

# Diseño e implementación de un horno automático de secado y envejecido de arroz para la procesadora de Proyelec Ingenierías. Fase I.

Aguirre Cueva Juan Fernando

Facultad de Ingeniería Electrónica, Escuela Politécnica del Ejercito  
Av. El Progreso S/N, Sangolquí, Ecuador

**Resumen:** El presente artículo describe el diseño de un sistema de control de humedad de grado y de control de temperatura en el interior del horno. La distribuidora de Proyelec Ingenierías se ha dedicado a comercializar arroz en la región de la Sierra, el cual es comprado en la región Costa. Debido a la gran demanda que tienen y a las ventajas que tiene realizar el proceso de secado y envejecido en sus instalaciones han decidido implementar un horno automático para el secado y envejecido de arroz, que básicamente consiste en someter al producto a temperaturas altas hasta que este tenga un grado de humedad de 10%RH. Este proyecto presenta desde el análisis del arroz a ser utilizado para el proceso, la manipulación que se debe dar al grano desde la llegada del producto a la procesadora, la instrumentación de todo el sistema, identificación de los parámetros de la planta, diseño del controlador de humedad del grano y del controlador de temperatura en el interior del horno, navegabilidad de la HMI, diseños P&ID, diseño eléctrico y simulaciones.

Gracias a programa Matlab® es posible identificar los parámetros de la planta, así como realizar el cálculo de las variables de los controladores para observar el comportamiento de los mismos. Y gracias a los programas Automation®, Cadesimu y Autocad® es posible realizar el diseño de todo el sistema de control de humedad y temperatura.

## Introducción

El arroz es uno de los principales componentes 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.

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 el proceso se detenga cuando el grano alcance la humedad óptima de 10%RH.

El horno en cuestión es 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.

## Filosofía de control

La arquitectura básica de un sistema de control (Fig. 1) está conformada por un PLC el cual será el cerebro encargado de controlar el proceso. El PLC tendrá conectado a sus entradas analógicas:

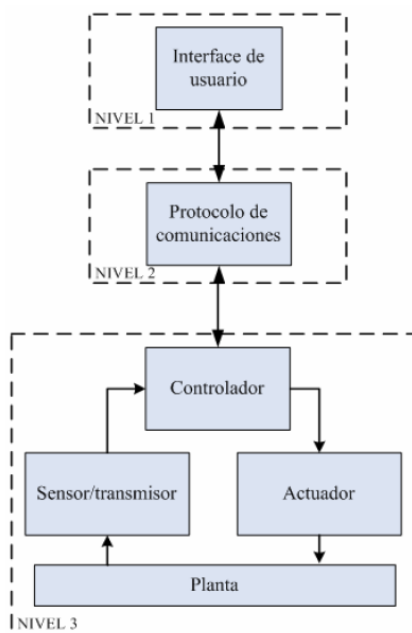
- Sensor de temperatura
- Sensor de humedad

Las salidas del PLC estarán conectadas a los siguientes elementos:

- Electroválvula

- Electrodo
- Motores DC
- Motor monofásico 220V

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.** Arquitectura básica del sistema de control

### Proceso de Secado

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%RH y 20%RH. 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.

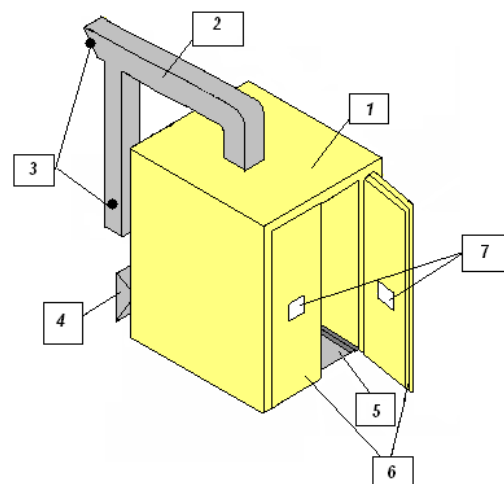
### Proceso de envejecido

Este proceso se lo realiza 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%RH y 14%RH ya que si la humedad es superior el arroz podría quemarse.

