseguir:

- Variando la sección de entrada de aire, por obturación de los orificios por donde entra, mediante discos roscados, anillo móvil o capuchón deslizante.
- Por deslizamiento de la boquilla del inyector respecto del Venturi.

Lo más habitual es que únicamente se module la válvula de gas, dejando en una posición fija la entrada de aire en la puesta en marcha.

⁸⁸ R. García, "QUEMADORES", Pág. 4

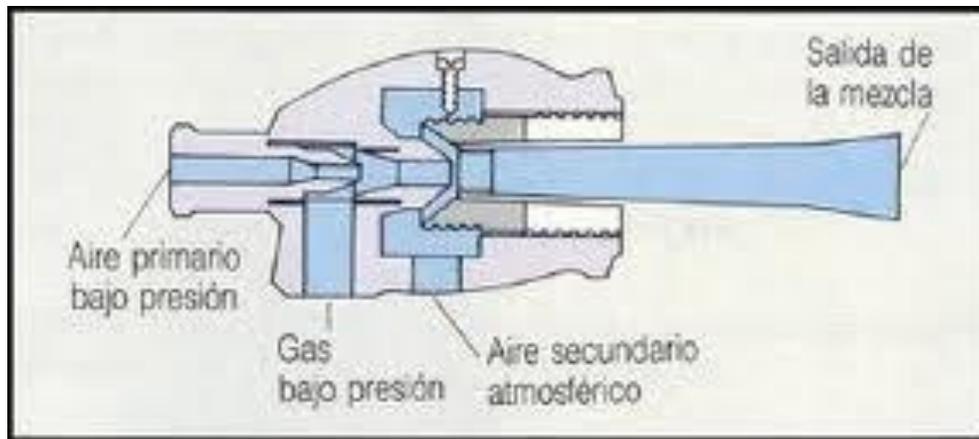


Figura 6.19. Esquema de regulación de quemadores atmosféricos⁸⁹

2. Quemadores Mecánicos. También se denominan como quemadores a sobrepresión; el aire de combustión es introducido mediante un ventilador, existen diversos sistemas para lograr la mezcla del aire con el combustible.

En el caso del gas, el combustible se introduce mediante los inyectores, aprovechando la propia presión de suministro. La combustión puede ajustarse actuando sobre el gasto de combustible, sobre la cantidad de aire a impulsar y sobre los elementos que producen la mezcla; por lo que es posible obtener rendimientos de combustión muy altos.

Por el número de escalones de potencia que producen, se distinguen los siguientes tipos de quemadores:

- **De una marcha.** Son quemadores que solo pueden funcionar con la potencia a la que hayan sido regulados, son quemadores de pequeña potencia.
- **De varias marchas.** Son quemadores con dos o más escalones de potencia (habitualmente dos); es decir, que pueden funcionar produciendo potencias distintas.
- **Modulantes.** Estos quemadores ajustan continuamente la relación aire-combustible, de manera que puedan trabajar con rendimientos elevados en

⁸⁹ R. García, "QUEMADORES", Pág. 4

una amplia gama de potencias; adecuándose de manera continua a las necesidades de producción.

En la Tabla 6.4 se indica el número de marchas de los quemadores en función de la potencia de los generadores.

Tabla 6.4. Marchas de los quemadores⁹⁰

Potencia del generador de calor (kW)	Tipo de regulación del quemador
$P \leq 100$	una marcha (todo-nada)
$100 < P \leq 800$	dos marchas (todo-poco-nada)
$800 < P$	Modulante

En las siguientes Figuras 6.20 y 6.21 se puede observar 2 tipos de quemadores mecánicos

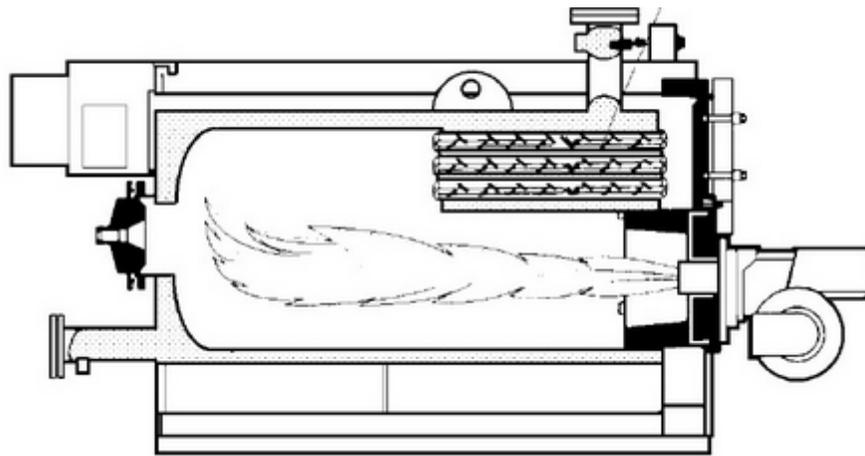


Figura 6.20. Quemador mecánico de gasóleo⁹¹

⁹⁰ R. García, "QUEMADORES", Pág. 4

⁹¹ R. García, "QUEMADORES", Pág. 5

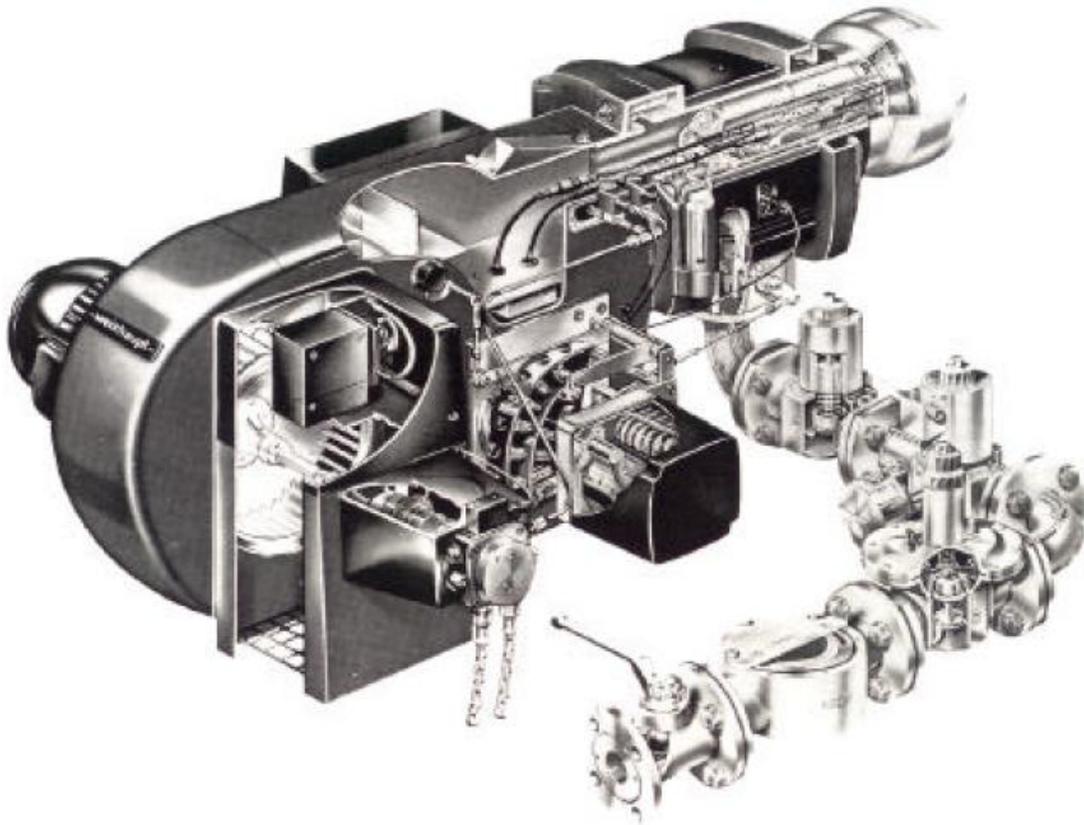


Figura 6.21. Quemador mecánico policombustible modulante⁹²

6.3.5 Variador de frecuencia⁹³

6.3.5.1 Características

Es un sistema para el control de la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna (AC) por medio del control de la frecuencia de alimentación suministrada al motor. Un variador de frecuencia es un caso especial de variador de velocidad. Los variadores de frecuencia son también conocidos como drivers de frecuencia ajustable (AFD), drivers de CA, microdrivers o inversores. Dado que el voltaje es variado a la vez que la frecuencia, a veces son llamados drivers VVF (variador de voltaje variador de frecuencia).

⁹² R. García, "QUEMADORES", Pág. 5

⁹³ www.unet.edu.ve/~maqflu/doc/LAB-1-128.htm, Variadores de frecuencia



Figura 6.22. Variador de frecuencia⁹⁴

6.3.5.2 Funcionamiento

Los dispositivos variadores de frecuencia operan bajo el principio de que la velocidad asíncrona de un motor de corriente alterna (CA) está determinada por la frecuencia de CA suministrada y el número de polos en el estator. De acuerdo con la relación:

$$RPM = \frac{60 \cdot f}{p} \quad \text{Ec. 6.4}$$

Donde:

RPM = Revoluciones por minuto

f = Frecuencia de suministro

⁹⁴ www.unet.edu.ve/~maqflu/doc/LAB-1-128.htm, Variadores de frecuencia

p = Número de polos

En los motores asíncronos las revoluciones por minuto son ligeramente menores por el propio asincronismo que indica su nombre. En estos se produce un desfase mínimo entre la velocidad de rotación (RPM) del motor (velocidad real o de salida) comparativamente con la cantidad de RPM's del campo magnético (las cuales si deberían cumplir la ecuación 6.4 tanto en motores síncronos como en motores asíncronos) debido a que solo es atraído por el campo magnético exterior que lo aventaja siempre en velocidad.

6.3.5.3 Descripción del VFD

Un sistema de variador de frecuencia (VFD) consiste generalmente en un motor CA, un controlador y una interfaz operadora.

Motor del VFD. El motor usado en un sistema VFD es normalmente un motor de inducción trifásico. Algunos tipos de motores monofásicos pueden ser igualmente usados, pero los motores de tres fases son normalmente preferidos. Varios tipos de motores síncronos ofrecen ventajas en algunas situaciones, pero los motores de inducción son más apropiados para la mayoría de propósitos.

Controlador del VFD. El controlador del dispositivo de variación de frecuencia está formado por dispositivos de conversión electrónicos de estado sólido. El diseño habitual primero convierte la energía de entrada CA en CC usando un puente rectificador. La energía intermedia CC es convertida en una señal quasi-senoidal de CA usando un circuito inversor conmutado. El rectificador es usualmente un puente trifásico de diodos, pero también se usan rectificadores controlados. Debido a que la energía es convertida en continua, muchas unidades aceptan entradas tanto monofásicas como trifásicas (actuando como un convertidor de fase, un variador de velocidad).

Actualmente, los transistores bipolares de puerta aislada (IGBT's) son usados en la mayoría de circuitos inversores.

Las características del motor CA es que requieren variación proporcional del voltaje cada vez que la frecuencia es variada. Por ejemplo, si un motor está diseñado para trabajar a 460 voltios a 60Hz, el voltaje aplicado debe reducirse a 230 voltios cuando la frecuencia es reducida a 30Hz. Así la relación V/Hz debe ser regulada en un valor constante ($460/60=7.67$ V/Hz en este caso). El método más novedoso y extendido en nuevas aplicaciones es el control de voltaje por PWM.

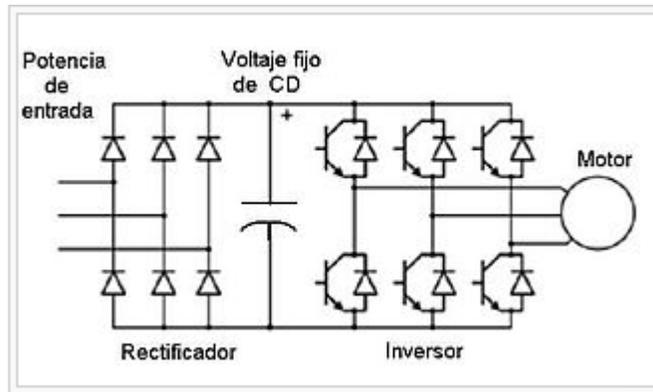


Figura 6.23. Diagrama de variador de frecuencia con modulación de ancho de pulso (PWM)⁹⁵

6.3.6 Motor de corriente continua con caja reductora⁹⁶

Es una maquina que convierte la energía eléctrica en mecánica, principalmente mediante el movimiento rotatorio. Esta máquina de corriente continua es una de las más versátiles en la industria. Su fácil control de posición, paro y velocidad la han convertido en una de las mejores opciones en aplicaciones de control y automatización de procesos. Los motores de corriente continua son utilizados en muchas aplicaciones de potencia (trenes y tranvías) o de precisión (maquinas, micro motores, etc).

⁹⁵ www.unet.edu.ve/~maqflu/doc/LAB-1-128.htm, Variadores de frecuencia

⁹⁶ www.unet.edu.ve/~maqflu/doc/LAB-1-128.htm, Motor de corriente continua



Figura 6.24. Motores de CC⁹⁷

6.3.6.1 Componentes

Una maquina de corriente continua (generador o motor) se compone principalmente de dos partes, un estator que da soporte mecánico al aparato y tiene un hueco en el centro generalmente de forma cilíndrica. En el estator además se encuentran los polos, que pueden ser de imanes permanentes o devanados con hilo de cobre sobre núcleo de hierro. El rotor es generalmente de forma cilíndrica, también devanado y con núcleo, al que llega la corriente mediante dos escobillas.

6.3.6.2 Funcionamiento

Según la Ley de Lorentz, cuando un conductor por el que pasa una corriente eléctrica se sumerge en un campo magnético, siguiendo la regla de la mano derecha, con modulo:

$$F = B * l * I$$

Ec. 6.5

Donde:

⁹⁷ www.unet.edu.ve/~maqflu/doc/LAB-1-128.htm, Motor de corriente continua

F = Es la fuerza en newton

I = Es la intensidad que recorre el conductor en amperios

l = Es la longitud del conductor en metros lineales

B = Es la densidad de campo magnético o densidad de flujo teslas

El rotor no solo tiene un conductor, sino varios repartidos por la periferia. A medida que gira, la corriente se activa en el conductor apropiado.

Normalmente se aplica una corriente con sentido contrario en el extremo opuesto del rotor, para compensar la fuerza neta y aumentar el momento.

El sentido de giro de un motor de corriente continua depende del sentido relativo de las corrientes circulares por los devanados inductor e inducido.

6.3.6.3 Caja reductora⁹⁸

Es un mecanismo que consiste, generalmente, en un grupo de engranajes, con el que se consigue mantener la velocidad de salida en un régimen cercano al ideal para el funcionamiento del generador.

Usualmente una caja reductora cuenta con un tornillo sin fin el cual reduce en gran cantidad la velocidad.

⁹⁸ www.unet.edu.ve/~maqflu/doc/LAB-1-128.htm, Caja reductora

CAPÍTULO 7

DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

Al llevar a cabo la función de control, el controlador automático usa la diferencia entre el valor de consigna y las señales de medición para obtener la señal de salida hacia el elemento de control. La precisión y capacidad de respuesta de estas señales es la limitación básica en la habilidad del sistema para controlar correctamente la medición. Si el sensor/transmisor no envía una señal precisa, o si existe un retraso en la medición de la señal, la destreza del controlador para manipular el proceso será degradada. Al mismo tiempo, el controlador debe recibir una señal de valor de consigna precisa conocida comúnmente como setpoint.

Para que un sistema de control sea calificado como funcional, se debe considerar los siguientes criterios para su diseño⁹⁹:

- **Estabilidad.** Debe ser estable considerando que un sistema es estable para una entrada suficientemente acotada la salida es también acotada.
- **Precisión.** La precisión es un valor estadístico y no es equivalente a la exactitud. Exactitud es el grado de correspondencia con un valor verdadero, que se supone que existe y su valor es absoluto. Precisión es el resultado de una sucesión de ensayos bajo las mismas condiciones, misma entrada, y se lo

⁹⁹ C. Vallejo, "Diseño y Simulación del Sistema de Control y Monitoreo de Nivel y Flujo de Agua para el Proceso de Perforación en la Fase de Exploración Minera del Proyecto IAMGOLD Quimsacocha", Pág. 106.

pondera mediante una curva que ilustra la dispersión de los resultados en base a su variación y por esta razón, su valor es estadístico.

- **Velocidad de respuesta.** Es la velocidad con la que el sistema se recupera del efecto de una perturbación. De este concepto surge que si se busca mayor velocidad de retorno a la condición en que estaba antes de ser perturbado, se debe aplicar acciones correctivas más fuertes.
- **Rapidez del sistema controlador frente al sistema controlado.** Se establece como el tiempo que requiere el sistema controlador, desde que detecta un cambio en la variable directamente controlada, hasta que actúa mediante el elemento de control.
- **Sensibilidad.** Este criterio explica la dependencia de una variable con respecto a otra, puesto que en un sistema existen variables, manipuladas, otras controladas y otras perturbadoras, es inevitable que la acción de una repercuta sobre las otras, por ello la necesidad de conocer e identificar cada variable a fin de conocer su naturaleza antes mencionada.

7.1 CARACTERIZACION DEL PROCESO¹⁰⁰

7.1.1 Selección de la acción del controlador

Dependiendo de la acción en el elemento final de control, un incremento en la variable medida puede requerir incrementos o disminuciones del valor de salida para el control del proceso. Todos los controladores pueden ser conmutados entre una acción directa o reversa; la acción directa significa que cuando el controlador ve un incremento de señal desde el transmisor, su salida se incrementa; mientras que la acción inversa significa que un incremento en las señales de medición hacen que la señal de salida disminuya. Para determinar cuál de estas salidas es correcta, debe ser llevado a cabo un análisis en los lazos de control del proceso.

¹⁰⁰ C. Vallejo, "Diseño y Simulación del Sistema de Control y Monitoreo de Nivel y Flujo de Agua para el Proceso de Perforación en la Fase de Exploración Minera del Proyecto IAMGOLD Quimsacocha", Pág. 108.

El primer paso es determinar las acciones de los elementos de control, que corresponden al variador de frecuencia, el ventilador, el quemador y el motor monofásico. Por razones de seguridad en la apertura del gas hacia el quemador se debe incluir, a parte de la electroválvula, una válvula de accionamiento manual.

En el segundo paso, se considera el efecto de un cambio en la medición de la temperatura en el interior del horno. Si es necesario incrementar la temperatura la temperatura en el interior del horno, la medición indicara la disminución de la temperatura, por tanto, la señal del controlador automático hacia el blower debe aumentar, es decir el controlador requiere acción inversa.

7.1.2 Variaciones

Cualquiera de los siguientes eventos podría ocurrir requiriendo una temperatura diferente en el proceso de secado o envejecido de arroz.

Primero. Si la posición de la válvula manual fuera cerrada ligeramente, entonces un flujo menor de gas afectaría al sistema, haciendo que el proceso caiga. Este es un cambio bajo demanda, y para restaurar el balance, el blower de control con accionamiento eléctrico, el sensor/transmisor y la válvula manual deberán ser colocados correctamente.

Segundo. Otra condición de desbalance sería un cambio en el valor de consigna o setpoint.

Tercero. Otro tipo de variación sería las diferentes temperaturas del ambiente, haciendo que el horno alcance la temperatura de consigna de forma rápida, en temperaturas altas, y de forma lenta, en temperaturas muy bajas, por lo que se debe considerar esta variación repentina con un controlador rápido que garantice el control de temperatura en el sistema.

7.1.3 Características del proceso y controlabilidad¹⁰¹

El controlador automático usa cambios de velocidad del actuador final para controlar la señal de medición, moviendo el actuador para oponerse a cualquier cambio que observe en la señal de medición. La controlabilidad de cualquier proceso es función de lo bien que una señal de medición responde a estos cambios en la salida del controlador; para un buen control la medición debería comenzar a responder en forma rápida, pero luego no cambiar rápidamente.

