



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**SELECCIÓN Y ACOPLAMIENTO
DE UN MICRO HORNO DE
INDUCCIÓN**

TESIS

Que para obtener el título de
INGENIERO MECÁNICO

P R E S E N T A

JUAN CARLOS SÁNCHEZ LADRÓN DE GUEVARA

DIRECTOR(A) DE TESIS

DR. ARMANDO ROJAS MORÍN



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIAS

A mis padres **Juan Carlos y Ma. del Rosario**, quienes me han cuidado siempre y proporcionado todo para alcanzar mis metas. No sólo en el aspecto material o manutención, sino dándome la mejor educación y cariño que pudiera pedir.

A mis hermanas **Fernanda y Sara**, así como al resto de mis familiares, quienes dan alegría a mi vida.

Agradezco a mi Universidad Nacional Autónoma de México, la cual me brindó la oportunidad de desarrollarme tanto académica como culturalmente, permitiéndome conocer y vivir todo lo que rodea a esta gran institución.

A mi querida Facultad de Ingeniería la cual me dio todo, en la que pasé los momentos más agradables y también los más duros, donde conocí a los maestros, doctores e ingenieros que me enseñaron el valor de ser un profesional útil a la sociedad. Y de la cual siempre me sentiré orgulloso de llevar su nombre en alto.

Con mi más sincero agradecimiento a mi tutor de tesis, **Dr. Armando Rojas Morín**, por su paciencia, confianza y apoyo para el desarrollo de este proyecto.

Con especial aprecio, al **Ing. Luis Alberto Sánchez Bonegui**, quien me enseñó las actitudes necesarias para el ejercicio profesional, y me introdujo a nuevas formas de pensar y atacar los problemas profesionales de esta profesión.

A mis profesores y amigos que he conocido a lo largo de estos años, por su apoyo, orientación y ayuda prestada.

Por último y no menos importante, agradezco al proyecto **PAPIT No. IN 115416, de la DGAPA**, por el apoyo brindado para la compra del equipo de instrumentación del sistema.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1.....	6
1.1 CLASIFICACIÓN DE LOS HORNOS INDUSTRIALES.....	7
1.1.1 ALTO HORNO.....	7
1.1.2 HORNO DE Balsa.....	11
1.1.3 HORNO DE TIPO TUNEL.....	12
1.1.4 HORNO ROTATORIO.....	14
1.1.5 HORNO DE RESISTENCIAS.....	16
1.1.6 HORNO DE ARCO.....	17
1.1.7 HORNO DE INDUCCIÓN.....	19
1.1.7.1 HORNOS DE INDUCCIÓN SIN NÚCLEO.....	21
1.1.7.2 HORNOS DE INDUCCIÓN CON NÚCLEO.....	22
1.2 CAMPOS DE APLICACIÓN.....	24
1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA UTILIZACIÓN DEL MICRO HORNO DE INDUCCIÓN ROYER.....	24
1.4 OBJETIVOS DE TRABAJO.....	25
1.5 CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN.....	25
1.6 VENTAJAS DEL CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN.....	26
1.7 BASES PARA EL CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN.....	27
1.7.1 INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA.....	27
1.7.2 LEY DE LENZ.....	28
1.7.3 EFECTO JOULE.....	28
1.7.4 MODELO DEL CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN.....	29
1.8 DISTRIBUCIÓN DE LAS CORRIENTES PARASITAS EN UNA BARRA SOLIDA.....	30
1.9 EFECTO SKIN.....	31
1.10 REFERENCIAS DE LAS FIGURAS.....	33
1.11 REFERENCIAS DE LAS ECUACIONES.....	35
CAPÍTULO 2.....	36
2.1 SELECCIÓN DEL MICRO HORNO DE INDUCCIÓN.....	37
2.2 DESCRIPCIÓN DEL MICRO HORNO DE INDUCCIÓN ROYER.....	43
2.3 ACOPLAMIENTO POR CONTACTO.....	44

2.4 ACOPLAMIENTO SIN CONTACTO	45
2.5 EQUIPOS A LA FRECUENCIA DE RED	47
2.6 EQUIPOS DE MEDIA FRECUENCIA.....	48
2.7 EQUIPOS DE ALTA FRECUENCIA.....	48
2.8 GENERADOR DE VÁLVULAS ELECTRÓNICAS	49
2.9 DIAGRAMA DE BLOQUES	50
2.10 LOS CONTROLES.....	50
2.11 CIRCUITO OSCILADOR.....	52
2.12 BOBINA DE INDUCCIÓN	54
2.13 CÁLCULO DE LA BOBINA DE INDUCCIÓN.....	56
2.13.1 CORRIENTE MÁXIMA DE LA BOBINA DE INDUCCIÓN	59
2.13.2 POTENCIA REQUERIDA	60
2.14 REFERENCIAS DE LAS FIGURAS	66
2.14 REFERENCIAS DE LAS ECUACIONES	67
CAPÍTULO 3.....	69
3.1 ANÁLISIS DEL DIAGRAMA DE INSTRUMENTACIÓN	70
3.1.1 ADQUISIDOR DE DATOS.....	72
3.1.2 TERMOPARES.....	75
3.1.3 ESTRUCTURA SOPORTE.....	76
3.1.4 GEOMETRÍA Y DIMENSIONES DE LA PROBETA	80
3.1.5 SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE LA BOBINA INDUCTORA.....	82
3.2 ACOPLAMIENTO DE LA INSTRUMENTACIÓN AL HORNO DE INDUCCIÓN	86
3.3 REFERENCIAS DE LAS FIGURAS	89
3.4 REFERENCIAS DE LAS ECUACIONES	89
CAPÍTULO 4.....	90
4.1 CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA.....	91
4.2 PUESTA A PUNTO DEL SISTEMA.....	91
4.3 JUSTIFICACIÓN DEL SISTEMA.....	92
4.4 VENTAJAS DEL SISTEMA Y SUS COMPONENTES	93
4.5 PRUEBA EXPERIMENTAL 1. CARACTERIZACIÓN DEL HORNO DE INDUCCIÓN	94
4.5.1 CONDICIONES DE LA PRUEBA EXPERIMENTAL 1	94
4.5.2 DESARROLLO DEL LA PRUEBA EXPERIMENTAL 1.....	96
4.5.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS	97

4.5.4 CONCLUSIONES DE LA PRUEBA EXPERIMENTAL 1	98
4.6 PRUEBA EXPERIMENTAL 2. CALENTAMIENTO DE UNA PROBETA METÁLICA MEDIANETE EL HORNO DE INDUCCIÓN	99
4.6.1 CONDICIONES DE LA PRUEBA EXPERIMENTAL 2	99
4.6.2 DESARROLLO DE LA PRUEBA EXPERIMENTAL 2	102
4.6.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS	103
4.6.4 CONCLUSIONES DE LA PRUEBA EXPERIMENTAL 2	107
4.7 PRUEBA EXPERIMENTAL 3. SIMULACIÓN DEL CALENTAMIENTO DE UNA PROBETA METÁLICA	108
4.7.1 CONDICIONES DE LA PRUEBA EXPERIMENTAL 3	108
4.7.2 DESARROLLO DE LA PRUEBA EXPERIMENTAL 3	109
4.7.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS	110
4.7.4 CONCLUSIONES DE LA PRUEBA EXPERIMENTAL 3	110
4.8 REFERENCIAS DE LAS FIGURAS	112
4.9 REFERENCIAS DE LAS ECUACIONES	112
CONCLUSIONES	113
5.1 CONCLUSIONES.....	114

CAPÍTULO 1

HORNOS INDUSTRIALES

INTRODUCCIÓN

Los hornos industriales son los equipos o dispositivos utilizados en la industria, en los que se calientan los materiales y las piezas colocados en su interior por encima de la temperatura ambiente.

La importancia en el uso de los hornos Industriales radica en que tienen múltiples aplicaciones en diferentes sectores industriales. En la industria automotriz se usan hornos de tratamientos térmicos de fusión de metales y de secado para fabricar automóviles, motocicletas y camiones; en la industria siderúrgica se usan hornos para fundir chatarra, para el laminado, la forja y la extrusión de diferentes metales, hornos para tratamientos térmicos, para fabricar aleaciones, para la reducción de minerales en el hierro, entre otros. En la industria del vidrio y la cerámica se utilizan hornos rotativos y tipo túnel para fabricar piezas, para la fusión de vidrio y fibras cerámicas. En la fabricación de materiales eléctricos como motores y transformadores.

Dentro de este presente trabajo no se pretendió adquirir un horno industrial, pero si se seleccionó un pequeño horno de inducción al que se acopló a un sistema instrumentado para alcanzar un fin en específico; el uso de la inducción electromagnética para calentar piezas metálicas, y a futuro acoplar un concentrador solar al sistema para producir un calentamiento híbrido.

Para ello en este capítulo se toma como antecedentes la clasificación de los hornos industriales, con el fin de partir de manera general con el funcionamiento y las características principales de los hornos, hasta llegar a lo particular que es el horno de inducción.

Posteriormente a lo largo de esta sección se presentara el tipo de hornos de inducción, los campos de aplicación de estos hornos, la justificación y los objetivos de este trabajo, las ventajas del calentamiento por inducción y las bases para el calentamiento por inducción.

1.1 CLASIFICACIÓN DE LOS HORNOS INDUSTRIALES.

La Forma de calentamiento da lugar a la clasificación de los hornos industriales en dos grupos (Figura 1.1), cada grupo con diversos tipos:

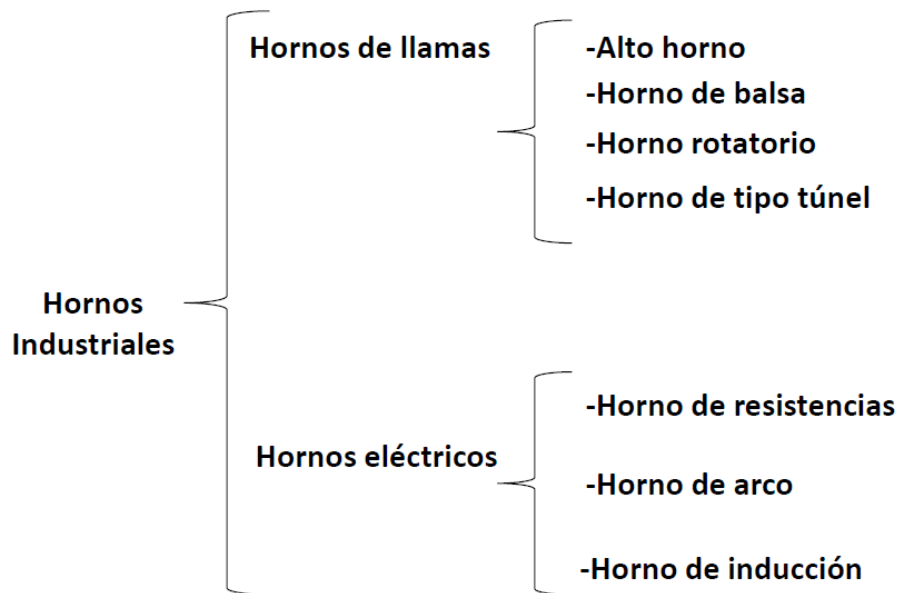


Figura 1.1. Cuadro sinóptico para la clasificación de los hornos industriales por su forma de calentamiento [1.1].

1.1.1 ALTO HORNO.

Un alto horno es un horno especial en el que tienen lugar la fusión de los minerales de hierro y la transformación química en un metal rico en hierro llamado arrabio (Figura 1.2). Es un horno de cuba, formado por dos troncos de cono unidos por sus bases mayores. El tronco superior recibe el nombre de cuba, y el inferior se llama etalajes, la zona intermedia se llama vientre. La parte interior del horno está recubierta por material refractario y la exterior es de chapa de acero, entre ambas capas se dispone un circuito de refrigeración. Estas instalaciones suelen tener alturas en torno a los 30 metros y de 4 a 9 metros de diámetro; su capacidad de producción puede variar entre 500 y 1500 toneladas diarias.



Figura 1.2. Alto horno número 6 AHMSA [1.2].

COMPONENTES PRINCIPALES DE UN ALTO HORNO.

Cuba: Tiene forma troncocónica y constituye la parte superior del alto horno; por la zona más estrecha y alta de la cuba llamada tragante donde se introduce la carga.

Carga: Está compuesta por los siguientes elementos:

- El mineral de hierro: magnetita¹, limonita², siderita o hematita³.
- Combustible: que generalmente es carbón de coque⁴. El carbón de coque, además de actuar como combustible provoca la reducción del mineral de hierro, es decir, provoca que el metal hierro se separe del oxígeno.
- Fundente: Puede ser piedra caliza o arcilla. El fundente se combina químicamente con la ganga⁵ para formar escoria, que queda flotando sobre el hierro líquido, por lo que se puede separar. Además ayuda a disminuir el punto de fusión de la mezcla.

El mineral de hierro, el carbón de coque y los materiales fundentes se mezclan y se tratan previamente, antes de introducirlos en el alto horno. El resultado es un material poroso llamado sinter.

¹ Mineral de hierro, constituido por óxido ferroso-diférrico (Fe_3O_4).

² El término se usa para designar óxidos e hidróxidos masivos de hierro.

³ Mineral compuesto de óxido férrico, cuya fórmula es Fe_2O_3 .

⁴ Combustible sólido formado por la destilación de carbón calentado a temperaturas de 500 a 1100 °C sin contacto con el aire.

⁵ Conjunto de todos los minerales sobrantes que se encuentran asociados a la mena.

Etalaje: Está separada de la cuba por la zona más ancha de esta última parte, llamada vientre. El volumen del etalaje es mucho menor que el de la cuba. La temperatura de la carga es muy alta (1500°C) y es aquí donde el mineral de hierro comienza a transformarse en hierro. La parte final del etalaje es más estrecha.

Crisol: Bajo el etalaje se encuentra el crisol, donde se va depositando el metal líquido. Por un agujero, llamado bigotera o piquera de escoria se extrae la escoria, que se aprovecha para hacer cementos y fertilizantes. Por un orificio practicado en la parte baja del mismo, denominada piquera de arrabio sale el hierro líquido, llamado arrabio, el cual se conduce hasta unos depósitos llamados cucharas. Así pues, el producto final del alto horno se llama arrabio, también llamado hierro colado o hierro de primera fusión.

FUNCIONAMIENTO.

El horno es alimentado con una mezcla de mineral de hierro, carbón de coque y fundente, generalmente piedra caliza. Mediante una cinta transportadora esta mezcla se lleva hasta una tolva situada en la parte superior del horno. La mezcla se va alimentando al horno a través de la parte superior, llamada tragante. En ella un mecanismo de trampillas permite la entrada de la materia prima evitando que escapen al exterior gases, humos y sustancias contaminantes.

Los altos hornos operan en continuo. Esto quiere decir que la forma de trabajo no consiste en introducir la mezcla con los reactivos y dejar que el horno funcione durante un determinado tiempo y que haya que detenerlo para extraer los productos. En un alto horno se introducen las materias primas sólidas por la parte superior y los productos, más densos, se extraen por la parte inferior de forma continua. Esto hace que la mezcla de entrada vaya cayendo hacia zonas más bajas del horno y que sucesivamente vaya pasando por la cuba, el vientre y el etalaje.

Por la parte inferior del horno se inyecta por unas toberas aire caliente. Este aire reacciona en la zona de etalajes con el coque, el coque se transforma en CO generando una temperatura de 1800°C. Con esta temperatura la carga llega en la zona inferior del horno a la temperatura de fusión del hierro y debido a la diferencia de densidades entre el hierro y la escoria estos quedan separados en el fondo del horno, en una zona donde está el crisol (Figura 1.3). El hierro fundido queda en la capa inferior del crisol y la escoria en la superior. Posteriormente se rompe (pincha) el tapón cerámico que obtura la piquera de arrabio y es sangrado el horno, extrayéndose el hierro de primera fusión, hierro colado o arrabio y a continuación la escoria.

El arrabio se vierte en grandes recipientes llamados cucharas, éstas pueden ser abiertas o cerradas (torpedo), que es un vagón semicerrado recubierto en su interior por ladrillos refractarios que mantienen el arrabio fundido, mientras es transportado hasta un horno de afino, donde le quitarán al arrabio las impurezas que todavía contiene y que lo hacen poco adecuado para el uso industrial.

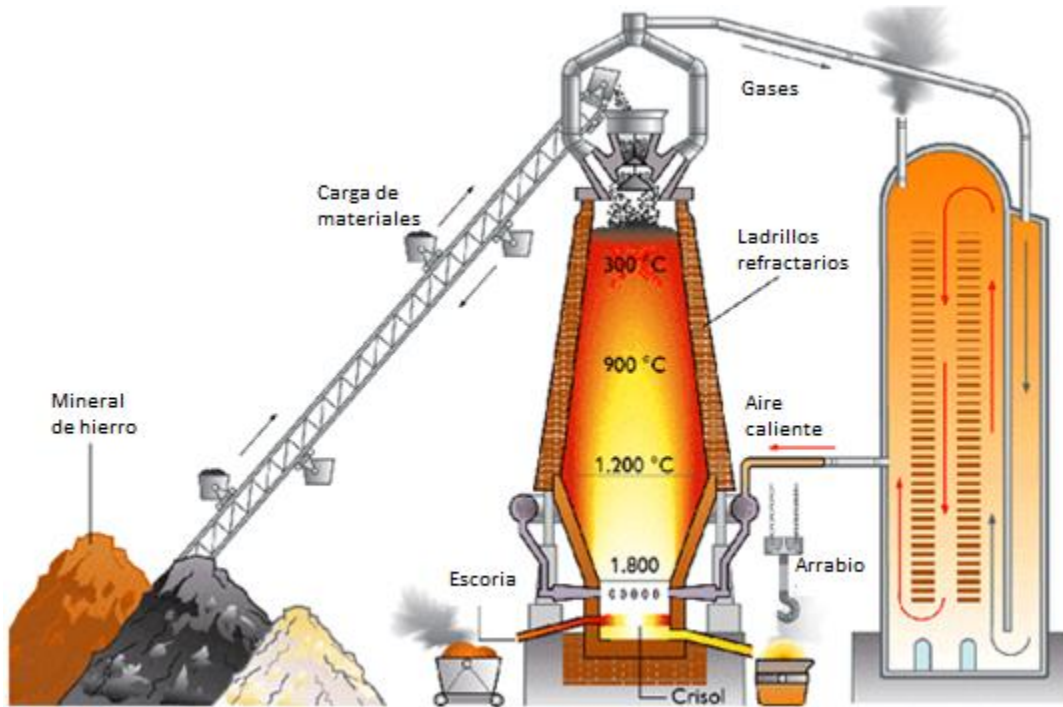


Figura 1.3. Proceso de un alto horno [1.3].

Las escorias obtenidas son empleadas en la fabricación de abonos agrícolas, como materia prima en la producción de cemento y en la fabricación de aislantes térmicos y acústicos.

Por la parte superior de la cuba salen unos gases provenientes de la combustión (CO , CO_2 y SO_3) que tras ser filtrados, para quitarle impurezas, son empleados como combustibles en unos intercambiadores de calor.

El coque cumple tres papeles durante el proceso.

- a) Combustible, aportando el calor necesario para la fusión de la escoria y del metal.
- b) Soporte de la carga y responsable de la permeabilidad de la misma, dada su gran porosidad.
- c) Reductor de los óxidos de hierro.

El fundente cumple una doble función.

- a) Reduce la temperatura de fusión del hierro.
- b) Reaccionan con los elementos que acompañan al mineral para formar la escoria.

1.1.2 HORNO DE Balsa.

Los hornos de balsa están constituidos esencialmente por una cuba en material refractario, de forma generalmente rectangular, cubierta de una bóveda aplanada. Sus dimensiones varían enormemente: se valoran generalmente por la superficie del baño de fusión, que es de 10 a 500 m².

La capacidad de producción para los hornos de balsa se expresa en toneladas por m², la capacidad de estos equipos es del orden de 1 a 2.5 Ton/m².

Las primeras materias se introducen por uno de sus extremos, estando el otro unido a unos canales, donde el vidrio se derrama por gravedad hacia las máquinas de fabricación. Para el vidrio plano, el extremo de extracción está provisto de un sifón de donde unos rodillos lo extraen y estiran en forma de lámina plana (Figura 1.4); también puede obtenerse por flotación.

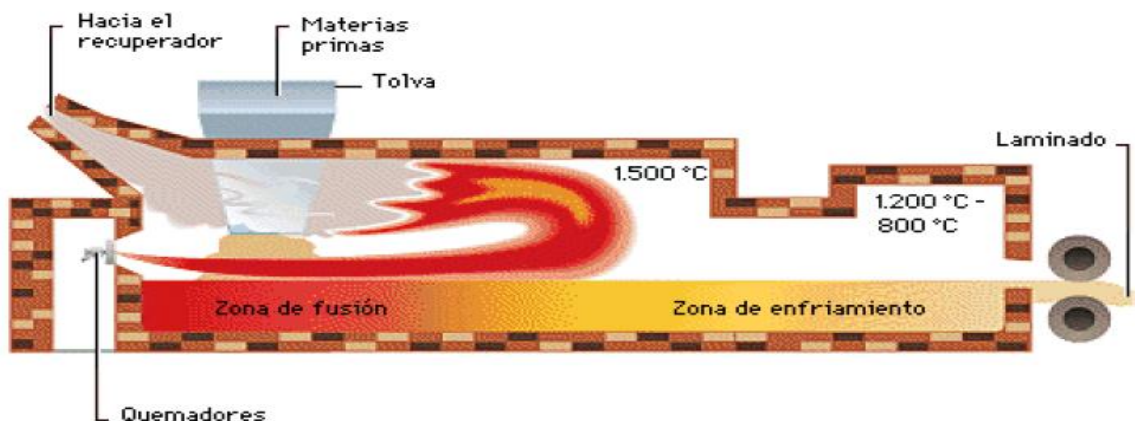


Figura 1.4. Horno de balsa con llama tipo bucle [1.4].

El equipo de calentamiento consta de unos inyectores de gas natural, los cuales desembocan en el horno en la proximidad de los canales de refractario de llegada del aire de combustión procedente de los dispositivos de recuperación. La llama se desarrolla entre la bóveda y la superficie del baño, y los productos de combustión se evacúan por orificios apropiados.

Los hornos de balsa pueden ser de dos tipos:

- Hornos de calentamiento en bucle o herradura, en los cuales los orificios de llegada de aire y de combustible están colocados en uno de los lados menores del rectángulo. La llama se desarrolla en forma de bucle para volver sobre ella misma y evacuarse por canales situados en el mismo lado que los orificios de llegada citados. El recorrido de la llama es pues sensiblemente igual al doble de la longitud de la balsa.
- Hornos de calentamiento transversal, en los cuales los orificios de llegada están colocados a lo largo de uno de los lados mayores del rectángulo, y los orificios de evacuación están colocados en el lado mayor opuesto, por lo que la llama, en este caso, sólo dispone para su desarrollo de la anchura de la balsa.

1.1.3 HORNO DE TIPO TUNEL.

Son de hogar fijo moviéndose las piezas a cocer. El horno túnel de llama libre es el más clásico y simple de los hornos túnel. Está constituido por una galería recta con una sección relativamente pequeña y una longitud que puede alcanzar los 130 metros (Figura 1.5). La galería está provista de puertas a ambos lados.



Figura 1.5. Horno tipo túnel [1.5].

El producto cerámico que se va a cocer se coloca en vagonetas que recorren lentamente la galería desde un extremo al otro. Las vagonetas cargadas llenan casi por completo el interior del horno y circulan sobre rieles. A intervalos regulares se introduce una vagoneta de producto crudo y se extrae otra de producto cocido. El movimiento de las vagonetas en el interior del horno es continuo y uniforme.

Las vagonetas están constituidas por una parte metálica inferior, con ruedas, que sostiene una capa de material aislante y refractario; la parte superior del refractario que lleva el

material que se cuece tiene espacios a través de los cuales pasan las llamas y productos de combustión. Las vagonetas forman un diafragma horizontal que aísla del calor todo lo que está situado por debajo y en particular las partes metálicas de la vagoneta.

Con objeto de que el aislamiento sea más perfecto, los bordes de la vagoneta están prolongados y tienen una forma curva, de modo que estos lados curvos están colocados en dos canales laterales rellenos de arena. Las vagonetas circulan por la acción de un mecanismo de empuje, generalmente hidráulico, que permite el empuje en ambos sentidos. El movimiento puede ser intermitente o continuo y suele estar comprendido entre 40 y 90 minutos.

A lo largo del horno túnel se distinguen tres zonas principales (Figura 1.6):

- (1).- Zona de precalentamiento,
- (2).- Zona de cocción,
- (3).- Zona de enfriamiento.

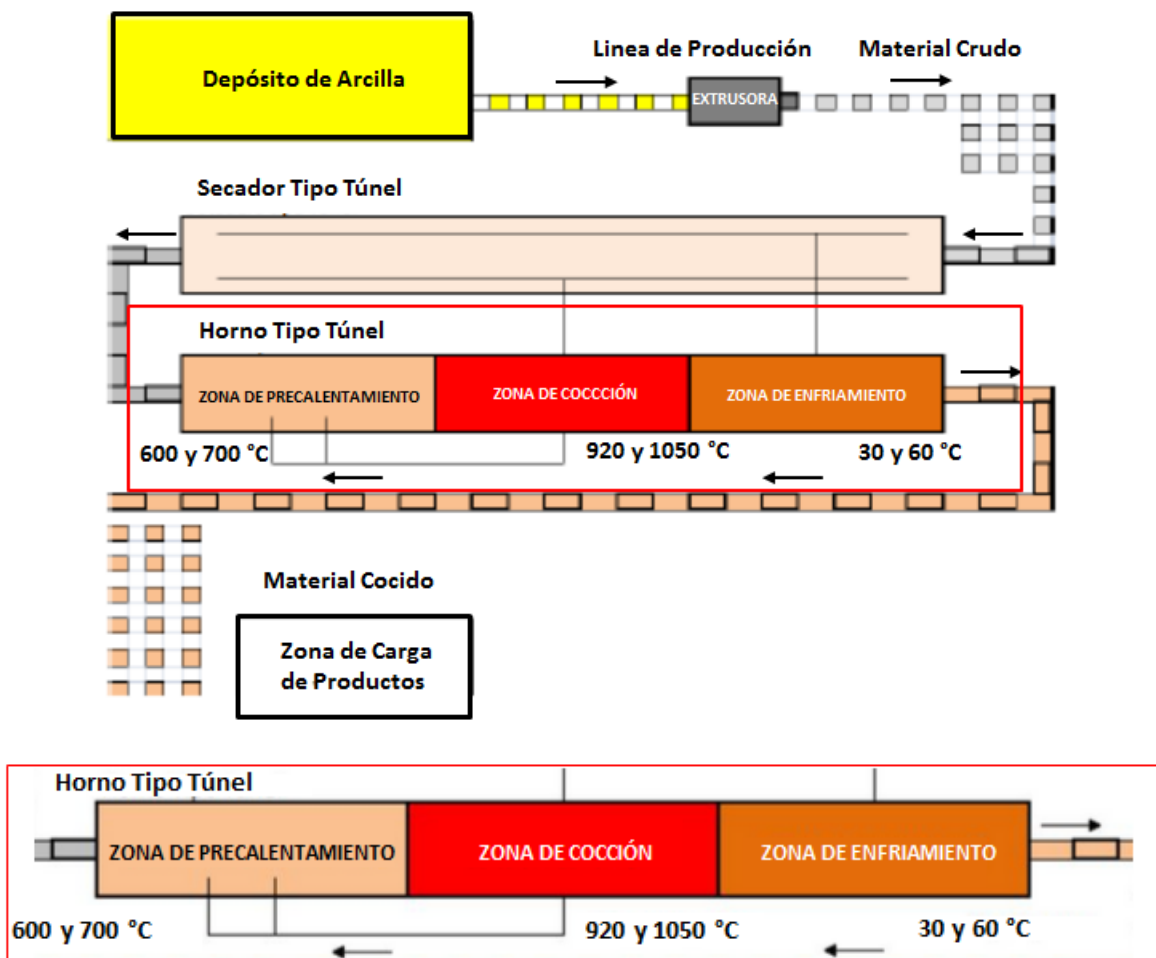


Figura 1.6. Principales zonas del horno tipo túnel [1.6].

En la zona de precalentamiento se calienta el material por la acción de los gases de salida de la zona de cocción, de tal forma que se crea una corriente de los productos de combustión en sentido opuesto al de la circulación de las vagonetas. En la zona de cocción, se encuentran los mecheros para la combustión del gas y una serie de entradas auxiliares de aire. La temperatura en la zona de cocción se mantiene entre 920 °C y 1050 °.

Una vez atravesada la zona de cocción, se produce un enfriamiento gradual mediante una corriente de aire frío que circula en contracorriente y que se introduce en el horno por medio de ventiladores. Las paredes en la zona de enfriamiento presentan unos intersticios por los que circula el aire frío.

El aire de los ventiladores se calienta al circular entre el material cocido, y alcanza la zona de cocción recuperando así el calor. Parte del aire caliente y de los gases de la combustión son extraídos del horno en varios puntos, y por medio de unos canales situados entre las paredes del horno son dirigidos hacia un secador de tipo túnel.

