

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Electrónica



Derivados de Maíz Alimenticio S.A.

DEMASA

“Sistema de control automático para un horno industrial”

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniería
Electrónica con el grado académico de Licenciatura**

José Fabio Arguedas Romero

Cartago, Noviembre del 2010

INSTITUTO TECNOLOGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRONICA

PROYECTO DE GRADUACIÓN

TRIBUNAL EVALUADOR

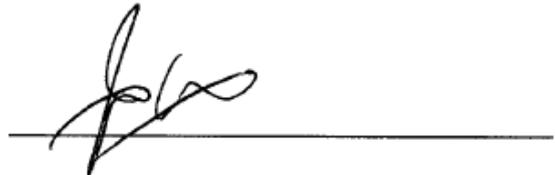
Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal



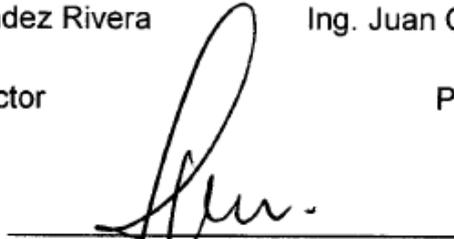
Ing. Miguel Hernández Rivera

Profesor lector



Ing. Juan Carlos Jiménez Robles

Profesor lector



Ing. Arnoldo Rojas Coto

Profesor asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica

Cartago, 24 de Noviembre del 2010

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, 24 de Noviembre 2010

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'J. Fabio Arguedas R.', is written over a horizontal line.

José Fabio Arguedas Romero

Céd: 1-1147-0250

Resumen: Debido a la competitividad del mercado, las industrias han aplicado diferentes métodos para mejorar la productividad. Una de las tendencias que ha tomado mayor fuerza en las industrias es la automatización de procesos para producir más en menos tiempo y menor costo, y para mejorar la calidad de sus productos. Es por esta razón que DEMASA, una empresa dedicada al cocimiento y molienda del maíz, ha decidido automatizar sus procesos industriales.

Por medio de este proyecto, se logra la automatización del horno utilizado en la línea de producción de tortillas. El problema que actualmente se presenta en el horno radica en el control inadecuado de la temperatura del horno, secuencias inseguras de encendido y apagado y en la falta de un control y monitoreo centralizado de los componentes del horno como los motores, transformadores, ventiladores, extractores de gases y mediciones de temperatura con termopares.

Estas dificultades pueden llegar a provocar problemas en la producción, como elevación de costos de producción por uso excesivo de combustible utilizado para la combustión del horno, paros forzados por daños en el equipo y defectos en el producto (tortillas) que no cumplen con los estándares de calidad requeridos para su venta.

Es por esta razón que se busca desarrollar un control automático de la temperatura y funcionamiento general del horno. Permitiendo a los operadores poder controlar mediante un PLC y monitorear mediante interfaces gráficas el estado del horno de una manera centralizada, más rápida y más eficaz.

Palabras claves: Regulador PID, dámper, variador de frecuencia, válvula tipo mariposa, termopares, PLC, HMI.

Summary: Due to market competitiveness, industries have applied several methods to improve productivity. A trend that has been growing in industry is processes' automation to produce more in less time and lower cost, and to improve the quality of their products. That's why, DEMASA, a company who makes cooking and milling of corn, has decided to automate their industrial processes.

Through this project, the oven used in the production line of tortillas had achieved its automation. The problem currently occurs in the oven lies in the inadequate temperature's control, switch on and switch off unsafe sequences and the lack of control and centralized monitoring on oven's components such as motors, transformers, fans, extractors and thermocouples measurements.

These complications may even induce production problems such as rising production costs due to fuel's waste used in oven's combustion, forced shutdowns for equipment damages and even not required quality standards on tortillas' sales.

For this reason it is searching a way to develop an automatic temperature control and general oven's performance. Allowing operators to control by a PLC and monitor through graphical interfaces the oven's status in a centralized, faster and more effective way.

Keywords: PID controller, damper, AC drive, butterfly valve, thermocouples, PLC, HMI.

INDICE GENERAL

Capítulo 1: Introducción	14
1.1 Entorno del problema	14
1.2 Descripción del problema e importancia de la solución.....	15
1.2.1 Síntesis del problema.....	17
1.2.2 Importancia de la solución.....	17
1.3 Solución seleccionada	18
Capítulo 2: Meta y objetivos	20
2.1 Meta	20
2.2 Objetivo general	20
2.3 Objetivos específicos	20
Capítulo 3: Marco Teórico	22
3.1 Descripción del proceso y sistema a mejorar	22
3.1.1 Sistema de combustión	22
3.1.2 Sistema eléctrico.....	27
3.2 Antecedentes bibliográficos	29
3.2.1 Descripción PLC (Controlador Lógico Programable)	30
3.2.2 Señal 4-20 mA	31
3.2.3 Protocolos de comunicación utilizados	32
3.2.4 Variador de frecuencia	34
3.2.5 El servomotor	34
3.2.6 Termopares.....	35

3.2.7 Descripción de los principales principios termodinámicos relacionados con la solución del problema.....	36
Capítulo 4: Procedimiento Metodológico.....	39
4.1 Reconocimiento y definición del problema.....	39
4.2 Obtención y análisis de información.....	39
4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución.....	40
4.4 Implementación de la solución.....	43
Capítulo 5: Descripción detallada de la solución.....	49
5.1 Proceso de medición y calibración del horno.....	49
5.1.1 Determinación del flujo másico de aire para cada paso.....	49
5.1.2 Calibración del flujo másico del LPG.....	50
5.2 Modelo matemático del horno.....	52
5.2.1 Modelo teórico.....	52
5.2.2 Modelo Empírico y validación del modelo.....	56
5.3 Determinación del regulador PID.....	57
5.3.1 Cálculo del Regulador PID teórico.....	57
5.3.2 Validación del Regulador PID.....	58
5.4 Descripción del PLC Compact Logix 1769-L32E.....	60
5.4.1 Características del controlador 1769-L32E.....	60
5.5 Descripción de la pantalla táctil PanelView Plus 1000.....	68
5.6 Descripción del software utilizado.....	69
5.6.1 RSLogix 5000 software de programación del PLC.....	69
5.6.2 RSLinx Classic.....	70

5.6.3 FactoryTalk View Machine Edition (ME)	71
5.7 Descripción de los variadores de frecuencia	73
5.8 Descripción de los actuadores	75
5.9 Diseño de diagramas de flujo y bloques	76
5.9.1 Diagrama de flujo para el encendido de los dispositivos	76
5.9.2 Diagrama de flujo de encendido automático	77
5.9.3 Bloques de escalamiento de entradas y salidas	78
5.9.4 Bloque promediador	79
5.9.5 Bloque PID	80
5.10 Diseño de la interfaz gráfica	86
5.10.1 Pantalla de inicio	87
5.10.2 Pantalla de Vista del horno	87
5.10.3 Pantalla de arranque del horno	88
5.10.4 Pantalla de control de temperatura	89
5.10.5 Pantalla de control de PID	90
5.10.6 Pantalla Variadores	91
5.10.7 Pantalla de alarmas	92
5.10.8 Pantallas de mensajes de alerta	93
5.11 Simulación	93
5.11.1 Simulación de rutinas de arranque	93
5.11.2 Simulación del controlador PID	94
5.12 Montaje del equipo	96
Capítulo 6: Resultados experimentales y análisis	97

6.1 Resultados experimentales.....	97
6.1.1 Resultados de emisiones de gases	97
6.1.2 Resultados experimentales de la secuencia de encendido y apagado.	98
6.1.3 Resultados experimentales de la variación de porcentaje de apertura de la válvula	98
6.2 Análisis de resultados.....	99
6.2.1 Análisis de las emisiones de gas.....	99
6.2.2 Análisis de las secuencias de encendido y apagado	100
6.2.3 Análisis de la variación del porcentaje de apertura.....	102
6.2.4 Análisis de ingeniería económica	103
Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones	105
Bibliografía	108
Apéndices	110
A.1. Abreviaturas.....	110
A.2. Glosario	110
A.3. Manual de operador	112
A.4. Planos de conexión de módulos del PLC	119
A.5. Mediciones de aire y emisiones de gases	126

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1.1	Diagrama del proceso de producción de tortillas	15
Ilustración 1.2	Ilustración de los tres pasos del horno de combustión.	15
Ilustración 1.3	Vista de la válvula mariposa para el aire	17
Ilustración 1.4	Lazo de control automático de la temperatura del horno T600	18
Ilustración 3.1	Partes del sistema de combustión.....	22
Ilustración 3.2	Regulador de presión	23
Ilustración 3.3	Válvula de seguridad.....	24
Ilustración 3.4	Ventilador de aire	24
Ilustración 3.5	Válvula tipo mariposa	25
Ilustración 3.6	Quemador de rejilla	26
Ilustración 3.7	Sistema de combustión del horno	26
Ilustración 3.8	Componentes del sistema eléctrico.....	27
Ilustración 3.9	Motor de banda transportadora	28
Ilustración 3.10	Circuito de transformador y electrodo.....	28
Ilustración 3.11	Secuencia de encendido y apagado del sistema eléctrico....	29
Ilustración 3.12	Conversión de señal de corriente a señal de tensión.	31
Ilustración 3.13	Conector DB9 para comunicaciones RS-232	33
Ilustración 3.14	Cable 10 Bate-T y conector RJ-45 para comunicación Ethernet	33
Ilustración 3.15	Sistema CSMA/CD.....	33
Ilustración 3.16	Circuito de variador de frecuencia	34

Ilustración 3.17	Servomotor	35
Ilustración 3.18	Termopar	35
Ilustración 3.19	Distribución de flujo másico en una tubería	38
Ilustración 4.1	Válvula proporcional.....	40
Ilustración 4.2	Conexión de dámper o actuador a la válvula tipo mariposa ...	42
Ilustración 4.3	Sensor de oxígeno	43
Ilustración 4.4	Secuencia automática de encendido y apagado	44
Ilustración 5.1	Medidor de flujo volumétrico Dresser	50
Ilustración 5.2	Desplegado de medición.....	51
Ilustración 5.3	Diagrama simplificado de entradas y salidas del horno.....	53
Ilustración 5.4	Respuesta ante un escalón del 35%	54
Ilustración 5.5	Tiempo para un 39.3% de la respuesta total del sistema	54
Ilustración 5.6	Tiempo para un 63.2% de la respuesta total del sistema	55
Ilustración 5.7	Aproximación de sistemas por medio de la herramienta Ident de Matlab	56
Ilustración 5.8	Diagrama de bloques del sistema controlado.....	57
Ilustración 5.9	Respuesta del sistema al escalón unitario con regulador PID	59
Ilustración 5.10	Características principales del PLC.....	60
Ilustración 5.11	Conexión serial del PLC.....	61
Ilustración 5.12	Botón pulsador de comunicación predeterminada del canal 0	62
Ilustración 5.13	Conexión Ethernet del PLC	62
Ilustración 5.14	Configuración de la dirección IP mediante RSLinx Classic...	63

Ilustración 5.15	Ingreso de la dirección IP	63
Ilustración 5.16	Conexión de módulos de I/O al PLC	66
Ilustración 5.17	Conexión de termopares al módulo de entrada de termopares del PLC	67
Ilustración 5.18	Características generales de los módulos I/O	68
Ilustración 5.19	PanelView Plus 1000	69
Ilustración 5.20	Módulos y conexiones del PanelView Plus 1000.....	69
Ilustración 5.21	Pantalla principal del RSLogix 5000.....	70
Ilustración 5.22	Administrador de dispositivos de red RSLinx Classic	71
Ilustración 5.23	Pantalla principal del software FactoryTalk View Studio ME	72
Ilustración 5.24	Asignación de etiquetas al desplegado	73
Ilustración 5.25	Variador de frecuencia PowerFlex 4.....	74
Ilustración 5.26	Conexión del variador de frecuencia	74
Ilustración 5.27	Conexión del actuador	75
Ilustración 5.28	Actuador AM24SR	76
Ilustración 5.29	Diagrama de flujo del encendido de dispositivos	77
Ilustración 5.30	Diagrama de flujo de secuencia de encendido y apagado automático	78
Ilustración 5.31	Bloques de escalamiento de entradas y salidas	79
Ilustración 5.32	Bloques para promediar entrada de termopares	79
Ilustración 5.33	Bloque PIDE	80
Ilustración 5.34	Diagrama de aplicación de la instrucción PIDE	80
Ilustración 5.35	Configuración de la ecuación PID	81

Ilustración 5.36	Configuración de los parámetros de la instrucción PID	82
Ilustración 5.37	Etiqueta del auto-sintonizador	83
Ilustración 5.38	Cuadro de diálogo del Autotune PIDE	84
Ilustración 5.39	Cuadro de resultados de la auto-sintonización	85
Ilustración 5.40	Diagrama de flujo del programa de auto-sintonización	86
Ilustración 5.41	Pantalla de inicio al sistema de control.....	87
Ilustración 5.42	Pantalla de vista del horno	88
Ilustración 5.43	Pantalla de arranque del horno	89
Ilustración 5.44	Pantalla de control de temperatura	90
Ilustración 5.45	Pantalla de control de PID.....	91
Ilustración 5.46	Pantalla variadores	92
Ilustración 5.47	Pantalla de variadores.....	93
Ilustración 5.48	Pantalla de mensajes.....	93
Ilustración 5.49	Simulación del sistema mediante instrucción LDLG	95
Ilustración 5.50	Respuesta del proceso simulado	95
Ilustración 5.51	Montaje del equipo en canaletas	96
Ilustración 6.1	Secuencia de encendido y apagado de relés	98
Ilustración 6.2	Principio del enclavamiento para accionar equipos	101
Ilustración 6.3	Linealidad entre el porcentaje de apertura y el ángulo del actuador.....	102
Ilustración A. 1	Conexión de módulo 1, 1769-IA8I entradas discretas	119
Ilustración A. 2	Conexión de módulo 2, 1769-IA8I entradas discretas.....	120
Ilustración A. 3	Conexión de módulo 3, 1769-IA16 entradas discretas.....	121

Ilustración A. 4	Conexión de módulo 4, 1769-OW16 salidas discretas	122
Ilustración A. 5	Conexión de módulo 5, 1769-IF4 entradas analógicas	123
Ilustración A. 6	Conexión de módulo 6, 1769-OF8 salidas analógicas	124
Ilustración A. 7	Conexión de módulo 7, 1769-IT6 entradas termopares	125

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Temperatura de los dos primeros pasos del horno T600.....	16
Tabla 3.1	Módulos que se conectaron al PLC CompactLogix 5000.....	30
Tabla 5.1	Flujo Volumétrico de aire en cada paso del horno	49
Tabla 5.2	Consumo de LPG de la línea 1.....	51
Tabla 5.3	Configuración predeterminada de la conexión serial	61
Tabla 5.4	Configuración predeterminada de la conexión serial	64
Tabla 5.5	Configuración predeterminada de la conexión serial	65
Tabla 5.6	Posiciones de los módulos instalados	67
Tabla 5.7	Posiciones de los módulos instalados	71
Tabla 5.8	Parámetros de configuración del variador	75
Tabla 5.9	Posiciones de los módulos instalados	82
Tabla 6.1	Medición de emisiones de la línea 1 de tortillas.....	97
Tabla 6.2	Porcentaje de apertura establecido y posición angular del actuador	99
Tabla 6.3	Comparación de las emisiones de gases del horno de tortillas y el decreto 30222	100

Capítulo 1: Introducción

Este capítulo contiene una explicación detallada del problema existente en la planta de producción de tortillas de DEMASA y la importancia de su solución. Además se especifica el procedimiento seguido para la obtención de dicha solución.

1.1 Entorno del problema

DEMASA es una filial del grupo GRUMA cuya sede principal se ubica en México. En nuestro país es líder en el mercado de harinas de maíz (MASECA®), tortillas (TORTI RICA®), snacks (TOSTY®), trigo, palmito y otros productos.

El área de producción de tortillas cuenta con seis líneas de producción T600, cada línea está formada por una mezcladora, una formadora, un horno T600 y un enfriador.

Cada una de las seis líneas producción tiene el mismo proceso, cuyo orden se resume en los siguientes pasos:

- a. El proceso inicia en las tolvas donde ingresa la harina a la línea.
- b. La harina es mezclada con cantidades apropiadas de agua en la mezcladora, la cual consiste en un motor de CD con un tornillo sin fin.
- c. En un dispositivo adicional, la masa se corta de acuerdo al molde instalado en la formadora.
- d. Una vez formada la tortilla pasa al horno T600 para cocinarla a una determinada temperatura de acuerdo al tipo de tortilla que se esté produciendo.
- e. Las tortillas pasan a la etapa de enfriamiento, la cual consta de varias bandas que transportan la tortilla hasta enfriarla a temperatura ambiente
- f. En la última etapa se evalúa su calidad y se empaca.

En la ilustración 1.1 se ilustra del proceso de producción de tortillas anteriormente descrito.

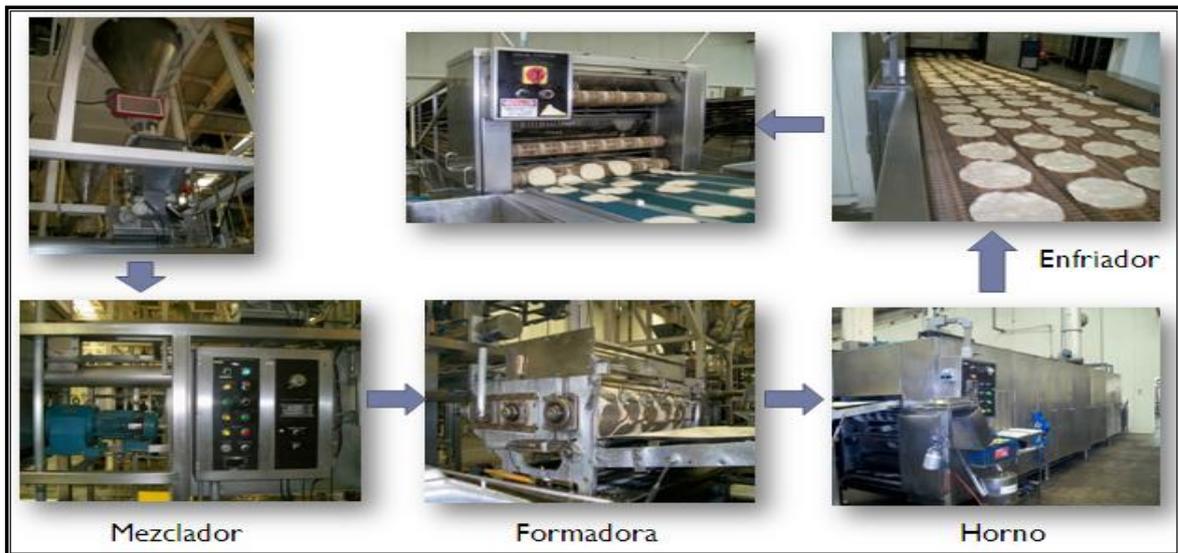


Ilustración 1.1 Diagrama del proceso de producción de tortillas

1.2 Descripción del problema e importancia de la solución

El horno de cocción de las tortillas está constituido por tres bandas transportadoras que dividen el horno en tres pasos. El primer paso tiene 12 quemadores, el segundo 9 y el tercero 8. En la ilustración 1.2 se muestra la distribución de los quemadores en cada paso del horno, cada quemador ha sido resaltado con un punto rojo para facilitar su identificación en la ilustración.

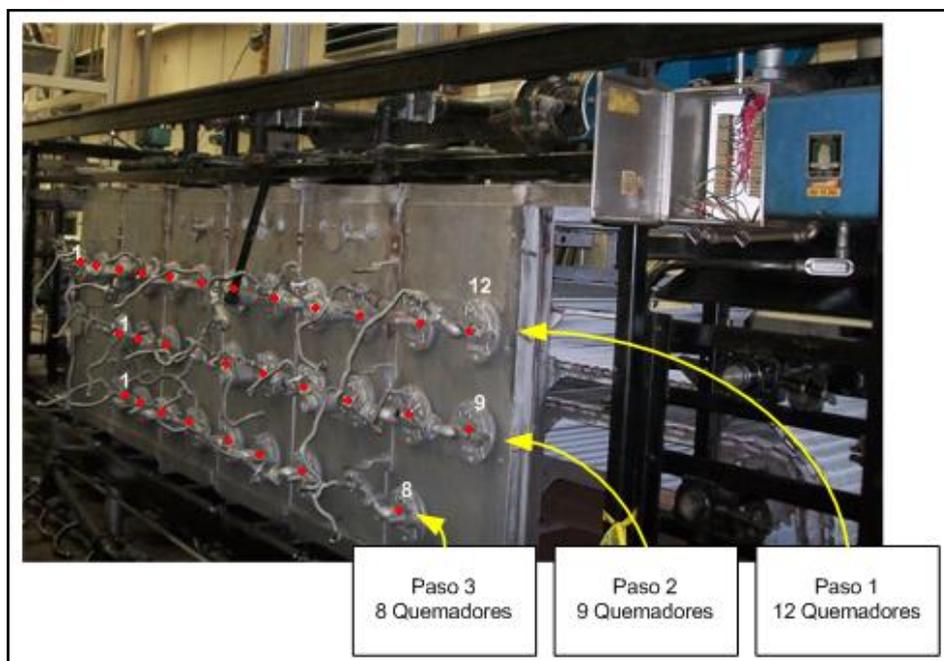


Ilustración 1.2 Ilustración de los tres pasos del horno de combustión.

En cada línea se producen diferentes tipos de tortillas que requieren determinadas temperaturas para cocinarlas, tal como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 1.1 Temperatura de los dos primeros pasos del horno T600

	Regular	Campesinas	Fogón	Gruesitas
Temp. Paso 1 (°C)	315,56 - 371 (600 – 700 °F)	260 – 315 (500 – 600 °F)	315,56 - 371 (600 – 700 °F)	315,56 - 371 (600 – 700 °F)
Temp. Paso 2 (°C)	287– 343 (550 – 650 °F)	232– 287 450 - 550	287 – 343 (550 – 650 °F)	287 – 343 (550 – 650 °F)

El control actual consiste en una operación manual del sistema, donde el operador, de acuerdo a la temperatura determinada para cada paso, regula el flujo de aire por medio de una válvula tipo mariposa, ver ilustración 1.3. Esta regulación se realiza a criterio del operador que observa visualmente la llama de los quemadores y gradúa el aire hasta que esta tome un color verde-azulado. No se cuenta con ningún tipo de medición técnica que defina los parámetros para determinar cuándo el proceso se aproxima a la combustión completa. Debido a que la inserción de aire para la combustión está basada en la observación del operador, algunas veces se queman las tortillas, o al contrario, no alcanzan la cocción adecuada.

También debido a la falta de mediciones de los componentes para la combustión, LPG y aire, es probable que se genere una mala combustión, por ejemplo, puede que haya más LPG que aire para la combustión, generando un desperdicio de LPG, o puede por el contrario, haber más aire que LPG generando una llama amarilla que produce hollín en el interior del horno, ensuciando los quemadores y ocasionando que la tortilla no se cocine correctamente, lo que se traduce a pérdidas económicas y daño ambiental.

Otro problema de la operación manual del horno, es la oscilación constante de la temperatura, esto debido a que la operación manual no permite que la

temperatura del horno se estabilice porque constantemente se está abriendo y cerrando la válvula que regula el flujo de aire, lo cual genera cambios en la cocción de la tortilla y por consiguiente, en algunas ocasiones se quema o queda semicocinada.

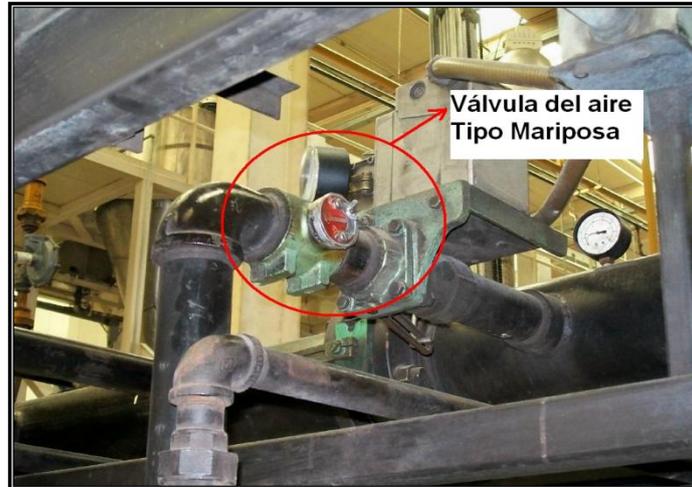


Ilustración 1.3 Vista de la válvula mariposa para el aire

1.2.1 Síntesis del problema

El desconocimiento de las cantidades de aire y LPG suministradas al horno y la falta de calibración de las mismas para una combustión eficiente, ocasiona un desperdicio del LPG que origina pérdidas económicas y daño ambiental.

Además la manipulación inadecuada de la válvula del aire produce una temperatura oscilante en el horno fuera de los rangos aceptables que altera la calidad del producto, genera consumo excesivo de combustible y demanda mantenimiento adicional del horno.

1.2.2 Importancia de la solución

Lograr una relación aire-LPG que permita una combustión eficiente para disminuir el desperdicio de combustible y controlar automáticamente el porcentaje de apertura de la válvula de aire con el fin regular la temperatura del horno para mejorar la calidad del producto.

1.3 Solución seleccionada

Se requiere realizar un control automático de la temperatura del horno en la línea de producción de tortillas, que regule la concentración del aire para la combustión en las dos primeras zonas del horno, donde se requieren temperaturas específicas de acuerdo al tipo de tortilla que se esté produciendo.

El sistema de control automático de la temperatura del horno contará con un controlador lógico programable (PLC), actuadores para las válvulas de regulación del aire y una interfaz con el usuario, donde se pueda establecer la temperatura deseada y variar el porcentaje de apertura de la válvula de regulación. También se podrá realizar el arranque del sistema y monitorear el adecuado funcionamiento de cada una de las partes que lo integran.

El control se realizará a partir de la medición de temperatura en las dos primeras zonas del horno mediante termopares tipo J, esta señal será utilizada por el PLC que enviará la señal de control a los actuadores que determinan el porcentaje de apertura de las válvulas para regular la cantidad de aire de la combustión, tomando como referencia la temperatura establecida por el operador.

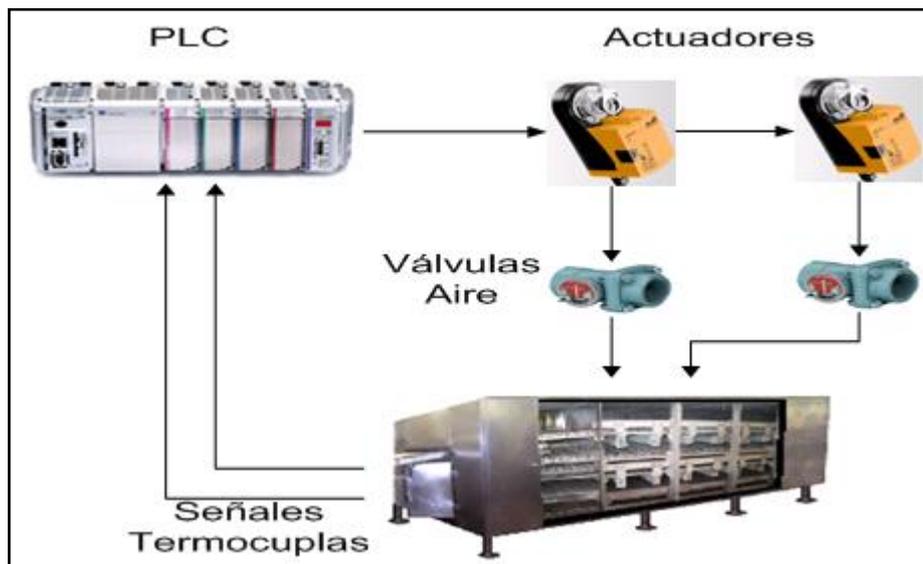


Ilustración 1.4 Lazo de control automático de la temperatura del horno T600

Por medio de la medición del consumo de gas LP del horno y del aire suministrado por el ventilador para la combustión, se obtendrán los parámetros

necesarios para poder determinar las cantidades adecuadas de aire para una la combustión, logrando de esta manera eliminar el desperdicio de gas LP.

Se permitirá también el control manual donde el operador pueda tomar poder sobre las variables a manipular desde el controlador propuesto.

Toda la tecnología utilizada en la solución propuesta es factible conseguirla en el país, por medio de empresas suministradoras de equipos de control automático industrial.

La parte inicial del diseño del sistema es la realización de un modelo matemático del horno y un análisis de sus características dinámicas y estáticas. Además se deben considerar ciertas variables externas como la cantidad de gas contenido en el tanque y su temperatura porque generan cambios de presión y con ello el flujo de gas en la entrada del sistema.

Una vez establecido el modelo matemático del horno, se procede al diseño del controlador y su programación para su posterior implementación y verificación. Cabe mencionar que el PLC debe instalarse en un gabinete que a futuro integrará todo el control de los demás equipos de la línea de producción.

Capítulo 2: Meta y objetivos

En este capítulo encontrará información sobre la meta y los objetivos que se desean alcanzar al automatizar el horno de cocción de tortillas, así como los indicadores para evaluar su cumplimiento.

2.1 Meta

Lograr la automatización del horno, tanto de las secuencias de encendido y apagado, como la regulación de la temperatura del horno manteniendo una relación adecuada de gas y aire para una combustión eficiente.

2.2 Objetivo general

Automatizar el horno de la línea de producción de tortillas T600, tanto el encendido y apagado de sus componentes, así como la regulación de temperatura en sus dos primeras zonas, para alcanzar los valores de temperatura establecidos por el operador.

2.3 Objetivos específicos

Los objetivos específicos que conducen a la solución del problema descrito son:

- a. Cumplir con el decreto ejecutivo 30222 sobre emisiones contaminantes en Costa Rica, publicado el 26 de marzo del 2002 en La Gaceta, por medio de la regulación de la cantidad de gas LP suministrado al horno con el fin de lograr una combustión eficiente. [1]
- b. Lograr la regulación de la temperatura del horno por medio de un controlador PID programado en el PLC, que controle el porcentaje de apertura de la válvula para alcanzar el valor de temperatura establecido por el operador.

- c. Lograr la regulación automática y manual del porcentaje de apertura de la válvula de aire, por medio de actuadores adaptados a las válvulas mariposa actualmente instaladas en el sistema.
- d. Realizar una secuencia automática de encendido y apagado de la banda transportadora del horno, el ventilador del aire para la combustión, el extractor de gases y la chispa de ignición.
- e. Implementar el sistema de control en un gabinete donde se encuentre el PLC con sus módulos, los variadores de frecuencia y los dispositivos de protección.
- f. Lograr que el personal comprenda la operación de la pantalla táctil para el control, brindándole capacitaciones y un manual de operación del sistema de control, donde se detallen las funciones de cada desplegado de la pantalla.

Capítulo 3: Marco Teórico

Este capítulo contiene una descripción de los principales temas o conceptos relacionados con la automatización del horno.

3.1 Descripción del proceso y sistema a mejorar

El proceso de cocción de las tortillas que se realiza en el horno T600 tiene dos sistemas:

- Sistema de Combustión.
- Sistema Eléctrico

3.1.1 Sistema de combustión

El sistema de combustión está constituido por un subsistema de gas y de aire, como se muestra en la ilustración 3.1.

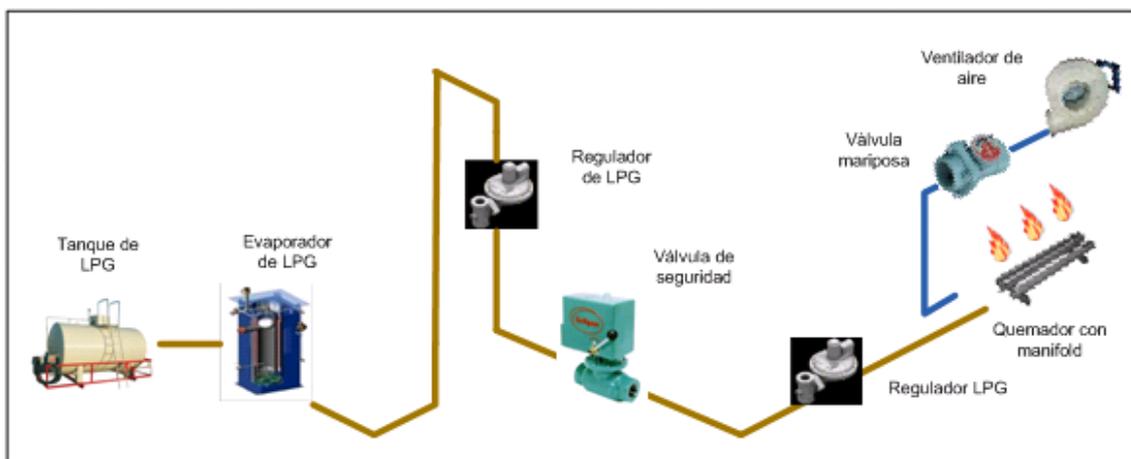


Ilustración 3.1 Partes del sistema de combustión

En el subsistema de gas, el combustible se obtiene de un tanque de 113 560 litros de LPG. En la salida del tanque el LPG pasa por un proceso donde se convierte del estado líquido al estado gaseoso, en este proceso se mantiene el gas a una temperatura constante de 5°C y una presión constante de 103,424 kPa (15 psi). A medida que el gas fluye hacia la planta, va adquiriendo una temperatura ambiente y pasa por una serie de reguladores que disminuyen la presión.

