



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

# **DISEÑO DE SISTEMA DE CONTROL SUPERVISORIO EN HORNO DE CALENTAMIENTO DE LINGOTES DE ACERO**

**Antonio Josué Arenas Juárez**

Asesorado por el Ing. Marco Antonio Mendoza Leonardo

Guatemala, noviembre de 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE SISTEMA DE CONTROL SUPERVISORIO EN HORNO DE  
CALENTAMIENTO DE LINGOTES DE ACERO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

**ANTONIO JOSUÉ ARENAS JUÁREZ**

ASESORADO POR EL ING. MARCO ANTONIO MENDOZA LEONARDO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paíz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Luis Pedro Ortíz de León
VOCAL V	P.A. José Alfredo Ortíz Herincx
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

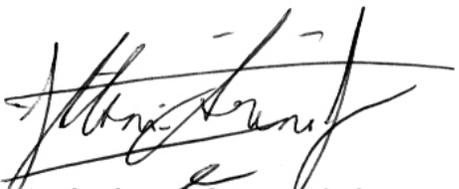
DECANO	Ing. Murphy Olympo Paíz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Otto Fernando Andrino González
EXAMINADOR	Ing. Armando Gálvez Castillo
EXAMINADOR	Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

**HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO DE SISTEMA DE CONTROL SUPERVISORIO EN HORNO DE  
CALENTAMIENTO DE LINGOTES DE ACERO,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería mecánica eléctrica, junio de 2009.



Antonio Josué Arenas Juárez

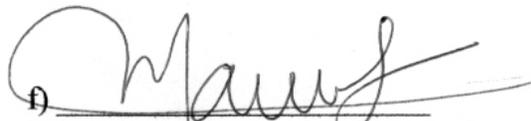
Guatemala, 18 de enero de 2010

Ingeniero  
Otto Andrino  
Coordinador del área de electrotecnia  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de ingeniería  
USAC

Señor Coordinador:

De la manera más atenta me dirijo a Usted, Para informarle que he asesorado el trabajo de graduación de Antonio Josué Arenas Juárez, titulado: DISEÑO DE SISTEMA DE CONTROL SUPERVISORIO EN HORNO DE CALENTAMIENTO DE LINGOTES DE ACERO.

Después de realizadas las revisiones correspondientes. He considerado que es satisfactorio obteniendo mi aprobación.



Ing. Marco Antonio Mendoza Leonardo  
Colegiado: 5554  
ASESOR

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA**



Guatemala, 02 de septiembre de 2010

**FACULTAD DE INGENIERIA**

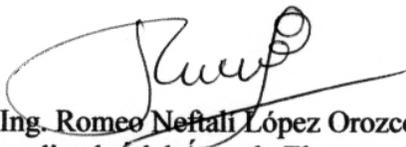
Señor Director:  
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me Permito dar aprobación al trabajo de graduación titulado: "DISEÑO DE SISTEMA DE CONTROL SUPERVISORIO EN HORNO DE CALENTAMIENTO DE LINGOTES DE ACERO", del estudiante Antonio Josué Arenas Juárez, que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente  
**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

  
Ing. Romeo Neftali López Orozco  
Coordinador del Área de Electrotecnia



**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

REF. EIME 40. 2010.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; Antonio Josué Arenas Juárez titulado: "DISEÑO DE SISTEMA DE CONTROL SUPEVISORIO EN HORNO DE CALENTAMIENTO DE LINGOTES DE ACERO", procede a la autorización del mismo.

  
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero



GUATEMALA, 08 DE NOVIEMBRE 2,010.

Universidad de San Carlos  
de Guatemala



Facultad de Ingeniería  
Decanato

DTG. 361.2010

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE SISTEMA DE CONTROL SUPERVISORIO EN HORNO DE CALENTAMIENTO DE LINGOTES DE ACERO**, presentado por el estudiante universitario **Antonio Josué Arenas Juárez**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Decano



Guatemala, 9 de noviembre de 2010.

/gdech

## **ACTO QUE DEDICO A:**

Dios	Siempre infinitamente bueno, llenando de bendiciones mi vida.
Estéfana Juárez	El soporte que me ha ayudado a alcanzar mis metas apoyándome en todo lo humanamente posible. Siendo ella siempre una madre ejemplar de la que me siento orgulloso de ser su hijo.
La memoria de Jose Antonio Arenas	Por sentar las bases de la familia Arenas permitiendo nuestro desarrollo profesional.
Ruth Maria Galindo	La mujer que me llena de amor compartiendo juntos los momentos felices
Hermanos y familiares vida.	Personas con las que Dios me permite compartir la vida.
Amigos y compañeros	Todas aquellas personas que me apoyaron a lo largo de la carrera compartiendo con ellos como una segunda familia en nuestra casa de estudios.

## AGRADECIMIENTOS

Dios	Por poner todas las condiciones en mi vida para yo poder estudiar y llenar de bendiciones mi camino hasta llegar a este punto.
A mi madre	Por el gran amor que demuestra con cada uno de sus actos por su familia y por su incansable sacrificio por mí y mis hermanos, al haber cumplido la función de padre y madre, siendo ella mi mayor ejemplo a seguir, porque nunca ha dejado que nos faltara algo y haber recibido de ella una educación integral en el hogar que me ha llevado a cumplir mis metas.
Ruth María Galindo	Por darme su amor, apoyo y comprensión, especialmente en el desarrollo del trabajo de graduación.
USAC	Por ser mi segundo hogar en mi paso por la universidad, por todo el conocimiento que recibimos en las aulas y ser la vía que me abrió las puertas para mi desarrollo profesional.
Pueblo de Guatemala	Por brindarme la oportunidad de estudiar en la USAC
Catedráticos	Por compartir el conocimiento que han adquirido mediante la experiencia.

## ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE GENERAL</b>	I
<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b>	V
<b>TABLAS</b>	IX
<b>GLOSARIO</b>	XI
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b>	XV
<b>RESUMEN</b>	XIX
<b>OBJETIVOS</b>	XXIII
<b>INTRODUCCIÓN</b>	XXV
<b>1. DESCRIPCIÓN DE CARACTERÍSTICAS Y FUNCIONAMIENTO BÁSICO DE UN HORNO DE RECOCIDO DE LINGOTES</b>	1
1.1. Horno de empuje	4
1.2. Condiciones para la combustión	6
1.3. Regiones de operación dentro del horno	7
1.4. Diversas tecnologías por utilizar para su funcionamiento	9
<b>2. VARIABLES INVOLUCRADAS EN EL PROCESO</b>	13
2.1. Temperatura dentro del horno	13
2.2. Temperatura de combustible	14
2.3. Cantidad de CO <sub>2</sub> en aire de salida del horno	15
2.4. Caudal de combustible	18
2.5. Caudal de aire de combustión y atomización	18
<b>3. SISTEMAS DEL HORNO</b>	19
3.1. Sistema de alimentación de combustible	19
3.1.1. Bombas de combustible	20
3.1.2. Tubería por utilizar	22

3.1.3. Sistema de precalentamiento de combustible	24
3.2. Sistema de suministro de aire a quemadores	28
3.2.1. Aire de atomización	34
3.2.2. Aire de combustión	35
3.2.2.1. Sistema de aire de combustión	35
3.2.2.2. Sistema de precalentamiento de aire de combustión	37
3.3. Alimentación y extracción de materia prima al horno	39
3.3.1. Sistema de alimentación de lingotes	40
3.3.2. Sistema de deshornado	41
3.4. Sistema de extracción de humos	42
3.5. Neutralización de gases a la salida de la chimenea del horno	43
<b>4. DESCRIPCIÓN DE SENSORES UTILIZADOS EN EL SISTEMA</b>	<b>47</b>
4.1. Termopar	47
4.2. Transductores de presión	53
4.3. Medidores de caudal	57
4.4. Finales de carrera	60
4.5. Interruptor capilar de temperatura	60
<b>5. DISEÑO DE FUNCIONAMIENTO DEL HORNO</b>	<b>63</b>
5.1. Relación entre las variables	63
5.2. Implicaciones en el control del horno	64
5.3. Variables en el proceso	67
5.3.1. Variables a monitorear	69
5.3.2. Variables a manipular	70
5.4. Diagrama de funcionamiento del horno	72
5.4.1. Diagramas de bloques sobre funcionamiento del horno	73

5.4.2. P&ID del control del horno de calentamiento de lingotes de acero	76
<b>6. DISEÑO DE CONTROL Y MONITOREO DEL SISTEMA</b>	<b>81</b>
6.1. Sistema de control para el horno	81
6.2. Dispositivo de control	82
6.3. Algoritmo de control y secuencia lógica del programa	86
6.3.1. Diversos estados de operación del horno	86
6.3.2. Distribución de las diversas memorias y registros en el PLC	88
6.4. Sistema de control supervisorio desarrollado en LAB VIEW	91
6.4.1. Comunicación entre el PLC y el sistema de control supervisorio	94
6.4.2. Método de monitoreo y acceso a la información del proceso	96
6.4.3. Diversos entornos gráficos para visualización del estado del horno	102
6.5. Visualización de datos en HMI y parámetros a ingresar	105
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>109</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>111</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>113</b>



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1. Horno de laminación	2
2. Diseño de aislante térmico dentro del horno	3
3. Funcionamiento de intercambiador de calor	4
4. Carga y descarga del horno	5
5. Pistón hidráulico de carga del horno	6
6. Condiciones para la combustión	7
7. Ubicación de zonas de calentamiento	8
8. Unidad de PLC principal	9
9. Ejemplo de la onda de alimentación de voltaje producida por un arrancador suave	10
10. Temperatura aproximada en las regiones interiores al horno.	14
11. Válvula de alivio de presión	15
12. Combustión ideal de combustible	16
13. Combustión incompleta del combustible o combustión rica	16
14. Combustión con exceso de oxígeno o combustión pobre	17
15. Interior de bomba de engranes exteriores y dirección del flujo	21
16. Sistema de distribución de combustible	23
17. Tanque de almacenaje de combustible	24
18. Tanque de abastecimiento de combustible	25
19. Tanque de precalentamiento y control de temperatura	25
20. Ubicación de resistencias calefactoras y válvula de alivio en parte superior de tanque de precalentamiento	26
21. Botella de calentamiento de bunker a la entrada de los quemadores	27
22. Disposición de tuberías de distribución de aire	29

23. Ventilador de combustión para los quemadores laterales	32
24. Quemador de combustible	33
25. Distribución de aire hacia los quemadores	34
26. Ventilador de atomización lateral y frontal	35
27. Ventilador de combustión lateral	36
28. Ventilador de combustión frontal y válvula reguladora de flujo	37
29. Manta aislante que cubre la tubería de combustión que conduce aire caliente	38
30. Intercambiador de calor de los quemadores frontales	38
31. Intercambiador de calor para los ventiladores laterales	39
32. Detalles de estructura de carga al horno	41
33. Barra deshornadora	42
34. Nomograma para el cálculo de la altura de chimenea	45
35. Funcionamiento de un termopar	47
36. Protección de alta resistencia de los termopares	50
37. Diagrama de un transductor	54
38. Transductor de presión	55
39. Partes de un transductor de presión	56
40. Partes de un encoder incremental	57
41. Instalación de encoder en carcasa de motor	58
42. Ensayo para determinar el caudal por revolución de una bomba de engranes	59
43. Switch de temperatura capilar	61
44. Tubo capilar y vaina de protección de termopar	64
45. Sensor de presión de aire 0-64 osi (0-4 psi)	66
46. Temperatura de la llama de un quemador	67
47. Instalación de interruptor capilar de temperatura	70
48. Válvula de control de aire de combustión	71
49. Diagrama de flujo del control del horno	74

50. Diagrama de bloques de la secuencia para el control de válvulas de alimentación de aire	75
51. Partes de un <i>encoder</i> incremental	76
52. Diagrama P&ID de horno de calentamiento de lingotes de acero	80
53. PLC MITSUBISHI FX2N-32M	82
54. Disposición de módulos de PLC	83
55. Módulo auxiliar de 16 entradas y módulo auxiliar de 16 salidas	83
56. Módulo de 2 canales de entrada análoga	84
57. Módulo de 2 canales de salida análoga	85
58. Módulo de lectura de termopares	85
59. Módulo de comunicación CCL	86
60. Indicación de cambio de estado de un equipo	91
61. Indicador de temperatura en LabVIEW	92
62. Cambio en estado de indicador	92
63. Registro gráfico de temperatura	93
64. Registro de eventos en LabVIEW	93
65. Diagrama de conexión RS-232	94
66. PLC instalado en panel, se puede observar la conexión RS-232	95
67. Software de OPC disponible en la red	96
68. Especificar puerto a utilizar en OPC	97
69. Creación de un nuevo puerto en OPC	97
70. Configuración del puerto en OPC	98
71. Agregar un nuevo dispositivo en OPC	98
72. Configuración de nuevo dispositivo en OPC	98
73. Agregar un nuevo ítem de datos del dispositivo en OPC	99
74. Configuración de ítem de datos del dispositivo en OPC	99
75. Apertura del OPC server desde LabVIEW	100
76. Selección de OPC desde LabVIEW	100
77. Configuración de la variable del OPC desde LabVIEW	101

78. Entorno gráfico principal de monitoreo del horno	103
79. Entorno gráfico de dispositivos en su estado apagado	104
80. Entorno gráfico de dispositivos en su estado encendido	105
81. HMI indicando los principales datos del horno	106
82. HMI llevando el récord de temperaturas del horno	106

## TABLAS

I. Propiedades del bunker	19
II. Cálculo del aire necesario para la combustión	30
III. Aire de atomización necesario	30
IV. Ciclo de trabajo del pistón del horno	40
V. Selección de factor S para respectivos compuestos en los gases de expulsión	44
VI. Rangos de temperatura par los distintos termopares	48
VII. Datos característicos de transductor de presión	55
VIII. Lista de instrumentos en diagrama P&ID	76
IX. Lista de equipos en diagrama P&ID	79
XI. Distribución de las entradas y salidas en el PLC	88



## GLOSARIO

### A

#### **Asfaltenos**

Son una familia de compuestos químicos orgánicos, resultan de la destilación fraccionada del petróleo crudo y representan los compuestos más pesados y por tanto, los de mayor punto de ebullición.

#### **Atomización**

Separar en pequeñas partículas un líquido.

### B

#### **Bomba de engranaje**

Dispositivo que se utiliza para bombear aceite de lubricación, producen caudal al transportar el fluido entre los dientes de dos engranajes acoplados, propulsan líquido a una cantidad constante por revolución

#### **Bunker**

Combustible utilizado para la combustión en el horno también llamado *fuel oil* o *heavy oil #6*.

### C

#### **Combustión**

Es una reacción química en la cual generalmente se desprende una gran cantidad de calor y luz.

#### **Cemento refractario**

Es aquel capaz de resistir las condiciones del medio en el que está inmerso sin alteraciones importantes en sus propiedades físico-químicas, durante un período económicamente rentable.

### E

**Encoder** Sensor de desplazamientos angulares con base en el conteo de un determinado número de pulsos por revolución.

**Escoria** Son un subproducto de la fundición de la mena para purificar los metales.

## G

**GX DEVELOPER** *Software* para desarrollo de programas de PLC, marca MITSUBISHI.

## L

**Ladrillo refractario** Ladrillo usado para soportar temperaturas altas y cambios de temperatura bruscos; se los emplea en chimeneas y hornos por su alta resistencia.

**LabVIEW** Es un entorno de programación gráfica usado por miles de ingenieros e investigadores para desarrollar sistemas sofisticados de medida, pruebas y control usando íconos gráficos e intuitivos y cables que parecen un diagrama de flujo.

**Lingotes** Un lingote es una masa de material fundido dentro de un molde que permite su fácil manejo y estiba.

**Límite de fluencia** Es la zona límite a partir de la cual el material se deforma plásticamente.

## M

**Mortero refractario** Se utiliza como material de agarre, revestimiento de paredes, y para formar las juntas entre hiladas de ladrillo refractario.

## O

**Ohmios** Es la unidad derivada de resistencia eléctrica en el Sistema Internacional de Unidades. Su nombre se deriva del apellido del físico alemán Georg Simon Ohm, autor de la Ley de Ohm.

## S

**Set point** Valor de una variable a la que se desea llegar en un sistema de control.

## T

**Termopar tipo B** Dispositivo formado por la unión de dos metales distintos (Platino (Pt)-Rodio (Rh) para el tipo B) que produce un voltaje (efecto *Seebeck*), que es función de la diferencia de temperatura entre uno de los extremos denominado "punto caliente".

**Transductor** Es un dispositivo capaz de transformar o convertir un determinado tipo de energía de entrada, en otra de diferente a la salida.



## LISTA DE ABREVIATURAS

### B

#### BTU

Una unidad de energía inglesa. Es la abreviatura de *British Thermal Unit*. Se usa principalmente en los Estados Unidos. Ocasionalmente, también se puede encontrar en documentación o equipos antiguos de origen británico.

### C

#### Cfh

*Cubit feet per hour*, pies cúbicos por hora.

### D

#### DTE

Es un equipo terminal de datos. Se considera DTE a cualquier equipo informático, sea receptor o emisor final de datos.

### F

#### FEM

Fuerza electromotriz.

#### FX2n-32M

Modelo de PLC utilizado en la automatización del horno.

### G

#### Gal

Galón, para medir volumen de líquidos.

#### GPM

Galones por minuto.

<b>GX DEVELOPER</b>	<i>Software</i> para desarrollo de programas de PLC, marca MITSUBISHI.
<b>H</b>	
<b>HP</b>	Conocido como caballo de fuerza, es una unidad de potencia.
<b>K</b>	
<b>Kw</b>	Unidad de medida de potencia real.
<b>O</b>	
<b>OSI</b>	Onza por pulgada cuadrada.
<b>OPC</b>	Es un estándar de comunicación en el campo del control y supervisión de procesos. Especifica parámetros para comunicación en tiempo real entre diferentes aplicaciones y diferentes dispositivos de control de diferentes proveedores.
<b>P</b>	
<b>P&amp;ID</b>	Diagrama que contiene la tubería de la instrumentación del control de un proceso.
<b>PLC</b>	Control lógico programable, por sus siglas en inglés, dispositivo encargado del control sobre el funcionamiento de máquinas, plantas y procesos industriales.

**PSI** Equivale a una unidad de presión cuyo valor equivale a 1 libra por pulgada cuadrada.

**R**

**RS-232** Es la interfaz que designa una norma para el intercambio serie de datos binarios entre un equipo terminal y un equipo de comunicación de datos, es la forma mas comúnmente usada para realizar transmisiones de datos entre ordenadores.

**S**

**SSF** Unidad de viscosidad cinemática.



## Resumen

En el presente trabajo se describen de forma general la función del horno de calentamiento de lingotes en la industria metalúrgica, es decir, el de elevar la temperatura del acero para el proceso de laminación en caliente, con el fin de volver maleable el acero y necesitar de una menor fuerza en las máquinas del proceso para deformarlo. Se le llama horno de empuje pues la carga del horno se realiza a través de un pistón hidráulico que empuja toda la serie de lingotes que están dentro del horno hasta su posición de deshornado o extracción.

El calentamiento de los lingotes se realiza por medio de la quema de bunker, la cual necesita grandes cantidades de oxígeno. El horno se divide en región de calentamiento, precalentamiento e igualación.

La variable principal en el control es la temperatura dentro del horno, y para realizar cambios en ésta, se modificarán las demás variables que están presentes en el proceso. Se debe mantener el combustible bunker a una temperatura que reduzca su viscosidad hasta que sea posible bombearlo y atomizarlo. La cantidad de CO<sub>2</sub> a la salida del horno da la información del equilibrio de la combustión, para buscar una mezcla de oxígeno carbono ideal. Se debe conocer la cantidad de combustible que se está suministrando al horno ya que este hecho está directamente relacionado con la combustión y según la cantidad de combustible que se suministre se calcula la cantidad de oxígeno otorgado por el aire de atomización y combustión.

Los diferentes sistemas del horno se dividen en

- Sistema de alimentación de combustible a los quemadores.
- Sistema de suministro de aire a los quemadores.
- Alimentación y extracción de materia prima al horno.
- Sistema de extracción de humos.

Cada uno de estos sistemas tendrá su accionamiento desde el PLC dispositivo que envía todas las señales a los contactores y recibe las señales de los sensores en el proceso.

Para medir la temperatura en el interior del horno se utilizan termopares tipo B diseñados para las altas temperaturas. Para saber que se está suministrando aire y combustible de forma adecuada al horno se tienen los transductores de presión de aire y combustible. El caudal de petróleo se mide con un sistema que aprovecha el principio de funcionamiento de las bombas de engranes, se considera un volumen desplazado constante por revolución y se lleva un conteo con un encoder. Otros sensores necesarios son los finales de carrera para el posicionamiento de la carga y la descarga de materia prima y los interruptores de temperatura que se utilizan para el control de la temperatura del combustible.

Son múltiples las complicaciones y las consideraciones técnicas que se deben tomar al instalar sensores en ambientes tan agresivos como los gases calientes en el interior del horno y el combustible viscoso a alta temperatura, además que la materia en movimiento pesa toneladas y causa vibraciones.

En el presente trabajo se especifican las variables por medir, las variables a manipular y la relación que existe entre estas y qué se debe tener en cuenta en el proceso de automatización. Se presentan los diagramas de bloques que indican el esquema de la toma de decisiones del sistema de control, además del diagrama P&ID donde se muestra las conexiones de los distintos instrumentos en el proceso y como se relacionan.

El PLC por utilizar es el Mitsubishi FX2n-32M con varios módulos auxiliares de entradas, salidas y módulos que le permiten obtener información y tener salidas

análogas. Se expone la distribución de las memorias dentro del PLC y la forma en que se realiza la conexión al sistema de supervisión desarrollado en LabVIEW en el cual se mantendrá un constante monitoreo de las variables del horno.



## OBJETIVOS

### General

- Diseñar un sistema automatizado de control y supervisión de los diversos procesos de un horno de calentamiento de lingotes de acero con una capacidad de 30 toneladas/hora.

### Específicos

1. Realizar los diagramas de flujo y de proceso sobre los cuales basarse para el desarrollo del sistema de control supervisorio.
2. Definir las variables en el proceso del calentamiento de lingotes de acero y la forma en que estos datos serán adquiridos por el sistema para tener toda la información necesaria para realizar el control.
3. Crear un sistema supervisorio en LabVIEW que permita apreciar las diversas variables en el proceso en un entorno gráfico amigable y que sea capaz de llevar el récord de funcionamiento del horno.



## INTRODUCCIÓN

El proceso de calentamiento de lingotes de acero en la industria metalúrgica es caracterizado por las altas temperaturas que se manejan, el acero debe estar a una temperatura de 1200 °C para ser procesado, el calor necesario es proporcionado por quemadores de bunker a los cuales se les inyecta aire para obtener una combustión efectiva de todo el combustible. El horno debe estar provisto de un sistema de control compuesto por varios tipos de sensores utilizando diversas tecnologías, esto debido a la diversidad de variables por medir y por la complejidad de los procesos que se manejan en el funcionamiento de éste.

Los datos de los sensores serán transmitidos al sistema de control supervisorio, para su control y análisis, de manera que pueda mantener al sistema en las condiciones deseadas, manipulando las diversas variables y mostrando el estado de cada una de éstas en un entorno gráfico amigable en el cual se puedan modificar los parámetros base del funcionamiento del horno.

En este trabajo se establecerán los distintos dispositivos de accionamiento y mecanismos de control, con sus respectivas protecciones y con el control supervisorio se pretende obtener rutinas para maniobras de encendido y apagado del horno, así como condiciones de emergencia, esto para tener una condición segura de operación del horno.



## **1. DESCRIPCIÓN DE CARACTERÍSTICAS Y FUNCIONAMIENTO BÁSICO DE UN HORNO DE CALENTAMIENTO DE LINGOTES DE ACERO**

En la industria del acero son necesarios varios tipos de tratamientos térmicos con diferente finalidad dependiendo del trabajo que se le realizará al material y del acabado necesario. En este caso, interesa el trabajo en caliente, el cual es el utilizado para el tren de laminación en la fabricación de varillas de construcción en caliente. A estas se les reduce el área transversal, desde un área de 120mm\*120mm (14,400mm<sup>2</sup>) hasta varillas con un área de hasta 71 mm<sup>2</sup>, a través de rodillos impulsados por grandes motores del orden de los 500hp hasta 1300hp, estos lingotes necesitan una elevada temperatura para poder realizar en ellos el proceso de deformado, la cual es proporcionada por el horno. Esta temperatura debe estar dentro de límites establecidos para que el hierro, durante el proceso, no esté a una temperatura muy baja que requiera un mayor esfuerzo para realizar la deformación o que el hierro esté muy caliente y se derrita dentro del horno o que el hierro en los rodillos patine. Por esto y otras razones importantes, al horno se le realiza el diseño del sistema de control supervisorio.

Dentro del horno los lingotes son calentados hasta una temperatura promedio de 1,200 °C a esta temperatura el hierro se vuelve maleable y está listo para ser procesado. Se debe notar que a esta temperatura el hierro no pierde su estructura interna lo cual significa que no pierde sus propiedades mecánicas como: la resistencia a la tensión, límite de fluencia, etc. características que son de vital importancia en el proceso de construcción. Durante el calentamiento el hierro se vuelve vulnerable a la oxidación, generando un óxido conocido como escoria o cascarilla, el cual se crea debido

a la corrosión que produce la cantidad de azufre y oxígeno presentes en los gases del horno.

**Figura 1. Horno de laminación**



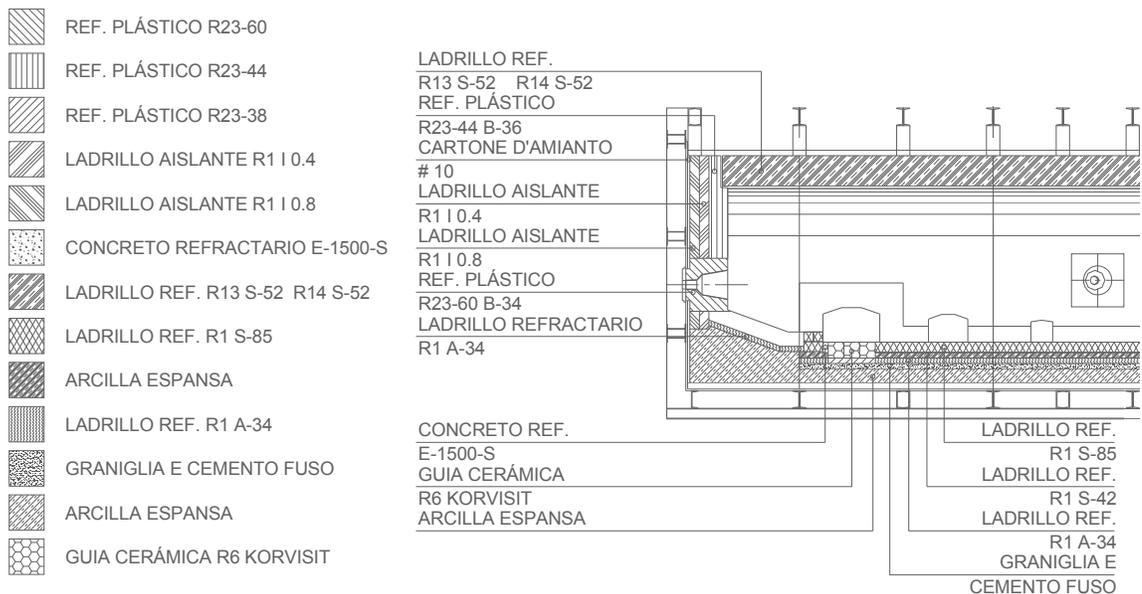
El horno, mostrado en la figura 1, está constituido por una estructura metálica exterior y varias capas de material refractario en el interior diseñadas para trabajo pesado y soportar las altas temperaturas del proceso, así como la expansión térmica, este material refractario debe resistir las condiciones agresivas del horno sin sufrir alteraciones importantes en sus propiedades físico-químicas durante un periodo de tiempo económicamente rentable.