1.1.4 HORNO ROTATORIO.

Un horno rotatorio es un cilindro de acero, recubierto en su interior por ladrillos refractarios, que se encuentra ligeramente inclinado respecto a la horizontal (menos de 10 grados) y que gira lentamente, a velocidades inferiores a 5 r.p.m. (Figura 1.7). El cilindro cuenta con llantas de acero que se apoyan sobre rodillos. Los rodillos soportan el peso del horno y su carga. Absorben dicho peso según dos componentes, la de mayor importancia perpendicular al eje del horno y la otra, de mucho menor valor, paralela al eje del horno.



Figura 1.7. Horno rotatorio [1.7].

La cantidad de llantas y los consiguientes apoyos depende de la longitud del horno. En general, se puede señalar que las llantas se encuentran distanciadas entre sí cada 25 o 30 metros, ya que los hornos de mayor tamaño llegan a tener un diámetro de 5.65 m y una longitud de 180 m y cuya capacidad de producción alcanza a 2000 Ton/día de clinker⁶ de cemento. El movimiento rotativo del horno es impulsado por un piñón acoplado a una corona (rígidamente vinculada al cilindro de acero). Generalmente el motor que produce la rotación es eléctrico, del tipo asíncrono o de corriente continua y, a través de un reductor de velocidad, moviliza al piñón. El calentamiento del horno se efectúa con gases calientes que se producen por combustión, en un quemador de gas u otros combustibles. Habitualmente el quemador se ubica en el extremo más bajo. En la punta opuesta del horno se ubica la chimenea por donde se evacuan los gases del mismo.

Esto significa que el extremo inferior del horno, donde se ubica el quemador, es la zona más caliente. Los gases producidos van recorriendo el horno y entregando su calor, saliendo por el extremo opuesto (Figura 1.8).

En el interior del horno la temperatura de los gases evoluciona de 2000 – 2350 °C (Llama) a 1050 °C, mientras que el material pasa de 850 – 900 °C a 1420 – 1450 °C.

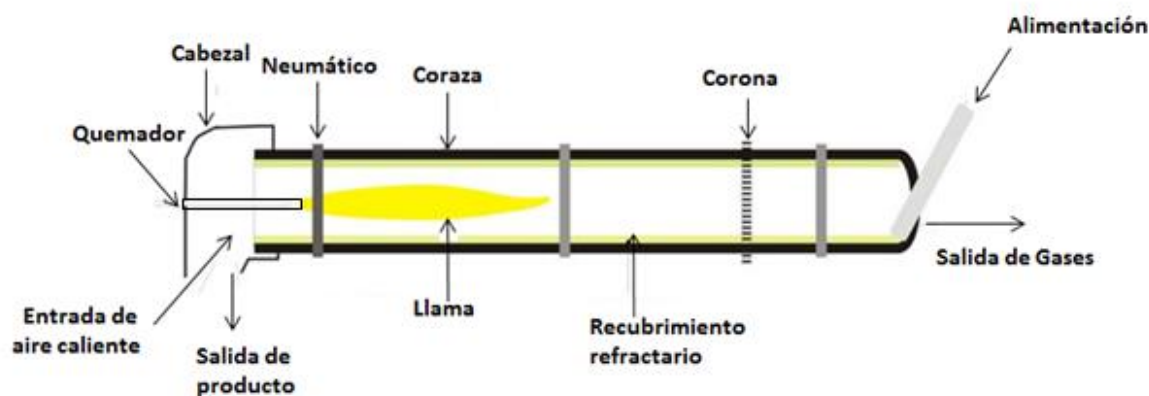


Figura 1.8. Arreglo general de un horno rotatorio [1.8].

El material a procesar es alimentado por el extremo superior del horno (lado de la chimenea), mediante dispositivos apropiados tales como bandas transportadoras, rampas, etc. A consecuencia de la inclinación y rotación del horno, el material se desplaza a lo largo del mismo hasta el extremo inferior (lado del quemador), donde sale a través de la boca de descarga. El material circula a contracorriente con respecto al calor.

⁶ Caliza cocida, principal materia prima de la que se obtiene el cemento.

1.1.5 HORNO DE RESISTENCIAS.

Se definen como hornos de resistencia aquellos que utilizan el calor disipado por efecto Joule⁷ en una resistencia óhmica, que puede estar constituida por la carga misma a ser calentada (hornos de calentamiento directo) o por resistencias adecuadas independientes de la carga (hornos de calentamiento indirecto), por las cuales circula corriente eléctrica.

En los hornos de calentamiento directo, el material se coloca entre dos electrodos (en contacto directo con ellos), ofreciendo una resistencia al paso de la corriente, y calentándose. Estos hornos encuentran aplicación generalmente en el tratamiento térmico de metales.

En la Figura 1.9 se muestran dos tipos de equipos de calentamiento por resistencia directa. La pieza se somete a una corriente eléctrica de baja tensión, tomada del secundario de un transformador provisto de varias tomas para adaptarse a diferentes secciones y/o distintos materiales o aleaciones.

El de la izquierda (a) es de funcionamiento intermitente, aplicándose sobre las piezas unas mordazas de contacto para paso de la corriente eléctrica a la pieza. El de la derecha (b) es de funcionamiento continuo para calentamiento de varillas, alambres, etc., aplicándose sobre la pieza unas roldanas, que conducen la corriente eléctrica a la pieza.

El calentamiento por resistencia directa es adecuado para piezas metálicas de gran longitud y sección pequeña y uniforme, tales como barras, palanquillas, varillas y alambres. Como se obtienen tiempos de calentamiento muy cortos, pueden acoplarse los equipos a la laminación, forja o conformado en caliente.

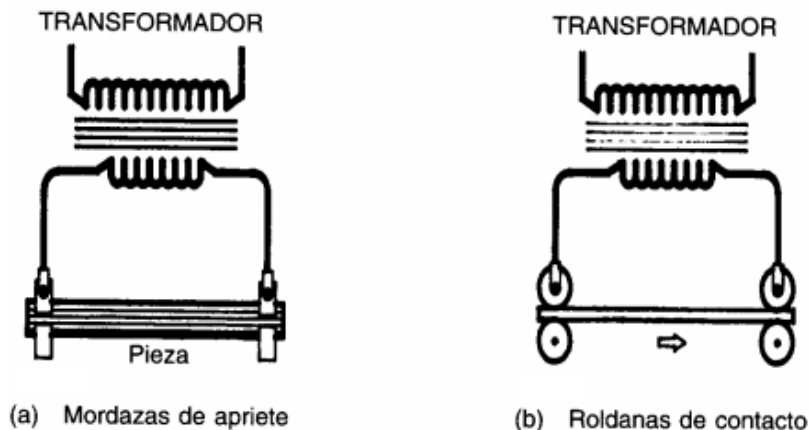


Figura 1.9. Equipos de calentamiento intermitente y continuo [1.9].

⁷ Pérdidas de potencia que producen calor en un conductor eléctrico de resistencia R al paso de una corriente eléctrica de intensidad I.

En los hornos de calentamiento indirecto, el material es calentado por radiación, por convección y/o por conducción mediante resistencias colocadas de forma adecuada. La carga a calentar y las resistencias se encuentran contenidas en una cámara aislada térmicamente por medio de materiales refractarios y aislantes.

En la Figura 1.10 se muestra una disposición típica de resistencias de alambre o pletina en las paredes laterales de un horno de carro para tratamientos térmicos hasta una temperatura máxima de 1100 °C. Las resistencias van dispuestas en las paredes laterales y están construidas con varillas gruesas debidamente plegadas y colgadas de ganchos.

Dimensiones interiores 3.200 × 1.000 × 1.000 mm.
Potencia 200 kW. Temp. 1.100 °C. Tensión 380 V.

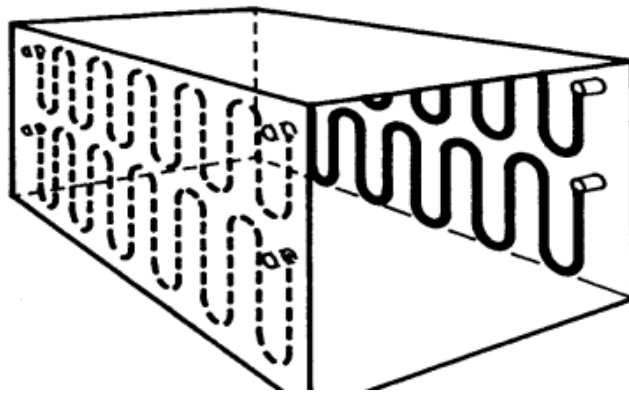


Figura 1.10. Disposición típica de resistencias de calentamiento indirecto [1.10].

1.1.6 HORNO DE ARCO.

La finalidad del horno de arco es producir acero, usando energía eléctrica que convierte en energía calorífica para la fundición (Figura 1.11), a través de intensas descargas eléctricas en forma de arcos voltaicos (comúnmente conocidos como arcos eléctricos). Por medio del arco voltaico, es posible conseguir una temperatura extraordinariamente elevada (mas de 3,000 °C), haciendo pasar una corriente eléctrica a través de la chatarra metálica o arrabio (que es la materia prima con que se fabrica el acero) que se comporta como una resistencia situada entre dos a más electrodos. El arco eléctrico se genera cuando la rigidez dieléctrica⁸ del medio aislante (aire) que separa a un electrodo de la chatarra se anula (electrodos y chatarra prácticamente en contacto), entonces el circuito trifásico de potencia se cierra, y la corriente fluye.

⁸ Valor límite de la intensidad del campo eléctrico en el cual un material pierde su propiedad aislante y pasa a ser conductor. Se mide en voltios por metro V/m.

Cuando los electrodos suben o no están en contacto con la carga metálica, el circuito de potencia se abre, y la corriente deja de fluir. Durante el tiempo de la descarga se produce una luminosidad muy intensa y un gran desprendimiento de calor.

El horno de arco eléctrico es utilizado para la fabricación de todo tipo de aceros, desde aceros con bajo contenido en carbono hasta aceros de alta aleación a partir de chatarra o materiales ferrosos con bajo o alto contenido de carbono. El tipo más conocido de esta clase de hornos, es el horno de Heroult, que consiste esencialmente de un crisol, tres electrodos y un transformador de potencia, diseñado especialmente para soportar la generación de los arcos eléctricos entre cada fase, a este transformador usualmente se le conoce como transformador del horno.

Los hornos de arco se han empleado en la fusión de metales ferrosos bajo las siguientes formas:

a) Hornos de acción indirecta, en los que el arco salta entre dos electrodos situados encima del baño y sin atravesar el metal (horno de arco libre), usados para fundición especiales de hierro y bronce.

b) Hornos de acción directa, en los que el arco salta de uno a otro electrodo pasando a través del baño, usados en la fundición de hierro y acero.



Figura 1.11. Horno de arco eléctrico [1.11].

1.1.7 HORNO DE INDUCCION.

Las bases para el calentamiento de metal por inducción fueron descubiertas en 1831 por el físico inglés Michael Faraday [1.12]. Mientras experimentaba en su laboratorio con dos bobinas de alambre enrolladas alrededor de un núcleo de hierro, él descubrió que si conectaba la primera bobina a una batería, una corriente momentánea podía ser medida en una dirección en un galvanómetro conectado en serie en la segunda bobina. Si la primera bobina permanecía conectada a la batería, la corriente desaparecía en la segunda bobina. Cuando se desconectaba la bobina de la batería, una corriente era detectada de nuevo en la segunda bobina, pero en dirección opuesta a la medida cuando se dejaba conectada a la batería. Faraday concluyó de ese experimento que una corriente eléctrica podía ser producida por un cambio en el campo magnético. En esa ocasión no había conexión física entre las bobinas, la corriente en la segunda bobina se dijo que era producida por un voltaje que era “inducido” de la primera bobina a la segunda bobina. La ley de Faraday de inducción declara que “la fuerza electromotriz (fem) inducida en un circuito es directamente proporcional a la rapidez de cambio en el tiempo del flujo magnético a través del circuito”.

El físico alemán German Heinrich Lenz después formuló en lo que ahora se conoce como la ley de Lenz que “La polaridad de la fem inducida es tal que ésta tiende a producir una corriente que producirá un flujo magnético que se opone al cambio del flujo magnético a través de un bucle”.

En las siguientes décadas este efecto fue usado en el diseño de transformadores con el propósito de cambiar el voltaje de un circuito a otro para la transmisión eficiente de la electricidad y operación de maquinaria eléctrica. Como producto de estos procesos de transformación se generaba calor en el núcleo del transformador. Estos núcleos fueron hechos de láminas apiladas de acero en un intento de reducir el calor que se generaba en el núcleo. En la última parte del siglo diecinueve se intentaba exactamente lo opuesto de manera de utilizar ese efecto de calentamiento para propósito de fundir metal.

Edwin Northrup, a principios de 1900, desarrolló el primer horno de inducción de alta frecuencia puesto en marcha en los laboratorios de Princeton. El desarrollo de este tipo de sistemas para calentamiento y fundición de metales era limitado, debido a que la potencia alcanzada era baja. En 1922 él desarrolló los sistemas motor-generador⁹, los cuales podían suministrar niveles de potencia de varios cientos de kilowatts a frecuencias por arriba de 960 Hz [1.13].

⁹ Conjunto de dos máquinas rotativas para generar una corriente de media frecuencia.

Después de la aceptación general de la inducción para fundir metal, la atención de científicos e ingenieros se volcó en otra dirección. Desde que la profundidad de penetración de la corriente en un metal dado, varía con la resistividad eléctrica, permeabilidad magnética, y frecuencia, fue posible calentar áreas específicas en una pieza de metal sin calentar otras. Este conocimiento fue usado con éxito por la compañía Midvale Steel (1927) y Ohio Crankshaft Company(1930) como proceso para endurecer la superficie del acero [1.14].

La segunda guerra mundial produjo gran interés en usar el calentamiento por inducción como tecnología, particularmente en tratamientos térmicos de componentes de artillería tales como proyectiles perforadores de blindaje y disparo. La habilidad de usar la inducción para endurecer superficies, fue también utilizada para salvar cerca de un millón de proyectiles los cuales habían sido calentados de manera indebida. Además, se encontró que los componentes de las orugas de los tanques, cadenas y piñones podían ser endurecidos en grandes cantidades de manera eficiente por inducción de alta frecuencia. En un área diferente, el calentamiento por inducción fue aplicado para precalentar lingotes de acero previos a la forja en caliente para partes como cañones de armas.

A finales de los años 60 el desarrollo de los semiconductores reemplazó a los motor-generadores por fuentes de poder de estado sólido más eficientes. En las siguientes décadas, la eficiencia de estas unidades tuvo un incremento de 95%, este cambio fue un factor importante para que los procesos de calentamiento por inducción tuvieran menor costo.

En México, existen empresas como “Hornos y Equipos de Fundición S.A. de C.V.” e “Ingeniería Técnica en Inducción”, las cuales cuentan con más de 30 años de experiencia en hornos de inducción. La primera compañía comenzó desde 1980 cuando iniciaba la tecnología de estado sólido a base de semiconductores controlados de silicio de muy baja capacidad, pasando por los componentes electrónicos de rangos más elevados que existen en la actualidad. Dicha compañía maneja hornos de inducción que cubren los requerimientos de fusión de metales en general como: aceros, aceros especiales, hierro, cobre, bronce, aluminio y metales preciosos. La segunda compañía se dedica al ramo del tratamiento térmico por inducción, la cual cuenta con una basta experiencia en procesos de todo tipo que conlleven inducción.

Básicamente, los hornos de inducción son hornos eléctricos en donde el calor es generado por la inducción eléctrica de un conductor que se encuentra en un crisol, rodeado por una bobina de cobre que esta maquinada de forma helicoidal (Figura 1.12).

El concepto de horno de inducción para la fusión y calentamiento de metales incluye los dos siguientes tipos:

-Equipos sin núcleo magnético, se aplican fundamentalmente a la fusión y tratamiento térmico de metales.

-Equipos con núcleo magnético, se aplican a la fusión y mantenimiento de metales líquidos.



Figura 1.12. Horno de inducción [1.15].

1.1.7.1 HORNOS DE INDUCCIÓN SIN NÚCLEO.

El horno consta en de un crisol en el que se coloca una carga metálica y es rodeado de una bobina de cobre tubular refrigerada, por la cual circula una corriente (Figura 1.13). El campo electromagnético generado induce corrientes y se calienta la carga, en este tipo de calentamiento no es necesario el contacto directo



Figura 1.13. Horno de inducción sin núcleo [1.16]

Estos hornos son de media y alta frecuencia¹⁰ y el equipo eléctrico que requieren son un banco de condensadores para regular la corriente y un transformador para reducir el voltaje.

Este tipo de equipos son utilizados para la fundición de metales (hierro y acero, cobre, aluminio y oro), tratamientos térmicos y soldadura. Los parámetros más importantes en estos equipos son los siguientes:

- El material a ser fundido (Determinado por el usuario).
- El tamaño del horno (Determinado por el tamaño de la pieza a producir).
- La potencia (Determinado por la producción por hora requerida).
- La frecuencia (Depende de las propiedades del material y su tamaño).

Estos hornos tienen una capacidad variable desde pocos kilogramos (2 kg) hasta 10 000 kg con frecuencias entre 200 Hz a 10 000 Hz y potencias desde 3 KW a 3000 KW.

1.1.7.2 HORNOS DE INDUCCIÓN CON NÚCLEO.

Los componentes de estos hornos son similares a los que tienen un horno de inducción sin núcleo, excepto que en lugar de poseer un sistema de refrigeración se utilizan núcleos constituidos de acero al silicio. La acción del campo electromagnético en la parte externa de la bobina puede provocar el sobrecalentamiento de ésta, por lo que, la bobina atraviesa los núcleos los cuales actúan como blindaje, y de esta forma se evita la dispersión del campo electromagnético externo (Figura 1.14).

Funcionan siempre a la frecuencia de red (50-60 Hz) y su comportamiento es idéntico al de un transformador eléctrico.

Estos equipos están constituidos básicamente por:

- Un inductor (primario) con un núcleo magnético cerrado y un baño de metal fundido (secundario) que llena un canal de material refractario.
- El cuerpo del horno situado encima o a un lado del inductor cuya capacidad es mayor que la del canal (Figura 1.15).

Estos hornos se utilizan preferentemente para mantenimiento de la temperatura de un baño de metal líquido. Tienen una capacidad de 6 a 60 tons. con potencias de 1000 a 17000 KW.

¹⁰ Frecuencia de la corriente eléctrica.

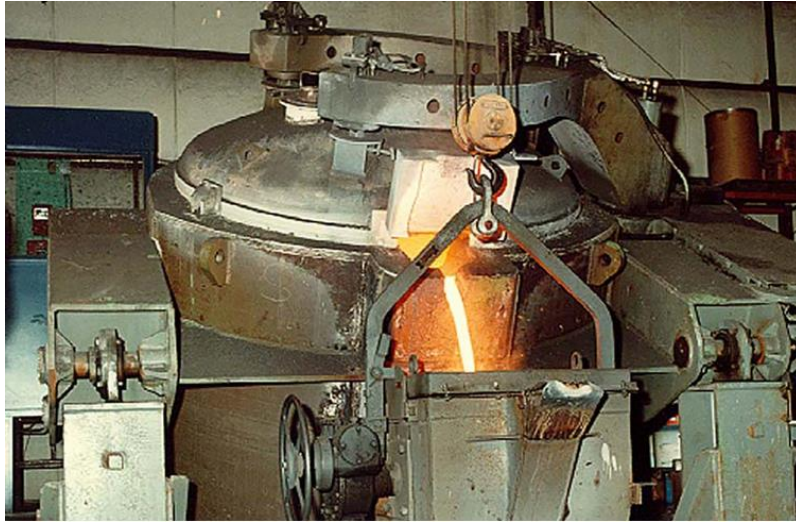


Figura 1.14. Horno de inducción con núcleo [1.17].

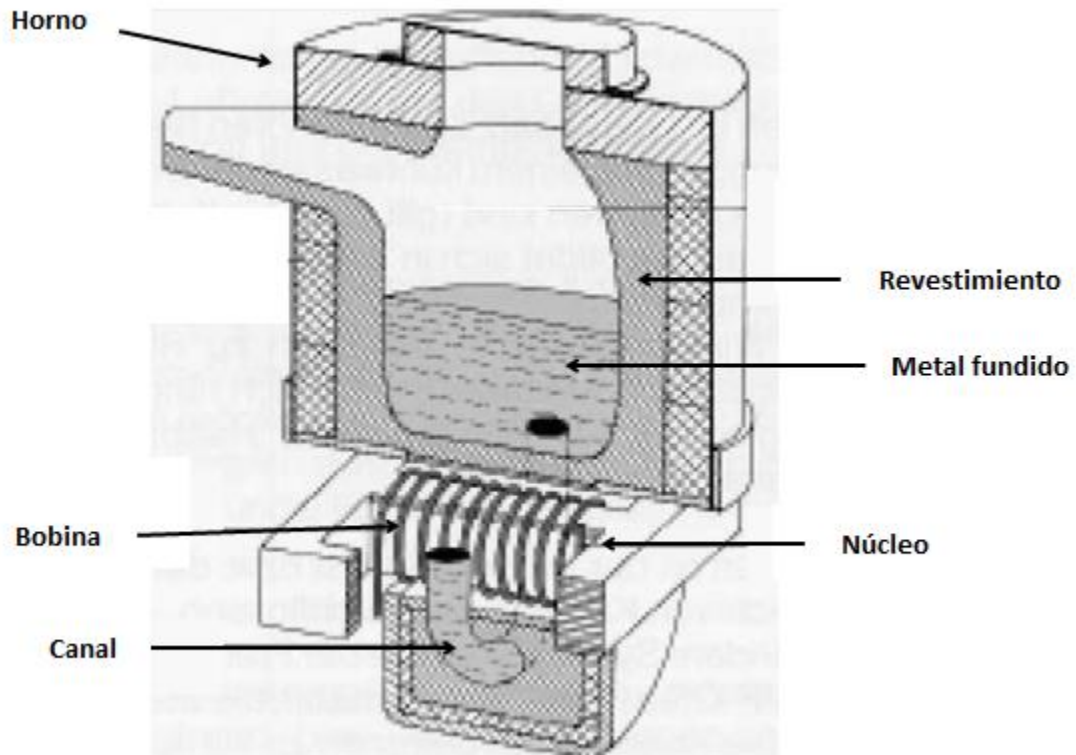


Figura 1.15. Principales componentes del Horno de inducción con núcleo [1.18].

1.2 CAMPOS DE APLICACION.

Las aplicaciones del calentamiento por inducción se pueden clasificar en cuatro campos principales:

1.- Fusión y mantenimiento a temperatura de colada de metales (hierro, aluminio y cobre, principalmente y sus aleaciones). Sus capacidades varían de unos pocos kilogramos hasta 1500 toneladas. Los hornos de fusión por inducción para el hierro ofrecen una eficiencia energética de 70 a 80%.

2.- Calentamiento de los mismos metales y aleaciones para procesos de forja, estampación, extrusión y conformado. Han desplazado a los hornos tradicionales de llamas en las instalaciones de producción en grandes series.

3.- Tratamientos térmicos, sobre todo temple y revenido de aceros en la industria del automóvil. Permite el encaje de los equipos dentro de las líneas de producción en instalaciones totalmente automatizadas.

4.- Aplicaciones varias tales como:

-Soldadura de alta o baja temperatura de forma continua o intermitente.

-Calentamiento de cubas de galvanizado para líneas continuas de banda de acero (hornos de canal) o instalaciones intermitentes (calentamiento de la cuba de hierro).

-Cocinas de inducción sustituyendo con ventaja a las resistencias eléctricas. La eficiencia energética de una cocina de inducción es del 84% frente al 74% de eficiencia de una cocina vitrocerámica de resistencias eléctricas.

1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA UTILIZACIÓN DEL MICRO HORNO DE INDUCCIÓN ROYER.

Por medio del Centro de Ingeniería de Superficies y Acabados (CENISA) y del departamento de Termofluidos se está realizando una línea de investigación novedosa en el uso de la energía solar concentrada (ESC) para aplicaciones de manufactura.

El presente trabajo de tesis es una porción de proyecto el cual debe contemplar un calentamiento de forma híbrida, realizándose mediante un horno y el aprovechamiento de la energía solar concentrada (ESC).

Por lo anterior se hizo la selección de un micro horno de inducción Royer, que es compatible con un concentrador solar con lente de fresnel, y que para efectos experimentales, se requirió acoplar al micro horno un sistema instrumentado que fue propuesto.

Es importante aclarar que para esta etapa del proyecto, solo se realizó la selección y el acoplamiento del micro horno de inducción Royer para la realización de pruebas experimentales, y que partiendo de este desarrollo se pueda continuar a futuro con el acoplamiento del micro horno, pero esta vez con un concentrador solar con lente de fresnel.

1.4 OBJETIVOS DE TRABAJO.

El objetivo principal de este trabajo es seleccionar un micro horno de inducción, acoplarlo a un sistema instrumentado propuesto y poner a punto el sistema para realizar pruebas experimentales con probetas metálicas.

Los objetivos particulares son:

1. Realizar la selección adecuada del micro horno de inducción.
2. Realizar el cálculo de la bobina de inducción.
3. Diseñar y acoplar la instrumentación al micro horno de inducción.
4. Realizar pruebas experimentales.

1.5 CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN.

El calentamiento por inducción es un método de calentamiento sin contacto ni llama, que puede poner al rojo vivo, en segundos, una sección determinada de una barra metálica con gran precisión. El calentamiento inductivo es utilizado en la industria para múltiples aplicaciones como tratamientos térmicos, principalmente temple, revenido y normalizado por inducción, soldadura, forja y fundición.

Los hornos de inducción modernos tienen características tecnológicas y ergonómicas que hacen que los lugares de trabajo sean seguros, además de que aumentan la productividad y logran un proceso más eficiente. Básicamente, los hornos de inducción son equipos eléctricos que utilizan una corriente inducida para calentar la carga (metal). Es decir consisten en una unidad de potencia que suministra una corriente de frecuencia alterna a una bobina, la cual tiene contiene una sección de cobre y alta conductividad; la corriente que pasa por la bobina forma un campo electromagnético. La fuerza y magnitud de este campo varía en función de la potencia y corriente que pasa a través de la bobina y su

número de espiras. La energía calorífica se logra por efecto de la corriente alterna y el campo electromagnético que generan corrientes secundarias en la carga, cuando el metal es cargado en el horno, el campo eléctrico penetra la carga y le induce una corriente que lo calienta.

1.6 VENTAJAS DEL CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN.

Algunas de las principales ventajas calentamiento por inducción se presentan a continuación:

- 1.- Como cualquier proceso de calentamiento eléctrico es un proceso limpio, no requiere combustión de gases y no ocasiona problemas de contaminación.
- 2.- El calor es producido directamente en la pieza de trabajo.
- 3.- El calentamiento por inducción es aplicable solo a materiales conductores, metales y aleaciones. Puede ser ocupado para calentar metales ferromagnéticos y paramagnéticos, los cuales presentan un comportamiento diferente.
- 4.- El proceso usa densidades de potencia altas (0.01 a $2\text{kW}/\text{cm}^2$), por lo que el calentamiento es muy rápido (pocos segundos). Esto hace que el proceso sea adecuado para producciones elevadas.
- 5.- Hay un control excelente en el suministro de potencia y el tiempo, por lo que la temperatura de calentamiento y la profundidad pueden ser controladas con precisión. El calentamiento rápido y el buen control hacen que el proceso sea adecuado para automatizarlo mediante el uso de los accesorios adecuados.
- 6.- Como el calentamiento se produce en la superficie de la pieza, es ideal en procesos donde se endurece el acero. En el caso de la profundidad puede ser controlada por la potencia y el tiempo; seleccionando la frecuencia adecuada.
- 7.- El calentamiento efectuado es ubicado en la superficie opuesta a la bobina. Esto hace posible que el calentamiento se restrinja solo en la ubicación deseada. Este efecto hace que el proceso sea adecuado para soldar.
- 8.- No hay una temperatura límite. Con el diseño correcto y la potencia adecuada, cualquier temperatura puede ser alcanzada.

