

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Electrónica



Sistema de Automatización para el Proceso de Fundición de Acero en un Horno Industrial

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el Título de Ingeniero en Electrónica con el Grado Académico de Licenciatura

Carlos Alberto Bolaños Jiménez

Cartago, Noviembre de 2010

INSTITUTO TECNOLOGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRONICA
PROYECTO DE GRADUACIÓN
TRIBUNAL EVALUADOR

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

Miembros del Tribunal



Ing. Juan Carlos Jiménez Robles

Profesor lector



Ing. Sergio Morales Hernández

Profesor lector



Ing. Francisco Navarro Henríquez

Profesor asesor

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

Cartago, 25 de Noviembre de 2010

Declaratoria de autenticidad:

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

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

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

Cartago, Noviembre del 2010



Carlos Alberto Bolaños Jiménez

Céd: 1-1192-0400

Resumen

En la actualidad, el tema del reciclaje tiene gran importancia en el mundo entero, debido al acelerado agotamiento de los recursos naturales causado principalmente por el uso irracional del ser humano. Ante este problema el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), específicamente la subdivisión de Maquinaria Equipo y Talleres (MET) ubicado en Cebadilla de Turrúcares en Alajuela, intenta afrontarlo mediante una solución innovadora.

La empresa decidió construir un horno de fundición que permite el aprovechamiento de más de 10000 kilogramos de acero que almacena en las bodegas de todo el país.

Para el diseño del mismo se hizo un estudio del único horno en funcionamiento en el país. Este cuenta con 3 electrodos de grafito que facilitan la formación de arco, los cuales tienen movimiento en un grado de libertad (vertical). Esta función la llevan a cabo los operadores de forma manual mediante contrapesas.

Se afronta el problema de que debido a fallos humanos por la inexactitud en los movimientos, se producen corrientes muy altas de forma continua, que a su vez conlleva a la destrucción de muchos de los componentes del sistema.

Partiendo de ésta problemática, se diseñó y probó un sistema hidráulico y uno de control automático que gobiernan el movimiento de los electrodos durante el proceso de fundición con el fin de evitar la destrucción de los dispositivos. El sistema toma decisiones alrededor de la variable corriente.

Palabras clave: Control, Monitorización, PLC, Pantalla táctil, electroválvulas, Electroodos, Crisol, MET.

Summary

At present, the topic of the recycling has great importance all over the world, caused to the intensive depletion of the natural resources caused principally by the irrational use of the human. Before this problem the Costa Rican Institute of Electricity (ICE), specifically the subdivision of Machinery, Equipment and Workshop (MET) located in Turrúcares in Alajuela, it tries to confront it by an innovative solution.

The company decided to construct a smelting furnace that allows the utilization of more than 10000 kilograms of steel that it stores in the warehouses of the whole country.

For the design of the same one there was done a study of the only oven in functioning in the country. This one relies on 3 graphite electrodes that there facilitate the formation of arch, which have movement in a degree of freedom (vertical). This function is carried out by the operators of manual form by against weight.

There is confronted the problem of which due to human errors for the inaccuracy in the movements, there take place very high currents of constant form, which in turn it carries to the destruction of many of the components of the system.

Departing from problematic this one, there was designed and proved a hydraulic system and one automatic control that govern the movement of the electrodes during the process of smelting in order to avoid the destruction of the devices. The system takes decisions about the current variable.

Keywords: Control, Monitoring, PLC, touch screen, Electrical valve, Electrodes, Crucible, MET.

A mi Madre, Padre, hermanos y abuelos, siempre fueron mi apoyo...

Agradecimiento

Agradezco a Dios por bendecirme con salud y su presencia durante toda mi vida.

A mis padres, hermanos, son mis pilares.

A mis amigos, siempre estuvieron ahí.

Al Ing. Edgar Varela Cascante por darme la oportunidad, además de los conocimientos aportados.

A los Ings. Romano Rodríguez Pacheco, Ricardo Sancho Vásquez y Esteban Blanco Urpi por creer en mí.

Al Ing. Fabian Montenegro por la formación profesional en el área de redes de computadores.

ÍNDICE GENERAL

Resumen	iv
Summary	v
Agradecimiento	vii
Capítulo 1: Introducción	1
1.1 Problema existente e importancia de la solución	1
1.2 Metodología para la solución del problema	2
Capítulo 2: Meta y Objetivos	4
2.1 Meta.....	4
2.2 Objetivo General.....	4
2.3 Objetivos Específicos	4
Capítulo 3: Marco Teórico	5
3.1 Descripción del proceso de horno de fundición de arco a mejorar.....	5
3.2 Antecedentes Bibliográficos	8
3.2.1 Historia del Horno de arco eléctrico (Astigarraga Urquiza, 1999).	8
3.2.2 Descripción general de hornos de arco (Astigarraga Urquiza, 1999).....	10
3.2.2.1 Hornos de arco radiante.....	11
3.2.2.2 Hornos de arco sumergido.....	12
3.2.2.3 Hornos de arco para fusión de acero	13
3.2.2.4 Fenómeno FLICKER o parpadeo.....	15
3.2.3 Controlador lógico programable (PLC).....	15
3.2.4 Paquete de programación STEP7 – Micro/WIN (SIEMENS, 2008)	16
3.2.4.1 Lenguaje AWL.....	16
3.2.4.2 Lenguaje KOP	17
3.2.4.3 Lenguaje FUP	18
3.3 Descripción de los principales principios físicos y/o electrónicos relacionados con la solución del problema.....	19
3.3.1 Parámetros Eléctricos de Operación del horno de Arco (Natural, Grupo Gas, 2009)	19
3.3.2 Transformadores de corriente	20
3.3.3 Fundamentos de Hidráulica.....	22
3.3.3.1 Propiedades de los fluidos hidráulicos	22
3.3.3.2 Principios Físicos	23
3.3.3.3 Sistemas hidráulicos	24
3.3.4 Presostatos.....	27
Capítulo 4: Procedimiento Metodológico	28
4.1 Reconocimiento y definición del problema	28
4.1 Obtención y análisis de información	28
4.2 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución	29
4.3 Implementación de la solución	31
4.4 Reevaluación y rediseño	32

Capítulo 5: Descripción detallada de la solución	34
5.1 Análisis de soluciones y selección final	34
5.2 Descripción del hardware	38
5.2.1 Planta física de horno eléctrico de arco	39
5.2.2 Alimentación principal.....	40
5.2.3 Transformador de corriente	42
5.2.4 Convertidor de corriente CA/CD.....	42
5.2.5 Sensores	43
5.2.5.1 Bero inductivo.....	43
5.2.5.2 Sensor de presión o celda de carga.....	44
5.2.5.3 Sensor de presión o Presostato	45
5.2.6 Sistema hidráulico	46
5.2.6.1 Bomba hidráulica con motor eléctrico	48
5.2.6.2 Filtro de aceite.....	48
5.2.6.3 Válvulas anti retorno.....	49
5.2.6.4 Válvula de alivio	49
5.2.6.5 Acumulador de presión hidráulica	49
5.2.6.6 Regulador de caudal	50
5.2.6.7 Válvula manual.....	50
5.2.6.8 Electroválvula	51
5.2.6.9 Pistón hidráulico	52
5.2.7 Pantalla táctil	53
5.2.8 Controlador lógico programable	54
5.2.8.1 CPU 224 AC/DC/Relé	54
5.2.8.2 Fuente de alimentación	56
5.2.8.3 Módulo de expansión de entradas analógicas	57
5.2.8.4 Módulo de expansión Siwarex MS	57
5.2.9 Relé de estado sólido	58
5.2.10 Pulsador inicio/apagado	59
5.2.11 Pulsador tipo hongo de apagado emergencia.....	59
5.2.12 Indicador luminoso tipo sogá.....	60
5.2.13 Alarma acústica	60
5.2.14 Luz piloto plástica	60
5.2.15 Armario de control	61
5.2.16 Medidor de Temperatura Infrarrojo.....	61
5.3 Descripción del software.....	63
5.3.1 Rutinas implementadas en el PLC	63
5.3.1.1 Rutina principal.....	63
5.3.1.2 Rutina de Inicialización.....	66
5.3.1.3 Rutina de interrupción	67
5.3.1.4 Rutina de perforación para los electrodos.....	68
5.3.1.5 Rutina de Reposo para los electrodos	70
5.3.2 Software implementado en la pantalla táctil	71
Capítulo 6: Análisis y Resultados Experimentales.....	79
Capítulo 7: Conclusiones y Recomendaciones	92
7.1 Conclusiones	92

7.2	Recomendaciones.....	92
	Bibliografía	94
	Apéndices.....	97
A.1	Glosario, abreviaturas y simbología.....	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1	Proceso de Horno eléctrico de Fundición (Villaverde, 2009).....	5
Figura 3.2	Contrapesas de Horno de Fundición (Romero, 2010).	6
Figura 3.3	Poleas de Horno de Fundición (Romero, 2010).	6
Figura 3.4	Evolución del horno de arco de C.A (Astigarraga Urquiza, 1999).....	9
Figura 3.5	Tipos de horno de arco (Astigarraga Urquiza, 1999).....	11
Figura 3.6	Horno de arco radiante (Astigarraga Urquiza, 1999).	11
Figura 3.7	Conformación general del horno de arco sumergido (Astigarraga Urquiza, 1999).....	13
Figura 3.8	Conexión típica de horno de arco para fusión de acero (Astigarraga Urquiza, 1999).....	14
Figura 3.9	Horno eléctrico de arco (Metales Ferrosos, 2009).	15
Figura 3.10	Diagrama de CPU SIEMENS (SIEMENS, 2008).	16
Figura 3.11	Operación AND en AWL.	17
Figura 3.12	Operación OR en AWL.....	17
Figura 3.13	Operación Y en KOP.....	17
Figura 3.14	Operación O en KOP.....	18
Figura 3.15	Operación AND en FUP.	18
Figura 3.16	Operación OR en FUP.....	18
Figura 3.17	Circuito equivalente de horno de arco (Natural, Grupo Gas, 2009). ...	19
Figura 3.18	Corriente vrs Tensión de arco (Natural, Grupo Gas, 2009).....	20
Figura 3.19	Circuito equivalente de transformador de corriente (Yacom, 2009). ..	21
Figura 3.20	Principio de Pascal (Ortega García, 2010).....	23
Figura 3.21	Ley de continuidad (Ortega García, 2010)	24
Figura 3.22	Diagrama de sistemas hidráulicos (Ortega García, 2010).....	24
Figura 3.23	Simbología de hidráulica (Ortega García, 2010).	26
Figura 3.24	Presostato digital (Esacademic, 2008).....	27
Figura 5.1	Gráfica teórica del comportamiento de pistón hidráulico.	37
Figura 5.2	Esquema general de la solución implementada.	38
Figura 5.3	Planta física horno eléctrico de arco.	40
Figura 5.4	Transformador trifásico.....	41
Figura 5.5	Transformador de corriente 2000/5 A (MBS AG, 2010).....	42

Figura 5.6	Convertidor de corriente CA/CD.....	43
Figura 5.7	Sensor de proximidad de tipo inductivo.....	44
Figura 5.8	Celda de carga tipo barra.....	44
Figura 5.9	Presostato hidráulico con salida analógica.....	45
Figura 5.10	Circuito hidráulico diseñado e implementado.....	47
Figura 5.11	Símbolo de Bomba hidráulica accionada por motor eléctrico.....	48
Figura 5.12	Símbolo de filtro de aceite.....	48
Figura 5.13	Válvula hidráulica anti retorno tipo check(Sierra, 2010).....	49
Figura 5.14	Símbolo de válvula de alivio.....	49
Figura 5.15	Símbolo de acumulador hidráulico.....	50
Figura 5.16	Símbolo de regulador de caudal.....	50
Figura 5.17	Válvulas de mando manual (Hidraulica, 2009).....	51
Figura 5.18	Electroválvula de dos posiciones (Monografías.com, 2010).....	51
Figura 5.19	Pistones hidráulicos posicionados en el tren principal.....	52
Figura 5.20	Dimensiones de pistón hidráulico.....	53
Figura 5.21	Pantalla táctil Omron NP5-SQ001.....	53
Figura 5.22	CPU 224 AC/DC/Relé.....	54
Figura 5.23	Fuente de alimentación DC.....	56
Figura 5.24	Módulo de entradas analógicas EM 231.....	57
Figura 5.25	Módulo SIWAREX MS.....	58
Figura 5.26	Relé de estado sólido.....	58
Figura 5.27	Pulsador plástico luminoso rasante.....	59
Figura 5.28	Pulsador plástico tipo hongo de emergencia.....	59
Figura 5.29	Indicador luminoso tipo sogá.....	60
Figura 5.30	Alarma acústica.....	60
Figura 5.31	Luz piloto plástica.....	61
Figura 5.32	Armario de control.....	61
Figura 5.33	Termómetro portátil.....	62
Figura 5.34	Diagrama de flujo de rutina principal.....	65
Figura 5.35	Rutina de Inicialización.....	66
Figura 5.36	Interrupción para leer analógicos.....	67
Figura 5.37	Subrutina de perforación para cada electrodo.....	69
Figura 5.38	Subrutina de Reposo para cada electrodo.....	70
Figura 5.39	Pantalla principal de la interfaz gráfica.....	72

Figura 5.40	Detección de material sólido dentro del crisol.	73
Figura 5.41	Seguridad para resguardar la configuración del control.	74
Figura 5.42	Teclado numérico para configurar variables.	74
Figura 5.43	Detección de fin de carrera.	75
Figura 5.44	Detección de posición del electrodo.	76
Figura 5.45	Pantalla de configuración.	77
Figura 5.46	Pantalla de pruebas.	78
Figura 6.1	Gabinete de control para horno de fundición.	79
Figura 6.2	Transductor de corriente HAS 200-S.	80
Figura 6.3	Banco de pruebas hidráulico.	81
Figura 6.4	Maquina de soldar Dialarc 250 AC/DC.	82
Figura 6.5	Plancha de acero de 12 cm de espesor.	82
Figura 6.6	Tren principal de horno de arco.	83
Figura 6.7	Brazo porta electrodo temporal de pruebas.	83
Figura 6.8	Tensión de salida en función de la corriente de entrada.	85
Figura 6.9	Tensión de salida del transductor con electrodo de alma de acero controlado por operador.	87
Figura 6.10	Tensión de salida del transductor con electrodo de grafito controlado por operador.	87
Figura 6.11	Señal de salida de sistema de control automático.	89
Figura 6.12	Tensión de salida del transductor con electrodo de grafito controlado por control automático.	91
Figura 6.13	Tensión de salida del transductor con electrodo de grafito controlado por control automático.	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1	Millones de toneladas de producción (Astigarraga Urquiza, 1999).	9
Tabla 6.1	Datos de entrada y salida para el transductor de corriente.	84
Tabla 6.2	Validez de los datos medidos mediante el transductor de corriente	86

Capítulo 1: Introducción

1.1 Problema existente e importancia de la solución

El plantel de maquinaria, equipo y talleres (MET) está ubicado en Cebadilla de Turrúcares de Alajuela y es una subdivisión del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) formado con el propósito de brindar todo el soporte necesario en los proyectos de esta entidad. Está geográficamente ubicado en el centro del país para quedar en una posición neutra respecto a sus operaciones.

El MET está dividido en diferentes talleres como lo son: mecánico, eléctrico precisión, enderezado y pintura, tubos, fundición entre otros. Algunas de sus funciones se detallan: Fabricación de los tubos que transportan el agua en los proyectos hidroeléctricos, fabricación de piezas de precisión, mantenimiento de la flotilla y equipo especial, diseño y montaje de los gabinetes de control de los sistemas utilizados en los diferentes proyectos. Algunos de éstos son: eólicos, geotérmicos e hidráulicos.

El proyecto que se describe fue desarrollado en el taller de fundición del MET y debe su necesidad al aprovechamiento de más de 10000 mil kilogramos de acero que actualmente el ICE tiene almacenado en las bodegas de todo el país. Este consiste en la construcción de un horno de fundición de arco eléctrico.

Para el diseño del mismo, se planeó realizar un estudio detallado de un horno con las mismas características que el que se requiere que ya estaba en funcionamiento, el cual permitiera una mejor y fácil construcción del propio. Pues esta investigación arrojó información muy valiosa donde destacan serios defectos.

El horno en estudio funde el acero bajo el principio de que si se hace circular una corriente alta por el material, pues tiende a fundirse. Además se aprovecha también de la relación de proporcionalidad que existe entre la distancia de arco y la cantidad de corriente que circula por el mismo. Por lo que aprovechándose de estos principios, resta solamente mover un electrodo hacia arriba y hacia abajo

para mantener la corriente en el ámbito adecuado y así fundir el material. Efectivamente así es como funciona el horno bajo estudio, más el problema se encuentra en la forma en que se hacen subir y bajar los electrodos, debido a que se realiza por el método de contrapesas y de una forma manual.

El horno cuenta con tres electrodos para fundir la chatarra, cada electrodo debe consumir 1500 amperios y oscilaciones desde 0 hasta 3000 amperios para que se establezcan los arcos, pero por características del arco eléctrico y la irregularidad de la superficie, los electrodos consumen algunas veces los 3000 amperios de forma continua durante períodos no aptos (mayores de 2 segundos). Si el fenómeno sobrepasa el tiempo mencionado produce movimientos anómalos en el embobinado del transformador, lo que causa la destrucción del mismo. Ante la situación el operador cuenta con una sola opción y es elevar manualmente el electrodo hasta visualizar que la corriente se estabilice dentro del funcionamiento normal.

El problema que se afronta es que el operador algunas veces no alcanza a solucionar el fenómeno antes del tiempo de riesgo (2 segundos). Por lo que la raíz del problema está en el error humano. La reiteración de tal evento conlleva a que el transformador tenga una vida útil drásticamente corta.

Debido a estos resultados surge la necesidad de incluir en el nuevo diseño para el horno, un sistema automático que controle el movimiento de los electrodos sustituyendo así el sistema manual que genera daños en dispositivos.

1.2 Metodología para la solución del problema

Los requerimientos para la construcción del nuevo horno de fundición fueron los siguientes:

- La corriente que debe fluir por el material a fundir no debe permanecer por más de 2 segundos en valores altos de corriente (arriba de 3000 amperios).
- Los accionadores para el movimiento de los electrodos debe ser presidido por sistemas hidráulicos.

- El accionamiento del sistema hidráulico debe ser controlado por una unidad lógica programable.
- Debe existir un sistema de control de emergencia además del control automático.

La solución que se desarrolló fue diseñar y probar un sistema de control automático que manipulara el movimiento de los tres electrodos que conforman el horno de fundición.

El sistema está constituido por una etapa de recolección de datos de la variable a controlar (corriente), por una interfaz de monitorización y configuración del sistema, por una unidad lógica programable que procesa la información recolectada para la toma de decisiones y un sistema hidráulico que es el encargado de interactuar con los electrodos.

Además se implementó un control manual para el accionamiento de los electrodos como una opción de emergencia.

Capítulo 2: Meta y Objetivos

2.1 Meta

Desarrollar un sistema de control automático para el proceso de fundición de acero evitando daños al transformador.

2.2 Objetivo General

Diseñar un sistema de control monitorizado para el proceso de fundición que evite el consumo de corriente alto (mayores a 2000 amperios) de forma continua por más de 2 segundos para evitar la destrucción del transformador.

2.3 Objetivos Específicos

- Diseñar un sistema automático que controle el movimiento de los pistones hidráulicos durante el proceso de fundición.
- Desarrollar una rutina que permita ejecutar el diseño del sistema automático.
- Desarrollar una rutina como interfaz gráfica que permita la visualización y configuración de la variable a controlar.
- Proponer un sistema de medición de temperatura en el material a fundir.

Capítulo 3: Marco Teórico

3.1 Descripción del proceso de horno de fundición de arco a mejorar.

A continuación se describe a detalle las etapas que recorre una sesión de fundición según entrevistas y visitas a planteles industriales donde se utiliza normalmente (Romero, 2010).

El proceso de funcionamiento de este horno es el siguiente:

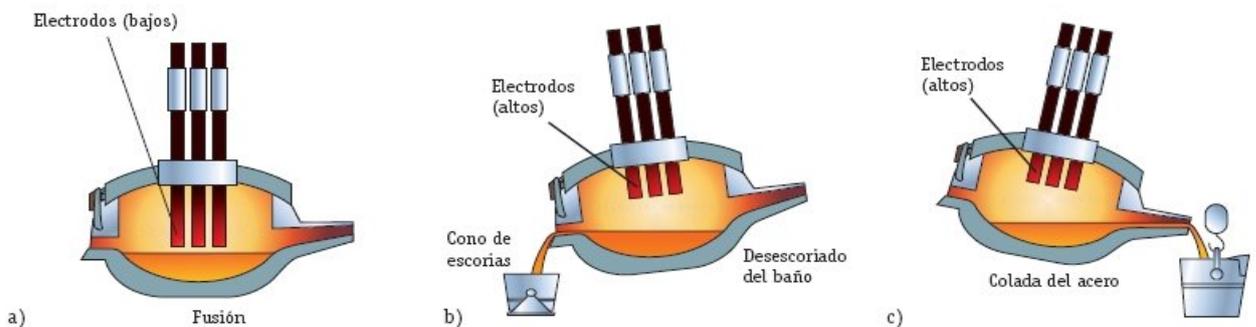


Figura 3.1 Proceso de Horno eléctrico de Fundición (Villaverde, 2009).

1. Se quita la tapa del horno y se deposita una fracción (1/6 de tonelada) de la chatarra a fundir. El horno bajo estudio tiene la capacidad de fundir una tonelada líquida.
2. Se cierra el horno y se acercan los electrodos a la chatarra para que se forme el arco eléctrico y comience el proceso de fundido (ver figura 3.1, a).

En este punto es donde se pretende realizar el aporte del proyecto, por lo que se detallará a profundidad el proceso actual. Todos los movimientos acá descritos son realizados manualmente mediante contrapesas (ver figura 3.2) que a su vez son gobernadas por un operador a través de poleas (ver figura 3.3).



Figura 3.2 Contrapesas de Horno de Fundición (Romero, 2010).



Figura 3.3 Poleas de Horno de Fundición (Romero, 2010).

