

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



PROPUESTA DE UN LABORATORIO DIDÁCTICO DE
TRATAMIENTO TÉRMICO SUPERFICIAL POR INDUCCIÓN

PRESENTADO POR:

CARLOS JOSUÉ DERAS ACEVEDO

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, JULIO 2021

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

M.Sc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIA GENERAL :

M.Sc. 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 :

PROPUESTA DE UN LABORATORIO DIDÁCTICO DE
TRATAMIENTOS TÉRMICO SUPERFICIALES POR
INDUCCIÓN

Presentado por :

CARLOS JOSUÉ DERAS ACEVEDO

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

San Salvador, julio de 2021

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

DEDICATORIA

Este trabajo de graduación está dedicado a:

Mis padres:

Carlos Deras y Fanny Acevedo

Y a mi hermano:

Alfredo Deras.

Carlos Deras.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer a mis padres y a mi hermano por toda la paciencia y el apoyo incondicional que me han dado en estos años de estudio.

Posteriormente, agradezco a todas las personas que directa o indirectamente colaboraron con el desarrollo de este trabajo de graduación. Comenzando con mi asesor Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz por la guía, el apoyo y la confianza; al personal no docente de la Escuela de Ingeniería Mecánica que, con su trabajo, brindaron aporte a mi formación como nuevo profesional.

A todos los profesores e instructores que aportaron a mi formación académica, en especial a los docentes de la Escuela de Ingeniería Mecánica.

A mis amigos y compañeros de carrera que siempre me brindaron su apoyo durante toda la jornada.

Carlos Deras.

PROPUESTA DE UN LABORATORIO DIDÁCTICO DE TRATAMIENTOS TÉRMICO SUPERFICIALES POR INDUCCIÓN

Estudiantes: Br. Carlos Josué Deras Acevedo ¹
Docente Asesor: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz²

Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería y Arquitectura,
Universidad de El Salvador

RESUMEN

El presente trabajo de graduación plantea la factibilidad de implementación de un laboratorio de tratamiento térmico superficial, más en específico, aquel que utiliza la inducción electromagnética como método de calentamiento. Una explicación y análisis de sus principios físicos, aplicaciones y facilidad de utilización proporcionaron un mejor panorama para plantear los beneficios y adversidades que la implementación del laboratorio pueda presentar. Estudio y selección de los equipos, componentes y requerimientos tanto de espacio como de seguridad se analizaron para aportar a la factibilidad del proyecto; así como también los costos y factibilidad económica, siempre tomando en consideración el impacto ambiental y social que la implementación del laboratorio pueda generar. Además, se ha considerado la capacitación de estudiantes mediante el uso del laboratorio. También, se realizó el estudio de normativas y regulaciones vigentes en nuestro país para adaptar el proyecto acorde a las mismas. El diseño de un plan de mantenimiento para los equipos, así como sus costos son factores que se evaluaron a fin de juzgar de la manera más imparcial la viabilidad de implementación del laboratorio.

Palabras clave: Inducción, Electromagnético y Tratamiento térmico superficial.

1 E-mail: carlos.deras.pyt@gmail.com

2 E-mail: jonathan.berrios@ues.edu.sv

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO	2
1.1. Generalidades de los tratamientos térmicos superficiales por inducción.....	2
1.1.1. Tratamiento térmico	5
1.1.2. Principios de la inducción electromagnética	6
1.1.2. Tratamiento térmico de temple por inducción	10
1.1.3. Tratamiento térmico de revenido por inducción	12
1.1.4. Soldadura por inducción	14
1.1.5. Recocido por inducción.....	15
1.1.6. Normalizado por inducción.....	16
1.1.7. Pre y post calentamientos por inducción.....	17
1.2. Sistemas sobre tratamientos térmicos superficiales por inducción	18
1.2.1. Factores a considerar en el calentamiento por inducción	19
1.2.2. Partes del sistema de calentamiento por inducción	24
1.3. Elementos que requieren tratamientos térmicos superficiales	28
1.4. Fabricación de bobinas de inducción	29
1.4.1. Fundamentos de las bobinas de trabajo	29
1.4.2. Diseño de la bobina	31
1.5. Diferentes aplicaciones para el calentamiento por inducción.....	33
1.6. Tratamiento de plásticos por inducción.....	35
2. PROPUESTA DE DISEÑO	36
2.1. Selección de componentes críticos que requieren tratamientos térmicos superficiales	36
2.1.1. Resortes y muelles	37
2.1.2. Tratamiento térmico en ejes.....	41
2.1.3. Tratamiento térmico en tornillos	45
2.1.4. Tratamientos termoquímicos y térmico en engranes	48
2.2. Cálculo de variables de proceso	51
2.2.1 profundidad de penetración	52
2.2.2. Modelado eléctrico de la carga	54
2.2.3. Inductancia.....	57

2.3. Estimación de las necesidades del proceso	58
2.3.1. Eficiencia térmica	59
2.3.2. Eficiencia eléctrica	60
2.3.3. Cálculo y estimación de parámetros	61
2.4. Selección de equipos de laboratorio y su respectiva carta técnica.	63
2.4.1. Selección de la fuente	63
2.4.2. Elección del generador	64
2.4.3. Selección de las bobinas	68
2.5. Selección de sistemas de control y equipos de seguridad.....	69
2.5.1. Selección de sistemas de control.....	70
2.5.2. Selección de equipos de seguridad	71
2.6. Estimación de las adecuaciones necesarias al espacio de trabajo....	74
2.6.1. Blindaje electromagnético	75
2.6.2. Efectividad del blindaje electromagnético	76
2.6.3. Selección de materiales de aislamiento	77
2.6.4. Uniones en los blindajes	79
2.7. Propuesta de distribución en planta.....	79
3. FACTIBILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO.....	81
3.1. Requerimientos energéticos y de espacio	81
3.1.1. Requerimientos energéticos	81
3.1.2. Requerimientos de espacio.....	82
3.2. Aspectos legales y normativos.....	83
3.2.1. Antecedentes de seguridad y salud ocupacional en El Salvador	83
3.2.2. Serie de normas ohsas 18000	84
3.2.3. Reglamento general sobre seguridad e higiene en El Salvador	85
3.2.4. Convenio con la oit sobre seguridad y salud de los trabajadores ...	87
3.2.5. Protocolo del convenio 155 de la oit	89
3.2.6. Instituciones nacionales e internacionales que velan por la salud y seguridad ocupacional en El Salvador	90
3.3. Propuesta de manual del usuario y salud ocupacional	91
3.3.1. Concientización de los encargados.	91
3.3.2. Requerimientos para la creación de un programa de salud y seguridad ocupacional dentro del laboratorio.....	92
3.3.3. Seguridad del usuario para con los equipos a utilizar en el laboratorio	93

3.4. Propuesta de plan de mantenimiento	93
3.4.1. Rutinas de mantenimiento	94
3.5. Desarrollo del análisis económico de la propuesta	95
3.5.1. Costos de equipos	96
3.5.2. Costo de equipos de protección.....	96
3.5.3. Costos de funcionamiento.....	97
3.5.4. Otros gastos debido a la puesta en marcha del proyecto	98
CONCLUSIONES.....	99
BIBLIOGRAFÍA.....	100

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 1.1. Ubicación gráfica de los distintos tipos de tratamientos térmicos.....	6
Fig. 1.2. Corriente eléctrica I atravesando una superficie S.....	7
Fig. 1.3. Dirección de la corriente inducida aumentando.....	9
Fig. 1.4. Dirección de la corriente inducida disminuyendo.....	9
Fig. 1.5. Ilustración de temple por inducción a un engrane.....	12
Fig. 1.6. Revenido de una pieza debajo de la temperatura crítica.....	14
Fig. 1.7. Soldadura con material de aporte con ayuda de calentamiento por inducción.....	15
Fig. 1.8. Recocido por inducción en pernos.....	16
Fig. 1.9. Estación de normalizado por inducción.....	17
Fig. 1.10. Esquema general de un equipo de calentamiento por inducción.....	19
Fig. 1.11. Distribución de la corriente y potencia en función de la profundidad.....	20
Fig. 1.12. Efecto piel en una pieza tratada por inducción.....	20
Fig. 1.13. Ilustración de las pérdidas por histéresis.....	23
Fig. 1.14. Ejemplos de bobinas utilizadas en sistemas de calentamiento por inducción.....	25
Fig. 1.15. Ejemplo de convertidor CD-CA.....	26
Fig. 1.16. Ejemplo de un banco de condensadores de compensación comúnmente utilizado en procesos de calentamiento por inducción.....	26
Fig. 1.17. Enfriamiento en línea utilizado en procesos de calentamiento por inducción.....	27
Fig. 1.18. Ejemplo de sistema de control utilizado en procesos de calentamiento por inducción.....	28
Fig. 1.19. Representación simbólica de las distintas bobinas en base a su geometría interna.....	30
Fig. 2.1. Tratamiento térmico aplicado a un resorte.....	38
Fig. 2.2. Tratamiento térmico aplicado a un resorte con agua de lluvia.....	39
Fig. 2.3. Tratamiento térmico realizado en una probeta para pruebas de ensayos de tracción.....	43
Fig. 2.4. Selección de ejes macizos (mayores y menores dimensiones) para tratamiento térmico superficial por inducción.....	44
Fig. 2.5. Selección de ejes huecos (mayores y menores dimensiones) para tratamiento térmico superficial por inducción.....	45
Fig. 2.6. Selección de pernos hexagonales de media rosca (mayores y menores dimensiones) para tratamiento térmico superficial por inducción.....	46
Fig. 2.7. Selección de pernos de hexagonal de rosca completa (mayores y menores dimensiones) para tratamiento térmico superficial por inducción.....	47
Fig. 2.8. Selección de tuercas hexagonales (mayores y menores dimensiones) para tratamiento térmico superficial por inducción.....	47
Fig. 2.9. Selección engranes rectos (mayores y menores dimensiones) para tratamiento térmico superficial por inducción.....	49
Fig. 2.10. Selección de piñones (mayores y menores dimensiones) para tratamiento térmico superficial por inducción.....	50
Fig. 2.11. Esquema básico de funcionamiento del calentamiento por inducción desde el punto de vista eléctrico.....	52
Fig. 2.12. Descripción gráfica del desfase de corriente en un conductor.....	53
Fig. 2.13. Líneas de profundidad de penetración vs frecuencia para distintos materiales ferromagnéticos.....	54
Fig. 2.14. Modelos en serie y paralelo de circuitos eléctricos usados en tratamientos térmicos por inducción.....	55
Fig. 2.15. Tipos de generadores de ELDEC.....	65
Fig. 2.16. Generador PICO de ELDEC y sus características.....	65

Fig. 2.17. Generador ECO LINE de ELDEC y sus características.....	..66
Fig. 2.18. Equipamiento y opciones del generador ECO LINE de ELDEC.....	67
Fig. 2.19. Información básica del generador CUSTOM LINE de ELDEC.....	67
Fig. 2.20. Equipamiento y opciones del generador PICO de ELDEC.....	67
Fig. 2.21. Generador CUSTOM LINE de ELDEC y sus características.....	68
Fig. 2.22. Equipamiento y opciones del generador CUSTOM LINE de ELDEC.....	68
Fig. 2.23. Distintos tipos de bobinas que ofrece ELDEC.....	69
Fig. 2.24. Características del aparato de mando que ofrece ELDEC.....	70
Fig. 2.25. Características del sistema de control que ofrece ELDEC.....	71
Fig. 2.26. Curva de Eficiencia vs. frecuencia para acero, hierro, cobre, aluminio 60 a 100,000 Hz. Datos experimentales.....	78
Fig. 2.27. Distribución en planta (distancia en m).....	80
Fig. 2.28. Diferentes vistas de planta (distancia en m).....	80

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1. Calores específicos y densidades para ciertos elementos.....	9
Tabla 1.2. Eficiencia de un calentador de inducción típico.....	21
Tabla 1.3. Frecuencias aproximadas para el calentamiento de ciertos materiales.....	22
Tabla 1.4. Elementos de máquinas que requieren tratamientos térmicos superficiales por inducción.....	28
Tabla 1.5. Diferentes tipos de bobinas utilizadas en diversos procesos de calentamiento por inducción.....	32
Tabla 2.1. Selección de resortes de menores dimensiones para tratamiento térmico superficial por inducción.....	41
Tabla 2.2. Selección de resortes de mayores dimensiones para tratamiento térmico superficial por inducción.....	41
Tabla 2.3. Distintos tratamientos térmicos aplicados a ejes.....	42
Tabla 2.4. Selección de ejes macizos (mayores y menores dimensiones) para tratamiento térmico superficial por inducción.....	44
Tabla 2.5. Selección de ejes huecos (mayores y menores dimensiones) para tratamiento térmico superficial por inducción.....	45
Tabla 2.6. Selección de pernos hexagonales de media rosca (mayores y menores dimensiones) para tratamiento térmico superficial por inducción.....	46
Tabla 2.7. Selección de pernos hexagonales de media rosca (mayores y menores dimensiones) para tratamiento térmico superficial por inducción.....	47
Tabla 2.8. Selección de tuercas hexagonales (mayores y menores dimensiones) para tratamiento térmico superficial por inducción.....	47
Tabla 2.9. Selección engranes rectos (mayores y menores dimensiones) para tratamiento térmico superficial por inducción (ancho de dientes).....	49
Tabla 2.10. Selección engranes rectos (mayores y menores dimensiones) para tratamiento térmico superficial por inducción.....	50
Tabla 2.11. Selección de piñones (mayores y menores dimensiones) para tratamiento térmico superficial por inducción (dimensiones del piñón y cadena).....	50
Tabla 2.12. Selección de piñones (mayores y menores dimensiones) para tratamiento térmico superficial por inducción.....	51
Tabla 2.13. Dimensiones de los elementos a analizar.....	61
Tabla 2.14. Dimensiones a utilizar para bobinas de trabajo.....	61
Tabla 2.15. Materiales y sus propiedades a utilizar.....	62
Tabla 2.16. Eficiencias y potencias calculadas.....	62
Tabla 2.17. Eficiencias y potencias calculadas (ejes y engranes).....	63
Tabla 2.18. Ventajas de equipos ELDEC.....	64
Tabla 2.19. Principales peligros en los talleres de tratamientos térmicos superficiales por inducción.....	72
Tabla 2.20. Principales EPIs que pueden ser utilizados en un laboratorio de tratamientos térmicos superficiales por inducción.....	73
Tabla 3.1. Instituciones que velan por la salud y seguridad ocupacional en El Salvador.....	90
Tabla 3.2. Propuesta de rutinas de mantenimiento para laboratorio de tratamientos térmicos superficiales por inducción.....	94
Tabla 3.3. Costos de adquisición de los equipos.....	96
Tabla 3.4. Costos de adquisición de equipos de protección.....	97
Tabla 3.5. Costos de funcionamiento.....	98
Tabla 3.6. Inversión inicial del proyecto.....	98

LISTADO DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

c:	Calor específico
CERSSO:	Centro Regional de Seguridad y Salud Ocupacional
CONACYT:	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
D:	Diámetro de la pieza a calentar con la bobina
d:	Diámetro del alambre del inductor
dc:	Diámetro de la bobina
d_{LW} :	Diámetro del eje
d_w :	Diámetro de la pieza
f:	Frecuencia de operación
H:	Intensidad de campo magnético
h:	Tolerancia del eje
I:	Corriente eléctrica
ISO:	Organización Internacional de Normalización
K:	Factor de acoplamiento geométrico entre la bobina y la pieza
K_R :	Factor adimensional de la trayectoria eléctrica
L:	Longitud de la bobina
l :	Longitud del inductor
l_c :	Longitud de la bobina de inducción
l_w :	Longitud de la pieza a calentar
m:	Masa de la pieza a calentar
MARN:	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
MSPAS:	Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social
N:	Número de espiras de un inductor
N_c :	Número de vueltas de la bobina de inducción
OHSAS:	Serie de evaluaciones de seguridad y salud ocupacional
OIT:	Organización Internacional del Trabajo
OPS:	Organización Panamericana de la Salud
P_c :	Potencia efectiva
$P_{\text{pérdidas térmicas}}$:	Potencia de las pérdidas térmicas a través de la superficie
P_w :	Potencia necesaria para calentar la pieza
r:	Radio de la pieza a calentar
R_{ht} :	Profundidad de la capa templada del eje
r_w :	Radio de la pieza a calentar
S:	Superficie
SSO:	Seguridad y Salud Ocupacional
t:	Tiempo de calentamiento
t_1 :	Redondez del eje
t_2 :	Paralelismo del eje
T_f :	Temperatura final
T_{in} :	Temperatura inicial
μ_0 :	Constante de permeabilidad en el vacío
$\eta_{\text{Eléctrica}}$:	Eficiencia eléctrica
$\eta_{\text{Térmica}}$:	Eficiencia térmica
η_T :	Eficiencia total
\oint :	Integral cerrada
ρ :	La resistividad eléctrica de un metal
μ :	Permeabilidad eléctrica en vacío
μ_r :	Permeabilidad relativa de un material
δ :	Profundidad de penetración
δ_c :	Profundidad de penetración de la bobina
δ_w :	Profundidad de penetración de la pieza a calentar
ρ_c :	Resistividad eléctrica de la bobina
ρ_w :	Resistividad eléctrica de la pieza
ρ_w :	Resistividad eléctrica de la pieza a calentar

INTRODUCCIÓN

En este trabajo de graduación se presenta las bases teóricas fundamentales de los tratamientos térmicos, en específico, aquellos que son superficiales y realizados en base al principio físico de inducción electromagnética como también sus distintos sistemas, elementos y funciones para un mejor entendimiento del beneficio que estos pueden traer a la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador.

Posteriormente, se realizan análisis de variables para la determinación del orden de prioridad de las mismas en la siguiente evaluación de los equipos, análisis de costos y los impactos de los mismos. Teniendo en cuenta estas variables, se procede a evaluar opciones de equipos y sus debidos subsistemas para poder culminar en los diferentes requerimientos que estos van a necesitar previo a su instalación y durante su operación normal, también tomando en cuenta los requerimientos de personal que se necesiten para poder dar un criterio de selección adecuado a las necesidades de los estudiantes de la escuela de ingeniería mecánica de la Universidad de El Salvador y también acorde a los recursos que ésta pueda proporcionar.