El refractario se presenta como:

- Cemento refractario
- Mortero refractario: se utiliza como material de agarre, revestimiento de paredes, y para formar las juntas entre hiladas de ladrillo refractario.

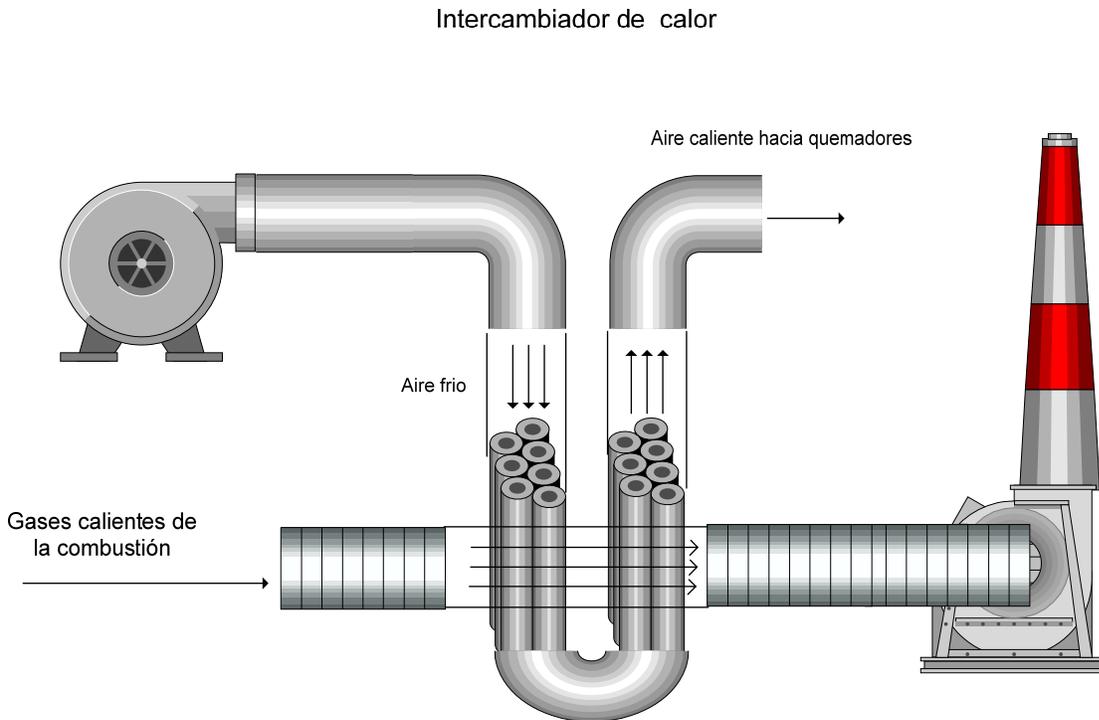
- Ladrillo refractario: tiene sus caras lisas, lo cual disminuye la adherencia con el mortero, resiste bien las altas temperaturas y la abrasión, es buen aislante térmico y es relativamente caro (actualmente el precio de un ladrillo refractario equivale aproximadamente al precio de diez ladrillos comunes).

**Figura 2. Diseño de aislante térmico dentro del horno**



El calor proporcionado para el calentamiento de los lingotes de acero dentro del horno lo brinda la combustión de bunker que sale de los quemadores colocados en puntos estratégicos del horno, para manejar específicas regiones de calentamiento. El bunker por ser un líquido altamente viscoso a temperatura ambiente, necesita un precalentamiento para ser bombeado hacia los quemadores donde se mezcla con aire para realizar la combustión. El aire de combustión para los quemadores es proporcionado por ventiladores centrífugos de gran caudal, el cual es precalentado en intercambiadores de calor con gases de salida del horno utilizando calor de desecho, esto para aumentar la eficiencia del proceso al recuperar un poco de calor. Se puede apreciar en la figura 3.

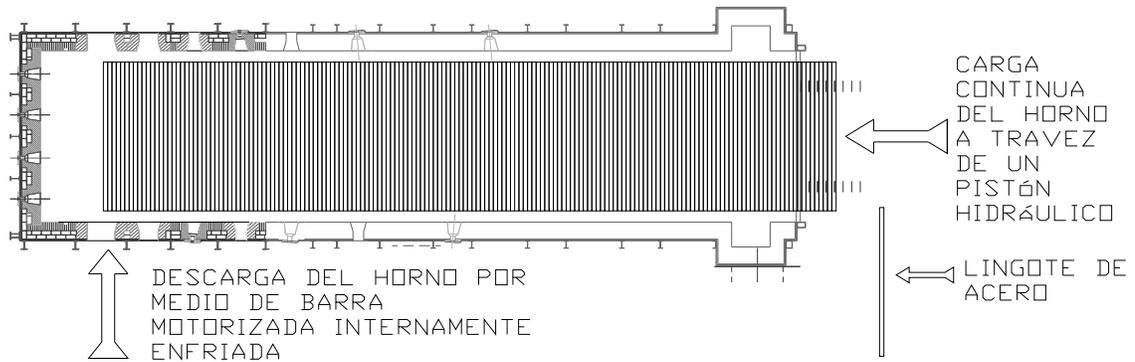
**Figura 3. Funcionamiento de intercambiador de calor**



### 1.1. Horno de empuje

La característica principal del horno de empuje es el sistema de carga de lingotes del horno, el cual es realizado por un pistón hidráulico que literalmente empuja una serie de lingotes colocados uno justo detrás del otro, de modo que el pistón mueve todos los lingotes dentro de este, llegando a mover 150 a la vez, deslizándose estos sobre guías dentro del horno.

**Figura 4. Carga y descarga del horno**



La carga como la descarga se realiza sin interrupción durante la operación de la laminación, salvo que haya alguna demora por fallos en el proceso, o algún cambio de calibre, que es un suceso común, surgido por el trabajo de reducir el área del hierro, los rodillos laminadores sufren un gran desgaste en el proceso y son cambiados de dos a tres veces diarias.

Con el sistema de empuje se tiene un horno sencillo desde el punto de vista mecánico. No hay habitualmente piezas móviles en la parte interior del horno que, dadas las altas temperaturas siempre son críticas.

**Figura 5. Pistón hidráulico de carga del horno**

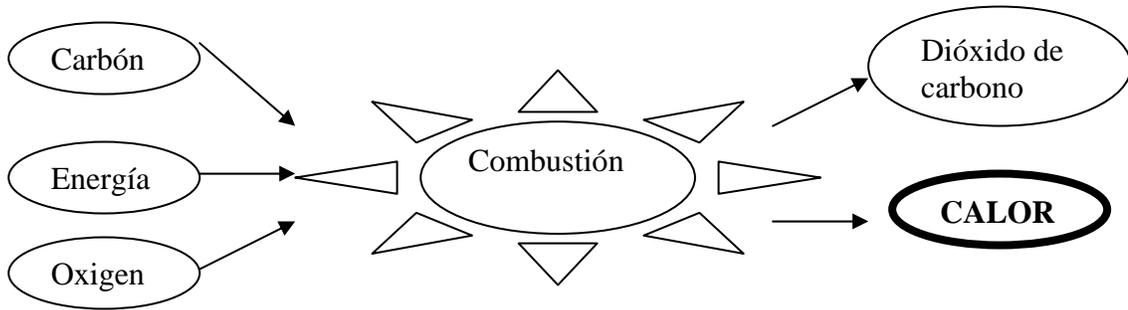


## **1.2. Condiciones para la combustión**

Para obtener una combustión son necesarios tres elementos: combustible, oxígeno y energía, esta última está dada por una llama piloto inicial o por una chispa, posteriormente la energía para realizar la combustión será tomada de combustiones previas dentro del horno. Como resultado se obtiene calor necesario para calentar los lingotes de acero y como un subproducto no deseado se obtiene dióxido de carbono.

En este caso estos son los componentes del proceso de combustión:

**Figura 6. Condiciones para la combustión**

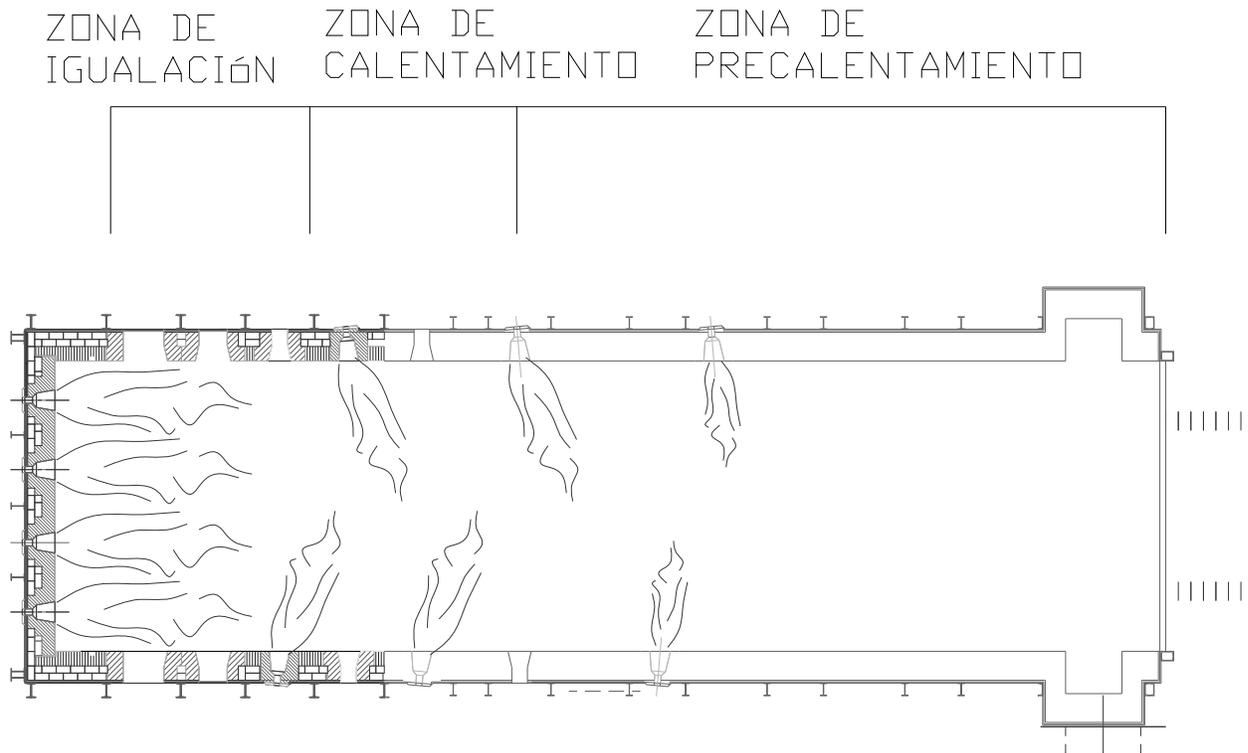


El carbón es suministrado por el combustible bunker que al reaccionar con el oxígeno produce calor y dióxido de azufre. Realizando el cálculo del aire necesario para realizar una buena combustión, se tiene el siguiente dato de conocimiento común, en los ingenieros encargados de procesos de combustión, para generar 100 btu se necesita 1 pie cúbico de aire por hora.

### **1.3. Regiones de operación dentro del horno**

Dentro del horno se definen tres regiones de calentamiento, durante cada una el hierro dentro del horno está bajo un proceso diferente, como se definen en la figura 7.

**Figura 7. Ubicación de zonas de calentamiento**



- A). - ZONA DE PRECALENTAMIENTO: donde el material ingresa al horno a temperatura ambiente, es calentado hasta una temperatura de unos 800 °C. Este calentamiento se realiza básicamente por convección. Aquí el hierro está sometido al calor de los gases y al ambiente de alta temperatura del horno.
- B). - ZONA DE CALENTAMIENTO: aquí, la superficie de los lingotes alcanzan una temperatura de unos 1250 °C, para el acero común, éste es el punto más caliente del horno, puesto que la región de más alta temperatura de las llamas del horno es en la punta.

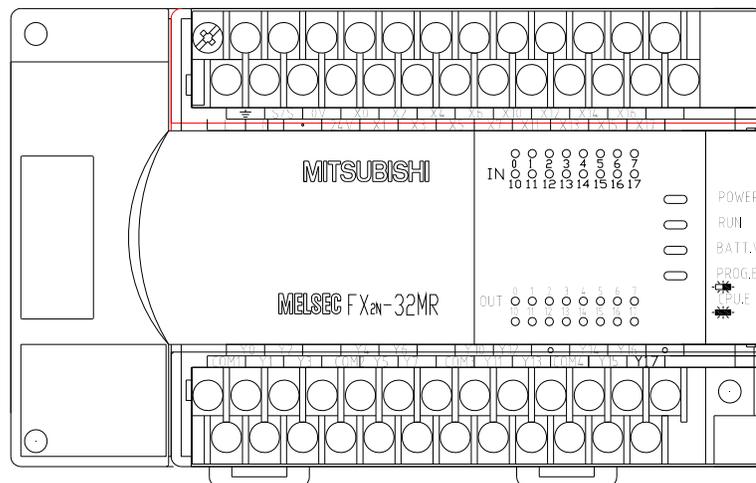
- C). - ZONA DE IGUALACIÓN O DE EMPAPE: se consigue que la diferencia de temperatura del punto más caliente del lingote con respecto al punto más frío esté comprendida entre 20 y 50 °C, de forma que no se presenten problemas causados por zonas frías que causen un mayor esfuerzo en los rodillos laminadores o una temperatura muy caliente que haga patinar el hierro en los rodillos en el tren de laminación, afectando la calidad del producto final laminado.

En estas dos últimas zonas la transferencia de calor se realiza básicamente por radiación.

#### 1.4. Diversas tecnologías por utilizar para su funcionamiento

Para el funcionamiento del horno, el control de todos los dispositivos es realizado por un PLC, el cual recibe toda la información del estado de los dispositivos, que a él están conectados.

**Figura 8. Unidad de PLC principal**

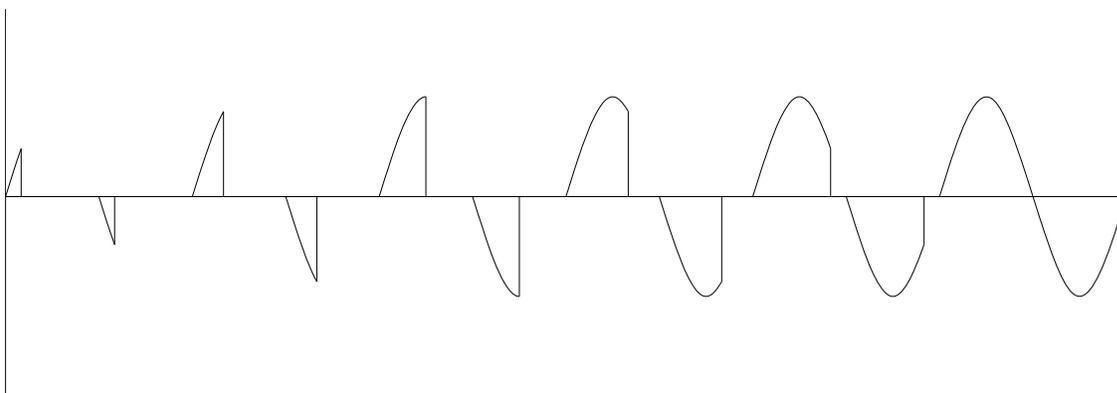


Fuente: <http://www.c-cnc.com/news/newsfile/2008/9/25/155936.shtml> 10/3/2010

Al PLC llegan las señales de todos los sensores que contiene el horno y todos los botones para su control, el cual toma todas estas señales y las interpreta mediante el programa.

El PLC controla las secuencias de arranque de los ventiladores, los cuales por su característica de arranque y por la magnitud de la potencia de los motores es necesario un arranque especial, en el cual no se eleve la corriente a niveles peligrosos que puedan dañar el equipo, para esto se utilizaron arrancadores suaves los cuales brindan una característica en la señal de arranque según se muestra en la figura 9.

**Figura 9. Ejemplo de la onda de alimentación de voltaje producida por un arrancador suave**



Con este tipo de onda se introduce un voltaje reducido al motor para reducir los siguientes efectos:

- Una elevada corriente de arranque que con frecuencia representa una carga inaceptable para la red.
- Golpes bruscos en engranajes y otros elementos de transmisión que provocan un desgaste innecesario de las piezas mecánicas.

- Altos valores de la aceleración y desaceleración que originan situaciones inestables en los procesos, por ejemplo en cintas transportadoras.

Para obtener los siguientes beneficios:

- Control flexible de la corriente y el par de arranque.
- Control suave de la corriente y de la tensión sin escalones ni periodos transitorios.
- Posibilidad de realizar frecuentes operaciones de arranque/parada sin que se produzca daños mecánicos.
- Facilidad para introducir cambios en las condiciones de arranque, aumentando la flexibilidad en la aplicación.
- Control del frenado para reducir o prolongar el tiempo de desaceleración del motor.

El sistema LabVIEW brinda la facilidad de poder interpretar las señales del PLC en un entorno gráfico amigable, esto gracias a la facilidad que posee el sistema para comunicarse con los dispositivos electrónicos. En este caso se obtiene la información mediante RS-232. En una pantalla se puede visualizar el estado de los diferentes dispositivos en el horno, así como el comportamiento de la temperatura. Con esto se puede entender más a fondo el funcionamiento en el arranque y enfriamiento de horno y se tiene una ayuda para la detección de fallas durante el funcionamiento.



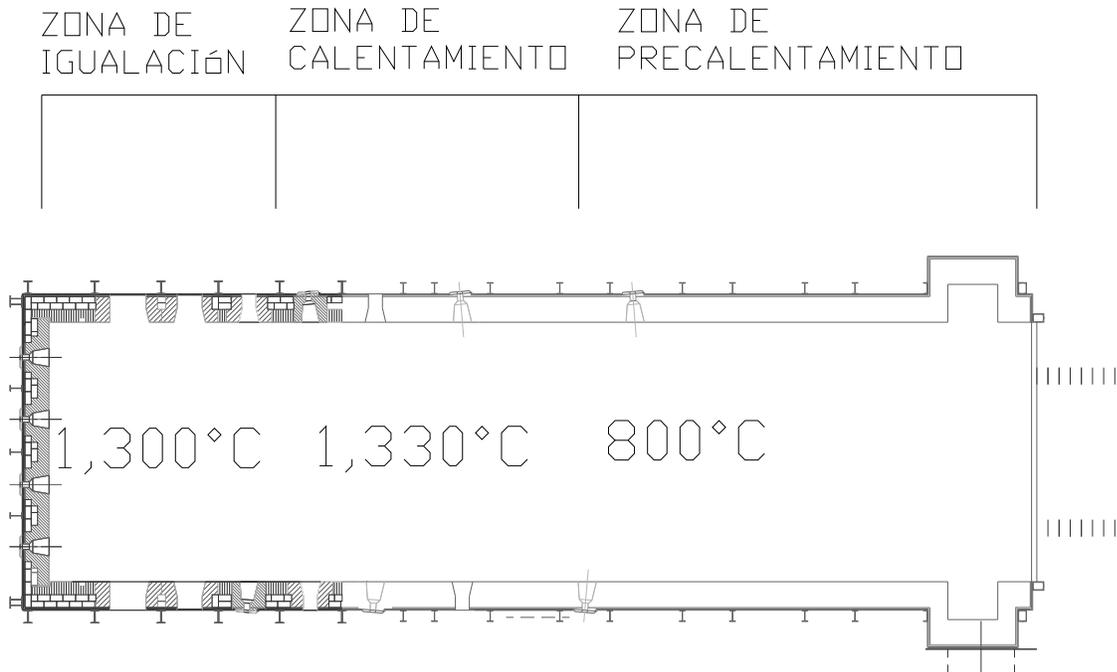
## 2. VARIABLES INVOLUCRADAS EN EL PROCESO

### 2.1. Temperatura dentro del horno

La temperatura que se busca, es la que lleve al acero por arriba de su punto de recristalización, es el factor más importante a en el sistema de control del horno, será el *set point* principal. Si se necesita mayor temperatura, requerirá al sistema mayor combustible lo cual hará trabajar a mayor velocidad la bomba de combustible aumentando el caudal, respondiendo a este caudal, las válvulas de aire se activan dejando pasar un mayor flujo de aire hacia los quemadores para obtener una mezcla idónea de combustible-aire. Los aislantes térmicos colocados en el interior de las paredes del horno y alrededor de las tuberías de aire caliente de alimentación cumplirán la función de utilizar la menor cantidad de combustible para alcanzar la temperatura solicitada en el *set point*.

Para una taza de producción estándar las temperaturas de las diferentes regiones dentro del horno se presentan en la figura 10.

**Figura 10. Temperatura aproximada en las regiones interiores al horno**



## 2.2. Temperatura de combustible

La temperatura del combustible es un factor importante ya que la viscosidad depende de ésta, el combustible a temperatura ambiente tiene una alta viscosidad siendo de esta forma difícil de bombear y de efectuar una combustión eficiente y rápida al no poder atomizar éste. Para reducir la viscosidad del combustible, se precalienta hasta una temperatura de 100 °C a través de tres ciclos de calentamiento, primero en un tanque de almacenamiento una resistencia de 7.5 Kw. que funcionan con 440V calienta el combustible hasta unos 60 °C luego es bombeada, hacia un tanque de precalentamiento en el cual se almacena a presión a 150 psi.

**Figura 11. Válvula de alivio de presión**



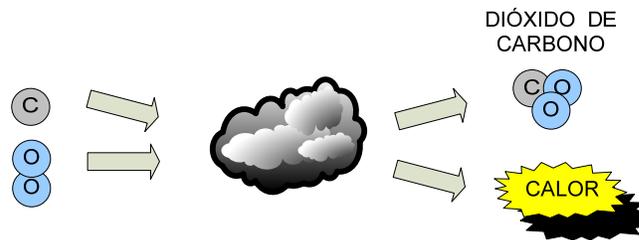
Fuente: [http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Proportional-Safety\\_Valve.jpg](http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Proportional-Safety_Valve.jpg) 16/4/2010

Este tanque tiene cuatro de estas resistencias calefactoras, posee una válvula de alivio, que ante una sobrepresión libera combustible hacia un depósito, de la salida de este tanque sale la tubería hacia el horno el cual posee 4 resistencias calefactoras colocadas dentro de cilindros metálicos cercanos a los quemadores, dos están colocados en paralelo para alimentar los quemadores frontales y una a cada costado para alimentar los grupos de quemadores laterales, en donde se les proporciona el calentamiento final de 150 °C y después de estas va directamente hacia los quemadores de combustible.

### **2.3. Cantidad de CO<sub>2</sub> en aire de salida del horno**

La cantidad de CO<sub>2</sub> en el aire es la que da el estado de la combustión. Para una combustión eficiente, la mezcla del oxígeno contenido en el aire y el carbono contenido en el combustible debe ser la ideal, como se muestra en la figura 12.

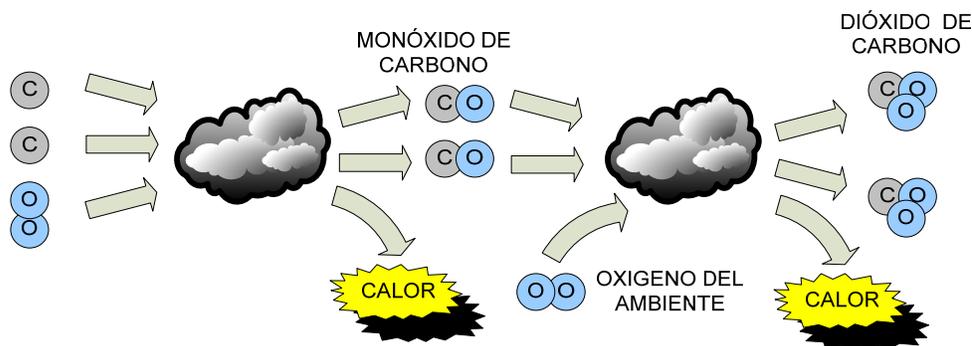
**Figura 12. Combustión ideal de combustible**



En caso de ser una mezcla desbalanceada, suceden diferentes situaciones:

- Al haber más carbono que oxígeno en la mezcla, o sea que la cantidad de aire no es la suficiente para producir la combustión de todo el combustible, se le llama una mezcla rica o una combustión reductora, la cual se caracteriza por la aparición de humo negro, debido a la combustión incompleta. Este fenómeno se esquematiza en la figura 13.

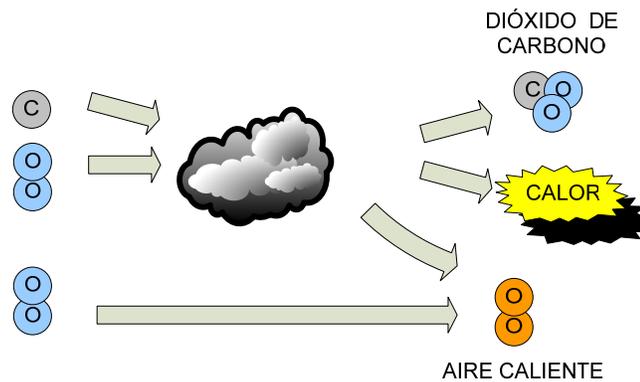
**Figura 13. Combustión incompleta del combustible o combustión rica**



Si se mezclan dos átomos de carbono, en vez de uno, con dos átomos de oxígeno, los carbonos compartirán el oxígeno, de manera que ninguno obtendrá el suficiente para convertirse en dióxido de carbono, liberando menor cantidad de calor.

- El segundo caso es cuando hay más oxígeno que el necesario en la mezcla, esto sucede cuando el carbón cae en una región con más oxígeno del que el necesita para convertirse en dióxido de carbono, en este caso se dice que la mezcla es pobre y que el fuego es oxidante, esto resulta en una llama que será más pequeña en tamaño y más clara relativamente, el exceso de oxígeno no toma parte en el proceso de combustión. Éste tipo de combustión se esquematiza en la figura 14.

**Figura 14. Combustión con exceso de oxígeno o combustión pobre**



El problema con el aire extra presente en el proceso es que éste no permite aprovechar al máximo el calor producido por la combustión ya que éste roba calor, de manera que parte de la energía es dedicada a calentar el aire. Las grandes cantidades de oxígeno en el interior del horno dadas por esta condición crea un ambiente muy corrosivo al chocar el oxígeno caliente con los materiales en el interior del horno provocando que la superficie del hierro a procesar salga con mucha cascarilla a causa de la corrosión, así como el desgaste de la estructura del horno.

El análisis del CO<sub>2</sub> da información acerca del estado de la combustión dentro del horno, que permite obtener el tipo de llama óptimo para aumentar la eficiencia del proceso. Obteniendo la temperatura deseada con la menor cantidad de combustible.

## **2.4. Caudal de combustible**

El caudal de combustible es importante conocerlo ya que está directamente relacionado con la temperatura del horno. El necesitar un aumento o disminución de temperatura se relaciona proporcionalmente al aumento o disminución de combustible inyectado al horno, éste será regulado por medio del control de la velocidad del motor de la bomba, a través de variadores de frecuencia. El caudal de combustible es en particular difícil de medir por las condiciones de éste, que a baja temperatura es altamente viscoso, y para reducir su viscosidad se lleva a altas temperaturas las cuales están fuera del rango de medición de los sensores comunes, por estas causas la medición del caudal de combustible se realiza de manera indirecta, contando los desplazamientos angulares del motor de la bomba.

## **2.5. Caudal de aire de combustión y atomización**

La cantidad de aire que será aportado a la combustión es la suma del aire de combustión y el aire de atomización, el aire de atomización será constante, cantidad necesaria para mantener una optima atomización del combustible. La válvula de mariposa reguladora de caudal se instalará en la línea de aire de combustión ya que la mayor parte del aire hacia el quemador va con este fin, siendo esta una tubería de gran diámetro es difícil encontrar un medidor de caudal de gases para estas condiciones, por lo tanto se recurre a utilizar transductores de presión, los cuales son los que dan información acerca de cuanto aire está fluyendo hacia los quemadores. Para mantener un flujo uniforme de aire a todos los quemadores, es indispensable que el flujo, sea turbulento no laminar.