El primer paso consiste en bajar únicamente el primer electrodo de los tres y detenerlo hasta que tenga contacto con la chatarra, este hecho lo detecta el operador de forma auditiva y sensitiva. Luego se comienza a bajar el segundo y

detiene hasta que se establezca el arco eléctrico en los dos primeros electrodos. En este punto, ambos arcos consumen nominalmente 1500 amperios con una variación de cero hasta 3000 A. En ciertos momentos ambos o alguno de los arcos consumen continuamente 3000 A por lo que el operador debe movilizar hacia arriba y luego hacia abajo tal electrodo con el propósito de estabilizar el consumo de corriente. Esto con el fin de prevenir la destrucción del transformador de alimentación que no resiste la entrega de 3000 A de forma continua por mucho tiempo (más de 2 segundos). Este movimiento en los electrodos se repite durante aproximadamente 20 minutos hasta que el material se haya fundido parcialmente. Una vez cumplido esto, se eleva el segundo electrodo y se comienza a descender el tercero para continuar con el mismo proceso ya mencionado, de nuevo por un lapso de 20 minutos hasta haber fundido la mayor parte del material. Cabe mencionar que el proceso se realiza separadamente en dos intervalos de 20 minutos cada uno, ya que el operador solo puede maniobrar dos electrodos a la vez y no los tres debido al riesgo de no poder controlar rápidamente los consumos de corriente continua.

Una vez finalizada esta primera etapa sucede un fenómeno particular. Debido a que la mayor parte del acero esta en forma líquida, los restantes sólidos comienzan a flotar en el material. Este hecho debe ser detectado por el operador y de inmediato se elevan los dos electrodos en operación para evitar consumos de corriente constante por las consecuencias mencionadas.

Cumplidos estos 40 minutos aproximados, el operador vuelve a descender los tres electrodos para continuar con el proceso de fusión. Esta es la segunda etapa y el objetivo no solo es terminar de fundir el material sino variar el consumo de corriente nominal a diferentes valores, normalmente superiores; esto se consigue descendiendo los electrodos, o sea disminuyendo las distancias con el material e igualmente previniendo consumos de corriente inadecuados (3000 amperios continuos). Este aumento de corriente produce un aumento de temperatura y se efectúa con el fin de agregar elementos que mejoraran la aleación final.

Esta última etapa tiene una duración de entre 10 y 20 minutos. Ya transcurridos se vuelven a elevar los electrodos para luego añadir la siguiente

fracción de chatarra sólida y de acá en adelante se repite el proceso ya mencionado hasta completar con la tonelada de material ya fundida.

Todo este proceso se pretende automatizar, evitando los inconvenientes y mejorando tiempos de ejecución al actuar con los tres electrodos a la vez.

3. Cuando la chatarra está en la última etapa de fusión se inyecta oxígeno para eliminar los elementos indeseables (silicio, magnesio, entre otros).
4. Se inclina el horno y se extrae la escoria (ver figura 3.1, b)
5. Se inclina el horno y se vierte el material fundido en la cuchara para llevarlo al área de moldeo (ver figura 3.1, c).

3.2 Antecedentes Bibliográficos

3.2.1 Historia del Horno de arco eléctrico (Astigarraga Urquiza, 1999).

En 1800 se hizo saltar el primer arco entre dos electrodos de carbono alimentado por pilas de Volta gracias al inglés Davy. Pero no sería hasta 1886 cuando el francés Paul Heroult comenzó sus investigaciones para sintetizar la base tecnológica del horno de arco actual. Sus estudios llegaron a su auge cuando en 1902 realiza la primera fusión industrial sobre una cuba rectangular de 2 t alimentada por un transformador monofásico de 300 KVA. El proceso de fundido tuvo una duración de 10 horas.

Desde esa fecha la tecnología de la fusión ha ido creciendo. Poco después enfrentaron el problema del desgaste de los refractarios, ya que se dio una tendencia por incrementar la potencia específica de trabajo para lograr mayor producción. Este traspie fue superado utilizando arcos cortos sumergidos en la escoria, operando a un factor de potencia de 0,60 – 0,65 y a muy altas intensidades.

Alrededor de los años 80 hubo de nuevo un aumento en la productividad gracias a ciertos avances como por ejemplo: la técnica de la escoria espumosa,

que permite utilizar arcos más largos a tensión más alta e intensidad más reducida. Este cambio hace que los hornos operen con un factor de potencia de 0,75 – 0,85, lo que permite un mejor aprovechamiento del transformador principal.

También se han mejorado las técnicas de refrigeración, la regulación de la potencia en el arco y se han integrado de forma masiva los equipos de control automatizados.

En la figura 3.4 se muestra la evolución de los hornos de arco de fusión de acero en los últimos 40 años. En este se observa cómo se pasa de 2,5 horas a menos de una hora los tiempos de fusión y de 15 t/h a 90-95 t/h las velocidades de fusión. Es conveniente indicar que este crecimiento en tiempos y velocidades se mantiene en la actualidad.

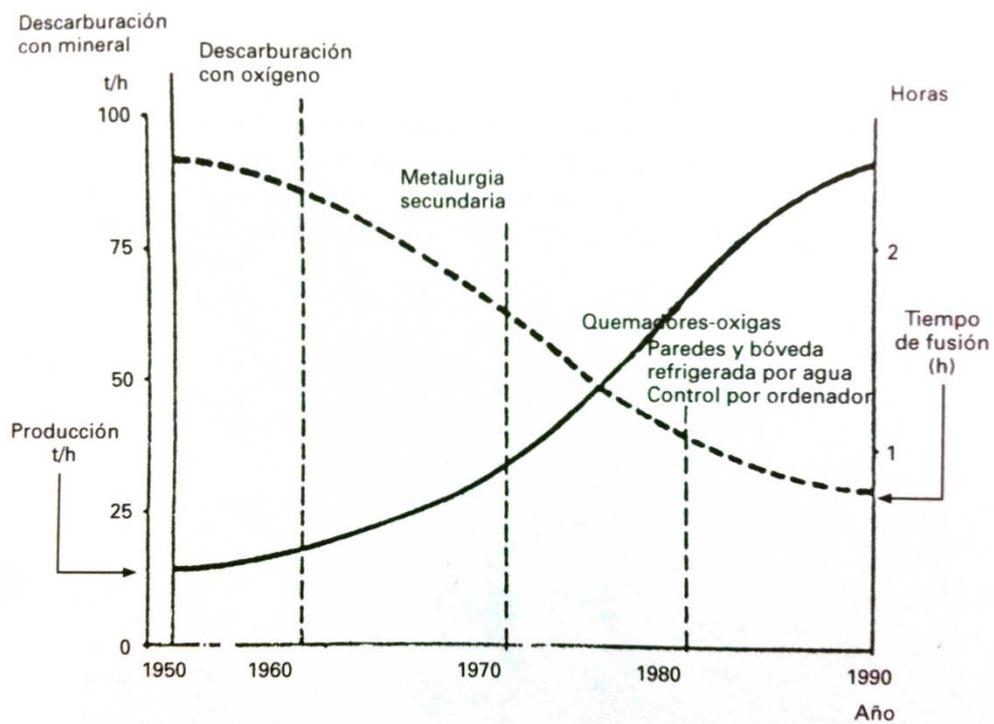


Figura 3.4 Evolución del horno de arco de C.A (Astigarraga Urquiza, 1999).

En la tabla 3.1 se muestra la producción en millones de t de acero de hace algunos años.

Tabla 3.1 Millones de toneladas de producción (Astigarraga Urquiza, 1999).

Año	España	CEE 12 miembros	EE.UU.	Japón	Total mundial
1990	12,9	142,1	88,7	110,3	747,9
1991	12,9	137,4	79,2	109,6	715,2
1992	12,3	132,5	83,2	98,1	694,7
1993	13,0	132,4	87,0	99,6	706,4
1994	13,5	139,0	88,9	98,3	702,0

3.2.2 Descripción general de hornos de arco (Astigarraga Urquiza, 1999).

El arco eléctrico es utilizado para el calentamiento de materiales mediante la circulación de corriente entre dos electrodos donde uno de ellos puede ser la propia carga. Entre sus aplicaciones están:

- La soldadura
- Los hornos de fusión de metales
- Los hornos de reducción de minerales.

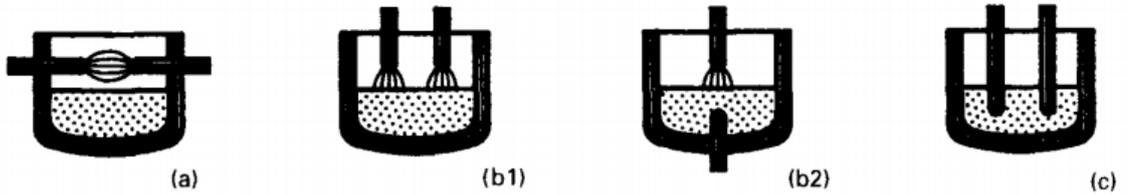
Cuando se utiliza para la soldadura, es usual tomar una varilla de aportación de material que cumple la función de electrodo, permitiendo así la formación de arco entre la varilla y el material a soldar. En ciertos casos el electrodo puede ser de grafito.

En aplicaciones de hornos de fusión, el material a fundir es depositado en la cuba donde puede ocurrir una de dos opciones: una, que el arco se forme entre electrodos y dos, entre electrodos y la carga. Los hay de tipo donde solo utilizan un electrodo (horno de corriente continua), donde utilizan dos electrodos colocados horizontalmente (calentamiento indirecto por radiación del arco al interior de la cuba) y donde se utilizan tres electrodos (hornos de corriente alterna, nuestro caso).

Cuando se utilizan los arcos para reducción, son específicamente para la fabricación de ferroaleaciones: carburo de calcio, silicio, metal, entre otros. Los electrodos se encuentran sumergidos en el material fundido donde el calentamiento es provocado por resistencia directa del material.

En general se muestran en la figura 3.5 los tres tipos de horno:

- (a) De arco radiante.
- (b) De fusión en corriente alterna (b1) y en corriente continua (b2).
- (c) De reducción de minerales.

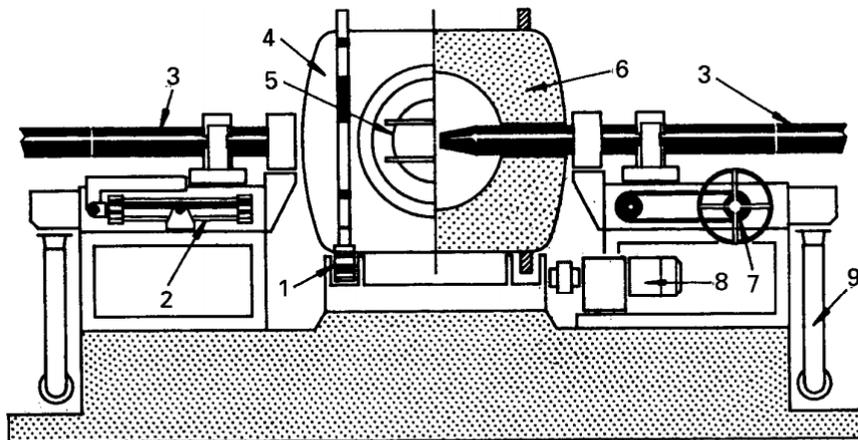


(a) Horno de arco radiante (calentamiento indirecto)
 (b) Horno de arco fusión [(b1) de corriente alterna, (b2) de corriente continua]
 (c) Horno de arco de reducción (calentamiento por resistencia)

Figura 3.5 Tipos de horno de arco (Astigarraga Urquiza, 1999).

3.2.2.1 Hornos de arco radiante.

Su principal característica radica en que los dos electrodos son colocados horizontalmente permitiendo así el establecimiento del arco dentro de la cuba. Normalmente son construidos como se muestra en la figura 3.6.



- | | |
|------------------------------|---|
| 1.- Roldanas | 6.- Revestimiento |
| 2.- Accionamiento hidráulico | 7.- Accionamiento manual |
| 3.- Electrodos | 8.- Grupo moto-reductor de basculación para colar |
| 4.- Cuba | 9.- Refrigeración por agua |
| 5.- Puerta de carga | |

Figura 3.6 Horno de arco radiante (Astigarraga Urquiza, 1999).

La parte de este tipo de hornos está constituido principalmente por:

- Un Transformador principal monofásico provisto de tomas en primario o secundario, con cambiador de tensiones de accionamiento manual o automático, que opera en vacío o en carga.
- Elementos de conexión en baja tensión entre transformador y electrodos, con el embarrado y cables de alimentación a las mordazas antes citadas, también refrigerados por agua.
- Un sistema de regulación de potencia para mantener ésta constante en el valor correspondiente a la toma de tensión elegida en el transformador.

Son construidos en capacidades de 100 a 1000 kg con potencias de 100 a 500 kW. En potencias bajas son monofásicos y en las altas trabajan con un sistema equilibrador de fases compuesto por una reactancia monofásica y un banco de condensadores.

Son utilizados únicamente para fusión de hierro y metales no férricos. Los electrodos consumen entre 5 y 8 kg/t.

Actualmente no se construyen nuevas unidades, ya que han sido desplazadas por hornos de tipo Heroult e Inducción.

3.2.2.2 Hornos de arco sumergido.

Dependiendo del material a fundir (ferroaleaciones, carburo de calcio, silicio metal, fósforo), el horno puede tener diferentes características, pero típicamente es el que se muestra en la figura 3.7.

En la bóveda se introducen 2, 3, 4, o 6 electrodos, alimentados en corriente alterna a baja tensión, que normalmente están sumergidos en el baño de material fundido. Este material puede ser compuesto de uno o varios productos minerales.

Los electrodos pueden ser de grafito o de una pasta cocida. El calentamiento que estos transfieren por el arco no es tan importante como el que se genera por el efecto Joule, debido a la corriente eléctrica que pasa por la carga. Las tensiones son del orden de 100 V con intensidades de 10000 a 100000 A.

Aunque los equipos son de gran potencia, el número de unidades en cada país es muy reducido.

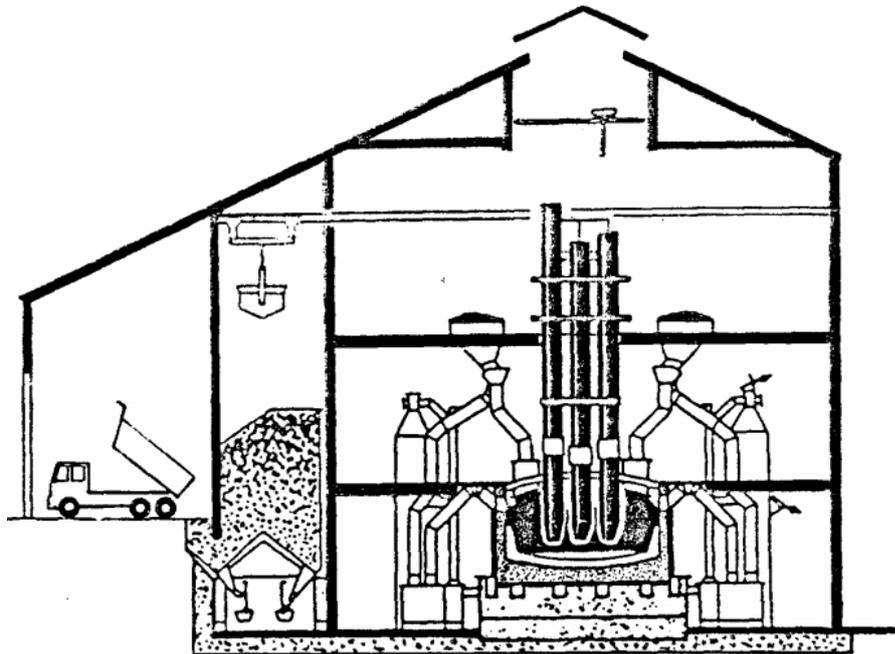


Figura 3.7 Conformación general del horno de arco sumergido (Astigarraga Urquiza, 1999).

3.2.2.3 Hornos de arco para fusión de acero

Este es el horno al que se debe el presente proyecto.

Muchas veces se comete el error de llamarles, hornos de arco, suponiendo que la carga es chatarra de acero donde en realidad puede ser cualquier pre reducido del mineral de hierro.

En general, estos hornos están conformados por tres electrodos de grafito, en corriente alterna o un electrodo en corriente directa que se introducen siempre por la parte superior de la cuba.

En la figura 3.8 se muestra la conexión normal. Constituida básicamente de tres partes:

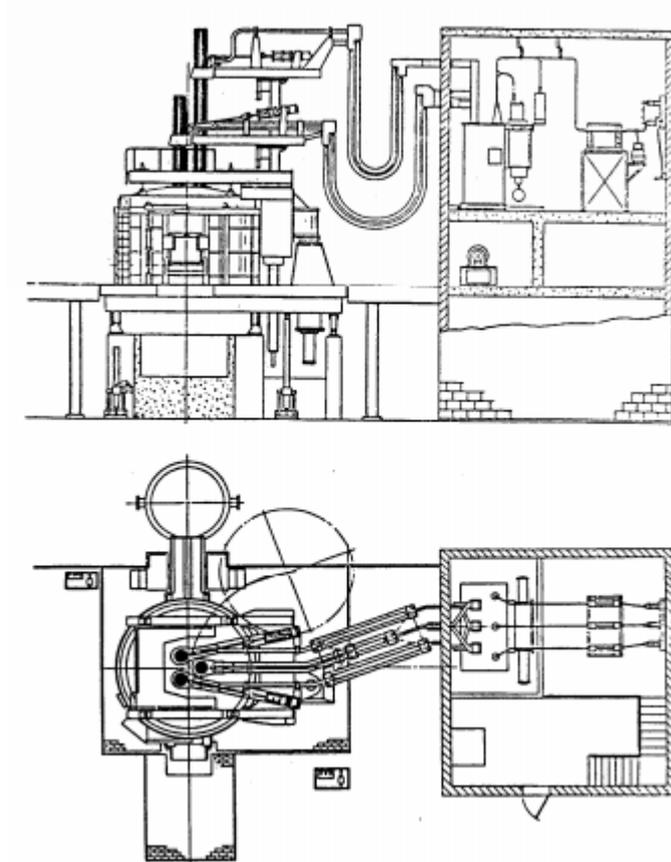


Figura 3.8 Conexión típica de horno de arco para fusión de acero (Astigarraga Urquiza, 1999).

- Equipo eléctrico con el transformador principal como elemento fundamental y el equipo de control.
- Equipo mecánico que incluye la cuba revestida donde se realiza la fusión de chatarra.
- Elementos auxiliares tales como sistema hidráulico de basculación, equipo de captación y depuración de humos, precalentador de chatarra, dispositivos de carga con cestas, entre otros.

Sufre un crecimiento acelerado en los países desarrollado.

En la figura 3.9 se muestra un ejemplo de horno de arco de C.A.

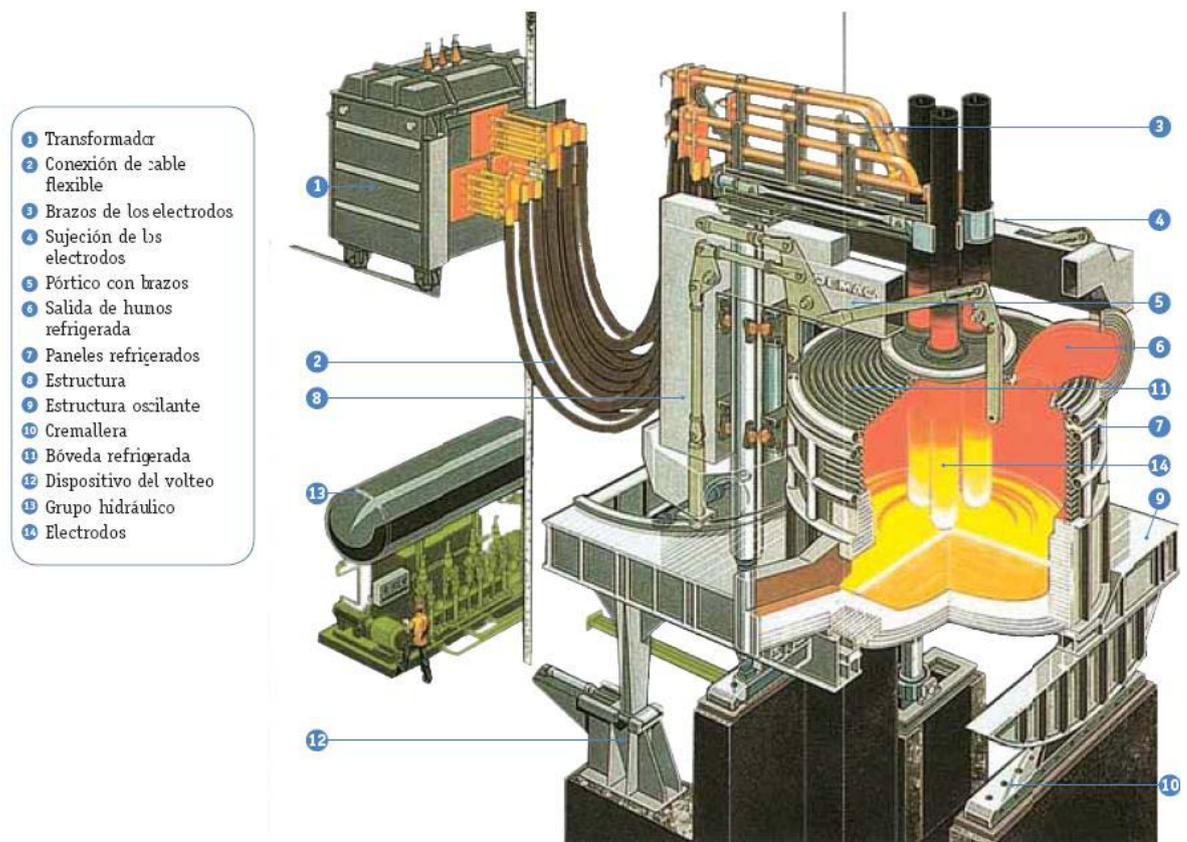


Figura 3.9 Horno eléctrico de arco (Metales Ferrosos, 2009).

3.2.2.4 Fenómeno FLICKER o parpadeo

Se trata de variaciones en la amplitud de la tensión diferentes en cada fase. La consecuencia más dañina son las variaciones en el brillo de las lámparas incandescentes. Estas generan molestia visual y cansancio en las personas cuando sus frecuencias oscilan entre 3 y 10 Hz (Issouribehere, Aguero, & Battaiotto, 2007).

Existen entidades reguladoras para establecer los niveles de flicker aceptables. Entre ellas IEEE.

3.2.3 Controlador lógico programable (PLC)

Este es un dispositivo compacto que está compuesto por un microprocesador, por una fuente de alimentación integrada, circuitos de entrada – salida, LED`s

indicadores, puertos de ampliación, puertos de comunicación. Su función es la de leer entradas, ejecutar rutinas y configurar las salidas. Este es apenas el CPU (ver figura 3.10) de todo un sistema de automatización.