Todos los procesos pueden ser descritos por una relación entre las entradas y las salidas. Por lo general, en los procesos no hay una respuesta inmediata en la indicación de la variable al inicio del sistema de control, luego la respuesta comienza a cambiar, se eleva rápidamente y se aproxima al final a un nivel constante. El proceso puede ser caracterizado por dos elementos de su respuesta, el primero es el tiempo muerto, o sea el tiempo antes de que la medición comience a responder. El tiempo muerto es una función de las dimensiones físicas de un proceso y parámetros tales como las velocidades de respuesta de los instrumentos y de sus regímenes de trabajo. El segundo elemento de respuesta que se caracteriza en la capacidad de un proceso, es el material o energía que debe ingresar o abandonar el proceso para cambiar las mediciones, por ejemplo, El volumen de aire caliente necesario para cambiar la temperatura del horno; la medición de una capacidad es su respuesta para un paso de entrada. Específicamente, el tamaño de una capacidad es medida por una constante de tiempo, que es definido como el necesario para completar el 63% de su respuesta total.

La constante de tiempo es una función del tamaño del proceso y del régimen de transferencia de material o energía. Para el caso del sistema de este proyecto, cuanto más grande sea el horno y menor el caudal de aire requerido para el proceso, mayor será la constante de tiempo. Combinamos con el tiempo muerto, los mismos definen cuanto tiempo lleva para que la señal responda a cambios de los elementos

¹⁰¹ C. Vallejo, "Diseño y Simulación del Sistema de Control y Monitoreo de Nivel y Flujo de Agua para el Proceso de Perforación en la Fase de Exploración Minera del Proyecto IAMGOLD Quimsacocha", Pág. 109.

de control. Un proceso puede comenzar a responder rápidamente, pero no cambiar muy rápido si su tiempo muerto es pequeño y su capacidad muy grande. En resumen cuanto mayor sea la constante de tiempo de la capacidad comparada con el tiempo muerto, mejor será la controlabilidad de proceso.

7.1.4 Variable¹⁰²

Se define como variable a todo aquel parámetro físico cuyo valor puede ser medido, controlado y modificado en sus cuantificaciones. En el control de procesos se definen las siguientes variables ilustradas en la Figura 7.1:

- **Variable Controlada.** Es aquella que se busca mantener constante o con cambios mínimos. Su valor debe seguir al valor de consigna o setpoint.
- **Variable Manipulada.** A través de esta se debe corregir el efecto de las perturbaciones. Sobre esta se colocara el actuador.
- **Variable Perturbadora.** Esta dado por los cambios repentinos que sufre el sistema y que provocan inestabilidad.
- **Variable Medida.** Es toda variable adicional, cuyo valor es necesario registrar y monitorear, pero que no es necesario controlar.

¹⁰² C. Vallejo, "Diseño y Simulación del Sistema de Control y Monitoreo de Nivel y Flujo de Agua para el Proceso de Perforación en la Fase de Exploración Minera del Proyecto IAMGOLD Quimsacocha", Pág. 110.

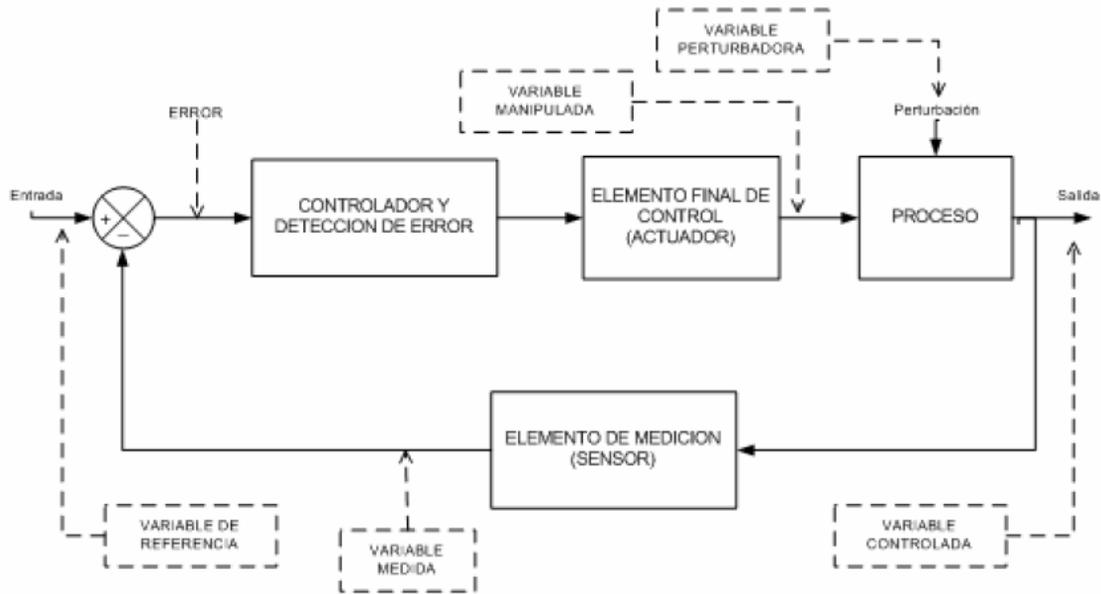


Figura 7.1. Variables en el control automático de procesos¹⁰³

7.1.5 Modelamiento matemático

Existen métodos a través de los cuales los sistemas de control pueden ser representados por medio de funciones matemáticas, esta representación recibe el nombre de modelamiento matemático, este modelo describirá las características dinámicas del sistema a través de ecuaciones diferenciales. El modelamiento puede ser analítico, cuando se aplican las leyes físicas correspondientes a cada componente del sistema, que en conjunto forman una estructura o función matemática; o experimental, que consiste en la identificación de los parámetros, mediante el análisis de datos de entrada y salida, estimando valores posibles que se ajusten al sistema.

A partir del modelamiento matemático, se puede llegar a una función que represente la relación entre la salida y entrada del sistema, esta función se denomina Función de Transferencia. El proceso experimental es denominado Identificación de

¹⁰³ C. Vallejo, "Diseño y Simulación del Sistema de Control y Monitoreo de Nivel y Flujo de Agua para el Proceso de Perforación en la Fase de Exploración Minera del Proyecto IAMGOLD Quimsacocha", Pág. 110.

Sistemas, y corresponde a la planta o proceso que se desea analizar, consiste en recoger datos de la variable de salida con su correspondiente dato de entrada que provoco dicha salida, para luego mediante algoritmos matemáticos aproximar una función de transferencia, la cual debe generar una salida estimada similar a la salida censada.

El modelamiento matemático del sistema corresponde a una planta que contiene en su interior el variador de frecuencia, el motor monofásico y el ventilador centrífugo.



Figura 7.2. Planta para el modelamiento matemático

Para hallar la función de transferencia de la planta se utilizó el proceso experimental para lo cual se utilizó la herramienta computacional **Ident** de **Matlab®**

Para determinar la función de transferencia se deben realizar los siguientes pasos:

- 1. Recolección de datos.** En la recolección de datos se ingresa una señal de entrada en la planta y se toman los datos de la salida cada cierto tiempo. Para nuestro caso se tomaron 30 datos en intervalos de 1s. Este proceso se realizó tres veces para garantizar que los datos sean confiables. Cabe recalcar que los datos en cada una de las muestras no variaron notablemente razón por la

cual se realizó el promedio de estas muestras las cuales se muestran en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1. Valores de entrada y salida de la planta

ENTRADA	SALIDA
4V	22 °C
4V	24.3 °C
4V	28 °C
4V	32.6 °C
4V	35.9 °C
4V	38.9 °C
4V	42.5 °C
4V	45 °C
4V	47 °C
4V	48.6 °C
4V	50 °C
4V	51.2 °C
4V	51.9 °C
4V	52.4 °C
4V	53 °C
4V	53.2 °C
4V	53.8 °C
4V	54.2 °C
4V	54.6 °C
4V	54.8 °C
4V	54.77 °C
4V	54.86 °C
4V	54.88 °C
4V	54.9 °C

4V	54.8 °C
4V	54.76 °C
4V	54.79 °C
4V	54.8 °C
4V	54.8 °C
4V	54.72 °C
4V	54.69 °C
4V	54.7 °C
4V	54.86 °C
4V	54.85 °C
4V	54.87 °C
4V	54.90 °C
4V	54.8 °C
4V	54.76 °C
4V	54.77 °C
4V	54.75 °C

- 2. Ingreso de datos.** Una vez adquiridos los datos se debe ingresar los mismos al programa **Ident** de **Matlab®**, en el cual se obtiene la siguiente gráfica después de ingresar la entrada, salida, tiempo de muestreo y selección de gráfica en el dominio del tiempo.

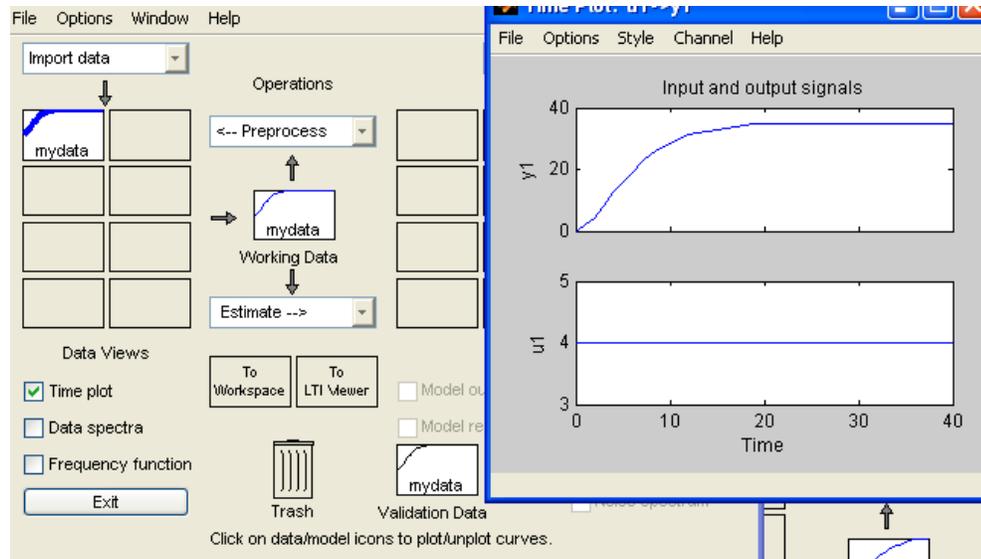


Figura 7.3. Gráfica de entrada y salida del proceso

3. **Estimación de parámetros.** La herramienta de **Matlab®** nos permite obtener los parámetros de nuestra función de transferencia, con la cual podemos diseñar nuestro controlador.

Al estimar estos parámetros se obtuvo la siguiente gráfica, la cual se asemeja a la que ingresamos inicialmente. Además esta herramienta de **Matlab®** indica que tan preciso es el modelo estimado con respecto al modelo original.

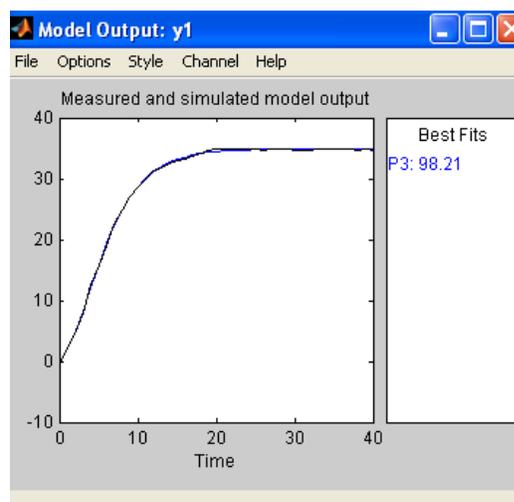


Figura 7.4. Modelo real vs modelo estimado

Como podemos observar en la Figura 7.4 el modelo estimado tiene un 98.21% de precisión respecto al modelo real.

En la Figura 7.5 se observan los parámetros de la función de transferencia de la planta.

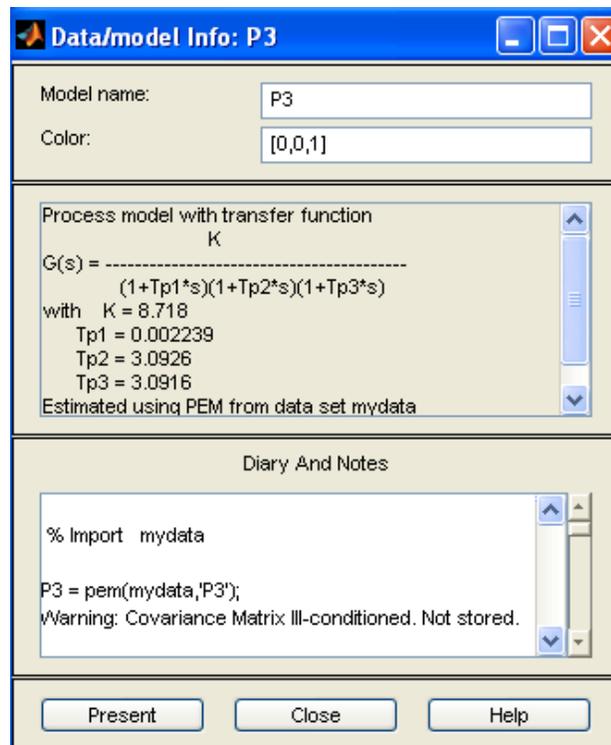


Figura 7.5. Parámetros de la función de transferencia

De esta manera la función de transferencia de la planta queda de la siguiente manera:

$$G_s = \frac{8.718}{1+0.002239*s \ 1+3.0926*s \ (1+3.0916*s)} \quad \text{Ec. 7.1}$$

Expandiendo la función de transferencia observada en el ANEXO 9 se obtuvo la siguiente función:

$$G s = \frac{8,178}{0,02140726295624*s^3+9,5749285838*s^2+6,186439*s+1} \quad \text{Ec. 7.2}$$

7.2 MÉTODOS PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE CONTROL¹⁰⁴

Los sistemas de control pueden ser clasificados basándose en diferentes criterios, así pues, podemos tener las siguientes clasificaciones.

Según su dimensión

- **Sistemas de parámetros concentrados.** Son aquellos que pueden ser descritos por ecuaciones diferenciales ordinarias.
- **Sistemas de parámetros distribuidos.** Son aquellos que requieren ecuaciones en diferencia (ecuaciones diferenciales con derivadas parciales).

Según el conocimiento de sus parámetros

- **Sistemas determinístico.** En estos sistemas se conoce exactamente el valor que corresponde a los parámetros. Por ejemplo un circuito RLC encargado de suministrar tensión a un equipo.
- **Sistemas estocásticos.** En este caso, la forma de conocer algunos o todos los valores de los parámetros, es por medio de métodos probabilísticos.

Según el carácter de transmisión en el tiempo

- **Sistemas continuos.** Son aquellos descritos mediante ecuaciones diferenciales, donde las variables poseen un valor para todo tiempo posible dentro de un intervalo de tiempo finito. Esta referido a las señales analógicas y su comportamiento matemático es similar a una onda continua. Por ejemplo un proceso de llenado de balones de gas.

¹⁰⁴ C. Vallejo, "Diseño y Simulación del Sistema de Control y Monitoreo de Nivel y Flujo de Agua para el Proceso de Perforación en la Fase de Exploración Minera del Proyecto IAMGOLD Quimsacocha", Pág. 118.

- **Sistemas discretos.** Son aquellos descritos mediante ecuaciones diferenciales y poseen valores solo para determinados instantes de tiempo, separados por intervalos dados por un periodo constante. Esta referido a las señales digitales y su comportamiento matemático es similar a un tren de pulsos. Por ejemplo el encendido y apagado de un selector que acciona una alarma.

Según la presencia de linealidad

- **Sistemas lineales.** Son aquellos cuyo comportamiento está definido por medio de ecuaciones diferenciales lineales, es decir, los coeficientes son constantes o funciones de la variable independiente. Deben cumplir con el principio de superposición. Por ejemplo un amplificador de señales.
- **Sistemas no lineales.** En caso de que una o más de las ecuaciones diferenciales no sean lineales, todo el sistema será no lineal. Por ejemplo el calentamiento de un horno.

Según el comportamiento en el tiempo

- **Sistemas invariantes en el tiempo.** Ocurre cuando todos sus parámetros son constantes, por tanto se mantiene en un estado estacionario permanentemente. Se define por ecuaciones diferenciales cuyos coeficientes son constantes. Por ejemplo la mezcla de sustancias dentro de un tanque que siempre contiene la misma cantidad y tipo de elementos.
- **Sistemas variantes en el tiempo.** Ocurre cuando uno o más de sus parámetros varían en el tiempo, por lo tanto, no se mantiene en estado estacionario. Se define por ecuaciones diferenciales cuyos coeficientes son funciones del tiempo. Por ejemplo para un motor de un vehículo de carrera, la masa del vehículo va a variar por acción del consumo de combustible.

Según sus aplicaciones

- **Sistemas servomecanismos.** Son aquellos en donde la variable controlada es la posición o el incremento de la posición con respecto al tiempo. Por ejemplo un mecanismo de control de velocidad o un brazo robótico.
- **Sistemas secuenciales.** Son aquellos en donde un conjunto de operaciones preestablecidas es ejecutada en un orden dado. Por ejemplo el arranque y parada de un motor o la conmutación delta-estrella de un motor.
- **Sistemas numéricos.** Esta referido a sistemas de control que almacenan información numérica, la cual incluye algunas variables del proceso codificadas por medio de instrucciones. Por ejemplo tornos, taladros, esmeriles, los cuales almacenan información referente a posición, dirección y velocidad.

El diseño de este proyecto se lo realiza con un sistema de control en lazo cerrado, donde se tiene la información de la humedad y temperatura del proceso, y mediante estos se toman las correspondientes acciones de control y monitoreo.

7.2.1 Sistemas de control por retroalimentación

Un sistema de control se dice que funciona en lazo cerrado cuando recibe información del proceso por medio de las señales de los sensores/transmisores, y en función del valor de estas, decide el valor de los actuadores; la utilización de información del proceso actualizada permite al sistema de control corregir sus acciones para compensar cualquier suceso imprevisto.

En un sistema de control con retroalimentación negativa, esta señal se resta de la señal de entrada, generando un error, el cual debe ser corregido por accionamiento del controlador. Este es el caso común utilizado en el campo del control de procesos industriales y su configuración se ilustra en la Figura 7.6.

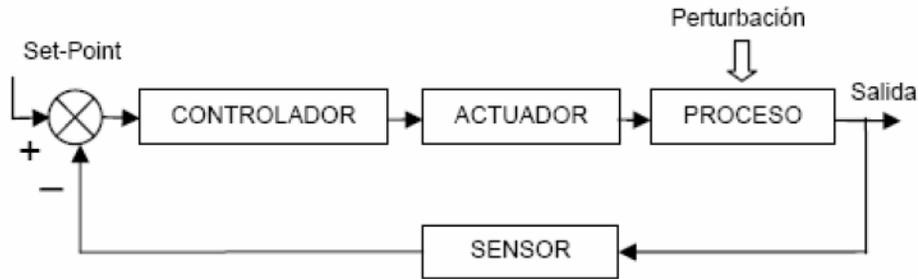


Figura 7.6. Sistema de control en lazo cerrado¹⁰⁵

El termino lazo se refiere al hecho de que una vez introducida una señal de error al sistema, esta viaja por el lazo hasta que se restablece el equilibrio. El propósito fundamental de un proceso de control automático a lazo cerrado es mantener la variable controlada igual a su valor de referencia. Por supuesto, el sistema de control automático empieza a trabajar una vez que aparece una señal de error. Esta se puede originar por una de las tres siguientes causas posibles:

1. Cambios en el valor de referencia.
2. Cambios inesperados en el proceso.
3. Cambios en la carga.

Las causas 1 y 3 se refieren a acciones ejecutadas voluntariamente por el operador del sistema, la causa 2 es el resultado de factores propios del proceso y no necesariamente causado por los operadores.

Al tiempo de respuesta de un sistema de control automático, o al tiempo que tarda en restablecer el equilibrio, se llama respuesta dinámica. Algunos de los factores que retardan la respuesta dinámica son los siguientes:

¹⁰⁵ C. Vallejo, "Diseño y Simulación del Sistema de Control y Monitoreo de Nivel y Flujo de Agua para el Proceso de Perforación en la Fase de Exploración Minera del Proyecto IAMGOLD Quimsacocha", Pág. 121.