### 3. SISTEMAS DEL HORNO

Los diferentes sistemas del horno se dividen en

- Sistema de alimentación de combustible a los quemadores.
- Sistema de suministro de aire a los quemadores.
- Alimentación y extracción de materia prima al horno.
- Sistema de extracción de humos.

Cada uno de estos sistemas tendrá su accionamiento desde el PLC que es el que envía todas las señales a los contactores y recibe las señales de los sensores en el proceso.

#### 3.1. Sistema de alimentación de combustible

El combustible que utiliza el horno es el comúnmente conocido como bunker, *fuel oil*, o “*heavy oil # 6*” este es un combustible residual que se obtiene de la destilación y refinación de los hidrocarburos, generalmente tiene un precio bajo en comparación a otros combustibles (residuo de la refinación) es por esto que se prioriza su uso en aplicaciones donde el consumo de energía es importante, como las aplicaciones navales, la generación eléctrica, hornos de precalentamiento de lingotes en las acerías el cual es este caso y en otras industrias similares.

**Tabla I. Propiedades del bunker**

Temperatura de inflamación	109°C
Agua y sedimentos	0.21%
viscosidad cinematica a 50 °C	185 SSF
Punto de escurrimiento	0°C
Azufre	2.07%
densidad a 15 °C	969 Kg/m <sup>3</sup>
Ceniza	0.05%

Fuente: [http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel\\_oil](http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_oil) 5/5/2010

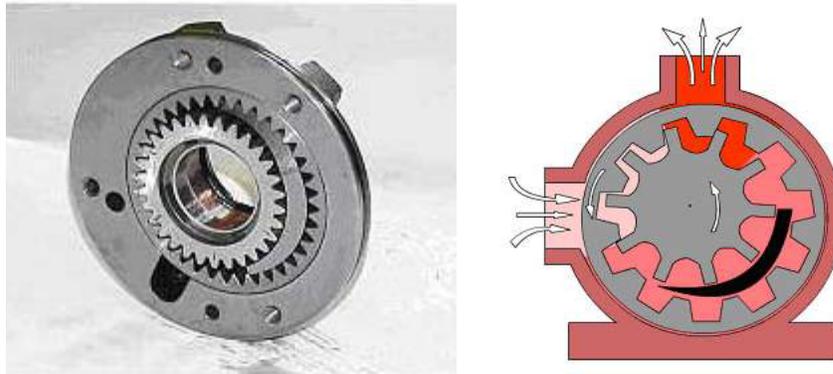
Suele contener una presencia importante de asfaltenos, los cuales hacen indispensable su atomización para encenderlo, y para realizar la atomización a éste se le debe reducir la viscosidad. Es de especial importancia el control de la viscosidad del bunker, la cual debe ser de aproximadamente 300 SSF a 50 °C, así como la ausencia de agua, ya que está en combinación con el azufre que normalmente viene en el combustible, produce la denominada “corrosión en frío” la cual no es otra cosa que la formación de ácido sulfúrico y sulfhídrico, que corroe el metal de los escapes de la maquinaria que usa este tipo de combustibles. El poder calórico del bunker es una función directa del crudo de origen pero se puede establecer un promedio de 140,000 BTU/galón.

### **3.1.1. Bombas de combustible**

Por las características del combustible y de la temperatura que se maneja, las bombas ideales en este caso son las bombas de engranes, las cuales por ser de desplazamiento positivo dan la característica de una cantidad de flujo constante por revolución, lo cual se aprovecha para medir la cantidad de combustible suministrado al horno.

Las bombas hidráulicas son los mecanismos encargados de producir la presión hidráulica, hasta el valor nominal que necesita el sistema, de acuerdo con sus condiciones de diseño.

**Figura 15. Interior de bomba de engranes exteriores y dirección del flujo**



Fuente: <http://www.mailxmail.com/curso-bombas-engranajes/bombas-rotativas-2> 17/4/2010

Estas bombas de engranes internos disponen de dos engranajes, uno interno cuyos dientes miran hacia el exterior, y otro externo con los dientes hacia el centro de la bomba, el eje motriz acciona el engranaje interno.

En este tipo de bombas existe, entre los dos engranajes, una pieza de separación en forma de media luna (semiluna). Esta pieza está situada entre los orificios de entrada y salida, donde la holgura entre los dientes de los engranajes interno y externo es máximo. Ambos engranajes giran en la misma dirección, pero el interno, al tener un diente más, es más rápido que el externo. El fluido hidráulico se introduce en la bomba en el punto en que los dientes de los engranajes empiezan a separarse, y es transportado hacia la salida por el espacio existente entre la semiluna y los dientes de ambos engranajes.

El volumen contenido se consigue entre el extremo de los dientes y la semiluna; posteriormente, en el orificio de salida, los dientes de los engranajes se entrelazan, reduciendo el volumen de la cámara y forzando al fluido a salir de la bomba.

Las bombas de engranajes interiores poseen un desgaste menor por la reducida relación de velocidad existente. Son utilizadas en caudales pequeños

y menor presión. A diferencia de las de engranajes externos, este tipo de bombas son más silenciosas, pero a su vez tienen mayor costo.

Mediante un experimento de campo detallado en la sección 4.3 se determinó que el volumen de combustible por revolución es de 0.007349389 gal.

El caudal teórico en m<sup>3</sup>/s de las bombas de engranajes internos sería:

$$Q_t = ((2 - \pi) / 60) \cdot F \cdot b \cdot n$$

F = Sección libre entre el anillo exterior y la rueda dentada

b = Ancho del diente

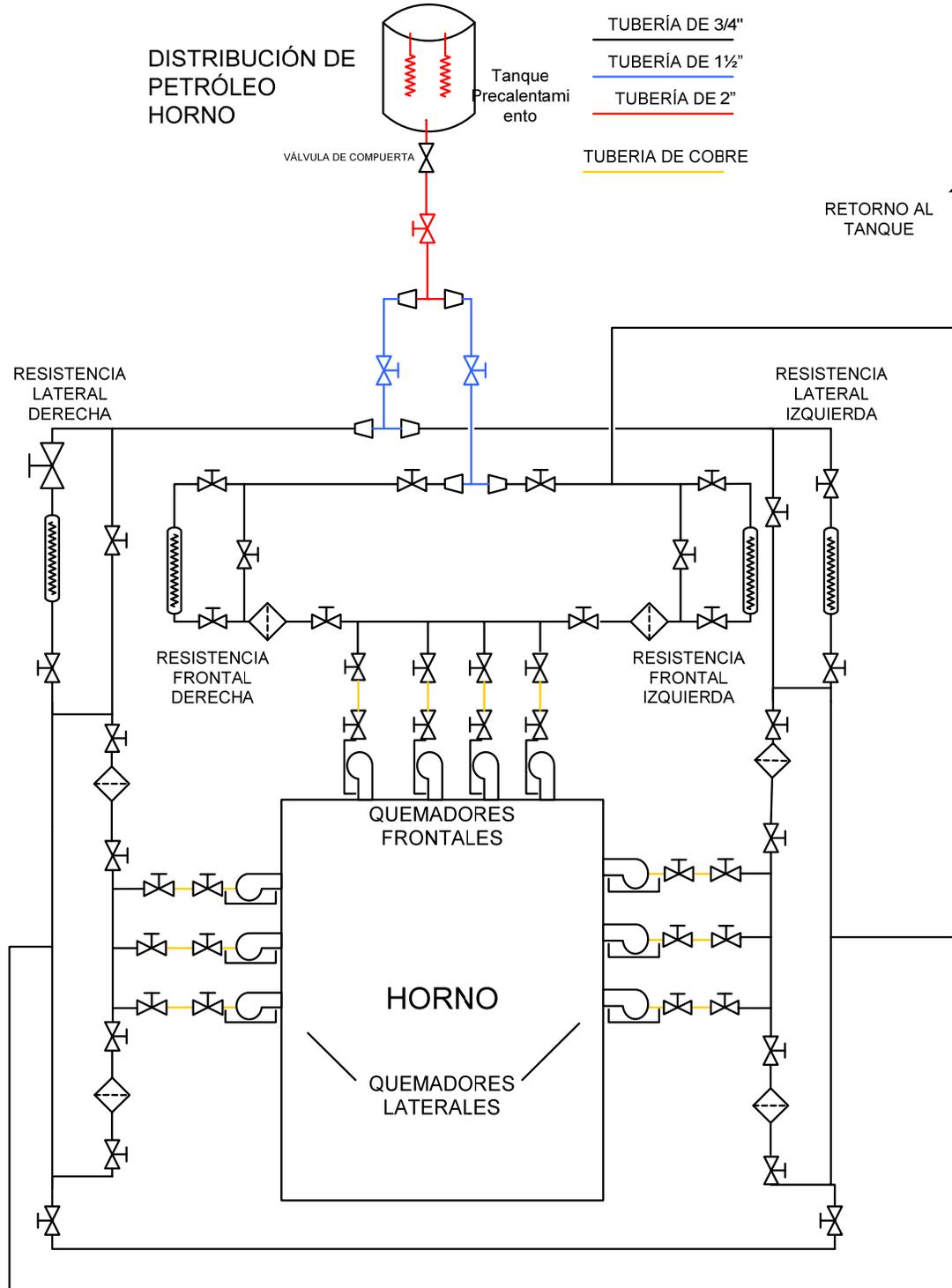
n = Velocidad de giro (rpm)

### 3.1.2. Tubería por utilizar

Las tuberías que transportan el combustible, estando éste a alta o baja temperatura, son galvanizadas de cédula 40 de 2 pulgadas de diámetro hasta la base del horno, y de 1 pulgada de diámetro para la distribución a los quemadores, esto porque el material de que está hecha la tubería no reacciona con la composición química del bunker, La tubería galvanizada tiene alta resistencia a la corrosión, ya que tiene una capa de zinc que es aplicada por medio del proceso de galvanizado por inmersión caliente, no se hace necesaria una tubería cubierta con un aislante térmico refractario especial ya que por las distancias cortas, es pequeña la caída de temperatura que sufre ésta en su trayecto hacia los quemadores. Teniendo en sus conexiones finales una delgada tubería de cobre de ¼" con la cual se alimentan los quemadores.

El diagrama de distribución de combustible se representa en la figura número 16.

Figura 16. Sistema de distribución de combustible



### 3.1.3. Sistema de precalentamiento de combustible

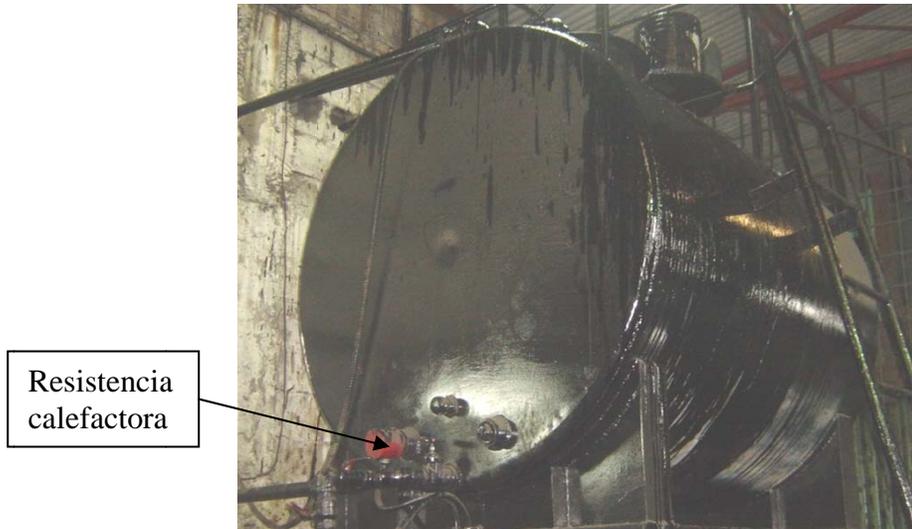
El combustible es precalentado a través de tres ciclos para reducir su viscosidad, primero para un fácil transporte en las tuberías y finalmente un calentamiento a mayor temperatura que reduce la viscosidad para que éste se pueda atomizar. Primero al ser extraído el petróleo de los tanques de almacenaje sin ser precalentado es bombeado por bombas especiales de engranes de baja velocidad para alta viscosidad.

**Figura 17. Tanque de almacenaje de combustible**



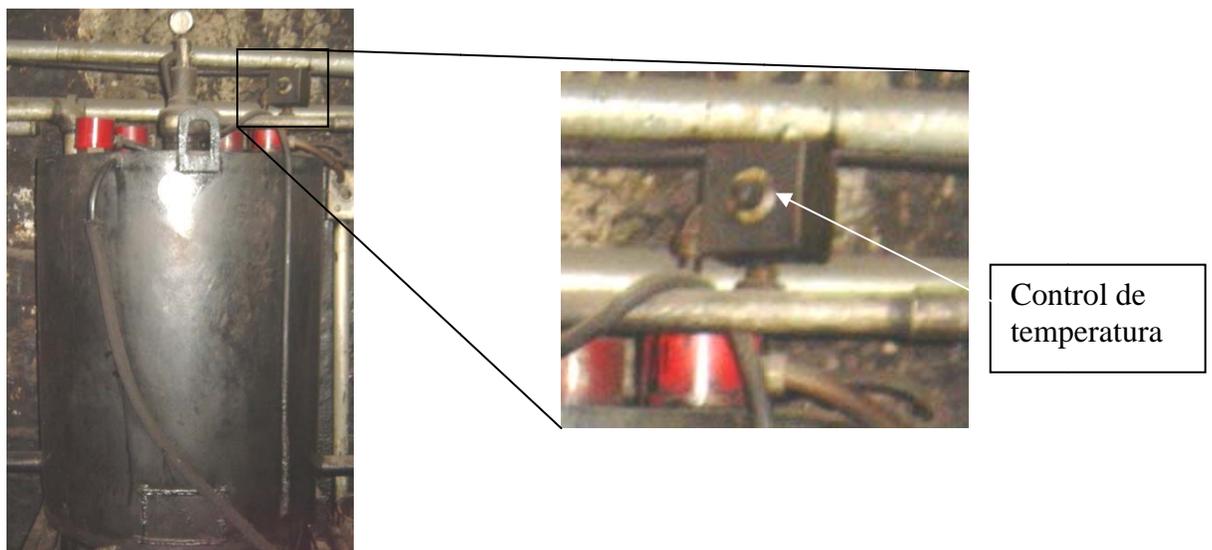
Éste es enviado al tanque de abastecimiento en el pasa por la primera resistencia calefactora, esta resistencia carece de control de temperatura ya que no logra elevar la temperatura de éste, a una temperatura de más de 70 grados, esto porque solo es una resistencia colocada al fondo del tanque de abastecimiento cerca de la tubería de salida para facilitar el flujo de combustible a través de las tuberías, por las bombas hasta el tanque de precalentamiento.

**Figura 18. Tanque de abastecimiento de combustible**



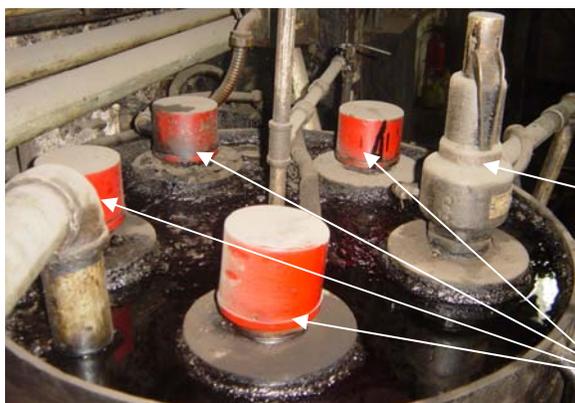
En la figura 18 se observa el tanque de abastecimiento, a la salida de este tanque pasa por la etapa principal y final de bombeo, y es por medio de esta bomba que se controla el flujo de combustible hacia los quemadores por medio de la regulación de su velocidad a través de variadores de frecuencia.

**Figura 19. Tanque de precalentamiento y control de temperatura**



El tanque de precalentamiento, como se muestra en la figura 19, posee 4 resistencias de 7.5 kW, cuenta con un control de temperatura basado en un interruptor de temperatura capilar regulable de 50 a 300 °C, que realiza la tarea de termostato, el cual limita la temperatura dentro del tanque y la mantiene dentro de un rango de  $\pm 2.5$  °C, en este punto el combustible ya está a una presión de 150 psi y para protección. Este tanque cuenta con una válvula de alivio, que expulsa bunker hacia depósitos en caso de existir una sobrepresión, ésta cuenta con un resorte el cual al ser vencido provoca un desfogue de combustible reduciendo la presión dentro del tanque. En la figura 20 se puede apreciar la ubicación de la válvula de alivio y las resistencias calefactoras.

**Figura 20. Ubicación de resistencias calefactoras y válvula de alivio en parte superior de tanque de precalentamiento**



Juego de 4 resistencias calefactoras, aparte de ellas se aprecia la válvula reguladora de presión con alivio.

Válvula de alivio

Resistencias calefactoras

**Figura 21. Botella de calentamiento de bunker a la entrada de los quemadores**



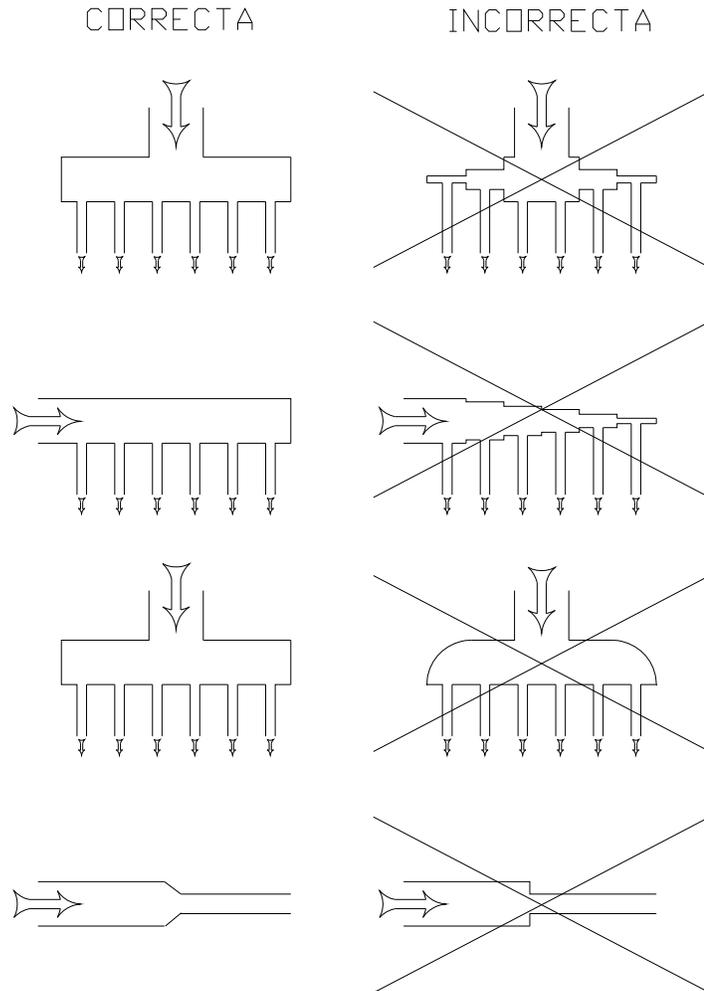
En las botellas de combustible sucede el calentamiento final de combustible, se muestran en la figura 21, son dos las que alimentan el combustible a los quemadores frontales y una para cada juego de quemadores laterales, como se indica en el diagrama de distribución de combustible. En el interior de la botella de calentamiento se encuentra una resistencia igual a las utilizadas en el tanque de precalentamiento y el estado de ésta es controlado con un interruptor de temperatura capilar del mismo modo que el tanque de precalentamiento. Con esto se asegura que el combustible tendrá una temperatura lo suficientemente elevada para crear la atomización de éste en los quemadores.

### **3.2. Sistema de suministro de aire a quemadores**

Con el objeto de calcular el aire necesario para realizar una buena combustión se tiene el siguiente dato, para generar 100btu se necesita 1pie cúbico de aire (*North American combustion Handboock* pág. 18).

Las tuberías de distribución de aire a los quemadores deben tener una disposición que asegure un flujo turbulento en el interior de éstas para asegurar una presión uniforme en todos los quemadores, la figura 22 ejemplifica la forma correcta de diseñar las tuberías.

**Figura 22. Disposición de tuberías de distribución de aire**



Se toma como base el caudal de combustible que tendrán los quemadores obtenidos de sus especificaciones, debido a la región del horno en donde operarán los quemadores, ya que los frontales proporcionarán una llama más grande que las demás, la cual disminuirá su tamaño conforme los quemadores se acerquen a la entrada del horno. Con una capacidad calorífica del Bunker de 140,000 BTU/galón, en los quemadores se tendrá:

**Tabla II. Cálculo del aire necesario para la combustión**

Zona	Cantidad	Galones por quemador (gal/h)
Frontales	4	37.7
Laterales primeros	2	32.42
Laterales segundos	4	26.39

Capacidad del petroleo= 140,000 btu/gal

Galones	Producen (BTU)	Aire necesario(cfh)
37.7	5,278,000	52,780
32.42	4,538,800	45,388
26.39	3,694,600	36,946
Total de aire para los 4 quemadores frontales		211,120
Total de aire para los 6 quemadores laterales		238,560
Total de aire para los 10 quemadores		449,680

El total de aire para todos los quemadores sería de 449,680 cfh, como se muestra en la tabla II.

Tomado un caudal de aire de atomización CTE. De 7300 cfh (según tablas de admisión de aire de quemador *North American*).

**Tabla III. Aire de atomización necesario**

aire total	aire de atomización por quemador	aire de atomización 10 quemadores	aire de combustión
449,680 cfh	7,300 cfh	73,000 cfh	376,680 cfh

El dispositivo utilizado para proporcionar aire a la combustión son sopladores (*blowers*), es un tipo especial de ventilador centrífugo de alta presión, utilizados para elevar la presión de aire o gas por encima de la presión atmosférica, para hacerlo fluir a través de alguna resistencia, o impulsar aire por medio de varios dispositivos que en éste caso serán los quemadores. El ventilador necesario se conoce por la presión necesaria en la tubería de salida.

Ventiladores:

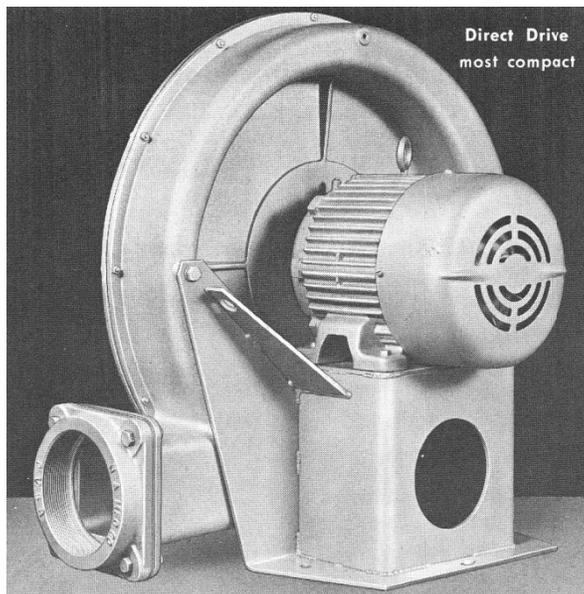
Para el aire de atomización se utiliza

- Para los quemadores frontales: 2332-21-2-25-D  
32 osi de presión  
Cámara interna de 21" de diámetro  
2 etapas  
Motor de 25 hp conexión directa  
Caudal aproximado de 102,000 cfh
- Para los quemadores laterales: 2332-28-2-T20D  
32 osi de presión  
Cámara interna de 28" de diámetro  
2 etapas  
Motor de 20 hp conexión directa  
Caudal aproximado de 90,000 cfh

Para el aire de combustión

- Para los quemadores laterales: 2324-33-1-60-D  
Se muestra en la figura 23  
24 osi de presión  
Cámara interna de 33" de diámetro  
1 etapa  
Motor de 60 hp conexión directa  
Caudal aproximado de 456,000 cfh

**Figura 23. Ventilador de combustión para los quemadores laterales**



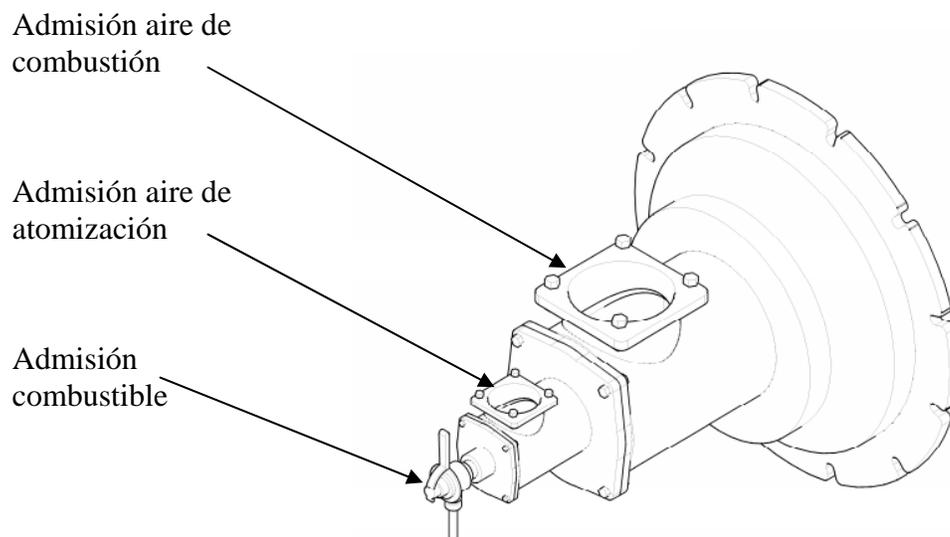
Fuente: [http://www.namfg.com/c-index/c-lit/blowers/2600\\_bul.pdf](http://www.namfg.com/c-index/c-lit/blowers/2600_bul.pdf) 17/5/2010

- Para los quemadores frontales: 2324-41-1-75-V  
24 osi de presión  
Cámara interna de 41" de diámetro  
1 etapa  
Motor de 75 hp conexión directa  
Caudal aproximado de 558,000 cfm

Los quemadores de bunker tienen dos cavidades de admisión de aire y una para admisión de combustible, una es del aire de atomización destinado para crear una atomización uniforme del combustible y obtener una combustión eficiente e instantánea al entrar en el horno y evitar una mala mezcla en la combustión, por exceso de carbono en algunas regiones y en otras por exceso de combustible.

Por otro lado, los quemadores tienen una cavidad de admisión de aire de mayor diámetro destinada para el aire de combustión, como se presenta en la figura 24.