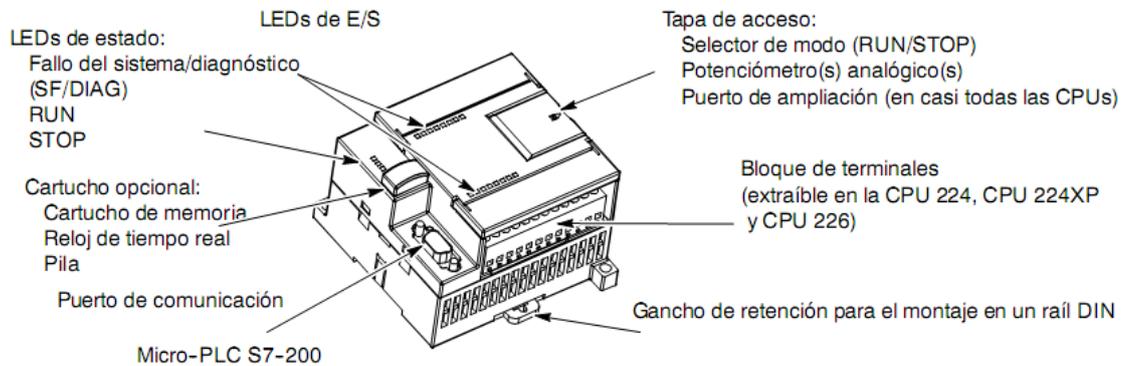


Figura 3.10 Diagrama de CPU SIEMENS (SIEMENS, 2008).

Mediante sus puertos de ampliación y comunicación se les puede adaptar a muchísimas aplicaciones, por lo que lo hace un dispositivo flexible y escalable. Algunos de los módulos de ampliación son: módulos de entradas digitales, módulos de salidas digitales, módulos de entradas analógicas, módulos GSM, módulos Ethernet, pantallas de visualización, entre otros.

3.2.4 Paquete de programación STEP7 – Micro/WIN (SIEMENS, 2008)

Este es el software que permite la programación de los controladores SIEMENS. En general acepta tres tipos de programaciones: AWL, KOP y FUP:

3.2.4.1 Lenguaje AWL

Anweisungen worten liste por sus siglas en alemán o lista de instrucciones permite programar textualmente y es muy similar al lenguaje ensamblador. Este es el lenguaje nativo de PLC SIEMENS. Ver ejemplos en las figuras 3.11 y 3.12.

```

LD I0.0    //Leer una entrada
A M0.0     //AND con un registro de un bit en memoria
=Q0.0      //Escribir el valor en la salida 1

```

Figura 3.11 Operación AND en AWL.

```

LD I0.0    //Leer una entrada
O I0.1     //OR con otra entrada
=Q0.1      //Escribir el valor en la salida 1

```

Figura 3.12 Operación OR en AWL.

3.2.4.2 Lenguaje KOP

Kontakte programm por sus siglas en alemán o lógica de contactos es un lenguaje muy parecido al esquema de cableado donde se supone una línea vertical que representa la fuente de alimentación así sea 220V en AC o 24 V en continua. Este flujo de corriente de la fuente va a estar controlado por contactores normalmente abiertos o cerrados. Los primeros permiten el paso de corriente si el contactor está cerrado y los segundos dan paso a la corriente si están en estado abierto. Este paso de corriente va a activar condicionalmente las salidas que son representadas por bobinas energizadas.

De esta forma se pueden diseñar múltiples condiciones lógicas como las mostradas en las figuras 3.13 y 3.14.

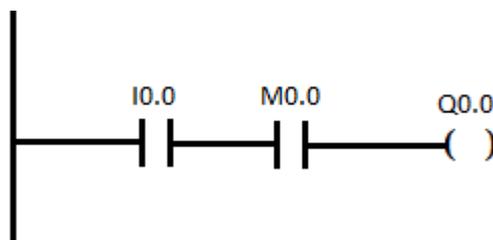


Figura 3.13 Operación Y en KOP.

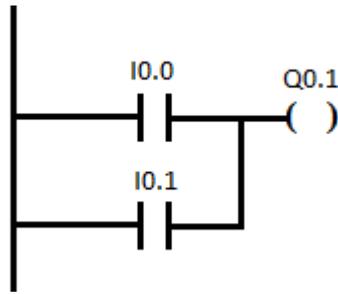


Figura 3.14 Operación O en KOP.

3.2.4.3 Lenguaje FUP

Funktionen programm por sus siglas en alemán o programación por funciones. En este editor no existen contactos ni bobinas como en KOP, sino es muy parecido a circuitos con compuertas lógicas. En las figuras 3.15 y 3.16 se muestran dos ejemplos.

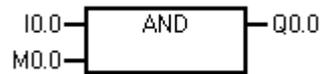


Figura 3.15 Operación AND en FUP.

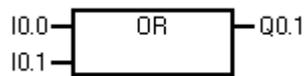


Figura 3.16 Operación OR en FUP.

3.3 Descripción de los principales principios físicos y/o electrónicos relacionados con la solución del problema.

3.3.1 Parámetros Eléctricos de Operación del horno de Arco (Natural, Grupo Gas, 2009)

El circuito equivalente del horno de arco es el siguiente:

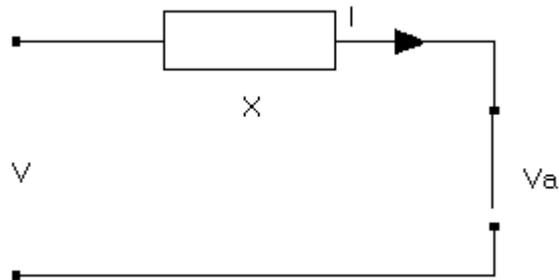


Figura 3.17 Circuito equivalente de horno de arco (Natural, Grupo Gas, 2009).

X es la reactancia del circuito, V es la tensión en vacío, Va es la tensión de arco e I es la corriente. El arco es resistivo, por tanto, la corriente está en fase con la tensión de arco. La tensión de arco es definida por la longitud del arco de la siguiente forma:

$$V_a = V_{AC} + V_L \quad (3.1)$$

$$V_a = V_{AC} + l * E \quad (3.2)$$

De la ecuación 3.1 y 3.2 podemos apreciar que la tensión de arco (V_a) está conformada por dos tensiones:

- una parte fija (V_{AC}) que aparece a partir del instante de separación de los contactos y depende de los materiales empleados,
- una parte variable, V_L que aparece cuando el arco se ha estabilizado, es el voltaje entre el electrodo y el metal. Ésta a su vez está descompuesta por dos parámetros:

- I es la longitud de arco (en cm).
- E es el gradiente de potencial de la columna de arco (V/cm).

Además, el comportamiento de la corriente respecto a la tensión es el siguiente:

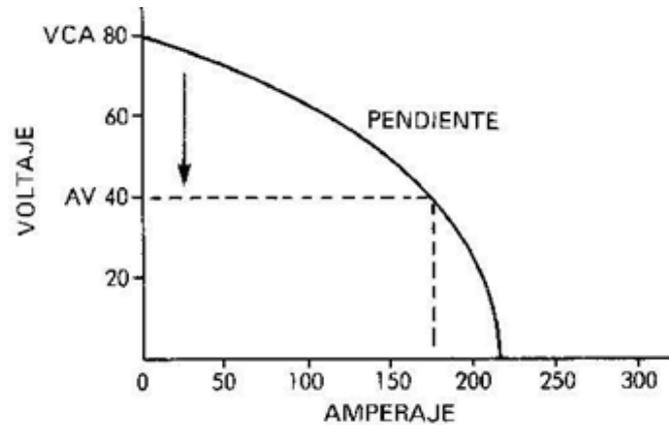


Figura 3.18 Corriente vrs Tensión de arco (Natural, Grupo Gas, 2009).

Cuando se forma el arco y se inicia la fusión, el V_{CA} de la parte fija se reduce hasta el valor del V_L de la parte variable. De acá en adelante, la tensión de arco depende de la variación de la longitud de arco l .

De la ecuación 3.2 y la figura 3.18 se puede deducir que, conforme se alarga el arco (aumento de l cm), la tensión de arco aumenta y se reduce la corriente. Cuando se acorta el arco, se reduce la tensión de arco y aumenta la corriente. Por lo tanto se define que la variación de corriente es inversamente proporcional a la longitud que existe entre el electrodo y el material a fundir. De esta característica se toma ventaja para controlar la corriente mediante el movimiento de los electrodos (longitud de arco).

3.3.2 Transformadores de corriente

Son dispositivos que en general cumplen dos funciones:

1. Tomar las señales de intensidades altas y reducirlas a un valor seguro y medible.
2. Aislar eléctricamente el circuito a medir de los instrumentos de medición.

Estos dispositivos normalmente están caracterizados por relaciones de corriente primaria y secundaria. Algunas relaciones típicas son: 600/5, 800/5, 1000/5, 2000/5, donde los valores nominales pueden ser 5 A y 1 A.

En la figura 3.19 se muestra el circuito equivalente de un transformador de corriente.

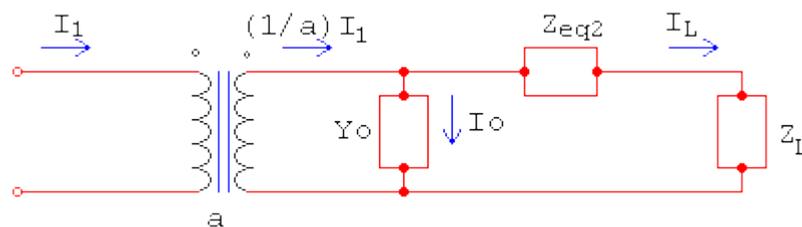


Figura 3.19 Circuito equivalente de transformador de corriente (Yacom, 2009).

Donde Y_0 es la admitancia de excitación, Z_L la impedancia de la carga y Z_{eq2} es la impedancia equivalente referida al secundario. De la figura 3.17 se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{a} * I_1 = I_0 + I_L \quad (3.3)$$

Donde:

$$I_0 = U_0(Z_{Eq2} + Z_L) * I_L \quad (3.4)$$

Luego:

$$\frac{1}{a} * I_1 = [U_0(Z_{Eq2} + Z_L) + 1] * I_L \quad (3.5)$$

Por lo tanto:

$$\frac{I_L}{I_1} = \frac{1}{a} * \frac{1}{[U_0(Z_{Eq2} + Z_L) + 1]} \quad (3.6)$$

De estas ecuaciones se observa que la relación de transformación entre I_L/I_1 es diferente a $1/a$, sino que aparece una expresión:

$$\frac{1}{[U_0(Z_{Eq}^2 + Z_L) + 1]} \quad (3.7)$$

Debido a que la ecuación 3.7 es de la forma compleja, van a existir errores de ángulo y fase en la transformación. Estos errores son los que van a determinar la calidad de los transformadores de corriente. Las entidades encargadas de dictar las normas que especifican la precisión de estos transformadores son la norma ASA americana y la norma VDE alemana.

3.3.3 Fundamentos de Hidráulica

La hidráulica es una rama de la hidromecánica que estudia la forma en que las fuerzas y los movimientos son transmitidos por medio de fluidos líquidos (Ortega García, 2010).

3.3.3.1 Propiedades de los fluidos hidráulicos

- Densidad (ρ)

Es la relación que existe entre la masa de un objeto y su volumen (Day & Carpi, 2002).

$$\rho = \frac{m}{V} (kg/m^3) \quad (3.8)$$

- Viscosidad

Es aquella que tiende a oponerse a su flujo cuando se le aplica una fuerza. En todos los líquidos la viscosidad disminuye con el aumento de temperatura (Basurto, 2001).

- Régimen laminar

Se refiere al desplazamiento ordenado de las moléculas dentro de un conductor.

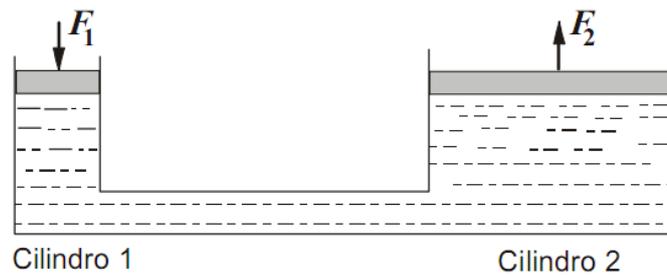
- Régimen turbulento

Se le llama así al desplazamiento desordenado de las moléculas dentro de un conductor.

3.3.3.2 Principios Físicos

- **Principio de Pascal**

La presión ejercida a un fluido envasado, se transmite uniformemente en todas las direcciones ejerciendo fuerzas de igual magnitud sobre áreas iguales. Ver figura 3.20.



$$\begin{array}{l} p_1 = \frac{F_1}{A_1} \\ p_2 = \frac{F_2}{A_2} \\ p_1 = p_2 \end{array} \quad \left| \quad \boxed{\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}}\right.$$

Figura 3.20 Principio de Pascal (Ortega García, 2010).

- **Ley de continuidad**

A densidades constantes y por cualquier sección de un tubo, debe pasar el mismo caudal en un tiempo dado. Ver figura 3.21.

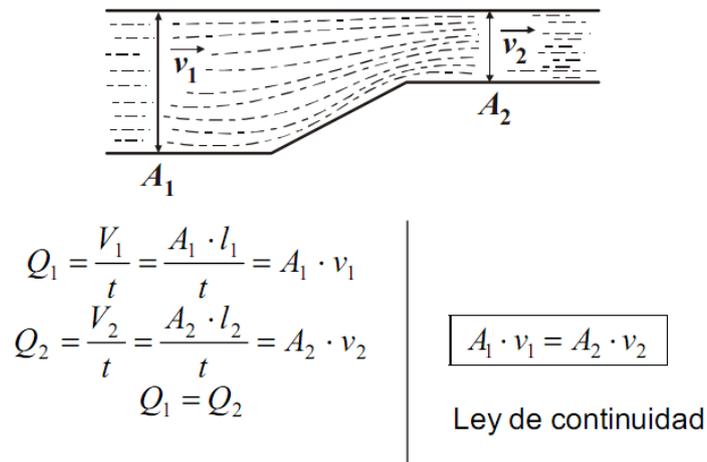


Figura 3.21 Ley de continuidad (Ortega García, 2010)

3.3.3.3 Sistemas hidráulicos

Típicamente la mayoría de las aplicaciones en hidráulica se diseñan según la figura 3.22.

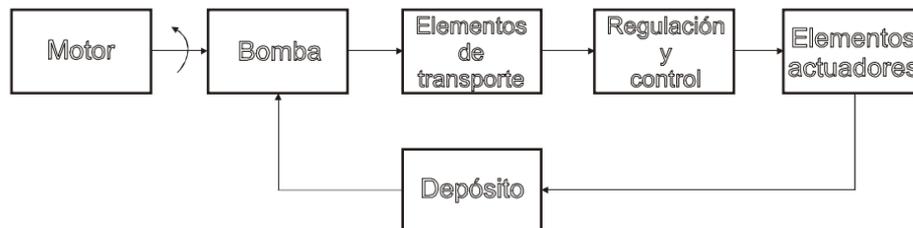


Figura 3.22 Diagrama de sistemas hidráulicos (Ortega García, 2010).

Componentes de sistemas hidráulicos

- **Bombas:** Dispositivo encargado de suplir la presión y el caudal necesarios para la distribución del fluido.
- **Depósito:** Se encarga del almacenamiento, recuperación y mantenimiento de los niveles del fluido a suplir.
- **Filtro:** Su función es la de no dejar pasar partículas sólidas hacia los elementos de transporte.

- **Manómetros:** Indicadores de presión que normalmente se posicionan después de la bomba.
- **Red de distribución:** Es la tubería necesaria para transportar los fluidos en todos los puntos.
- **Elementos de regulación y control:** Son aquellos dispositivos cuya función es regular el paso de aceite entre las bombas y los elementos actuadores. Se les llama válvulas y pueden ser accionados de varias formas: manualmente, circuitos eléctricos, neumáticos, hidráulicos o mecánicos. Además son clasificadas en tres grupos:
 1. Válvulas distribuidoras: Varían según el número de orificios (vías), las posiciones y por su forma de activar.
 2. Válvulas antirretorno: Permiten el flujo de aceite en un solo sentido.
 3. Válvulas de regulación de presión y caudal: Encargadas de variar la presión y caudal según necesidades.
- **Elementos actuadores:** Se clasifican en dos grupos: cilindros y motores.
 1. Cilindros: Su función es la de transformar la energía hidráulica en mecánica mediante movimientos lineales. Existen dos tipos: de simple efecto y de doble efecto.
 - a. De simple efecto: El vástago únicamente trabaja en un sentido. Para regresar a la posición inicial se colocan muelles (resortes) o aprovechan la fuerza de gravedad.
 - b. De doble efecto: Su vástago trabaja en los dos sentidos posibles.
 2. Motores: Igualmente que los cilindros transforman la energía hidráulica en mecánica, pero mediante movimientos rotativos. Existen varios tipos: de engranajes, de pistones y rotativos de aspas.

En la figura 3.23 se muestra la representación gráfica y simbología.

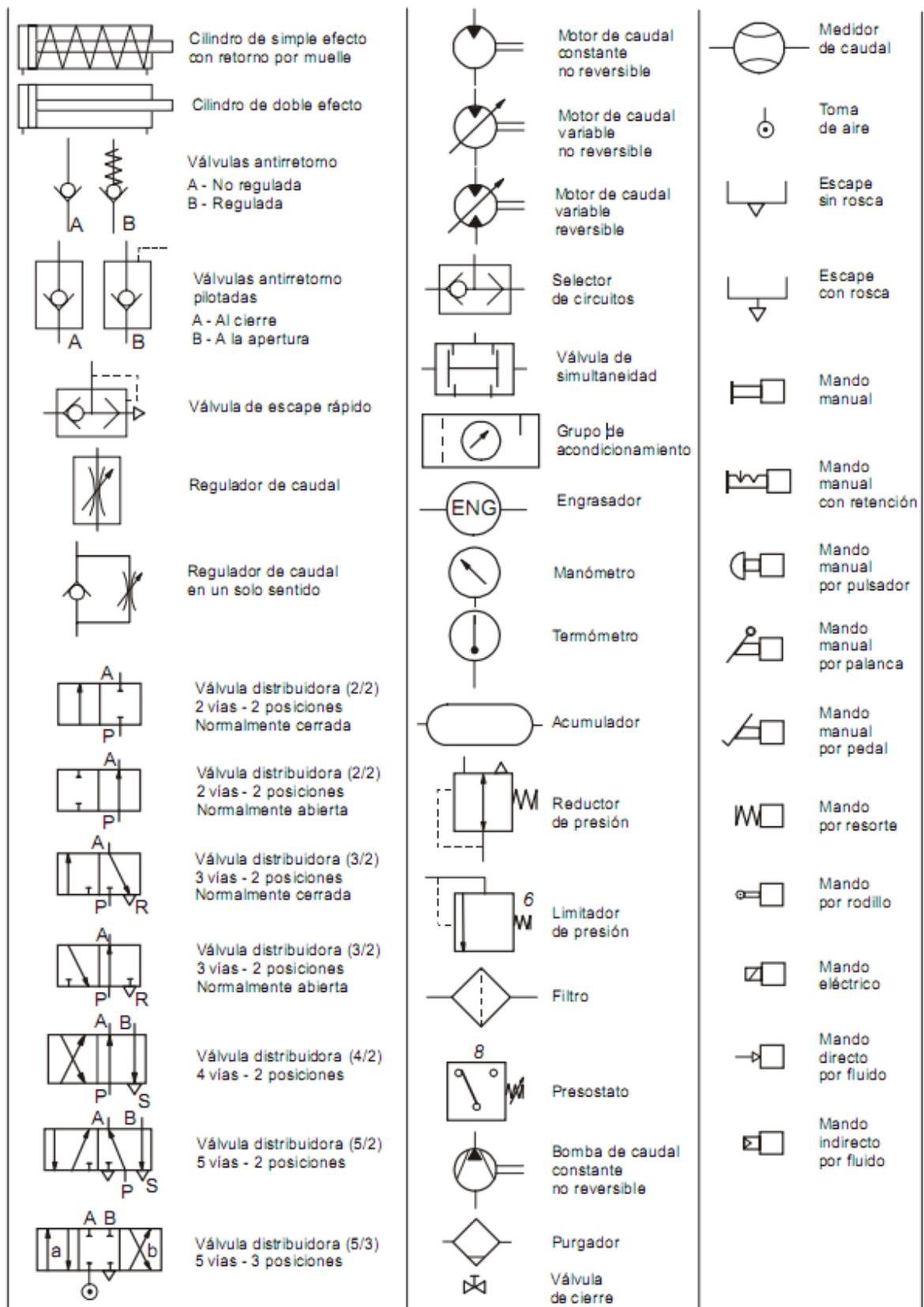


Figura 3.23 Simbología de hidráulica (Ortega García, 2010).

3.3.4 Presostatos

Este dispositivo también es llamado interruptor de presión y está encargado de cerrar o abrir un circuito eléctrico según sea la presión medida. Existen de tipo analógico o digital. En el caso de los digitales, son regulables respecto a sus umbrales de interrupción. Ver figura 3.24.

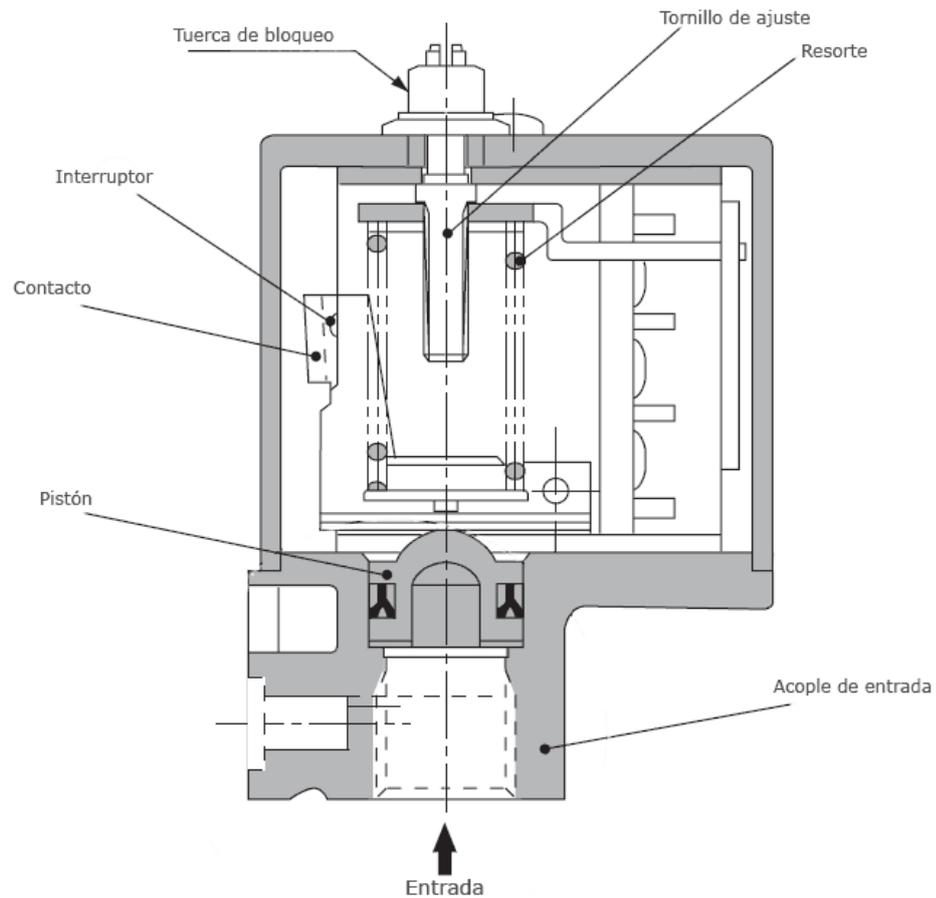


Figura 3.24 Presostato digital (Esacademic, 2008).