1. El tiempo de respuesta de los instrumentos que constituyen el lazo de control, conocido comúnmente como time lag.
2. El tiempo que tarda la señal en viajar de un instrumento a otro.
3. La inercia de la variable controlada a cambiar su valor, conocido comúnmente como pure lag.
4. El tiempo que transcurre desde el momento en que la variable controlada sufre un cambio hasta que se inicia una acción correctiva, que se le denomina dead time.

7.2.1.1 Control de encendido/apagado o control on/off¹⁰⁶

Su funcionamiento se muestra en la Figura 7.7, donde se observa la señal medida y la señal del controlador.

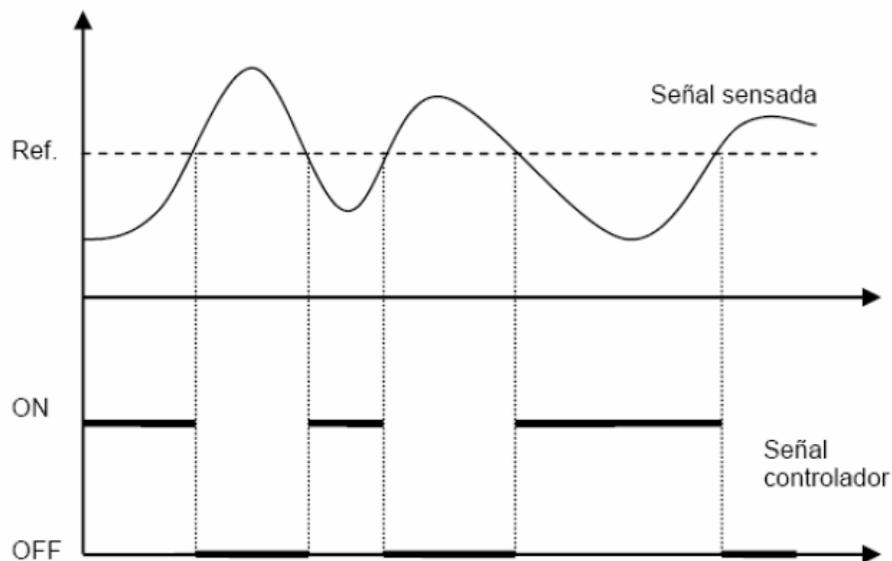


Figura 7.7. Funcionamiento del Control On/Off¹⁰⁷

¹⁰⁶ C. Vallejo, "Diseño y Simulación del Sistema de Control y Monitoreo de Nivel y Flujo de Agua para el Proceso de Perforación en la Fase de Exploración Minera del Proyecto IAMGOLD Quimsacocha", Pág. 122.

¹⁰⁷ C. Vallejo, "Diseño y Simulación del Sistema de Control y Monitoreo de Nivel y Flujo de Agua para el Proceso de Perforación en la Fase de Exploración Minera del Proyecto IAMGOLD Quimsacocha", Pág. 122.

Este tipo de sistemas de control de dos posiciones se maneja con actuadores que tienen dos posiciones fijas, lo que significa que se controla la conexión y desconexión. Si consideramos que $u(t)$ es la señal de salida del controlador y $e(t)$ la señal de error, en el controlador de encendido/apagado, la señal $u(t)$ permanece en un valor máximo o mínimo, como se ilustra en la Figura 7.8, según sea la señal de error positiva o negativa; de manera que:

$$\begin{aligned} u(t) &= U1 \text{ Para } e(t) > 0 \\ u(t) &= U2 \text{ Para } e(t) < 0 \end{aligned} \quad \text{Ec. 7.3}$$

Donde $U1$ y $U2$ son constantes.

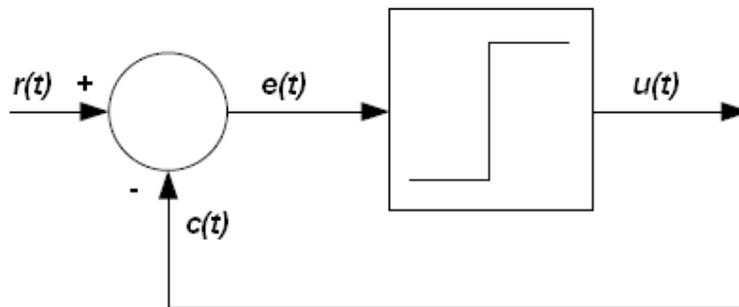


Figura 7.8. Diagrama de bloques del controlador On/Off¹⁰⁸

Existe una variación de este controlador, en donde la señal de error varía en un rango determinado antes de que se produzca la conmutación, se lo conoce como control On/Off con histéresis. Dicha brecha hace que la salida del controlador mantenga su valor hasta que la señal de error haya rebasado ligeramente el valor de referencia, como se observa en la Figura 7.9. Su función es impedir la frecuente acción del elemento final de control o actuador, causando menos desgaste en el elemento y alargando su vida útil.

¹⁰⁸ C. Vallejo, "Diseño y Simulación del Sistema de Control y Monitoreo de Nivel y Flujo de Agua para el Proceso de Perforación en la Fase de Exploración Minera del Proyecto IAMGOLD Quimsacocha", Pág. 123.

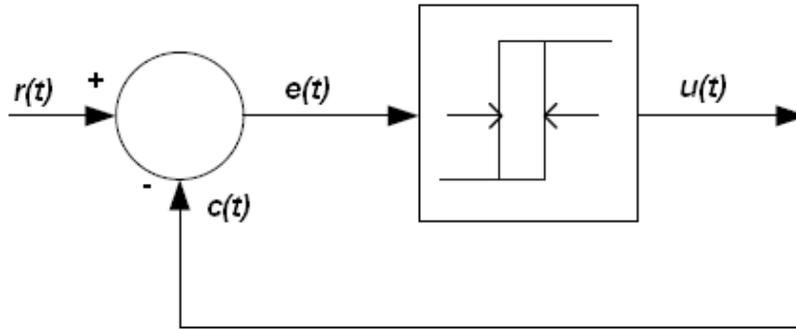


Figura 7.9. Diagrama de bloques del controlador On/Off con histéresis¹⁰⁹

7.2.1.2 Controlador proporcional (P)

Es un control que se basa en la ganancia aplicada al sistema, se fundamenta en el principio de que la respuesta del controlador debe ser proporcional a la magnitud del error. No corrige ni elimina perturbaciones, únicamente atenúa o aumenta la señal de error, como se observa en la Figura 7.10. Se representa a través del parámetro K_p y define la fuerza potencia con que el controlador reacciona frente a un error.

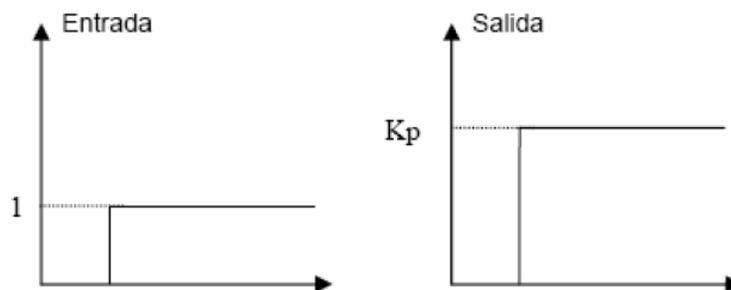


Figura 7.10. Funcionamiento del control proporcional¹¹⁰

La ecuación que describe su funcionamiento es:

¹⁰⁹ C. Vallejo, "Diseño y Simulación del Sistema de Control y Monitoreo de Nivel y Flujo de Agua para el Proceso de Perforación en la Fase de Exploración Minera del Proyecto IAMGOLD Quimsacocha", Pág. 124.

¹¹⁰ C. Vallejo, "Diseño y Simulación del Sistema de Control y Monitoreo de Nivel y Flujo de Agua para el Proceso de Perforación en la Fase de Exploración Minera del Proyecto IAMGOLD Quimsacocha", Pág. 124.

$$m t = \overline{m} + K_C * e(t) \quad \text{Ec. 7.4}$$

Donde:

$m t$ = Representa la salida del controlador.

\overline{m} = Representa el valor de la salida del controlador cuando el error es cero

K_C = Representa la ganancia del controlador.

$e(t)$ = Representa la señal de error y es la diferencia entre el valor de consigna y la variable que se controla, es decir, $e t = r t - c(t)$.

La ventaja de este tipo de controlador es que su único parámetro de ajuste es el valor de K_C , sin embargo estos operan con un error en estado estacionario o desviación causado por el ajuste de este parámetro; mientras mayor es el valor de K_C menor es su desviación pero a la vez la respuesta del proceso se hace mas oscilatoria e inestable.

Su función de transferencia es la siguiente:

$$C_p s = K_C \quad \text{Ec. 7.5}$$

Donde K_C es una ganancia proporcional ajustable. El controlador proporcional puede controlar cualquier planta estable, pero posee desempeño limitado y error en régimen permanente (offset).

7.2.1.3 Controlador integral (I)¹¹¹

Es también conocido como reset. Este tipo de controlador anula errores y corrige perturbaciones, mediante la búsqueda de la señal de referencia, necesita de un tiempo T_i para localizar dicha señal, como se observa en la Figura 7.11. Se representa mediante el término K_i que es el coeficiente de acción integral y es igual a $1/T_i$

¹¹¹ C. Vallejo, "Diseño y Simulación del Sistema de Control y Monitoreo de Nivel y Flujo de Agua para el Proceso de Perforación en la Fase de Exploración Minera del Proyecto IAMGOLD Quimsacocha", Pág. 125.

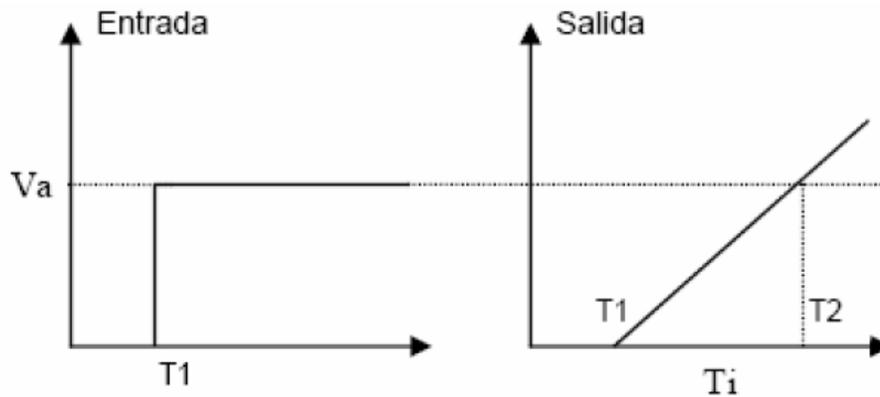


Figura 7.11. Funcionamiento del control integral¹¹²

La ecuación que representa este controlador es la siguiente:

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad \text{Ec. 7.6}$$

La función de transferencia del controlador es:

$$C_i(s) = \frac{K_i}{s} \quad \text{Ec. 7.7}$$

La señal de control $u(t)$ tiene un valor diferente de cero cuando la señal de error $e(t)$ es cero; por lo que se concluye, que dada una referencia constante o perturbaciones, el error en régimen permanente es cero.

7.2.1.4 Control derivativo (D)

Conocido también como rate. Este controlador por sí solo no es utilizado, necesita estar junto al proporcional y al integral. Sirve para darle rapidez o

¹¹² C. Vallejo, "Diseño y Simulación del Sistema de Control y Monitoreo de Nivel y Flujo de Agua para el Proceso de Perforación en la Fase de Exploración Minera del Proyecto IAMGOLD Quimsacocha", Pág. 125.

aceleración a la acción de control. Necesita de una diferencia de tiempo T_d para alcanzar la señal de referencia, como se ilustra en la Figura 7.12. Se representa mediante el término K_d que es el coeficiente de acción derivativa y es igual a $1/T_d$.

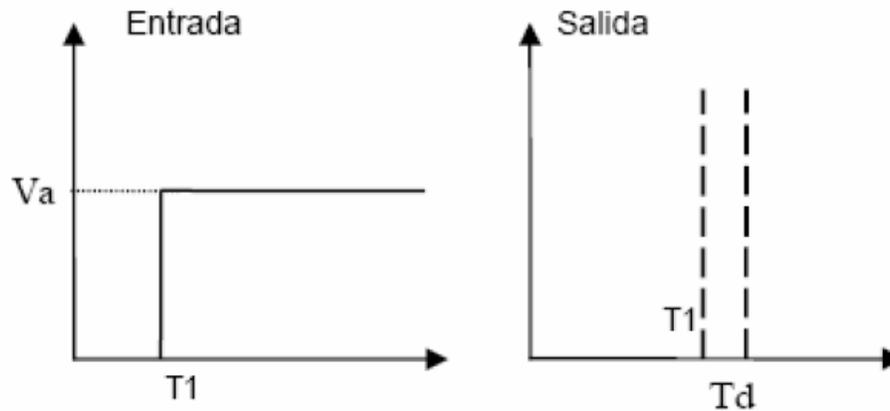


Figura 7.12. Funcionamiento del control derivativo¹¹³

7.2.1.5 Control proporcional-integral (PI)

Actúa en forma rápida, tiene una ganancia y corrige el error, no experimenta un offset en estado estacionario. Cuando los procesos no son controlables con la acción proporcional, es decir, exigen control en un punto determinado, este tipo de controlador elimina dicha desviación, agregando inteligencia al controlador proporcional gracias al reajuste en su función. Su ecuación de modelado esta descrita de la siguiente forma:

$$m t = \bar{m} + K_C * e t + \frac{K_C}{\tau} * e t * dt \quad \text{Ec. 7.8}$$

Donde:

τ = Representa el tiempo de integración o de reajuste.

¹¹³ C. Vallejo, "Diseño y Simulación del Sistema de Control y Monitoreo de Nivel y Flujo de Agua para el Proceso de Perforación en la Fase de Exploración Minera del Proyecto IAMGOLD Quimsacocha", Pág. 126.

Del análisis de la ecuación anterior podemos concluir que τ es el tiempo que toma al controlador repetir la acción proporcional, por tanto, mientras menor es el valor de τ , la respuesta del controlador se toma más rápida. La función de transferencia de este controlador es:

$$C_{PI} s = K_p * 1 + \frac{1}{T_i * s} \quad \text{Ec. 7.9}$$

Con un control proporcional, es necesario que exista error para tener una acción de control distinta de cero; con acción integral, un error pequeño positivo siempre nos dará una acción de control creciente, y si fuera negativo, la señal de control será decreciente. Este razonamiento nos muestra que el error en régimen permanente será siempre cero; se puede demostrar que un control PI es adecuado para todos los procesos donde la dinámica es esencialmente de primer orden, lo que puede ejecutarse mediante un ensayo al escalón.

7.2.1.6 Controlador proporcional-derivativo (PD)¹¹⁴

Es estable y reduce los retardos, es decir, su acción es más fulminante. Este tipo de controladores se utilizan en los procesos que tienen la posibilidad de ser solucionados con la acción proporcional, pero el parámetro derivativo le agrega cierta cantidad de anticipación. Se describe mediante la siguiente ecuación:

$$m(t) = \bar{m} + K_c \cdot e(t) + K_c \cdot \tau_D \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad \text{Ec. 7.10}$$

Donde:

τ_D representa la constante de tiempo de derivación

¹¹⁴ C. Vallejo, "Diseño y Simulación del Sistema de Control y Monitoreo de Nivel y Flujo de Agua para el Proceso de Perforación en la Fase de Exploración Minera del Proyecto IAMGOLD Quimsacocha", Pág. 127.

La desventaja de este controlador es que opera con una desviación en la variable que controla. Dicha desviación se puede corregir únicamente con la acción de integración, pero por otro lado, el controlador PD soporta mayor ganancia, lo que causa menor desviación comparado con un controlador que solo tiene acción proporcional. La función de transferencia de este controlador es la siguiente:

$$C_{PD} s = K_c + s * K_c * T_d \quad \text{Ec. 7.11}$$

Cuando una acción de control derivativa se agrega a un controlador proporcional permite obtener un controlador de alta sensibilidad, es decir que responde a la velocidad del cambio del error y produce una corrección significativa antes de que la magnitud del error se vuelva demasiado grande. Aunque el control derivativo no afecta en forma directa al error en estado estacionario, añade amortiguamiento al sistema y, por tanto, permite un valor más grande que la ganancia K , lo cual provoca una mejora en la precisión en estado estable.

7.2.1.7 Controlador proporcional integral derivativo (PID)¹¹⁵

Este controlador es el más completo y complejo, tiene una respuesta más rápida y estable siempre que esté bien sintonizado. Este tipo de controlador tiene por objeto, el anticipar hacia donde se dirige el proceso utilizando para ello la observación de la rapidez para el cambio del error. Su ecuación característica es la siguiente:

$$m(t) = \bar{m} + K_c \cdot e(t) + \frac{K_c}{\tau_I} \cdot \int e(t) \cdot dt + K_c \cdot \tau_D \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

Ec. 7.12

La función de transferencia de este controlador es la siguiente:

¹¹⁵ C. Vallejo, "Diseño y Simulación del Sistema de Control y Monitoreo de Nivel y Flujo de Agua para el Proceso de Perforación en la Fase de Exploración Minera del Proyecto IAMGOLD Quimsacocha", Pág. 128.

$$C_{PID}(s) = K_C \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s \right)$$

Ec. 7.13

Resumiendo se puede decir que; el control proporcional actúa sobre el tamaño del error. El control integral rige el tiempo para corregir el error y el control derivativo le brinda la rapidez a la actuación, volviéndolo anticipativo.

7.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DE HUMEDAD Y TEMPERATURA DEL PROCESO

Un procedimiento básico para el diseño del sistema de control en tiempo real posee las siguientes etapas:

- Generación de especificaciones
- Diseño arquitectónico
- Diseño de componentes
- Síntesis del diseño
- Pruebas

7.3.1 Diseño del sistema de control de humedad del grano

7.3.1.1 Consideraciones de diseño

El diseño del sistema de control de humedad del grano consta principalmente de un sensor de humedad y la acción de control que se la realiza a la válvula de gas que permite el paso hacia el quemador. El proceso requiere que:

1. Se alcance una humedad de 10% RH en el proceso de secado
2. Se alcance una humedad de 10% RH en el proceso de envejecido

- Una vez alcanzada esta humedad se cierre la válvula de gas para que ya no ingrese aire caliente al horno y el grano empiece a enfriarse.

Las variables que intervienen en este sistema son:

- **Variable Controlada:** Humedad
- **Variable Manipulada:** Caudal de Gas
- **Variable Perturbadora:** Temperatura ambiente

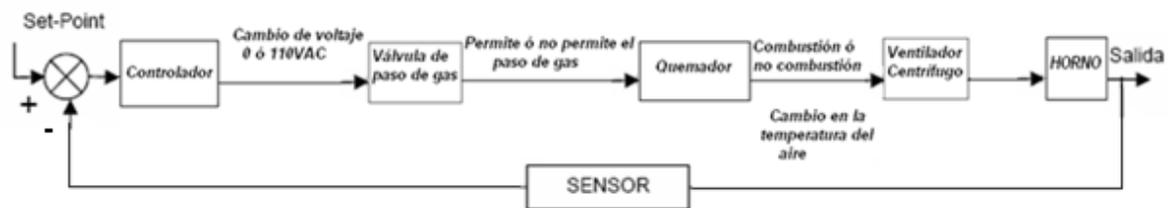


Figura 7.13. Diagrama de bloques del control de humedad

La acción de control necesaria para este sistema es **On/Off**, puesto que al alcanzar el valor de consigna de humedad la válvula de gas debe cerrarse completamente.

7.3.2 Diseño del sistema de control de temperatura del horno

7.3.2.1 Consideraciones de diseño

El diseño del sistema de control de temperatura consta principalmente de un sensor de temperatura y la acción de control se la realiza al variador de frecuencia que a su vez cambia la velocidad del motor y del ventilador centrífugo y por tanto el caudal de aire caliente que ingresa al horno. El proceso requiere que:

1. Este sistema de control, garantice la temperatura en el interior del horno, ya sea para el proceso de secado (50 °C) o para el proceso de envejecido (120 °C).
2. El sistema requiere un control de temperatura con una tolerancia de hasta 1%, caracterizado por los parámetros del elemento de medición y del elemento final de control.
3. Al ser un sistema de tercer orden la acción de un controlador PI no basta, razón por la cual se debe utilizar un controlador PID.