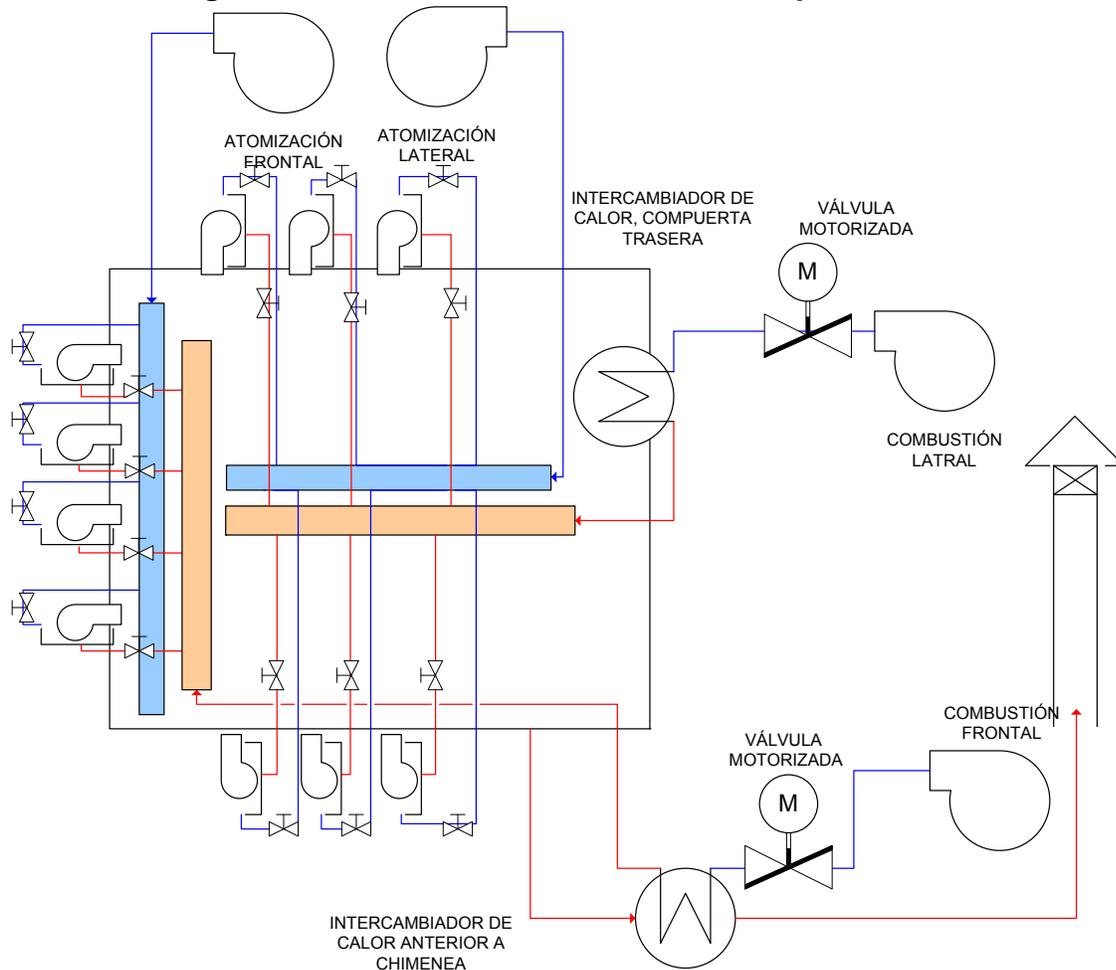
**Figura 24. Quemador de combustible**



En el aire de combustión se aporta la mayor parte del oxígeno necesario para mezclarse con el carbono y producir la combustión, el resto del oxígeno proviene del aire de atomización y otra parte proviene de otras aperturas del horno del cual se succiona aire por el ventilador de tiro forzado de la chimenea.

La disposición de las tuberías de aire debe ser distribuida como se muestra en la figura 25.

Figura 25. Distribución de aire hacia los quemadores



### 3.2.1. Aire de atomización

Es la parte del suministro de aire hacia los quemadores, usualmente alrededor del 10%, utilizado para separar el aceite, en este caso el bunker, en pequeñas partículas o gotitas, posteriormente en el proceso de combustión éste también aporta, en menor medida, una parte de oxígeno para mezclarse con el carbono, la presión mínima del aire de atomización en el quemador debe ser de 14 osi para *light oil* y de 22 osi para *heavy oil*, estos ventiladores se muestran en la figura 26.

**Figura 26. Ventilador de atomización lateral y frontal**



### **3.2.2. Aire de combustión**

La fuente principal de oxígeno para la combustión puede que incluya también el aire inducido por presión negativa dentro de la cámara del horno dado por el ventilador de tiro forzado de la chimenea del horno. El aire de combustión de los ventiladores frontales y laterales es alimentado por dos ventiladores independientes y éste circula por circuitos de precalentamiento de aire individuales.

#### **3.2.2.1. Sistema de aire de combustión**

El aire de combustión es impulsado por ventiladores de gran caudal de aire, a alta presión y el caudal es regulado por una válvula motorizada, esta es uno de los principales elementos en el control del horno al suministrar justo el aire necesario para acercarse a la combustión perfecta, por esto se necesita un control preciso sobre ésta. Las características de los ventiladores de combustión son las siguientes:

Ventilador de los quemadores laterales, se muestra en la figura 27.

- Cámara interna de 33" de diámetro
- 1 etapa
- Motor de 60 hp (conexión directa)
- Caudal aproximado de 456,000 cfh
- 24 osi de presión

**Figura 27. Ventilador de combustión lateral**



Ventilador de los quemadores frontal, se muestra en la figura 28.

- Cámara interna de 31" de diámetro
- 1 etapa
- Motor de 70 hp transmisión por fajas.
- Caudal aproximado de 500,000 cfh
- 32 osi de presión

**Figura 28. Ventilador de combustión frontal y válvula reguladora de flujo**



#### **3.2.2.2. Sistema de precalentamiento de aire de combustión**

Para aumentar la eficiencia del proceso de combustión, se recomienda precalentar el aire, de esta forma se regresa hacia dentro del horno una parte del calor de desecho.

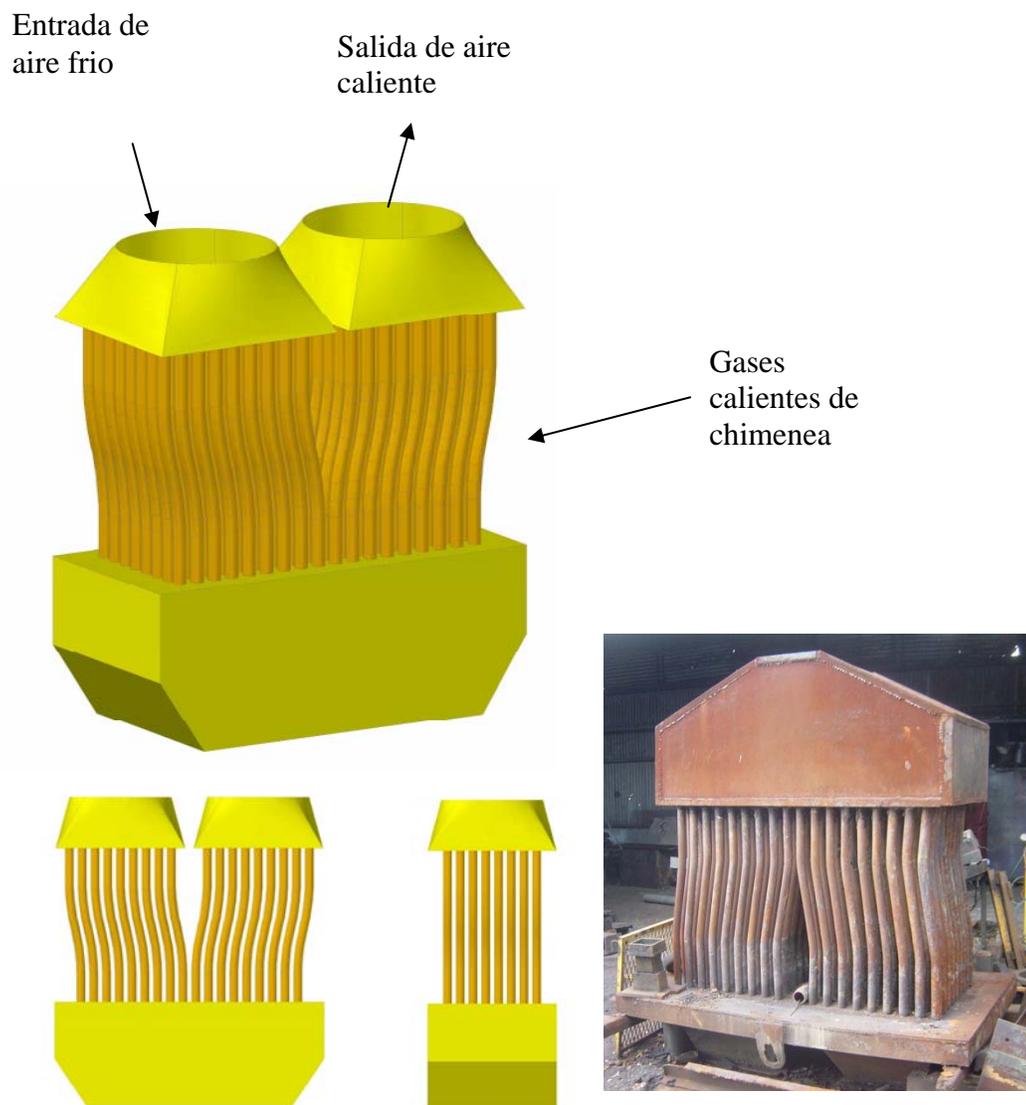
El intercambiador de calor absorbe calor de los gases de expulsión de la chimenea y calienta el aire que se dirige a los quemadores frontales del horno, para evitar pérdidas de calor, luego de pasar por el intercambiador de calor la tubería es forrada con una capa de manta aislante, la cual se muestran en la figura 29. Los intercambiadores de calor se muestran en las figuras 30 y 31.

**Figura 29. Manta aislante que cubre la tubería de combustión que conduce aire caliente**



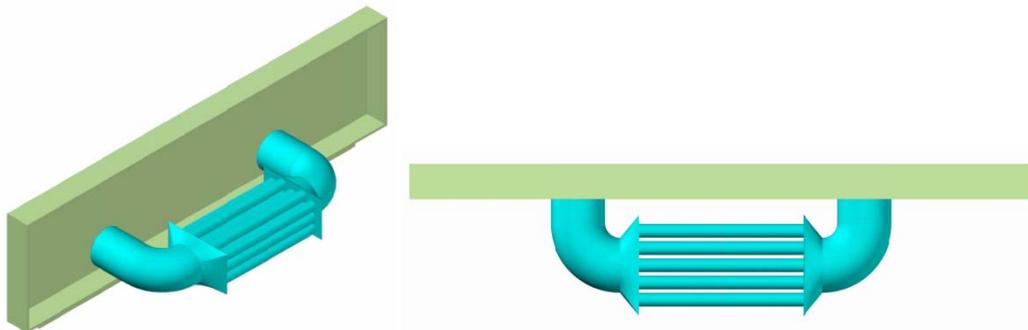
Fuente: <http://spanish.alibaba.com/search/refractory-blanket-1.html> 5/8/2010

**Figura 30. Intercambiador de calor de los quemadores frontales**



A diferencia de los quemadores frontales, el circuito de precalentamiento de aire de los quemadores laterales tiene el intercambiador de calor dentro del horno, en la parte posterior del horno un arreglo de tubos transfiere calor al aire. Como se muestra en la figura 31.

**Figura 31. Intercambiador de calor para los ventiladores laterales**



### 3.3. Alimentación y extracción de materia prima al horno

El ritmo al que se esté suministrando y extrayendo materia prima al horno influye en la temperatura de éste pues esto determina cuanto tiempo estarán los lingotes dentro del horno, es caso de un tiempo muy prolongado estos pueden llegar a pegarse unos con otros creando atrasos en el proceso al dificultar su extracción del horno creando pérdidas. Un ritmo de alimentación lento o rápido necesita de más o menos temperatura.

#### 3.3.1. Sistema de alimentación de lingotes

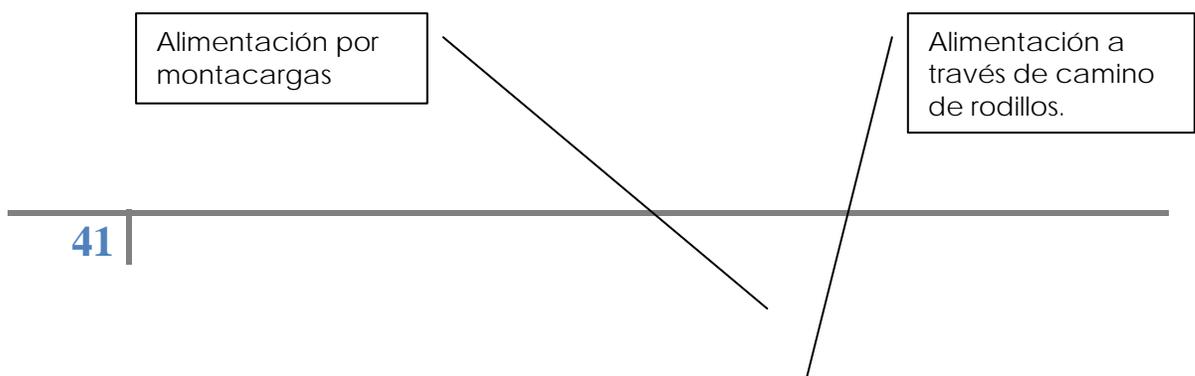
Los lingotes al ingresar al horno pasan por una estructura diseñada para suministrar lingotes al horno en la línea de la cortadora de lingotes, se muestra en la figura 32, ya que los lingotes traen una longitud un poco menor a los 16 metros, la cortadora de lingotes los deja a una longitud de 4 metros que es la de diseño del horno. La estructura tiene la capacidad de almacenar lingotes en su parte superior. En caso de tener atrasos estos pueden ser ingresados al horno, los almacenados.

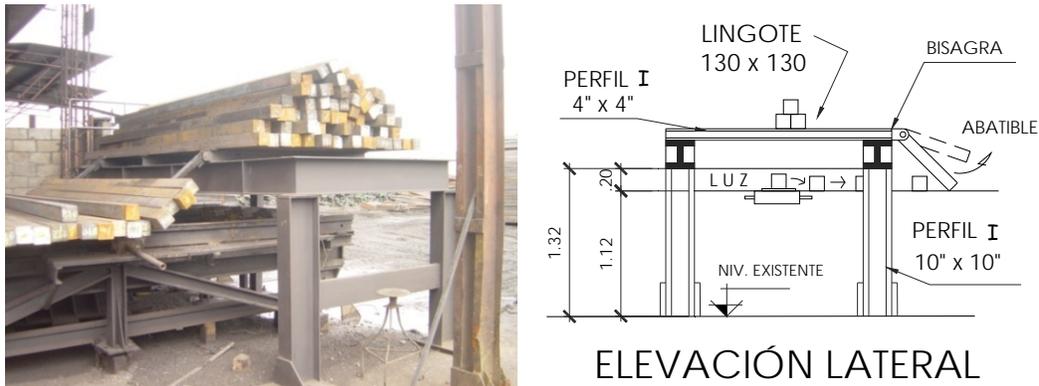
El elemento principal de la carga del horno es el pistón hidráulico el cual realiza la tarea de empujar los lingotes en el horno, ejerciendo éste un gran esfuerzo al empujar hasta 170 lingotes de acero con un peso total de más de 90 toneladas, con una carrera de 90 centímetros, con el ciclo de trabajo que se muestra en la tabla IV.

**Tabla IV. Ciclo de trabajo del pistón del horno**

	Carrera Vacío	Carrera carga	Carrera retroceso	Colocación Palanquillas
Velocidad	5.20cm/s	0.80cm/s	6.40cm/s	
Distancia	13cm	39cm	52cm	
Tiempo	2.50s	48.75s	8.13s	132.63s

**Figura 32. Detalles de estructura de carga al horno**





### 3.3.2. Sistema de deshornado

Deshornado se le llama a la acción de extraer los lingotes del horno por medio de una barra extractora que se introduce totalmente dentro del horno, esta barra es enfriada con agua que circula en su interior, para resistir las altas temperaturas dentro de éste y alargar su tiempo de vida. Esta barra recorre el horno a través de lado a lado empujando los lingotes hacia afuera del mismo.

Figura 33. Barra deshornadora



La barra deshornadora, que se muestra en la figura 33, está accionada por un motor trifásico, el cual con un cambio de giro introduce o retira la barra, un pequeño tablero de control tiene el mando para introducir la barra al horno y posicionarla, en sus límites superior e inferior tiene sensores de final de carrera que no permiten que el motor siga más allá de su rango.

### **3.4. Sistema de extracción de humos**

Los gases de la combustión calientes salen de proceso a través de un túnel subterráneo, que es en donde chocan con el intercambiador de calor, este túnel de 25 metros de largo finaliza en la entrada de un ventilador de tiro forzado, impulsado por un motor de 150 HP, que crea una presión negativa que hace que todos los gases del horno se dirijan hacia la chimenea. Este ventilador ayuda también a aportar oxígeno a la combustión, ya que al crear la presión negativa dentro del horno permite el flujo de aire hacia el interior a través de cualquier espacio que encuentre disponible como la compuerta de deshornado y extracción de lingotes, además de esto, permite la forma alargada de las llamas al dirigir el flujo de aire hacia el fondo del horno.

El empuje de gases hacia la atmósfera está dado por una mezcla de tiro natural y tiro forzado. En el tiro natural se aprovecha el efecto de empuje de Arquímedes que sufren los gases calientes rodeados por otros, más fríos.

La chimenea contiene una columna de humos calientes, rodeada de aire a una temperatura ambiente inferior. El empuje o tiro se calcula por la diferencia del peso de ambas columnas, de altura igual a la de la chimenea.

La forma más sencilla de estimar esta diferencia consiste en considerar las dos columnas como de aire a temperaturas distintas pero uniformes. Para la columna caliente, la temperatura será la de entrada de los humos en la chimenea, menos una cantidad por pérdidas, que puede estimarse en unos  $0,08 \text{ }^{\circ}\text{C/m}$  y para el aire ambiente se utiliza la temperatura de éste a nivel del suelo.

El ventilador de tiro forzado impulsa los gases hacia la chimenea para su dispersión en el aire ambiente. Este ventilador debe ser resistente a las temperaturas y agresiones de los componentes de los humos, e impulsarlos a la chimenea, cuya altura ahora depende exclusivamente de los condicionantes de contaminación.

### **3.5. Neutralización de gases a la salida de la chimenea del horno**

Los residuos del proceso de combustión son altamente contaminantes y para minimizar la concentración de estos en poblaciones aledañas se tiene una altura mínima considerada, esta altura garantiza una dispersión adecuada de contaminantes en la atmósfera, para determinarla se parte del diámetro de la chimenea en metros, y se correlaciona horizontalmente con las isotermas del

gas a emitir. Una vez se tenga el punto de unión, se correlaciona éste verticalmente subiendo perpendicularmente hasta llegar a las líneas de caudal emitido (Nm<sup>3</sup>/h). Con este nuevo punto identificado, se vuelve a correlacionar horizontalmente con las líneas de Q/S para finalmente encontrar la altura mínima H' en el eje de abscisas bajando perpendicularmente.

La relación Q/S se calcula dividiendo la carga másica en kg/h del contaminante emitido entre el valor respectivo del factor S en mg/Nm<sup>3</sup> definido en la tabla V.

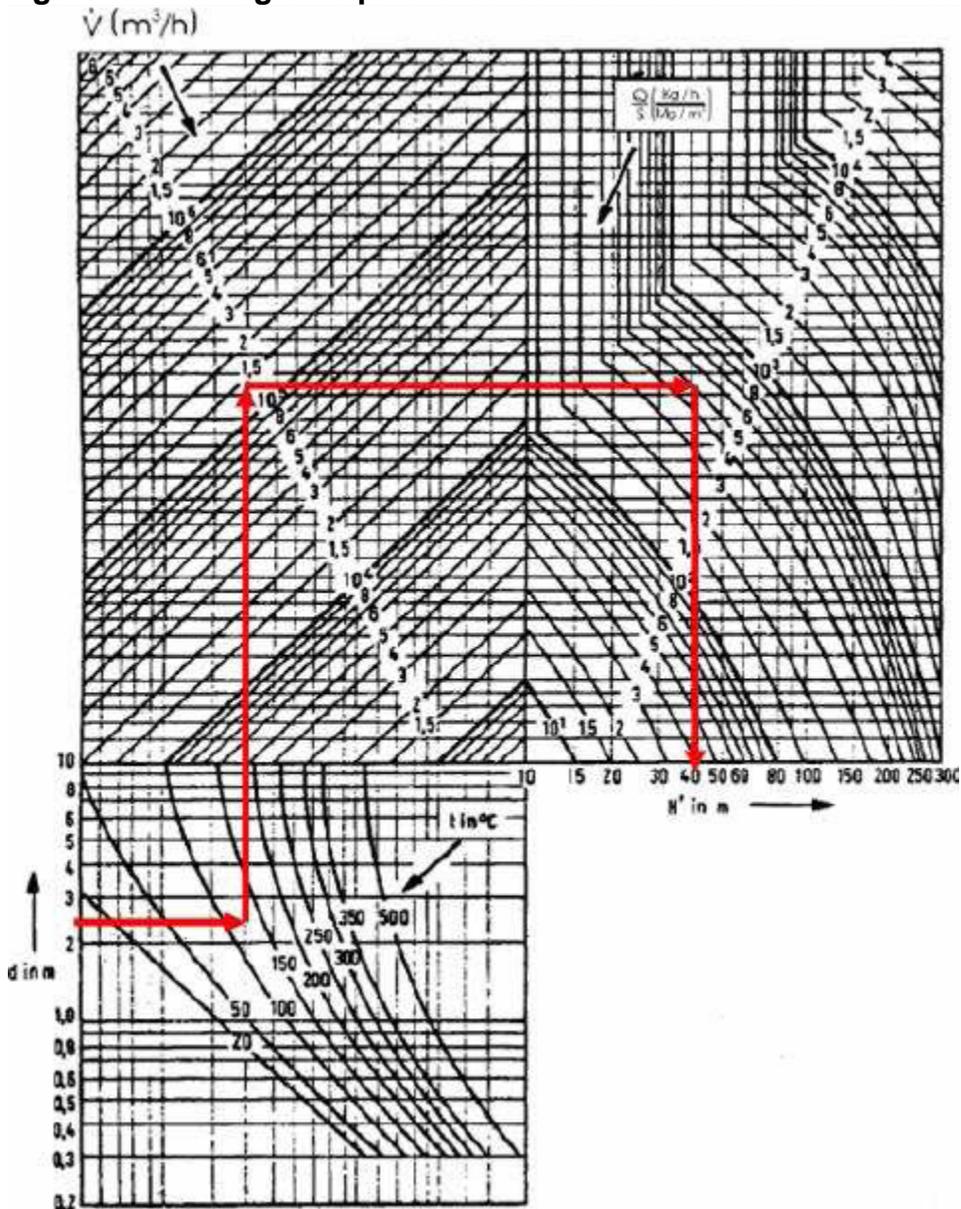
**Tabla V. Selección de factor S para respectivos compuestos en los gases de expulsión**

Compuestos	(S) mg/Nm <sup>3</sup>
Partículas sólidas totales	0.08
Plomo y sus compuestos inorgánicos, indicados como Pb	0.0025
Cadmio y sus compuestos inorgánicos, indicados como Cd	0.00013
Mercurio y sus compuestos inorgánicos, indicados como Hg	0.00013
Cloro	0.09
Compuestos gaseosos de cloro inorgánico, expresados como HCl	0.1
Compuestos gaseosos de flúor inorgánico, expresados como HF	0.0018
Monóxido de carbono	7.5
Oxidos de azufre (dióxido de azufre y trióxido de azufre, expresados como dióxido de azufre)	0.14
Sulfuro de hidrógeno	0.003
Oxidos de nitrógeno, expresados como dióxido de nitrógeno	0.1
Compuestos inorgánicos en partículas:	
• Clase I (Ver anexo II)	0.005
• Clase II (Ver anexo II)	0.05
• Clase III (Ver anexo II)	0.1
Compuestos orgánicos gaseosos:	
• COV	0.1
• Clase I (Ver anexo III)	0.05
• Clase II (Ver anexo III)	0.1
Compuestos cancerígenos:	
• Clase I (Ver anexo IV)	0.00005
• Clase II (Ver anexo IV)	0.0005
• Clase III (Ver anexo IV)	0.005

Fuente: **CRITERIOS PARA EL CÁLCULO DE LA ALTURA DE CHIMENEAS** Xunta de Galicia, conserjería de medio ambiente y desenvolvimiento sostenible, dirección general de cuidado ambiental, Santiago de Compostela 2007

La altura por seleccionar será la mayor de las obtenidas a partir de la aplicación del procedimiento, a los diferentes contaminantes emitidos por la instalación. Un ejemplo de este procedimiento se observa en la siguiente gráfica.

Figura. 34 Nomograma para el cálculo de la altura de chimenea



Fuente: **CRITERIOS PARA EL CÁLCULO DE LA ALTURA DE CHIMENEAS** Xunta de Galicia, conserjería de medio ambiente y desenvolvimiento sostenible, dirección general de cuidado ambiental, Santiago de Compostela 2007

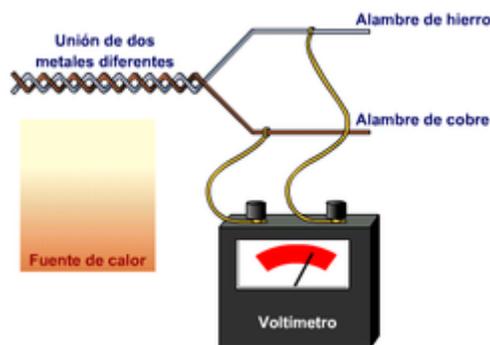


## 4. DESCRIPCIÓN DE SENSORES UTILIZADOS EN EL SISTEMA

### 4.1. Termopar

Un termopar es un dispositivo formado por la unión de dos metales distintos que produce un voltaje (efecto *Seebeck*), que es función de la diferencia de temperatura entre uno de los extremos denominado "punto caliente" o unión caliente o de medida y el otro denominado "punto frío" o unión fría o de referencia.

Figura 35. Funcionamiento de un termopar



Fuente: [http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Termopar\\_\(diagrama\\_de\\_funcionamiento\)-LMB.png](http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Termopar_(diagrama_de_funcionamiento)-LMB.png)

12/5/2010

Estos tienen la ventaja de ser económicos, intercambiables, tienen conectores estándar y son capaces de medir un amplio rango de temperaturas. Su principal limitación es la exactitud ya que los errores del sistema inferiores a un grado Celsius son difíciles de obtener.

La energía generada por un termopar es una función no lineal de la temperatura. Esta dependencia se puede aproximar por un polinomio complejo (de 5º a 9º orden dependiendo del tipo de termopar). Los métodos analógicos

de linealización son usados en medidores de termopares de bajo costo. En este caso la linealización la realiza el Módulo de PLC Mitsubishi FX2n- 2LC, al cual se le indica el tipo de termopar que se está utilizando y éste brinda un resultado en °C. Teniendo éste la capacidad de interpretar las señales de distintos dispositivos de medición de temperatura que se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla VI. Rangos de temperatura para los distintos termopares**

Set value	Sensor type	Input range	Unit
0	K	-200.0 to 200.0	10 <sup>-1</sup> °C
1		-100.0 to 400.0	10 <sup>-1</sup> °C
2		-100 to 1300	°C
3		-100 to 800	°F
4		-100 to 2400	°F
5	J	-200.0 to 200.0	10 <sup>-1</sup> °C
6		-100.0 to 400.0	10 <sup>-1</sup> °C
7		-100.0 to 800.0	10 <sup>-1</sup> °C
8		-100 to 1200	°C
9		-100 to 1600	°F
10		-100 to 2100	°F
11	R	0 to 1700	°C
12		0 to 3200	°F
13	S	0 to 1700	°C
14		0 to 3200	°F
15	E	-200.0 to 200.0	10 <sup>-1</sup> °C
16		0 to 1000	°C
17		0 to 1800	°F
18	T	-200.0 to 200.0	10 <sup>-1</sup> °C
19		-200.0 to 400.0	10 <sup>-1</sup> °C
20		0.0 to 400.0	10 <sup>-1</sup> °C
21		-300.0 to 400.0	10 <sup>-1</sup> °F
22		-300.0 to 700.0	10 <sup>-1</sup> °F
23		0.0 to 700.0	10 <sup>-1</sup> °F

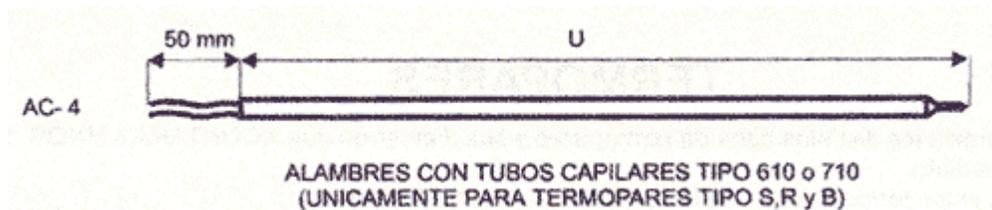
Set value	Sensor type	Input range	Unit
24	B	0 to 1800	°C
25		0 to 3000	°F
26	N	0 to 1300	°C
27		0 to 2300	°F
28	PL II	0 to 1200	°C
29		0 to 2300	°F
30	WRe5-26	0 to 2300	°C
31		0 to 3000	°F
32	U	-200.0 to 600.0	10 <sup>-1</sup> °C
33		-300.0 to 700.0	10 <sup>-1</sup> °F
34	L	0.0 to 900.0	10 <sup>-1</sup> °C
35		0 to 1600	°F
36	JPt100	-50.0 to 150.0	10 <sup>-1</sup> °C
37		-200.0 to 500.0	10 <sup>-1</sup> °C
38		-300.0 to 300.0	10 <sup>-1</sup> °F
39		-300 to 900	°F
40	Pt100	-50.0 to 150.0	10 <sup>-1</sup> °C
41		-200.0 to 600.0	10 <sup>-1</sup> °C
42		-300.0 to 300.0	10 <sup>-1</sup> °F
43		-300 to 1100	°F

Fuente: MELSEC FX Series, Programmable Logic Controllers, User's manual, FX2N-2LC, temperature module, Mitsubishi electric industrial automation, Art. no.: 132307, 2007 , Version D.