3.1.1.1 Regulador de presión

El primer regulador disminuye la presión del gas de 137,895 kPa (20 psi) a 5,231 kPa (0,759 psi). Tal como se observa en la ilustración 3.2, el sistema del regulador de tiene de un resorte que actúa sobre una aguja en cuyo extremo se coloca un sello de neopreno que regula el paso de gas. Entre menor sea la distancia entre del sello y el orificio de paso de gas, menor será la presión de salida del regulador. [2]

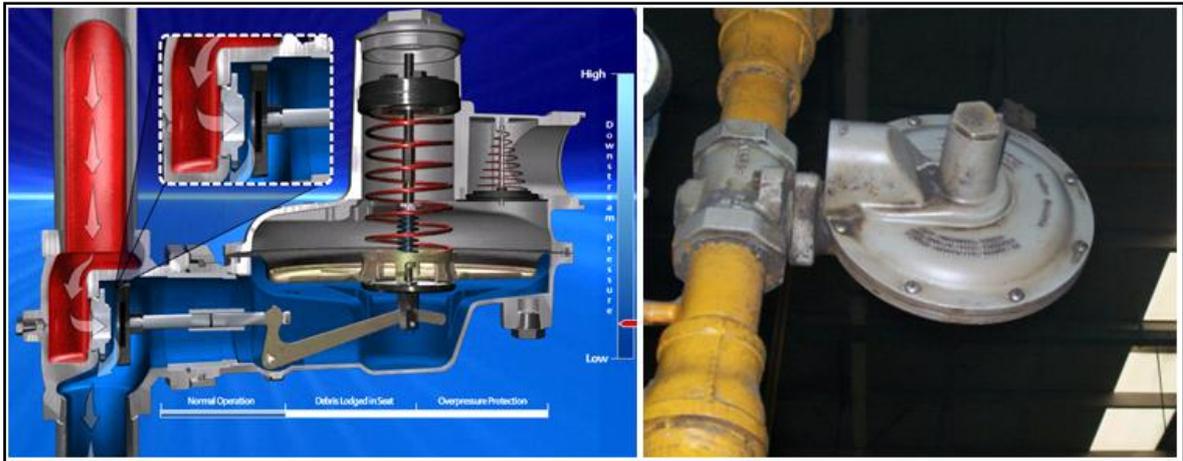


Ilustración 3.2 Regulador de presión

3.1.1.2 Válvula de seguridad

Luego de reducir la presión del gas pasa por la válvula de seguridad, cuya palanca manual solamente puede moverse cuando se enciende el transformador de alta tensión de los electrodos generadores de la chispa de ignición. En la ilustración 3.3 se muestra la válvula de seguridad marca eclipse.

Esta válvula se abre manualmente y automáticamente cierra el flujo de gas cuando se abren los interruptores de funcionamiento. La válvula no puede volver a cerrarse hasta que se corrija la causa que abrió los interruptores y los interruptores se vuelvan a cerrar. Estos interruptores monitorean tanto la presión del gas como los contactos que se accionan cuando se enciende el transformador de alta tensión. Si no hay energía eléctrica, la válvula inmediatamente se cierra.



Ilustración 3.3 Válvula de seguridad

Después de la válvula de seguridad, el flujo de gas se divide en tres tuberías que van a cada paso del horno, la presión de gas es reducida en cada tubería a 124,544 Pa (0,018 psi) y luego se distribuye a cada múltiple de admisión (manifold) de los quemadores para la mezcla con el aire.

3.1.1.3 Ventilador de aire

En el subsistema de aire, el suministro se obtiene por medio de un ventilador o turbina que proporciona 0,236 m³/s (500 CFM) de aire con una presión constante de 6,227 kPa (0,903 psi), en la ilustración 3.4 se muestra el ventilador utilizado para la combustión.

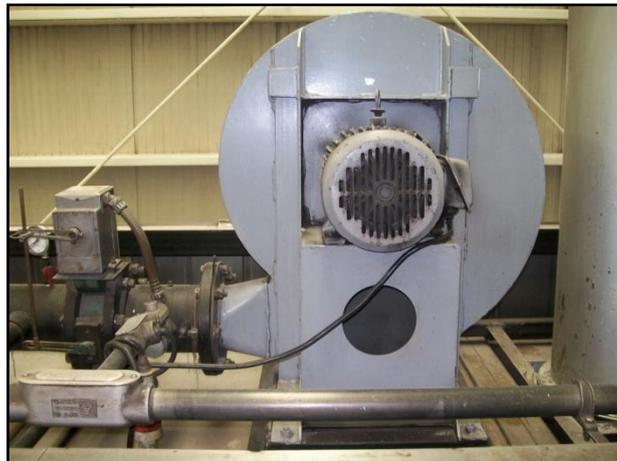


Ilustración 3.4 Ventilador de aire

3.1.1.4 Válvula tipo mariposa

El flujo de aire proporcionado por el ventilador se divide en tres tuberías que van a cada paso. En cada una de estas tuberías hay una válvula tipo mariposa que regula el paso de aire que entrará a cada múltiple de admisión de los quemadores para ser mezclado con el gas LP.

La válvula mariposa internamente consta de un disco que gira un cuarto de vuelta permitiendo el cierre y la apertura total del paso de flujo.



Ilustración 3.5 Válvula tipo mariposa

3.1.1.5 Quemadores de pre-mezcla

Los quemadores son del tipo pre-mezcla ya que primeramente se realiza la mezcla en el múltiple de admisión y luego la mezcla pasa al quemador. Esta mezcla se realiza tomando ventaja de la presión del aire para que se recombine con el gas LP en un encapsulado, donde posteriormente pasa a los quemadores de tipo cilíndrico de 1 metro de longitud. El enrejado del quemador permite que se genere una llama uniforme a lo largo de él, pero tiene la desventaja que se puede tapar fácilmente con el hollín producido en la combustión y residuos de tortilla, por lo que es necesario su limpieza continua. En la ilustración 3.6 se muestra uno de los 29 quemadores que contiene el horno.



Ilustración 3.6 Quemador de rejilla

En la ilustración 3.7 se observa el sistema de combustión del horno, el primer paso 1 contiene 12 quemadores, el segundo paso contiene 9 quemadores y el tercer paso contiene 8 quemadores, para un total de 29 quemadores en el horno.

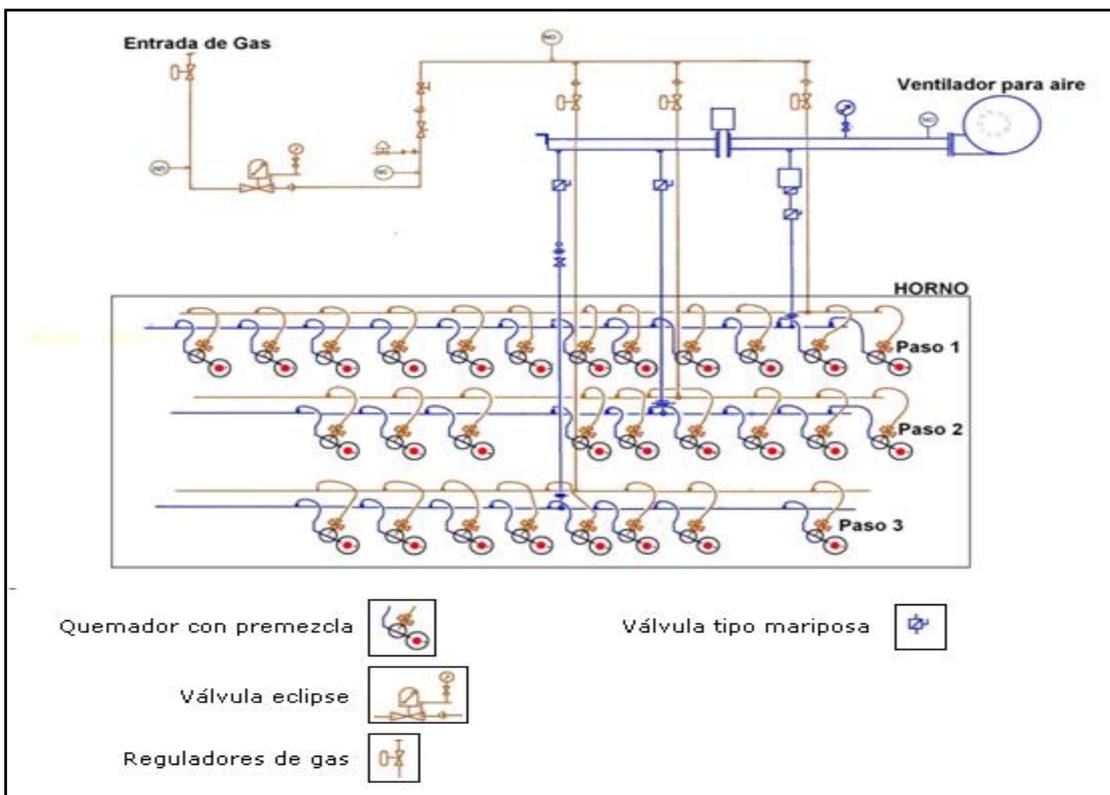


Ilustración 3.7 Sistema de combustión del horno

3.1.2 Sistema eléctrico

El sistema eléctrico se encarga del encendido del motor de la banda, del ventilador de aire, del extractor de gases y del transformador de alta tensión para los electrodos generadores de chispa para la combustión.

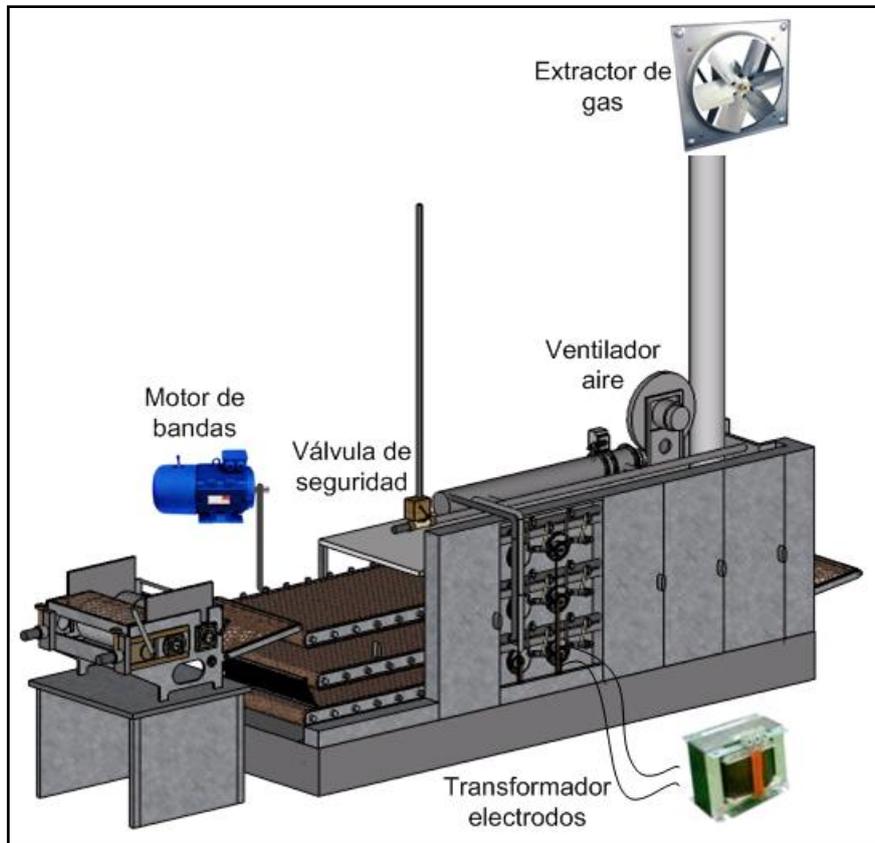


Ilustración 3.8 Componentes del sistema eléctrico

3.1.2.1 Motores del sistema

Los motores utilizados por el sistema eléctrico son motores de CA trifásicos. El motor de la banda tiene una potencia de 3,728 KW (5 HP) y realiza el movimiento de las tres bandas transportadoras por medio de un sistema de engranajes. El motor del ventilador de aire tiene una potencia de 3,728 KW (5 HP) y el motor del extractor de gases tiene una potencia de 0,746 KW (1 HP). La ilustración 3.9 muestra el motor de la banda.



Ilustración 3.9 Motor de banda transportadora

3.1.2.2 El transformador de alta tensión

El transformador de alta tensión se encarga de alimentar eléctricamente a los electrodos ubicados en cada quemador para producir un arco eléctrico que reacciona con la mezcla de aire y gas LP para la combustión. Este transformador produce en su salida una tensión de 5.5 kV. En la ilustración 3.10 se muestra el circuito del transformador de alta tensión conectado al electrodo.

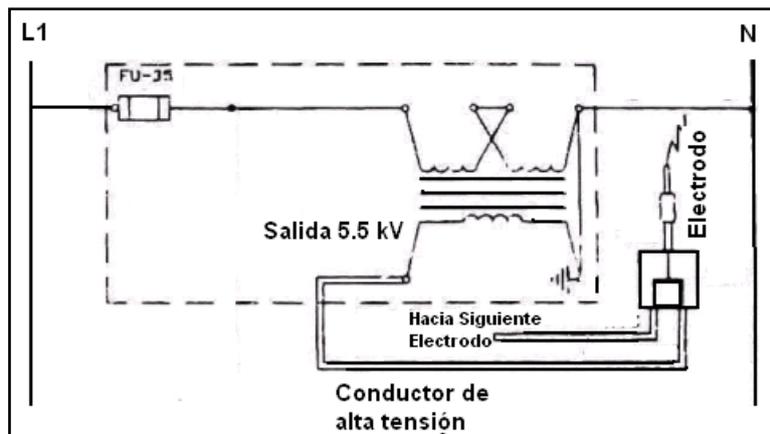


Ilustración 3.10 Circuito de transformador y electrodo

3.1.2.3 Secuencia de encendido del sistema eléctrico

El encendido del horno es realizado por un operador aproximadamente una hora antes de que sea utilizado, se requiere de una serie de pasos que tienen una secuencia la cual se debe cumplir para evitar accidentes y daños en el

horno. Igualmente el apagado del horno requiere de una secuencia de pasos que se deben respetar. La secuencia de encendido y apagado del horno se muestra en la ilustración 3.11.

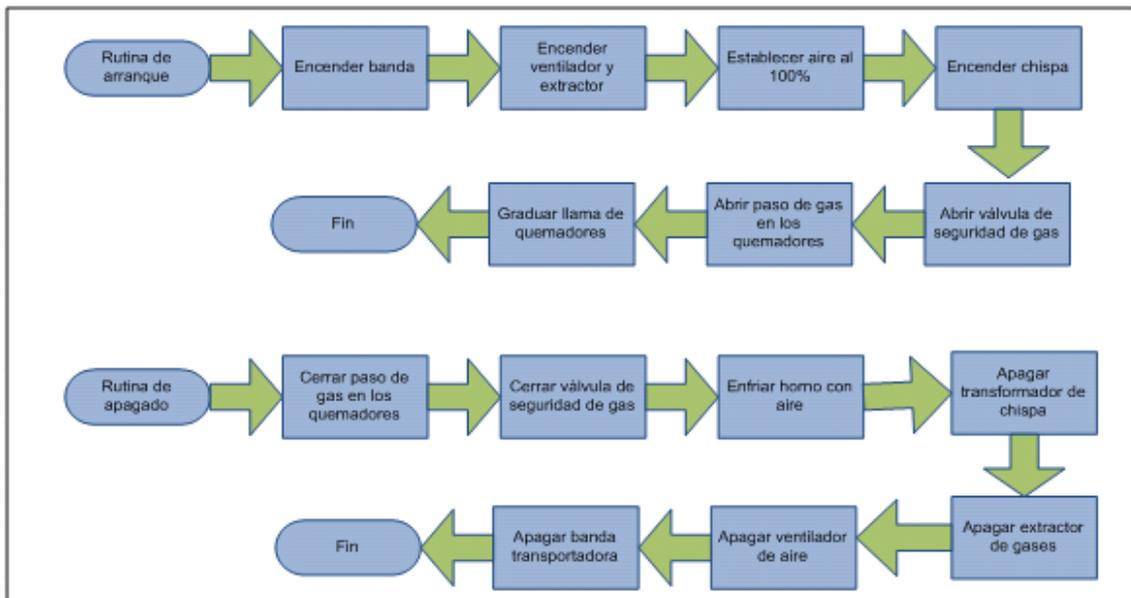


Ilustración 3.11 Secuencia de encendido y apagado del sistema eléctrico

En ocasiones cuando el operador enciende el horno no sigue la secuencia anteriormente descrita y se producen accidentes en la planta, por ejemplo, al abrir el paso de gas sin la presencia de chispa se produce una acumulación de gas en el interior del horno y al encender la chispa se genera una explosión en el interior del horno, incluso algunas llamas logran salir del horno poniendo en peligro la vida de los operarios. Se desea que el encendido y apagado del horno sea seguro, para lograrlo se programarán secuencias semiautomáticas, donde involucra la participación del operador en la apertura y cierre del paso del gas. En procesos donde existe gas LP como combustible, no es recomendable que se automatice totalmente dichos procesos, para prevenir accidentes al observar personalmente su adecuado comportamiento.

3.2 Antecedentes bibliográficos

En esta sección encontrará una ligera descripción del PLC utilizado y de principios básicos relacionados con la realización del proyecto.

3.2.1 Descripción PLC (Controlador Lógico Programable)

El PLC utilizado fue el CompactLogix 1769-L32E de la marca Allen Bradley, su elección la realizó la empresa y estuvo basada en mantener una estandarización de sistemas de control en diferentes procesos de producción que utilizan PLC's marca Allen Bradley. Los módulos que conforman este controlador se observan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Módulos que se conectaron al PLC CompactLogix 5000

Cantidad	Número de catálogo	Tipo de Módulo	Descripción
1	1769-L32E	Controlador Compact Logix	Controlador con comunicación Ethernet, RS232 y memoria de 750 KB
2	1769-IA8/A	Entradas discretas	8 entradas de 100/120V AC
1	1769-IA16/A	Entradas discretas	16 entradas de 100/120V AC
1	1769-OW16/A	Salidas discretas	16 salidas para relé AC/DC
1	1769-IF8/A	Entradas Analógicas	8 entradas analógicas de 0-20 mA o 4-20 mA
1	1769-IT6/A	Entradas Analógicas	6 entradas de termocupla
1	1769-OF8C/A	Salidas Analógicas	8 salidas analógicas de 0-20 mA o 4-20 mA

Características principales del controlador CompactLogix 1769-L32E [3]

- Memoria para usuario de 750 KB.
- Puerto de comunicación serial RS232 de 38.4 Kbps, mediante DF1 o ASCII.
- Puerto de comunicación Ethernet/IP 10/100 Base-T.
- Capacidad de expansión de módulos 16.
- Memoria Flash opcional.
- Intervalo de escaneo de datos, de acuerdo al número de módulos conectados. Para módulos de entradas y salidas (analógicas y digitales):

- 1...4 módulos pueden ser escaneados en 1 ms.
- 5...30 módulos pueden ser escaneados en 2 ms.
- Funciones matemáticas avanzadas: trigonométricas, PID, exponenciales, punto flotante (coma flotante) y las instrucciones de cálculo.
- Módulo de memoria flash EPROM opcional disponible.
- Interruptor de llave: RUN, REM, PROG
- RAM con batería de respaldo

3.2.2 Señal 4-20 mA

La señal de 4-20 mA es un estándar muy utilizado a nivel industrial tanto para el control de válvulas y actuadores como para medición de transmisores de presión, nivel, flujo, concentración, etc. La señal de corriente es continua a lo largo del cable de conexión entre la fuente generadora de corriente y el amperímetro, lo que permite conexión a largas distancias, esta es una ventaja comparada con la señal de tensión que presenta caídas de tensión a medida que crece la distancia del cable de conexión. Por esta razón la señal de corriente es más utilizada que la señal de tensión.

En algunos casos es requerida una conexión de larga distancia pero el medidor de señales o el actuador solamente acepta tensión de entrada, para estos casos es recomendable utilizar una señal de corriente y convertirla al final del recorrido en una señal de tensión de 2 a 10V que es la señal de tensión utilizada por algunos instrumentos de medición y actuadores. Se requiere de un circuito resistivo básico para dicha conversión, en la ilustración 3.12 se muestra este circuito.

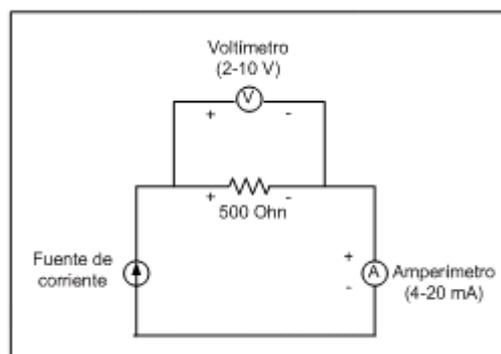


Ilustración 3.12 Conversión de señal de corriente a señal de tensión.

3.2.3 Protocolos de comunicación utilizados

En esta sección se describen los protocolos de comunicación utilizados por los diferentes dispositivos para el control del horno.

3.2.3.1 RS-232

En telecomunicaciones, RS-232 (Recommended Standard 232) es un estándar para la comunicación serial de datos binarios y para señales que conexión entre un DTE (Data Terminal Equipment) y un DCE (Data Circuit terminating Equipment). Este estándar define las características eléctricas como por ejemplo el la tensión de ± 15 V, la sincronización de las señales, el significado de las señales, y el tamaño físico y la disposición de las patillas de conectores. Esta comunicación requiere varias patillas para las líneas de control de flujo y las líneas de transmisión (Tx) y recepción (Rx). [4]

En una comunicación RS-232 se pueden configurar los siguientes parámetros:

- Velocidad en baudios (1200, 2400, 4800, 9600).
- Bit de paridad (par o impar) para reconocimiento de errores de comunicación.
- Cantidad de bits del dato (8, 16, 32).
- Bit de parada (Stop) luego de cada dato.

Por lo general se utiliza un conector DB9 para la conexión serial. En la ilustración 3.13 se muestra este tipo de conector. [4]

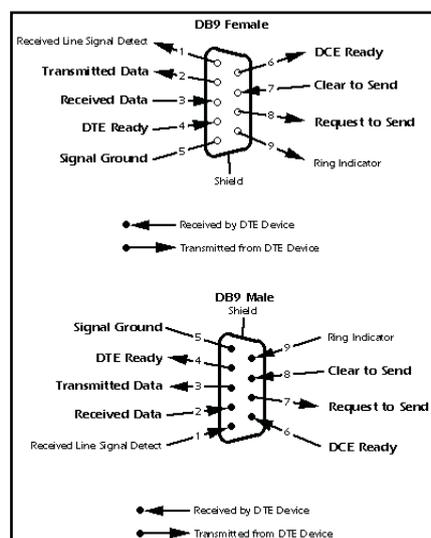


Ilustración 3.13 Conector DB9 para comunicaciones RS-232

3.2.3.2 Ethernet

Es un estándar de redes de computadoras de área local realizado por la IEEE en 1983, también conocido como Ethernet 802.3, algunas de sus características son:

- Velocidad de transmisión de datos 100Mbit/s hasta 10Gbit/s.
- Algunos de los medios de comunicación son: cable de par trenzado 10 Base-T para comunicaciones de 10Mbit/s, 100 Base-T para comunicaciones de 100 Mbit/s y fibra óptica para comunicaciones hasta 10 Gbit/s (fibra multimodo). En la ilustración 3.14 se muestra el cable 10 Base-T y su conector RJ-45 utilizado en el proyecto.



Ilustración 3.14 Cable 10 Base-T y conector RJ-45 para comunicación Ethernet

- Utiliza el sistema CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection), que consiste en la detección de una señal portadora por parte de una estación de transmisión. Cuando presentan colisiones entre envío de estaciones que transmiten simultáneamente, se debe repetir el mensaje en un tiempo aleatorio generalmente distinto en cada estación hasta que haya una recepción correcta de los datos. [5]

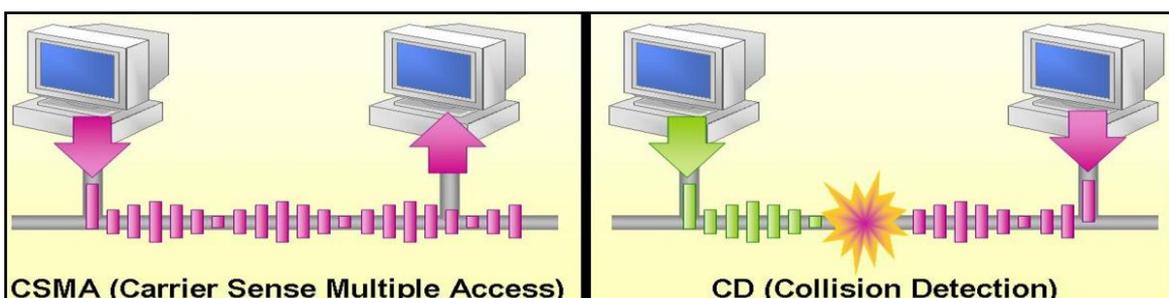


Ilustración 3.15 Sistema CSMA/CD

3.2.4 Variador de frecuencia

La función de un variador de frecuencia es controlar la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna, variando la frecuencia de la señal de alimentación.

El principio de funcionamiento de un variador de frecuencia es el siguiente:

“La velocidad de un motor síncrono CA (n) es igual a la frecuencia de alimentación (f) entre el número de polos en el estator (p).”

$$n = \frac{120 * f}{p} \text{ [RPM]} \quad (3.1)$$

El circuito fundamental de un variador de se divide en tres etapas:

- Etapa 1: rectificación de la señal trifásica AC.
- Etapa 2: Transformación de señal AC a DC por medio de filtro.
- Etapa 3: Transformación de señal DC a señal quasisenoidal de AC por medio de un circuito inversor conmutado.

El circuito del variador de frecuencia con sus tres etapas se muestra en la ilustración 3.16. [6]

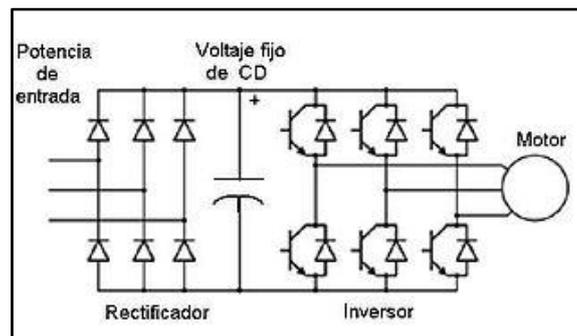


Ilustración 3.16 Circuito de variador de frecuencia

3.2.5 El servomotor

Un servomotor es un dispositivo similar a un motor de corriente continua, que tiene la capacidad de ubicarse en cualquier posición dentro de su rango de operación, y mantenerse estable en dicha posición. Está conformado por un motor, una caja reductora y un circuito de control. Los servos se utilizan frecuentemente en sistemas de radio control y en robótica, pero su uso no está

limitado a estos. La posición angular del servo motor puede ser controlada por pulsos, voltaje o corriente.

El componente principal de un servo es un motor de corriente continua, que realiza la función de actuador en el dispositivo: al aplicarse un voltaje entre sus dos terminales, el motor gira en un sentido, pero produciendo un bajo par. Para aumentar el par del dispositivo, se utiliza una caja reductora, que transforma gran parte de la velocidad de giro en torsión. En la ilustración 3.17 se muestra una imagen de un servomotor.

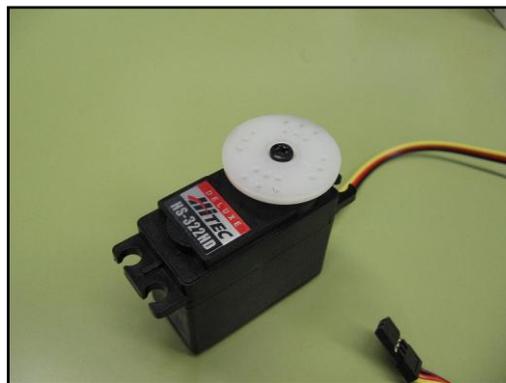


Ilustración 3.17 Servomotor

3.2.6 Termopares

Los termopares son el sensor de temperatura más común utilizado industrialmente. Un termopar se construye con dos alambres de distinto material, termoeléctricamente hablando, unidos en un extremo (soldados generalmente). Al aplicar temperatura en la unión de los metales se genera un voltaje muy pequeño (efecto Seebeck) del orden de los milivolts el cual aumenta linealmente con la temperatura.

Por ejemplo, un termopar "tipo J" está hecha con un alambre de hierro y otro de constantán (aleación de cobre y níquel). Al colocar la unión de estos metales a 750 °C, debe aparecer en los extremos 42.2 mV. [7]

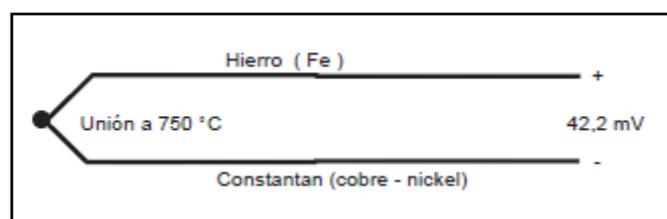


Ilustración 3.18 Termopar

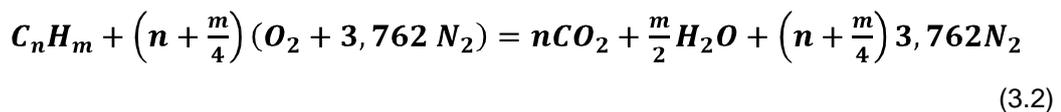
Normalmente los termopares industriales se consiguen encapsulados dentro de un tubo de acero inoxidable u otro material, en un extremo está la unión y en el otro el terminal eléctrico de los cables, protegido adentro de una caja redonda de aluminio (cabezal).

Existen una infinidad de tipos de termopares, en la tabla aparecen algunas de las más comunes, pero casi el 90% de los termopares utilizados son del tipo J ó del tipo K. En el horno actualmente están conectados termopares tipo J.

3.2.7 Descripción de los principales principios termodinámicos relacionados con la solución del problema.

3.2.7.1 Balance másico de la combustión y relación aire-LPG

La combustión de hidrocarburos en el aire involucra centenares de reacciones químicas elementales y decenas de especies químicas, para este caso, se considera la reacción general de un hidrocarburo del tipo C_nH_m , cuya reacción estequiométrica de combustión con el aire es la siguiente. [8]



Esta reacción estequiométrica se ajusta al LPG cuya composición generalmente es de 60% propano (C_3H_8) y 40% butano (C_4H_{10}). Cada uno de estos hidrocarburos contiene la siguiente masa molar:

$$C_3H_8 = 12 * 3 + 1 * 8 = 44 \text{ Kg/mol} \quad (3.3)$$

$$C_4H_{10} = 12 * 4 + 1 * 10 = 58 \text{ Kg/mol} \quad (3.4)$$

La proporción de concentración de propano y butano se calcula de la siguiente manera

$$\frac{Kg}{mol} \text{ de } C_3H_8 + \frac{Kg}{mol} \text{ de } C_4H_4 = 102 \text{ Kg/mol} \quad (3.5)$$

$$\text{Proporción propano (60\%)} = \frac{102 * 0,6}{44} = 1,364 \quad (3.6)$$

$$\text{Proporción butano (40\%)} = \frac{102 * 0,4}{58} = 0,689 \quad (3.7)$$

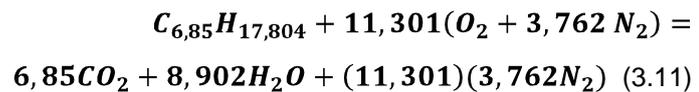
Con estas proporciones de propano y butano se puede calcular la atomicidad del LPG:

$$\text{atomicidad de Carbono} = 3 \text{ átomos} * 1,364 + 4 \text{ átomos} * 0,689 = 6,85 \text{ átomos} \quad (3.8)$$

$$\text{atomicidad de Hidrógeno} = 8 \text{ átomos} * 1,364 + 10 \text{ átomos} * 0,689 = 17,804 \text{ átomos} \quad (3.9)$$

$$\text{LPG} = C_{6,85}H_{17,804} \quad (3.10)$$

De esta manera la reacción estequiométrica para el LPG sería:



La relación aire-combustible:

$$\text{aire}/\text{LPG} = \frac{11,301 \text{ mol} * (2 * 16 \text{ g/mol}) + 42,51 \text{ mol} * (2 * 14 \text{ g/mol})}{1 \text{ mol} * (6,85 * 12 \text{ g/mol}) + 1 \text{ mol} * (17,804 * 1 \text{ g/mol})} = 15,5 \quad (3.12)$$

Normalmente en los procesos de combustión existe un exceso de aire para asegurarse que se está consumiendo eficazmente el combustible. Para un exceso de aire de aire del 10% la relación aire-LPG sería:

$$\text{aire}/\text{LPG} = 15,5 * 1,1 = 17,05 \quad (3.13)$$

3.2.7.2 Cálculo del flujo másico y principio de conservación de la masa

Normalmente para la medición de flujo de gas se utilizan medidores de flujo volumétrico (m^3/h) ya que estos son más baratos que los medidores de flujo másico (Kg/h). El flujo másico en los gases varía de acuerdo a la temperatura y presión a la que se encuentren. El cálculo del flujo másico para un gas se realiza de la siguiente manera. [9]

$$\text{flujo másico} \left(\frac{Kg}{h} \right) = \text{flujo volumétrico} \left(\frac{m^3}{h} \right) * \text{Densidad} \left(\frac{Kg}{m^3} \right) \quad (3.14)$$

Donde la densidad se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Densidad} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{\text{presión absoluta} \left(\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right)}{170,56 * \text{temperatura absoluta} \text{ (K)}} \quad (3.15)$$

Una vez obtenido el flujo másico este obedece al principio de la conservación de la masa:

$$M_T = M_1 + M_2 + M_3 \quad (3.16)$$

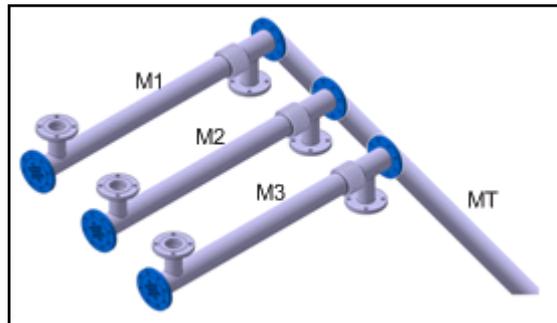


Ilustración 3.19 Distribución de flujo másico en una tubería

Capítulo 4: Procedimiento Metodológico

Este capítulo contiene la metodología seguida para seleccionar la solución más adecuada, el procedimiento para alcanzar dicha solución basados en el método de diseño de ingeniería.

4.1 Reconocimiento y definición del problema

El gerente de mantenimiento del departamento de tortillas en DEMASA percibió que en las líneas de producción existía un problema en el manejo del horno de cocción. Este problema se le atribuyó a la falta de control de la temperatura y de las secuencias de encendido y apagado. Todo esto causando problemas en la calidad de la producción de tortillas, consumo excesivo de combustible y mantenimiento adicional en el horno.

En el proceso de escogencia de la mejor solución al problema se decidió utilizar un PLC para el control de la temperatura y generación de la secuencia de encendido y apagado del horno.

También se realizaron entrevistas a los operarios y técnicos de mantenimiento de las líneas de producción con el objeto de recopilar información para la identificar los detalles del problema para cubrirlos con la solución buscada.