Un análisis de riesgos, estudio de medidas de seguridad y el impacto ambiental que los equipos y los tratamientos térmicos superficiales por inducción puedan generar, será también un tema fundamental de estudio para que puedan generarse, en un futuro, normativas y regulaciones que rigen a las empresas que se dediquen al mismo rubro para posibilitar una capacitación competente a los futuros profesionales que deseen estudiar más a fondo los tratamientos térmicos.

1. MARCO TEÓRICO

Los tratamientos térmicos superficiales engloban una gran cantidad de procesos y aplicaciones en nuestro mundo moderno, en la industria, es prioridad mantener a los operarios, supervisores y cualquier persona involucrada en procesos metalúrgicos (como los tratamientos térmicos), al tanto de los distintos mecanismos y sub procesos que vuelvan más eficientes los resultados.

Los tratamientos térmicos superficiales por inducción electromagnética se están volviendo de alta demanda por su portabilidad y resultados sumamente eficientes para el consumo de energía. La necesidad de capacitar a los profesionales para que estén sabedores de estos nuevos mecanismos y sus variables de proceso conlleva también a la necesidad de un área óptima para difundir estos conocimientos y técnicas que puedan darles los conocimientos necesarios a los profesionales de la Universidad De El Salvador, más en específico, a los futuros profesionales de la rama de ingeniería mecánica.

Las distintas comparaciones de los tratamientos térmicos superficiales convencionales versus los realizados por inducción brindarán un panorama de las ventajas y amplias aplicaciones que la inducción puede ofrecer a muchos procesos que las empresas utilizan actualmente, los componentes de los sistemas, fabricación, principios de funcionamiento y operación son la base fundamental que el profesional deberá de llevar a las empresas para mejorar la eficiencia en los procesos de tratamientos térmicos superficiales que siempre es lo que se busca para entregar un producto o servicios de calidad.

1.1. GENERALIDADES DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS SUPERFICIALES POR INDUCCIÓN

Se puede definir el tratamiento térmico superficial como la acción de modificar la estructura de los metales metálicos mediante uno o varios ciclos de calentamiento y enfriamiento de la superficie [1].

El proceso que engloba todas estas acciones proporciona la capacidad de modificar ciertas propiedades, mecánicas en mayor importancia, relacionadas con la estructura de los metales [1].

Un tratamiento térmico es un proceso en el que se efectúa un calentamiento localizado de la pieza y un enfriamiento controlado. Dicho calentamiento se lleva a cabo mediante bobinas (llamados inductores) de cobre fabricadas a la medida de la pieza o con dimensiones “estándar” para usos generales y también en ciertos casos, diseñados a medida para una única sección a calentar de una pieza o componente mecánico. Las bobinas hacen circular un campo magnético en la pieza que se comporta como un electroimán que se opone al flujo magnético (Basándose en el principio de corriente de Foucault) por lo que se genera calor de forma controlada [1].

El tratamiento térmico superficial por inducción permite cumplir con los requisitos de las distintas piezas o componentes mecánicos en cuanto a dimensiones, dureza superficial y facilidad del tratamiento [1].

La eficiencia de un sistema de calentamiento por inducción utilizado para una aplicación específica se ve incidida por varios factores: las características de la pieza, el diseño de la bobina, la capacidad de la fuente de alimentación utilizada para el sistema y la cantidad de cambio de temperatura requerido para la aplicación [1].

En primer lugar, se debe de considerar que el calentamiento por inducción funciona únicamente con materiales conductores. Los plásticos y otros materiales no conductores a menudo se pueden calentar indirectamente realizando un incremento de temperatura a un susceptor metálico conductor que transfiere calor al material no conductor. Un susceptor es un material metálico conductor que se utiliza para transferir calor a otra pieza de metal o material no conductor. Los susceptores a menudo están hechos de grafito porque es altamente resistente y fácil de maquinar, o alternativamente de acero inoxidable, aluminio u otros materiales [2].

Además del calor generado por las corrientes de Foucault (principio físico en el que se basa la inducción electromagnética), los materiales magnéticos también producen calor a través del llamado efecto de histéresis (el cual se explicará posteriormente). Este efecto deja de ocurrir a

temperaturas por encima del punto "Curie", la temperatura en la que cualquier material magnético pierde sus propiedades magnéticas. La resistencia relativa de los materiales magnéticos se clasifica en una escala de "permeabilidad" de 100 a 500; mientras que los no magnéticos tienen una permeabilidad de 1, los materiales magnéticos pueden tener una permeabilidad de hasta 500 [2].

En los materiales conductores, aproximadamente el 85% del efecto de calentamiento se presenta en la superficie o "piel" de la pieza; la intensidad de calentamiento disminuye a medida que aumenta la distancia desde la superficie. Por lo tanto, las partes pequeñas o delgadas generalmente son calentadas más rápidamente que las partes con mayor grosor, también debe de considerarse si es necesario calentar la pieza completamente o no [2].

Se debe mencionar que existe una relación entre la frecuencia de la corriente alterna y la profundidad de penetración del calentamiento generado: cuanto mayor sea la frecuencia, menor será la profundidad de penetración el calentamiento en la zona de la pieza donde se está realizando el tratamiento. Las frecuencias de 100 a 400 kHz producen calor de energía relativamente alta, ideal para calentar rápidamente piezas pequeñas o la superficie / piel de partes más grandes. Para un calor profundo y penetrante, se ha demostrado que los ciclos de calentamiento más largos a frecuencias más bajas de 5 a 30 kHz son más efectivos [2].

Dentro del inductor se localiza el campo magnético variable requerido para el calentamiento por inducción el cual se desarrolla a través del flujo de corriente. El diseño de inductores es uno de los aspectos más importantes del sistema en general. Un inductor bien diseñado proporciona el patrón de calentamiento adecuado y maximiza la eficiencia de la fuente de alimentación de calentamiento por inducción, a la vez que permite una fácil extracción de la pieza [2].

El tamaño de la fuente de alimentación de inducción requerida para calentar una pieza en particular se debe determinar a base de cuánta energía necesita transferirse a la pieza de trabajo. Esto depende de la masa del material que se está calentando, del calor específico del material y de la elevación de la temperatura requerida. También se deben considerar las pérdidas de calor por conducción, convección y radiación [3].

La eficiencia del calentamiento por inducción para una aplicación específica depende de la cantidad de cambio de temperatura requerido. Se puede acomodar una amplia gama de cambios de temperatura; como regla general, generalmente se utiliza más potencia de calentamiento por inducción para aumentar el grado de cambio de temperatura [3].

1.1.1. TRATAMIENTO TÉRMICO

El tratamiento térmico se aplica principalmente a los aceros. Para comprender las transformaciones en la estructura de un acero, es necesario conocer los componentes estructurales de éstos; debido a que, las variaciones de las propiedades son basadas en función del contenido de carbono de cada acero [3].

El tratamiento térmico es utilizado para endurecer, ablandar o eliminar los esfuerzos inducidos en los aceros debido a procesos de estirado, prensado, forjado o mecanizado. Con el tratamiento se modifica la estructura cristalina en su totalidad o de manera parcial para realizar cambios en las características mecánicas del metal [3].

Estos tratamientos están sujetos a las características de los aceros, las exigencias de las piezas tratadas, su geometría y dimensiones. En general, se efectúan sobre piezas ya mecanizadas o en su última etapa de fabricación, por lo que, en caso de producirse un fallo, éstos son generalmente muy costosos, en especial, el caso de matrices, moldes o herramientas [1].

Las etapas del tratamiento térmico son, en específico, 3 etapas con distintas finalidades, definidas a continuación [1]:

- Calentamiento hasta la temperatura determinada: La elevación de temperatura debe ser uniforme en la pieza.
- Permanencia en la temperatura establecida: Al permanecer a la temperatura determinada, se logra la completa transformación de la estructura constituyente inicial.
- Enfriamiento: Dependiendo de qué tratamiento térmico sea, el enfriamiento puede ser lento o rápido y en distintos medios.

Existen muchos tipos de tratamientos térmicos, sin embargo, entre los más conocidos se pueden encontrar (ver, Fig. 1.1) [1]:

- Recocido,
- Revenido,
- Normalizado, y
- Temple.

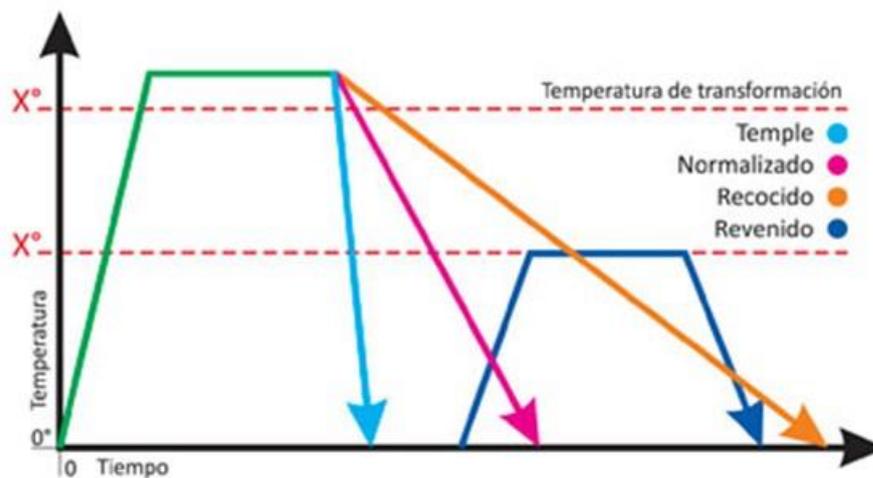


Fig. 1.1 Ubicación gráfica de los distintos tipos de tratamientos térmicos [3].

1.1.2. PRINCIPIOS DE LA INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

La ley de Ampere es útil para el cálculo de campos magnéticos generados por determinadas distribuciones de corriente que circulan por un conductor.

Suponiendo una superficie abierta S cualquiera con su curva limitadora l en una región del espacio por donde circulan corrientes eléctricas, las componentes del campo magnético B a lo largo de dicha curva, están relacionados con la corriente neta I que pasa por la superficie en su sentido hacia afuera a través de la Ec. 1.1 (ver, Fig. 1.2) [3]:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I \quad (1.1)$$

donde:

\oint es el integral cerrada de línea,

I es la corriente neta que atraviesa la superficie S que describe la trayectoria cerrada $d\mathbf{l}$, y

μ_0 es una constante de permeabilidad en el vacío = $4\pi \times 10^{-7} \frac{N}{A^2}$.

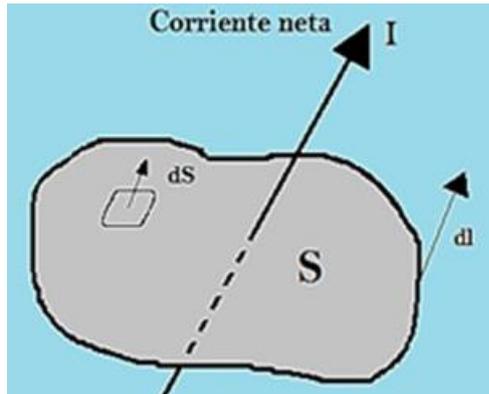


Fig. 1.2. Corriente eléctrica I atravesando una superficie S [4].

El efecto magnético de campos eléctricos o corrientes variables se muestra en la Ec. 1.2 [4]:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \left(\epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} + I \right) \quad (1.2)$$

Si en un inductor, el cual por lo general se trata de una bobina de un material conductor, circula una corriente eléctrica se formará un campo magnético donde su distribución y amplitud se rigen por la ley de Ampere la cual se puede ver en la Ec. 1.3 [4]:

$$NI = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = HI \quad (1.3)$$

donde:

N es el número de espiras del inductor,

I es la corriente que atraviesa por el inductor,

H es la intensidad del campo magnético, y

l es la longitud del inductor.

Mientras que si la corriente es alterna entonces se utiliza la ecuación de Faraday. Por lo tanto, la Ley de Ampere es válida para [4]:

- Cualquier configuración de campo magnético
- Cualquier conjunto de corrientes
- Cualquier trayectoria de integración.

La ley de Faraday postula que la tensión inducida en un circuito cerrado es directamente proporcional a la rapidez con que cambia en el tiempo el flujo magnético que atraviesa una superficie cualquiera con el circuito como borde, debido a esto, se plantea que un campo magnético estacionario podría generar una corriente [4].

La fuerza electromotriz que se induce en un circuito es directamente proporcional al número de vueltas que posee el inducido y proporcional a la rapidez con la que cambia el flujo magnético que atraviesa el circuito [4].

La ley de Lenz expresada en términos del aporte de la corriente inducida sobre el campo magnético total puede ser de la siguiente forma: “el sentido de la corriente inducida es tal que su contribución al campo magnético total se opone a la variación del flujo de campo magnético que genera la corriente inducida”, en otras palabras, se puede concluir que, la corriente inducida surge en un sentido tal que se opone a la causa que la produce [4].

El signo negativo en la Ley de Faraday sugiere esta oposición, lo que significa que, si el flujo magnético que está atravesando el interior de una espira se encuentra en aumento la corriente inducida crea un flujo en dirección opuesta para que se oponga a este aumento. Inversamente si el flujo magnético que está atravesando el interior de una espira se encuentra disminuyendo entonces la corriente inducida crea un flujo en la misma dirección para que se oponga a esta disminución (ver, Figs. 1.3 y 1.4) [4].

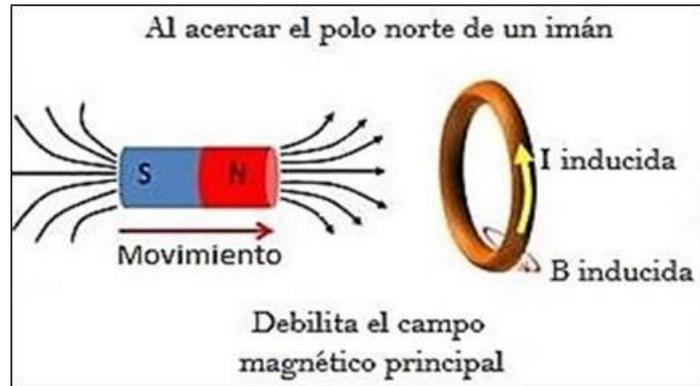


Fig. 1.3. Dirección de la corriente inducida aumentando [4].

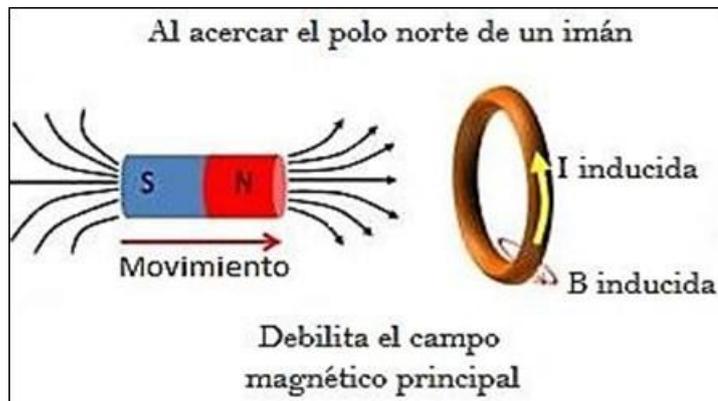


Fig. 1.4. Dirección de la corriente inducida disminuyendo [4].

Para obtener la potencia requerida por el sistema es necesario realizar el cálculo de la energía transferida en forma de calor hacia el objeto a calentar, para de esta forma realizar el correcto dimensionamiento de la fuente de alimentación [4].

El calor es una forma de energía, la cual es transmitida entre dos cuerpos o sistemas, causado por un cambio de temperatura. La diferencia de temperatura de cada sistema dependerá entre otras, del calor específico del elemento que forma el cuerpo (ver, Tabla 1.1) [4].

Tabla 1.1. Calores específicos y densidades para ciertos elementos [4].

Material	Densidad, kg/m ³	Calor específico, kcal/kg·°C
Acero	8238	0.11
Polipropileno	946	0.48
Tungsteno	19250	0.037

1.1.2. TRATAMIENTO TÉRMICO DE TEMPLE POR INDUCCIÓN

El temple se puede definir como un tratamiento térmico, cuyo objetivo es el de incrementar la dureza y resistencia mecánica de un metal (los cuales principalmente son aceros al carbono y aceros aleados) [1].

El temple es un proceso el cual consiste en calentar el metal a una temperatura determinada, la cual se encuentra por encima de la temperatura de transformación a fin de obtener cierta estructura cristalina determinada, después de esto, continúa el enfriamiento rápido a una velocidad superior a la crítica [3].

A fin de conseguir un enfriamiento rápido el acero caliente a cierta temperatura de temple se introduce dentro de un medio líquido, el cual puede ser agua, aceite, sales fundidas o bien se puede realizar el enfriamiento con aire o gases. La velocidad de enfriamiento se determina por las características de cada acero y en base a los resultados que se desean obtener [3].

En estos procesos de tratamientos térmicos, la etapa de enfriamiento y la velocidad alta son los aspectos más importantes a considerad [3].

En las industrias existen diversos tipos de aceros, cada uno con diferente composición química y, también, amplias aplicaciones para un mismo tipo de acero, debido a ello es que los fabricantes generalmente proveen los valores óptimos de temperatura y tiempo de permanencia de la pieza, así como también la velocidad de enfriamiento que debe de utilizarse durante el temple [3].

A continuación, se proseguirá al análisis de los aspectos específicos del proceso de temple por inducción:

Este tipo de tratamiento térmico utiliza un calentamiento, para después aplicarle un enfriamiento brusco con los objetivos de aumentar la dureza, la resistencia y/o la vida útil de la pieza [4].

En el temple por inducción, se utiliza calor inducido y enfriamiento de manera rápida para incrementar la dureza y durabilidad del acero. La inducción es un proceso en el cual se genera calor controlable, focalizado e intenso. No es necesario el contacto físico con la pieza o metal a templar [4].