### Arquitectura del Horno

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 3m de alto, 3m de ancho y 4m de profundidad. En la parte posterior del horno se encuentra el blower que ingresara el aire caliente producido por el quemador.

El horno (Fig. 2) 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.



**Figura 2.** Descripción del horno

Las partes básicas del horno son las siguientes:

1. Caja del horno

2. Ducto de realimentación
3. Compuertas
4. Campana
5. Piso
6. Puertas
7. Ventanilla

### Instrumentación del sistema

El sistema de control contará con los siguientes componentes:

**Controlador:** Las funciones del controlador en 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 preactuadores.
- 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.

**Sensor de temperatura (Fig. 3):** Para realizar la selección de uno de estos sensores se debe tomar en cuenta las siguientes características:

- Intervalo de temperatura
- Resistencia química
- Resistencia a la abrasión
- Requisitos de instalación.

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

**Figura 3.** Especificaciones técnicas del sensor de temperatura

**Sensor de humedad (Fig. 4):** 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.

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

**Figura 4.** Especificaciones técnicas del sensor de humedad

**Quemador (Fig. 5):** El módulo controlador de encendido tiene las siguientes especificaciones técnicas:

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

**Figura 5.** Especificaciones técnicas del quemador

**Motor monofásico 220V (Fig. 6):** El motor monofásico tiene las siguientes especificaciones técnicas:

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 $\Phi$ 0.97
Modelo	NVR17094-2

**Figura 6.** Especificaciones técnicas del motor monofásico 220V

**Motor DC con caja reductora (Fig. 7):** Para realizar la selección de uno de estos motores se debe tomar en cuenta las siguientes características:

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

**Figura 7.** Especificaciones técnicas de los motores DC con caja reductora

**Variador de frecuencia (Fig. 8):** El variador de frecuencia debe cumplir con las siguientes características:

- 3 entradas digitales de 24VDC
- 1 entrada analógica de 4 a 20mA ó 0 a 10VDC
- Alimentación de 200-240VAC
- Control a 2 o 3 hilos
- Potencia 10HP
- Robusto

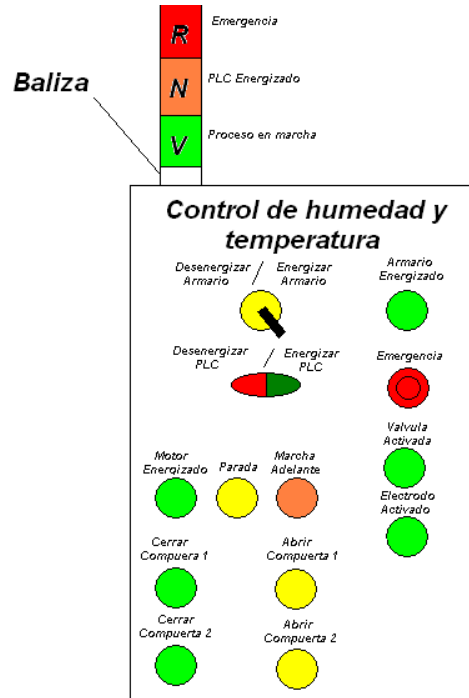
**Puente H (Fig. 8):** Este driver permitirá controlar el sentido de giro de los motores DC con caja reductora, los cuales abrirán y cerrarán las compuertas del ducto de realimentación. Este driver debe cumplir con las siguientes características:

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

**Figura 8.** Especificaciones técnicas del puente H

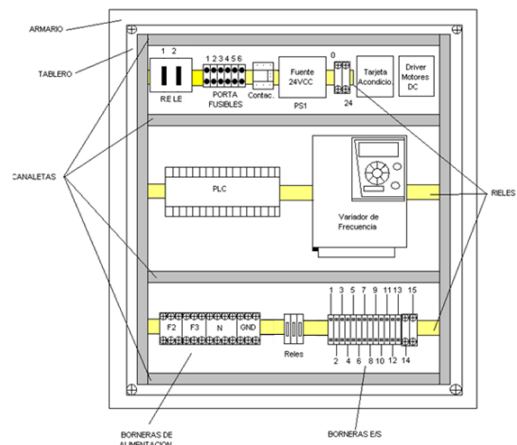
### Ubicación de los elementos

En la Figura 9 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 9.** 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 vacios, como se muestra en la Figura 10.