Adicionalmente el gerente de mantenimiento solicitó que los equipos adquiridos para la automatización del proceso fueran proveídos por empresas reconocidas que den soporte en Costa Rica, con la garantía y respaldo del funcionamiento de los mismos.

4.2 Obtención y análisis de información

Para obtener un conocimiento profundo de los procesos a solucionar se realizaron entrevistas a las personas relacionadas con estos como operarios y técnicos, además se consultó material bibliográfico sobre procesos de combustión, termodinámica y control automático de hornos. Todo esto con el objetivo de poder obtener la mejor solución y seleccionar adecuadamente los equipos que se utilizarán para la solución del problema como los actuadores y los módulos de entrada y salida del PLC. Otros equipos fueron definidos por la

empresa como el PLC, los variadores de frecuencia y los termopares, tomando en cuenta su compatibilidad con sistemas existentes.

También se investigó sobre las características y funciones del PLC, el software utilizado para su programación, el set de instrucciones y la forma de programación en escalera y bloques utilizada por el Controlador Compact Logix 5000.

Una parte importante que se tomó en cuenta para la selección de los equipos utilizados fue su costo, por lo que se estudiaron varias cotizaciones realizadas por diferentes proveedores y se evaluó cuáles de ellas cumplían con el presupuesto asignado al proyecto.

4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución

Observando el comportamiento del horno y tomando en cuenta toda la información recopilada con anterioridad se tomaron en consideración varias alternativas para la regulación de la temperatura del horno. Estas fueron: válvulas proporcionales, dámper, sensores de oxígeno.

Válvulas proporcionales: Este tipo de válvulas regula la presión y el caudal a través de un conducto por medio de una señal eléctrica, que puede ser de corriente o de voltaje. Su principal aplicación es el control de posición y de fuerza, ya que los movimientos son proporcionales y de precisión, lo que permite un manejo más exacto del paso de fluidos.

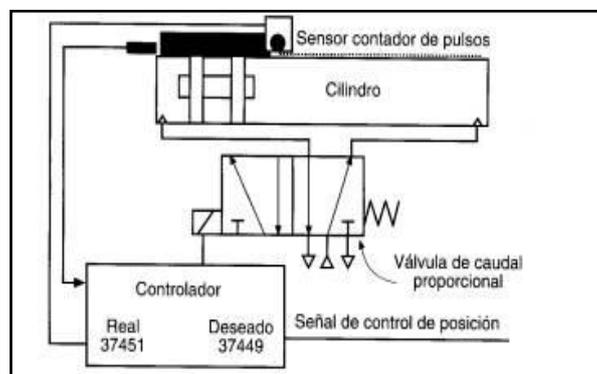


Ilustración 4.1 Válvula proporcional

Por medio de una válvula proporcional se puede realizar un control de posición de lazo cerrado, donde el actuador podría ser un cilindro, el sensor que envía

una corriente o tensión proporcional a la posición de dicho cilindro, y el controlador un procesador que gobierne el dispositivo en general. La corriente o tensión se incrementa a medida que el pistón se desplaza a la derecha y disminuye cuando se mueve a la izquierda.

La señal enviada por el controlador hacia la válvula proporcional depende del valor de corriente o tensión, que a la vez indican la distancia que falta para alcanzar la posición deseada. Cada vez que la presión del aire, la temperatura o cualquier otro parámetro de perturbación ocasionen un cambio de posición, el controlador tendrá la capacidad de hacer pequeños ajustes para lograr la posición exacta del cilindro.

Las válvulas proporcionales para manejo de aire son más económicas que para el manejo de gas ya que estas requieren de un sistema neumático y total aislamiento eléctrico, para evitar alguna explosión.

Dámper: Es un sistema electromecánico que cuenta con un servo motor, también conocido como actuador, que controla la apertura de una válvula por medio de un sistema mecánico que se conecta entre el rotor del motor y la manivela o palanca de la válvula. Esta parte mecánica algunas veces puede ser regulada para variar los rangos de apertura de la válvula.

Algunas de sus características del son: la posición angular del motor es controlada por tensión o corriente, genera una señal de realimentación que indica la posición angular del motor, algunos posee la opción de posicionamiento manual para mayor seguridad, su velocidad angular constante durante toda la carrera, algunos poseen un circuito digital limitador de giro para protección de motor. También pueden ser diseñados para soportar altas temperaturas y resistente a la humedad.

La ilustración 4.2 se muestra la conexión de un actuador a una válvula tipo mariposa.



Ilustración 4.2 Conexión de dámper o actuador a la válvula tipo mariposa

Sensor de oxígeno o sonda lambda: Está basado en el principio de funcionamiento de una pila o celda de combustible de concentración de oxígeno con un electrolito sólido. El electrolito sólido está formado por un compuesto cerámico de Dióxido de Zirconio estabilizado con óxido de Itrio, dicha estructura es impenetrable por los gases, la capa cerámica está cerrada por un extremo, por el otro extremo está en contacto con la atmósfera (aire exterior) como referencia, ambos extremos del cuerpo cerámico están provistos en su parte interna de electrodos que poseen una fina capa de platino permeable a los gases, un tubo cerrado por un extremo y ranuras por los laterales que protege al cuerpo cerámico de golpes y cambios bruscos de temperatura. El cuerpo cerámico es permeable a los iones de O_2 a partir de aproximadamente $350^\circ C$, con temperaturas de trabajo de $600^\circ C$, esta es la razón por la cual las sondas lambda están siendo provistas de sistemas calentadores (resistencias eléctricas) para que la sonda entre en funcionamiento cuando el sistema aun, no ha alcanzado su temperatura normal de funcionamiento.

El contenido de O_2 en los gases de escape en relación con el aire de referencia produce una tensión eléctrica entre ambas superficies. Esta tensión puede ser, con una mezcla rica ($\lambda < 1$) con una mezcla pobre ($\lambda > 1$) o con una mezcla ideal ($\lambda = 1$), donde la combustión es completa y no se producen gases contaminantes.

Para procesos de combustión de gas LP la relación Lambda de acuerdo a la mezcla estequiométrica es de 15,5:1. Expresado en masa sería 15.5 Kg. de aire por 1 Kg. de combustible.

Si la cantidad de aire proporcionado, es igual a la cantidad de aire necesario, se obtiene un valor de $\lambda = 1$. De esta manera, obtener una lectura de $\lambda = 1.10$ nos expresa un 10% de exceso de aire, un $\lambda = 0.90$ expresa un 10% de exceso de combustible. [10]



Ilustración 4.3 Sensor de oxígeno

Luego de analizar las características y los costos de los equipos para el control de temperatura del horno junto con el ingeniero encargado de las líneas de producción de tortillas, se determinó utilizar un dámper o actuador unido mecánicamente al eje de la válvula mariposa que regula el paso del aire. No obstante se les sugirió el considerar a futuro la instalación de sensores de oxígeno y actuadores para la regulación de gas para un mejor desempeño del sistema.

4.4 Implementación de la solución

Dentro de las etapas para la implementación de la solución se encuentran las siguientes:

- **Obtención de información sobre el sistema de combustión y el sistema eléctrico del horno.**

Se procedió primeramente a conocer el sistema de combustión y eléctrico del horno, para esto se realizaron entrevistas a operarios y técnicos de mantenimiento del horno. También se obtuvo información del manual de operación del horno suministrado por el jefe de mantenimiento de la planta.

- **Determinación y medición de las principales variables que afectan el proceso de combustión.**

Se realizó un estudio exhaustivo sobre las variables y elementos que influirían en el control de temperatura del horno, como la cantidad de flujo aire y de gas suministrado para la combustión. Para la medición de la temperatura se utilizaron termopares tipo J, para la medición del flujo de gas se midió el consumo general de la planta y se calculó el consumo de cada horno y para la medición de flujo de aire se contrataron servicios externos.

- **Reconocimiento de las secuencias de encendido y apagado del horno.**

Se observó la rutina de encendido y apagado de los hornos por parte de los operarios. Luego se consultó el manual de operación del horno y se determinó la secuencia correcta de encendido y apagado automático que se muestran en la siguiente ilustración

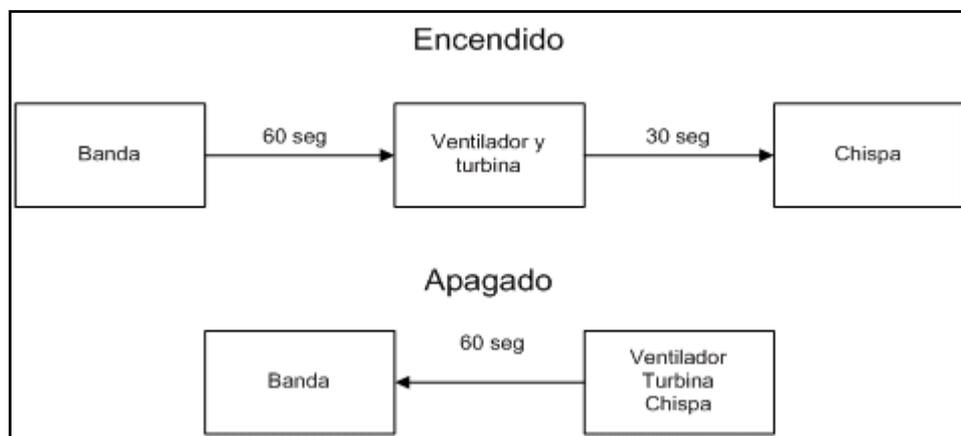


Ilustración 4.4 Secuencia automática de encendido y apagado

Se investigó como generar alarmas por fallos de encendido utilizando contactores, guarda motores y protecciones térmicas.

- **Determinación del modelo matemático de la planta y cálculo del controlador PID**

Una vez conocidas las variables que intervienen en el control de temperatura, se prosiguió a obtener un modelo matemático de la planta analizando la respuesta del horno, es decir, su temperatura, ante una entrada constante de flujo de aire. Se desarrolló un modelo teórico y empírico para validarlo, esto por medio del programa Matlab y estudio de literatura de modelado de sistemas térmicos.

Una vez obtenido el modelo de la planta se prosiguió a diseñar el controlador PID más adecuado, esto se logró por medio del programa Matlab y literatura referente controladores PID.

- **Determinación de las características y estudio del hardware y software utilizado por el PLC.**

Se buscó información sobre el PLC Compact Logix5000 de la marca Allen Bradley para determinar sus alcances respecto al proyecto. También se estudió la programación en escalera y en bloques soportada por este controlador, así como su set de instrucciones. También se analizaron programas que servirían como referencia para el control de temperatura y desarrollo de secuencias de encendido y apagado. Se estudió el manual del RSLogix 5000 que es el software utilizado para la programación del controlador, sus funciones, alcances y su conectividad con el software programador de la interfaz gráfica del Panel View.

También se estudiaron los manuales de referencia de módulos de entrada y salidas analógicas y digitales, además del módulo de entrada para termopares.

- **Determinación de las características de la pantalla táctil y estudio del software utilizado para su programación**

Se identificaron las características de la pantalla táctil Panel View Plus 1000 de la marca Allen Bradley. Se estudió el manual explicativo del software FactoryTalk *View Machine Edition* utilizado para la programación de la interfaz gráfica.

- **Diseño de diagramas de flujo y programación del PLC.**

Una vez conocido el set de instrucciones del PLC, se realizaron diagramas de flujo tanto para el proceso de control de temperatura como para los procesos de encendido y pagado del horno. Estos diagramas de flujo se utilizaron para programar el PLC por medio de rutinas en escalera para el encendido y apagado del horno y rutinas de bloques para el control de temperatura.

- **Creación de interfaces gráficas para el control del horno**

Se realizaron interfaces para el control de temperatura y encendido y apagado del horno por medio del Panel View. Estas interfaces fueron conectadas al programa del PLC por medio de etiquetas o “tags”. Además se realizaron interfaces para monitorear las variables del proceso.

- **Simulación de las rutinas programadas**

Una vez creadas las rutinas de automatización del horno en el PLC y enlazadas con las interfaces gráficas programadas en el Panel View se prosiguió a simular estos procesos por medio de los programas de simulación RSLogix Emulated 500 y RSLinx Classic. El software RSLogix Emulated simula la conexión de la computadora al PLC, dando la posibilidad de descargar el programa diseñado y simular su funcionamiento. El software RSLinx Classic simula que el panel View es la pantalla de la computadora y permite el enlace de las rutinas programadas en el PLC y las rutinas para la pantalla táctil. Este proceso de simulación ayudó en el ciclo de verificación y corrección de errores de las rutinas programadas.

- **Descarga y pruebas de las rutinas programadas**

Una vez verificadas y corregidas las rutinas en el proceso de simulación se procedió a descargarlas en el PLC y el Panel View. Esto se realizó en el laboratorio antes de conectar estos dispositivos al sistema. Se conectaron termopares para verificar una correcta medición de temperatura, también se conectó el actuador para verificar su adecuado funcionamiento y su control de posición de acuerdo a la temperatura medida. También se observaron las secuencias de encendido y apagado del horno por medio de los indicadores luminosos de cada salida digital en los módulos del PLC. También se midieron las señales de salida por medio de un amperímetro para verificar que su valor fuera correcto.

Una vez verificado el buen funcionamiento de las rutinas programadas, se simularon fallas en el sistema para observar el accionamiento de alarmas.

Se realizaron ajustes principalmente en el posicionamiento del actuador de acuerdo a los valores establecidos y ajustes en las ganancias del PID por medio de la función de auto-sintonización.

- **Instalación del PLC y sus módulos, los variadores de frecuencia y otros dispositivos en el gabinete**

Una vez definido el equipo para la automatización como el PLC con sus módulos y los variadores de frecuencia, además de los dispositivos de protección del equipo como contactores, guarda motores, protecciones térmicas para los motores, disyuntores magnéticos y fusibles, se procedió al montaje del equipo en el gabinete diseñado para dar protección al sistema de control. El montaje de estos dispositivos, junto con las borneras que reciben las señales externas, fue realizado por los técnicos de mantenimiento de la planta. También se realizó el reemplazo de los termopares en mal estado.

- **Conexión de equipos del horno al PLC**

Las señales se conectaron al PLC por medio de borneras que se conectaban a las señales de campo como los termopares, los actuadores, los motores y el transformador de alto voltaje. Para que los técnicos pudieran realizar una conexión adecuada del sistema se les proveyó de planos de conexión, ver apéndice A.4.

- **Conexión y pruebas del PLC y Panel View conectados al sistema real**

Una vez verificado el buen funcionamiento de las rutinas programadas en el PLC y el Panel View se procedió a la instalación de los mismos al sistema. Con esta instalación se finalizó la implementación de todos los equipos al sistema real. Se requirió del paro de la línea para poder realizar las pruebas finales de funcionamiento y terminar de corregir detalles para dejar el sistema sin errores y listo para utilizarse con el horno en funcionamiento normal.

- **Capacitación a operarios y técnicos de mantenimiento**

El último paso fue capacitar a los operarios y técnicos de mantenimiento en el uso adecuado del nuevo sistema. Se les explicó cómo manipular las interfaces gráficas para monitorear y controlar el horno. También se les mostró las posibles alarmas que se generan en el sistema y cómo reconocerlas. También se le brindó una explicación del programa del PLC al ingeniero de automatización de la empresa y al jefe de la planta y del equipo de mantenimiento, para que a futuro pudieran agregar nuevas funciones al programa. Para completar la capacitación se les entregaron manuales de instrucciones para la utilización del programa de la pantalla y manuales técnicos del programa y conexiones del PLC.

Capítulo 5: Descripción detallada de la solución

En este capítulo encontrará el detalle de procedimientos seguidos para la automatización del horno.

Primeramente se describe el proceso de calibración del horno por medio de la medición y regulación del aire y gas para obtener una relación adecuada de estos componentes para la combustión.

También se expondrá el método seguido para obtener el modelado matemático de la planta y del regulador PID que corrige sus características dinámicas y estáticas.

Posteriormente se detalla el hardware y software utilizado para la solución del problema y los diagramas de flujo de las rutinas programadas.

Al final de esta sección se encuentra una simulación de las rutinas programadas en el PLC para verificar su adecuado funcionamiento.

5.1 Proceso de medición y calibración del horno

5.1.1 Determinación del flujo másico de aire para cada paso

Para la medición del flujo de aire fue necesaria la contratación de los servicios de Laboratorios Lambda, especialistas en este tipo de mediciones. En la tabla 5.1 se muestra el flujo de aire medido.

Tabla 5.1 Flujo Volumétrico de aire en cada paso del horno

Puntos de muestreo	Flujo Volumétrico (dm ³ /s)	Flujo másico (Kg/hr)
Paso #1	54,6	196,56
Paso #2	56,4	203,04
Paso #3	54,9	197,64

La densidad del aire es aproximadamente igual a 1 Kg/m³ y este valor es relativamente constante. Esta densidad se utiliza para el cálculo del flujo másico, cuyos resultados se muestran en la tabla 5.1.

5.1.2 Calibración del flujo másico del LPG

La relación de aire-LPG requerida para una combustión completa, para una composición de LPG de 60% propano y 40% butano, es de aproximadamente 15,5 Kg de aire por cada 1 Kg de LPG. Sin embargo los procesos de combustión requieren siempre de un exceso de aire para asegurar que la mayor parte del combustible reaccione. Para un exceso de aire del 10% la relación aire-LPG es la siguiente.

$$\text{aire}/\text{LPG} = 15,5 * 1,1 = 17,05 \frac{\text{Kg}_{\text{aire}}}{\text{Kg}_{\text{LPG}}} \quad (5.1)$$

Con el fin de obtener una relación de aire-LPG aproximada a la requerida, se midió el flujo de aire y se calculó el valor deseado de flujo másico del LPG.

$$\text{Flujo másico}_{\text{LPG}} = \frac{197,64 \text{ Kg/hr}}{17,05} = 11,59 \text{ Kg/hr} \quad (5.2)$$

Con este valor como referencia se procedió a calibrar la entrada de flujo de gas del horno por medio de los reguladores instalados en la entrada de gas del horno. Para esto se realizaron varias mediciones del flujo de gas por medio de un medidor de flujo volumétrico Serie 3B de la marca Dresser, ubicado en la tubería de entrada del gas LP de la planta de producción de tortilla, hasta obtener un valor cercano al buscado. [11]



Ilustración 5.1 Medidor de flujo volumétrico Dresser

La medición de flujo se expresa en Metros Cúbicos por hora (Reales). La medida “real” del volumen indica que es completamente independiente de la densidad específica del gas, temperatura, y presión y pueden ser fácilmente convertidas a flujo másico por medio de la aplicación de las Leyes de los gases ideales. El gas LPG es considerado un gas ideal debido a que su

factor de compresibilidad (Z) es aproximadamente 1 (volumen específico molar real entre volumen específico molar ideal). El medidor de flujo muestra su medición por medio de un odómetro de 8 dígitos con coma decimal, tal como se muestra en la ilustración 5.2.

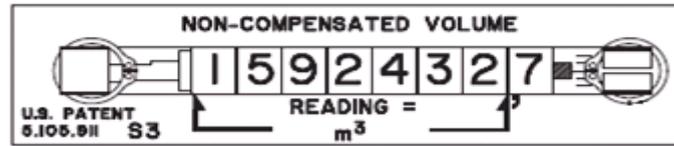


Ilustración 5.2 Desplegado de medición

Esta medición de volumen no es compensada, por lo que se debe tomar en cuenta la temperatura y la presión del gas para el cálculo del flujo másico.

Una vez calibrada la entrada de flujo de gas, se realizaron varias mediciones del consumo de gas LP en diferentes días para obtener un promedio y verificar que el sistema es estable, en la tabla 5.2 se muestran estas mediciones y el promedio calculado.

Tabla 5.2 Consumo de LPG de la línea 1

Medición	Flujo volumétrico (m ³ /hr)
1	6,6
2	8,4
3	6,2
4	7,3
5	5,8
Promedio	6,9

Para obtener el flujo másico del gas LP se midió la temperatura y la presión del gas en el mismo punto y tiempo de medición de consumo, para determinar la densidad y posteriormente el flujo másico.

La temperatura del LPG en el punto de medición de flujo aproximadamente es de 5 °C (278,15 K) y la presión manométrica es aproximadamente de 137,89515 KPa (20 psi). La presión absoluta del LPG se calcula de la siguiente manera.

$$Presión_{absoluta} = Presión_{manométrica} + Presión_{atmosférica} \quad (5.3)$$

$$Presión_{absoluta} = 137,895 \text{ KPa} + 101,325 \text{ KPa} = 239,220 \text{ KPa} \quad (5.4)$$

De esta manera la densidad del gas en estas condiciones es la siguiente:

$$Densidad = \frac{239,220(KPa)}{170,56 \cdot 278,15 (K)} = 5,04 \text{ Kg}/m^3 \quad (5.5)$$

Por lo tanto el flujo másico del LPG es:

$$Flujo_{m\acute{a}sico} = 6,9 \text{ m}^3/hr * 5,04 \text{ Kg}/m^3 = 34,78 \text{ Kg}/hr \quad (5.6)$$

Aplicando la ley de conservación de la masa, se obtiene el flujo másico en cada paso del horno, para esto se toma como supuesto que cada uno de los pasos son iguales:

$$Flujo \text{ m\acute{a}sico paso } 1_{LPG} = \frac{34,78 \text{ Kg}/hr}{3} = 11,60 \text{ Kg}/hr \quad (5.7)$$

De esta manera se logra obtener un sistema de combustión bastante eficiente, disminuyendo el desperdicio de LPG y las emisiones contaminantes. La relación aire-LPG para el sistema calibrado es la siguiente.

$$aire/LPG = \frac{197,64 \text{ Kg}_{aire}}{11,60 \text{ Kg}_{LPG}} = 17,04 \quad (5.8)$$

5.2 Modelo matemático del horno

5.2.1 Modelo teórico

Muchos procesos estables y sobreamortiguados de segundo orden, entre ellos los procesos térmicos, tienen un tipo de respuesta de “S” ante una entrada escalón.

$$G_1(s) = \frac{K_1}{(s+a)(s+b)^2} \quad (5.9)$$

Estos procesos pueden ser representados de manera aproximada por un modelo de retardo de primer orden con tiempo muerto, tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$G(s) = \frac{K e^{-st_d}}{s+a} \quad (5.10)$$

Donde la constante a representa el recíproco de la constante de tiempo dominante del sistema y el tiempo muerto se ajusta para representar las otras constantes de tiempo, correspondientes a polos alejados del origen y cuya influencia desaparece rápidamente. [12]

Para controlar la temperatura del horno se tomará como variable de control el porcentaje de apertura de la válvula que permite el flujo del aire y como variable controlada la temperatura medida por los termopares. Un diagrama simplificado de las entradas y salidas del horno se muestra en la figura 5.3.

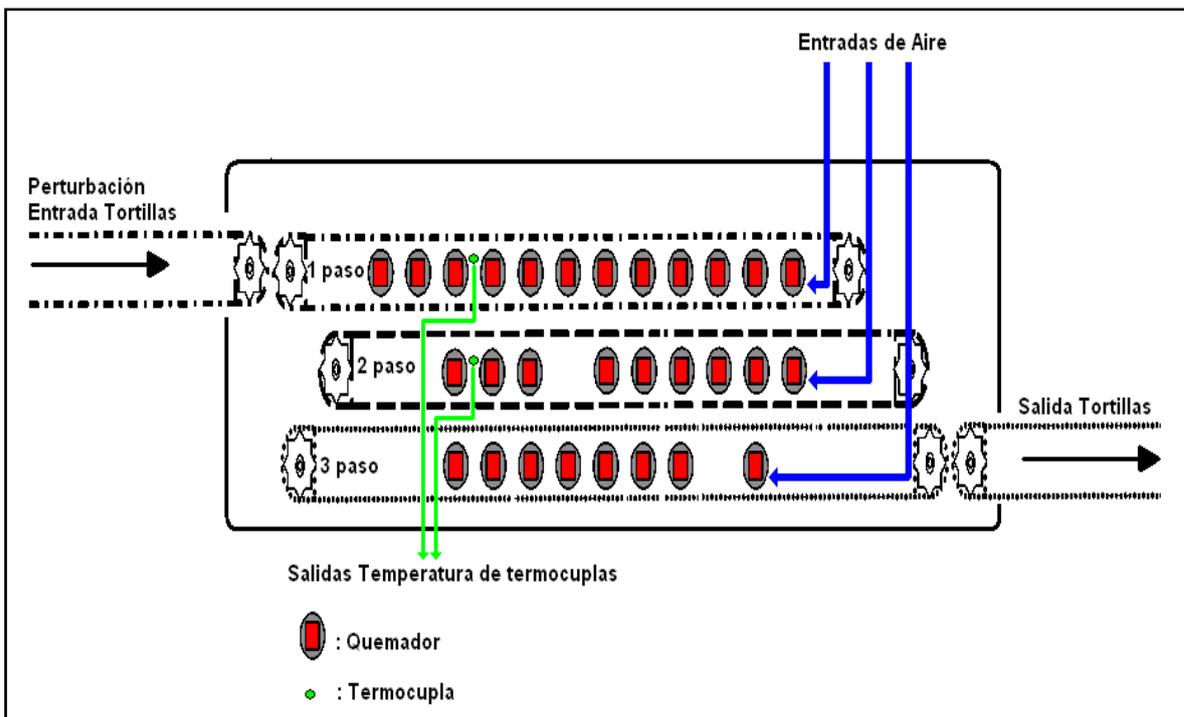


Ilustración 5.3 Diagrama simplificado de entradas y salidas del horno

Una vez definidas las entradas y salidas del horno se procedió a obtener la respuesta del horno ante un escalón de un 35% de apertura de la válvula mariposa que controla el flujo del aire. Se realizaron mediciones de la temperatura del horno cada 30 segundos y se obtuvo la siguiente respuesta:

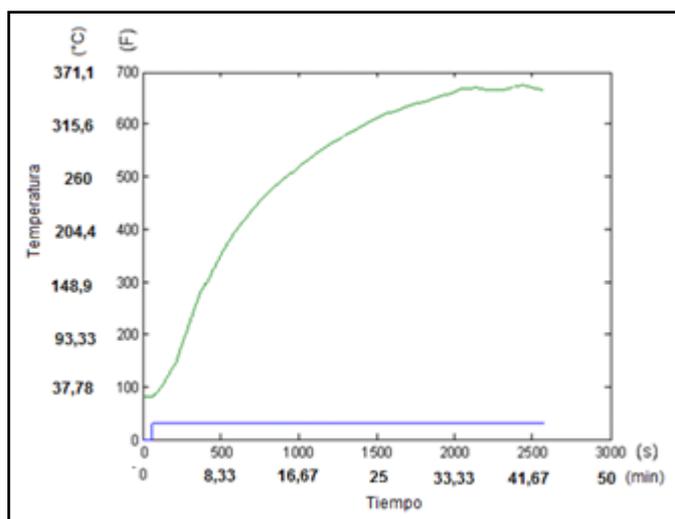


Ilustración 5.4 Respuesta ante un escalón del 35%

La constante de tiempo del sistema se obtiene observando el tiempo al 63.2% de la diferencia entre el valor final y valor inicial de la temperatura. A este tiempo se le debe restar el tiempo muerto t_d del sistema, que es el tiempo transcurrido entre la aplicación del escalón y el cambio en la temperatura. Debido a la dificultad para medir el tiempo muerto, se utilizó otro método para calcular la constante de tiempo del sistema de manera independiente al tiempo muerto, donde además de medir el tiempo al 63.2%, se mide el tiempo en el cual la salida alcanza el 39,3% de la diferencia entre el valor final y el valor inicial. El cálculo de la constante de tiempo del sistema se muestra a continuación. [12]

$$T_x = T_f - T_i = 666 F - 80 F = 586 F \approx 581 K \quad (5.11)$$

$$T_{39,3\%} = 230 F = 110 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.12)$$

$$T_{63,2\%} = 370 F \approx 188 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.13)$$

En la ilustración 5.5 se observa que el tiempo correspondiente a la temperatura de 110 °C (230 F) es 308s.

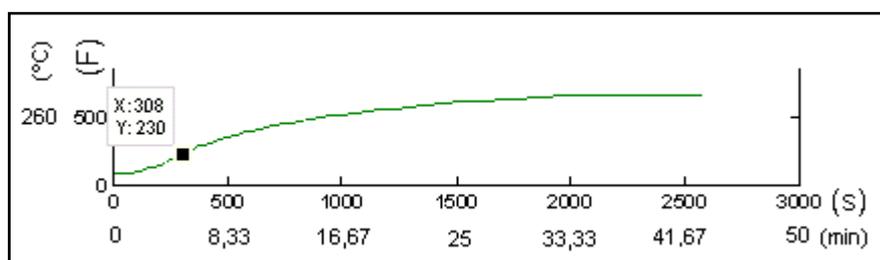


Ilustración 5.5 Tiempo para un 39.3% de la respuesta total del sistema

En la ilustración 5.6 se observa que el tiempo correspondiente a la temperatura de 187,8 °C (370 F) es 538 s.

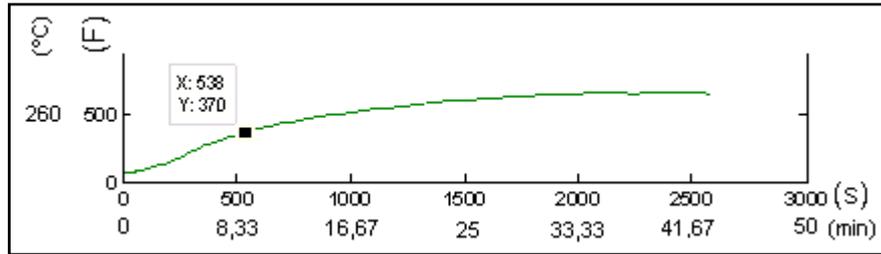


Ilustración 5.6 Tiempo para un 63.2% de la respuesta total del sistema

Una vez obtenidos los tiempos para el 39.3% y 63.2% de la respuesta del horno se procedió a calcular la constante de tiempo del sistema.

$$\tau = 2 * (538 \text{ seg} - 308 \text{ seg}) = 460 \text{ seg} \approx 8 \text{ min} \quad (5.14)$$

En la ecuación que modela el horno la constante a es el recíproco de la constante de tiempo.

$$a = \frac{1}{\tau} = 0.002174 \text{seg}^{-1} \quad (5.15)$$

El tiempo muerto se calcula de la siguiente manera:

$$t_d = t_{63.2\%} - (t_i + \tau) = 538 \text{ seg} - (60 \text{ seg} + 460 \text{ seg}) = 18 \text{ seg} \quad (5.16)$$

Donde t_i es el tiempo en el que se aplica el escalón.

La ganancia estática se calcula como a por el cociente del cambio de temperatura entre la amplitud del escalón:

$$k = a * \frac{T_x}{\%Apertura} = 0.002174 * \frac{586 \text{ F}}{35\%} = 0.03640 \quad (5.17)$$

Por lo tanto, la función de transferencia que modela el comportamiento del horno es la siguiente:

$$G(s) = e^{-18s} * \frac{0,03640}{s+0,002174} \quad (5.18)$$

5.2.2 Modelo Empírico y validación del modelo

Por medio de la herramienta Ident de Matlab para la identificación de sistemas se encontró el modelo empírico del sistema. Esta herramienta genera varias curvas que se aproximan al sistema real, tal como se muestra en la ilustración 5.7

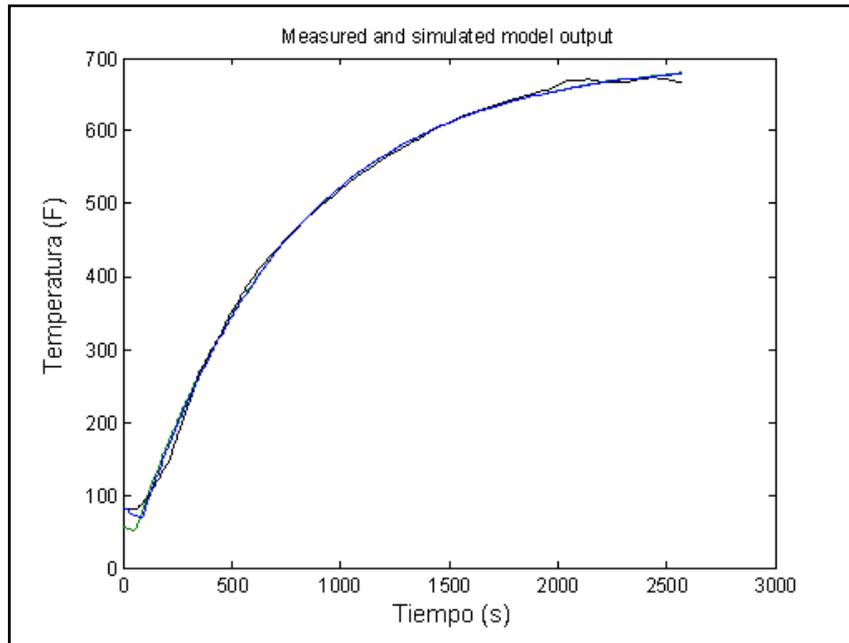


Ilustración 5.7 Aproximación de sistemas por medio de la herramienta Ident de Matlab

Se eligió la curva con una aproximación del 96,55% al sistema real y luego se generó la función de transferencia del sistema aproximado.

$$G(s) = e^{-30s} * \frac{0,03854}{s+0,001376} \quad (5.19)$$

Esta función de transferencia es similar a la obtenida teóricamente, lo cual le otorga validez al modelo obtenido experimentalmente.