Las variables que intervienen en este sistema son:

- **Variable Controlada:** Temperatura
- **Variable Manipulada:** Caudal de aire caliente
- **Variable Perturbadora:** Temperatura ambiente

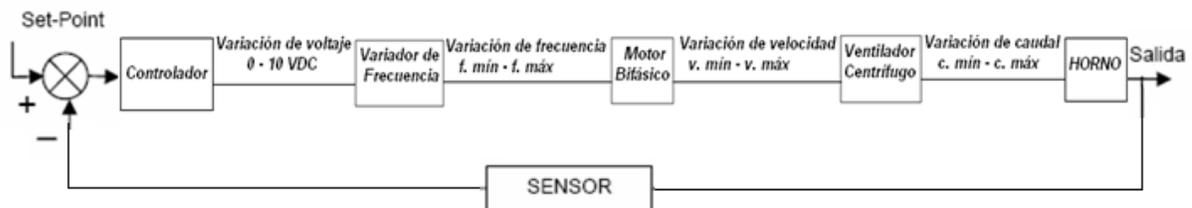


Figura 7.14. Diagrama de bloques del control de temperatura

La acción de control necesaria al manejar una variable de temperatura, la cual es una variable lenta, es tipo **PID** ya que actúa en forma rápida, tiene una ganancia y corrige el error, no experimenta un offset en estado estacionario. Por ser un sistema de tercer orden el sistema tiene un sobreimpulso y un tiempo de establecimiento muy grande por tal razón se debe utilizar la acción derivativa, la cual actúa directamente sobre estos parámetros.

Para obtener los datos para la sintonización del controlador se utiliza la función de transferencia de la planta.

El método de ajuste de las ganancias del controlador PID utilizado es el de Ziegler y Nichols y está basado en el método de respuesta al escalón como se muestra en la Figura 7.15; y se resume en ensayar al sistema un lazo abierto con un escalón unitario, en donde se calculan los parámetros, como la máxima pendiente de la curva y el retardo, y con ellos establecemos las ganancias del controlador. Este método es experimental y se lo obtiene mediante el siguiente procedimiento:

1. Con el sistema en lazo abierto, se lleva a la planta a un punto de operación normal, es decir que la salida de la planta se estabiliza en $y(t)=y_0$ para una entrada constante $u(t)=u(0)$.
2. En el instante inicial t_0 , se aplica un cambio en la entrada escalón desde u_0 a u^∞ , en un rango de 10 al 20% de rango completo.
3. Se registra la salida hasta que se estabilice en el nuevo punto de operación. Esta curva se la denomina de reacción del proceso. Se calculan los parámetros del modelo de la siguiente forma:

$$K_0 = \frac{y_\infty - y_0}{y_\infty - u_0}; \quad \text{Ec. 7.14}$$

$$\tau_0 = t_1 - t_0; \quad \text{Ec. 7.15}$$

$$v_0 = t_2 - t_1 \quad \text{Ec. 7.16}$$

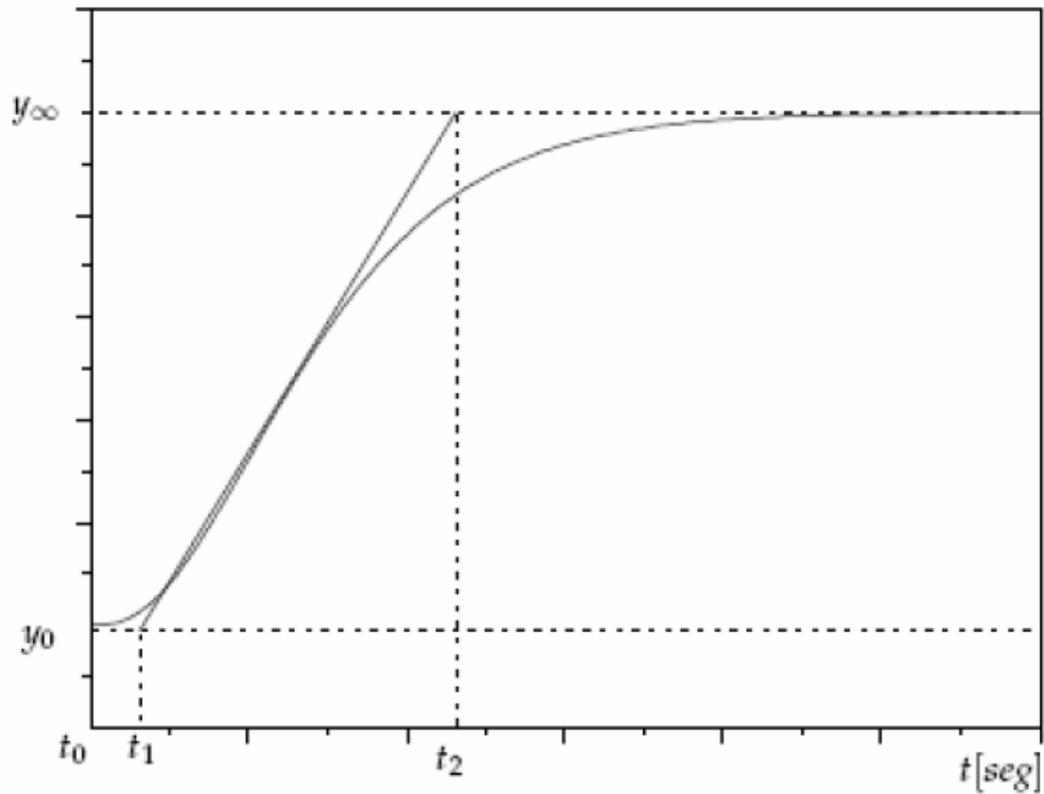


Figura 7.15. Parámetros de la respuesta al escalón de una planta

Para la obtención de los datos con los que se trata el proceso de desarrollo del controlador, se utiliza el programa **Matlab®**, en cual nos brinda la posibilidad de trabajar con la función de transferencia de la planta y además nos permite calcular las constantes que nos permitirán sintonizar el controlador como se puede ver en el ANEXO 13. El comportamiento de la curva basada en este método experimental de sintonización es el que se indica en la Figura 7.16.

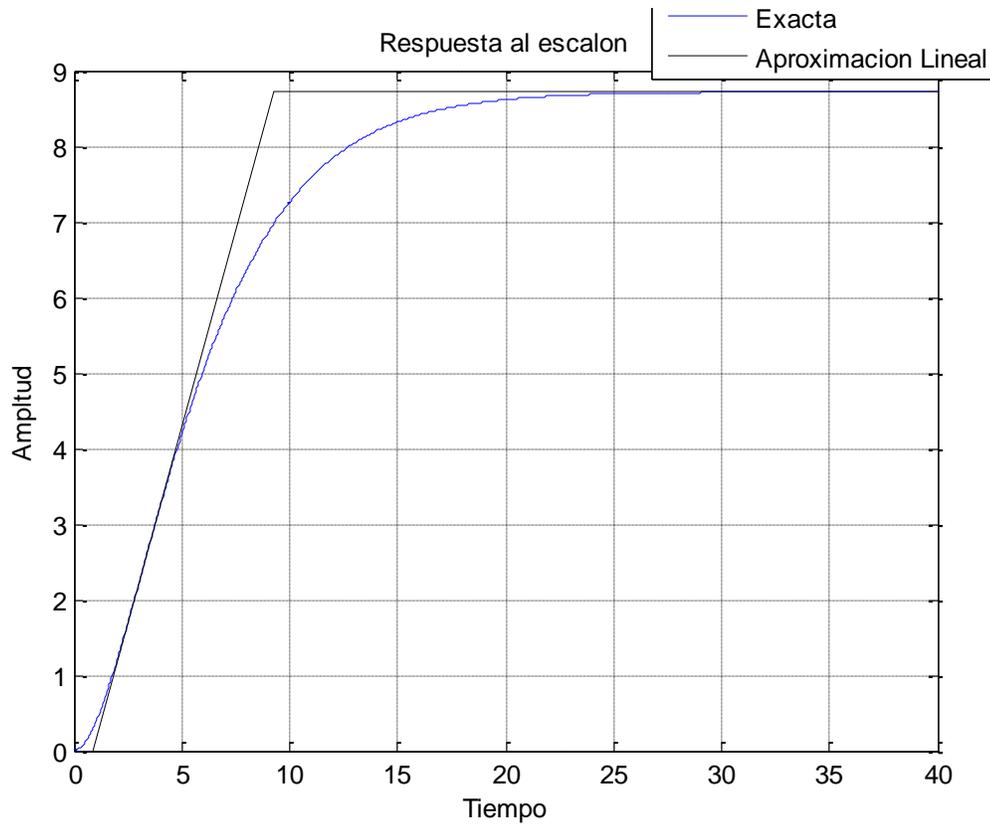


Figura 7.16. Comportamiento de la planta mediante Ziegler y Nichols

De donde se obtiene los valores que correspondan al retardo y la constante de tiempo, al trazar una tangente al punto de inflexión de la curva.

$$L = 0.8733s$$

$$T = 8.4052s$$

Reemplazando estos valores para la obtención de los parámetros de sintonización del controlador se obtiene:

$$Kp = 1.2 \frac{T}{L} \quad \text{Ec. 7.17}$$

$$Ti = 2L \quad \text{Ec. 7.18}$$

$$Td = 0.5L \quad \text{Ec. 7.19}$$

$$Kp = 1.2 \frac{8.4052}{0.8733} = 11.5499$$

$$Ti = 2 * (0.8733) = 1.7465$$

$$Td = 0.5 * (0.8733) = 0.4366$$

$$Ki = \frac{Kp}{Ti} \quad \text{Ec. 7.20}$$

$$Ki = \frac{11.5499}{1.7465} = 6.6130$$

$$Kd = Kp * Td \quad \text{Ec. 7.21}$$

$$Kd = 11.5499 * 0.4366 = 5.0431$$

De esta forma la función de transferencia del controlador PID para nuestra planta es:

$$C_{PID} s = 11.5499 * \left(1 + \frac{1}{1.7465*s} + 0.4366 * s \right) \quad \text{Ec. 7.22}$$

CAPÍTULO 8

REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA

En el CAPÍTULO1, se especificó de manera muy general y funcional los elementos que participan en el sistema de control. En este capítulo vamos a detallar cada elemento requerido en el sistema de control para que funcione correctamente y la manera en que se van a relacionar.

8.1 REQUERIMIENTOS GENERALES

El sistema requiere un dispositivo controlador que será el encargado de recibir las señales de los sensores de temperatura y de humedad. Además de este el controlador tendrá conectado a su entrada un pulsador de emergencia que detendrá todo el proceso.

Este sistema tendrá conectado a sus salidas a relé; la válvula de paso de gas con su luz indicadora, el electrodo con su luz indicadora, contactor con su luz indicadora y la baliza que indicará emergencia (rojo), energización (naranja) y proceso en marcha (verde). Además el sistema tendrá conectado a sus salidas transistorizadas; el variador de frecuencia que controlan la parada y la marcha de el motor monofásico, además se encuentra conectado el driver que controla el sentido de giro en los motores DC con caja reductora.

Además de esto, el controlador necesita estar comunicado con una HMI que despliegue las opciones de funcionamiento y los registros del controlador para que estén a disposición del usuario.

El sistema contara también con un interruptor principal que energizara el armario con una luz indicadora y un pulsador doble que energizará al PLC.

Se contará además con una fuente de 24VDC para las salidas y entradas lógicas del PLC. El sistema contará con elementos de protección como fusibles y relé termomagnético.

8.2 REQUERIMIENTOS ESPECÍFICOS

8.2.1 Controlador lógico programable

Las funciones del controlador para las que ha sido diseñado el sistema de control de humedad del grano y de temperatura en el interior del horno, deben cumplir con las siguientes características básicas:

- Detección y lectura de las señales que envían los sensores-transmisores.
- Desarrollo del algoritmo de control y envío de las acciones al sistema, a través de los actuadores y pre actuadores.
- Capacidad de ser reprogramado con un nuevo algoritmo de supervisión y control.
- Establecer comunicaciones entre las diversas partes del sistema.
- Controlar los procesos continuos.
- Capacidad de comunicación con una PC para el desarrollo de un HMI.
- Comunicación con un variador de frecuencia mediante una salida analógica.

Partiendo de este análisis, se descarta las soluciones de control basados en diseños propios con microcontroladores por las siguientes razones:

- Garantizar al sistema de control la robustez y confiabilidad para su desempeño en un ambiente hostil de trabajo, considerando las condiciones ambientales y físicas del proceso.
- El tiempo requerido en probar y acondicionar el diseño para que cumpla todas las características de funcionamiento.

En lo que corresponde a Controladores más avanzados como son los PACs, se descarta su utilización por las siguientes razones:

- Sus características de funcionamiento son de gama alta, y en general su funcionalidad está sobredimensionada para el sistema de control planteado para el proceso.
- El precio de este controlador no justificaría su inversión, frente a otras tecnologías que resuelven el criterio de control planteado.
- El acceso a la adquisición, manejo y mantenimiento de estos dispositivos aun es limitado en el mercado local.

Para realizar la selección del PLC se deben tomar en cuenta los siguientes factores:

8.2.1.1 Factores cuantitativos¹¹⁶

Toma en consideración factores numéricos y de cantidad.

- **Entradas y salidas.** Se debe determinar la cantidad de señales de entrada y salida que existen en el sistema y que merezcan conectarse al controlador,

¹¹⁶ C. Vallejo, "Diseño y Simulación del Sistema de Control y Monitoreo de Nivel y Flujo de Agua para el Proceso de Perforación en la Fase de Exploración Minera del Proyecto IAMGOLD Quimsacocha", Pág. 137.

luego se debe determinar si las entradas/salidas son de tipo analógico o tipo discreto. Conocida la cantidad, a este total se le debe agregar entre 10 y 20% adicional (reserva para futuras ampliaciones).

- **Memoria.** Se debe considerar la memoria del sistema y la memoria lógica. La cantidad de memoria del sistema está directamente ligado al número de entradas y salidas y al tipo de estas, así tenemos que una entrada/salida digital ocupa 1 bit de información, mientras que una entrada/salida analógica ocupa 16bits. La memoria lógica está referida a la cantidad de información que se debe almacenar a raíz del algoritmo de control, cada instrucción va a sumar 1 ó 2 bytes, pero los comandos de mayor jerarquía (timers, contadores, sumadores, conversores, etc.) necesitan más memorias.
- **Alimentación.** Dependiendo de la cantidad de módulos de entrada/salida que se tenga que gestionar, el autómata requerirá mayor nivel de amperaje a un voltaje constante.
- **Periféricos.** Hay que considerar que el autómata debe conectarse a dispositivos externos, para lo cual debe contar con los puertos necesarios para la conexión.

8.2.1.2 Factores cualitativos¹¹⁷

Toma en consideración factores de calidad, desempeño y modo de trabajo.

- **Consideraciones físicas y ambientales.** El ambiente de trabajo en donde debe operar el autómata es determinante cuando se debe elegir la confiabilidad y robustez del equipo, puesto que un componente de mayor calidad es más costoso, la planificación debe considerar no sobreestimar las condiciones del ambiente (polvo, humedad, temperatura) y requerir un equipo de mucha mayor robustez al realmente necesitado.

¹¹⁷ C. Vallejo, "Diseño y Simulación del Sistema de Control y Monitoreo de Nivel y Flujo de Agua para el Proceso de Perforación en la Fase de Exploración Minera del Proyecto IAMGOLD Quimsacocha", Pág. 138.

- **Tipo de control.** Determinar el tipo de control a emplear es una función de las estrategias de control y dependerá de la complejidad del proceso, así como de la necesidad de contar con backups. Se determinan las funciones especiales para el control de las variables, tales como contadores rápidos, funciones PWM, funciones especiales de entrada/salida, bloques de operación PID.
- **Comunicaciones.** Tomando en cuenta la gran gama de dispositivos de hardware, software y protocolos de transferencia, se busca un entorno orientado al control supervisado y adquisición de datos, que permita la comunicación entre diferentes dispositivos pero a la vez que se garantice un dialogo robusto y transparente.
- **Servicios adicionales.** Esta dado por las ventajas adicionales con las que cuenta un equipo en relación a otro. El traro del suministrador también es importante a la hora de decidirse por un equipo u otro, además las proveedores pueden brindar cursos gratuitos de capacitación para el personal a cargo, asistencia técnica y mantenimiento permanente; disponibilidad en stock del producto dentro del país, así como de los componentes internos.
- **Compatibilidad.** En algunos casos se preferirá equipos de tipo estándar, mientras que en otros casos será necesarios de tipo propietario. La elección del equipo en cuanto a su compatibilidad estará ligada a los demás equipos involucrados dentro de la planta.

8.2.1.3 Especificaciones técnicas

El PLC acorde al proceso debe cumplir con las siguientes especificaciones técnicas:

Tabla 8.1. Especificaciones técnicas del PLC

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS
Factores Cuantitativos

Tipo	Cantidad	Descripción
Entradas Digitales 24VDC 15mA	2	Pulsador de Emergencia
		Extra
Salidas Digitales a Relé (110VAC 5 A)	7	Electroválvula y luz indicadora
		Electrodo y luz indicadora
		Contactador y luz indicadora
		Luz roja de la baliza
		Luz naranja de la baliza
		Luz verde de la baliza
		Módulo extra de 7 salidas digitales a relé (110VAC 5A)
Salidas Digitales 24VDC 2 A	7	Motor DC 1 adelante
		Motor DC 1 atrás
		Motor DC 2 adelante
		Motor DC 2 atrás
		Parada del Variador de Frecuencia
		Marcha delante del Variador de Frecuencia
		Módulo extra de 7 salidas digitales (24VDC 2A)
Entradas Analógicas 4 a 20mA ó 0 a 10VDC	3	Sensor de temperatura
		Sensores de humedad
		Módulo extra de 2 entradas analógicas (4 a 20mA ó 0 a 10VDC)
Salidas Analógicas 4 a 20mA ó 0 a 10VDC	2	Variador de Frecuencia
		Extra

Memoria	32 Kb	
Alimentación	100-240VAC, 60Hz/2 A	
Periféricos	Puerto serial, Puerto Ethernet	
Peso	No mayor a 500gr.	
Dimensiones	15cm x 10cm x 7cm	
Factores Cualitativos		
Condiciones físicas y ambientales	Robusto para trabajar en: Altas temperaturas, humedad alta y medio de trabajo con polvo	
Bloques Especiales	2	Bloque PID
		Bloque PID Extra
Bloques Funcionales	Counters, Timers, Comparadores	
Comunicaciones	TCP/IP, ModBus TCP/IP, ModBus RTU	
Servicios adicionales	Software de programación amigable, comprensible, con entorno gráfico y ayudas interactivas.	
	Repuestos y servicio técnico cercano al lugar de operación del PLC.	
Compatibilidad	Software para HMI	

Se sugiere el PLC **DirecLogic06** de Koyo por cumplir con las características señaladas anteriormente, además tiene slots de expansión para añadir los módulos de: Entradas y salidas analógicas F0-04AD-1, Módulo de comunicación Ethernet H0-ECOM100. Si es necesario se pueden agregar otros módulos de entradas/salidas.

8.2.2 Sensor de temperatura

Para realizar la selección de uno de estos sensores se debe tomar en cuenta las siguientes características:

- Intervalo de temperatura

- Resistencia química de la termocupla o del material de su cubierta.
- Resistencia a la abrasión y vibración.
- Requisitos de instalación.

Tabla 8.2. Especificaciones técnicas del sensor de temperatura

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS			
RANGO DE TRABAJO	AMBIENTE DE TRABAJO	COSTO	CARACTERISTICAS
10 °C a 130 °C	Ambiente húmedo Ambiente con polvo	Bajo	Robusto Instalación con rosca Lo más lineal posible Respuesta rápida

Se sugiere la **termocupla tipo K** por ser la más lineal y tener un rango de trabajo dentro de lo establecido. Además tiene un bajo costo y es muy fácil de instalar. Una de las características más importantes es que esta desarrollada para trabajar en ambientes industriales y es el más lineal de todos.