1.7 BASES PARA EL CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN.

El principio del calentamiento por inducción se basa principalmente en dos fenómenos físicos:

1. Inducción Electromagnética
2. Efecto Joule.

1.7.1 INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA.

La transferencia de energía al objeto a calentar se produce por medio del fenómeno llamado inducción electromagnética. Se sabe que una corriente alterna es inducida en un lazo de material conductor cuando este lazo se coloca en un campo magnético alterno [1.18]. La ecuación es la siguiente:

$$U = \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.1)$$

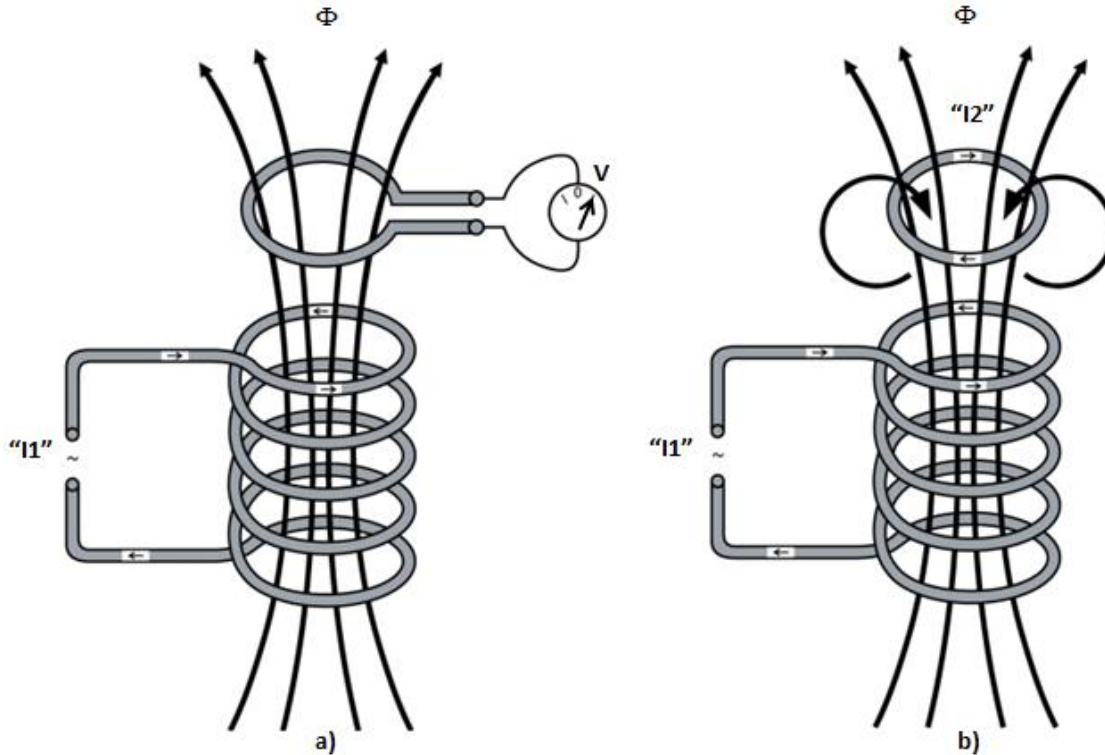
Donde:

U = Voltaje [V].

Φ = Flujo Magnético [Wb].

t = Tiempo [s].

Cuando el lazo está cerrado, la tensión inducida U hará que fluya una corriente que se oponga al campo magnético alterno. Esta es la ley de Faraday-Lenz (Figura 1.16).



Figuras 1.16a. y 1.16b. Tensión inducida en el material conductor (izquierda) y Ley de Faraday-Lenz (derecha) [1.19].

1.7.2 LEY DE LENZ.

La ley de Lenz establece lo siguiente: “El sentido de una corriente inducida debe ser tal, que se oponga a la causa que la produce” [1.20]. La variación mencionada en este principio es la variación de flujo magnético Φ .

1.7.3 EFECTO JOULE.

Los electrones que se desplazan por efecto de un campo eléctrico ganan energía cinética que es transmitida a los átomos de un material al chocar con ellos. Estas colisiones da por resultado un incremento de la temperatura del material. La ley de Joule establece que: “El calor generado en un conductor por el paso de la corriente eléctrica es proporcional al producto de la resistencia del conductor por el cuadrado de la intensidad de corriente” [1.21] la ecuación es la siguiente:

$$P = R * I^2 \quad (1.2)$$

Donde:

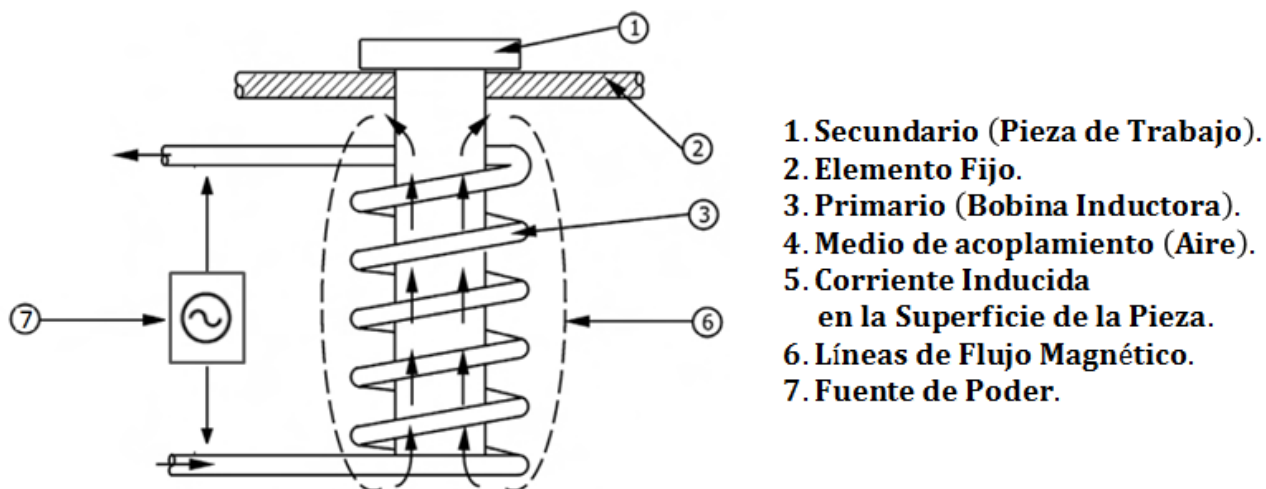
P = Potencia eléctrica [W].

I = Intensidad de corriente [A].

R = Resistencia eléctrica [Ω].

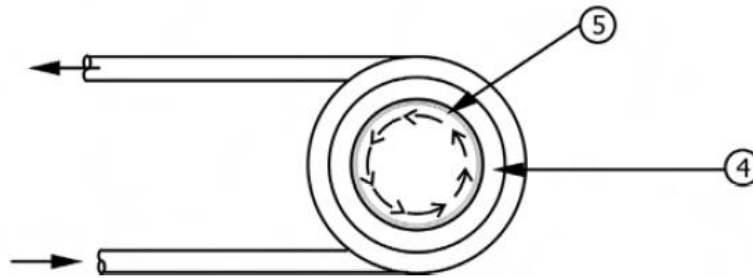
1.7.4 MODELO DEL CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN.

El modelo del calentamiento por inducción se fundamenta en el principio de funcionamiento de un transformador eléctrico. La pieza de trabajo es el secundario mientras que la envuelve una bobina de cobre que es el primario (Figura 1.17a). En este caso el medio de acoplamiento es el aire, así este es un transformador con un núcleo de aire con una vuelta en el secundario. Una fuente de poder genera una corriente alterna que atraviesa el primario (bobina de cobre). La corriente alterna del primario crea un campo magnético que envuelve la pieza de trabajo y que inducen en ella corrientes de Foucault¹¹ (Figura 1.17b), el calor se genera en la pieza debido a las pérdidas por I^2R correspondientes a la resistividad del material. Una parte del calor es absorbida en forma de radiación desde la pieza de trabajo hacia la bobina, razón por la cual la bobina está hecha de tubo de cobre para que circule agua de enfriamiento.



Figuras 1.17a. Modelo del calentamiento por inducción [1.22].

¹¹ Corrientes parásitas que se presentan en los núcleos o partes metálicas de algunas máquinas eléctricas (transformadores, motores o generadores).



Figuras 1.17b. Corriente inducida en la superficie de la pieza de trabajo [1.22].

1.8 DISTRIBUCION DE LAS CORRIENTES PARASITAS EN UNA BARRA SOLIDA.

Para poder visualizar el comportamiento de las corrientes parásitas inducidas, se imagina una barra sólida que está constituida por un número de capas concéntricas (Figura 1.18). El campo magnético inducido es más fuerte en el espacio ocupado entre el diámetro interno de la bobina y el diámetro externo de la capa exterior de la barra.

Un cierto flujo de campo magnético pasa a través de la capa externa de la barra, induciendo corrientes parásitas. El planteamiento a responder es, si la intensidad de campo magnético es mayor o menor en la capa externa, en comparación con el campo externo. Esto depende si la corriente inducida en la capa externa tiende a reforzar o no el campo. Si la corriente tiende a aumentar el campo magnético, se induciría un voltaje elevado en la capa externa, causando una corriente elevada. Esto podría resultar en un campo aún más fuerte, y un voltaje más elevado, situación que no puede suceder. Así la intensidad de campo magnético se reduce dentro de la capa externa, por lo cual la corriente inducida en la segunda capa que le sigue es menor que en la capa externa, y la corriente en la tercera capa es menor que en la segunda, y así sucesivamente. En general la magnitud de las corrientes inducidas disminuye independientemente si la barra es de un material ferromagnético o paramagnético.

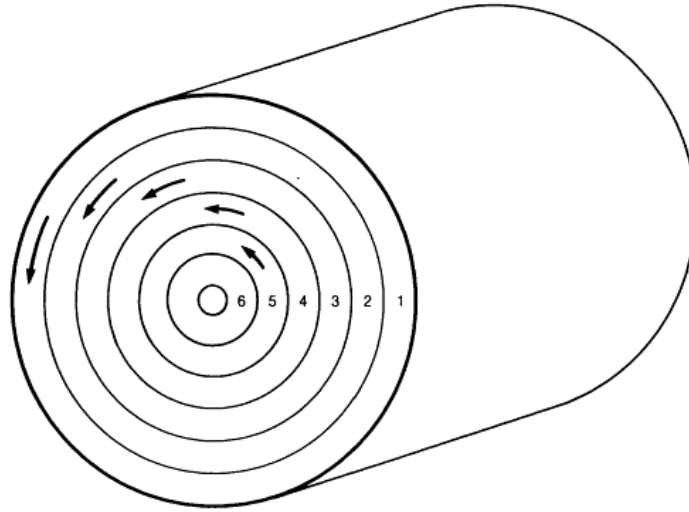


Figura 1.18. Variación de las corrientes parásitas en una barra sólida dentro de una bobina con corriente alterna [1.23].

1.9 EFECTO SKIN.

Cuando la corriente directa fluye a través de un conductor, la distribución de la corriente dentro de la sección transversal es uniforme, sin embargo cuando la corriente alterna fluye a través del mismo conductor, la distribución de la corriente no es uniforme. El valor máximo de la densidad de corriente siempre estará localizado en la superficie del conductor, la densidad de corriente disminuirá de la superficie del conductor hacia el centro. Este fenómeno de la distribución de la corriente no uniforme dentro de la sección transversal del conductor es llamado efecto skin, el cual siempre ocurre en presencia de corriente alterna. Así el efecto skin se puede presentar en una pieza de trabajo que se encuentre dentro de una bobina de inducción. Este es uno de los factores más importantes que causan la concentración de las corrientes parásitas en la superficie de la pieza. El grado del efecto skin depende de la frecuencia y las propiedades del material (Resistividad eléctrica ρ y permeabilidad relativa del material μ_r) conductor. La distribución de la densidad de corriente en la superficie de la pieza puede ser calculada de forma aproximada por la siguiente ecuación:

$$I_x = I_0 * e^{\frac{-x}{\delta}} \quad (1.3)$$

Donde:

I_x = Densidad de corriente a una profundidad x de la superficie [A/m^2].

I_0 = Densidad de corriente en la superficie ($x=0$) [A/m^2].

δ = Profundidad de penetración [cm].

ρ = Resistividad del material [Ohm*cm].

μ_γ = Permeabilidad relativa del material.

f = Frecuencia [Hz].

La profundidad de penetración es descrita en centímetros como:

$$\delta = 5000 * \sqrt{\frac{\rho}{\mu_\gamma * f}} \quad (1.4)$$

La profundidad de penetración δ definida en la ecuación 1.4 es la distancia desde la superficie del conductor hacia el núcleo a la cual la corriente disminuye exponencialmente como e^{-1} .

Así para una distancia $x = \delta$ la corriente es:

$$I_\delta = I_0 * e^{\frac{-\delta}{\delta}} = I_0 * e^{-1} = \frac{I_0}{e} \quad (1.5)$$

$$I_\delta = .368I_0 \quad (1.6)$$

Se puede observar de las ecuaciones anteriores (1.5 y 1.6) cuando $x = \delta$, la densidad de corriente será igual al 37% del valor que hay en la superficie, de lo cual se concluye que el 63% de la corriente se concentrará dentro de la pieza de trabajo en una capa superficial de espesor igual a δ .

1.10 REFERENCIAS DE LAS FIGURAS.

[1.1] Uniovi. (2006). Lección 10.-Hornos Industriales. Abril 15, 2016, de Uniovi Sitio Web:

<http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion1.HornosIndustriales.2006.pdf>

[1.2] AHMSA. (2011). Inicia AHMSA Pruebas en Caliente del Alto Horno 6. Abril 15, 2016, de Youtube Sitio Web:

<https://www.youtube.com/watch?v=Qq-loTDQtnA>

[1.3] Educativa. (2015). 1.1. Alto horno. Abril 15, 2016, de Educativa Sitio Web:

http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/1000/1092/html/1_1_alto_horno.html

[1.4] Castillo Neira. (2015). Combustión Industrial de Gas Natural. Hornos de balsa. p.322.

[1.5] Metalcertima. (2012). SISTEMAS DE COCCIÓN. Abril 15, 2016, de Metalcertima Sitio Web:

http://www.metalcertima.pt/es/productos.5/coccion.91/hornos.92/horno_tunel.105/horno_tunel.a84.html

[1.6] Orozco C. Luis. (2013). PROYECTO SUGAMUXI REPUBLICA DE COLOMBIA ASOCIACION INDUSTRIAL Y TECNOLOGICA DE ARCILLAS DEL SUGAMUXI ONG SOGAMOSO, BOYACA 2013.

[1.7] CITICIC LUOYANG ZHONGKUANG INDUSTRIAL CO.LTD. (2016). Products. Febrero 10, 2017, de CITICIC Sitio Web:

<http://citicmhc.com/news/82.html>

[1.8] Megatech Internacional. (2016). VSK Plantas de Cemento Portland. Febrero 10, 2017, de Megatech Internacional Sitio Web:

<http://www.cement-plant.com/spanish/vsk-plantas-de-cemento-portland.html>

[1.9] [1.10] Uniovi. (2006). Lección 2.-Hornos de resistencias. Abril 15, 2016, de Uniovi Sitio Web:

<http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion2.Hornos.RESISTENCIAS.2006.pdf>

[1.11] Direct Industry. (2018). Productos. Marzo 20, 2018, de Direct Industry Sitio Web:

<http://www.directindustry.es/prod/sarralle/product-16176-1731744.html>

[1.12] Resnick, Halliday Robert David. (2002). FISICA (VOL.2) (5ª ED). p.211.

[1.13] Astigarraga Urquiza Julio. (1994). "Hornos Industriales de Inducción: Teoría, Cálculo y Aplicaciones". McGraw-Hill, España 1994.

[1.14] Salgado Baltazar Moisés. Tesis. "Calentamiento de metales por medio de inducción electromagnética y concentración solar". (2014).Facultad de ingeniería UNAM.

[1.15], [1.16] FARADAY INDUCCION. (2014). Productos. Marzo 20, 2018, de HORNOS DE INDUCCIÓN Sitio Web:

<http://hornosdeinduccion.com.mx/>

[1.17] HAN. (2018). Horno Industrial. Marzo 20, 2018, de HAN Sitio Web:

<http://www.han-rollingmachine.com/rolling-mill/medium-frequency-coreless-induction-melting.html>

[1.18] Hornos Industriales. (2017). Apuntes-Industrias I. Febrero 10, 2017, de Universidad de Buenos Aires Sitio Web:

<http://materias.fi.uba.ar/7202/>

[1.18], [1.19] Callebaut, J. (2014). Application Note. Marzo 20, 2018, de Leonardo Energy Sitio Web:

<http://www.leonardo-energy.org/melting.html>

[1.20] Jaramillo Gabriel, Alvarado Alfonso. (Abril 2016). "ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO". TRILLAS, Reimpresión, México 2016.

[1.21] Guanuchi Suqui Enrique. Tesis. "Niveles de radiación magnética producida por cocinas de inducción comercializadas en el Ecuador". (2016).Universidad del AZUAY.

[1.22] DESHMUKH Yoshvant V. (2005). Industrial Heating. Taylor & Francis Grove, 2005.

[1.23] Stanley Zinn, S. L. Semiatin. (1988). Elements of Induction Heating: Design, Control, and Applications. Electric Power Research Institute, 1988.

1.11 REFERENCIAS DE LAS ECUACIONES.

(1.1) Expresión de la ley de Faraday.

Callebaut, J. (2014). Application Note. Marzo 20, 2018, de Leonardo Energy Sitio Web:

<http://www.leonardo-energy.org/melting.html>

(1.2) Expresión de la ley de Joule.

Resnick, Halliday Robert David. (2002). FISICA (VOL.2) (5ª ED).

(1.3), (1.5), (1.6) Expresión para el cálculo de la densidad de corriente en la superficie de una pieza.

DESHMUKH Yoshvant V. (2005). Industrial Heating. Taylor & Francis Grove, 2005.

(1.4) Expresión para el cálculo de la profundidad de penetración.

DESHMUKH Yoshvant V. (2005). Industrial Heating. Taylor & Francis Grove, 2005.

CAPÍTULO 2

SELECCIÓN, DESCRIPCIÓN Y CÁLCULO DE DIMENSIONAMIENTO DEL MICRO HORNO DE INDUCCIÓN.

INTRODUCCIÓN

En esta sección se describirá el procedimiento realizado para la selección y cálculo de dimensionamiento del micro horno de inducción. Se puede dividir en tres partes:

Selección del Equipo: Primeramente se explica el fin para el cual será empleado el micro horno de inducción, así como los requerimientos por parte del cliente para seleccionar este equipo. Después se enlistan los equipos que fueron sujetos a una evaluación por medio de una matriz de decisión, y finalmente se mencionan las razones por las cuales se seleccionó el micro horno de inducción ganador.

Descripción del Equipo: Aquí se describe a detalle el micro horno de inducción que se seleccionó, sus características principales, su forma de acoplarlo a la pieza de trabajo y su ficha técnica. También se describe la interfaz para operar el equipo, sus controles y los componentes electrónicos más importantes.

Cálculo de dimensionamiento del equipo: En ésta sección se describe como se desarrollaron los cálculos para determinar las dimensiones de la bobina inductora, obtener el tiempo de calentamiento de la pieza de trabajo y la potencia empleada para el calentamiento.

2.1 SELECCIÓN DEL MICRO HORNO DE INDUCCIÓN.

Antes de empezar con la selección del equipo se definió con el cliente que el micro horno sería empleado para un calentamiento híbrido, donde parte del calor generado sería a partir del aprovechamiento de la ESC por medio de un concentrador solar con lente de fresnel (Figura 2.1), esto quiere decir que desde un principio ya se conocían las características para seleccionar el equipo, así como una configuración propuesta para su instrumentación.



Figura 2.1. Concentrador solar con lente de fresnel [2.1].

De la junta celebrada con el cliente se expusieron los siguientes puntos a considerar para la selección del equipo:

- El equipo debe ser compatible con un concentrador solar de lente de fresnel, de manera que la potencia del micro horno sea de 1 a 2 KW que es el rango de potencias que se puede obtener con el concentrador.
- Debido a que el concentrador solar posee un foco (spot) de 25 mm de diámetro, se requiere que el equipo sea apto para trabajar con probetas de diámetro similar.
- Se debe considerar que el equipo maneje un amplio rango de frecuencias, o bien que opere en un rango apropiado (50-100 kHz) para el diámetro de las probetas mencionado en el punto anterior.

- Se debe contar con un sistema de enfriamiento o de protección que evite que el equipo se dañe por las altas temperaturas que pueda alcanzar al realizar pruebas experimentales.
- El equipo debe ser ligero (no exceder un peso igual a 4kg) para ser de fácil traslado cuando se requiera hacer pruebas con el concentrador solar.
- El costo del equipo debe encontrarse en un rango de precios de 500 a \$1000 USD.

Para comenzar la selección del micro de inducción se enlistaron los cuatro equipos que mejor se pudieron adaptar a los requerimientos del cliente, junto con sus respectivas características. Posteriormente se realizó una matriz de decisión donde se determinó la calificación o el nivel que alcanzó cada equipo evaluado en cada una de los conceptos establecidos.

A continuación se muestra el primer equipo con sus características principales:

El MINI-DUCTOR II es un dispositivo portátil (Figura 2.2) que emplea el calentamiento por inducción a una frecuencia de 50 [kHz] y una potencia de 1000 [W]. El dispositivo es usado en aplicaciones automotrices, calentamiento y liberación de tuercas, cojinetes, pernos y engranajes (Figura 2.3). El equipo no cuenta con ningún sistema de enfriamiento o protección por sobre carga, por lo cual tiene ciclos de operación de 2 [min.], con pausas de 20 [min.]. El uso del equipo está limitado solo a calentamiento de metales ferromagnéticos y su costo es de \$600 USD.



Figura 2.2. MINI-DUCTOR II [2.2].



Figura 2.3. Liberación de una tuerca por calentamiento por inducción [2.3].

El EASYHEAT es un equipo que emplea el calentamiento por inducción en un rango de frecuencias de 150 a 400 [kHz] y una potencia de 2400 [W] (Figura 2.4). El equipo es ideal para manejar distintos tamaños de piezas y metales, procesos de forja, endurecimiento superficial y soldadura (Figura 2.5). El equipo no cuenta con un sistema de enfriamiento, sin embargo el proveedor fabrica intercambiadores de calor para este tipo de equipos. El horno EASYHEAT puede operar en un ciclo corto (10 s) o en un ciclo largo (10 000 s) sin interrupciones, su costo es de \$2900 USD.



Figura 2.4. Micro horno de inducción EASYHEAT [2.4].



Figura 2.5. Pre calentamiento por inducción para procesos de forja [2.5].

El micro horno Royer es un equipo que emplea el calentamiento por inducción en un rango de frecuencias de 60 a 80 [kHz] y una potencia de 1500 [W]. (Figura 2.6). El dispositivo es usado en aplicaciones para calentamiento de metales ferromagnéticos (Figura 2.7). El equipo no incluye un sistema de enfriamiento, sin embargo posee conexiones para adaptar un sistema de enfriamiento mediante agua. El micro horno Royer puede operar en un ciclo de hasta 5 [min.] sin interrupciones, su costo es de \$750 USD.



Figura 2.6. Micro horno de inducción Royer [2.6].



Figura 2.7. Calentamiento por inducción de una probeta metálica [2.7].

El micro horno UI-7003 es un equipo que emplea el calentamiento por inducción a una frecuencia de 60 [kHz] y una potencia de 800 [W]. (Figura 2.8). El dispositivo es usado en aplicaciones para calentamiento y soldadura de metales (Figura 2.9). El equipo no incluye un sistema de enfriamiento sin embargo posee conexiones para adaptar un sistema de enfriamiento mediante agua. El UI-7003 puede operar en un ciclo de hasta 10 [min.] sin interrupciones, su costo es de \$1700 USD.



Figura 2.8. Micro horno de inducción UI-7003 [2.8].



Figura 2.9. Soldadura mediante calentamiento por inducción [2.9].

Una vez recabada la información con las características principales de cada equipo y sus respectivas aplicaciones se procede a realizar una matriz de decisión donde se comparan los conceptos de la matriz con cada alternativa (Tabla 2.1). La valoración será +1 si es mejor que el concepto base o -1 si es peor, 0 para el caso de ser similares.

	Mini-Ductor II	Easyheat	Royer	UI-7003
Ciclo de operación	-1	1	1	1
Potencia	-1	0	0	-1
Costo	0	-1	0	-1
Rango de Frecuencias	-1	1	0	-1
Peso	1	-1	0	-1
Total	-2	0	1	-3
Lugar	3°	2°	1°	4°

Tabla 2.1. Matriz de decisión para los hornos disponibles.

Se puede apreciar en la Tabla 2.1 como se evaluaron cada uno de los micro hornos de inducción y la posición que obtuvieron en dicha evaluación. Se evaluó puntuando a cada equipo de forma positiva si mejoraba los requerimientos del cliente, de manera neutral si los cumplía y de forma negativa si no cumplía con los requerimientos, al final se sumaron los puntos obtenidos y se compararon para seleccionar al equipo de mayor puntuación.

Brevemente se puede mencionar que los equipos MINI-DUCTOR II y el UI-7003 se encontraron muy limitados ya que no tenían un rango de frecuencias y sus aplicaciones se restringieron a una sola frecuencia de operación, el ciclo de operación del MINI-DUCTOR II fue muy corto y no se puede adaptar un sistema de enfriamiento para este equipo. Los micro hornos de inducción EASYHEAT y Royer tuvieron ventaja en comparación con los equipos anteriores porque presentaron un rango de frecuencias variado, su potencia fue la adecuada y pueden trabajar con ciclos de operación cortos o largos, además de que existe un control en la temperatura que alcanza la bobina inductora. Los fabricantes de estos dos últimos micro hornos fabrican intercambiadores y aerofriadores especiales, que funcionan con agua o aire y que permiten mantener refrigerada la bobina evitando un sobrecalentamiento del equipo.

Con los argumentos anteriores, los equipos que mostraron ser aptos fueron el EASYHEAT y el Royer sin embargo este último tiene un menor costo y su peso es más liviano, así el equipo que se selecciono fue el micro horno de inducción Royer.

2.2 DESCRIPCIÓN DEL MICRO HORNO DE INDUCCIÓN ROYER.

El micro horno de inducción Royer es un calentador de inducción de propósito general, diseñado principalmente para calentar metales como el hierro y el acero, sin tener contacto con el metal (Figura 2.10). El equipo cuenta con una protección para evitar daños por sobrecarga o mal uso del usuario. Debido a que el sistema de control tiene un límite de operación, éste avisa al usuario cuando la unidad está apunto de sobrecargarse o está demasiado caliente [2.10].



Figura 2.10. Micro horno de inducción Royer [2.10].

A continuación se presenta en la Tabla 2.2 las especificaciones del micro horno:

Especificación Técnica del Horno	
Tipo de Horno	Horno de Inducción
Potencia de Entrada	1500 W
Corriente de Entrada	15 A
Voltaje de Operación	120 VAC
Frecuencia de Operación	60 - 80 KHz
Temperatura ambiente de Operación	-17 - 48 °C
Materiales	
Bobina Inductora	Tubería de Cobre
Estructura del Horno	Aluminio
Dimensiones	
Largo x Ancho x Alto	0.20 x 0.17 x 0.07 m
Peso	7.7 kg

Tabla 2.2. Especificación del micro horno de inducción Royer [2.11].

El micro horno de inducción Royer tiene dos técnicas para acoplar la bobina inductora con la pieza de trabajo:

- Acoplamiento por contacto.
- Acoplamiento sin contacto.

2.3 ACOPLAMIENTO POR CONTACTO.

En la Figura 2.11 se muestra una aplicación típica de este tipo de acoplamiento, que es el calentamiento del cubo de una polea, para liberarlo de un eje oxidado. En este caso, se deben usar varias hebras delgadas de alambre para que se pueda agarrar mejor a la pieza, en lugar de un solo alambre (Aquí se usó un solo alambre largo para enrollar la pieza, pero un alambre de Litz¹ resulta mejor). Entre mejor esté acoplado el alambre mayor será la potencia aprovechada por la pieza y si se aumenta el número de vueltas, se incrementará la potencia. Es posible sobrecargar el calentador si se aplica demasiadas vueltas, por lo que si eso sucede se debe disminuir el número de vueltas, y volver a intentar.

¹ Hilo constituido por varios alambres recubiertos con una película aislante y trenzados.

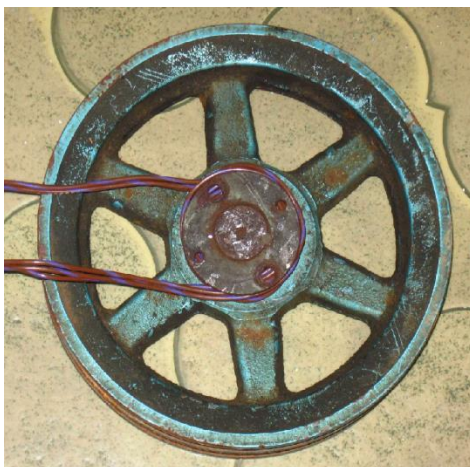


Figura 2.11. Calentamiento de una polea [2.12].

2.4 ACOPLAMIENTO SIN CONTACTO.

En algunos casos, especialmente cuando se desea calentar pequeñas piezas, hasta calentarlas al rojo vivo, es usado el acoplamiento sin contacto. En este caso, la bobina estaría hecha de tubería de cobre, la cual envuelve la pieza sin tocarla. Cuando el calentador es energizado, el campo magnético de la bobina causa que la corriente fluya en la pieza a calentar. En la Figura 2.12 se muestra un ejemplo de este tipo.



Figura 2.12. Calentamiento por acoplamiento sin contacto [2.13].

Se tiene que tener especial cuidado de que las espiras de la bobina de cobre no estén en contacto entre sí, ya que si esto sucediera crearía el efecto de una espira en el secundario y absorbería toda la energía, tal como se muestra en la Figura 2.13.



Figura 2.13. El calor radiado por el perno produce que la espira se caliente demasiado y se junte con la espira de abajo, provocando un corto circuito [2.14].

Antes de analizar el diagrama de bloques del horno, es necesario aclarar el espectro de frecuencia en el que opera el equipo, ya que la frecuencia en Hz de la corriente eléctrica tiene una influencia fundamental en las características del funcionamiento de los equipos de calentamiento por inducción (ver Tabla 2.3).

