

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO
DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA PARA
TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE METALES FERROSOS**

PRESENTADO POR:

**WILBER MAURICIO CHÁVEZ SIFONTES
KEVIN FERNANDO RAMOS RIVAS**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, OCTUBRE DE 2023

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

M.Sc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIA GENERAL :

Ing. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

Dr. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO :

Ing. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTOR INTERINO :

Ing. FRANCISCO ALFREDO DE LEÓN TORRES

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO MECÁNICO

Título :

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO
DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA PARA
TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE METALES FERROSOS**

Presentado por :

**WILBER MAURICIO CHÁVEZ SIFONTES
KEVIN FERNANDO RAMOS RIVAS**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

San Salvador, octubre de 2023

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

DEDICATORIA

A mis Padres:

Mirna de Chávez

Mauricio Chávez

Padre y Madre, recibid el fruto de vuestros esfuerzos, desvelos y sacrificios. Su hijo que les estará eternamente agradecido.

A mi Hermano:

Marvin Chávez

Por ser una razón más, de mis esfuerzos.

A mi Esposa:

Mónica de Chávez

Por ser un apoyo fundamental en mi formación académica y personal.

Wilber Mauricio

DEDICATORIA

Le dedico este trabajo a toda mi familia. Principalmente, a mis padres Fernando Alberto Ramos Aquino y María Consuelo Rivas Melgar que me apoyaron en los momentos más desafiantes de mi carrera y mi vida con una enorme dosis de amor y sin pedir nada a cambio. Gracias por enseñarme el valor de las cosas y que siempre debo poner a Dios primero ante cualquier proyecto o decisión a iniciar. También porque me enseñaron a ser la persona que soy hoy, mis principios, mis valores, mi perseverancia y mi empeño.

Kevin Fernando

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Dios por haberme permitido culminar esta etapa de mi vida y haber puesto en mi camino lo necesario para lograrlo, no sin antes también agradecer a mis padres, Fernando Alberto Ramos Aquino y María Consuelo Rivas Melgar quienes siempre me han brindado su apoyo incondicional para poder cumplir todos mis objetivos personales y académicos, también son los que me han brindado el soporte material y económico para poder concentrarme en los estudios y nunca abandonarlos.

Son muchos los docentes que han sido parte de mi camino universitario, y a todos ellos les quiero agradecer por transmitirme los conocimientos necesarios para hoy poder estar aquí.

También, agradezco a mi asesor y docente Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz por su dedicación a la formación académica; y por guiarme en el camino hacia la exitosa culminación del presente trabajo.

Agradecerles a todos mis compañeros los cuales muchos de ellos se han convertido en mis amigos, cómplices y hermanos. Gracias por las horas compartidas, los trabajos realizados en conjunto y las historias vividas.

Por último, agradecer a la universidad que me ha exigido tanto, pero al mismo tiempo me ha permitido obtener mi tan ansiado título. Agradezco a cada directivo por su trabajo y por su gestión, sin lo cual no estarían las bases ni las condiciones para aprender conocimientos, mi muy querida Universidad de El Salvador. Hacia la libertad por la cultura UES.

Wilber Mauricio

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Dios por haberme permitido culminar esta etapa de mi vida y haber puesto en mi camino lo necesario para lograrlo, no sin antes también agradecer a mis padres, Fernando Alberto Ramos Aquino y María Consuelo Rivas Melgar quienes siempre me han brindado su apoyo incondicional para poder cumplir todos mis objetivos personales y académicos, también son los que me han brindado el soporte material y económico para poder concentrarme en los estudios y nunca abandonarlos.

Son muchos los docentes que han sido parte de mi camino universitario, y a todos ellos les quiero agradecer por transmitirme los conocimientos necesarios para hoy poder estar aquí. Sin ustedes los conceptos serían solo palabras.

También, agradezco a mi asesor y docente Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz quien me brindó su amistad y conocimiento en mi formación académica y para culminar este trabajo de graduación.

Agradecerles a todos mis compañeros los cuales muchos de ellos se han convertido en mis amigos, cómplices y hermanos. Gracias por las horas compartidas, los trabajos realizados en conjunto y las historias vividas.

Por último, agradecer a la universidad que me ha exigido tanto, pero al mismo tiempo me ha permitido obtener mi tan ansiado título. Agradezco a cada directivo por su trabajo y por su gestión, sin lo cual no estarían las bases ni las condiciones para aprender conocimientos, mi muy querida Universidad de El Salvador. Hacia la libertad por la cultura - UES.

Kevin Fernando

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA PARA TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE METALES FERROSOS

Estudiantes: Brs. Wilber Mauricio Chávez Sifontes¹, y Kevin Fernando Ramos Rivas²
Docente asesor: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz³
Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería y Arquitectura,
Universidad de El Salvador

RESUMEN

En este trabajo de graduación se ha recabado la teoría necesaria para entender el funcionamiento y operación de un horno de inducción electromagnética para el calentamiento de piezas metálicas; así, se presenta la clasificación de los diferentes hornos hasta la actualidad; se especifican detalles referentes a un horno de inducción electromagnética y las generalidades de metalografía para comprender las fases del acero a diferentes temperaturas y principalmente cómo se efectúan sus transformaciones. Posteriormente se abordan los cálculos de las propiedades físicas del material a tratar térmicamente, el cual se tomará de base para el diseño posterior de todos los parámetros del horno de inducción como lo sería el cálculo de la potencia de calentamiento en función de la pieza a tratar, así mismo el tiempo de calentamiento y diseño del circuito oscilante. También, se presentan los detalles de la factibilidad técnica y económica para determinar la viabilidad de la construcción del equipo. Finalmente, se demuestra mediante la simulación que el diseño del circuito cumple la función de establecer un campo magnético oscilante de alta frecuencia para calentamiento de los metales.

Palabras claves: Horno; Inducción electromagnética; Tratamiento térmico; y Calentamiento.

1 wchavez@ilcabana.net

2 kramos@ilcabana.net

3 jonathan.berrios@ues.edu.sv

ÍNDICE DEL TRABAJO

	Pág.
Introducción.....	1
1. Generalidades De Los Hornos.....	3
1.1. Hornos Industriales.....	3
1.1.1. Hornos Eléctricos Resistivos	5
1.1.2. Hornos A Gas O Combustible	6
1.1.3. Hornos A Fuel Oil	6
1.1.4. Hornos Eléctricos De Inducción.....	7
1.2. Hornos De Inducción Electromagnética.....	8
1.2.1. Historia	9
1.2.2. Funcionamiento	11
1.2.3. Aplicaciones	13
1.2.4. Ventajas	14
1.3. Tipos De Hornos De Inducción	15
1.3.1. Hornos De Inducción Sin Núcleo.....	16
1.3.2. Hornos De Inducción Con Núcleo	17
1.4. Componentes De Un Horno De Inducción Sin Núcleo Escala Laboratorio.....	19
1.4.1. Bobina Inductora	20
1.4.2. Material De Carga	22
1.4.3. Circuito Oscilador	29
1.4.4. Circuito De Control	35
1.4.5. Fuente De Alimentación	40
1.4.6. Circuito De Protección Eléctrica	42
1.4.7. Sistema De Enfriamiento.....	49
1.5. Tratamiento De Los Metales.....	50
1.4.1. Diagrama Hierro Carburo De Hierro	51
1.4.2. Microestructuras En Aleaciones Fe-Fe ₃ C	54
1.4.3. Aceros Y Fundiciones.....	61
1.4.4. Curvas TTT De Los Aceros	63

1.4.5. Tratamiento De Los Metales	65
2. Diseño De Un Horno De Inducción.....	70
2.1. Material De Carga.....	71
2.1.1. Densidad.....	71
2.1.2. Permeabilidad Magnética.....	72
2.1.3. Calor Específico.....	77
2.1.4. Resistividad Eléctrica.....	79
2.1.5. Temperatura De Diseño.....	82
2.1.6. Tiempo De Calentamiento	82
2.2. Sistema De Calentamiento	95
2.2.1. Sistema De Alta Frecuencia.....	96
2.2.2. Bobina Inductora.....	96
2.2.3. Circuito De Control.....	112
2.2.4. Sistema De Enfriamiento	113
2.3. Prototipo Final.....	114
3. Factibilidad	118
3.1. Factibilidad Técnica	118
3.1.1. Requerimientos De Hardware.....	118
3.1.2. Requerimiento De Software.....	119
3.1.3. Recurso Humano.....	120
3.1.4. Conocimientos Y Habilidades	121
3.2. Factibilidad Económica	122
Conclusiones.....	125
Recomendaciones.....	126
Bibliografía.....	127
Anexos.....	129
Anexo A. Manual De Mantenimiento.....	129
Anexo B. Manual De Seguridad.....	131
Anexo C. Equipos Y Accesorios Comprados.....	132

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 1.1. Clasificación de los hornos industriales según el método de calentamiento, atmósfera reinante y solera [3].	4
Fig. 1.2. Horno eléctrico con calentamiento resistivo [4].	5
Fig. 1.3. Horno a quemador a gas para tratamiento térmico [5].	6
Fig. 1.4. Horno a fuel oil para fundición de aluminio [6].	7
Fig. 1.5. Horno eléctrico de inducción sin núcleo para fundición [8].	8
Fig. 1.6. Horno de inducción electromagnética sin núcleo, agitación debido a la baja frecuencia [10].	9
Fig. 1.7. Hornos históricos, horno de canal abierto, Kjellin, Wyatt y patente de Northrup [11].	11
Fig. 1.8. Proceso de operación general de un horno de inducción electromagnética [12].	13
Fig. 1.9. Calentamiento por inducción a barra de un acero para forja [7].	13
Fig. 1.10. Calentamiento por inducción para instalaciones mecánicas precisas [7].	14
Fig. 1.11. Fundición por medio de un horno de inducción [7].	14
Fig. 1.12. Horno de inducción AMFH de inducterm sin núcleo [14].	17
Fig. 1.13. Sistema del horno de inducción con núcleo [11].	18
Fig. 1.14. Horno de inducción con núcleo para fundición [11].	19
Fig. 1.15. Inductor de solenoide multivuelta convencional [15].	20
Fig. 1.16. Variedad de geometrías de inductores utilizados en calentamiento por inducción [15].	21
Fig. 1.17. Comportamiento de las resistividades eléctricas de algunos materiales comerciales [15].	24
Fig. 1.18. Efecto de la temperatura y la intensidad del campo sobre la permeabilidad magnética relativa μ_r [15].	26
Fig. 1.19. Temperatura de Curie de acero al carbono simple versus el contenido de carbono en peso [15].	27
Fig. 1.20. Comparación de la permeabilidad magnética en campos magnéticos relativamente "débiles" y "fuertes" [15].	28
Fig. 1.21. Calor específico de algunos metales versus la temperatura [15].	29
Fig. 1.22. Sistema de resonancia en paralelo [12].	30
Fig. 1.23. Etapas de un ciclo de oscilación de un circuito LC sin resistencia, las gráficas de barra presentan las energías magnéticas y eléctricas almacenadas en las diferentes etapas de la oscilación, la flecha presenta la corriente [16].	31
Fig. 1.24. Valores de la corriente del sistema en los diferentes puntos [16].	32
Fig. 1.25. Trazo de un osciloscopio que presenta la oscilación de un circuito LC amortiguado. La amplitud de la oscilación disminuye porque se disipa energía en la resistencia del circuito [16].	33
Fig. 1.26. Curvas de resonancia para el circuito oscilatorio forzado. Las tres curvas corresponden a diferentes valores de la resistencia del circuito, las flechas horizontales indican el ancho de la agudeza de cada resonancia [16].	34
Fig. 1.27. Circuito base del oscilador Mazzilli original [18].	35

Fig. 1.28. Carga inicial de la bobina [18].....	37
Fig. 1.29. Primer y segundo cuarto de ciclo de la corriente [18].....	38
Fig. 1.30. Primero, segundo y Tercer cuarto de ciclo de la corriente [18].....	39
Fig. 1.31. Ciclo de la corriente en el circuito oscilador Mazzilli. 1er cuarto de ciclo carga de bobina por medio de la fuente; 2do Cuarto de ciclo carga de capacitor; 3er cuarto de ciclo carga de bobina mediante capacitor y fuente y; 4to cuarto de ciclo carga de capacitor [18].....	40
Fig. 1.32. Componentes de una fuente DC conmutada [19].	41
Fig. 1.33. Cortacircuitos fusible [20].....	43
Fig. 1.34. Relé térmico [20].	43
Fig. 1.35. Interruptor magnetotérmico [20].....	44
Fig. 1.36. Interruptor diferencial [20].	45
Fig. 1.37. Circuito de protección básico [20].	46
Fig. 1.38. Bobina hueca refrigerada [12].....	50
Fig. 1.39. Diagrama de equilibrio hierro carburo de hierro marcado en términos generales [22].	51
Fig. 1.40. División de grupos sobre la base del contenido de carbono en el diagrama hierro - carburo de hierro [22].	53
Fig. 1.41. Representación esquemática de un acero eutectoide [22].	54
Fig. 1.42. Microestructura perlítica de un acero eutectoide mostrando láminas alternas de ferrita- α (fase clara) y cementita (fase oscura) [22].	55
Fig. 1.43. Representación esquemática de las microestructuras de un acero hipoeutectoide [22].	56
Fig. 1.44. Fotomicrografía de un acero con el 0.38 % de C, microestructura constituida por perlita y ferrita proeutectoide [22].	57
Fig. 1.45. Representación esquemática de las microestructuras de un acero hipereutectoide [22]	58
Fig. 1.46. Fotomicrografía de un acero con el 1.4 % de C, microestructura constituida por perlita y cementita proeutectoide [22].	59
Fig. 1.47. Fotomicrografía de un acero con microestructura de esferoidita. Las partículas pequeñas son cementita en una matriz continua de ferrita α [22].....	60
Fig. 1.48. Fotomicrografía de un acero con microestructura martensítica. Los granos en forma de aguja es la martensita y las regiones blancas es austenita retenida [22].	61
Fig. 1.49. Diagrama TTT esquemático de un acero típico [22].....	64
Fig. 2.1. Horno de inducción electromagnética escala laboratorio [14].	70
Fig. 2.2. Variación de la permeabilidad magnética respecto a la temperatura de un acero SAE 1045 [23].....	73
Fig. 2.3. Permeabilidad relativa de un acero SAE 1045 [23].....	75
Fig. 2.4. Variación del calor específico respecto a la temperatura para un acero SAE 1045 [23].	77
Fig. 2.5. Calores específicos del acero SAE 1045 a distintas temperaturas [23].....	78
Fig. 2.6. Variación de la resistividad eléctrica respecto a la temperatura [23].	80
Fig. 2.7. Variación de la resistividad eléctrica respecto a la temperatura [23].	81

Fig. 2.8. Iteración de propiedades termo-físicas del aire a la temperatura de película.....	86
Fig. 2.9. Aproximación del número de Nusselt medio superior sobre la base de distintas teorías [27].....	90
Fig. 2.10. Sistema de inducción electromagnética sin recubrimiento [12].	96
Fig. 2.11. Funcionamiento de un transformador monofásico [12].	97
Fig. 2.12. Demostración amplificada del efecto pelicular en la probeta de laboratorio.	100
Fig. 2.13. Bobina de inducción electromagnética fabricada con alambre sólido de cobre THHN 10 AWG recubierta de barniz aislante o dieléctrico con un valor de 53.8950 μH	110
Fig. 2.14. Dimensiones nominales de la bobina primaria del sistema de inducción. Cotas en mm.	111
Fig. 2.15. Simulación del circuito tanque LC calculado para una frecuencia de ~ 10 kHz, con una capacitancia de 4.70 μF y una inductancia de 53.8950 μH	114
Fig. 2.16. Circuito oscilador Mazilli para un horno de inducción de 1200 W a 10 kHz de frecuencia resonante.....	115
Fig. 2.17. Simulación del diseño para el circuito inversor Mazilli, 1.2 kW a 10 kHz.....	116
Fig. 3.1. Cotización de un horno de inducción comercial de 2.5 kW en AliExpress.....	124

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1. Rango de frecuencias generales en hornos de inducción según su uso [11].	15
Tabla 1.2. Capacidades y potencias generales en hornos de inducción según su frecuencia [11].	15
Tabla 1.3. Resistividades eléctricas para algunos materiales comunes [15].	24
Tabla 1.4. Componentes estándar en el circuito Oscilador Mazilli [18].	36
Tabla 1.5. Capacidad de corriente permisible en conductores aislados para 0 a 2,000 V nominales y no más de tres conductores portadores de corriente en una canalización, cable o tierra (directamente enterrados) y temperatura ambiente de 30 °C [21].	47
Tabla 1.6. Componentes utilizados en el circuito de fuerza y control de encendido del horno de inducción electromagnética [20].	48
Tabla 1.7. Sistemas de enfriamiento [12].	50
Tabla 1.8. Estructuras en el diagrama metaestable hierro carburo de hierro (Fe-Fe ₃ C) [22].	52
Tabla 2.1. Permeabilidad relativa de un acero SAE 1045 [23].	75
Tabla 2.2. Intervalos de diámetros óptimos para las diferentes frecuencias en distintos materiales según la permeabilidad [17].	76
Tabla 2.3. Calores específicos del acero SAE 1045 a distintas temperaturas [23].	78
Tabla 2.4. Variación de la resistividad eléctrica respecto a la temperatura [23].	80
Tabla 2.5. Características del material a tratar, ACERO SAE 1045.	82
Tabla 2.6. Propiedades del aire a la presión de 1 atm, [26].	85
Tabla 2.7. Evaluación del tiempo de calentamiento en función de la potencia eléctrica.	95
Tabla 2.8. Variación de la corriente y potencia en el circuito oscilador en función del número de espiras en la bobina inductora.	106
Tabla 2.9. Componentes seleccionados para el circuito de base Mazzilli con referencias a las Figs. 2.16 y 1.27.	112
Tabla 3.1. Descripción técnica de los equipos portátiles utilizados para la investigación, desarrollo, diseño y simulación del proyecto.	119
Tabla 3.2. Requerimientos del recurso humano quien administrará el equipo.	120
Tabla 3.3. Costo del desarrollo de la investigación.	122
Tabla 3.4. Costo de materia prima, componentes, entre otros.	123
Tabla 3.5. Costo de mano de obra.	123
Tabla 3.6. Costo total de proyecto.	123
Tabla 3.7. Compra desglosada de horno de inducción al extranjero AliExpress.	124

LISTADO DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

- A : Sección transversal de la bobina
- A_s : Área superficial de la probeta
- B : Intensidad del campo magnético
- C : Capacitancia
- C_p : Calor específico del material
- D : Diámetro de la probeta
- d : Diámetro del conductor de la bobina
- E_{gen} : Generación de energía en el sistema
- $f_{natural}$: Frecuencia natural
- g : Aceleración de la gravedad
- Gr_L : Número de Grashof
- H : Excitación magnética
- h : Coeficiente de transferencia de calor convectivo
- I : Corriente
- I_p : Corriente del primario
- I_s : Corriente del secundario
- k : Coeficiente de conductividad térmica del aire
- L : Longitud o altura de la probeta
- l : Altura de la bobina
- L_c : Longitud característica según la geometría de la probeta
- L_i : Inductancia
- m : Masa del material
- n_L : Número de vueltas por unidad de longitud
- N_p : Número de vueltas del primario
- N_s : Número de vueltas del secundario
- Nu : Número de Nusselt
- $Nu_{L,fp}$: Número de Nusselt en base a la aproximación de Cebeci
- P : Potencia
- Pa : Paso por vuelta de la bobina
- P_d : Potencia disipada en el material
- P_{el} : Potencia eléctrica de entrada
- P_{er} : Perímetro de la probeta
- P_{int} : Potencia de entrada
- P_{out} : Potencia de salida
- Pr : Número de Prandtl

P_{sur} : Potencia superficial
 Q_{conv} : Transferencia de calor por convección
 Q_{int} : Flujo de calor entrante al sistema
 Q_{out} : Flujo de calor saliente del sistema
 Q_{ra} : Transferencia de calor por radiación
 r : Radio de la probeta
 Ra_L : Número de Rayleigh
 R_s : Resistencia del material
 t : Tiempo
 T_{∞} : Temperatura de los alrededores o del infinito
 T_f : Temperatura de película
 T_{fluido} : Temperatura de los alrededores o del infinito
 T_{Op} : Temperatura de operación máxima o temperatura de diseño
 T_s : Temperatura superficial
 V : Volumen del material
 ν : Coeficiente de viscosidad dinámica del aire
 V_{el} : Tensión
 V_p : Voltaje del primario
 V_s : Voltaje del secundario
 β : Coeficiente de expansión volumétrica
 γ : Densidad
 δ : Espesor del efecto pelicular
 $\Delta E_{térmica,sistema}$: Cambio de energía interna en el sistema
 ΔT : Diferencial de temperatura
 ε : Coeficiente de emisividad térmica
 ε_m : Fem máxima de la fuente
 θ : Theta, ángulo de perímetro o sección circular
 μ : Permeabilidad absoluta del material
 μ_0 : Constante de permeabilidad magnética para el aire o el vacío
 μ_r : Permeabilidad relativa del material
 π : Constante Pi
 ρ : Resistividad eléctrica del material
 σ : Constante de Stefan Boltzman
 φ : Phi, desfase de la corriente contra el voltaje
 $\omega_{natural}$: Frecuencia natural de oscilación
 ω'' : Frecuencia de la fem

INTRODUCCIÓN

La producción de calor por medio de corrientes parásitas, en el pasado, era indeseada en algunos procesos, no obstante con el paso del tiempo se demostró que se podía sacar provecho de dichas pérdidas. Debido a que todos los materiales conductores de electricidad presentan una oposición al flujo de cargas, estos se calientan por Efecto Joule, de esta forma no sería irracional pensar en hacer un horno que funcione a base de corrientes parásitas, facilitando así el hecho que se podría calentar directamente la pieza a tratar, ya que al inducir corrientes parásitas en esta, se calentaría por efecto Joule y no sería necesario calentar el horno antes de comenzar a usarlo para el caso de los hornos eléctricos resistivos. En cuanto a los tiempos de calentamiento, estos son mucho menor a los hornos resistivos ya que la generación de calor en un horno de inducción es directa en la pieza y no mediante radiación y convección para el caso de los hornos resistivos, así a su vez este tiempo solo dependerá de la cantidad de potencia instalada en la fuente de energía, limitando también el tamaño de las piezas a tratar.

El horno de inducción electromagnética será un equipo valioso para la realización de prácticas de laboratorio para los estudiantes de la escuela de ingeniería mecánica, fortaleciendo los conocimientos teóricos en ensayos de los diferentes tratamientos térmicos aplicables con este equipo, así también como realizar procesos de forja.

El siguiente informe consta de tres capítulos, en el primer capítulo se abordan todas las generalidades referentes a los hornos metalúrgicos industriales partiendo de lo general a lo específico siendo esto el horno de inducción y sus ventajas respecto a los otros tipos de hornos, luego se abordan generalidades de la metalografía de los aceros partiendo de los estados metaestables del acero a las diferentes temperaturas y las transformaciones que este sufre en las diferentes transformaciones, ya sea a enfriamiento lento o rápido y los resultados que se obtienen partiendo de las generalidades de los diagramas TTT temperatura, tiempo y transformación. Se abordan los diferentes tratamientos térmicos que existen y las subcategorías de estos.

En el segundo capítulo se presenta de forma ordenada los diferentes procedimientos para el cálculo del horno de inducción, se comienza partiendo del material seleccionado a tratar ya que este determina la potencia requerida.

Luego de haber definido el material a tratar se define la temperatura de operación y las propiedades promedio del material específico para después comenzar con el cálculo de la potencia mínima para poder llegar a la temperatura de diseño máxima tomando como base las pérdidas que se presentarán durante el proceso de calentamiento.

Luego sobre la base de los cálculos de la potencia superficial con relación al efecto pelicular se determina la potencia de diseño del equipo estableciendo un tiempo de calentamiento adecuado para el equipo el cual permita la realización de múltiples ensayos sobre la base de la duración de los laboratorios de tratamientos térmicos.

Por último, se explica el diseño del circuito de oscilación, partiendo del circuito oscilador Mazzilli por Vladimiro Mazzilli y sus ventajas que este circuito presenta para el proceso de calentamiento por inducción [1].

En el tercer y último capítulo se presenta el estudio de factibilidad técnica y económica para determinar la viabilidad de la construcción o compra de este equipo para la realización de laboratorios.

1. GENERALIDADES DE LOS HORNOS

Desde las comunidades neolíticas quienes forjaron cuchillos y utensilios de cobre, pasando por la cultura china que fabricó los primeros hornos, hasta llegar al primer proceso industrial de fundición en Inglaterra, en el siglo XVIII, la historia de la fundición es prueba indiscutible del continuo afán del hombre y la sociedad por buscar su propio desarrollo y evolución. Hoy por hoy, el resultado de este largo recorrido es el concepto de modernos sistemas autónomos de producción en serie, que aportan a la industria ventajas tales como la disminución de costos, optimización de materia prima e implementación de métodos de producción más seguros, eficientes y amigables con el medio ambiente, entre otras ventajas. En pocas palabras, actualmente la tecnología para fundir metal es, sin duda, más versátil, segura y productiva [1].

En primer lugar, conviene recordar que la 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 por inducción se emplea industrialmente para múltiples aplicaciones como tratamientos térmicos, principalmente temple, revenido y normalizado por inducción; generación de plasma; procesos de unión como braseado y soldadura, forja y, por supuesto, fundición por inducción [2].

1.1. HORNOS INDUSTRIALES

Los hornos industriales son dispositivos o equipos utilizados para calentar o fundir piezas a diferentes temperaturas, colocándolos en su interior por encima de la temperatura ambiente; las cuales producirán reacciones químicas dependiendo la obtención del producto deseado. También se puede tratar térmicamente un material para impartir determinadas propiedades, ablandar los materiales para una operación de conformado posterior, y recubrir las piezas con otros materiales. Este calentamiento se puede realizar de forma directa sobre las piezas a tratar o de forma indirecta por

transmisión de calor desde otros componentes por mecanismos de transferencia de calor como son conducción, convección y radiación [3].

Partiendo de las diferentes formas de calentamiento, atmósfera reinante y solera del horno, en la Fig. 1.1 se presenta una clasificación de hornos [3].

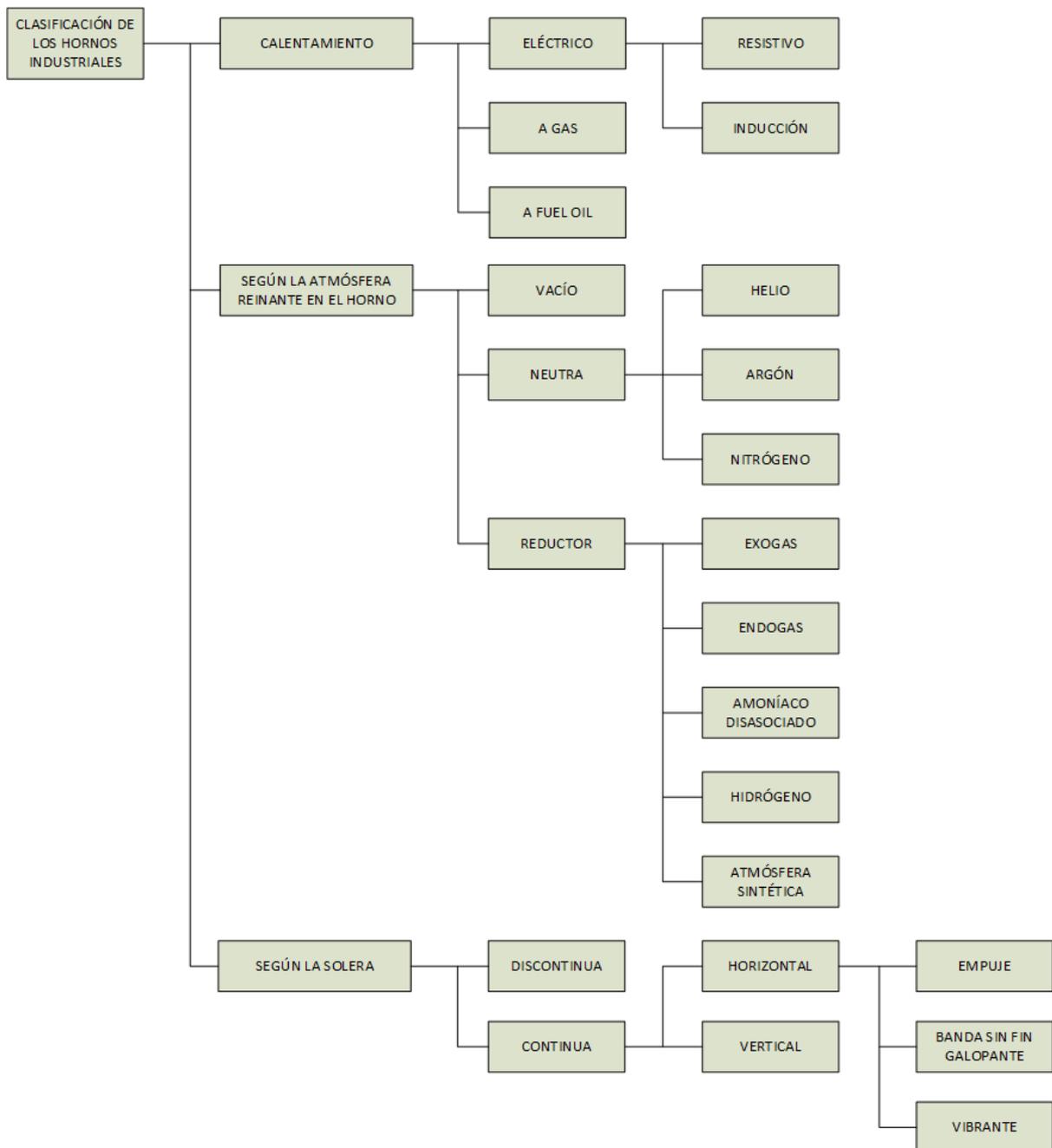


Fig. 1.1. Clasificación de los hornos industriales según el método de calentamiento, atmósfera reinante y solera [3].

Los hornos se dividen de acuerdo con los fines con que fueron ideados y, por lo cual, tienen características específicas o apropiadas para cada caso, sin embargo, tienen toda una serie de componentes constructivos comunes, aunque diseños distintos [3].

1.1.1. HORNOS ELÉCTRICOS RESISTIVOS

En esta clase de hornos el sistema de calentamiento que se acopla al horno depende de la temperatura a alcanzar y está en función del material a tratar térmicamente [3].

Para el calentamiento de los hornos industriales de resistencias se requiere energía eléctrica y resistencia óhmica directa, para el posterior calentamiento de la pieza a tratar en donde se realiza este calentamiento por efecto Joule y ceden calor a la carga por los diferentes medios o formas de transferencia de calor, tal como se presenta en la Fig. 1.2 [3].



Fig. 1.2. Horno eléctrico con calentamiento resistivo [4].

Los hornos eléctricos, a pesar de tener un costo más alto sus ventajas son muy considerables como la facilidad de utilización de fibras cerámicas como aislamiento del

horno, ausencia de humos de combustión, mejores condiciones de trabajo alrededor del horno, mayor seguridad del personal y obtener temperaturas muy elevadas, dependiendo del diseño [3].

1.1.2. HORNOS A GAS O COMBUSTIBLE

El calentamiento por gas tiene la ventaja que es de bajo costo y su gran desventaja es que la temperatura alcanzada no supera en la mayoría de casos los 1,100 °C, adicional el control de atmósfera y control de temperatura se hace difícil por lo cual este sistema de calentamiento se emplea solo para tratamientos térmicos, tal como se presenta en la Fig. 1.3 [3].



Fig. 1.3. Horno a quemador a gas para tratamiento térmico [5].

1.1.3. HORNOS A FUEL OIL

En los hornos fuel oil se utiliza una fracción de petróleo obtenida por el residuo en la destilación fraccionada. Es el combustible más pesado de los que se pueden destilar a presión atmosférica. El fuel oil se utiliza como combustible en los hornos para destilar el petróleo haciéndolo circular dentro de tubos dispuestos en serpentines a lo largo de las paredes del horno de combustión. Esta clase de combustible al combinarse con el aire genera contaminantes sólidos (hollín) y gaseosos (monóxido de carbono, gases

ácidos, compuestos sulfurosos) afectando la atmósfera, un modelo de este se representa en la Fig. 1.4 [3].



Fig. 1.4. Horno a fuel oil para fundición de aluminio [6].

1.1.4. HORNOS ELÉCTRICOS DE INDUCCIÓN

Siendo éstos el tema central de este reporte, un horno de inducción es un horno eléctrico en el que el calor es generado por la inducción eléctrica de un medio conductor (un metal) en un crisol (ver Fig. 1.5) o sin éste, alrededor del cual se encuentran enrolladas bobinas magnéticas [7].



Fig. 1.5. Horno eléctrico de inducción sin núcleo para fundición [8].

1.2. HORNOS DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Los hornos de inducción son equipos eléctricos que utilizan una corriente inducida para fundir o calentar la carga (material). Es decir, estos consisten en una unidad de potencia o inversor que inyecta una corriente alterna de alta frecuencia en una bobina principal, la cual contiene una sección de cobre reforzado y alta conductividad, la bobina puede poseer diferentes figuras, aunque siempre conservando su forma helicoidal, y la corriente que pasa por ella forma un campo electromagnético que afecta a la pieza ferrosa que se pretende calentar. 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 [1].

Para fundición, el crisol es cargado con material, que puede ser chatarra, lingotes, retornos, virutas u otros. Cuando el metal se carga en el horno, el campo electromagnético penetra la carga y le induce la corriente que lo funde o calienta, una vez la carga está fundida, el campo y la corriente inducida agitan el metal, la agitación es producto de la frecuencia suministrada por la unidad de potencia, la geometría de la bobina, densidad, permeabilidad magnética y resistencia del metal fundido [9].

El rango de capacidades en función de la masa a tratar en los hornos de inducción abarca desde menos de 1 kilogramo, hasta 320 toneladas y son utilizados para fundir toda clase de metales ferrosos y no ferrosos, incluso metales preciosos. El rango de frecuencias de operación de los hornos de inducción va desde la frecuencia de red (50 o 60 Hz) hasta los 10 kHz, en función del metal que se quiere fundir, la capacidad del horno y la unidad del inversor [9].

Frecuencias menores generan más turbulencias en el metal y reducen la potencia que se puede aplicar al metal fundido, tal como se presenta en la Fig. 1.6 [9].

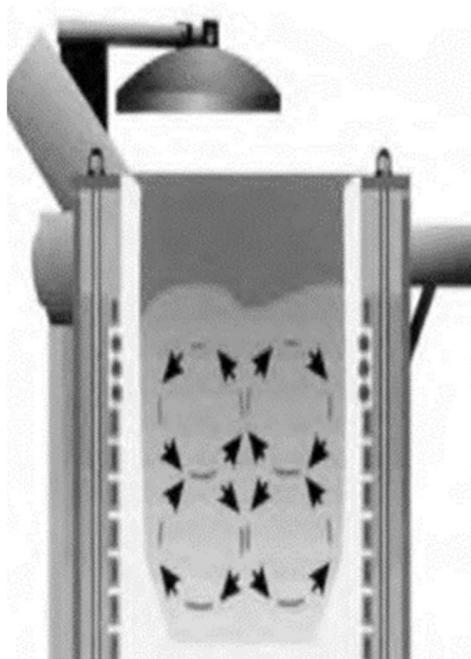


Fig. 1.6. Horno de inducción electromagnética sin núcleo, agitación debido a la baja frecuencia [10].