En este tipo de temple se utilizan inductores de cobre fabricados a la medida de la zona o pieza a calentar. Con el debido equipo y aditamentos adecuados, es posible manipular la entrega de potencia (kW) y la frecuencia de corriente de trabajo (Hz) en los inductores de cobre [4].

El procedimiento del temple por inducción está basado en que, al forzar un campo magnético alterno que circule por las bobinas (inductores), la pieza o metal se puede calentar hasta la temperatura de mantenimiento de temple, debido a que se comportará como un electroimán que se encuentra en oposición al flujo magnético generado por los inductores, éste fenómeno se traduce en la generación de calor por efecto Joule de una manera controlada y útil para los procesos [2].

El principio de funcionamiento puede definirse como la transformación desde el inductor de energía electromagnética en energía calórica aplicada directamente en el metal a calentar [2].

Durante el calentamiento del metal, no existen componentes de la fuente de energía en contacto directo con la pieza a tratar térmicamente, tampoco existen gases ni combustión, cabe mencionar que no hay existencia de algún otro elemento que provoque la limitación de la posición o forma del metal o pieza a calentar que puede estar en un entorno aislante de la fuente, sumergido en un líquido, cubierto por algún tipo de sustancia aislante, en atmósferas gaseosas o incluso en vacío [4].

El beneficio del temple por inducción se tiene un aumento de la productividad debido a que es un proceso que se puede realizar rápidamente y tiene repetitividad, que puede ser integrado fácilmente en las líneas de producción [5].

Con la inducción en general, se tratan piezas individuales, esto permite que cada pieza se temple de manera individual con las especificaciones propias que se requieren. Los parámetros de proceso optimizados para cada pieza pueden ser almacenados en una computadora. El temple por inducción es limpio, seguro y normalmente tiene un diseño compacto [5].

A raíz de que sólo se realiza el calentamiento en el área específica del componente a ser templado, el proceso de temple por inducción es extremadamente eficiente en cuanto a consumo energético [5].

La inducción se emplea para templar numerosos componentes, como ejemplo se puede citar: engranajes, cigüeñales, árboles de levas, ejes motrices, ejes de salida, barras de torsión, balancines, juntas homocinéticas, válvulas, anillos de giro, pistas interiores y exteriores (ver, Fig. 1.5) [5].

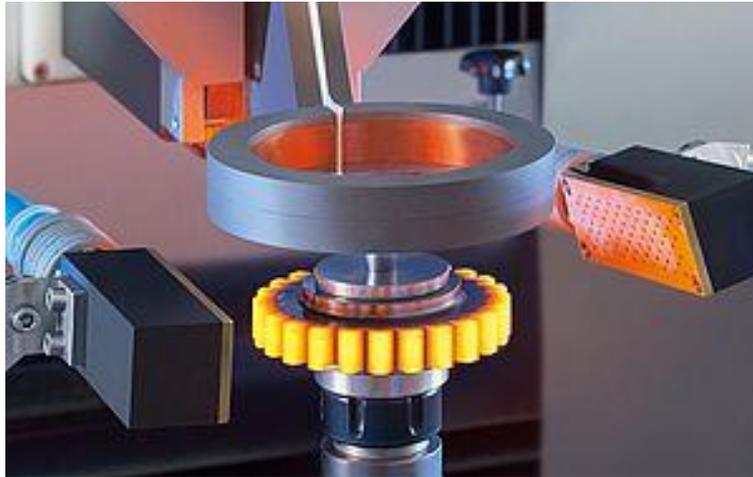


Fig. 1.5. Ilustración de temple por inducción a un engrane [6].

1.1.3. TRATAMIENTO TÉRMICO DE REVENIDO POR INDUCCIÓN

El tratamiento térmico de revenido consiste en calentar una pieza metálica, que viene procedente de un proceso de temple, a una temperatura por debajo de la crítica inferior, para generar una reducción al máximo de los esfuerzos térmicos que pueden crear deformaciones [6].

Inicialmente, el ciclo térmico del revenido se divide en 3 etapas con requerimientos específicos [6]:

- ✓ Calentamiento hasta una temperatura determinada, la cual es inferior a la crítica.
- ✓ Uno o varios ciclos de mantenimiento a una o varias temperaturas establecidas.
- ✓ Uno o varios ciclos de enfriamiento hasta temperatura ambiente (en general realizados al aire, agua o aceite).

Para un metal o componente dado, la permanencia a la temperatura del revenido depende de la geometría y dimensiones de la pieza, en general,

para los aceros, los cuales tienen un contenido medio de carbono, se recomienda una hora, más una hora por pulgada de espesor [6].

La velocidad de enfriamiento en el tratamiento de revenido es recomendada que sea lenta, para poder eliminar los esfuerzos residuales progresivamente sin generar deformación [6].

El revenido por inducción consigue disminuir la dureza, la resistencia y aumenta la tenacidad de los aceros templados, a la vez se eliminan los esfuerzos generados durante el temple, dejando al acero con la dureza deseada al aplicarle una corriente inducida basada en el efecto Joule [8].

El sistema tradicional de revenido consiste en un calentamiento a temperaturas relativamente bajas (entre 150 y 500 °C teniendo como consideración mantenerse siempre por debajo de la temperatura crítica) durante un tiempo para luego dejarlas enfriar lentamente [8].

Debido a su importancia en la industria, a continuación, se mencionan algunas ventajas del revenido por inducción [5]:

- ✓ Tiempos más cortos durante el proceso,
- ✓ Control de la temperatura de manera más eficiente,
- ✓ Integración rápida en líneas de producción,
- ✓ Ahorro en consumo energético,
- ✓ Disponibilidad inmediata de piezas a entregar, y
- ✓ Disminución de espacio en planta.

El revenido por inducción se utiliza ampliamente en la industria de automoción a fin de revenir la superficie de los componentes templados, como ejes, barras y juntas [5].

El proceso también se realiza en la industria de tubos y tuberías para revenir las piezas templadas. El revenido por inducción en algunas ocasiones se realiza en la misma estación de temple, y otras se adecúa una o varias estaciones de revenido separadas de la de temple (ver, Fig. 1.6) [5].

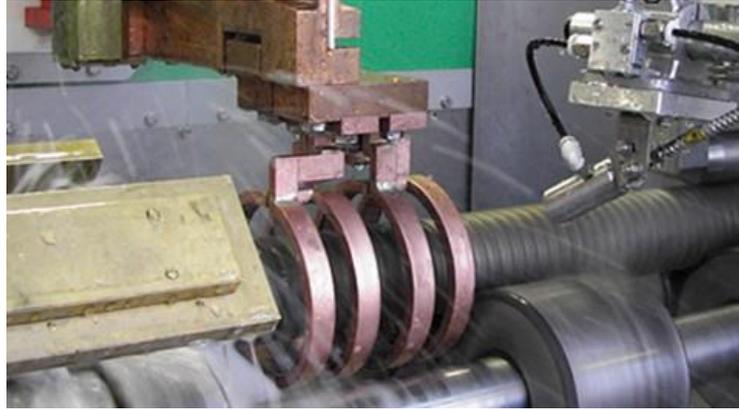


Fig. 1.6. Revenido de una pieza debajo de la temperatura crítica [6].

1.1.4. SOLDADURA POR INDUCCIÓN

La soldadura por inducción consiste en un proceso en el cual, dos o más metales (llamados base) se unen por medio de otro metal (llamado de aporte) el cual tiene un punto de fusión más bajo que los metales base, utilizando un mecanismo de calentamiento por inducción. En general, durante un calentamiento por inducción, los metales ferrosos incrementan su temperatura rápidamente debido al campo electromagnético generado por la corriente alterna proveniente de una bobina de inducción [4].

La soldadura por inducción se utiliza mayormente en la industria de tubos y tuberías, para la soldadura longitudinal de acero inoxidable (ya sea magnético o no magnético), aluminio, aceros con bajo contenido de carbono y una amplia gama de metales conductores [4].

El calor se induce electromagnéticamente en el tubo o tubería. La velocidad y la precisión de la soldadura por inducción la convierten en el proceso idóneo para la soldadura en el borde de tubos y tuberías. En este proceso, los tubos atraviesan a una alta velocidad a través del interior de una bobina de inducción. Al mismo tiempo, sus bordes se calientan y entonces se unen unos con otros aplicando presión para dar forma a un cordón de soldadura longitudinal. La soldadura por inducción es particularmente adecuada para grandes procesos con grandes producciones [5].

Muchos de los beneficios de la soldadura por inducción son de gran importancia para las empresas, entre los cuales se tienen (ver, Fig. 1.7) [5]:

- ✓ Bajos costos de operación,
- ✓ Bajo consumo eléctrico y alta eficiencia,
- ✓ Reducción de desechos,
- ✓ Amplia variedad de tamaños para la aplicación de la soldadura, y
- ✓ Bajas dimensiones, facilidad de adaptación a las líneas de producción.



Fig. 1.7 Soldadura realizada con material de aporte con ayuda de calentamiento por inducción [6].

1.1.5. RECOCIDO POR INDUCCIÓN

El recocido se puede definir como un tratamiento térmico característico de los productos semielaborados y acabados cuyo objetivo de diseño es la reducción al mínimo de los esfuerzos internos generados a lo largo de los procesos de fabricación. Esto reduce la tendencia a la torcedura y deformación de las piezas después del proceso de mecanizado [6].

El recocido tiene objetivos principales, de gran importancia para la industria, siendo estos [6]:

- ✓ Alterar la estructura del metal para así atribuirle al mismo las propiedades mecánicas de diseño, ablandando y mejorando su maquinabilidad.
- ✓ Recristalizar los metales que hayan sido trabajados en frío.
- ✓ Aliviar esfuerzos residuales causados por los procesos de fabricación.

En múltiples ocasiones, son efectuados recocidos en piezas que fueron templadas y revenidas con anterioridad. Para conseguir esto, debe elegirse una temperatura que consiga la disminución de la dureza y la resistencia del metal. Es por ello que el recocido consiste, fundamentalmente, en un calentamiento hasta temperaturas entre los 800 y 925 °C, siguiendo un enfriamiento a baja velocidad [6].

Las temperaturas bajas necesarias para estos procesos pueden ser compensadas debido a la duración del recocido, la velocidad de enfriamiento después del recocido tiene un alto impacto, ya que un enfriamiento a altas velocidades puede provocar nuevos esfuerzos y si es demasiado lento puede existir el riesgo de fragilidad (ver, Fig. 1.8) [6].

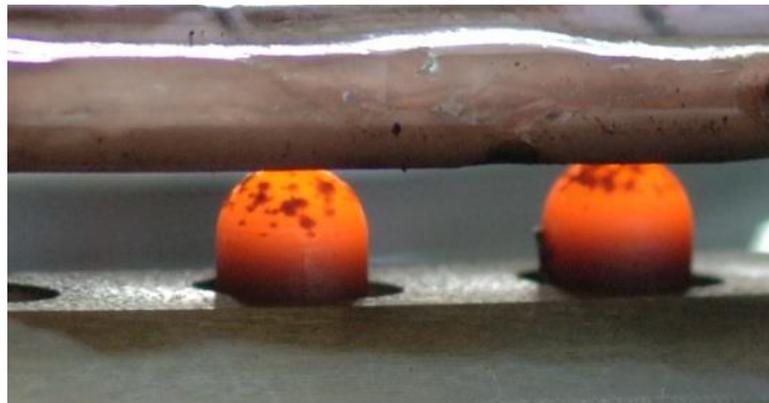


Fig. 1.8. Recocido por inducción en pernos [6].

1.1.6. NORMALIZADO POR INDUCCIÓN

El normalizado se puede definir como un proceso que se efectúa con el objetivo de proporcionar una facilidad de mecanización de las piezas con buenos resultados, lo cual depende de la estructura cristalina que el metal posea. El normalizado se efectúa posteriormente al temple, debido a que el resultado de éste es dependiente del estado inicial de la estructura de los metales al finalizar el temple [6].

El normalizado consiste en calentar con rapidez el metal hasta una temperatura entre 30 - 50 °C por encima de la temperatura crítica superior, al lograrlo, se debe de mantener esa temperatura el tiempo necesario para lograr

la transformación completa de la estructura en austenita. Finalmente, se deja enfriar en aire sin turbulencia (al aire libre), logrando conseguir una estructura uniforme. El normalizado tiene por objetivo principal dejar un metal en estado natural, es decir, que no posea esfuerzos internos y que cuente con una distribución uniforme del carbono. Es usual emplear el normalizado como tratamiento previo al temple y al revenido [6].

Algunos aspectos de mayor relevancia para este estudio acerca del normalizado son [6]:

- ✓ La velocidad de enfriamiento es más baja que la necesaria durante el temple y más rápida que en un recocido.
- ✓ La finalidad del tratamiento es afinar y homogeneizar la microestructura.
- ✓ Es realizado generalmente en los aceros al carbono cuyo porcentaje en peso es de 0.15 a 0.60% de carbono.

El recocido y normalizado por inducción tienen la ventaja de ofrecer un calor rápido y focalizado, con un control preciso de la temperatura y fácil integración en líneas de producción. La inducción trata las piezas y elementos de manera individual con las especificaciones necesarias (ver, Fig. 1.9) [5].



Fig. 1.9. Estación de normalizado por inducción [6].

1.1.7. PRE Y POST CALENTAMIENTOS POR INDUCCIÓN

El precalentamiento por inducción también logra aliviar los metales antes de su plegado, y permite preparar los tubos y tuberías antes de la soldadura la cual también puede realizarse por medio de inducción. Los equipos de inducción son en su mayoría móviles y facilitan reparaciones sin

necesidad de largas trayectorias de piezas. El precalentamiento por inducción es utilizado también en las industrias automotriz, aeronáutica, y de construcción naval. Una aplicación muy importante es el precalentamiento antes de la soldadura [5].

El post-calentamiento por inducción es aplicable generalmente a los componentes metálicos y las soldaduras, para poder aliviar los esfuerzos internos causadas por los procesos previos. El post-calentamiento por inducción también puede ser utilizado a fin de calentar núcleos de cable después de su extrusión. Cuando se realiza un proceso de post-calentamiento a bandas de acero, cables y alambres, se puede garantizar un factor de potencia constante de 0.95, logrando reducir casi por completo los costos por energía reactiva también minimizando el riesgo de deformación del cable [5].

También se cuenta con aplicaciones para tubos, tuberías y aviación. En la industria automotriz se pueden aplicar recocidos a anillos, ejes, las juntas y engranajes; también con un post-calentamiento se pueden mejorar los recubrimientos existentes en los discos de freno para resistir la corrosión a la que son sometidos [5].

1.2. SISTEMAS SOBRE TRATAMIENTOS TÉRMICOS SUPERFICIALES POR INDUCCIÓN

Al iniciar el estudio del sistema de calentamiento por inducción, se puede representar de manera sencilla por una fuente de corriente alterna (CA), una bobina de inducción y la pieza o elemento a calentar, también conocida como pieza de trabajo [9].

El tipo de funcionamiento de transferencia de energía entre la bobina de inducción y la pieza a calentar es similar al principio de operación de un transformador, en el que el primario corresponde a las espiras de la bobina de inducción y la superficie del elemento a calentar representa un secundario que cuenta con una sola espira, utilizando su propia resistencia como carga (ver, Fig. 1.10) [9]:

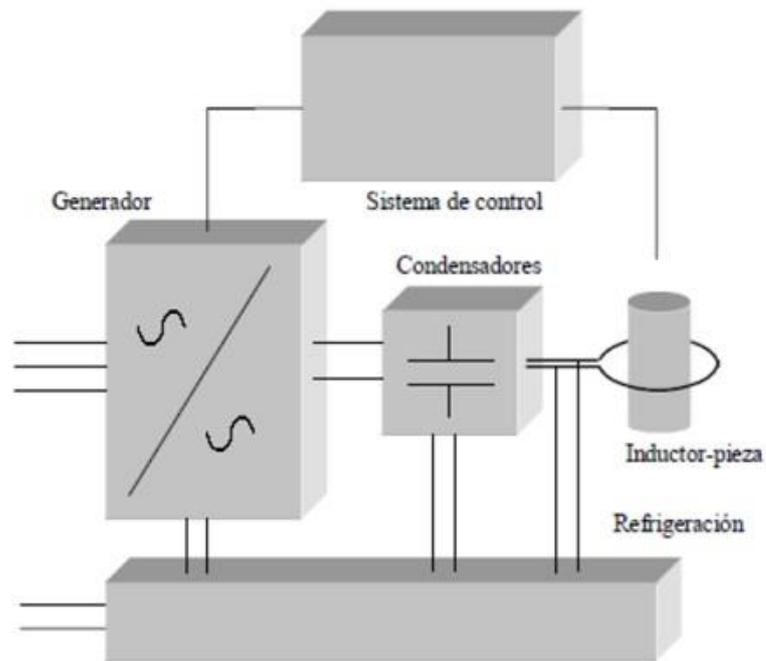


Fig. 1.10. Esquema general de un equipo de calentamiento por inducción [9].

1.2.1. FACTORES A CONSIDERAR EN EL CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN

La profundidad de penetración representa la distancia medida desde la superficie del objeto a calentar hasta el interior del mismo, distancia a la cual se realiza el cálculo de la densidad de corriente. Una de las características importantes que se tiene en el calentamiento por inducción es que la distribución de las corrientes inducidas en el interior del objeto no es uniforme, éste fenómeno se conoce como efecto piel.

El efecto piel puede ser definido como la disminución de la intensidad de corriente desde la superficie hacia el centro del elemento por el cual circula una corriente alterna (ver, Fig. 1.11) [10].

