

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**



**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

**“MANTENIMIENTO DE UN HORNO A INDUCCIÓN MAGNÉTICA”**

**EXAMEN DE GRADO (COMPLEXIVO)**

Previa a la obtención del grado de:

**INGENIERO EN ELECTRICIDAD ESPECIALIZACIÓN  
ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACION INDUSTRIAL**

**LEONARDO JAVIER VILLAVICENCIO GARCÍA**

**GUAYAQUIL – ECUADOR**

**AÑO: 2015**

## **AGRADECIMIENTO**

Sobre todo a Dios, a mi esposa y a mis padres por el apoyo incondicional que han brindado todos estos años.

## DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mi familia en especial a mi esposa, a mis padres, mis hermanos y a mis dos hijos Yanuá y Javier.

## TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

.....  
**Nombre del Profesor**

MG. DENNYS CORTEZ A.

.....  
**Nombre del Profesor**

PH. D. DOUGLAS PLAZA GUINGLA

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestas en este Informe corresponde exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(REGLAMENTO DE GRADUACIÓN DE LA ESPOL).

.....  
LEONARDO JAVIER  
VILLAVICENCIO GARCÍA

## RESUMEN

Este trabajo consiste en mejorar las condiciones de fundición y alargar la vida útil de un horno de inducción magnética marca AJAX MAGNETHERMIC debido a su poco mantenimiento en cada uno de sus elementos, llegar a operaciones óptimas de trabajo y realizar sugerencias de maniobras a seguir para la utilización del mismo.

El horno a inducción es el corazón productivo de la empresa metalmecánica en que se encuentra. Como máquina principal es muy difícil realizar un mantenimiento completo y extendido, es así que se realizó el mantenimiento en dos partes de acuerdo a los materiales requeridos y los tiempos de ejecución de cada uno. Para estas mejoras se aplicaron los conocimientos adquiridos dando mayor énfasis a electrónica de potencia, sistemas digitales, electrónica básica y redes industriales para escoger las mejores decisiones en el momento de realizar el mantenimiento.

Al término del mantenimiento se obtuvieron mejoras significativas en cuanto al tiempo de fundición, encendido inmediato del horno, mayor potencia y vida útil de los elementos que conforman el horno. Se llegó en la primera parte del mantenimiento a un 70% de potencia en su operación, completada la segunda parte de su mantenimiento se llegó a un 90% de su funcionamiento normal.

## ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO .....	ii
DEDICATORIA .....	iii
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN .....	iv
DECLARACIÓN EXPRESA .....	v
RESUMEN .....	vi
ÍNDICE GENERAL.....	vii
INTRODUCCIÓN .....	viii
CAPÍTULO 1 .....	1
1. SOLUCIONES A LOS PROBLEMAS PRESENTADOS EN EL HORNO DE INDUCCIÓN .....	1
<b>1.1 Eléctrico-electrónico.</b> .....	2
<b>1.1.1 Cables de fuerza y fusibles</b> .....	2
<b>1.1.2 Tiristor SCR</b> .....	3
<b>1.1.3 Banco de capacitores y resonancia</b> .....	4
<b>1.1.4 Tarjetas eletrónicas</b> .....	7
<b>1.2 Sistema de refrigeración</b> .....	9
CAPITULO 2.....	12
2. RESULTADOS OBTENIDOS.....	12
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	14
BIBLIOGRAFÍA.....	17

## INTRODUCCIÓN

La fusión por inducción es un proceso donde un metal es fundido en el crisol de un horno por efecto de una corriente alterna, es un método de calentamiento sin contacto ni llama.

Para este caso en particular se plantea mejorar el rendimiento de un horno de inducción de fabricación americana AJAX MAGNETHERMIC, el mismo antes de su mantenimiento trabajaba por debajo de su potencia y los tiempos de fundición eran entre el doble y el triple de su operación normal. A demás de las altas temperaturas que soportaban el sistema al no contar con un sistema adecuado de refrigeración y la manipulación constante de los capacitores sin criterio técnico. Sus datos de diseño nos indican los siguientes valores de operación: Potencia 550KW, entrada: 480Vac trifásico 636KVA 759Amp., salida: 1250Vac monofásico 1100Amp. 1000Hz, dos crisoles de 500Kg.