**Figura 10.** Ubicación de los elementos dentro del armario

## Esquema de la interface HMI

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.

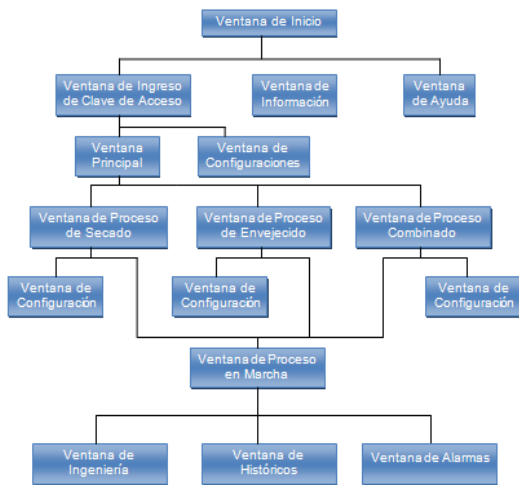
Es necesario que el usuario no tenga acceso a la configuración de las temperaturas, humedades de ingreso y humedad de salida, únicamente el administrador que conozca la clave de acceso a las páginas de configuración puede realizar estos cambios.

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

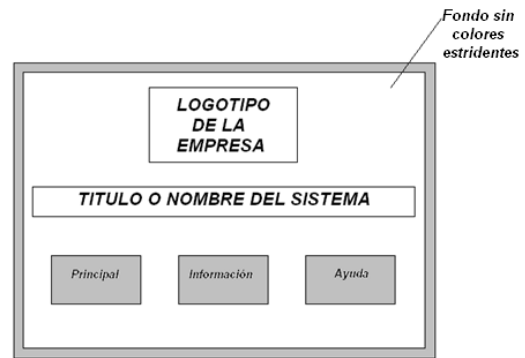
HUM1 y el valor de la humedad de salida HUMS. Cuando la humedad del producto sea igual a la humedad de ingreso HUM2, entonces se va a asignar automáticamente al registro respectivo el valor de TEMP2, el valor de HUMS que no varía y el tiempo de enfriamiento TENF2. Finalmente cuando la humedad del producto 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. En la figura 10 se observa la navegabilidad de la HMI:



**Figura 10.** Navegabilidad de la HMI

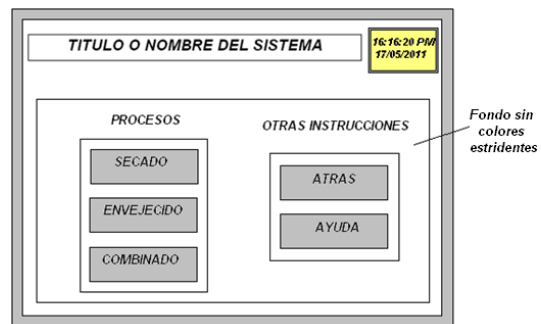
**Ventana de Inicio (Fig. 11):** En esta primera ventana se colocará el logotipo de la empresa, en la parte inferior hay un espacio para colocar el nombre del sistema (Horno automático de secado y envejecido de arroz). En la parte inferior de la ventana se tendrá un menú de tres botones

- **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.



**Figura 11.** Ventana de inicio

**Ventana Principal (Fig. 12).** Al oprimir el botón PRINCIPAL del menú de la ventana de inicio, se direcciona hacia una ventana de ingreso de clave de acceso, 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.