El tiempo de muestreo del sistema tendría que ser aproximadamente la décima parte de la constante de tiempo del sistema.

$$T_s \leq \frac{\tau}{10} = \frac{460 s}{10} \quad (5.20)$$

$$T_s \leq 46 s$$

Debido a que el tiempo de muestreo del sistema es mayor que el tiempo muerto, este se puede obviar de la función de transferencia. De esta manera

se obtuvo el modelo matemático del horno representado por la siguiente función de transferencia:

$$G(s) = \frac{0,03854}{s+0,001376} \quad (5.21)$$

5.3 Determinación del regulador PID

5.3.1 Cálculo del Regulador PID teórico

Se requiere obtener un regulador PID que controle la temperatura del horno a lazo cerrado. El diagrama de bloques del sistema incluyendo el regulador PID se representa en la ilustración 5.8

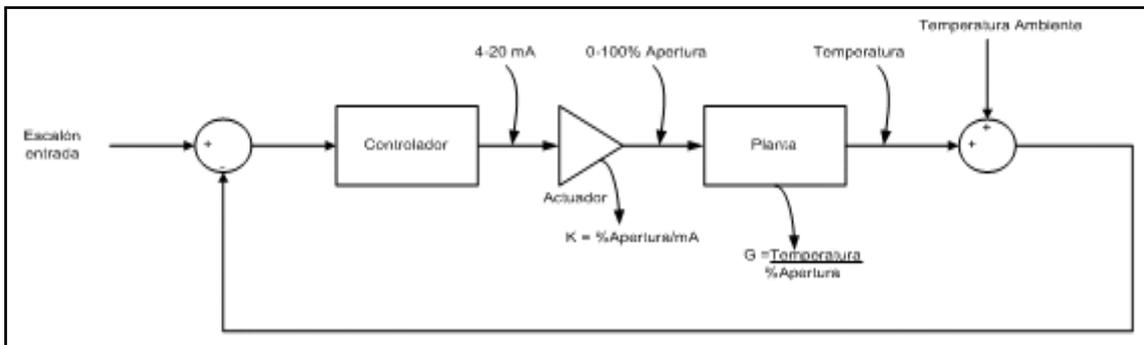


Ilustración 5.8 Diagrama de bloques del sistema controlado

Un regulador simple pero eficaz para controlar la temperatura consiste en un regulador PI analógico con ganancia estática 1 tiene únicamente un valor variable, denominado **b**, como se muestra a continuación:

$$K_{PI}(s) = k * \frac{(s+b)}{s} \quad (5.22)$$

Este regulador corresponde a un compensador en atraso, donde la constante **b** tendrá el valor aproximado, entre el 95% y el 130% del recíproco de la constante **a** del modelo en tiempo continuo.

Por medio de este regulador la salida del sistema estará exenta de variaciones o desviaciones de su valor a causa de perturbaciones o no linealidades externas o internas del sistema. Si se desea un sistema más rápido, puede agregarse un compensador de adelanto, es decir, añadir una ganancia derivativa.

De esta manera el intervalo de valores de **b** sería:

$$\mathbf{b} = [0.95 * \alpha, 1.30 * \alpha] = [0.0013, 0.0018] \quad (5.23)$$

Utilizando el límite superior del valor de **b**, se obtiene el siguiente regulador PI analógico:

$$K_{PI}(s) = \frac{s+0,0018}{s} = 1 + \frac{0,0018}{s} \quad (5.24)$$

$$K_I = 0,0018 \quad K_P = 1$$

Utilizando el límite inferior del valor de **b**, se obtiene el siguiente regulador PI analógico:

$$K_{PI}(s) = \frac{s+0,0013}{s} = 1 + \frac{0,0013}{s} \quad (5.25)$$

$$K_I = 0,0013 \quad K_P = 1$$

Si se desea un sistema más rápido, se puede utilizar el regulador obtenido con el límite superior, pero la respuesta del sistema tiene un pequeño sobreimpulso.

5.3.2 Validación del Regulador PID

Para validar este regulador PI se utilizó la herramienta SISOTOOL de Matlab y se analizó la respuesta del sistema real para este regulador. Debido a que la ecuación del regulador PI en Matlab tiene una forma diferente al regulador obtenido, se debe realizar una conversión del regulador obtenido para utilizar Matlab.

$$K_{PI}(s) = 1 + \frac{0,0018}{s} = 0,0018 * \frac{1+560s}{s} \quad (5.26)$$

La respuesta del sistema para un escalón unitario con el regulador PID se muestra en la ilustración 5.9.

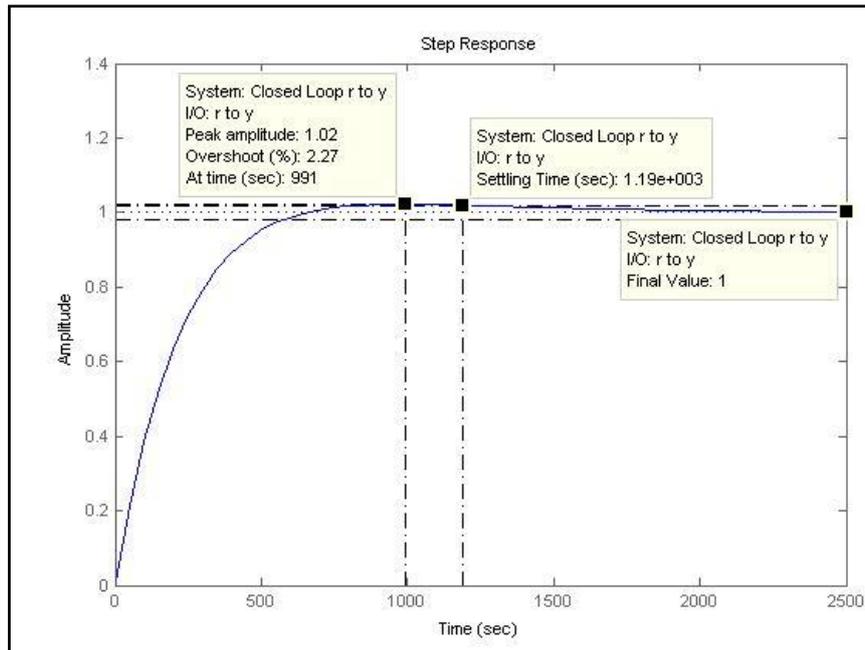


Ilustración 5.9 Respuesta del sistema al escalón unitario con regulador PID

Como se observa el sistema con regulador tiene un tiempo de estabilización de 1900 segundos, aproximadamente 32 minutos, comparándolo con el sistema sin regulador con tiempo de estabilización de 2460 segundos, aproximadamente 41 minutos. Se observa que el tiempo equivalente se disminuyó en una un 79% del tiempo original. También se observa que el error en estado estacionario no existe y que el sobreimpulso del sistema es relativamente bajo de un 2.27%.

En un sistema de control de temperatura lo que se busca es disminuir el sobre impulso y corregir el error en estado estacionario, por lo que se considera eficaz el regulador obtenido.

Es conveniente que la implementación del regulador permita la variación de la constante b , es decir la ganancia integral, entre los límites indicados, para lograr un ajuste adecuado en cuanto a velocidad del sistema y el sobreimpulso generado.

5.4 Descripción del PLC Compact Logix 1769-L32E

El PLC es el “cerebro” del sistema de automatización, en el se programaron todas las rutinas que controlan tanto la temperatura, como las secuencias de encendido y apagado del sistema. A continuación se describen algunas de sus características, los módulos de entrada y salida conectados al controlador, y el software utilizado para su programación.

5.4.1 Características del controlador 1769-L32E

El controlador CompactLogix 1769-L32E siempre es el módulo del extremo izquierdo en el sistema (ver ilustración 5.16). Este debe ubicarse a una distancia de no más de 4 módulos de la fuente de alimentación. Tiene la capacidad de comunicación serial y Ethernet con otros dispositivos, posee una tarjeta de memoria flash para actualizaciones del firmware del controlador, por medio de una llave se puede establecer su modo de control y posee LEDS indicadores de estado, tal como se muestra en la ilustración 5.10.



Ilustración 5.10 Características principales del PLC

5.4.1.1 Puerto serial RS-232

El controlador posee un puerto serial RS-232 macho de 9 pines llamado “Canal 0” que fue utilizado para configurar la dirección IP del PLC por medio del software RSLinx Classic instalado en una computadora personal.

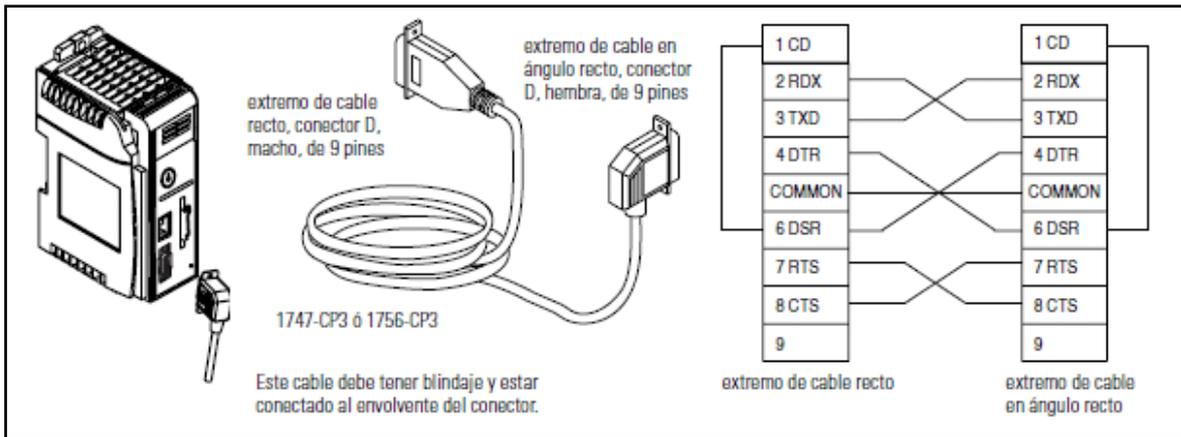


Ilustración 5.11 Conexión serial del PLC

Se utilizó la configuración de comunicación serie predeterminada en el controlador que se muestra en la tabla 5.3. [3]

Tabla 5.3 Configuración predeterminada de la conexión serial

Parámetro	Opción predeterminada
Protocolo	DF1 full-dúplex
Baud Rate	19.2 Kbit/s
Paridad	ninguna
Dirección de Estación	0
Líneas de Control	Sin handshakin
Detección de Error	BCC
Respuesta Embebida	auto detección
Detección de paquetes Duplicados	habilitado
ACK Timeout	50 (x 20 ms)
Límite de Recepción NAK	3 reintentos
Límite de transmisión ENQ	3 reintentos
Bits de datos	8
Bit de Parada	1

El protocolo de transmisión DF1 es un protocolo asíncrono de bytes orientado a la comunicación de la mayoría de los módulos Allen-Bradley, los datos son de 8 bits, sin paridad y con una velocidad de transmisión máxima de 19200 baudios. El protocolo DF1 especifica cómo enviar los datos por el puerto RS-232, es decir, declarar qué acciones tomar cuando se recibe una serie de caracteres, por ejemplo, restablecer un dispositivo cuando se reciben los caracteres *RST.

Para establecer la configuración predeterminada se utilizó “*el botón pulsador de comunicación predeterminada del canal 0*” que está ubicado en la esquina inferior derecha de la parte frontal del controlador, como se muestra en la siguiente ilustración.

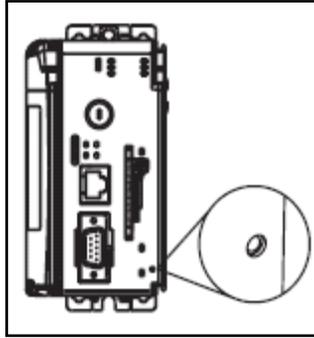


Ilustración 5.12 Botón pulsador de comunicación predeterminada del canal 0

El indicador LED de comunicación predeterminada del canal 0 (DCH0) se enciende (de color verde, fijo) para mostrar que la configuración de comunicación predeterminada está activa.

5.4.1.2 Puerto Ethernet

Se asignó una dirección IP al puerto Ethernet (Canal 1) para que el controlador se pudiera comunicar tanto con la computadora como con la pantalla táctil a través de una red Ethernet.

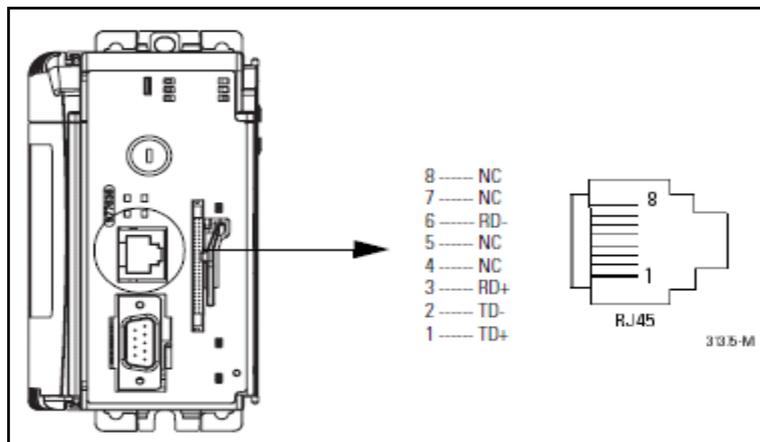


Ilustración 5.13 Conexión Ethernet del PLC

Para la asignación de la dirección IP se utilizó el software RSLinx, esta operación consta de una serie de pasos que se mencionan a continuación. [3]

- a. Conectar el PLC a la red Ethernet y encenderlo.
- b. Conectar el controlador mediante la conexión serie.
- c. Iniciar el RSLinx y abrir la ventana RSWho. Navegar en RSWho a la red Ethernet.

- d. Hacer clic con el botón derecho del mouse en el puerto Ethernet y seleccionar “Module Configuration”.

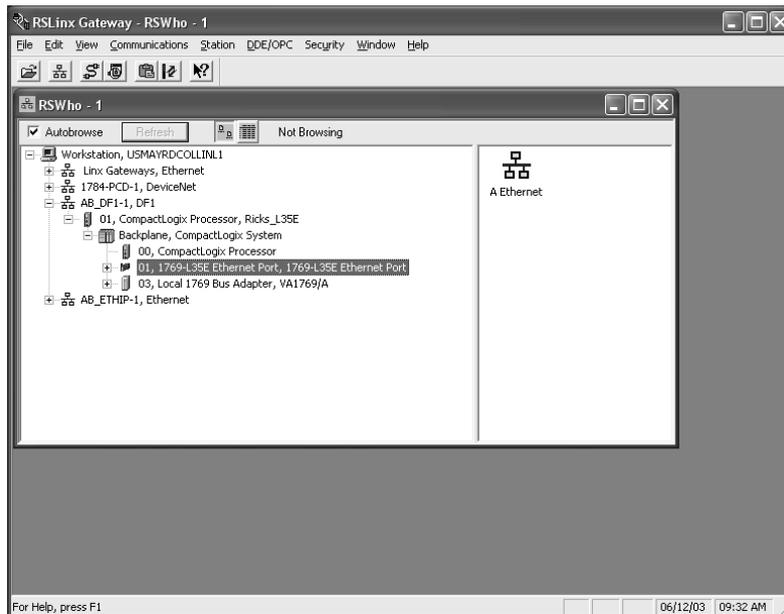


Ilustración 5.14 Configuración de la dirección IP mediante RSLinx Classic

- e. Seleccionar la pestaña “Port Configuration”, elegir el tipo “Static” e introducir la dirección IP, la máscara de la red y la dirección de Gateway.

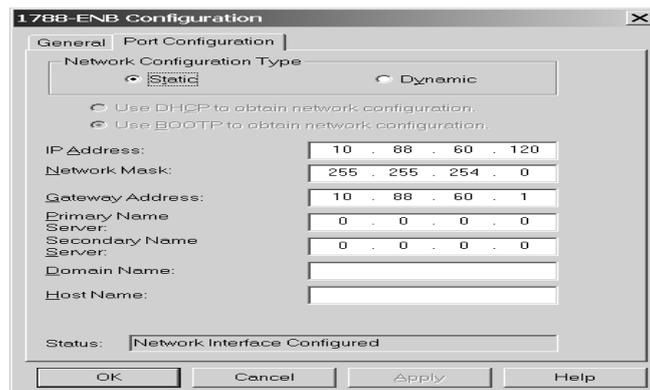


Ilustración 5.15 Ingreso de la dirección IP

5.4.1.1 Interruptor de llave para establecer el modo de control

Por medio del interruptor de llave ubicado en la parte frontal del PLC se pueden establecer los modos de control, estos son: RUM, PROG y REM. En la tabla 5.4 se resumen las acciones que se pueden desarrollar en cada uno de estos modos. [3]

Tabla 5.4 Configuración predeterminada de la conexión serial

Posición del interruptor de llave	Descripción	
RUN	<ul style="list-style-type: none"> •Cargue proyectos. •Ejecute el programa y habilite las salidas. •Usted no puede crear ni eliminar tareas, programas o rutinas. Usted no puede crear ni eliminar tags ni editar en línea mientras el interruptor de llave está en la posición RUN (marcha). •Usted no puede cambiar el modo usando el software de programación mientras el interruptor de llave está en la posición RUN. 	
PROG	<ul style="list-style-type: none"> •Inhabilite las salidas. •Cargue/descargue proyectos. •Cree, modifique y elimine tareas, programas o rutinas. •El controlador no ejecuta (escanea) tareas mientras el interruptor de llave está en la posición PROG. •Usted no puede cambiar el modo mediante el software de programación mientras el interruptor de llave está en la posición PROG. 	
REM	<ul style="list-style-type: none"> •Cargue/descargue proyectos. •Cambie entre los modos Programación remota, Prueba remota y Marcha remota mediante el software de programación. 	
	Marcha remota	<ul style="list-style-type: none"> •El controlador ejecuta (escanea) tareas. •Habilite las salidas. •Edite en línea.
	Programa remoto	<ul style="list-style-type: none"> •Inhabilite las salidas. •Cree, modifique y elimine tareas, programas o rutinas. •Descargue proyectos. •Edite en línea. •El controlador no ejecuta (escanea) tareas.
	Prueba remota	<ul style="list-style-type: none"> •Ejecute tareas con las salidas inhabilitadas. •Edite en línea.

Para el proyecto se utilizó el interruptor de llave colocado en la posición de REM para poder manejar el modo de control del PLC desde el software de programación RSLogix 5000 instalado en la computadora personal.

5.4.1.2 Indicadores de estado

En la tabla se resume la función de cada uno de los indicadores LED ubicados en la parte frontal del PLC. [3]

Tabla 5.5 Configuración predeterminada de la conexión serial

Indicador:	Color:	Descripción:
RUN	Apagado	El controlador está en el modo Programa o Prueba.
	verde fijo	El controlador está en el modo Marcha.
FORCE	Apagado	No hay tags que contengan forzados de E/S. Los forzados de E/S están inactivos (inhabilitados)
	ámbar fijo	Los forzados de E/S están activos (habilitados) Pueden haber o no forzados de E/S.
	ámbar parpadeante	Una o más direcciones de entrada o salida han sido forzadas al estado activado o desactivado, pero lo forzados no se han habilitado.
BAT	Apagado	La batería respalda la memoria.
	rojo fijo	La batería está: •no instalada. •95% descargada y debe reemplazarse.
I/O	Apagado	Ya sea: •No hay dispositivos en la configuración de E/S del controlador. •El controlador <i>no</i> contiene un proyecto (la memoria del controlador está vacía).
	verde fijo	El controlador se está comunicando con todos los dispositivos en su configuración de E/S.
	verde parpadeante	Uno o más dispositivos en la configuración de E/S del controlador <i>no</i> responden.
	rojo parpadeante	El controlador no se está comunicando con ningún dispositivo. El controlador está en fallo.
OK	Apagado	No hay alimentación eléctrica conectada.
	rojo parpadeante	Si el controlador es ->Entonces: Un nuevo controlador ->El controlador requiere una actualización de firmware. No es un nuevo controlador ->Ocurrió un fallo mayor. Para borrar un fallo realice una de las siguientes acciones: - Cambie el interruptor de llave de PROG a RUN a PROG - Vaya en línea con el software RSLogix 5000
	rojo fijo	El controlador detectó un fallo no recuperable, por lo tanto borró el proyecto de la memoria. Para recuperarse: 1. Desconecte y vuelva a conectar la alimentación eléctrica al chasis. 2. Descargue el proyecto. 3. Cambie al modo Marcha. Si el indicador LED OK permanece de color rojo fijo, comuníquese con el representante de Rockwell Automation o con el distribuidor regional.
	verde fijo	El controlador está en buen estado.
	verde parpadeante	El controlador está almacenando o cargando un proyecto a, o desde, la memoria no volátil.

5.4.1.3 Ranura para tarjeta de memoria Flash

En esta ranura se inserta la tarjeta de memoria Flash con el firmware actualizado. Este firmware está disponible con el software RSLogix 5000, o puede descargarse desde el sitio web de soporte técnico <http://support.rockwellautomation.com>. En este caso el firmware fue cargado desde el software RSLogix 5000.

5.4.1.4 Conexión lateral con módulos I/O

El Controlador 1769-L32E se debe de conectar en el extremo izquierdo del banco de sistema de control. Los módulos entradas y salidas pueden conectarse tanto a la izquierda como la derecha de la fuente de poder. Se pueden colocar un máximo de 8 módulos al lado de la fuente de poder. En nuestro caso se utilizaron 7 módulos conectados de la siguiente manera. [3]

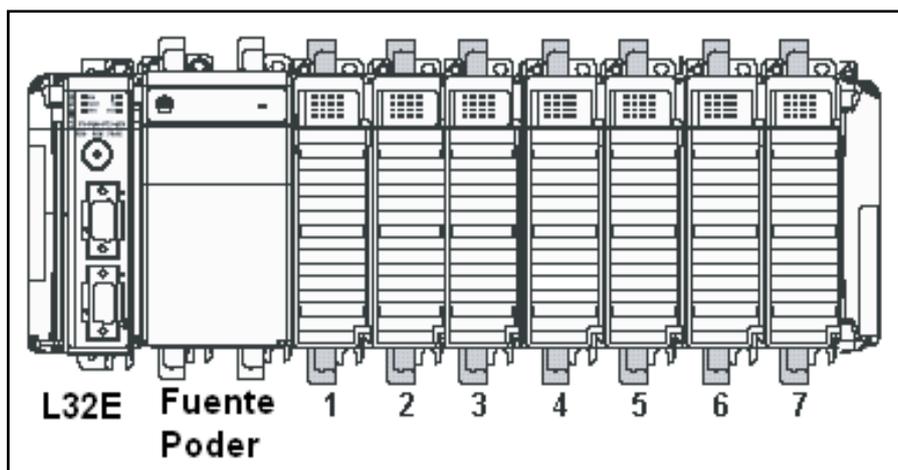


Ilustración 5.16 Conexión de módulos de I/O al PLC

En la tabla 5.6 se indican los módulos instalados en las diferentes posiciones.

Tabla 5.6 Posiciones de los módulos instalados

Posición de Ranura	Módulo	Nº de Catálogo	Descripción
1	Entradas discretas	1769-IA8I/A	8 entradas discretas de 120V CA
2	Entradas discretas	1769-IA8I/A	8 entradas discretas de 120V CA
3	Entradas discretas	1769-IA16/A	16 entradas discretas de 120V CA
4	Salidas discretas	1769-OW16/A	16 salidas discretas de relé CA y CC normalmente abierto, rango de salida: <ul style="list-style-type: none"> • 5 a 265 VCA • 5 a 125 VCC
5	Entradas analógicas	1769-IF8/A	8 entradas analógicas. Rangos de entrada: <ul style="list-style-type: none"> • Voltaje: $\pm 10V$ Cd, 0 a 10V Cd, 0 a 5V Cd, 1 a 5V • Corriente: 0 a 20 mA, 4 a 20 mA
6	Salidas analógicas	1769-OF8/A	8 salidas analógicas con rango de 0 a 20 mA y 4 a 20 mA
7	Entradas termocupla	1769-IT6/A	5 entradas para termopares tipo: J, K, E, R, S, T, B, N, C, para sensores tipo CJC y entradas de mili voltios de $\pm 50mV$ y $\pm 100mV$

Es importante mencionar que el módulo de termopares 1769-IT6/A debe ser configurado para termopares tipo J, como los utilizados en la medición de temperatura del horno. Tiene la capacidad de medir temperaturas en el rango de -210 a 1200 °C, lo cual funciona para las mediciones de temperatura del horno que rondan entre los 21 a 426,7 °C. Este módulo tiene la capacidad de realizar la compensación por juntas frías, tomando como referencia la temperatura medida por los sensores de compensación que están conectados a las entradas de compensación de juntas frías.

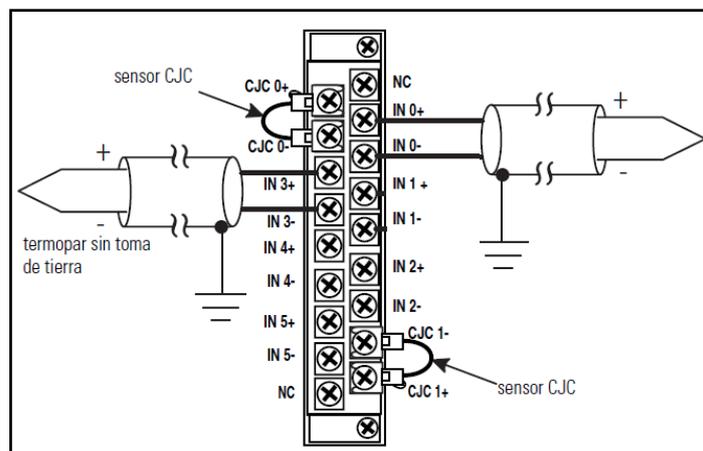


Ilustración 5.17 Conexión de termopares al módulo de entrada de termopares del PLC

Todos los módulos cuentan con las características mostradas en la ilustración 5.18.

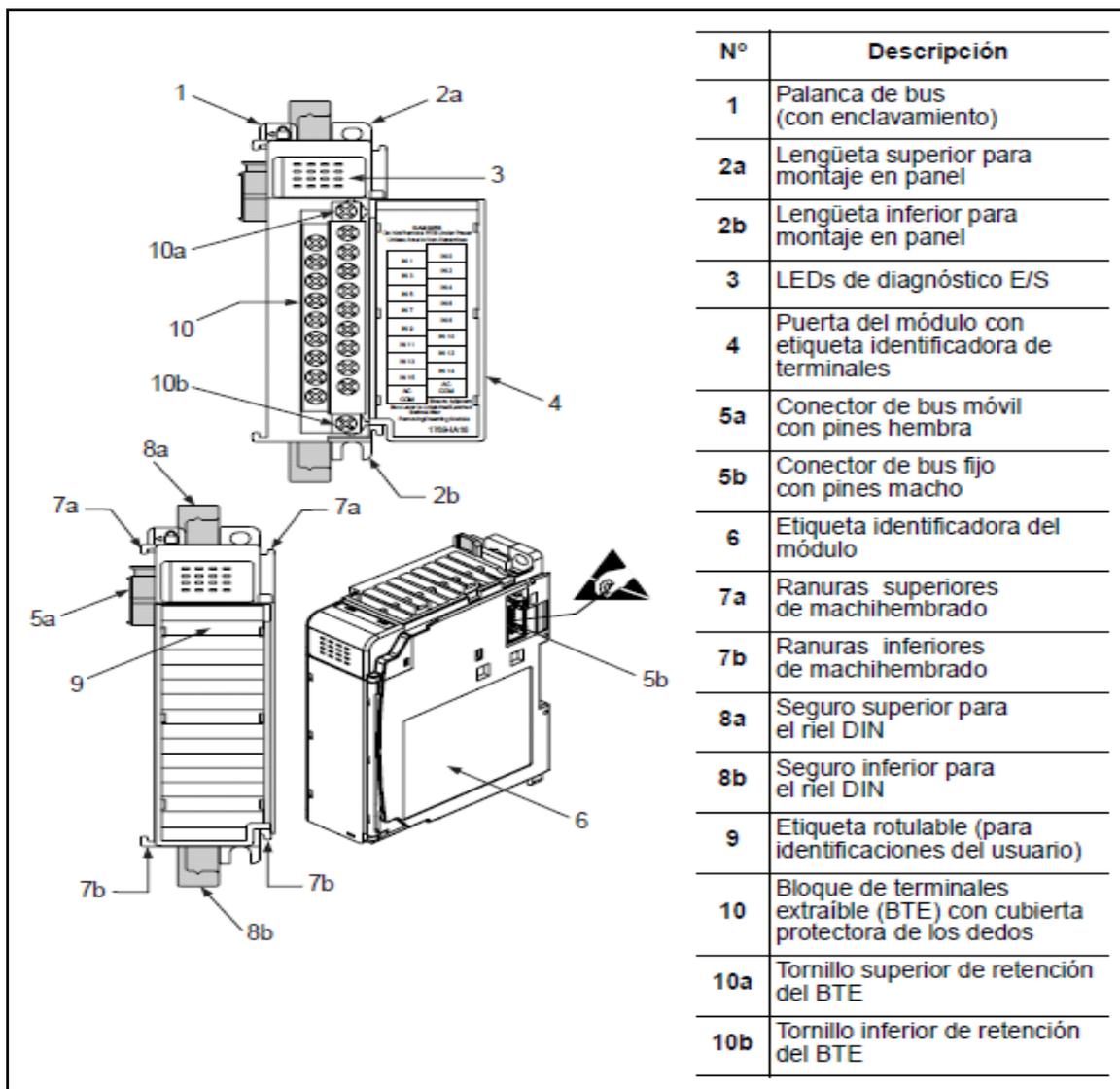


Ilustración 5.18 Características generales de los módulos I/O

5.5 Descripción de la pantalla táctil PanelView Plus 1000

La pantalla táctil Panel View Plus 1000 de la marca Allen Bradley ofrece desplegados de 18 bits y plantillas programables que incluyen alarmas, diagnósticos, pantallas de mensaje, procesos, variadores, etc. La pantalla tiene una dimensión de 26,42 cm y está diseñada para soportar condiciones ambientales severas. En la ilustración 5.19 se muestra el Panel View Plus 1000.



Ilustración 5.19 PanelView Plus 1000

La pantalla está compuesta por el módulo lógico y el módulo de despliegado. En el módulo lógico se descarga el programa de los desplegados gráficos, esta descarga puede ser por comunicación serial o Ethernet, en el proyecto se utilizó la comunicación Ethernet para la conexión con el PLC y la computadora personal. [13]

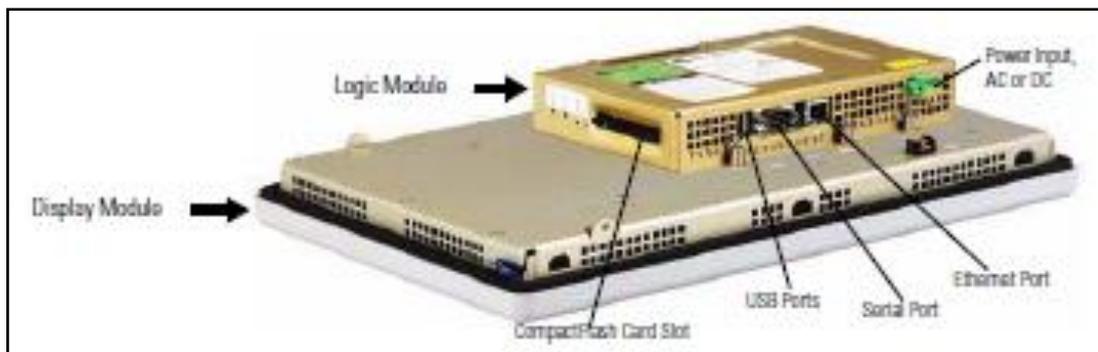


Ilustración 5.20 Módulos y conexiones del PanelView Plus 1000

Para la configuración de la dirección IP se utilizó el software RSLinx de la misma manera que el PLC.

5.6 Descripción del software utilizado

En esta sección encontrará una descripción breve de las características del software utilizado por el PLC y la pantalla táctil.

5.6.1 RSLogix 5000 software de programación del PLC

Este software permite programar las rutinas del PLC mediante programación en escalera y de bloques. Contiene un completo set de instrucciones que

comprende instrucciones de bits, temporización y conteo, entrada y salida, comparación, lógicas, cálculo y matemáticas, arreglos, secuenciales, control de programa, especiales como el PID y trigonométricas. También pueden programarse rutinas continuas y secuenciales. En la ilustración 5.21 se muestra la pantalla principal del RSLogix 5000. [14]

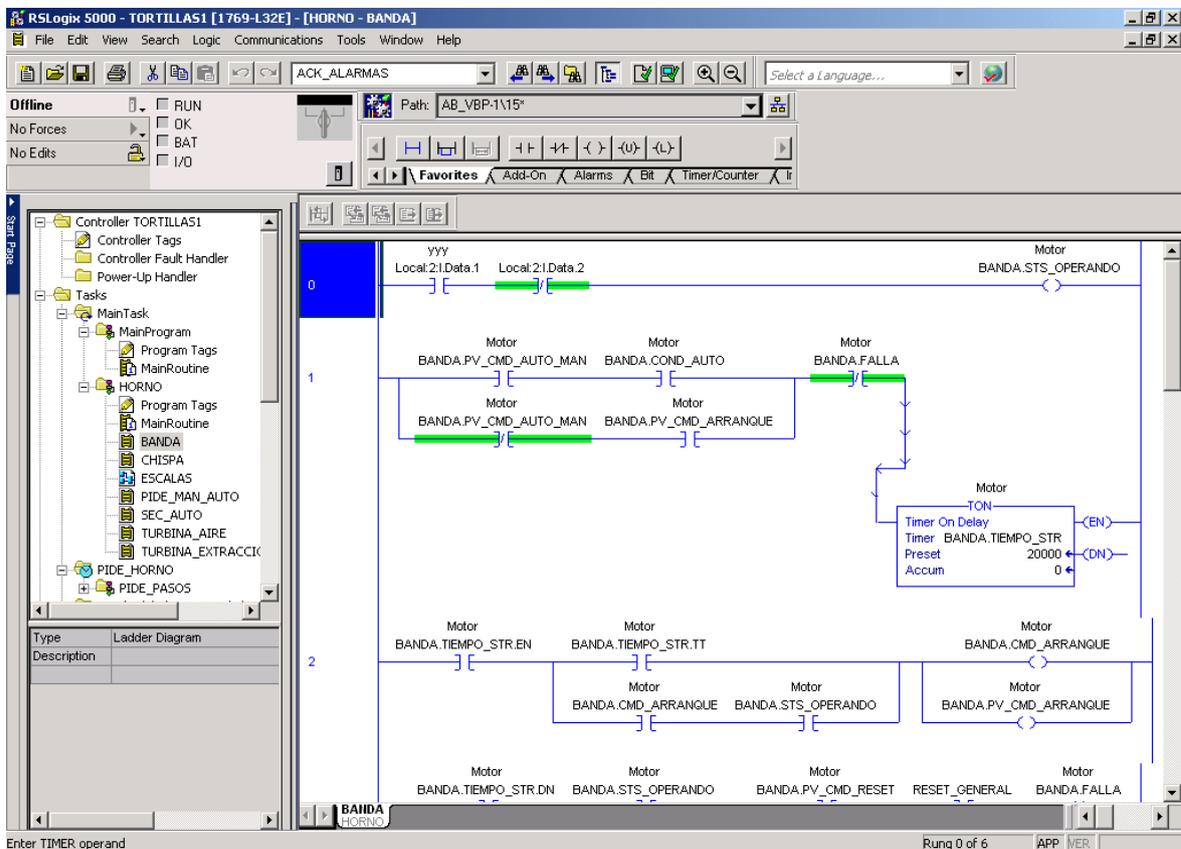


Ilustración 5.21 Pantalla principal del RSLogix 5000

5.6.2 RSLinx Classic

Este programa se utiliza para la conexión de los dispositivos mediante comunicación Ethernet. Permite la configuración de la dirección IP del PLC y la pantalla táctil. Mediante este software se realiza la conexión del PLC, la pantalla táctil y la computadora personal. Su función principal es la administración de dispositivos Allen-Bradley que se conectan a la red.