En el ANEXO 4 se puede observar un cuadro de voltaje vs temperatura de la termocupla tipo k

8.2.3 Sensor de humedad

Para realizar la selección de uno de estos sensores se debe tomar en cuenta las siguientes características:

- Intervalo de humedad
- Resistencia a la abrasión
- Resistencia a vibración.
- Requisitos de instalación.

Tabla 8.3. Especificaciones técnicas del sensor de humedad

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS			
RANGO DE TRABAJO	AMBIENTE DE TRABAJO	COSTO	CARACTERÍSTICAS
5% RH a 35%RH	Altas temperaturas Ambiente con polvo	Bajo	Robusto Instalación con rosca Lo más lineal posible Respuesta rápida

Se sugiere el **higrómetro resistivo PCRC-11** por tener un rango de trabajo dentro de lo establecido. Además tiene un bajo costo y es muy fácil de instalar.

Una de las características más importantes es que esta desarrollada para trabajar en ambientes industriales. Cabe señalar que no es lineal pero es fácil determinar su valor de resistencia para la humedad requerida

8.2.4 Válvula de paso de gas

La válvula de paso de gas del sistema tiene las siguientes especificaciones técnicas:

Tabla 8.4. Especificaciones técnicas de la válvula de paso de gas

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS				
Capacidad máx. Regulada	Capacidad min. Regulada	Tipo de tubería	Accionamiento	Alimentación
400-450 pies cúbicos/hr	30-40 pies cúbicos/hr	Cobre o metal	On-Off	110VAC 1.5 A 60Hz

8.2.5 Módulo controlador de encendido

El módulo controlador de encendido tiene las siguientes especificaciones técnicas:

Tabla 8.5. Especificaciones técnicas del modulo controlador de encendido

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Alimentación	110 VAC 60Hz
Sistema de encendido	De tipo intermitente
Intensidad	10 Amp
Gas utilizado	GLP
Capacidad	3-12Kg/h
Valor térmico	150000-600000
Serie	QG01 1008726

8.2.6 Ventilador centrífugo

El ventilador centrífugo tiene las siguientes especificaciones técnicas:

Tabla 8.6. Especificaciones técnicas del ventilador centrífugo

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
TIPO	MATERIAL

Albéalos hacia atrás	Aluminio
----------------------	----------

8.2.7 Motor monofásico 220V

El motor monofásico tiene las siguientes especificaciones técnicas:

Tabla 8.7. Especificaciones técnicas del motor bifásico

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Alimentación	220/240 VAC 60Hz
Intensidad	42/21 A
Revoluciones	1730 rpm
Protección	IP55
Potencia	7,5 Kw 10HP
F. de Potencia	Cos Φ 0.97
Modelo	NVR17094-2

8.2.8 Motor DC con caja reductora

Para realizar la selección de uno de estos motores se debe tomar en cuenta las siguientes características:

Tabla 8.8. Especificaciones técnicas de los motores DC con caja reductora

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Tensión Nominal	24VDC
Velocidad Nominal a 24V	200rpm
Corriente Nominal	1500mA
Relación engranajes	30:1
Torque	4,6Kg/cm
Fijación	Rosca

Se sugiere el **motor DC S330125** de Hitec por tener las características descritas en la Tabla 8.8.

8.2.9 Variador de frecuencia

El variador de frecuencia permite controlar la velocidad del motor monofásico y de esta manera se varía el caudal de aire caliente que ingresa al horno. Este variador debe cumplir con las siguientes características:

Tabla 8.9. Especificaciones técnicas del Variador de Frecuencia

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS		
Factores Cuantitativos		
Tipo	Cantidad	Descripción
Entradas Digitales 24VDC	3	Parada del Variador de Frecuencia
		Marcha adelante del Variador de Frecuencia
		Extra
Entradas Analógicas 4 a 20mA ó 0 a 10VDC	1	Salida analógica del PLC
Alimentación		200-240V/2A bifásico
Control		2 o 3 hilos
Potencia		10HP
Dimensiones		20cm x 15cm x 10cm
Factores Cualitativos		
Condiciones físicas y ambientales		Robusto para trabajar en: Altas temperaturas, humedad alta y medio de trabajo con polvo

Se sugiere el Variador de Frecuencia **ATV312HU75M3** de Schneider a pesar de que es trifásico cumple con la potencia requerida.

8.2.10 Driver para el manejo de motores DC

Este driver permitirá controlar el sentido de giro de los motores DC con caja reductora, los cuales abrirán y cerrarán las compuertas del ducto de realimentación. Este driver debe cumplir con las siguientes características:

Tabla 8.10. Especificaciones técnicas del driver

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Vs	24VDC
Vss	24VDC
Vi, Ven	24VDC
Corriente de Consumo	100mA
Corriente Nominal	4 A

Se sugiere el integrado **L298** por tener las características descritas en la Tabla 8.10. En el ANEXO 8 se puede observar el diagrama eléctrico del L298.

8.2.11 Relés

El sistema requiere relés que tengan un excelente desempeño y entre otras que reúnan las propiedades adecuadas para el proceso.

Tabla 8.11. Características técnicas de los relés

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
BOBINA	
Voltaje Max. AC	110VAC 60Hz

Corriente Max. AC	200 mA
Tiempo de operación + revote	10ms
Tiempo de apertura + rebote	8ms
Vida mecánica	10 millones en CA, 20 millones en CC
CONTACTOS PRINCIPALES	
# de Contactos	2
Voltaje Max. AC	110VAC 60Hz
Corriente Max. AC	12 A

Se sugieren los relés C10-A10 de Releco por tener las características descritas en la Tabla 8.11.

8.2.12 Contactor

El sistema requiere un contactor que tenga un excelente desempeño y entre otras que reúna las propiedades adecuadas para el proceso.

Tabla 8.12. Especificaciones técnicas del contactor

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
BOBINA	
Voltaje Max. AC	110VAC 60Hz
Corriente Max. AC	200 mA
Tiempo de operación + revote	10ms
Tiempo de apertura + rebote	8ms
Vida mecánica	10 millones en CA, 20 millones en CC
CONTACTOS PRINCIPALES	
# de Contactos	4
Voltaje Max. AC	240VAC 60Hz
Corriente Max. AC	55 A

Se sugiere el contactor 3TF48 de Siemens por tener las características descritas en la Tabla 8.12.

8.2.13 Fusibles

Para el dimensionamiento de los fusibles se realizó la sumatoria de las cargas como se muestra en el ANEXO 14.

Los fusibles para la protección del motor deben cumplir con las siguientes características para el proceso:

Tabla 8.13. Especificaciones técnicas de los fusibles

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Voltaje	220VAC
Corriente	55 A
Dimensiones	10x38
Tipo	K
Encapsulado	Cartucho con portafusibles

Para alimentar al PLC se debe utilizar otro fusible con las siguientes características:

Tabla 8.14. Especificaciones técnicas de los fusibles

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Voltaje	110VAC
Corriente	3 A
Dimensiones	10x38
Tipo	K
Encapsulado	Cartucho con portafusibles

Para alimentar la fuente, al contactor, al relé del PLC y al electrodo se debe utilizar otro fusible con las siguientes características:

Tabla 8.15. Especificaciones técnicas de los fusibles

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Voltaje	110VAC
Corriente	23 A
Dimensiones	10x38
Tipo	K
Encapsulado	Cartucho con portafusibles

Para alimentar la válvula, las luces piloto, la baliza y los relés se debe utilizar otro fusible con las siguientes características:

Tabla 8.16. Especificaciones técnicas de los fusibles

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Voltaje	110VAC
Corriente	10 A
Dimensiones	10x38
Tipo	K
Encapsulado	Cartucho con portafusibles

Finalmente para la salida de 24VDC se necesita otro fusible con las siguientes características:

Tabla 8.17. Especificaciones técnicas de los fusibles

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Voltaje	24VDC

Corriente	6 A
Dimensiones	10x38
Tipo	K
Encapsulado	Cartucho con portafusibles

Estos elementos de protección los tiene **Proyelec**

8.2.14 Relé termomagnético

El relé térmico debe cumplir con las siguientes características para el proceso:

Tabla 8.18. Especificaciones técnicas del relé termomagnético

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Voltaje	220VAC
Corriente	51 A
Numero de polos	Bifásico
Dimensiones	40x10x15

Se sugiere el relé termomagnético **TDA200** de ABB por tener las características descritas en la Tabla 8.18.

8.2.15 Fuente de voltaje de 24VCC

Se requiere que la fuente se alimente de los 110VAC proveniente de la red eléctrica y que proporcione los 24VCC.

Básicamente, las especificaciones requeridas para la fuente que se utiliza son las que se muestran a continuación:

Tabla 8.19. Especificaciones técnicas de la fuente de voltaje

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Alimentación	110-220 VAC 60Hz
Corriente de consumo.	500mA.
Corriente Máx.	6 Amp.
Potencia	144 watts
Voltaje de salida	24VDC

Se sugiere la fuente **DR-4524** de MEAN WELL por cumplir con las características descritas.

8.2.16 Luces piloto

Se dispondrá de luces indicadoras de dos voltajes diferentes. Las que son para las salidas a relé del PLC y tienen las siguientes características:

Tabla 8.20. Especificaciones técnicas de las luces piloto

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Voltaje	85-264 VAC
Corriente Máx.	0.5 Amp.
Foco	Incandescente
Color	Verde, naranja y amarillo

También se dispondrá de otras luces piloto para las salidas transistorizadas del PLC con las siguientes características:

Tabla 8.21. Especificaciones técnicas de las luces piloto

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Voltaje	24 VDC
Corriente Máx.	0.125 Amp.
Foco	Incandescente
Color	Verde, naranja, verde

Se sugieren las luces piloto **Vitel** ya que cumplen con las características descritas.

8.2.17 Pulsadores

El pulsador de marcha-paro debe cumplir con las siguientes características:

Tabla 8.22. Especificaciones técnicas del pulsador marcha-paro

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Voltaje	110VAC
Corriente	100 mA
Tipo	Rasante
Condición mecánica	Doble
Condición de montaje	Panel empotrado
Condición ambientales	Interior normal

También se dispondrá de un pulsador de emergencia con las siguientes características:

Tabla 8.23. Especificaciones técnicas del pulsador de emergencia

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Voltaje	24VDC
Corriente	100 mA
Tipo	Rasante

Condición mecánica	Emergencia
Condición de montaje	Panel empotrado
Condición ambientales	Interior normal

Se sugieren las luces piloto **Schneider Electric** ya que cumplen con las características descritas.

8.2.18 Interruptor

El interruptor será el encargado de energizar el armario. Este interruptor debe cumplir con las siguientes características:

Tabla 8.24. Especificaciones técnicas del interruptor

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Voltaje	220V 3phases
Corriente Soportada	80 A entre líneas
Frecuencia	60Hz
Temp. de trabajo	50 °C
Cantidad de contactos	4

Se sugieren el interruptor 3LD2 2220TK1 de Electric ya que cumplen con las características descritas.

8.2.19 Baliza

La baliza será la encargada de informar visualmente de cómo se encuentra el proceso. Esta baliza debe cumplir con las siguientes características:

Tabla 8.25. Especificaciones técnicas de la baliza

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Voltaje	120VAC
Corriente	2 A
Frecuencia	60Hz
Control	24VDC
Colores	Rojo, naranja y verde
Temp. de trabajo	50 °C
Luz	Led

Se sugiere la baliza Q-Light ST56ELF de Control led ya que cumplen con las características descritas.

8.2.20 Borneras

Se utilizarán borneras de un piso para conexiones de alimentación y potencia, y borneras de dos pisos para las conexiones de I/O. Estas deben tener las siguientes características:

Tabla 8.26. Especificaciones técnicas de las borneras

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Cuerpo aislante	Poliamida 66
Elementos de apriete	Acero
Conexión	Tornillo
Montaje	Riel din

Estos elementos los tiene **Proyelec.**

8.2.21 Cable

Se utilizará cable de un calibre para las conexiones de alimentación y potencia y de otro calibre para las conexiones de control.

Tabla 8.27. Cable utilizado

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Cable de Potencia	10AWG y 12AWG
Cable de Control	14AWG

Estos elementos los tiene **Proyelec**.

8.2.22 Armario

Debe ser un armario metálico dentro del cual se va a construir e implementar el sistema controlador. Debe ser empotrable y debe disponer de algún mecanismo de seguridad para que el acceso a su interior sea únicamente posible si se dispone de una llave especial para abrirlo.

8.3 ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES

Las consideraciones a tomar en cuenta para el acondicionamiento son todos los parámetros técnicos dados por el fabricante en cada dispositivo de medición, de control y elementos finales o actuadores. Este procedimiento, conocido como acondicionamiento, incluye funciones como amplificación, filtrado, aislamiento eléctrico y multiplexación de la señal. La gran variedad de productos en el mercado oferta flexibilidad para la adquisición de los dispositivos, y basados en ese criterio, examinaremos los que más se acomoden en la planta y a la vez requieran de mínimo o ningún acondicionamiento.

Para el PLC analizado, las entradas discretas admiten un voltaje nominal de 24VDC hasta máximo de 28.8VDC, con impedancias de entrada de 2.1K Ω y 3.4K Ω

para corrientes de 11mA y 7mA dependiendo del canal de entrada, en este sentido no hay problema ya que únicamente será conectado el pulsador de emergencia.

Las salidas discretas de carga en el relé admiten hasta 240VAC a 5 A y 30VDC a 2 A, en cuyo caso el acondicionamiento de estas señales deberá realizarse con las respectivas protecciones de sobrecorriente.

Basados en estas consideraciones; el pin de parada, el pin de marcha adelante, la señal de marcha adelante del motor DC1, la señal de marcha atrás del motor DC1, la señal de marcha adelante del motor DC2 y la señal de marcha atrás del motor DC2 se conectarán directamente a los canales de salida a relé 30VDC del PLC. Mientras que para las salidas discretas para la válvula de gas, luz roja de la baliza, luz naranja de la baliza y luz verde de la baliza, luces indicadoras serán conectadas a las salidas a relé las cuales son alimentadas con 110VAC. Los elementos como el contactor y el electrodo serán conectados a relés los cuales serán conectados a las salidas a relé alimentadas a 110VAC, esto se debe a la corriente que demandan estos elementos.

En el caso de las entradas analógicas que pueden ser de 0 a 10VDC con una impedancia de 250 K Ω , se debe acondicionar la salida de la termocupla tipo K mediante un amplificador de instrumentación para obtener una señal de 0 a 10VDC. Para la señal del higrómetro resistivo se debe utilizar un puente de wheatstone y determinar el voltaje al cual se cumple con el setpoint de humedad y detener el proceso.

La salida analógica del controlador es una señal de voltaje (0-10VDC), enviada al variador de frecuencia el cual varía la frecuencia de la señal bifásica que es enviada al motor para de esta manera cambiar la velocidad del mismo. Esta salida es conectada directamente.

El acondicionamiento de la termocupla y del higrómetro resistivo se pueden ver en los ANEXOS 5 y 7 respectivamente.

8.4 DISTRIBUCIÓN DE LOS ELEMENTOS

El total de elementos usados y su distribución se detalla en la Tabla 8.26.

Tabla 8.28. Distribución de los elementos

Elemento	Cantidad	Ubicación
Fusible	6	Regleta 1
Relé Termomagnético	1	Regleta 1
Fuente de poder 24VDC	1	Regleta 1
PLC	1	Regleta 2
PC	1	Junto al armario
Sensor de temperatura	1	Interior del horno
Sensor de humedad	1	Interior del horno
Variador de Frecuencia	1	Regleta 2
Válvula de paso de gas	1	Fuera del galpón
Electrodo	1	Fuera del galpón
Motor Monofásico 220V	1	Fuera del galpón
Ventilador Centrífugo	1	Fuera del galpón
Motor DC con caja reductora	2	Montados en el ducto
Driver de motores DC	1 tarjeta	Regleta 1
Acondicionamiento	1 tarjeta	Regleta 1
Relés	3	Regleta 3
Contactador	1	Regleta 1
Baliza	1	Sobre el armario
Luces Piloto 110VAC	6	Puerta del armario
Luces Piloto 24VDC	6	Puerta del armario

Pulsador doble acción	1	Puerta del armario
Pulsador de emergencia	1	Puerta del armario
Interruptor general	1	Puerta del armario
Borneras de un piso	17	Regleta 1 y 3
Borneras de dos pisos	7	Regleta 1 y 3
Cable 10AWG, 12AWG, 14AWG	1 rollo de cada uno	Dentro del armario
Armario	1	Junto a la PC

8.5 UBICACIÓN DE LOS ELEMENTOS

En la Figura 8.1 se muestra una ubicación tentativa de los elementos en la parte externa del armario, para esto se debe hacer orificios en la tapa del armario dependiendo del tamaño de los elementos.

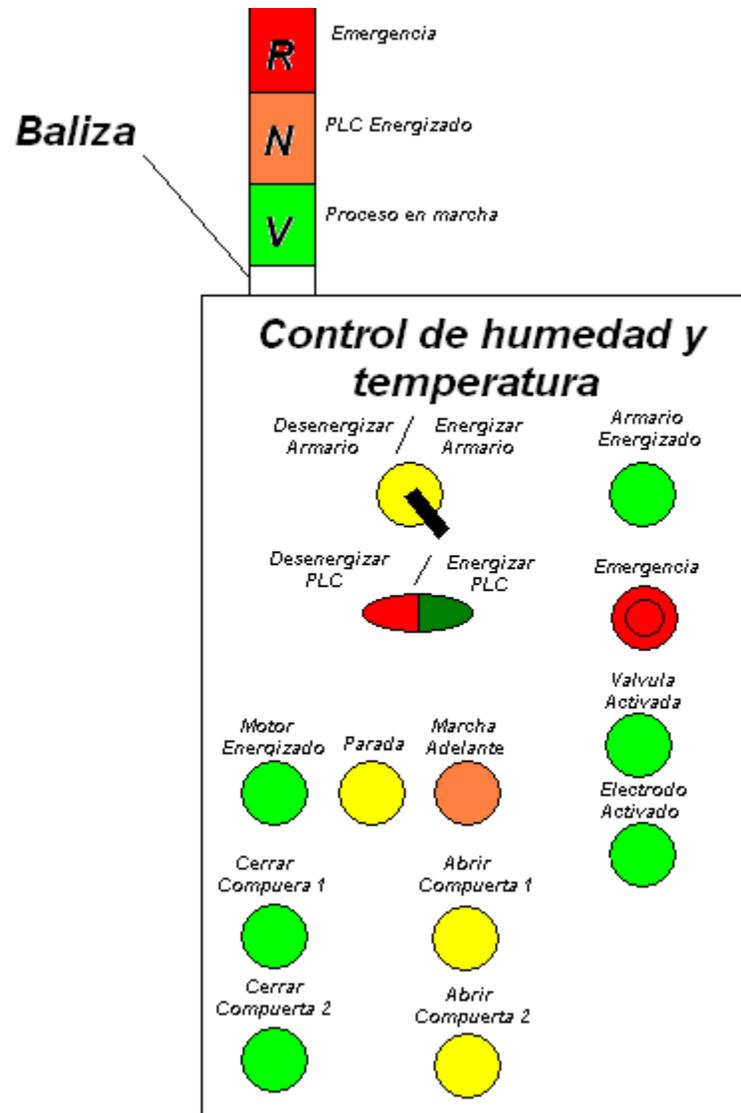


Figura 8.1. Diseño de la Ubicación de los elementos fuera del armario

En cuanto a la vista interior del armario, se planea utilizar tres rieles de implementación estándares para la ubicación de los elementos, de esta manera se puede disponer del espacio interior de mejor manera sin dejar espacios vacíos, como se muestra en la Figura 8.2.