GRUPO Y RANGO(Hz)	FRECUENCIAS COMERCIALES (Hz)	APLICACIONES	GENERADOR
Frecuencia de Red y sus Múltiplos 50-60 Hz	50 y 60 Hz	Fusión y calentamiento de piezas largas.	Conexión a la red.
Media Frecuencia 150-10000 Hz	150, 200, 400, 1000, 3000, 4000 y 10 000 Hz.	-Calentamiento superficial para profundidades de penetración de 0.01 a 0.4cm y diámetros de 1-30cm. -Soldadura de .5 a 1cm de espesor.	-Moto-Generador, -Generador de estado sólido.
Alta frecuencia 10-2000 kHz	60, 80, 100, 150, 200, 250, 450, 600 Y 2000 kHz.	-Calentamiento superficial para piezas pequeñas de 1 a 3cm de diámetro. -Soldadura de tubo. -Crecimiento de cristales para semiconductores.	-Osciladores -Generadores de radio frecuencia.

Tabla 2.3. Frecuencias comunes y sus aplicaciones [2.15].

En consecuencia es normal la clasificación de los equipos eléctricos en tres grupos principales:

- Equipos de frecuencia de red (50- 60Hz).
- Equipos de media frecuencia (150-10000 Hz).
- Equipos de alta frecuencia que operan (10-2000 kHz).

Salvo en algunos hornos de inducción cuya bobina o inductor es trifásico, lo normal es un inductor monofásico que opera a la frecuencia de red y con un factor de potencia muy bajo. Por este motivo, prácticamente todos los equipos de inducción disponen de una batería de condensadores, en muchos casos ajustable, para corregir el factor de potencia de la bobina o inductor hasta un valor unidad.

2.5 EQUIPOS A LA FRECUENCIA DE RED.

También se denominan equipos de baja frecuencia, en ellos no existe la conversión de frecuencia. Solamente se utilizan transformadores, condensadores para la corrección del factor de potencia y circuitos de comando y protección. La potencia envuelta en estos sistemas puede llegar a centenas de Mega watts. Así como en el transformador, la potencia transferida es proporcional a la frecuencia de operación. Por ser esta baja (50Hz-60Hz), el equipo presenta un volumen considerable, o sea, baja densidad de potencia. Normalmente se utiliza esta frecuencia de operación en el calentamiento de materiales voluminosos, en los cuales se desea una uniformidad en el calentamiento, como por ejemplo, en la fundición de metales a gran escala. De esta forma, para que el efecto Skin sea poco pronunciado, se debe operar en baja frecuencia.

En la Figura 2.14 se muestra el diagrama de un equipo de baja frecuencia para un inductor monofásico con los condensadores de corrección del factor de potencia.

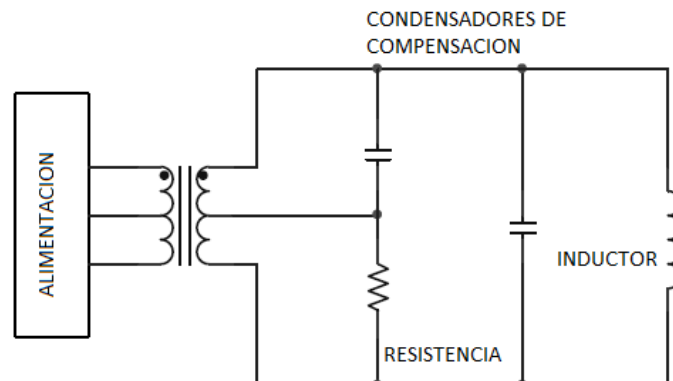


Figura 2.14. Instalación de baja frecuencia para inductor monofásico [2.16].

2.6 EQUIPOS DE MEDIA FRECUENCIA.

Anteriormente los sistemas de media frecuencia estaban constituidos por moto-generadores, que suministraban la tensión alterna a la bobina de inducción. Dichos sistemas presentan algunas desventajas que limitan su uso. Estos sistemas operan con frecuencia fija, baja eficiencia, baja densidad de potencia, ruido audible y mayor necesidad de mantenimiento debido a la existencia de piezas móviles. Existen también los convertidores estáticos que utilizan tiristores, y que surgieron como una alternativa para la implementación de sistemas de calentamiento inductivo.

Se denominan medias frecuencias a las comprendidas entre 150 y 10000 Hz aunque en ocasiones se extiende entre 100kHz y 25kHz. Los métodos más utilizados para generar dichas frecuencias son:

- Grupo motor alternador.
- Multiplicadores estáticos de frecuencia².
- Convertidores de media frecuencia de tiristores³.

La utilización de convertidores estáticos permite minimizar las desventajas presentadas por el conjunto motor-generador, además de permitir un mayor control en el proceso de calentamiento. Una vez que las características de los materiales varían con la temperatura, durante el proceso de calentamiento, es necesario el uso de un circuito de control para la optimización del proceso.

2.7 EQUIPOS DE ALTA FRECUENCIA.

Estos equipos se utilizan en aplicaciones donde se desea una profundidad de penetración pequeña o elevada densidad de potencia. En este tipo de aplicación, tradicionalmente son empleados circuitos osciladores de potencia a válvula, pero con el desarrollo de los semiconductores y de las técnicas de conmutación suave, los convertidores estáticos se han expandido a potencias y frecuencias en que pueden operar con elevada eficiencia, haciendo mucho más atractiva la utilización de estos.

² Dispositivo que en equipos de inducción, genera corrientes eléctricas de mayor frecuencia que la de alimentación.

³ Generador de media o alta frecuencia en el que, después del rectificador mediante diodos o tiristores, se dispone de un inversor de tiristores que alimenta la carga.

La frecuencia de estos equipos está comprendida entre los 10 y 2000 kHz, distinguiéndose los siguientes tipos:

- Generadores de válvulas electrónicas.
- Generadores aperiódicos.⁴
- Generadores de tiristores.⁵
- Generadores de transistores de potencia.⁶

2.8 GENERADOR DE VÁLVULAS ELECTRÓNICAS.

Es de especial interés para este trabajo, contar con la descripción de este generador, ya que el sistema de calentamiento seleccionado opera de manera similar a este tipo de equipos, en un rango de frecuencias alto (60-80kHz). Un esquema básico de estos equipos se representa en la Figura 2.15. Un equipo consta de:

- 1.- Un rectificador, que suministra una tensión continua de 5 000 a 15 000 V.
- 2.- Un oscilador de válvula, que alimenta a un circuito oscilante excitado por uno o varios tríodos⁷.
- 3.-Un transformador de alta frecuencia, adaptado al circuito de carga inductor-pieza.

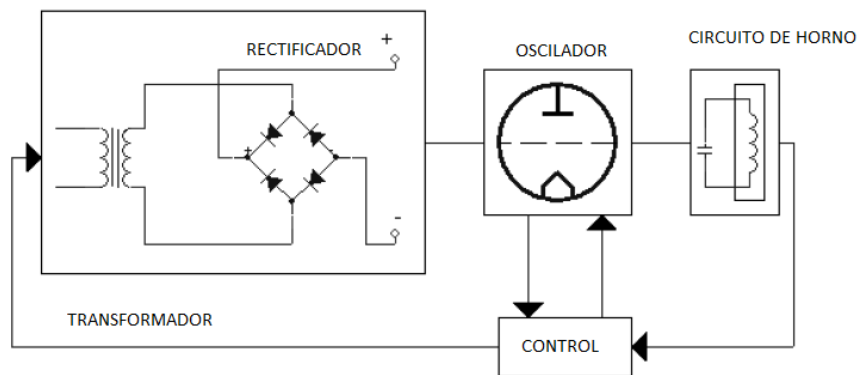


Figura 2.15. Esquema de un generador de válvulas eléctricas [2.17].

⁴ Generador donde la tensión de salida del oscilador al transformador, y este al circuito formado por inductor-carga.

⁵ Son similares a los de media frecuencia, pero diseñados para 10,25 y 50kHz.

⁶ Generadores diseñados para 50 y 200 kHz.

⁷ Válvula electrónica de tres electrodos, ánodo, cátodo y rejilla de control.

El rendimiento de estos generadores es del orden del 70-90 por ciento para frecuencias comprendidas entre 10 y 100 kHz, pero baja al 55-75 por ciento para frecuencias de 100 a 2 000 kHz. El inductor opera normalmente a una tensión inferior a la del tríodo disponiendo de un adaptador de tensión transformador. La duración de la válvula es limitada (7 000-10 000 h), siendo el elemento más importante del generador. La potencia nominal puede llegar a 1 500 kW. Se regula la potencia actuando sobre la tensión rectificada. Siendo auto-oscilante el circuito de alta frecuencia, funciona a la frecuencia resonante del circuito de carga y conduce a los bornes ánodo-cátodo de la válvula una carga puramente resistiva, con tal que la tensión de excitación sea la adecuada. El arranque es casi instantáneo (se requieren únicamente 20-120 segundos para calentar la válvula) y la potencia de vacío es del orden del 3 por ciento de la potencia nominal.

2.9 DIAGRAMA DE BLOQUES.

El horno de inducción cuenta con diversos sistemas como se muestra en el siguiente diagrama de bloques (Figura 2.7).

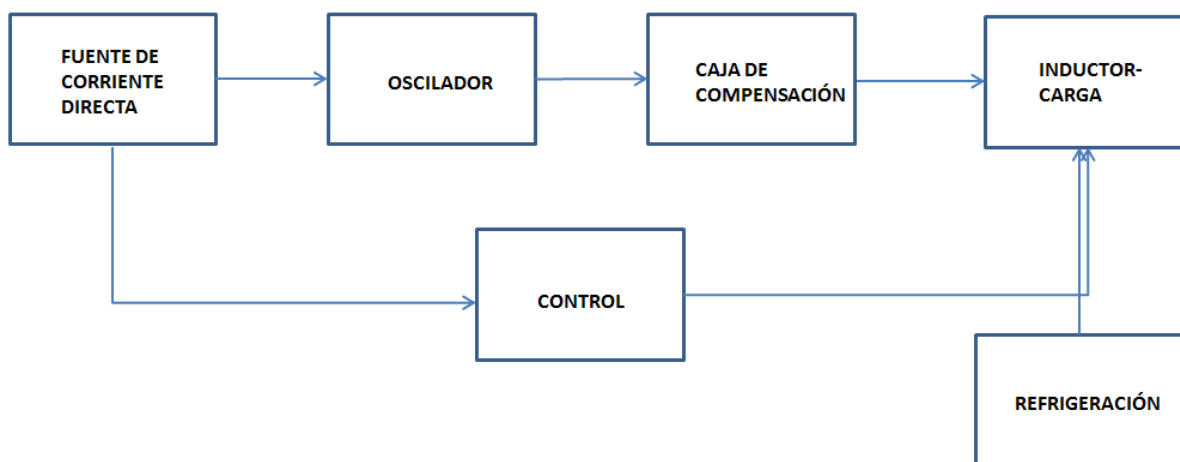


Figura 2.16. Diagrama de bloques del horno de inducción.

2.10 LOS CONTROLES.

Circuit Breaker: El interruptor del horno es el botón negro que muestra on y off. Este interruptor controla la potencia del Royer y también lo protege de sobrecargas.

Al presionar on se prepara para operarlo. Cuando se enciende la unidad, prenderán todos los leds momentáneamente mientras la unidad hace una prueba de potencia para

asegurarse de que está en óptimas condiciones de operar. Cuando los leds se apaguen la unidad está lista para operar.

Push Button: Este botón controla el calentamiento y tiene dos maneras de operar.

-Modo 1 "Press on, Press off". Si se presiona e inmediatamente se suelta el botón, el calentador está activado y se enciende, el led marcado con heat on se iluminará. Si se presiona el botón otra vez, el calentador se apaga y el led dejará de brillar.

-Modo 2 "Press and Hold". Si se le mantiene presionado el botón por más de dos segundos, el horno entra en modo "Press and Hold". En este modo momentáneo el calentador estará encendido hasta que se suelte el botón y se apague.

Así se cuentan con dos opciones "Press on, Press off" está diseñado para periodos largos de calentamiento y "Press and Hold" para periodos cortos.

Leds: Hay 5 leds ubicados en la cara frontal del horno, de izquierda a derecha (Figura 2.17).

Verde: Indica que la potencia está activada. Este led debe encender todo el tiempo en que el interruptor esté prendido y el horno conectado a la toma de corriente. Si el led no se enciende cuando el interruptor este en prendido, el calentador tiene un problema que se debe reportar.

Ámbar: Indica que el calentador está encendido y está generando calor. Este led también indica cuando la unidad está sobrecargándose. Si los circuitos internos llegan a calentarse demasiado, este led empezará a parpadear lentamente dos veces por segundo. El horno automáticamente disminuirá el flujo de calor para controlar el incremento de temperatura cuando este en ese modo. Si el horno continúa calentándose demasiado la unidad se dispara y el led que indica "Fault" comenzará a parpadear indicando un código de sobrecarga.

Rojo: Este es el led que indica error y también indica cuando se está a punto de llegar a la sobrecarga. Cuando un error ocurre este led parpadea en 2 dígitos un código que indica el error. Algunos códigos suceden a menudo como el 2-1 (horno sobrecargado) y el 2-2 (sobrecarga de corriente).

Cuando la carga en el horno llega cerca del 90% de su máxima capacidad, el led que indica "Fault" comienza a parpadear dos veces por segundo. Al mismo tiempo, el controlador del nivel de potencia es bloqueado y no permite incrementar la potencia. El controlador puede girar hacia la izquierda para disminuir la potencia, pero ignora el giro en dirección de las manecillas del reloj. El horno todavía puede sobrecargarse por muchas cosas como

el movimiento relativo de la bobina o permitiendo que la bobina toque la pieza, cuando esto sucede la unidad marca un código de error.

Power Knob: Este controlador ajusta la potencia nominal del horno. No controla de manera directa el nivel de calentamiento, solo lo relativo a la potencia. Para muchos trabajos el controlador se ajusta completamente hacia la derecha. Se debe considerar que el controlador se bloquea y no se puede incrementar más la potencia una vez que el horno alcanza el 90% de su capacidad, este límite está diseñado para permitir el mayor suministro de potencia del horno sin riesgo excesivo de que se dispare la unidad.



Figura 2.17. Leds indicadores en el horno de inducción [2.18].

2.11 CIRCUITO OSCILADOR.

Los osciladores sinusoidales son sistemas electrónicos capaces de generar una tensión alterna de amplitud y frecuencia constantes. Son sistemas con una sola terminal de salida para la tensión alterna generada, y entradas para la alimentación de continua [2.19].

La frecuencia con la que oscila el circuito depende del condensador y de la inductancia que se utilice; cuanto mayor sea el condensador y la inductancia, menor va a ser la frecuencia. Una vez dispuestos ambos elementos en el circuito, estos son fijos y, por tanto, la frecuencia de oscilación es una característica de dicho circuito, la cual recibe el nombre de "frecuencia propia del circuito oscilante" o "frecuencia natural de oscilación".

El circuito oscilador del micro horno de inducción es sencillo, en su forma más simplificada se observa que consta de dos transistores como elemento de amplificación, capacitores,

resistencias y bobinas. La arquitectura del circuito oscilador Royer se puede encontrar en cualquier aparato que reproduzca imágenes con tecnología LCD, como una pantalla de televisión o una laptop. En la Figura 2.18 se muestra el esquema básico del circuito oscilador Royer.

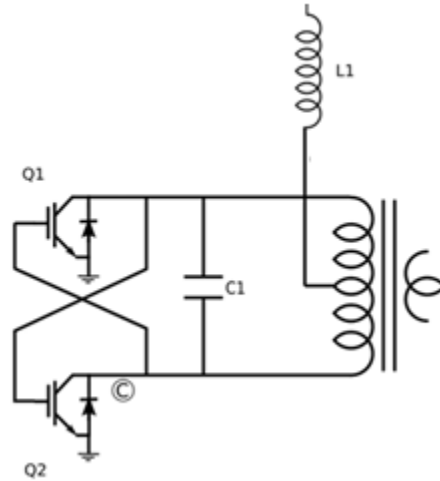


Figura 2.18. Esquema del oscilador Royer.

El circuito oscilador del horno está alimentado con una fuente de 12[V], y para que haya circulación de corriente se tiene que hacer que el transistor Q1 conduzca por medio de una resistencia R1 que le produce una excitación en la base. Este es el camino de la corriente principal (Figura 2.19).

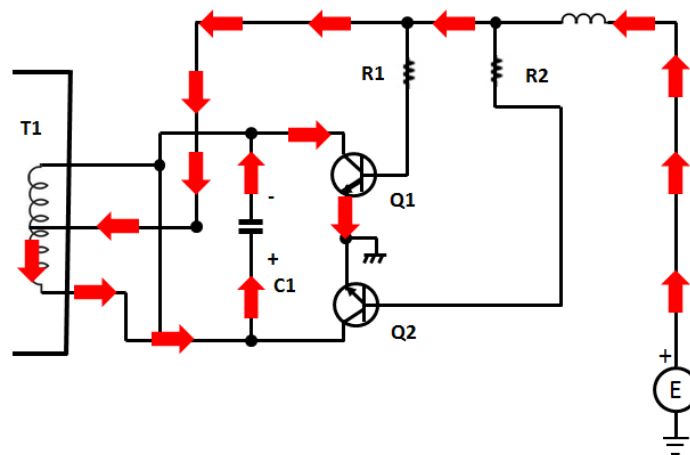


Figura 2.19. Primer hemicycle en el circuito oscilador.

Cuando Q1 conduce se provoca en el transformador el primer medio ciclo de una onda sinusoidal, para completarlo es necesario que la corriente recorra el camino inverso, impulsada por el transistor Q2 (Figura 2.20).

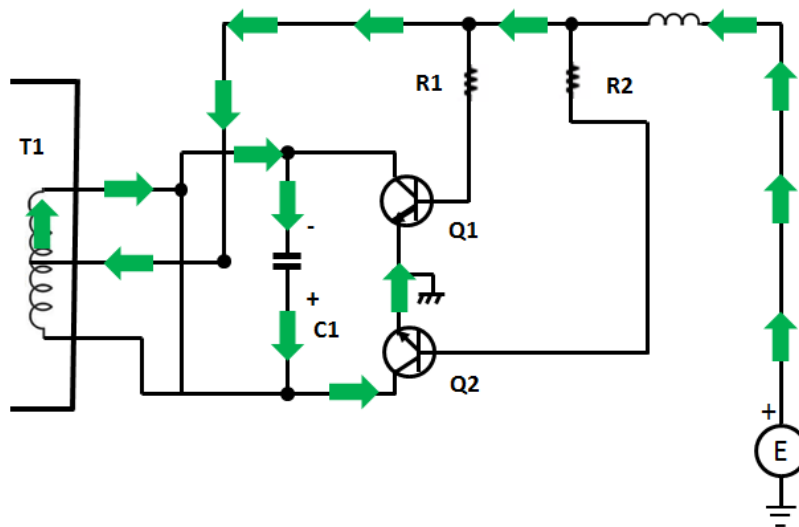


Figura 2.20. Segundo hemicycleo en el circuito oscilador.

2.12 BOBINA DE INDUCCIÓN.

Por ser muy elevada la corriente que circula por la bobina, se construye con un perfil de cobre hueco para la refrigeración por agua. Para hornos de media frecuencia (0.1-10Khz) se emplean serpentines inductores con un espesor de 3-5mm y para hornos de baja frecuencia (60Hz) se tienen espesores de 10-20mm.

La bobina debe estar provista de un aislamiento eléctrico adecuado para las altas tensiones empleadas y de un aislamiento térmico interior para no someter al aislamiento eléctrico a temperaturas elevadas.

Se debe considerar la forma de la bobina inductora, pues en ella se concentra el flujo de líneas de fuerza del campo magnético sobre la carga o sección a calentar. En la Figura 2.21 se muestran diversos modelos de espiras.

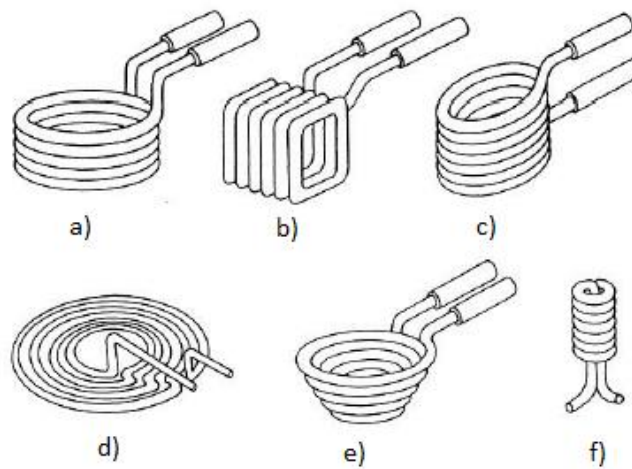


Figura 2.21. Configuraciones típicas de serpentines inductores [2.20].

Para aplicaciones de media y alta frecuencia se requiere que las configuraciones de las bobinas o sus contornos se puedan acoplar a la pieza a calentar. Las bobinas pueden tener un contorno redondo (Figura 2.21a), rectangular (Figura 2.21b), formado para alguna pieza especial (Figura 2.21c). La bobina pancake (Figura 2.21d) es utilizada cuando se desea calentar un solo lado de la pieza, o cuando no es posible envolver toda la pieza. Se utiliza la bobina en espiral (Figura 2.21e) para calentar engranajes cónicos o herramientas con punta. Las brocas pueden ser calentadas por bobinas de varias espiras (Figura 2.21f).

Las condiciones necesarias para tener en cuenta en el cálculo de la bobina son las siguientes:

- Mientras menor es la distancia entre la carga y las espiras de la bobina, mayor será la concentración de las líneas de fuerza del campo magnético, aumentando la intensidad de las corrientes parásitas, lo que producirá una mayor temperatura por efecto Joule.
- Es mayor la concentración de las líneas de fuerza en el centro de la bobina, en forma longitudinal.
- La mínima concentración de líneas de fuerza se encuentra en el centro geométrico de la bobina, en el centro de la circunferencia si es circular o en la intersección de las diagonales si es rectangular o cuadrada.

2.13 CÁLCULO DE LA BOBINA DE INDUCCIÓN.

Para el cálculo del diámetro interno de una espira, se considera que el diámetro de la probeta de acero es de 25.4 [mm]. De la Figura 2.13 se aprecia que el espesor del aislante térmico es de 0.8 [mm], la tubería de cobre tiene un diámetro externo de 6.35 [mm] y diámetro interno de 3.175 [mm].

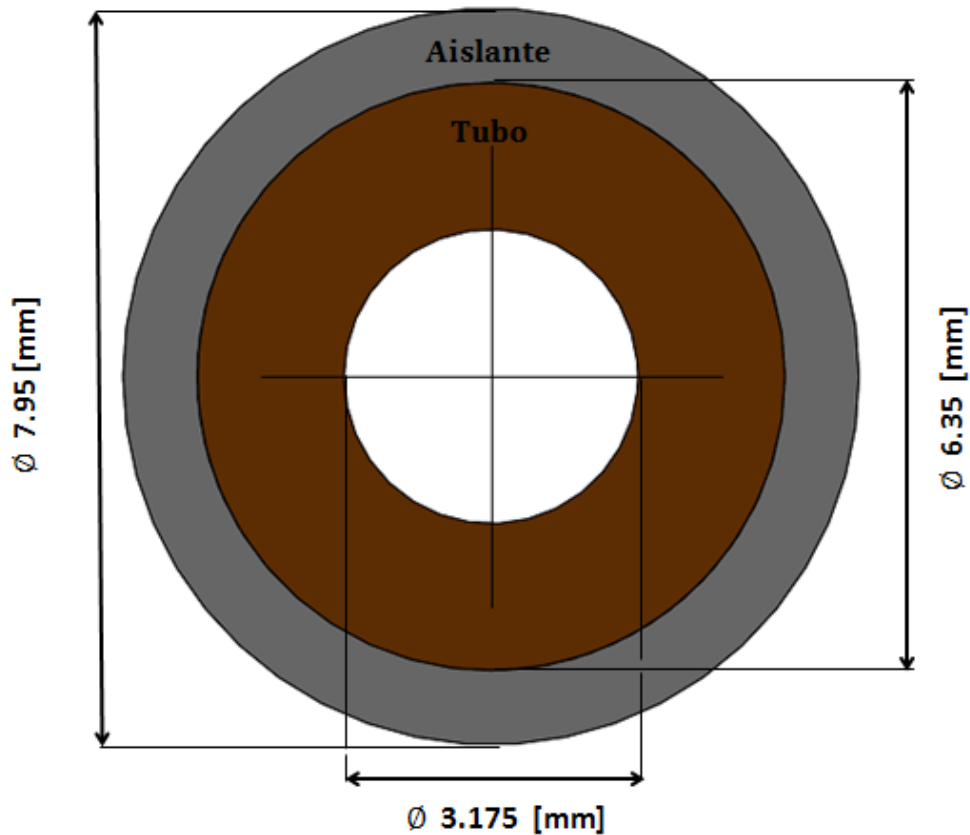


Figura 2.22. Sección transversal de la tubería de cobre.

Para calcular la longitud de cada espira se tiene:

$$l_{espira} = (2\pi)(r_{barra}) = (2\pi)(12.7 \text{ [mm]}) = 79.8 \text{ [mm]} \quad (2.1)$$

El número de espiras se obtiene como:

$$N_{espira} = \frac{h_{barra}}{D_{Cu} + E_{aislante}} = \frac{100 \text{ [mm]}}{6.35 \text{ [mm]} + 1.6 \text{ [mm]}} = 12.5 \approx 13 \quad (2.2)$$

De la ec. 2.2 se observa que el número de espiras obtenidas es para una bobina que no presenta separación entre sus espiras (Figura 2.23 a), sin embargo para maximizar la transferencia de calor se procede a calcular el espacio entre cada espira y obtener una bobina con arreglo espaciado (Figura 2.23 b).

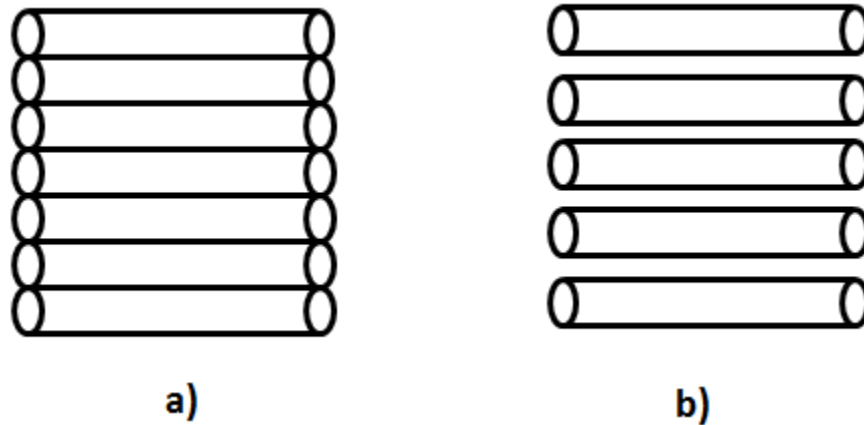


Figura 2.23 a y 2.23 b. Arreglo para una bobina sin separación entre espiras (Izquierda) y bobina con arreglo espaciado (Derecha).

La bobina con arreglo espaciado debe de tener seis espiras, longitud disponible se obtiene como:

$$l_D = h_{barra} - h_{bobina} \quad (2.3)$$

$$h_{bobina} = (6)(D_{Cu} + E_{aislante}) = (6)(6.35 \text{ [mm]} + 1.6 \text{ [mm]}) \quad (2.4)$$

$$h_{bobina} = 47.7 \text{ [mm]}$$

$$l_D = 100 \text{ [mm]} - 47.7 \text{ [mm]} = 52.3 \text{ [mm]}$$

El espacio entre espira y espira se obtiene como:

$$E_{espira} = \frac{l_D}{N_{espira}} = \frac{52.3 \text{ [mm]}}{6} = 8.7 \text{ [mm]} \quad (2.5)$$

La longitud de cobre a utilizar es:

$$l_{Cu} = (l_{espira})(N_{espira}) = (79.8 \text{ [mm]})(6) = 478.8 \text{ [mm]} \quad (2.6)$$

La expresión para calcular la resistencia eléctrica de la bobina es:

$$R_{Bobina} = \frac{l_{Cu}}{(S)(\sigma_{Cu})} = \frac{l_{Cu}}{(r_{ext}^2 - r_{int}^2)(\pi)(\sigma_{Cu})} \quad (2.7)$$

Sustituyendo en la ec. 2.4 los valores del radio y longitud de la tubería de cobre:

$$R_{Bobina} = \frac{0.478[m]}{((0.00317[m])^2 - (0.00159[m])^2)(\pi)(5.8 * 10^7[S/m])}$$

$$= 35 \text{ [m}\Omega\text{]}.$$

Donde:

- D_{Cu} = Diámetro exterior de la tubería de cobre [mm].
- $E_{aislante}$ = Espesor del aislante [mm].
- h_{barra} = Altura de la probeta [mm].
- r_{barra} = Radio de la probeta [mm].
- l_D = Longitud disponible [mm].
- E_{espira} = Espacio entre cada espira [mm].
- l_{Cu} = Longitud de cobre requerida [mm].
- l_{espira} = Longitud de cada espira [mm].
- N_{espira} = Número de espiras.
- r_{int} = Radio interior de la tubería de cobre [mm].
- r_{ext} = Radio exterior de la tubería de cobre [mm].
- R_{Bobina} = Resistencia de la bobina [Ω].
- S = Sección transversal del tubo [m^2].
- σ_{Cu} = Conductividad eléctrica [S/m].