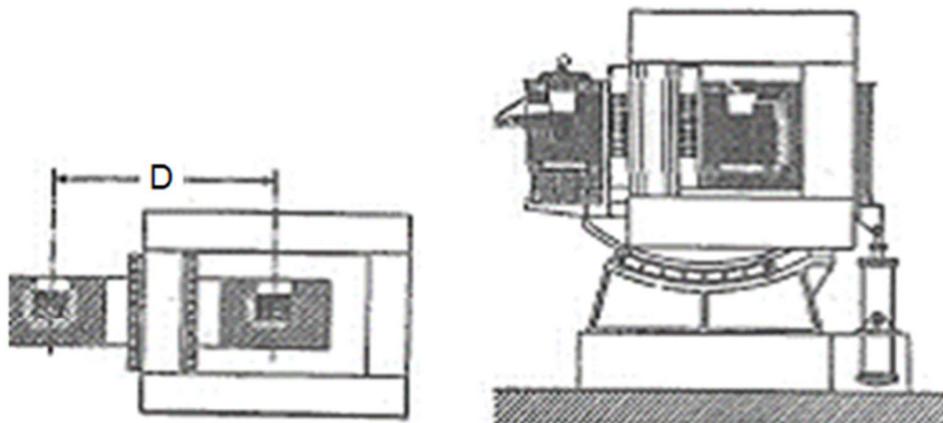
1.2.1. HISTORIA

El calentamiento por inducción se llevó a cabo mediante la utilización de la inducción como fuente de calentamiento de un material, y fue introducido mediante importantes aportes de los físicos Heaviside (1884) y Joseph John Thompson (1940) a la teoría de corrientes de Eddy [11].

Heaviside estudió el desarrollo del calor por conversión de energía electromagnética en el núcleo de un solenoide. De aquí se inició la carrera que tendría como meta el horno de inducción como se tiene noticia actual; es decir, el dispositivo que consta de una bobina inductora, la cual es atravesada por corrientes de una frecuencia alta que inducirá en la carga las corrientes encargadas del calentamiento de la misma. Se puede entonces semejar el horno de inducción con un transformador cuyo devanado secundario es la propia carga y en la cual se deben de generar grandes pérdidas por corriente parásitas [11].

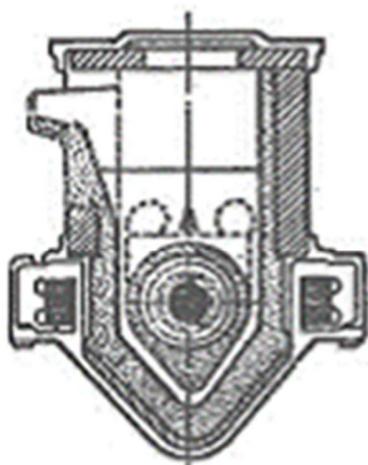
El calentamiento por inducción se aplicó industrialmente, en primer lugar, a la fusión de metales. La empresa Ferranti ideó un horno de fusión, con un devanado primario al que aplicaba una corriente alterna de 50 Hz. Se colocaba el cuerpo de horno con revestimiento refractario; dicho anillo de metal hacía de secundario del transformador, comportándose como una espira en corto circuito. El vaciado de parte del baño permitía el aporte de carga sólida que, mediante la energía desarrollada en el baño por efecto Joule, daba lugar a la fusión y recalentamiento hasta la temperatura de colada. Esta idea fue aplicada con éxito por el sueco Dr. F. Kjellin, quien hacia 1903 diseña y construye un horno de inducción con canal abierto (ver Fig. 1.7) alimentado por un generador monofásico instalado en las proximidades de la acería Gysing Bruk Suecia. Al aplicarlo a la fusión del acero se presentaron dificultades: operativas por la oxidación del baño y de materiales refractarios de alta temperatura, por lo que la idea fue prácticamente abandonada [11].

En 1918, el profesor americano Dr. E. F. Northrup patenta un horno de inducción sin núcleo de alta frecuencia tal como se presenta en la Fig. 1.7, y en 1927, se instala el primer horno de media frecuencia en una planta de Sheffield (Inglaterra). Desde entonces, el número y tamaño de las instalaciones no ha dejado de crecer hasta llegar a hornos de 1500 toneladas para mantenimiento y sobrecalentamiento de arrabio líquido. Se ha extendido su aplicación al calentamiento de piezas para tratamiento térmico y para deformación plástica [11].

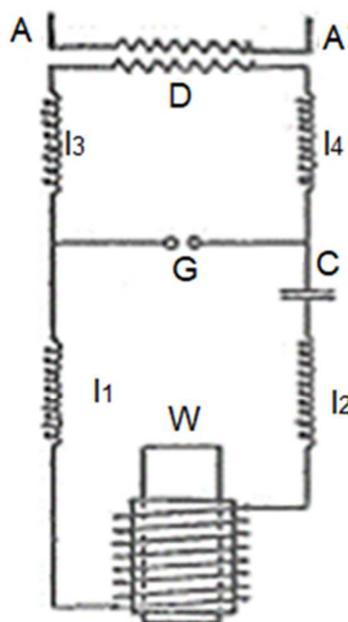


Esquema de horno de inducción de canal abierto

Horno Kjellin



Horno Wyatt



Patente de Northrup 1918.

Fig. 1.7. Hornos históricos, horno de canal abierto, Kjellin, Wyatt y patente de Northrup [11].

1.2.2. FUNCIONAMIENTO

El calentamiento por inducción es un método de no contacto rápido, eficiente, preciso y repetible para calentar materiales eléctricamente conductores como latón,

aluminio, cobre o acero o materiales semiconductores como carburo de silicio, carbono o grafito. Para calentar materiales no conductores como plásticos o vidrio, la inducción calienta un susceptor de grafito que transfiere el calor al material no conductor [12].

El calentamiento por inducción se utiliza muy eficazmente en muchos procesos como soldadura fuerte, soldadura y ajuste encogido. Desde algo tan pequeño como una aguja hipodérmica hasta una rueda grande en un tanque. Muchas empresas de la industria automotriz, la industria de dispositivos médicos y la aeronáutica hacen un uso eficiente de la calefacción por inducción en sus procesos [12].

La fuente de alimentación de calentamiento por inducción convierte la alimentación de la línea de CA en una corriente alterna de mayor frecuencia, la entrega a una bobina de trabajo y crea un campo electromagnético dentro de la bobina. Su pieza de trabajo se coloca en ese campo que induce corrientes de Eddy en la pieza de trabajo. La fricción de estas corrientes genera calor preciso, limpio y sin contacto. Por lo general, se requiere un sistema de refrigeración por agua para enfriar la bobina de trabajo y el sistema de inducción [12].

El sistema de calentamiento por inducción comprende los componentes siguientes: fuente de poder, estación de calentamiento, bobina inductora, metal a calentar tal como se presenta en la Fig. 1.8. La fuente de poder recibe la corriente alterna (CA) que debe ser rectificadora y regulada, es decir que es transformada en corriente directa (CD). La corriente rectificadora es alimentada al convertidor de frecuencia que permite generar un campo magnético en la bobina. La frecuencia de trabajo de la corriente tiene una relación inversamente proporcional con la profundidad de flujo magnético sobre la carga. La corriente inducida se concentra más en la superficie del metal, disminuyendo su intensidad proporcionalmente hacia el centro de la pieza, es decir a menor frecuencia mayor es la profundidad de penetración, determinando así que las frecuencias bajas son ideales para la fusión de metales debido a que su masa es compacta en el crisol [12].

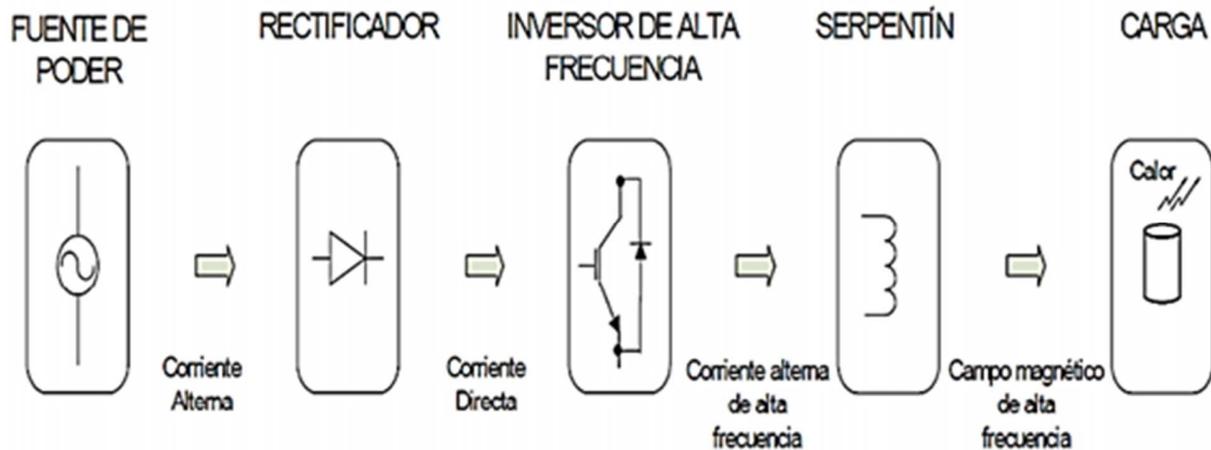


Fig. 1.8. Proceso de operación general de un horno de inducción electromagnética [12].

1.2.3. APLICACIONES

Las aplicaciones típicas del calentamiento están localizadas fundamentalmente en la industria de transformaciones metálicas, sin embargo, los hornos de inducción se pueden utilizar para fundir, soldar, tratar o ajustar por contracción cualquier material que se adecúe para su uso con calor por inducción. El tratamiento puede incluir materiales de recocido, endurecimiento o templado. Uno de los usos bastantes comunes en la manufactura es la forja, como se presenta en la Fig. 1.9 [7].



Fig. 1.9. Calentamiento por inducción a barra de un acero para forja [7].

La inducción de calor puede ser utilizada para soldaduras fuertes o soldadura simple de cobre, bronce, latón o acero. El ajuste por contracción puede implicar el montaje de piezas para una fabricación precisa, tal como se presenta en la Fig. 1.10. Los

procesos de fundición se pueden hacer con material de recubrimiento de refractario y entre los metales que se pueden fundir directamente están el acero, bronce, cobre y latón, el proceso de fundición se presenta en la Fig. 1.11 [7].



Fig. 1.10. Calentamiento por inducción para instalaciones mecánicas precisas [7].



Fig. 1.11. Fundición por medio de un horno de inducción [7].

1.2.4. VENTAJAS

A continuación, se resumen algunas de las ventajas más destacadas de este tipo de sistema de calentamiento [13]:

- Calentamiento rápido, menos contaminación.

- Como el principio de calentamiento en si es inducción electromagnética, su calor se genera por la propia pieza de trabajo.
- Este sistema de calentamiento genera poca oxidación, alto rendimiento térmico, buena repetitividad de tecnología, sólo un blanqueo muy leve en superficies de metales.
- Alto grado de automatización.
- Permite el funcionamiento automático sin vigilancia, aumenta la productividad laboral.
- Tiene calentamiento uniforme, una alta precisión de control de la temperatura.
- De acuerdo con los diferentes tamaños de piezas de trabajo, se necesitan instalar diferentes especies de hornos de inducción.
- En comparación con otros métodos de calentamiento, reduce eficientemente el consumo energético, tiene mayor productividad de trabajo.
- Cumplen con los requisitos ambientales.

1.3. TIPOS DE HORNOS DE INDUCCIÓN

Los hornos de inducción pertenecen a la clasificación de hornos eléctricos y de fusión de materiales féreos o no féreos, según sea el requerimiento. Existen dos tipos principales de hornos que son: los de inducción sin núcleo y los de inducción con núcleo. Ambos hornos se clasifican por su frecuencia de trabajo y capacidad de la manera siguiente, tal como se presenta en las Tabla 1.1 y 1.2 [12].

Tabla 1.1. Rango de frecuencias generales en hornos de inducción según su uso [11].

Tipo de frecuencia	Rango, Hz	Uso
Baja	50-200	Hornos de fusión
Media	200-1000	Tratamientos térmicos y soldadura
Alta	1000 o mayor	No metales

Tabla 1.2. Capacidades y potencias generales en hornos de inducción según su frecuencia [11].

Frecuencia, Hz	Capacidad, kg	Potencia, kW
Baja	6000-60000	1000-17000
Media	2-10000	3-3000
Alta	Nivel de laboratorio o tamaño escala	

En la Tabla 1.1 se presentan las capacidades y potencias comunes de los dos tipos de hornos según las frecuencias de operación, y en la Tabla 1.2 se presentan algunas relaciones entre capacidades de carga y potencias necesarias cuando éstos son fundidos, por lo que a manera de conclusión se puede recalcar que mientras más grande sea la carga a fundir, se requerirá menos frecuencia [12].

1.3.1. HORNOS DE INDUCCIÓN SIN NÚCLEO

Consisten en un crisol de material refractario el cual es un material que posee relativamente baja conductividad, aunque no permite el paso de corriente, en el que se coloca una carga metálica y se rodea por una bobina de cobre, refrigerada, por la cual circula corriente. El campo electromagnético que se genera induce corrientes en la carga. Estas corrientes son conocidas también como corrientes parásitas o de Foucault, la bobina viene a ser el primario de un transformador y el metal es el secundario, y las transformaciones de energía que se llevan a cabo durante el proceso son: en el primario, de energía eléctrica en magnéticas; y en el secundario, de energía magnética en eléctrica, y de energía eléctrica en energía calórica debido a la resistividad del material [12].

En este tipo de calentamiento no es necesario el contacto directo y mientras más delgada sea la pared del refractario, el rendimiento de fusión será mayor. En cuanto a la temperatura de la bobina, no debe exceder los 318 K; pasados los 333 K los canales se pueden ver afectados debido a la formación de incrustaciones. Para este fin es común emplear un sistema de refrigeración adecuado para la bobina. Por otro lado, la frecuencia de alimentación a la bobina depende de la resistividad del material y del diámetro del crisol: además, es importante reconocer que, a menor carga metálica, mayor es la frecuencia requerida, como se comentó en el apartado anterior [12].

Adicionalmente, la potencia en estos sistemas será fijada a partir de la masa a ser calentada y del tiempo en operación. En la Fig. 1.12 se puede visualizar un horno típico de inducción sin núcleo magnético que incluye el crisol, sistema basculante, bobina de inducción y sistema de refrigeración [12].



Fig. 1.12. Horno de inducción AMFH de inducterm sin núcleo [14].

1.3.2. HORNOS DE INDUCCIÓN CON NÚCLEO

Los componentes de estos hornos son básicamente los mismos que el anterior, excepto en que en lugar de poseer un sistema de refrigeración se utilizan núcleos constituidos de un acero sólido tal como se presenta en la Fig. 1.13, 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 [12].

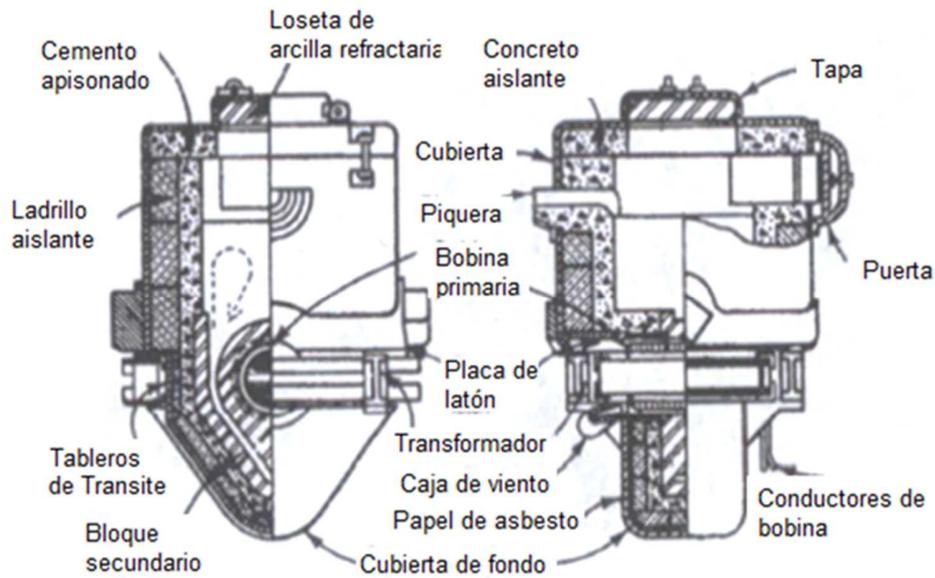


Fig. 1.13. Sistema del horno de inducción con núcleo [11].

Estos equipos tienen una bobina que rodea una pequeña porción de la unidad; es decir, la bobina o bobinas hace las veces de primaria y el bucle, o movimiento cerrado del propio metal fundido, de secundario; como el secundario, tiene una sola espira, éste se induce a sí mismo una corriente eléctrica de baja tensión y gran amperaje que produce el calor necesario para fundir, como se presenta en la Fig. 1.14. Lo que quiere decir que para iniciar el funcionamiento de un horno de inducción de baja frecuencia se debe emplear un poco de metal fundido, de modo que forme el secundario. En estos equipos la velocidad de calentamiento es muy elevada y la temperatura se controla fácilmente, lo que hace que dichos hornos sean muy útiles y se empleen ampliamente en el mundo. Se utiliza comúnmente en fundidoras no ferrosas y es particularmente adecuado para sobrecalentar (calentamientos por encima de la temperatura normal de fundición para mejorar la fluidez), mantenimiento (que lo hace adecuado para aplicaciones de fundición por inyección en matriz), y duplexado (uso de dos hornos para, por ejemplo, fundir el metal en uno y transferirlo al otro) [12].

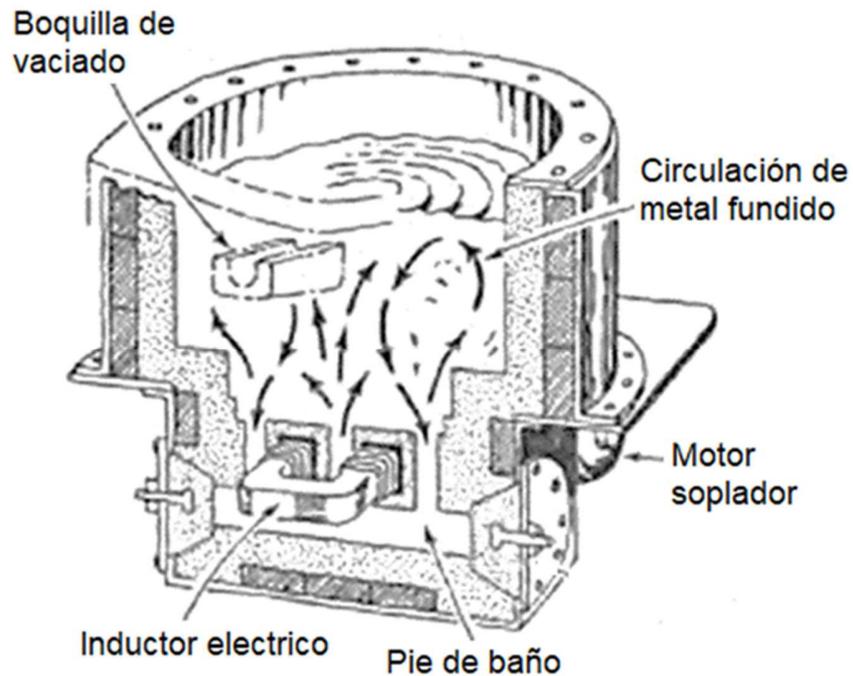


Fig. 1.14. Horno de inducción con núcleo para fundición [11].

1.4. COMPONENTES DE UN HORNO DE INDUCCIÓN SIN NÚCLEO ESCALA LABORATORIO

El calentamiento por inducción es un fenómeno multifísico que comprende una interacción compleja de fenómenos electromagnéticos, de transferencia de calor, metalúrgicos y análisis de circuitos que están estrechamente interrelacionados y son altamente no lineales porque las propiedades físicas de los materiales dependen de la intensidad del campo magnético, la temperatura y la microestructura. Para comprender cómo se compone y opera un horno de inducción sin núcleo se debe comprender el funcionamiento de sus componentes por separado como lo son [15]:

- Material de carga,
- Bobina inductora,
- Circuito oscilador,
- Circuito de control,
- Fuente de alimentación,

- Circuito de protección eléctrica, y
- Sistema de enfriamiento

1.4.1. BOBINA INDUCTORA

En el mercado existen distintos tipos de bobinas que se pueden clasificar en función del tipo de material de núcleo que se esté utilizando para su construcción, los inductores o bobinas se fabrican en una diversidad de formas y tamaños y generalmente se clasifican en dos categorías, como fijos o variables. Tanto los inductores fijos como variables se clasifican en tres grupos, estos son bobinas con núcleo de aire, con núcleo de hierro y con núcleo de ferrita. Las bobinas con núcleo de aire tienen una baja inductancia y generalmente trabajan con señales eléctricas de alta frecuencia ya sean en radios, televisiones o equipos de radio control y, para este caso, para la inducción de corriente en una probeta de un acero para calentamiento. Un voltaje alterno aplicado a una bobina de inducción (por ejemplo, solenoide bobina multivuelta, Fig. 1.15) dará como resultado un flujo de corriente alterna (CA) en el circuito de la bobina [15].

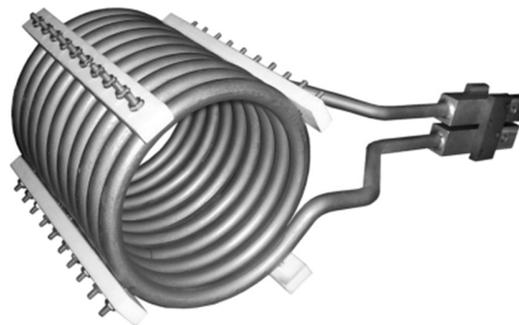


Fig. 1.15. Inductor de solenoide multivuelta convencional [15].

Una corriente alterna en la bobina produce en su entorno un campo magnético variable en el tiempo que tiene la misma frecuencia que la corriente de la bobina. Este campo magnético induce corrientes parásitas en la pieza de trabajo ubicada dentro de la bobina. Estas corrientes inducidas tendrán la misma frecuencia que la corriente de la

bobina; sin embargo, su dirección es opuesta a la corriente de la bobina. Estas corrientes producen calor por el efecto Joule [15].

En la Fig. 1.16 se presenta una variedad de geometrías de inductores utilizadas en el calentamiento por inducción. Reconociendo que existe una variedad casi infinita de tipos de inductores, por tanto, es conveniente revisar los principios básicos del calentamiento por inducción considerando una bobina tipo solenoide que rodea una pieza de trabajo cilíndrica. Este enfoque se utilizará para el diseño en el capítulo 2.



Fig. 1.16. Variedad de geometrías de inductores utilizados en calentamiento por inducción [15].

Ahora bien, la inductancia (L) se define como la constante de proporcionalidad que relaciona la rapidez del cambio de la corriente con la fuerza electromotriz inducida y está relacionada por la Ec. (1.1 [16].

$$\varepsilon_L = L_i * \frac{di}{dt} \quad (1.1)$$

Nótese que la inductancia posee las siguientes unidades: $V * \frac{s}{A}$. En el sistema internacional esta combinación de unidades recibe el nombre de Henry o Henryos.

Al resolver la Ec. (1.1 en función de un solenoide se tiene que la inductancia para una bobina con núcleo de aire se representa por la Ec. (1.2 [16].

$$L_i = \mu_0 n_L^2 l A \quad (1.2)$$

donde: L_i es la inductancia o autoinductancia,

μ_0 es la permeabilidad del vacío,

n_L es la cantidad de vueltas por unidad de longitud de la bobina,

l es la longitud de la bobina, y

A es el área de la sección transversal del flujo.

1.4.2. MATERIAL DE CARGA

Debido a varios fenómenos electromagnéticos, la distribución de corriente dentro de un inductor y la pieza de trabajo no son uniformes. Esta falta de uniformidad de la fuente de calor provoca gradientes de temperatura en la pieza de trabajo. La distribución de corriente no uniforme está asociada con varios fenómenos electromagnéticos, incluidos, entre otros [15]:

- Efecto piel,
- Efecto proximidad,
- Efecto anillo,
- Efecto ranura, y
- Efectos de fin y borde, y algunos otros

Estos efectos juegan un papel importante en el desempeño de un sistema de calentamiento por inducción. Antes de explorar los factores que afectan la distribución del campo magnético y el flujo de corrientes parásitas, es imperativo comprender la naturaleza de las propiedades electromagnéticas de los materiales calentados. Las propiedades electromagnéticas de los materiales es una expresión bastante amplia que se refiere a una serie de características de ingeniería que incluyen la resistividad eléctrica (conductividad eléctrica), permeabilidad magnética relativa, densidad de flujo de saturación, fuerza coercitiva, pérdida por histéresis, permitividad, susceptibilidad magnética, momento dipolar magnético y muchos otros. Reconociendo la importancia de todas las propiedades electromagnéticas, en este texto sólo se abordarán aquellas propiedades que tienen el efecto más pronunciado en el rendimiento de los sistemas de calentamiento por inducción, que entre las cuales son [15]:

- Resistividad eléctrica, y
- Permeabilidad magnética.

A) Resistividad eléctrica

La capacidad del material para conducir fácilmente la corriente eléctrica se especifica mediante la conductividad eléctrica y el recíproco de la conductividad es la resistividad eléctrica ρ . Las unidades en el sistema internacional para la resistividad son $\Omega \cdot m$, respectivamente. Ambas características se pueden utilizar en ingeniería práctica, sin embargo, la mayoría de los libros de datos contienen datos para ρ . Por lo tanto, el valor de la resistividad eléctrica se utiliza principalmente en este documento [15].

Los metales y aleaciones se consideran buenos conductores eléctricos y tienen mucho menos resistencia eléctrica al flujo de corriente en comparación con otros materiales (por ejemplo, cerámica, plásticos, entre otros). En la Tabla 1.3 se presenta los valores de ρ para materiales comunes a temperatura ambiente [15].

Dado lo anterior, se sabe que la mayoría de los materiales metálicos son conductores eléctricos, a su vez también se dividen en varios subgrupos según la magnitud de sus resistividades eléctricas. Hay metales y aleaciones que se consideran metales de baja resistencia (por ejemplo, plata, cobre, oro, magnesio, aluminio) y metales y aleaciones de alta resistencia (por ejemplo, titanio, acero al carbono, acero inoxidable,

tungsteno, superaleaciones a base de Ni). La resistividad eléctrica de los materiales metálicos varía con la temperatura, la composición química, microestructura y tamaño de grano. Para la mayoría de los metales, ρ aumenta con la temperatura. En la Fig. 1.17 se presenta resistividades eléctricas de algunos materiales comúnmente utilizados en función de la temperatura [15].

Tabla 1.3. Resistividades eléctricas para algunos materiales comunes [15].

Material a temperatura ambiente	Resistividad eléctrica, $\mu\Omega \cdot m$
Plata	0.015
Cobre	0.017
Oro	0.024
Aluminio	0.027
Tungsteno	0.054
Zinc	0.059
Níquel	0.068
Cobalto	0.090
Acero al carbono	0.160
Acero inoxidable	0.700
Plomo	0.210
Titanio	0.420
Níquel cromo	1.000
Grafito	7.00-9.00
Madera seca	$10^{14} - 10^{17}$
Vidrio	$10^{16} - 10^{20}$
Téflon	$>10^{19}$

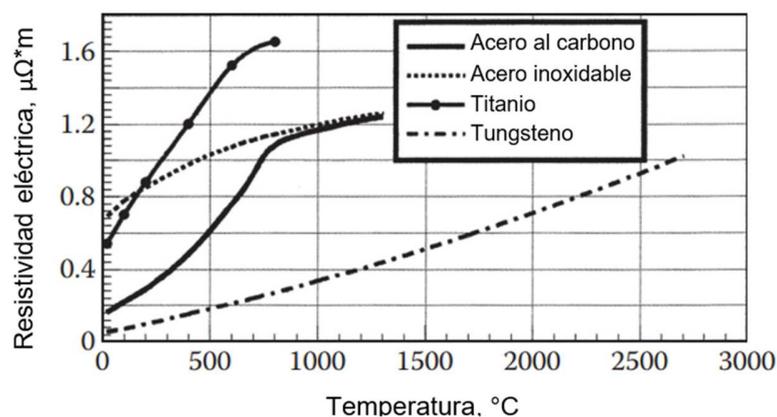


Fig. 1.17. Comportamiento de las resistividades eléctricas de algunos materiales comerciales [15].

La resistividad de los metales puros a menudo se puede aproximar como una función lineal de la temperatura (a menos que haya un cambio en una red de transformación de material/fase) [15].

B) Permeabilidad magnética

La permeabilidad magnética relativa μ_r indica la capacidad de un material (por ejemplo, un metal) para conducir el flujo magnético mejor que el vacío o el aire. Permitividad relativa (o constante dieléctrica) ϵ indica la capacidad de un material para conducir el campo eléctrico mejor que el vacío o el aire. Tanto μ_r como ϵ son parámetros adimensionales y tienen significados muy similares [15].

La permeabilidad magnética relativa tiene un efecto marcado en la selección de los parámetros del proceso que afectan los fenómenos eléctricos, incluido el efecto piel, efecto de fin y borde electromagnético, así como efectos de proximidad y timbre. La permitividad relativa no suele tener un impacto medible cuando se utilizan materiales metálicos, pero juega un papel importante en aplicaciones de calentamiento dieléctrico. La constante μ_0 (igual a $4\pi \times 10^{-7}$ H/m) se llama permeabilidad del espacio libre (el vacío), y de manera similar la constante ϵ_0 (igual a 8.854×10^{-12} F/m) se llama permitividad de espacio libre [15].

El producto de μ_r y μ_0 se llama permeabilidad magnética μ y corresponde a la relación de la densidad de flujo magnético (B) a la intensidad del campo magnético (H) [15].

$$\frac{B}{H} = \mu_r \mu_0 \quad (1.3)$$

Todos los materiales, según su capacidad de magnetización, se pueden dividir en paramagnéticos, diamagnético y ferromagnéticos. La permeabilidad magnética relativa de los materiales paramagnéticos es ligeramente superior a 1 ($\mu_r > 1$). El valor de μ_r para materiales diamagnéticos es ligeramente menor de 1 ($\mu_r < 1$). Debido a diferencias insignificantes de μ_r tanto para materiales paramagnéticos como diamagnéticos, en la práctica de calentamiento por inducción, esos materiales se denominan simplemente no magnéticos (por ejemplo, aluminio, cobre, titanio y tungsteno) [15].

A diferencia de los materiales paramagnéticos y diamagnéticos, los materiales ferromagnéticos exhiben el alto valor de la permeabilidad magnética relativa ($\mu_r \gg 1$). Sólo hay unos pocos elementos que revelan las propiedades ferromagnéticas a temperatura ambiente. Estos incluyen hierro, cobalto y níquel. Algunos metales de tierras raras son ferromagnéticos a temperaturas inferiores a la temperatura ambiente. Todos los aceros al carbono simples son ferromagnéticos. También hay una gran cantidad de aleaciones de aceros que pertenecen al grupo de los materiales ferromagnéticos [15].

La propiedad ferromagnética del material es una función compleja de estructura, composición química, tratamiento previo, tamaño de grano, frecuencia, intensidad del campo magnético y temperatura como se puede ver en la Fig. 1.18, el mismo grado de acero al carbono a la misma temperatura y frecuencia puede tener un valor de μ_r notablemente diferente debido a diferencias en la intensidad del campo magnético (potencia de la bobina). Por ejemplo, el μ_r de los aceros magnéticos comúnmente utilizados en calentamiento por inducción puede variar desde valores pequeños (por ejemplo, $\mu_r = 2$ o 3) hasta valores muy altos (por ejemplo, más de 500), dependiendo de la intensidad del campo magnético H y la temperatura [15].

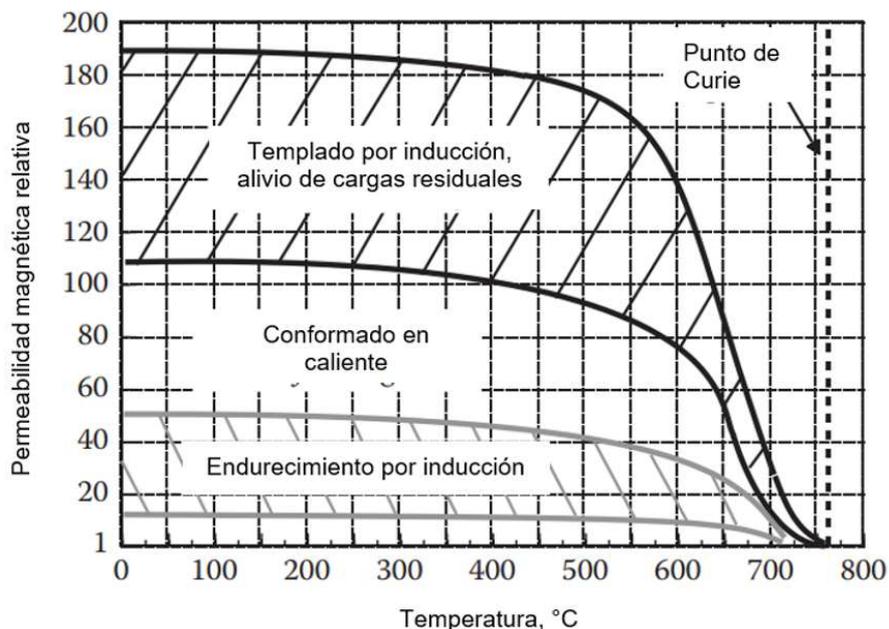


Fig. 1.18. Efecto de la temperatura y la intensidad del campo sobre la permeabilidad magnética relativa μ_r [15].

La temperatura a la que un cuerpo ferromagnético pierde sus propiedades magnéticas volviéndose no magnético se llama temperatura de Curie (punto Curie) y también se suele denominar como temperatura crítica A_2 . En la Fig. 1.19 se presenta una parte del diagrama de transformación de fases hierro carburo de hierro que ilustra la temperatura crítica de A_2 en función del contenido de carbono [15].

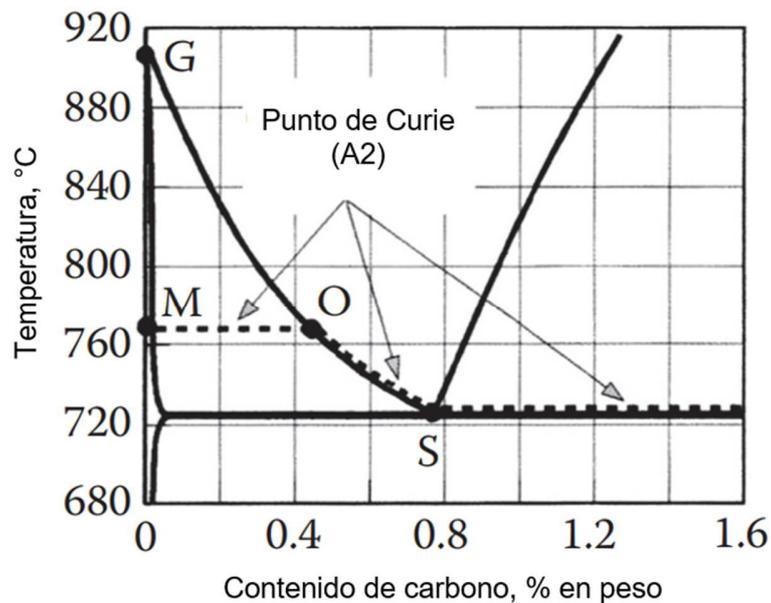


Fig. 1.19. Temperatura de Curie de acero al carbono simple versus el contenido de carbono en peso [15].