El termopar utilizado es de unión tipo “B” (Platino (Pt)-Rodio (Rh)), es adecuado para la medición de altas temperaturas superiores a 1,800 °C. Los termopares tipo B presentan el mismo resultado a 0 °C y 42 °C debido a su curva de temperatura/voltaje, limitando así el uso a temperaturas por encima de 50 °C sin que esto presente un problema en el control del horno ya que para enfriar éste es necesario mantener los ventiladores y la chimenea encendidos a lo largo de 4 días para lograr disipar el calor almacenado durante el proceso hasta llegar a menos de 50 °C.

Otro punto importante en la selección del termopar es el aislamiento y la construcción de la sonda. Estos factores tienen un efecto en el rango de temperatura a medir, precisión y fiabilidad en las lecturas. Los cables del termopar están protegidos por un conducto capilar cerámico, éste a su vez se encuentra dentro de una vaina cerámica que lo cubre por completo como se muestra en la figura 36.

**Figura 36. Protección de alta resistencia de los termopares**



Fuente: [http://www.kountaras.com/documentos\\_html/termocuplas\\_termopares.html](http://www.kountaras.com/documentos_html/termocuplas_termopares.html) 12/5/2010

Los problemas que se pueden dar en los termopares son:

- Los termopares con una baja sensibilidad, como en el caso de los tipos B tienen una resolución menor.
- La mayoría de los errores de medición son causados por uniones no intencionales del termopar. Se debe tener en cuenta que cualquier contacto entre dos metales distintos creará una unión. Si lo que se desea es aumentar la longitud de las guías, se debe usar el tipo correcto del cable de extensión. Así por ejemplo, el tipo K corresponde al termopar K.

Al usar otro tipo se introducirá una unión termopar. Cualquiera que sea el conector empleado debe estar hecho del material termopar correcto y su polaridad debe ser la adecuada. Lo correcto es emplear conectores comerciales del mismo tipo que el termopar para evitar problemas. Esto aumenta de manera significativa el costo del sistema de monitoreo, ya que una extensión de unos 30 metros del cable del mismo tipo del termopar llega a costar el doble del termopar adquirido.

- Un problema que se presenta por la resistencia de la guía. Para minimizar la desviación térmica y mejorar los tiempos de respuesta, los termopares están integrados con delgados cables. Esto puede causar que los termopares tengan una alta resistencia, la cual puede hacer que sea sensible al ruido y también puede causar errores debidos a la resistencia del instrumento de medición.
- Otro problema presente en los termopares es la descalibración. La causa más común es la difusión de partículas atmosféricas en el metal a los extremos de la temperatura de operación, de la misma manera las impurezas y los químicos del aislante difundiéndose en el cable del termopar. Si se opera a elevadas temperaturas, se deben revisar las especificaciones del aislante de la sonda, tomar en cuenta que uno de los criterios para calibrar un instrumento de medición, es que el patrón debe ser por lo menos 10 veces más preciso que el instrumento a calibrar.

- La salida de un termopar es una pequeña señal, así que es susceptible de error por ruido eléctrico. La mayoría de los instrumentos de medición rechazan cualquier modo de ruido (señales que están en el mismo cable o en ambos) así que el ruido puede ser minimizado al retorcer los cables para asegurarse que ambos recogen la misma señal de ruido. Si se opera en un ambiente extremadamente ruidoso, (Ej.: cerca de un gran motor), es necesario considerar usar un cable de extensión protegido.
- Otro factor son los voltajes en modo común, ya que aunque las señales del termopar son muy pequeñas, voltajes mucho más grandes pueden existir en el output del instrumento de medición. Estos voltajes pueden ser causados tanto por una recepción inductiva (un problema cuando se mide la temperatura de partes del motor y transformadores) o por las uniones a conexiones terrestres. Si existe alguna conexión terrestre pueden existir algunos voltios entre el tubo y la tierra del instrumento de medición. Estas señales están una vez más en el modo común (las mismas en ambos cables del termopar) así que no causarán ningún problema con la mayoría de los instrumentos siempre y cuando no sean demasiado grandes. Voltajes del modo común pueden ser minimizados al usar termopares aislados.

Se debe considerar tres leyes fundamentales en el uso de termopares:

1. Ley del circuito homogéneo. En un conductor metálico homogéneo no puede sostenerse la circulación de una corriente eléctrica por la aplicación exclusiva de calor.

2. Ley de los metales intermedios. Si en un circuito de varios conductores la temperatura es uniforme desde un punto de soldadura 'A' a otro 'B', la suma algebraica de todas las fuerzas electromotrices es totalmente independiente de los conductores metálicos intermedios y es la misma que si se pusieran en contacto directo 'A' y 'B'.

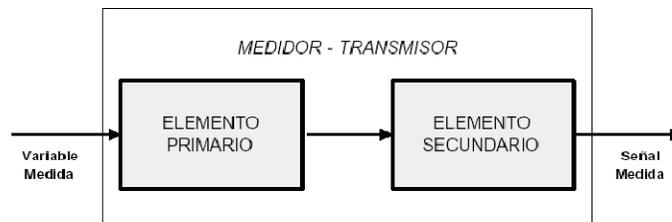
3. Ley de las temperaturas sucesivas. La f.e.m. generada por un termopar con sus uniones a las temperaturas T1 y T3 es la suma algebraica de la f.e.m. del termopar con sus uniones a T1 y T2 y de la f.e.m. del mismo termopar con sus uniones a las temperaturas T2 y T3.

Estas leyes hacen evidente que en el circuito se desarrolla una pequeña tensión continua proporcional a la temperatura de la unión de medida, siempre que haya una diferencia de temperaturas con la unión de referencia.

#### **4.2. Transductores de presión**

La presión, junto con la temperatura, constituyen las variables que más frecuentemente se miden y controlan en los procesos químicos industriales. En las mediciones de presión no solo se necesita un sensor como en los termopares, aquí se usa un transductor, como se muestra en la figura 37, el cual dará una señal proporcional a la presión medida en un rango de 4-20 mA, que será la señal que el PLC recibirá interpretándola en datos de presión.

**Figura 37. Diagrama de un transductor**



Se debe tener especial cuidado en la selección del sensor de presión de combustible a la hora de monitorear líquidos o gases a altas temperaturas se debe asegurar que está entre el rango en el cual tiene capacidad el sensor, esto está disponible en la mayoría de la hoja de especificaciones del fabricante. Muchos sensores de presión tienen un rango de compensación de temperatura que corrige el error a medida que la temperatura aumenta o disminuye, este error afecta el cero y el span. El sensor, se muestra en la figura 38, tendrá que soportar una presión de 200 PSI, temperaturas de más de 200 °C y por el correrá un caudal de hasta 10 GPM estos son los parámetros a considerar, éste debe proporcionar una salida de 4-20 mA, para determinar en el PLC el valor de presión dentro de la tubería. Las características del transductor de presión se muestran en la tabla VII y su aspecto exterior en la figura 38.

**Tabla 7. Datos característicos de transductor de presión**

<b>Item</b>	Pressure Transducer
<b>Range</b>	0 to 300 psi
<b>Accuracy</b>	+/- 1% Full Scale
<b>Output</b>	4 To 20 mA DC
<b>Power Required</b>	10 to 36 DC
<b>Process Connection</b>	1/4" NPT
<b>Electrical Connections</b>	1/2" NPT Male Conduit
<b>Lead Length (In.)</b>	36
<b>Wetted Materials</b>	316 Stainless Steel
<b>Housing</b>	Stainless Steel
<b>Operating Temp.</b>	-30 To 300 °C
<b>NEMA Rating</b>	4X
<b>Max. Pressure (PSI)</b>	2400
<b>Compatible With</b>	Any Process Compatible with Stainless Steel
<b>Includes</b>	Instructions
<b>Manufacturers Warranty Length</b>	1 Year

Fuente: <http://www.grainger.com/Grainger/wwg/viewCatalogPDF.shtml?browserCompatible=true&toolbar=false&CatPage=686&Catalog=main> 7/4/2010

**Figura 38. Transductor de presión.**



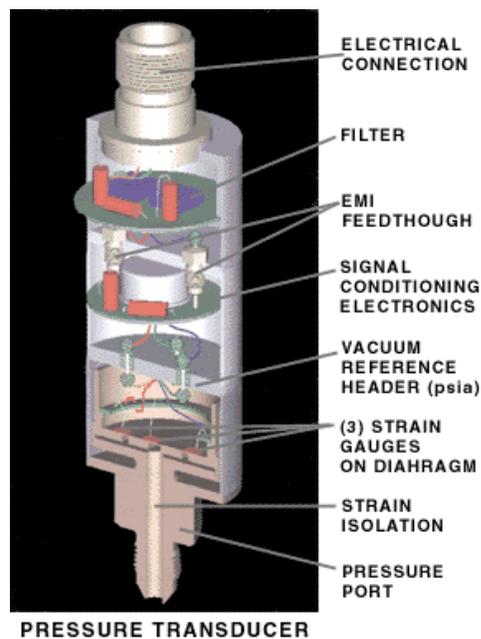
Fuente: <http://www.grainger.com/Grainger/DWYER-Pressure-Transmitter-2HLT1?Pid=search>

11/3/2010

Con su rosca NPT se coloca en algún punto de la tubería en donde se quiera medir la presión.

Como principio de funcionamiento, estos sensores industriales están contruidos utilizando un diafragma interno resistente a ambientes químicos agresivos siendo para este propósito el resto de piezas de acero inoxidable. La presión aplicada provoca el desplazamiento del diafragma, y este desplazamiento se mide por un transductor de posición, las partes internas del transductor de presión se muestran en la figura 39.

**Figura 39. Partes de un transductor de presión**



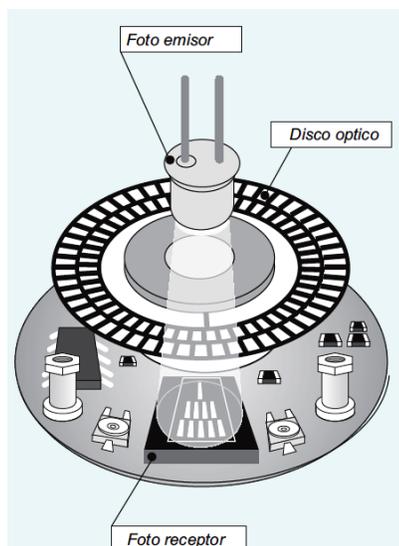
Fuente: <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/mabel/materias/manometros.html> 3/5/2010

### 4.3. Medidores de caudal

Para medir el caudal de combustible que se suministra al horno se utiliza el principio de funcionamiento de las bombas de engranajes que alimentan el horno de combustible, por ser bombas de desplazamiento positivo, éstas impulsan un volumen de líquido constante por revolución. Colocando un *encoder incremental*, que da un pulso a determinado desplazamiento angular de los engranes de la bomba y este valor mediante una conversión da el resultado en galones.

Los *encoders* son dispositivos que se conectan mecánicamente a un eje con el objeto de obtener la información de la posición angular de éste.

**Figura 40. Partes de un *encoder incremental***

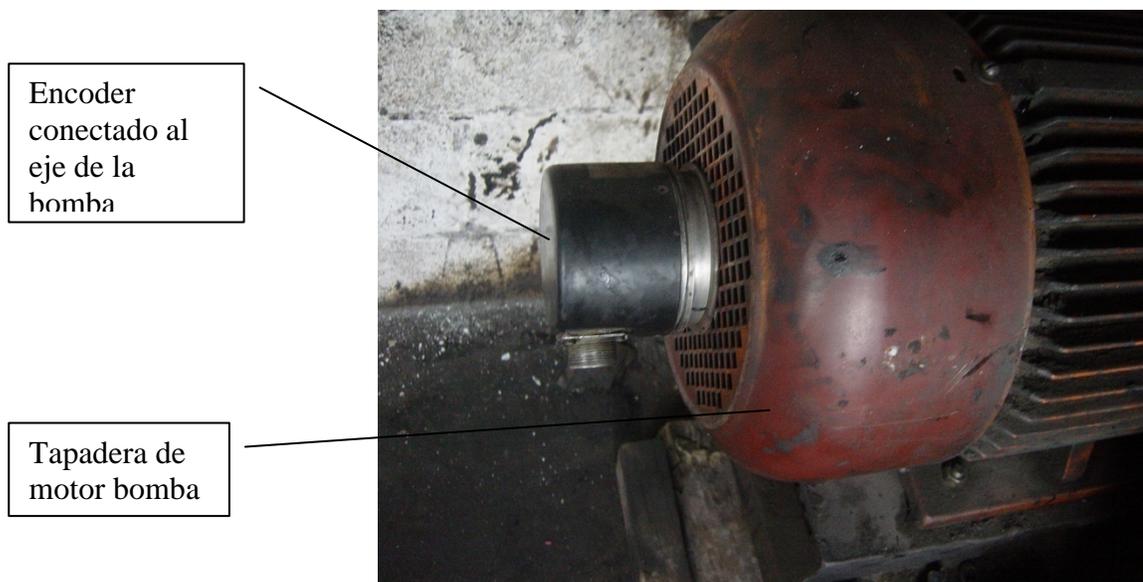


Fuente: <http://bc.inter.edu/facultad/arincon/encoderIncrementales.pdf> 9/12/2009

Los *encoder* incrementales como el de la figura 40, tienen dos salidas desfasadas para poder determinar el sentido de giro pero en este caso únicamente interesa el conteo de pulsos por lo que sólo se utiliza una señal de

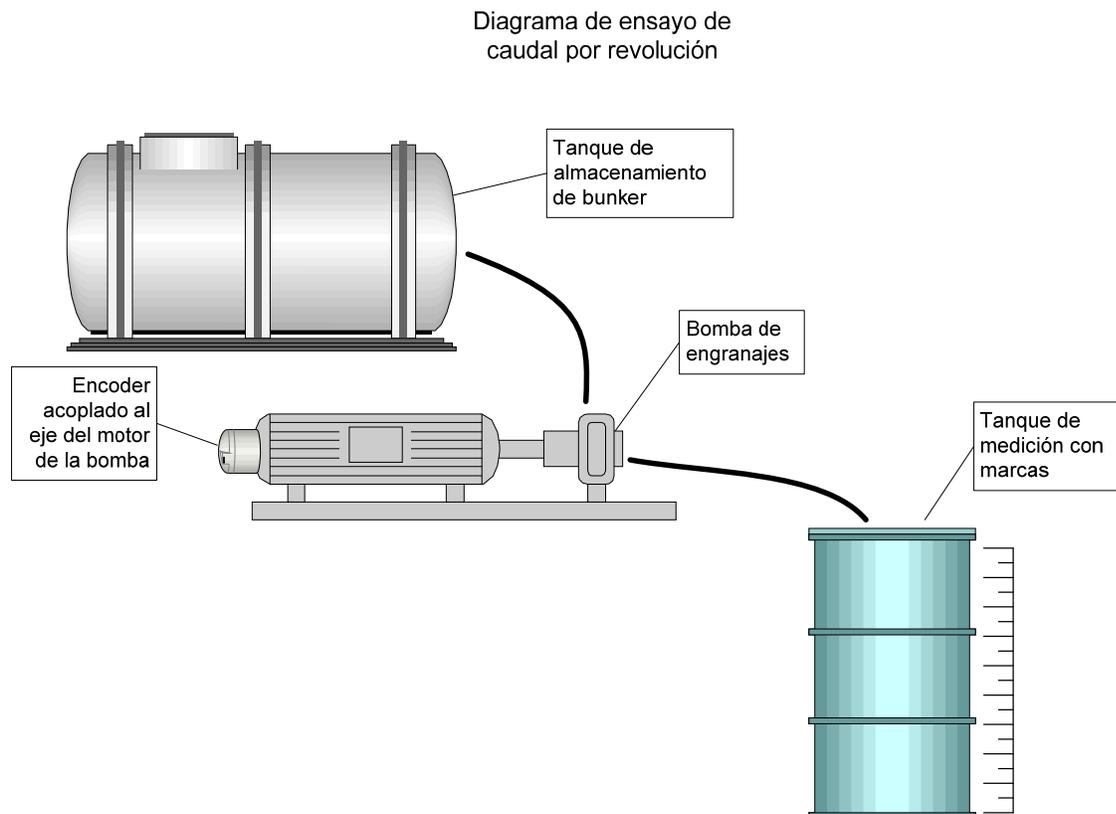
salida. Para el acople del encoder se auxilia de la tapadera metálica del motor que en este caso es lo suficientemente rígida y resistente para sostener el *encoder* y mediante un acople flexible se conecta al eje de la máquina siguiendo éste las revoluciones de la bomba, como se hace referencia en la figura 41.

**Figura 41. Instalación de encoder en carcasa de motor**



Realizando ensayos previos se pudo determinar que el volumen que impulsaba la bomba por revolución, este ensayo se realiza midiendo la cantidad de pulsos que lleva el encoder para llenar cierta cantidad de combustible dentro de un recipiente el cual conocemos su volumen. Con un barril con varias marcas con la misma separación se realizan varias pruebas verificando el caudal de la bomba, el esquema de esta prueba se observa en la figura 42.

**Figura 42. Ensayo para determinar el caudal por revolución de una bomba de engranes**



Este volumen es de **0.007349389 Gal.**

De esta manera, se obtuvo una forma de determinar el combustible consumido por el horno, utilizando intervalos de tiempo para medir el combustible tendremos el caudal, y se obtendrá el caudal instantáneo a medida que los intervalos de medida de tiempo sean más cortos, procurando no acercarse al periodo que hay entre cada pulsación del encoder ya que esto daría lecturas erróneas o poco exacta, por esto se contarán los pulsos en 1 segundo para medir el caudal que a una velocidad cercana a las 1800 RPM se tendrán aproximadamente 3000 pulsos por segundo, con lo cual se obtendrán datos más exactos.

#### **4.4. Finales de carrera**

Los finales de carrera tienen un papel importante dentro de este proceso, por el tipo de trabajo pesado que se realiza se buscan sensores robustos que soporten golpes de los lingotes y movimientos bruscos, para esto se utilizan finales de carrera de rodillo metálico abatible ajustable, esto para ajustar la posición en la que se desea el contacto con la pieza en movimiento. Ellos protegen que se salga de sus rieles el carro del empujador de lingotes dentro del horno. De igual manera, indican su posición máxima a la barra que extrae los lingotes al rojo vivo del horno, además indican la posición máxima y mínima del transportador de lingotes a la salida del horno.

#### **4.5. Interruptor capilar de temperatura**

En el proceso, el interruptor capilar de temperatura se utiliza para el control de las resistencias calefactoras de bunker. Este tiene un funcionamiento muy sencillo, teniendo tres terminales: normalmente abierto NO, normalmente cerrado NC y una terminal común. Con esto al llegar el sensor a la temperatura seleccionada acciona el interruptor, el interruptor se muestra en la figura 43. Para este caso la señal es enviada al PLC en donde la interpreta y decide si se encienden las resistencias calefactoras al descender la temperatura por debajo de la seleccionada.

**Figura 43. Switch de temperatura capilar**



Fuente: Termostato de tubo capilar, VETO Y CIA. LTDA San Eugenio, España, Cat.  
68.350, ENE/04

Éste puede ser utilizado en gases, líquidos y sólido. Con una precisión de  $\pm 2.5$  °C que es aceptable para el tipo de variable, el cual busca únicamente mantener al combustible a una temperatura donde su viscosidad sea aceptable para la atomización, sin calentarlo demasiado para que se creen burbujas en el combustible que dificulten el proceso. El dispositivo trabaja de 50 a 300 °C, el bulbo está hecho de cobre y en su interior contiene aceite de silicona.



## 5. DISEÑO DE FUNCIONAMIENTO DEL HORNO

Con todos los sistemas descritos se procede a la fusión de estos para el funcionamiento del horno, siendo siempre la temperatura la variable controlada y el resto las variables por manipular.

### 5.1. Relación entre las variables

En el diseño del horno la finalidad es tener una tasa de producción de 30 toneladas hora equivalente a 66,138 libras/hora y para calentar cada libra a 1200° C requiere 340 BTU

$66,128 \times 340 = 22,5$  MBTU/hora

El dato base para el cálculo del aire necesario en la combustión es:

Para generar 100btu se necesita 1pie cúbico de aire.

Con una capacidad calorífica del bunker de 140,000 BTU/galón

Entonces para cada galón de combustible se necesita 1,400 pies cúbicos de aire

El horno tendrá una demanda máxima aproximada de 320 galones/hora, los ventiladores instalados con capacidades de:

- Combustión frontal 558,000 cfh
- Atomización frontal 102,000 cfh
  
- Combustión lateral 456,000 cfh
- Atomización lateral 90,000 cfh

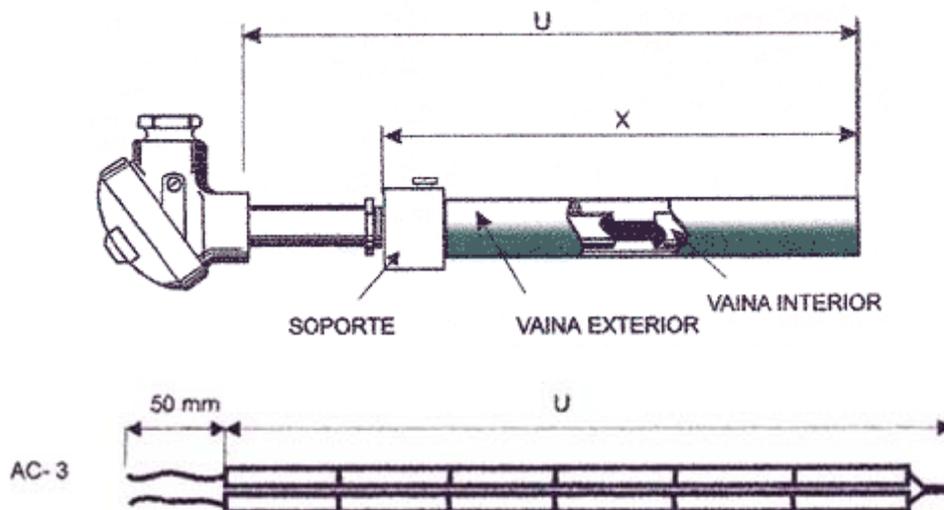
Así se tendrá 192 cfh fijos correspondientes al aire de atomización y 1013,000 cfh variables correspondientes al aire de combustión. Que varían respecto a la apertura de la válvula de mariposa. De un requerimiento de aire de 500,000cfh

dado por los BTU requeridos por el horno considerando una eficiencia del 50%, con esto se puede apreciar que se estará utilizando la mitad de la capacidad de aire total que se tiene disponible con la capacidad de los ventiladores.

## **5.2. Implicaciones en el control del horno**

- La principal implicación que se debe tomar en cuenta es la alta temperatura a la que trabaja el horno, esta llega a ser de 1450 °C, la cual se mide con termopares. Existen varios tipos de termopares disponibles en el mercado que su rango superior de medición es de alrededor de los 1800 °C en su hoja de características como: los termopares tipo R, S, y B pero por el tipo de proceso no es solo de considerar la temperatura; la instalación del termopar debe resistir vibración, ser azotada por la llamas de fuego impulsadas por los ventiladores de atomización y combustión, ambiente químico agresivo por la combustión del bunker y por supuesto la alta temperatura. Para soportar debidamente las condiciones anteriores, el termopar debe ir dentro de una cubierta protectora como se muestra en la figura 44.

**Figura 44. Tubo capilar y vaina de protección de termopar**



Fuente: <http://www.igsac.com.pe/termocuplas-termopozos-productos.html> 7/4/2010

La cabeza del termopar debe estar debidamente aislada del ambiente a medir para evitar que sufran daños las conexiones y el cableado, el cual se debe alejar en la medida en que sea posible del calor para evitar daños en el cableado.

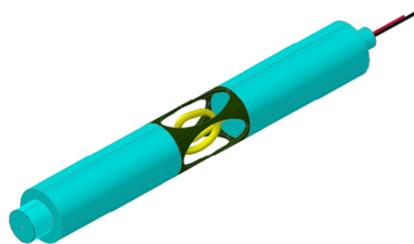
Para evitar una mala lectura del termopar el cable transmisor de la señal hasta el dispositivo de control debe ser especial para el tipo de termopar que se está utilizando, ya que por el principio de funcionamiento de los termopares un empalme con otro metal provocaría una nueva diferencia de voltaje que afectaría la medición.

- El caudal de combustible, en un principio tiene alta viscosidad, y luego de entrar en contacto con las resistencias calefactoras su viscosidad se reduce, pero la temperatura aumenta, por el interés en conocer la cantidad de combustible que ingresa a los quemadores, éste se debe medir a la salida del tanque de precalentamiento, de cual sale a una temperatura de

150 °C, en busca de una forma eficiente para medir el caudal de combustible se encuentran muchos tipos de sensores de caudal pero la mayoría de estos tienen una temperatura máxima de 100 °C y por arriba de esta temperatura son muy costosos, la solución a este problema es mediante la medición indirecta del combustible contando las vueltas que da la bomba al suministrar hacia los quemadores, de esta forma el único sensor que se coloca en la línea de petróleo es un sensor de presión que brinda una retroalimentación de que el combustible está siendo suministrado de manera correcta hacia los quemadores.

- El aire de combustión tiene la característica de mantener una presión en el rango de las OSI (onzas por pulgada cuadrada), este aire al salir de los intercambiadores de calor lleva una temperatura de alrededor de los 400° centígrados, los transductores de presión de aire para ese rango de temperatura y las presiones relativamente bajas que se manejan comparadas con los sistemas neumáticos son bastante costosos y difíciles de adquirir además que su estructura es bastante delicada por la naturaleza del sensor, se muestra en la figura 45.