Capítulo 4: Procedimiento Metodológico

4.1 Reconocimiento y definición del problema

Como ya se ha analizado en secciones anteriores, el problema surgió durante el diseño del nuevo horno de fundición que se desea implementar. Para una construcción más eficiente se decidió investigar en el país sobre otros hornos del mismo tipo que estuvieran en funcionamiento normal. Esto con el objetivo de mejorar posibles defectos que se encontrasen.

Esta investigación se llevó a cabo en la ciudad de Cartago, donde se encontró el único en operación en todo el país. La misma fue una entrevista realizada al operador durante una jornada de trabajo. De manera que la visita fue provechosa de forma presencial y en cuanto a indicaciones del operador.

Los defectos encontrados en el funcionamiento se enfatizaron en la forma en que los tres electrodos del horno eran controlados. Pues estos se movilizaban de una forma manual mediante poleas tratando de mantener el consumo de corriente lo más estable posible. Estos movimientos inexactos causaban un consumo de corriente alto (por encima de 3000 A) que se mantenían durante períodos (mayores a 2 s) que no eran soportados por el transformador de alimentación. Bajo estas condiciones, el bobinado del transformador tenía movimientos anómalos los cuales culminaban en desgastes de material y éstos en la destrucción del equipo.

Debido a éste fenómeno, el transformador era sometido a constantes reparaciones, las cuales generaban pérdidas económicas innecesarias.

4.1 Obtención y análisis de información

La información necesaria durante el desarrollo del proyecto fue suministrada y procesada de la siguiente forma:

- a. Reuniones con Ingenieros en electrónica.

Estas fueron necesarias y repetidas durante todo el desarrollo del proyecto. Al inicio fue para discutir y concretar los requerimientos del sistema de control. La elección de la solución escogida fue el fruto de varias reuniones. Luego fueron constantes debido cambios en el desarrollo de la solución. Como también en la planificación de la prueba del mismo.

b. Reuniones con especialista en hornos de fundición.

La presencia del especialista en las reuniones fue muy frecuente debido a que ninguna de las decisiones tomadas podía pasar por alto sin que éste la diera por válida.

c. Reuniones con Ingenieros en Mecánica

Estas fueron necesarias debido a que el presente proyecto debía tomar en cuenta el diseño de todo el sistema físico de la planta e integrarlo con el sistema de control. También fue necesario ser asesorado para llevar a cabo uno de los objetivos del proyecto que era el diseño de todo el sistema hidráulico que gobernaría el movimiento.

d. Referencias Bibliográficas

Se tuvo que recurrir a libros de siemens para familiarizarse con los lenguajes de programación, así como los de Omron para la correcta programación de la pantalla táctil.

Además las fuentes de páginas web fueron frecuentes para resolver un sinnúmero de problemas. Entre estas están las indicadas en el marco teórico para sentar bases sólidas de los principios físicos y eléctricos que acarrea el proyecto como también el análisis de muchas de las hojas de datos.

4.2 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución

Primeramente se hizo un análisis bibliográfico entre ellos los principios eléctricos que se presentan en el arco eléctrico. Con base a esto se parte del hecho de que controlando la distancia de arco se puede controlar la corriente

(sección 3.3.1). Luego se realiza una entrevista detallada respecto el proceso que actualmente se sigue para fundir acero (Romero, 2010). De esta entrevista surge la primera opción de solución. Esta consiste en pasar de un control manual a un control puramente automático donde el proceso de fundición no dependa de la reacción humana.

Más esta sería abortada luego de ciertas reuniones donde se analizaban los posibles efectos que podía tener. Concretamente se descartó porque en caso de falta de corriente eléctrica no habría forma de tomar medidas.

Este detalle abrió camino a la segunda opción, en la que se planteaba un dominante control automático del proceso, pero con un plan de emergencia el cual estaba basado en un control manual que funcionaba en paralelo. Debido a que el sistema de emergencia debía cumplir con estándares de seguridad se propuso que ambos sistemas (manual/automático) tenían que funcionar con accionadores hidráulicos, ya que en caso de falta de energía eléctrica se podía recurrir a una bomba manual que inyectara aceite al sistema de pistones.

Fue ésta la opción que se implementó entonces. Más esta ya estaba condicionando ciertos requerimientos del sistema. Entre éstos están que el sistema de accionamiento al ser del tipo hidráulico, sería un poco lento debido a ciertas características específicas.

Otro aspecto a decidir fue si se trabajaba con dos electrodos en la etapa de perforación (ver sección 3.1), ya que así era como se hacía en los procesos actuales. Pero se llegó a la conclusión de que se operaba con dos únicamente porque de forma manual no se tenía la precisión y rapidez de controlar los tres. Por lo que se definió operar los tres electrodos en todas las etapas del proceso. Esto mejoraría los tiempos de ejecución.

Otra de las ideas discutidas fue el diseño del circuito hidráulico que se elegiría para el sistema. La opción se tomó respecto al circuito que ocupara menor cantidad de válvulas (de accionamiento manual e hidráulico) en la implementación. Esto para reducir excesivos gastos económicos.

4.3 Implementación de la solución

A continuación se muestra el procedimiento que se siguió para cumplir con el desarrollo de la solución:

a. Reconocimiento del proceso a mejorar.

Antes que todo se procedió a investigar cual era el proceso que se deseaba automatizar, el cual se consiguió mediante una visita a una empresa en donde tienen en operación un horno de arco del mismo tipo que el que se deseaba construir. Además de la entrevista al operador de la máquina.

También se adquirió y analizó los planos de la planta física en la que se iba a implementar el proyecto, ya que ésta era diferente a las conocidas.

b. Elección de solución a implementar.

La solución escogida se concretó luego de varias reuniones con múltiples ingenieros y técnicos como por ejemplo: electrónicos, mecánicos y especialistas en fundición.

c. Selección y compra de dispositivos.

Para determinar cuáles dispositivos iban a ser necesarios, se hizo un análisis primeramente a los datos que se necesitaban medir, las posiciones en donde debían funcionar según la planta física, el tratamiento que debían tener las señales (acondicionamiento) para poder ser interpretadas por el dispositivo programable. Bajo estos requerimientos se escogieron y mandaron a traer los transductores y equipo de acondicionamiento de señal.

Luego se procedió a escoger un dispositivo lógico programable que se adecuase a los requerimientos físicos: Cantidad de entradas digitales y analógicas, tipo y cantidad de puertos de comunicación, cantidad de salidas digitales y analógicas, tipo de alimentación.

Seguidamente se determinaron cuales eran las señales que debía controlar el sistema y de esta forma estudiar y escoger los actuadores y las señales de salida.

Luego se diseñó el circuito hidráulico que iba a funcionar como actuador y a partir de éste mandar a comprar todos los componentes necesarios. Para lograr este fin se utilizó el software de simulación Automation Studio.

También se tuvo que investigar y elegir un dispositivo que funcionara como interfaz gráfica para el usuario para su compra.

d. Programación del proceso automático.

Antes de acudir a las programaciones se tuvo que realizar estudio de los lenguajes de programación.

Durante este proceso se tuvo que modificar varias veces la programación debido a cambios que se le añadían a la planta física como a la lógica del sistema. Tanto la programación de la unidad lógica programable como el de la interfaz gráfica se ejecutaron y probaron en sus respectivos software.

e. Pruebas de implementación física.

Terminadas las programaciones se procedió a verificar su correcto funcionamiento mediante pruebas reales.

f. Documentación.

Desde el inicio del proyecto se fue actualizando el informe final. Y al terminar se digitó el manual de usuario para la operación del mismo.

4.4 Reevaluación y rediseño

Algunas de las mejoras que se le podría aplicar al sistema en el futuro son por ejemplo:

1. Mejoramiento del factor de potencia mediante la utilización de arcos más largos a tensiones más altas e intensidades reducidas.

2. La implementación de paneles refrigerados en las paredes y bóveda. Esto permitiría el aumento de potencia media absorbida en el arco eléctrico.
3. Implementar un compensador anti Flicker (sección 3.2.2.4).

Capítulo 5: Descripción detallada de la solución

5.1 Análisis de soluciones y selección final

Una vez claro el problema que se debía resolver, se empezaron a plantear posibles soluciones para la automatización del proceso de fundición. La discusión se centró en cuál sería la secuencia que se debía seguir durante el proceso de fundición y en el tipo de accionadores (electroválvulas proporcionales ó de encendido y apagado).

Se empezó a debatir por la secuencia del proceso. La primera opción se basó en la secuencia utilizada por el horno bajo investigación (sección 3.1), pero de una forma automática la cual dividía el proceso en dos etapas claras:

Etapas 1: Durante esta se procedería a ejecutar el proceso llamado perforación en el cual se trabajaría únicamente con dos de los electrodos disponibles. El tercero quedaba en un estado neutral en la parte de arriba de la cuba sin participación. La secuencia de movimiento de los dos a utilizar era primero bajar uno hasta que hiciera contacto con el material a fundir, luego se empezaba a bajar el segundo hasta que circulara corriente entre las dos fases (o sea los dos electrodos). Esta corriente al estar prácticamente en corto circuito, se comportaría muy irregular. Por esta razón es que el sistema debía entrar en un juego de subir y bajar el electrodo para tratar de mantener la corriente estable. Este papel solo se aplicaría al segundo electrodo y se mantendría hasta que perforara totalmente el material. Físicamente su función es derretir el acero que estaba ubicado en este sector hasta el fondo de la cuba. De ahí el nombre de perforación. Luego de llegar hasta la parte de debajo de la cuba, se debía mantener en esta posición durante 7 minutos más o menos estable. Esto con el objetivo de asegurarse que el material en el sector estaba derretido.

Terminado éste proceso, se suben los dos electrodos e inicia la misma secuencia con uno de estos mismos electrodos y el que estaba en descanso hasta completar la segunda perforación total.

Seguidamente se suben estos dos e inicia la segunda etapa.

Etapa 2: En esta se empezarían a bajar los tres electrodos al mismo tiempo hasta percibir corriente. El objetivo consistiría en tratar de mantener la corriente en su valor nominal (1500 A). La etapa cambiaría cuando ocurre el fenómeno llamado 'charco'. Este se da cuando la mayor parte del material a fundir pasa a estado líquido generando movimiento de bloques sólidos. Estos movimientos hacen contacto directo con los electrodos formando cortos circuitos (elevados consumos de corriente). Por lo que de inmediato se debería levantar los electrodos para luego bajarlos y seguir manteniendo la corriente nominal. De esta manera se continuaría hasta que el operador considere que el material esté correctamente derretido y detener el sistema automático.

Esta opción se vio opacada por una nueva, la cual integraba todo el proceso en una sola etapa y además disminuiría considerablemente los tiempos de ejecución.

Esta nueva idea se pensó en una sola etapa que se llamaría de perforación. O sea, el sistema únicamente tendría el objetivo de ir perforando el material hasta llegar al fondo de la cuba para luego mantenerse en un valor promedio de corriente. Mas se diferenciaba de la anterior en que en este caso, los tres electrodos entrarían en funcionamiento. El proceso se describe a continuación.

Se bajan los tres electrodos hasta detectar circulación de corriente en cada uno de ellos para luego empezar a mantener el consumo de corriente dentro del ámbito permitido 1500 nominal y variaciones de corriente que no permanezcan constantes en valores altos (2000 A) por más de 2 segundos. Por otro lado cuando ocurre el fenómeno 'charco', el sistema debería detectarlo e inmediatamente subir los electrodos y bajarlos según el comportamiento de la corriente.

Esta segunda opción se mantendría hasta que por estándar de seguridad, se le criticó que el sistema no podría funcionar puramente automático debido a lo que podría suceder si por algún motivo faltase la energía, ya que el material podría solidificarse con los electrodos inmersos.

Ante esta situación se pensó en actuadores hidráulicos y que además integrara dos modos de funcionamiento: automático y manual. Este modo manual

podría funcionar gracias a que el sistema hidráulico tendría que estar integrado por una bomba manual de emergencia.

Ya en este punto se estaba muy cerca de la solución final. A todos estos cambios se le adjuntó otro más. Gracias a la idea del Ingeniero David Vargas Gómez quien tiene gran experiencia en funcionamiento de hornos de arco, indicó que sería bueno que el sistema estuviera en capacidad de variar la corriente promedio que se debería de mantener circulando por cada electrodo debido a que está directamente relacionada con la temperatura de la colada. Donde señaló que durante el proceso de fundido es muy funcional subir y bajar temperaturas.

De esta forma se especificó que el sistema debía estar en capacidad de modificar la corriente promedio que circulaba por cada electrodo.

En este punto ya se tenían todos los requerimientos para el diseño como la secuencia a seguir. Por lo que se procedió a discutir en la utilización de electroválvulas proporcionales o de apagado y encendido.

Respecto a esta elección, el ingeniero Edgar Varela Cascante representante de la empresa, aconsejó que por su experiencia en sistemas de automatización, esta solución debía implementarse con electroválvulas de encendido y apagado, ya que los sistemas hidráulicos tienen un tiempo de respuesta muy lento comparado con los requeridos por un controlador complejo.

Tomando en cuenta lo aconsejado se decide implementar la solución con electroválvulas de encendido y apagado con histéresis.

Luego surgió la duda respecto a los sistemas hidráulicos, los cuales pueden ser algo lentos. Pues se temió que la velocidad de su movimiento no fuera suficiente para corregir antes de los 2 segundos en el que el sistema debía evitar el consumo de corriente alto (3000 A). Más esta preocupación se resolvió con la ayuda de un software de simulación, el cual permitió dimensionar y probar de forma teórica el diseño.

Para determinar que tan lento sería el sistema, se simuló un pistón hidráulico accionado por electroválvulas de encendido y apagado con las características requeridas, esto en el software Automation Studio y así obtener su velocidad. Con

esta se calcularía si el sistema sería capaz de mover el pistón al menos un centímetro en menos de 2 segundos (tiempo límite). Esta distancia de un centímetro se midió durante la visita de investigación del horno en funcionamiento. Donde se comprobó que con la variación de 1 cm, el consumo de corriente se corregía.

Luego del análisis de simulación se determinó que la velocidad del pistón al cabo de 1 cm de desplazamiento es de 12 cm/s y va creciendo hasta llegar a una velocidad continua de 14 cm/s (ver figura 5.1). O sea, en el peor de los casos (12 cm/s), la corriente podría recuperar el valor promedio nominal (movimiento de 1 cm de longitud) en menos de un segundo (0.1 segundos aproximadamente).

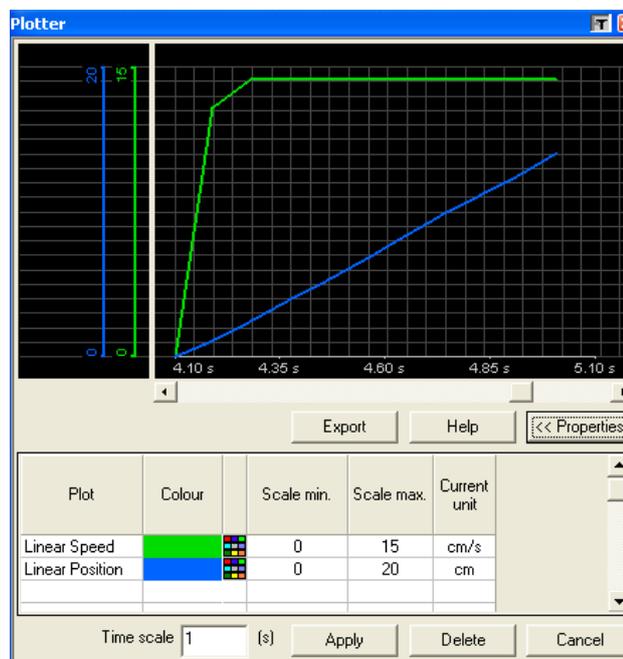


Figura 5.1 Gráfica teórica del comportamiento de pistón hidráulico.

De esta forma se comprobó que mediante electroválvulas de apagado y encendido, el problema del tiempo de estabilización se podía corregir. Por con siguiente se determinó su uso en la solución.

5.2 Descripción del hardware

En la figura 5.2 se presenta un esquema general de la solución escogida para la automatización del horno eléctrico de arco.

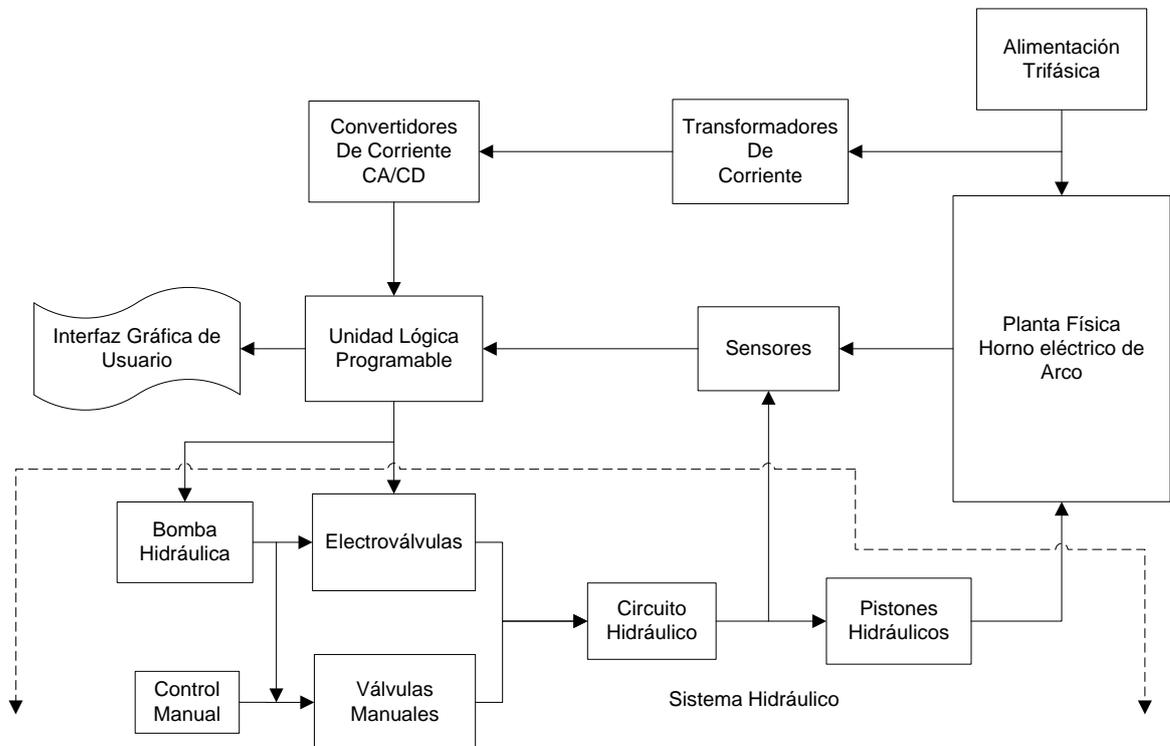


Figura 5.2 Esquema general de la solución implementada.

En este esquema se muestra la forma en que se implementó la solución. Uno de los componentes principales es el transformador, cuya función es pasar de 34000 V a 117 V con una corriente nominal de 1500 amperios. Este alimenta una carga conectada en delta (tres electrodos) donde cada una de estas señales se hace pasar por un transformador de corriente, el cual la reduce y facilita así su correcta medición.

Luego de que la señal ha sido reducida, se hace circular por un circuito encargado de acondicionar la señal para ser medida directamente por el dispositivo lógico programable.

La medición de corriente se realiza en tiempo continuo con el fin de tomar decisiones respecto al movimiento de los electrodos y así controlar la corriente bajo el principio de la sección 3.3.1

La solución cuenta con 6 sensores de proximidad, los cuales son ubicados estratégicamente para detectar cuando cada electrodo está en el límite superior o inferior respectivamente.

También se necesitaron 3 sensores de peso utilizados para descubrir cuando los electrodos tienen contacto con material sólido dentro del crisol. La detección de tal fenómeno es necesario con el fin de conocer el momento en que se deben detener los electrodos, ya sea para controlar la corriente o para prevenir fracturas por contra fuerza.

Fue preciso utilizar un sensor de presión de aceite para determinar el momento en que estuviera en un valor justo para iniciar los movimientos de los pistones.

Otra parte de la solución fue el diseño hidráulico implementado, quien fue el encargado de los accionamientos dirigidos por el control automático como también por el manual.

Finalmente se utilizó una pantalla táctil como interfaz gráfica de usuario, la cual cumple funciones de monitorización y configuración.

A continuación se describen los detalles de cada dispositivo utilizado.

5.2.1 Planta física de horno eléctrico de arco

En la figura 5.3 se muestra el diseño de la planta física del horno eléctrico que se construyó.