El valor máximo de la permeabilidad magnética relativa $\mu_{r\text{máx}}$ se ve muy afectado por la composición química y microestructura. Por ejemplo, la $\mu_{r\text{máx}}$ de un acero con alto contenido de carbono con 1.2 % es más de tres veces menor en comparación con el $\mu_{r\text{máx}}$ de un acero bajo en carbono con 0.1 %. Se podría concluir que μ_r siempre disminuye con la temperatura. Este es el caso en la mayoría de las aplicaciones de calentamiento por inducción y de tratamiento térmico. Sin embargo, en un campo magnético relativamente “débil”, μ_r podría aumentar primero con la temperatura y sólo cerca del punto Curie haría que la permeabilidad magnética comenzara a disminuir drásticamente como se presenta en la Fig. 1.20 [15].

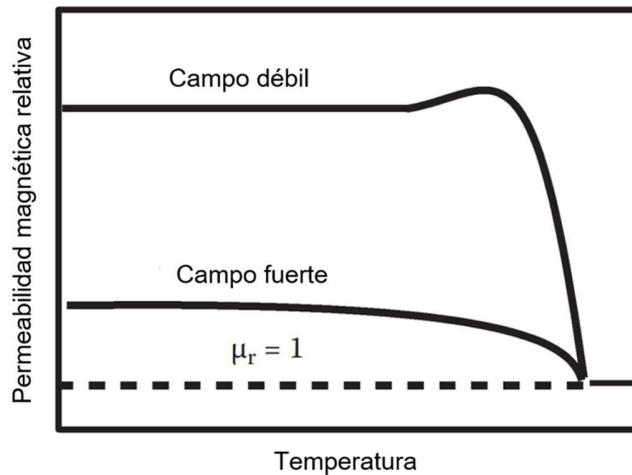


Fig. 1.20. Comparación de la permeabilidad magnética en campos magnéticos relativamente "débiles" y "fuertes" [15].

Así mismo es de mucha importancia comprender el comportamiento de las propiedades termo físicas de los materiales calentados, ya que estas cambiaran durante todo el proceso de calentamiento, concentrándonos en aquellas propiedades que tienen el efecto más pronunciado en el rendimiento de los sistemas de calentamiento por inducción, se tendrá [15]:

A) Calor específico

El valor de la capacidad calorífica C indica la cantidad de energía que habría que absorber por la pieza de trabajo para lograr una unidad de cambio de temperatura requerido. Matemáticamente hablando [15]:

$$C = \frac{dQ}{dT} \quad (1.4)$$

Donde dQ es la energía requerida y dT es el cambio de temperatura requerido. La capacidad calorífica C se mide en $J/(mol \text{ } ^\circ C)$. La capacidad calorífica está estrechamente relacionada con un parámetro llamado calor específico c , que representa la capacidad calorífica por unidad de masa, es decir, la cantidad de energía necesaria que se debe absorber por una unidad de masa del material para lograr un aumento de temperatura

unitario. El calor específico se mide en $J/(kg \text{ } ^\circ C)$ o $Btu/(lb \text{ } ^\circ F)$. Un valor alto de calor específico corresponde a una mayor potencia requerida para calentar una unidad de masa a una unidad de temperatura. Los valores del calor específico de algunos metales de uso común se presentan en la Fig. 1.21 [15].

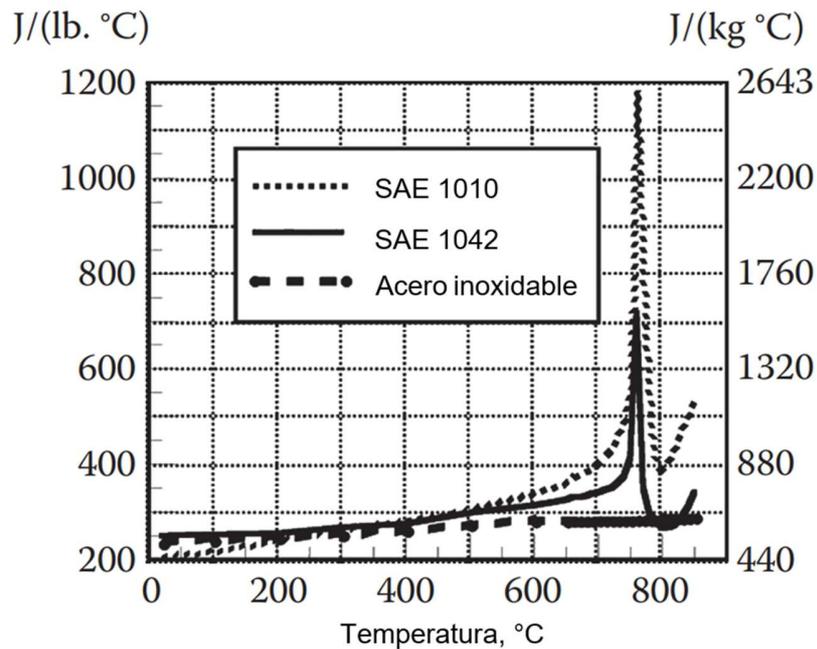


Fig. 1.21. Calor específico de algunos metales versus la temperatura [15].

1.4.3. CIRCUITO OSCILADOR

Entre las tecnologías para los sistemas de inducción electromagnética se tienen dos tipos de circuitos resonantes, los cuales son circuito en serie y circuito en paralelo. En el circuito en serie sus componentes se conectan de forma secuencial y en el circuito en paralelo los componentes del circuito se conectan de forma paralela [17].

En las unidades de potencia con resonancia paralela la corriente que pasa por el tiristor es inferior comparada a los circuitos con resonancia en serie. En el mismo nivel de potencia, la corriente con resonancia en serie es cinco veces más importante comparándolo a los circuitos con resonancia paralela. Por la misma razón, los recambios

en los circuitos con resonancia paralela cuestan mucho menos ya que se asegura un máximo ciclo de vida de los componentes electrónicos y es por esto que el circuito de resonancia a diseñar será un circuito en paralelo, tal como se presenta en la Fig. 1.22 [17].



Fig. 1.22. Sistema de resonancia en paralelo [12].

El sistema de alta frecuencia o resonancia está compuesto por un condensador o banco de condensadores en paralelo con una bobina de cobre, la cual es la bobina inductora del horno de inducción. Dicha conexión forma un circuito oscilador electromagnético. Para comprender el circuito se destaca que existen varias analogías entre un oscilador mecánico y un oscilador electromagnético [17].

En primera instancia se asume que no existen pérdidas en este circuito oscilador, por lo que se desprecia toda existencia de resistencia en este circuito. De igual forma se asume que no habrá ninguna fuente de energía externa (una fem), por lo que la energía de este sistema deberá de provenir de uno de los dos componentes inicialmente cargado, continuando con esta analogía se puede suponer que el capacitor es el que está originalmente cargado y éste se conecta a una bobina instantáneamente, dando lugar a las acciones siguientes, las cuales se presentan en la Fig. 1.23 [17].

En la primera etapa del punto "a" hasta el punto "e" los cuales se presentan en la Fig. 1.23, se puede considerar que originalmente el capacitor se encuentra totalmente cargado por lo que la energía total del sistema es totalmente eléctrica (energía total en el campo eléctrico interno del capacitor), por lo que este se empieza a descargar contra la bobina haciendo que ésta empiece a crear un campo electromagnético debido al flujo de

corriente eléctrica que pasa por ella, el capacitor continúa descargándose a tal grado que éste por fin le ha cedido toda su energía a la bobina y es ahí en donde el campo electromagnético está en su punto mayor “c”, al no haber energía ya en el capacitor, la energía almacenada en la bobina se empieza a descargar contra el capacitor en el mismo sentido de la corriente original, provocando que ahora el capacitor se empiece a cargar inversamente a la polaridad original, dando comienzo a la segunda etapa del ciclo que sería desde el punto “e” hasta el punto “a”, etapa caracterizada con la única diferencia a la anterior que el flujo de corriente es contrario al de la primera etapa debido a la polarización inversa del capacitor, dando como resultado la Fig. 1.24 donde se presenta a detalle el comportamiento de la corriente en el sistema en un ciclo completo de oscilación [17].

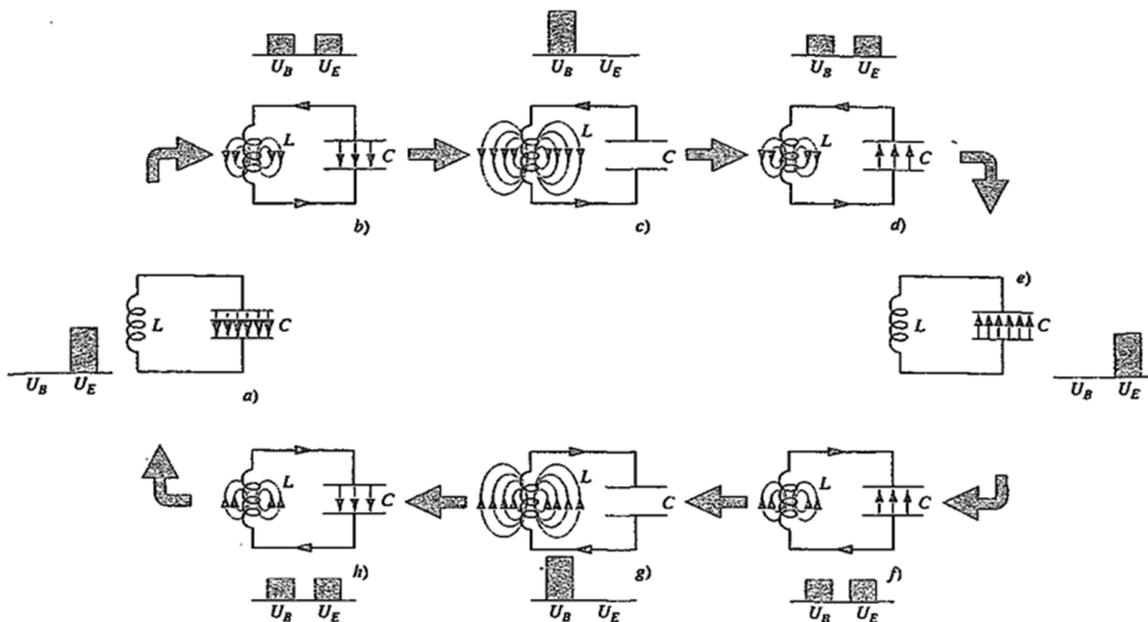


Fig. 1.23. Etapas de un ciclo de oscilación de un circuito LC sin resistencia, las gráficas de barra presentan las energías magnéticas y eléctricas almacenadas en las diferentes etapas de la oscilación, la flecha presenta la corriente [16].

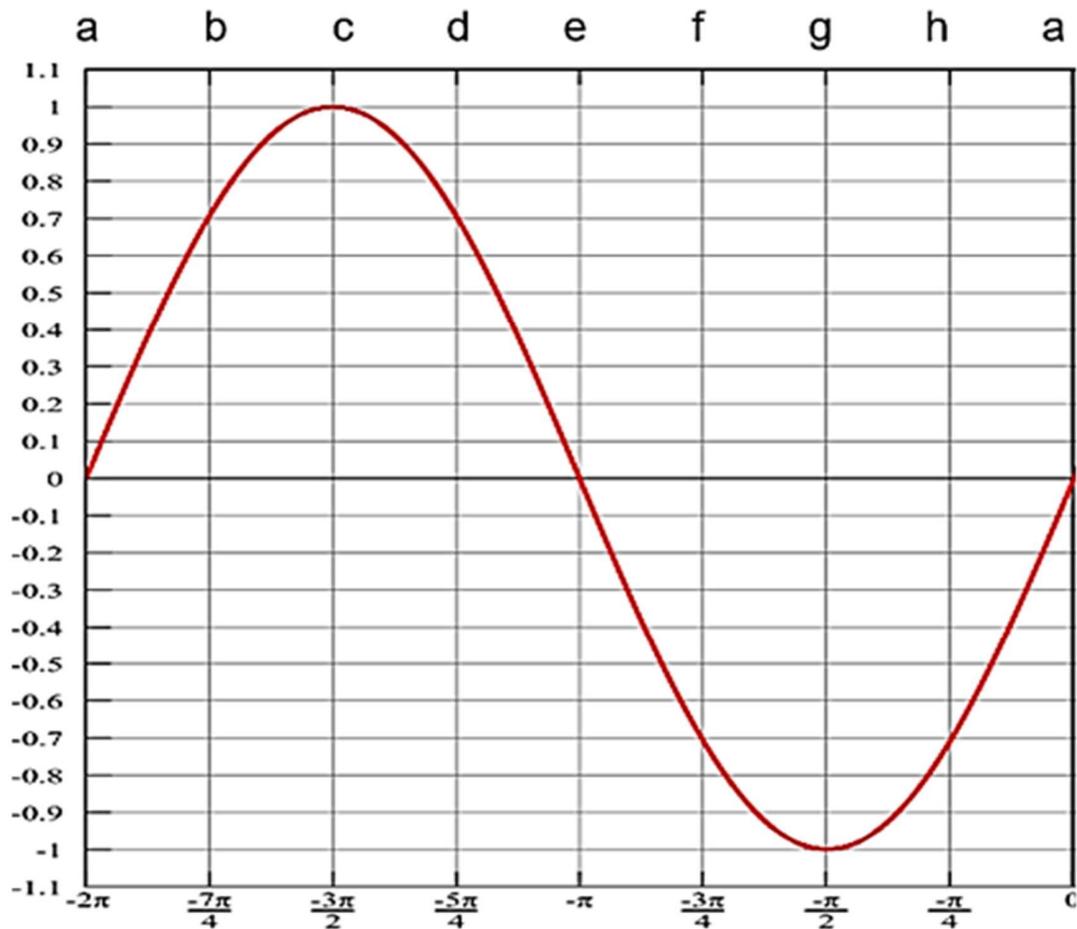


Fig. 1.24. Valores de la corriente del sistema en los diferentes puntos [16].

Para el circuito de resonancia de la Fig. 1.23 se puede expresar la frecuencia natural de oscilación con la Ec. (1.5 [16].

$$\omega_{natural} = \frac{1}{\sqrt{L_i C}} \quad (1.5)$$

donde: $\omega_{natural}$ es la frecuencia de oscilación natural del sistema en rad/s,

L_i es la inductancia de la bobina primaria, y

C es la capacitancia equivalente del banco de condensadores no polarizados.

Dejando todo para términos de la frecuencia se obtiene la Ec. (1.6 [16].

$$f_{natural} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_i C}} \quad (1.6)$$

Al ver el comportamiento de la corriente se puede observar la tendencia sinusoidal de ésta, así mismo la diferencia de potencial desplazada 90° de fase de la corriente de la Fig. 1.23, por lo que se obtiene como resultado de este circuito una corriente alterna cuya frecuencia de oscilación solo dependerá del valor de la capacitancia y la inductancia; en otras palabras, del capacitor o banco de capacitores y la bobina [16].

Ahora bien, ya comprendido los efectos de la conexión en paralelo de estos componentes se puede incorporar a este análisis las pérdidas existentes en el circuito para asemejarlo a un caso real, por lo que es de entender que habrán fugas de energía en este sistema debido a resistencias internas de las líneas conductoras y los componentes, lo que provoca que la amplitud de la onda vaya disminuyendo paulatinamente hasta agotar la energía original en el sistema, siendo esto un circuito LC amortiguado cuyo comportamiento se presenta en la Fig. 1.25 [16].

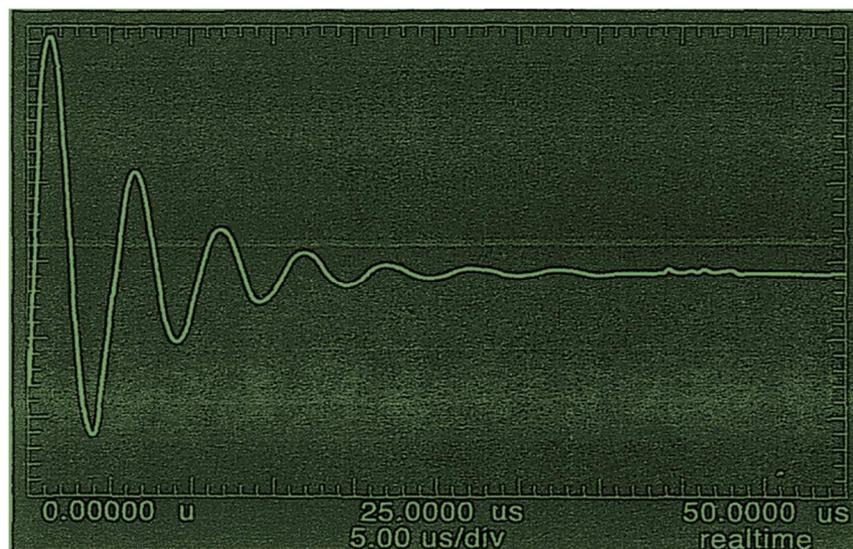


Fig. 1.25. Trazo de un osciloscopio que presenta la oscilación de un circuito LC amortiguado. La amplitud de la oscilación disminuye porque se disipa energía en la resistencia del circuito [16].

Suponiendo que el circuito se energiza por una fuente externa electromotriz variable en el tiempo y dada por la Ec. (1.7 [16].

$$\varepsilon = \varepsilon_m \cos(\omega''t) \quad (1.7)$$

Con una corriente inducida variable en el tiempo dada por la Ec. (1.8 [16].

$$i = i_m \text{Sen}(\omega''t - \varphi) \quad (1.8)$$

Por lo que será lógico suponer que i_m es grande cuando la frecuencia de excitación ω'' se aproxima a la frecuencia natural ω del sistema. En otras palabras, se estima que una gráfica de i_m en función de ω'' alcance su valor máximo cuando se cumple la Ec. (1.9, así [16]:

$$\omega'' = \omega = \frac{1}{\sqrt{L_i C}} \quad (1.9)$$

Cuando esto se cumple se dice que el circuito se encuentra en condición de resonancia, tal como se presenta en la Fig. 1.26 [16].

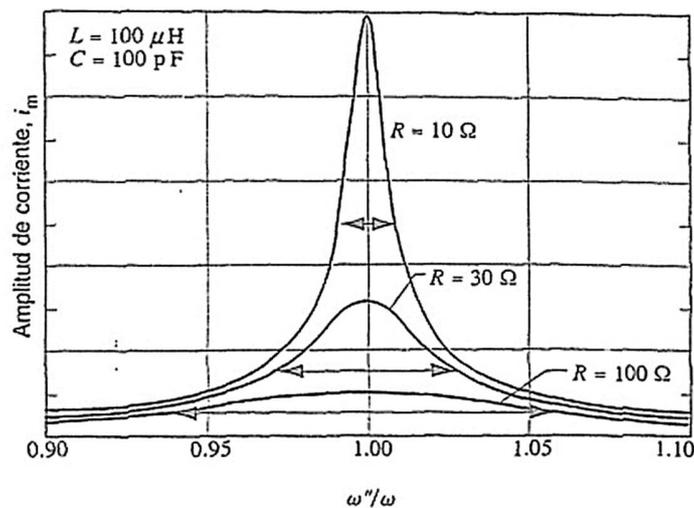


Fig. 1.26. Curvas de resonancia para el circuito oscilatorio forzado. Las tres curvas corresponden a diferentes valores de la resistencia del circuito, las flechas horizontales indican el ancho de la agudeza de cada resonancia [16].

1.4.4. CIRCUITO DE CONTROL

Dentro de las opciones más propicias para la inversión de voltaje se tienen el circuito oscilador Royer y el circuito oscilador Mazzilli, siendo el circuito Mazilli el más adecuado debido a que este ofrece una señal autoresonante y sinusoidal a la salida, a diferencia del oscilador Roger que es una salida de onda cuadrada [18].

La Fig. 1.27 representa el circuito del convertidor flyback Mazzilli ZVS. Este circuito, que fue inventado por Vladimiro Mazzilli, es una mejora de la topología del oscilador Royer. Esta topología es un convertidor auto oscilante que puede impulsar un transformador con una alta potencia y una buena eficiencia. En el devanado primario compuesto por las bobinas L_2 y L_3 que junto con el capacitor C_1 forman un circuito oscilador LC cuya frecuencia de resonancia satisface la Ec. (1.6 ya antes demostrada [18]).

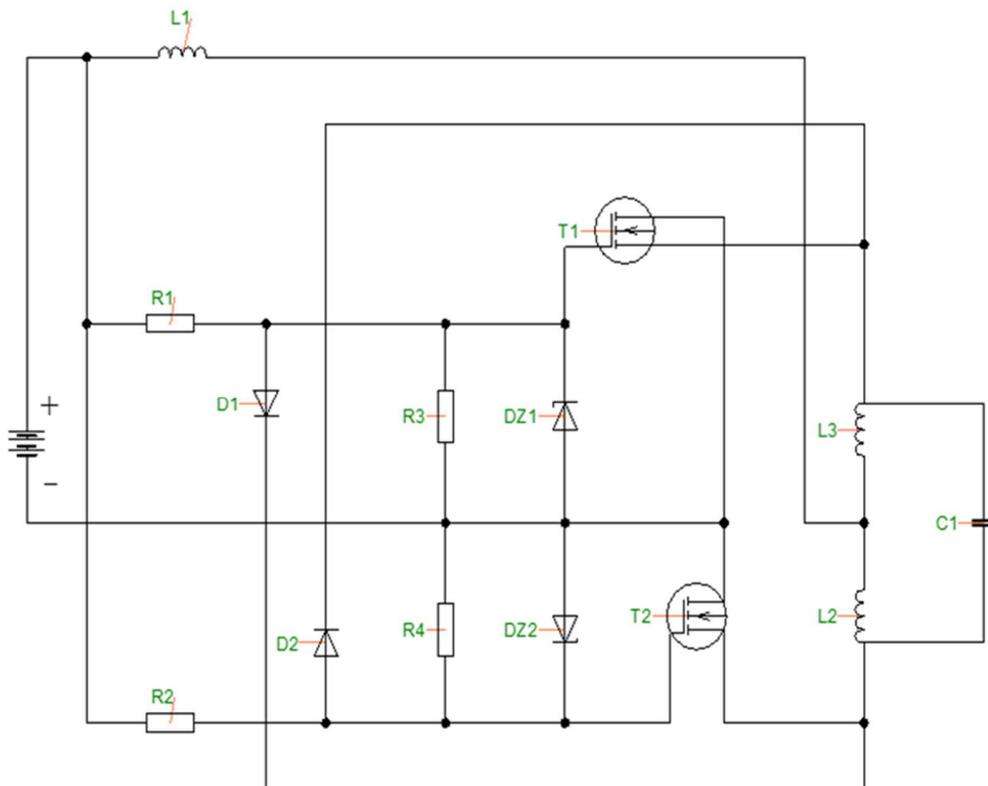


Fig. 1.27. Circuito base del oscilador Mazzilli original [18].

Dado que el circuito funciona a alta potencia para la escala de laboratorio, se puede disipar una cantidad significativa de calor a través del condensador C_1 . Para prevenir una falla del capacitor, se deben conectar los capacitores en paralelo para repartir el calentamiento entre todos, con una capacitancia equivalente en paralelo rondando alrededor de los microfaradios, cada uno con una capacidad de voltaje máximo de 630 V en paralelo. El valor de la inductancia del devanado primario del circuito original fue de $54.1\mu\text{H}$ y la capacitancia equivalente de $0.341\ \mu\text{F}$ por lo que la frecuencia del oscilador era de unos 37.1 kHz. Los valores de los componentes estándar del circuito se representan en la Tabla 1.4 [18].

Tabla 1.4. Componentes estándar en el circuito Oscilador Mazilli [18].

Componente	Valor	Unidades
Resistencia R1	470	Ω
Resistencia R2	470	Ω
Resistencia R3	10	$k\Omega$
Resistencia R4	10	$k\Omega$
Diodo Zener DZ1	12	V
Diodo Zener DZ2	12	V

Para los transistores el voltaje de puerta de cada MOSFET debe estar equipado con un buen disipador de calor y un sistema de enfriamiento para evitar el sobrecalentamiento durante el funcionamiento. Los componentes estándares solo se seleccionan sobre la base de su capacidad técnica únicamente y no en su valor nominal, por ejemplo, los transistores MOSFET se seleccionan sobre la base de la capacidad de conducir corriente y tolerar altos voltajes. Los componentes del circuito a variar son la bobina principal L_p , la bobina $L1$ que funciona como un limitador de corriente y el capacitor o banco de capacitores C_1 [18].

El funcionamiento del circuito es simple, la bobina $L1$ funciona como una barrera para la corriente, haciendo que la energía inicialmente circule hacia los circuitos de cualquiera de las compuertas $Q1$ o $Q2$. Luego debido a las pérdidas en las líneas, la corriente siempre llegará primero a una compuerta que, a otra, es ahí donde se puede suponer que la corriente llega primero a la compuerta de $Q1$ permitiendo el paso de la corriente en la bobina primaria por medio de $L3$, cargando de este modo el campo

magnético de la bobina, obteniendo el primer cuarto de ciclo de energía para la corriente tal como se presenta en la Fig. 1.28 [18].

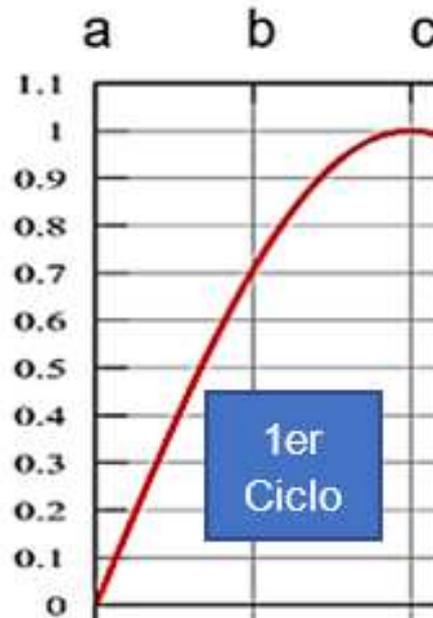


Fig. 1.28. Carga inicial de la bobina [18].

Cuando la bobina se carga completamente, en ese instante los componentes L1 y Lp se empieza a comportar como un corto circuito y la corriente llega a su punto máximo, tanto que la corriente deja de circular por el circuito de la compuerta Q1 haciendo que se inhiba en paso de la corriente por Q1 y la bobina completamente cargada se empieza a descargar contra el capacitor hasta que se descarga por completo, dando lugar al segundo cuarto de ciclo de la corriente Fig. 1.29 [18].

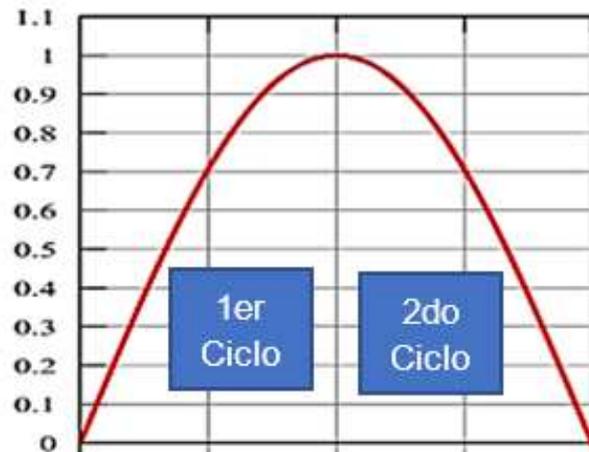


Fig. 1.29. Primer y segundo cuarto de ciclo de la corriente [18].

Al terminar de descargarse la bobina contra el capacitor, éste inmediatamente se empieza a descargar e invierte la polaridad del circuito activando y desactivando por medio de los diodos D1 y D2 el circuito de la compuerta Q2 y Q1 respectivamente, con ayuda de la tensión de la fuente se vuelve a cargar la bobina L_p hasta el voltaje nominal dando como resultado una oscilación forzada suprimiendo la amortiguación, dando como resultado el tercer cuarto de ciclo (ver Fig. 1.30) [18].

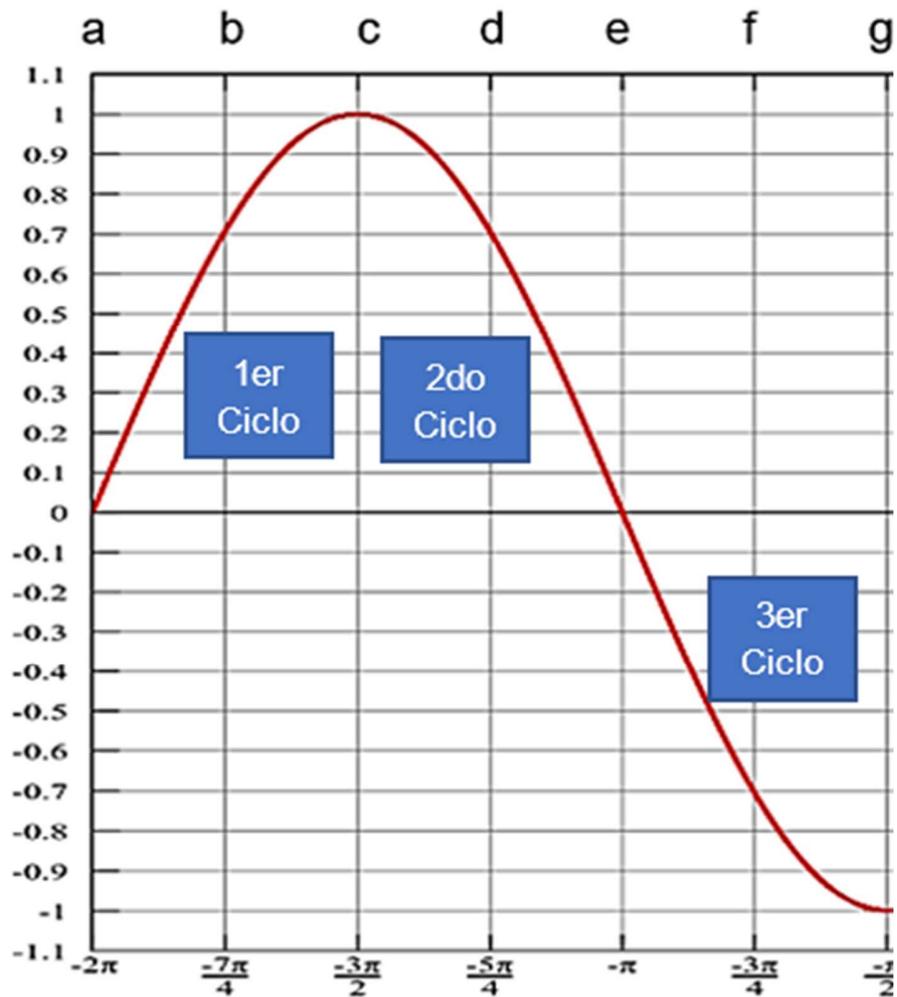


Fig. 1.30. Primero, segundo y Tercer cuarto de ciclo de la corriente [18].

Por último, al terminar de descargarse el capacitor y con la bobina completamente cargada ésta se empieza a descargar siguiendo el mismo sentido de la corriente anterior, dando como resultado el último cuarto de ciclo de la corriente Fig. 1.31 [18].

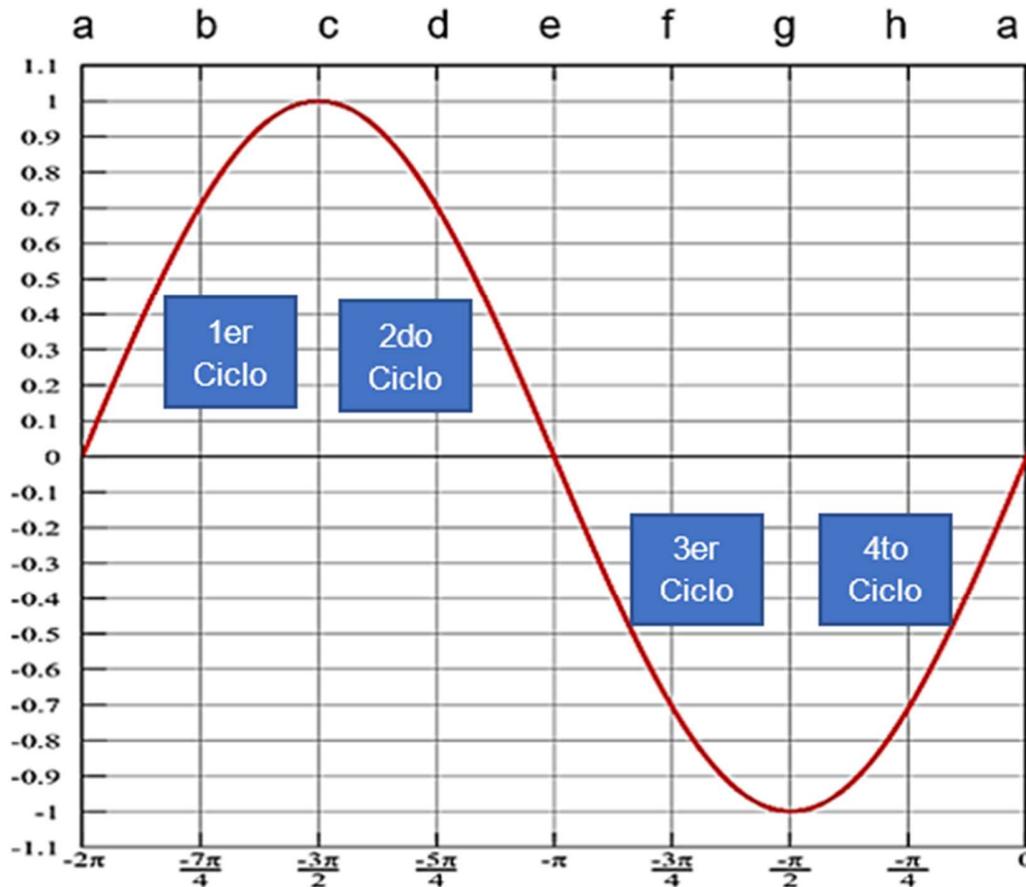


Fig. 1.31. Ciclo de la corriente en el circuito oscilador Mazzilli. 1er cuarto de ciclo carga de bobina por medio de la fuente; 2do Cuarto de ciclo carga de capacitor; 3er cuarto de ciclo carga de bobina mediante capacitor y fuente y; 4to cuarto de ciclo carga de capacitor [18].

1.4.5. FUENTE DE ALIMENTACIÓN

Es esencial tomar la decisión adecuada en cuanto a la selección y la planificación de la fuente de alimentación. Una conexión o un dimensionado incorrecto de la fuente de alimentación pueden afectar gravemente a la seguridad y/o la disponibilidad de toda la instalación [19].

Las fuentes de voltaje o corriente DC se subdividen en dos grupos principales, los cuales son las fuentes lineales y las fuentes conmutadas (ver Fig. 1.32) respectivamente, el diseño de las fuentes lineales es simple pero bastante robusto, poseen una baja eficiencia y el voltaje de salida varía en función al voltaje de entrada. Por su contraparte,

las fuentes conmutadas poseen una mayor eficiencia que oscila entre un 65% y un 95% y ofrecen una salida de voltaje estable [19].