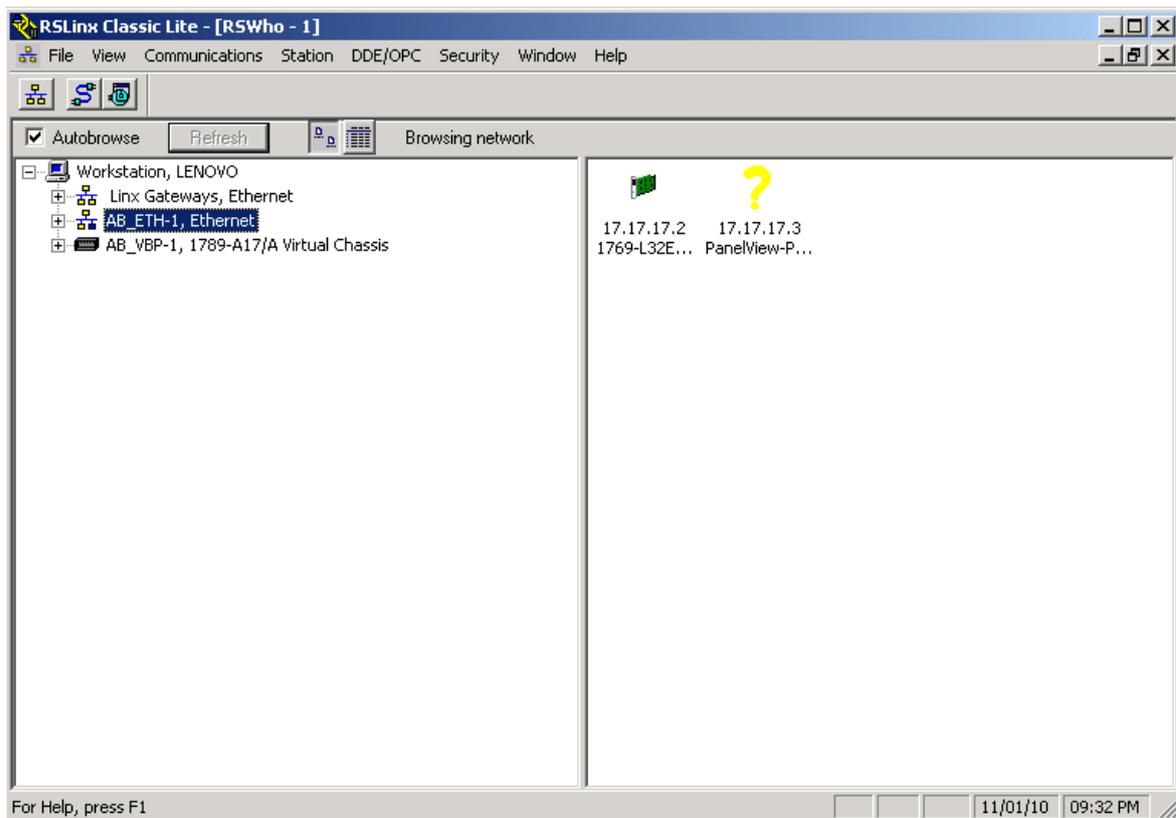


Ilustración 5.22 Administrador de dispositivos de red RSLinx Classic

En la tabla Las direcciones IP asignadas a cada dispositivo fueron:

Tabla 5.7 Posiciones de los módulos instalados

Dispositivo	Dirección IP
Computadora Personal	17.17.17.1
PLC	17.17.17.2
Pantalla Táctil	17.17.17.3

5.6.3 FactoryTalk View Machine Edition (ME)

FactoryTalk View Machine Edition (ME) es un software HMI de nivel de máquina compatible con interfaces de operador tanto abiertas como incorporadas para el monitoreo y control de máquinas individuales o pequeños procesos. Este software permite una interface de operador consistente entre múltiples plataformas, incluyendo Microsoft® Windows® CE y Microsoft Windows Vista y XP.

S adapta a las necesidades de la aplicación, desde aplicaciones pequeñas autónomas a nivel de máquina, hasta aplicaciones grandes de HMI de

supervisión multiservidor, multicliente y multiusuario. En el proyecto se utilizó la función de multiusuario, creando un usuario administrador que tiene acceso a todas las pantallas incluyendo las de configuración y el usuario operador que tiene acceso a las pantallas de monitoreo y control. En la ilustración 5.23 se muestra la pantalla principal del FactoryTalk View Machine Edition (ME).



Ilustración 5.23 Pantalla principal del software FactoryTalk View Studio ME

La conexión de las variables de las rutinas programadas en el PLC mediante el software RSLogix 5000 se enlazan a la interfaz gráfica por medio de “etiquetas”, las cuales se construyen con el nombre del programa del que provienen y el nombre de la variable. En la ilustración 5.24 se muestra el cuadro de diálogo donde se ingresan estas etiquetas.

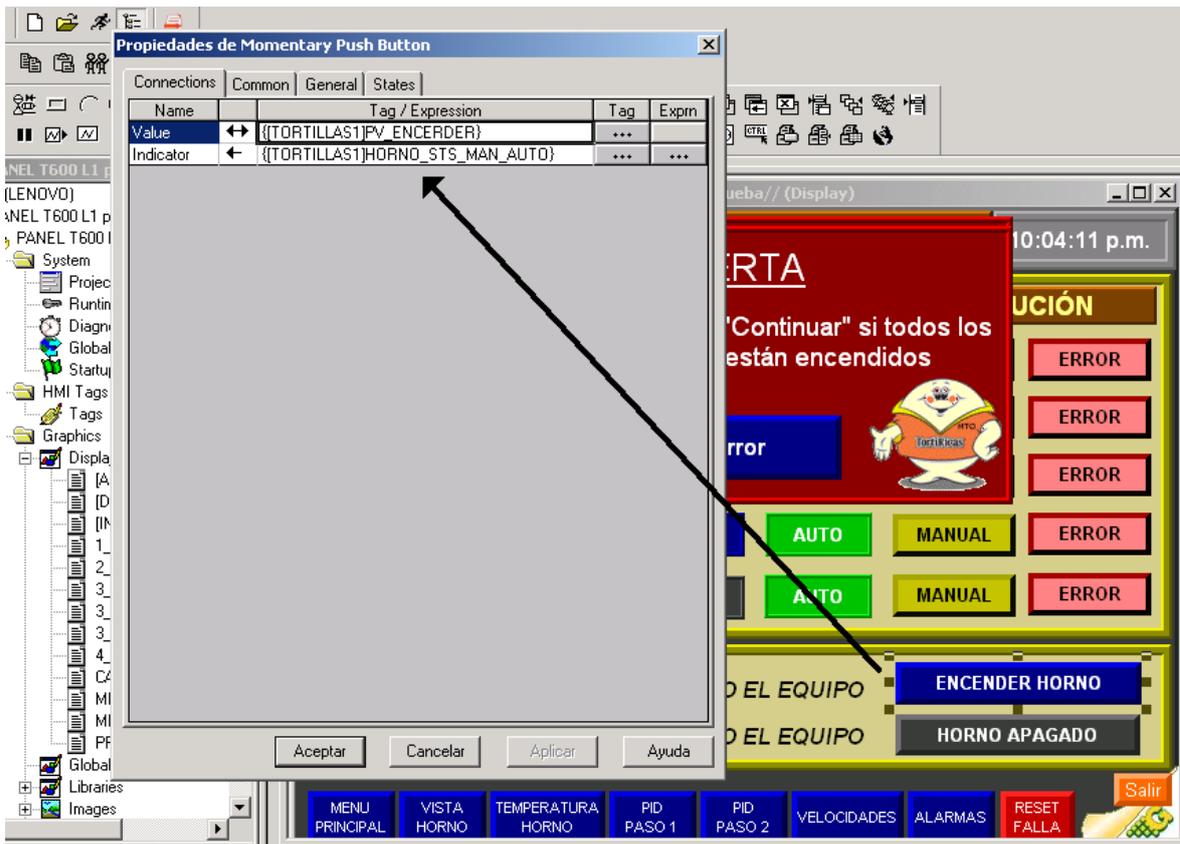


Ilustración 5.24 Asignación de etiquetas al desplegado

5.7 Descripción de los variadores de frecuencia

Los variadores de frecuencia PowerFlex 4 ® de la marca Allen-Bradley ® brindan un poderoso control de velocidad del motor en un diseño compacto que ahorra espacio, estos se utilizaron para el control de velocidad del motor de la banda, el ventilador y el enfriador de tortillas. Algunas de sus características son:

- Embalaje flexible y opciones de montaje.
- Soporta temperaturas ambiente de 50°C.
- Teclado integral con pantalla de 4 dígitos y 10 indicadores LED adicionales para proporcionar control intuitivo.
- Los 10 parámetros comúnmente programados se agrupan para una rápida y fácil puesta en marcha.



Ilustración 5.25 Variador de frecuencia PowerFlex 4

La velocidad del variador de frecuencia se regula mediante una señal de control de 4 a 20 mA correspondiente a velocidades de 0 a 60 Hz. Se realizó la siguiente conexión del variador de frecuencia.

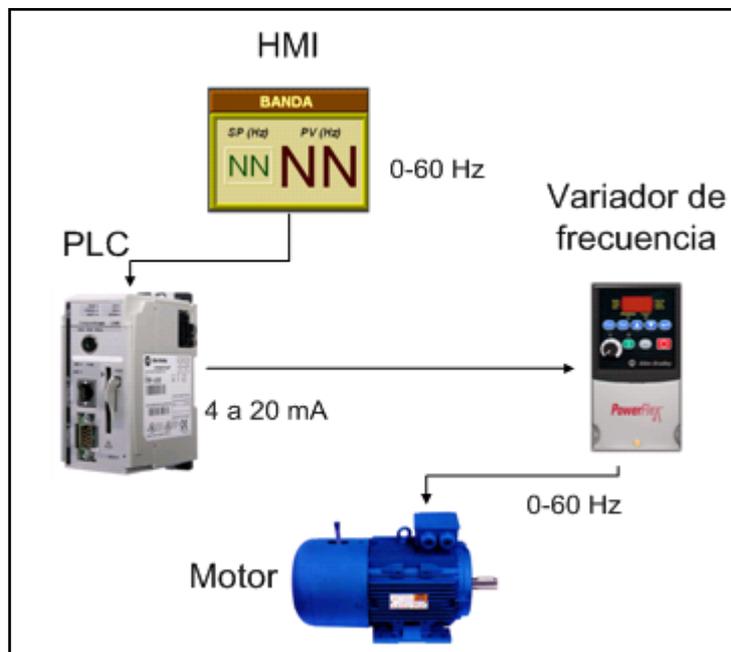


Ilustración 5.26 Conexión del variador de frecuencia

Los parámetros que se configuraron para controlar el variador con una señal de 4 a 20 mA y generar una realimentación de 4 a 20 mA para indicar la frecuencia de funcionamiento del variador se muestran en la siguiente tabla.

[15]

Tabla 5.8 Parámetros de configuración del variador

Parámetro	Configuración	Función
P038	3	Señal de entrada para control de velocidad de 4 a 20 mA
A051	14	
A054	14	
A132	3	
A065	10	Señal de salida de realimentación de 4 a 20 mA
A066	10	

5.8 Descripción de los actuadores

Los actuadores utilizados son los AM24SR de la marca Belimo y su aplicación principal es la modulación proporcional. Algunas características del actuador son:

- Funciona en respuesta a un voltaje variable de 2 a 10V, por medio de una resistencia de 500Ω puesta en sus entradas puede ser controlado con la corriente de 4 a 20mA brindada por el PLC. Tal como se muestra en la ilustración 5.27.

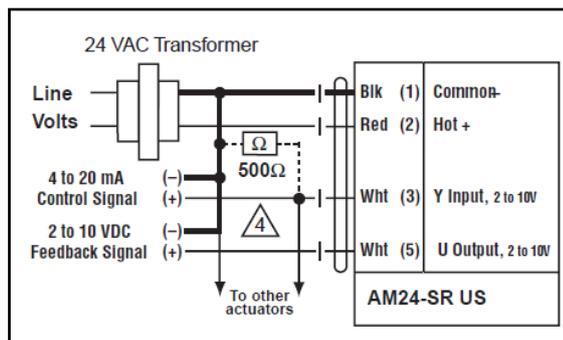


Ilustración 5.27 Conexión del actuador

- El actuador demora 150 segundos recorriendo todo su desplazamiento angular de 0° a 95° .
- Mediante el botón de accionamiento manual que posee se puede realizar una prueba de funcionamiento donde recorrerá una carrera completa y regresará a la posición que se encontraba.
- Cuenta con dos topes mecánicos.

- Genera una señal de realimentación de 2 a 10V que indica la posición del actuador.
- Posee un circuito protector que limita su desplazamiento angular a un máximo de 95°

El actuador posee un eje con rosca que permite la instalación directa de la parte mecánica. En la ilustración 5.28 se muestra el actuador utilizado.

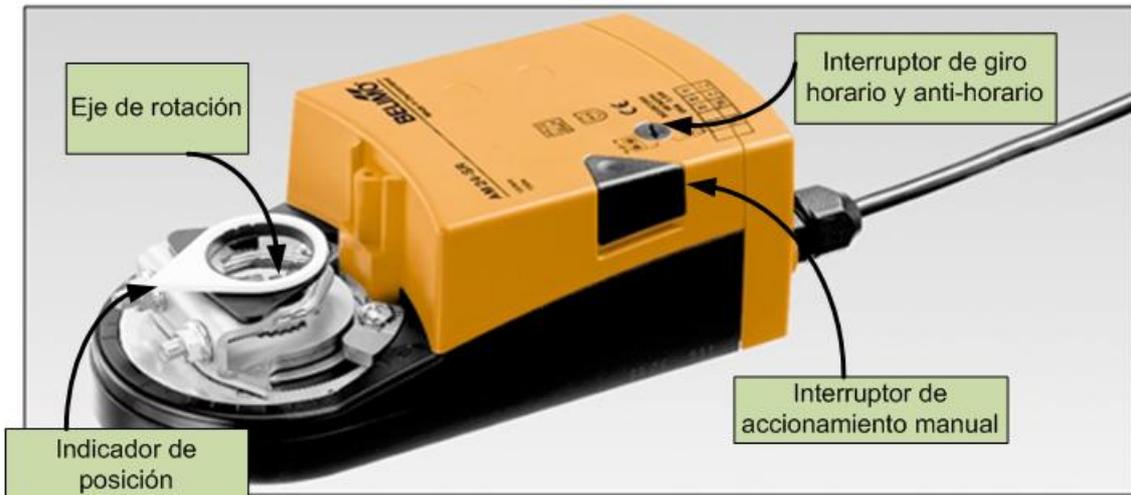


Ilustración 5.28 Actuador AM24SR

5.9 Diseño de diagramas de flujo y bloques

En esta sección encontrará los diagramas de flujo utilizados para la programación de las rutias del PLC.

5.9.1 Diagrama de flujo para el encendido de los dispositivos

Se utilizó el mismo diagrama de flujo para el encendido de la banda transportadora, el motor del ventilador de aire, el motor del extractor de gases y el transformador de los electrodos generadores de chispa. El diagrama de flujo se muestra en la ilustración 5.29.

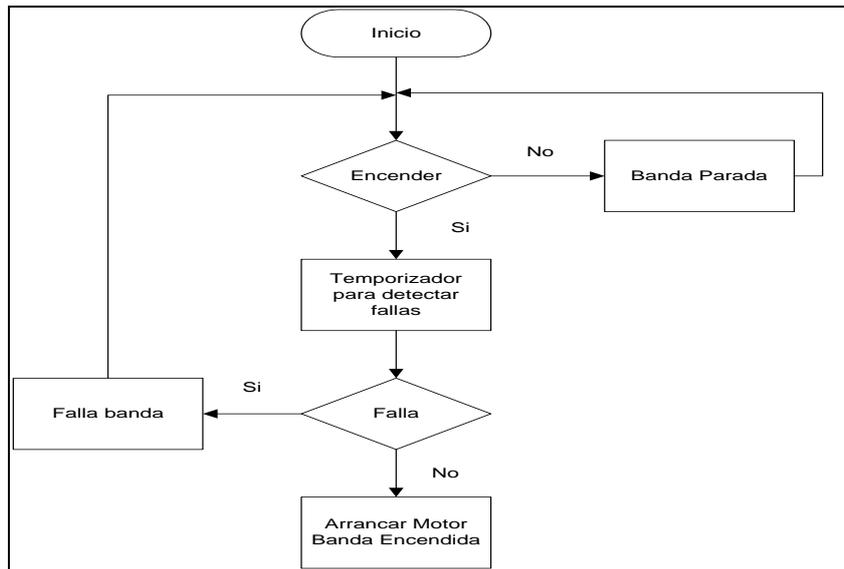


Ilustración 5.29 Diagrama de flujo del encendido de dispositivos

5.9.2 Diagrama de flujo de encendido automático

Para el encendido automático del horno se realizó el diagrama de flujo correspondiente a la secuencia de encendido aconsejada por el manual de operación del horno. En la ilustración 5.30 se muestra el diagrama de flujo de la secuencia de encendido automático.

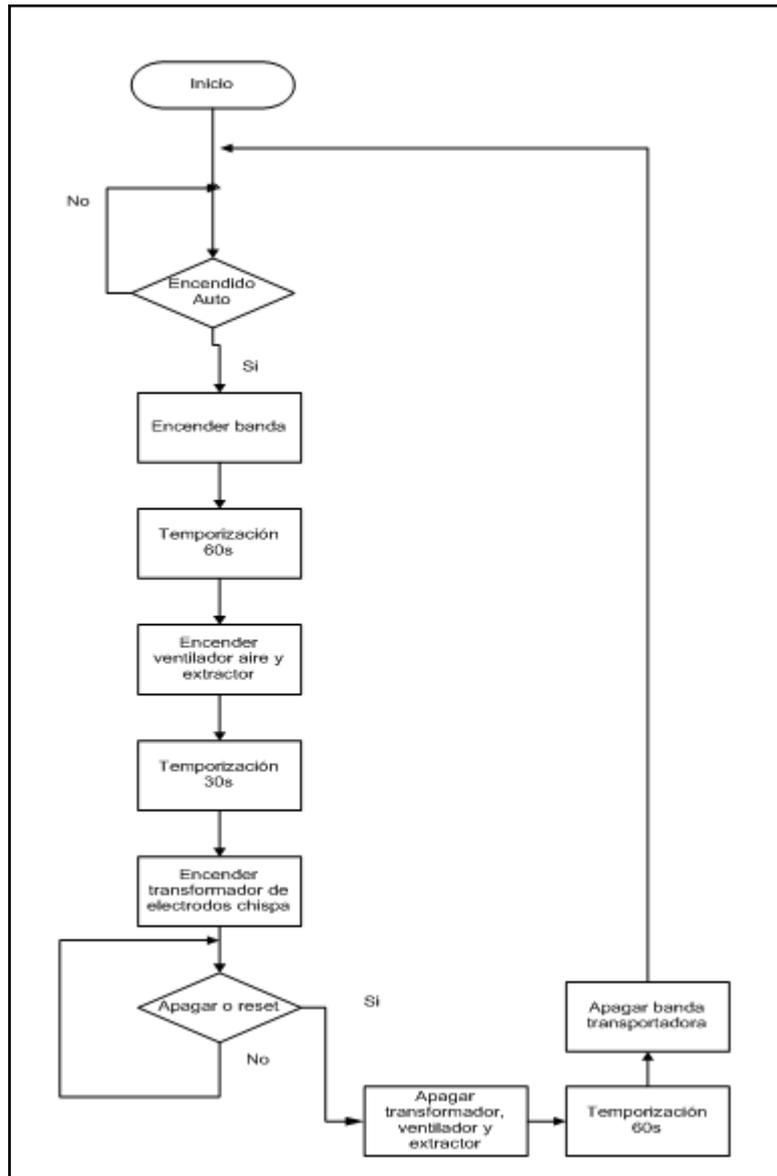


Ilustración 5.30 Diagrama de flujo de secuencia de encendido y apagado automático

5.9.3 Bloques de escalamiento de entradas y salidas

Para poder controlar adecuadamente los variadores de frecuencia y el actuador y para realizar mediciones correctas de temperatura se utilizaron bloques de escalamiento. Por ejemplo para el actuador el valor del escalamiento de salida es de 0-100%. Los bloques de escalamiento se muestran a continuación.

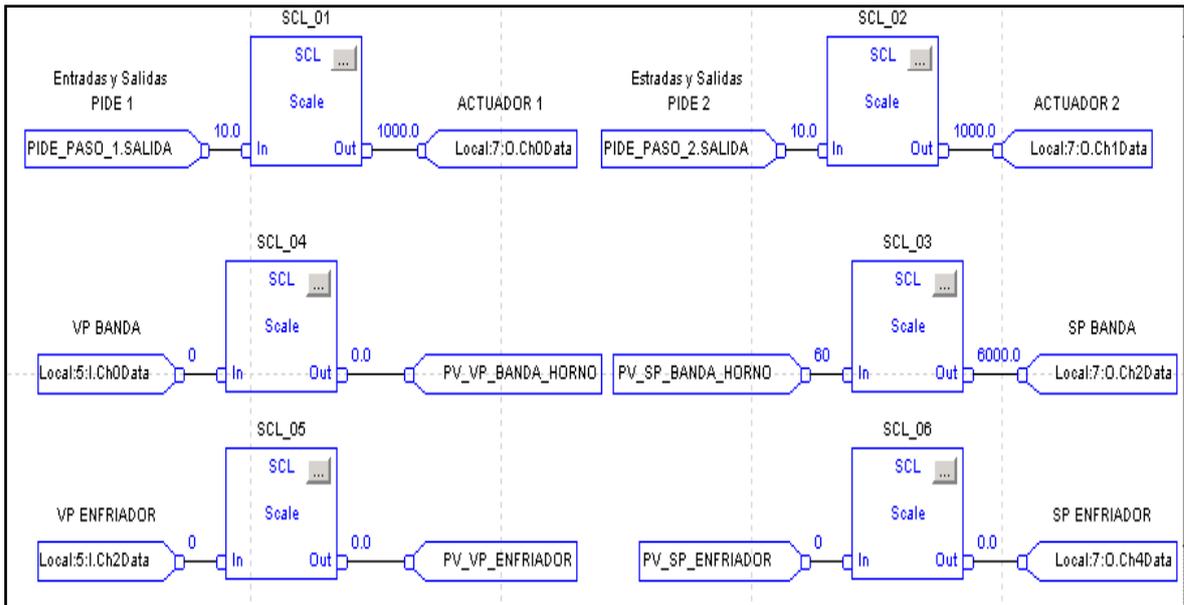


Ilustración 5.31 Bloques de escalamiento de entradas y salidas

5.9.4 Bloque promediador

Este bloque se utilizó para calcular el promedio de la temperatura medida por la termocupla, esto con el fin de obtener un valor más continuo para la entrada del controlador PID.

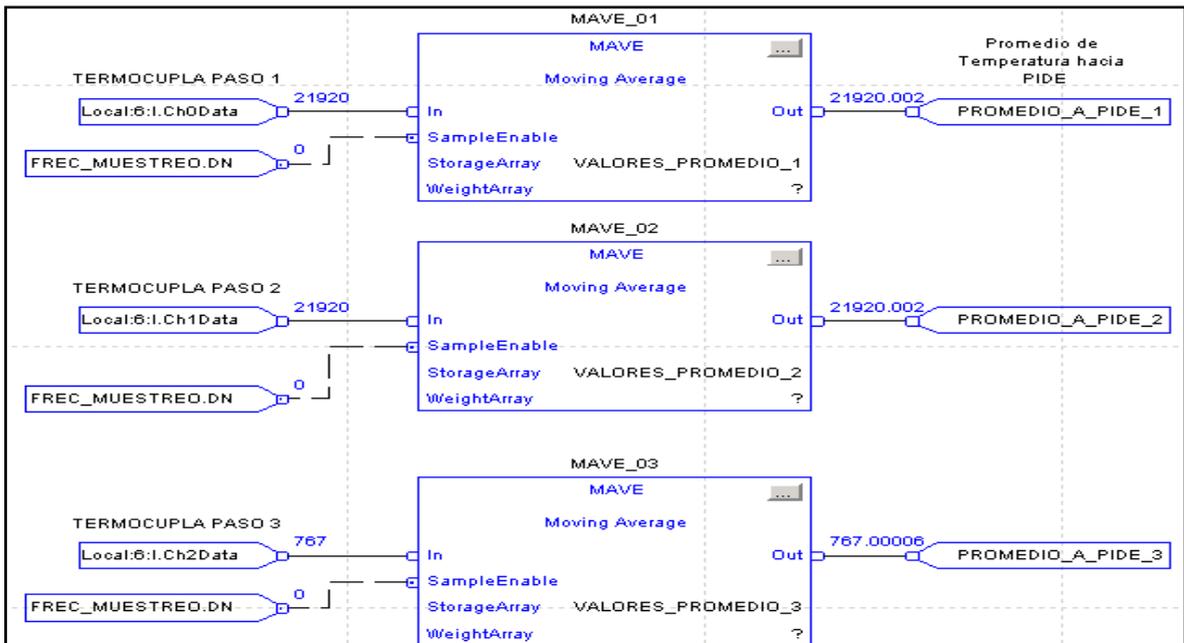


Ilustración 5.32 Bloques para promediar entrada de termopares

5.9.5 Bloque PID

Para la programación del controlador PID se utilizó el bloque de instrucciones especiales "PIDE". En la ilustración 5.33 se muestra el bloque PIDE.

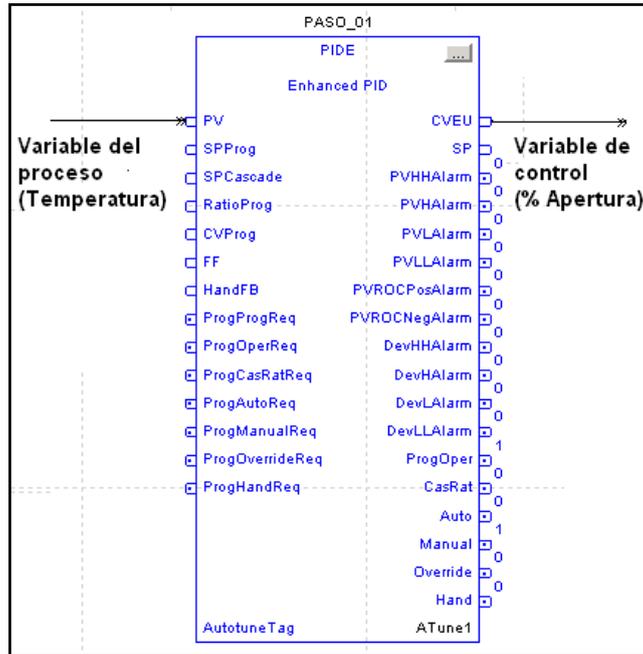


Ilustración 5.33 Bloque PIDE

La instrucción PIDE se utiliza en lazos cerrados para que la variable de proceso siga el valor del Setpoint establecido, tal como se muestra en la siguiente ilustración.

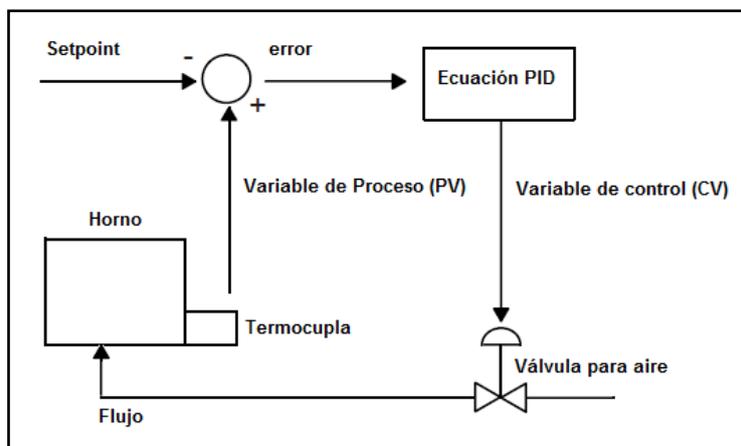


Ilustración 5.34 Diagrama de aplicación de la instrucción PIDE

La ecuación PID utilizada por la instrucción PIDE es una ecuación de forma posicional con la opción de utilizar las ganancias de manera independiente o dependiente. Se utilizó la configuración de ganancias independientes donde,

las ganancias proporcional, integral y derivativa sólo afectan a los términos específicos proporcional, integral, o derivativo respectivamente. La acción de cálculo de error y la ecuación del controlador son las siguientes:

$$E = SP - PV \quad (5.27)$$

$$CV = K_p E + K_i \int_0^t E dt - K_d \frac{dE}{dt} + BIAS \quad (5.28)$$

Esta configuración se realiza en la pestaña de configuración general del cuadro de configuración de la instrucción PIDE. En la ilustración 5.35 se muestra el cuadro de configuración de la ecuación del PID.

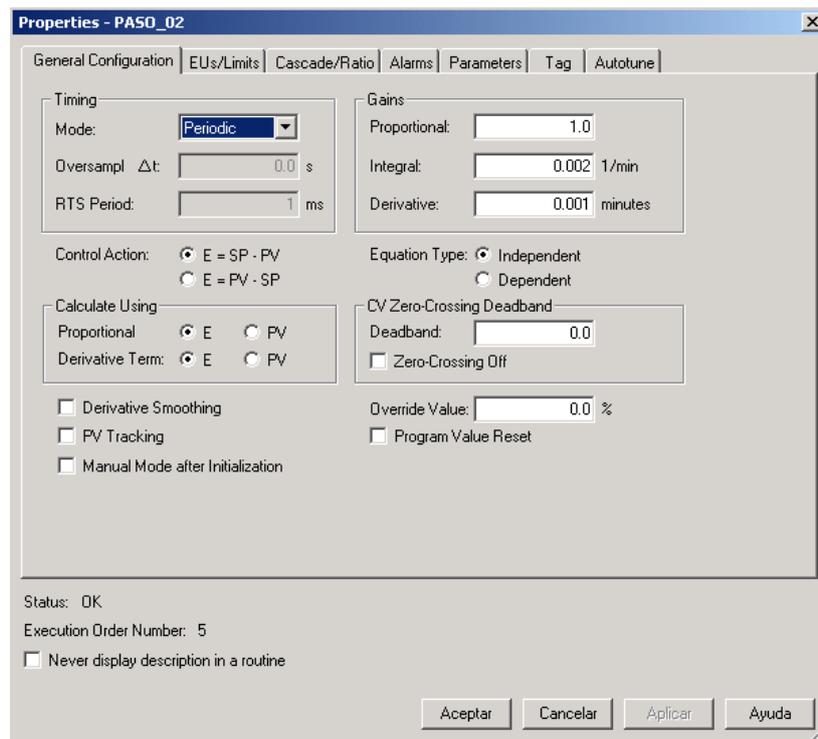


Ilustración 5.35 Configuración de la ecuación PID

5.9.5.1 Restablecimiento Anti-windup y transferencia sin perturbaciones de manual a automático

La instrucción PID automáticamente produce un restablecimiento Anti-windup para prevenir la saturación del término integral cada vez que la salida CV alcanza los valores máximo o mínimo, según lo establecido por los parámetros MAXO y MINO. El término integral acumulado permanece estático hasta que la salida cae por debajo del límite máximo del CV o se eleva por encima de su límite mínimo. La acumulación integral normal se reanuda automáticamente.

5.9.5.2 Parámetros de entrada de la instrucción PIDE.

Los principales parámetros de entrada de la instrucción PIDE se resumen en la tabla 5.9.

Tabla 5.9 Posiciones de los módulos instalados

SP	Valor del Setpoint
SO	Porcentaje de salida
KP	Ganancia Proporcional. Para ganancias independientes, está es la ganancia proporcional. Para ganancias dependientes, está es la ganancia del controlador.
KI	Ganancia Integral. Para ganancias independientes, está es la ganancia integral (1/seg). Para ganancias dependientes, está es un tiempo de restablecimiento (minutos por repetición)
KD	Tiempo derivativo. Para ganancias independientes, está es la ganancia derivativa (seg). Para ganancias dependientes, está es un tiempo de muestreo en minutos.
PE	Selección de ganancias dependientes o independientes. Seleccionar Independientes cuando se desea que las tres ganancias (KP, KI, KD) operen independientemente. Seleccionar Dependiente cuando desea que la ganancia del controlador afecte las otras tres ganancias (KP, KI, KD).
CA	Acción de Control. E=PV-SP o E=SP-PV
MAXO	Límite superior de CV
MINO	Límite inferior de CV

Los parámetros de límites de la variable de proceso y la variable de control se definen en la pestaña de EUs/Limits:

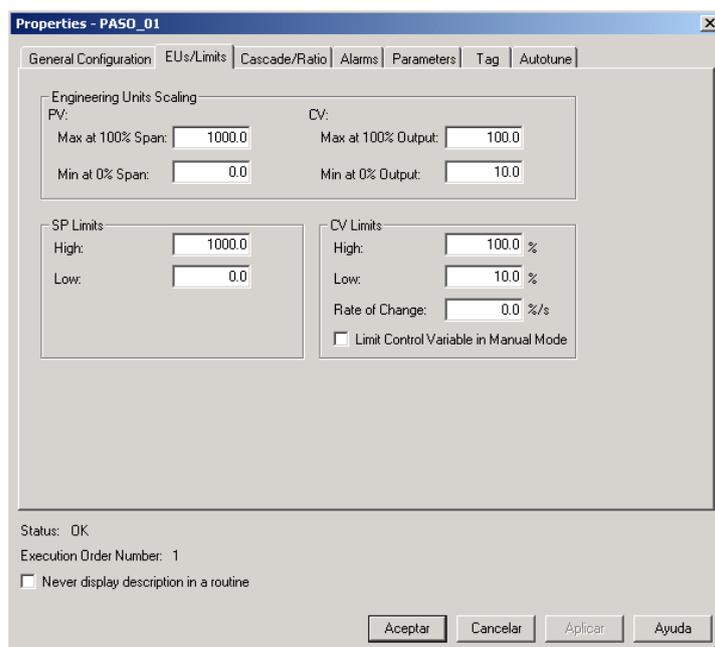


Ilustración 5.36 Configuración de los parámetros de la instrucción PID

5.9.5.3 Función de Auto-sintonización:

El RSLogix 5000 PIDE Autotuner proporciona un sencillo auto-sintonizador de lazo abierto incorporado dentro de la instrucción utilizada en el lenguaje de programación por Diagramas de Bloques de Función. Debido a que el PIDE Auto-tuning se construye en el controlador, puede realizar el ajuste automático por medio del PanelView o cualquier otra interfaz de operador, como el RLogix 5000. El bloque PIDE ha sido diseñado para utilizar una etiqueta que estructura de datos se definen el auto-sintonizador. Esto permite a los usuarios crear etiquetas para sintonizar los lazos. Estas etiquetas también se pueden acceder por cualquier dispositivo, como el PanelView, para realizar el auto-tuning mediante el establecimiento y la lectura de los valores apropiados en la estructura de datos de autoajuste en el controlador.