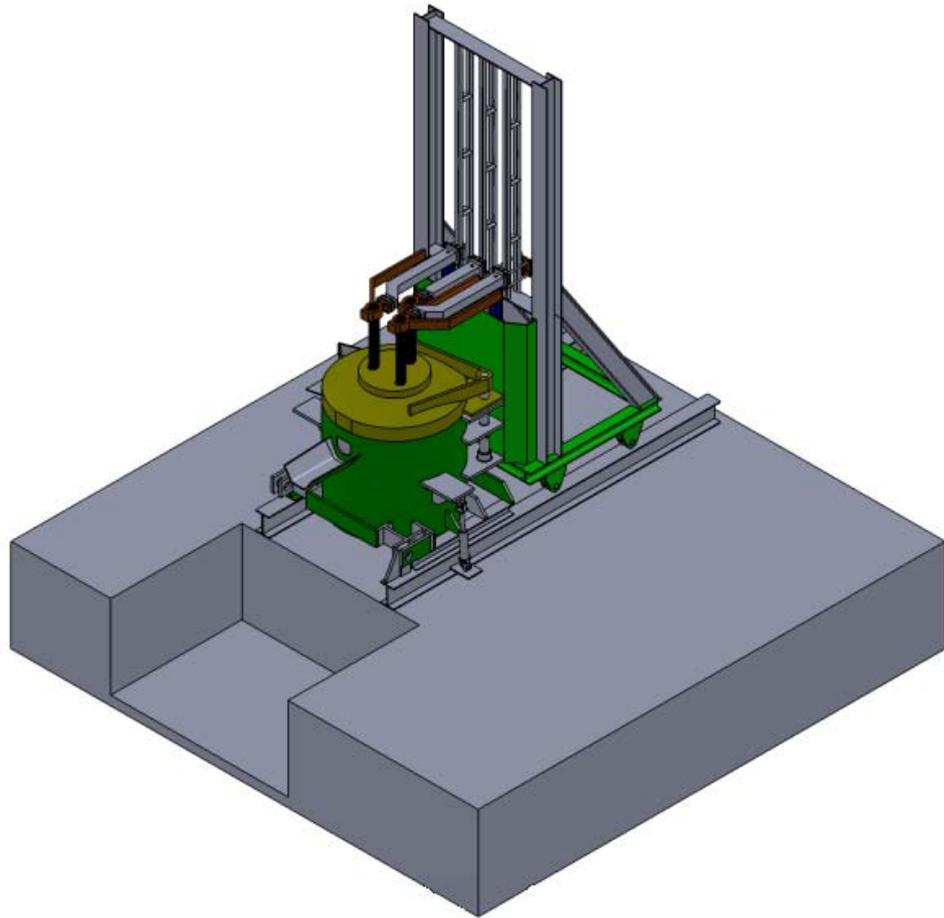


Figura 5.3 Planta física horno eléctrico de arco.

Este cuenta con un soporte principal que tiene la capacidad de desplazarse mediante dos rieles. A esta parte se le sujetan los tres pistones en posición vertical encargados del movimiento de los brazos porta electrodos que tienen libre movimiento dentro de sus respectivas guías.

Otro de los componentes es el crisol con capacidad de una tonelada líquida de acero. El mismo posee 2 pistones encargados del pivoteo para verter su contenido en la cuchara.

5.2.2 Alimentación principal

El equipo encargado de suplir la energía es un transformador conectado en Y al cual se le conectó la carga en delta. Este se muestra en la figura 5.4.



Figura 5.4 Transformador trifásico.

Las características del transformador son las siguientes:

- Potencia Nominal: 290 KVA.
- Frecuencia: 60 Hz.
- Tensión nominal en primario: 33540 V.
- Corriente nominal en primario: 5 A.
- Tensión nominal en secundario: 106 V.
- Corriente nominal en secundario: 1500 A.
- Temperatura máxima de aceite: 55°C.
- Peso total con aceite: 5310 Kg.

5.2.3 Transformador de corriente

Estos transformadores cumplen dos funciones: la primera consiste en aislar el circuito de alta potencia del circuito de control, la segunda es reducir considerablemente la variable a medir para su medición. Esta se observa en la figura 5.5.



Figura 5.5 Transformador de corriente 2000/5 A (MBS AG, 2010).

A continuación se describen las principales características: (MBS AG, 2010)

- Corriente en el primario: 1000 A.
- Corriente en el secundario: 5 A.
- Carga: 10 VA.
- Frecuencia nominal: 50 Hz.

5.2.4 Convertidor de corriente CA/CD

Este convertidor de corriente tiene la función de tomar la señal alterna proveniente del transformador y pasarla a un nivel RMS con una magnitud estándar de medición (4-20mA o 0-10V). Este se muestra en la figura 5.6.

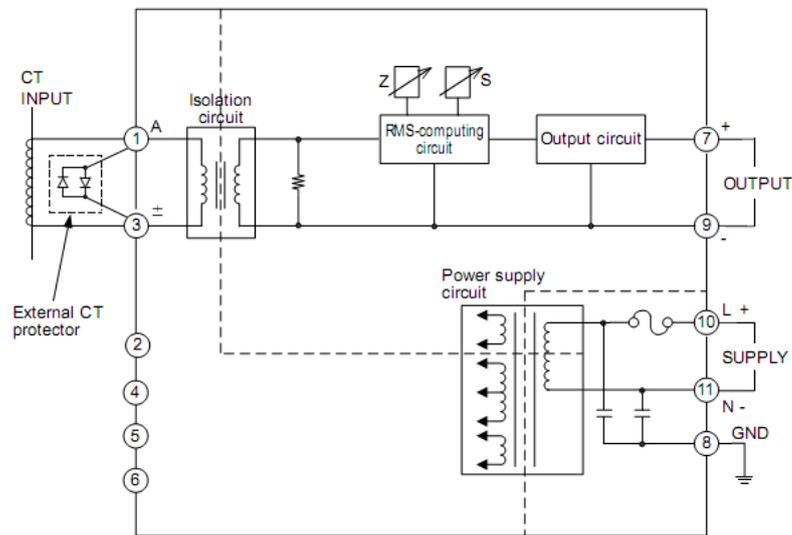


Figura 5.6 Convertidor de corriente CA/CD.

Entre sus principales características se tienen:

- Rango de entrada: 0-5 A
- Fuente de alimentación: 15-30 V DC.
- Señal de salida: 0-10 V DC.
- Tamaño de paso: 10 mV.

5.2.5 Sensores

5.2.5.1 Bero inductivo

Este dispositivo es un sensor de proximidad de tipo inductivo encargado de la detección de metal. Para la solución se necesitaron de 6 unidades, 2 por cada electrodo, uno para detectar cuando el brazo está en la posición límite superior y otro para cuando está en el límite inferior. Este se muestra en la figura 5.7.



Figura 5.7 Sensor de proximidad de tipo inductivo.

5.2.5.2 Sensor de presión o celda de carga

Este sensor se escogió para detectar el momento en que los electrodos tienen contacto físico con el material sólido. De esta forma se evita ejercer presiones que podrían causar ruptura de piezas. Su función es medir el peso (kg) que soporta cada electrodo y enviarlo mediante una señal analógica para la toma de decisiones. Se necesitaron 3 celdas en total. Esta se muestra en la figura 5.8.



Figura 5.8 Celda de carga tipo barra.

Entre sus principales características se tiene:

- Salida nominal: $3\text{mV/V} \pm 0.1\%$.
- Sobrecarga segura: 150%.
- Excitación nominal: 10 V DC/AC.
- Máxima excitación: 15 V DC/AC.
- Distancia de cable: 6 m.

5.2.5.3 Sensor de presión o Presostato

Este componente fue utilizado para medir la presión en la tubería del circuito hidráulico con el fin de alternar el funcionamiento del motor eléctrico que acciona la bomba hidráulica. Se estable un rango de encendido entre 1000 y 2000 psi. Si la variable está por encima del límite superior, la unidad de control apagará automáticamente el motor y si está por debajo del límite inferior, el motor se encenderá. En la figura 5.9 se ilustra el componente.



Figura 5.9 Presostato hidráulico con salida analógica.

Algunas de las características principales son:

- Tensión de alimentación: 12-30 V DC.
- Histéresis: 1% a 99%.
- Tiempo de conmutación: < 4ms.
- Salidas: 2 salidas a transistor (1.4 A/PNP), 1 salida analógica 4-20 mA.
- Campo de regulación: 0-400 bar.

5.2.6 Sistema hidráulico

El circuito mostrado en la figura 5.10 es el encargado de ejecutar los accionamientos controlados por el control automático y manual a la vez. Es quien gestiona el movimiento de los electrodos. Posee 5 pistones de doble efecto, 5 válvulas manuales, 3 electroválvulas además de los componentes necesarios en todo circuito hidráulico: motor eléctrico de bomba, bomba hidráulica, válvula de alivio, manómetros, tanque de almacenamiento, filtros, válvulas anti retorno y un acumulador.

Para determinar la presión de trabajo se partió del peso de las masas que debían soportar los pistones. Tres de ellos debían soportar 145 kg en el caso de los encargados de accionar los brazos porta electrodos. Uno tendría como carga 200 kg (empuje del tren de soporte) y el último debía soportar los 2500 kg que demandaría el crisol para pivotar. Por lo que se tomaron los datos de este último debido a que requería la mayor presión.

Conociendo el diámetro externo (5 cm), se calculó su área:

$$A = \pi * r^2 = \pi * 2,5^2 = 19,63 \text{ cm}^2 \quad (5.1)$$

Luego de determinó la presión:

$$P = \frac{F(kg)}{A(\text{cm}^2)} = \frac{2500 \text{ kg}}{19,63 \text{ cm}^2} = 127,32 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad (5.2)$$

Además conociendo:

$$1\text{Bar} = 1 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 14,504 \text{ psi} \quad (5.3)$$

Y

$$P = 127,32 \text{ bar} = 1846 \text{ psi} \quad (5.4)$$

Por lo que se determinó que la presión de trabajo debía ser de 2000 psi tomando en cuenta ciertas perdidas.

Para probar el diseño de este sistema se utilizó el software de simulación Automation Studio 5.0.

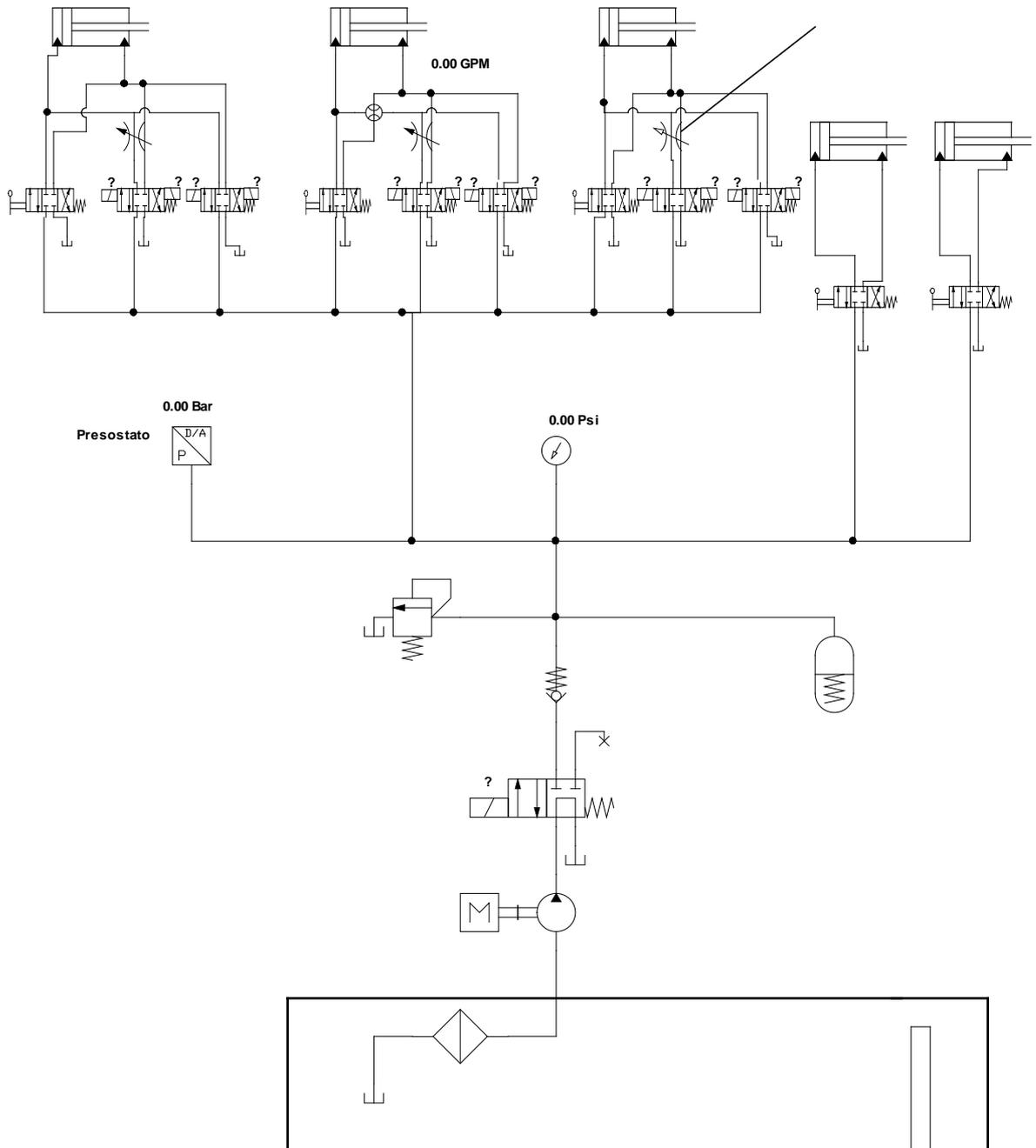


Figura 5.10 Circuito hidráulico diseñado e implementado.

5.2.6.1 Bomba hidráulica con motor eléctrico

Su símbolo se muestra en la figura 5.11 y son los encargados de inyectar presión de aceite por toda la tubería. El funcionamiento de estos dispositivos es alternado y gobernado por la unidad de control dependiendo de la presión en la tubería.

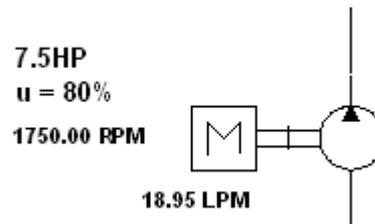


Figura 5.11 Símbolo de Bomba hidráulica accionada por motor eléctrico.

Las características de la bomba hidráulica son:

- Tipo: piñón.
- Máxima presión: 3500 psi.
- Caudal: 5 Gpm.

5.2.6.2 Filtro de aceite

Este tiene como objetivo el no dejar pasar impurezas en el aceite hacia fuera del tanque de almacenamiento del fluido. Su símbolo es ilustrado en la figura 5.12.

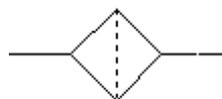


Figura 5.12 Símbolo de filtro de aceite.

5.2.6.3 Válvulas anti retorno

La mostrada en la figura 5.13 tiene como objetivo permitir flujo de aceite únicamente en una dirección y se utiliza como protección de las bombas hidráulicas.

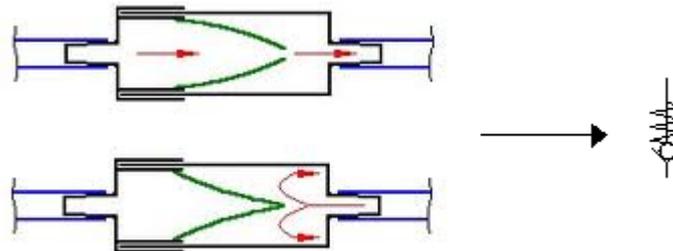


Figura 5.13 Válvula hidráulica anti retorno tipo check(Sierra, 2010).

5.2.6.4 Válvula de alivio

Este dispositivo cuyo símbolo se muestra en la figura 5.14 tiene la función de descargar el aceite al tanque de almacenamiento en caso de que la presión sea superior a la establecida como nominal para el accionamiento (2000 psi). Es de emergencia ante sobre presiones.



Figura 5.14 Símbolo de válvula de alivio.

5.2.6.5 Acumulador de presión hidráulica.

Este componente es el encargado de mantener más o menos constante la presión en la tubería gracias a su capacidad de almacenamiento de presión. Su funcionamiento se puede entender análogamente como el realizado por un capacitor eléctrico que almacena tensión. Mientras la presión es distribuida por alguna de las bombas, este solo cumple la función de almacenamiento, pero si en

algún momento disminuye, el acumulador descarga la suya como respuesta a la necesidad de mantener constante la presión. Para este diseño se empleó una con capacidad de 10 litros. Su símbolo es mostrado en la figura 5.15.



Figura 5.15 Símbolo de acumulador hidráulico.

5.2.6.6 Regulador de caudal

Este dispositivo sirve para ajustar el caudal inyectado a los pistones según sea el requerimiento de velocidad, tomando en cuenta su relación de proporcionalidad. Este se ilustra en la figura 5.16.



Figura 5.16 Símbolo de regulador de caudal.

5.2.6.7 Válvula manual

Este elemento es el que permite el movimiento de los electrodos en caso de emergencia. Funciona de forma paralela al control automático y tiene prioridad en caso de accionar ambos sistemas. Tres manubrios controlan el movimiento de los tres electrodos, uno el movimiento del tren y otro el giro del crisol. Este paquete de manubrios se muestra en la figura 5.17.



Figura 5.17 Válvulas de mando manual (Hidraulica, 2009).

5.2.6.8 Electroválvula

Este dispositivo tiene el objetivo de gobernar el movimiento de los pistones en modo automático. Se necesitaron 3 de ellos, uno por pistón. Cuenta con tres posiciones, de 4 vías, de centro cerrado, con dos solenoides con dos resortes para retorno y se energizan con 110 V AC. El mostrado en la figura 5.18 soporta hasta 3500 psi.

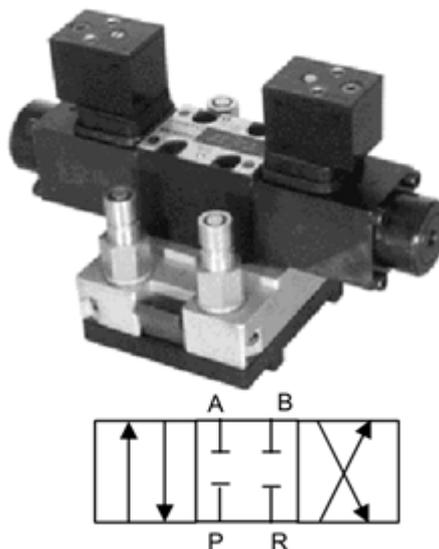


Figura 5.18 Electroválvula de dos posiciones (Monografías.com, 2010).

5.2.6.9 Pistón hidráulico

Este componente hidráulico es el encargado de ejecutar los movimientos de los brazos porta electrodos. Tiene la particularidad de ser de doble efecto, lo que significa que la dirección de desplazamiento de vástago se puede manipular tanto hacia a fuera como hacia dentro. En la figura 5.19 se muestran los tres electrodos posicionados.



Figura 5.19 Pistones hidráulicos posicionados en el tren principal.

Las dimensiones de los pistones se muestran en la figura 5.20.

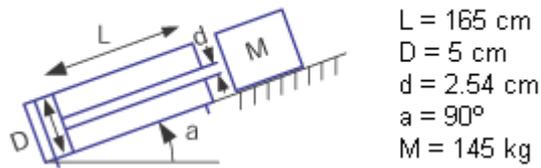


Figura 5.20 Dimensiones de pistón hidráulico.

5.2.7 Pantalla táctil

Para cumplir con los requerimientos de la solución fue necesario la configuración y monitorización del sistema de control en tiempo real. Esta función fue solventada con la utilización de una interfaz gráfica de usuario del tipo pantalla táctil como la que se muestra en la figura 5.21.



Figura 5.21 Pantalla táctil Omron NP5-SQ001.

Entre sus características se tienen:

- Alimentación: 24 V DC.
- Comunicación serial: RS232, RS422/RS485.
- Batería reemplazable.

- Carga y descarga desde USB.

5.2.8 Controlador lógico programable

Este es uno de los elementos principales que se implementaron en la solución debido a que su función consiste en recolectar todas las señales de los sensores, procesarlos según las rutinas de programación y cambiar las señales de salidas que controlan el movimiento de los electrodos. Para cumplir con este objetivo se requirió el uso de una serie de dispositivos que conforman toda la unidad de control: CPU 224 AC/DC/Relé, fuente de alimentación, módulo de expansión de entradas analógicas, módulo de expansión Siwarex MS.

5.2.8.1 CPU 224 AC/DC/Relé

Este es un PLC de la familia SIMATIC S7-200 de la marca SIEMENS como el mostrado en la figura 5.22. Su función es la de mantener un ciclo de ejecuciones constante: leer entradas, procesarlas y modificar las salidas.



Figura 5.22 CPU 224 AC/DC/Relé.

Entre las características principales se tienen:

- Alimentación: 110 V AC.
- Entradas digitales: 14 de 24 V DC.

- Salidas Digitales: 10 a Relé.
- Memoria de programa: 12288 bytes.
- Memoria de de datos: 8192 bytes.
- Módulos de ampliación: 7.
- Puertos de comunicación: 1 RS485.
- Aritmética en coma flotante: si.
- Velocidad de ejecución booleana: 0,22 microsegundos/operación.

A continuación se detalla la función de cada entrada y salida del PLC.

Entradas digitales utilizadas 13 de 14 disponibles:

- 1 señal para indicar el inicio del proceso.
- 1 señal para indicar fin de proceso.
- 1 señal para indicar el modo (automático/manual).
- 1 señal para indicar paro de emergencia.
- 3 señales para indicar cuando cada uno de los tres electrodos tiene contacto con el material.
- 3 señales para indicar cuando cada uno de los tres electrodos están en el límite superior.
- 3 señales para indicar cuando cada uno de los tres electrodos están en el límite inferior.

Salidas digitales utilizadas 10 de 10 disponibles:

- 3 señales para indicar a cada uno de los tres electrodos cuando descender.
- 3 señales para indicar a cada uno de los tres electrodos cuando ascender.

- 1 señal tipo alarma luminosa para indicar cuándo hay consumo de corriente elevada.
- 1 señal tipo alarma auditiva para indicar cuándo hay consumo de corriente elevada.
- 1 señal luminosa de advertencia para indicar sistema en operación.
- 1 señal para encender o apagar el motor que impulsa la bomba hidráulica.

Salidas analógicas:

- 3 entradas para medir la corriente consumida en cada electrodo.
- 1 entrada para medir la presión de aceite en el sistema hidráulico
- 3 entradas para medir el peso soportado en cada uno de los tres electrodos.

5.2.8.2 Fuente de alimentación

La mostrada en la figura 5.23 es la unidad encargada de suministrar la energía eléctrica a todos los dispositivos que requieren excitación de 24 V DC. Esta requiere alimentación de 110 V AC y soporta un consumo de corriente de hasta 5 A. O sea de 120 Watts.

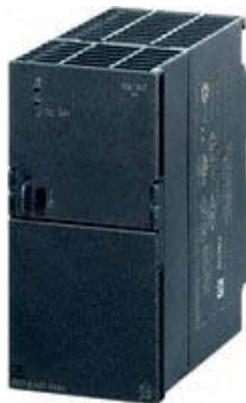


Figura 5.23 Fuente de alimentación DC.

5.2.8.3 Módulo de expansión de entradas analógicas

Fue necesario utilizar un módulo de entradas analógicas para la medición de la corriente consumida en cada uno de los electrodos y la presión de aceite de la tubería. Este se muestra en la figura 5.24.



Figura 5.24 Módulo de entradas analógicas EM 231.

Entre sus principales características se tienen:

- Consumo de potencia 2 W.
- Entradas analógicas: 4.
- Rangos de entrada: 0-10 V, 0-5 V, ± 5 - ± 25 V, 0-20mA.
- Tiempo de conversión: < 250 μ s.
- Resolución: 12 bits A/D

5.2.8.4 Módulo de expansión Siwarex MS

Tres de los módulos mostrados en la figura 5.25 fueron necesarios para la recolección de la señal analógica provenientes de las tres celdas de carga debido

a que éstas últimas tienen una señal de salida en el orden de mV y no es compatible con el estándar 4-20 mA o 0-10 V que son los que admite el PLC.