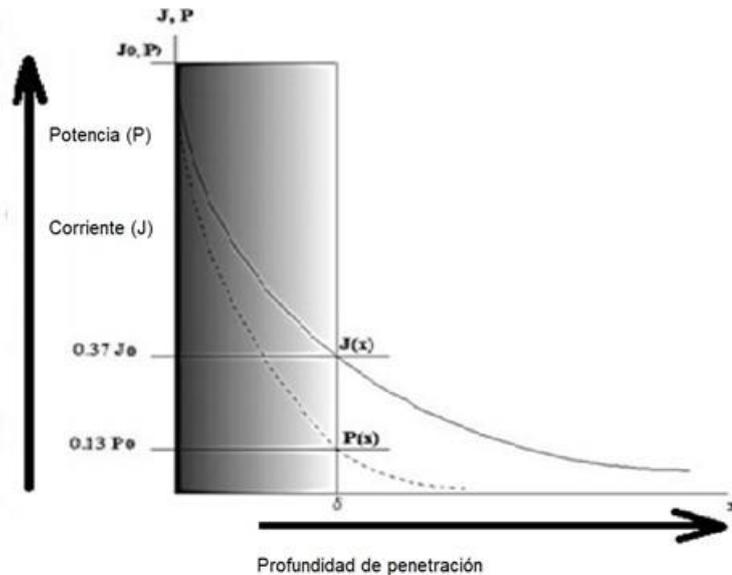
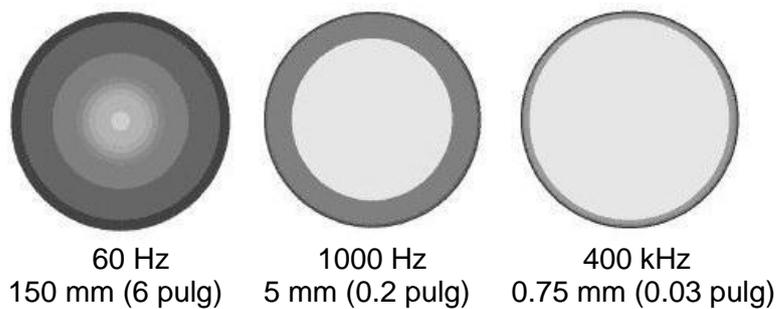


Fig. 1.11. Distribución de la corriente y potencia en función de la profundidad [10].

Una propiedad a considerar en el calentamiento inductivo es que la distribución de las corrientes inducidas en el interior de la pieza no se encuentra de forma uniforme. Este efecto es conocido como efecto piel y depende fundamentalmente de la frecuencia de operación, de la forma y del tipo del elemento a ser calentado. Este fenómeno puede ser entendido mediante el análisis del principio de la inducción electromagnética. La corriente inducida en la pieza genera un campo magnético, el cual, se opone al campo magnético que lo creó. Se puede dividir la pieza en conjuntos infinitesimales, donde la corriente inducida en los conjuntos más externos de la pieza, tiende a reducir el campo magnético de inducción de los conjuntos más internos de la misma, causando una densidad de corriente mayor en la superficie, reduciéndose en dirección al centro de forma exponencial, tal como se presenta en la (ver, Fig. 1.12) [10]:



60 Hz 150 mm (6 pulg) 1000 Hz 5 mm (0.2 pulg) 400 kHz 0.75 mm (0.03 pulg)
Fig. 1.12. Efecto piel en una pieza tratada por inducción [10].

La distribución de la corriente en el elemento a trabajar puede ser determinada por un parámetro conocido como profundidad de penetración (representada por δ) el cual se calcula por la Ec. 1.4 [10]:

$$\delta = \sqrt{\rho \pi F \mu} \quad (1.4)$$

donde:

ρ es la resistividad eléctrica del metal, $\Omega \cdot m$:

$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$, es la permeabilidad magnética al vacío (en este caso, permeabilidad magnética relativa al metal), ud; y

F es la frecuencia de operación.

Este parámetro define el espesor a la cual la corriente de trabajo se distribuye de forma uniforme. Esta propiedad es muy utilizada en el tratamiento térmico de superficies metálicas, donde es adoptada una frecuencia de operación que logre permitir el rápido calentamiento de la superficie, por lo tanto, si se mantiene la inducción del campo magnético por un período prolongado, el calor generado en la superficie se distribuye por toda la pieza en función de la conductividad térmica del metal [10].

En la Tabla 1.2 se presenta los niveles de eficiencia de un calentador de inducción típica a determinadas temperaturas [10].

Tabla 1.2. Eficiencia de un calentador de inducción típico [10].

Material	Temperatura final, °C	Eficiencia
Acero al carbono	1250	0.65
Acero al carbono	700	0.80
Acero inoxidable	1250	0.60
Latón	800	0.50
Cobre	900	0.40
Aluminio	500	0.40

En la Tabla 1.3 se presenta las frecuencias a determinadas temperaturas y profundidades de penetración de ciertos materiales típicos:

Tabla 1.3. Frecuencias aproximadas para el calentamiento de ciertos materiales [10].

Material					Frecuencia, Hz
Acero no magnético	Acero magnético	Latón	Cobre	Aluminio y aleaciones de aluminio	
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	8–35	35–440	22–800	22–800	500
40–175	6–25	30–300	15–600	15–600	1000
25–100	3.5–14	15–180	9–350	9–350	3000
20–85	2.5–10.5	10–130	7–260	7–260	5000
14–60	2–8.5	8–100	5–180	5–180	10000
10–40	1.5–5.5	6–75	3–125	3–125	20000
5–22	0.7–3.0	3.5–40	2–75	2–75	60000
4–17	0.5–2.0	2.5–30	1.5–60	1.5–60	100000
1.8–8	0.2–1.0	1.2–15	0.6–20	0.6–20	500000

Fundamentalmente, una corriente eléctrica es un movimiento de electrones los cuales tienen masa, y por tener una velocidad, adquieren cierta energía cinética. Además, el movimiento de estos electrones es de forma no ordenada. Cuando una corriente eléctrica circula por un material conductor, los electrones chocan con las moléculas de dicho conductor, encontrando resistencia para poder circular libremente, el mismo que depende del material conductor y que es conocido como resistencia eléctrica, lo cual provoca pérdidas de potencia y tensión y a su vez dan origen a un calentamiento del mismo. Este efecto es conocido como el efecto Joule [12].

Las corrientes de Foucault (también, conocidas como corrientes parásitas, corrientes torbellino, o Eddy currents en inglés) se producen cuando un conductor (con o sin propiedades magnéticas) atraviesa un campo magnético variable, o viceversa. Este movimiento relativo causa una circulación de electrones, o corriente inducida dentro del conductor. Estas corrientes circulares de Foucault crean electroimanes con campos magnéticos que se oponen al efecto del campo magnético aplicado (Ley de Lenz). Cuanto más fuerte sea el campo magnético aplicado, o mayor la conductividad del conductor, o mayor la velocidad relativa de movimiento, mayores serán las corrientes de Foucault y los campos opositores generados. Las corrientes de Foucault crean pérdidas de energía a través del efecto Joule. Más concretamente, dichas corrientes transforman formas útiles de energía, como la cinética, en calor no deseado, por lo que generalmente es

un efecto inútil, sin embargo, para todas las aplicaciones de tratamientos térmicos, éstas pérdidas serán de gran importancia [12].

Las pérdidas por Histéresis aparecen cuando un material conductor presenta propiedades magnéticas, además de las pérdidas por corrientes parásitas se añaden las pérdidas por histéresis. Este tipo de pérdidas son provocadas por la fricción entre las moléculas del material a calentar, cuando éste es magnetizado de forma alterna, es decir primero en una dirección y luego en otra. A las moléculas se las puede considerar como pequeños magnetos que se hacen girar con cada inversión de dirección del campo magnético. La energía requerida para girar estas moléculas se convierte en calor y se incrementa a medida que aumenta la frecuencia del campo magnético. Esta histéresis es provocada por una discontinuidad de los valores de magnetización en un material magnético debido al cambio de los campos magnéticos. Cabe aclarar, las pérdidas por corrientes de Foucault aportan con mayor calentamiento que las pérdidas por histéresis (ver, Fig. 1.13) [12].

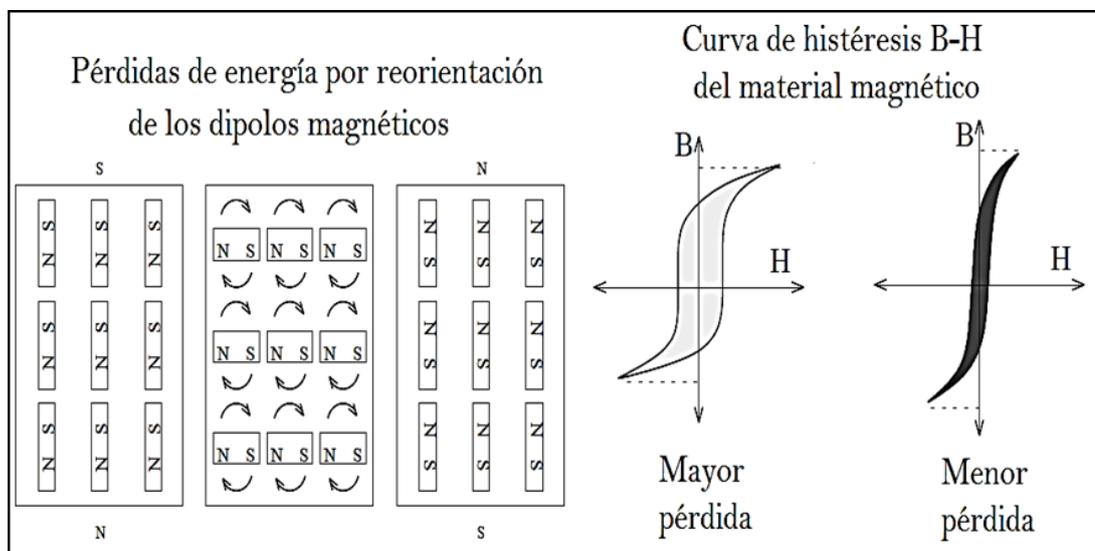


Fig. 1.13. Ilustración de las pérdidas por histéresis [10].

El rendimiento de un sistema de calentamiento por inducción se puede ver como una relación entre pieza e inductor, como concepto de la eficacia con la que la bobina de inducción calentará a un objeto. Esta relación se verá favorecida por factores como:

- ✓ Una resistividad elevada del objeto a ser calentada.

- ✓ Una resistividad reducida del inductor.
- ✓ Propiedad ferromagnética del material del objeto a calentar.
- ✓ Excelente acoplamiento geométrico entre la bobina de inducción y la pieza a calentar, el cual depende del factor K, calculado así por la Ec. 1.5 [10]:

$$K = \left(\frac{d}{D}\right)^3 \quad (1.5)$$

donde:

d es el diámetro del alambre del inductor, y

D es el diámetro de la pieza a calentar con la bobina.

1.2.2. PARTES DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN

Un sistema diseñado para el calentamiento por inducción se compone esencialmente de los siguientes elementos principales [10]:

- Uno o varios inductores (bobina) de calentamiento. El inductor es el responsable directo de la generación de los campos magnéticos en las proximidades del elemento a calentar [10]. La bobina, también conocida como inductor, es el componente del sistema de calentamiento por inducción que proporciona el grado de eficacia y eficiencia con el cual se calienta el elemento de trabajo. Las bobinas tienen diferentes variaciones en manufactura, desde una simple bobina enrollada con forma helicoidal (o solenoide) compuesta por varias vueltas (o espiras) de tubo de cobre enrolladas alrededor de un mandril, hasta una bobina mecanizada de alta precisión a partir de cobre macizo y soldada al finalizar. La bobina es utilizada para realizar la labor de transferencia de la energía de la fuente de alimentación de calentamiento por inducción al elemento a trabajar, mediante la producción de un campo electromagnético alterno. El campo electromagnético confiere una corriente que fluye por la pieza de trabajo como reflejo de la corriente que fluye por la bobina. Cuando la corriente

fluye contra la resistividad de la pieza de trabajo, genera calor dentro del elemento de trabajo debido a las pérdidas de potencia (ver, Fig. 1.14) [11].

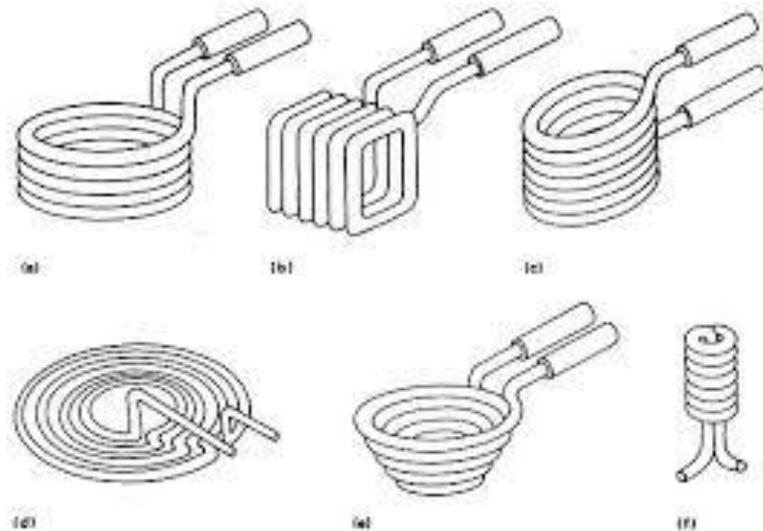


Fig. 1.14. Ejemplos de bobinas utilizadas en sistemas de calentamiento por inducción [9].

- Sistemas de alimentación eléctrica. En los sistemas de calentamiento por inducción, es necesario el uso de una fuente de alimentación de alta frecuencia, la cual se encargará de alimentar la carga [10].
- Estos sistemas utilizan convertidores estáticos de potencia conocidos como inversores (convertidores CD-CA), los cuales están construidos a base de interruptores semiconductores, cuya función es la de transformar corriente y/o voltaje directo a alterno [9]. Las ventajas de los generadores para calentamiento inductivo son (ver, Fig. 1.15) [9]:
 - ✓ Amplio intervalo de frecuencias de trabajo,
 - ✓ Alta eficiencia de la fuente,
 - ✓ Bajo volumen y peso, y
 - ✓ No existe necesidad de mantenimiento.



Fig. 1.15. Ejemplo de convertidor CD-CA [9].

- Batería de condensadores de compensación. Es necesaria, para lograr que el factor de potencia de la carga del sistema de alimentación eléctrica esté próximo a la unidad (100% de eficiencia) cuando está funcionando a la frecuencia de resonancia del calentador (ver, Fig. 1.16) [10].



Fig. 1.16 Ejemplo de un banco de condensadores de compensación comúnmente utilizado en procesos de calentamiento por inducción [9].

- Sistema de refrigeración. El inductor y los demás componentes (ya sean condensador, elementos de potencia, etc.) necesitan disipar grandes potencias en forma de calor. El elemento refrigerante más común es, en general, agua en la mayoría de los casos (ver, Fig. 1.17) [10].



Fig. 1.17. Enfriamiento en línea utilizado en procesos de calentamiento por inducción [9].

- Sistema de control de aplicación. Comprende la manipulación de la pieza y el control de los parámetros del calentamiento (potencia, tiempo de calentamiento, temperatura, etc.) Un sistema de control es un conjunto de elementos que se encargan de mantener otro sistema, proceso o planta, controlado bajo un programa establecido. Para controlar un proceso se suelen mantener constantes ciertas variables, como, por ejemplo, la temperatura, la presión, el nivel, la humedad, etc. En los sistemas de control, una magnitud física variable es representada generalmente mediante una señal eléctrica que varía de manera tal que describe dicha magnitud, por ejemplo, una señal eléctrica será la variación de la salida de tensión de un termopar la cual mide temperatura y la variación de temperatura es transformada en variación de tensión. Es posible afirmar que un sistema de control debe ser estable, rápido debe estar adecuadamente amortiguado y debe de atenuar los efectos de ruidos, perturbaciones y cambios de carga mientras se mantiene la carga constante (ver, Fig. 1.18) [10].



Fig. 1.18 Ejemplo de sistema de control utilizado en procesos de calentamiento por inducción [9].

1.3. ELEMENTOS QUE REQUIEREN TRATAMIENTOS TÉRMICOS SUPERFICIALES

Debido a la amplia gama de aplicaciones, se realizó la selección de elementos a tratar debido a sus bajas dimensiones, ya que la finalidad del proyecto es la presentación de un equipo de calentamiento por inducción para uso didácticas, se han seleccionado los siguientes elementos para tratamiento térmico superficial por inducción (ver, Tabla 1.4) [5].

Tabla 2.4. Elementos de máquinas que requieren tratamientos térmicos superficiales por inducción [5].

Elementos	Tipo de tratamiento térmico por inducción a aplicar	Finalidad del tratamiento
Engranajes, cigüeñales, árboles de levas, ejes, ejes de salida, barras de torsión, balancines, juntas homocinéticas, válvulas y anillos de giro, palanquillas, barras y extremos de barras.	<ul style="list-style-type: none"> • Temple • Revenido • Normalizado • Recocido 	Incrementar la dureza externa debido a los impactos a los que puede ser sometido el elemento, manteniendo un núcleo dúctil que no permita la fractura.
Tubos y tuberías acero inoxidable (magnético y no magnético), aluminio, aceros de bajo contenido de carbono y otro tipo de metales conductores.	<ul style="list-style-type: none"> • Soldadura • Normalizado • Recocido 	Soldadura sin metal de aporte que pueda generar oxidación interna en la pieza, liberación de esfuerzos y esfuerzos residuales por procesos de fabricación previos.
Cables, tiras de acero, hojas de cuchillo y tubos de cobre, discos de freno.	<ul style="list-style-type: none"> • Normalizado • Recocido • Pre calentamiento • Post calentamiento 	Mejor estructura del cable para el pre y post trenzado del cable conductor. Liberación de esfuerzos y esfuerzos residuales por procesamiento previo.

1.4. FABRICACIÓN DE BOBINAS DE INDUCCIÓN

El inductor (o bobinas de trabajo), es el elemento del sistema de calentamiento por inducción el cual determina el grado de eficacia y eficiencia con el cual se calienta la pieza de trabajo [10].

Existen ciertas variaciones en el diseño y construcción de las bobinas o inductores, desde una bobina enrollada con forma helicoidal (llamada solenoide) compuesta por varias vueltas (o espiras) fabricadas de un tubo de cobre enrolladas alrededor de un mandril hasta una bobina mecanizada con alta precisión a partir de cobre macizo y soldada con precisión [10].