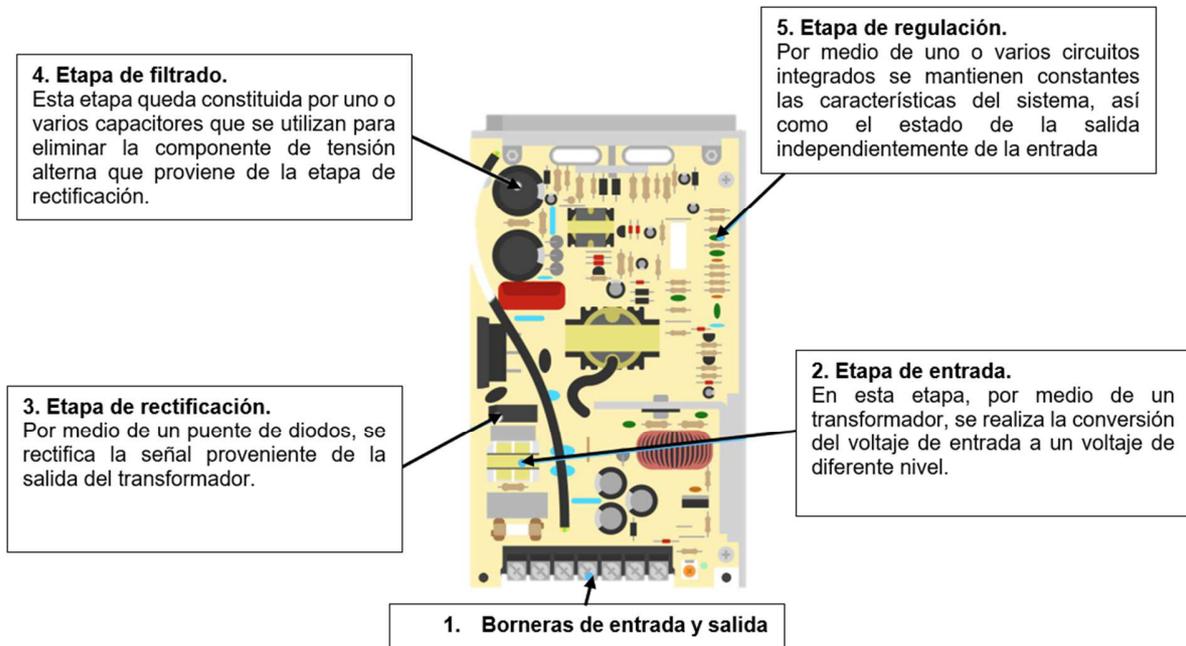


Fig. 1.32. Componentes de una fuente DC conmutada [19].

Una fuente conmutada o también llamada fuente de poder (Power Supply Unit), es un circuito electrónico que transforma la energía eléctrica a través de dispositivos de conmutación que encienden y apagan a altas frecuencias, los cuales son conocidos como tiristores, y con componentes de almacenamiento de energía eléctrica como capacitores o inductores para la suministración de energía cuando el dispositivo de conmutación se encuentra en el estado no conductor. Son utilizadas frecuentemente para proporcionar diversos niveles de potencia de salida de corriente Directa (CD), necesarios para las aplicaciones que se requieren hoy en día tal y como en Iluminación, Electrónica, Control Industrial, e inclusive calentamiento por inducción [19].

Para el diseño del circuito en el capítulo 2 se tomará como base una fuente conmutada, ya que mediante un interruptor se puede controlar el proceso de calentamiento. Ahora bien, las fuentes de energía con las que se cuenta en la red del laboratorio son monofásicas y trifásicas, teniendo en cuenta que el valor de la potencia que consumirá el circuito en conjunto a las pérdidas por transferencia de calor son pocas

y que el equipo posee un rendimiento eléctrico bastante bueno se prefiere usar la red monofásica [19].

Para calcular la potencia de la fuente de la red se debe asumir que las pérdidas que se generan en el proceso de transformación de voltaje son despreciables, porque se implementa el modelo de un transformador ideal lo cual implica que la red deberá suministrar por lo menos la potencia nominal de diseño más un porcentaje extra y que por seguridad para suplir cualquier sobrecarga se ajusta ese factor por norma un 30% más de potencia, lo que implica que la red debe ser capaz de suplir la potencia nominal más un 30% o lo mismo que $1.3 \cdot P_{\text{nominal}}$ calculada. Al ser un diseño a escala de laboratorio se usará el suministro de energía eléctrica monofásica de 127 V a 60 Hz [19].

Entre los valores comerciales de las fuentes se tienen de configuración de 0 a 48 V de corriente continua y se tiene un rango de configuraciones desde 2 A en baja potencia hasta los 60 A en gran potencia, o lo mismo que fuentes desde 96 watts hasta 2,880 watts respectivamente [19].

1.4.6. CIRCUITO DE PROTECCIÓN ELÉCTRICA

Las instalaciones eléctricas cuentan con diversos sistemas de protección para garantizar la seguridad y la integridad de los usuarios y de las infraestructuras. Los sistemas de protección más frecuentes son [20]:

- Cortacircuitos fusible,
- Relé térmico,
- Interruptor termomagnético, e
- Interruptor diferencial

A) Cortacircuitos fusible

Dispositivos destinados a cortar automáticamente el circuito eléctrico cuando la corriente eléctrica que los atraviesa es muy alta. El fusible (ver Fig. 1.33) es la parte de un circuito que se funde si pasa de una intensidad superior para la que se construyó. El fusible es sólo la lámina o hilo conductor destinado a fundirse y, por lo tanto, a cortar el

circuito, mientras que el cortocircuito fusible comprende, además, la carcasa, los materiales de soportes, entre otros [20].



Fig. 1.33. Cortacircuitos fusible [20].

B) Relé térmico

Dispositivo de protección que tiene la capacidad de detectar las intensidades no admisibles (ver Fig. 1.34). No puede eliminar la avería por sí solo, necesita otro elemento que realice la desconexión de los receptores. Se suele utilizar una lámpara de señalización al cerrar el circuito para indicar que el relé térmico ha actuado debido a una sobreintensidad no admisible [20].



Fig. 1.34. Relé térmico [20].

C) Interruptor termomagnético

Dispositivo electromecánico con capacidad para cortar, por sí mismo, las sobreintensidades no admisibles y los cortocircuitos que se puedan producir (ver Fig. 1.35). En la Desconexión por cortocircuito. Actúa por principio de funcionamiento magnético. Una bobina magnética crea una fuerza que, por medio de un sistema de

palancas, se encarga de abrir el contacto móvil (entrada de corriente). Si la corriente eléctrica que atraviesa el interruptor automático supera la intensidad nominal de distintas veces, su apertura tiene lugar a un tiempo inferior a 5 ms. Ahora bien, en la desconexión por sobrecarga. Actúa por principio de funcionamiento térmico. Un bimetálico se curva cuando es atravesado por una sobreintensidad no admisible y origina una fuerza que se transmite por medio de palancas y desconecta el contacto móvil. El tiempo de actuación lo determina la intensidad que lo atraviesa: a más intensidad menos tiempo tarda en actuar [20].

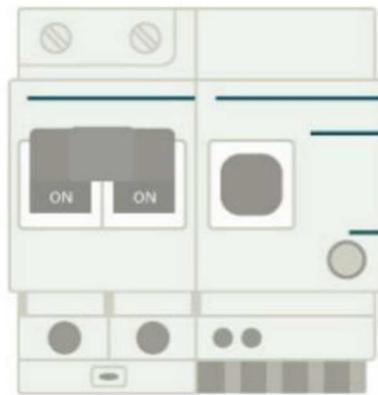


Fig. 1.35. Interruptor magnetotérmico [20].

D) Interruptor diferencial

Dispositivo de protección que detecta y elimina los defectos de aislamiento (ver Fig. 1.36). Este dispositivo tiene mucha importancia en las instalaciones eléctricas y necesita estar protegido de las sobreintensidades y cortocircuitos, colocando un interruptor magnetotérmico antes del mismo. Durante el funcionamiento de este dispositivo en situaciones de normalidad, la corriente que entra en un receptor tiene el mismo valor que el que sale de este. Sin embargo, en caso de que haya un defecto de aislamiento, se producirá un desequilibrio entre la corriente de entrada y la de salida, con lo que la variación de corriente no será nula. Cuando esto ocurre, el interruptor diferencial actúa abriendo el circuito cuando detecta que esta variación de corriente no es nula [20].

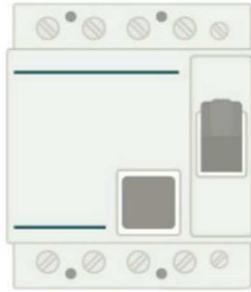


Fig. 1.36. Interruptor diferencial [20].

Para el circuito de la Fig. 1.37, los componentes se seleccionan de la siguiente manera, el conjunto de relé y contactor se selecciona en base a la corriente nominal del equipo de inducción o fuente de alimentación a la entrada, el disyuntor de igual forma sobre la corriente de trabajo pero con un factor más arriba de la nominal y por último el interruptor termomagnético o Circuit Breaker se selecciona en base a la capacidad del cable conductor usado en la instalación eléctrica. El cable se seleccionará en base a la corriente nominal del equipo más un factor suficientemente arriba para evitar sobrecalentamiento en las líneas, este se selecciona en base al código eléctrico nacional (NEC) como se ve en la Tabla 1.5 [20].

El circuito de control y fuerza de la Fig. 1.37 se compone de la siguiente manera como se presenta en la Tabla 1.6 [20].

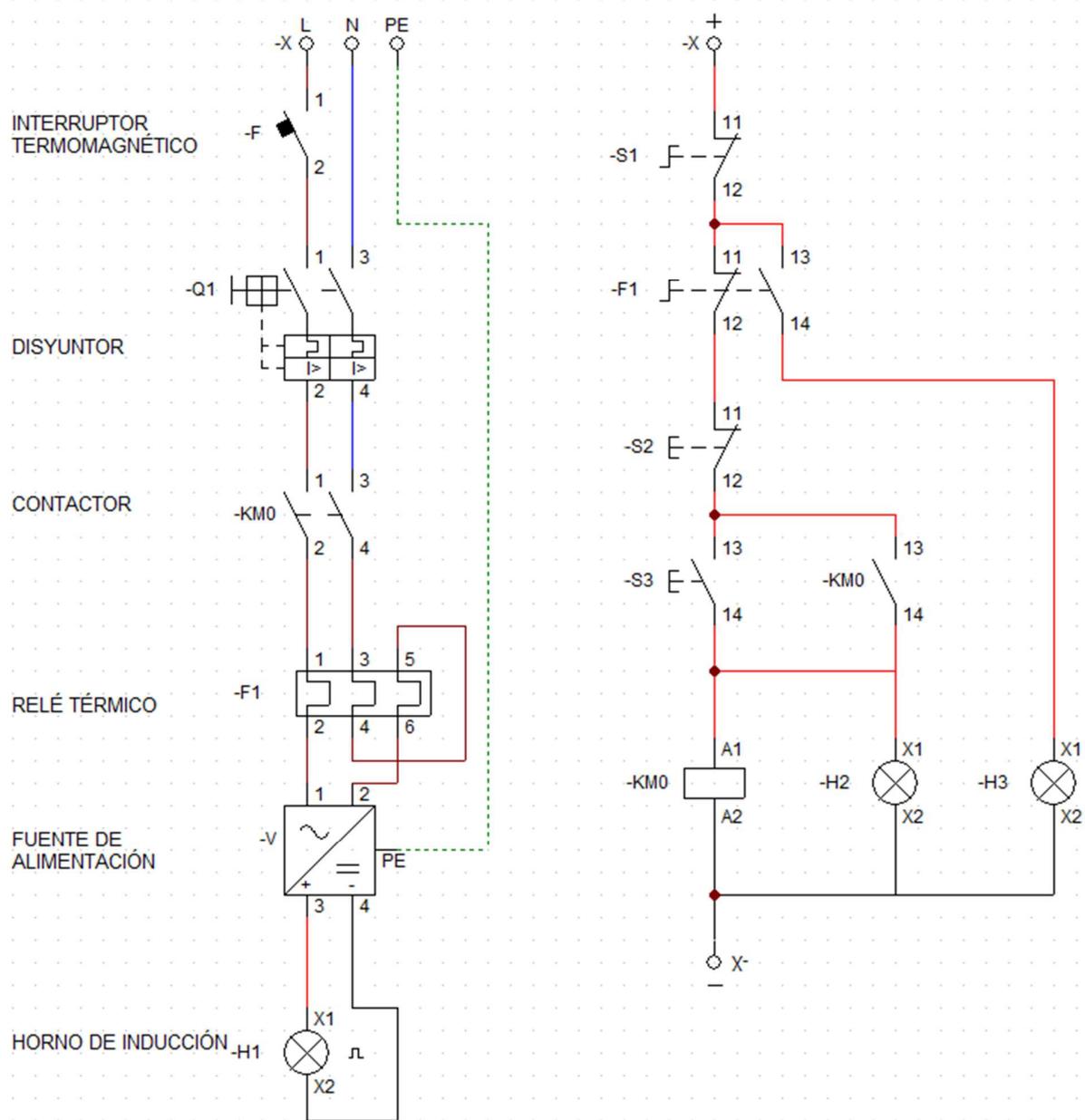
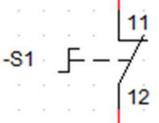
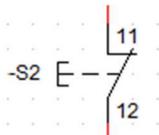
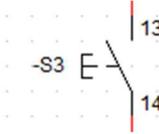
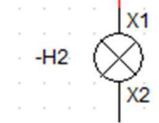
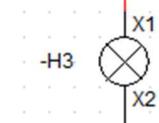
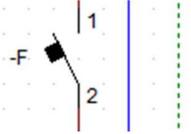
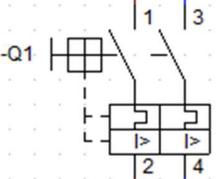


Fig. 1.37. Circuito de protección básico [20].

Tabla 1.5. Capacidad de corriente permisible en conductores aislados para 0 a 2,000 V nominales y no más de tres conductores portadores de corriente en una canalización, cable o tierra (directamente enterrados) y temperatura ambiente de 30 °C [21].

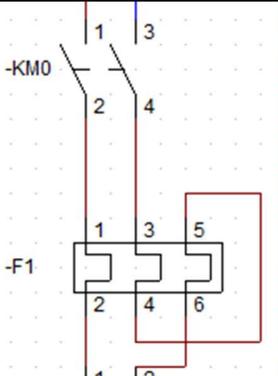
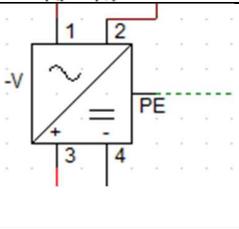
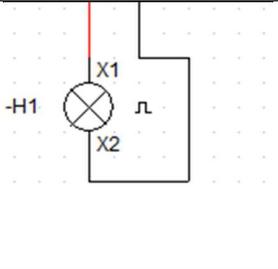
Calibre, mm ²	Calibre, AWG O kcmils	Temperatura nominal del conductor					
		60 °C	75 °C	90 °C	60 °C	75 °C	90 °C
		Tipos	Tipos	Tipos	Tipos	Tipos	Tipos
		TW*, UF*	FEPW*, RH*, RHW*, THHW*, THW*, THWN*, XHHW*, USE*, ZW*	TBS, SA, SIS, FEP*, FEPB*, MI, RHH*, RHW-2, THHN*, THHW*, THW-2*, THWN-2*, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW2	TW*, UF*		TBS, SA, SIS, THHN*, THHW*, THW-2*, THWN-2*, RHH*, RHW-2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW2
Cobre							
0.82	18	-	-	14	-	-	-
1.31	16	-	-	18	-	-	-
2.08	14	20	20	25	-	-	-
3.30	12	25	25	30	20	20	25
5.25	10	30	35	40	25	30	35
8.36	8	40	50	55	30	40	45
13.29	6	55	65	75	40	50	60
21.14	4	70	85	95	55	65	75
26.26	3	85	100	110	65	75	85
33.62	2	95	115	130	75	90	100
42.20	1	110	130	150	85	100	115
53.50	1/0	125	150	170	100	120	135
67.44	2/0	145	175	195	115	135	150
85.02	3/0	165	200	225	130	155	175
107.21	4/0	195	230	260	150	180	205
126.67	250	215	255	290	170	205	230
152.01	300	240	285	320	190	230	255
177.34	350	260	310	350	210	250	280
202.68	400	280	335	380	225	270	305
253.35	500	320	380	430	260	310	350
304.02	600	355	420	475	285	340	385
354.69	700	385	460	520	310	375	420
380.02	750	400	475	535	320	385	435
405.36	800	410	490	555	330	395	450
456.03	900	435	520	585	355	425	480
506.70	1,000	455	545	615	375	445	500
633.38	1,250	495	590	665	405	485	545
760.05	1,500	520	625	705	435	520	585
886.73	1,750	545	650	735	455	545	615
1,013.40	2,000	560	665	750	470	560	630

Tabla 1.6. Componentes utilizados en el circuito de fuerza y control de encendido del horno de inducción electromagnética [20].

Ilustración	Simbología utilizada	Descripción del componente
		<p>Stop de hongo para emergencia o seguridad</p>
		<p>Interruptor de alto manual, normalmente cerrado</p>
		<p>Interruptor de inicio o start, normalmente abierto</p>
		<p>Indicador de funcionamiento o puesta en marcha</p>
		<p>Indicador de disparo o sobrecarga</p>
		<p>Interruptor termomagnético o circuit breaker</p>
		<p>Disyuntor diferencial</p>

Continúa.

Continuación.- Tabla 1.7. Componentes utilizados en el circuito de fuerza y control de encendido del horno de inducción electromagnética [20].

Ilustración	Simbología utilizada	Descripción del componente
		<p>Relé de sobrecarga y contactor armado</p>
		<p>Fuente de alimentación conmutada</p>
		<p>Representación esquemática del horno de inducción o su circuito</p>

1.4.7. SISTEMA DE ENFRIAMIENTO

El sistema de enfriamiento es de vital importancia para equipos de gran capacidad y de uso continuo en manufactura (ver Fig. 1.38), puesto que la bobina percibe calentamiento debido a la radiación del material a tratar [12].

Como fluido refrigerante se prefiere utilizar agua fría tratada, por lo que al agua potable se le realiza una combinación de químicos anti incrustantes y biosidas para prevenir la corrosión y taponamiento de cualquier tipo en el sistema de enfriamiento. Así, de este modo se proyecta una larga vida útil para la bobina y accesorios del equipo de enfriamiento [12].

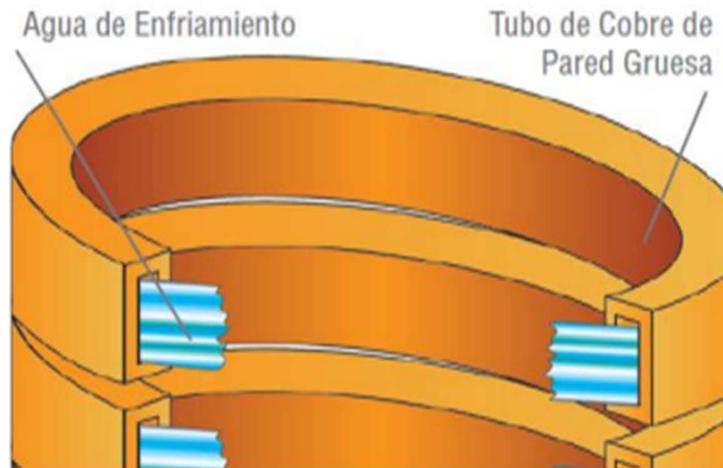


Fig. 1.38. Bobina hueca refrigerada [12].

Los sistemas de refrigeración para hornos de inducción se clasifican en tres, los cuales son de circuito abierto, circuito cerrado con radiadores y circuito cerrado con intercambiadores, cada uno se describe a continuación en la Tabla 1.8 [12].

Tabla 1.8. Sistemas de enfriamiento [12].

Sistema	Descripción
Circuito abierto	Es uno de los sistemas de refrigeración más económicos y eficientes del mercado, se debe tener en consideración que presenta más consumo de agua y se caracteriza por estar en contacto con un flujo de aire para lograr enfriar el agua, este flujo de aire se puede dar por tiro mecánico o por tiro natural, dependiendo de la aplicación.
Circuito cerrado con radiadores	Se caracteriza por el paso del fluido muy cerca de un ventilador radiador que es impulsado mecánicamente, su ventaja es que no requiere gran cantidad de tuberías ni cableado de control.
Circuito cerrado con intercambiadores	Este tipo de sistema tiene equipos auxiliares como los intercambiadores de calor que separan las corrientes fluidas, los cuales, por lo general se sitúan en medio de la torre de enfriamiento y el sistema del horno por inducción.

1.5. TRATAMIENTO DE LOS METALES

La temperatura en la que tienen lugar los cambios alotrópicos en el hierro está influida por elementos de aleación, de los cuales el más importante es el carbono, para comprender los diferentes tratamientos que se pueden aplicar a los metales ferrosos es necesario conocer las propiedades del material a tratar a diferentes concentraciones de carbono y sus estados a diferentes temperaturas, es por ello que se presenta la Fig. 1.39

en dónde se observa la porción más comúnmente utilizada del diagrama hierro carbono, esta fracción del diagrama es conocida como diagrama hierro – carburo de hierro [22].

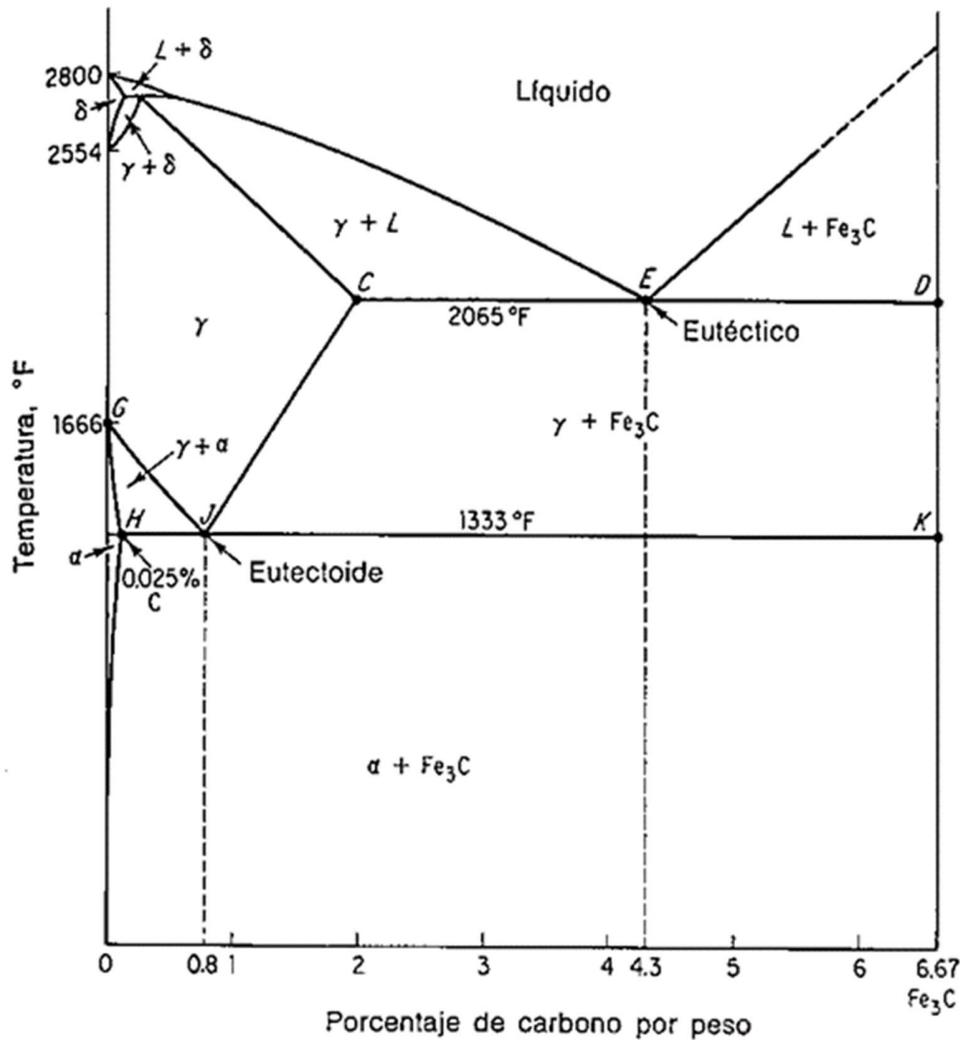


Fig. 1.39. Diagrama de equilibrio hierro carburo de hierro marcado en términos generales [22].

1.4.1. DIAGRAMA HIERRO CARBURO DE HIERRO

Este diagrama es la parte entre el hierro puro (Fe) y un compuesto intersticial (carburo de hierro, Fe_3C) que contiene 6.67 % de C en peso. Es importante recalcar que este diagrama es llamado diagrama de equilibrio hierro carburo de hierro, sin embargo, no es verdaderamente un diagrama de equilibrio ya que equilibrio implica que no hay

cambio de fase con el tiempo y es un hecho que el compuesto carburo de hierro se descompondrá en el tiempo en hierro y carbono (grafito), aunque esto tomaría un tiempo exageradamente largo a temperatura ambiente, incluso aunque se mantuviese a 1300 °F tardaría años en formar el grafito. Por lo tanto, el diagrama, aunque represente condiciones metaestables, se puede considerar como representante de cambios en equilibrio, bajo condiciones de calentamiento y enfriamiento relativamente lentos [22].

El diagrama presenta tres líneas horizontales que indican reacciones isotérmicas, una a 1,493 °C (2,720 °F), otra a 1,129 °C (2,065 °F) y la última a 723 °C (1,333 °F). Algunas de las estructuras presentes en el diagrama se presentan en la Tabla 1.9 [22].

Tabla 1.9. Estructuras en el diagrama metaestable hierro carburo de hierro (Fe-Fe₃C) [22].

Cementita o carburo de hierro (Fe ₃ C)	Contiene 6.67 % de C en peso, es un compuesto intersticial típicamente duro y frágil de baja resistencia a la tracción (~5,000 Lb/pulg ²), aunque de alta resistencia compresiva. Es la estructura más dura que aparece en el diagrama, su estructura cristalina es ortorrómbica.
Austenita (γ)	Es una solución sólida intersticial de carbón disuelto en hierro (FCC), su máxima solubilidad es al 2 % de C a 2065 °F. Sus propiedades promedio son resistencia a la tracción 150,000 Lb/pulg ² , dureza 40 Rockwell C y alta tenacidad, esta solución no es estable a temperatura ambiente.
Ledeburita (γ + Fe ₃ C)	Es la mezcla eutéctica de austenita y cementita, contiene 4.3 % de C y se forma a 2,065 °F
Ferrita (α)	Es una solución sólida intersticial de una pequeña cantidad de carbón disuelto en hierro con estructura cristalina BCC, la máxima solubilidad es de 0.025 % de C a 1,333 °F, esta es la estructura más suave que aparece en el diagrama. Sus propiedades promedio son resistencia a la tracción 40,000 Lb/pulg ² , dureza menor que la Rockwell C 0 o que la Rockwell B 90
Perlita (α + Fe ₃ C)	Es la mezcla eutectoide que contiene 0.8 % de C y se forma a 1,333 °F a un enfriamiento muy lento. Es una mezcla muy fina, tipo placa o laminar de ferrita y cementita, sus propiedades promedio son resistencia a la tracción 120,000 Lb/pulg ² , dureza Rockwell C 20
Hierro delta (δ)	Existe a temperaturas entre 1535 y 1400 °C, la red cristalina estable del hierro vuelve a ser la cúbica centrada en el cuerpo (BCC). Esta fase cristalina del hierro carece de interés industrial, por lo que no se referirá más a ella.

Si se toma como base el contenido de carbono, es práctica común dividir el diagrama hierro - carburo de hierro en dos partes, aquellas aleaciones que contengan menos del 2 % de C se conocen como “aceros”, y aquellas que contengan más del 2 % de C se conocen como “hierros fundidos” como se puede observar en la Fig. 1.40 [22].

Ahora bien, el intervalo del acero se subdivide en dos grupos por medio del punto eutectoide (0.8 % de C), aquellos que contengan menos del 0.8 % de C se llaman aceros

hipoeutectoides y los que contienen entre 0.8 y 2 % de C se conocen como aceros hipereutectoides, la principal diferencia entre estos radica en la matriz principal de cada uno, ya que para los aceros hipoeutectoides se tiene una matriz blanda y dúctil compuesta por ferrita y para los aceros hipereutectoides se tiene una matriz dura y frágil compuesta por cementita [22].

Los hierros fundidos de igual forma se subdividen en dos grupos por medio del punto eutéctico (4.3 % de C), los hierros fundidos que contengan menos de 4.3 % de C se conocen como hierros fundidos hipoeutécticos, en tanto los que contienen más del 4.3 % de C se conocen como hierros fundidos hipereutécticos [22].

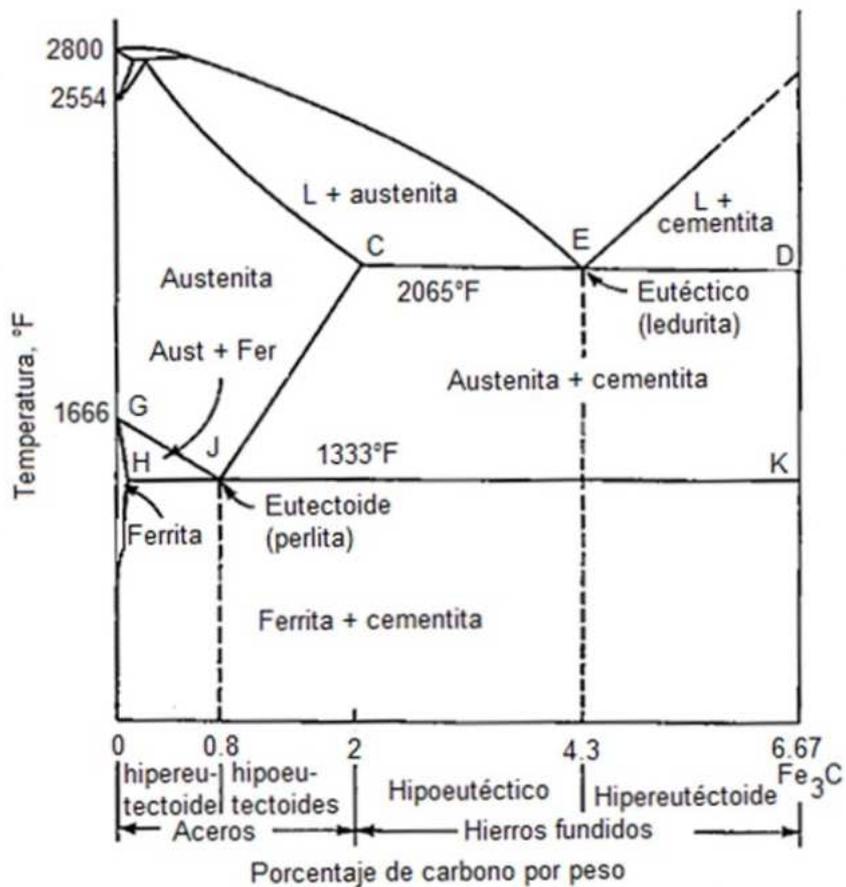


Fig. 1.40. División de grupos sobre la base del contenido de carbono en el diagrama hierro - carburo de hierro [22].

1.4.2. MICROESTRUCTURAS EN ALEACIONES Fe-Fe₃C

La microestructura que se desarrolla depende tanto del contenido de carbono como del tratamiento térmico. Si el enfriamiento es muy lento se dan condiciones de equilibrio y la microestructura obtenida es como las descritas en el apartado más atrás, aunque si los enfriamientos son muy rápidos se producen procesos que cambian la microestructura y por lo tanto las propiedades mecánicas. Para este caso se presentan las micrografías más importantes en los aceros [22]:

a) Aceros eutectoides

Son aquellos en los que la fase austenítica sólida tiene composición del eutectoide 0.8 % (100 %), tal como se presenta en la Fig. 1.41 [22].

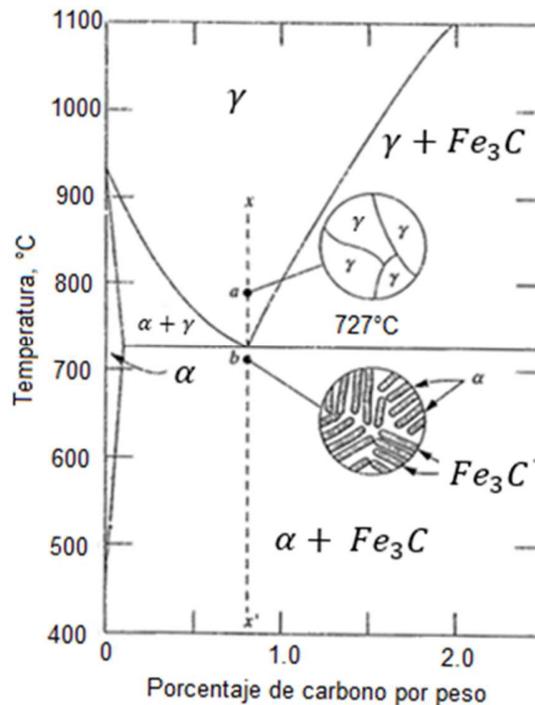


Fig. 1.41. Representación esquemática de un acero eutectoide [22].

Inicialmente la microestructura de la fase γ es muy sencilla con granos orientados al azar (punto a de la línea xx'). Al enfriar se desarrollan las dos fases sólidas Fe- α y

cementita. Esta transformación de fases necesita la discusión del carbono ya que las tres fases tienen composiciones diferentes [22].

Para cada grano de austenita se forman dos fases con láminas de ferrita y otras de cementita respectivamente (punto b de la línea xx'). Las orientaciones entre grano son al azar. Esta microestructura de ferrita y cementita se conoce como "perlita", y el nombre deriva de la apariencia de madreperla bajo el microscopio como se presenta en la Fig. 1.42 [22].

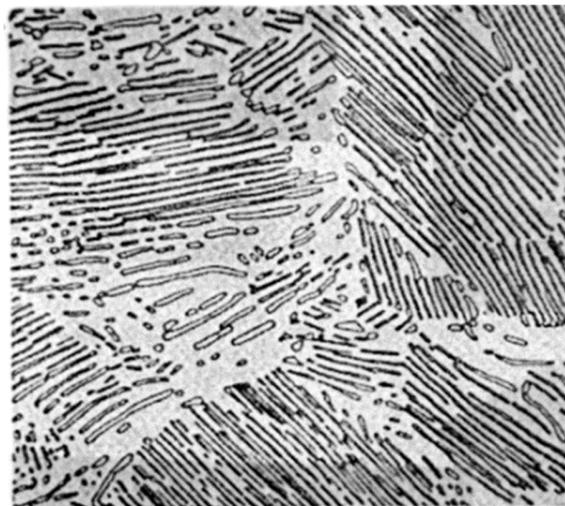


Fig. 1.42. Microestructura perlítica de un acero eutectoide mostrando láminas alternas de ferrita- α (fase clara) y cementita (fase oscura) [22].