**Figura 45. Sensor de presión de aire 0-64 osi (0-4 psi)**



Por lo tanto, se debe prestar especial cuidado al colocar el sensor, procurando no aplicar torque del lado de la conexión eléctrica ya que esta carga cae directamente sobre el elemento sensor, además se debe realizar un diseño

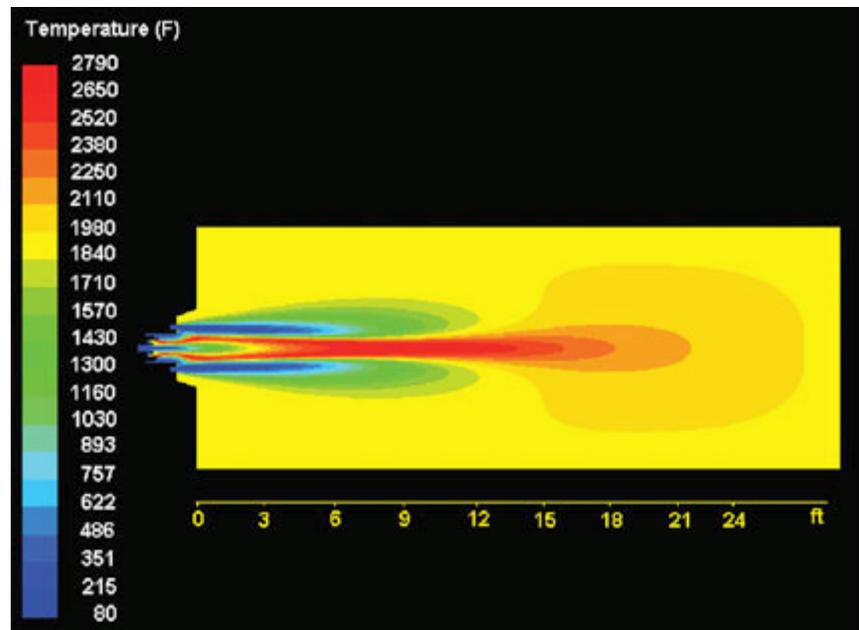
especial que proteja el sensor una vez instalado en la admisión de aire a los quemadores.

- También se debe tener en cuenta que los lingotes que maneja el horno son de casi media tonelada y en el momento de la extracción y la alimentación de estos al horno se producen vibraciones que pueden afectar el montaje de los distintos sensores del proceso, principalmente a los finales de carrera colocados en los sistemas de alimentación. La instalación de los dispositivos del horno debe realizarse tomando esto en cuenta y realizar revisiones periódicas del estado de los sensores.

### **5.3. Variables en el proceso**

- La temperatura dentro del horno (precalentamiento, calentamiento e igualación) oscila entre los 1200 y 1400 grados en la zona más caliente que es la zona de calentamiento, bajando esta temperatura a 700 grados en la zona de precalentamiento y a 1100 en la zona de igualación. La distribución de las temperaturas que se presentan en llama del quemador son como se muestra en la figura 46:

**Figura 46. Temperatura de la llama de un quemador**



Fuente: <http://www.xmgpkj.com/en/pro.asp?Pid=10&a=4> 4/2/2010

- Caudal de aire de combustión: este caudal estará regulado por las válvulas de mariposa motorizadas, las cuales se calcula su apertura exacta por medio de la señal de un *encoder* conectado al motor y sensores de final de carrera.
- Temperatura de aire de combustión:  
El precalentar el aire produce un ahorro de energía modesto a cambio de una pequeña inversión inicial, esto produce grandes beneficios a lo largo tiempo en ahorro energético.
- Caudal de aire de atomización:  
Para el aire a atomización se calcula el caudal necesario para asegurar una óptima atomización del combustible y este se deja constante, dejando la regulación del aire que se aporta a la llama al aire de combustión.

- Caudal de combustible:

El caudal es regulado por la velocidad a la que trabaja la bomba de engranajes, la cual impulsa una determinada cantidad de combustible por cada revolución, así que manipulando la velocidad de ésta, por medio de un variador de frecuencia se consigue un caudal regulable.

- Temperatura de combustible:

El combustible debe tener baja viscosidad para poder ser atomizado en los quemadores, una serie de resistencias calefactoras colocadas en diferentes puntos en el recorrido del combustible

### **5.3.1. Variables a monitorear**

Éstas son las señales que llegan a los diferentes sensores del sistema, con las cuales el control toma las decisiones para ajustar los valores de los dispositivos para conseguir el comportamiento que se desea del horno.

- Temperatura dentro del horno:

Obtenida por los termopares del horno, que envían una señal interpretada por el módulo Fx2n-2LC del PLC que dará en un registro del PLC la temperatura en grados centígrados.

- Temperatura del combustible:

Se coloca un controlador de temperatura en las resistencias de calentamiento de combustible de las botellas del horno y en el tanque de precalentamiento del horno, el cual activa las resistencias al caer estas por debajo de la temperatura set y las desactiva al sobrepasar esta temperatura por 5 grados. Este es un control poco preciso con una señal 0 – 1, suficiente para mantener el combustible a la temperatura adecuada sin que

se produzcan grandes cantidades de vapores en el sistema de alimentación de combustible que nos dificulten la alimentación.

La presión de la alimentación de combustible se detecta por medio de un transductor de presión especialmente diseñado para alta temperatura, el cual da una señal de confirmación de que el combustible se está suministrando a la presión adecuada.

- Presión de aire de combustión será un auxiliar que corroborará la existencia de caudal de aire en las tuberías, esto dará una guía de alguna falla en ventiladores o en las válvulas.
- Velocidad de la bomba de combustible, verificando junto con ésta el caudal mediante el encoder conectado al eje del motor.

### **5.3.2. Variables a manipular**

Con las variables a manipular se tiene la capacidad de hacer cambiar su valor o estado de manera directa a través de los actuadores, con la modificación de éstas se establece el control del horno pues con esto se tiene el control de temperatura del horno que es nuestra variable controlada. Entre las variables manipuladas están:

- Frecuencia de alimentación del motor de la bomba de combustible.  
Manipulada mediante el variador de frecuencia el cual recibe su señal de 4-20 mA desde un módulo digital análogo del PLC, de esta manera se tiene control sobre la velocidad a la cual está girando el motor, y como este tiene asociado un encoder que mide el caudal por medio de las revoluciones de la bomba se convierte en un controlador de caudal con el variador de frecuencia siempre controlado desde el PLC.

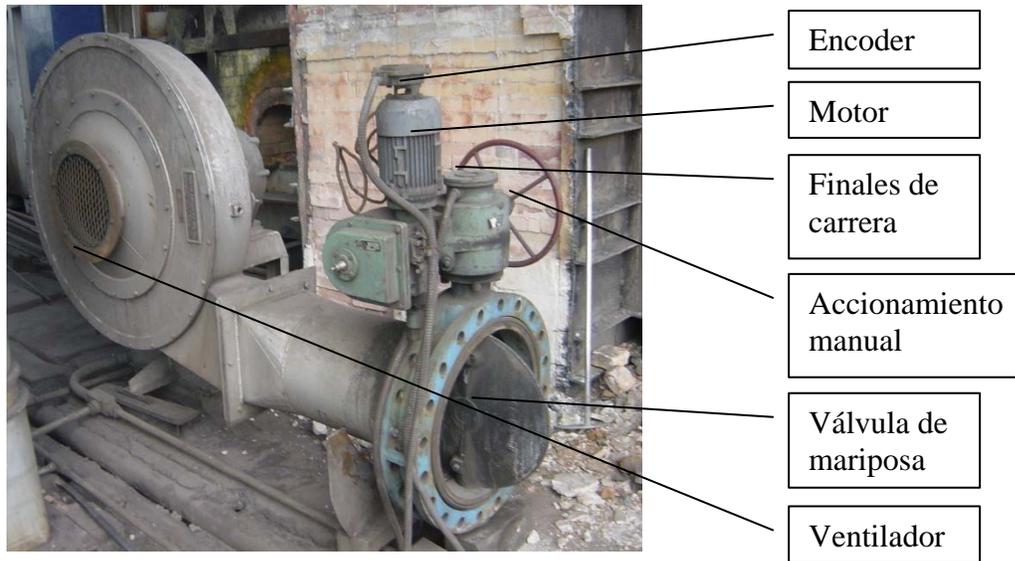
- Estado de las resistencias de precalentamiento (encendido – apagado). Estas resistencias tienen un control de temperatura regulable que hace que las resistencias se apaguen al pasar sobre el *set point* y se enciendan al estar por debajo de éste, en un rango de  $\pm 2.5$  °C del *set point*. Instalados según se muestra en la figura 47:

**Figura 47. Instalación de interruptor capilar de temperatura**



- La apertura de la válvula de admisión de aire de combustión: con un sistema de posicionamiento programado desde el PLC, la válvula busca una posición determinada gracias al accionamiento de un motor y mediante un *encoder* colocado en el eje del motor. Este sistema brinda una forma precisa de obtener la posición de la válvula, con lo cual se puede regular la cantidad de aire suministrada al horno, la disposición de los equipos de control de la válvula se muestran en la figura 48.

**Figura 48. Válvula de control de aire de combustión**



- Se obtiene el control sobre los dispositivos de alimentación y extracción de lingotes, a través del estado de los motores eléctricos que manejan la barra deshornadora y la alimentación a través de las electroválvulas que controlan el pistón hidráulico.

#### **5.4. Diagrama de funcionamiento del horno**

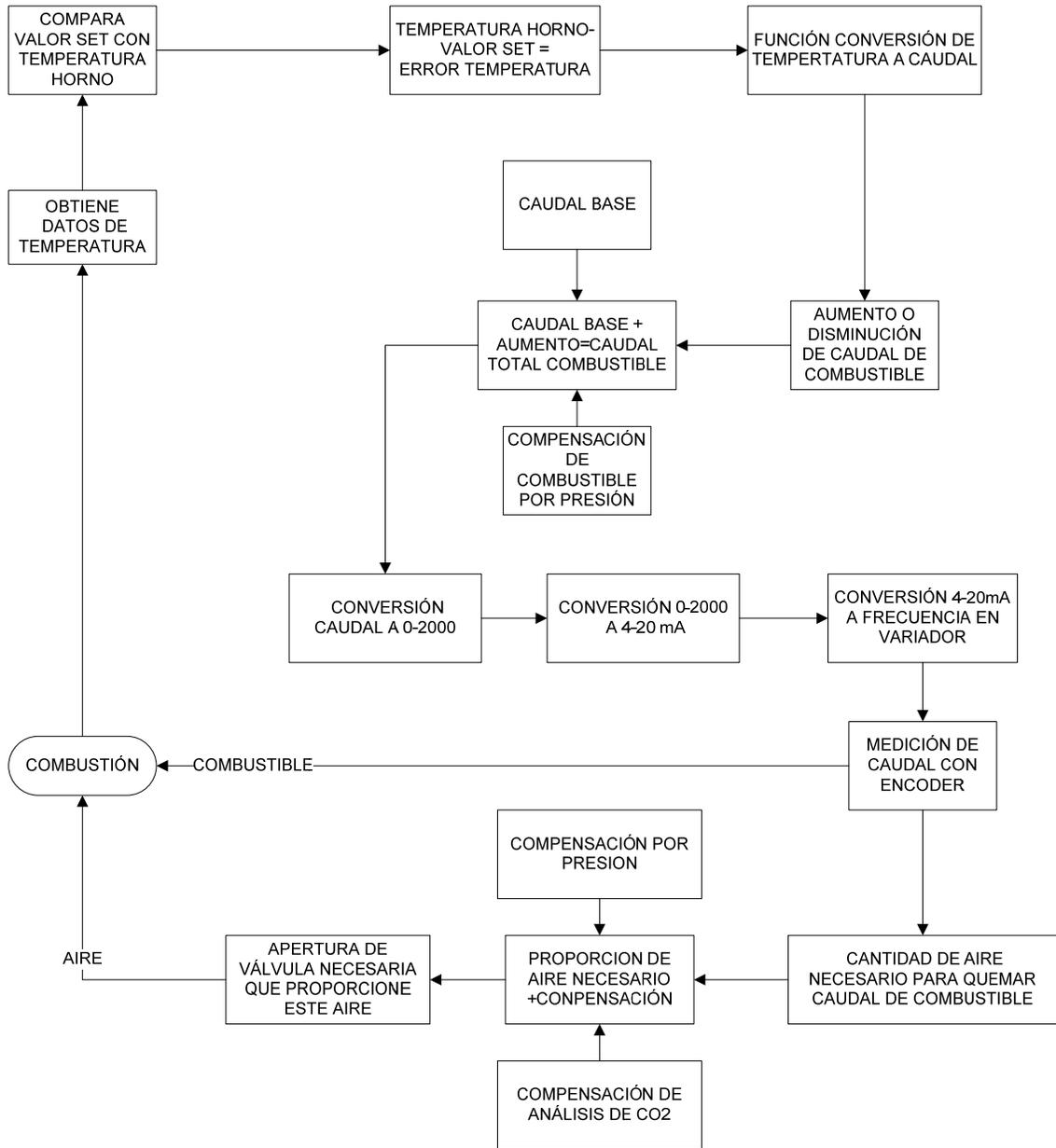
Por medio de los diagramas se puede interpretar de mejor manera el funcionamiento del horno, la forma en la que están relacionados los distintos dispositivos se puede apreciar en el diagrama P&ID y en el diagrama de bloques se interpreta la forma en la que se toma las decisiones.

#### **5.4.1. Diagramas de bloques sobre funcionamiento del horno**

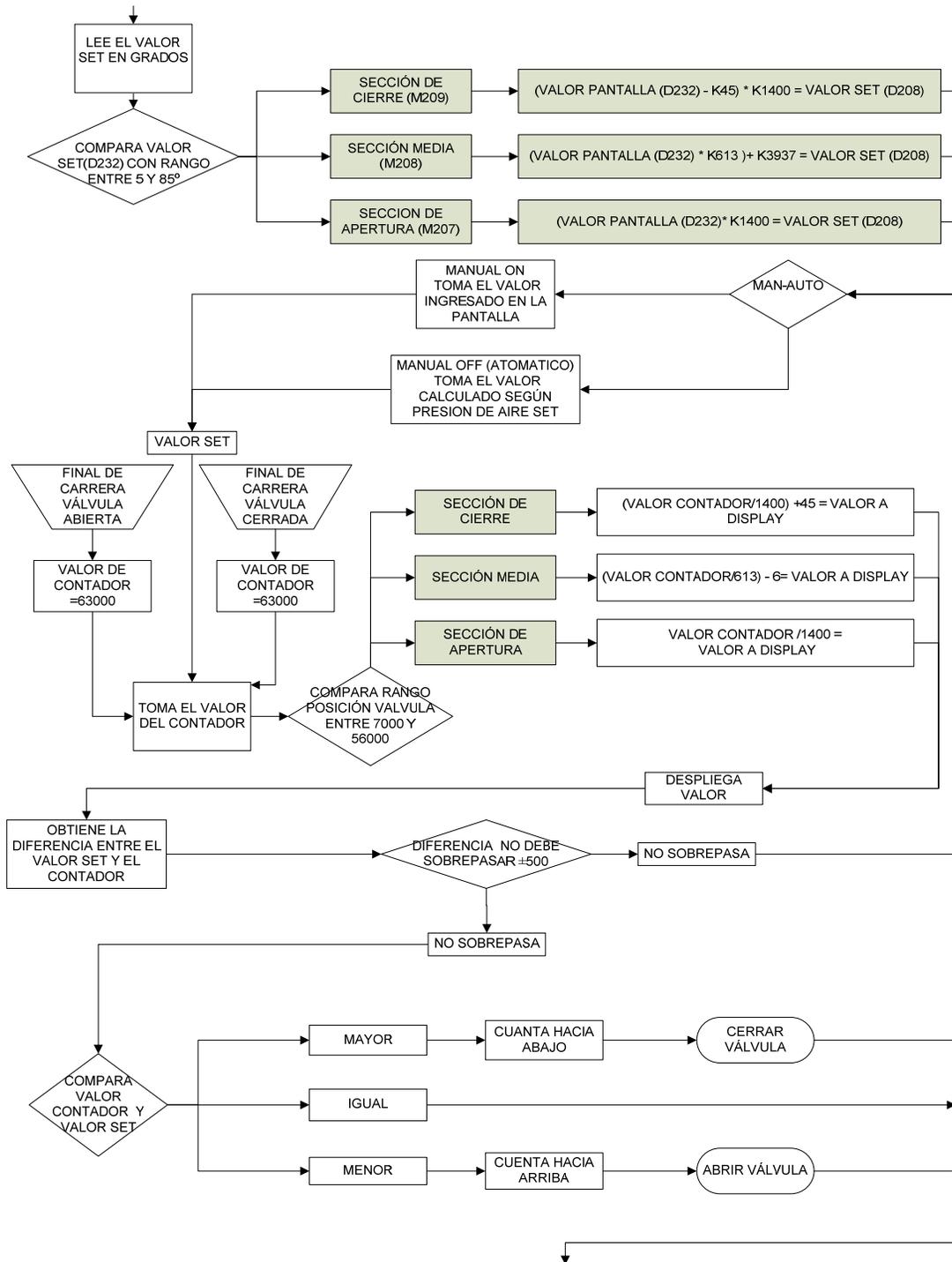
Un diagrama de bloques da el esquema de la toma de decisiones en el sistema de control del horno, con base en esto es que se desarrolla la estrategia de control dentro del PLC, este esquema es la guía que orienta al programador sobre su meta y las relaciones que debe realizar dentro del programa.

De la misma manera, bloque de control que indica la apertura de aire se presenta su descripción en un diagrama aparte, el bloque de la válvula recibe el valor en grados de apertura y controla un motor eléctrico que posiciona la válvula en la posición deseada, el desarrollo de este controlador se realiza por medio de un programa en escalera dentro del PLC y se utiliza como guía el diagrama de la figura 49.

Figura 49. Diagrama de bloques de funcionamiento del horno



**Figura 50. Diagrama de bloques de la secuencia para el control de válvulas de alimentación de aire**

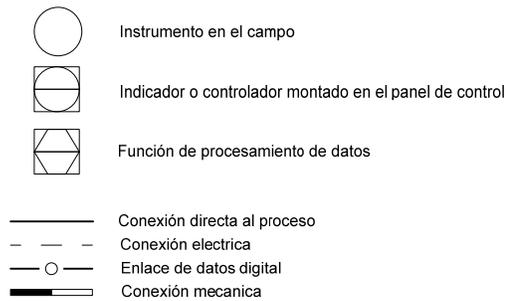


### 5.4.2. P&ID del control del horno de calentamiento de lingotes de acero

El P&ID se refiere a un diagrama de tuberías e instrumentación, en este tipo de diagramas se muestran los instrumentos del proceso y a que tuberías están conectados, también se muestra el flujo de información entre los dispositivos y se puede saber que dispositivo tiene efecto sobre otro.

Para interpretar este diagrama es necesario conocer los símbolos que se muestran en la figura 51:

**Figura 51. Símbolos en P&ID**



La lista de instrumentos se presenta en la siguiente tabla.

**Tabla VIII. Lista de instrumentos en diagrama P&ID**

ES001	Control de encendido del motor del ventilador de atomización 1
ES002*	Control de encendido del motor del ventilador de atomización 2
TE003	Termopar área igualación
TCI003	Control de temperatura principal del horno
FY003	Bloque de función de temperatura a combustible
TE004	Termopar área calentamiento
TI004	Indicador de temperatura área calentamiento
TE005	Termopar área precalentamiento
TI005	Indicador de temperatura área precalentamiento
ES006	Control de encendido del motor del ventilador de combustión 1
ES007*	Control de encendido del motor del ventilador de combustión 2
FV008	Válvula de mariposa reguladora de flujo de aire quemadores frontales

FV008	Válvula de mariposa reguladora de flujo de aire quemadores frontales
ZO008	límite de carrera válvula abierta quemadores frontales
ZC008	límite de carrera válvula cerrada quemadores frontales
ZT008	Transmisor de posición de válvula quemadores frontales
FV009*	Válvula de mariposa reguladora de flujo de aire quemadores laterales
ZO009*	límite de carrera válvula abierta quemadores laterales
ZC009*	límite de carrera válvula cerrada quemadores laterales
ZT009*	Transmisor de posición de válvula quemadores laterales
FCI010	Control e indicador de flujo de aire
FY011	Bloque de función de retroalimentación de aire necesario con base en la presión en la tubería y análisis de la mezcla.
AT012	Transmisor de valores de co2
AC012	Control de mezcla de gases
ES013	Control de encendido del motor del ventilador de chimenea
TW014	Termo pozo de botella calefactora frontal derecha
TSH014	Interruptor activado por alta temperatura en botella calefactora frontal derecha
TC014	Controlador de temperatura de botella calefactora frontal derecha
TW015*	Termo pozo de botella calefactora frontal izquierda
TSH015*	Interruptor activado por alta temperatura en botella calefactora frontal izquierda
TC015*	Controlador de temperatura de botella calefactora frontal izquierda
TW016*	Termo pozo de botella calefactora lateral derecha
TSH016*	Interruptor activado por alta temperatura en botella calefactora lateral derecha
TC016*	Controlador de temperatura de botella calefactora lateral derecha
TW017*	Termo pozo de botella calefactora lateral izquierda
TSH017*	Interruptor activado por alta temperatura en botella calefactora lateral izquierda
TC017*	Controlador de temperatura de botella calefactora lateral izquierda
TW018	Termo pozo de tanque de precalentamiento
TSH018	Interruptor activado por alta temperatura en tanque de precalentamiento

TC018	Controlador de temperatura de tanque de precalentamiento
PSV019	Válvula de alivio de presión de tanque de precalentamiento
FCI020	Controlador de flujo de combustible
FY021	Bloque de función de caudal de combustible a aire necesario
SC022	Controlador de velocidad de la bomba de combustible
ST022	Transmisor de velocidad de la bomba de combustible
SI022	Indicador de velocidad de la bomba de combustible
PT023	Transmisión de presión de combustible a la salida del tanque de precalentamiento
PI023	Indicador de presión de combustible a la salida del tanque de precalentamiento
FY024	Bloque de función para la retroalimentación del controlador de flujo de combustible
PT025	Transmisor de presión de aire de combustión frontal
PI025	Indicador de presión de aire de combustión frontal
PT026*	Transmisor de presión de aire de combustión lateral
PI026*	Indicador de presión de aire de combustión lateral
ES027	Control de encendido de resistencia calefactora de tanque de almacenamiento
LE027	Elemento sensor de nivel de tanque de almacenamiento
LSL027	Alarma de nivel bajo de tanque de almacenamiento

Los instrumentos marcados con un asterisco no se muestran en el diagrama, esto con fines de una mejor interpretación del funcionamiento del horno en el diagrama, para poder entender la ubicación de estos dispositivos, se debe ver los diagramas de distribución de aire y distribución de combustible.

Aparte de los instrumentos, los dispositivos que se pueden observar en el diagrama son los siguientes:

**Tabla IX. Lista de quipos en diagrama P&ID**

AF1	Ventilador de atomización frontal
AF1-EM	Motor eléctrico de ventilador de atomización frontal
AF2*	Ventilador de atomización lateral
AF2-EM*	Motor eléctrico de ventilador de atomización lateral
AF3	Ventilador de combustión frontal
AF3-EM	Motor eléctrico de ventilador de combustión frontal
AF4*	Ventilador de combustión lateral
AF4-EM*	Motor eléctrico de ventilador de combustión lateral
AF5	ventilador de tiro forzado de la chimenea
AF5-EM	motor eléctrico de ventilador de tiro forzado de la chimenea
TK1	tanque de abastecimiento
TK2	tanque de precalentamiento
EX1	resistencia calefactora botella frontal derecha
EX2*	resistencia calefactora botella frontal izquierda
EX3*	resistencia calefactora botella lateral derecha
EX4*	resistencia calefactora botella lateral izquierda
EX5	resistencia calefactora de tanque de precalentamiento
EX6	resistencia calefactora de tanque de abastecimiento.

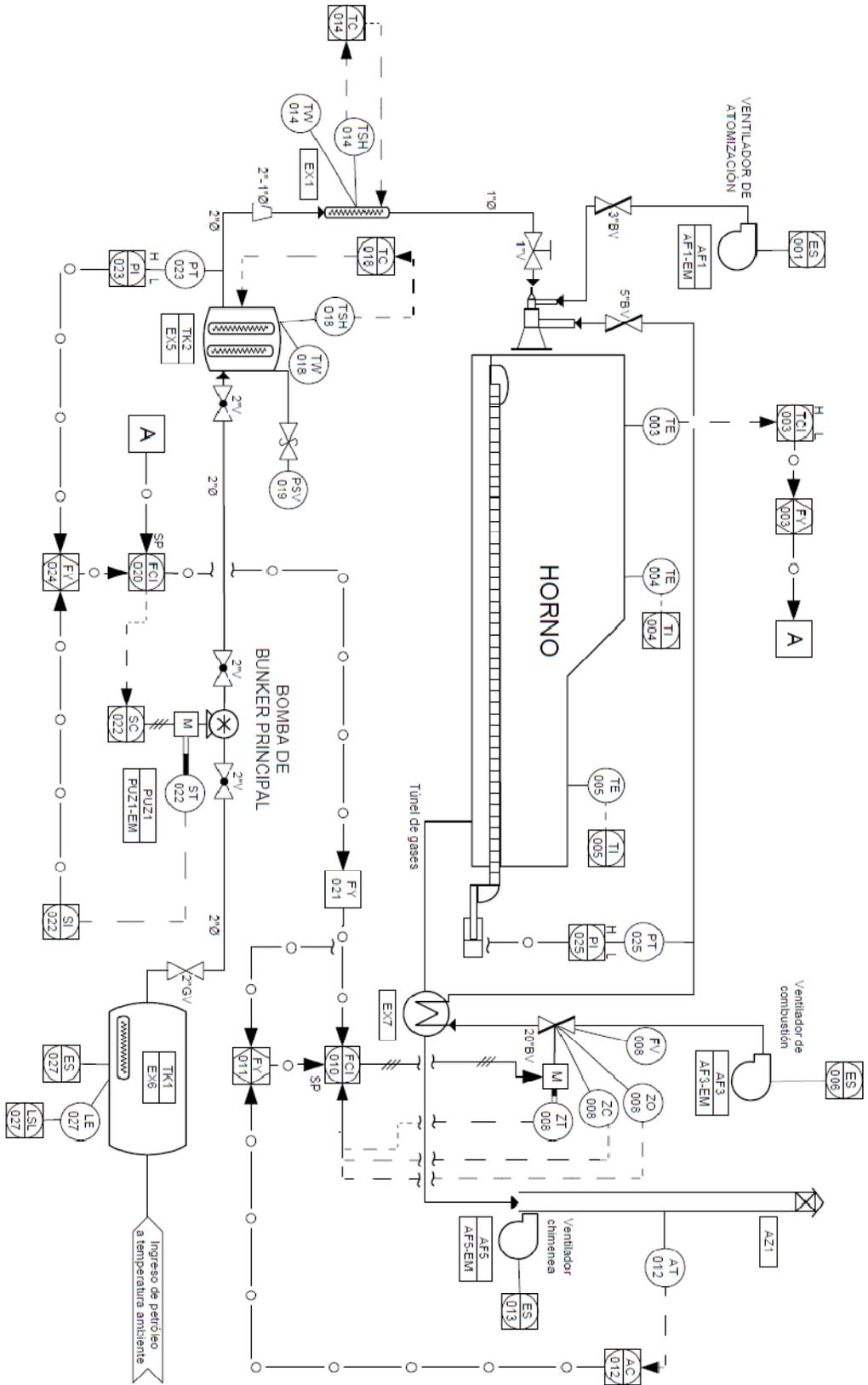


Figura 52. Diagrama P&ID de horno de calentamiento de lingotes de acero

## 6. DISEÑO DE CONTROL Y MONITOREO DEL SISTEMA

El sistema de control será llevado por el PLC y la supervisión la realizará el software de LabVIEW desde la PC en la cabina de control general de la planta y una HMI en cuarto de control de los dispositivos del horno llevará también una supervisión y el ingreso manual de los parámetros del horno.

### 6.1. Sistema de control para el horno

El control está realizado por varios lazos, independientes unos de otros, el principal es un lazo de retroalimentación que a partir de las lecturas de temperatura este modifica la cantidad de combustible suministrado al horno, y este sistema a la vez se retroalimenta de un sensor de presión de combustible el cual garantiza que el petróleo lleva una presión. Un control de razón de entrada de aire suministra el aire necesario para quemar el combustible en el punto de una combustión eficiente, se le llama control de razón porque el aire es suministrado de manera proporcional al combustible. Este sistema se asegura que la mezcla se realice de manera eficiente mediante un sensor de análisis de CO<sub>2</sub>, el cual le proporciona una compensación a la señal de la cantidad de aire necesario de modo de que al tener una combustión incompleta rica en combustible o una pobre con mucho aire, éste detecta las anomalías y corrija, además de la compensación por CO<sub>2</sub> un sensor de presión de aire indica de una manera más inmediata que el aire está siendo suministrado de manera adecuada al quemador de combustible.