Para el sistema de fuerza nos concentraremos en el cableado, SCR, fusibles, banco de capacitores e inductancia en conjunto con la resonancia óptima del equipo. Para el sistema de control se analiza el estado de la fuente de poder para la alimentación del sistema digital, así como de cada tarjeta electrónica y las propiedades de los cada uno de los componentes que los conforman. Finalmente el sistema de refrigeración que atraviesa por los sistemas de fuerza y control, este debería ajustarse a las normas del fabricante cuya temperatura máxima de trabajo es 45°C.

## **CAPÍTULO 1**

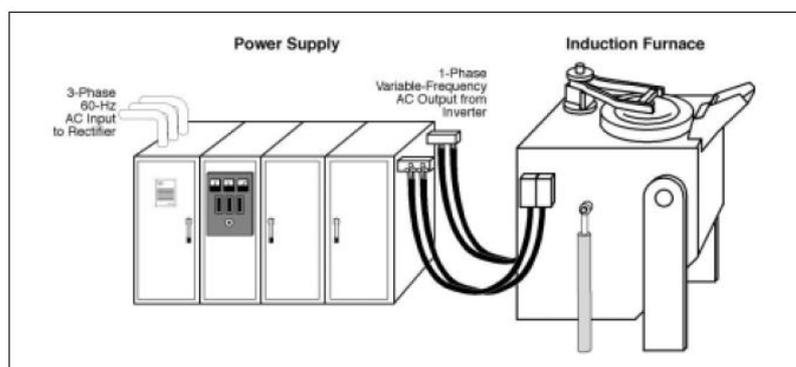
### **1. SOLUCIONES A LOS PROBLEMAS PRESENTADOS EN EL HORNO DE INDUCCIÓN.**

En la revisión previo al mantenimiento se encontraron los siguientes inconvenientes los cuales detallo a continuación:

1. Puntos calientes en terminales de cables de fuerza.
2. Fusibles abiertos y de diferentes clases.
3. Tiristores en mal estado y de diferentes características.
4. Derretimiento de aislamiento en reactores, transformadores y mangueras para el paso de agua.
5. Tarjetas electrónicas en mal estado y elementos averiados.
6. Sistema de refrigeración para el sistema de fuerza, control y bobina de fundición deficiente.

Debido a los múltiples inconvenientes que presenta el sistema y los tiempos de ejecución de las soluciones, se procedió a dividir el mantenimiento en dos partes:

- Eléctrico-electrónico
- Refrigeración



**FIGURA 1.1** Horno a inducción

## 1.1 Eléctrico-electrónico.

### 1.1.1 Cables de fuerza y fusibles.

Cables: Se sustituyó los cables de fuerza por cable de alta temperatura debido a la mala refrigeración del horno ya que el aumento de temperatura hace que la resistencia del cable sea mayor, es decir, crea mayor oposición al paso de la electricidad.

Fusibles: Se encontró fusibles que no son acordes al tipo de protección requerido. Dentro de los diferentes modelos y formas de fusibles se debe

tomar en consideración los siguientes aspectos para la elección del más adecuado para el sistema a proteger:

gG/gL: para uso general.

aR/gR: para la protección de semiconductores.

aM: para la protección de motores.

En este caso los fusibles se encuentran en el sistema para proteger a los SCR, por lo tanto deben ser ultra-rápidos en su accionamiento y se emplean la familia de los aR/gR.