1.4.1. FUNDAMENTOS DE LAS BOBINAS DE TRABAJO

Las bobinas o inductores, tienen la finalidad de transferir la energía de la fuente de alimentación de calentamiento por inducción y el cabezal de trabajo a la pieza o elemento a trabajar, mediante la producción de un campo electromagnético alterno. Éste campo electromagnético produce una corriente que fluye por la pieza de trabajo como reflejo de la corriente que fluye por el inductor. Cuando la corriente fluye contra la resistividad de la pieza de trabajo, genera calor dentro de la pieza de trabajo debido a las pérdidas de potencia disipadas en forma de calor [10].

Un segundo principio de calentamiento, llamado calentamiento histerético, también entra en acción cuando la pieza de trabajo es de un metal magnético, un ejemplo es el acero al carbono. La energía se genera dentro de la pieza de trabajo por el campo magnético alterno al cambiar la polaridad magnética dentro del elemento de trabajo. El calentamiento histerético sucede en la pieza de trabajo únicamente hasta llegar a la temperatura de Curie (750 °C en el caso del acero), a la cual la permeabilidad magnética de los metales se ve reducida hasta 1 [10].

Asimismo, la correlación entre la bobina y el suministro eléctrico de inducción forman parte esencial para la eficiencia del proceso. Los sistemas de inducción de frecuencia se pueden correlacionar fácilmente con una amplia

variedad de bobinas, mediante el uso de un transformador de salida multitomas de la fuente de alimentación [10].

La bobina o inductor es un elemento que, debido a su geometría, almacena energía en forma de campo magnético. Se puede clasificación de las bobinas en tres tipos de acuerdo a su construcción: bobinas con núcleo de aire (las cuales son utilizadas para sistemas de radiofrecuencias), bobinas con núcleo de ferrita (utilizadas mayormente en filtros para evitar interferencias) y bobinas con núcleo de hierro (para realizar bobinas con muy alta impedancia, las cuales son de capacidades idóneas para los tratamientos térmicos) [12].

En cuanto a las geometrías en bobinas de inducción, éstas pueden variar conforme a su aplicación y en general no deben tener una forma previamente especificada, debido a que cuando por un material conductor se encuentran circulando una corriente alterna, se genera un campo magnético alterno, el cual, que a su vez creará corrientes inducidas sobre un objeto de material conductor que se encuentre ubicado en su cercanía, por tanto, se puede deducir que no existen limitaciones en cuanto a la forma y el tamaño que tenga el objeto a calentar, ya que la bobina de inducción podrá tomar la configuración que más se ajuste a la carga (ver, Fig. 1.19) [12].

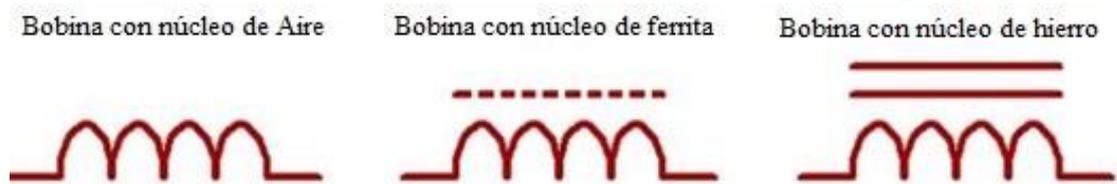


Fig. 1.19. Representación simbólica de los distintos tipos de bobinas en base a su geometría interna [12].

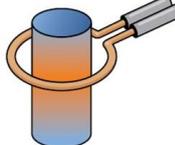
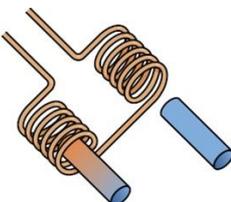
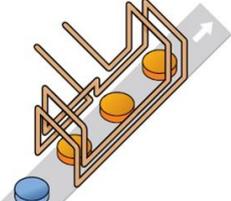
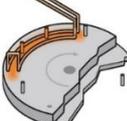
1.4.2. DISEÑO DE LA BOBINA

El diseño de la bobina es esencial para la eficacia y la eficiencia de cualquier proceso de calentamiento por inducción. Lo más conveniente, es diseñar la bobina analizando en primer lugar dónde es necesario generar el calor en la pieza para poder realizar el proceso; a continuación, se diseña la bobina para conseguir el efecto de calentamiento [10].

Las bobinas de inducción son conductores de cobre enfriados por agua. Se realizan con tubo de cobre, un metal que puede conformarse fácilmente a la forma de la bobina para el proceso de calentamiento por inducción. Las bobinas de calentamiento por inducción están frías y no se calientan mientras fluya agua por ellas. En la Tabla 1.12 se presenta los distintos tipos de bobinas utilizadas para los procesos de calentamiento por inducción [10].

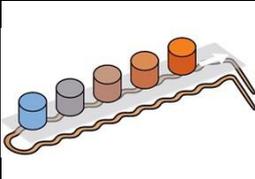
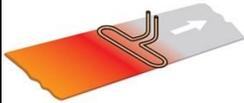
A causa de que se disipan potencias altas en los semiconductores y en la bobina de inducción, todos estos elementos requieren de un sistema de refrigeración apropiado para evitar la destrucción de los mismos. Para cumplir con el objetivo de refrigeración se puede utilizar sistemas con disipadores de calor de aluminio o sistemas de refrigeración por agua, siendo éste último el método más empleado, sin embargo, se recomienda una combinación de ambos métodos. Es necesario mantener las bobinas de inducción a una baja temperatura, razón por la cual se pueden construir de forma hueca a fin de que se pueda hacer circular agua por su interior (ver, Tabla 1.12) [12].

Tabla 1.5. Diferentes tipos de bobinas utilizadas en diversos procesos de calentamiento por inducción [10].

Tipo de bobina	Ilustración	Descripción
Bobina helicoidal de varias espiras		<p>Es la más común y eficiente; el número de espiras define la anchura del patrón de calentamiento. La pieza de trabajo puede permanecer estacionaria dentro de la bobina para proporcionar una franja de calentamiento (conocido como calentamiento estacionario). En otros casos, la pieza de trabajo atraviesa la bobina para calentar la totalidad de la pieza con un patrón más uniforme (conocido como calentamiento de barrido).</p>
Bobina de una espira		<p>Son ideales para calentar una franja estrecha de una pieza de trabajo o la punta de un elemento. Estas bobinas también pueden barrer la longitud de una pieza de trabajo y se utilizan habitualmente para el tratamiento térmico.</p>
Bobina helicoidal multiposición		<p>Utilizadas mayormente para producir más piezas dentro de un tiempo determinado, pero permitiendo un proceso de calentamiento completo. Mientras se calienta una pieza de trabajo en una de las posiciones, la otra bobina puede ser cargada y descargada para el siguiente ciclo de calentamiento. Es posible cualquier número de posiciones, pero típicamente sólo resultan prácticas hasta 8 posiciones.</p>
Bobina de canal		<p>Las bobinas pueden conformarse de modo que la pieza de trabajo atraviese el campo electromagnético por acción de un mecanismo de transporte lineal. La pieza de trabajo se calienta a medida que avanza por la bobina de canal, y ésta puede configurarse para calentar toda la pieza o sólo una pequeña franja.</p>
Bobina de canal curvada		<p>Estas bobinas se encuentran curvadas para adaptarse a una mesa giratoria y se configuran para ocupar uno de los pasos de un proceso de montaje de varios pasos.</p>
Bobina helicoidal dividida		<p>Son bobinas helicoidales divididas de una o varias espiras que se utilizan cuando no es posible el acceso al área a calentar utilizando una bobina helicoidal convencional.</p>
Bobina interior		<p>Los orificios interiores pueden calentarse con bobinas interiores de una o varias espiras.</p>
Bobina de placa concentradora		<p>Las placas concentradoras se utilizan en las bobinas de una o varias espiras para concentrar la corriente de la bobina y producir un efecto de calentamiento definido en la pieza de trabajo. Estas bobinas también pueden contar con una bobina maestra con insertos diseñada para calentar piezas con diferentes formas.</p>

Continúa.

Continuación.- Tabla 1.5 Diferentes tipos de bobinas utilizadas en diversos procesos de calentamiento por inducción [10].

Tipo de bobina	Ilustración	Descripción
Bobinas y transportadores		Muchas piezas se calientan mientras son transportadas por un sistema de transportador. Siempre y cuando el metal del transportador no sea conductor de la electricidad, el campo magnético atraviesa el transportador y calienta la pieza de trabajo a medida que pasa por el campo.
Bobina de aguja		Se utiliza una bobina de una o varias espiras, para calentar una zona larga y delgada de una pieza, o bien se utiliza para calentar una banda móvil de acero delgado o aluminio.

1.5. DIFERENTES APLICACIONES PARA EL CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN

El calentamiento por inducción se puede usar de manera muy efectiva para precalentar materiales conductores para forjar, soldar, conformar en caliente y enfriar en caliente. Por ejemplo, las puntas de las palas de los motores de turbina pueden colocarse en una bobina de inducción especialmente diseñada y calentarse a la temperatura deseada para reparaciones de soldadura. El paso de precalentamiento por inducción mejora el tiempo del ciclo y reduce la tensión en el resto de la cuchilla [12].

Dentro de la industria aeroespacial, se ha vuelto mucho más económico reparar costosos componentes del motor que reemplazarlos. Los sistemas de calentamiento por inducción proporcionan soluciones rentables que ahorran tiempo para realizar diversas reparaciones como puntas de turbinas de alta presión (HPT), alivio de esfuerzo de soldadura de TIG, soldadura de placas y componentes de turbinas como honeycomb, soldadura y otros componentes de la turbina, manejo de piezas adjuntas y muchas otras aplicaciones [12].

El calentamiento por inducción, que ya se utiliza para producir piezas grandes y piezas de motor, ahora se utiliza para una variedad cada vez mayor de procesos de fabricación a menor escala, donde la calidad y la fiabilidad son imperativas [12].

La producción de conductores y cables de fibra óptica requiere un calor continuo para el precalentamiento, la polimerización y el sellado del aislante,

recocido, recubrimiento, etc. Debido a su tamaño compacto y control preciso de la temperatura, los equipos de calentamiento por inducción colocados en línea son la solución ideal para estos procesos [12].

La fabricación de cadenas industriales requiere eficiencia, velocidad de proceso y repetibilidad. El calentamiento por inducción ofrece resultados altamente uniformes, proporcionando las características necesarias a cada eslabón de la cadena, reafirmando la alta confiabilidad del proceso [12].

Para el procesamiento y envasado de alimentos moderno, los principales fabricantes emplean una amplia gama de procesos de calentamiento que incluyen calentamiento, preparación, sellado y envasado de productos. Con una alta fiabilidad y consistencia, las innovadoras soluciones de calentamiento por inducción ofrecen un ajuste perfecto para esta industria [12].

Estas industrias abarcan el diseño y la fabricación de una amplia variedad de herramientas tales como cuchillos, palas, sierras, martillos y destornilladores. Los procesos de fabricación de herramientas, como el tratamiento térmico, el alivio de los esfuerzos, la soldadura fuerte, la soldadura por contracción, la inserción de metal a plástico y el precalentamiento antes de la soldadura, se benefician de las ventajas del innovador calentamiento por inducción [12].

Las compañías de fabricación de dispositivos médicos continuamente buscan formas de reducir los costos de producción y acelerar el tiempo de comercialización. Al mismo tiempo, la calidad mejorada del producto y la consistencia de fabricación son absolutamente esenciales; no puede haber atajos cuando la vida y el bienestar de un paciente están en juego. Los fabricantes de dispositivos médicos recurren a la tecnología avanzada de calentamiento por inducción para ayudar a cumplir sus objetivos de producción, costo y calidad [12].

Los nuevos métodos de extracción de los nuevos valiosos recursos naturales deben cumplir con los más altos niveles de seguridad y protección ambiental, mientras se mantienen los niveles de rentabilidad requeridos para impulsar la industria [12].

El calentamiento por inducción es ampliamente conocido en toda la industria ferroviaria por su facilidad de integración y su capacidad para simplificar y combinar múltiples etapas de proceso. El tratamiento térmico por inducción se utiliza para fabricar piezas para conjuntos, cojinetes, frenos, trenes de transmisión, engranajes, uniones y ejes [12].

La industria de la construcción naval, como muchas otras con una huella global, se ha convertido en un entorno cada vez más competitivo. La construcción de nuevos buques y la renovación de las flotas existentes requieren una capacidad tecnológica basada en la calidad, la diversificación, la competitividad y la flexibilidad. También se debe tomar en cuenta el cumplimiento de las normativas, preocupaciones ambientales y las cuestiones de seguridad [12].

La tecnología de calentamiento por inducción se utiliza cada vez más para la fabricación de tubos debido a su alta eficiencia energética, capacidad de integración de producción en línea, control de temperatura preciso y alta precisión dimensional [12].

1.6. TRATAMIENTO DE PLÁSTICOS POR INDUCCIÓN

El objetivo del tratamiento de los plásticos es conseguir productos de calidad, con diferentes formas y destinados a aplicaciones específicas. Una gran variedad de procesos es utilizada para transformar plásticos en los miles de objetos cotidianos que son utilizados. Para moldear o dar forma a los termoplásticos, son suavizados previamente, para permitir que el plástico fluya a través de un medio de contraste, para ser inyectados, o formados en o sobre un molde. Para realizar un calentamiento de los plásticos de manera eficiente y homogénea, los sistemas de calentamiento por inducción son altamente efectivos [12].

2. PROPUESTA DE DISEÑO

Los sistemas de calentamiento por inducción consisten, en esencia, de un generador de corriente alterna, una bobina de calentamiento y la pieza que se desea calentar, que se sitúa en el interior de la bobina. Cuando dicha corriente alterna se hace pasar por la bobina, se genera un campo magnético cerca de la superficie de la pieza. Este campo magnético induce corrientes superficiales en la pieza (llamadas corrientes de Foucault) que producen el calentamiento por efecto Joule (pérdidas resistivas).

Para generar una corriente alterna circulando por el inductor, generalmente se tiende a utilizar un circuito oscilante formado por el inductor y un capacitor en serie o en paralelo. El circuito oscilador es también conocido como circuito tanque resonante y por lo general, es alimentado por un convertidor CD/CA conocido como inversor, el cual convierte una tensión o corriente continua obtenida por rectificado de red y filtrado, en una forma de onda cuadrada simétrica y cuyas características dependen de la frecuencia, la potencia y el tipo de tanque resonante, este va conectado las bobinas que serán las que calentarán las piezas o elementos a tratar.

2.1. SELECCIÓN DE COMPONENTES CRÍTICOS QUE REQUIEREN TRATAMIENTOS TÉRMICOS SUPERFICIALES

Se seleccionarán aquellos elementos que se deseen tratar térmicamente mediante inducción, los cuales deben de ser de alta demanda o utilidad en El Salvador. Debido a que es un laboratorio con fines didácticos, no se tomará en cuenta ningún elemento de dimensiones arriba de 30 cm de largo y 2 pulgadas de diámetro o espesor y también que no sea de aceros no comunes ya que se trabajará con muestras a fin de enseñar al estudiante el proceso de tratamiento térmico superficial por inducción, así como también para reducir costos de utilización y materiales.

2.1.1. RESORTES Y MUELLES

Los aceros para resortes y muelles deben poseer propiedades especiales debido a las condiciones de trabajo de los muelles (cilíndricos y planos). Estos elementos sirven para amortiguar, empujar y en virtud de esto la principal propiedad que deben poseer debe ser un alto límite elástico y un elevado límite de fatiga. Estas condiciones se logran con contenidos de carbono de entre 0.5 y 0.7% C. Además, se utilizan con aleaciones de Si, Mn, Cr, V, W y Ni que aumentan el límite de elasticidad. Los aceros más utilizados son: SAE 9250, 9255, 9260, 5160 y 6150. Los aceros para muelles logran sus propiedades después del temple a 820 – 870 °C (enfriamiento en agua o aceite según el caso), para lograr una transformación martensítica completa y uniforme en todo el volumen del metal. El revenido se da a temperaturas de entre 350 a 450 °C por lo que clasifica como revenido medio. Al final del proceso se obtiene una dureza de 40 – 50 HRC [6].

Se pueden mencionar las siguientes características en el acero empleado en la fabricación de resortes [6]:

- ✓ Es indispensable que los aceros posean un alto límite elástico, es decir, que el coeficiente de trabajo no sobrepase el límite de elasticidad [6].
- ✓ En la práctica industrial, el límite de elasticidad a la tracción suele oscilar entre 107 y 883 kPa, dependiendo del uso y de las características de dimensión, composición [6].
- ✓ Para que un muelle funcione normalmente, el valor del límite de elasticidad debe ser muy elevado y próximo a las cifras antes señaladas, y como la resistencia a la rotura suele oscilar de un 10 a un 40% superior al límite elástico, es decir, entre 235 y 981 kPa [6].
- ✓ Es importante que los muelles, posean resistencia a la fatiga, pues muchos de los muelles, en vida útil, reciben los esfuerzos en forma cíclica y repetitiva [6].
- ✓ Es necesario evitar la descarburación de los muelles en sus procesos térmicos y de fabricación, pues esto cataliza el proceso de fatiga, porque la descarburación, se produce inicialmente en la periferia, y es por la

periferia donde el muelle tiende a comenzar su falla. Igualmente hay que cuidar la presencia de grietas, defectos que pueda tener el muelle [6].

El temple se realiza a temperaturas variables de 800 a 900 °C y no exige precauciones muy especiales. Se obtienen muy buenos trabajos realizando el calentamiento en hornos de sales, ya que de esa forma empleando sales de cianuro ligeramente carburantes no solo se evita la descarburación, sino se consigue una ligera carburación superficial que es muy beneficiosa. Además, se evita la oxidación superficial y la presentación es muy buena [6].

El enfriamiento se hará rápidamente en agua o aceite, según el tipo de acero. Los aceros al carbono y de baja aleación se templean en agua y los aceros cromo-vanadio y algunos otros aleados, en aceite. El temple en aceite tiene la ventaja de que produce menos deformaciones que el temple en agua, pero solo se puede emplear para los aceros aleados o perfiles delgados de aceros de baja aleación [6].

Para el temple de resortes se emplea una instalación que consta de unas espirales de cobre que rodean el muelle, apoyado en dos cilindros móviles que le hacen girar alrededor de sus ejes durante el calentamiento. Terminado éste proceso, se separan los cilindros y cae el muelle al depósito de enfriamiento (ver, Fig. 2.1) [6].