Mecánicamente, las perlitas tienen propiedades intermedias entre la blanda y dúctil ferrita y la dura y quebradiza cementita [22].

b) Aceros hipoeutectoides

Los aceros hipoeutectoides son aquellos en los que la fase austenítica sólida tiene un contenido de carbono inferior a la del eutectoide 0.80 %. Los cambios en la microestructura se presentan en la Fig. 1.43 [22].

Para una temperatura ~ 875 °C, la microestructura de la fase γ es homogénea con granos orientados al azar (punto c de la línea yy'). Al enfriar se desarrolla la fase α y esta se convierte en una región bifásica $\alpha + \gamma$ (punto d de la línea yy'). En este punto se ha

segregado un poco de fase α , al bajar en temperatura (punto e de la línea yy') aumenta el contenido en fase α (aunque la proporción depende de la composición inicial del acero hipoeutectoide). La mayor cantidad de fase α se forma en los límites de grano de la fase inicial γ . Al enfriar se atraviesa la temperatura del eutectoide al punto f de la línea yy'. En esta transformación de fases, la ferrita no cambia prácticamente y la austenita que queda se transforma en perlita dando la microestructura característica de los aceros hipoeutectoides Fig. 1.44 [22].

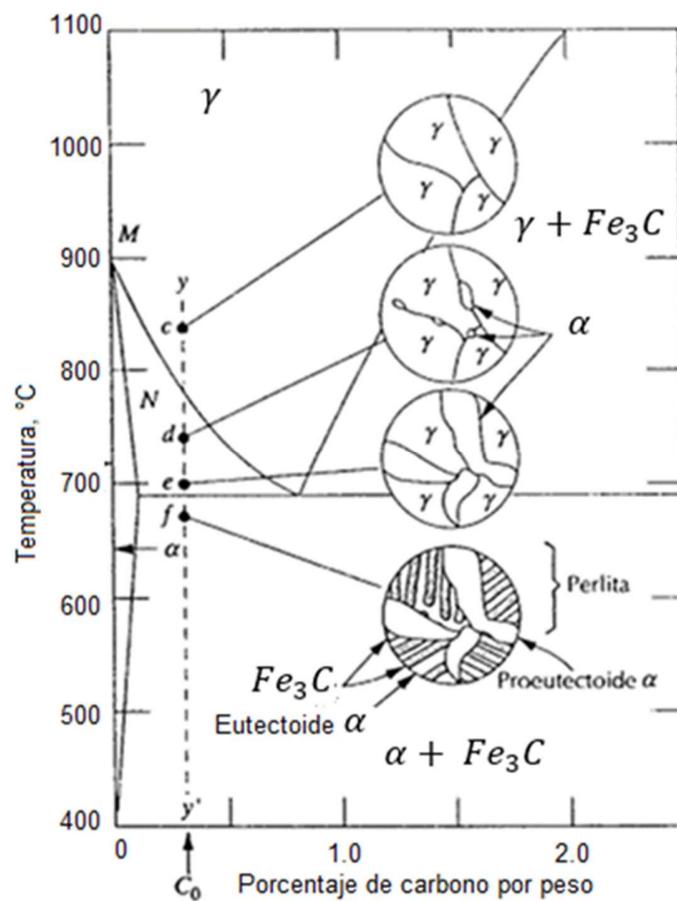


Fig. 1.43. Representación esquemática de las microestructuras de un acero hipoeutectoide [22].

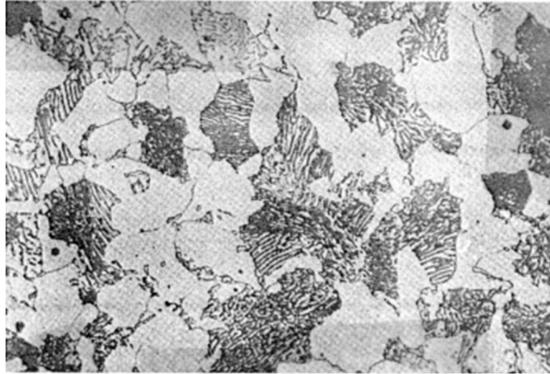


Fig. 1.44. Fotomicrografía de un acero con el 0.38 % de C, microestructura constituida por perlita y ferrita proeutectoide [22].

La ferrita de la perlita se denomina ferrita eutectoide (formada a la temperatura del eutectoide, y proveniente de los granos que restaban de la austenita), la ferrita formada antes del eutectoide (en los límites de grano de la austenita) se denomina ferrita proeutectoide. En la perlita la relación de fases es de ~9 a 1, aunque en los aceros hipoeutectoides la relación perlita y ferrita proeutectoide depende del porcentaje inicial de carbono. Esta microestructura siempre se observa en los aceros hipoeutectoides si han sido enfriados lentamente y son los más comunes [22].

c) Aceros hipereutectoides

Son aquellos en los que la fase austenítica sólida tiene un contenido de carbono entre 0.80 y 2.00 %. Los cambios en la microestructura de un acero de esta composición se dan en la Fig. 1.45 [22].

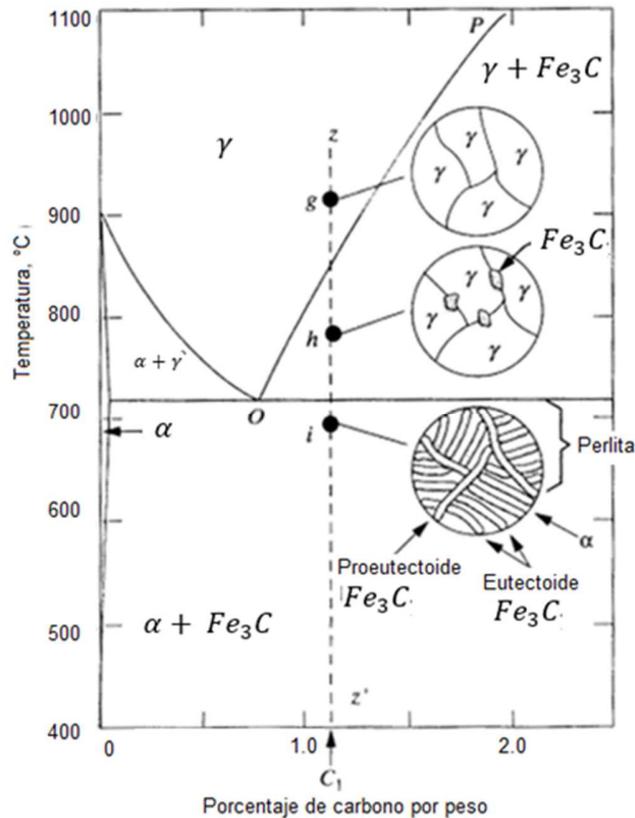


Fig. 1.45. Representación esquemática de las microestructuras de un acero hipereutectoide [22].

Para una temperatura aproximada a 900 °C, la microestructura de la fase γ es homogénea con granos orientados al azar (punto g de la línea zz'). Al enfriar se desarrolla la cementita y se convierte en una región bifásica $\gamma + \text{cementita}$ (punto h de la línea zz'). La cementita se comienza a formar en los límites de grano de la austenita. Esta cementita se denomina cementita proeutectoide ya que se ha formado antes de que se dé la reacción del eutectoide. Al descender por debajo de la temperatura eutéctica, toda la austenita remanente de composición eutectoide se transforma en perlita (punto i de la línea zz'). Por lo tanto, la microestructura es perlita y cementita proeutectoide tal como se presenta en la Fig. 1.46 [22].

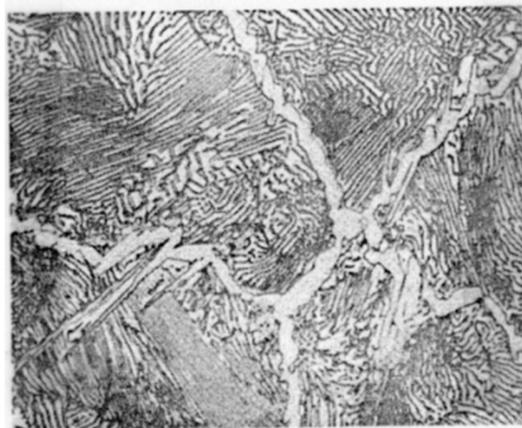


Fig. 1.46. Fotomicrografía de un acero con el 1.4 % de C, microestructura constituida por perlita y cementita proeutectoide [22].

d) Otras microestructuras

En la transformación de la austenita se forma, además de perlita, un constituyente denominado bainita. La microestructura bainítica consta de las fases ferrita y cementita, aunque formando agujas o placas según la temperatura de la transformación. La temperatura de la transformación es menor que la de la perlita. Las transformaciones perlítica y bainítica compiten entre sí. La transformación en otro microconstituyente es solo posible si se calienta la aleación [22].

Si un acero con microestructura perlítica se calienta a una temperatura inferior a la del eutectoide durante un tiempo largo (por ejemplo: $T = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$, tiempo = 18 - 24 h) se forma una nueva microestructura denominada esferoidita, que es cementita globular o esferoidal (ver Fig. 1.47). Las partículas de cementita aparecen como pequeñas esferas incrustadas dentro de la matriz ferrítica α . Esta transformación tiene lugar mediante la difusión del carbono, aunque sin cambiar las proporciones relativas de la fase ferrita y cementita [22].

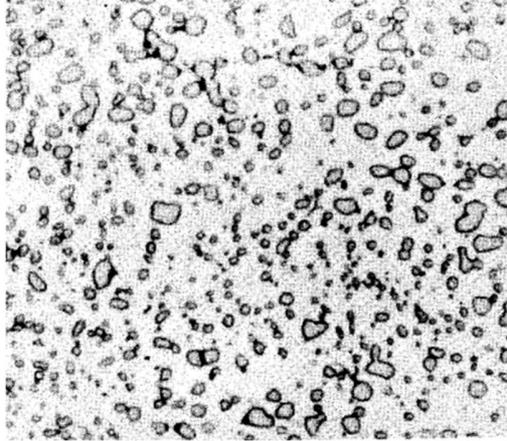


Fig. 1.47. Fotomicrografía de un acero con microestructura de esferoidita. Las partículas pequeñas son cementita en una matriz continua de ferrita α [22].

En los casos descritos anteriormente se discuten las fases y microestructuras presentes si el enfriamiento es suficientemente lento y se pueden ajustar las fases a las composiciones de equilibrio. En muchos casos estas transformaciones son tan lentas como impracticables e innecesarias. En estos casos se prefieren las condiciones de no equilibrio. Además, la presencia de otros elementos aleantes modifican mucho las regiones de estabilidad de las diferentes fases en el sistema Fe-C. Por ejemplo, el enfriamiento rápido (temple) hasta una temperatura próxima a la del ambiente en un acero austenizado origina una microestructura denominada martensita (ver Fig. 1.48) [22].

Esta resulta como una estructura de no equilibrio de la transformación de la austenita, aunque sin difusión de carbono, y tiene lugar al enfriar muy rápidamente para evitar la difusión del carbono. Se puede considerar como una transformación competitiva a la de perlita y bainita. Aunque esta transformación no es muy bien conocida se sabe que se transforma desde austenita (estructura cristalina FCC) hasta martensita (estructura cristalina BTC). Los átomos de carbono permanecen como soluto intersticial dentro de la estructura tetragonal sin que se segregue el carbono en forma de cementita. Este sólido sobresaturado se transforma rápidamente a otras estructuras más estables si se calienta, aunque a temperatura ambiente es estable casi indefinidamente [22].



Fig. 1.48. Fotomicrografía de un acero con microestructura martensítica. Los granos en forma de aguja es la martensita y las regiones blancas es austenita retenida [22].

1.4.3. ACEROS Y FUNDICIONES

Los aceros son aleaciones hierro-carbono con concentraciones apreciables de otros elementos aleantes. Existen miles de aceros de diferentes composiciones y/o tratamientos térmicos. Los aceros se clasifican según su contenido de carbono en: bajo, medio y alto contenido de carbono [22].

Los aceros al carbono solo contienen concentraciones residuales de impurezas mientras que los aceros aleados contienen elementos que se añaden intencionadamente en concentraciones específicas. Los aceros y aleaciones en general se pueden designar de acuerdo a las instrucciones dadas por ACERO SAE “American Iron and Steel Institute”, ASTM “American Society for Testing and Materials” y SAE “Society of Automotive Engineers”. La designación ACERO SAE/SAE consta de cuatro cifras. Las dos primeras indican el contenido en aleantes y las dos segundas de carbono. Las dos primeras para aceros al carbono son 1 y 0 mientras que en aceros aleados puede ser por ejemplo 13, 41 o 43. Las cifras tercera y cuarta indican el contenido de carbono multiplicado por cien. Por ejemplo, el acero código acero SAE 1010 es un acero al carbono (sin elementos aleantes adicionales) y un 0.1 % de C. Los aceros al carbono se pueden dividir en [22]:

- a) Aceros de bajo carbono,
- b) Aceros de medio carbono, y
- c) Aceros de alto carbono.

Ahora bien, más atrás se comentó que los hierros fundidos o simplemente fundiciones se pueden clasificar como fundiciones eutécticas, cuando el contenido de carbono es igual al 4.3 % en peso, fundiciones hipoeutécticas cuando el contenido de carbono es menor y fundiciones hipereutécticas cuando el contenido de carbono es mayor. Según el diagrama de fases, las fundiciones funden a temperaturas entre 1,150 y 1,300 °C considerablemente más baja que la de los aceros (del orden de 1,500 °C). Por lo tanto, funden y se moldean con mayor facilidad y de ahí el nombre que reciben. Sin embargo, las fundiciones se clasifican más por el estado en que se encuentra el carbono. Ya se ha comentado que la cementita es metaestable y se descompone para dar ferrita y grafito. En enfriamiento lento y con la presencia de algunos elementos (principalmente el silicio con una concentración superior al 1 %) favorecen este proceso, y la presencia de otros elementos y los enfriamientos rápidos lo impiden. Las propiedades mecánicas de las fundiciones dependen de la composición y del tratamiento térmico, los tipos más comunes de fundiciones son [22]:

- a) Fundición gris.
- b) Fundición esferoidal.
- c) Fundición blanca.
- d) Fundición maleable.

A) Aceros de bajo carbono

Constituyen la mayor parte de todo el acero fabricado. Contienen menos del 0.25 % en peso de C, no responde al tratamiento térmico para dar martensita ni se pueden endurecer por acritud. La microestructura consiste en ferrita y perlita. Por lo tanto, son relativamente blandos y poco resistentes, aunque con extraordinaria ductilidad y tenacidad. Son de fácil mecanizado, soldables y baratos. Se utilizan para fabricar vigas, carrocerías de automóviles, y láminas para tuberías, edificios y puentes. Otro grupo de aceros de bajo contenido de carbono son los de alta resistencia y baja aleación. Contienen concentraciones variables de Cu, V, Ni y Mo totalizando un aproximado de 10

% en peso. Poseen mucha más resistencia mecánica, que puede aumentar por tratamiento térmico y mantienen las propiedades de fácil mecanizado. Se emplean en componentes donde la resistencia mecánica es crítica: puentes, torres, columnas de soportes de edificios altos, bastidores de camiones y vagones de tren [22].

B) Aceros de medio carbono

Contienen entre el 0.25 y 0.60 % en peso de C. Estos aceros pueden ser tratados térmicamente mediante austenización, temple y revenido para mejorar las propiedades mecánicas. La microestructura generalmente es martensita revenida. Las adiciones de Cr, Ni y Mo facilitan el tratamiento térmico que en su ausencia es difícil y útil solo para secciones de pieza relativamente delgadas. Son más resistentes que los aceros de bajo carbono, aunque menos dúctiles y maleables. Se suelen utilizar para fabricar cinceles, martillos, cigüeñales, pernos, entre otro [22].

C) Aceros de alto carbono

Generalmente contienen entre el 0.60 y 1.4 % en peso de C. Son más duros y resistentes (y menos dúctiles) que los otros aceros al carbono. Casi siempre se utilizan con tratamientos de templado y revenido que lo hacen muy resistentes al desgaste y capaces de adquirir la forma de herramienta de corte. Generalmente contienen Cr, V, W y Mo, los cuales dan carburos muy duros como $Cr_{23}C_6$, V_4C_3 y WC. Se utilizan como herramientas de corte, matrices para hechura de materiales, herramientas de herrería y carpintería. Por ejemplo, cuchillos, navajas, hojas de sierra, brocas para cemento, corta tubos, troqueles, herramientas de torno, muelles e hilos de alta resistencia [22].

1.4.4. CURVAS TTT DE LOS ACEROS

Los tratamientos térmicos más comunes a los que son sometidos los aceros son: temple, recocido y revenido. El temple es un proceso de enfriamiento rápido para dar principalmente martensita, lo que le da mucha dureza, aunque es metaestable, no se pueden calentar a alta temperatura. El recocido es un tratamiento térmico del acero a alta

temperatura para eliminar esfuerzos internos, afinar el grano y conseguir más homogeneidad. Por último, el revenido es un tratamiento térmico como el recocido, aunque a menor temperatura para que no haya transformación de fases sino una simple liberación de esfuerzos internos y homogeneización [22].

Los diagramas TTT de los aceros dependen de la composición, es decir del contenido de carbono y de los contenidos en otros elementos metálicos. En la Fig. 1.49 se representa un diagrama TTT de un acero genérico. Se pueden ver las transformaciones de austenita a perlita (gruesa o fina) y a martensita según las velocidades de enfriamiento. Comenzando con un acero austenítico (por encima de 850 °C), y si la velocidad de enfriamiento es lenta se cruza las líneas de comienzo y fin de la transformación de la perlita (línea III). Resultado final es un acero perlítico (perlita fina o gruesa en función del tiempo). En el caso de la línea II, comienza la transformación a perlita, aunque no finaliza (no cruza la línea de final de la transformación), por lo tanto, la fracción de austenita que no ha cambiado se transforma a martensita cuando intercepta con la línea Ms. Para la línea I, no hay transformación a perlita y todo cambia a martensita, aunque puede quedar algo de austenita metaestable retenida [22].

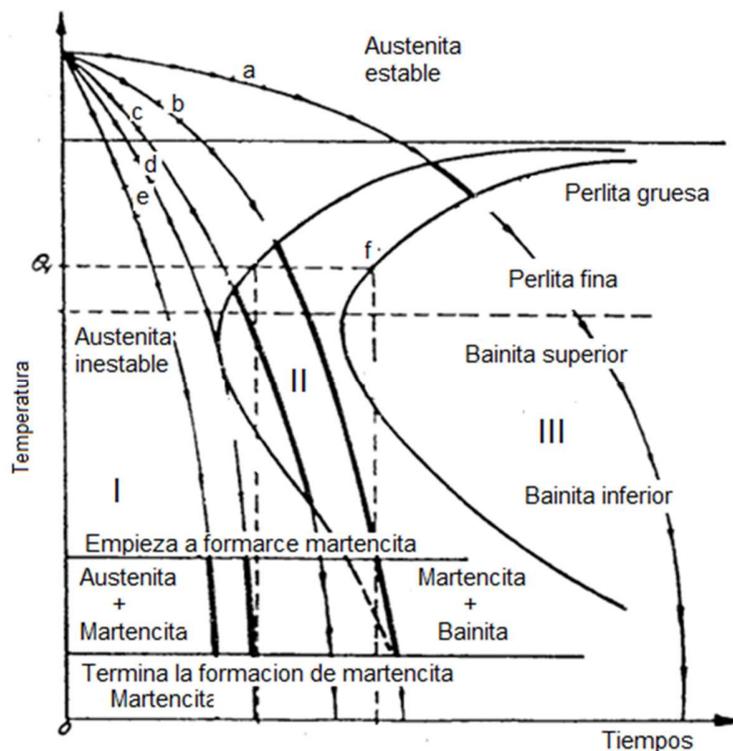


Fig. 1.49. Diagrama TTT esquemático de un acero típico [22].

1.4.5. TRATAMIENTO DE LOS METALES

El objeto de estos tratamientos es mejorar las propiedades mecánicas de los metales bien mejorando su dureza y resistencia mecánica o bien aumentando su plasticidad para facilitar su conformado. Estos tratamientos no deben alterar de forma notable la composición química de un metal. Se pueden distinguir cuatro clases diferentes de tratamientos [22]:

a) Tratamientos térmicos

Consisten en operaciones de calentamiento y enfriamiento a las que se someten los metales para conseguir determinados cambios en su estructura cristalina (por ejemplo, el tamaño del grano) sin que la composición química resulte afectada [22].

De estos se pueden definir los cuatro más fundamentales que serían:

➤ Temple

Consiste en el calentamiento de un metal acompañado de un posterior enfriamiento de forma súbita. De este modo, se obtiene un metal muy duro y resistente mecánicamente a causa de su estructura cristalina deformada. El endurecimiento aportado por el temple se puede comparar al que se consigue por medio de la deformación en frío. Este tratamiento es propio de los aceros y consiste en su austenización, es decir, un calentamiento hasta una temperatura superior a la de austenización (723 °C), seguido de un enfriamiento lo suficientemente rápido para obtener una estructura martensítica [22].

La posibilidad de templar un acero viene determinada por dos factores:

- Su templabilidad. Capacidad de un acero para el temple, es decir, la facilidad con la que se forma la martensita. La transformación completa de austenita en martensita sólo se consigue con velocidades de enfriamiento muy elevadas.
- La velocidad de enfriamiento. La cual estará definida por el medio que se utilice para enfriar el metal, ya sea baño de sales, agua, aceite, entre otros.

El temple del acero nunca constituye un tratamiento final debido a que la estructura martensítica obtenida, pese a ser muy dura, es al mismo a tiempo muy frágil. Por este motivo, una vez templado el acero, se le somete a tratamiento térmico de revenido con

objeto de obtener una estructura más dúctil y tenaz. Los efectos de este tratamiento dependen de la temperatura y del tiempo de duración del proceso. El tratamiento completo de temple más revenido recibe el nombre de “bonificado”. El bonificado es un tratamiento adecuado para aceros aleados o aquellos con un alto contenido de carbono [22].

➤ **Revenido**

Se aplica exclusivamente a los metales templados y es, por lo tanto, un tratamiento complementario del temple. Con el revenido se pretende mejorar la tenacidad del metal templado a expensas de disminuir un poco su dureza [22].

➤ **Normalizado**

Este tratamiento confiere al acero una estructura y propiedades que arbitrariamente se consideran como normales y características de su composición. Por medio de éste, se eliminan esfuerzos internos y se uniformiza el tamaño de grano. Se suelen someter a normalizado piezas que han sufrido trabajos en caliente, en frío, enfriamientos irregulares o sobrecalentamientos y también se utiliza en aquellos casos en los que se desean eliminar los efectos de un tratamiento anterior defectuoso. En este tratamiento, la velocidad de enfriamiento no es lo suficientemente elevada como para formar martensita y la estructura resultante es perlita y ferrita o cementita de grano fino. Es un tratamiento adecuado para los aceros con bajo contenido de carbono pues mejora sus propiedades mecánicas [22].

➤ **Recocido**

Consiste en calentar el acero a una cierta temperatura (similar a la del normalizado) y a continuación someterlo a un enfriamiento muy lento (por lo general se apaga el horno y se deja que el material se enfríe en su interior). El recocido se aplica al acero para ablandarlo y proporcionarle la ductilidad y maleabilidad para conformado plásticamente o darle su forma final por mecanizado. La diferencia entre los tratamientos de temple, normalizado y recocido estriba en la velocidad de enfriamiento que sirve para definir la dureza y la resistencia finales de la pieza [22].

b) Tratamientos termoquímicos

Consisten en operaciones de calentamiento y enfriamiento de metales que se complementan con la adición de nuevos elementos en la superficie de las piezas, de manera que se modifica la composición química superficial. Con estos tratamientos, se pretende mejorar las propiedades superficiales en los materiales, en especial, su dureza y resistencia al desgaste y a la corrosión sin modificar las propiedades en su interior. De esta forma, se pueden obtener piezas con una gran dureza superficial y cuyo interior conserve una elevada tenacidad. Los cuatro tratamientos termoquímicos más usuales son [22]:

➤ **Cementación o carburación**

Consiste en añadir carbono, mediante difusión, a la superficie de un acero que presente un bajo contenido en este elemento (como máximo 0.2 – 0.3 %) con objeto de aumentar su dureza superficial y conseguir una alta tenacidad en el núcleo. La cantidad de carbono depende de varios factores [22]:

- Composición química inicial del acero.
- Naturaleza de la atmósfera carburante.
- Temperatura.
- Tiempo de duración del tratamiento.

Es frecuente aplicar un tratamiento posterior de revenido para eliminar esfuerzos internos.

➤ **Nitruración**

Endurecimiento superficial del acero mediante la incorporación de nitrógeno. La pieza que se pretende nitrurar se somete en un horno a una corriente de amoníaco a una temperatura ~500 °C. A esta temperatura, se libera el nitrógeno del amoníaco que es absorbido superficialmente por el acero. Este nitrógeno forma nitruros con los elementos químicos (Al, Cr, V, W y Mo) del acero aleado, aumentando notablemente la dureza superficial del acero tratado. Antes de la nitruración, las piezas se someten a temple y revenido para evitar un ablandamiento del núcleo de la pieza de un acero a tratar. La nitruración, además de incrementar superficialmente la dureza de los aceros, los hace más resistentes a la fatiga y a la corrosión. Por este motivo, se utiliza para endurecer

piezas de maquinaria (válvulas, bielas, cigüeñales, entre otros) y también herramientas (brocas) [22].

➤ **Carbonitruración**

Es un tratamiento intermedio entre la cementación y la nitruración con el que se consigue aumentar la dureza de los aceros por medio de la absorción superficial de carbono y nitrógeno. La temperatura a la que se realiza el proceso está entre 750 °C y 800 °C. La pieza a tratar se somete a una atmósfera rica de carbono, como en el caso de la cementación, a la que se le añade nitrógeno en forma de amoníaco. Los aceros a los que se les aplica este tipo de tratamiento son semejantes a los que se emplean en la cementación (aceros con bajo contenido de carbono), no siendo necesaria la presencia de elementos formadores de nitruros, puesto que el endurecimiento se consigue por la acción combinada del carbono y del nitrógeno. La carbonitruración se realiza mediante atmósferas gaseosas. Cuando se lleva a cabo por medio de baños líquidos recibe el nombre de “cianuración”. Además de a los aceros con bajo contenido de carbono, también se puede aplicar este tratamiento a aceros de medio y alto contenido de carbono con el fin de que adquieran una buena resistencia y dureza superficial [22].

➤ **Sulfinización**

Consiste en añadir una pequeña capa superficial a la pieza a tratar de azufre, nitrógeno y carbono (estos dos últimos en menor cantidad), al introducir la pieza en un baño con sales de los anteriores elementos. La temperatura de este baño es ~565 °C. Con este tratamiento, aumenta considerablemente la resistencia al desgaste de los metales, disminuye su coeficiente de rozamiento y se favorece su lubricación. Se aplica a herramientas que van estar sometidas a rozamiento [22].

c) Tratamientos mecánicos

Este tipo de tratamientos mejora las características de los metales por deformación mecánica o acritud, en frío o en caliente [22].

➤ **Tratamientos mecánicos en caliente (forja)**

Consisten en deformar un metal, una vez calentado a una temperatura determinada, golpeándolo fuertemente. De este modo, se afina el tamaño de grano y se eliminan irregularidades de la pieza, con lo que se mejora su estructura interna [22].

➤ **Tratamientos mecánicos en frío**

Consisten en deformar el metal a temperatura ambiente ya sea golpeándolo o bien por trefilado o laminación. Con este tipo de deformación, se incrementa la dureza y la resistencia mecánica del metal, aunque disminuye su plasticidad y ductilidad [22].

d) Tratamientos superficiales

Mediante estos tratamientos se modifica la superficie de los metales sin variar su composición química. A diferencia de los tratamientos termoquímicos, en este caso no es necesaria la aportación de calor [22].

2. DISEÑO DE UN HORNO DE INDUCCIÓN

En este capítulo se presenta en detalle los pasos a seguir para el diseño de las distintas partes del horno de inducción electromagnética (ver Fig. 2.1).

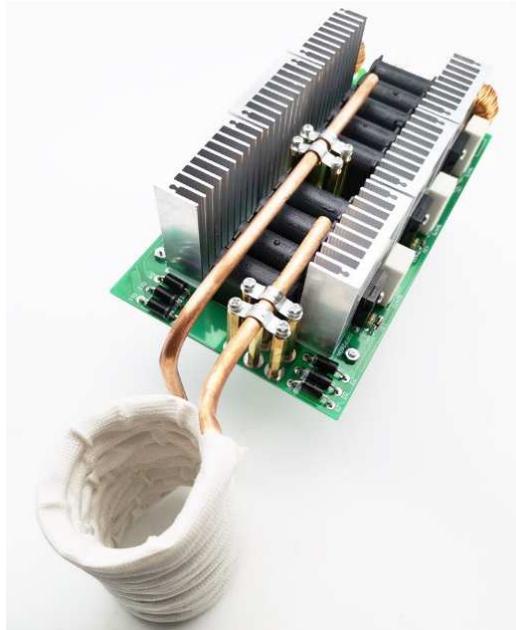


Fig. 2.1. Horno de inducción electromagnética escala laboratorio [14].

Durante el desarrollo del presente trabajo de investigación, se estipularon ciertos requerimientos indispensables para el correcto diseño y funcionamiento del horno eléctrico de inducción electromagnética, los puntos claves que se determinaron para el diseño de éste son:

- Ubicación (espacio y tamaño);
- Materiales de carga;
- Temperatura de operación;
- Tiempo de calentamiento; y
- Alimentación y fuente de poder.

El orden estipulado más adecuado para un correcto diseño es comenzar analizando la materia de carga, o modelo de carga a usar comúnmente en el horno, teniendo claro esto se procedió a calcular la potencia suministrada por el equipo en la

bobina para el proceso deseado, por lo que para ello fue necesario estipular previamente un tiempo permisible de calentamiento y una temperatura de operación.

Lo siguiente fue seleccionar el tipo de circuito base a utilizar haciendo el cálculo de cada componente eléctrico, empezando por la bobina primaria, condensadores y elementos electrónicos para atrás del circuito como lo serían las capacidades de los transistores, diodos, entre otros. Así sucesivamente hasta el cálculo de la fuente de poder.

2.1. MATERIAL DE CARGA

Establecer el material a trabajar es un requisito fundamental para determinar las características principales para el posterior diseño del horno, así como la frecuencia, amperajes por las bobinas y componentes que conformarían los circuitos.

Para este caso, se ha establecido que se disponen de barras de acero como probetas para la realización de laboratorios, por lo que se tomó de manera general aquellos aceros al carbono más comunes como componentes de materiales de carga, siendo más específico se utilizará el acero SAE 1045 para el análisis. Para ello es necesario conocer las propiedades físicas de los aceros en general; así, a continuación, se presentan las propiedades físicas a conocer de manera importante para los respectivos cálculos posteriores.

2.1.1. DENSIDAD

La densidad por definición es la medida de lo que ocupa un cuerpo en relación a lo que pesa, es decir densidad es igual a la masa entre el volumen. Por eso la medida de la densidad usualmente viene definida por kg/m^3 ; es decir, el mismo peso de un cuerpo muy denso ocupará muy poco y un cuerpo poco denso ocupará mucho. Así, la densidad media del acero es de $7,85 \text{ kg/m}^3$ [13].

2.1.2. PERMEABILIDAD MAGNÉTICA

En física se denomina permeabilidad magnética a la capacidad de los materiales para atraer y hacer pasar a través de sí los campos magnéticos. Esta permeabilidad está dada por la relación entre la inducción magnética existente y la intensidad de campo magnético que aparece en el interior de dicho material.

El grado de magnetización de un material en respuesta a un campo magnético se denomina permeabilidad magnética absoluta (μ) y se suele representar por la Ec. (2.1 [16]).

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2.1)$$

donde: B es la intensidad del campo magnético (también llamada densidad de flujo magnético) en el material, y
 H es la excitación magnética.

La permeabilidad magnética para el aire o el vacío se denota como μ_0 , y su valor en el sistema internacional de unidades se presenta mediante la Ec. (2.2 [16]).

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{H}{m} \quad (2.2)$$

Considerando que la permeabilidad magnética queda siempre referida a la del aire o el vacío se ha establecido un número adimensional, y éste es la permeabilidad magnética relativa (μ_r), que es la razón entre la permeabilidad de un material con respecto a la permeabilidad del vacío, el cual se expresa mediante la Ec. (2.3 [16]).

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (2.3)$$

donde: μ_r es la permeabilidad relativa del material,
 μ es la permeabilidad del material, y
 μ_0 es la permeabilidad del vacío.

Además, es necesario resaltar que este parámetro físico cambiará conforme vaya modificando la temperatura de la probeta de un acero, por lo que se debe tomar como base una curva experimental de variación de la permeabilidad relativa para un acero SAE 1045 (ver Fig. 2.2) [23].

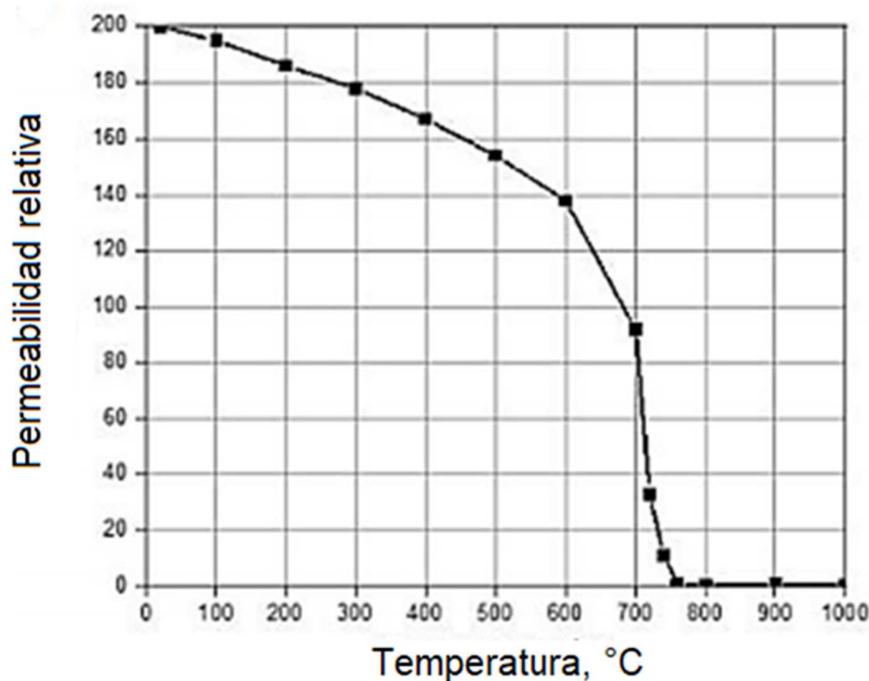


Fig. 2.2. Variación de la permeabilidad magnética respecto a la temperatura de un acero SAE 1045 [23].

A partir de esta curva experimental se obtiene un valor promedio de la permeabilidad relativa del acero en cuestión para aproximar lo más posible a la realidad del diseño, y así también seleccionar más adelante la frecuencia óptima para la probeta. Es por esto que se recreó la curva en un archivo de Excel para poder obtener de manera sencilla la ecuación de tendencia de los datos. Por lo que el paso a seguir para obtener el valor medio del recorrido de la curva durante el calentamiento del acero es aplicar el

método del valor medio por integrales, el cual se define de la manera siguiente en la Ec. (2.4 [24]).

$$\int_a^b f(x) \cdot dx = f_{(z)} \cdot (b - a) \quad (2.4)$$

donde: a y b son límites de recorrido de la integral,

$f_{(x)}$ es la ecuación de tendencia de los datos, y

$f_{(z)}$ es el valor medio de la integral definida.