A continuación se presenta en la Tabla 2.4 un resumen con los cálculos obtenidos en este apartado:

Resultados	
Longitud por Espira	79.8 [mm]
Número de Espiras	6 vueltas
Longitud Disponible	52.3 [mm]
Espacio entre Espiras	8.7 [mm]
Longitud Total de la Bobina Inductora	478.8 [mm]
Resistencia de la Bobina Inductora	35 [mΩ].

Tabla 2.4. Resultados obtenidos para el cálculo de la bobina inductora.

2.13.1 CORRIENTE MÁXIMA DE LA BOBINA DE INDUCCIÓN.

Para obtener la corriente máxima que circula por la bobina de inducción se calcula su sección transversal y se compara el valor obtenido con los valores de la Tabla 2.5.

$$S = (r_{ext}^2 - r_{int}^2)(\pi) = ((3.175)^2 - (1.59)^2)(\pi) \quad (2.8)$$

$$S = 23.72 [mm^2]$$

Sección [mm ²]	Corriente [A]
0.52	5
0.82	7
1.31	10
2.08	25
3.31	30
5.26	40
8.37	60
13.30	80
21.15	105
33.62	140
42.36	165
53.49	195

Tabla 2.5. Corriente máxima para conductores [2.22].

Interpolando se obtiene que la corriente máxima que circula por la bobina de inducción es:

$$i_{max} = 112.2 \text{ [A]}.$$

2.13.2 POTENCIA REQUERIDA.

La energía eléctrica suministrada a la bobina se transforma de tres maneras distintas:

- 1.- El calentamiento de la pieza para alcanzar una temperatura y profundidad requerida en un tiempo requerido.
- 2.- Las pérdidas de calor de la pieza debido a la radiación, convección y conducción.
- 3.- Las pérdidas en la bobina ($I_c^2 R_c$), las cuales son pérdidas inevitables.

Para efectuar el cálculo se determinó el uso de barra redonda a partir de la cual se elaboraron probetas de acero al carbono 1010 con una longitud de 100 [mm] y un diámetro de 25.4 [mm], las cuales se elevara su temperatura hasta alcanzar 1000 [°C].

Obtención del volumen de acero a calentar:

$$V_b = \frac{(\pi)(D_b^2)}{4}(l_b) = \frac{(\pi)(0.254[\text{m}])^2}{4}(0.10[\text{cm}]) = 5.067 \times 10^{-5} \text{ [m}^3] \quad (2.9)$$

Donde:

- D_b = Diámetro de la probeta [m].
- l_b = Longitud de la probeta [m].
- V_b = Volumen de la probeta [m³].
- M_b = Masa de la probeta [kg].
- A_s = Área de la superficie radiante de la probeta [m²].
- ρ_a = Densidad del acero [kg/m³].

Cálculo de la masa y el área de la superficie radiante de la probeta:

$$M_b = (V_b)(\rho_a) = (5.067 \times 10^{-5} \text{ [m}^3])(7870 \text{ [kg/m}^3]) = 0.3987 \text{ [kg]} \quad (2.10)$$

ρ_a =Densidad del acero= 7870 [kg/m³].

Área de la superficie radiante:

A_s = Área curva del cilindro + Área de un extremo

$$A_s = (\pi)(D_b)(l_b) + \frac{(\pi)(D_b^2)}{4} = (\pi)(0.0254[m])(0.10[m]) + \frac{(\pi)(0.0254[m])^2}{4} \quad (2.11)$$

$$A_s = 79.8 \times 10^{-4} [m^2] + 5.07 \times 10^{-4} [m^2] = 84.87 \times 10^{-4} [m^2]$$

Calor requerido para calentar la probeta de 27 a 1000[°C]:

C= Calor específico del acero = 486[J/kg K].

$$\Delta H = (M_b)(C)(\Delta T) = (M_b)(C)(T_2 - T_1) \quad (2.12)$$

$$= (0.3987 [kg])(486 [J/kg K])(1273[K] - 300[K]) = 188.56 [kJ]$$

Calor radiado a 1000 [°C]:

$$P_1 = (\sigma)(A_s)(\epsilon)(T_2^4 - T_1^4) \quad (2.13)$$

$$= (5.67 \times 10^{-8} [W/m^2 K^4])(84.87 \times 10^{-4} [m^2])(.8)((1273[K])^4 - (300[K])^4) = 1007.8 [W]$$

$$P_1 = 1.007 [kW]$$

Donde:

- σ = Constante de Stefan Boltzmann = $5.67 \times 10^{-8} [W/m^2 K^4]$
- ϵ = Emisividad del acero.
- T_1 = Temperatura ambiente [K].
- T_2 = Temperatura final [K].
- ΔH = Calor requerido [kJ].

- C = Calor específico del acero [J/kg K].
- P_1 = Potencia radiada [kW].

Para un calentamiento rápido se considera una potencia:

$$P_1 = (4)(1.007) = 4.03 [kW]$$

La probeta que está siendo calentada se considera como un material ferromagnético ($\mu_r = 0.15$) hasta que alcanza los 760[°C] y como material paramagnético en el rango de temperatura de 760 a 1000[°C]. Para piezas de trabajo con diámetro o espesor de 1-3 [cm] a las cuales se les realizará un calentamiento superficial, el rango de frecuencias 1-50 [kHz] suele ser el más adecuado. La frecuencia que se utilizará será de 10[kHz], durante todo el calentamiento.

La profundidad de penetración a 760 [°C] es:

$$\delta_{760} = (5034) \sqrt{\frac{\rho}{(\mu_r)(f)}} = (5034) \sqrt{\frac{66.4 \times 10^{-6} [\Omega \times \text{cm}]}{(.15)(10^4 [\text{Hz}])}} = 0.11 [\text{cm}] \quad (2.14)$$

$$\delta_{760} = 1.1 [\text{mm}]$$

Sustituyendo en la ec. 2.14 cuando $\mu_r = 1$ para materiales paramagnéticos se obtiene la profundidad de penetración de 760 - 1000 [°C] es:

$$\delta_{1000} = (5034) \sqrt{\frac{66.4 \times 10^{-6} [\Omega \times \text{cm}]}{(1)(10^4 [\text{Hz}])}} = 0.41 [\text{cm}] = 4.1 [\text{mm}]$$

Si el calentamiento tiene lugar en un intervalo de tiempo $\Delta\tau$, la potencia total (P_T) para el calentamiento de la probeta es:

$$P_T = (C)(M_b) \left(\frac{\Delta T}{\Delta\tau} \right) + (\sigma)(A_s)(\epsilon)(T_2^4 - T_1^4) \quad (2.15)$$

Cuando la temperatura requerida T_2 es alcanzada, la potencia suministrada aumentará la temperatura a un valor T_U , por lo cual una potencia adicional será radiada. Suponiendo que la potencia suministrada se mantiene constante.

$$P_T = (\sigma)(A_s)(\epsilon)(T_U^4 - T_1^4) \quad (2.16)$$

Se puede despejar a T_U como:

$$T_U = \sqrt[4]{\frac{P_T}{(\sigma)(A_s)(\epsilon)} + T_1^4} \quad (2.17)$$

Sustituyendo la ecuación 2.16 en 2.15 se obtiene:

$$\frac{\Delta T}{\Delta \tau} = \frac{(\sigma)(A_s)(\epsilon)}{(C)(M_b)} (T_U^4 - T_1^4) \quad (2.18)$$

Integrando la ecuación 2.18 de T_1 a T_2 se obtiene:

$$\tau = \frac{(C)(M_b)}{(\sigma)(A_s)(\epsilon)(T_U^3)} * \left[\begin{aligned} & \tan^{-1} \left(\frac{T_2}{T_U} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{T_1}{T_U} \right) + \frac{1}{2} \\ & * \ln \frac{(T_U + T_2)(T_U - T_1)}{(T_U - T_2)(T_U + T_1)} \end{aligned} \right] \quad (2.19)$$

Este es el tiempo requerido para calentar de T_1 a T_2 con una potencia de entrada dada P_T .

Para el calentamiento de la probeta hasta 760[°C]

$$T_{U760} = \sqrt[4]{\frac{4.03 \times 10^3 [\text{W}]}{(5.67 \times 10^{-8} [\text{W}/\text{m}^2 \text{K}^4])(84.87 \times 10^{-4} [\text{m}^2])(0.8)} + (300 [\text{K}])^4} \quad (2.20)$$

$$= 1798.7 [\text{K}]$$

El tiempo requerido para calentar la probeta de 27 a 760 [°C] es:

$$\tau = \frac{(C)(M_b)}{(\sigma)(A_s)(\epsilon)(T_U^3)} = \frac{(486 [\text{J}/\text{kg K}]) (0.398 [\text{kg}])}{(5.67 \times 10^{-8})(84.87 \times 10^{-4} [\text{m}^2])(0.8)(1798.7 [\text{K}])^3} = 86.44 [\text{s}]$$

$$\tau_{760} = (86.44 [\text{s}]) \left[\begin{array}{l} \tan^{-1} \left(\frac{1033 [\text{K}]}{1798.7 [\text{K}]} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{300 [\text{K}]}{1798.7 [\text{K}]} \right) + \frac{1}{2} \\ * \ln \frac{(1798.7 [\text{K}] + 1033 [\text{K}]) (1798.7 [\text{K}] - 300 [\text{K}])}{(1798.7 [\text{K}] - 1033 [\text{K}]) (1798.7 [\text{K}] + 300 [\text{K}])} \end{array} \right]$$

$$\tau_{760} = (86.44 [\text{s}]) (0.8413) = 72.7 [\text{s}]$$

El tiempo requerido para calentar la probeta de 760 a 1000 [°C] es:

$$\tau_{1000} = (86.44 [\text{s}]) \left[\begin{array}{l} \tan^{-1} \left(\frac{1273 [\text{K}]}{1798.7 [\text{K}]} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{1033 [\text{K}]}{1798.7 [\text{K}]} \right) + \frac{1}{2} \\ * \ln \frac{(1798.7 [\text{K}] + 1273 [\text{K}]) (1798.7 [\text{K}] - 1033 [\text{K}])}{(1798.7 [\text{K}] - 1273 [\text{K}]) (1798.7 [\text{K}] + 1033 [\text{K}])} \end{array} \right]$$

$$\tau_{1000} = (86.44 [\text{s}]) (0.3231) = 27.9 [\text{s}]$$

Debido a que la transformación magnética a 760[°C] requiere un tiempo determinado, la bibliografía [2.23] indica que hay que añadir cinco segundos más del tiempo estimado, por lo que el tiempo total de calentamiento para la probeta a una potencia de 4.03 [kW] es:

$$\tau_{total} = 72.7 [\text{s}] + 27.9 [\text{s}] + 5 [\text{s}] = 105.6 [\text{s}] \sim 2 [\text{min.}] \quad (2.21)$$

La potencia por unidad de longitud es:

$$P_L = \frac{P_T}{l_b} = \frac{4.03 \text{ [W]}}{0.1 \text{ [m]}} = 40.3 \text{ [kW/m]} \quad (2.22)$$

A continuación se presenta en la Tabla 2.5 un resumen con los cálculos obtenidos para este apartado:

Resultados	
Volumen de la probeta a calentar	5.067x10 ⁻⁵ [m ³]
Masa de la probeta	0.398 [kg]
Area de la superficie radiante	84.87x10 ⁻⁴ [m ²]
Calor para calentar la probeta de 27 a 1000 °C	188.56 [kJ]
Calor radiado a 1000 °C	1.007 [kW]
Potencia requerida para el calentamiento	4.03 [kW].
Profundidad de penetración a 760 °C	1.1 [mm]
Profundidad de penetración a 1000 °C	4.1 [mm]
Tiempo para calentar la probeta de 27 a 760 °C	72.2 [s]
Tiempo para calentar la probeta de 760 a 1000 °C	27.9 [s]
Tiempo total de calentamiento	105.6 [s]
Potencia por unidad de longitud	40.3 [kW/m].

Tabla 2.5. Cálculos obtenidos de la potencia requerida para el calentamiento de la probeta.

2.14 REFERENCIAS DE LAS FIGURAS.

[2.1] Mora Jaramillo Alejandro. Tesis. “Diseño de un concentrador solar con lente de fresnel para propósitos académicos y de experimentación”. (2014). Facultad de ingeniería Universidad Nacional Autónoma de México.

[2.2] INDUCTION INNOVATIONS. (2018). Mini-ductor II (MD-700). Septiembre 19, 2018, de INDUCTION INNOVATIONS Sitio Web:
<http://www.theinductor.com/induction-heating-products/mini-ductor/models/md-700-110v>

[2.3] INDUCTION INNOVATIONS. (2018). Induction heating applications: Mini-ductor. Septiembre 19, 2018, de INDUCTION INNOVATIONS Sitio Web:
<http://www.theinductor.com/induction-heating-products/mini-ductor/applications>

[2.4] Ambrell. (2018). EASYHEAT Induction heating systems. Septiembre 19, 2018, de Ambrell Sitio Web:
<https://www.ambrell.com/products/easyheat-systems>

[2.5], [2.9] Ambrell. (2018). EASYHEAT Induction heating process applications. Septiembre 19, 2018, de Ambrell Sitio Web:
<https://www.ambrell.com/induction-heating-applications>

[2.8] Avio. (2018). High-frequency Induction Heater Unit. Septiembre 19, 2018, de Avio Sitio Web:
<http://www.avio.co.jp/english/products/assem/lineup/highfrequency/index.html>

[2.6],[2.7], [2.10], [2.11], [2.12], [2.13] , [2.14] Fluxeon Corp. (2012). Royer Induction Heater Version 3.3. Manual Rev.1.00.

[2.15], [2.23] DESHMUKH Yoshvant V. (2005). Industrial Heating. Taylor & Francis Grove, 2005.

[2.16], [2.17] Astigarraga Urquiza Julio. (1994). “Hornos Industriales de Inducción: Teoría, Cálculo y Aplicaciones”. McGraw-Hill, España 1994.

[2.19] Campos Valls Gustavo, Espí López José. (2011). Fundamentos de Electrónica Analógica. Universidad de Valencia 2011.

[2.21] Stanley Zinn, S. L. Semiatin. (1988). Elements of Induction Heating: Design, Control, and Applications. Electric Power Research Institute, 1988.

[2.22] Electrocable. (2017). Fabricación de conductores eléctricos y alambre esmaltado. Marzo 20, 2018, de Electrocable Sitio Web:
<http://electrocable.com/productos/cobre/FXT-TTF-TWF.html>

2.15 REFERENCIAS DE LAS ECUACIONES.

(2.1) Expresión para el cálculo de la longitud de cada espira.

(2.2) Expresión para el cálculo del número de espiras.

(2.6) Expresión para el cálculo de la longitud de cobre a utilizar para la bobina inductora.

(2.7) Expresión para el cálculo de la resistencia eléctrica de la bobina inductora.

(2.8) Expresión para el cálculo de la sección transversal de la tubería de cobre.

Albán Tinoco Carlos Alberto. Tesis. “Construcción de un horno de inducción para acero con capacidad de 50 kg”. (2008). Facultad de ingeniería Universidad Politécnica Salesiana.

(2.3) Expresión para el cálculo de la longitud disponible.

(2.4) Expresión para el cálculo de la altura de la bobina.

(2.5) Expresión para el cálculo del espacio entre espira y espira.

Vega Iriarte Luis Alberto. Tesis. “Diseño y construcción de equipo de refrigeración de leche cruda en sitio de producción”. (2010). Universidad Nacional de Colombia.

(2.9) Expresión para el cálculo del volumen de acero a calentar.

(2.10) Expresión para el cálculo de la masa de la probeta.

(2.11) Expresión para el cálculo del área de la superficie radiante.

(2.12) Expresión para el cálculo del calor requerido para calentar la probeta de 27 a 1000[°C].

(2.13) Expresión para el cálculo del calor radiado por la probeta a 1000[°C].

(2.14) Expresión para el cálculo de la profundidad de penetración a 760[°C].

(2.15) Expresión para el cálculo de la potencia total.

(2.16) Expresión para el cálculo de la potencia total cuando una temperatura ultima es alcanzada.

- (2.17) Expresión para el cálculo de la temperatura última.
- (2.18) Expresión para el cálculo del incremento de temperatura con respecto del tiempo de calentamiento.
- (2.19) Expresión para el cálculo del tiempo de calentamiento.
- (2.20) Expresión para el cálculo de la temperatura última a 760[°C].
- (2.21) Expresión para el cálculo del tiempo total de calentamiento.
- (2.22) Expresión para el cálculo de la potencia por unidad de longitud.

DESHMUKH Yoshvant V. (2005). Industrial Heating. Taylor & Francis Grove, 2005.

CAPÍTULO 3

ACOPLAMIENTO DE LA INSTRUMENTACIÓN AL HORNO DE INDUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

Como se vio en el capítulo anterior se llevó a cabo la selección del micro horno de inducción junto con la determinación de algunos parámetros importantes del equipo, como su potencia y las dimensiones de la bobina.

En este tercer capítulo se describirá la instrumentación del micro horno de inducción. Se puede dividir en dos partes:

Análisis del diagrama de instrumentación: Aquí se describe por medio de un diagrama y una tabla la forma en que está compuesta la instrumentación del horno, se explica cómo se adquirieron sus componentes, y posteriormente se describe a detalle cada uno de estos.

Acoplamiento de la instrumentación: Aquí se describe como se fueron interconectando y probando cada uno de los elementos de la instrumentación, para posteriormente acoplarlos al micro horno y formar un solo sistema.

3.1 ANÁLISIS DEL DIAGRAMA DE INSTRUMENTACIÓN.

Por medio de la Figura 3.1 y la Tabla 3.1 se presentan los elementos que componen el diagrama para la instrumentación del micro horno de inducción, posteriormente se exponen las razones que motivaron la propuesta de este diagrama.

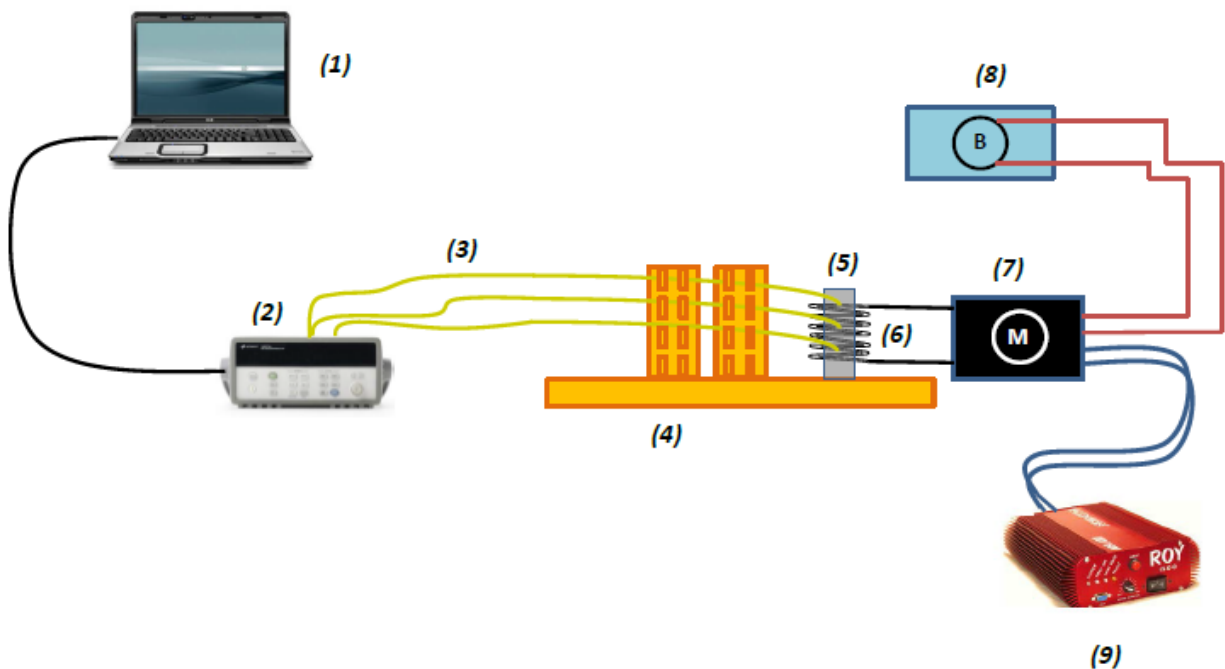


Figura 3.1. Diagrama de la instrumentación del micro horno de inducción.

1 Laptop	6 Bobina Inductora
2 Adquisidor de datos 34792A	7 Matchbox
3 Termopar tipo K	8 Bomba
4 Estructura soporte	9 Micro horno de Inducción Royer
5 Probeta Metálica	

Tabla 3.1. Lista de elementos que componen la instrumentación del micro horno de inducción.

Se puede observar que la instrumentación cuenta con un adquisidor de datos, el cual ya se había adquirido anteriormente con el fin de emplearse para otros proyectos que se están llevando de manera paralela a este, y que están relacionados con la energía solar concentrada y el calentamiento híbrido.

Aunque no se realizó una matriz de selección donde se comparó el adquisidor contra un arduino o un microprocesador son claras las ventajas que tiene el adquisidor sobre los otros dos dispositivos, como es el caso que no se requiere saber programar para poder utilizarlo, además de que es muy versátil por su amplio rango de magnitudes físicas que puede medir con gran precisión. Otra ventaja importante del adquisidor se encuentra en que posee un conjunto de amplificadores que permiten conectarle termopares al equipo sin necesidad de hacer un ajuste o calibración en ellos.

Los termopares que se utilizaron son tipo K, y se conectaron tres a la probeta metálica para medir su temperatura por medio de las señales de voltaje que mandaron al adquisidor de datos.

En el mismo diagrama se indica con el número cuatro la estructura soporte, que es el sistema encargado de contener a la probeta y evitar que cualquier otra superficie se dañe por el calor que pueda producir la probeta cuando aumente su temperatura. Se propuso este sistema al diagrama de instrumentación porque se contaba con la habilidad de manejar softwares de diseño como solidworks y autocad, en donde se desarrolló el ensamble de las piezas de dicho sistema y posteriormente se convirtió a un archivo DXF para que se hiciera el corte laser en madera MDF.

En cuanto al sistema de enfriamiento se ilustra en el diagrama bajo el número ocho la bomba que hace fluir el agua a través de la bobina inductora, su importancia de este sistema consiste en evitar que la bobina se ponga al rojo vivo y sus espiras comiencen a juntarse provocando un corto circuito en el equipo, y por tanto un mal funcionamiento. La propuesta de la bomba surgió del cuestionario que se envió al fabricante antes de adquirir el micro horno, en donde se preguntó si el equipo contaba con algún sistema de enfriamiento, por lo que el fabricante sugirió acoplar una bomba a la bobina. Aunque no se desarrolló algún proceso de selección para la bomba más adelante se presentara el cálculo del flujo que debe tener para poder disipar el calor en la bobina de inducción.

A continuación se describe a detalle cada uno de los elementos que conforman el diagrama de instrumentación y posteriormente como se desarrolló su acoplamiento con el micro horno de inducción.

3.1.1 ADQUISIDOR DE DATOS.

Uno de los elementos clave para la instrumentación del horno es el adquisidor de datos, el cual es un dispositivo electrónico que registra datos por medio de sensores conectados externamente. Un sensor convierte un fenómeno físico como la temperatura de una habitación, la intensidad de una fuente de luz o la fuerza aplicada a un objeto en una señal eléctrica que se puede medir, dependiendo del tipo de sensor, su salida eléctrica puede ser un voltaje, corriente u otro atributo eléctrico que varía con el tiempo. Algunos adquirentes se comunican con un ordenador personal y utilizan software específico para ver y analizar los datos recogidos, mientras que otros tienen un dispositivo de interfaz local (teclado, pantalla LCD) y puede ser utilizado como un dispositivo independiente [3.1]. El hardware del adquisidor funciona principalmente como un dispositivo que digitaliza señales analógicas entrantes para que una PC pueda interpretarlas. Los tres componentes principales de un dispositivo adquisidor de datos son:

- Circuito de acondicionamiento de señales.
- Convertidor analógico-digital (ADC).
- Bus de PC.

ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES.

Las señales del exterior pueden contener ruido lo cual distorsiona la medición o pueden ser muy débiles para medirse directamente. El circuito de acondicionamiento de señales manipula una señal de tal forma que sea apropiada para entrar al convertidor analógico-digital. Este circuito puede incluir amplificación, atenuación, filtrado y aislamiento [3.2].

CONVERTIDOR ANALÓGICO-DIGITAL (ADC).

Las señales analógicas de los sensores deben ser convertidas en digitales antes de ser manipuladas por el equipo digital como una PC. Un ADC es un chip que proporciona una representación digital de una señal analógica en un instante de tiempo. En la práctica, las señales analógicas varían continuamente con el tiempo y un ADC realiza muestras periódicas de la señal en un intervalo de tiempo definido. Estas muestras son transferidas a una PC a través de un bus, donde la señal original es reconstruida desde las muestras en software [3.3].

BUS DE PC.

Los adquirentes de datos se conectan a una PC a través de una ranura o puerto. El bus de la PC sirve como la interfaz de comunicación entre el adquirente y la PC para pasar instrucciones y datos medidos. Los adquirentes son compatibles con los buses más comunes como USB, PCI, PCI Express y Ethernet, recientemente han llegado a estar disponibles para comunicación inalámbrica Wi-Fi [3.4].



Figura 3.2. Partes de un sistema adquirente de datos [3.5].

ADQUISIDOR 34792A

Entre los requerimientos de la experimentación se encuentra acoplar varios sensores para obtener mediciones de temperatura en diferentes zonas de una probeta, que se calienta por medio del horno; es por ello que se requirió buscar un equipo adecuado para la medición de la temperatura.

Debido a que este proyecto está de manera paralela con otros proyectos que también emplean el calentamiento de los metales, se observa de ellos que los equipos más usuales para la medición de temperatura son los circuitos MAX31855, los cuales digitalizan las señales de los termopares tipo K-, J-,N-,T-,S-,R- o E-. Sin embargo, para fines prácticos del experimento se decidió usar el adquirente 34792A (Figura 3.3) el cual a diferencia del circuito MAX31855 no requiere de una programación previa para poder manejar las mediciones obtenidas, además de que el adquirente cuenta con interfaz gráfica y un software "Bench Link Data Logger" los cuales permiten mostrar y recopilar datos más fácil para posteriormente ser analizados.

La unidad 34792A cuenta con un multímetro interno que le permite medir varias señales distintas como son: Temperatura, Voltaje DC y AC, Resistencia, Frecuencia y Periodo, Corriente DC y AC. El multímetro digital se encuentra instalado dentro del chasis de la unidad dejando tres ranuras libres donde se insertan los módulos, los cuales cuentan con 20 canales para uso general (Figura 3.4).



Figura 3.3. Adquisidor 34792A [3.6].

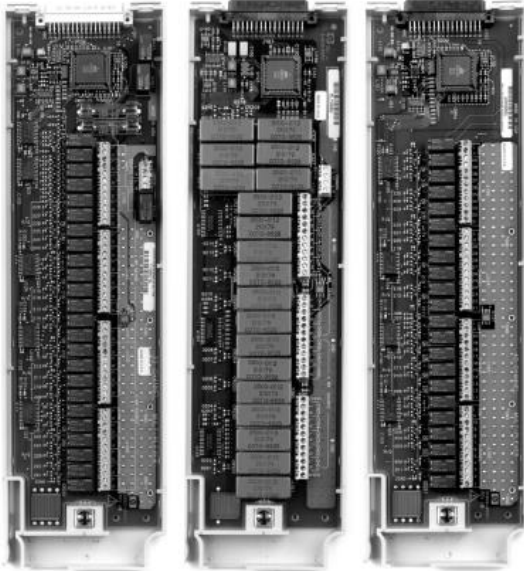


Figura 3.4. Módulos 34901A, 34902A, y 34908A [3.7].

3.1.2 TERMOPARES.

Un termopar es la unión de dos alambres conductores con diferente composición. El termopar genera una fuerza electromotriz (fem) que depende de la diferencia de temperatura de la junta caliente o de medida y la unión fría o de referencia, así como la composición del termopar. Siempre que se someta a temperaturas fluctuantes a la unión de un termopar, se producirán cambios en el valor del voltaje generado (del orden de mV) y que depende de la temperatura en la junta caliente o de medición [3.8]. Debido al tipo de aplicación y el rango de temperaturas que maneja, se seleccionó el termopar tipo K. Este tipo de termopares se utilizan con mucha frecuencia en los hornos de tratamientos térmicos. El termopar tipo K se compone de una aleación de 90% de níquel y 10% de cromo en su conductor positivo: 94% de níquel, 2% de aluminio, 3% de manganeso y 1% de silicio en su componente negativo (Figura 3.5). Puede usarse para medir temperaturas de hasta 1200 °C. Para llevar a cabo las pruebas experimentales se requirieron de cuatro termopares por lo cual, se hicieron las soldaduras respectivas para cada tramo de cable tipo K en los laboratorios de la DIMEI (Figura 3.6).



Figura 3.5. Se muestra la composición por elemento del cable termopar tipo K. Elemento Positivo: Níquel-Cromo (Cromel), Elemento Negativo: Níquel-Aluminio (Alumel) [3.9].



Figura 3.6. Preparación de los cables para termopar tipo K con soldadura de gas argón.

3.1.3 ESTRUCTURA SOPORTE.

Este sistema consiste en un marco de madera MDF¹ con las características necesarias para contener a la probeta metálica, mantener fijos el Matchbox y una serie de termopares a la hora de hacer las pruebas. A continuación se muestra una vista isométrica de la estructura soporte propuesta en el software de diseño (Figura 3.7).