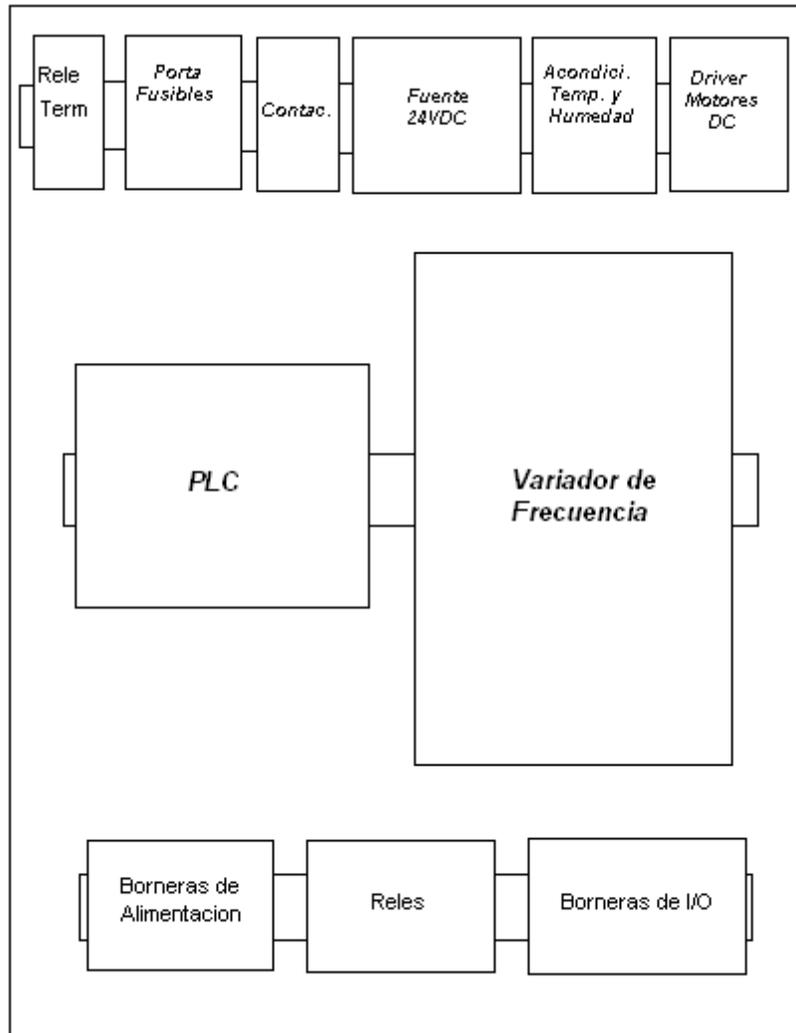


Figura 8.2. Diseño de la ubicación de los elementos en el interior del armario

En la Figura 8.2 se muestra la ubicación de los elementos en sus respectivas rieles, se va a necesitar tres de estas ubicadas en forma no equidistante debido al gran tamaño del variador de frecuencia. Se respeta la forma tradicional de ubicación de los elementos, la parte superior para los elementos de protección, tarjetas electrónicas, contactor y fuente de poder; la parte central para el PLC y Variador de frecuencia; y la parte inferior para las borneras de alimentación y las entradas y salidas del sistema y los relés.

8.6 CONEXIÓN DE LOS ELEMENTOS

Las conexiones observadas en el ANEXO 10 se realizan de la siguiente manera:

Primero se va a conectar los cables de alimentación L1 y L2, a los elementos de protección, en este caso los fusibles y el relé termo magnético.

Las líneas F4 y F5 se van a utilizar para alimentar directamente al variador de frecuencia y al motor monofásico 220V después del relé termomagnético. La línea F1 se va a utilizar para alimentar directamente al PLC. La línea F2 se conecta a una bornera de la cual se distribuye para alimentar la baliza y las luces piloto de 110VAC, la válvula de paso de gas, relé del electrodo y relé del contactor. Y la línea F3 se conecta a una bornera de la cual se distribuye para alimentar al electrodo, contactor, la fuente de 24VDC y el relé de activación del PLC.

El neutro N y GND se conecta directamente a las borneras para distribuirse a todos los componentes del sistema.

La fuente de voltaje PS1 proporciona en una de sus salidas (V+) 24VCC. A esta salida se la conecta a F6 y a su bornera. La parte negativa de la fuente de 24VCC se conecta directamente a su bornera. Esta conexión va a servir para las salidas del PLC que controlan al Driver de los motores DC con sus luces piloto.

Además para controlar la parada y marcha adelante del variador de frecuencia con sus luces piloto.

En cuanto a las borneras de E/S, se les asigna las siguientes señales:

- Bornera 1, entrada + de la termocupla
- Bornera 2, entrada – de la termocupla
- Bornera 3, entrada1 del higrómetro resistivo
- Bornera 4, entrada2 del higrómetro resistivo
- Bornera 5, salida a la válvula de paso

- Bornera 6, salida al electrodo
- Bornera 7, salida1 al motor DC1
- Bornera 8, salida2 al motor DC1
- Bornera 9, salida1 al motor DC2
- Bornera 10, salida2 al motor DC2
- Bornera 11, salida a la baliza (rojo)
- Bornera 12, salida a la baliza (naranja)
- Bornera 13, salida a la baliza (verde)
- Bornera 14, salida1 al motor monofásico 220V
- Bornera 15, salida2 al motor monofásico 220V

Para entender de mejor manera las conexiones se puede observa los gráficos de los elementos con su nomenclatura en la Figura 8.3.

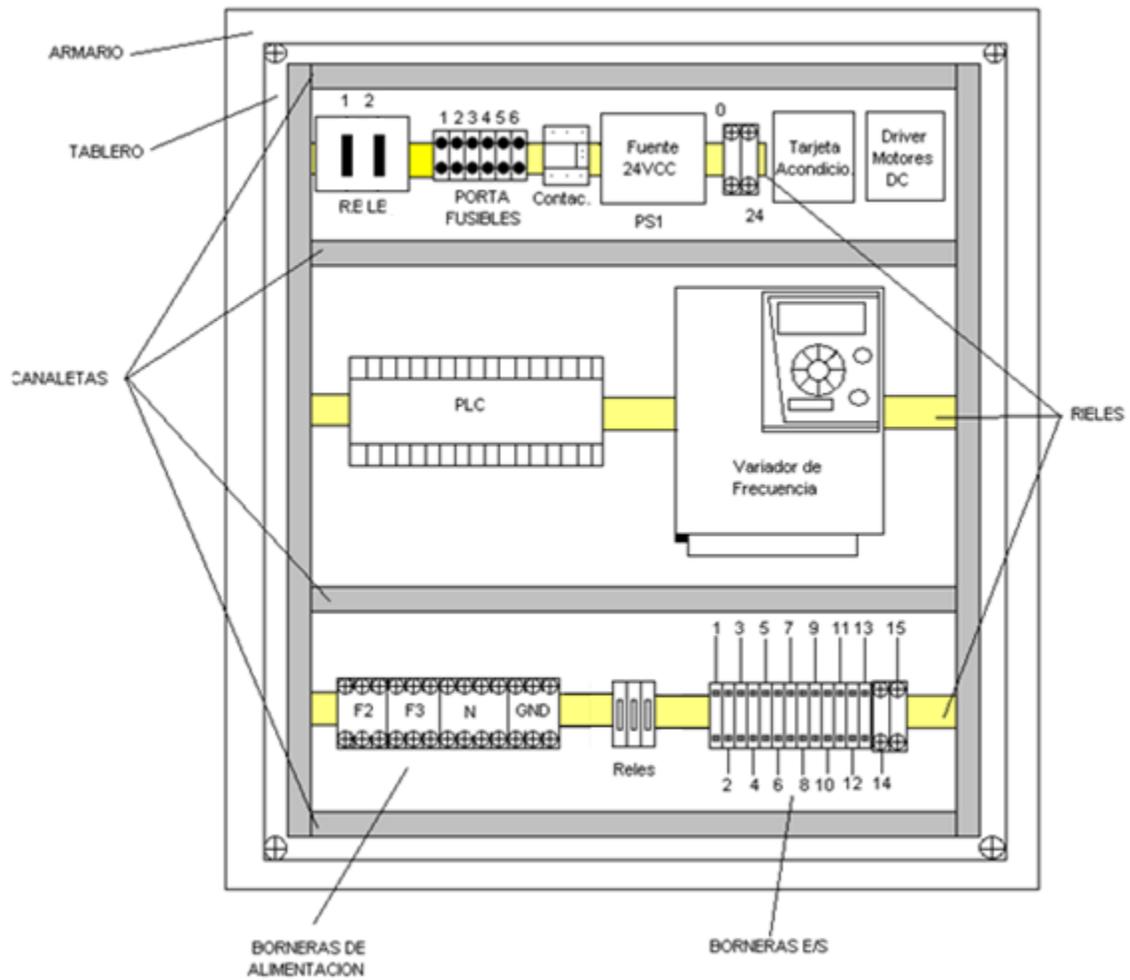


Figura 8.3. Ubicación de los elementos dentro del armario

CAPÍTULO 9

ESQUEMA DE LA INTERFACE HMI

La interface Hombre-Maquina es un conjunto de pantallas que muestran una presentación de la planta o del equipamiento en forma grafica. Los datos de los dispositivos, se muestran como dibujos o esquemas en primer plano (foreground) sobre un fondo estático (background). Mientras los datos cambian en campo, el foreground es actualizado. Los datos analógicos se pueden mostrar como números, o gráficamente mediante el uso de herramientas específicas. Además de la adquisición de datos, el desarrollo de la aplicación puede integrar herramientas para acciones de control hacia el proceso. El sistema puede tener varias pantallas, dependiendo de los requerimientos para el control y monitoreo del proceso, y el operador puede seleccionar las más relevantes en cualquier momento.

Independientemente del software que se elija se debe garantizar la comunicación entre la PC y el PLC, para que se puedan visualizar todos los registros, manejar históricos, alarmas, entre otros.

9.1 FILOSOFÍA DE CONTROL

El sistema requiere que el usuario ingrese inicialmente dos temperaturas y tres humedades. La primera temperatura con la primera humedad de ingreso, con la humedad de salida y el tiempo de enfriamiento corresponde al proceso de secado. La segunda temperatura con la segunda humedad de ingreso, con la humedad de

salida y el tiempo de enfriamiento corresponde al proceso de envejecido. También se puede realizar un proceso combinado.

A este conjunto de temperaturas, humedades y tiempos se denomina “recetas”. El sistema en total va a disponer de 3 recetas, una para el proceso de secado, otra para el proceso de envejecido y otra para el proceso combinado específicamente para el arroz INIAP 14. Si otra variedad de arroz va a ser procesada y requiere de otros parámetros se pueden agregar otras recetas. Las recetas pueden ser protegidas por clave.

Todas las pantallas de la HMI van a desplegar botones, barras de texto, títulos, indicadores, etc. Estos se utilizarán para que el usuario sea capaz de ejecutar el control del horno utilizando este dispositivo.

Los valores de las temperaturas, humedades de ingreso, humedad de salida y tiempo de enfriamiento necesitan ser almacenados en registros del HMI para utilizarlos en el programa que será desarrollado en el PLC.

La primera vez que se utiliza el sistema va a ser necesario ingresar tanto las temperaturas, humedades de ingreso, humedad de salida y tiempos de enfriamiento.

Pero estos valores quedaran ya almacenados en las RECETAS para que estén predefinidas en usos posteriores.

Ingresados todos los valores, el usuario seleccionara el proceso que desea ya sea SECADO, ENVEJECIDO o COMBINADO.

Posteriormente el usuario debe presionar un botón de INICIO para comenzar el proceso. Es necesario que exista un botón de STOP para detener el proceso totalmente.

Es necesario que el usuario no tenga acceso a la configuración de las temperaturas, humedades de ingreso y humedad de salida, únicamente el administrador que conozca la clave de acceso a las páginas de configuración puede realizar estos cambios.

Al presionar INICIO, con el proceso de SECADO, este va a comenzar, se va a asignar al registro indicado la temperatura TEMP1, el valor de la humedad de ingreso HUM1, el valor de la humedad de salida HUMS y el tiempo de enfriamiento TENF1. Cuando la humedad del producto sea igual a la HUMS, el proceso SECADO va a terminar, esto significa que se necesita asignar el valor de "0" al registro respectivo para que se apague el quemador, y el ventilador permanezca encendido y las ventoleras abiertas durante TENF1. Este proceso solo se realizará si el producto inicial cumple con HUM1.

Al presionar INICIO, con el proceso de ENVEJECIDO, este va a comenzar, se va a asignar al registro indicado la temperatura TEMP2, el valor de la humedad de ingreso HUM2 y el valor de la humedad de salida HUMS y el tiempo de enfriamiento TENF2. Cuando la humedad del producto sea igual a la HUMS, el proceso ENVEJECIDO va a terminar, esto significa que se necesita asignar el valor de "0" al registro respectivo para que se apague el quemador, y el ventilador permanezca encendido y las ventoleras abiertas durante TENF2. Este proceso solo se realizará si el producto inicial cumple con HUM2.

Al presionar INICIO, con el proceso COMBINADO, este va a comenzar, se va a asignar al registro indicado la temperatura TEMP1, el valor de la humedad de ingreso HUM1 y el valor de la humedad de salida HUMS. Cuando la humedad del producto sea igual a la humedad de ingreso HUM2, entonces se va a asignar automáticamente al registro respectivo el valor de TEMP2, el valor de HUMS que no varía y el tiempo de enfriamiento TENF2. Finalmente cuando la humedad del producto sea igual a la HUMS, el proceso COMBINADO va a terminar, esto significa que se necesita asignar el valor de "0" al registro respectivo para que se apague el

quemador, y el ventilador permanezca encendido y las ventoleras abiertas durante TENF2. Este proceso solo se realizará si el producto inicial cumple con HUM1.

A petición del cliente en este proceso estarán involucradas dos personas, usuario el cual no tendrá acceso a cambios en las recetas y mucho menos a cambios en la sintonización y el Administrador el cual tendrá acceso a cambios en las recetas, sintonización y cambios en general en cualquiera de las pantallas.

9.2 DESCRIPCIÓN DE LA INTERFACE

El sistema de control y monitoreo a desarrollarse en el HMI, estará conformado por 16 ventanas, distribuidas de la siguiente manera:

- Ventana de Inicio
- Ventana de Ingreso de Clave de Acceso
- Ventana de Información
- Ventana de Ayuda
- Ventana Principal
- Ventana de Configuraciones
- Ventana de Proceso de Secado
- Ventana de Configuración
- Ventana de Proceso de Envejecido
- Ventana de Configuración
- Ventana de Proceso Combinado
- Ventana de Configuración
- Ventana de Proceso en Marcha
- Ventana de Ingeniería
- Ventana del Histórico de Flujo del proceso
- Ventana de Alarmas del proceso

La navegabilidad de las ventanas se observa en la Figura 9.1.

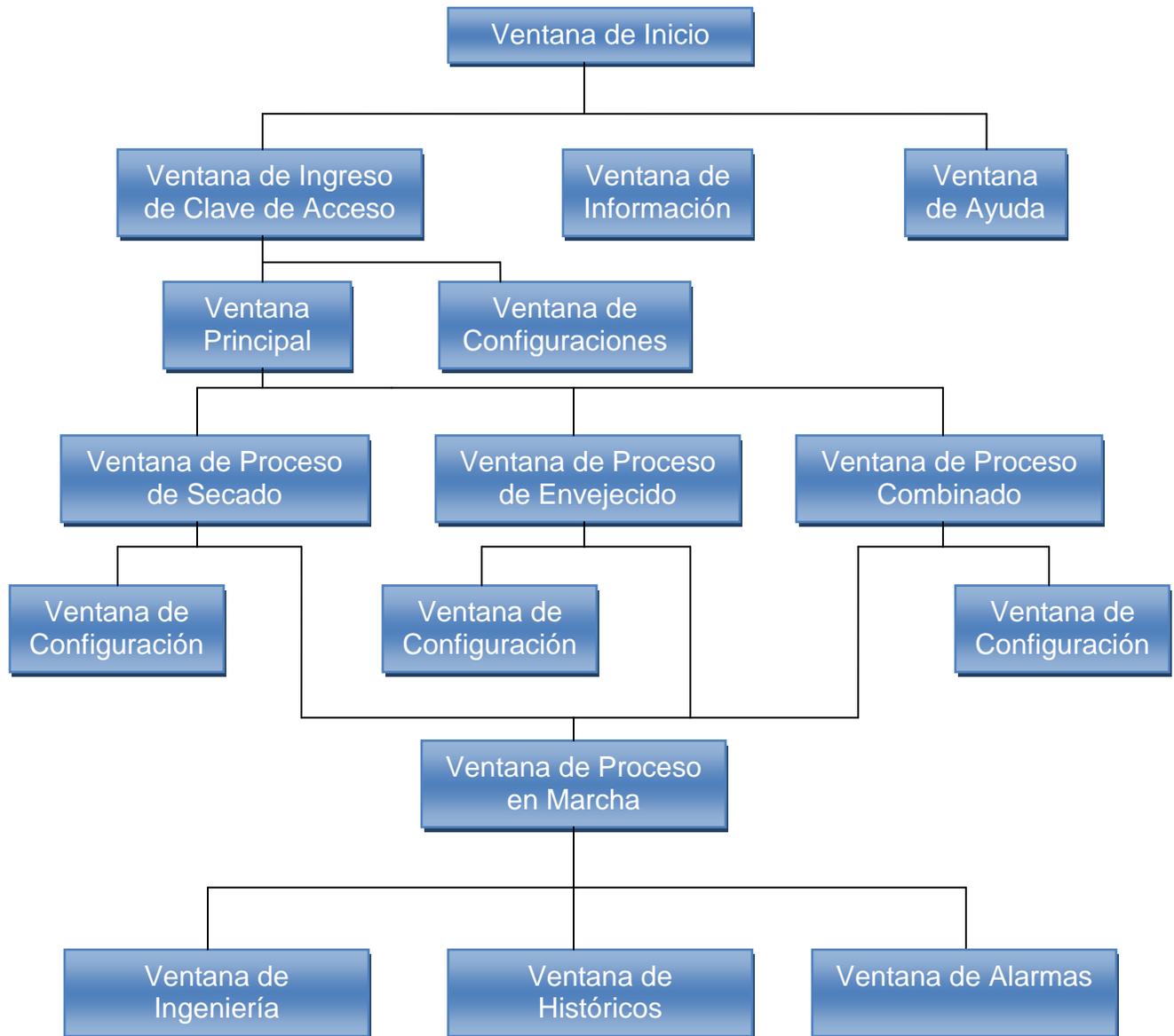


Figura 9.1. Navegabilidad de la HMI

9.3 DESCRIPCIÓN DE LAS VENTANAS

Para el diseño de las pantallas del HMI se han utilizado las normas UNE-EN ISO 9241 PRINCIPIOS DE DIALOGO.

En esta descripción se observarán los elementos que debe tener cada una de las ventanas.

Ventana de Inicio. En esta primera ventana se colocará el logotipo de la empresa, en la parte inferior hay un espacio para colocar el nombre del sistema (Horno automático de secado y envejecido de arroz). En la parte inferior de la ventana se tendrá un menú de tres botones

- **Principal.** La cual envía a la ventana principal, previo el ingreso correcto de la clave de acceso en la ventana ingreso de clave de acceso.
- **Información.** La cual muestra un archivo con extensión .txt, en donde se indica un resumen del desarrollo del sistema, con los aspectos esenciales de su funcionamiento. Esta ventana se la puede observar en la Figura 9.2.

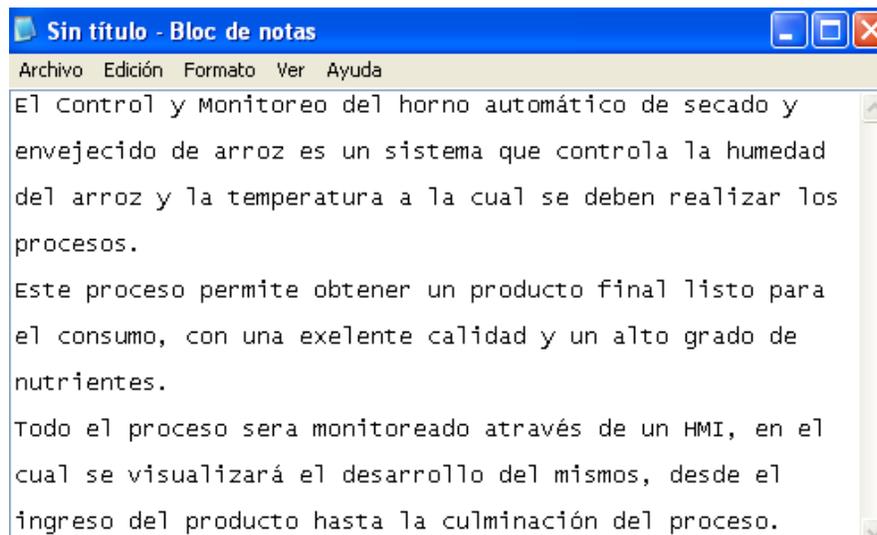


Figura 9.2. Ventana de información

- **Ayuda.** En la cual se muestra el temario de ayudas para el manejo de los diferentes menús, botones, indicadores y herramientas en las ventanas del HMI.