Ahora bien, despejando $f_{(z)}$ de la Ec. (2.4 se obtiene la Ec. (2.5 [24]).

$$f_{(z)} = \frac{1}{(b - a)} \cdot \int_a^b f_{(x)} \cdot dx \quad (2.5)$$

Partiendo de la Tabla 2.1 y de la Fig. 2.3 se encuentra la ecuación de regresión para el cálculo de la permeabilidad media en un rango de calentamiento hasta 1000 °C, haciendo uso de la Ec. (2.5 [24] se obtiene:

$$f_{(z)} = \frac{1}{(1000 - 20)} \left[\int_{20}^{760} (-4x10^{-12}X^5 + 4x10^{-9}X^4 - 9x10^{-7}X^3 - 0.0002x^2 - 0.0302X + 200.26) \cdot dx + \int_{760}^{1000} (2) \cdot dx \right]$$

Resolviendo:

$$f_{(z)} = \frac{109522.6952 + 480}{980}$$

$$f_{(z)} = 112.2476481$$

$$\mu_r \approx 112.25\%$$

Tabla 2.1. Permeabilidad relativa de un acero SAE 1045 [23].

Punto	Temperatura, °C	Permeabilidad relativa, %
1	20	200
2	100	194
3	200	186
4	300	177
5	400	167
6	500	154
7	600	138
8	700	92
9	716	32
10	740	12
11	760	2
12	800	2
13	900	2
14	1000	2

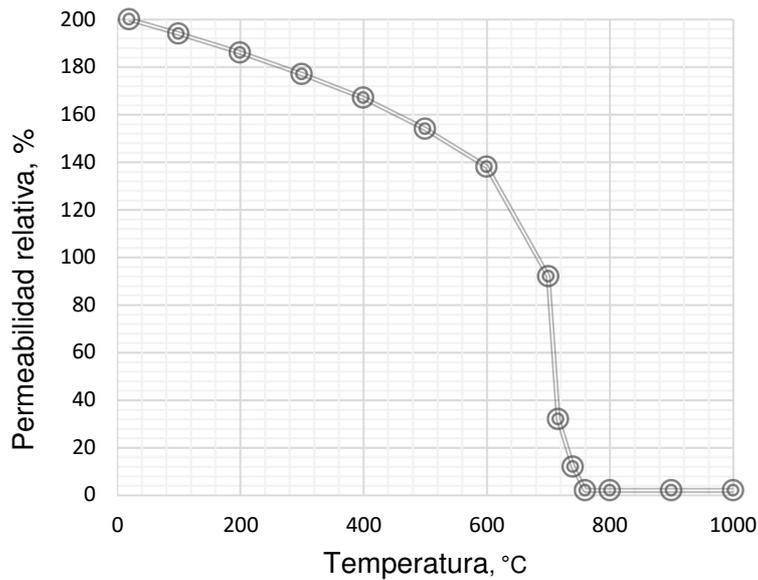


Fig. 2.3. Permeabilidad relativa de un acero SAE 1045 [23]

Por lo tanto, el valor medio a obtener para un acero SAE 1045 en permeabilidad relativa durante un calentamiento desde temperatura ambiente hasta $\sim 1,000$ °C será de $\mu_r = 112.25\%$.

Por último, haciendo una comparación entre metales con respecto a su permeabilidad magnética, se considera que los aceros se clasifican en función del magnetismo que presentan, así de esta forma se obtiene lo siguiente:

- El acero al carbono de uso común, los aceros inoxidable ferríticos, martensíticos y dúplex son nombrados ferromagnéticos, permeabilidad magnética relativa (μ_r) superior a la unidad (2 o más), serán atraídos fuertemente por un imán.
- Los aceros inoxidable austeníticos en condición totalmente blandos son paramagnéticos con permeabilidad magnética relativa (μ_r) de ~ 1.01 son atraídos ligeramente por un imán.
- La mayoría de los metales no ferrosos, como el cobre o aluminio, son materiales diamagnéticos, que no son atraídos por el imán.

Analizando el resultado se obtiene que respectivamente para un acero al carbono SAE 1045 a temperatura ambiente es ferromagnético sobre la base de la Fig. 2.3, aunque realizados los cálculos anteriores se observa que en un rango de calentamiento hasta 1,000 °C el acero experimenta una permeabilidad relativa promedio de 1.12 o 112.25% en todo el proceso de calentamiento, por lo que para los cálculos se tomó como acero no magnético de manera conservadora, esto servirá más adelante con referencia a la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Intervalos de diámetros óptimos para las diferentes frecuencias en distintos materiales según la permeabilidad [17].

Material					Frecuencia, Hz
Acero no magnético	Acero magnético	Latón	Cobre	Aluminio sus aleaciones	
Temperatura final					
1,200 °C	700 °C	800 °C	850 °C	500 °C	
Ø, mm	Ø, mm	Ø, mm	Ø, mm	Ø, mm	
150 – 500	27 – 75	110 -	50 -	50 -	50
60 – 250	8.0 – 35	35 – 440	22 – 800	22 – 800	500
40 – 175	6.0 – 25	30 – 300	15 – 600	15 – 600	1,000
25 – 100	3.5 – 14	15 – 180	9 – 350	9 – 350	3,000
20 – 85	2.5 – 10.5	10 – 130	7 – 260	7 – 260	5,000
14 – 60	2.0 – 8.5	8 – 100	5 – 180	5 – 180	10,000
10 – 40	1.5 – 5.5	6 – 75	3 – 125	3 – 125	20,000
5 – 22	0.7 – 3.0	3.5 – 40	2 – 75	2 – 75	60,000
4 – 17	0.5 – 2.0	2.5 – 30	1.6 – 60	1.6 – 60	100,000
1.8 - 8	0.2 – 1.0	1.2 - 15	0.6 - 20	0.6 – 20	500,000

2.1.3. CALOR ESPECÍFICO

El aumento de temperatura que experimenta un metal por acción del calor es una consecuencia de la energía transmitida y que es transformada en energía de vibración. La cantidad de calor necesario para elevar una unidad de masa del metal un grado celcius de temperatura, es lo que se denomina calor específico.

El calor específico está en función de la presión, volumen y temperatura; aunque considerando las necesidades de este trabajo, solamente se referirá a condiciones de presión constante y su valor será generalmente la media para un intervalo de temperatura según la ecuación de tendencia respecto a la Fig. 2.4 [23].

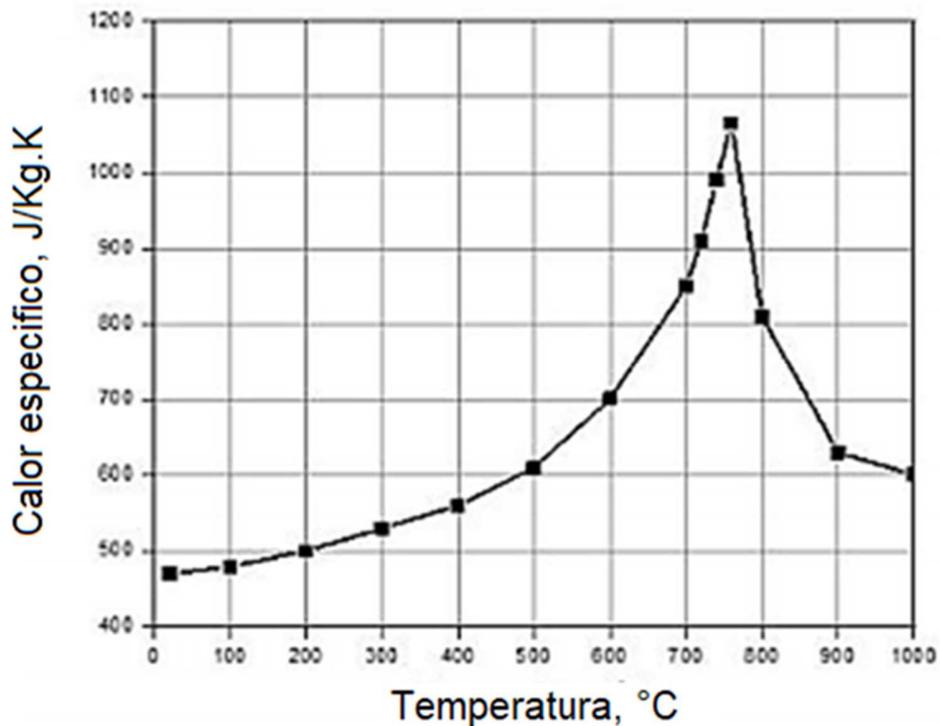


Fig. 2.4. Variación del calor específico respecto a la temperatura para un acero SAE 1045 [23].

Partiendo de la Tabla 2.3 y de la Fig. 2.5 se encuentra la ecuación de regresión para el cálculo del calor específico medio en un rango de calentamiento hasta 1,000 °C, haciendo uso de la Ec. (2.5 [24] se obtiene:

Tabla 2.3. Calores específicos del acero SAE 1045 a distintas temperaturas [23].

Punto	Temperatura, °C	Calor específico, J/kg·K
1	18.75	468.75
2	100	481.25
3	200	500
4	300	531.25
5	400	562.5
6	500	609.375
7	600	700
8	700	850
9	718.75	912.5
10	734.375	993.75
11	762.5	1068.75
12	800	812.5
13	900	628.125
14	1000	600

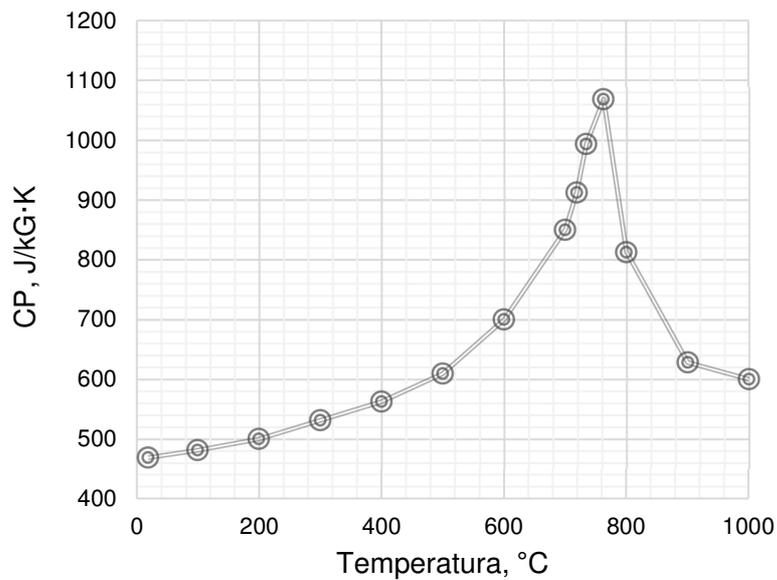


Fig. 2.5. Calores específicos del acero SAE 1045 a distintas temperaturas [23].

$$f(z) = \frac{1}{(b-a)} \cdot \int_a^b f(x) \cdot dx$$

$$f_{(z)} = \frac{1}{(1000 - 18.75)} \cdot \left[\int_{18.75}^{762.5} (9x10^{-9}X^4 - 1x10^{-5}X^3 + 0.0039x^2 - 0.3359X + 477.01). dx + \int_{762.5}^{1000} (0.0138x^2 - 26.069X + 12909). dx \right]$$

$$f_{(z)} = \frac{452366.2695 + 170444.8438}{981.25}$$

$$f_{(z)} = 634.7119625$$

$$C_p \approx 634.71 \text{ J/kg}\cdot\text{K}.$$

Por lo tanto, el valor medio a obtener para un acero SAE 1045 en calor específico durante un calentamiento desde temperatura ambiente hasta ~1,000 °C será de $C_p = 634.71 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$.

2.1.4. RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

La resistividad es una propiedad básica de los materiales que cuantifica la oposición del material al flujo de corriente. Está directamente relacionada con las vibraciones de las partículas internas, la composición atómica y otras variables microscópicas. Cuando se eleva la temperatura de un material los átomos ganan energía interna (energía cinética) lo que produce una mayor probabilidad de choques entre ellos. Este fenómeno se traduce en el macro mundo como un aumento en la resistividad. Es importante mencionar que la resistividad es el recíproco de la conductividad. En otras palabras, la temperatura juega un papel importante en el valor de resistividad del material en una condición específica ya que ésta sufre una variación a medida que el material aumenta su temperatura. En la Fig. 2.6 se presenta una curva experimental de la resistividad versus temperatura para un acero SAE 1045 [23].

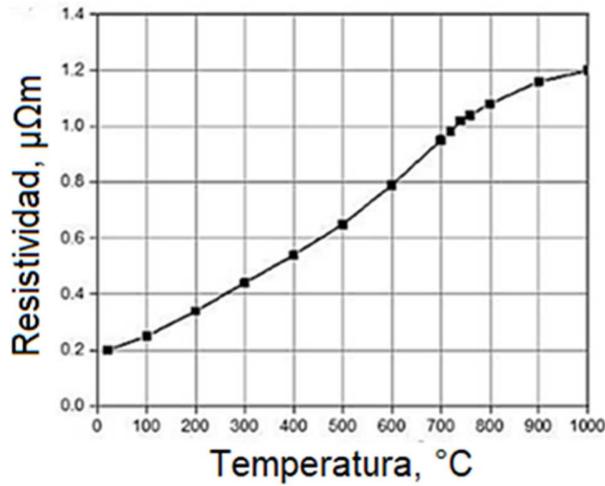


Fig. 2.6. Variación de la resistividad eléctrica respecto a la temperatura [23].

De igual forma, se procede a obtener el valor medio del recorrido para aproximar los datos por medio de la integración de la tendencia exponencial.

Partiendo de la Tabla 2.4 y de la Fig. 2.7 se encuentra la ecuación de regresión para el cálculo de la resistividad eléctrica media en un rango de calentamiento hasta 1,000 $^{\circ}\text{C}$, haciendo uso de la Ec. (2.5 [24] se obtiene:

Tabla 2.4. Variación de la resistividad eléctrica respecto a la temperatura [23].

Punto	Temperatura, $^{\circ}\text{C}$	Resistividad, $\Omega\text{m} \times 10\text{E}-6$
1	18.52	0.2
2	100.00	0.253
3	200.00	0.34
4	300.00	0.44
5	400.00	0.533
6	500.00	0.653
7	600.00	0.787
8	700.00	0.953
9	737.04	1.013
10	800.00	1.08
11	900.00	1.167
12	1,000.00	1.2

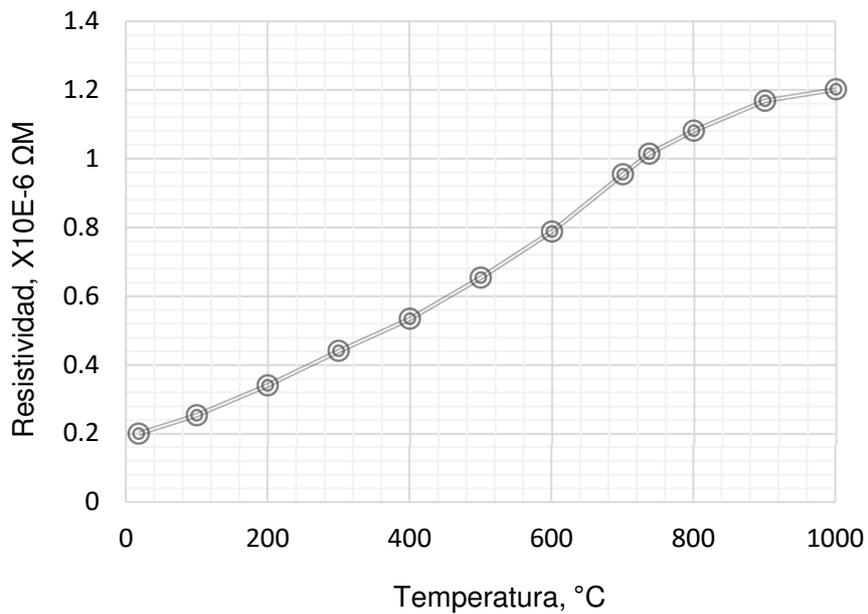


Fig. 2.7. Variación de la resistividad eléctrica respecto a la temperatura [23].

$$f(z) = \frac{1}{(b - a)} \cdot \int_a^b f(x) \cdot dx$$

$$f(z) = \frac{1}{(1000 - 18.52)} \cdot \left[\int_{18.52}^{1000} (-3x10^{-12}X^4 + 4x10^{-9}X^3 - 2x10^{-6}X^2 + 0.001X + 0.1779) \cdot dx \right]$$

$$f(z) = \frac{407.77}{981.48}$$

$$f(z) = 0.41546$$

$$\rho \approx 0.42x10^{-6} \Omega m.$$

Por lo tanto, el valor medio de resistividad a obtener para un acero SAE 1045 durante un calentamiento desde temperatura ambiente hasta $\sim 1,000$ °C es de $\rho = 0.42 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$.

2.1.5. TEMPERATURA DE DISEÑO

La temperatura se establece a partir de la Fig. 1.39, puesto que para asegurarnos el poder austenizar de manera efectiva el material de carga (tratamientos térmicos a mayor temperatura) se debe llegar a una temperatura superior al punto eutectoide (723 °C). Sin embargo, a su vez existe la limitante de los sensores de temperatura comerciales, es por ello que el horno se diseñará para trabajar con una temperatura hasta 1,000 °C debido a que la mayoría de sensores de temperatura operan bien hasta ese punto sin perder fiabilidad.

$$T_{Op} = 1,000 \text{ °C}$$

2.1.6. TIEMPO DE CALENTAMIENTO

Luego de un pequeño estudio de algunos materiales, se optó por diseñar el equipo para una carga de un acero SAE 1045 con un enfoque para un rango de calentamiento de temperatura ambiente hasta 1,000 °C, el cual se especifica en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Características del material a tratar, acero SAE 1045.

Características	Valor y unidades
Densidad	7,850 kg/m ³
Permeabilidad magnética relativa promedio en un rango de calentamiento de 25 a 1,000 °C	112.25%
Calor específico promedio en un rango de calentamiento de 25 a 1,000 °C	634.71 J/kg·°C
Resistividad promedio en un rango de calentamiento de 25 a 1,000 °C	$0.42 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$

Una vez obtenidos los datos del material que se desea calentar se elige un trozo de un acero SAE 1045 de 2.54 cm de diámetro con un largo de 5 cm como probeta de diseño, ésta será calentada a una temperatura de 1,000 °C, y para calcular el tiempo de calentamiento se debe determinar la potencia mínima que se necesite para realizar dicho proceso. Se procede a calcular la potencia eléctrica que se necesita. Para empezar, con la densidad se puede calcular la masa que posee el material a partir de la Ec. (2.6 [23].

$$\gamma = \frac{m}{V} \quad (2.6)$$

donde: ρ es la densidad del material,
 m es la masa del material, y
 V es el volumen del material.

El volumen para un cilindro se representa mediante la Ec. (2.7 [24]:

$$V = \frac{\pi}{4} * D^2 * L \quad (2.7)$$

Sustituyendo la Ec. (2.7 en la Ec. (2.6 y despejando la masa, se obtiene:

$$m = \gamma * \frac{\pi}{4} * D^2 * L$$

Sustituyendo valores, queda:

$$m = 7850 \frac{Kg}{m^3} * \frac{\pi}{4} * (0.0254m)^2 * (0.05 m)$$

$$m = 0.1988 \text{ kg}$$

$$m \cong 0.20 \text{ kg.}$$

Continuando con los cálculos, es necesario realizar un balance de transferencia de calor (ver Ec. (2.8) para determinar el cambio en la energía interna del sistema necesaria para elevar la temperatura de la probeta. Así, tomando en consideración las transferencias netas de calor como para este caso sería la convección natural, radiación y la generación de calor por medios externos como lo sería de energía eléctrica a térmica (inducción electromagnética) [25].

$$Q_{int} - Q_{out} + E_{gen} = \Delta E_{t\acute{e}rmica,sistema} \quad (2.8)$$

donde: Q_{int} es el calor neto entrante al sistema, el cual será cero;

Q_{out} es el calor neto saliente del sistema, para este caso será igual a la convección natural del sistema y la radiación de la pieza;

E_{gen} es la energía generada por medio externo, de eléctrica a térmica; y

$\Delta E_{t\acute{e}rmica,sistema}$ es el cambio de energía interna del sistema.

Reordenando la Ec. (2.8 [25], queda:

$$-(Q_{conv} + Q_{ra}) + E_{gen} = \Delta E_{t\acute{e}rmica,sistema} \quad [J]$$

Convirtiendo la Ec. (2.8 en razón del tiempo se obtiene [25]:

$$-(\dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{ra}) + \dot{E}_{gen} = \dot{\Delta E}_{t\acute{e}rmica,sistema} \quad [W] \quad (2.9)$$

Empezando con el cálculo de la convección, se sabe que la transferencia de calor de este tipo está representada por la Ec. (2.10 [25].

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (2.10)$$

donde: h es el coeficiente de convección el cual oscila entre 5 - 25 W/m²·°C para el aire a convección natural,

A_s es el área superficial de la probeta,

T_s es la temperatura superficial de la probeta, y

T_∞ es la temperatura del aire en los alrededores

El primer paso a realizar es encontrar la temperatura de película, y luego las propiedades termo-físicas del aire a esa temperatura, la temperatura de película se obtiene a partir de la Ec. (2.11 [25]).

$$T_f = \frac{T_s + T_{fluido}}{2} \quad (2.11)$$

donde: T_s es la temperatura de la superficie de la probeta, por análisis conservador y de diseño se asume 1,000 °C,

T_{fluido} es la temperatura del infinito o del medio, que se tomó como 25 °C, y

T_f es la temperatura de película

Resolviendo la Ec. (2.11 [25]), queda:

$$T_f = \frac{1000 + 25}{2}$$

$$T_f = 512.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Tabla 2.6. Propiedades del aire a la presión de 1 atm [26].

Propiedades del aire a la presión de 1 atm							
Temp, °C	Densidad, kg/m ³	Calor específico, J/kg·K	Conductividad térmica, W/m·K	Difusividad térmica, m ² /s ²	Viscosidad dinámica, kg/m·s	Viscosidad cinemática, m ² /s	Número de Prandtl
500	0.4565	1093	0.05572	1.117x10 ⁻⁴	3.563x10 ⁻⁵	7.806x10 ⁻⁵	0.6986
600	0.4042	1115	0.06093	1.352x10 ⁻⁴	3.846x10 ⁻⁵	9.515x10 ⁻⁵	0.7037

Ahora como la temperatura de película quedó entre 500 y 600 °C, se procede a iterar (ver Fig. 2.8) para 512.5 °C de la Tabla 2.6 los valores de la conductividad térmica, viscosidad cinemática y número de Prandtl para el aire bajo la condición de 1 atm de presión ya que el equipo se encuentra bajo esa condición de operación. Para encontrar:

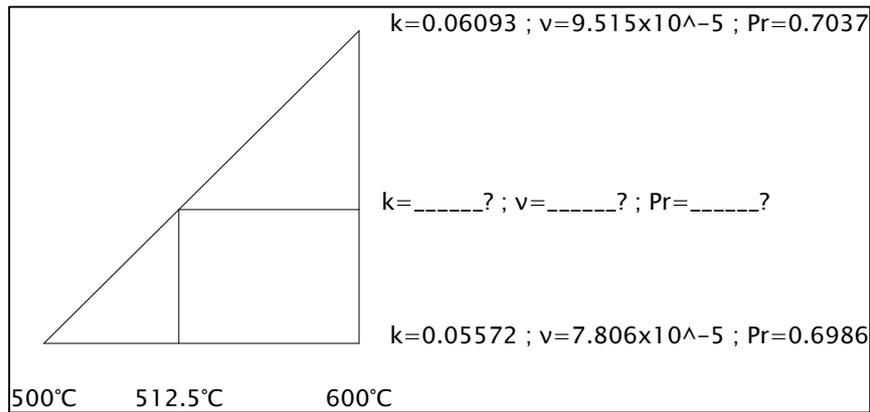


Fig. 2.8. Iteración de propiedades termo-físicas del aire a la temperatura de película.

Proceso de iteración para la conductividad térmica, Ec. (2.12):

$$\frac{k_{sup} - k_{inf}}{T_{max} - T_{min}} = \frac{k_x - k_{inf}}{T_x - T_{min}} \quad (2.12)$$

Resolviendo la Ec. (2.12, queda:

$$k_x = k_{inf} + (T_x - T_{min}) \left(\frac{k_{sup} - k_{inf}}{T_{max} - T_{min}} \right)$$

$$k_x = 0.05572 + (512.5 - 500) \left(\frac{0.06093 - 0.05572}{600 - 500} \right)$$

$$k_x = 0.05637 \frac{W}{m * K}$$

Proceso de iteración para la viscosidad dinámica, Ec. (2.13):

$$\frac{\nu_{sup} - \nu_{inf}}{T_{max} - T_{min}} = \frac{\nu_x - \nu_{inf}}{T_x - T_{min}} \quad (2.13)$$

Resolviendo la Ec. (2.13):

$$v_x = v_{inf} + (T_x - T_{min}) \left(\frac{v_{sup} - v_{inf}}{T_{max} - T_{min}} \right)$$

$$v_x = \left(7.806 + (512.5 - 500) \left(\frac{9.515 - 7.806}{600 - 500} \right) \right) \times 10^{-5}$$

$$v_x = 8.020 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s}$$

Proceso de iteración para el número de Prandtl, Ec. (2.14):

$$\frac{Pr_{sup} - Pr_{inf}}{T_{max} - T_{min}} = \frac{Pr_x - Pr_{inf}}{T_x - T_{min}} \quad (2.14)$$

Resolviendo la Ec. (2.14):

$$Pr_x = Pr_{inf} + (T_x - T_{min}) \left(\frac{Pr_{sup} - Pr_{inf}}{T_{max} - T_{min}} \right)$$

$$Pr_x = 0.6986 + (512.5 - 500) \left(\frac{0.7037 - 0.6986}{600 - 500} \right)$$

$$Pr_x = 0.6992$$

Ahora se procede a calcular el coeficiente de expansión volumétrica, Ec. (2.15 [25]):

$$\beta = \frac{1}{T_f}, \quad [K^{-1}] \quad (2.15)$$

Resolviendo la Ec. (2.15 [25]), queda:

$$\beta = \frac{1}{273.15 + 512.5}$$

$$\beta = 0.001272 \text{ K}^{-1}$$

Ahora se calcula el número de Grashof, Ec. (2.16 [25]).

$$Ra_L = Gr_L * Pr \quad (2.16)$$

donde: Ra_L es el número de Rayleigh, y

Gr_L es el número de Grashof

El número de Rayleigh se calcula a partir de la Ec. (2.17 [25]):

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} \quad (2.17)$$

Por lo tanto, sustituyendo la Ec. (2.17 en la Ec. (2.16 y despejando para el número de Grashof se obtiene la Ec. (2.18, la cual queda [25]:

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} * \frac{1}{Pr} \quad (2.18)$$

donde: g es la gravedad, y

L es la altura de la probeta

Resolviendo la Ec. (2.18 y sustituyendo datos se obtiene:

$$Gr_L = \frac{\left(9.81 \frac{m}{s^2}\right) (0.001272) (1000 - 25) (0.05 \text{ m})^3}{\left(8.02 \times 10^{-5} \frac{m}{s^2}\right)^2} * \frac{1}{0.6992}$$

$$Gr_L = 338,158.7202.$$

La turbulencia se da a valores de Grashof mayores que 10^9 , por lo que se obtiene un régimen laminar, confirmando la convección natural. Un cilindro vertical se puede considerar como una pared plana si se cumple la condición de la Ec. (2.19 [25]):

$$D \geq \frac{35L}{Gr_L^{\frac{1}{4}}} \quad (2.19)$$

Evaluando la Ec. (2.19 [25]), se obtiene:

$$0.0254 \geq \frac{35(0.05)}{338,158.7202^{\frac{1}{4}}}$$

$$0.0254 \geq 0.0725.$$

Al ser incorrecta la inecuación se debe proceder a calcular el número de Nusselt con base a otras aproximaciones diferentes de la Ec. (2.20, ya que para la primera aproximación no cumple los requisitos, así [25]):

$$Nu = \frac{hL_c}{k} = C(Gr_L Pr)^n = C Ra_L^n \quad (2.20)$$

donde: Nu es la primera aproximación para el número de Nusselt,

h es el coeficiente de convección,

L_c es la longitud característica para la geometría,

C es una constante, y

n es una constante, para flujo laminar n que es igual a $1/4$ y para flujo turbulento es $1/3$ sobre la base de la primera aproximación

Al no cumplir los requisitos, [26] cita el uso de la aproximación de Cebeci (1974), ya que esta incorpora una mejor aproximación para la relación del número de Nusselt para cilindros esbeltos que no cumplen con estos criterios. Para esto se cita el trabajo de investigación [27], en donde aproximan el número de Nusselt dependiendo el número de Rayleigh, como se presenta en la Fig. 2.9 [27]:

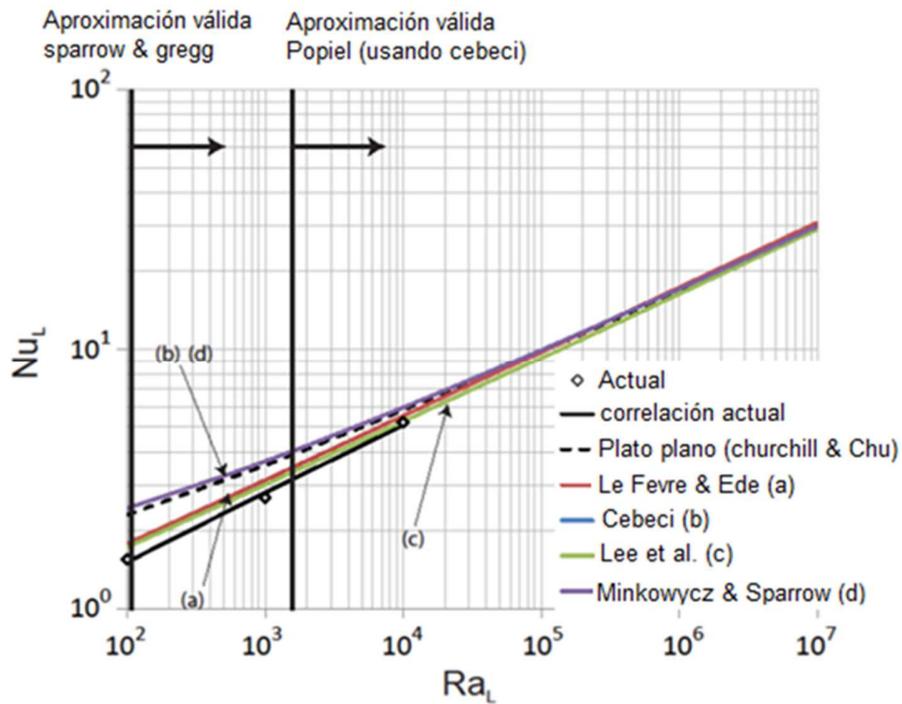


Fig. 2.9. Aproximación del número de Nusselt medio superior sobre la base de distintas teorías [27].

Evaluando el número de Rayleigh en la Ec. (2.17 se reafirma el uso de la aproximación de Cebeci (1974), así [25]:

$$Ra_L = 236,440.58.$$

En la mayoría de los libros de texto de transferencia de calor el límite aceptado para la solución aproximando a la placa plana se puede usar para aproximar los números de Nusselt promedio para cilindros verticales ($Pr = 0.72$) en donde el margen de error de la aproximación es del 5% sobre la base del estándar de la Ec. (2.19 [26]. Para analizar

este caso se usa la aproximación de la capa límite, la cual en 1974 Cebeci amplió el trabajo de Sparrow & Gregg resolviendo numéricamente las ecuaciones gobernantes usando la aproximación para la capa límite para números de Prandtl entre 0.01 y 100, el método se presenta en la Ec. (2.21 [27]):

$$Nu_{L,fp} = 0.68 + \frac{0.670Ra_L^{\frac{1}{4}}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{4}{9}}} \quad (2.21)$$

En esta ecuación, Ra_L es el número de Rayleigh sobre la base de la altura del cilindro. Los resultados ofrecen una desviación máxima del 4% entre las soluciones del número de Nusselt promedio por lo que se tomó para resolver este problema. Así, resolviendo la Ec. (2.21 [27]), se obtiene:

$$Nu_{L,fp} = 0.68 + \frac{0.670(236,440.58)^{\frac{1}{4}}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{0.6992}\right)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{4}{9}}}$$

$$Nu_{L,fp} = 12.0001527$$

$$Nu_{L,fp} \cong 12.00$$

Ahora bien, tomando la Ec. (2.20 [25]), se procede a resolver para encontrar el coeficiente convectivo de transferencia de calor:

$$Nu = \frac{hL_c}{k}$$

$$h = \frac{kNu}{L_c}$$

$$h = \frac{\left(0.05637 \frac{W}{m * K}\right) (12.00)}{(0.05m)}$$

$$h = 13.5288 \frac{W}{m^2 * K}$$

$$h \cong 13.53 \frac{W}{m^2 * K}$$

Retomando y sustituyendo en la Ec. (2.10, se obtiene que la transferencia de calor por convección se resuelve de la siguiente manera [25]:

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty)$$

$$\dot{Q}_{conv} = h(\pi * D * L)(T_s - T_\infty)$$

$$\dot{Q}_{conv} = 13.53(\pi * (0.0254) * (0.05))(1,000 - 25)$$

$$\dot{Q}_{conv} = 52.63274321 W$$

$$\dot{Q}_{conv} \cong 52.63 W$$

Ahora, continuando con el cálculo de la radiación, se tiene que la transferencia de calor de este tipo está representada por la Ec. (2.22 [25]:

$$\dot{Q}_{ra} = \varepsilon * A * \sigma * (T_s^4 - T_{alr}^4) \quad (2.22)$$

donde: ε es la emisividad del material para radiar, para los cuerpos negros es igual a 1,
 para aceros de 0.75 a 0.85,
 A es el área superficial del material,

σ es la constante de Stefan Boltzman $5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$,

T_s es la temperatura de la superficie del material radiante, y

T_{alr} es la temperatura del infinito o medio que lo rodea.

Resolviendo la Ec. (2.22 para una temperatura de operación de 1,000 °C y tomando en consideración un criterio conservador se tomó la emisividad como óptima para cuerpos negros, dando lugar al siguiente resultado [25]:

$$\dot{Q}_{ra} = \varepsilon * (\pi * D * L + \frac{\pi}{2} * D^2) * \sigma * (T_s^4 - T_{alr}^4)$$

$$\dot{Q}_{ra} = (\pi * 0.0254 * 0.05 + \frac{\pi}{2} * 0.0254^2) * 5.67 \times 10^{-8} * ((1000 + 273.15)^4 - (25 + 273.15)^4)$$

$$\dot{Q}_{ra} = 743.0949872 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{ra} \cong 743.10 \text{ W}$$

Habiendo calculado las pérdidas, se procede a calcular la energía del sistema, la cual será la energía efectiva en elevar la temperatura de la probeta, y se encuentra representada por la Ec. (2.23 [25]:

$$\Delta E_{\text{térmica,sistema}} = \frac{m * C_p * \Delta T}{t} \quad (2.23)$$

donde: m es la masa de la probeta,

C_p es el calor específico,

ΔT es la diferencia de temperaturas, y

t es el tiempo que tardará el calentamiento.