Los sistemas de calentamiento de combustible son sistemas aislados de retroalimentación de dos posiciones, al detectar que la temperatura cae debajo del valor elegido estos encienden las resistencias calefactoras y al sobrepasar el *set point* estas se apagan, manteniendo la temperatura alrededor del *set point* por  $\pm 2.5$  °C.

## 6.2. Dispositivo de control

El cerebro encargado de llevar a cabo el control del horno y la interpretación de las señales es el PLC MITSUBISHI FX3U con salidas a relé, como el que se muestra en la figura 53.

**Figura 53. PLC MITSUBISHI FX2N-32M**



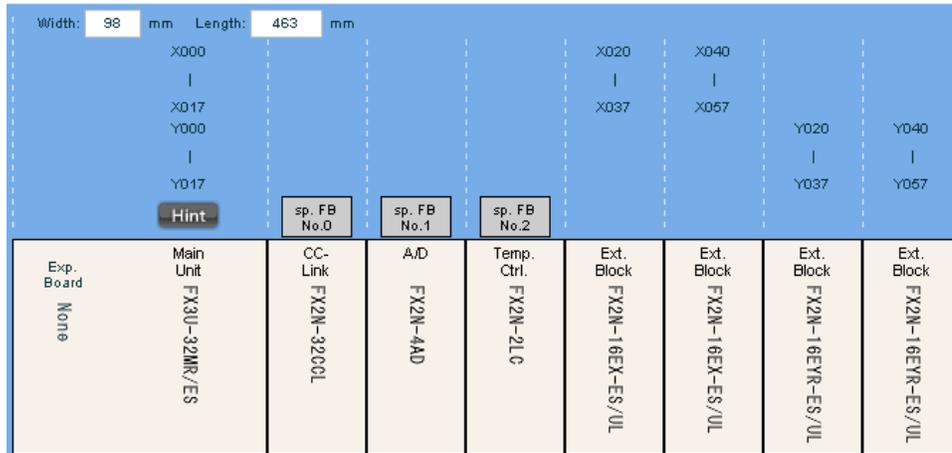
Fuente: <http://www.gdeja.com/product/productshow/1116/3075.html> 12/01/2010

Utilizando el *software* GX DEVELOPER para el desarrollo del programa en lenguaje escalera en el cual se programan todas las tareas que se desea que realice el PLC ante diferentes situaciones, dentro del PLC por medio de instrucciones en escalera se unen las señales de todos los dispositivos con sus respectivos actuadores, y en el mismo lenguaje escalera mediante funciones aritméticas se suman las señales de compensación y se dan los parámetros para los controladores como los variadores de frecuencia y el posicionador de la válvula, el cual con base en comparaciones controla la posición de una válvula mediante el encendido y cambio de giro del motor, retroalimentado mediante un encoder.

Por la cantidad de entradas y salidas que se manejan en el control del horno no es suficiente con las que posee únicamente el módulo principal del PLC, por esto se añaden módulos y su distribución queda según se muestra en la figura

54, gracias a un *software* de Mitsubishi se establece la distribución de los módulos de PLC.

**Figura 54. Disposición de módulos de PLC**



- Módulos de entradas y salidas: por la gran cantidad de dispositivos a conectar en el PLC se presenta la necesidad de añadir módulos adicionales de entradas y salidas, cada módulo auxiliar puede añadir 8 o 16 entradas o salidas extras, aparte de las 16 que trae la unidad principal del PLC, que es lo que trae la unidad FX2n-32MR, que se muestran en la figura 55.

**Figura 55. Módulo auxiliar de 16 entradas y módulo auxiliar de 16 salidas**



Fuente: [http://store.iic.cc/index.php?main\\_page=product\\_info&products\\_id=11977](http://store.iic.cc/index.php?main_page=product_info&products_id=11977) 12/01/2010

- Módulos de lectura de datos de voltaje y corriente análogos: son los encargados de tomar la señal 4-20 mA de los transductores de presión a instalar en el sistema de aire de combustión y en el sistema de alimentación de combustible, como se muestra en la figura 56 y se interpreta por medio de una linealización en un número de 0 a 2000, con lo cual se realiza los cálculos necesarios dentro de la programación en escalera.

**Figura 56. Módulo de 2 canales de entrada análoga**



Fuente: <http://www.178b2b.com/Sells/1893305.html> 12/01/2010

- Módulos de salidas análogas para enviar la referencia (4-20 mA) de velocidad al variador de frecuencia de la bomba de combustible, como el que se muestra en la figura 57, el variador interpretará que a 4 mA dará el mínimo de velocidad y a 20 mA la máxima velocidad en la bomba, estos son el inverso de los módulos AD, este interpreta el valor de un registro entre 0 a 2000 y lo convierte en corriente de 4 a 20 mA.

**Figura 57. Módulo de 2 canales de salida analógica**



Fuente: <http://wwwf2.mitsubishielectric.co.jp/melfansweb/fxspec/fxDirectProductInfoServlet.do=FX2N-4DA> 12/01/2010

- Módulos de lectura de termopares: estos serán los encargados de tomar lecturas de las señales de los termopares instalados en el horno, se muestra en la figura 58, así como del combustible y el aire de combustión, estos tienen la cualidad de tomar la pequeña señal de voltaje generada por un termopar e interpretarla según el termopar que esté leyendo, esto se hace en la configuración del módulo.

**Figura 58. Módulo de lectura de termopares**



Fuente: <http://wwwf2.mitsubishielectric.co.jp/melfansweb/fxspec/fxDirectProductInfoServlet.doFX2N-2LC> 12/01/2010

- Módulos de comunicación en red: para publicar los datos de los diferentes módulos, se muestra en la figura 59, para que la planta completa tenga conocimiento de estos y poder interactuar entre ellos y este sistema.

**Figura 59. Módulo de comunicación CCL**



Fuente: [http://wwwf2.mitsubishielectric.co.jp/melfansweb/fx\\_spec/fxDirectProductInfoServlet.do?FX2N-32CCL](http://wwwf2.mitsubishielectric.co.jp/melfansweb/fx_spec/fxDirectProductInfoServlet.do?FX2N-32CCL) 5/3/2010

### 6.3. Algoritmo de control y secuencia lógica del programa

El programa en su funcionamiento estándar sigue lo indicado en el diagrama de flujo de control de la figura 50 en el capítulo 5 y se busca únicamente conseguir la temperatura del *set point*, pero el horno tendrá distintos procesos como el arranque, el apagado o el estado de baja producción en los cuales la planta a la que alimenta con lingotes a alta temperatura tiene fallos y esto causa que los lingotes dentro del horno estén sometidos por mayor tiempo a altas temperaturas.

#### 6.3.1. Diversos estados de operación del horno

El horno posee diversas características ante diferentes situaciones, para un correcto funcionamiento se debe comprender sus diferentes sistemas y cómo funcionan éstos.

- Secuencia de arranque del horno:
  1. Estando los dispositivos del horno apagados, se acciona el botón de encendido.
  2. Al entrar en estado de inicio, primero se cierran las válvulas de aire de modo que al arrancar los ventiladores de combustión, éstos arranquen con una carga mínima y no forzar su arranque evitando esforzar los aislamientos internos de motor y picos muy altos de corriente, también en este punto se deben encender las resistencias calefactoras de combustible para reducir la viscosidad de éste y facilitar el bombeo.
  3. Se procede a encender el motor de la chimenea y de los ventiladores.
  4. Luego de haber culminado el periodo de arranque de los ventiladores y el amperaje de los motores de estos logre un estado estabilizado, se procede a abrir la válvula de aire, añadiendo carga a los ventiladores.
  5. Con las válvulas de aire abiertas y los ventiladores encendidos se encienden la bombas de combustible y aparece la llama en los quemadores, en este punto entra a funcionar el sistema de control de temperatura buscando el *Set Point*.
  
- Estado de baja producción o paro en la planta:

Al estar la planta con una producción baja o que se pare la producción momentáneamente, la tasa a la que salen los lingotes de acero del horno se reduce drásticamente haciendo que estos permanezcan más tiempo del debido dentro del horno, las consecuencias de ésto lleva a los lingotes a pegarse uno con otro y a dificultar su extracción del horno. Además de esto es un gasto innecesario de combustible. Al estar la planta durante cierto tiempo en paro o con una baja producción el *Set Point* del horno se deberá mantener a una temperatura menor en la que no le cueste retomar la

temperatura de producción y que ahorre combustible cambiando el *Set Point* a un 75% de la temperatura antes del paro, reduciendo la velocidad de las bombas de alimentación de combustible y reduciendo la carga de los ventiladores cerrando la válvula de regulación de aire.

- **Apagado del horno:**  
Se apagan las bombas de combustible primero, luego los ventiladores, esto para evitar que el combustible llegue al horno sin suficiente oxígeno, derramándose por las compuertas del horno, generando así situaciones de peligro.
- **Enfriamiento horno:**  
En el enfriamiento del horno se dejan los ventiladores y la chimenea encendida con las válvulas abiertas al máximo, para hacer circular aire frío por el horno, disminuyendo la temperatura lo más rápido, con el objeto de reducir el tiempo necesario en realizar un mantenimiento y que el operario no corra riesgo al realizarlo.

### **6.3.2. Distribución de las diversas memorias y registros en el PLC**

El sistema de supervisión tiene que conocer la ubicación de la variable de la que desea tener la información, en el PLC estará la información de todos los dispositivos conectados al sistema de control del horno. Éste sistema de supervisión lo estará interrogando para mostrar en pantalla el estado de los dispositivos y variables en el horno, las distintas variables a las que maneja el PLC en sus entradas y salidas se muestran en la tabla X.

**Tabla X. Distribución de las entradas y salidas en el PLC**

ENTRADA	ALIAS
X0	ENCODER VÁLVULA 1
X1	ENCODER VÁLVULA 2
X2	ENCODER BOMBA DE COMBUSTIBLE
X3	VÁLVULA ABIERTA v2
X4	VÁLVULA CERRADA v2
X5	VÁLVULA ABIERTA V1
X6	VÁLVULA CERRADA V1
X7	ARRANQUE VENT. COMB. 1
X10	PARO VENT. COMB. 1
X11	ARRANQUE VENTILADOR COMBUSTIÓN 2
X12	PARO VENTILADOR COMBUSTIÓN 2
X13	START VENTILADOR ATOMIZACIÓN 3
X14	PARO VENTILADOR ATOMIZACIÓN 3
X15	ARRANQUE VENTILADOR ATOM. 4
X16	PARO VENTILADOR ATOM. 4
X17	ARRANQUE RESIS. FRONTAL
X20	PARO RESIS. FRONTAL
X21	ARRANQUE RESISTENCIAS LATERALES
X22	PARO RESISTENCIAS LATERALES
X23	ARRANQUE BOMBA DE COMBUSTIBLE
X24	PARO BOMBA DE COMBUSTIBLE
X25	EMERGENCIA BOMBA DE COMBUSTIBLE
X26	TERMOST RESIS. FRONTAL 1
X27	TERMOST RESIS. FRONTAL 2
X30	TERMOST RESIS LATERAL DERECHA
X31	TERMOST RESIS LAT. IZQ
X32	EMPUJADOR DE LINGOTE
X33	COMPUERTA HORNO LADO SALIDA
X34	COMPUERTA HORNO LADO DESHORNADOR
X35	IZQUIERDA DESHORNADORA
X36	DERECHA DESHORNADORA
X37	ADELANTE DESHORN.
X40	ATRÁS DESHORNADORA
X41	FC1 MAX DESHORN.
X42	FC2 MIN DESHORN.
X43	EVACUADOR DE LINGOTE
X44	RODILLOS EVACUADOR DE LINGOTE

SALIDA	ALÍAS
Y0	MOTOR VENTILADOR 1 COMBUSTIÓN
Y1	MOTOR VENTILADOR 2 COMBUSTIÓN
Y2	MOTOR VENTILADOR 3 ATOMIZACIÓN
Y3	MOTOR VENTILADOR 4 ATOMIZACIÓN
Y4	ABRIR V1 AIRE COMBUSTIÓN
Y5	CERRAR V1 AIRE COMBUSTIÓN
Y6	ABRIR V2 AIRE COMBUSTIÓN
Y7	CERRAR V2 AIRE COMBUSTIÓN
Y10	RESISTENCIA FRONTAL 1
Y11	RESISTENCIA FRONTAL 2
Y12	RESISTENCIA LATERAL DERECHA
Y13	RESISTENCIA LATERAL IZQUIERDA
Y14	PILOTO VENTILADOR 1 COMBUSTIÓN
Y15	PILOTO VENTILADOR 2 COMBUSTIÓN
Y16	PILOTO VENTILADOR 3 ATOMIZACIÓN
Y17	PILOTO VENTILADOR 4 ATOMIZACIÓN
Y20	PILOTO RESISTENCIAS FRONTALES
Y21	PILOTO RESISTENCIAS LATERALES
Y22	BOMBA DE COMBUSTIBLE
Y23	PILOTO BOMBA 1
Y24	PILOTO ALARMA
Y25	ADELANTE DESHORNADORA
Y26	ATRÁS DESHORNADORA
Y27	DERECHA DESHORNADORA
Y30	IZQUIERDA DESHORNADORA
Y31	ADELANTE RODILLOS CARRO
Y32	ADELANTE BARREDORA
Y33	ATRÁS BARREDORA
Y34	EV1 COMPUERTA 1 HORNO SALIDA
Y35	EV2 COMPUERTA 2 HORNO DESHOR
Y36	EV3 EVACUADOR LINGOTE
Y37	EV CHATARREO

Los módulos análogos tienen a cargo las lecturas de los valores de los termopares, de los transductores de presión; éstos se encontrarán en registros de 16 bits, de los cuales se tendrá acceso a su información desde el sistema supervisorio para monitorear en tiempo real las variables análogas del horno.

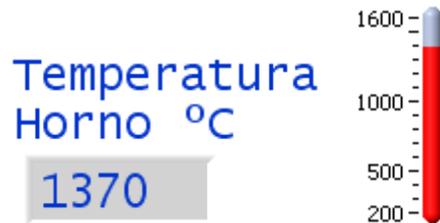
#### 6.4. Sistema de control supervisorio desarrollado en LAB VIEW

En el entorno que se creará en LabVIEW será únicamente como interpretación de las señales del PLC, él no realizará ningún control sobre ningún dispositivo, solo será el encargado de interpretar los datos que contiene el PLC y publicarlos de manera que el usuario que está viendo la pantalla sepa lo que está pasando de una manera sencilla y amigable. Como ejemplo el encendido y apagado de un ventilador se representa en la figura 60:



El programa de LabVIEW estará supervisando el estado de una memoria o una salida en el PLC y respondiendo al estado en que se encuentre ésta, los diversos dispositivos que se encuentren en pantalla indicaran el estado de estos. De la misma forma, el sistema en LabVIEW tomará lecturas de registros de datos en el PLC para publicarlos, estos registros tendrán las lecturas de temperatura dentro del horno, entre otros datos importantes que serán publicados de manera gráfica sencilla.

**Figura 61. Indicador de temperatura en LabVIEW**



El sistema de supervisión interpretará memorias en el programa que indicarán estados de alarma arranque entre otros estos estarán indicados como se muestra en la figura 61.

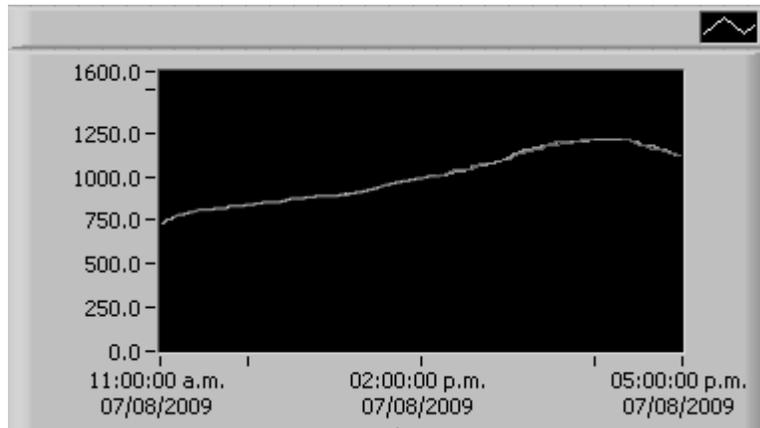
**Figura 62. Cambio en estado de indicador**



De esta forma, se podrán identificar lo que está pasando en el proceso, las señales de los sensores, las salidas y las entradas teniendo a disposición una buena herramienta para detectar fallas. Y conocer el estado de todos los dispositivos.

Si se desea de la misma manera que el sistema de control supervisorio sea capaz de llevar un registro de los sucesos en éste, que pueda llevar un récord de las alarmas y sucesos que se den en el horno, como se muestra en la figura 62.

**Figura 63. Registro gráfico de temperatura**



El registro de las alarmas o eventos especiales en el horno es conveniente que se lleve a cabo, como el que se muestra en la figura 64, a manera de poder observar éstas y archivarlas para en un futuro, interpretar fallos o comparar resultados de producción con el estado del horno y poder tener parámetros para crear mejoras al sistema.

**Figura 64. Registro de eventos en LabVIEW**

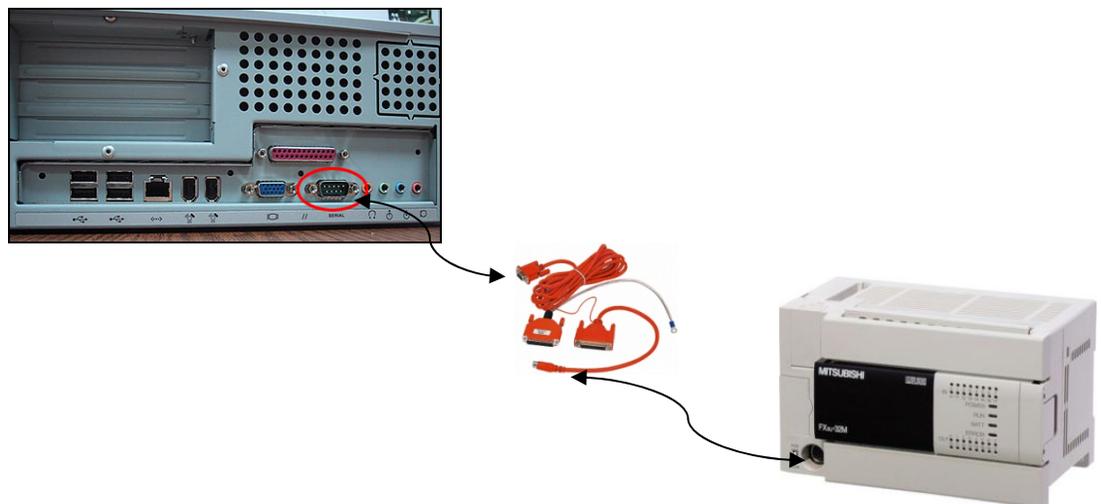
La interfaz muestra una tabla con dos columnas: 'Object Name' y 'Set Time'. Hay dos filas de datos. La primera fila está resaltada en rojo y la segunda en azul. Debajo de la tabla hay un control de desplazamiento horizontal.

Object Name	Set Time
\\96482559fa1d4e9\Temperaturas\var compar 1.Alarms.LoLo	18/12/2009 ...
\\96482559fa1d4e9\Untitled Library 1\var compar 1.Alarms.HiHi	18/12/2009 ...

#### 6.4.1. Comunicación entre el PLC y el sistema de control supervisorio

El medio por el cual el sistema de control supervisorio obtiene los datos del PLC es una conexión punto a punto serial RS-232 maestro esclavo, la secuencia de conexión se muestra a continuación.

**Figura 65. Diagrama de conexión RS-232**



El protocolo RS-232 es una norma o estándar mundial que rige los parámetros de uno de los modos de comunicación serial. Por medio de este protocolo se estandarizan las velocidades de transferencia de datos, la forma de control que utiliza dicha transferencia, los niveles de voltajes utilizados, el tipo de cable permitido, las distancias entre equipos, los conectores, etc.

A nivel de *software*, la configuración principal que se debe dar a una conexión a través de puertos seriales. RS-232 es básicamente la selección de la velocidad en baudios (1200, 2400, 4800, etc.), la conexión RS-232 se muestra en la figura 66, la verificación de datos o paridad (paridad par o paridad impar o sin

paridad), los bits de parada luego de cada dato (1 o 2), y la cantidad de bits por dato (7 o 8), que se utiliza para cada símbolo o carácter enviado.

**Figura 66. PLC instalado en panel, se puede observar la conexión RS-232**



(RS-232C o *Recommended Standard-232C*). En telecomunicaciones, RS 232 es un estándar para la conexión serial de señales de datos binarias entre un DTE (Equipo terminal de datos) y un DCE (Equipo de terminación del circuito de datos). En la jerga informática, el DTE sería el dispositivo que se conecta en nuestro caso el PLC y un DTE sería el dispositivo al que se conecta que en nuestro caso, es la computadora.

Algunas limitaciones de los RS-232, son los cables que no pueden ser mayores a 15 metros de largo y transmiten a una velocidad de 20 KB/s.

Características:

- Aislamiento galvánico
- Transmisión de señales de estado
- Distancia de transmisión: hasta 25 km
- Fiabilidad de funcionamiento y rendimiento
- Resistente a los entornos expuestos a niveles elevados de interferencia

#### 6.4.2. Método de monitoreo y acceso a la información del proceso

Por medio de un OPC, el *software* de LabVIEW tiene a su disponibilidad toda la información que contiene el PLC ya sea booleano o análogo. El **OPC** (*Object Linking and Embedding (OLE) for Process Control*) es un estándar de comunicación en el campo del control y supervisión de procesos. Este estándar permite que diferentes fuentes (Servidores de OPC) envíen datos a un mismo cliente OPC, al que a su vez podrán conectarse diferentes programas compatibles con dicho estándar. De este modo, se elimina la necesidad de que todos los programas cuenten con drivers para dialogar con múltiples fuentes de datos, basta que tengan un driver OPC.

Existen varios programas OPC para cada dispositivo, cada uno con diferentes características pero todos ellos con la misma función, la de publicar los datos del PLC. Un ejemplo de los OPC para el PLC Mitsubishi de la serie FX son los mostrados en la siguiente figura.

**Figura 67. Software de OPC disponible en la red**



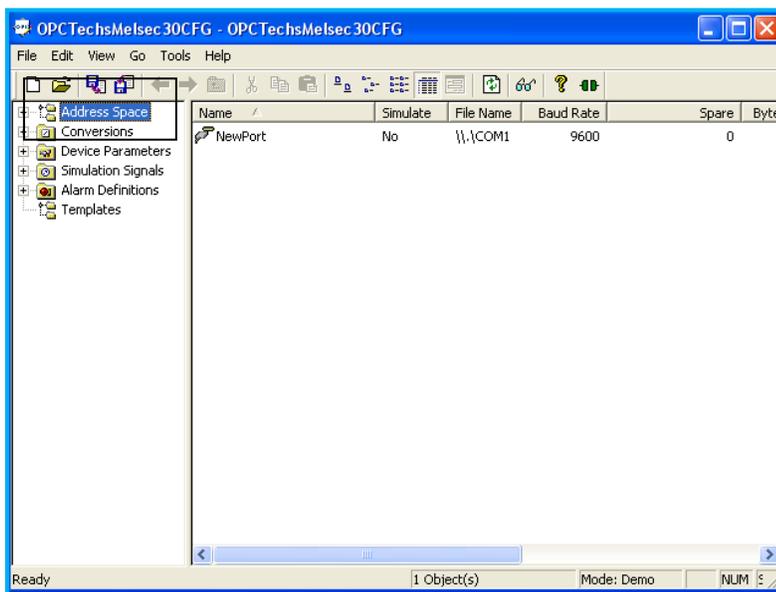
Fuente: <http://www.kepware.com/> 8/12/2009

Ambos en su versión para PLC Mitsubishi, versiones de demostración, pueden ser descargadas de la red de manera gratuita pero para aplicaciones industriales de estos deben ser compradas.

Utilizando el OPCTechs OPC server 320 se obtienen los datos de PLC de la siguiente manera:

Se abre el programa OPC configurator el cual al abrir se aprecia lo mostrado en la figura 67.

**Figura 68. Especificar puerto a utilizar en OPC**



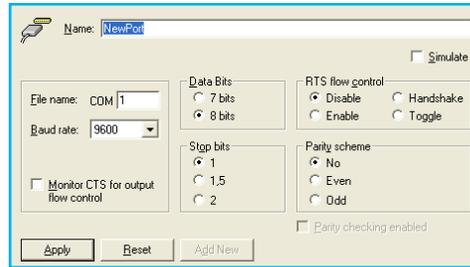
Se especifica el puerto que se va a utilizar haciendo *clic* derecho en espacio de “Address Space”, para abrir el menú de configuración del puerto serial a trabajar, como en la figura 69.

**Figura 69. Creación de un nuevo puerto en OPC**



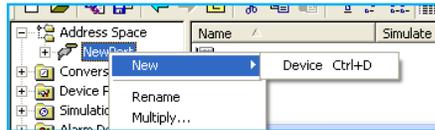
Una vez hecho esto aparece el menú para configurar el puerto a utilizar para la comunicación con el PLC, mostrando el menú para la configuración del OPC como se muestra en la figura 70.

**Figura 70. Configuración del puerto en OPC**



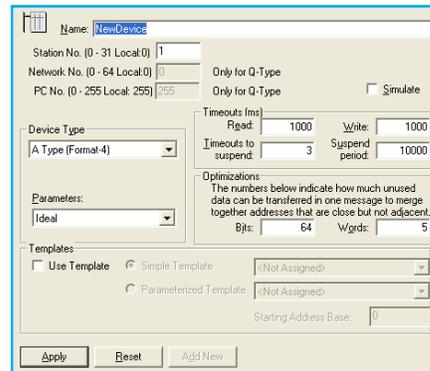
Al haber culminado la configuración del puerto, se especifica el dispositivo a utilizar haciendo clic derecho sobre el puerto anteriormente configurado, como se muestra en la figura 71.

**Figura 71. Agregar un nuevo dispositivo en OPC**



Una vez hecho esto aparece el menú para configurar el dispositivo, en este caso el PLC debe aparecer un menú como se aprecia a continuación.

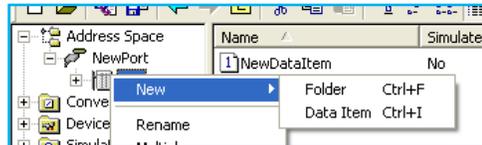
**Figura 72. Configuración de nuevo dispositivo en OPC**



Al tener especificado el dispositivo a utilizar, haciendo clic derecho sobre el dispositivo configurado, como se muestra en la figura 73, se añaden los datos

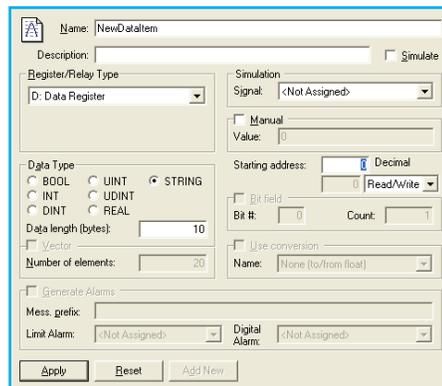
que se quiera leer del PLC, estos se pueden agrupar en carpetas para guardar un mayor orden.

**Figura 73. Agregar un nuevo ítem de datos del dispositivo en OPC**



Aparecerá el menú de el contenido del PLC, aquí se podrá decir qué registro, de qué tipo y el nombre que se le quiera asignar para una fácil identificación, esto se configura en el menú que aparece a continuación.