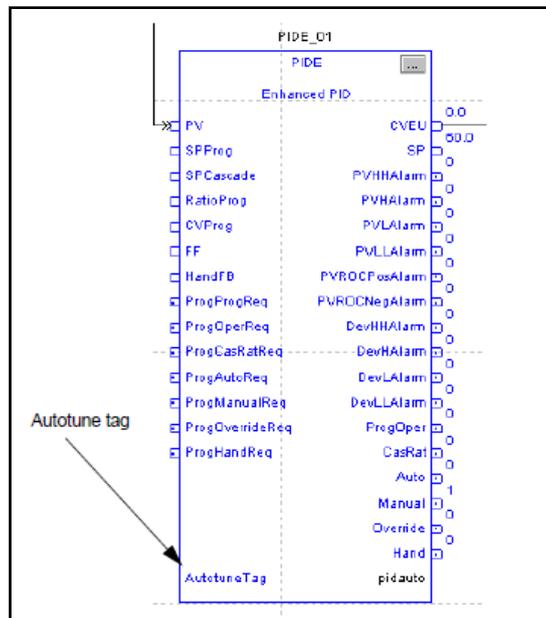


Ilustración 5.37 Etiqueta del auto-sintonizador

La interfaz de usuario para el auto-sintonizador PIDE consiste principalmente en la pestaña Autotune del cuadro de diálogo Propiedades del PIDE. La función de sintonización automática para un simple lazo abierto, está integrada en la instrucción PIDE.

La pestaña Autotune permite configurar y adquirir la etiqueta PIDE_AUTOTUNE para el algoritmo de sintonización automática. Los cuadros

asociados son para iniciar el algoritmo de sintonización, monitorear las salidas y cargar las ganancias sintonizadas.

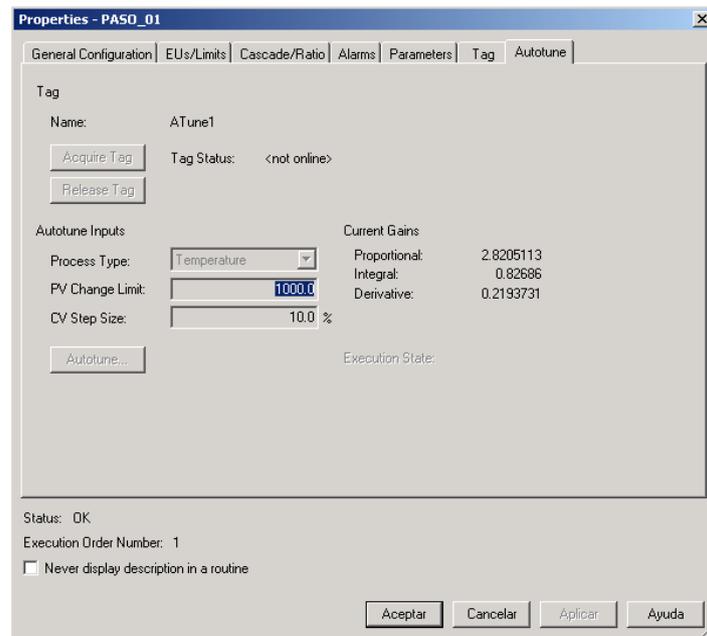


Ilustración 5.38 Cuadro de diálogo del Autotune PIDE

Los pasos para la sintonización mediante RSLogix 5000son los siguientes:

- Se selecciona el tipo de proceso (Process Type) que se desea sintonizar, en este caso se eligió un proceso de temperatura.
- Se debe definir el límite de cambio de la variable de proceso, en este caso se establece el límite al 100%.
- Se establece el valor del escalón de entrada del sistema. En nuestro caso un 10% del valor total, es decir, una apertura de la válvula del 10%. Un escalón de mayor porcentaje duraría más tiempo estabilizándose y sobrepasaría los límites de tiempo de la auto-sintonización.
- Luego de configurar el proceso de sintonización se da clic en el botón autotute y muestra la siguiente pantalla.

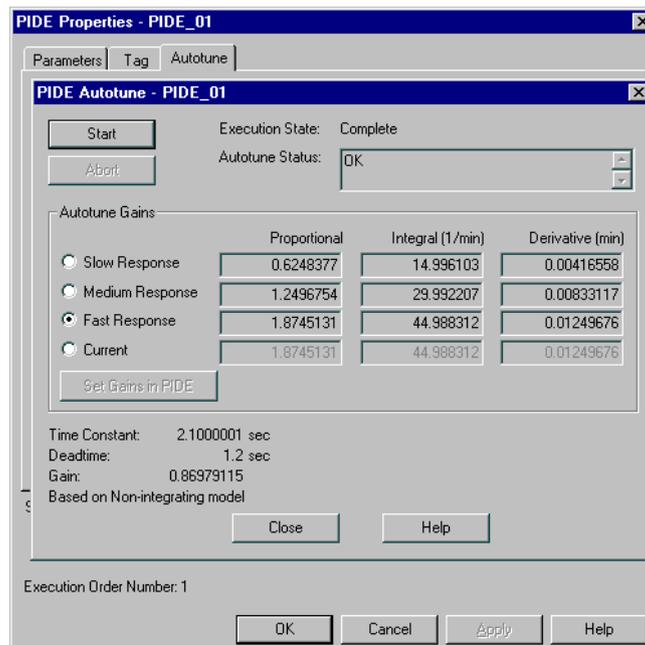


Ilustración 5.39 Cuadro de resultados de la auto-sintonización

- El cuadro de diálogo PIDE Autotune permite la sintonización del PID y carga las ganancias PIDE adquiridas. Al hacer clic en el botón “Start” y el algoritmo de autoajuste comenzará a de ejecución.
- En cualquier momento durante esta operación se puede cancelar el proceso de sintonización automática haciendo clic en el “Abort”.
- Si el algoritmo de autoajuste falla, el motivo de la falla se muestra en la caja de estado de autoajuste.
- También puede seleccionar que tipo de ganancias quiere utilizar para generar una respuesta lenta, media o rápida.
- Puede actualizar manualmente cualquiera de las ganancias mediante la selección actual y escribiendo nuevos valores en las cajas.
- Cuando el algoritmo de sintonización automática se ha completado correctamente, puede cargar estas ganancias al controlador PID dando clic en el botón “Set Gains in PIDE”.

Se desarrollo un programa que realiza la auto-sintonización desde la pantalla táctil, el diagrama de flujo de este programa se presenta a continuación.

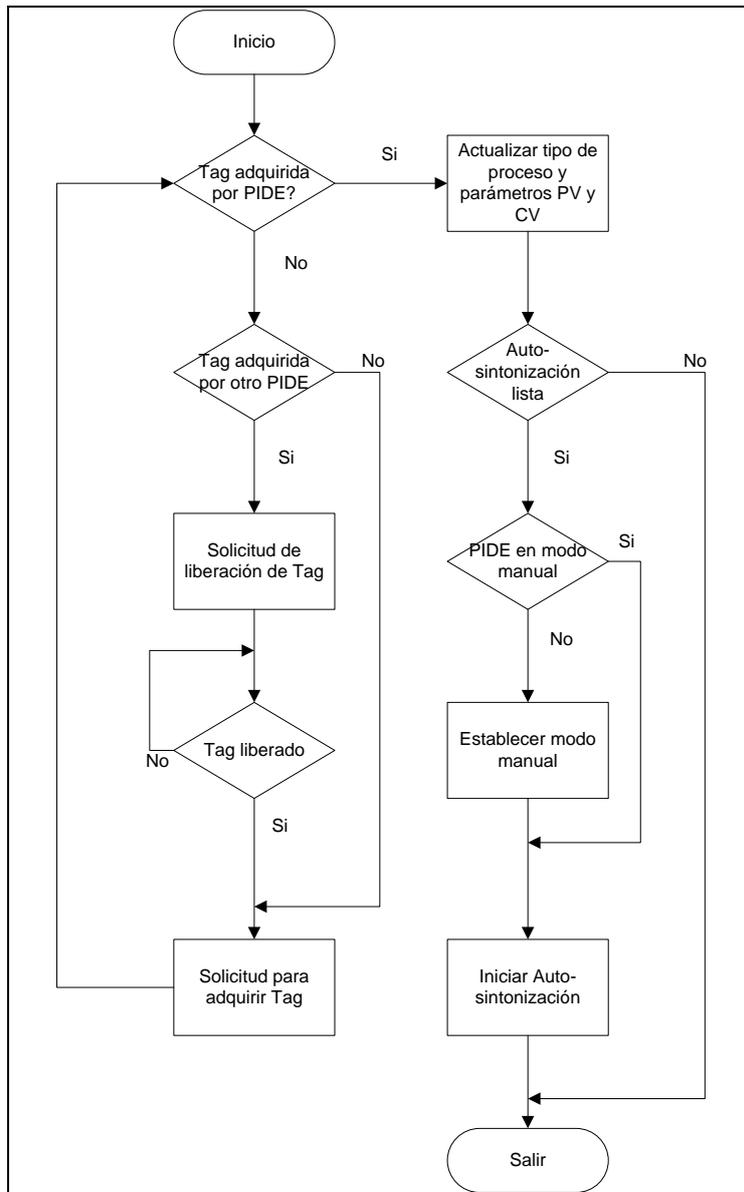


Ilustración 5.40 Diagrama de flujo del programa de auto-sintonización

5.10 Diseño de la interfaz gráfica

En esta sección encontrará una explicación breve de las interfaces gráficas programadas en la pantalla táctil PanelView Plus 1000. Las figuras utilizadas para los desplegados fueron desarrolladas en un software especializado para dibujo llamado "Google SketchUp, algunas de sus características utilizadas en el diseño de los desplegados fueron: dibujo de figuras por capas, vistas en tercera dimensión, cambiar texturas de superficies, cambiar color de superficies y diferentes orientaciones de las figuras.

5.10.1 Pantalla de inicio

La pantalla de inicio o entrada al sistema de control permite el ingreso con contraseña para el ambiente de operador y administrador. El ambiente de operador está limitado, no permite el ingreso a las pantallas de configuración del control PID. En la ilustración 5.41 se muestra la pantalla de inicio.



Ilustración 5.41 Pantalla de inicio al sistema de control

5.10.2 Pantalla de Vista del horno

La principal función de la pantalla de vista del horno es monitorear rápidamente el estado del horno, como el estado de sus componentes y las temperaturas en cada paso. También permite ingresar la temperatura de enfriamiento del horno, utilizada para las secuencias de encendido y apagado automático. En la ilustración 5.42 se muestra la pantalla de vista del horno.

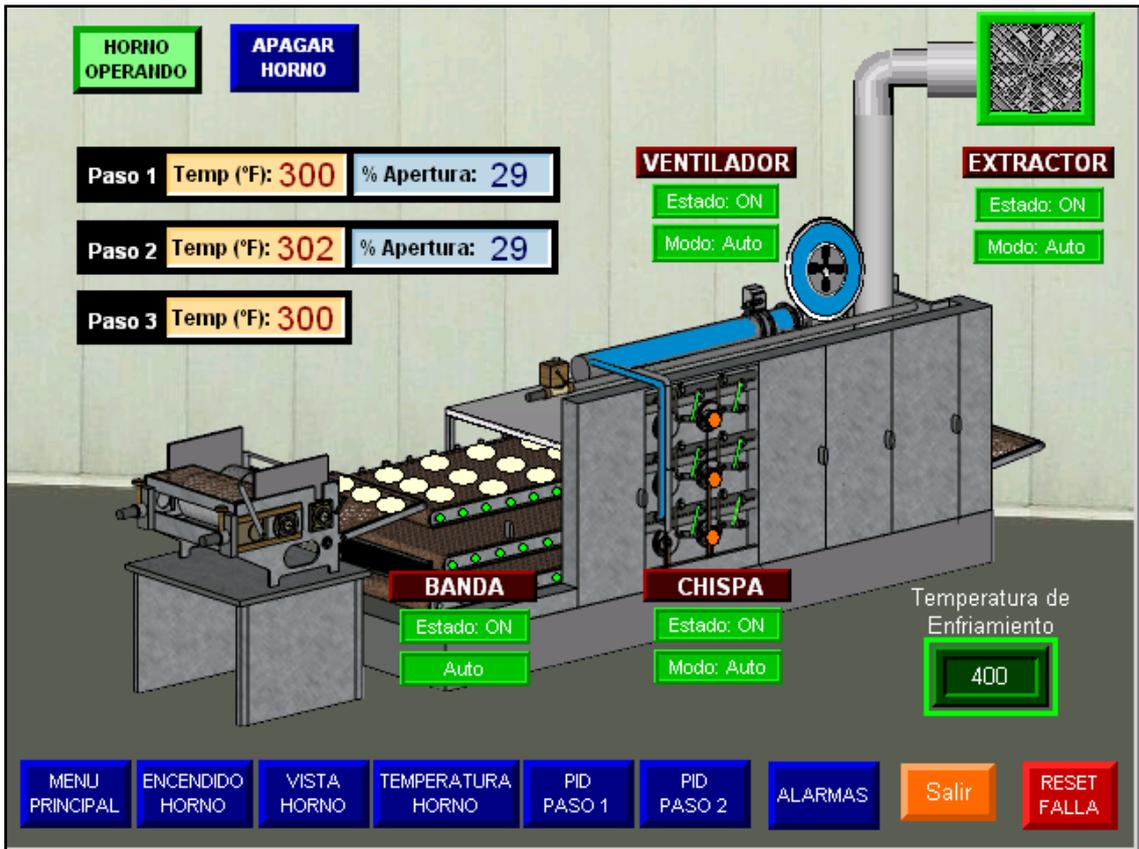


Ilustración 5.42 Pantalla de vista del horno

5.10.3 Pantalla de arranque del horno

La pantalla de arranque del horno permite el encendido y apagado del horno mediante el modo manual y modo automático. En el modo manual el operador va encendiendo cada componente del sistema paso a paso, en el modo automático se produce una secuencia de encendido o apagado programa en el PLC con intervalos de tiempo entre cada componente. En la ilustración 5.43 se muestra la pantalla de arranque del horno.



Ilustración 5.43 Pantalla de arranque del horno

5.10.4 Pantalla de control de temperatura

La pantalla de control de temperatura permite al operador establecer los valores de temperatura que desea para cada paso del horno por medio del modo automático. El modo manual permite al operador alterar directamente el porcentaje de apertura de la válvula, sin control de temperatura.

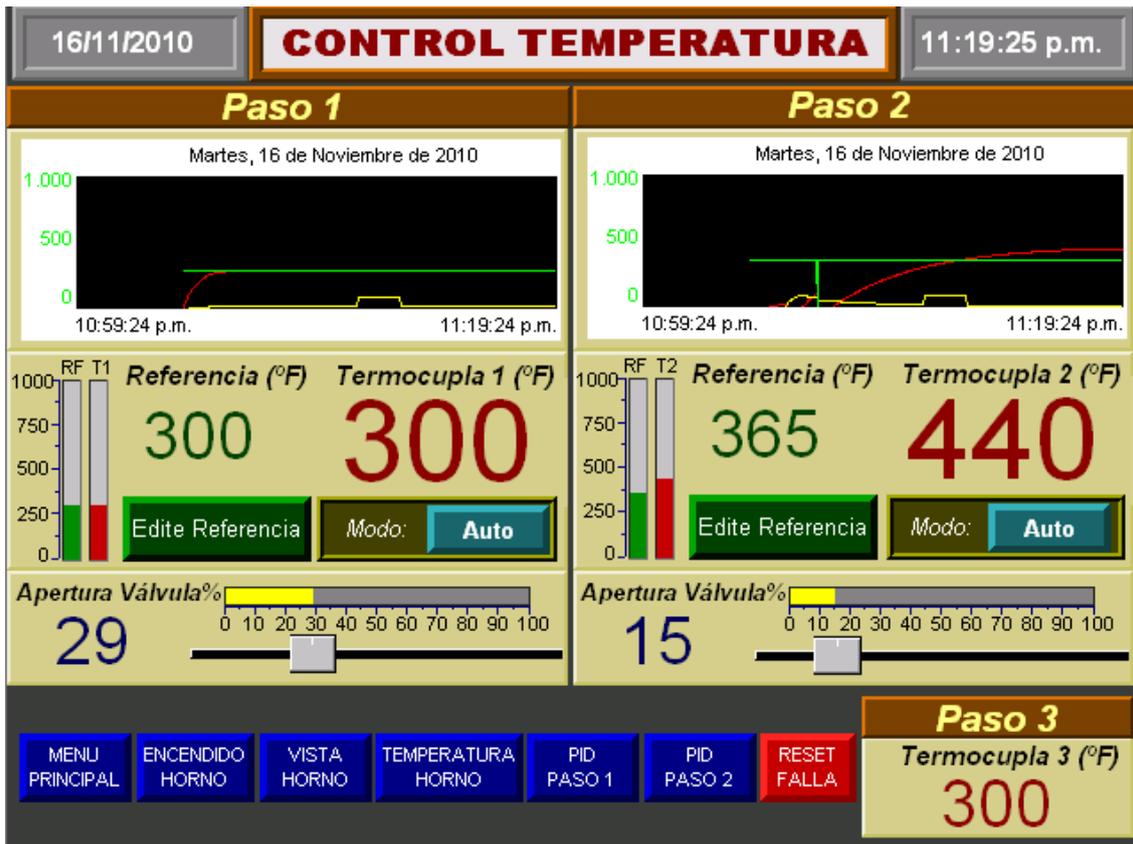


Ilustración 5.44 Pantalla de control de temperatura

5.10.5 Pantalla de control de PID

Esta pantalla permite cambiar los valores de las ganancias proporcional, integral y derivativa del regulador PID. También permite la auto-sintonización de dichas ganancias. En la ilustración 5.45 se muestra la pantalla de control del PID.

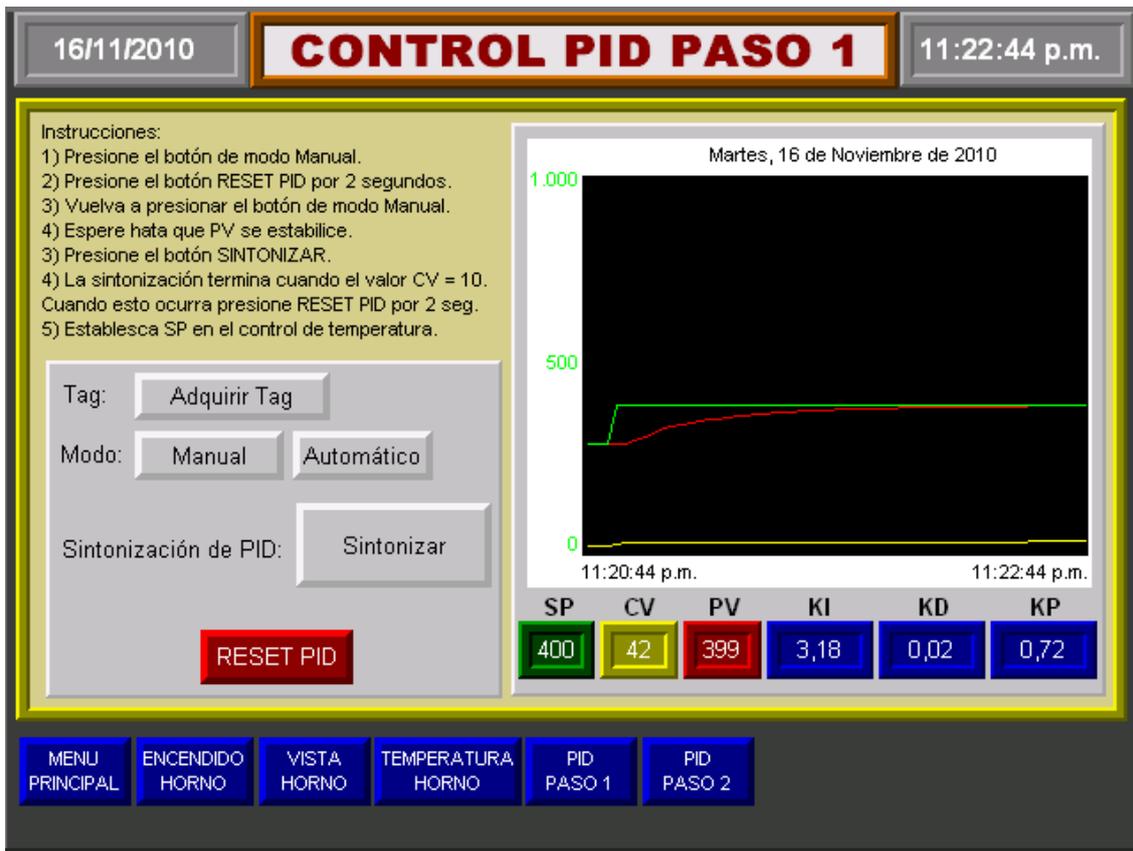


Ilustración 5.45 Pantalla de control de PID

5.10.6 Pantalla Variadores

Mediante la pantalla de variadores de frecuencia el operario establece la velocidad de los motores de la banda, del enfriador, de la cortadora, del Katrón y del dosificador. El rango de la velocidad establecida se encuentra entre los 0 y 60 Hz. En la ilustración 5.46 se muestra la pantalla de los variadores.



Ilustración 5.46 Pantalla variadores

5.10.7 Pantalla de alarmas

Esta pantalla tiene la función de desplegar las alarmas que se pueden generar tanto en el encendido del horno como en el proceso de control de temperatura. Entre las alarmas se encuentran:

- Fallo de banda
- Fallo de ventilador de aire
- Fallo de extractor de gases
- Fallo de chispa
- Sobre temperatura

La pantalla de alarmas despliega la hora y fecha en que se produjo la alarma, la hora y fecha en que se reconoció la alarma y un mensaje indicando que da una descripción del equipo que fallado. También permite el reconocimiento de alarmas y el restablecimiento del sistema. En la ilustración 5.47 se muestra la pantalla de alarmas.



Ilustración 5.47 Pantalla de variadores

5.10.8 Pantallas de mensajes de alerta

Las pantallas de mensajes se despliegan cuando ocurren los siguientes eventos:

- Cuando se detecta una temperatura del horno mayor a los 426,67 °C (800 F).
- Cuando se enciende el transformador de los electrodos para la chispa.

Estas pantallas de mensajes ayudan al operador a actuar correctamente ante estos eventos.



Ilustración 5.48 Pantalla de mensajes

5.11 Simulación

5.11.1 Simulación de rutinas de arranque

Se realizaron simulaciones de las rutinas de secuencia encendido y apagado de los equipos que integran el horno y del controlador PID.

Por medio de los indicadores de encendido de cada módulo de salidas digitales se logró simular las secuencias de encendido y apagado, y se verificaron los

intervalos de tiempo programados en estas secuencias. También se simularon fallas para verificar que se mostraran en pantalla mensajes de alerta indicando la falla producida y el apagado del horno ante una falla.

5.11.2 Simulación del controlador PID

Una vez obtenido el controlador PIDE y configurado correctamente en el PLC, se procedió a la simulación del proceso para ello se utilizó una instrucción de bloque LDLD que utiliza la ecuación 5.32, cuyas variables son adelanto “Lead” y atraso “Lag”.

$$H(s) = K \left(\frac{1+Lead*s}{1+Lag*s} \right) \quad (5.29)$$

Para simular el modelo se establece la variable Lead igual cero y se obtiene:

$$H(s) = K \left(\frac{1}{1+Lag*s} \right) \quad (5.30)$$

Luego se busca la forma del modelo:

$$H(s) = \frac{K}{Lag} \left(\frac{1}{1/Lag+s} \right) \quad (5.31)$$

$$\frac{1}{Lag} = 0,001376 \quad Lag = 726 \quad (5.32)$$

$$\frac{K}{Lag} = 0,03854 \quad K = 16,5 \quad (5.33)$$

La ecuación de la función LDLG que simularía el modelo de la planta sería:

$$H(s) = 16,5 \left(\frac{1}{1+726*s} \right) \quad (5.34)$$

A continuación se muestra el bloque controlador PIDE conectado al bloque LDLG que simula la planta:

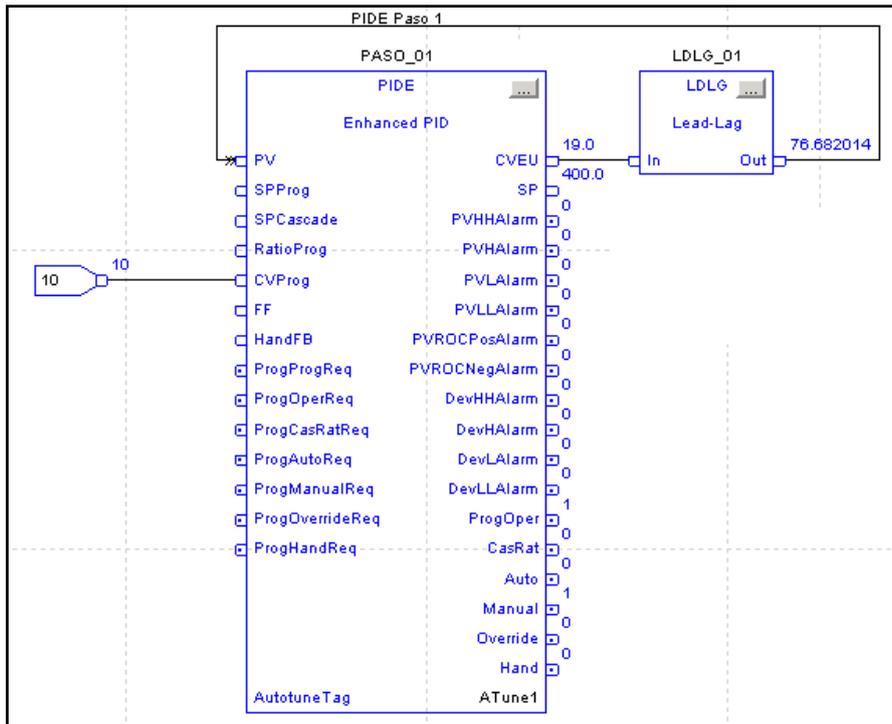


Ilustración 5.49 Simulación del sistema mediante instrucción LDLG

La respuesta obtenida de la simulación se visualizó en la pantalla táctil. La figura 5.50 muestra la respuesta.

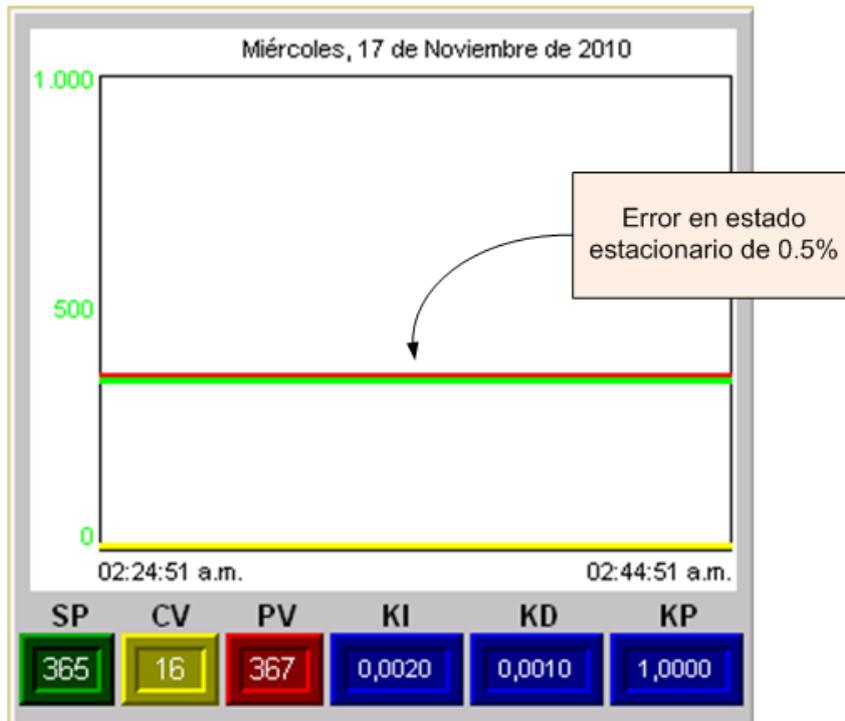


Ilustración 5.50 Respuesta del proceso simulado

5.12 Montaje del equipo

Para el montaje de los equipos se utilizaron canaletas que se colocarán dentro de gabinetes. Entre los equipos que se conectaron en estas canaletas fueron: el PLC y sus módulos de entrada y salida, la fuente de poder del PLC, los variadores de frecuencia y el switch. El resto de dispositivos que se utilizaron como protecciones y terminales de entrada y salida de cableado fueron: borneras, guarda motores, contactores, protecciones térmicas y disyuntores.

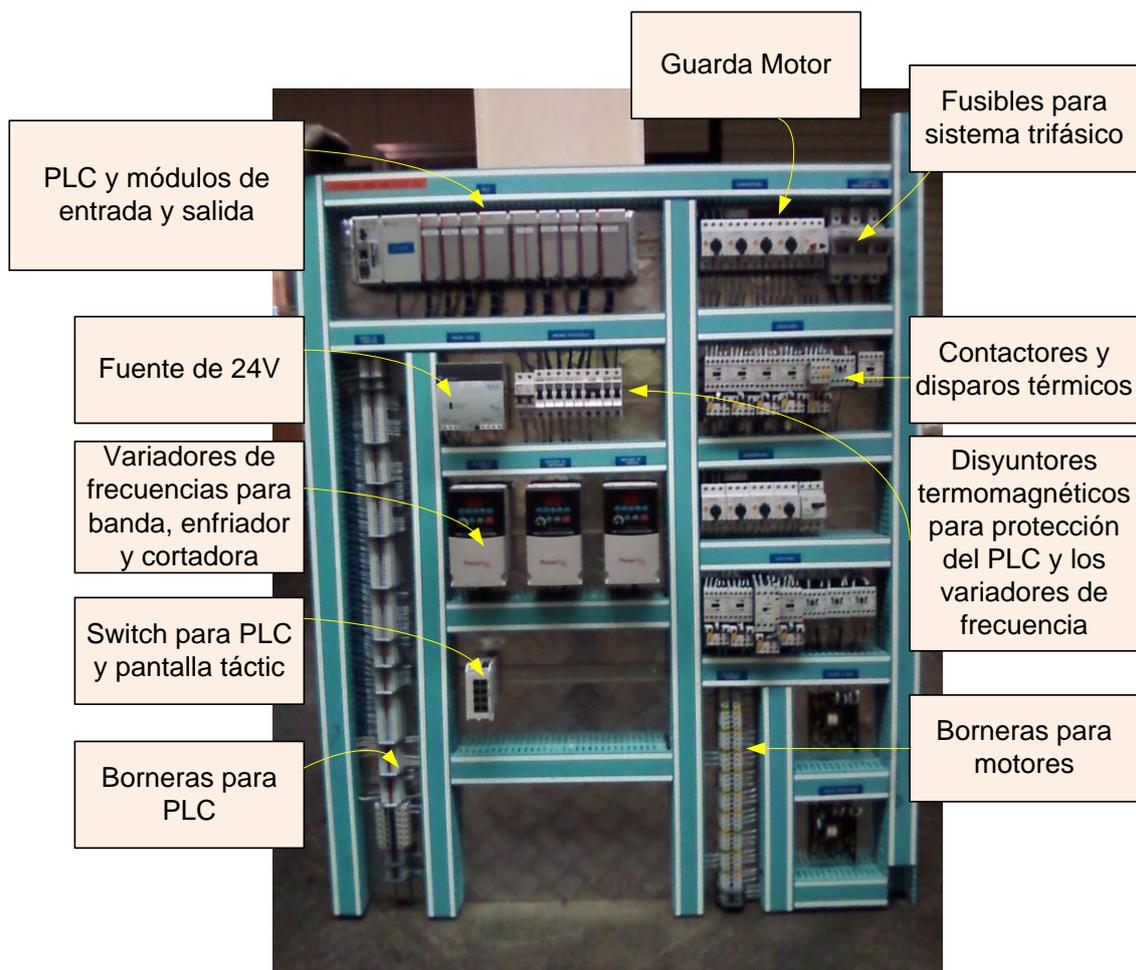


Ilustración 5.51 Montaje del equipo en canaletas

La función de los disyuntores magnéticos es dar protección contra altas corrientes al PLC y a los variadores de frecuencia. Dentro de los dispositivos que protegen los motores son los guarda motores que protegen de corto circuito, los contactores que envían la señal de realimentación al PLC para indicar que equipo ha entrado en línea o ha fallado y las protecciones térmicas.

Capítulo 6: Resultados experimentales y análisis

En este capítulo encontrará los resultados de la solución implementada y un análisis de los mismos. Parte de la solución no se pudo implementar por factores ajenos a mi persona, entre ellos, atrasos en la compra y entrega de equipos por parte de los proveedores y alta demanda de la producción, no permitiendo el paro de la línea para el montaje y la conexión de los dispositivos de campo.

6.1 Resultados experimentales

En esta sección encontrará los resultados experimentales obtenidos después de la implementación de la solución.

6.1.1 Resultados de emisiones de gases

Por medio de la medición del aire y gas utilizado para la combustión, se calibró la entrada de LPG al horno por medio del regulador de entrada y se logró una aproximación a la relación adecuada de aire y LPG. La relación de aire-LPG que se suministra en cada paso del horno es la siguiente.

$$\text{aire}/\text{LPG} = \frac{197,64\text{Kg}_{\text{aire}}}{11,6\text{Kg}_{\text{LPG}}} = 17,04 \quad (6.1)$$

Esta aproximación a la relación ideal de 17,05 produce una disminución de las emisiones contaminantes. Con el fin de obtener el resultado de las emisiones contaminantes se procedió a contratar a Laboratorios Lambda especialistas en este tipo de mediciones. En la tabla 6.1 se muestra el resultado promedio de estas mediciones.