Figura 5.25 Módulo SIWAREX MS.

5.2.9 Relé de estado sólido

Seis de los mostrados en la figura 5.26 fueron implementados en la solución. Cumple dos funciones: aislar eléctricamente el circuito de control del circuito de salida y además tienen la particularidad de soportar gran cantidad de choques y vibraciones.



Figura 5.26 Relé de estado sólido.

Algunas de sus características son:

- Señal de entrada: 3–32 V DC.

- Señal de salida: 24-280 VAC.
- Corriente máxima: 10 A RMS.

5.2.10 Pulsador inicio/apagado

Dos de los dispositivos mostrados en la figura 5.27 fueron utilizados para el encendido y el apagado del proceso de automatización. Operan con una tensión de 24 V DC.



Figura 5.27 Pulsador plástico luminoso rasante.

5.2.11 Pulsador tipo hongo de apagado emergencia

El dispositivo mostrado en la figura 5.28 fue utilizado para ser activado en caso de necesitar apagar el sistema por motivos de emergencia. Una vez activado no se desactiva hasta girar el manubrio. Su tensión de funcionamiento es de 24 V DC.



Figura 5.28 Pulsador plástico tipo hongo de emergencia.

5.2.12 Indicador luminoso tipo soga

El indicador luminoso tipo soga mostrado en la figura 5.29 fue utilizado como sistema luminoso de advertencia para indicar que el horno está en operación. Funciona a una tensión de 12 V CD.



Figura 5.29 Indicador luminoso tipo soga.

5.2.13 Alarma acústica

El dispositivo de la figura 5.30 fue utilizado como alarma acústica en caso de que la corriente consumida en alguno de los electrodos supere el límite establecido. Su tensión de funcionamiento es de 12 VDC.



Figura 5.30 Alarma acústica.

5.2.14 Luz piloto plástica

El dispositivo de la figura 5.31 fue utilizado como alarma luminosa en caso de que la corriente consumida en alguno de los electrodos supere el límite establecido. Su tensión de funcionamiento es de 24 VDC.



Figura 5.31 Luz piloto plástica.

5.2.15 Armario de control

Un armario como el mostrado en la figura 5.32 fue utilizado para el montaje de todo el sistema de control.



Figura 5.32 Armario de control.

5.2.16 Medidor de Temperatura Infrarrojo

Uno de los objetivos del proyecto fue recomendar un dispositivo con ciertos requerimientos:

- Medir altas temperaturas (hasta 1800 °C).
- El dispositivo no puede tener contacto con el material a medir.
- De uso Móvil.

Para este fin se recomendó y adquirió un medidor de temperatura de tipo infrarrojo como el que se muestra en la figura 5.33.



Figura 5.33 Termómetro portátil.

Entre sus principales características se tienen:

- Rango de medición: 200 – 1800 °C.
- Rango del espectro: 1,6 μ .
- Visor: de doble laser.
- Máxima longitud de medición: 15 m.
- Mínima longitud de medición: 3 m.

5.3 Descripción del software

El otro componente necesario para integrar todas las partes del hardware y ponerlo a funcionar como se debe es el software o el programa que controle las señales y los movimientos necesarios. Para este fin fue necesario sintetizar dos tipos de programaciones. Una en el controlador lógico programable y otro para la interfaz gráfica de usuario. A continuación se detalla cada una de éstas.

5.3.1 Rutinas implementadas en el PLC

5.3.1.1 Rutina principal

La rutina principal en un PLC SIEMENS siempre se está ejecutando de una forma cíclica, o sea una vez que termina su ejecución vuelve a iniciar. Tomando en cuenta esta particularidad se sintetizó la rutina mostrada en la figura 5.34.

Durante el primer ciclo se ejecuta la subrutina de inicialización, luego se valora si el sistema está encendido o apagado. En caso del primero se ejecuta la subrutina llamada perforación y de lo contrario la subrutina de Reposo.

Seguidamente se valora si hay alguna emergencia y de haberla se apaga el sistema. Luego se revisa si los electrodos están en posición de reposo o en el límite superior. De no ser así se activa un indicador luminoso giratorio como advertencia de peligro. De la misma forma se revisa si se están consumiendo valores de corriente en cada electrodo por encima del límite configurado previamente. De darse el caso, se activan dos alarmas: una luminosa de color rojo y una acústica continua de 2,4 kHz.

Otra variable a revisar es la llamada selector, la cual decide si se requiere que el sistema tome el control de los movimientos o que sea por parte de un operador. De estar en modo manual se deshabilitan las salidas, mas no se dejan de realizar los cálculos, esto con el objetivo de que el sistema automático pueda tomar el control en cualquier momento.

Otras de las variables a verificar son las de tiempo de muestreo y de cantidad de muestras a promediar. Si alguna de estas cambia de inmediato se reinicia el temporizador que gobierna la interrupción para leer analógicos como también los registros asociados.

Por último, se revisa que la presión de aceite en la tubería se encuentre entre 1000 y 2000 psi. Si está por encima del límite superior se envía una señal hacia el motor que acciona la bomba hidráulica para su apagado, pero si está por debajo de límite inferior se envía la señal de encendido. Esto con el fin de no mantener el motor encendido por largos períodos innecesarios. Un aspecto a considerar es que cada vez que se enciende el motor, se debe seguir una secuencia de arranque para evitar cargas elevadas al arrancar el motor. La secuencia consiste en dar un tiempo prudente (2 segundos) para que el motor alcance su velocidad nominal y luego conectar la carga mediante la activación de una electroválvula.

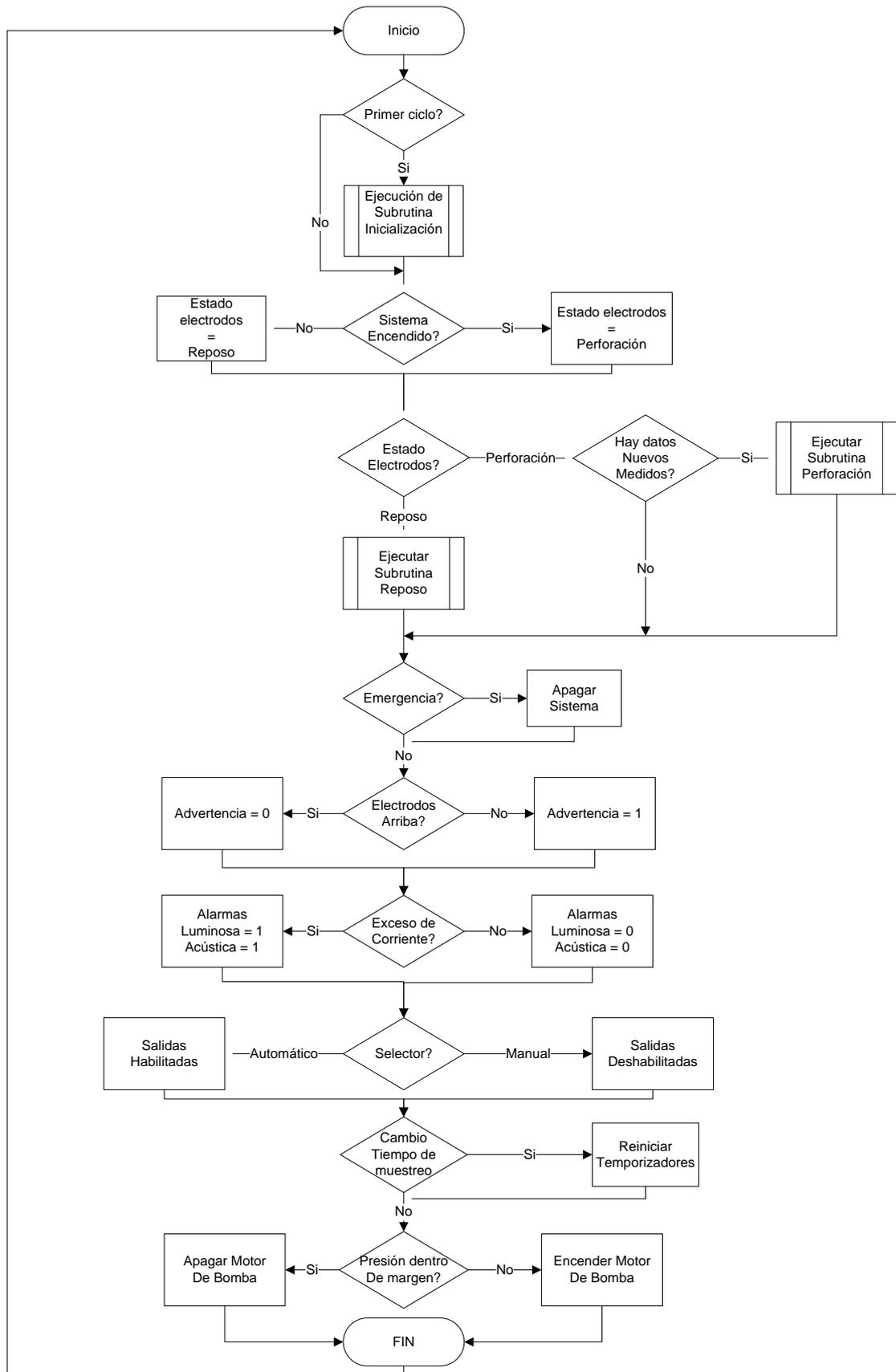


Figura 5.34 Diagrama de flujo de rutina principal.

5.3.1.2 Rutina de Inicialización

La rutina que es mostrada en la figura 5.35 únicamente se ejecuta durante el primer ciclo y como primera instrucción debido a que cumple funciones vitales para el sistema: Inicializar temporizadores, asociar estos a las interrupciones, habilitar interrupciones y aplicar un reset a las banderas y registros involucrados. Esto último para iniciar en un estado adecuado.

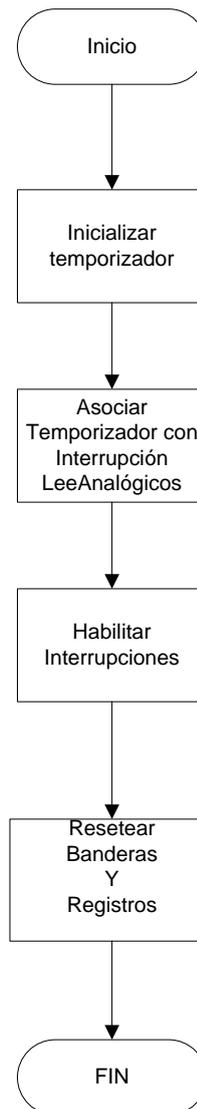


Figura 5.35 Rutina de Inicialización.

5.3.1.3 Rutina de interrupción

Esta interrupción solo se ejecuta según el temporizador configurado y consiste en tomar las variables del ADC ya convertidas a digital (16 bits) y pasarlas a registros temporales donde luego se linealizan según variable real. Las variables que almacenan la corriente consumida por cada electrodo se suman una n cantidad de veces para luego promediar y redondear. Tanto la cantidad de sumatorias (n) como el tiempo entre cada interrupción son configurables en cualquier momento. Esta se muestra en la figura 5.36.

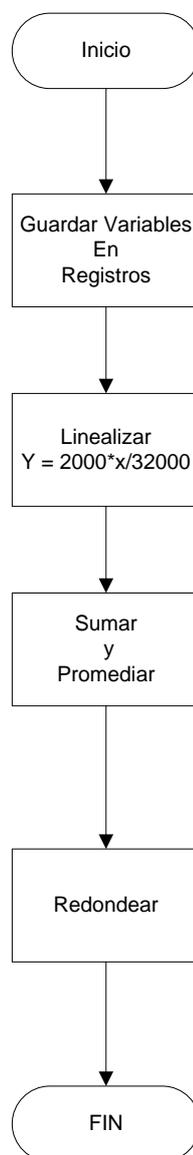


Figura 5.36 Interrupción para leer analógicos.

5.3.1.4 Rutina de perforación para los electrodos

El diagrama mostrado en la figura 5.37 es el encargado de decidir todos los movimientos durante la etapa de perforación (sección 5.1). Cada electrodo es controlado por una rutina idéntica a ésta.

Las variables a tomar en cuenta son:

- **Modo Prueba:** Si esta activa (1), el sistema no toma ninguna decisión respecto a movimientos. Más bien atiende las ordenes provenientes de la interfaz gráfica y que pueden ser: bajar o subir cada uno de los tres electrodos.
- **Hay corriente:** Si está activa (1), significa que hay circulación de corriente por el electrodo, pero si está desactivada (0) significa que no circula corriente.
- **Hay contacto:** Si está activa (1), indica que el electrodo está en contacto con material dentro del crisol, más si está desactivada (0), significa que no hay contacto.
- **Fin de carrera:** En modo activo (1) traduce que el electrodo llegó al límite inferior, más desactivada (0), pues no ha llegado a su límite inferior.

Básicamente lo que se busca con esta rutina es mantener el consumo de corriente dentro del rango configurado sin forzar las partes físicas.



Figura 5.37 Subrutina de perforación para cada electrodo.

5.3.1.5 Rutina de Reposo para los electrodos

Esta se ejecuta siempre que el sistema este apagado, pero depende del modo de operación. Porque si está en manual, aunque el sistema envíe ordenes los movimientos no se van a reflejar debido a que las salidas están deshabilitadas. Pero si se van a manifestar si está en modo automático.

El diagrama de la figura 5.38, básicamente busca ubicar los electrodos en la posición inicial.

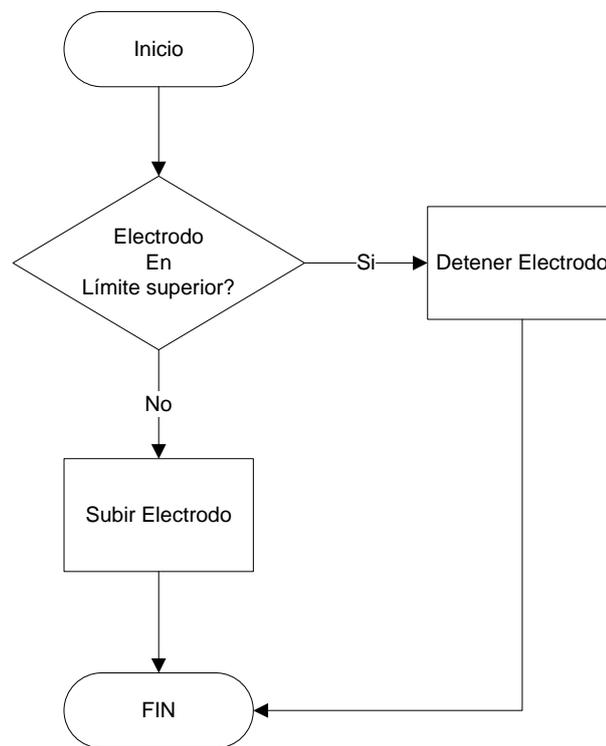


Figura 5.38 Subrutina de Reposo para cada electrodo.

5.3.2 Software implementado en la pantalla táctil

Esta parte de la programación fue realizada con el fin de facilitar la monitorización y configuración del sistema de control. En la figura 5.39 se muestra la pantalla principal.

En esta se puede apreciar la corriente consumida por cada electrodo de dos formas. La animada la podemos observar mediante los medidores de nivel los cuales varían sus colores dependiendo del valor. El nivel marcado en estos indica el consumo de corriente nominal. La otra forma de apreciar estas mediciones es de forma textual. Por ejemplo Corriente 1 indica la cantidad de corriente que circula por el electrodo número 1.

De forma textual también se pueden apreciar la corriente nominal, que es la corriente deseada como promedio entre las variaciones existentes, la incertidumbre que es la cantidad de corriente hacia arriba y hacia debajo de la nominal por donde puede estar fluctuando el consumo. Esta determina los límites máximo y mínimo que igualmente se muestran.

En esta también se aprecia si el sistema está apagado/encendido, en modo automático/manual y si la alarma de audio está encendida o apagada. Cuando ésta última está apagada se muestra una x de color rojo sobre el texto.

Los indicadores textuales dentro de marcos de color gris son también botones lo que indica que son configurables. Los tres de la izquierda son conmutables entre las dos opciones ya mencionadas.

Las teclas F1-F6 cumplen con determinadas funciones:

- F1: Muestra el menú de configuración de pantalla.
- F2: Ajustar el brillo y el contraste.
- F3: Ajustar la fecha y la hora.
- F4: Cambiar la contraseña.
- F5: Bajar el nivel de seguridad.

- F6: Muestra la segunda pantalla de configuración.

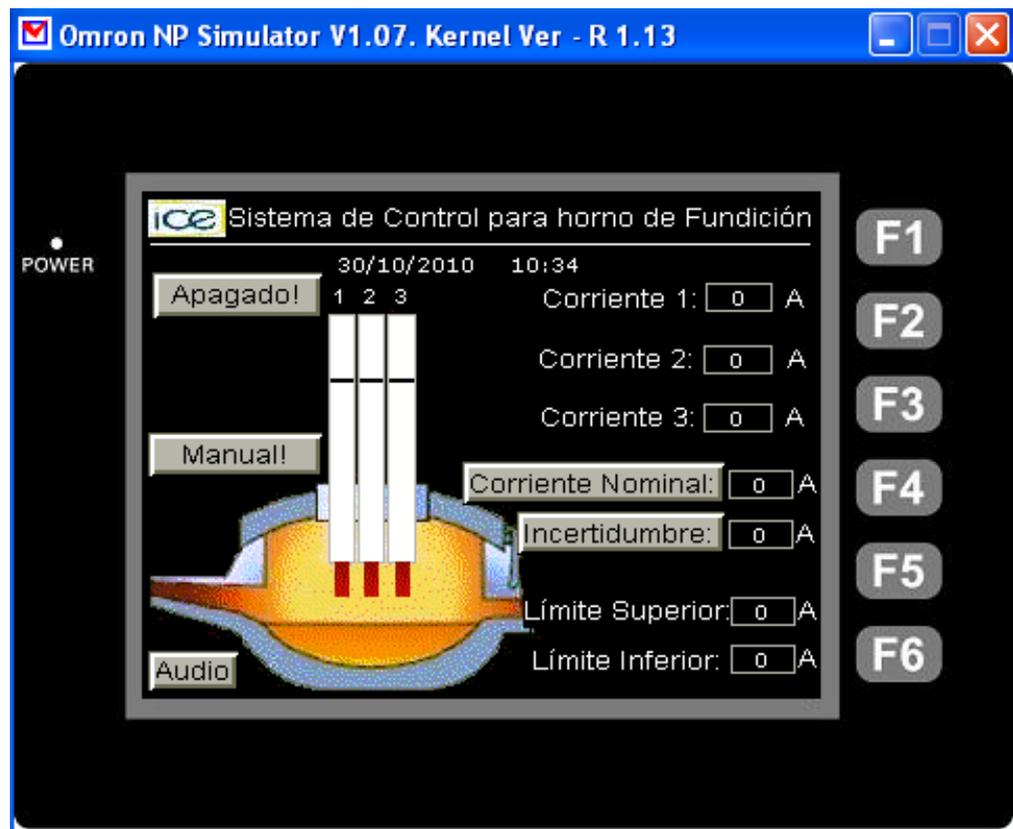


Figura 5.39 Pantalla principal de la interfaz gráfica.

En la figura 5.40 se muestra la pantalla en funcionamiento, donde también se puede apreciar si hay o no circulación de corriente en cada electrodo, mediante un símbolo de rayo de color rojo.

También se puede observar si alguno de los electrodos está en contacto físico con el material dentro del crisol. Esto se aprecia con un símbolo de caja negra por debajo del electrodo.

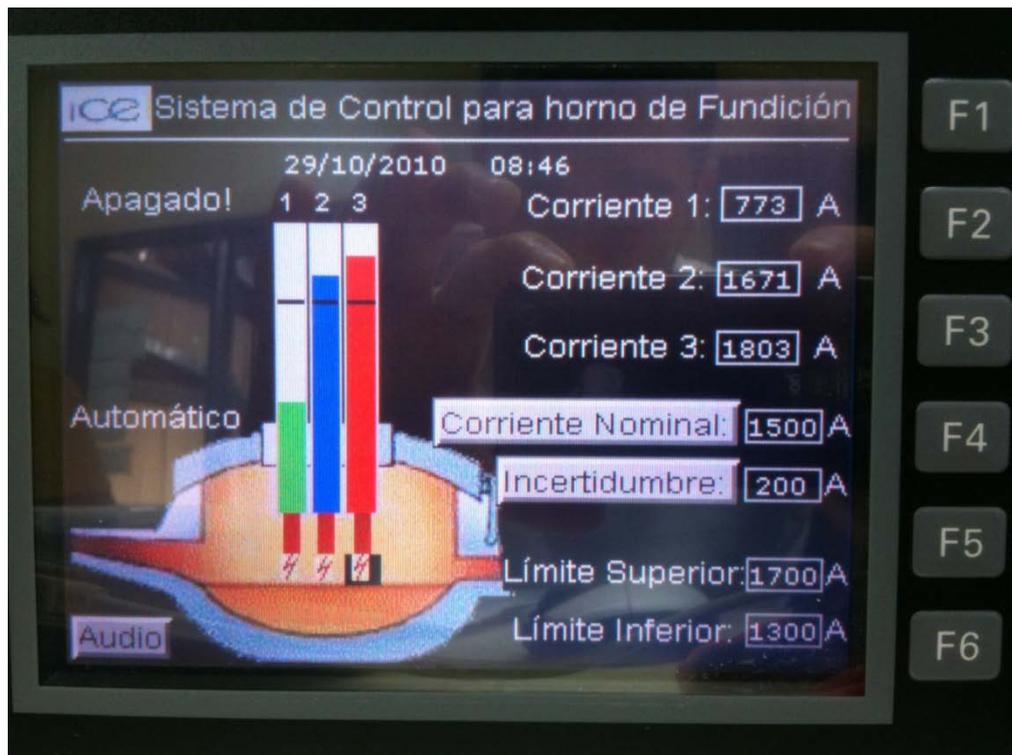


Figura 5.40 Detección de material sólido dentro del crisol.

Un aspecto relevante es que cualquier configuración que se desee realizar está protegida por una contraseña para evitar la configuración de un usuario sin conocimientos. Esta clave se le solicita al usuario una única vez durante cualquier configuración como se muestra en la figura 5.41. También se puede restablecer la seguridad mediante la tecla F5.