**Figura 12.** Ventana principal

**Ventana de Proceso (Fig. 13):** 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.

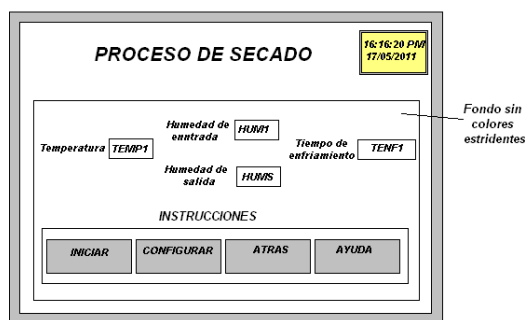


Figura 13. Ventana de proceso

**Ventana de Configuración (Fig. 14):** 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.

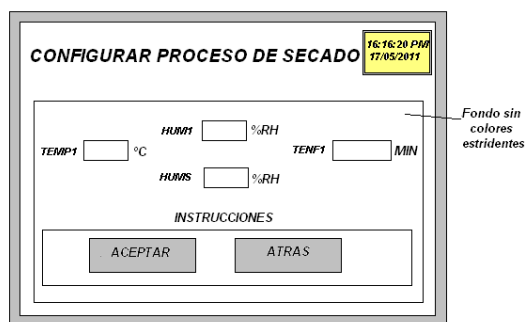


Figura 14. Ventana de configuración

**Ventana de Proceso en Marcha (Fig. 15):**

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.

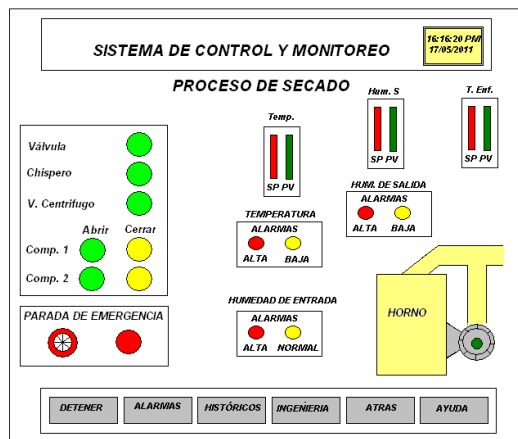


Figura 15. Ventana de proceso en marcha

**Ventana de Ingeniería (Fig. 16):** 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.

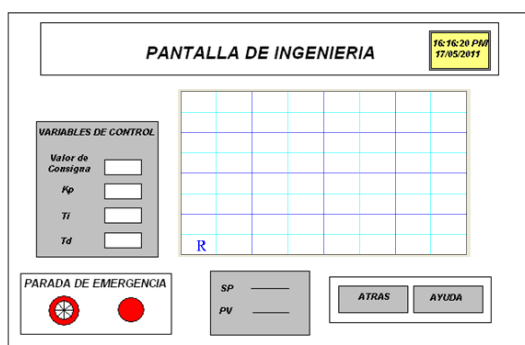


Figura 16. Ventana de ingeniería

**Ventana de Históricos (Fig. 17):** 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.

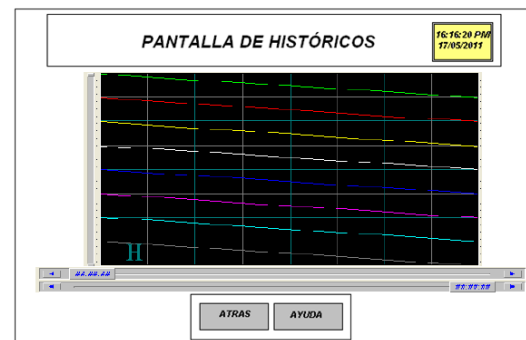


Figura 17. Ventana de históricos

**Ventana de Alarmas (Fig. 18):** 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.



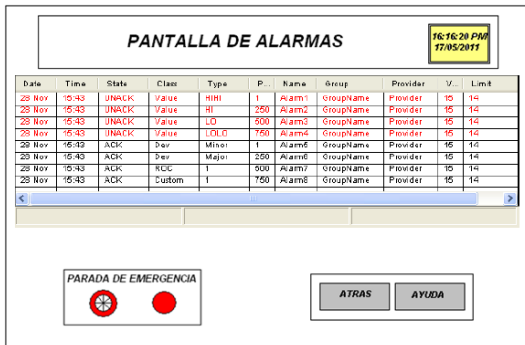


Figura 18. Ventana de alarmas

### Identificación de la planta

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 19. Planta

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:

**Recolección de datos (Fig. 20):** 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.

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

Figura 20. Valores de entrada y salida de la planta

**Ingreso de datos (Fig. 21):** 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.

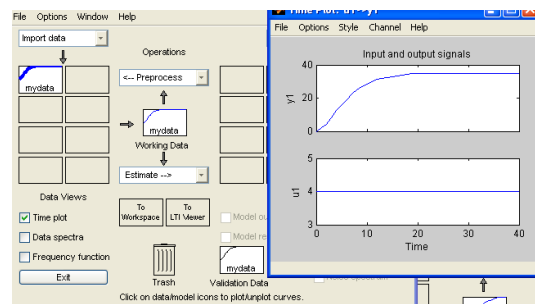
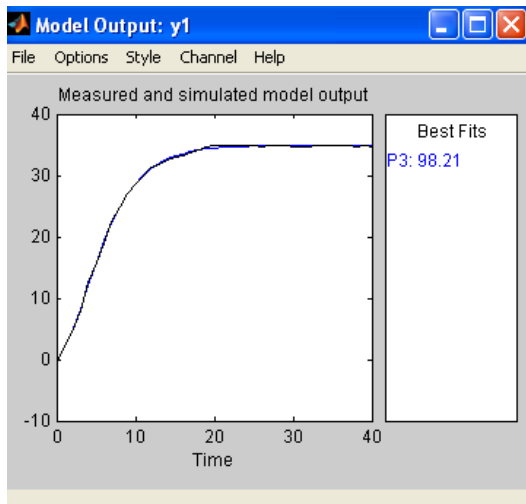


Figura 21. Gráfica de entrada y salida del proceso

**Estimación de parámetros (Fig. 22):** La herramienta de **Matlab®** nos permite obtener los parámetros de nuestra función

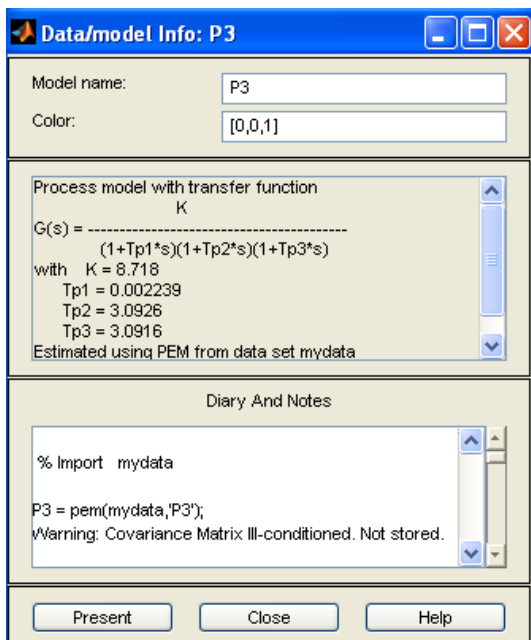
de transferencia, con la cual podemos diseñar nuestro controlador.

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 22.** Modelo real vs modelo estimado

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



**Figura 23.** Parámetros de la función de transferencia

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

$$G(s) = \frac{8.178}{(0.02140726295624 \cdot s^3 + 9.5749285838 \cdot s^2 + 6.186439 \cdot s + 1)}$$

**Figura 24.** Función de transferencia

### Diseño de los controladores

**Controlador de humedad (Fig. 25):** 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
3. 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 25.** 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.