Así mismo, la energía externa suministrada al sistema será la potencia eléctrica, por lo que el término de energía generada en la Ec. (2.9 se puede sustituir por el término de la Ec. (2.24 [26].

$$\dot{E}_{gen} = P_{el} \quad (2.24)$$

Reordenando la Ec. (2.9 y sustituyendo los resultados de las ecuaciones Ec. (2.24, Ec. (2.23, Ec. (2.22 y Ec. (2.10 se obtiene [25]:

$$-(\dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{ra}) + \dot{E}_{gen} = \Delta \dot{E}_{térmica,sistema}$$

$$-(52.63 + 743.10) + P_{el} = \frac{m * C_p * \Delta T}{t}$$

Reordenando la ecuación en función de la potencia eléctrica a suministrar:

$$t = \frac{m * C_p * \Delta T}{P_{el} - 795.73}$$

Sustituyendo los resultados de la masa, el calor específico y las temperaturas se puede determinar el tiempo de calentamiento en función de la potencia eléctrica a suministrar, tal como se presenta en la Ec. (2.25:

$$t = \frac{0.20 * 634.71 * (1,000 - 25)}{P_{el} - 795.73}$$

$$t_{cal} = \frac{123,768.45}{P_{el} - 795.73} \quad (2.25)$$

donde: t_{cal} es el tiempo de calentamiento de la probeta, y

P_{el} es la potencia eléctrica o capacidad del equipo, la potencia mínima exige valores mayores que 795.73 W.

Evaluando la Ec. (2.25 se procede a crear la Tabla 2.7.

Tabla 2.7. Evaluación del tiempo de calentamiento en función de la potencia eléctrica.

Potencia eléctrica, W	Tiempo de calentamiento, s	Tiempo de calentamiento, min	Tiempo de calentamiento, h
800.00	28,985.59	483.09	8.05
900.00	1,187.00	19.78	0.33
1,000.00	605.91	10.10	0.17
1,100.00	406.77	6.78	0.11
1,200.00	306.15	5.10	0.09
1,300.00	245.44	4.09	0.07
1,400.00	204.82	3.41	0.06
1,500.00	175.74	2.93	0.05
1,600.00	153.89	2.56	0.04
1,700.00	136.87	2.28	0.04
1,800.00	123.24	2.05	0.03
1,900.00	112.08	1.87	0.03
2,000.00	102.77	1.71	0.03

Tomando en consideración la duración de los laboratorios de metalurgia de la Universidad de El Salvador que es de 1 hora y 40 min, o lo mismo que 100 min se puede establecer un máximo tiempo de calentamiento y con ello se escoge que la potencia mínima sería de 1.20 kW con un tiempo de calentamiento de 5.10 min por probeta.

2.2. SISTEMA DE CALENTAMIENTO

Teniendo en consideración que el equipo estará destinado para uso en un laboratorio universitario, se optó por dejar libre la bobina inductora y no recubrirla para que los estudiantes puedan visualizar directamente el equipo en funcionamiento natural para una mejor comprensión teniendo siempre un fiel cumplimiento con las medidas de seguridad y operación necesarias durante toda la práctica de laboratorio como se presenta en la Fig. 2.10 [12].

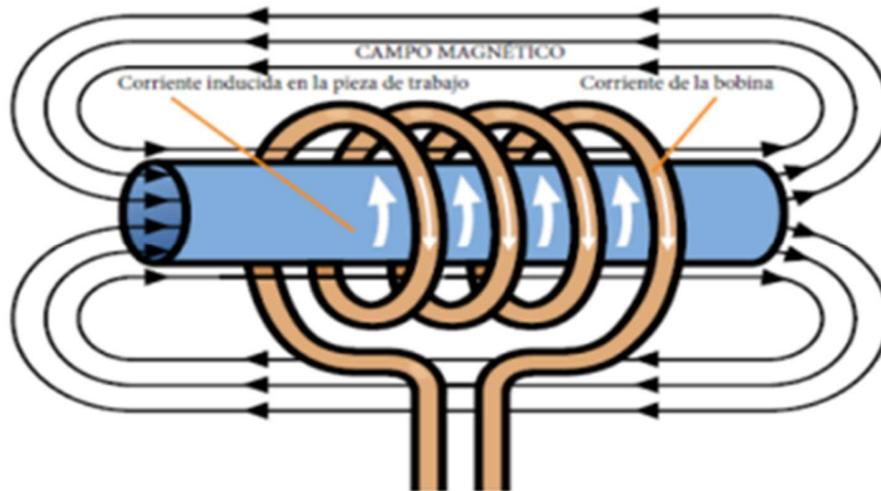


Fig. 2.10. Sistema de inducción electromagnética sin recubrimiento [12].

2.2.1. SISTEMA DE ALTA FRECUENCIA

Tomando como referencia la Tabla 2.2 se puede seleccionar una frecuencia de diseño para los posteriores cálculos, seleccionando una frecuencia de operación de 10 kHz se obtiene un intervalo óptimo para probetas de diámetros desde 14 hasta 60 mm.

2.2.2. BOBINA INDUCTORA

Continuando, se recuerda que el sistema básico de calentamiento por inducción, se basa en el funcionamiento de un transformador ideal, bajo las leyes de Ampere. Por convención, se define que la parte del circuito en donde se ubica la fuente de alimentación se denomina el primario, el otro lado del circuito, el voltaje es inducido y se denomina el secundario. Para el caso del calentamiento por inducción el elemento primario hace referencia a la bobina de inducción y el secundario corresponde al material de carga (material a calentar) y se representa teóricamente tal como se presenta en la Fig. 2.11 [28].

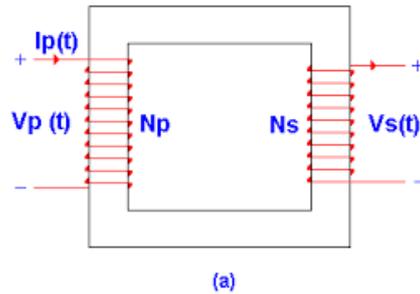


Fig. 2.11. Funcionamiento de un transformador monofásico [12].

En un sistema, la potencia expresada en vatios, corresponde a la Ec. (2.26 [28]).

$$P = V_{el} * I * \text{Cos}(\emptyset) \tag{2.26}$$

donde: P es la potencia,
 V_{el} es el voltaje, e
 I es la corriente.

Para el transformador ideal, la eficiencia es del 100%, por lo que se asume que las pérdidas son despreciables, por lo cual la potencia de entrada es igual a la de salida, entonces esto se refleja en la Ec. (2.27 [28]):

$$P_{int} = P_{out} \tag{2.27}$$

De forma que sustituyendo la Ec. (2.26 en la ecuación Ec. (2.27), se obtiene [28]:

$$V_p * I_p * \text{Cos}(\Phi) = V_s * I_s * \text{Cos}(\emptyset)$$

Y ya que la corriente del secundario está en fase con la del primario se puede eliminar $\text{Cos}(\emptyset)$ de ambos lados de la ecuación, quedando de la manera siguiente [28].

$$V_p * I_p = V_s * I_s$$

Reordenando, se obtiene la Ec. (2.28 [28]).

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p} \quad (2.28)$$

Ahora, teniendo en consideración que el transformador es un elemento que transforma voltaje en forma proporcional a su relación de espiras, se tiene que esta relación se ve reflejada en la Ec. (2.29 [28]).

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad (2.29)$$

Ahora al comparar las ecuaciones Ec. (2.28 y Ec. (2.29 se puede obtener una función para expresar la relación de la corriente con el número de vueltas de los devanados, tal como se presenta a continuación:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} ; \quad \frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p}$$

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p}$$

Despejando:

$$I_p * \frac{N_p}{N_s} = I_s$$

Teniendo en consideración que el material de carga se asume como el secundario, y el número de espiras de este se toma igual a 1, reordenando el resultado anterior se simplifica de la siguiente manera, obteniendo la Ec. (2.30):

$$I_p * \frac{N_p}{1} = I_s$$

$$I_s = I_p * N_p \quad (2.30)$$

El calentamiento por inducción se logra al inducir una corriente de alta frecuencia en el material de carga permitiendo la excitación de los electrones y la fricción ocasionada por la resistencia del material, que es proporcional a su resistividad. Por lo anterior la potencia disipada en el material de carga por efecto Joule, se expresa en la Ec. (2.31) [28].

$$P_d = I_s^2 * R_s \quad (2.31)$$

donde: P_d es la potencia disipada en el material, y
 R_s es la resistencia del material.

La resistencia del material R_s es importante en el sistema de calentamiento porque se opone al flujo de la corriente que fluye a través de la bobina de inducción permitiendo la excitación y fricción de los electrones, esta resistencia se puede calcular mediante la Ec. (2.32) [11].

$$R_s = \frac{\rho * l_{carga}}{\text{Área transversal al flujo de la corriente}} \quad (2.32)$$

donde: ρ es la resistividad promedio del material previamente calculada, y
 l_{carga} es el perímetro o la longitud extendida de la película afectada.

Ahora bien, en el instante de inducir corriente en el material de carga este se verá afectado a cierta profundidad únicamente, esta profundidad será nada más que el efecto pelicular, esta medida está representada por la siguiente variable “ δ ” y su magnitud es bastante pequeña y dependerá de la frecuencia de resonancia, esta profundidad se ve representada en la Fig. 2.12.

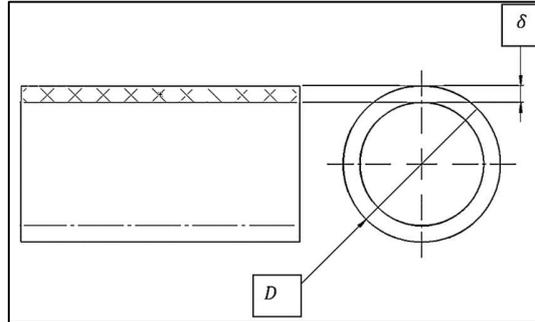


Fig. 2.12. Demostración amplificada del efecto pelicular en la probeta de laboratorio.

Teniendo esta comprensión del efecto pelicular, en la probeta únicamente se estará calentando una capa externa de esta, siendo esta laminar y conociendo el flujo de la corriente en la probeta se puede tomar fácilmente que el área transversal por la cual la corriente fluirá será nada más que la longitud de la probeta por el efecto pelicular y la longitud que recorrerá la corriente en la probeta se toma como el perímetro externo de la probeta ya que el efecto piel es bastante pequeño. Estas consideraciones se presentan a continuación:

El área transversal se define mediante la Ec. (2.33 [11]).

$$\text{Área} = l * \delta \quad (2.33)$$

La longitud que recorre la corriente se define en la Ec. (2.34 [11]).

$$P_{er} = \theta * r \quad (2.34)$$

donde: θ es el ángulo del segmento circular, que para este caso es 1 revolución completa o igual a 2π radian, y
 r es el radio de la probeta.

Y asumiendo un diámetro medio mediante la Ec. (2.35).

$$\text{Diámetro}_{medio} = \frac{D + (D - 2 * \delta)}{2} \quad (2.35)$$

Que por simplicidad se asume: $D \gg \delta$

$$Diámetro_{medio} = \frac{D + (D)}{2}$$

Por lo que:

$$Diámetro_{medio} = D$$

Sustituyendo el diámetro medio para el cálculo del perímetro en la Ec. (2.34 se obtiene:

$$P_{er} = D * \pi$$

Ahora, sustituyendo los resultados de las Ec. (2.33 y (2.34 en la Ec. (2.32, se obtiene la Ec. (2.36 [11].

$$R_s = \frac{\rho * l_{carga}}{\text{Área}}$$
$$R_s = \frac{\rho * D * \pi}{l * \delta} \quad (2.36)$$

dónde: δ es el espesor del efecto pelicular, profundidad de efecto piel,

l es la longitud de la probeta,

D es el diámetro de la probeta, y

ρ es la resistividad del material previamente calculada.

Reemplazado la ecuación de la resistencia eléctrica del material Ec. (2.36 y la corriente secundaria Ec. (2.30, en la Ec. (2.31, se obtiene la potencia disipada en el material en función de datos primarios, obteniendo la Ec. (2.37 [11].

$$P_d = I_s^2 * R_s$$

$$P_d = (I_p * N_p)^2 \left(\frac{\rho * D * \pi}{l * \delta} \right)$$

$$P_d = \frac{(I_p * N_p)^2 (\rho * D * \pi)}{l * \delta} \quad (2.37)$$

Para conocer cuanta corriente debe inducir la bobina es necesario hallar el valor de la potencia superficial en la pieza, teniendo en consideración el área del material de carga, cuya ecuación está dada por la Ec. (2.38 [11]).

$$A_s = \pi * D * l \quad (2.38)$$

Tomando la ecuación del área superficial de la carga Ec. (2.38 y la potencia disipada del material Ec. (2.37, se puede encontrar la potencia superficial, como se describe en la Ec. (2.39 [11]).

$$P_{sur} = \frac{P_d}{A_s} \quad (2.39)$$

Sustituyendo las ecuaciones Ec. (2.37 y Ec. (2.38 en la Ec. (2.39, se obtiene [11]:

$$P_{sur} = \frac{(I_p * N_p)^2 (\rho)}{\delta * l^2}$$

Para continuar es necesario conocer la expresión del efecto pelicular, para esto a partir de las ecuaciones de Maxwell se sabe que la profundidad de piel es la distancia medida desde la superficie al interior de la pieza y el despeje de la ecuación se describe en la Ec. (2.40 [11]).

$$\delta = \sqrt{\frac{2 * \rho}{\mu * \omega}} \quad (2.40)$$

donde: μ es la permeabilidad del material, puede calcular sobre la base de los cálculos previos de la permeabilidad relativa, y ω es la frecuencia angular de la energía eléctrica.

Sustituyendo la Ec. (2.40 en el resultado de la Ec. (2.39 y reordenando los valores se obtiene la Ec. (2.41 [11]).

$$P_{sur} = \frac{(I_p * N_p)^2 (\rho)}{\sqrt{\frac{2 * \rho}{\mu * \omega}} * l^2}$$

Al sustituir la ecuación del efecto pelicular Ec. (2.40) se procede a reemplazar la frecuencia angular por la frecuencia [11]:

$$P_{sur} = \frac{(I_p * N_p)^2 (\rho)}{\sqrt{\frac{2 * \rho}{\mu * 2 * \pi * f}} * l^2}$$

$$P_{sur} = \left(\frac{I_p * N_p}{l}\right)^2 * \frac{\rho}{\sqrt{\frac{\rho}{\mu * \pi * f}}} \quad (2.41)$$

La intensidad del campo magnético está dada por la Ec. (2.42 [28]).

$$H = \frac{N_p * I_p}{l_{carga}} \quad (2.42)$$

Sustituyendo la Ec. (2.42 en la Ec. (2.41 y reordenando términos se obtiene la Ec. (2.43 [11]).

$$P_{sur} = (H)^2 * \frac{\frac{\rho}{1}}{\sqrt{\frac{\rho}{\mu * \pi * f}}}$$

$$P_{sur} = (H)^2 * \sqrt{\rho * \mu * \pi * f} \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (2.43)$$

Por otro lado, la potencia superficial se puede relacionar con el cambio en la energía interna del sistema de la Ec. (2.23), obteniendo la siguiente comparación:

$$P_{sur} = \dot{\Delta E}_{t\acute{e}rmica,sistema} = \frac{m * C_p * \Delta T}{A_s * t}$$

Cambiando la masa en función de la densidad y resolviendo para el volumen y el área de la probeta se obtiene la Ec. (2.44 [12].

$$P_{sur} = \dot{\Delta E}_{t\acute{e}rmica,sistema} = \frac{V * \gamma * C_p * \Delta T}{A_s * t}$$

$$P_{sur} = \dot{\Delta E}_{t\acute{e}rmica,sistema} = \frac{\left(\left(\frac{\pi}{4} \right) D^2 * l \right) * \gamma * C_p * \Delta T}{(\pi * D * l) * t}$$

$$P_{sur} = \dot{\Delta E}_{t\acute{e}rmica,sistema} = \frac{D * \gamma * C_p * \Delta T}{4 * t}$$

$$P_{sur} = \frac{D * \gamma * C_p * \Delta T}{4 * t} \quad (2.44)$$

Sustituyendo la Ec. (2.43 en la Ec. (2.44 se obtiene la Ec. (2.45 [12].

$$(H)^2 * \sqrt{\rho * \mu * \pi * f} = \frac{D * \gamma * C_p * \Delta T}{4 * t}$$

Despejando para la intensidad del campo magnético [12]:

$$H = \sqrt{\frac{D * \gamma * C_p * \Delta T}{4 * t * \sqrt{\rho * \mu * \pi * f}}} \quad (2.45)$$

Resolviendo:

$$H = \sqrt{\frac{* (0.0254) * (7850) * (634.71) * (975)}{4 * (306.15) * \sqrt{(0.42 \times 10^{-6}) * (1.1225 * 4\pi \times 10^{-7}) * \pi * (10^3)}}$$

$$H = 27,176.64 \left(\frac{\text{Amp} * N^{\circ} \text{ Vueltas}}{m} \right)$$

Sustituyendo el resultado de la Ec. (2.45) en la Ec. (2.42) se obtiene una función simplificada de la corriente en el primario en función del número de espiras del primario, siendo la expresión la Ec. (2.46).

$$H = \frac{N_p * I_p}{l_{carga}}$$

Despejando en función de la corriente del primario:

$$I_p = \frac{l_{carga} * H}{N_p}$$

$$I_p = \frac{0.05 * 27176.64}{N_p}$$

$$I_p = \frac{1358.83}{N_p} (\text{Amp} * N^{\circ} \text{ Vueltas}) \quad (2.46)$$

Con la intensidad de campo definida, se puede encontrar la corriente del devanado primario en función del número de vueltas o espiras que tenga la bobina como se presenta en la Ec. (2.46), de este modo se realizó una tabla comparativa en función de las espiras, en donde también se aprecia una aproximación de la potencia implementada por una fuente externa al equipo para suministrar la potencia a 48 V en corriente continua.

Comparando los resultados obtenidos en la Tabla 2.8 se aprecia que la corriente en el devanado primario oscila entre los 135.88 A para 10 espiras hasta 17.88 A para 76 espiras respectivamente, no obstante, en el apartado de cálculos para el tiempo de

calentamiento en la página 82 se sabe que la probeta experimentará pérdidas durante el proceso de calentamiento, siendo 795.73 watts de energía en forma de calor por radiación y convección, así también se determinó que el diseño requiere de una potencia mínima de 1,200 watts de entrada. Partiendo con la potencia mínima requerida y evaluando en la Tabla 2.8 se puede asimilar a un diseño con 54 espiras en el borne primario con 25.16 A como corriente del primario y una potencia suministrada de 1,207.85 watts.

Tabla 2.8. Variación de la corriente y potencia en el circuito oscilador en función del número de espiras en la bobina inductora.

Número de vueltas del primario	Tensión de entrada en el devanado primario, V	Corriente en el devanado primario, A	Potencia suministrada, W
10.00	48.00	135.88	6,522.38
12.00	48.00	113.24	5,435.32
14.00	48.00	97.06	4,658.85
16.00	48.00	84.93	4,076.49
18.00	48.00	75.49	3,623.55
20.00	48.00	67.94	3,261.19
22.00	48.00	61.77	2,964.72
24.00	48.00	56.62	2,717.66
26.00	48.00	52.26	2,508.61
28.00	48.00	48.53	2,329.42
30.00	48.00	45.29	2,174.13
32.00	48.00	42.46	2,038.25
34.00	48.00	39.97	1,918.35
36.00	48.00	37.75	1,811.77
38.00	48.00	35.76	1,716.42
40.00	48.00	33.97	1,630.60
42.00	48.00	32.35	1,552.95
44.00	48.00	30.88	1,482.36
46.00	48.00	29.54	1,417.91
48.00	48.00	28.31	1,358.83
50.00	48.00	27.18	1,304.48
52.00	48.00	26.13	1,254.30
54.00	48.00	25.16	1,207.85
56.00	48.00	24.26	1,164.71
58.00	48.00	23.43	1,124.55
60.00	48.00	22.65	1,087.06
62.00	48.00	21.92	1,052.00
64.00	48.00	21.23	1,019.12
66.00	48.00	20.59	988.24
68.00	48.00	19.98	959.17
70.00	48.00	19.41	931.77
72.00	48.00	18.87	905.89
74.00	48.00	18.36	881.40
76.00	48.00	17.88	858.21

Para una correcta selección de la fuente a utilizar se recomienda como regla general asumir un 30% en potencia como margen de seguridad, por lo que con facilidad se puede decir que la fuente necesaria con 30% extra en capacidad debe ser de 1,570.21 watts, aunque ya que no existe esa configuración se selecciona la próxima inferior o superior a esa potencia con lo que de forma estándar se aproxima a usar una fuente de 1,500 watts con la configuración de voltaje variable 0 - 48 V DC y 35 A de salida máximo, con lo que dicha fuente se regularía a brindar el voltaje y amperaje necesario, es importante que la fuente sea de conmutación ya que de esta forma se puede controlar el encendido y apagado del equipo con una botonera o un controlador de temperatura.

Con los datos del número de espiras necesarias y la corriente máxima de suministro, según el análisis de la Tabla 2.8 se puede caracterizar geoméricamente la bobina inductora, en otras palabras, establecer las dimensiones de la misma de manera preliminar, como primer paso se debe seleccionar el calibre del conductor de la bobina por lo que se tomó como referencia la Tabla 1.5.

De la Tabla 1.5 se seleccionó un alambre conductor THHN 10 AWG de cobre con capacidad de conducir corriente en un ambiente seco hasta 40 amperios a 90 °C, quedando con un 60% de capacidad excedente ya que la corriente máxima del circuito oscila los 25 amperios. Este conductor posee una sección transversal de 5.25 mm² referente a un diámetro de ~2.60 mm de alambre sólido, agregando 1 milímetro de separación adicional entre vueltas con este diámetro y el número de espiras se determinó la altura del embobinado mediante la Ec (2.47).

$$l = n * P + d \quad (2.47)$$

donde: n es el número de espiras la cual es igual a 54,

l es la altura total de la bobina,

P es el paso por vuelta equivalente a 3.60 mm, y

d es el diámetro el cual es de 2.60 mm.

Resolviendo la Ec. (2.47 para 54 espiras y 2.60 mm diámetro del conductor:

$$l = 54 * 3.60 + 2.60$$

$$l = 197.00 \text{ mm}$$

Tomando la Ec. (1.2 se puede dejar la inductancia en términos del área transversal interna de la bobina, siendo esta la Ec. (2.48 [12].

$$L_i = \mu_0 n_L^2 l A$$

$$L_i = (4 \times 10^{-7}) \left(\frac{54}{0.197} \right)^2 (0.197) A$$

$$L_i = A * 5.379823 \times 10^{-3}$$

$$L_i = A * 5.379823 \times 10^{-3} \quad (2.48)$$

Sustituyendo la Ec. (2.48 en la Ec. (1.6 y conociendo la frecuencia de diseño se puede iterar para encontrar el diámetro interno de la bobina, para el valor de la capacitancia a sustituir se puede tomar como referencia una capacitancia de 4.7 micro faradios muy usada en varios de los calentadores por inducción modernos, sustituyendo valores obtenemos.

$$f_{natural} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_i C}}$$

$$10,000 = \frac{1}{2\pi\sqrt{(A * 5.379823 \times 10^{-3})(4.7 \times 10^{-6})}}$$

$$10,000 = \frac{1}{\sqrt{A} * 0.0009991088156}$$

$$\sqrt{A} = \frac{1}{9.991088156}$$

$$A = 0.010018 \text{ m}^2$$

Resolviendo para el diámetro en función del área se obtiene la Ec. (1.4:

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (2.49)$$

Resolviendo.

$$D = \sqrt{\frac{4 * 0.010018}{\pi}}$$

$$D = 0.11293942 \text{ m}$$

$$D \approx 11.29 \text{ cm}$$

Resolviendo la Ec. (2.48).

$$L_i = A * 5.379823x10^{-3}$$

$$L_i = 0.010018 * 5.379823x10^{-3}$$

$$L_i = 53.8950 \mu H$$

Con ello se acepta el resultado ya que la probeta tiene 2.54 cm de diámetro, y la bobina 11.29 cm internos, con lo que hay suficiente espacio para ubicar con seguridad la probeta dentro de la bobina sin correr riesgo de contacto y con esa geometría se mantiene la frecuencia de diseño de ~10 kHz. La bobina se presenta en la Fig. 2.13 y sus dimensiones se presenta en la Fig. 2.14.

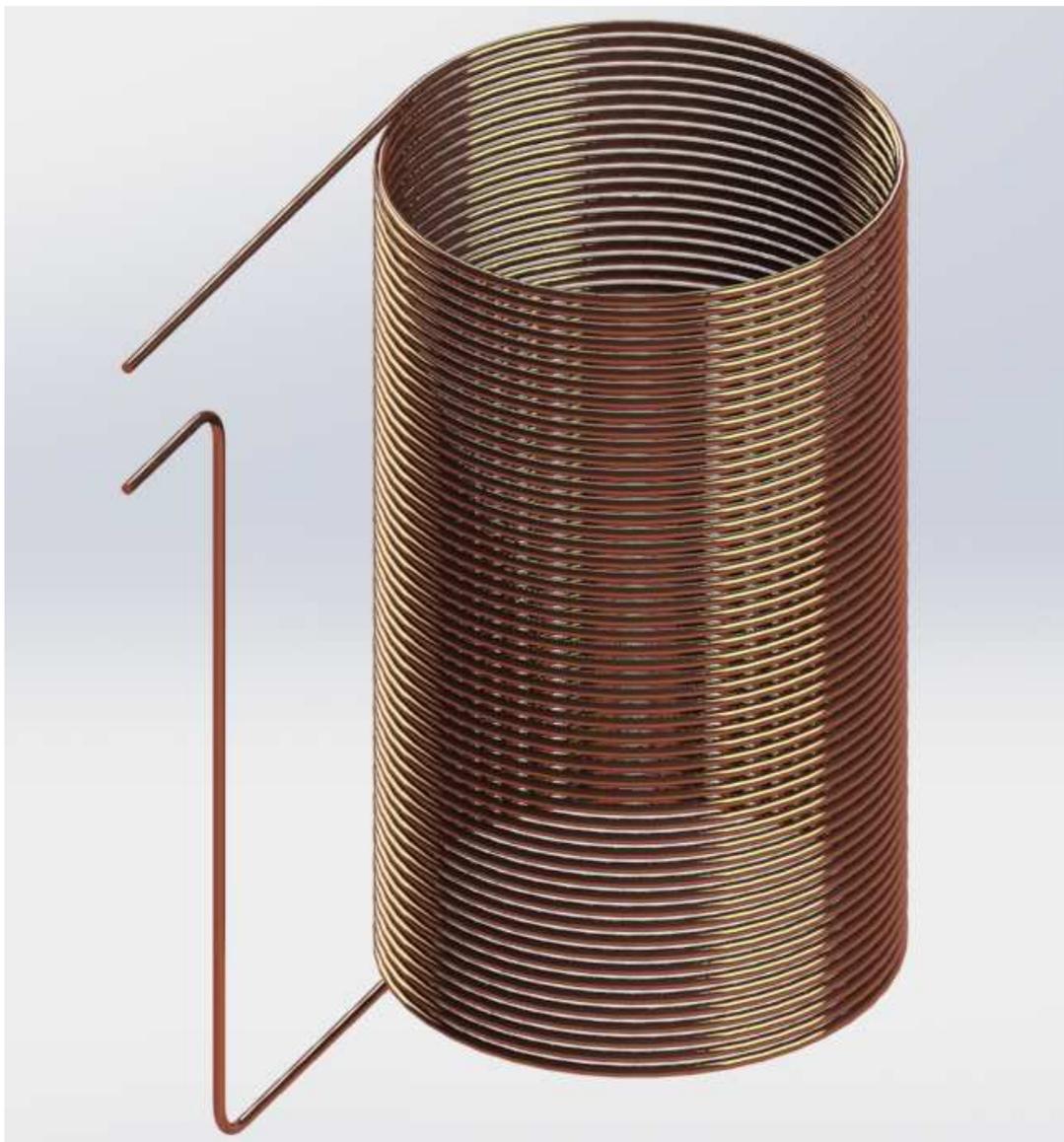


Fig. 2.13. Bobina de inducción electromagnética fabricada con alambre sólido de cobre THHN 10 AWG recubierta de barniz aislante o dieléctrico con un valor de $53.8950 \mu\text{H}$.

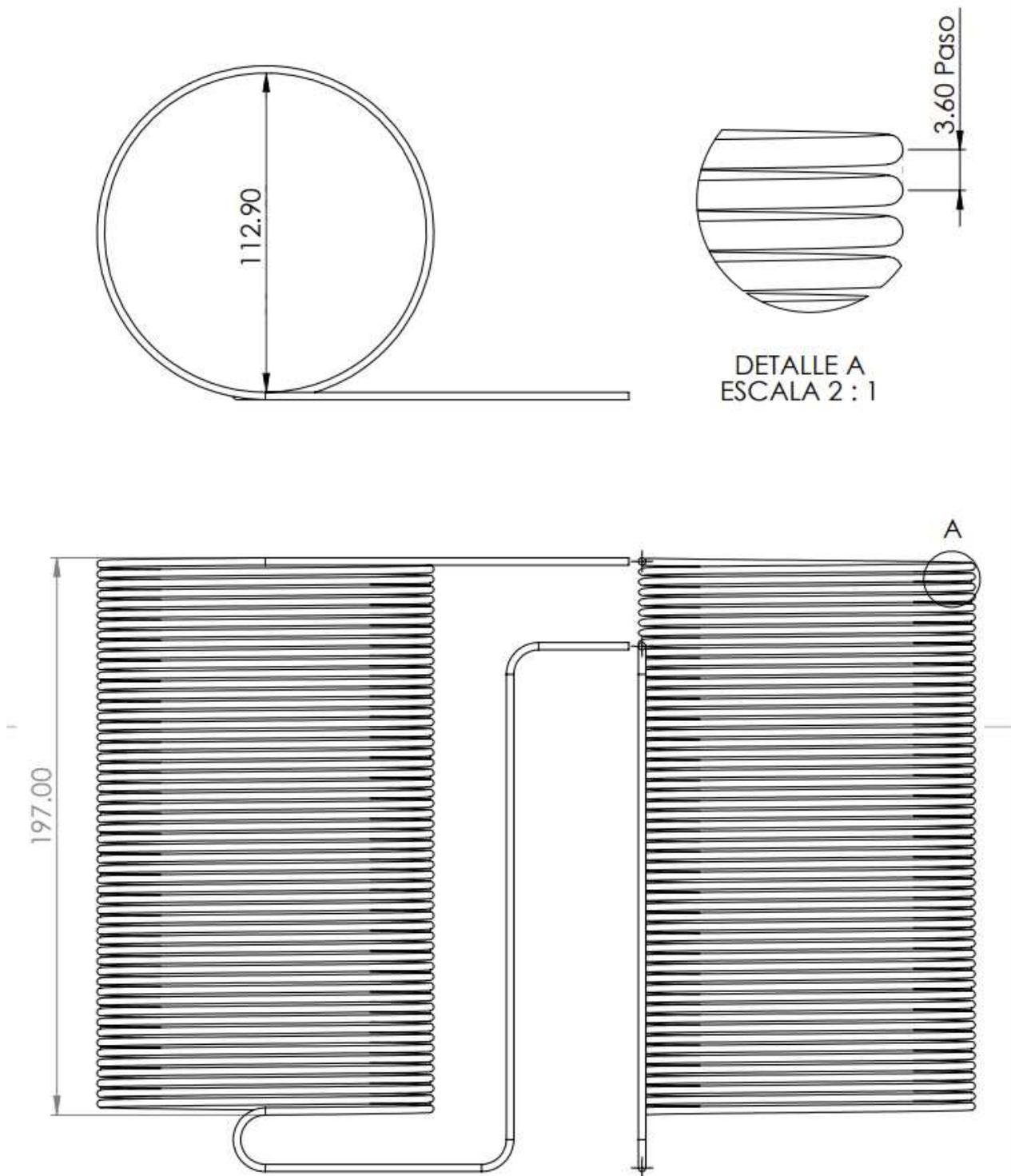
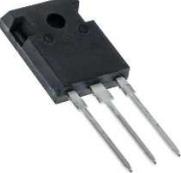
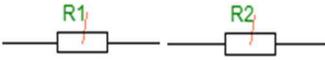
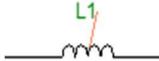


Fig. 2.14. Dimensiones nominales de la bobina primaria del sistema de inducción. Cotas en mm.

2.2.3. CIRCUITO DE CONTROL

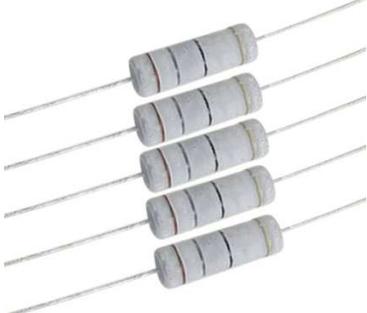
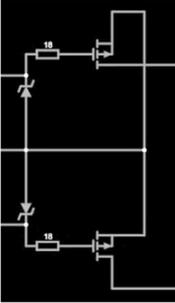
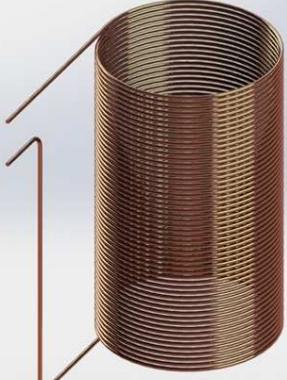
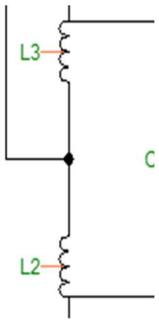
En la Tabla 2.9 se detallan los componentes seleccionados para el circuito de control de amortiguamiento forzado para el circuito oscilador tanque LC:

Tabla 2.9. Componentes seleccionados para el circuito de base Mazzilli con referencias a la Fig. 1.27.

Ilustración	Simbología utilizada	Descripción del componente
		Transistor MOSFET IRFP4668PBF, 200V 130A 9.7mOhm 161nC
		Condensador no polarizado, WIMA, MKP1J034706B00KB00, 470nF, 630VAC
		Diodo rápido FR307, 3A 1000V 500ns
		470R, resistencia de óxido metálico de 5w
		Diodo Zener modelo 1N5349BRLG, 12v, 5W
		Inductor de 100µH

Continúa.

Continuación.- Tabla 2.10. Componentes seleccionados para el circuito de base Mazzilli con referencias a la Fig. 2.16Fig. 1.27.

Ilustración	Simbología utilizada	Descripción del componente
		<p>10kR, resistencia de óxido metálico de 1/2W</p>
		<p>18R, resistencia de óxido metálico de 1/2w</p>
		<p>Bobina de inducción electromagnética 53.8950 μH</p>

2.2.4. SISTEMA DE ENFRIAMIENTO

Por motivos de facilidad y que el equipo es a escala de laboratorio se escogerá no instalarle bobina hueca ya que no se encuentra un proveedor local para la fabricación de la bobina inductora, en su lugar se usará una bobina sólida de alambre conductor THHN 10AWG, los laboratorios durarán poco tiempo y el material para fabricar la bobina para su reemplazo es barato y fácil de adquirir, además de que no siempre se expondrá hasta la corriente nominal de funcionamiento, por lo que una bobina podría funcionar múltiples veces hasta su reemplazo.