En la Figura 9.3 se aprecia la disposición de los elementos correspondientes a la ventana de inicio.

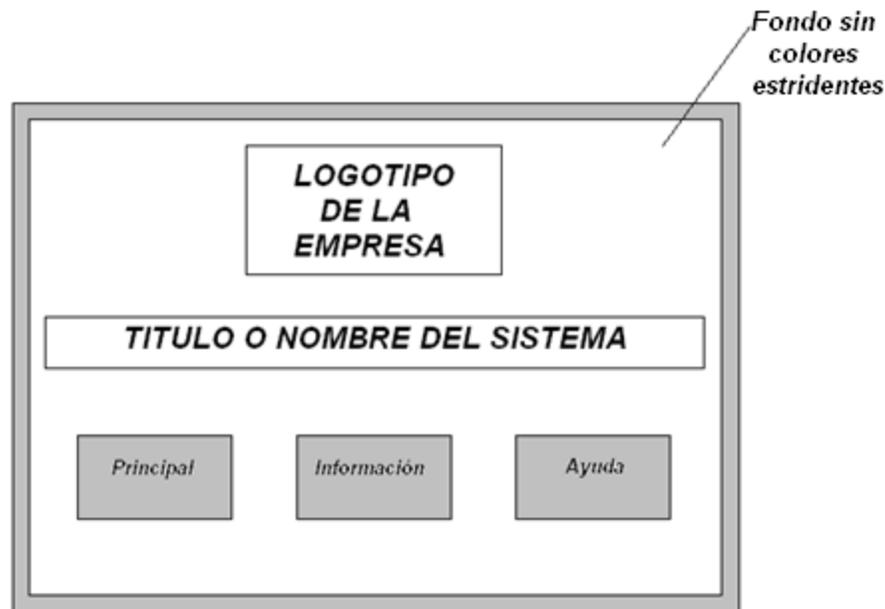


Figura 9.3. Ventana de inicio

Ventana de Inicio. Al oprimir el botón PRINCIPAL del menú de la ventana de inicio, se direcciona hacia una ventana de ingreso de clave de acceso como se observa en la Figura 9.4; esto con el objeto de brindar seguridad a las operaciones que se realicen desde la HMI. En esta pantalla se debe ingresar el nombre del usuario y la clave ó el nombre del administrador y la clave, mientras no se digite en forma correcta estos dos parámetros no se ingresará a la ventana principal. Esta ventana tiene dos botones, Aceptar para validar lo que se ha digitado y Regresar para retornar a la ventana de inicio.

INGRESE CLAVE DE ACCESO

NOMBRE:

PASSWORD:

Aceptar

Regresar

Figura 9.4. Ventana de ingreso de clave de acceso

La ventana principal tiene en la parte superior el nombre del sistema, en la esquina superior derecha tiene la hora y fecha. En la parte central tiene un fondo el cual contiene un menú para seleccionar el proceso requerido, SECADO, ENVEJECIDO o COMBINADO. Además existe otro menú, llamado Otras Instrucciones que nos permiten regresar a la ventana de inicio, mediante el botón Atrás e ingresar al temario de ayudas, mediante el botón de Ayuda del sistema. La distribución de los objetos se muestra en la Figura 9.5.

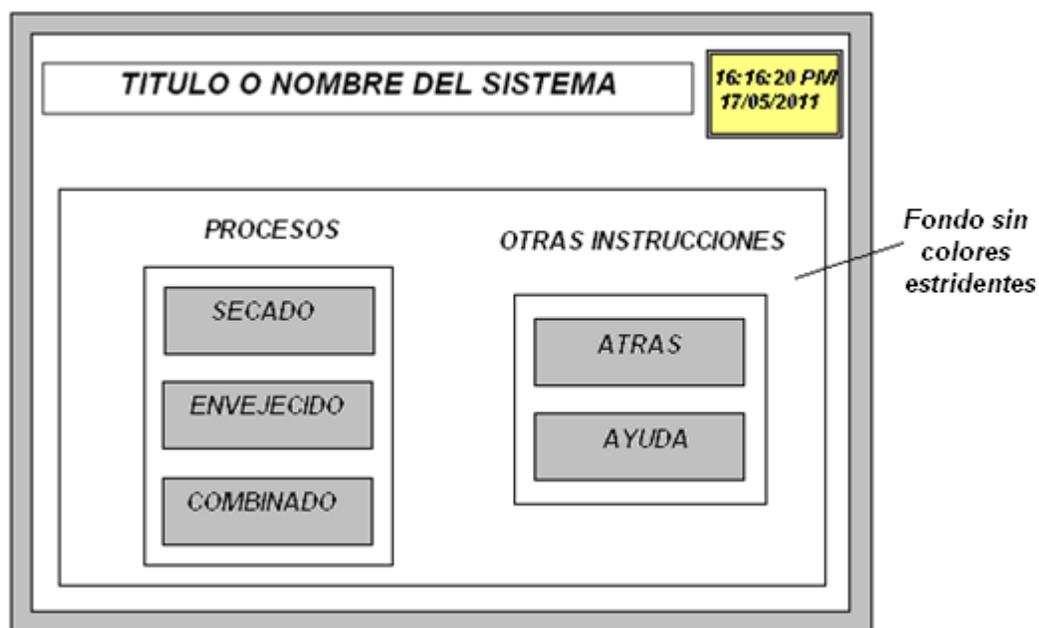


Figura 9.5. Ventana principal

Ventana de Proceso. Esta ventana podría ser cualquiera de las tres descritas anteriormente como son SECADO, ENVEJECIDO o COMBINADO, para la explicación de la ventana se tomará como ejemplo la del PROCESO DE SECADO.

Esta ventana tiene en la parte superior el nombre del proceso, en la esquina superior derecha tiene la hora y fecha. En la parte central tiene un fondo el cual contiene la temperatura a la que debe desarrollarse el proceso, la humedad a la que debe ingresar el arroz, la humedad a la cual debe salir el arroz y el tiempo de enfriamiento del producto. Además un menú, llamado Instrucciones que nos permite iniciar el proceso, mediante el botón de Iniciar, regresar a la ventana principal, mediante el botón Atrás, ingresar al temario de ayudas, mediante el botón de Ayuda del sistema. El administrador puede configurar los parámetros del proceso, mediante el botón Configurar, mientras que el usuario únicamente puede ejecutar el proceso. La distribución de los objetos se muestra en la Figura 9.6.

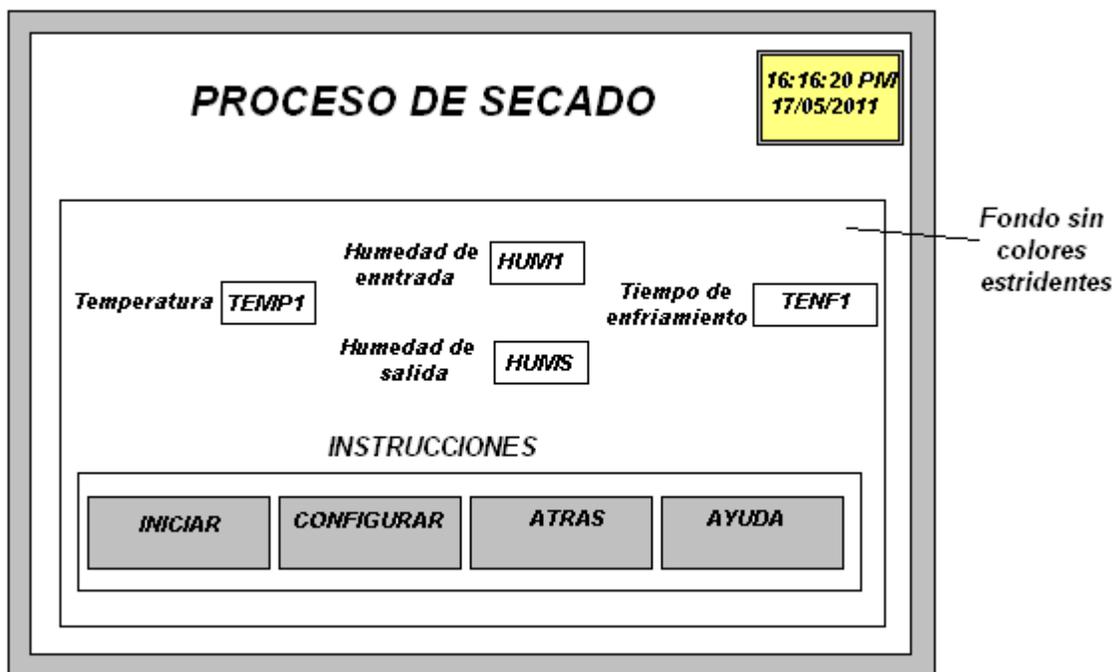


Figura 9.6. Ventana de proceso

Ventana de Configuración. La ventana configuración tiene en la parte superior el nombre del sistema, en la esquina superior derecha tiene la hora y fecha. En la parte central tiene un fondo el cual contiene cajas de texto para ingresar la temperatura del proceso TEMP1, humedad de entrada del producto HUM1, humedad de salida HUMS y tiempo de enfriamiento TENF1. Además existe un menú, llamado Instrucciones que nos permite aceptar los cambios realizados, mediante el botón Aceptar, y regresar a la ventana de Proceso de Secado, mediante el botón Atrás. La distribución de los objetos se muestra en la Figura 9.7.

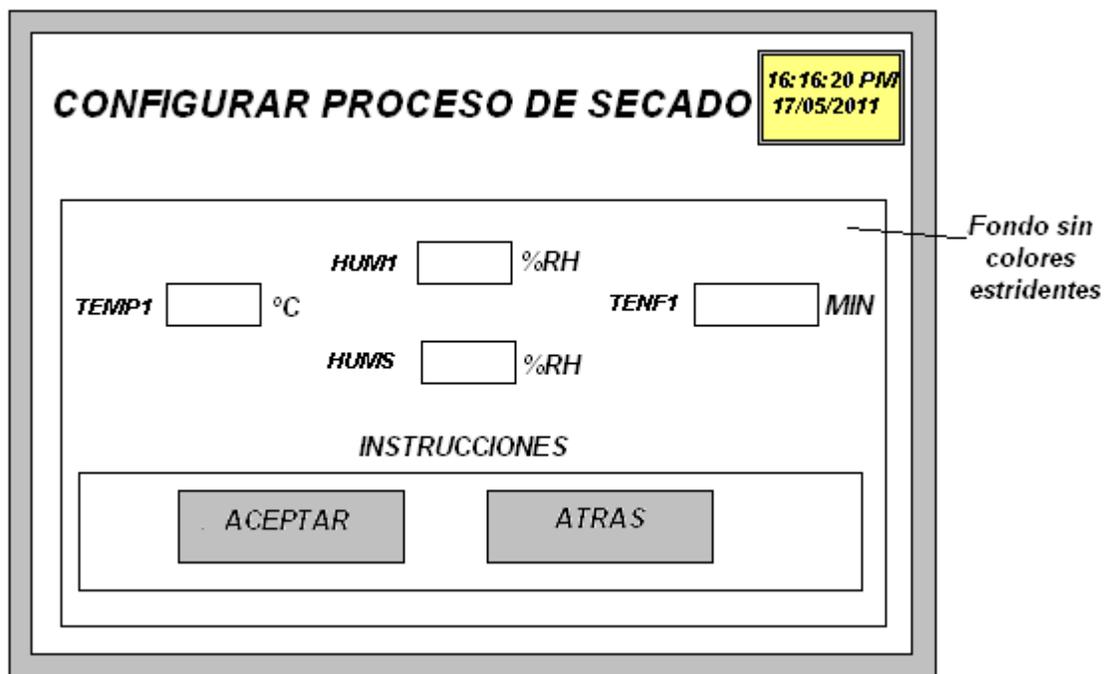


Figura 9.7. Ventana de configuración de proceso

Ventana de Proceso en Marcha. Al oprimir el botón Iniciar del menú de la ventana de Proceso de Secado, se direcciona hacia una ventana de Sistema de Control y Monitoreo la cual está compuesta en la parte superior por el nombre de la pantalla Sistema de Control y Monitoreo, en la esquina superior derecha tiene la hora y fecha. Abajo del título de la pantalla se muestra el proceso que se está desarrollando, en este caso Secado. En la parte izquierda se encuentran luces indicadoras de los

elementos que intervienen en el proceso como válvula de gas, chispero, ventilador centrífugo, compuertas activadas por los motores DC.

Debajo de estas luces indicadoras se encuentra el pulsador de emergencia con su respectiva luz indicadora.

En el centro de la ventana se encuentra un cuadro de alarmas de la humedad de entrada del grano, la cual indica si el grano tiene una humedad excesiva y por tanto no se puede realizar este proceso ó si la humedad es adecuada.

En el lado derecho de la ventana se encuentran tres paneles de medición, el primero para la temperatura del proceso, el segundo para la humedad de salida de grano y la tercera para el tiempo de enfriamiento. Cada panel indicará el valor de consigna y el valor de la variable del proceso. Bajo el panel de temperatura hay un cuadro de alarmas que indica si la temperatura es muy alta o si es muy baja y bajo el panel de humedad de salida hay un cuadro de alarmas que indica si la humedad de salida es muy alta o si es muy baja.

Bajo estas alarmas se encuentra un grafico interactivo del horno con el ventilador centrífugo.

Esta pantalla consta de dos menús, el primero que permite detener el proceso y regresar a la ventana de Proceso de Secado, mediante el botón Detener, regresar a la ventana de Proceso, mediante el botón Atrás e ingresar al temario de ayudas, mediante el botón de Ayuda del sistema. El segundo menú que tiene tres botones Alarmas, Históricos e Ingeniería.

La distribución de los objetos se muestra en la Figura 9.8.

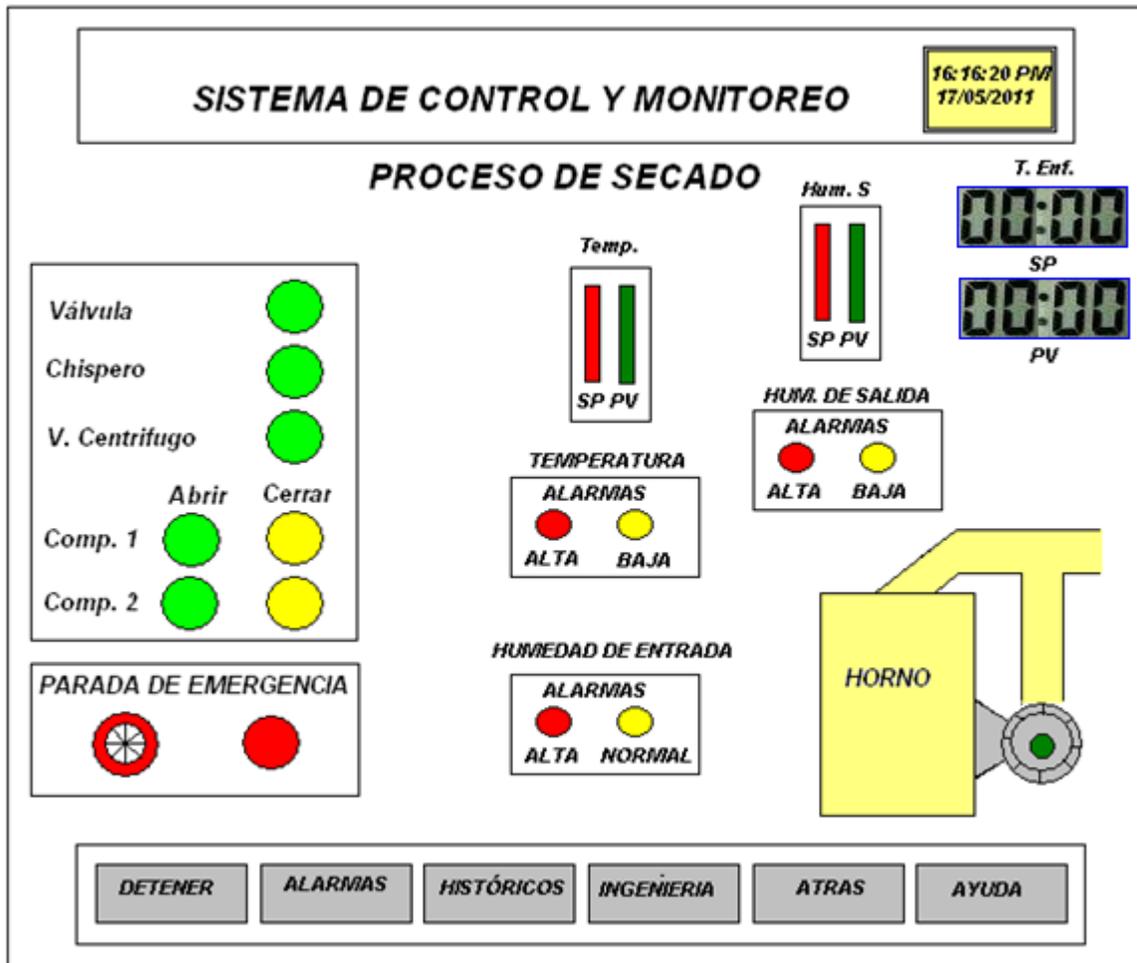


Figura 9.8. Ventana de proceso en marcha

Ventana de Ingeniería. En la ventana de interface de Ingeniería, se encuentran los valores de las variables del control de temperatura del sistema para la sintonización del controlador proporcional, integral, derivativo. El usuario únicamente puede observar los parámetros del controlador mientras que el administrador puede cambiar cualquiera de los parámetros.

En este caso, el tipo de control que más se adapta al proceso es el tipo PID. En el panel de las variables de control se puede digitar el valor de consigna y los valores para las constantes de ganancia proporcional (K_p), Tiempo de integración o reajuste (T_i) y la rapidez de derivación (T_d). Además en esta ventana existe el botón de parada de emergencia del sistema y un panel en la parte inferior en donde se

observan los valores que se obtienen en el tiempo para el valor de consigna, la variable procesada y la variable manipulada, como se puede observar en la Figura 9.9.