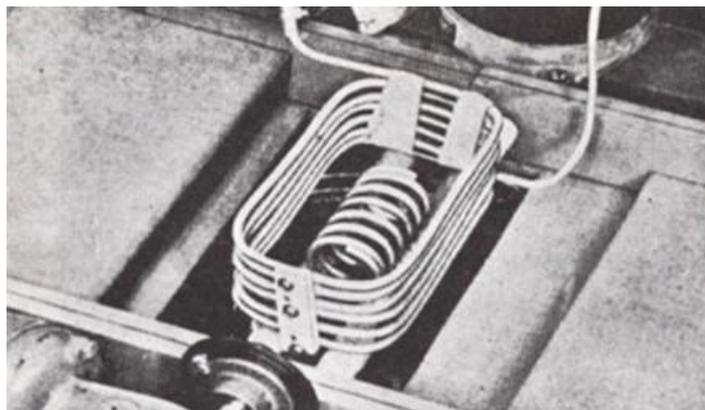


Fig. 2.1. Tratamiento térmico aplicado a un resorte [6].

La profundidad de calentamiento depende principalmente de tres variables: frecuencia, potencia y tiempo. Modificando esas características se pueden utilizar las más variadas combinaciones para conseguir, en cada caso, los mejores resultados [6].

La dificultad de templar pequeños resortes en espiral, que se funden cuando se les aplica calor en la forma usual, se resuelve usando en dicha operación un trozo de plancha de acero de 1/4 pulg. Se requiere calentar una parte de 3 x 4 pulg de la placa, hasta ponerla al rojo vivo, y dejarla enfriar hasta que el rojo desaparezca. Sujetar el resorte con un pedazo de alambre que le permita girar libremente, colocarlo sobre la placa candente y rodarlo hasta que empiece a cambiar de color. En primer lugar, se pondrá amarillo, seguido un cambio a color más oscuro, púrpura moteada, y finalmente del tono azul del temple. En el instante que aparezca el azul, se introduce el resorte en un depósito con agua (ver, Fig. 2.2) [6].

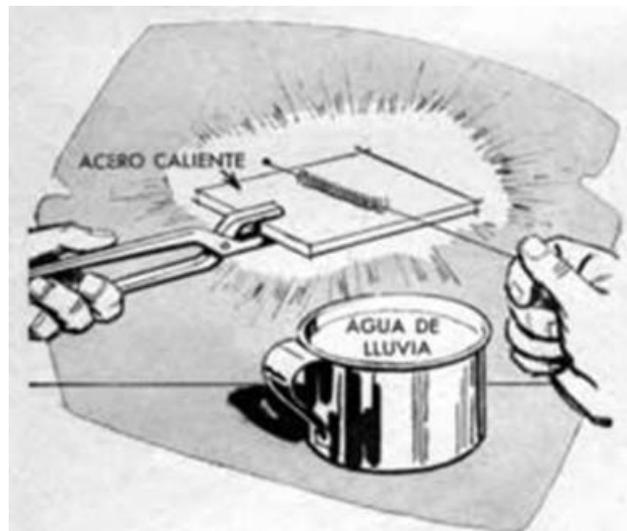


Fig. 2.2. Tratamiento térmico aplicado a un resorte con agua de lluvia [6].

Los muelles también pueden ser templados manualmente como se indicó anteriormente, sin embargo, se pueden resaltar otros métodos [6].

Para este caso se debe empezar por escoger una buena clase de acero para el muelle, siendo probablemente el mejor el que contenga un 0.8% de carbono. Al formar un muelle debe evitarse en lo posible el forjado y martillado, recurriendo solamente a la curvatura y presión del mismo. Es conveniente recocer el acero, para evitar que se agriete o parta al templarlo. Es muy importante que el muelle se caliente por igual, ya que esto da excelentes resultados, la aplicación de la corriente eléctrica es la más ideal para este proceso [6].

El revenido Se suele efectuar a temperaturas variables desde 200 a 500 °C, según el proceso de fabricación, y luego se enfrían al aire [6].

En general, los muelles que tienden a perder su forma en la fragua ordinaria, se calienta en una estufa y se templan en agua o aceite. El revenido debe hacerse en aceite hirviendo [6].

En el procedimiento general de tratamiento térmico se calienta el muelle al rojo, más bien oscuro, y se introduce en agua. Se pone después en un recipiente con bastante grasa para cubrirlo, se calienta hasta que arda con llama alargada, y se deja enfriar [6].

El recocido de los aceros para muelles exige ciertas precauciones especiales. El recocido tiene por objeto ablandar el acero, quitarle tensiones que se han originado en la laminación y trefilado y hacer posible el enrollado. En este proceso debe evitarse que el material se descarbure, pues luego en las zonas descarburadas se inician fácilmente grietas de fatiga durante el trabajo del muelle y, además, con la descarburación, se disminuye la sección transversal útil de muelle, ya que el comportamiento elástico de la zona descarburada es muy bajo [6].

Para evitar este contratiempo, se pueden hacer los recocidos en cajas cerradas con bastante cantidad de viruta de fundición exenta de humedad o en hornos de atmósfera controlada, procurando no elevar demasiado la temperatura, siendo preferible, a veces, obtener durezas no muy bajas y tener seguridad de que no hay descarburaciones. El recocido se suele efectuar a temperaturas comprendidas entre 750 y 800 °C y luego se enfría lentamente en el horno a los 600 °C [6].

En base a la información anterior, se procede a la toma de decisión de las dimensiones máximas y mínimas de los resortes que serán utilizados como piezas de trabajo [6].

Se tomarán en cuenta 2 tipos de resorte, de mayores y menores dimensiones, para tomar en cuenta en los cálculos posteriores que se realizarán para la potencia requerida del equipo [6].

Estos cálculos serán de gran utilidad para que se pueda hacer la cotización adecuada de los equipos y tener una amplia gama de elementos que puedan ser parte del material didáctico que se utilizará para realizar las

futuras prácticas en el laboratorio de tratamientos térmicos superficiales por inducción (ver, Tablas 2.1 y 2.2) [6].

Tabla 2.1. Selección de resortes de menores dimensiones para tratamiento térmico superficial por inducción [14].

N° de parte LEE	Diámetro del agujero	Diámetro del perno	Diámetro exterior nominal	Diámetro del alambre	Longitud sin carga	Carga a deflexión del 50%	Constante	Altura solida
	mm	mm	mm	mm	mm	kg	kg/mm	mm
LHL 375A 05	9.53	4.76	8.61	1.32	50.80	12.70	.500	23.75
LHL 375A 06			8.31	1.32	63.50	13.60	.428	30.48
LHL 375A 07			8.89	1.32	76.20	12.25	.321	36.20
LHL 375A 7A			8.81	1.32	101.6	12.70	.250	47.75
LHL 375A 7B			8.81	1.32	127.0	12.47	.196	59.94
LHL 375A 08			8.38	1.32	152.4	12.93	.170	71.00
LHL 375A 09			8.76	1.32	177.8	12.70	.143	83.31

Tabla 2.2. Selección de resortes de mayores dimensiones para tratamiento térmico superficial por inducción [14].

N° de parte LEE	Diámetro del agujero	Diámetro del perno	Diámetro exterior nominal	Diámetro del alambre	Longitud sin carga	Carga a deflexión del 50%	Constante	Altura solida
	mm	mm	mm	mm	mm	kg	kg/mm	mm
LHL 750A 10	19.05	9.53	18.16	2.67	114.3	45.93	.804	51.18
LHL 750A 11			18.03	2.67	127.0	45.36	.714	58.17
LHL 750A 12			18.03	2.67	139.7	43.66	.625	65.79
LHL 750A 13			18.03	2.67	152.4	44.23	.580	70.36
LHL 750A 13A			18.03	2.67	165.1	43.49	.527	78.23

2.1.2. TRATAMIENTO TÉRMICO EN EJES

La mayor parte de los ejes de máquinas se fabrican a partir de un acero al bajo o medio carbono, ya sea rolado en frío o en caliente, aunque también cuando se requiera de su superior resistencia, se aplican aceros de aleación. En ejes de diámetros más pequeños (menores de alrededor de 3 pulgadas de

diámetro), se recurre más al acero colado en frío, y en tamaños mayores se utiliza acero rolado en caliente. La misma aleación, colada en frío, tiene propiedades mecánicas superiores a las que tienen rolado en caliente, por el trabajo en frío, pero esto se obtiene a costa de esfuerzos residuales de tracción en la superficie. El maquinado para formar cuñeros, ranuras o escalones libera estos esfuerzos locales residuales, pudiendo provocar distorsión (ver, Tabla 2.1) [8].

Tabla 2.3. Distintos tratamientos térmicos aplicados a ejes [8].

1. Recocido suave	
Tiempo, h	2
Temperatura, °C	670
Método de enfriamiento	En el horno
2. Templado	
Tiempo, h	Hasta homogeneizar con la temperatura del horno
Temperatura, °C	840
Método de enfriamiento	Aceite
3. Revenido	
Tiempo, h	1
Temperatura, °C	230
Método de enfriamiento	Aceite

Las barras coladas en caliente deben ser maquinadas en toda su superficie para eliminar la capa exterior carburizada. En tanto que en una superficie colada en frío ciertas porciones pueden quedarse tal cual, excepto cuando se requiera maquinar hasta cierta dimensión para cojinetes, etcétera.

Los ejes que tienen sectores sometidos a fuertes rozamientos, serán templados y revenidos con temple integral o por inducción en las zonas que correspondan, o cementados, templados y revenidos si el material empleado así lo requiere para evitar desgastes prematuros. Antes de continuar el proceso de fabricación serán enderezados en forma unitaria [8].

El proceso de temple se lleva a cabo calentando el acero a una temperatura aproximada de 915 °C en el cual la ferrita se convierte en austenita, después la masa metálica es enfriada rápidamente, sumergiéndola o rociándola en agua, en aceite o en otros fluidos o sales. Después del temple siempre se suele hacer un revenido. Es uno de los principales tratamientos térmicos que se realizan y lo que hace es disminuir y afinar el tamaño del grano de la alineación de acero correspondiente. Se pretende la obtención de

una estructura totalmente martensítica. Se basa en calentar la pieza a una temperatura comprendida entre 700 y 1000 °C, para luego enfriarla rápidamente controlando el tiempo de calentamiento y de enfriamiento (ver, Fig. 2.3) [8].

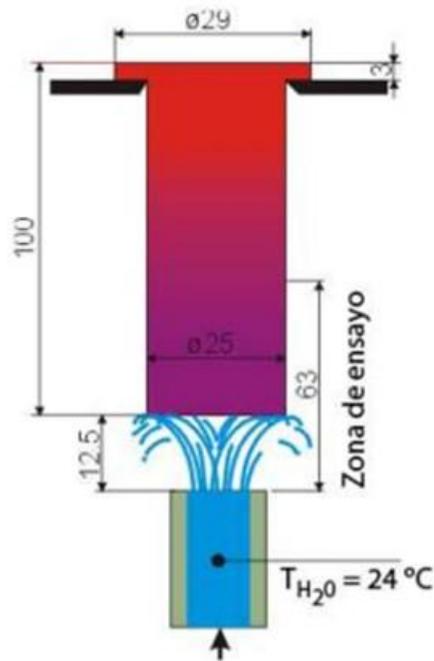


Fig. 2.3. Tratamiento térmico realizado en una probeta para pruebas de ensayos de tracción [8].

Tras finalizar el calentamiento, se cuelga la probeta por un extremo de modo que un chorro de agua, a temperatura constante, incida directamente sobre su extremo inferior durante 10 minutos. La probeta se irá enfriando a distinta velocidad según la distancia respecto al punto de incidencia del chorro de agua. El extremo inferior de la probeta se enfriará rápidamente, sufriendo un temple más severo y será más duro que el otro extremo [8].

Al igual que con el apartado anterior, se tomarán en cuenta 2 tipos de ejes, huecos y macizos para cálculos posteriores de potencia [8].

Ambas selecciones también serán subdivididas en máximas y mínimas dimensiones de ambos tipos de ejes, a fin de mantener la variedad de tratamientos térmicos superficiales que se podrán realizar a ejes por parte de los estudiantes [8].

Al variar dimensiones, también se podrá capacitar de mejor manera al estudiante para que pueda tomar las mejores decisiones al momento de realizar los tratamientos térmicos a las distintas piezas de trabajo (ver, Fig. 2.4 y 2.5 y Tablas 2.4 y 2.5) [8].

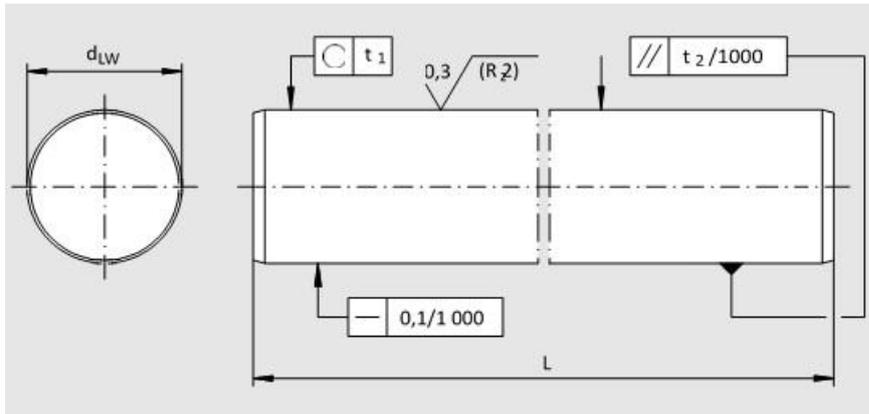


Fig. 2.4. Selección de ejes macizos (mayores y menores dimensiones) para tratamiento térmico superficial por inducción [15].

Tabla 2.4. Selección de ejes macizos (mayores y menores dimensiones) para tratamiento térmico superficial por inducción [15].

Tabla de medidas en mm										
Diámetro del eje (d_{LW})	Referencia	Peso, kg/m	Longitud ($L_{máx}$)	Materiales			Tolerancia ($h6$), μm	Redondez ($t1$), μm	Paralelismo ($t2$), μm	Profundidad de la capa templada (Rht_{min}), mm
				Acero bonificado	Acero resistente a la corrosión					
					AISI-420 (X46Cr13)	AISI-440B (X90CrMoV18)				
8	W 8	0.39	4,000	•	•	•	0-9	4	6	0.4
10	W 10	0.61	4,000	•	•	•	0-9	4	6	0.4
12	W 12	0.89	6,000	•	•	•	0-11	5	8	0.6
14	W 14	1.21	6,000	•	•	•	0-11	5	8	0.6
15	W 15	1.37	6,000	•	•	•	0-11	5	8	0.6
16	W 16	1.57	6,000	•	•	•	0-11	5	8	0.6
17	W 17	1.78	6,000	•	-	-	0-11	5	8	0.6
18	W 18	1.98	6,000	•	•	•	0-11	5	8	0.6
35	W 35	7.56	6,000	•	-	-	0-16	7	11	1.5
40	W 40	9.8	6,000	•	•	•	0-16	7	11	1.5
50	W 50	15.3	6,000	•	•	•	0-16	7	11	1.5
60	W 60	22.1	6,000	•	•	•	0-19	8	13	2.2
80	W 80	39.2	6,000	•	•	•	0-19	8	13	2.2

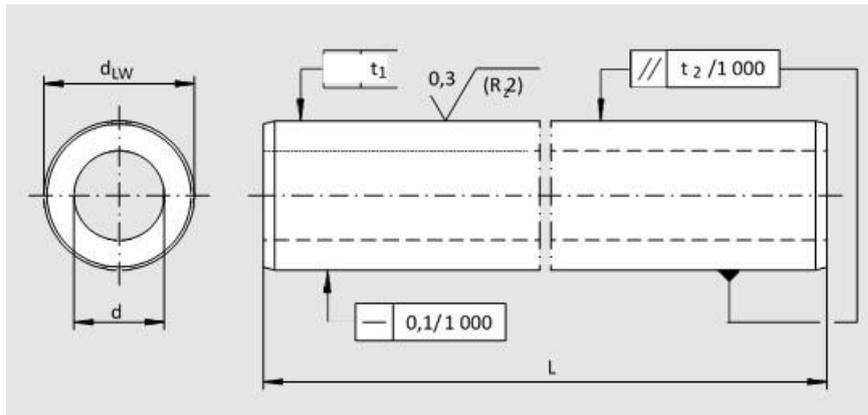


Fig. 2.5. Selección de ejes huecos (mayores y menores dimensiones) para tratamiento térmico superficial por inducción [15].

Tabla 2.5. Selección de ejes huecos (mayores y menores dimensiones) para tratamiento térmico superficial por inducción [15].

Tabla de medidas en mm									
Diámetro exterior d _{LW}	Referencia	Peso kg/m	Longitud L	Diámetro interior d	Material Acero bonificado	Tolerancia h7 μm	Redondez t1 μm	Paralelismo t2 μm	Profundidad de la capa templada Rht mín. mm
16	WH 16	1.28	6,000	7	•	0-18	5	8	0.9
20	WH 20	1.25	6,000	14	•	0-21	6	9	0.9
25	WH 25	2.35	6,000	15.6	•	0-21	6	9	0.9
30	WH 30	3.5	6,000	18.2	•	0-21	6	9	0.9
40	WH 40	4.99	6,000	28.1	•	0-25	7	11	1.5
50	WH 50	9.97	6,000	29.7	•	0-25	7	11	1.5
60	WH 60	14.2	6,000	36	•	0-30	8	13	2.2
80	WH 80	19.5	6,000	56.9	•	0-30	8	13	2.2

2.1.3. TRATAMIENTO TÉRMICO EN TORNILLOS

En la práctica, la mayoría de tornillos que se fabrican son de acero o aluminio. Los tornillos fabricados en aluminio son frecuentes en uniones de materiales blandos como la madera o el plástico, para aplicaciones caseras o donde se aprecia su ligereza. Entre los tornillos de aleaciones de acero hay que destacar los aceros inoxidable para aplicaciones específicas por su durabilidad, en la industria alimentaria o en condiciones corrosivas con atmósferas adversas. En los aceros, un contenido bajo de carbono permite mantener la ductilidad a pesar de la dureza del carbono; con el contenido de manganeso y silicio se consigue un tratamiento térmico a bajo coste y con el niobio se mantiene el control de tamaño del grano a alta temperatura. En los

aceros inoxidables, además, el cromo, junto al níquel y sobre todo el molibdeno determina la calidad de la aleación [16].