Tabla 6.1 Medición de emisiones de la línea 1 de tortillas

	Resultado Promedio
Partículas suspendidas totales (isocinético)	67 ± 2 mg/Nm ³
SO ₂	< 3 mg/Nm ³
NO _x	< 3 mg/Nm ³
CO ₂	2,8 ± 0.1 %

6.1.2 Resultados experimentales de la secuencia de encendido y apagado.

Las secuencias de encendido y apagado del horno programadas en el PLC controlan los módulos de salidas digitales para relés. Se conectaron los contactores de relé a las salidas de estos módulos y se observó su comportamiento al correr estas secuencias. Estos relés son los encargados de accionar los motores y el transformador del horno. Se observaron las siguientes secuencias.

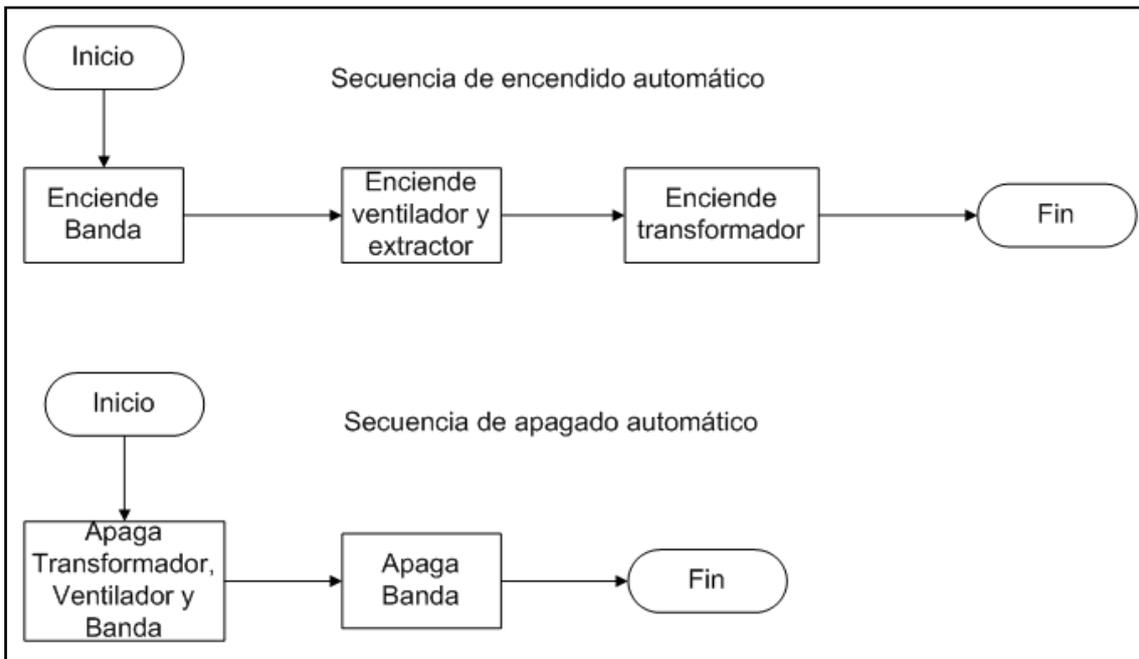


Ilustración 6.1 Secuencia de encendido y apagado de relés

6.1.3 Resultados experimentales de la variación de porcentaje de apertura de la válvula

Mediante la interfaz gráfica para el control de temperatura, se estableció el modo de operación manual. En este modo se puede controlar directamente el porcentaje de apertura de la válvula. Se conectó el actuador al módulo de salidas analógicas del PLC y se hicieron variaciones del porcentaje de apertura de la válvula por medio de la interfaz gráfica. Se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 6.2 Porcentaje de apertura establecido y posición angular del actuador

Porcentaje de apertura establecido en HMI	Posición experimental del actuador	Posición esperada del actuador	Porcentaje de error
10%	9,1°	9°	1,1%
20%	18,3°	18°	1,64%
30%	27,2°	27°	0,74%
40%	36,3°	36°	0,82%
50%	45,1°	45°	0,22%
60%	54,1°	54°	0,18%
70%	63,1°	63°	0,15%
80%	72,2°	72°	0,27%
90%	81,2°	81°	0,24%
100%	90,1°	90°	0,11%

6.2 Análisis de resultados

6.2.1 Análisis de las emisiones de gas

Al comparar la relación de aire-LPG que se midió experimentalmente en el horno con la relación teórica que se calculó para una combustión eficiente, tiene una aproximación del 99.24% y que se encuentra dentro del rango del $\pm 5\%$ permisible.

$$\text{aire/LPG} = 17,05 \pm 5\% \frac{\text{Kg aire}}{\text{Kg LPG}} \quad (\text{Relación Teórica}) \quad (6.2)$$

$$\text{aire/LPG} = \frac{197,64 \text{Kg aire}}{11,5 \text{Kg LPG}} = 17,18 \frac{\text{Kg aire}}{\text{Kg LPG}} \quad (\text{Relación Experimental}) \quad (6.3)$$

$$\text{Aproximación} = \frac{17,04}{17,05} * 100\% = 99,94\% \quad (6.4)$$

Debido a la alta aproximación con la relación teórica para la combustión eficiente, se disminuyen las emisiones contaminantes de gases. De acuerdo a las mediciones de las emisiones de gas realizadas en la chimenea de la línea 1 de tortillas, y comparando estos resultados con el decreto número 30222 en cuanto a los niveles de emisiones de gases permisibles, se puede observar en la tabla 6.3 que los índices de emisiones se encuentran por debajo de los

niveles máximos permitidos. De esta manera se concluye que el sistema posee una combustión bastante eficaz.

Tabla 6.3 Comparación de las emisiones de gases del horno de tortillas y el decreto 30222

	Resultado Promedio	Decreto 30222
Partículas suspendidas totales (isocinético)	67 ± 2 mg/Nm ³	250 mg/Nm ³
SO₂	<3 mg/Nm ³	1500 mg/Nm ³
NO_x	<3 mg/Nm ³	515 mg/Nm ³
CO₂	2,8 ± 0.1 %	12 - 13,5 %

6.2.2 Análisis de las secuencias de encendido y apagado

Analizando las secuencias de encendido y apagado automático, se observa que éstas cumplen cabalmente con las sugeridas por los operarios y el manual de operación del horno. Los intervalos de tiempo no se tomaron arbitrariamente, sino que se realizaron mediciones y promedios de tiempo adecuado entre cada operación. Por ejemplo, en el encendido del sistema es necesario que haya un intervalo de tiempo de 60 segundos entre el arranque de la banda y el resto del equipo, este es el tiempo aproximado que dura una tortilla recorriendo los tres pasos del horno, de esta manera, si se va la energía del sistema y se queman o quedan crudas algunas tortillas, al encender nuevamente el sistema, la banda correrá 60 segundos sacando el producto dañado y posteriormente se encenderá el resto de los componentes.

El objetivo de estas secuencias es brindar seguridad al operario. La secuencia de encendido busca la manera de no dar paso al flujo de gas LP hasta que no estén presentes aire y la chispa para evitar una explosión. Igualmente en la secuencia de apagado, se busca apagar primeramente el gas y luego el aire y la chispa para que no haya fugas de gas y explosiones.

También con la secuencia de encendido se busca limpiar las tuberías de los pasos primeramente con aire antes de permitir que se genere la chispa evitando también explosiones por gases que hayan quedado almacenados en la tubería.

Cabe mencionar que durante el encendido de los equipos se utilizó la técnica del enclavamiento la cuál proporciona una mayor seguridad en el accionamiento y capacidad para utilizar pulsadores normalmente abiertos o cerrados que frecuentemente se utilizan en la industria. Esta técnica se muestra en la ilustración 6.2

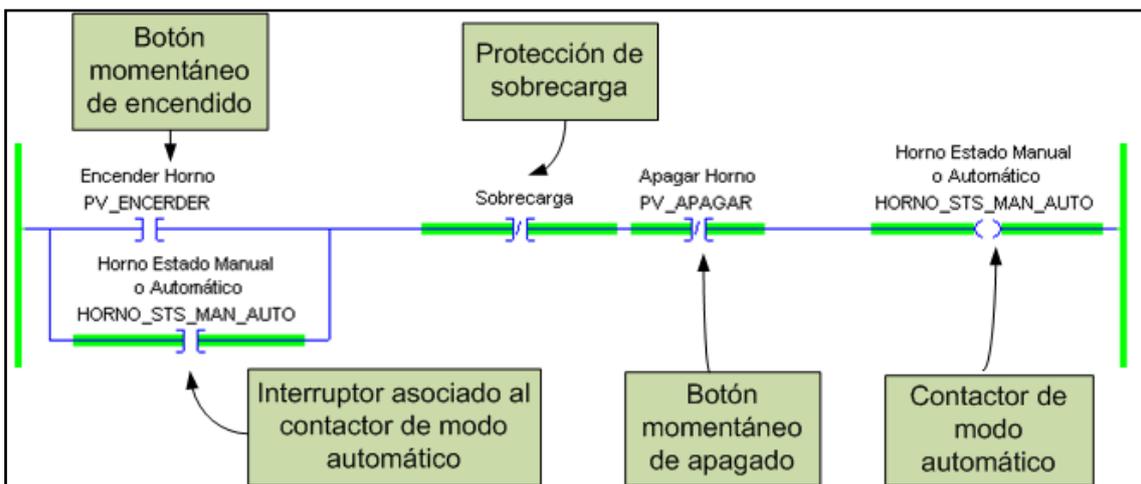


Ilustración 6.2 Principio del enclavamiento para accionar equipos

El botón momentáneo en la pantalla táctil “PV_ENCENDER” enciende el contactor modo automático “HORNO_STS_MAN_AUTO”, existe al interruptor asociado que produce el enclavamiento del contactor. Cuando se presiona el botón de encendido se activará el contactor de modo automático y el interruptor asociado a este, con la condición de que no haya sobrecarga. Si el interruptor de encender horno se abre, siempre permanecerá encendido el contactor de modo automático por la continuidad de corriente que proporciona el interruptor de modo automático.

El contactor de modo automático se apaga cuando se presiona el botón de apagado “PV_APAGAR” o existe una sobrecarga en el sistema. También se apaga cuando se produce un corte de energía eléctrica, protegiendo al sistema para que no arranque una vez que se restablezca la energía eléctrica.

6.2.3 Análisis de la variación del porcentaje de apertura

En la tabla 6.2 se observa que el valor esperado del ángulo de giro del actuador se aproxima al valor obtenido experimentalmente. En los ángulos de menor valor, que corresponden a los porcentajes de apertura de 10% y 20%, se observa que el porcentaje de error es mayor, sin embargo, esta posición angular del actuador no se utiliza normalmente una vez encendido el horno, ya que no corresponden a los porcentajes de apertura que producen las temperaturas de operación del horno. También se observa que a partir del 30% de apertura, el error es relativamente bajo, produciendo un mejor desempeño del sistema en los porcentajes de apertura de operación normal del horno.

Al graficar los datos de la tabla 6.2 se observa que el comportamiento del porcentaje de apertura y la posición angular del actuador es lineal, lo cual facilita el control del actuador. En la ilustración 6.3 se observa esta linealidad.

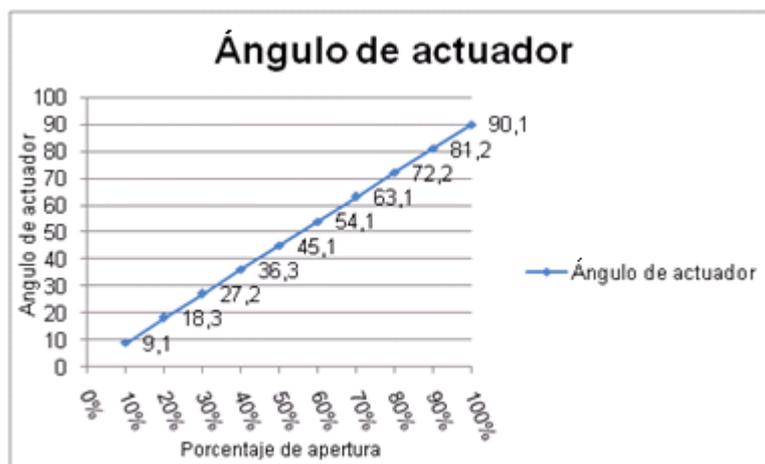


Ilustración 6.3 Linealidad entre el porcentaje de apertura y el ángulo del actuador

Esta linealidad permite una conexión directa del actuador a la válvula tipo mariposa que permite un rango de giro de 0° a 90° y un porcentaje de apertura de 0% al 100% respectivamente. En la ilustración 6.4 se muestra la conexión directa de la válvula al actuador.

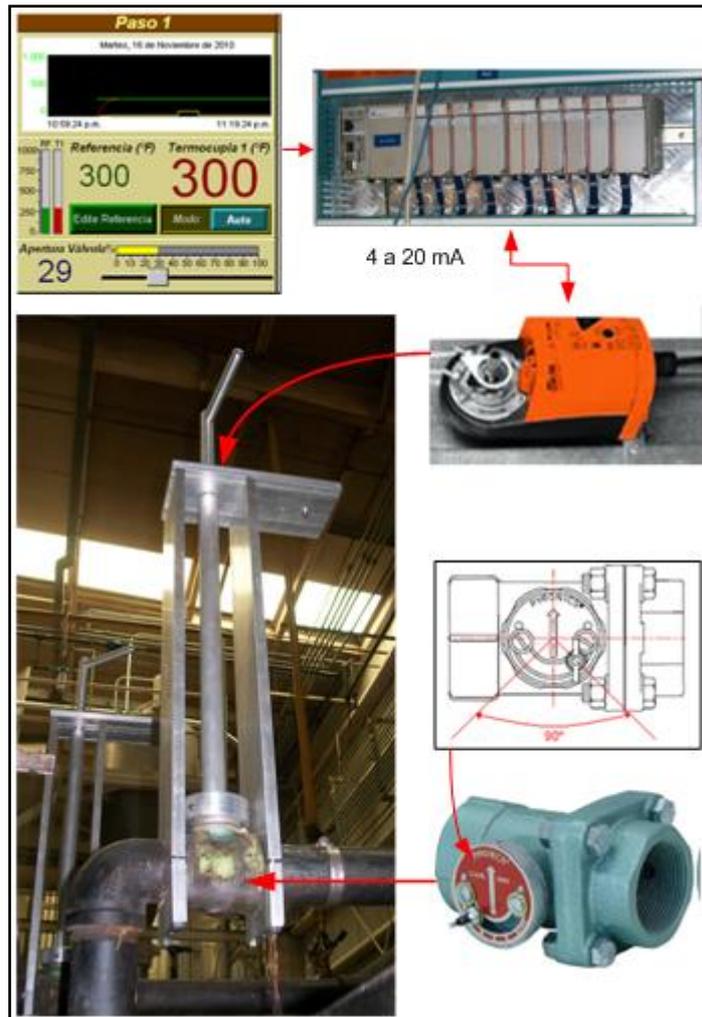


Ilustración 6.4 Conexión de la válvula tipo mariposa al actuador

De esta manera se comprueba que una conexión mecánica directa del eje del actuador al eje de la válvula funciona correctamente y no habría peligro de dañar las válvulas debido a su correspondencia de giro con el actuador.

6.2.4 Análisis de ingeniería económica

Por medio de la calibración del LPG suministrado al horno para lograr una combustión eficiente, se logró disminuir consumo de combustible. El ahorro monetario asociado a esta disminución del consumo de LPG se calcula en el siguiente análisis de ingeniería económica.

Antes de la calibración el horno consumía en promedio $7,8 \text{ m}^3/\text{hr}$ de LPG cuyo flujo másico es el siguiente:

$$\text{Flujo másico}_{LPG} = \frac{7,8 \text{ m}^3}{\text{hr}} * \frac{5,04 \text{ Kg}}{\text{m}^3} = 39,31 \text{ Kg/hr}$$

Multiplicando por el peso específico del LPG, tenemos la cantidad en litros por hora:

$$\text{Litros de LPG consumido} = \frac{39,31 \text{ Kg}}{\text{hr}} * \frac{1 \text{ lt}}{0,54 \text{ Kg}} = 72,80 \text{ lt/hr}$$

Finalmente se calcula el gasto monetario por este consumo de LPG basándose en los precios impuestos por RECOPE publicados en la Gaceta N°223 del 17 de Noviembre del 2010.

$$\text{Costo diario LPG} = \frac{72,8 \text{ lt}}{\text{hr}} * \frac{24 \text{ hr}}{\text{día}} * \frac{257.217}{\text{lt}} = 449,410.00/\text{día}$$

Después de la calibración el horno consumió 6,9 m³/hr, cuyo flujo másico es de 34,78 Kg/hr. Su equivalente en litros por hora es:

$$\text{Litros de LPG consumido (calibrado)} = \frac{34,78 \text{ Kg}}{\text{hr}} * \frac{1 \text{ lt}}{0,54 \text{ Kg}} = 64,41 \text{ lt/hr}$$

El gasto monetario por este consumo calibrado de LPG es el siguiente:

$$\text{Costo diario LPG (calibrado)} = \frac{64,41 \text{ lt}}{\text{hr}} * \frac{24 \text{ hr}}{\text{día}} * \frac{257.217}{\text{lt}} = 397,600.00/\text{día}$$

El ahorro monetario diario y mensual se obtiene comparando el consumo de LPG antes y después de la calibración:

$$\text{Ahorro monetario diario} = \frac{449,410.00}{\text{día}} - \frac{397,600.00}{\text{día}} = 51,810.00/\text{día}$$

$$\begin{aligned} \text{Ahorro monetario mensual} &= \frac{51,810.00}{\text{día}} * \frac{7 \text{ días}}{1 \text{ semana}} * \frac{4,33 \text{ semanas}}{1 \text{ mes}} \\ &= 1,570,361.00 \end{aligned}$$

Se observa que mediante la calibración del LPG suministrado al horno para alcanzar una combustión eficiente, además de que disminuyen las emisiones de gases contaminantes, también disminuye el costo diario de la producción de tortillas en un 11,53% y mensualmente genera un ahorro millonario.

Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

En este capítulo encontrará las conclusiones y recomendaciones del proyecto de automatización del horno.

Conclusiones

- La medición y regulación de las cantidades de aire y gas LP que consume el horno y el establecimiento de la relación adecuada para la combustión eficiente, logró una disminución de los gases contaminantes y del desperdicio de combustible, disminuyendo también el gasto de dinero por el ahorro de combustible.
- La centralización del control y monitoreo del horno realizado mediante el PLC y la pantalla táctil, produjo un sistema de operación del horno más eficiente, preciso y de fácil utilización.
- El control automático de temperatura del horno por medio del regulador PID programado en el PLC, disminuyó el tiempo de estabilización de la temperatura del horno y corrigió el error de estado estacionario.
- La secuencia de encendido y apagado de los dispositivos del horno programada en el PLC y operada mediante la pantalla táctil, permitió un mayor control y monitoreo de cada uno de estos dispositivos.
- El control habilitado por medio de la pantalla táctil, permitió la variación de la velocidad de los motores que conforman el sistema eléctrico y de combustión del horno.
- La facilidad de operación y control visual del proceso proporcionado por la pantalla táctil garantizó la utilización adecuada del sistema de control por parte de los operadores.

- La utilización de actuadores con conexión mecánica a las válvulas tipo mariposa, es la forma más eficiente de bajo costo económico para el control automático y manual del porcentaje de apertura de las válvulas tipo mariposa.
- La calibración del LPG consumido por el horno disminuyó el costo de producción diario de tortilla en un 11,53%, que mensualmente produjo un ahorro millonario.
- La implementación del sistema de control en un gabinete protegió los dispositivos de control condiciones ambientales dañinas como el polvo, la humedad y las altas temperaturas. Además proporciona un acceso fácil para el mantenimiento del equipo.

Recomendaciones

- Para un control más eficiente de la temperatura se recomienda la utilización de medidores de flujo en tiempo real tanto para el aire como para el gas, permitiendo una mayor observabilidad de las variables del sistema.
- Para poder lograr una combustión más eficiente es recomendable controlar tanto la cantidad de aire como del gas tomando como referencia la medición realizada por sensores de oxígeno, con el fin de obtener una relación constante ante variabilidad en la composición del LPG, dosificando una de estas cantidades en función de la otra con mayor precisión.
- Al tratarse de un sistema que utiliza LPG para la combustión, es importante que siempre exista la intervención humana para monitorear y verificar los procesos tanto en las HMI como en el sistema real.

- Realizar una calibración del resto de los hornos y calderas de la planta de producción, para disminuir las emisiones contaminantes, disminuir los costos de producción y optar por el reconocimiento público como una industria amigable con el medio ambiente.

Bibliografía

- [1] Presidente de la República y los Ministros de Salud y del Ambiente y Energía, Costa Rica. **Decreto Ejecutivo N°30222**. [En Línea]
<http://digeca.minae.go.cr/documentos/aire/Decreto%2030222.pdf>
[Consulta: Febrero 2010].
- [2] Fisher Inc. **Principles of Operation**. [En Línea]
<http://www.fishercommercialservice.com/Web/EN/Index.html> [Consulta: Mayo 2010].
- [3] Allen Bradley Company Inc. **Controlador CompactLogix™ 1769-L32E, -L35E** [En Línea].
<http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/1769-L32-es-p.pdf> [Consulta: Marzo 2010].
- [4] National Instruments Inc. **Comunicaciones Serial: Conceptos generales** [En Línea] <http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/> [Consulta: Abril 2010]
- [5] Sharam Hekmat. **Communication Networks**. [En Línea]
<http://www.pragsoft.com/books/CommNetwork.pdf> [Consulta: Abril 2010]
- [6] Carrier Corporation Syracuse, **Variable Frequency Drive**. [En Línea]
http://www.xpedio.carrier.com/idc/groups/public/documents/marketing/wp_varfreqdrive.pdf [Consulta: julio 2009]
- [7] Proton. **¿Qué son y cómo funcionan las termocuplas?** [En Línea]
http://proton.ucting.udg.mx/dpto/maestros/mateos/clase/Modulo_03/termocuplas.pdf [Consulta: Febrero 2010]
- [8] Jesús Estrada Díaz, **Optimización del proceso de cocción en hornos para cerámica** [En Línea]
http://octi.guanajuato.gob.mx/octigtto/formularios/ideasConcyteg/Archivos/13102006_OPTIMIZACION_PROCESO_COCCION_HORNOS_CERAMICA.pdf [Consulta Marzo 2010]

- [9] Bruce E. Poling, John M. Prausnitz, John P. O'Connell, **The properties of gases and liquids**, 5 Edición. McGraw-Hill, 2004.
- [10] Ramón Villalobos Scovino, La sonda lambda o sensor de oxígeno, [En Línea] <http://www.automotriz.net/tecnica/sensor-de-oxigeno.html> [Consulta: marzo 2010].
- [11] Dresser Measurement Inc, **ROOTS Meter Series B3 Featuring Life-Lubed Accessory Units**, 2001 (formato pdf).
- [12] Eduardo Interiano, **Controlando un sistema térmico**, [En Línea] <http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control/clase/> [Consulta: abril 2010]
- [13] Allen Bradley Company Inc. **FactoryTalk® View Machine Edition y PanelView™ Plus** [En Línea]. <http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/ftalk-pp012-es-p.pdf> [Consulta: Mayo 2010].
- [14] Allen Bradley Company Inc. **RSLogix 5000 General Instruction Set** [En Línea]. <http://www.rockwellautomation.com/rockwellsoftware/design/rslogix5000/> [Consulta: Mayo 2010]
- [15] Allen Bradley Company Inc. **PowerFlex 4 adjustable frequency AC drive**, Agosto 2008. (formato pdf).

Apéndices

A.1. Abreviaturas

- **PLC:** Controlador Lógico Programable.
- **HMI:** Interfaz Hombre – Máquina.
- **PV:** Variable del proceso.
- **CV:** Variable de control.
- **KI:** Ganancia Integral
- **KP:** Ganancia Proporcional.
- **KD:** Ganancia Derivativa.
- **PID:** Regulador Proporcional, Integral y derivativo

A.2. Glosario

- **Constantán:** Es una aleación, generalmente formada por un 55% de cobre y un 45% de níquel ($\text{Cu}_{55}\text{Ni}_{45}$). Se caracteriza por tener una resistencia eléctrica constante en un amplio rango de temperaturas
- **Relé:** Es un dispositivo electromecánico que funciona como un interruptor controlado por un circuito eléctrico en el que, por medio de una bobina y un electroimán, se acciona un juego de uno o varios contactos que permiten abrir o cerrar otros circuitos eléctricos independientes.
- **Electrodo:** Es una placa de membrana rugosa de metal, un conductor utilizado para hacer contacto con una parte *no metálica* de un circuito, por ejemplo un semiconductor, un electrolito, el vacío (en una válvula termoiónica), un gas (en una lámpara de neón), etc.
- **Presión absoluta:** Es la presión atmosférica más la presión manométrica (presión que se mide con el manómetro).
- **Baudio:** Es una unidad de medida, usada en telecomunicaciones, que representa el número de símbolos transmitidos por segundo en una red analógica.

- **Bit:** Es el acrónimo de Binary digit. (dígito binario). Un bit es un dígito del sistema de numeración binario. Un bit o dígito binario se representa mediante uno dos valores, 0 ó 1.
- **Memoria flash:** Es una manera desarrollada de la memoria EEPROM que permite que múltiples posiciones de memoria sean escritas o borradas en una misma operación de programación mediante impulsos eléctricos.
- **Set Point:** Es un valor que se utiliza como referencia para controlar una variable, el objetivo es que la variable controlada alcance este valor de Set Point después de cierto tiempo.
- **Máscara de red:** Es una combinación de bits que sirve para delimitar el ámbito de una red de computadoras.
- **Estequiometría:** Es el cálculo de las relaciones cuantitativas entre reactantes y productos en el transcurso de una reacción química
- **Lead:** Término utilizado en control automático para designar a un controlador en adelanto.
- **Lag:** Término utilizado en control automático para designar a un controlador en atraso.
- **Katrón:** Es un motor de CD llamado así por su marca, que gira un tornillo sin fin para dosificar la harina en el mezclador.
- **Dosificador:** Es un motor de CD que gira un tornillo sin fin para dosificar la sal en la harina.

A.3. Manual de operador

► Ingreso al sistema de control y monitoreo

1. Presione el botón

Login

2. Introduzca el nombre de usuario y contraseña.

3. Seleccione el tipo de proceso que desea controlar y monitorear



4. Si desea salir de la cuenta presione el botón

Logout

► **Manejo de la pantalla de Vista del horno**

1. Establezca la temperatura de enfriamiento del horno.

Enfriar **NNN°F**

El horno debe tener una temperatura menor a la establecida para poder apagarse.

2. Al presionar el botón de

ENCENDER HORNO

el horno se encenderá de manera automática.

El botón cambiará

HORNO OPERANDO

indicando que el horno está operando.

3. Esta pantalla permite monitorear el estado de la banda, del ventilador, del extractor, de la chispa y del enfriador. Los tres estados que se muestran son:

Estado: ON

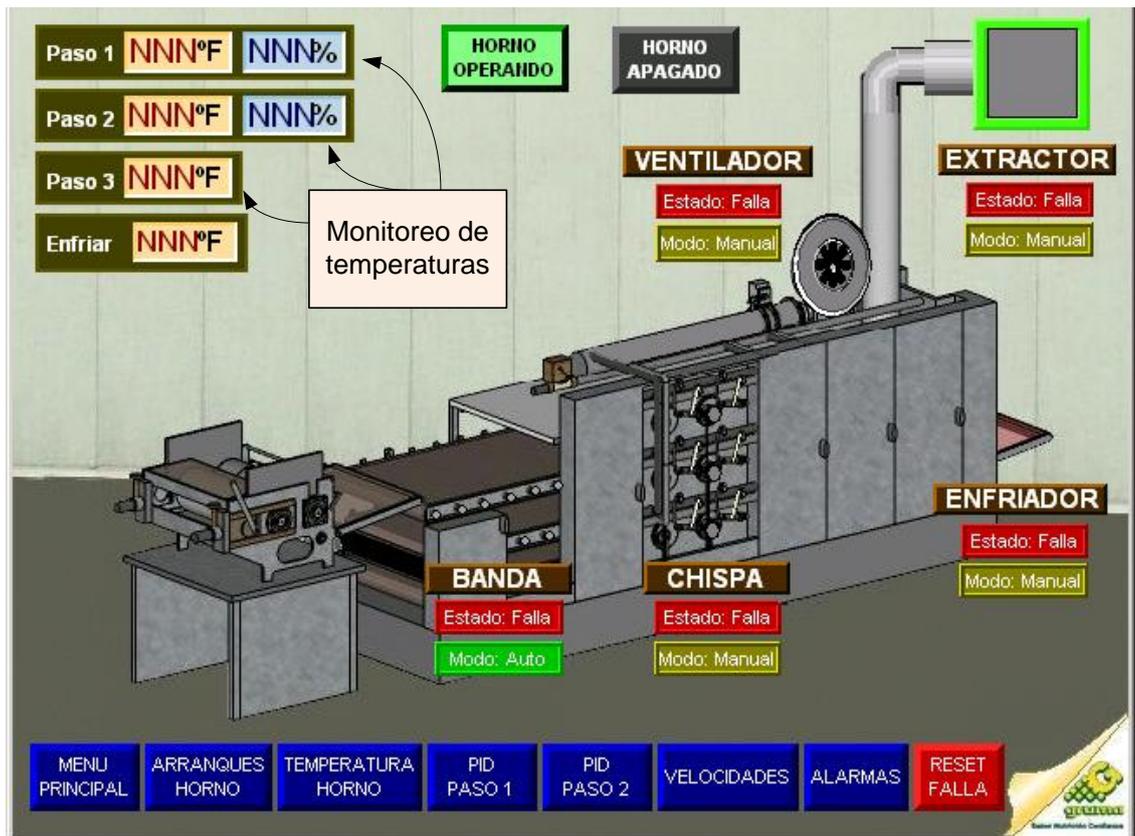
Estado: OFF

Estado: Falla

También permite monitorear el modo de operación de estos equipos:

Modo: Manual

Modo: Auto



4. Puede monitorear la temperatura de cada paso.

5. Los botones en la parte inferior de la pantalla permiten la navegación del operador por las diferentes pantalla.

El botón

RESET FALLA

se utiliza para re-establecer el equipo cuando se produce una falla.

6. Apague el horno presionando el botón

APAGAR HORNO

Este botón cambiará a

HORNO APAGADO

indicando que el horno está apagado

► **Manejo de la pantalla de Arranques Horno**

1. Para cada dispositivo existe un botón de modo de operación ubicado bajo la columna de EJECUCIÓN, que permite establecer el modo de operación de ellos.

AUTO

MANUAL

2. Para encender el horno en modo automático establezca todos sus dispositivos en modo auto, lo cual se indica la bajo la columna MODO de la siguiente manera **AUTO**

y presione el botón de encender horno

ENCENDER HORNO

EQUIPO	ESTADO	MODO	EJECUCIÓN
MOTOR DE BANDA	ANDANDO	MANUAL	AUTO ERROR
MOTOR DE ENFRIADOR	ANDANDO	MANUAL	AUTO ERROR
VENTILADOR DE AIRE	FALLA	MANUAL	AUTO ERROR
EXTRACTOR DE GASES	ERROR	AUTO	MANUAL ERROR
TRANSFORMADOR CHISPA	PARADO	AUTO	MANUAL ERROR

ARRANQUE AUTOMÁTICO DE TODO EL EQUIPO **ENCENDER HORNO**

PARO AUTOMÁTICO DE TODO EL EQUIPO **HORNO APAGADO**

MENU PRINCIPAL VISTA HORNO TEMPERATURA HORNO PID PASO 1 PID PASO 2 VELOCIDADES ALARMAS RESET FALLA **Salir**

ESTADO: **ANDANDO** Indica que el dispositivo está funcionando y andando.

PARADO Indica que el dispositivo está parado.

FALLA Indica que se ha producido una falla en el equipo.

ERROR Indica que hay un error de software

4. Para encender los dispositivos de manera manual, establezca su modo en

MANUAL

y presione el botón

ARRANCAR

5. Para apagar los equipos de manera manual, verifique que se encuentre en modo

MANUAL

y presione el botón

PARAR

► Manejo de la pantalla de Temperatura Horno

1. Para controlar la temperatura de manera automática, establezca el modo de

operación en Auto

Modo: **Auto**

. Luego presione el botón

Edite Referencia

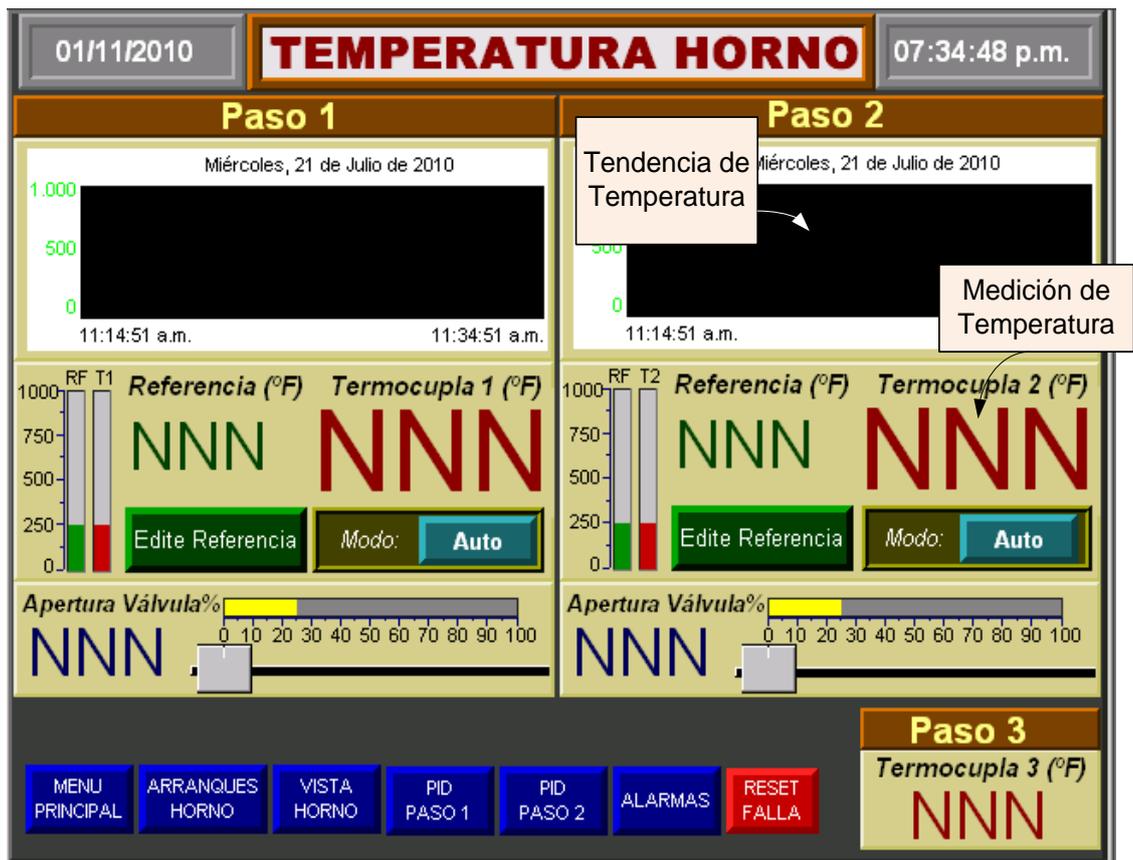
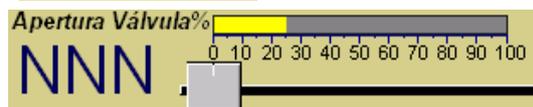
para establecer el valor de referencia.