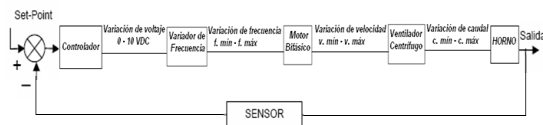
**Controlador de temperatura (Fig. 26):** El diseño del sistema de control de temperatura consta principalmente de un sensor de temperatura y la acción de control se la realiza al variador de frecuencia que a su vez cambia la velocidad del motor y del ventilador centrífugo y por tanto el caudal de

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

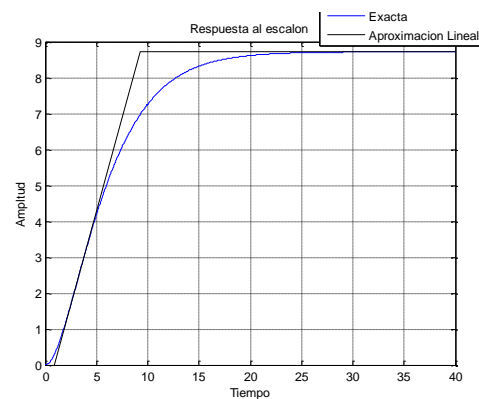


**Figura 26.** Diagrama de bloques del control de temperatura

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 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. 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.



**Figura 27.** 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:

$$K_p = 1.2 \frac{T}{L} \quad \text{Ec. 1}$$

$$T_i = 2L \quad \text{Ec. 2}$$

$$T_d = 0.5L \quad \text{Ec. 3}$$

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

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

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

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad \text{Ec. 4}$$

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

$$K_d = K_p * T_d$$

$$K_d = 11.5499 * 0.4366 = 5.0431$$

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

$$C_{PID} s = 11.5499 * \left( 1 + \frac{1}{1.7465*s} + 0.4366 * s \right) \quad \text{Ec. 5}$$

### Simulaciones

**Controlador de humedad:** La simulación del controlador ON-OFF para la humedad de salida del arroz se la realizó en Simulink® donde se obtuvo siguiente gráfica.

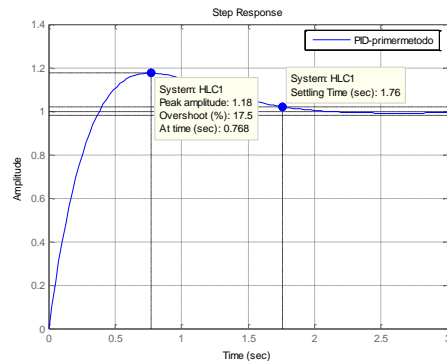


**Figura 28.** Control on/off de humedad

En la Figura 28 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.

**Controlador de temperatura:** La simulación del controlador PID para la temperatura se la realizó en Simulink® donde se obtuvo la siguiente gráfica.



**Figura 29.** 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.

### Conclusiones

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.

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.

### Referencias

- [1] Ahyaudin Ali. "Sistemas de piscicultura en arrozales con bajos niveles de insumos en Malasia" [www.fao.org/docrep/006/y1187s07.htm](http://www.fao.org/docrep/006/y1187s07.htm) (Abril, 2009)
- [2] Arias. C, 1993, "Manual de Manejo Poscosecha de Granos a Nivel Rural", FAO, Santiago de Chile, Chile, pp. 18-44, 83-85.
- [3] OGATA, Katsuhiko, Ingeniería de Control Moderna, Tercera Edición, Editorial Prentice Hall Hispanoamericano, México 1998, pp 476-520.
- [4] SMITH, Carlos; CORRIPIO, Armando, Control Automático de Procesos, Segunda Edición, Editorial Limusa, México 1997, pp 107-145.
- [5] FRANKLIN, G; POWELL; EMANI, Naeini, Control de Sistemas Dinámicos con Retroalimentación, Segunda Edición, Editorial Addison-Wesley Iberoamericana, México 1991, pp 210-230.



**Juan Fernando Aguirre**

nació en Quito, Ecuador, en 1987. Recibió el título de pregrado en ingeniería electrónica, automatización y control en el 2011 en la Escuela Politécnica de Ejército. Entre los campos de interés esta la Seguridad Industrial.