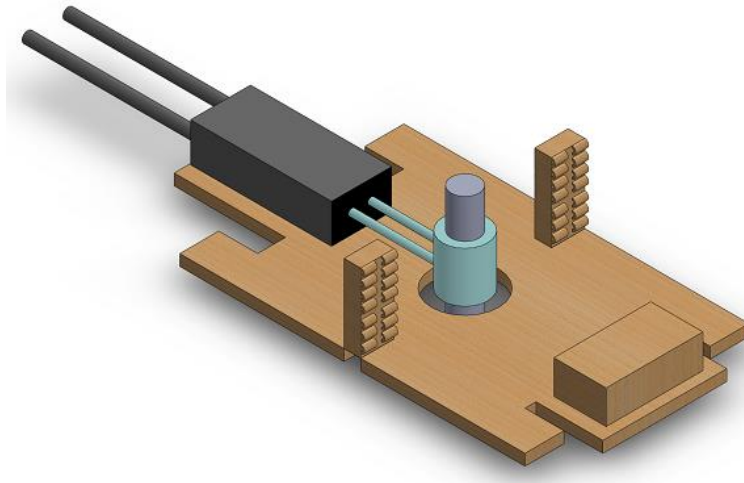


Figura 3.7. Vista Isométrica de la estructura soporte de probeta, Matchbox y termopares.

Hasta el momento se tienen algunas condicionantes para la estructura, a través de las cuales se pudo proponer un diseño que se adapte a ellas y que si se requiere hacer cambios en un futuro no se modifique drásticamente toda la estructura.

Las condiciones importantes que se tienen desde un principio es que la estructura contenga a una probeta metálica con dimensiones de 100 x 25.4 [mm] (L x D), además de que la probeta alcanzara altas temperaturas. Por otra parte, en la estructura debe quedar fijo el Matchbox el cual pesa 400 [g] haciendo que se requiera una caja pequeña como contrapeso que pueda equilibrar el peso del Matchbox al otro extremo. Finalmente se debe contar con un sistema de sujeción para cuatro termopares de calibre 20 AWG.

Lo primero es que la base no podría ser un cuadrado simétrico, se debía considerar una superficie rectangular con un largo de 400 [mm] y un ancho de 200 [mm]. La base

¹ Madera de fibra de densidad media (MDF medium density fibreboard).

rectangular contará con ranuras en cada uno de sus lados y un orificio circular al centro para contener a la probeta cilíndrica (Figura 3.8).

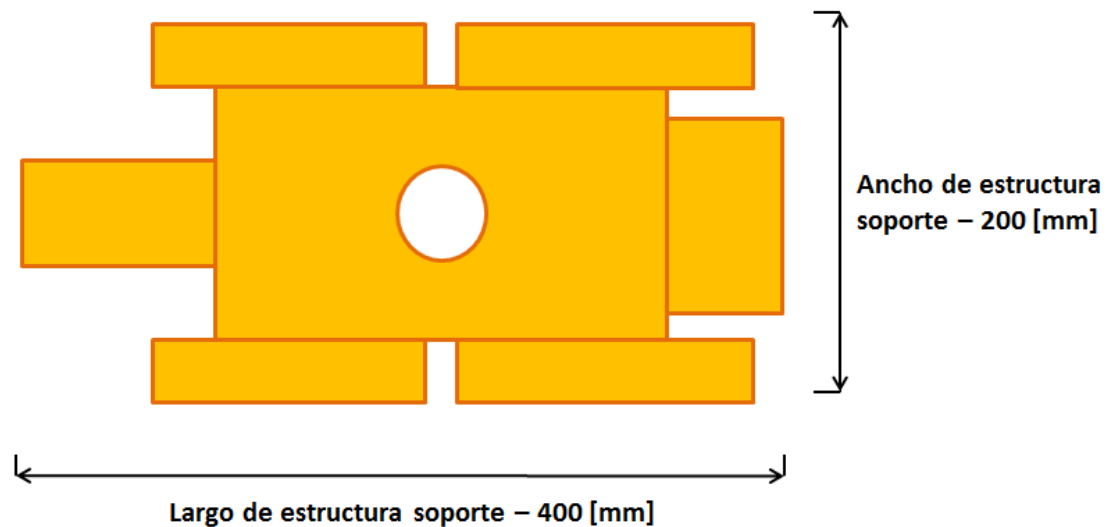


Figura 3.8. Diseño de la estructura soporte en una vista superior.

Teniendo presente que se requiere un sistema de sujeción para los termopares, se consideró la idea de manejar un par de postes rectangulares con una altura de 100 [mm] y un ancho de 25 [mm] (Figura 3.9), cada poste puede sujetar cuatro termopares y los postes se ensamblan en las ranuras laterales de la base.

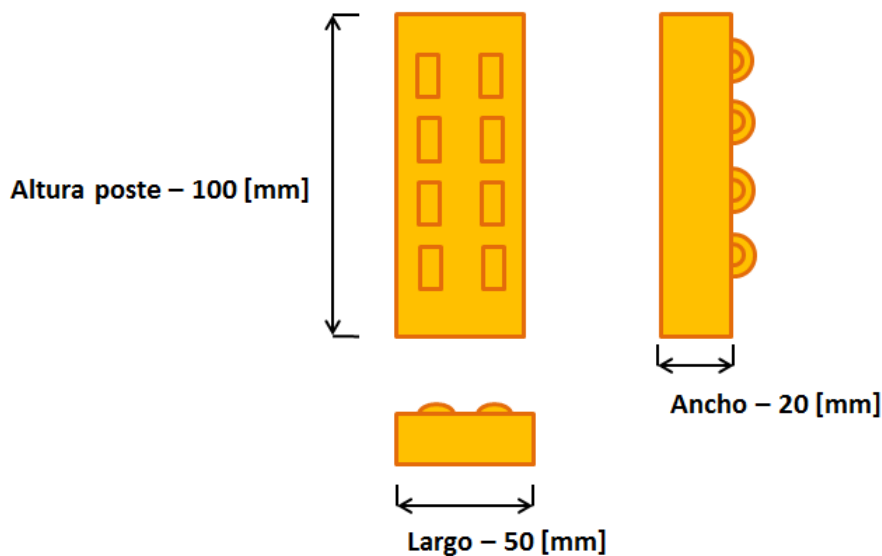


Figura 3.9. Diseño de los postes para sujeción de termopares en vistas frontal, lateral y superior.

En cuanto a la sujeción de la probeta se anexaron cuatro soportes centrales que se encuentran por debajo de la estructura soporte y que están fijados por medio de cuatro ángulos metálicos de 45° que se atornillan a la base con sus respectivas tuercas. Cada soporte central está conformado por un tornillo con una punta de yeso en su extremo para poder soportar las altas temperaturas que pueda alcanzar la pieza metálica. Las puntas de yeso se fabricaron con dos tuercas unidas que están enrolladas con vendajes de yeso y se atornillan fácilmente en cada tornillo.



Figuras 3.10 y 3.11. Vista lateral de los soportes centrales (Izquierda). Vista inferior de los soportes centrales (derecha).

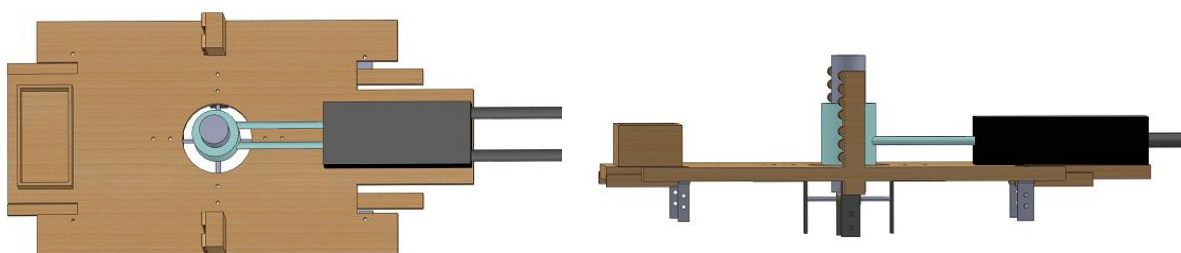
También se incluyó en la parte superior de la estructura soporte una caja con dimensiones 80 x 40 [mm] (L x A) de modo que cuando se fijó el Matchbox en un extremo de la estructura la caja puede servir de contrapeso en el otro extremo.



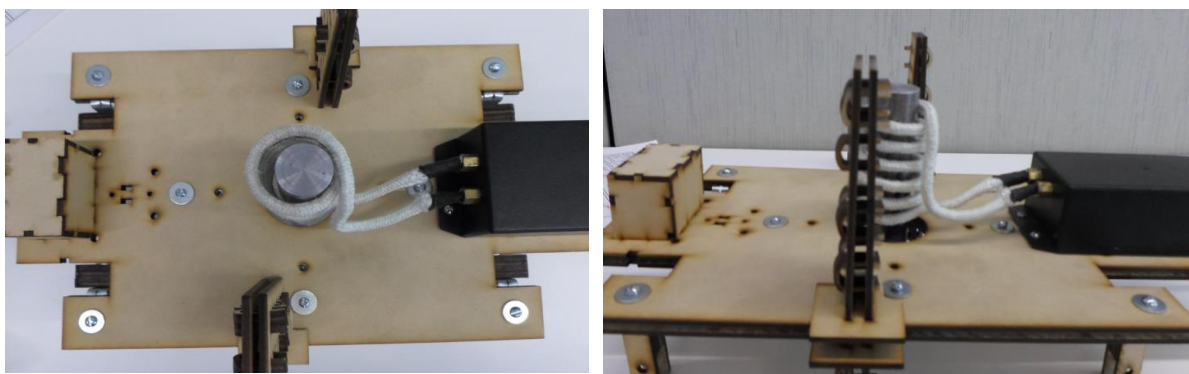
Figura 3.12. Vista isométrica de caja para contrapeso.

Con estas ideas planteadas se pudo completar la construcción de la estructura soporte a manera de que se cumplieran con los requerimientos anteriormente descritos y sea más fácil llevar a cabo las pruebas con el horno de inducción y las probetas metálicas. Sin embargo, se verá más adelante que no todas las ideas resultaron lo más convenientes para el correcto funcionamiento de la estructura.

A continuación se muestra la estructura soporte en el software de diseño y su ensamble final (Figuras 3.13 a 3.16):



Figuras 3.13 y 3.14. Vista en planta (Izquierda) y vista lateral (derecha) de la estructura soporte en software de diseño.



Figuras 3.15 y 3.16. Imagen de la estructura soporte ensamblada (Izquierda). Se aprecian los postes para la sujeción de termopares (derecha).

3.1.4 GEOMETRÍA Y DIMENSIONES DE LA PROBETA.

Para la realización de los experimentos se cuenta con una probeta cilíndrica fabricada en acero al carbono AISI 1010 [3.10]. La probeta tiene 25.4 [mm] de diámetro, la parte cilíndrica una longitud de 100 [mm] (Figura 3.17). En cuanto a la colocación de los termopares la probeta tiene una distribución de cuatro barrenos con un diámetro de 1.6 [mm].

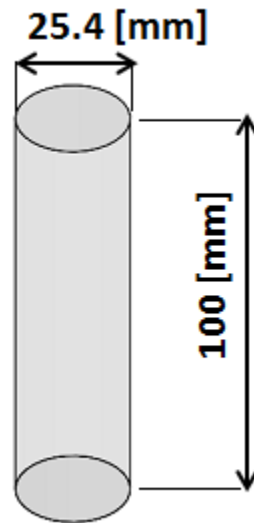
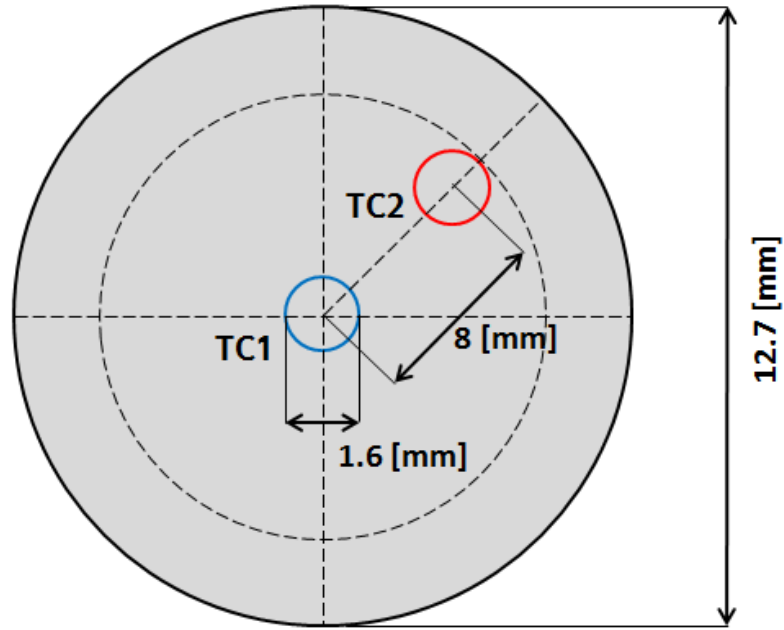
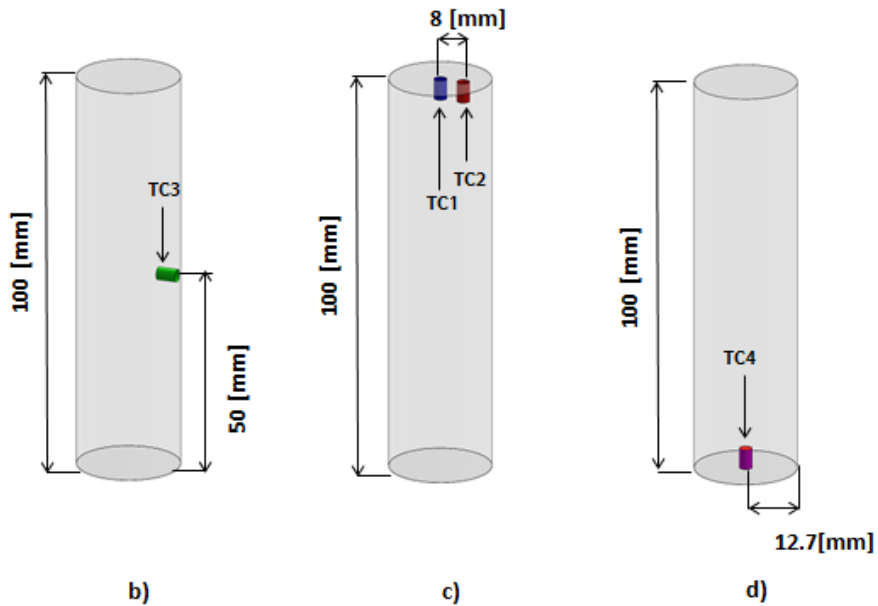


Figura 3.17. Probeta de prueba de geometría cilíndrica.

La distribución de los barrenos se presenta en la Figura 3.18. La parte superior de la probeta está instrumentada con dos termopares; uno colocado en el eje longitudinal y el otro fuera del eje, ambos separados a una distancia de centros de 8 [mm] (Figuras 3.18a y 3.18c). La superficie cilíndrica está instrumentada con un termopar a una distancia de 50 [mm] desde la parte superior de la probeta (Figura 3.18b). Finalmente, la base inferior está instrumentada con un termopar ubicado en el eje longitudinal (Figura 3.18d).



a)



b)

c)

d)

Figura 3.19. Esquema de la probeta cilíndrica: a) Vista superior con la distribución de los barrenos para los termopares TC1 y TC2; b) Vista isométrica del barreno para el termopar TC3; c) Vista Isométrica con la distribución de los barrenos para los termopares TC1 y TC2; d) Vista isométrica del barreno para el termopar TC4.

3.1.5 SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE LA BOBINA INDUCTORA.

El sistema de enfriamiento está compuesto por una bomba sumergible que impulsa agua (contenida en un recipiente) a través de un tubo con una longitud de 1.2 [m] y 6.35 [mm] de diámetro interno, que se conecta a la bobina inductora por medio del Matchbox, el agua circula al interior de la bobina para disminuir su temperatura y posteriormente regresa a un recipiente (Figura 3.20).

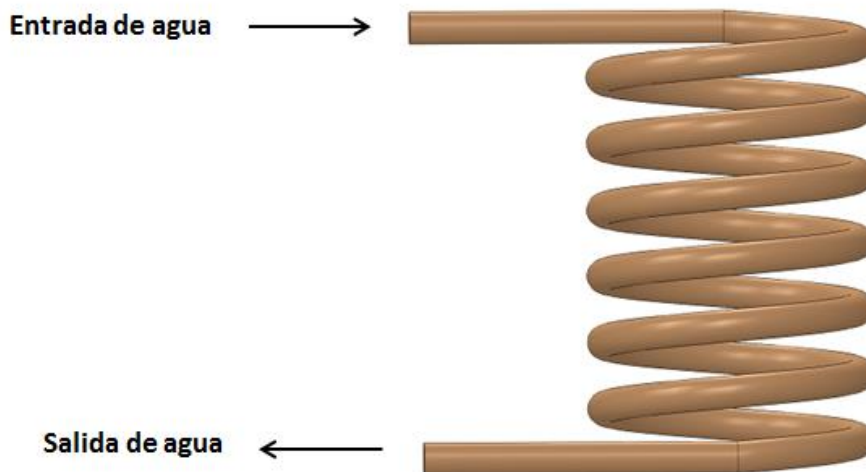


Figura 3.20. Vista lateral de la bobina inductora donde se ve la dirección de entrada y salida del agua.

En cuanto a lo que se refiere a los requerimientos del sistema de enfriamiento, el fabricante del horno no especifica flujo ni calidad del agua, solo hace sugerencia de interconectar una bomba al Matchbox para evitar que la bobina inductora se llegue a sobrecalentar y se tenga que apagar el equipo. Debido al tipo de experimentos y su duración, la bobina inductora no requiere de un flujo continuo de agua inclusive el horno puede mantenerse encendido sin que circule agua al interior de la bobina, sin embargo, el énfasis que se pone en este sistema de refrigeración es para poder disipar aproximadamente 2.4 [KW] y de esta forma asegurar el correcto funcionamiento del horno.

Para determinar el flujo de agua requerido se utilizó la ecuación de flujo volumétrico en la cual se sustituyó el valor dado por el fabricante para el diámetro interno del tubo que se interconecta al Matchbox, por lo que el cálculo del flujo se obtuvo de la siguiente forma:

$$\dot{G} = (A)(V)(\text{Cos}\theta) \quad (3.1)$$

Como el flujo es perpendicular al área A el ángulo θ es igual a 0° por lo que la Ec. 3.1 se simplifica:

$$\dot{G} = (A)(V) \quad (3.2)$$

Sección transversal del tubo:

$$A = \frac{(\pi)(D_i^2)}{4} = \frac{(\pi)(6.35 \times 10^{-3} [\text{m}])^2}{4} = 3.16 \times 10^{-5} [\text{m}^2]$$

Sustituyendo la sección transversal en la Ec. 3.2:

$$\dot{G}_a = (3.16 \times 10^{-5} [\text{m}^2]) (1.9 [\text{m/s}]) = 6.01 \times 10^{-5} [\text{m}^3/\text{s}]$$

El resultado obtenido se convierte a litros por minuto:

$$\begin{aligned} \dot{G}_a &= \frac{(6.01 \times 10^{-5} [\text{m}^3/\text{s}]) (1000 [\text{l}])}{(1[\text{m}^3])} = 0.06 [\text{l/s}] \\ &= \frac{(0.06 [\text{l/s}]) (60 [\text{s}])}{(1[\text{min}])} = 3.6 [\text{l/min}] \end{aligned}$$

Donde:

- \dot{G} = Flujo volumétrico [m^3/s].
- \dot{G}_a = Flujo volumétrico de agua [l/min].
- A = Sección transversal del tubo [m^2].
- V = Velocidad del fluido = $1.9 [\text{m/s}]$.
- θ = Ángulo entre la dirección perpendicular a A y la dirección del flujo = 0° .
- D_i = Diámetro interno del tubo = $6.35 \times 10^{-3} [\text{m}]$.

Con la ecuación de flujo volumétrico se obtuvo que el flujo de agua que puede circular a través de la bobina inductora es de 3.6 [l/min], para éste flujo se determinó utilizar una bomba sumergible con un rango de operación de 3 a 5.2 [l/min].

Se emplea una bomba sumergible modelo AQUA5W con motor eléctrico de 3450 [RPM]. Este equipo es el modelo más pequeño que hay, sin embargo el diámetro de descarga y el flujo de agua se acoplan bien al Matchbox y a la bobina inductora (Figura 3.21).



Figura 3.21. Imagen de la bomba sumergible para el sistema de enfriamiento [3.11].

A continuación se presentan los resultados obtenidos en esta sección (Tabla 3.2) y una especificación con las características de la bomba (Tabla 3.3):

Resultados	
Sección transversal del tubo	$3.16 \times 10^{-5} [\text{m}^2]$
Flujo volumétrico de agua	3.6 [l/min]

Tabla 3.2. Se aprecian los resultados obtenidos para el flujo de agua permisible en la bobina inductora.

Especificación de la Bomba	
Tipo de Bomba	Sumergible
Flujo Normal / Max.	3.0 / 5.2 LPM
Altura Optima	0.7 m
Diámetro de Succión	12.7 mm (0.5 pulg)
Diámetro de Descarga	6.4 mm (0.25 pulg)
Materiales	
Material del cuerpo	Plástico
Material del Impulsor	Plástico
Motor	
Tipo de Motor	Eléctrico
Potencia	5W
RPM	3450
Voltaje	120 V
Dimensiones	
Largo x Ancho x Alto	0.04 x 0.04 x 0.02 m
Peso	0.15 kg

Tabla 3.3. Datos de la bomba sumergible.

3.2 ACOPLAMIENTO DE LA INSTRUMENTACIÓN AL HORNO DE INDUCCIÓN.

En esta etapa se interconectaron los elementos para el acoplamiento de la instrumentación con el micro horno de inducción. Estos elementos se aprecian en la figura 3.22. En la interconexión de los elementos se corroboró como es el caso de la estructura soporte que el sistema de sujeción para contener la probeta funcionara correctamente y que cuando se realicen las pruebas no se desajusten las probetas. Por otro lado, se hicieron corridas en el software del adquisidor de datos para corroborar que los termopares estén sensando la temperatura y llegue la señal de forma adecuada a la computadora. También se encendió la bomba sumergible y se revisó que no existieran fugas en las interconexiones del Matchbox y de la bobina.

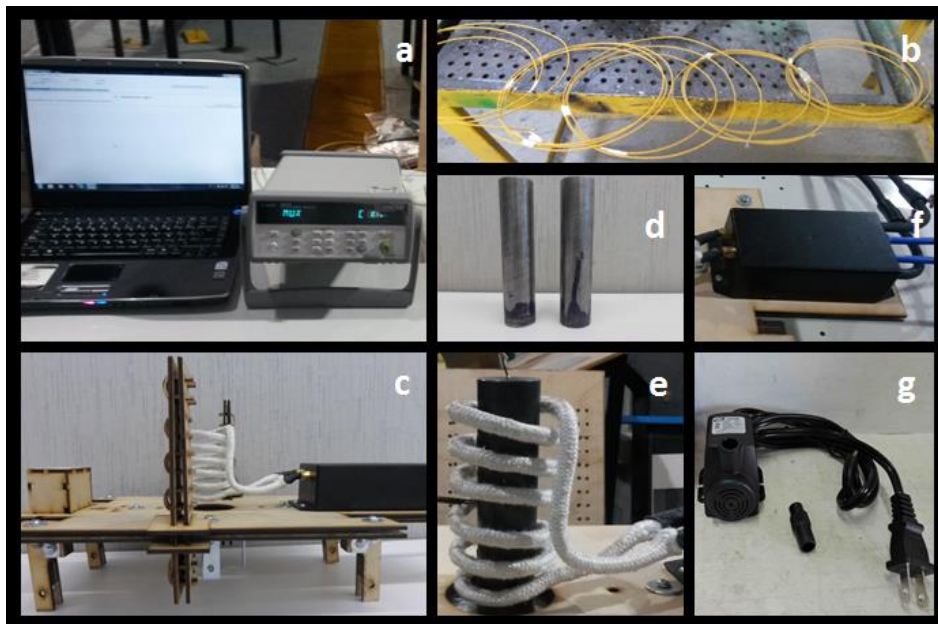


Figura 3.22. Fotografías de los elementos para el acoplamiento del micro horno de inducción. a) Sistema adquisidor de datos. b) Termopares tipo K. c) Vista lateral de la estructura soporte. d) Probetas. e) Bobina inductora. f) Matchbox. g) Bomba sumergible.

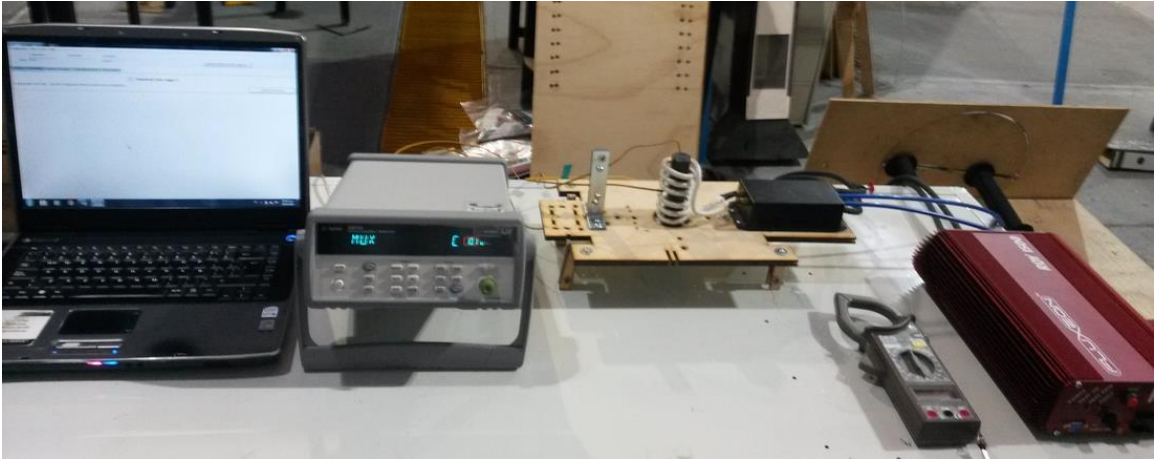


Figura 3.23. Fotografía del micro horno de inducción acoplado.

Hay que mencionar que en el acoplamiento se requirió de mucho cuidado para ensamblar cada componente, considerando las dimensiones de cada elemento y realizando los ajustes necesarios de manera que los componentes puedan funcionar. Por ejemplo, se puede señalar que los postes para sujetar los termopares se tuvieron que omitir en el acoplamiento (figura 3.24.) debido a que los termopares no quedaban totalmente ajustados a la probeta de pruebas.

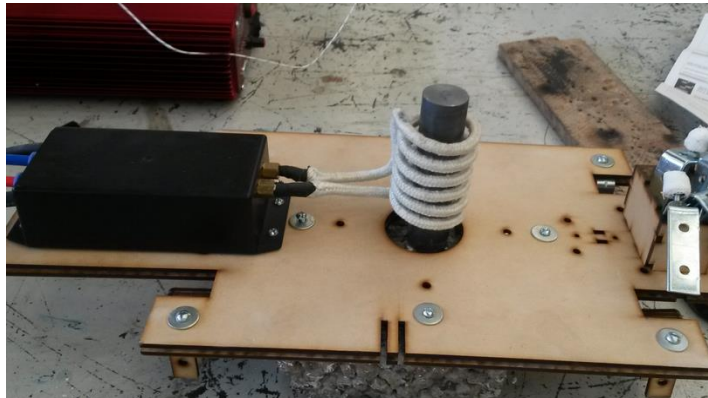


Figura 3.24. Omisión de los postes para sujeción de termopares.

Una solución temporal para la sujeción de los termopares fue atornillar a la estructura dos perfiles en “L” tal como se observa en la figura 3.25 de modo que cuando los termopares quedaran en medio de los perfiles, se pudieran fijar por medio de dos tornillos para que

no se muevan a la hora de hacer las pruebas. También es importante destacar que se omitió un segundo barreno (TC2) en la cara superior de la probeta por lo que el total de barrenos para los termopares fue de tres.



Figura 3.25. Sujeción de termopares por medio de perfiles en “L”.

3.3 REFERENCIAS DE LAS FIGURAS.

[3.1] Finaltest. (2018). ¿Qué es un Data logger?. Marzo 20, 2018, de Finaltest Sitio Web:

<http://www.finaltest.com.mx/product-p/art-4.htm>

[3.2], [3.3], [3.4],[3.5] NI. (2018). ¿Qué es Adquisición de Datos?. Marzo 20, 2018, de NI Sitio Web:

<http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>

[3.6], [3.7] Keysight Technologies. (2014). Keysight 34970A/34972A Data Acquisition/Switch Unit. User's Guide. Edition 4.