### **1.1.2 Tiristor SCR**

Es el mismo caso de los fusibles, no todos los SCR pueden ser utilizados para cualquier propósito. La corriente y la tensión máxima soportada y la sensibilidad de compuerta como son la corriente mínima para el encendido y el tiempo de respuesta (“ $t_q$  es el menor tiempo que debe transcurrir entre que se invierte la intensidad por el ánodo y en el instante que aplicamos tensión ánodo-cátodo positiva sin que entre en conducción [1]”) son los parámetros que fueron considerados para el reemplazo de las existentes. Los valores de los SCR utilizados son:

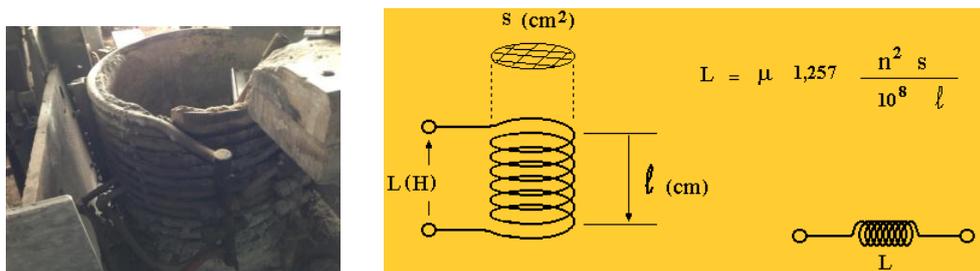
“ $I_{av}$ : 760Amp;  $V_{rrm}$ : 800V;  $V_{gt}$ : 3V min.;  $I_{gt}$ : 200mA min;  $t_q$ : 100 a 200 $\mu$ s [2]”

El inconveniente que se tiene es el tamaño y la disponibilidad de SCR en el mercado Ecuatoriano que cumplan con las características, para salir de este problema se adaptó bloques de cobre que entran en contacto con los SCR y las conexiones en el equipo.

### **1.1.3 Banco de condensadores y resonancia**

La resonancia es el estudio de la respuesta de frecuencia de un circuito particular. El circuito resonante es una combinación de elementos R, L y C. Para este caso deseamos tener una aproximación de un sistema resonante, consideramos estimar el valor de la inductancia en la bobina a temperatura ambiente sin carga ya que la frecuencia de resonancia natural del circuito de carga se altera cuando la inductancia cambia por el calentamiento de la bobina. Es decir, los cambios ocurren cuando se inserta una pieza a fundir diferente en la bobina y el punto de resonancia nunca puede ser exactamente el mismo.

La inductancia aproximada de una bobina de una sola capa bobinada al aire puede ser calculada de la siguiente forma:



**FIGURA 1.2** Bobina y cálculo de inductancia [3]

L = inductancia

$\mu$  = permeabilidad magnética del material del núcleo (aire=1)

s = área de la bobina (3277.59cm<sup>2</sup>)

l = longitud de la bobina (60cm)

n = número de espiras (15)

Donde L de acuerdo a la fórmula de la figura 1.2 es 154 $\mu$ H, esta una aproximación para obtener un valor estimado de la resonancia natural del sistema sin carga. Procedemos con estos datos a calcular un valor capacitivo.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad [4]$$

La frecuencia de trabajo es de 1000Hz, podemos obtener que C que es igual a 16.39 $\mu$ F el cual se pueda llegar a un valor cercano con capacitores de 1.47 $\mu$ F en existencia.



**FIGURA 1.3** Banco de capacitores del horno

A partir de este valor referencial se procedió a variar la carga capacitiva de acuerdo al material a fundir procediendo al cálculo aproximado de la inductancia, para el proceso de arranque del equipo. Cabe recalcar su dificultad en obtener la resonancia al proceder con variaciones de inductancia por otros factores como es la poca refrigeración del sistema y la deformidad de la carga a fundir al encontrarse en estado líquido.

MATERIAL	L.E. (MPa)	Permeabilidad $\mu_r$	Inducción de saturación $B_s$ (T)	Inducción remanente $B_r$ (T)	Conductividad (IACS)
Cobre OFHC Recocido	33	1	0	0	99
Hierro 99,99% Recocido	37	20000	2,15	0.01	17
Hierro 99,9% Recocido	138	1900	2,11	0,08	16
Acero 0,8%C Recocido	850	1000	2,10	0,25	15
Acero 0,8%C T+R 500°C	1100	700	2,10	0,50	15
Acero 0,8%C T+R 200°C	1300	450	2,10	0,68	15
Acero 0,8%C Templado	1350	375	2,10	0,90	15

**FIGURA 1.4** Tabla de permeabilidad

#### 1.1.4 Tarjetas electrónicas

El sistema de control, monitoreo y transferencias de señales desde están divididas en 4 tarjetas



**FIGURA 1.5** Tarjetas de control

Tarjeta-fuente: Contiene todos los elementos para convertir las señales de AC en DC y es reconocida por sus elementos capacitivos, transformador y reguladores de voltajes para trabajar sobre los  $\pm 15\text{Vdc}$ .