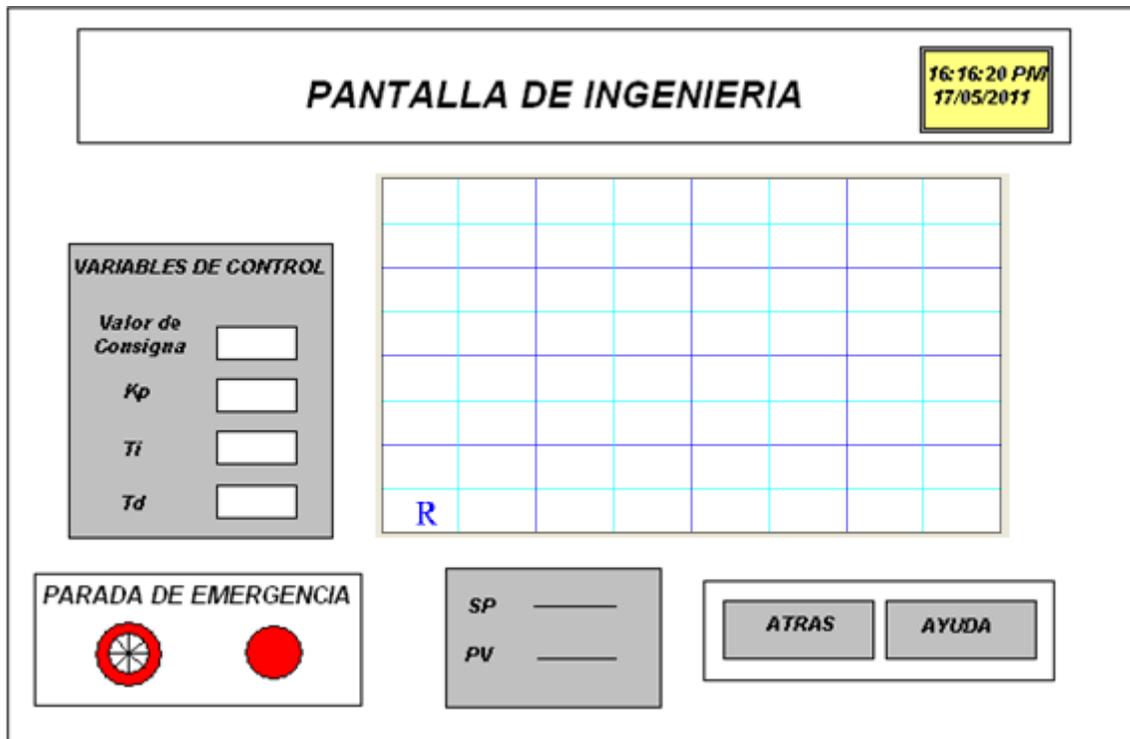


Figura 9.9. Ventana de ingeniería

Ventana de Históricos. En la ventana de históricos de flujo del proceso se puede obtener la cantidad de procesos culminados correctamente y procesos detenidos. En esta ventana se observa la variación de la humedad del grano desde que ingresa hasta que sale del proceso. Además se puede visualizar como fue la temperatura del proceso. El usuario únicamente puede observar los parámetros de los históricos mientras que el administrador puede cambiar cualquiera de los parámetros.

Esta ventana tiene un menú que permite regresar a la ventana de inicio, mediante el botón Atrás e ingresar al temario de ayudas, mediante el botón de Ayuda del sistema. La distribución de los objetos se muestra en la Figura 9.10.

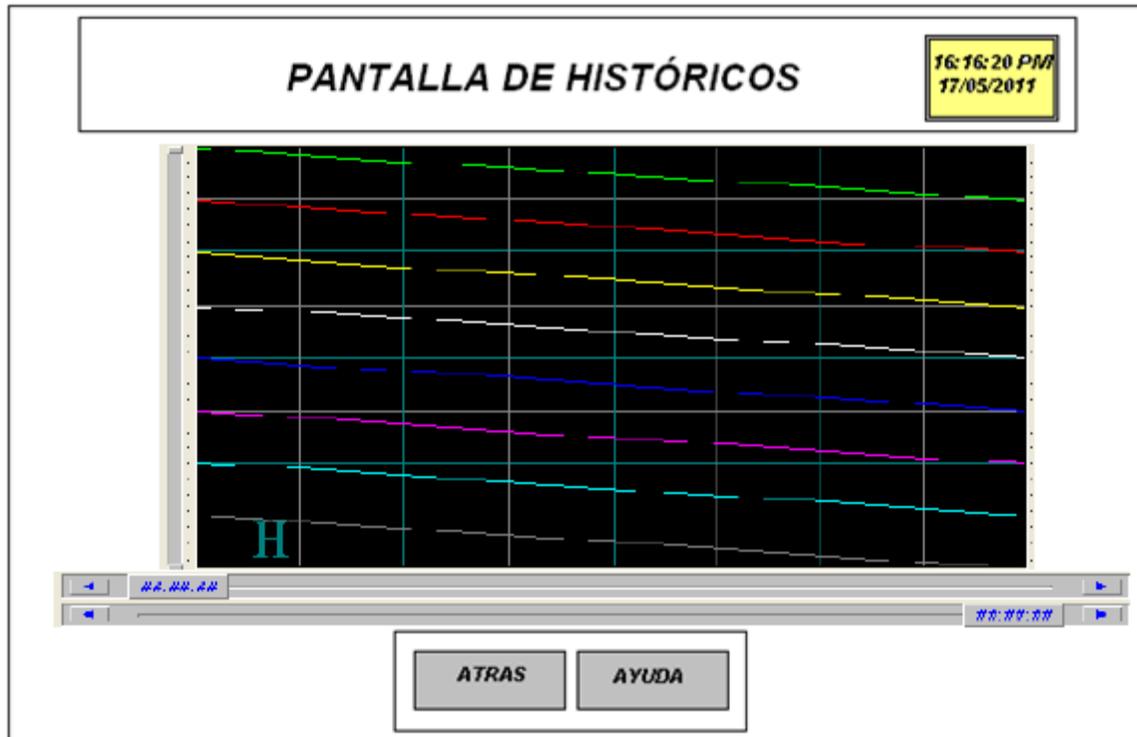


Figura 9.10. Ventana de históricos

Ventana de Alarmas. La ventana de alarmas del sistema contiene una tabla de visualización de alarmas y eventos distribuida en el proceso. Esta herramienta permite la gestión para una estructura en red de ordenadores y para alarmas de tratamiento local. Para el desarrollo de nuestro Sistema de Control y Monitoreo, los eventos que se generan dentro de este proceso son los niveles alto y bajo de temperatura, nivel alto y nivel adecuado de la humedad de entrada, nivel alto y nivel bajo de la humedad de salida. Otra alarma generada por el sistema es la parada de emergencia dentro del proceso. El usuario únicamente puede observar los parámetros de la pantalla de alarmas mientras que el administrador puede modificar cualquiera de estos parámetros.

Los campos generados en esta tabla contienen la fecha, hora, reconocimiento, prioridad, nombre de la alarma generada, grupo, valor, limite y un comentario para

tomar una acción correctiva o del estado en proceso, como se observa en la Figura 9.12.

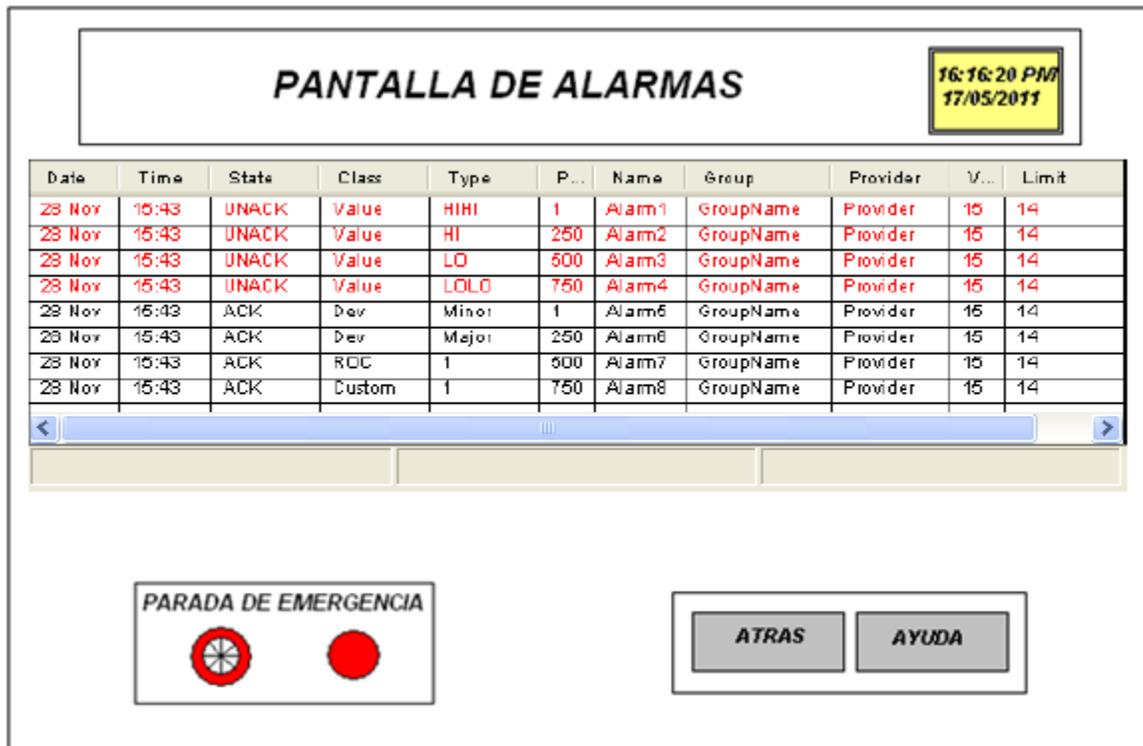


Figura 9.11. Ventana de alarmas

Se recomienda realizar una base de datos que permita realizar consultas complejas las cuales puedan ser creadas dinámicamente o estar contenidas en archivos externos. Adicionalmente, estas consultas pueden incluir parámetros que se necesiten transferir en tiempo de ejecución.

Esta base de datos permitirá obtener datos de las alarmas y eventos generados durante la operación del sistema.

Para desarrollar esta base de datos se puede utilizar SQL y exportar los datos al programa Excel.

CAPÍTULO 10

SIMULACIONES

La simulación de los procesos de control para el proceso de secado y envejecido de arroz se los realizó el **Matlab®**. Esta herramienta permite observar el comportamiento de los controladores tanto el ON-OFF para la humedad y el PID para el control de temperatura

10.1 SIMULACIÓN DEL CONTROLADOR ON-OFF

La simulación del controlador ON-OFF para la humedad de salida del arroz se la realizó en **Simulink®** con el circuito del ANEXO 11, donde se obtuvo la gráfica de la Figura 10.1.

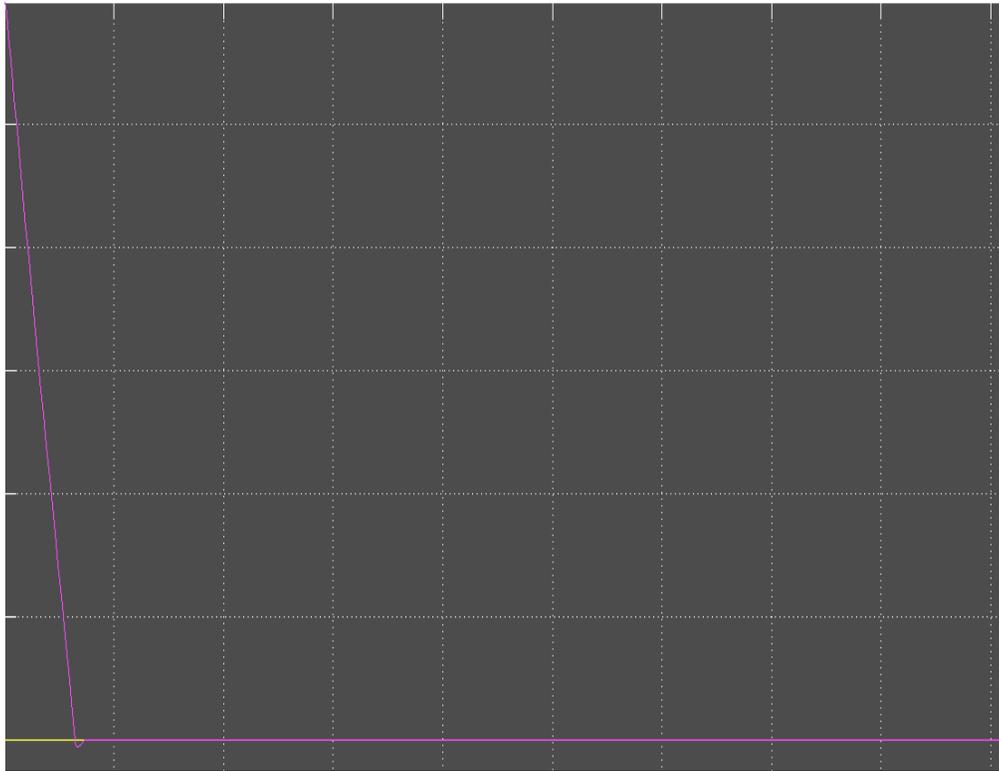


Figura 10.1. Control on/off de humedad

En la Figura 10.1 se puede observar la humedad del proceso o humedad de ingreso del arroz, la cual depende del proceso a realizarse, si la humedad de ingreso es 15%RH y la humedad de consigna es 10%RH, se puede observar como desciende la humedad hasta alcanzar la humedad de consigna.

Cuando la humedad del arroz alcanza la humedad de consigna se apaga el quemador y el control termina.

En el horno se pudieron obtener los datos de humedad del aire respecto a la humedad del grano como se muestran en el ANEXO 6.

10.2 SIMULACIÓN DEL CONTROLADOR PID

La simulación del controlador PID para la temperatura se la realizó en **Simulink®** con el circuito del ANEXO 12, donde se obtuvo la gráfica de la Figura 10.2.

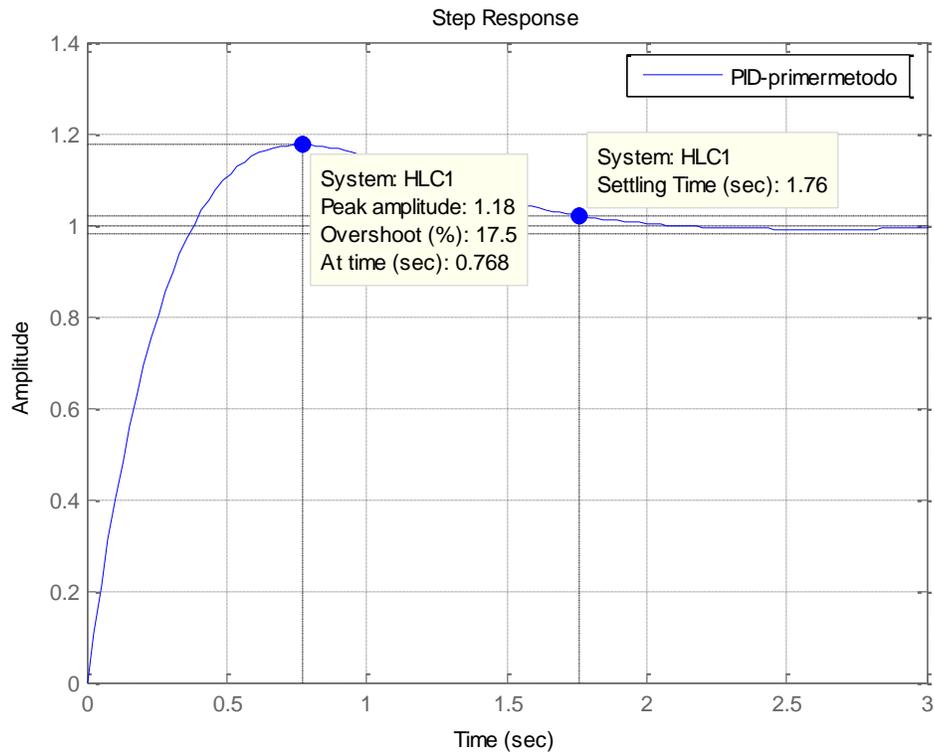


Figura 10.2. Control PID de temperatura

En la figura se puede observar que el sobreimpulso es menor al 20% y que el tiempo de establecimiento es menor a 2 segundos, se puede concluir que nuestro controlador a cumplido con los parámetros de diseño que fueron planteados inicialmente.

CAPÍTULO 11

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

11.1 CONCLUSIONES

Al finalizar el desarrollo del DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN HORNO AUTOMATICO DE SECADO Y ENVEJECIDO DE ARROZ PARA LA PROCESADORA DE PROYELEC INGENIERIAS. FASE I, se presentan las siguientes conclusiones detalladas a continuación:

- En las pruebas realizadas y verificadas en el laboratorio se determinó que la temperatura máxima que puede alcanzar el horno es de 107 °C, razón por la cual el proceso de envejecido se debe realizar a esta temperatura.
- El horno construido por el personal mecánico es de fácil mantenimiento. Para su operación no es necesario tener personal calificado, puede realizarlo cualquier persona.
- La arquitectura del horno facilitó el diseño de ubicación de los sensores de humedad y de temperatura, y en el futuro garantizará el control que se necesita para alcanzar la temperatura deseada y mantenerla controlada asegurando la correcta cocción del producto.
- La cantidad de producto que se ingrese en el horno influirá en el tiempo que se demora el horno en culminar cualquiera de los procesos, esto se debe a la obstrucción que sufre el flujo de masas de aire caliente en el interior del horno.

- Se determinó las variables de temperatura y humedad como las variables que intervienen en el proceso directamente.
- Matlab permite obtener y observar el comportamiento de la planta así como permite determinar las constantes para la sintonización del controlador.
- Los elementos que intervienen en el proceso deben ser seleccionados con las características sugeridas en el presente trabajo para garantizar el funcionamiento adecuado del mismo.
- Los elementos sugeridos en el presente trabajo son de fácil adquisición en el mercado nacional.
- El diseño planteado de la HMI es de arquitectura abierta y flexible con la posibilidad de expansiones o modificaciones.
- El desarrollo de este proyecto ha sido realizado paso a paso para que las personas interesadas puedan entender la manera en que el controlador automático de temperatura y humedad va a funcionar, además sirve de guía para realizar las conexiones de todos los elementos que intervienen en este sistema.
- Para facilidad del administrador, el HMI ha sido diseñado con Recetas para que sean cambiadas de forma fácil.
- El presente diseño involucra un detalle de los elementos necesarios, así como elementos extras que requiere cada equipo para facilitar la selección e implementación del sistema.

11.2 RECOMENDACIONES

- Establecer procedimiento de recepción, muestreo y manejo del grano antes del proceso de secado o envejecido, tomando en cuenta con referencia un contenido de humedad con el que debe llegar el grano de campo de 20 a 22% RH para el proceso de secado y entre 16% y el 14%RH para el proceso de envejecido y con un porcentaje de impurezas no mayor al 3%.
- Establecer un plan de manejo de unidades de almacenamiento para grano seco, donde se enfatice en capacidades de almacenamiento, distribución y

manejo del grano dentro de la unidad, aireación, desinfección y control de plagas.

- Para realizar el proceso de secado o envejecido, el arroz debe estar previamente pilado sin cáscara y en lo posible libre de impurezas.
- Se recomienda utilizar los componentes sugeridos ya que cumplen con las características del proceso.
- Se debería respetar el esquema establecido en el diseño, puesto que este se consideró como una opción sencilla.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ahyaudin Ali. "Sistemas de piscicultura en arrozales con bajos niveles de insumos en Malasia" www.fao.org/docrep/006/y1187s07.htm (Abril, 2009)
2. Andrade. M, 2007, "Manual del Cultivo de Arroz", Estación Experimental Boliche-INIAP, Ecuador, pp. 17-19, 136-139.
3. Arias. C, 1993, "Manual de Manejo Poscosecha de Granos a Nivel Rural", FAO, Santiago de Chile, Chile, pp. 18-44, 83-85.
4. Assenato. D y de Lucia. M, 1993 "La ingeniería en el Desarrollo, Manejo y Tratamiento de Granos Poscosecha, FAO" (Agosto, 2009).
5. BIBLIOTECA INIAP El Boliche (Provincia del Guayas)
6. http://www.sapiensman.com/medicion_de_temperatura/termocuplas.htm, termocuplas
7. <http://www.trcelectronics.com/Meanwell/dr-4524.shtml>, Fuente de Poder
8. OGATA, Katsuhiko, **Ingeniería de Control Moderna**, Tercera Edición, Editorial Prentice Hall Hispanoamericano, México 1998, pp 476-520.

9. SMITH, Carlos; CORRIPIO, Armando, **Control Automático de Procesos**, Segunda Edición, Editorial Limusa, México 1997, pp 107-145.
10. FRANKLIN, G; POWELL; EMANI, Naeini, **Control de Sistemas Dinámicos con Retroalimentación**, Segunda Edición, Editorial Addison-Wesley Iberoamericana, México 1991, pp 210-230.
11. PALLAS, Ramón; **Sensores y Acondicionadores de señal**, Tercera Edición, Editorial AlfaOmega, España 2001, pp350-370.
12. www.schneiderelectric.com/support/downloads, Twido S1061 Version A, Modbus & macro.
13. www.energia.inf.cu/iee-mep/SyT/CDG/.../QUEMADORES.PDF
14. www.conarroz.com/pdf/NovSisSec.pdf
15. www.agrimaq.com.ar/horno_ciclonico.htm
16. www.extractores.com.mx/centrifugos.htm
17. www.conarroz.com/pdf/19Arrocesespeciales.p