[3.8] Universidad Autónoma Metropolitana. (2014). "Tipo de Termopares". Marzo 20, 2018, de Universidad Autónoma Metropolitana Sitio Web:

<http://www.uam.es/docencia/labvformat/labvformat/Anexo/termopar2.htm>

[3.9] ELECTRONICA INDUSTRIAL MONCLOVA, S. DE R.L. DE C.V. (2017). Cables de Extensión para Termopar. Marzo 20, 2018, de ELECTRONICA INDUSTRIAL MONCLOVA, S. DE R.L. DE C.V. Sitio Web:

<http://docplayer.es/63748344-17-cables-de-extension-para-termopar.html>

[3.10] Aceros Luchriher. (2018). Acero SAE 1008 y 1010. Marzo 20, 2018, de Aceros Luchriher Sitio Web:

<http://acerosluchriher.mx/portfolio-posts/acero-sae-1008-y-1010/>

[3.11] Evans Ocotlan. (2018). Bombas Sumergibles. Marzo 20, 2018, de Evans Ocotlan Sitio Web:

<http://evansocotlan.com/es/bombas-sumergibles/105-aqua5w.html>

3.4 REFERENCIAS DE LAS ECUACIONES.

(3.1), (3.2) Expresión para el cálculo del flujo volumétrico.

Giles Randal V. (2005). Mecánica de los Fluidos e Hidráulica. Mc Graw Hill, 2005.

CAPÍTULO 4

PUESTA A PUNTO DEL SISTEMA

INTRODUCCIÓN

Una vez que se logró hacer la interconexión y acoplamiento de la instrumentación con el micro horno descrita en el capítulo anterior, lo siguiente fue poner a punto el sistema construido y comenzar con la etapa experimental.

Lo que se persiguió con la puesta a punto de este sistema fue poder observar el comportamiento del micro horno de inducción, y así validar su correcto funcionamiento y su capacidad para poder calentar piezas de manera rápida y sencilla, con esto se tiene la intención a futuro de poder acoplarle un concentrador solar de lente de fresnel.

Con el concentrador solar y el micro horno de inducción se construirá un sistema de calentamiento híbrido, aprovechando la inducción electromagnética y la energía solar concentrada (ESC). Este sistema servirá como banco de pruebas para que los alumnos y profesores sean capaces de experimentar, tanto con calentamiento inductivo como con la ESC, y concluir que son alternativas posibles de aprovechar en un futuro.

A continuación se muestran las razones por las cuales se propuso este sistema, su justificación, la metodología empleada para ponerlo a punto, así como sus respectivas ventajas. También se muestran algunas pruebas experimentales realizadas en donde se podrá apreciar los cambios en las variables del sistema y las temperaturas de trabajo obtenidas.

4.1 CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA.

La configuración del sistema se armó con componentes que se acoplaron de forma individual, sin necesidad de adquirir algún kit o elemento adicional con el fabricante del micro horno de inducción. Esta configuración se propuso con el fin de poder realizar pruebas experimentales con el micro horno, y así poder observar su rendimiento y capacidad de calentamiento. Posteriormente con las referencias de operación del equipo, se desarrollara un proyecto en particular donde se produzca un calentamiento híbrido por medio de dos equipos, un micro horno de inducción y un concentrador solar.

4.2 PUESTA A PUNTO DEL SISTEMA.

Para la puesta a punto del sistema se desarrolló de manera previa el acoplamiento del micro horno de inducción con los elementos descritos anteriormente, por lo que el siguiente paso será probar el rendimiento del equipo bajo condiciones reales para que se realicen pruebas y experimentos, también de ser posible observar algún cambio perceptible en alguna variable dada y guardar registro para ser analizada.

A continuación se presenta el procedimiento efectuado para la puesta a punto del sistema:

1. Se ajusta la probeta dentro de la estructura soporte sujetándola con las puntas de yeso, dejando una longitud expuesta de 70 mm de la parte cilíndrica.
2. Se colocan los termopares en los barrenos de la probeta revisando que correspondan a la profundidad especificada y se etiquetan debidamente para identificarlos durante los experimentos.
3. Se acciona la bomba y se ajusta para que el flujo circule a través de la bobina inductora.
4. Las puntas (positiva y negativa) de los termopares se conectan a la tarjeta de adquisición de datos.
5. Se introduce la tarjeta al adquisidor y se enciende para sintonizar los canales de lectura de los termopares.
6. Una vez encendido el adquisidor se sincroniza con la computadora por medio del software Bench Link Data Logger y se inicia lecturas de temperatura.

7. Se enciende el micro horno de inducción y se gira la perilla a una tercera parte de la potencia.
8. Cuando el micro horno se enciende se miden valores de corriente y voltaje con el multímetro de pinzas para verificar el correcto funcionamiento del equipo.
9. Cuando los termopares indiquen que la probeta alcanza una temperatura de 500° C se apaga el micro horno y se retira la probeta.

4.3 JUSTIFICACIÓN DEL SISTEMA.

La configuración del sistema tiene como referencia un proyecto que pertenece a la misma línea de investigación que se realiza por parte de CENISA y del departamento de Termofluidos, en donde el elemento clave del proyecto es un concentrador solar con lente de fresnel, que está instrumentado con un termopar y una tarjeta arduino para poder sensar la temperatura que se produce en la zona focal del concentrador.

Tomando como base la estructura del proyecto anterior y estudiando los recursos que se tenían disponibles, se pudo plantear que nuestro sistema debería contar con: una fuente emisora de calor, un adquisidor de datos, termopares y un dispositivo capaz de sujetar las piezas que fuesen calentadas por la fuente. Lo siguiente fue definir con el cliente el tipo de fuente de calor, en este caso se especificó que debía ser un micro horno de inducción.

La selección del micro horno de inducción se hizo analizando las características principales de cuatro equipos propuestos, posteriormente se evaluó a cada equipo por medio de una matriz de decisión y se asignó una puntuación. El equipo que cumplió con el rango de frecuencias, potencia y ciclo de operación entre otros requerimientos del cliente fue el micro horno de inducción Royer.

Para la adquisición de datos no se realizó ninguna selección de equipo como en el caso del micro horno Royer, aquí simplemente se aprovechó como recurso un adquisidor de datos que tenía el departamento de Termofluidos y que se le solicitó como préstamo para realizar este proyecto.

Los termopares se realizaron soldando secciones de cable para termopar tipo K, este tipo de termopar se eligió por tener un rango de temperaturas amplio (- 200 a 1200 [°C]) en comparación con otros tipos, además de que su aplicación es para hornos de tratamiento térmico.

El dispositivo que sostiene las piezas a calentar solo es un prototipo que está empleado como banco de pruebas y que a futuro se puede ir perfeccionando, por lo que no se eligieron materiales que requiriesen un gran esfuerzo para dar la forma deseada.

El material de la estructura soporte es madera MDF, y la técnica empleada para darle forma es corte laser. Las piezas que estarán sujetas en la estructura soporte son probetas metálicas de acero al carbono AISI 1010 con acabado espejo en una de sus caras, estas probetas no están estandarizadas ni se realizó ningún ensayo destructivo, su fin es observar su comportamiento y la temperatura que puedan alcanzar con el micro horno de inducción Royer.

4.4 VENTAJA DEL SISTEMA Y SUS COMPONENTES.

Principales ventajas del sistema:

- 1.- El sistema se puede montar y desmontar con facilidad ya que todos sus componentes se acoplan de forma individual, sin estar soldados o fijados permanentemente.
- 2.- Se pueden acoplar otros elementos al sistema dependiendo las pruebas a realizar.
- 3.- No ocasiona problemas de contaminación.

Principales ventajas de los componentes:

- 1.- El micro horno de Inducción Royer puede calentar piezas sin estar en contacto con ellas en periodos de tiempo cortos que van desde pocos segundos hasta minutos.
- 2.- Hay un control de la temperatura de la bobina inductora, por lo que el sobrecalentamiento puede ser evitado por medio del flujo de agua que suministra una bomba hacia el interior de la bobina, o un circuito eléctrico de protección que bloquea el aumento de potencia del micro horno.
- 3.- A diferencia de otros equipos el micro horno Royer puede operar a más de una frecuencia en un rango de 60 a 80 [KHz].
- 4.- El adquisidor de datos cuenta con la facilidad de ser operado sin necesidad de tener conocimiento en algún lenguaje de programación.
- 5.- El adquisidor puede medir una amplia gama de magnitudes físicas con gran precisión.
- 6.- El material de la estructura soporte está hecha de madera MDF lo que le permite ser ligera y no se degrada al estar expuesta a la luz solar.

4.5 PRUEBA EXPERIMENTAL 1. CARACTERIZACIÓN DEL HORNO DE INDUCCIÓN.

Esta prueba experimental es la primera realizada utilizando el micro horno de inducción donde el tema de interés es caracterizar el horno de manera que se obtengan los parámetros de voltaje, corriente y potencia para tomarlos como base y continuar con las pruebas posteriores.

4.5.1 CONDICIONES DE LA PRUEBA EXPERIMENTAL 1.

La prueba se realizó el día lunes 23 de abril del 2018; entre las 6:00 p.m. a 6:45 pm. La temperatura ambiente que se registró a lo largo del experimento varía entre los 25°C y 26 °C aproximadamente.

Se procedió a colocar el Matchbox y la bobina en la base soporte y posteriormente se accionó la bomba sumergible, a continuación se energizó el micro horno y se dio comienzo con la caracterización.

Para esta prueba se acoplaron al horno de inducción los elementos mostrados en la Figura 4.1.

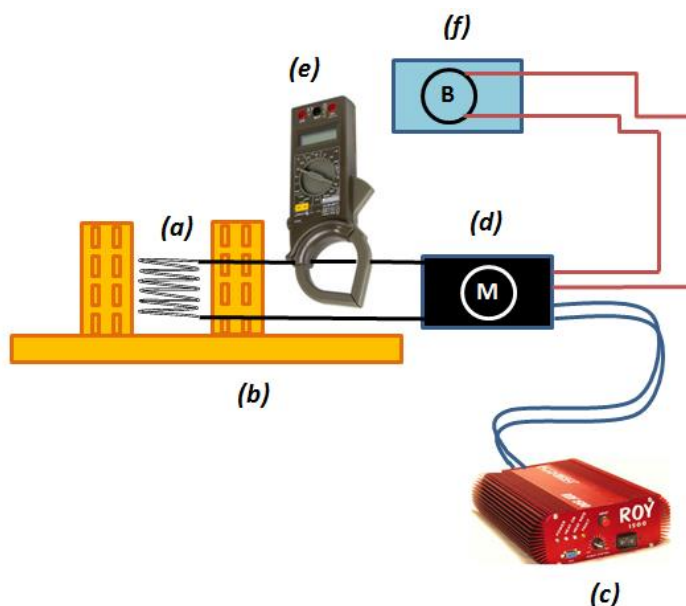


Figura 4.1. Diagrama de instrumentación para el primer experimento. a) Bobina inductora, b) Base soporte, c) Micro horno de inducción, d) Matchbox, e) Multímetro de pinzas, f) bomba sumergible.

La prueba experimental inició cuando se puso en marcha el horno de inducción encendiendo el led del horno y ajustando la perilla a su primera graduación (Figura 4.2).

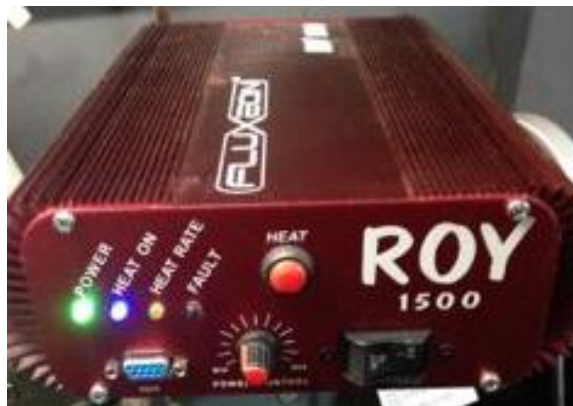


Figura 4.2. Encendido del micro horno de inducción.

Para la caracterización del horno se empleó un multímetro de pinzas con el cual se fueron obteniendo los valores de corriente y voltaje (Figura 4.3).



Figura 4.3. Micro horno de inducción y multímetro de pinzas.

4.5.2 DESARROLLO DE LA PRUEBA EXPERIMENTAL 1.

Una vez que el micro horno de inducción se encendió y estaba estable se procedió a realizar la primera lectura de la corriente que circula en la bobina inductora. Para esta prueba experimental el intervalo de tiempo entre cada lectura fue de un minuto por lo que al terminar una lectura se dejó pasar un minuto y a continuación se ajustó la perilla a la siguiente graduación, esto con el fin de registrar cada valor de corriente y potencia en cada una de las graduaciones del micro horno. Cuando la perilla se ajustó a la última graduación se registró su valor y se apagó el equipo.

A continuación se presenta una tabla con los valores obtenidos durante la prueba:

Evento	Tiempo [s]	Voltaje [V]	Corriente [A]
1	60	120	0
2	120	120	0
3	180	120	0.1
4	240	120	0.9
5	300	120	2.5
6	360	120	4
7	420	120	7
8	480	120	10
9	540	120	12
10	600	120	13
11	660	120	17.5
12	720	120	20

Tabla 4.1. Valores registrados durante la primera prueba experimental.

Después de que se registraron los valores experimentales el siguiente paso fue obtener las potencias para cada graduación del micro horno de inducción, por lo que los cálculos se realizaron con la ec. 4.1 y se registraron en la Tabla 4.2:

$$P = (V)(I) \quad (4.1)$$

Evento	Potencia [W]
1	0
2	0
3	12
4	108
5	300
6	480
7	840
8	1200
9	1440
10	1560
11	2100
12	2400

Tabla 4.2. Valores de potencia obtenidos durante la primera prueba experimental.

Por los resultados obtenidos en las Tablas 4.1 y 4.2 es posible concluir que los rangos de operación del sistema acoplado (ver Tabla 4.3) son los siguientes:

Rangos de Operación	
Potencia	100 - 2400 [W]
Corriente	1 - 20 [A]

Tabla 4.3. Rangos de operación del sistema acoplado.

4.5.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Con los datos obtenidos en la prueba se obtuvo la curva de la potencia suministrada con respecto al tiempo lo cual se puede observar por medio de la Figura 4.4.

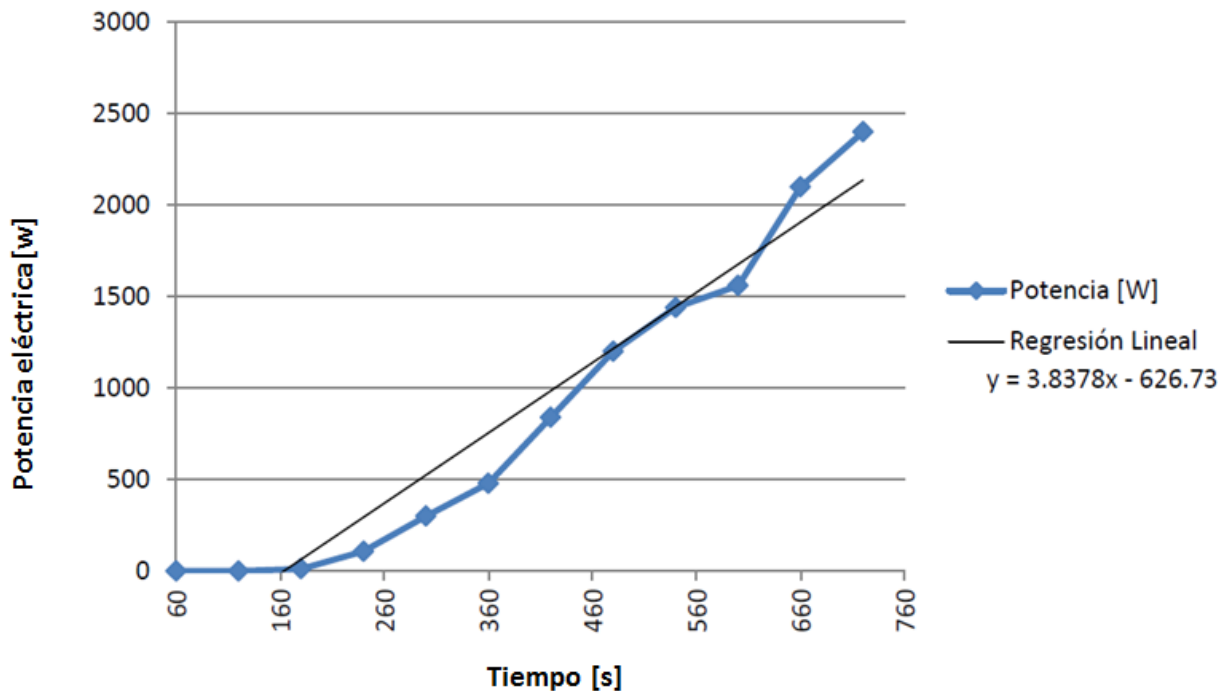


Figura 4.4. Comportamiento de la potencia durante la primera prueba experimental.

En la Figura 4.4 se aprecia el comportamiento de la potencia durante toda la prueba, la curva de potencia obtenida es la curva que caracteriza al micro horno de inducción para cada una de sus graduaciones. Se puede observar que la curva presenta una pendiente positiva probando que la potencia aumenta con cada graduación del horno.

4.5.4 CONCLUSIONES DE LA PRUEBA EXPERIMENTAL 1.

A partir de completar la primera prueba experimental, se pudo concluir lo siguiente:

- El acoplamiento del micro horno de inducción con la base soporte, la bomba y la bobina resultó exitoso por lo que se puede volver a poner en marcha el sistema repetidas veces sin ninguna complicación.
- Se cotejaron los valores de la corriente obtenidos contra el valor indicado en la placa de datos del micro horno ($I = 10$ [A]) y se aprecia que el valor máximo obtenido ($I_{13} = 20$ [A]) supera al doble la corriente indicada en la placa de datos.

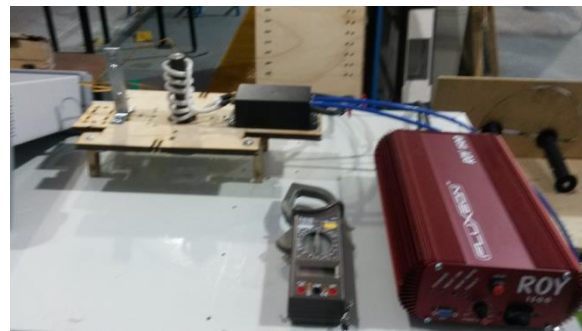
- Se propone que se realicen varias pruebas parecidas a la anterior para corroborar que la curva de potencia obtenida no cambia y de esta forma anexar una tabla al micro horno donde se indiquen las corrientes y potencias de cada graduación, esto con el fin de facilitar futuras pruebas experimentales relacionadas con el calentamiento de metales.

4.6 PRUEBA EXPERIMENTAL 2. CALENTAMIENTO DE UNA PROBETA METÁLICA MEDIANTE EL HORNO DE INDUCCIÓN.

La segunda prueba experimental consiste en calentar una probeta metálica utilizando el micro horno de inducción. El tema de interés es observar el comportamiento de las temperaturas en puntos específicos de la probeta a lo largo de la prueba, con ello se intentó exponer los posibles usos y aplicaciones para el calentamiento de metales con este dispositivo.

4.6.1 CONDICIONES DE LA PRUEBA EXPERIMENTAL 2.

La prueba se realizó el día lunes 7 de mayo del 2018; entre las 6:30 p.m. a 7:00 pm. La temperatura ambiente que se registró a lo largo de la prueba varía entre los 23°C y 24 °C aproximadamente.



Figuras 4.5 y 4.6. Micro horno de inducción acoplado para la segunda prueba experimental (izquierda) y estructura soporte con la probeta de prueba (derecha).

Antes de iniciar se coloca la probeta de prueba dentro de la estructura soporte y se ajusta con las puntas de yeso de manera que se deje una longitud expuesta de 70 mm (Figura 4.7). Luego se fijaron los tres termopares que se emplearon para obtener los valores de temperatura que alcanzaría la probeta a lo largo del experimento (Figura 4.8).

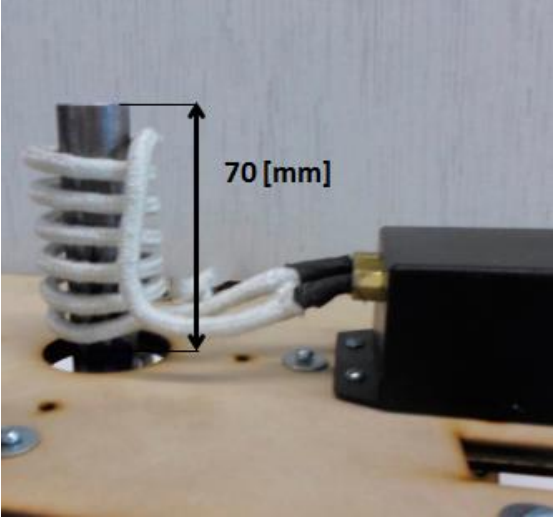


Figura 4.7. Longitud expuesta de la probeta de prueba.

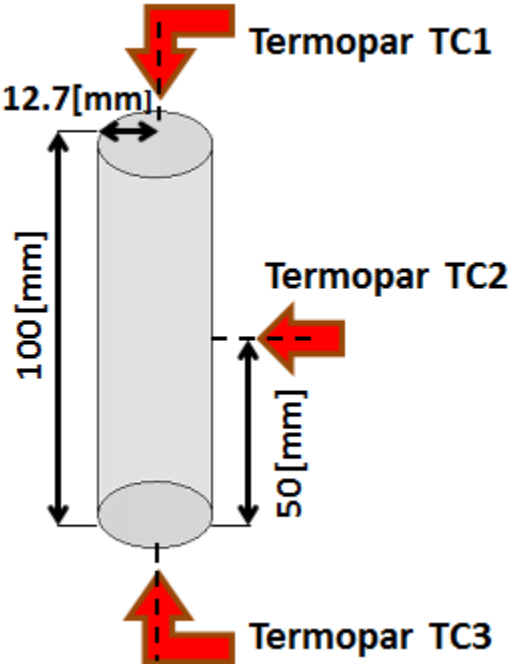
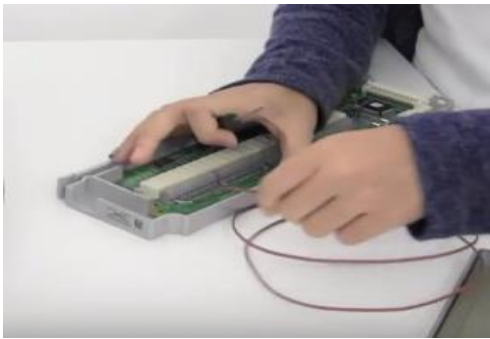


Figura 4.8. Esquema para la ubicación de los termopares TC1, TC2 y TC3.

A continuación se removió con un desarmador la cubierta del módulo y se conectaron las dos terminales de los termopares (positiva y negativa) al módulo, posteriormente se cerró la cubierta y se insertó en la parte trasera del adquisidor de datos (Figuras 4.9 y 4.10).



Figuras 4.9 y 4.10. Conexión de termopar en módulo del adquisidor (izquierda) y vista inferior del adquisidor de datos (derecha) [4.1].

Lo siguiente fue encender el ordenador y se puso en funcionamiento el adquisidor de datos con el software Bench Link Data Logger.

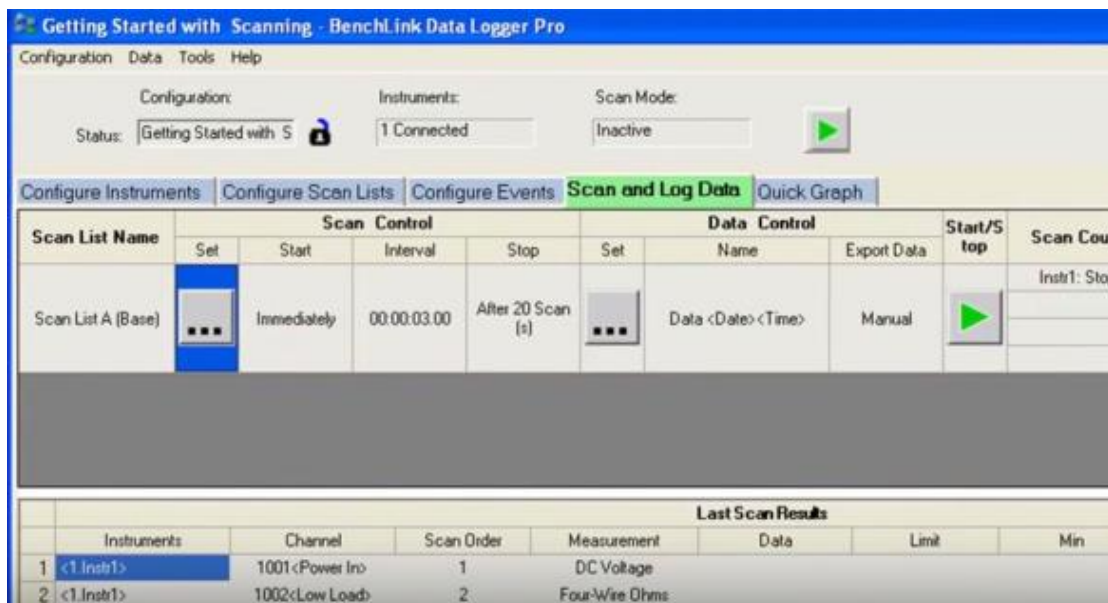


Figura 4.11. Imagen del software donde se muestra la interfaz de configuración [4.2].

4.6.2 DESARROLLO DE LA PRUEBA EXPERIMENTAL 2.

Se comenzó por encender el micro horno de inducción junto con la bomba sumergible, después se ajustó la perilla del horno a su tercera graduación y a partir de este momento el adquirente comenzó a comunicar al ordenador los valores de temperatura que estaban alcanzando los termopares en los puntos que tenían contacto con la pieza.

En breve se aprecia cómo la probeta empieza a aumentar su temperatura y en cuestión de aproximadamente 2 minutos y medio su temperatura alcanzó más de 200 °C de acuerdo a lo registrado en el adquirente de datos (Figura 4.12).

Name: Data 8199 2391 5/07/2018 18:46:39
Owner: Mando
Comments:
Acquisition D 07/05/2018 18:46
&Instrument: 34972A Address: Modules: Slot1:
Scan Control Start Action: Immediately Instrument Aborted
Scan Time 101 (C) 102 (C) 103 (C) 104 (C)

1	18:46:39:171	26.168	26.426	24.973	23.31
2	18:46:49:162	26.016	26.273	25.03	23.347
3	18:46:59:162	25.768	26.046	25.015	23.283
4	18:47:09:162	25.722	25.957	25.084	23.325
5	18:47:19:162	31.611	34.49	25.786	23.317
6	18:47:29:162	41.938	47.189	30.315	23.337
7	18:47:39:162	54.527	61.316	37.402	23.343
8	18:47:49:162	68.227	76.631	43.289	23.325
9	18:47:59:162	84.182	91.827	44.518	23.363
10	18:48:09:162	101.156	106.397	47.677	23.348
11	18:48:19:162	118.73	120.922	52.81	23.384
12	18:48:29:162	136.271	135.816	59.246	23.351
13	18:48:39:162	153.055	151.565	65.081	23.416
14	18:48:49:162	170.236	165.967	72.037	23.407
15	18:48:59:162	185.947	180.654	80.855	23.419
16	18:49:09:162	197.861	194.537	89.807	23.446
17	18:49:19:162	207.932	209.673	98.176	23.476

Figura 4.12. Temperaturas registradas durante la segunda prueba.

A continuación se hizo un ajuste en la perilla del horno y se colocó en la sexta graduación, debido a las temperaturas que se estaban generando durante la prueba se hizo la tarea de monitorear el recubrimiento de los termopares, ya que con esto se evitó daños en el aislamiento térmico.

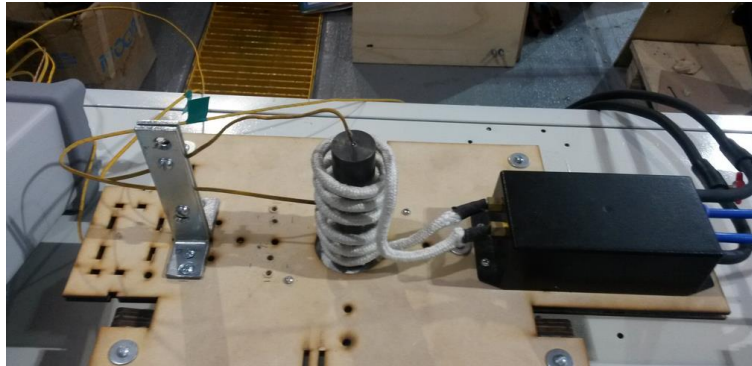


Figura 4.13. Fotografía donde se muestran los termopares en contacto con la pieza de prueba.

4.6.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS.

La prueba experimental que dio inicio a las 6:30 pm aproximadamente alcanzó su punto más alto a las 6:52 pm y a partir de ahí se comenzó a comunicar una temperatura de 500 °C (Figura4.14).Hasta este punto se consideró que se tenía una cantidad de mediciones considerable, razón por la cual se apagó y desmontó el micro horno.

```

Name:      Data 8199 2391 5/07/2018 18:46:39
Owner:     Mando
Comments:
Acquisition D      07/05/2018 18:46
&Instrument: 34972A      Address:  Modules:  Slot1:
Scan Control Start Action:      Immediately Instrument Aborted
Scan      Time      101 (C)      102 (C)      103 (C)      104 (C)
35 18:52:19:162      420.865      459.17      212.519      23.511
36 18:52:29:162      432.031      475.976      220.158      23.616
37 18:52:39:162      443.496      487.211      227.835      23.55
38 18:52:49:162      457.954      500.819      235.548      23.512
    
```

Figura 4.14. Temperaturas alcanzadas durante el punto más alto de la prueba.