La manera en que se procedió con este elemento fue reemplazando los capacitores en mal estado a simple vista y revisando las señales de salida.

Tarjeta principal: Trabaja con lógica HTL (lógica de alta inmunidad al ruido) para aplicaciones industriales donde el ruido eléctrico es muy elevado. Es de procesamiento lento y consumo es elevado ya que

incorpora diodos zener para crear un gran desplazamiento entre los estados de voltaje lógico 1 y 0. Estos dispositivos operan con una fuente de tensión de 15V.

Se realizó un estudio minucioso de esta tarjeta al revisar la lógica de sus componentes y llegar a ubicar las señales de entrada y se identificó las señales de disparo de los SCR, las ondas cuadráticas de las señales trifásicas. El modelo de pista tiene la particularidad de estar en la baquelita sólo los caminos de alimentación de voltaje, tierra y neutro. Las demás señales recorren la tarjeta por medio de cables.

Esta tarjeta realiza el control y de todo el sistema de señales a los SCR, contiene elementos obsoletos y se estudia la factibilidad de realizar una nueva tarjeta con lógica CMOS debido a que se puede conseguir también una alta inmunidad al ruido, además de un consumo más bajo.

Tarjeta lógica: Esta tiene la particularidad de tener los diodos zener para las operaciones lógicas 1 y 0. En esta tarjeta se realizó un chequeo de cada uno de los elementos y su operatividad en el momento de servicio.

Tarjetas de monitoreo: Son dos tarjetas dedicados a enviar las señales de corriente y voltaje y lumínicas de marcha y paro de del equipo. Se revisó dichas tarjetas, se reemplazaron elementos en mal estado.

## 1.2 Sistema de refrigeración

En los datos del fabricante se indica utilizar una temperatura de trabajo máxima de 45°C, los cuales no fueron respetados y se procedía a múltiples arranques del equipo siendo una de sus principales causas la falla por alta temperatura que alcanzaba los 65°C o más.



**FIGURA 1.6** Horno inducción a repotenciar

La figura 1.6 presenta al horno de inducción durante su operación aún con las consecuencias por la alta temperatura, durante el trabajo de fundición se observó con un osciloscopio el disparo no sincronizado de los SCR o su avería, la operación de los fusibles que protegen los a los mismos, el deterioro de la cuba de fundición, daño en las mangueras por donde se transporta el agua como refrigerante del sistema, siendo este el punto más

crítico la unión entre la bobina de inducción y el banco de condensadores por medio de una manguera que transporta agua y a su vez acopla el cable que entrega 1100Amp a 1000Hz a la bobina.

El sistema inicial de refrigeración consistía en una pequeña cuba en la que se colocaba el agua a ser utilizada para la fundición (fig. 1.6), lo que evidentemente no era suficiente al obtener con un termómetro láser los datos de temperatura mayores a 45°C. Una temporal solución fue puesta en práctica pero sin dejar de ser efectiva fue el colocar una segunda cuba con hielo y la primera cuba con agua, una bomba realiza la recirculación del agua en el sistema.



**Figura 1.7** Adaptación de segunda cuba

La figura 1.7 presenta las dos cubas cuyos resultados de esta temporal solución mejoró la potencia de 40% a 60% en el proceso, reduciendo el tiempo de fundición de 8 horas a 6 horas pero con los mismos problemas de elevación de temperatura a las dos últimas horas del proceso. Se operó así

bajo la vigilancia y cuidados de mantenimiento hasta poner en práctica la solución definitiva al problema de temperatura.