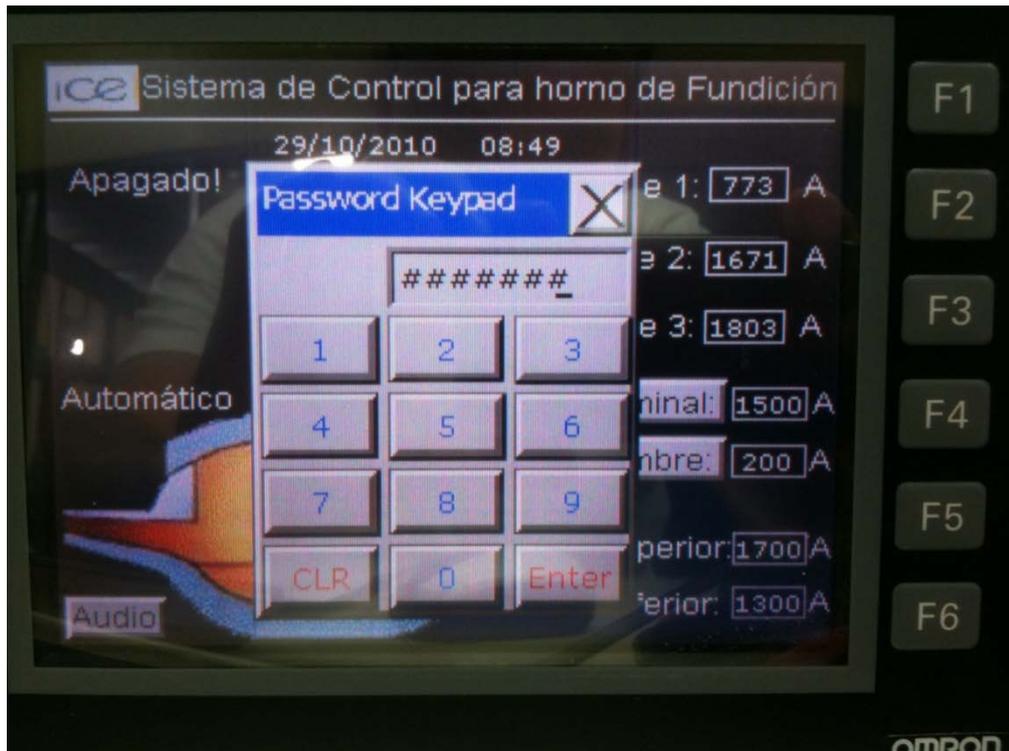


Figura 5.41 Seguridad para resguardar la configuración del control.

En los botones que requieran de acceso numeral para su configuración se muestra un teclado numérico para digitar el nuevo valor. Este teclado se muestra en la figura 5.42.

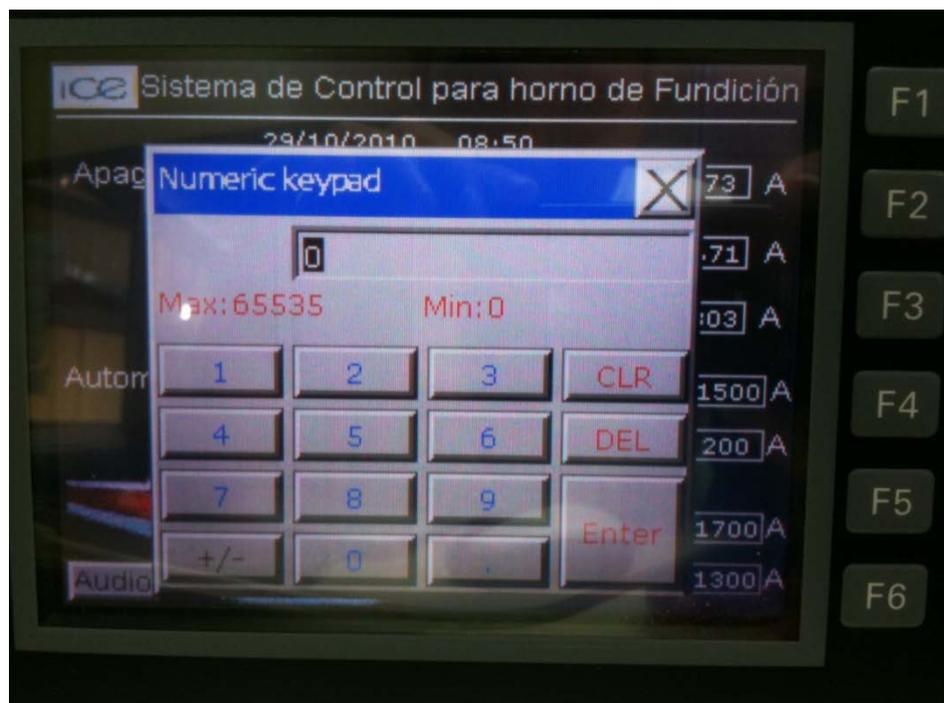


Figura 5.42 Teclado numérico para configurar variables.

Otro dato que se puede apreciar es si alguno de los electrodos ha llegado hasta la posición de límite inferior, lo cual puede significar que el electrodo debe ser cambiado debido a desgastes físicos. Este indicador se muestra en la figura 5.43.

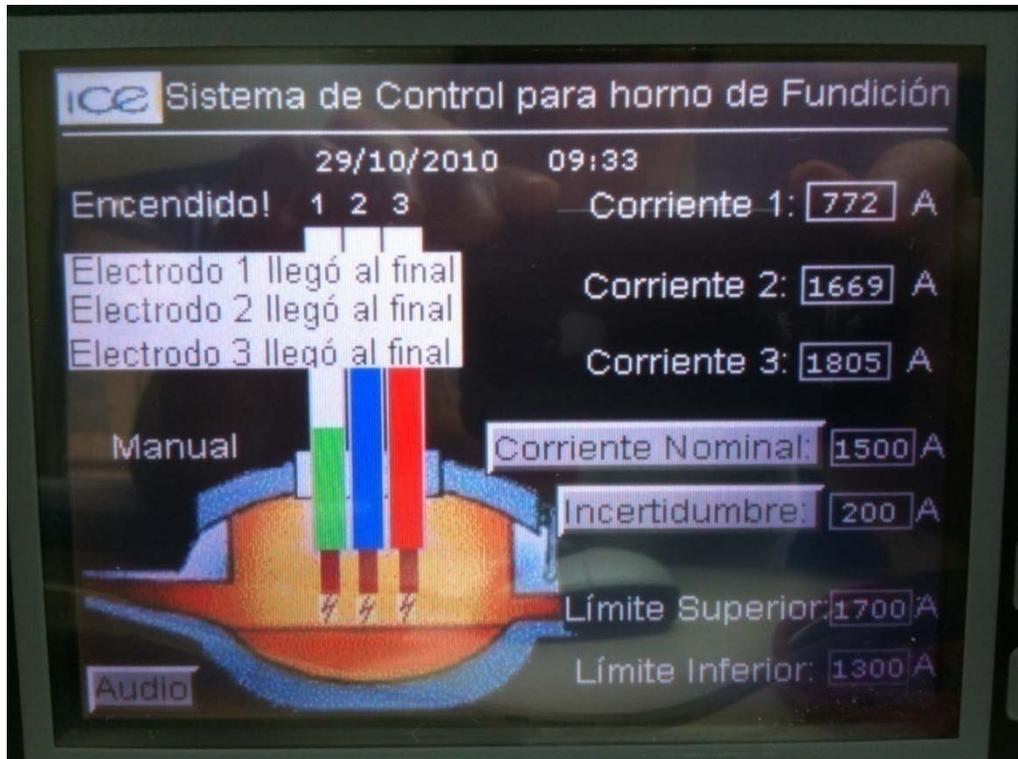


Figura 5.43 Detección de fin de carrera.

Otra variable que se puede detectar y mostrar es si los electrodos están en posición inicial o si están en otro lugar. En la figura 5.44 se aprecia que uno de los electrodos no contiene una barra roja como los otros dos, indicando así que este electrodo aún está en posición inicial. O sea que no ha empezado a descender. Si se muestra la barra roja significa que pueden estar en cualquier posición por debajo de la posición de inicio.

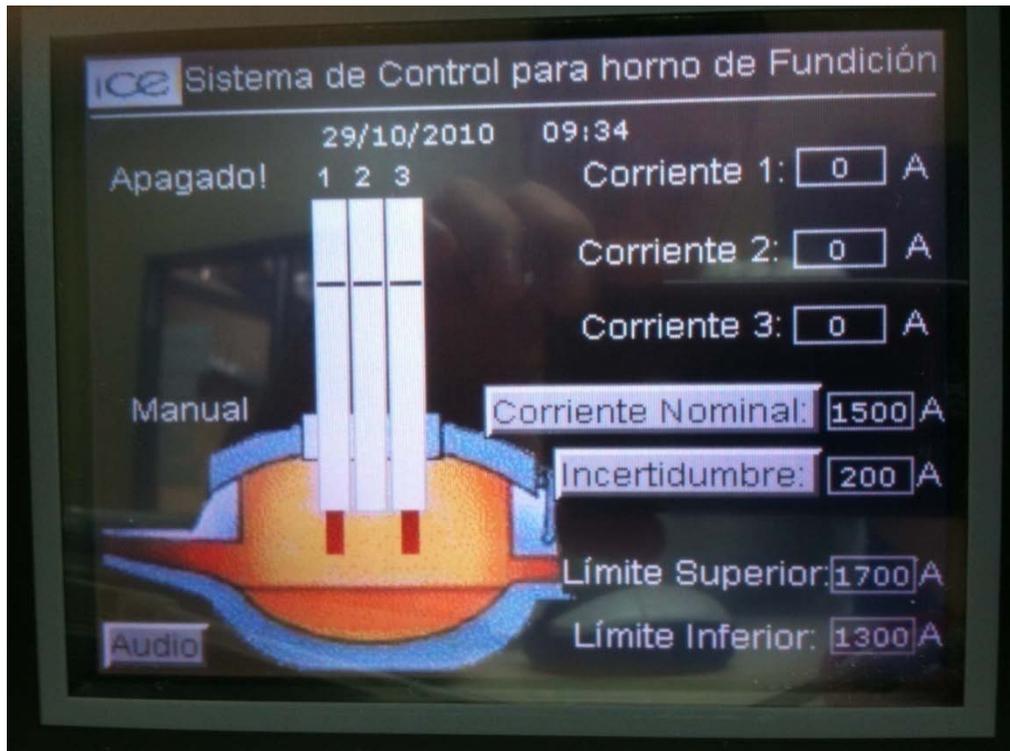


Figura 5.44 Detección de posición del electrodo.

En la figura 5.45 se muestra la segunda pantalla de configuración. En esta se pueden configurar dos parámetros. El período de muestreo, que es el tiempo entre cada nueva medición de las entradas analógicas. Cambia directamente el registro que almacena el temporizador de interrupción.

La otra variable a configurar es la cantidad de muestras a tomar antes de promediar el valor. Es necesario promediar varias mediciones debido a que la corriente normalmente va a estar oscilando. Así que las decisiones se toman respecto a una media de la señal.

En esta pantalla se muestra dos flechas. La de la izquierda conduce hacia pantalla principal y la de la derecha hacia la tercera pantalla.

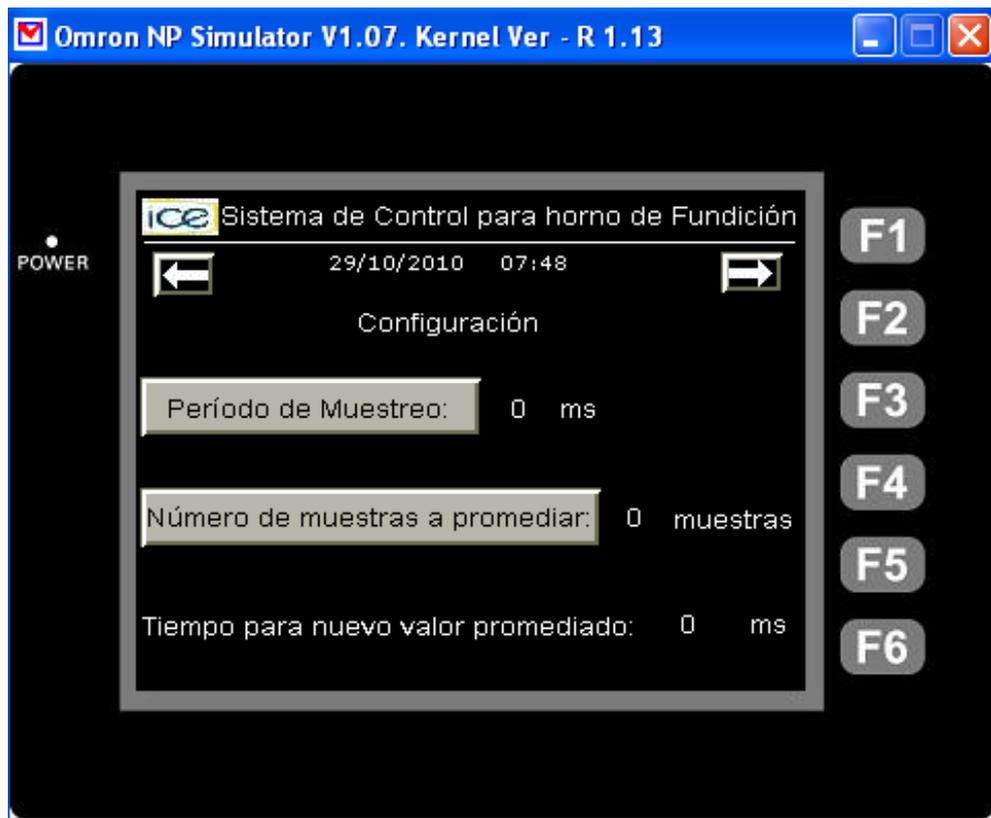


Figura 5.45 Pantalla de configuración.

En la figura 5.46 se muestra la tercera pantalla. Esta es utilizada para probar el movimiento de los tres pistones. Este se habilita solo cuando el sistema esta encendido, en modo automático y que el modo prueba este encendido.

Desde esta pantalla se puede regresar a la segunda presionando la flecha ubicada al lado izquierdo superior. También puede pasar directamente a la pantalla principal presionando la tecla F6.



Figura 5.46 Pantalla de pruebas.

Capítulo 6: Análisis y Resultados Experimentales

Debido al faltante de ciertos componentes requeridos para la solución, por motivos de retardos en compras y de construcción, se implementó y sometió a múltiples pruebas un prototipo conformado por el 70% del equipo real, el 30% faltante se implementó con equipo de características similares, pero de menor proporción. Dentro de este porcentaje se encontraban sensores de proximidad los cuales fueron simulados con interruptores de paso.

En la figura 6.1 se muestra el hardware del sistema de control puesto a prueba.

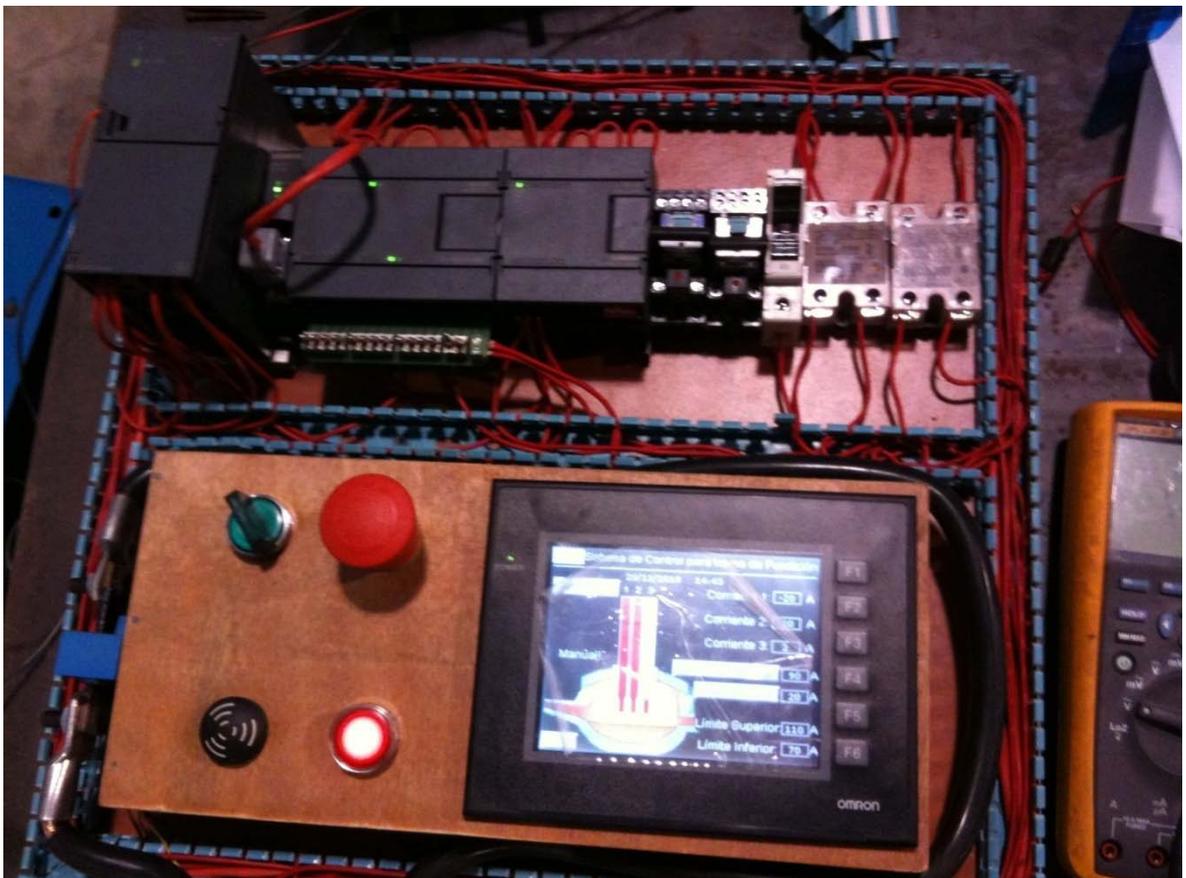


Figura 6.1 Gabinete de control para horno de fundición.

La mayor parte del equipo mostrado en la figura 6.1 es el que va a ser utilizado en el montaje permanente para el sistema de control del horno de fundición. Esta es una versión temporal de menor proporción, pero funcional diseñada y cableada

específicamente para pruebas. En el panel del operador, en la parte superior izquierda se encuentra el selector entre modo Auto/Manual, en la superior derecha se encuentra el pulsador tipo hongo de paro de emergencia, en la inferior izquierda se encuentra la alarma de audio, en la inferior derecha se encuentra el indicador luminoso de sistema en operación. En la parte derecha del panel se ubica la pantalla táctil para configuración y monitorización del sistema de control. A un costado de este panel se encuentra el transductor de corriente.

En la parte superior del tablero se ubican una fuente de alimentación de 5 A, UN PLC 224 con sus respectivos interruptores para la simulación de ciertos sensores de proximidad, módulo de entradas analógicas, un fuse de 1 A de protección para la pantalla y dos relés de estado sólido para las señales de control hacia la electroválvula.

Las mediciones fueron realizadas en Cebadilla de Turrúcares, Alajuela. En el ICE (MET), específicamente en Latitud: 9°56'05.72"N Longitud: 84°20'47.03"O Elevación: 503m (según Google Earth), a una temperatura ambiente de 28 °C; con el objetivo de futuras reproducciones.

Para la medición de corriente en tiempo real se acudió al transductor de corriente HAS 200-S mostrado en la figura 6.2 de la marca LEM.

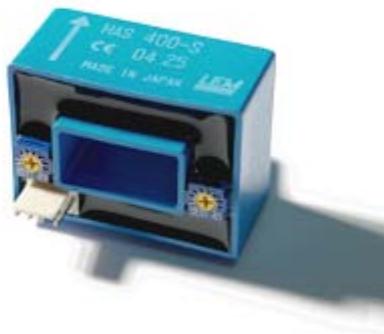


Figura 6.2 Transductor de corriente HAS 200-S.

Este dispositivo fue requerido únicamente para el prototipo de prueba y no para el equipo a instalar permanentemente. Esto por motivos de proporción y

existencia. Por este motivo se detallan sus características principales de manera especial en esta sección:

- Corriente nominal en el primario: 200 A.
- Corriente pico en el primario: ± 600 A.
- Tensión de alimentación: $(\pm 15 \pm 5\%)$ V.
- Tensión de salida: $(\pm 4 \pm 40)$ m V
- Linealidad: $< 1\%$ de I nominal en primario.

Por otro lado también se utilizó el banco de pruebas hidráulico mostrado en la figura 6.3, el cual trabajó a una presión de 500 PSI y a la que se le adaptó una de las electroválvulas requeridas por el sistema.



Figura 6.3 Banco de pruebas hidráulico.

Uno de los componentes principales utilizado en las pruebas fue el que simbólicamente representaría el transformador de alimentación de 107 V, 1500 A nominales en el secundario. Su representante fue una máquina de soldar Dialarc

250 AC/DC de la marca MILLER, la cual alimentó el electrodo bajo pruebas. Esta se muestra en la figura 6.4.



Figura 6.4 Máquina de soldar Dialarc 250 AC/DC.

Fue necesaria una plancha de acero como material a fundir con un espesor de 12 cm, esta se muestra en la figura 6.5.



Figura 6.5 Plancha de acero de 12 cm de espesor.

Como último componente de sistema de pruebas se encuentra el tren retenedor de los pistones, donde se adaptó a uno de los pistones un brazo porta electrodo temporal el cual sujetaría el electrodo de grafito utilizado para fundir acero. Este se muestra en las figuras 6.6 y 6.7.



Figura 6.6 Tren principal de horno de arco.



Figura 6.7 Brazo porta electrodo temporal de pruebas.

Una vez claro todos los componentes del sistema bajo pruebas, se procede a describir las mediciones realizadas.

Para la calibración del transductor de corriente, se procedió a medir la corriente consumida en una soldadura normal y la señal de salida del transductor. Esta soldadura la efectuó un soldador con experiencia. La corriente que pasaba por el electrodo fue medida con un amperímetro de gancho RMS Verdadero 1000 A AC/DC modelo 337 A de marca FLUKE y la medición de la tensión de salida del transductor se realizó mediante un multímetro digital FLUKE 287 RMS verdadero. Estos datos se muestran en la tabla 6.1

Tabla 6.1 Datos de entrada y salida para el transductor de corriente.

Corriente de Entrada(A)	Tensión de Salida(V)	Tensión extrapolada * 3200 (V)	Config. Soldadora
82,0	1,7	5440,0	90 A
81,3	1,6	5216,0	
94,0	1,9	6112,0	
74,1	1,8	5824,0	
76,2	1,9	6112,0	
88,5	1,7	5536,0	
97,0	2,0	6336,0	
109,3	2,0	6432,0	
99,5	2,0	6336,0	100 A
92,4	2,0	6304,0	
95,0	2,4	7776,0	
90,3	2,2	7040,0	
134,0	2,7	8640,0	
133,0	2,8	8960,0	140 A
145,0	3,0	9600,0	
138,0	3,0	9600,0	
154,0	3,0	9600,0	
141,3	2,9	9280,0	
124,7	2,4	7680,0	

Estos datos se graficaron en la figura 6.8 para obtener la ecuación de línea recta que caracteriza el transductor de corriente.