De los valores reportados por el adquisidor de datos (Figuras 4.12 y 4.14) es posible concluir que los rangos de temperatura de trabajo del sistema para una probeta cilíndrica (ver Tabla 4.4) son los siguientes:

Rangos de Temperatura	
Cara superior	30 - 450 [°C]
Superficie Cilíndrica	30 - 500 [°C]
Cara inferior	30 - 230 [°C]

Tabla 4.4. Rangos de temperatura de trabajo del sistema para una probeta cilíndrica.

Las mediciones de temperatura obtenidas en la prueba se almacenaron en el registro del adquisidor de datos y después fueron analizadas por medio de un ordenador. Con las mediciones de temperatura se pudieron obtener las curvas de temperatura con respecto al tiempo para cada termopar (Figura 4.15). Posteriormente, se hizo una regresión lineal para cada curva, éstas se pueden observar en las Figura 4.16, 4.17 y 4.18.

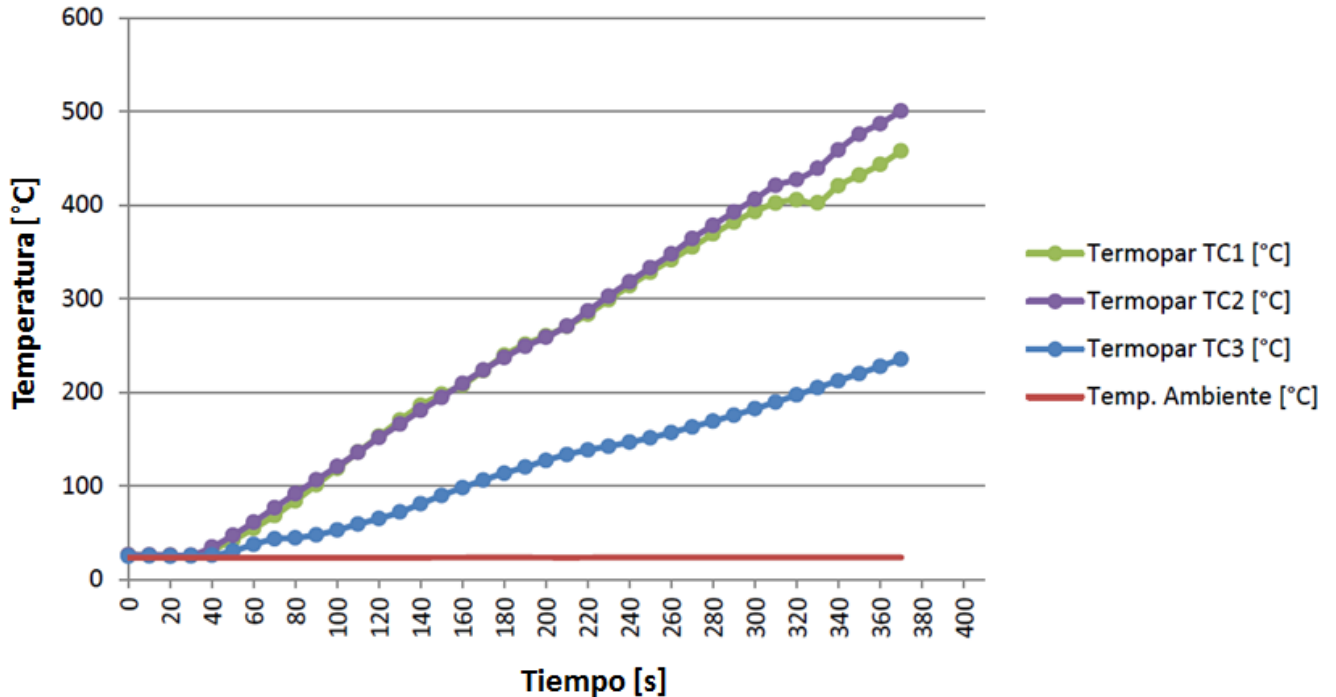


Figura 4.15. Curvas de temperatura de los termopares TC1, TC2 y TC3.

En el gráfico de la Figura 4.15 se muestran las curvas de temperatura de los termopares (TC1, TC2 Y TC3) que se encuentran en contacto con la probeta cilíndrica, se aprecia una gran similitud entre el comportamiento de los termopares TC1 y TC2, estos termopares se encuentran ubicados en la cara superior de la probeta (TC1) y en la superficie cilíndrica de la probeta (TC2). Los resultados obtenidos en esta prueba indican que el micro horno puede emplearse en piezas pequeñas que requieran de un tratamiento superficial.

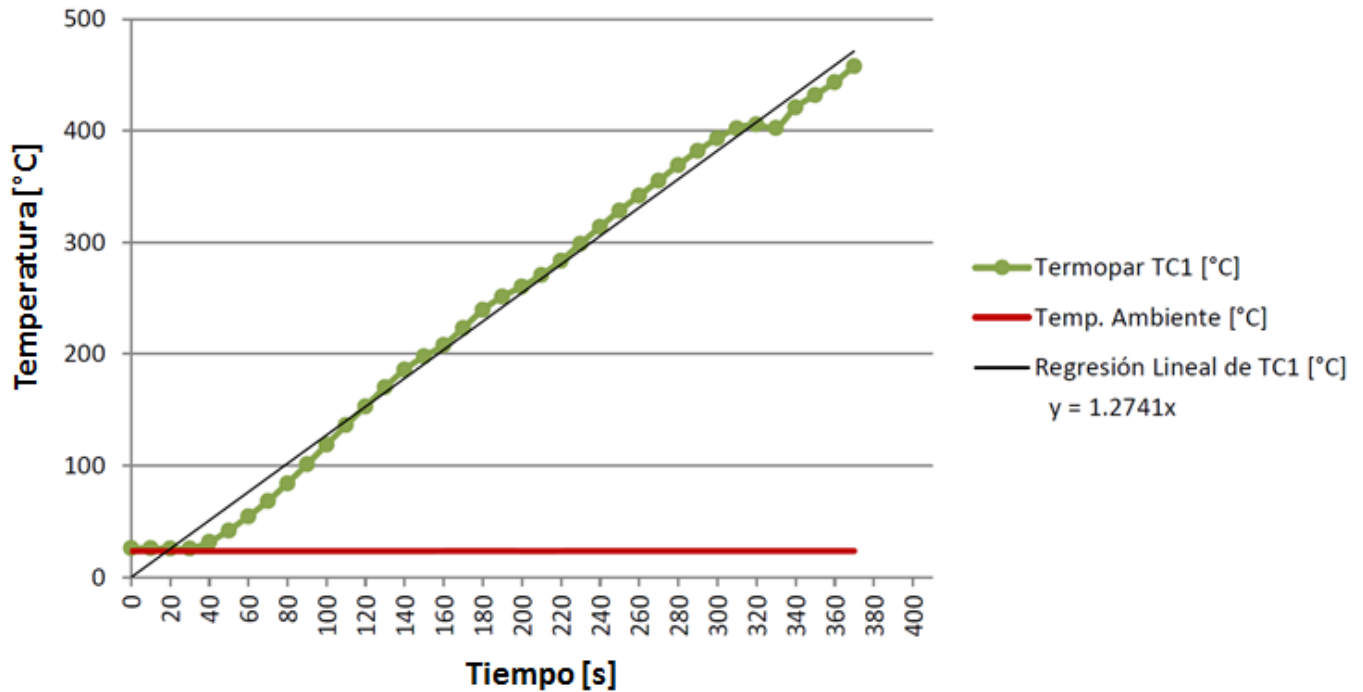


Figura 4.16. Curva de temperatura para el termopar TC1 con regresión lineal.

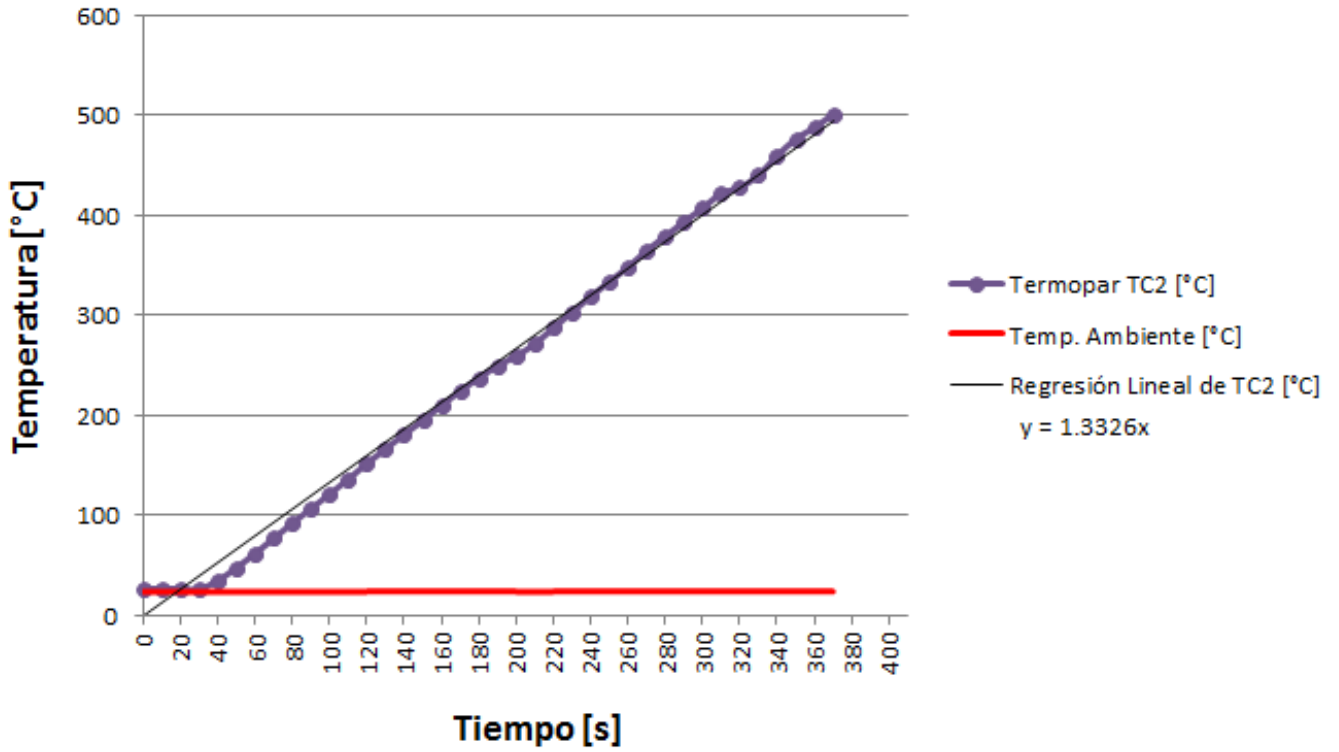


Figura 4.17. Curva de temperatura para el termopar TC2 con regresión lineal.

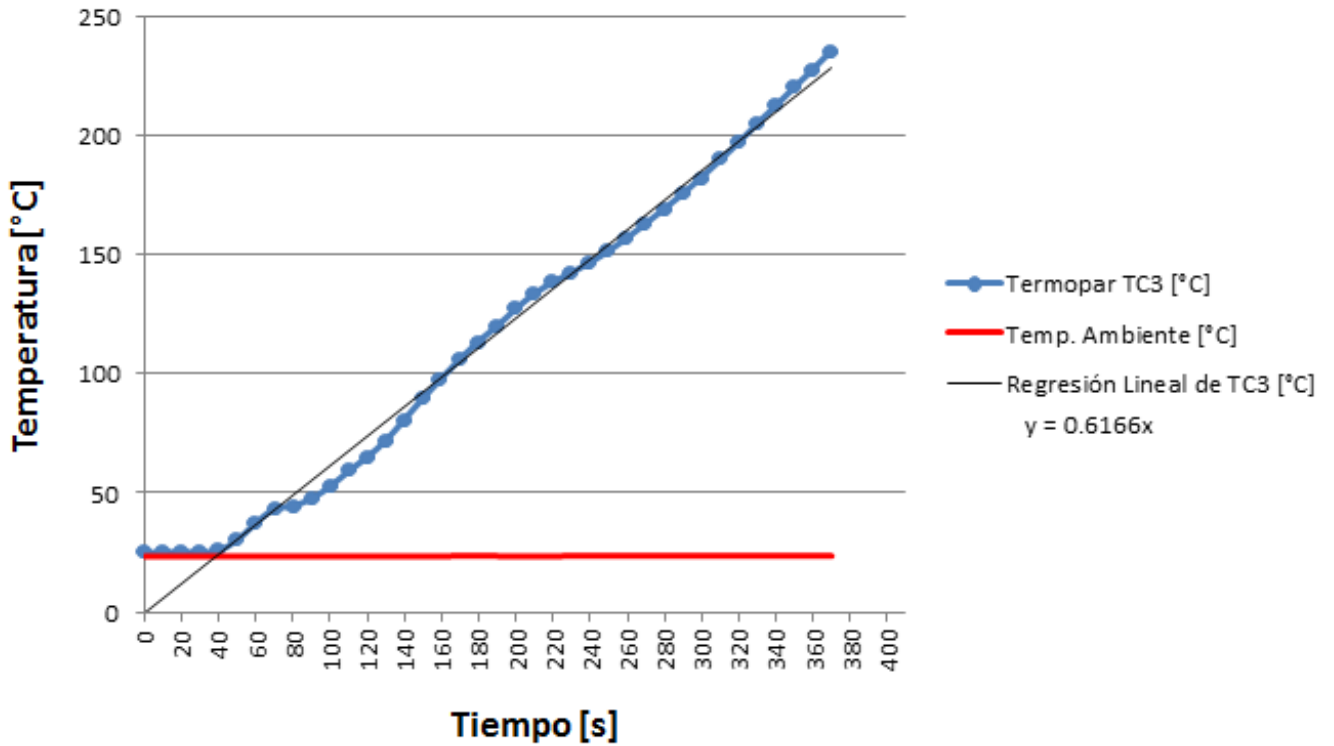


Figura 4.18. Curva de temperatura para el termopar TC3 con regresión lineal.

Uno de los primeros efectos mostrados en las Figuras 4.16 a 4.18 se aprecia durante los primeros 40 segundos de la prueba, cuando las curvas de los termopares presentan una temperatura constante, esto indica que durante ese intervalo de tiempo la temperatura en la probeta se está homogenizando. También se puede apreciar que las curvas obtenidas en el experimento tienen pendiente positiva y se asemejan a un comportamiento lineal por lo cual se hizo una regresión lineal para cada curva.

Las pendientes obtenidas para las curvas de temperatura de los termopares prueban que hay una razón de cambio en la temperatura que es positivo y que varía en cada zona de la probeta [4.3]. Las razones de cambio obtenidas para los termopares TC1, TC2 y TC3 son de: 1.27 [°C/s], 1.33 [°C/s] y 0.61 [°C/s] respectivamente. Las razones de cambio de los termopares TC1 y TC2 indican que la temperatura aumentó en más de 1 [°C] sobre segundo en la parte superior de la probeta, más sin embargo en la base de la probeta la temperatura aumentó en menos de 1 [°C] sobre segundo.

4.6.4 CONCLUSIONES DE LA PRUEBA EXPERIMENTAL 2.

A partir de completar la segunda prueba experimental, se pudo concluir lo siguiente:

- El adquirente de datos resultó útil para conjuntar y manejar las mediciones obtenidas de manera que no se presentó ruido en los gráficos realizados.
- También resultó de manera exitosa el sistema de sujeción para la probeta debido a que durante todo el experimento se mantuvo fija a pesar de que su temperatura fue en aumento.
- El micro horno de inducción es capaz de calentar piezas metálicas de manera rápida y eficiente con lo que queda demostrado el potencial de este dispositivo para poder desarrollar tratamientos térmicos en piezas pequeñas.
- Se propone realizar pruebas experimentales donde se calienten varias probetas a distintas temperaturas de forma que después se analicen las probetas y se pueda desarrollar una práctica de laboratorio.

4.7 PRUEBA EXPERIMENTAL 3. SIMULACIÓN DEL CALENTAMIENTO DE UNA PROBETA METÁLICA.

La tercera prueba experimental consistió en realizar la simulación del calentamiento de una probeta metálica, esto es muy parecido a lo que se llevó a cabo en la segunda prueba pero con la variación de que los datos recabados fueron obtenidos de forma teórica. Con esta prueba se pretende obtener la curva de temperatura para el calentamiento de una probeta de acero al carbono y comparar las temperaturas alcanzadas y el tiempo de calentamiento contra los valores experimentales de la segunda prueba.

4.7.1 CONDICIONES DE LA PRUEBA EXPERIMENTAL 3.

Para esta prueba se consideró un bobina tipo solenoide con flujo axial a la que se acopló una carga metálica de 25.4 [mm] de diámetro. Las fórmulas para determinar el tiempo de calentamiento para una bobina con flujo axial se aprecian en la Tabla 4.2.

No.	Material	Formula	Diferencia de Temp. [°C]
1	Aluminio	$t = (3000)(D^2)$	$\Delta\theta = 30$
2	Cobre	$t = (2500)(D^2)$	$\Delta\theta = 40$
3	Latón	$t = (8000)(D^2)$	$\Delta\theta = 50$
4	Acero al carbón	$t = (50000)(D^2)$	$\Delta\theta = 40$
5		$t = (40000)(D^2)$	$\Delta\theta = 70$
6		$t = (35000)(D^2)$	$\Delta\theta = 100$

Tabla 4.2. Fórmulas para la determinación del tiempo de calentamiento en el interior de una bobina de flujo axial [4.4].

4.7.2 DESARROLLO DE LA PRUEBA EXPERIMENTAL 3.

Se comenzó por tomar de referencia la temperatura inicial obtenida en la segunda prueba experimental que fue de 26 [°C] y a partir de ahí se consideró que la temperatura fuera aumentando en intervalos de 40 en 40 [°C] (ver Tabla 4.3) esto con la finalidad de simular una diferencia de temperatura supuesta entre la superficie y el centro de la pieza.

Para una pieza metálica de cero al carbón y una diferencia de temperatura $\Delta\theta = 40[^\circ\text{C}]$ se usó la formula No.4 de la Tabla 4.2:

$$t = (50000)(D^2) \quad (4.2)$$

Donde:

- t = Tiempo de calentamiento [s].
- D = Diametro de la carga [m].
- $\Delta\theta$ = Diferencia de temperatura [°C].
- 50000 = Factor numérico (dependiente del material, diametro D y $\Delta\theta$) [s/m^2].

En la Tabla 4.3 se observan los valores calculados para el calentamiento con bobina de flujo axial.

Evento	Temperatura [°C]	Tiempo [s]
1	26	0
2	66	32.26
3	106	64.52
4	146	96.78
5	186	129.04
6	226	161.3
7	266	193.56
8	306	225.82
9	346	258.08
10	386	290.34
11	426	322.6
12	466	354.86

Tabla 4.3. Valores calculados para el calentamiento con bobina de flujo axial.

4.7.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Con los valores calculados en la Tabla 4.3 se procedió a graficar temperatura contra tiempo, la curva obtenida se observa en la Figura 4.19.

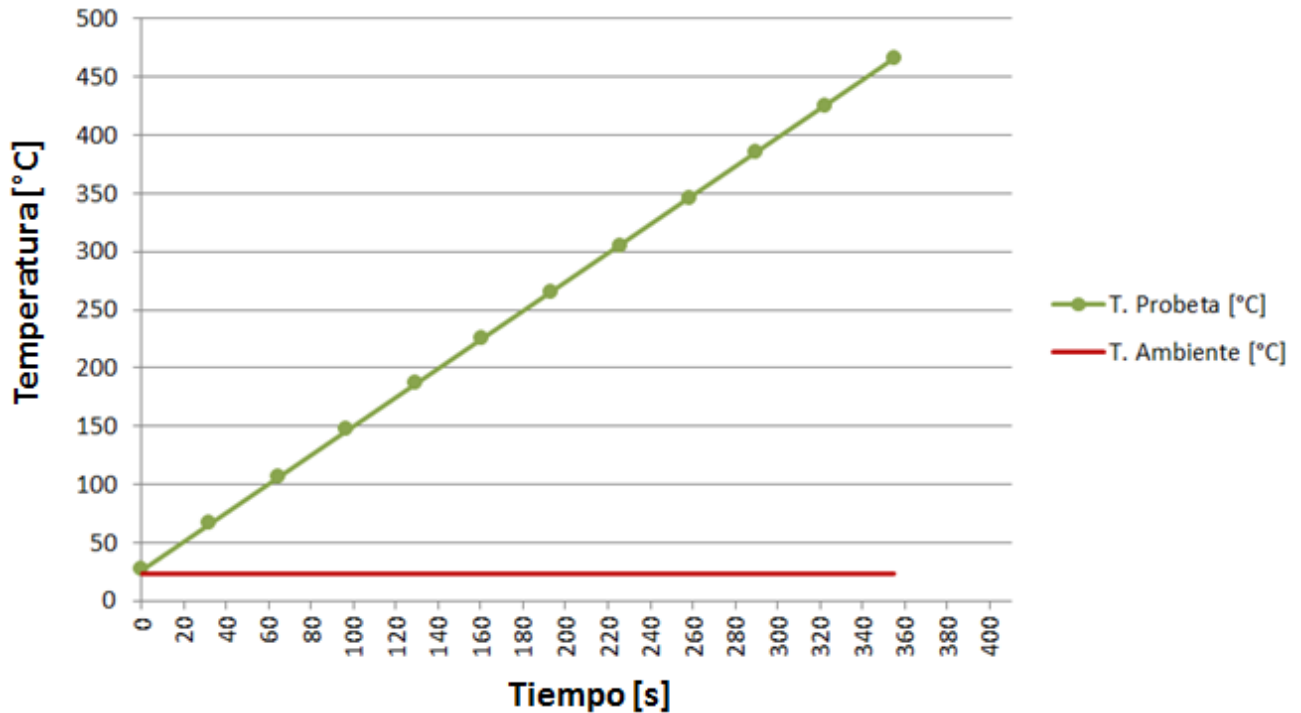


Figura 4.19. Curva de temperatura para el calentamiento con bobina de flujo axial.

En la Figura 4.19 se puede observar que la curva de temperatura tiene bastante similitud con la gráfica del termopar TC1, debido a que ambos gráficos son para el calentamiento superficial en una pieza metálica, sin embargo, para la curva obtenida en la tercer prueba no se apreció un intervalo donde la temperatura fuera constante ya que no hubo un tiempo de homogenización en la probeta y su tiempo de calentamiento fue de 10 segundos menos con respecto de la curva obtenida para el termopar TC1.

4.7.4 CONCLUSIONES DE LA PRUEBA EXPERIMENTAL 3.

A partir de completar la tercer prueba, se pudo concluir lo siguiente:

- Los resultados obtenidos en esta prueba resultaron satisfactorios ya que se pudieron mostrar las diferencias entre un proceso que se desarrolló de manera experimental y otro de forma teórica.

- Para esta prueba se requirió de un menor tiempo de calentamiento en comparación con el segundo experimento debido a que no se presentaron pérdidas de potencia.
- Por ser una prueba de carácter teórica, la temperatura siempre fue en aumento con respecto del tiempo y no se observó un tiempo de homogenización como en las pruebas experimentales.

4.8 REFERENCIAS DE LAS FIGURAS.

[4.1] Keysight Technologies. (2017). Test and Measurement Basics, de Youtube Sitio Web:

<https://www.youtube.com/watch?v=KMPaBW85P-Q&t=68s>

[4.2] Keysight Technologies. (2016). BenchLink Data Logger Pro, Basic Scan, de Youtube Sitio Web:

<https://www.youtube.com/watch?v=4e1vbhrJpRw>

[4.3] Universidad Nacional Rio Negro. (2012). “Razón de Cambio”, de Salones Virtuales Sitio Web:

http://recursos.salonesvirtuales.com/assets/bloques/Maria_ElenaRUIZ_Raz%C3%B3n_de_Cambio.pdf

[4.4] Astigarraga Urquiza Julio. (1994). “Hornos Industriales de Inducción: Teoría, Cálculo y Aplicaciones”. McGraw-Hill, España 1994.

4.9 REFERENCIAS DE LAS ECUACIONES.

(4.1) Expresión para el cálculo de la potencia.

Resnick, Halliday Robert David. (2002). FISICA (VOL.2) (5ª ED).

(4.1) Expresión para el cálculo del tiempo de calentamiento en el interior de una bobina de flujo axial.

Astigarraga Urquiza Julio. (1994). “Hornos Industriales de Inducción: Teoría, Cálculo y Aplicaciones”. McGraw-Hill, España 1994.

CONCLUSIONES

5.1 CONCLUSIONES.

En esta sección final del trabajo escrito se resumen los resultados obtenidos a lo largo de todo el proyecto:

- Considerando que en el primer capítulo se expuso como objetivo plantear como antecedentes una clasificación de los hornos industriales, y partiendo de esto poder llegar a un tipo de horno en particular que utiliza el fenómeno de la inducción para el calentamiento de los metales; se puede decir que se alcanzó este objetivo al introducirnos en los hornos de inducción.
- Partiendo de que en el segundo capítulo se planteó seleccionar un micro horno de inducción y calcular algunos parámetros como: dimensiones de la bobina, potencia requerida por el equipo y tiempo de calentamiento; se concluye que se alcanzaron estos objetivos, puesto que en principio se pudo seleccionar un equipo que cumple con los requerimientos del cliente y la relación costo beneficio es buena en comparación con otros equipos.
- También se logró obtener la geometría de la bobina inductora la cual cuenta con 6 espiras de vuelta con un diámetro interno de 25.4 [mm] cada una, y que en total forman una bobina con una altura de 100 [mm], la separación entre espira y espira es de 8.7 [mm]. Con esta geometría establecida se seleccionaron las piezas cilíndricas para efectuar el calentamiento cuyas dimensiones máximas y mínimas son: Diámetro = 25.4 [mm], longitud = 100 [mm]. Las probetas no están estandarizadas ya que el interés en estas piezas era observar la temperatura que podían alcanzar con el micro horno, el material utilizado para estas probetas fue un acero al carbono AISI 1010.
- La potencia que se calculó para obtener un calentamiento desde 27[°C] a 1000 [°C] de una probeta metálica con las características ya mencionadas es de: Potencia= 4 [kW] para un tiempo: $\tau = 2$ [min.]. Estos datos son teóricos ya que se observó en la parte experimental que los valores de potencia, tiempo de calentamiento y temperaturas de trabajo son otros.

- Revisando lo planteado en el tercer capítulo también se puede concluir que la instrumentación del micro horno de inducción se pudo llevar a cabo en su totalidad de forma que mediante un ordenador el dispositivo de adquisidor datos pudo informar la magnitud de las variables medidas. Por otro lado, el micro horno de inducción se acopló a varios dispositivos con las características enunciadas en este trabajo (termopares, estructura soporte, bobina, bomba, etc.) pudiendo concluir que el acoplamiento se realizó de manera adecuada y que, como resultado, se produjo un sistema capaz de funcionar y permanecer estable durante las pruebas experimentales.
- Para la puesta a punto se hizo una revisión previa de los elementos que se acoplaron al micro horno de inducción. De esta forma, se hicieron ajustes previos en la estructura soporte para que la probeta estuviera expuesta a una longitud conveniente dentro de la bobina inductora, además de que también se agregaron piezas adicionales para sujetar a los termopares y que siempre estuvieran en contacto con la probeta de prueba. Con esta revisión previa se pudo desarrollar un procedimiento para poder llevar a cabo la puesta en marcha del micro horno de inducción junto con el sistema acoplado.
- De la etapa experimental de este trabajo se puede concluir que las pruebas realizadas con el sistema acoplado resultaron exitosas ya que de ellas se pudieron obtener rangos de operación con los cuales se caracterizó el sistema y también permitieron observar cómo evolucionaba el comportamiento del horno. Para el sistema acoplado se obtuvo un rango de Potencia de 100 a 2400 [W] , y un rango de Corriente de 1 a 20 [A]. El rango de temperatura de trabajo obtenido para una probeta cilíndrica en la cara superior es de 30 a 450 [°C], en la superficie cilíndrica es de 30 a 500 [°C] y en la cara inferior es de 30 a 230 [°C].
- Con este trabajo se persiguieron varios objetivos tales como seleccionar un micro horno de inducción, acoplar un sistema instrumentado y poner a punto el sistema, sin embargo el principal fin perseguido fue utilizar la inducción electromagnética para poder calentar piezas metálicas. Se puede ver que dicho fin se alcanzó con éxito ya que con los rangos de temperatura de trabajo obtenidos se pudo observar que el sistema es capaz de elevar la temperatura de las probetas metálicas.

- La utilización final de este sistema se encuentra ubicada como una parte de la investigación que se está desarrollando por parte del Centro de Ingeniería de Superficies y Acabados (CENISA) y del departamento de Termofluidos, y que consiste en el uso de la energía solar concentrada para aplicaciones de manufactura. Por lo que la utilización final de este trabajo es asentar las bases del calentamiento inductivo y complementar la investigación, para que a futuro se desarrolle un calentamiento híbrido por medio de un micro horno de inducción y un concentrador solar con lente de fresnal. Este sistema híbrido servirá como banco de pruebas para que profesores o alumnos realicen pruebas experimentales con la inducción electromagnética y la energía solar concentrada, y concluir que son alternativas libres de contaminación que se pueden explotar en un futuro.