**FIGURA 1.8** Torre de enfriamiento

La figura 1.8 es la adaptación de la torre de enfriamiento para el sistema que conjuntamente con el mantenimiento a la parte de fuerza y control del equipo, los tiempos de fundición llegan a valores normales conjuntamente con el aumento de la potencia hasta un 95% y llegando a un punto de obtener una mejor resonancia para el proceso.

## **CAPÍTULO 2**

### **2. RESULTADOS OBTENIDOS**

Con el mantenimiento de cada uno de los elementos que componen el horno a inducción magnética, se obtiene como resultado la mejora en la respuesta del sistema a los procesos de fundición, así como también la reparación de tarjetas auxiliares que reposaban junto con el equipo.

Al tener una aproximación a la resonancia natural del sistema sin carga se puede realizar mejoras al inicio de fundición para el sinterizado y utilizando las tablas de permeabilidad para cargas ferrosas y no ferrosas se puede aplicar el mismo principio con arranques en la que los picos de voltaje y corriente no sean tan bruscos y el horno no se vea forzado a suspender la fundición por falla de sincronismo.

La adaptación de una torre de enfriamiento permitió que la temperatura en los sistemas de fuerza, control y bobina de fundición esté por debajo de lo recomendado por el fabricante, permitiéndole al equipo alcanzar mayores potencias y reduciendo los tiempos de fundición.

Con los fusibles y tiristores adecuados y recomendados por el fabricante ayudó a realizar una mejor operación del sistema de fuerza y control.

	<b>Sin Mantenimiento</b>	<b>Mantenimiento y segunda cuba</b>	<b>Mantenimiento y torre de enfriamiento</b>
<b>HORAS</b>	<b>KW</b>	<b>KW</b>	<b>KW</b>
1	245	120	90
2	245	350	480
3	245	350	320
4	245	245	110
5	245	245	
6	220	150	
7	220		
8	220		
9	176		
10	176		

Tabla 1: Tiempos de fundición

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Después de haber realizado el trabajo de mejoramiento en el horno de inducción establezco las siguientes conclusiones y recomendaciones:

1. Se logró aumentar el tiempo de vida de los elementos de control con un mantenimiento a tarjeta y la mejora del tiempo de respuesta con la sustitución de elementos en mal estado y puntos fríos.
2. Con la estimación de la resonancia natural del sistema se logró un mejor arranque y respuesta en los SCR que conforman el sistema.

3. Se logró aumentar el tiempo de vida de los elementos de fuerza con el cambio de cableado nuevo en la que se encontró puntos calientes por deterioro y corrosión.
4. El horno aumentó su eficiencia notablemente con la incorporación de un sistema de refrigeración adecuado, disminuyendo los tiempos de fundición.
5. Se identificaron las deficiencias al momento de realizar un mantenimiento general al equipo como es la inclusión de materiales varios que no son apropiados para el horno como lo es la elección apropiada de los tiristores, zeners, fusibles y demás elementos sustituibles.
6. Antes de comenzar con la fundición se aconseja realizar un cálculo basado en el material a fundir.

7. Se recomienda ubicar señalizaciones en los alrededores del horno para evitar accidentes.
  
8. Es recomendable realizar una tarjeta principal con tecnología CMOS con el fin de tener repuestos de primera mano, incluyendo un consumo más bajo y mayor rapidez de respuesta.
  
9. Se debe tener cuidado con la manipulación del banco capacitores debido a que tienen almacenado carga.

## BIBLIOGRAFÍA

[1] Electrónica Industrial, Universidad de las Palmas de Gran Canaria

[http://www.iuma.ulpgc.es/~roberto/asignaturas/EI/transparencias/EI\\_Tema\\_3.3.Tiristor.pdf](http://www.iuma.ulpgc.es/~roberto/asignaturas/EI/transparencias/EI_Tema_3.3.Tiristor.pdf)

[2] Semikron serie SKT760, <http://datasheet.octopart.com/SKT760/16E-SemiKron-datasheet-8549932.pdf>

[3] Irshad Khan, Automatic frequency control of an induction furnace, 2000.

[4] EPRI Electric Power Research Institute, Power Quality for Induction Melting in Metals Production, 1999.