El proceso industrial de fabricación de tornillos mediante estampación y laminación requiere el uso de acero de gran ductilidad, es decir con poco contenido de carbono. Esta particularidad hace que los tornillos de menor resistencia no reciban tratamiento térmico de endurecimiento [16].

Para la fabricación de tornillos de gran resistencia se suelen utilizar aceros normales (y por tanto más baratos que los aceros especiales) que permiten un temple mayor después de un tratamiento por cementación o nitruración [16].

Al igual que las secciones anteriores, se tomarán en cuenta dimensiones mayores y menores para pernos, con rosca parcial, rosca completa y tuercas como piezas de trabajo (ver, Fig. 2.6 - 2.8 y Tablas 2.6 - 2.8) [16].

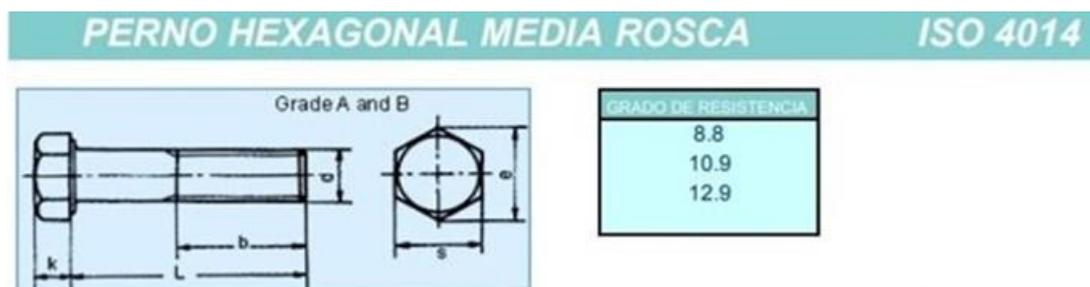


Fig. 2.6. Selección de pernos hexagonales de media rosca (mayores y menores dimensiones) para tratamiento térmico superficial por inducción [16].

Tabla 2.6. Selección de pernos hexagonales de media rosca (mayores y menores dimensiones) para tratamiento térmico superficial por inducción [16].

Perno hexagonal media rosca											mm
	Rosca	M5	M6	M8	M10	M12	M16	M20	M24	M30	M36+
	Paso	0.8	1	1.25	1.5	1.75	2	2.5	3	3.5	4
b	L ≤ 125	16	18	22	26	30	38	46	54	66	-
	125 < L ≤ 200	-	-	-	-	-	44	52	60	72	84
	L > 200	-	-	-	-	-	-	-	73	85	97
	k	3.5	4	5.3	6.4	7.5	10	12.5	15	18.7	22.5
e	Grado A	8.79	11.05	14.38	17.77	20.03	26.75	33.53	39.98	-	-
	Grado B	-	-	-	-	-	26.17	32.95	39.56	50.85	60.79
	S	8	10	13	16	18	24	30	36	46	55
	L	25-50	30-60	35-80	40-100	45-120	55-160	65-200	80-240	90-300	300

TORNILLO HEXAGONAL ROSCA COMPLETA

ISO 4017

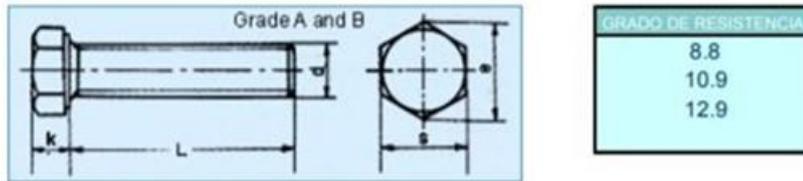


Fig. 2.7. Selección de pernos de hexagonal de rosca completa (mayores y menores dimensiones) para tratamiento térmico superficial por inducción [16].

Tabla 2.7. Selección de pernos hexagonales de rosca completa (mayores y menores dimensiones) para tratamiento térmico superficial por inducción [16].

Tornillo hexagonal rosca completa										mm	
Rosca	M5	M6	M8	M10	M12	M16	M20	M24	M30	M36	
Paso	0.8	1	1.25	1.5	1.75	2	2.5	3	3.5	4	
k	3.5	4	5.3	6.4	7.5	10	12.5	15	18.7	22.5	
e	Grado	8.79	11.05	14.38	17.77	20.03	26.75	33.53	39.98	-	
		-	-	-	-	-	26.17	32.95	39.55	50.85	60.79
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S	8	10	13	16	18	24	30	36	46	55	
L	8-40	8-50	12-60	16-60	20-80	30-100	40-100	50-100	70-100	80-100	

TRUERCAS HEXAGONALES

AS 1112

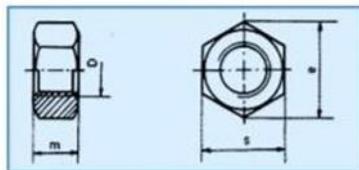


Fig. 2.8. Selección de tuercas hexagonales (mayores y menores dimensiones) para tratamiento térmico superficial por inducción [16].

Tabla 2.8. Selección de tuercas hexagonales (mayores y menores dimensiones) para tratamiento térmico superficial por inducción [16].

Tuercas hexagonales									mm
Rosca	M2	M3	M4	M5	M6	M8	M10	M12	M16
Paso	0.4	0.5	0.7	0.8	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0
s	1.6	2.4	3.2	4.7	5.2	6.8	8.4	10.8	14.8
e	4.32	6.01	7.66	8.79	11.05	14.38	17.77	20.03	26.75
s	4	5.5	7	8	10	13	16	18	24
Rosca	M20	M24	M30	M36	M42	M48	M56		
Paso	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5		
s	18	21.5	25.6	31	34.8	38.8	45.8		
e	32.95	39.55	50.85	60.79	71.30	82.60	93.50		
s	30	36	46	55	65	75	85		

2.1.4. TRATAMIENTOS TERMOQUÍMICOS Y TÉRMICO EN ENGRANES

Los tratamientos termoquímicos son principalmente métodos utilizados para alterar las propiedades físicas y químicas de un metal ferroso. Los engranes están sometidos a grandes presiones en la superficie de contacto y por eso el tratamiento que la mayoría de ellos recibe consiste en un tratamiento térmico de cementación o nitruración con lo cual se obtiene una gran dureza en la zona de contacto de los dientes y una tenacidad en el núcleo que evite su ruptura por un sobreesfuerzo. La cementación consiste en efectuar un calentamiento prolongado en un horno de atmósfera controlada y suministrarle carbono hasta que se introduzca en la superficie de las piezas a la profundidad que se desee. Una vez cementada la pieza, se la somete a temple, con lo cual se obtiene gran dureza en la capa exterior, ideal para soportar los esfuerzos de fricción a que se someten los engranes [17].

Los engranes que se someten a cementación están fabricados de aceros especiales adecuados para la cementación. El temple tiene por objeto endurecer y aumentar la resistencia de los aceros. Para ello, se calienta el acero a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior (aproximadamente 900 a 950 °C) y se enfría luego más o menos rápidamente (según la composición y el tamaño de la pieza) en un medio conveniente, agua o aceite, por ejemplo. El revenido es un tratamiento que se da a las piezas que han sido previamente templadas. Lo que se consigue es disminuir la dureza y resistencia de los aceros templados, se eliminan los esfuerzos residuales generados durante el temple y se mejora la tenacidad, quedando además el acero con la dureza o resistencia deseada [17].

El temple superficial es un procedimiento mediante el cual se endurece solamente la capa superficial de las piezas. El calentamiento puede realizarse por corrientes inducidas, pudiéndose regular perfectamente la profundidad del calentamiento y con ello la penetración de la dureza. Una vez conseguida la temperatura de temple, se enfría generalmente en agua preparada para tal uso [17].

Durante el endurecimiento por inducción, el engrane es endurecido superficialmente por medio de corrientes alternas de alta frecuencia. El

proceso consiste en enrollar una bobina de inducción alrededor de la pieza, generalmente la pieza es girada dentro de la bobina, en pocos segundos los dientes son llevados por encima de la temperatura crítica (de un color rojo intenso), después de este proceso el engranaje es retirado de la bobina y se le da un temple controlado por medio de un baño de rocío aplicado por un rociador anula o se le sumerge en un baño agitado. Antes del endurecimiento por inducción el disco del engranaje se trata térmicamente [17].

Nuevamente se tomarán en cuenta los diferentes tipos de engranes para su posterior uso didáctico en los tratamientos térmicos superficiales por inducción (ver, Figs. 2.9 y 2.10 y Tablas 2.9 - 2.12) [13].

ENGRANAJES RECTOS
SPUR GEARS

PIÑONES Y RUEDAS (con cubo en un lado) ángulo de presión 20°
SPROCKETS AND WHEELS (with box in one side) pressure angle 20°
Material C43- UNI 7847

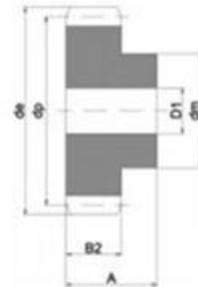


Fig. 2.9. Selección engranes rectos (mayores y menores dimensiones) para tratamiento térmico superficial por inducción [16].

Tabla 2.9. Selección engranes rectos (mayores y menores dimensiones) para tratamiento térmico superficial por inducción (ancho de dientes) [16].

Ancho diente "B"	mm	Ancho diente "A"	mm
M 1	15	M 1	25
M 1.5	17	M 1.5	30
M 2	20	M 2	35
M 2.5	25	M 2.5	40
M 3	30	M 3	50
M 4	40	M 4	60
M 5	50	M 5	75
M 6	60	M 6	80

Tabla 2.10. Selección engranes rectos (mayores y menores dimensiones) para tratamiento térmico superficial por inducción [16].

Z	Módulo "M3"				Módulo " M4"				Módulo "M5"			
	de	dp	dm	D1	dxe	dp	dm	D1	de	dp	dm	D1
15	51	45	35	12	68	60	45	14	85	75	60	20
16	54	48	38	14	72	64	50	16	90	80	65	20
17	57	51	42	14	76	68	50	16	95	85	70	20
18	60	54	45	14	80	72	50	16	100	90	70	20

Continúa.

Continuación.- Tabla 2.10. Selección engranes rectos (mayores y menores dimensiones) para tratamiento térmico superficial por inducción [16].

Z	Módulo "M3"				Módulo " M4"				Módulo "M5"			
	de	dp	dm	D1	de	dp	dm	D1	de	dp	dm	D1
19	63	57	45	14	84	76	60	16	105	95	70	20
20	66	60	45	14	88	80	60	16	110	100	80	20
21	69	63	45	16	92	84	70	16	115	105	80	20
22	72	66	50	16	96	88	70	16	120	110	80	25
23	75	69	50	16	100	92	75	20	125	115	90	25
24	78	72	50	16	104	96	75	20	130	120	90	25
25	81	75	60	16	108	100	75	20	135	125	90	25
26	84	78	60	16	112	104	75	20	140	130	100	25
27	87	81	60	16	116	108	75	20	145	135	100	25
28	90	84	60	16	120	112	75	20	150	140	100	25
29	93	87	60	16	124	116	75	20	155	145	100	25
30	96	90	60	16	128	120	75	20	160	150	100	25
31	99	93	70	16	132	124	80	20				
32	102	96	70	16	136	128	80	20				

PIÑONES 5 x 2,5 mm
SPROCKETS 03 - 1

Para cadena de rodillos s/ DIN 8187
For roller chains ISO/R 606

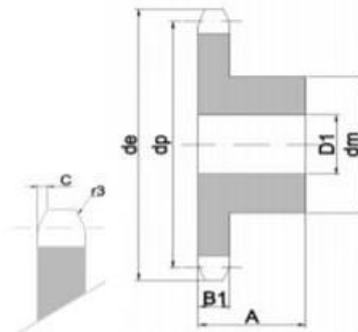


Fig. 2.10. Selección de piñones (mayores y menores dimensiones) para tratamiento térmico superficial por inducción [16].

Tabla 2.11. Selección de piñones (mayores y menores dimensiones) para tratamiento térmico superficial por inducción (dimensiones del piñón y cadena) [16].

Piñón	mm	Cadena	mm
Radio diente	5	Paso	5
Ancho curva	0.6	Ancho interior	2.5
Ancho diente	2.3	Diámetro rodillo	3.2

Tabla 2.12. Selección de piñones (mayores y menores dimensiones) para tratamiento térmico superficial por inducción [16].

Z	de	dp	Simple			
			dm	D1	A	kg
13	23	20.89	14	6	10	0.01
14	24.6	22.47	15	6	10	0.02
15	26-2	24.04	16	6	10	0.02
16	27.8	25.63	18	8	13	0.02
17	29.4	27.2	18	8	13	0.03
18	30.9	28.79	18	8	13	0.03
19	32.5	30.38	18	8	13	0.03
20	34.1	31.96	18	8	13	0.03
21	35.7	33.54	20	8	13	0.04
22	37.3	35.13	20	8	13	0.04
23	38.9	36.72	20	8	13	0.04
29	48.4	46.25	25	8	15	0.07
30	50	47.83	25	8	15	0.07
31	51.6	49.42	30	8	15	0.10
32	53.2	51.01	30	8	15	0.10
33	54.8	52.6	30	8	15	0.10
34	56.3	54.19	30	8	15	0.10
35	57.9	55.78	30	8	15	0.11
36	59.5	57.37	30	8	15	0.11
37	61.1	58.96	30	8	15	0.11
38	62.7	60.54	30	8	15	0.11

2.2. CÁLCULO DE VARIABLES DE PROCESO

En los procesos de tratamientos térmicos superficiales por inducción se utilizan bobinas de cobre fabricados a medida de la zona a calentar. A estas bobinas de cobre se les puede programar la entrega de potencia (kW) y la frecuencia de corriente (Hz).

Un sistema de calentamiento por inducción se puede representar de manera simple por una fuente de corriente alterna (CA), una bobina de inducción y la pieza a calentar, también conocida como pieza de trabajo.

El proceso de transferencia de energía entre la bobina de inducción y la pieza a calentar es similar al principio de funcionamiento de un transformador, en el que el primario corresponde a las espiras de la bobina de inducción y la superficie de la pieza a calentar representa un secundario de una sola espira, con su propia resistencia como carga (ver, Fig. 2.11).

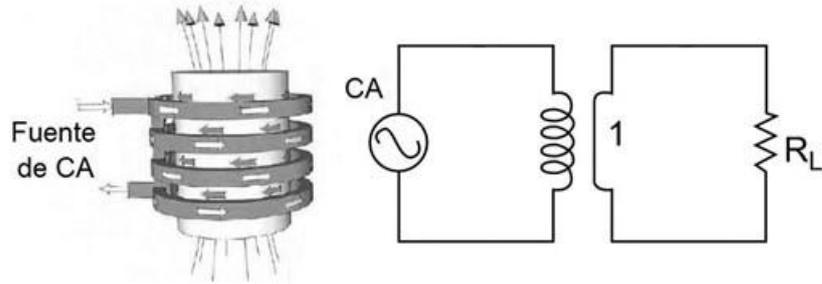


Fig. 2.11. Esquema básico de funcionamiento del calentamiento por inducción desde el punto de vista eléctrico [10].

2.2.1. PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN

La corriente alterna al fluir a través de un material eléctricamente conductor presenta la peculiaridad de que tiene una mayor intensidad en la superficie de un material, siendo esta concentración más intensa a medida que aumenta la frecuencia de esa corriente, este fenómeno es conocido como efecto piel [10].

En calentamiento por inducción la concentración de las corrientes parasitas inducidas tiende a concentrarse en la superficie del material a medida que aumenta la frecuencia del campo magnético generado por la bobina de inducción [10].

La interpretación física consiste en que al fluir estas corrientes se producen un campo magnético, que se expande y contrae a lo largo del conductor y provoca un voltaje el cual se opone al flujo de estas, esto se conoce como autoinducción. Por lo tanto, estas corrientes conforme se acercan al centro de la pieza son menos intensas y se retrasan en fase, pero todas tienen la misma frecuencia (ver, Fig. 2.12) [10].

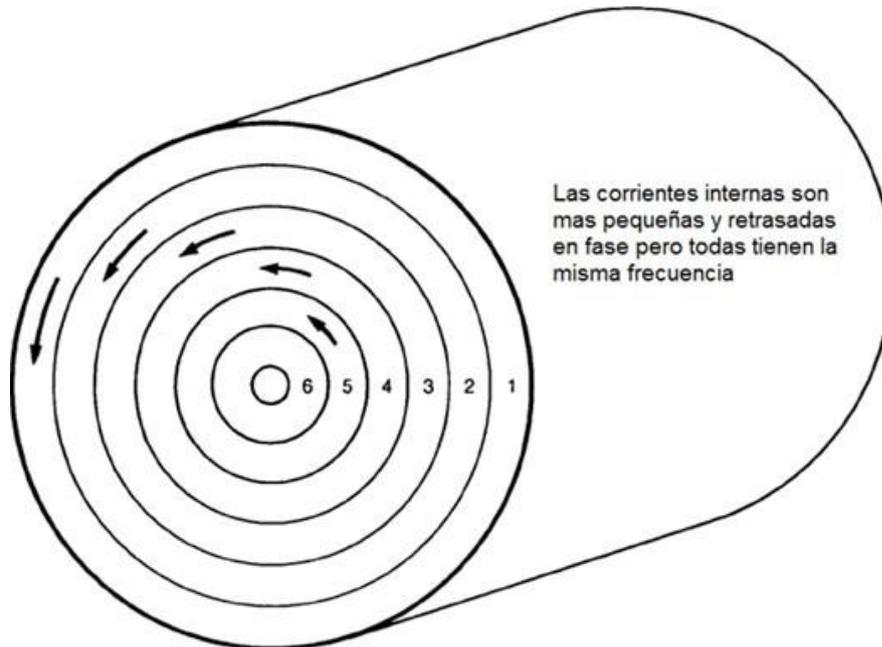


Fig. 2.12. Descripción gráfica del desfase de corriente en un conductor [10].