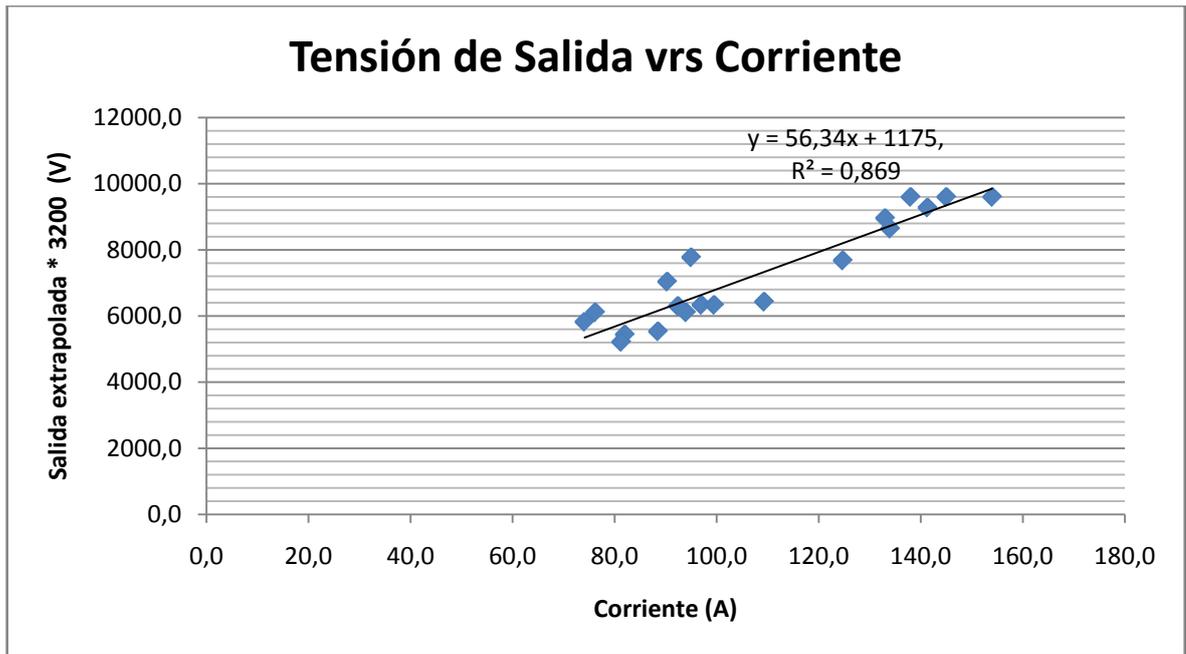


Figura 6.8 Tensión de salida en función de la corriente de entrada.

De los datos de la figura 6.8 se calcula la recta de regresión en la que se obtiene un coeficiente de correlación bastante fuerte (cercano a 1), lo que indica que existe una correlación lineal fuerte.

De la ecuación de regresión de la figura 6.8 se despeja la variable a controlar (Corriente) para aplicar directamente a la entrada analógica y procesarla dentro de la unidad lógica programable como el valor de corriente real.

$$I = \frac{V_{ext} - 1175}{56,34} \quad (6.1)$$

Para verificar la validez en la medición de corriente ya linealizada se procede a comparar los datos medidos con el amperímetro 337 A y el dato mostrado en la pantalla táctil. Estos se tabulan en la tabla 6.2.

Tabla 6.2 Validez de los datos medidos mediante el transductor de corriente

Corriente FLUKE 337 (A)	Corriente PLC Linealizada (A)	% Error
79,2	75,7	4,266950657
67,8	71,7	4,828093009
84,2	87,6	3,647535102
79,1	82,5	4,611149676
90,2	87,6	3,374431764
80,5	77,4	3,497129013
94,0	91,6	2,469542432
94,3	93,3	0,907150775
95,5	91,6	3,915031316
92,4	91,0	1,475580389
113,0	117,2	4,382788708
107,3	104,1	3,543625143
134,0	132,5	1,120065275
133,0	138,2	3,893920104
145,0	149,5	3,130011139
143,0	149,5	4,738055183
154,0	149,5	2,897067434
141,3	143,9	1,810838602
116,7	115,5	0,99461996

Para mantener la corriente consumida por cada electrodo dentro de cierto rango de magnitudes, se procedió a conocer el comportamiento en el tiempo de la señal que se debía controlar, primero con un electrodo de alma de acero y luego con uno de grafito. Este comportamiento se muestra en las figuras 6.9 y 6.10 respectivamente. Estas mediciones se realizaron con un Osciloscopio Digital Tektonix, TDS2014.

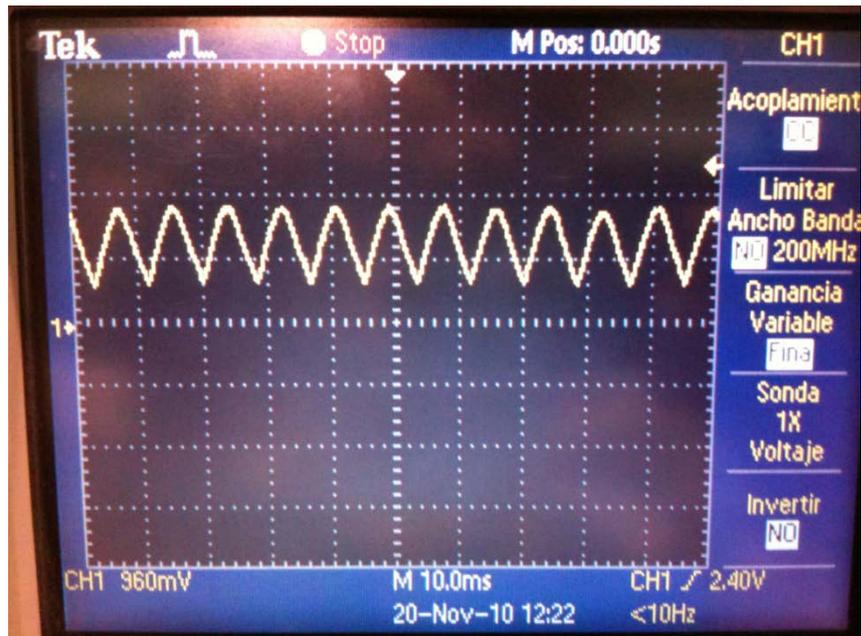


Figura 6.9 Tensión de salida del transductor con electrodo de alma de acero controlado por operador.

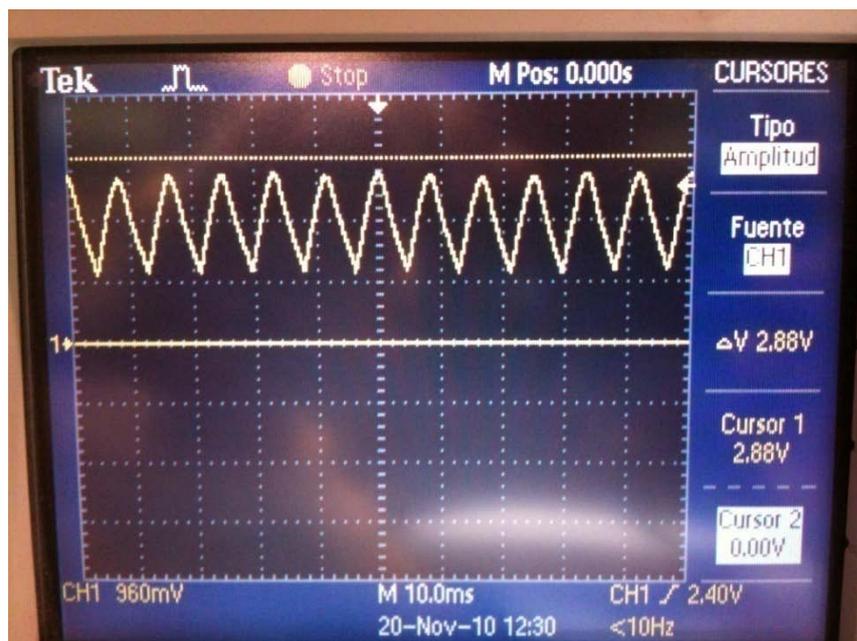


Figura 6.10 Tensión de salida del transductor con electrodo de grafito controlado por operador.

De las figuras 6.9 y 6.10 se deducen ciertos requerimientos en la medición. La señal a controlar debe de tener una frecuencia de oscilación de 100 Hz sin importar el consumo promedio. Además, los electrodos de grafito (90 ± 31 A) consumen una mayor corriente que los electrodos con alma de acero (77 ± 37 A)

para una misma configuración de la máquina de soldar. Vale aclarar que los electrodos utilizados para fundición son los de grafito.

De este análisis se establece la frecuencia de muestreo mínima ($2 \cdot 100\text{Hz}$ según Nyquist) como también los límites máximo y mínimo en los que debe operar la prueba de fundición (121 A máx. y 59 A mín.). Estos datos fueron configurados en el sistema de control mediante la interfaz de usuario programada en la pantalla táctil.

Antes de iniciar con las pruebas se reguló el caudal de aceite del sistema hidráulico con el objetivo de establecer la velocidad del pistón a 6 cm/s. Esto mediante la dosificación de una válvula de paso. Y con el fin de no fracturar los electrodos durante el primer contacto con el material. Vale mencionar que la prueba consistió en controlar la corriente únicamente en uno de los tres electrodos del sistema de fundición.

Una vez configurado el sistema de control se procedió a realizar las primeras pruebas de fundición. Durante estas se sufrieron múltiples fracturas de los electrodos por lo que se procedió a bajar la velocidad con que se desplazaban los pistones. Esta se estableció a 2 cm/s.

Los resultados de esta nueva configuración se muestran mediante la gráfica en el tiempo de la señal de salida del transductor de corriente mostrada en la figura 6.11.

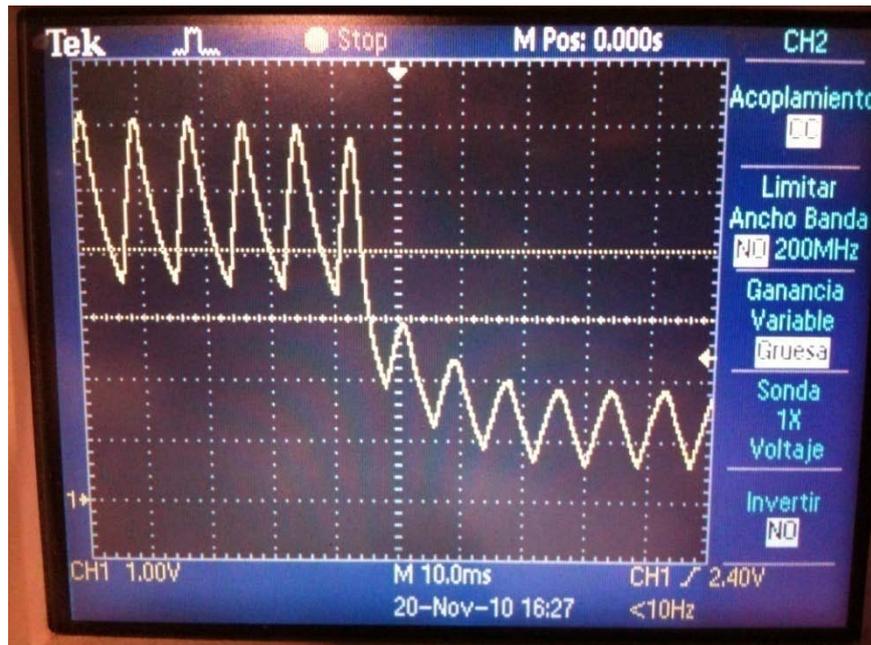


Figura 6.11 Señal de salida de sistema de control automático.

En la figura 6.11 se puede apreciar la tensión de salida del transductor cuando el sistema está gobernado por el sistema automático. Donde se observa que ya no se fractura el electrodo, mas trabaja de una forma no adecuada, pues su comportamiento corresponde a una oscilación con un tiempo de 500 ms entre subida ($I_o = 330 \text{ A}$) y bajada ($I_o = 40 \text{ A}$).

Esta anomalía sería corregida cuando se pasó de una configuración inicial a una secundaria según se muestra a continuación:

Configuración Inicial:

- Corriente Nominal = 90 A.
- Incertidumbre = 30 A
- Límite superior = 120 A.
- Límite inferior = 60 A.

Configuración Secundaria:

- Corriente Nominal = 90 A.

- Incertidumbre = 20 A
- Límite superior = 110 A.
- Límite inferior = 70 A.

Vale aclarar que para cualquier configuración los límites están determinados por la corriente nominal y la incertidumbre. La intención en pasar de la primera a la segunda fue en hacer que el sistema reaccionara de una forma más rápida (disminuyendo los límites requeridos) respecto a la primera cuando se da una variación de corriente.

Este objetivo fue exitosamente resuelto. En las figuras 6.12 y 6.13 se puede apreciar como el sistema de control automático logra fundir de la misma forma que lo realizó el soldador de gran experiencia (ver figura 5.10).

Respecto a las otras etapas durante el proceso de fundido, fueron exitosamente probadas una por una mediante la simulación de las entradas digitales.



Figura 6.12 Tensión de salida del transductor con electrodo de grafito controlado por control automático.



Figura 6.13 Tensión de salida del transductor con electrodo de grafito controlado por control automático.

Capítulo 7: Conclusiones y Recomendaciones

7.1 Conclusiones

- La variable corriente se midió con un margen de error menor al 5%.
- La variación de corriente de una máquina de soldar Dialarc 250 AC/DC de la marca MILLER, bajo condiciones normales de soldadura, es del 33% de su corriente nominal.
- La frecuencia de variación de corriente de una máquina de soldar Dialarc 250 AC/DC de la marca MILLER, bajo condiciones normales de soldadura, es de 100 Hz.
- La rutina implementada para el sistema automático ON-OFF con Histéresis fue capaz de controlar la cantidad de corriente consumida por el electrodo durante el proceso de fundido evitando corrientes elevadas por más de 2 segundos, esto para el equipo de prueba.
- La rutina diseñada e implementada para la interfaz gráfica permitió configurar la corriente media deseada, como también los límites inferior y superior del sistema automático.

7.2 Recomendaciones

- Antes de probar el sistema de control en el equipo verdadero del horno de fundición se deben volver a calibrar y configurar las características del mismo.
- Utilizar una frecuencia de muestreo no menor a 200 HZ.
- Velocidades mayores a 3 cm/s en el pistón pueden fracturar los electrodos.
- Asegurarse que las señales de control conmutan correctamente antes de realizar una prueba que podría ser destructiva.
- Mantener el orden de encendido de equipo de la siguiente forma:
 1. Encender el sistema de control automático.

2. Encender unidad hidráulica.
3. Encender sistema de potencia (transformador o equivalente).
4. Iniciar el proceso de fundido.

Bibliografía

1. Astigarraga Urquiza, J. (1999). *Hornos de arco para fusión de Acero*. Bogotá, Colombia: McGRAW-HILL.
2. Bagur, A. R. (2010). *Producción de metales ferrosos*. Recuperado el 7 de Mayo de 2010, de http://www.aprendizaje.com.mx/Curso/Proceso1/Temario1_III.html#nueve
3. BascotecniaSteel. (2008). *Hornos de arco eléctrico en la acería*. Recuperado el 10 de Mayo de 2010, de <http://www.bascotecniasteel.com/es/aceria-hornosarcoelectrico.php>
4. Basurto, L. (2001). *ALNICOLSA PRODUCTOS AGROINDUSTRIALES*. Recuperado el 30 de Septiembre de 2010, de <http://taninos.tripod.com/viscosidad.htm>
5. Biel, R., & Bayés, P. (2004). *GRAFITOS BARCO, S.A., AGENTES RECARBURANTES PARA HORNO ELÉCTRICO DE INDUCCIÓN EN FUNDICIÓN*. Recuperado el 2 de Mayo de 2010, de <http://www.grafitosbarco.com/fotos/AR.pdf>
6. Bloquera mexicanas. (2010). *Máquinas Rusas*. Recuperado el 21 de Octubre de 2010, de <http://maquinasrusas.tripod.com/hidraulico.htm>
7. Boada Ferrer, M. (2010). *Revista Investigación y Ciencia año 2010, Horno de arco eléctrico*. Recuperado el 11 de Mayo de 2010, de http://www.investigacionyciencia.es/03064834000646/Horno_de_arco_el%C3%A9ctrico.htm
8. Day, M. M., & Carpi, A. (2002). *VisionLearning*. Recuperado el 30 de Septiembre de 2010, de http://www.visionlearning.com/library/module_viewer.php?mid=37&l=s
9. Diaz, J. (9 de Febreo de 2008). *FESTO DIDACTIC*. Recuperado el 30 de Septiembre de 2010, de Fundamentos físicos de la hidráulica: <http://www.pascualbravo.edu.co/buzon/juan.diaz/Capitulo02.pdf>
10. Esacademic. (2008). *Los diccionarios y las enciclopedias sobre el Académico* . Recuperado el 30 de Septiembre de 2010, de <http://www.esacademic.com/dic.nsf/eswiki/955382>
11. Hidraulica. (2009). *Hidraulica - Tomas de Fuerza para Camión* . Recuperado el 21 de Octubre de 2010, de http://www.vickers.com.es/Tomas_de_Fuerza.html
12. Issouribehere, F., Agüero, J. L., & Battaiotto, P. E. (24 de Mayo de 2007). *Diseño de un Statcom para la mitigación del Flicker producido por hornos de arco eléctrico*. Recuperado el 6 de Octubre de 2010, de http://www.iitree-unlp.org.ar/pdf/B4.01_ISSOURIBEHERE.pdf

13. Lobato Fernández, A., & García Espinosa, L. M. (2008). *Flicker calidad de servicio*. Recuperado el 6 de Octubre de 2010, de EL FLICKER (Parpadeo): http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/EMC/trabajos_02_03/interf_red_y_ctos_elec/cem/paginas/flicker%20calidad%20de%20servicio.htm
14. MBS AG. (2010). *Sulzbach Messwandler*. Recuperado el 21 de Octubre de 2010, de http://www.mbs-ag.com/en/pages/Produktprogramm/index.php?ldTreeGroup=5&ldProduct=38&navid=1&MediandoWEB_mbs=a2ahgtntf5aq8ek8h3bbrb5eq2&__utma=222653511.1249133358.1287713246.1287713246.1287713246.1&__utmb=222653511.4.10.1287713246&__utmc=222653511&__utmz=
15. *Metales Ferrosos*. (1 de Marzo de 2009). Recuperado el 27 de Septiembre de 2010, de <http://tecnoalex2009.blogspot.com/>
16. Monografias.com. (2010). *Diseño e instalación de circuitos hidráulicos de Potencia*. Recuperado el 21 de Octubre de 2010, de <http://www.monografias.com/trabajos82/disenoinstalacion-circuitos-hidraulicos-potencia/disenoinstalacion-circuitos-hidraulicos-potencia2.shtml>
17. Natural, Grupo Gas. (2009). *Catálogo de tecnologías, hornos eléctricos*. Recuperado el 5 de Mayo de 2010, de <http://www.empresaeficiente.com/es/catalogo-de-tecnologias/hornos-electricos>
18. OEA-Mexico. (1979). *Seminario sobre procesos de Aceleración en Hornos Eléctricos*. Ciudad de Mexico.
19. Ortega García, M. (2010). *Principios de Hidráulica y Neumática*. Recuperado el 30 de Septiembre de 2010, de http://www.juntadeandalucia.es/averroes/ies_sierra_magina/d_tecnologia/LIBRO/pdf/hidrapri.pdf
20. Romero, J. C. (18 de Agosto de 2010). Proceso de horno de Fundición. (C. A. Bolaños Jiménez, Entrevistador)
21. SACI. (2008). *Transformadores de corriente*. Recuperado el 29 de Septiembre de 2010, de <http://www.maresa.com/pdf/10%20instrumentos%20de%20medicion/p%2010-13%20transformadores%20de%20corriente.pdf>
22. SIEMENS. (2008). *Manual del sistema de automatización S7-200*. Nueremberg: Siemens AG.
23. SIEMENS. (1997). *S7-200 Programmable Controller System Manual*. Alpharetta, GA: Siemens SE&A.
24. Sierra, J. (2010). *CÓMO INSTALAR UN SISTEMA DE INYECCIÓN DE CO2*. Recuperado el 21 de Octubre de 2010, de <http://perso.wanadoo.es/jsierrao/co2.html>
25. *Universidad Simón Bolívar*. (Julio de 2005). Recuperado el 6 de Octubre de 2010, de Calidad del servicio eléctrico, Flicker:

http://prof.usb.ve/robert/Archivos_Compartidos/Material%20Tecnico/Material%20CSE/Trabajo%20Flicker%20%28Jose%20Leon%29%20%20%28CSE-USB-RAB%202005%29.pdf

26. Villaverde, A. (28 de Noviembre de 2009). *Materiales Ferrosos*. Recuperado el 27 de Septiembre de 2010, de <http://adriantecnologia2.blogspot.com/2009/02/procesos-de-obtencion-del-acero-y-otros.html>
27. Yacom. (2009). *Transformadores de medidas*. Recuperado el 29 de Septiembre de 2010, de <http://garaje.ya.com/migotera/trafomedida.htm>

Apéndices

A.1 Glosario, abreviaturas y simbología

AC: corriente alterna.

DC: corriente continua.

ICE: Instituto Costarricense de Electricidad.

AWL: lista de instrucciones.

KOP: lógica de contactos.

FUP: programación por funciones.

PLC: controlador lógico programable.

FLICKER: parpadeo.

LED: diodo emisor de luz.

CPU: unidad central de procesamiento.

PSI: libra por pulgada cuadrada.

GPM: galones por minuto.

USB: bus serial universal.

Relé: elemento que funciona como interruptor y es controlado eléctricamente.

Caudal: cantidad de fluido que circula por unidad de tiempo.

Presión hidráulica: cantidad de fuerza perpendicular por unidad de área.

Presostato: medidor de presión hidráulica.

Hidráulica: rama que estudia las propiedades mecánicas de los fluidos.

Celda de carga: medidor de peso.

Electrodo: Conductor eléctrico a través del cual puede entrar o salir una corriente eléctrica.

Sistema: conjunto de elementos organizados que interactúan entre sí para lograr un objetivo.

Transductor: dispositivo capaz de transformar el efecto de una causa física de entrada, en otra de diferente a la salida, normalmente eléctrica.