2 Para manipular el porcentaje de apertura de la válvula, establezca el modo de

operación en Manual

Modo: **Manual**

. Luego varíe la barra deslizadora:



El paso 3 del horno solamente se puede monitorear.

► **Manejo de la pantalla Control PID Paso 1 y 2**

1. Antes de realizar la sintonización establezca el porcentaje de apertura de la válvula, es decir, el valor de CV en un 10%. Permita que el sistema se establezca en ese valor. Luego proceda a seguir las instrucciones contenidas en la pantalla

01/11/2010 **CONTROL PID PASO 1** 08:22:52 p.m.

Instrucciones:
1) Establezca Adquirir Tag.
2) Presione el botón RESET PID por 2 segundos.
3) Presione el botón de modo manual.
4) Presione el botón SINTONIZAR y espere.
5) La sintonización termina cuando el valor CV = 10.
Cuando esto ocurra presione RESET PID por 2 seg.
6) Establezca SP en el control de temperatura.

Tag: Adquirir Tag
Modo: Manual Automático
Sintonización de PID: Sintonizando...
RESET PID

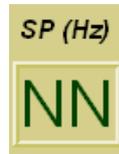
Jueves, 15 de Julio de 2010
04:02:35 p.m. 04:04:35 p.m.

SP	CV	PV	KI	KD	KP
NNN	NNN	NNN	NN,NN	NN,NN	NN,NN

MENU PRINCIPAL ARRANQUES HORNO VISTA HORNO TEMPERATURA HORNO PID PASO 2 ALARMAS RESET FALLA Valor de las ganancias

► **Manejo de la pantalla Velocidades**

1. Para establecer el valor de la velocidad de los motores debe de dar clic sobre el display numérico del setpoint



A screenshot of a control panel titled 'VELOCIDADES'. At the top left is the date '01/11/2010' and at the top right is the time '08:27:28 p.m.'. The main area contains five motor speed displays: 'BANDA', 'ENFRAIDOR', 'CORTADORA', 'DOSIFICADOR', and 'KATRÓN'. Each display shows 'SP (Hz)' and 'PV (Hz)' values, both currently set to 'NN'. A callout box with an arrow pointing to the 'PV (Hz)' display of the 'CORTADORA' motor contains the text 'Medición de la velocidad del motor'. At the bottom, there are five buttons: 'MENU PRINCIPAL', 'VISTA HORNO', 'ARRANQUES HORNO', 'ALARMAS', and 'RESET FALLA'. A logo is visible in the bottom right corner.

► **Manejo de la pantalla de Alarmas**

1. Primero debe de reconocer la alarma presionando el botón



2. Luego debe de restablecer el dispositivo que ha fallado, para ello

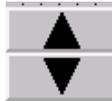
oprima el botón



3. Si desea borrar las alarmas reconocidas puede hacerlo presionando el botón



4. Por medio de las flechas  puede desplazarse hasta arriba o abajo

de la lista, para desplazamientos de un paso utilice las flechas 

A.4. Planos de conexión de módulos del PLC

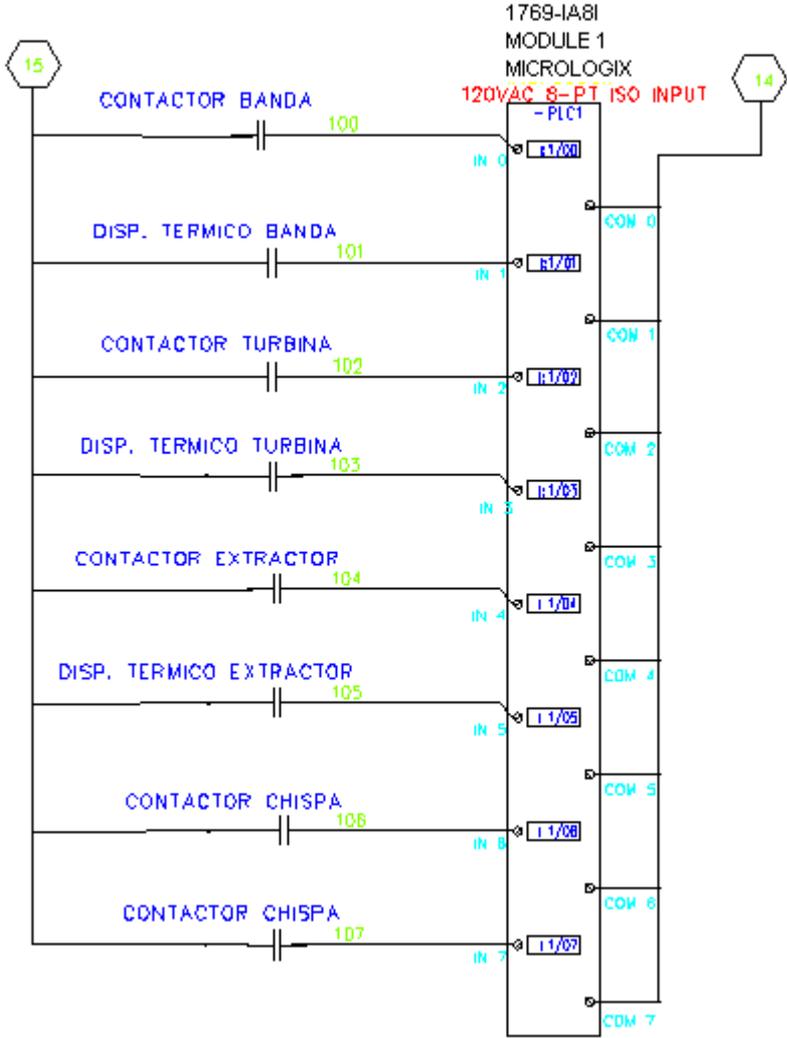


Ilustración A. 1 Conexión de módulo 1, 1769-IA8I entradas discretas

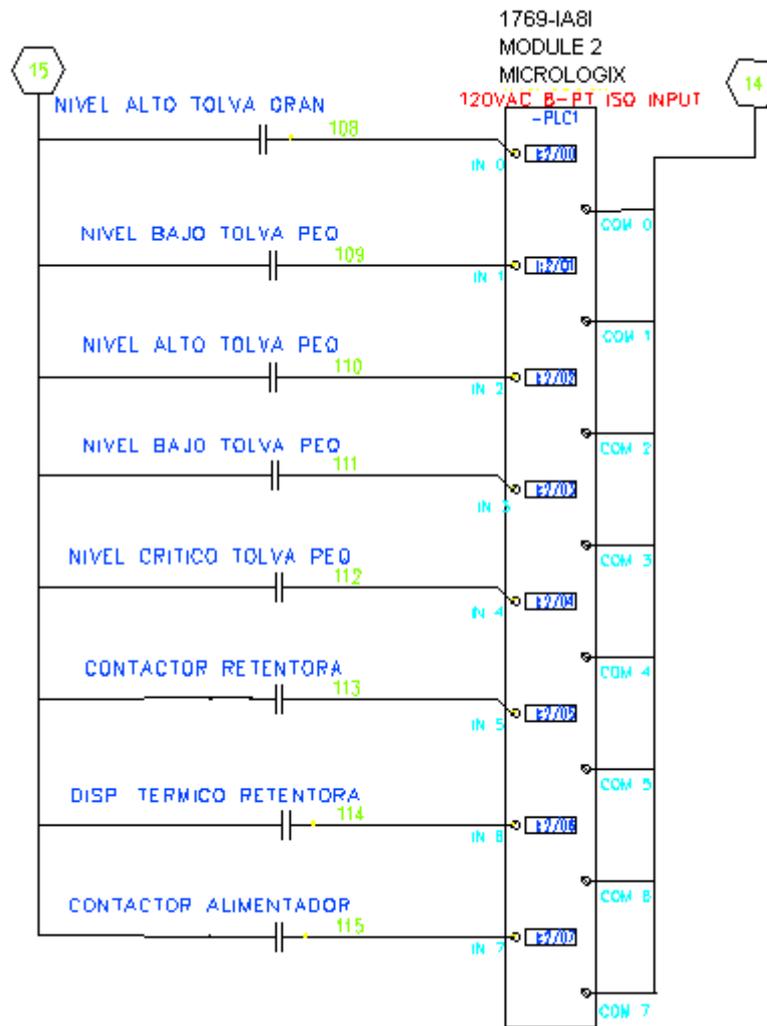


Ilustración A. 2 Conexión de módulo 2, 1769-IA8I entradas discretas

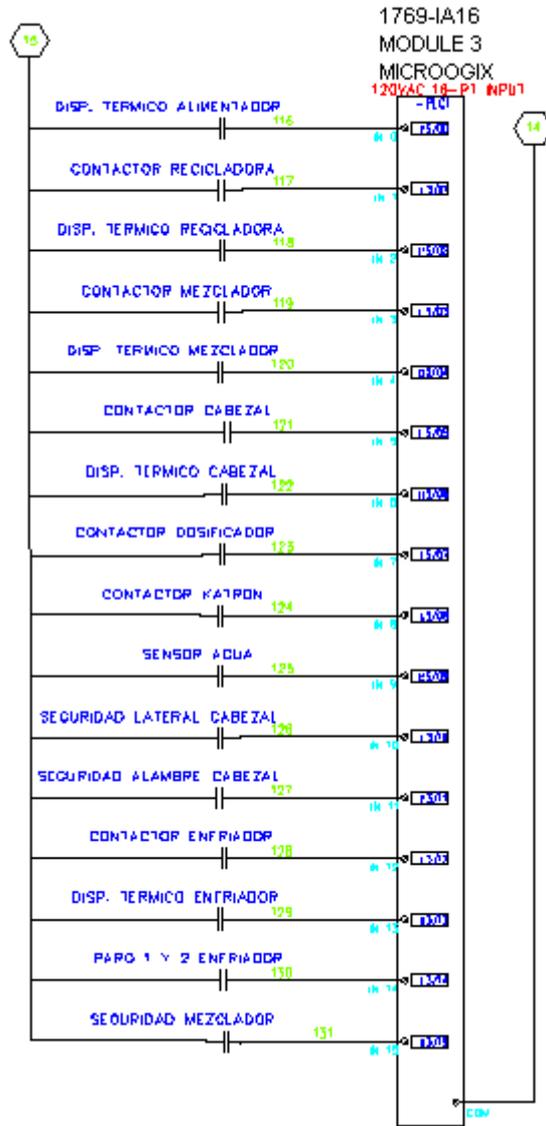


Ilustración A. 3 Conexión de módulo 3, 1769-IA16 entradas discretas

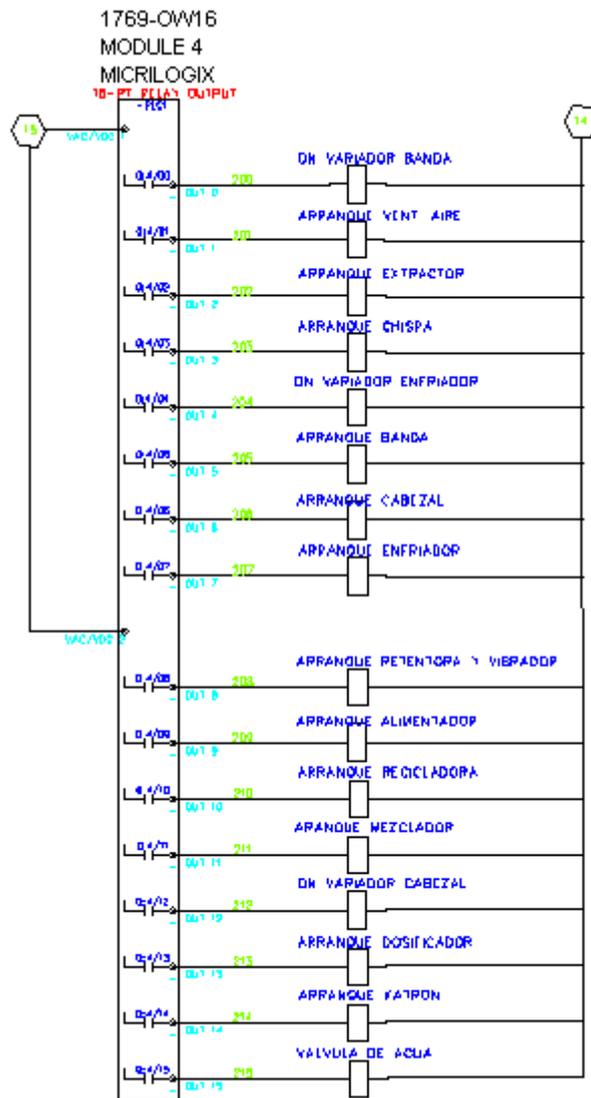


Ilustración A. 4 Conexión de módulo4, 1769-OW16 salidas discretas

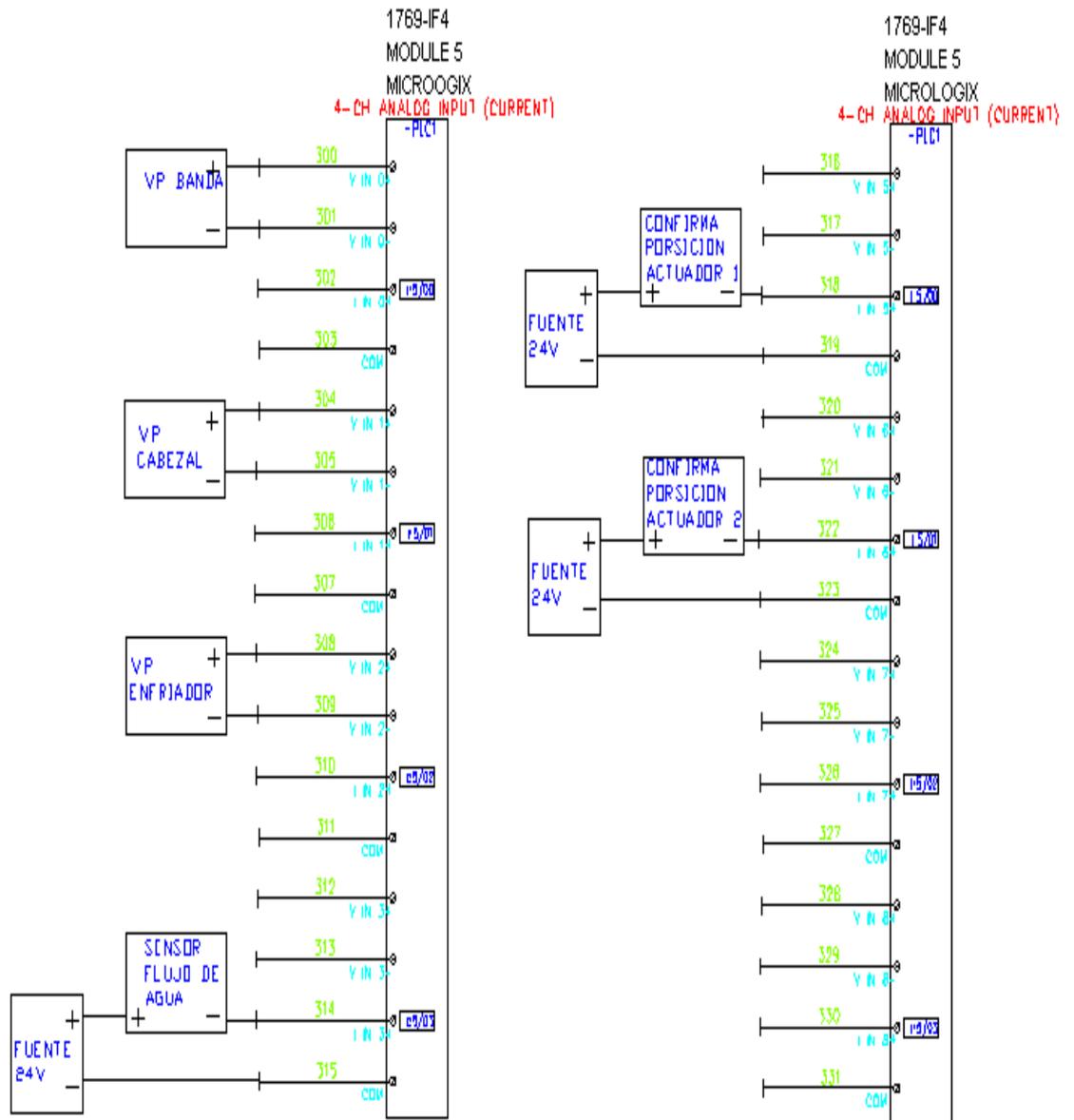


Ilustración A. 5 Conexión de módulo 5, 1769-IF4 entradas analógicas

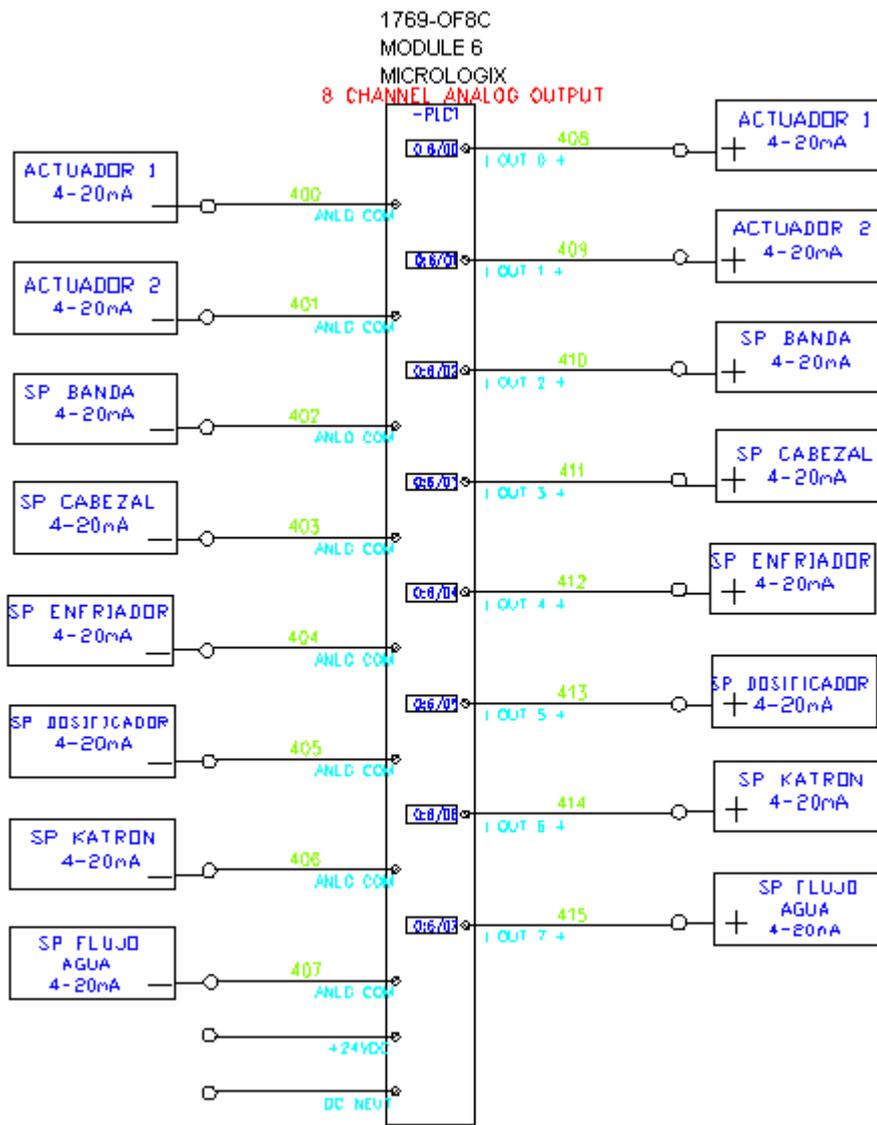


Ilustración A. 6 Conexión de módulo 6, 1769-OF8 salidas analógicas

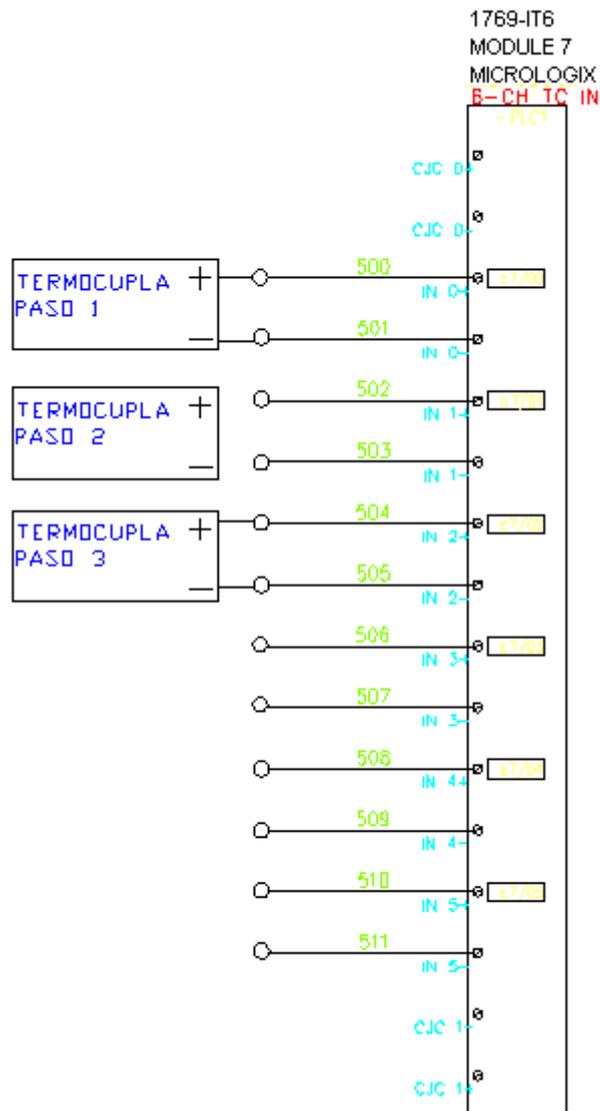


Ilustración A. 7 Conexión de módulo 7, 1769-IT6 entradas termopares

A.5. Mediciones de aire y emisiones de gases



Tels.: 2286-1168 / 2226-4462 • Fax: (506) 2226-4462 • Apartado: 877-1011 San José, Costa Rica
e-mail: lambda@raesa.co.cr

RESULTADO DE ANALISIS # 209,662

---RESULTADO DE ANALISIS QUIMICO---

FECHA: 20 DE ABRIL DEL 2010.

SOLICITANTE: DEMASA

ATENCION: ING. ROGER BLANDON

REFERENCIA: MEDICION DE VELOCIDADES DE LOS DUCTOS DE AIRE DE LOS QUEMADORES DE LA LINEA #1 DE TORTILLA, REALIZADA EL DIA 20 DE ABRIL DEL 2010 EN LAS INSTALACIONES DE DEMASA EN PAVAS, SAN JOSE.

PUNTO DE MUESTREO	Diámetro (cm)	Temperatura (°C)	Presion Estatica (pulg H ₂ O)	Velocidad (m/s)	Flujo Volumétrico	Flujo Volumétrico Estándar (25 °C, 1 atm)
PASO #1	5,1	52,3	+24,5	26,7	0,0546 m ³ /s	0,0445 m ³ /s
PASO #2	5,1	52,6	+24,5	27,6	0,0564 m ³ /s	0,0459 m ³ /s
PASO #3	5,1	52,8	+24,0	26,9	0,0549 m ³ /s	0,0446 m ³ /s

OBSERVACIONES:

- METODOS ANALITICOS: LAMBDA PT-11.
- VER DETALLES DE LAS REFERENCIAS DE LOS METODOS DE ENSAYO ACREDITADOS SOLICITADOS EN EL ALCANCE DE ACREDITACION DEL LABORATORIO EN LA DIRECCION ELECTRONICA: www.eca.or.cr

RAFAEL I. AMÍN PÉREZ
N.I. CFCIQ 537

NOTA: Refiérase al número de este resultado para cualquier consulta.

LAMBDA R-04



Tels.: 2286-1168 / 2226-4462 • Fax: (506) 2226-4462 • Apartado: 877-1011 San José, Costa Rica
e-mail: lambda@raesa.co.cr

ESTUDIO DE EMISIONES DE GASES DE CALDERA

SOLICITANTE:
DEMASA, S.A.

EQUIPO: LINEA DE TORTILLERIA #1

MUESTREO EL DIA 19/03/2010

EN SUS INSTALACIONES UBICADAS EN: PAVAS, SAN JOSE

Latitud N 09° 57' 02,6" Longitud O 84° 08' 35,6"



Tels.: 2286-1168 / 2226-4462 • Fax: (506) 2226-4462 • Apartado: 877-1011 San José, Costa Rica
e-mail: lambda@raesa.co.cr

RESULTADO DE ANALISIS # 208709

---RESULTADO DE ANALISIS QUIMICO DE EMISIONES AL AIRE---

FECHA: 30 DE MARZO DE 2010.

SOLICITANTE: DEMASA-PAVAS

ATENCION: ING. CATALINA VARGAS

MUESTREO DE EMISIONES DE GASES DE LINEA #1 DE TORTILLERIA, A TRAVES DE LA CHIMENEA, REALIZADO POR PERSONAL DEL LABORATORIO QUIMICO LAMBDA EL DIA 19-03-2010, EN LAS INSTALACIONES DE DEMASA-PAVAS, UBICADA EN PAVAS. LATITUD N 9°57'02.6", LONGITUD O 84°08'35.6". LINEA #1 DE TORTILLERIA, HORARIO DE FUNCIONAMIENTO: ---, MODULACION DEL FUEGO: FUEGO UNICO. MUESTREO REALIZADO ENTRE LAS 13:23 Y LAS 13:47

DATOS DE LA CHIMENEA Y LA FUENTE ESTACIONARIA PARA EL MONITOREO Y LAS MEDICIONES

DIAMETRO INTERNO DE CHIMENEA	LONGITUD TOTAL DE CHIMENEA	ALTURA DE PUERTOS DE MUESTREO	NUMERO DE PUNTOS DE MUESTREO	TIPO DE COMBUSTIBLE	TIPO DE FUEGO	TEMPERATURA AMBIENTE	PRESION BAROMETRICA
39 cm	240 cm	150 cm	8	LPG	FUEGO UNICO	28,5 °C	680 mmHg

RESULTADOS ANALITICOS DEL MUESTREO EN LINEA #1 DE TORTILLERIA.

	RESULTADO PROMEDIO
PARTICULAS SUSP. totales (isocinético)	67 ± 2 mg/Nm ³
SO ₂	< 3 mg/Nm ³
NO _x (como NO ₂)	< 3 mg/Nm ³
CO ₂	2,8 ± 0,1 %
O ₂	16,6 ± 0,2 %
CO	196 ± 4 mg/Nm ³
HUMEDAD DEL GAS	5,5 ± 2 %
O ₂ DE REFERENCIA	5 %
TEMPERATURA DE LOS GASES	155 ± 4 °C

OBSERVACIONES:

METODOS UTILIZADOS:

PROCEDIMIENTOS SEGUN LOS PROTOCOLOS LAMBDA PT-10 Y LAMBDA PT-11

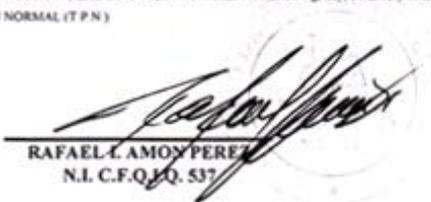
VER DETALLES DE LAS REFERENCIAS DE LOS METODOS EN EL ALCANCE DE LA ACREDITACION DEL LABORATORIO EN WWW.ECCL.0F.CF

METODOLOGIA DE REFERENCIA:

PROCEDIMIENTOS UNICAMENTE DE REFERENCIA A LOS UTILIZADOS EPA (Environmental Protection Agency) 91 al 95 y 96c, 97a, 97b

RESULTADOS BASE SECA A TEMPERATURA Y PRESION NORMAL (T P N)

CODIGO LAMBDA: 945204


RAFAEL C. AMÓN PÉREZ
N.I. C.F.O.I.Q. 537



Tels.: 2286-1168 / 2226-4462 • Fax: (506) 2226-4462 • Apartado: 877-1011 San José, Costa Rica
e-mail: lambda@racsa.co.cr

RESULTADO DE ANALISIS # 208711

---RESULTADO DE ANALISIS QUIMICO DE EMISIONES AL AIRE---

FECHA: 30 DE MARZO DE 2010.

SOLICITANTE: DEMASA-PAVAS

ATENCION: ING. CATALINA VARGAS

MUESTREO DE EMISIONES DE GASES DE LINEA #1 DE TORTILLERIA, A TRAVES DE LA CHIMENEA, REALIZADO POR PERSONAL DEL LABORATORIO QUIMICO LAMBDA EL DIA 19-03-2010, EN LAS INSTALACIONES DE DEMASA-PAVAS, UBICADA EN PAVAS. LATITUD N 9°57'02.6", LONGITUD O 84°08'35.6". LINEA #1 DE TORTILLERIA, HORARIO DE FUNCIONAMIENTO: ----, MODULACION DEL FUEGO: FUEGO UNICO. MUESTREO REALIZADO ENTRE LAS 13:23 Y LAS 13:47.

**CALCULO DE LAS CONCENTRACIONES EN INMISIONES POR DISPERSIONES DE GAUSS
EFECTO DE LA EMISION DE LA CHIMENEA A LOS ALREDEDORES**

CUADRO DE LOS RESULTADOS DE LAS DISPERSIONES DE GAUSS

	CONCENTRACION MÁXIMA ESPERADA	NORMA ANUAL EN COSTA RICA
PARTICULAS SUSP.	0,1 µg/m ³	90 µg/m ³
SO ₂	< 0,1 µg/m ³	80 µg/m ³
NO _x	< 0,1 µg/m ³	100 µg/m ³

CONDICIONES PARA EL CALCULO DE LAS DISPERSIONES DE GAUSS:

CONDICION DE VELOCIDAD DE VIENTOS: 2 m/s
ESTABILIDAD ATMOSFERICA: A
ALTURA FINAL DESTINO DE ESTIMACION: 2 m
DISTANCIA MAXIMA CONCENTRACION: 300 m

OBSERVACIONES:

- CODIGO LAMBDA: 8452G4
- VER CURVAS DE DISPERSION ADJUNTAS.


RAFAEL I. AMÓN PÉREZ
N.I. C.F.Q.I.Q. 837

EVALUACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

El estudio realizado ha abarcado el camino completo necesario para obtener todos los datos pertinentes y necesarios para alcanzar resultados serios y coherentes, sobre todo en función de que todas las mediciones se realizaron en equipos de chimeneas de calderas existentes y durante su funcionamiento normal y real. Además el haber utilizado metodologías internacionales para las mediciones permitió tener mayor confiabilidad durante el proceso de obtención de la información.

CUADRO DE CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES:

A.- EMISION DE GASES:

I.- SISTEMA DE COMBUSTION DE LA LINEA DE TORTILLERIA #1.

CONTAMINANTE	CUMPLIMIENTO	RECOMENDACIÓN
PARTICULADO	DENTRO DE NORMA	N/A
SO ₂	DENTRO DE NORMA	N/A
NO _x	DENTRO DE NORMA	N/A
CO ₂	DENTRO DE NORMA	N/A
O ₂	DENTRO DE NORMA	N/A

N/A = no aplica.

B.- INMISION DE GASES POR ESTIMACIÓN GAUSSIANA:

I.- SISTEMA DE COMBUSTION DE LA LINEA DE TORTILLERIA #1.

CONTAMINANTE	CUMPLIMIENTO	RECOMENDACIÓN
PARTICULADO	DENTRO DE NORMA	N/A
SO ₂	DENTRO DE NORMA	N/A
NO _x	DENTRO DE NORMA	N/A



Tels.: 2286-1168 / 2226-4462 • Fax: (506) 2226-4462 • Apartado: 877-1011 San José, Costa Rica

e-mail: lambda@raesa.co.cr

CONCLUSIONES FINALES

EMISIONES:

1.- SO₂:

- LAS EMISIONES DE SO₂ DE LA CALDERA CUMPLE CON EL REGLAMENTO PUBLICADO EN EL DECRETO 30222 PARA LA EMISIÓN DE SO₂.

2.- NO_x:

- LAS EMISIONES DE NO_x DE LA CALDERA CUMPLE CON EL REGLAMENTO PUBLICADO EN EL DECRETO 30222 PARA LA EMISIÓN DE NO_x.

3.- PARTICULAS TOTALES EN SUSPENSIÓN:

- LAS EMISIONES DE PTS DE LA CALDERA CUMPLE CON EL REGLAMENTO PUBLICADO EN EL DECRETO 30222 PARA LA EMISIÓN DE PARTICULAS.

INMISIONES:

PTS – SO₂ - NO_x:

- LAS INMISIONES ESTIMADAS POR DISPERSIONES GAUSSIANAS PROVOCADAS POR LOS GASES DE EMISIÓN DE LA LINEA DE TORTILLERIA #1 NO SOBREPASAN EN NINGUN MOMENTO LAS NORMAS EXISTENTES DE INMISION Y POR ENDE SE ESTIMA QUE SU EFECTO A LOS ALREDEDORES ESTARA DENTRO DE LOS PARÁMETROS ACEPTABLES.


RAFAEL AMÓN PÉREZ
N.I. 537