2.3. PROTOTIPO FINAL

Tomándose como base las recomendaciones del circuito oscilante Mazzilli se estableció usar 10 capacitores no polarizados modelo MKP1J034706B00KB00 con 470 nF cada uno a una capacidad máxima de tensión de 630 VAC dando como capacitancia equivalente $4.7 \mu\text{F}$ que en conjunto con la inductancia de la bobina primaria de $53.8950 \mu\text{H}$ según la geometría calculada de la Fig. 2.14, se obtiene una frecuencia de resonancia de $\sim 10 \text{ kHz}$ tal como se presenta en la Fig. 2.15.

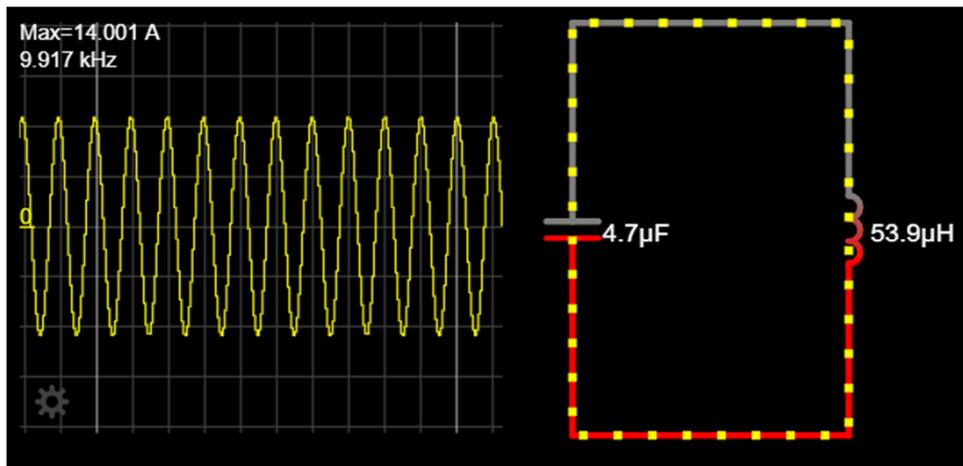


Fig. 2.15. Simulación del circuito tanque LC calculado para una frecuencia de $\sim 10 \text{ kHz}$, con una capacitancia de $4.70 \mu\text{F}$ y una inductancia de $53.8950 \mu\text{H}$.

Mediante el uso del software gratuito online de simulación de circuitos eléctricos falstad se procedió a realizar el circuito final y la simulación de este para corroborar los resultados previamente calculados, al circuito original se le añadió una mejora usada hoy en la actualidad de colocar una resistencia de 18 ohmios en la línea de Gain antes del mosfet, con la intención de mejorar el funcionamiento y proteger el MOSFET. Así también, se seleccionó el MOSFET IRFP4668PBF por su capacidad para conmutar las puertas de conexión y desconexión, se seleccionaron dos diodos Zener de 12 V a 5 W y 2 diodos rápidos modelo FR307. El circuito se presenta en la Fig. 2.16.

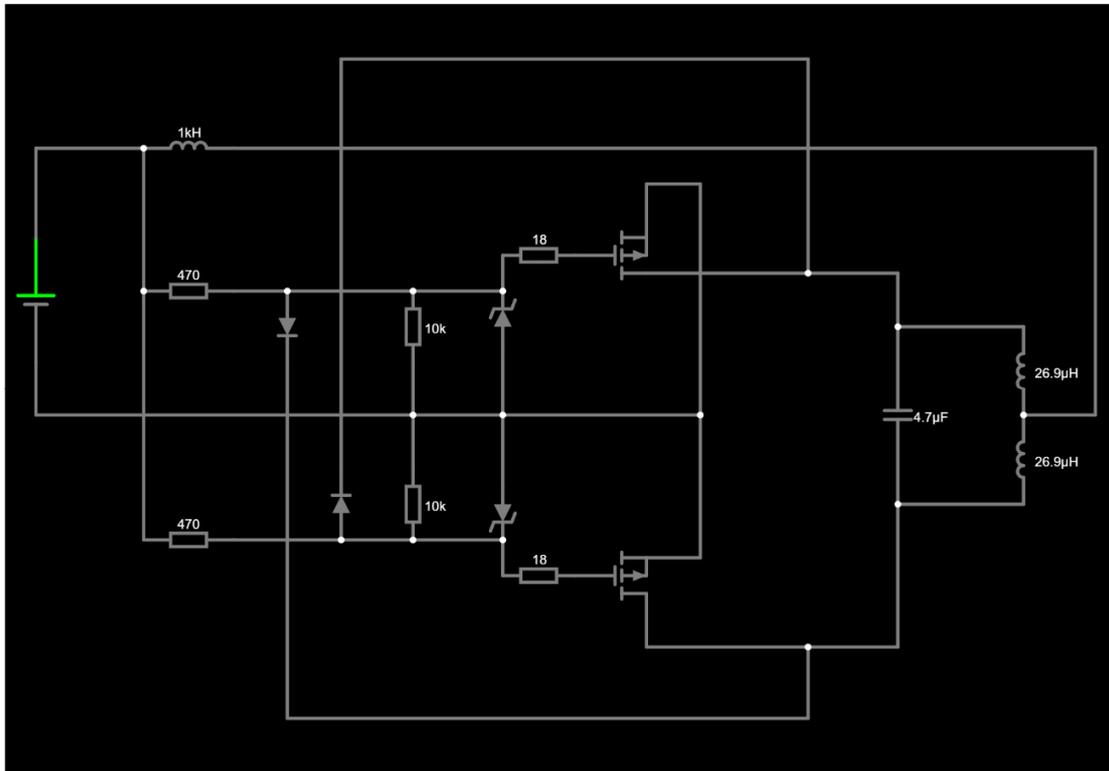


Fig. 2.16. Circuito oscilador Mazilli para un horno de inducción de 1200 W a 10 kHz de frecuencia resonante.

Cabe resaltar que el diseño se hizo sobre la base de la bobina soldada a la mitad a la fuente de tensión tal cual es el modelo original base Mazzilli, es por ello que aparecen las bobinas L2 y L3 de la Fig. 1.27 con un valor de $26.9475 \mu\text{H}$ referente a la mitad del valor de la inductancia de la bobina completa.

Al simular el circuito de la Fig. 2.16 se obtiene el resultado que se presenta en la Fig. 2.17. La frecuencia de oscilación ronda los 9.917 kHz debido a que el software no puede tolerar todos los decimales para el valor de los componentes.

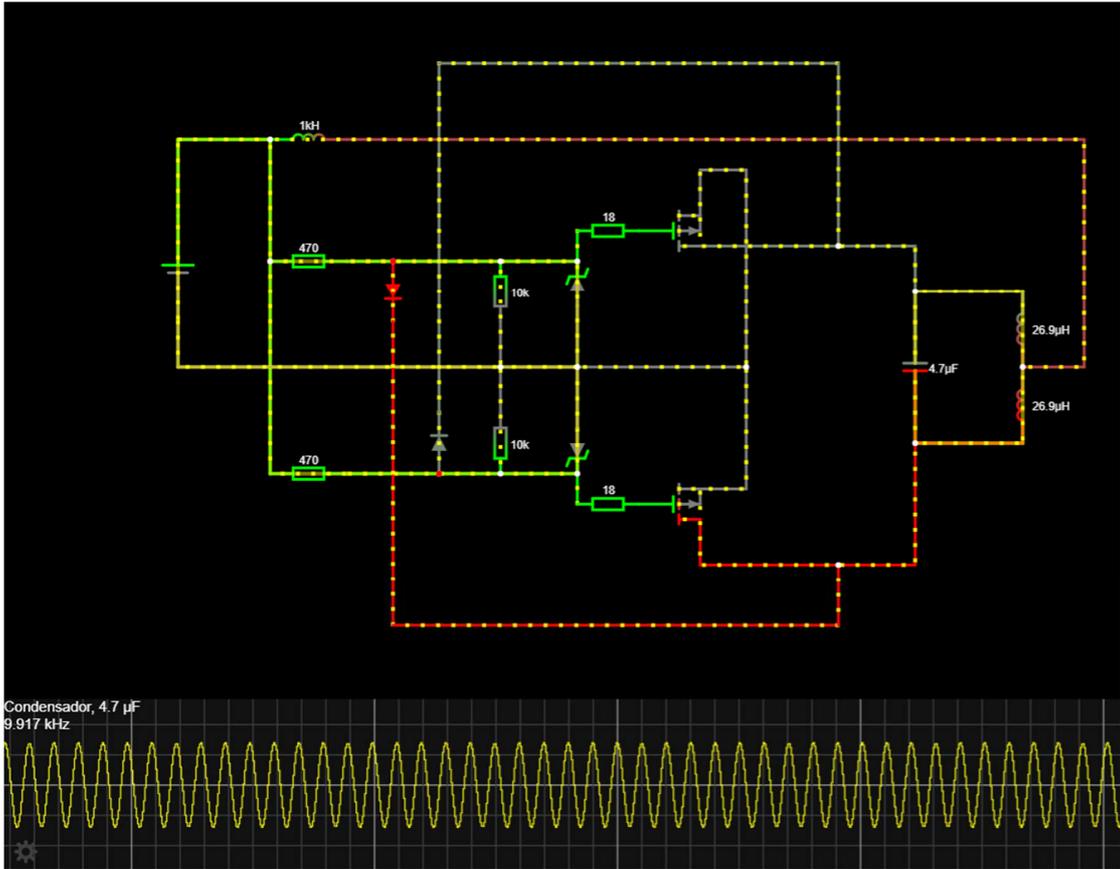


Fig. 2.17. Simulación del diseño para el circuito inversor Mazilli, 1.2 kW a 10 kHz.

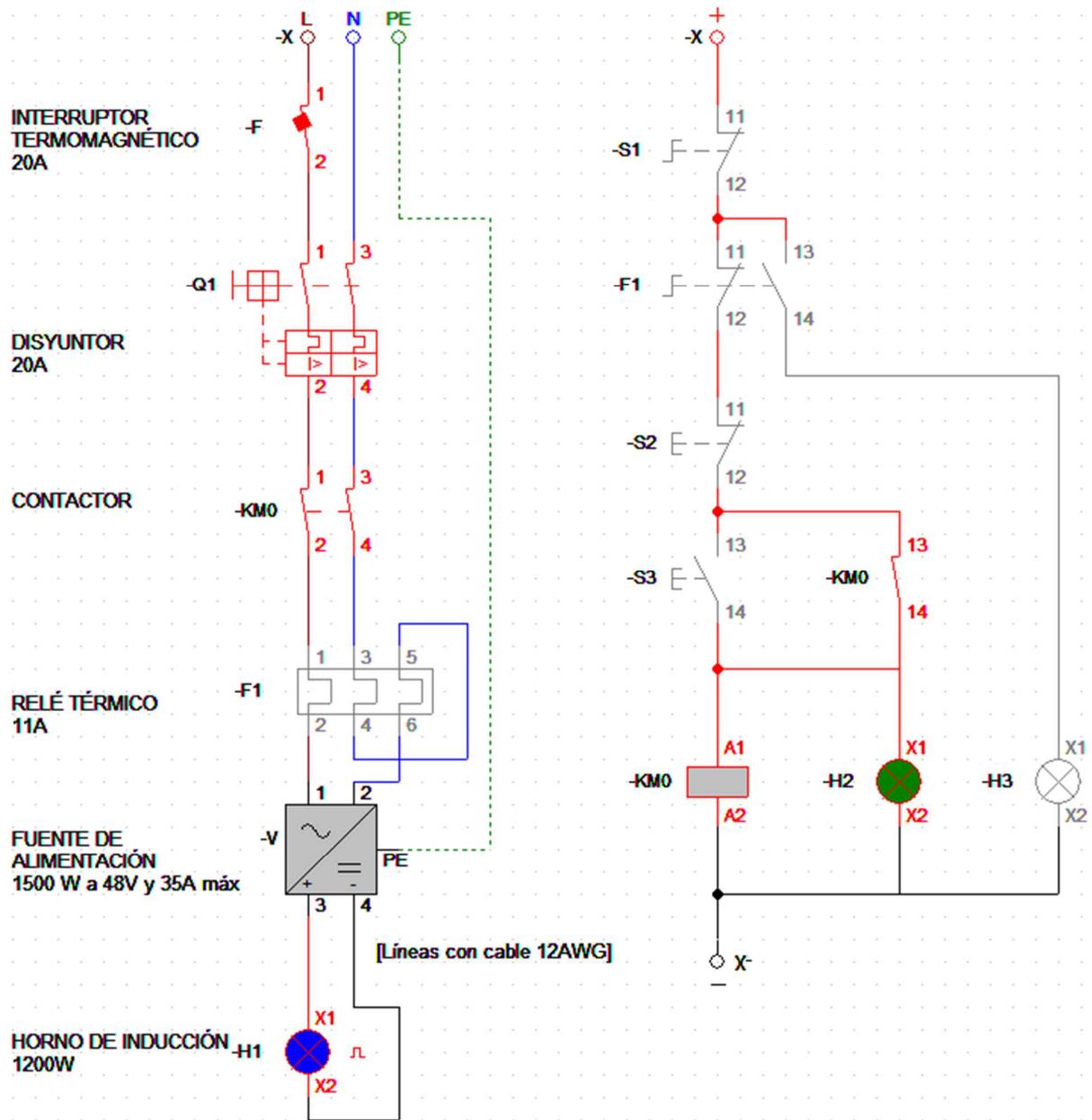


Fig. 2.18. Circuito de protección para equipo de inducción a 1200 W.

3. FACTIBILIDAD

Factibilidad se refiere a la disponibilidad de los recursos necesarios para llevar a cabo los objetivos o metas señalados, la factibilidad se apoya en dos aspectos básicos que son:

- Técnico, y
- Económico.

El éxito de un proyecto está determinado por el grado de factibilidad que se presente en cada uno de los dos aspectos anteriores. El estudio de factibilidad sirve para recopilar datos relevantes sobre el desarrollo de un proyecto y sobre la base de ello tomar la mejor decisión, si procede su estudio, desarrollo o implementación.

3.1. FACTIBILIDAD TÉCNICA

Para determinar la factibilidad técnica, se detallarán los requerimientos de hardware, software, conocimientos, habilidades y recursos humanos necesarios para dar inicio a un proyecto de diseño y construcción de un horno de inducción electromagnética para su implementación en laboratorios de tratamientos térmicos.

3.1.1. REQUERIMIENTOS DE HARDWARE

Entre los requerimientos de equipos necesarios para el estudio y desarrollo del proyecto se tienen las computadoras de escritorios o portátiles, de entre las cuales se tienen dos portátiles modelo Lenovo Legion i5, estas consolas son usadas para el trabajo diario personal, en donde el software manejado con mayor frecuencia pertenece a herramientas de Microsoft Office e Internet para la investigación de conceptos.

Adicionalmente, se requerirá un equipo portátil para actividades de soporte, diseño de contenidos, tutoría, simulación, entre otros. Este hardware anteriormente descrito podría cumplir con las siguientes características básicas similares o superiores, obtenidas

sobre la base de un estándar de selección de equipo adecuado para el estudio de la carrera de grado de ingeniería mecánica. Los portátiles tienen las características que se presentan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Descripción técnica de los equipos portátiles utilizados para la investigación, desarrollo, diseño y simulación del proyecto.

Item	Descripción
Procesador	Intel Core i5 – 10300H CPU @ 2.5 GHz con 8 núcleos y 16 hilos
Memoria RAM	12 Gb – máximo 16Gb DDR4
Almacenamiento	128 Gb SSD NVMe + 1Tb HDD
Cámara integrada	Sí Full HD
Tarjeta de video	NVIDIA GTX 1650 – 4 Gb
Tarjeta de sonido	DOLBY ATMOS
Sistema operativo	Windows 10 Home Single, 22H2

3.1.2. REQUERIMIENTO DE SOFTWARE

A continuación, se detallan los requerimientos de los softwares necesarios para la investigación, modelado, diseño y simulación del proyecto:

- Plataforma de edición ofimática.

Actualmente se dispone de licencias corporativas de Office, entre ellas Office 2019 y Office 365 cuya versión no afectará el correcto funcionamiento para el trabajo cooperativo online en el documento.

- Plataforma de modelado de circuitos electrónicos.

Para ello se tienen dos softwares diferentes uno es ProfiCad y el otro es Applet el simulador de circuitos cuyo software no requiere licencia, el primer software se puede utilizar en la versión de prueba instalándolo en uno de los equipos y el otro se encuentra libre en internet bajo el enlace: <http://falstad.com/>.

- Plataforma de navegación WEB.

En cuanto a los navegadores se tienen Google Chrome, Mozilla Firefox y Microsoft Edge.

- Plataforma de Video conferencia. Gracias a la Institución universitaria se tienen institucional regida por Google, por lo que se dispone de la plataforma de Google Meet empresarial.

- Plataforma de diseño mecánico.

En diseño mecánico se tienen dos softwares diferentes, uno es SolidWorks de Dassault Systemes y el otro es Inventor de Autodesk, cuyas licencias con las que se disponen son estudiantiles, en el caso de este tipo de software se utilizaría para el modelado de componentes mecánicos, ya sea para este caso la bobina primaria Lp.

3.1.3. RECURSO HUMANO

En cuanto al recurso humano necesario para que el proyecto pueda ser implementado en la institución y que la capacitación pueda ser continua, siendo debido a que la institución dispone de personal con las competencias requeridas, se podrá hacer uso del recurso existente con un reordenamiento de sus funciones para el personal fijo del proyecto, tal como se presenta en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Requerimientos del recurso humano quien administrará el equipo.

Cantidad	Cargo	Descripción
1	Administrador de Equipos de laboratorio / Gestor del curso	Profesional con experiencia en metalurgia y máquinas herramientas que administrará el uso y operación del horno de inducción electromagnética, así como la implementación de nuevas funcionalidades y actualizaciones del diseño del equipo.

Para el caso de la capacitación al personal interno y estudiantil de la escuela, ésta se realizará por el Administrador de equipos de laboratorio, todo esto tomando en consideración el alto nivel de conocimiento del docente, no obstante, no se dejará las labores habituales porque se trata de funciones eventuales.

3.1.4. CONOCIMIENTOS Y HABILIDADES

Para el desarrollo de la investigación bibliográfica se debe tener un alto conocimiento en el uso de equipos informáticos, tanto softwares (anteriormente ya descritos) como hardwares. Entre los conocimientos técnicos-profesionales necesarios para el diseño del proyecto se detalla:

- Alto nivel en matemáticas y física.

Entre las cualidades matemáticas más sobresalientes se requiere alta lógica, análisis, capacidad de entender y resolver todo tipo de ecuación, para ello se tiene que se ha cursado cuatro materias de matemáticas para ingeniería y tres físicas.

- Conocimientos en termodinámica y transferencia de calor

Se requiere para el análisis de potencia mínima necesaria estimando las pérdidas existentes por parte de la convección y radiación de la probeta. Así, como el comportamiento de los materiales a las diferentes temperaturas de operación o intervalos de temperatura. Para ello se ha cursado 2 materias de termodinámica y 1 materia de transferencia de calor.

- Conocimientos en ciencia de los materiales y metalurgia.

Se requiere para establecer el punto de operación máximo del equipo, conociendo las diferentes microestructuras y estados del acero se puede establecer una temperatura máxima para realizar variedades de tratamientos térmicos a diferentes temperaturas. Para ello se ha cursado dos materias de ciencia a los materiales y dos materias de procesos de fabricación.

- Conocimientos en electricidad y electrónica.

Se requiere la capacidad analizar y resolver diferentes tipos de circuitos, y comprender los componentes pasivos y activos en ellos, así como también poder diseñar una bobina inductora adecuada en función del material de carga a tratar.

- Habilidad en soldadura de componentes electrónicos.

Se requiere poder realizar los circuitos diseñados y llevarlos a su operación, así como también poder realizar cambios a los componentes de los circuitos una vez se hayan deteriorados.

3.2. FACTIBILIDAD ECONÓMICA

En este apartado se debe realizar una evaluación de costos entre el diseño de un horno por inducción desarrollado en el presente documento, teniendo en consideración la investigación, la materia prima y mano de obra para su realización; contra el costo de un horno por inducción ya existente en el mercado con características similares o idénticas al diseño propuesto.

En la Tabla 3.3 se tuvieron en consideración las horas de investigación y reuniones por parte de los diferentes docentes de la universidad, incluyendo las horas de reuniones con el orientador del proyecto y las horas por parte de los exponentes para el desarrollo del diseño.

Tabla 3.3. Costo del desarrollo de la investigación.

Descripción	Cantidad	Unidad	C/U, \$	C/T, \$
Bibliografía, cursos	50	h	2.50	125.00
Tutorías con asesores	50	h	12.50	625.00
Total =				750.00

Para el caso de los insumos necesarios para la fabricación del proyecto, se realizó la Tabla 3.4 con el presupuesto donde se expondrán los costos de la materia prima, indicando la cantidad del artículo junto con sus unidades comerciales de venta respectivamente.

Teniendo los materiales definidos se procede con el presupuesto para la fabricación e instalación del horno por inducción, estos costos se contemplarán en la Tabla 3.5.

Con la información anterior se procede a totalizar los costos del diseño para su comparación contra una maquina en el mercado, tal como se presenta en la Tabla 3.6.

Buscando proveedores de este tipo de equipos a nivel nacional se determinó que solo venden inductores para ajuste térmico de rodamientos, siendo estos hornos de inducción de poca capacidad, cotizando en el mercado extranjero se obtuvieron cotizaciones de china mediante la plataforma de AliExpress, el equipo encontrado más próximo a los requerimientos y con los menores costos se detalla en la Fig. 3.1.

La compra del equipo por AliExpress se desglosa en la Tabla 3.7.

Tabla 3.4. Costo de materia prima, componentes, entre otros.

Componentes	Cantidad	Unidad	C/U, \$	C/T, \$
Cable para la bobina THHN 10 AWG	1	m	1.00	1.00
Fuente de poder conmutada de 1500 W de 0 – 48 V	1	u	299.94	299.94
Cable eléctrico THHN 12 AWG	3	m	0.60	1.80
IRFP4668PBF MOSFET	2	u	11.77	23.54
WIMA, MKP1J034706B00KB00 470nF, 630 VAC Capacitor	10	u	5.01	50.10
FR307 Fast Diode	2	u	1.68	3.36
470R, 5 W Metal Oxide resistor	2	u	2.00	4.00
10 k, ½ W resistor	2	u	2.00	4.00
18 R, ½ W resistor	2	u	2.00	4.00
Inductor de anillo de línea	1	u	10.50	10.50
12 V, 5 W Zener Diode	2	u	1.70	3.40
Cautín de tipo Lápiz de 25 W	1	u	20.00	20.00
Rollo de estaño	2	u	19.90	39.80
Pasta fundente para estaño	2	u	0.99	1.98
Medidor de inductancia	1	u	16.89	16.89
Osciloscopio	1	u	80.39	80.39
Plataforma PCB	1	u	10.29	10.29
Disipadores de calor	2	u	6.43	12.86
Interruptor manual	1	u	4.20	4.20
Total =				581.76

Tabla 3.5. Costo de mano de obra.

Descripción de obra	Cantidad	Unidad	C/U, \$	C/T, \$
Fabricación horno de inducción	30	hora	6.00	180.00
Instalación horno de inducción	1	día	6.00	6.00
Total =				186.00

Tabla 3.6. Costo total de proyecto.

Item	Descripción	Costo, \$
1	Desarrollo del diseño	750.00
2	Materia prima	581.76
3	Mano de obra	186.00
Total =		1,517.76



Fig. 3.1. Cotización de un horno de inducción comercial de 2.5 kW en AliExpress.

Tabla 3.7. Compra desglosada de horno de inducción al extranjero AliExpress.

Costo del equipo; \$	Costo de envío, \$	Impuesto aprox., \$	C/T, \$
128.70	242.33	60.00	431.03

CONCLUSIONES

- El horno por inducción diseñado cumple con la función de calentar el material de carga seleccionado, asegurando el campo electromagnético el cual es un factor determinante en este tipo de hornos.
- Mediante el estudio realizado y teniendo en consideración las características diferenciadoras de los hornos por inducción, se clasifican dentro de los tipos que menos emisiones de gases genera durante su proceso de fundición o calentamiento, convirtiéndolo en uno de los hornos más amigables para el medio ambiente.
- A nivel financiero el diseño desarrollado en este proyecto se realizó mediante la búsqueda de las mejores alternativas, sin embargo el alto costo de la fuente de suministro y la compra de la materia prima en general encarecen mucho el proyecto, por lo que se decide comprar el equipo en lugar de fabricarlo, obteniendo un ahorro en la inversión y dotando a la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador con un horno eléctrico inductivo para la realización de algunos laboratorios en el área de la metalurgia.
- Sobre la base del trabajo de Propuesta de un laboratorio didáctico de tratamiento térmico superficial por inducción [17]. se podría elaborar procedimientos a realizar para las prácticas de laboratorio de tratamientos térmicos con el equipo de calentamiento por inducción.
- El circuito se podría mejorar incorporando un controlador de temperatura infrarrojo para facilitar la mantención de temperaturas específicas.

RECOMENDACIONES

- El diseño del horno fue realizado para calentar 0.2 kg de un acero SAE 1045 hasta 1,000 °C, por lo que los parámetros de diseño del equipo fueron calculados en función a este material, si se requiere calentar otro tipo de metal se deberá recalcular la capacidad en función a los nuevos materiales que se deseen fundir para conocer el máximo punto de operación para el nuevo material.
- Para aumentar la frecuencia de oscilación y reducir el espesor del efecto pelicular solo es necesario remover un condensador del banco de condensadores, entre más se remuevan más ira incrementando la frecuencia y reduciendo el espesor del efecto pelicular y por el contrario se requiera mayor penetración solo se deben de seguir agregando más condensadores de igual capacitancia al circuito.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Botero, F. (2016). Hornos de inducción. Producción limpia y eficiente. Revista de Inductotherm Corp
- [2] Villavincencio García, L.J. (2015). Mantenimiento de un horno de inducción magnética. Guayaquil, Ecuador: Escuela superior politécnica del litoral.
- [3] Duarte Barrero, D.F., y Vargas Alvarez, J.D. (2018). Diseño de un horno eléctrico para tratamientos térmicos con atmósfera controlada. Bogotá, Colombia: Fundación Universitaria Los Libertadores.
- [4] JULIO MARTINEZ NAYA, S.A. (2018). Julio Martinez Naya Servicios. Obtenido de Resistencias para hornos industriales: <https://www.juliomartineznaya.com/resistencias-hornos-industriales-resistencias-electricas-tipos-y-usos/>
- [5] HINRA SAC (2000). Hornos Hinra Perú SAC. Obtenido de Horno a quemador a gas para tratamientos térmicos: <http://hinrasac.com/V1/project-view/horno-a-quemador-a-gas-para-tratamiento-termico/>
- [6] Nanjing Boqiao Machinery Co. (2004). Made in China. Obtenido de Horno de fusión para aluminio: https://es.made-in-china.com/co_boqiaomachine/product_Aluminum-Fuel-Gas-and-Fuel-Oil-Melting-Furnace-for-Aluminum-Casting-Foundry-Factory_oihuening.html
- [7] Díaz Hernández, Y. (2012). Diseño del horno de inducción con vista a laminación continua de la palanquilla de acero. La Habana, Cuba: Instituto Superior Politécnico
- [8] Electorheatnew (2014). Electro Heat Induction INC. Obtenido de Hornos de inducción sin núcleo o de canal para su industria: <https://electroheatinduction.com.mx/hornos-de-induccion-sin-nucleo-o-de-canal-para-su-industria/>.
- [9] Rudney, V. (2003). Wikipedia. Obtenido de Horno de inducción: https://es.wikipedia.org/wiki/Horno_de_inducci%C3%B3n
- [10] Calvo, C.S. (2015). SCIENTIA. Obtenido de Hornos utilizados en la fabricación de aleaciones ferrosas y no ferrosas: <https://revistas.urp.edu.pe/index.php/Scientia/article/download/388/384/786>
- [11] Astigarraga Urquiza, J., y Aguirre Ormazá, J.L. (1999). Hornos industriales de inducción. Mc Graw Hill. (1^{ra} Ed.). México.
- [12] Mejía Silva, W.S., y Villalobos Vaquero, G.F. (2019). Diseño de un horno de inducción para prácticas de laboratorio. Bogotá, Colombia: Fundación Universitaria de América.
- [13] Garay Garay, L.J. (2017). Diseño de un horno de inducción magnética. Concepción, Chile: Universidad del Bio Bio.

- [14] Inductotherm Corp. (2011). Inductotherm. Obtenido de Guía de fundamentos de seguridad en la fundición por inducción: en:<https://code.inductotherm.com/06%20Resources/Safety/M2573%20Rev%202.pdf>.
- [15] Valery Rudnev, Don Loveless y Raymond L. Cook. (2017) Antecedentes de, Manual de calentamiento por inducción. CRC Press. Segunda edición.
- [16] Resnick, R., Hallyday, D., & Krane, K. (2007) Física, Volumen II. (4^{ta} Ed. en español). México.
- [17] Deras Acevedo, C.J. (2021). Propuesta de un laboratorio didáctico de tratamiento térmico superficial por inducción. San Salvador, El Salvador: Universidad de El Salvador.
- [18] Hapidin, D.A., Saleh, I., Miftahul, M., & Khairurrijal, K. (2017). Diseño y desarrollo de un convertidor Flyback de conmutación de voltaje cero Mazzilli de configuración en serie como fuente de alimentación de alto voltaje para electrohilado sin agujas. Bandung, República de Indonesia: Instituto de tecnología de Bandung.
- [19] AG Electrónica (2023). Catálogo fuentes Mean Well. Estados Unidos.
- [20] Zetino, J. (2020). Equipos y elementos de instalación en baja tensión, especificaciones. Unidad II-B. Instalaciones eléctricas para sistemas mecánicos 1. Universidad de El Salvador.
- [21] Earley, M.W., Vigstol, D., Cloutier, M., y Coache, C.D. (2016). Código nacional eléctrico. Estados Unidos.
- [22] Avner, S.H. (1975). Introducción a la metalurgia física. Mc Graw Hill. (2^{da} Ed.). México.
- [23] Bastidas Ordoñez, J.A., Pazmin, D.G., García Escobar, J.W., y Montoya Rojas, E. (1985). Diseño y construcción de un horno de inducción para fundición de acero y temple de metales. Cali, Colombia: Corporación Universitaria Autónoma de Occidente.
- [24] Strang, G., y Herman, E. (2022). Cálculo, Volumen I. (13^{ra} Ed. digital OpenStax. Houston), Texas
- [25] Incropera, F.P. (1999). Fundamentos de transferencia de calor. (4^{ta} Ed.). Naucalpan de Juárez, México.
- [26] Cengel, Y.A. (2016). Transferencia de calor y masa. (3^{ra} Ed.). México.
- [27] Day, J. (2012). Convección natural para cilindros verticales. Texas: Universidad del Norte de Texas
- [28] Chapman, S.J. (1987). Máquinas eléctricas. (3^{ra} Ed.). Bogotá

ANEXOS

ANEXO A. MANUAL DE MANTENIMIENTO

Del buen mantenimiento que se realice dependerá el buen funcionamiento, de igual manera la conservación y la vida útil del horno por inducción, en este manual el encargado del mantenimiento encontrará las posibles acciones que debe tener en consideración en el momento de realizarlo, cumpliendo cada uno de los pasos que se describirán a continuación.

- **Mantenimiento de la bobina.**

Se recomienda revisar semanalmente el apriete de tornillos que sujetan la bobina debido a que se trata de una parte sometida a altas vibraciones, por otra parte, al estar sometida a altas temperaturas se recomienda cada año desmontar el núcleo en su totalidad, de esta manera limpiar o reemplazar si es necesario tornillería o remaches de sujeción.

- **Mantenimiento de acoples eléctricos.**

Se debe realizar una inspección semanal de los contactos eléctricos del horno, revisando de manera visual peladuras en los cables, obstrucciones y la limpieza de estos evitando de esta manera posibles cortos, o el mal funcionamiento del sistema.

- **Mantenimiento de la carcasa.**

Se recomienda semanalmente revisar tornillería, ajustando las piezas que se noten un poco sueltas. En caso de presentar abolladuras, golpes o raspaduras y teniendo en consideración que la carcasa estará recubierta con una capa de anticorrosivo, se recomienda pulir y recubrir nuevamente la zona dañada, de esta manera evitando daños más profundos en el horno

- **Actividades de mantenimiento.**

En el cuadro, se mencionan algunos pasos y actividades que se deben tener en consideración para desarrollar el programa de mantenimiento y la frecuencia en la que se deben realizar.

Componente	Actividad	Frecuencia			
		Diario	Semanal	Mensual	Anual
Bobina	Apriete de tornillería			x	
	desmontaje de bobina				x
Cables y tomas eléctricos	Limpieza		x		
	Revisión de conector y cables			x	
Carcasa	Apriete de tornillería			x	
	Golpes	x			
	Inspección visual de estado físico	x			

ANEXO B. MANUAL DE SEGURIDAD

Este manual contiene advertencias de seguridad que deben ser consultadas previamente para la correcta operación evitando accidentes dentro del laboratorio. El horno por inducción debe ser operado solamente por personal capacitado ya que existen, altos riesgos de accidentalidad, los cuales deben tener conocimientos sobre prácticas seguras en el laboratorio y el uso adecuado de los controladores, en el caso de los estudiantes aprendices deben estar bajo la supervisión de la persona encargada del equipo. Ya que existe varios riesgos por quemaduras o incendios.

Para poder asistir a las prácticas e ingresar al recinto en el cual se encontrará el horno por inducción, el personal debe contar con los implementos siguientes:

- Guantes aluminizados: son implementos de laboratorio que protegen al operador de las altas temperaturas, salpicadura de metal líquido y radiación calorífica.
- Careta de seguridad: elemento de protección facial, el cual se encarga de prevenir accidentes relacionados con salpicadura de agentes químicos y en especial para esta aplicación de fundición de metales a altas temperaturas.
- Mascarilla auto filtrante: son mascarillas especiales para la protección de las vías respiratorias cubriendo la boca, nariz y varillas, esto debido a que el metal fundido puede emitir gases nocivos para la salud.
- Antes de operar el equipo, lea atentamente las instrucciones siguientes:
 - Utilice los implementos de seguridad anteriormente explicados.
 - No opere el horno sin la autorización del personal capacitado.
 - No acerque ningún objeto inflamable cuando el horno este encendido.
 - Tenga precaución con el uso de agua, en el instante de que el horno entre en funcionamiento en especial con los componentes electrónicos.
 - Coloque la probeta en el lugar designado por el docente.
 - Mantenga las vías de acceso libre de cualquier obstáculo en caso de emergencia.
 - Opere el equipo correctamente para lo que fue diseñado.
 - Solo el personal capacitado está autorizado y apto para operar el equipo.
 - Luego de finalizada la practica limpie la zona de trabajo que se dispuso para la práctica, dejando un ambiente limpio y seco.

ANEXO C. EQUIPOS Y ACCESORIOS COMPRADOS

Equipo o EPP adquirido	Ilustración
Horno de inducción electromagnética de 6kW	
Termómetro infrarrojo industrial -58 °C hasta 700 °C	
Guantes de aluminio para calor hasta 500 °C	
Medidor de autoinductancia o inductancia de bobinas	
Osciloscopio portátil digital	