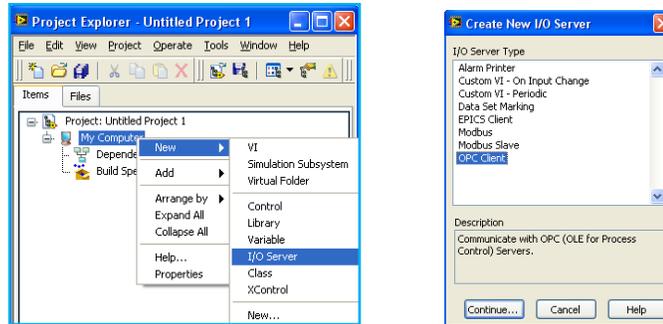
**Figura 74. Configuración de ítem de datos del dispositivo en OPC**



De esta manera, se agrega en esta lista todos los datos que se desee obtener del PLC. Una vez terminada esta lista se procederá a cargar a LabVIEW todos los datos del OPC.

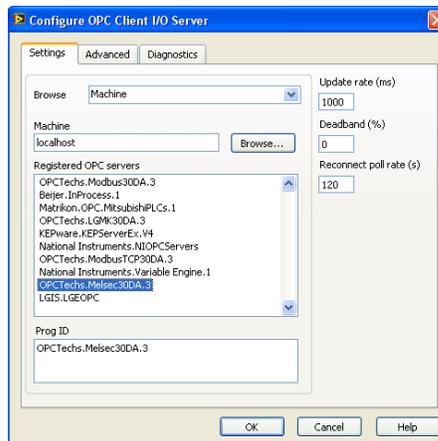
Desde el menú de proyecto se añade un nuevo I/O server en el cual se alegrirá al OPC *Client*, tal y como se muestra en la figura 75.

**Figura 75. Apertura del OPC server desde LabVIEW**



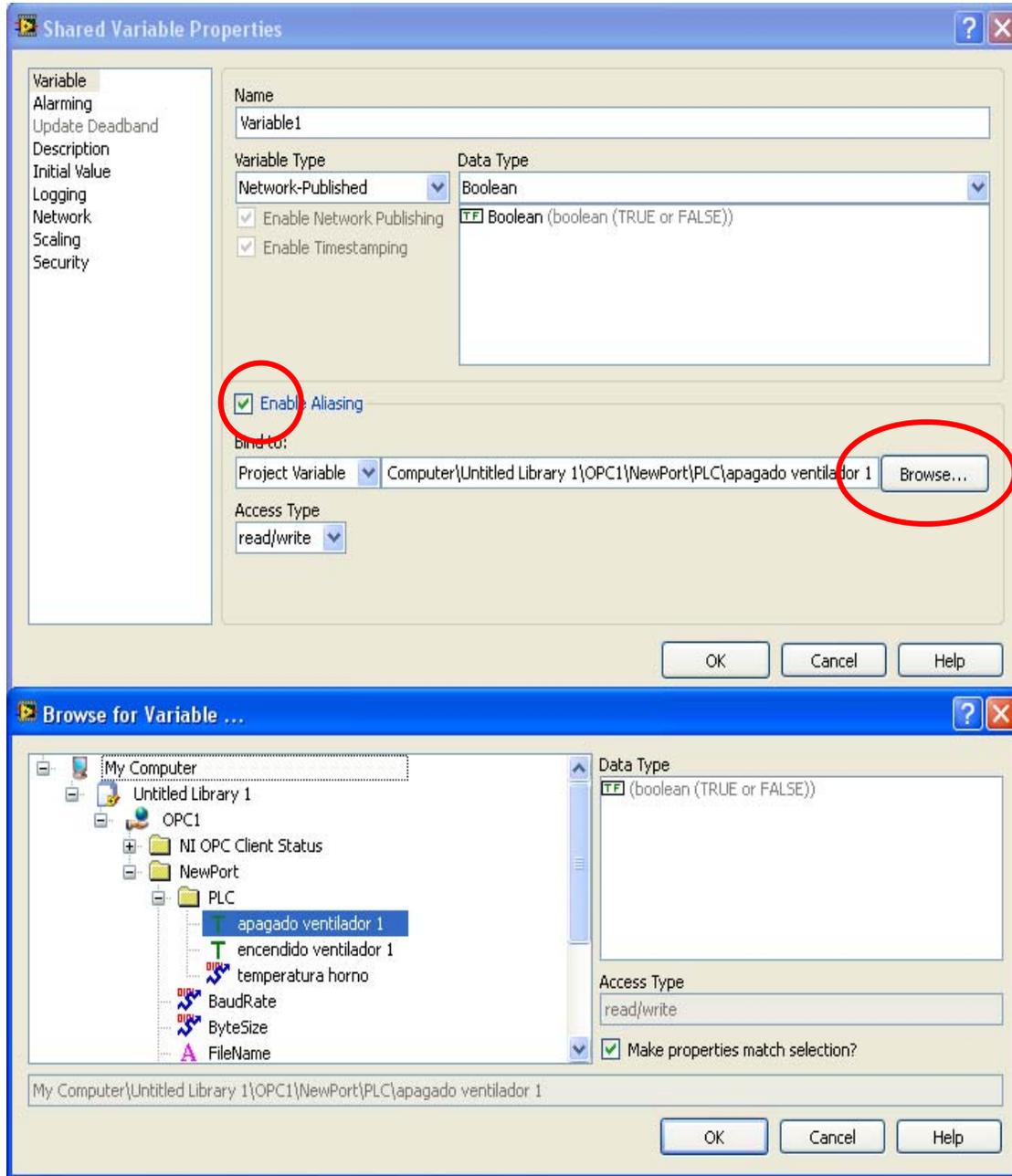
En la lista de los diversos OPC se elige en el que se desarrolla la lista de dispositivos a leer del PLC, este menú se mostrará como se muestra a continuación.

**Figura 76. Selección de OPC desde LabVIEW**



Después de esto se procede a crear variables en el proyecto en que se está trabajando en LabVIEW y estas se ligan a los datos del OPC como se muestra en la figura 77.

Figura 77. Configuración de la variable del OPC desde LabVIEW



Se selecciona la casilla que indica ligar la variable  y luego en el *BROWSER* se busca la variable a la cual se quiere ligar. Esto se hace para cada dato del PLC que esté trabajando.

A partir de aquí queda desarrollar el programa en LabVIEW y los diversos entornos gráficos en los que se visualizarán el estado de los dispositivos y los valores de mayor importancia en el horno, una vez se coordine con el OPC.

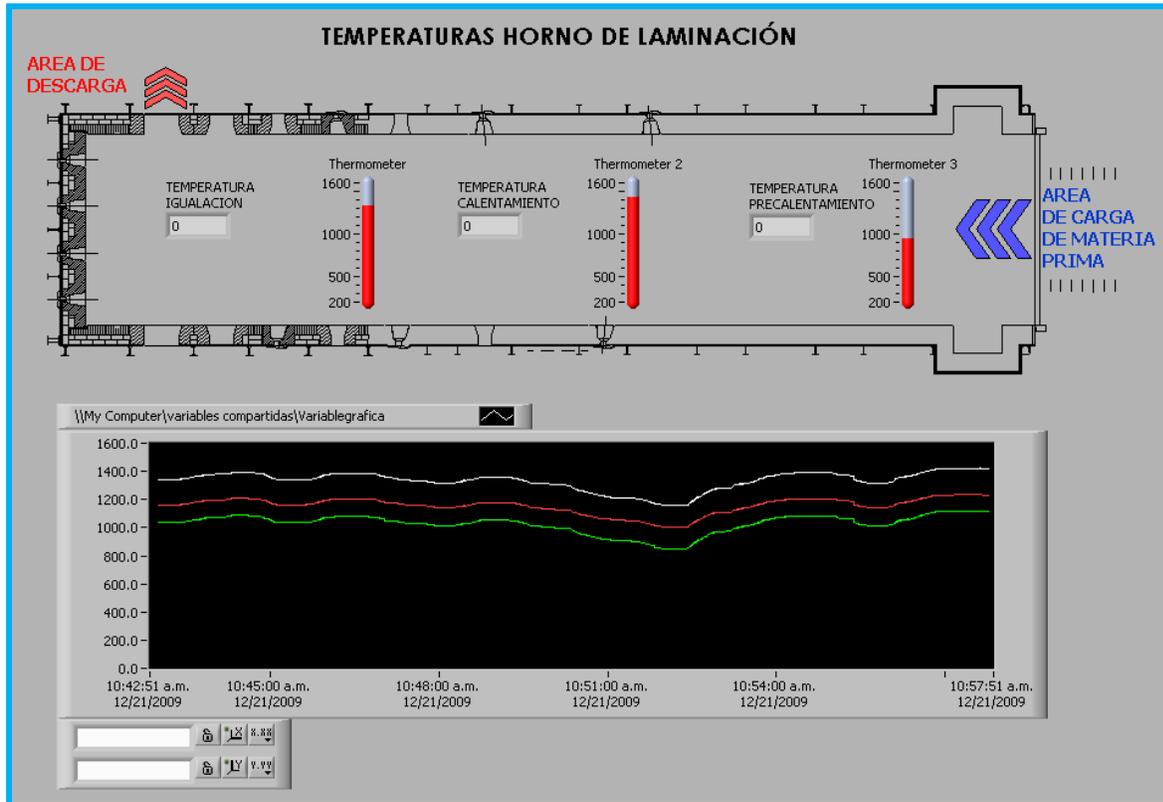
### **6.4.3. Diversos entornos gráficos para visualización del estado del horno**

- **Entorno gráfico de temperaturas**

En esta pantalla se monitorea principalmente temperaturas en el horno sobre un esquema que representa la vista de planta del horno de laminación y la temperatura en esta área, el entorno gráfico se muestra en la figura 78, la temperatura representada de 3 maneras:

- Indicando el valor de la temperatura actual en un indicador numérico.
- Un termómetro que indica la temperatura en una forma gráfica que facilita la comparación y una interpretación rápida de la temperatura.
- Una gráfica que indica el comportamiento de la temperatura del horno en las últimas 12 horas, esta gráfica contiene 3 curvas, cada una representa una región del horno, con ésta se puede observar un patrón de comportamiento.

Figura 78. Entorno gráfico principal de monitoreo del horno



- Entorno gráfico de dispositivos

En esta pantalla se indica el estado de cada dispositivo, se muestra en la figura 79, dibujo que está en la pantalla representa un dispositivo en el proceso o representa una memoria dentro del PLC o un evento en especial. En la primera imagen se observan todos los dispositivos en el modo inactivo y en la segunda se muestran en el modo activado.

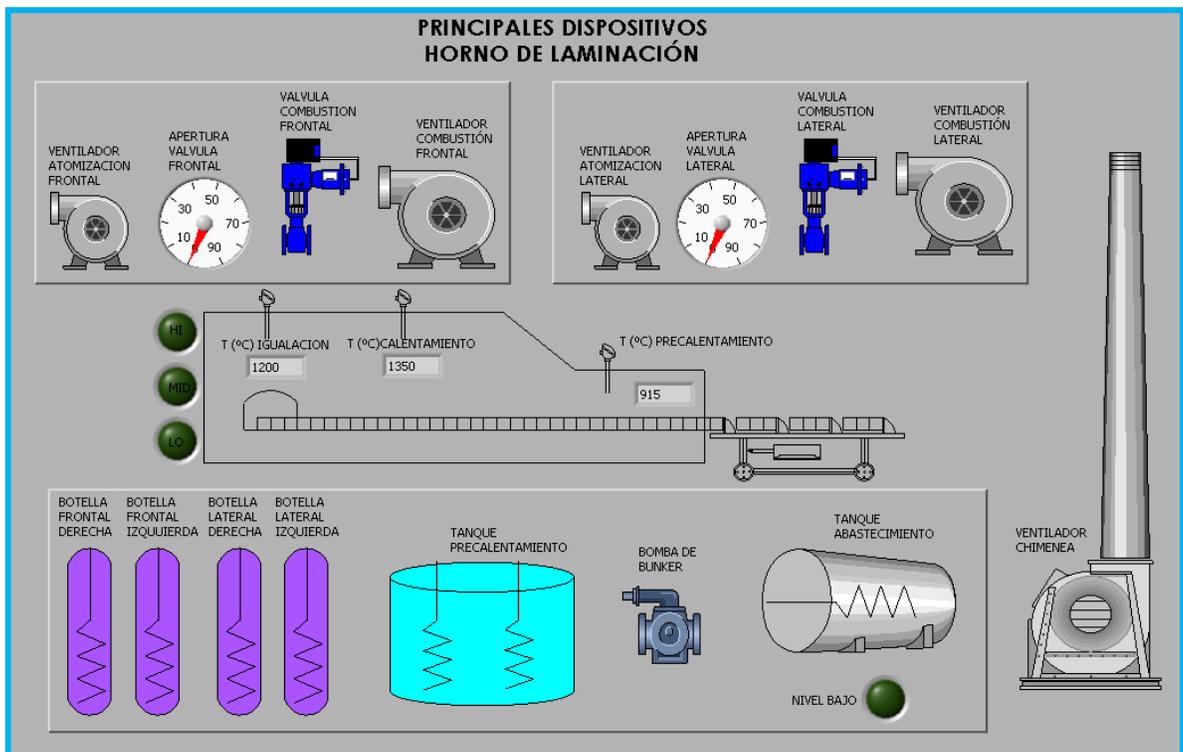
Las resistencias por ser elementos calefactores estas al encender se colocan de color rojo.

Para los dispositivos motorizados o similares su estado de encendido es de color verde.

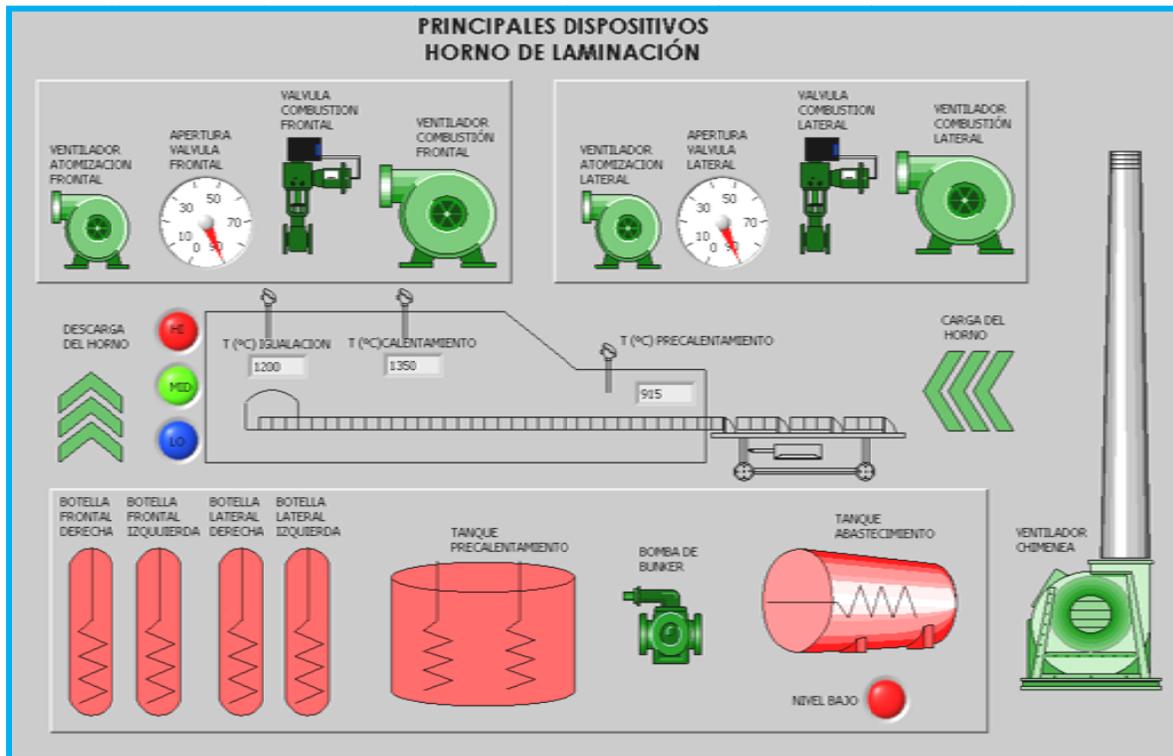
Se aprecia mediante indicadores de reloj el estado de apertura de las válvulas, las cuales su apertura máxima es a 90 grados y están cerradas cuando éstas están a 0 grados de apertura.

Además de esto se coloca un indicador, el cual indica la región de temperatura en la que se está trabajando, si se trabaja a temperaturas por arriba de lo necesario se encenderá el indicador HI, si la temperatura es la adecuada se encenderá MID y si el horno está frío se encenderá LO, siempre estará encendido uno y solo uno de estos indicadores, el entorno gráfico en donde se muestran los dispositivos encendidos se muestra en la figura 80.

Figura 79. Entorno gráfico de dispositivos en su estado apagado



**Figura 80. Entorno gráfico de dispositivos en su estado encendido**



### 6.5. Visualización de datos en HMI y parámetros a ingresar

Se utilizará un HMI (interfaz humano máquina) situada en campo en un punto accesible a los operarios del horno a través de la cual podrán observar los estados de los principales dispositivos del horno, como se muestra en la figura 81 y 82. La pantalla a utilizar es la BEIJERS E-700. Esta HMI deberá tener un entorno gráfico sencillo esto para no caer en la necesidad de la adquisición de dispositivos costosos de alta resolución. La representación de los diferentes dispositivos se hace de manera similar a el sistema de monitoreo de LabVIEW. Posee 2 entornos gráficos que tienen un funcionamiento similar al de el sistema de monitoreo en LabVIEW con la diferencia que en el entorno de dispositivos se puede controlar de manera manual el caudal de las bombas de combustible y la apertura de las válvulas cuando el sistema cambie de manual a automático.

Figura 81. HMI indicando los principales datos del horno

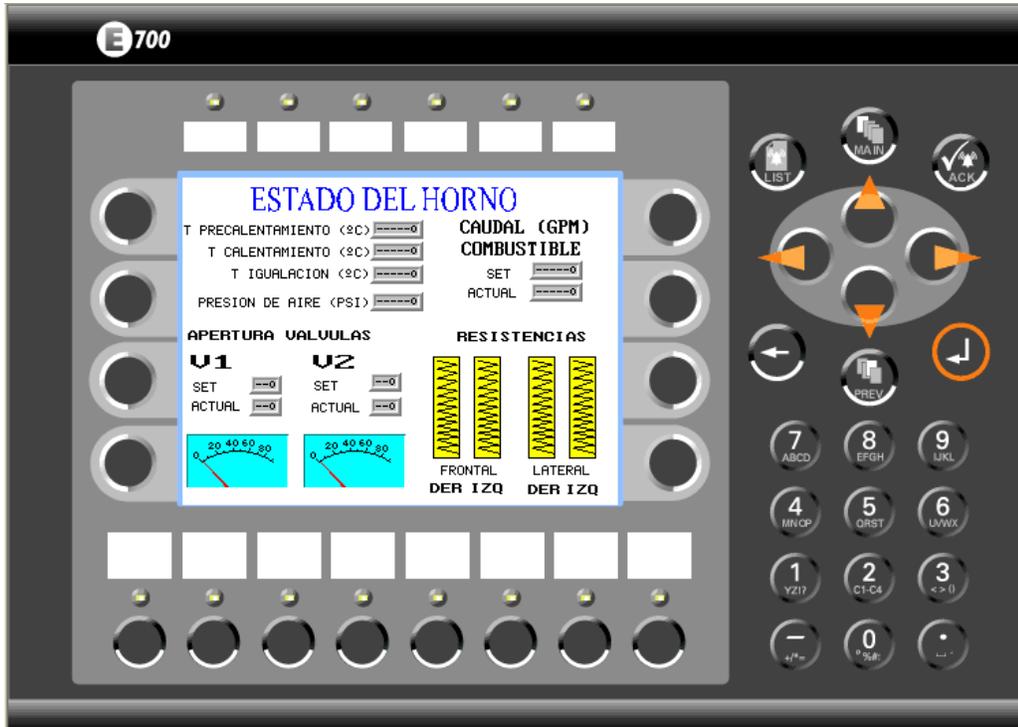
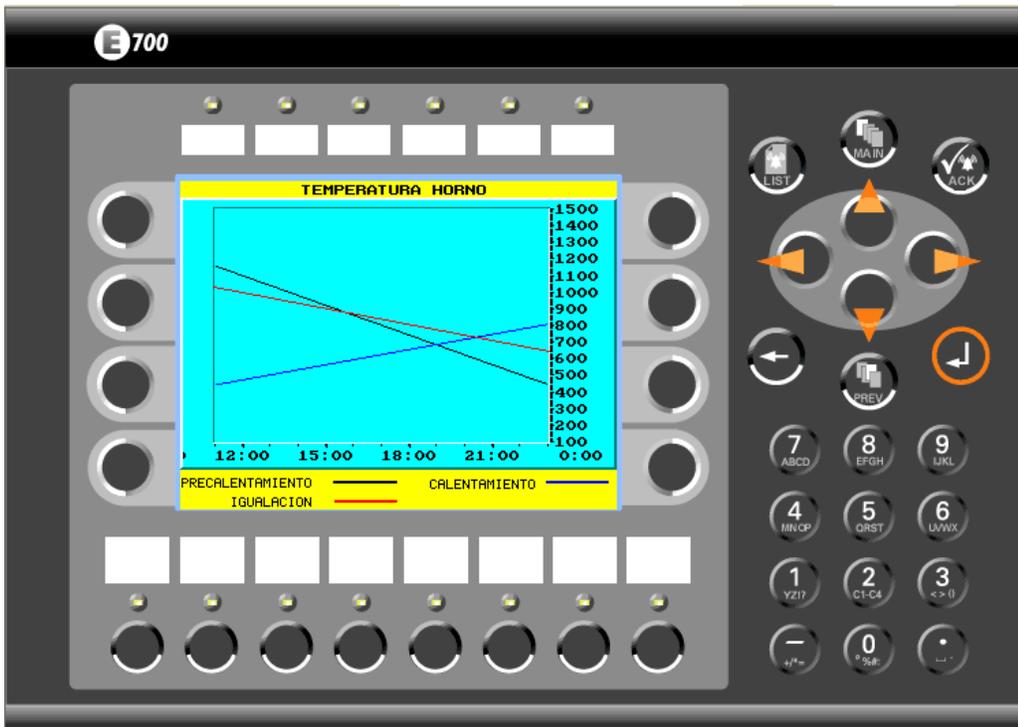


Figura 82. HMI llevando el record de temperaturas del horno



Cada elemento que se despliega en la pantalla se puede relacionar con el PLC a una memoria o a un registro de datos dependiendo del caso, los indicadores del estado de las resistencias calefactoras del horno se ponen de color azul, si éstas están apagadas y se ponen de color amarillo si éstas están encendidas. Las temperaturas del horno se despliegan en una gráfica que recoge los datos de temperatura de las últimas 12 horas, para que el operario observe el comportamiento del horno.

En el modo automático del horno se tendrá acceso únicamente al “SET DE TEMPERATURA” y en el modo manual, a la apertura de las válvulas de aire y al caudal de combustible.



## CONCLUSIONES

1. El proceso del calentamiento de lingotes con *bunker* posee sistemas diversos en el horno, de los cuales se debe conocer la información del estado de las variables, tener control y poder actuar sobre éstos para que los sistemas funcionen de manera conjunta, ya que las fallas o cambios de uno afectan a los demás.
2. Al ingresar todas las señales de los distintos dispositivos de control del horno, se tiene el poder de tomar decisiones, de parte del PLC, para ajustes, protocolos de arranque-paro y baja producción, además de mantener un sistema de alarmas para el funcionamiento automático del horno.
3. Con la supervisión en un entorno gráfico fácil de entender se puede saber de una manera sencilla el estado de funcionamiento de todas las variables en el proceso de calentamiento de lingotes de acero dentro del horno y el estado de los dispositivos asociados al proceso.
4. Para saber el valor de las variables en el proceso del horno existen diversos tipos sensores de diferentes marcas y tecnologías que pueden proporcionar esta información al PLC, para que este ejerza el control sobre el proceso, se escoge el sensor en base a conectividad y tolerancia al proceso, precio y señal de salida.
5. Con el proceso de automatización del horno se logran notables mejoras en la modernización del sistema y en seguridad industrial al reducir la mano de obra en tareas peligrosas al ser humano.

## RECOMENDACIONES

1. Realizar un diagrama de bloques en donde se indique el funcionamiento básico del programa, a modo de que el programador de PLC tenga una guía en la cual basar su estrategia para diseñar el programa en escalera.
2. Diseñar el horno en su estructura y posición de los operarios de modo que estos tengan la mayor seguridad posible en el trabajo, sin estar expuestos a altas temperaturas ni gases nocivos, recordando siempre que la seguridad es primero y esta consideración debe ser tomada en cuenta en el proceso de automatización.
3. Proteger toda la instrumentación contra los movimientos de los lingotes, la vibración que estos producen, las altas temperaturas y el ambiente corrosivo que se maneja en el proceso del calentamiento de lingotes.
4. Realizar un diagrama P&ID del proceso, ya que éste es necesario para la nueva capacitación del personal que va a estar a cargo del horno; también para entender las conexiones además de las relaciones en el proceso y saber que puntos se verán afectados al modificar algún dispositivo.
5. Utilizar cable blindado y aterrizado en la utilización de variadores de frecuencia en motores, para variar la velocidad del motor, como el de la bomba de alimentación, y tener la carcasa del motor sólidamente aterrizada para protección y eliminación de interferencia, por las altas frecuencias de conmutación que utiliza el variador de frecuencia.

6. Es conveniente utilizar intercambiadores de calor que utilicen energía de desecho para calentar el aire de combustión, ya que al hacer esto se produce un ahorro de combustible y se aumenta la eficiencia del horno.
  
7. Realizar la regulación del aire, que aporta oxígeno a la combustión de bunker en el horno, únicamente por medio del aire de combustión y mantener el de atomización constante para asegurar una atomización eficiente, y mantener el aire de combustión variable de manera que responda ante los cambios en la demanda de combustible para mantener la proporción adecuada de combustible y oxígeno.
  
8. Utilizar el *software* que brinda el fabricante del dispositivo de control, en este caso MITSUBISHI, para realizar la comunicación entre el PLC y una PC o el dispositivo que se utilice para la publicación visual de los datos, ya que estos facilitan el trabajo al tener protocolos preestablecidos y formas de programación gráficas fáciles de entender, diseñadas especialmente para este propósito.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Del Río, Jesús **Conformación plástica de materiales metálicos** (en frío y en caliente): forja, laminación, estirado, estampación, extrusión, embutición, España: CIE-Dossat 2000-2005. 655 pp.
2. MELSEC FX Series, *Programable Logic Controllers, User's manual, FX2N-2LC, temperature module, Mitsubishi electric industrial automation*, Art. no.: 132307, 2007, Version D.
3. *North American COMBUSTION HANDBOOK*; Volume: I, II, *A Basic Reference on the Art and Science of Industrial Heating with Gaseous and Liquid Fuels*. 3a. ed. EEUU, 1978.
4. Travis, Jeffrey. Kring, Jim. **LabVIEW for Everyone: Graphical Programming Made Easy and Fun, Third Edition**. Prentice Hall. EEUU, 2006.
5. [www.articuloz.com/otro-articulos/bunker-combustible-491964.html](http://www.articuloz.com/otro-articulos/bunker-combustible-491964.html)  
4/3/2010.
6. [www.swagelok.com.mx/valvulas/valvulas\\_de\\_alivio\\_proporcional.htm](http://www.swagelok.com.mx/valvulas/valvulas_de_alivio_proporcional.htm)  
4/12/2009.
7. [www.discoramo.com/docs/hojastecnicas/HOJA%20TECNICA%20BUNKER.pdf](http://www.discoramo.com/docs/hojastecnicas/HOJA%20TECNICA%20BUNKER.pdf) 7/5/2010.