El efecto piel en la pieza, depende en gran medida del diámetro del conductor, así como de la frecuencia y de las propiedades del material (permeabilidad magnética, resistividad eléctrica). La medida cuantitativa del efecto piel es la profundidad de penetración del calentamiento (δ) y se define como aquella distancia de la superficie en la cual el valor de la corriente se ha reducido a $1/e$ o 37% del valor que se tiene en la superficie del cilindro. La densidad de potencia en este punto es $1/e^2$ o del 14 % del valor de la superficie; por lo tanto, el 86% del calentamiento ocurre en el volumen comprendido entre la superficie y δ lo cual se calcula por la Ec. 2.1 [10].

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} \quad (2.1)$$

donde:

δ es la profundidad de penetración en m,

f es la frecuencia de la corriente inducida, que es igual a la de la corriente del circuito en Hz,

ρ es la resistividad eléctrica del material en ohm·m, y

μ_r es la permeabilidad relativa del material, unidad adimensional.

Como las magnitudes de los parámetros, permeabilidad magnética y conductividad eléctrica dependen de las características de cada conductor, una vez definido el tipo de material que se quiere calentar la única manera de modificar la profundidad de penetración es variando la frecuencia de operación de la fuente de potencia (ver, Fig. 2.13) [10].

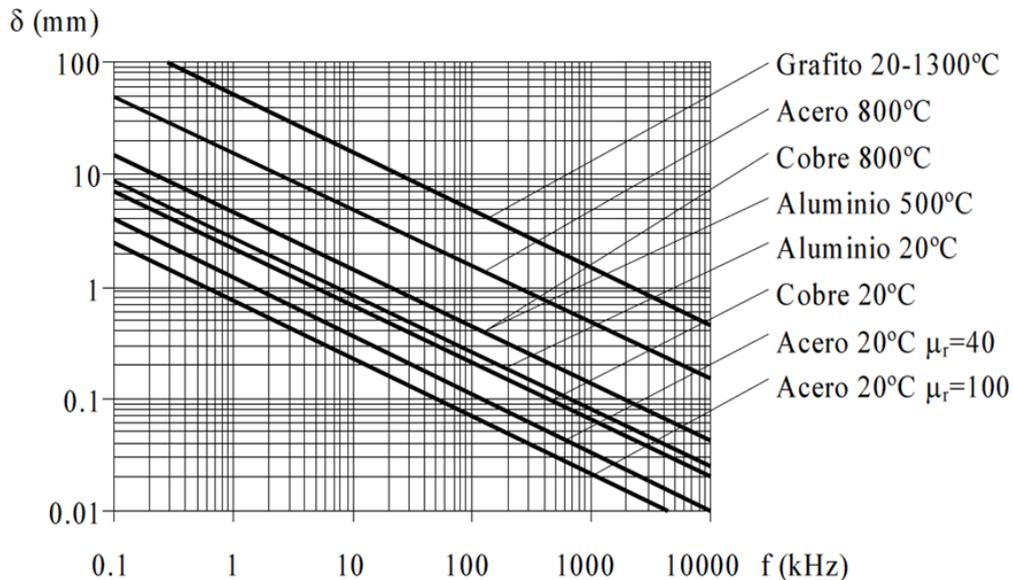


Fig. 2.13. Líneas de profundidad de penetración vs frecuencia para distintos materiales ferromagnéticos [10].

2.2.2. MODELADO ELÉCTRICO DE LA CARGA

El modelado eléctrico de la pieza-bobina, es representado a través de un inductor y una resistencia, este modelo es la representación más simple y permite entender de manera general el comportamiento de un sistema de calentamiento por inducción [10].

La relación bobina-pieza a calentar es modelada eléctricamente por un inductor y una resistencia equivalente. La resistencia equivalente representa la resistencia de la pieza de trabajo como reflejo en la bobina, más la resistencia propia de la bobina. Existen dos modelos para representar a la bobina de inducción y la pieza a calentar: el modelo serie y el modelo en paralelo (ver, Fig. 2.14) [10].

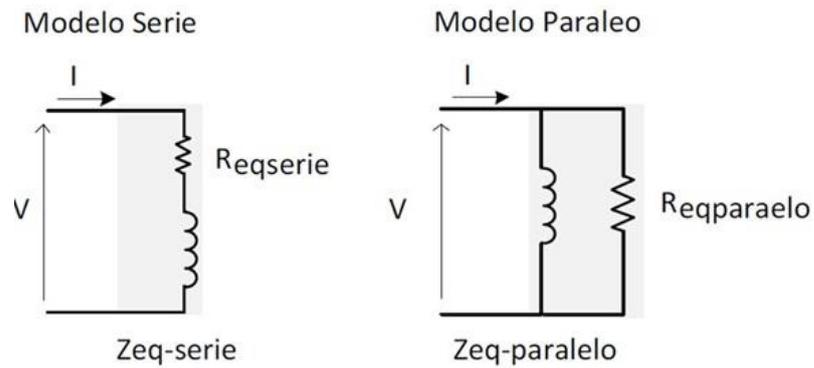


Fig. 2.14. Modelos en serie y paralelo de circuitos eléctricos usados en tratamientos térmicos por inducción [10].

En el modelo serie, el inductor y la resistencia equivalente están en serie. Así la potencia activa se calcula por la Ec. 2.2 [10]:

$$P_{Activa} = I^2 Z_{eqserie} = I^2 (R_{eqserie} + X_L) \quad (2.2)$$

La potencia reactiva se calcula por la Ec. 2.3 [10]:

$$P_{Reactiva} = I^2 X_L = I^2 \omega L \quad (2.3)$$

Por lo tanto, el factor de calidad puede ser calculado por la Ec. 2.4 [10]:

$$Q = \frac{I^2 \omega L}{I^2 R_{eqserie} + I^2 \omega L} = \frac{\omega L}{I^2 R_{eqserie}} \quad (2.4)$$

En el modelo en paralelo el inductor y la resistencia equivalente están paralelo en este caso la potencia reactiva se calcula por la Ec. 2.5 [10]:

$$P_{Activa} = \frac{V^2}{Z_{eqparalelo}} = V^2 \left(\frac{1}{R_{eqparalelo}} + \frac{1}{X_L} \right) \quad (2.5)$$

La potencia reactiva se calcula por la Ec. 2.6 [10]:

$$P_{Reactiva} = \frac{V^2}{X_L} = \frac{V^2}{\omega L} \quad (2.6)$$

El factor de calidad se calcula por la Ec. 2.7 [10]:

$$Q = \frac{\frac{V^2}{\omega L}}{\frac{V^2}{R_{eqparalelo}} + \frac{V^2}{\omega L}} = \frac{R_{eqparalelo}}{\omega L} \quad (2.7)$$

Es demostrado que para un alto factor de calidad el comportamiento a la frecuencia de resonancia es análogo. Considerando esto el comportamiento de la energía es el mismo en ambos casos lo que se puede calcular por la Ec. 2.8 [10]:

$$Q = Q_{paralelo} = Q_{serie} \quad (2.8)$$

Entonces, es posible pasar de un modelo a otro usando la Ec. 2.9 [10]:

$$R_{eqparalelo} = Q^2 R_{eqserie} \quad (2.9)$$

El valor de la resistencia equivalente está en función de la resistencia de la bobina y de la resistencia de la pieza de trabajo. En muchos casos la resistencia de la bobina se considera constante, ya que comúnmente utiliza un sistema de enfriamiento, por otra parte, la resistencia de la pieza de trabajo cambia con la temperatura y su efecto se refleja directamente en la resistencia del modelo bobina-pieza. Tomando lo anterior en consideración y siguiendo las leyes de Maxwell, puede ser demostrado que en caso de usar una bobina con forma de solenoide y una pieza eléctricamente conductora, la resistencia equivalente puede expresarse mediante la Ec. 2.10 [10]:

$$R_{eq} = R_S K_R S \frac{N^2}{l^2} \quad (2.10)$$

donde:

R_S es la resistencia superficial de la pieza, se calcula por la Ec. 2.11 [10]:

$$R_S = \frac{\rho_{\omega}}{\delta_{\omega}} \quad (2.11)$$

donde:

ρ_{ω} es la resistividad eléctrica del material a calentar, y

δ_{ω} es la profundidad de penetración

K_R es un factor adimensional que toma en cuenta la variación de la trayectoria eléctrica entre el diámetro de la pieza y la profundidad de penetración. Para el caso específico en donde se utiliza una pieza cilíndrica este factor se calcula por la Ec. 2.12 [10]:

$$K_R = 1 - e^{-\frac{2r_{\omega}}{\delta_{\omega}}} \quad (2.12)$$

donde:

r_{ω} es el radio de la pieza a calentar.

S , representa la superficie a calentar. Este parámetro se obtiene comúnmente multiplicando el perímetro de la pieza por su longitud.

l_{ω} es la longitud de la pieza a calentar.

N_C es el número de vueltas de la bobina de inducción.

Por lo tanto, para una pieza sólida cilíndrica de radio r_{ω} , la resistencia equivalente se calcula por la Ec. 2.13 [10]:

$$R_{eq} = K_R N_C^2 \rho_{\omega} \frac{2\pi r_{\omega}}{\delta_{\omega} l_{\omega}} \quad (2.13)$$

2.2.3. INDUCTANCIA

Existen varios factores que afectan el valor de inductancia del modelo bobina-pieza entre los que destacan el tamaño y la forma de la bobina, el tamaño y el material de la pieza de trabajo, la temperatura de calentamiento y la intensidad de campo magnético, por lo tanto, no existe una ecuación

precisa para calcular el valor de esta inductancia, ya que este valor se encuentra en función varios parámetros [10].

Sin embargo, en aplicaciones de calentamiento inductivo es posible llegar a una aproximación mediante las fórmulas de Wheeler, si se asume, que la inductancia es un solenoide de longitud finita de pared delgada. Con este enfoque, el valor de la inductancia se calcula por la Ec. 2.14 [10]:

$$L \approx \frac{10\pi\mu_0 N_c^2 r_c^2}{9r_c + 10l_c} \quad (2.14)$$

donde:

L es el valor de la inductancia,

l_c es la longitud de la bobina,

r_c es el radio, y

μ₀ es la permeabilidad magnética del vacío.

2.3. ESTIMACIÓN DE LAS NECESIDADES DEL PROCESO

Una vez que es seleccionada la pieza de trabajo y el tipo de proceso de calentamiento al que será sometido (temperatura y producción), es necesario definir la frecuencia y la potencia de alimentación necesaria tomando en cuenta las consideraciones hechas hasta el momento.

La fuente de CA debe proporcionar una corriente con una frecuencia tal, que genere una profundidad de penetración menor a ¼ del diámetro de la pieza de trabajo.

La estimación de la potencia necesaria para calentar la pieza de trabajo a una temperatura dada se calcula por la Ec. 2.15 [10]:

$$P_w = mc \frac{T_f - T_{in}}{t} \quad (2.15)$$

donde:

m es la masa de la pieza en kg,

c es el calor específico en J/kg·°C,

T_{in} y T_f la temperatura inicial y final respectivamente en °C, y

t es el tiempo requerido en segundos.

Considerando que P_w representa la potencia necesaria para calentar la pieza, la potencia de la fuente tiene que ser más grande debido a las pérdidas de energía. De esta manera, la potencia efectiva que la fuente debe de ser capaz de suministrar se calcula por la Ec. 2.16 [10]:

$$P_c = \frac{P_w}{\eta_T} \quad (2.16)$$

Donde la eficiencia total se calcula por la Ec. 2.17 [10]:

$$\eta_T = \eta_{Térmica} \cdot \eta_{Eléctrica} \quad (2.17)$$

2.3.1. EFICIENCIA TÉRMICA

Las pérdidas térmicas involucran las pérdidas en la superficie provocadas por radiación y por convección, así como las pérdidas producidas por la conducción en los extremos de la bobina. Estas pérdidas pueden ser disminuidas gracias al aislamiento proporcionado por un refractario, pero tiene que ser cuidadosamente diseñado para evitar el deterioro de acoplamiento electromagnético que puede causar el aumento de las pérdidas eléctricas. Para bobinas cilíndricas con concreto como refractario, la eficiencia y pérdidas térmicas pueden obtenerse mediante las Ec. 2.18 y 2.19 [10]:

$$\eta_{Térmica} = \frac{P_w}{P_w + P_{perdidastermicas}} \quad (2.18)$$

$$P_{perdidastermicas} = 3.74 \times 10^{-4} \frac{l_c}{\log_{10} \left(\frac{d_c}{d_w} \right)} \quad (2.19)$$

donde:

$P_{perdidastermicas}$ son las pérdidas térmicas a través de la superficie.

d_c y d_w son el diámetro interior de la bobina y el diámetro de la pieza, respectivamente, y

l_c es la longitud de la bobina.

2.3.2. EFICIENCIA ELÉCTRICA

La eficiencia eléctrica representa las pérdidas en las espiras de la bobina de trabajo y su alrededor. Cuando es utilizada una bobina con forma de solenoide para calentar una barra sólida cilíndrica, el valor de estas pérdidas puede aproximarse con la Ec. 2.20 [10]:

$$\eta_{eléctrica} = \frac{1}{1 + \frac{d_c + \delta_c}{d_w + \delta_w} \sqrt{\frac{\rho_c}{\mu_r \rho_w}}} \quad (2.20)$$

donde:

δ_c y δ_w son la profundidad de penetración de la bobina y de la pieza de trabajo, respectivamente;

ρ_c y ρ_w son la resistividad de la bobina y de la pieza a calentar, respectivamente; y

μ_r es la permeabilidad magnética relativa de la pieza de trabajo.

2.3.3. CÁLCULO Y ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS

Para la estimación de parámetros se tomará en cuenta la Tabla 2.13 con las dimensiones de cada uno de los elementos que se evaluarán, ya que no se cuentan con cotizaciones de bobinas, se utilizarán valores asumidos en base a las dimensiones máximas de los elementos a estudiar.

Tabla 2.13. Dimensiones de los elementos a analizar.

Elemento	Masa mínima, kg	Masa máxima, kg	Diámetro, m	Longitud mínima, m	Longitud máxima, m
Resorte1	0.035	0.05	0.00889	0.0362	0.04775
Resorte 2	0.05	0.08	0.01803	0.05817	0.06579
Eje macizo 1	0.137	0.3425	0.015	0.1	0.25
Eje macizo 2	1.53	3.825	0.05	0.1	0.25
Eje hueco 1	0.125	0.3125	0.02	0.1	0.25
Eje hueco 2	0.997	2.4925	0.05	0.1	0.25
Tornillo Hexagonal media rosca 1	0.09	0.24	0.01	0.03	0.08
Tornillo Hexagonal media rosca 2	0.135	0.36	0.018	0.045	0.12
Tuerca Hexagonal 1	0.018	0.036	0.0052	0.006	0.012
Tuerca Hexagonal 2	0.018	0.036	0.0108	0.006	0.012
Engrane Recto 1	0.459	0.765	0.08	0.03	0.05
Engrane Recto 2	0.459	0.765	0.12	0.03	0.05
Piñón 1	0.04	0.1	0.0357	0.013	0.015
Piñón 2	0.04	0.1	0.0548	0.013	0.015

Las bobinas a utilizar se subdividirán en 2, una utilizada para piñones y engranes exclusivamente debido a las dimensiones consideradas y otra para el resto de elementos, ya que los diámetros de los engranes y piñones cambian drásticamente respecto a los demás elementos, ambas fabricadas de cobre (ver, Tabla 2.14):

Tabla 2.14. Dimensiones a utilizar para bobinas de trabajo.

Tipo de bobina	Lc, m	Dw, m
Bobina para engranes y piñones	0.20	0.15
Bobina para el resto de elementos	0.30	0.10

Se tomarán en cuenta los siguientes materiales y sus propiedades como los utilizados para la fabricación de los elementos a analizar con sus respectivos cálculos (ver, Tabla 2.15):

Tabla 2.15. Materiales y sus propiedades a utilizar [14].

Material	Calor específico, J/kg·°C	μr	ρ , $\Omega \cdot m$
Hierro	450	5013.38071000	1.00×10^{-7}
Acero carbono	460	100.26761400	1.43×10^{-7}
Acero carbono	460	100.26761400	7.20×10^{-7}
Acero inoxidable martensítico	460	39.78873580	6.90×10^{-7}
Acero inoxidable martensítico	460	95.49296590	6.90×10^{-7}
Acero inoxidable austenítico	460	1.00267614	6.90×10^{-7}
Acero inoxidable austenítico	460	7.00281750	6.90×10^{-7}
Cobre	390	0.99999358	1.68×10^{-8}

Tomando los datos anteriores y valores de frecuencia entre 40 kHz y 400 kHz, se utilizaron las Ecs. 2.1 y 2.15 a 2.20; se obtuvieron los siguientes valores de eficiencias (ver, Tabla 2.16):

Tabla 2.16. Eficiencias y potencias calculadas.

Dato	Valor obtenido
$\eta_{\text{térmica mínima}}$, %	99.96
$\eta_{\text{térmica máxima}}$, %	99.99
$\eta_{\text{eléctrica mínima}}$, %	67.28
$\eta_{\text{eléctrica máxima}}$, %	99.87
η_t mínimo, %	64.61
η_t máximo, %	99.87
P_c mínimo, kW	0.208
P_c máximo, kW	177.000

Se debe mencionar que los tiempos de calentamiento se han tomado valores de tiempos de 10, 15, 45 y 60 segundos respectivamente, para permitir que el equipo arranque apropiadamente. También se puede realizar una comparación con los datos obtenidos si los tratamientos térmicos con bobina de tipo solenoide se realizan solo para los ejes y engranes, los demás elementos, se pueden tratar con una bobina tipo placa para los resortes y una bobina de una sola espira para el resto. Los nuevos resultados de los cálculos de potencia se presentan en la Tabla 2.17.

Tabla 2.17. Eficiencias y potencias calculadas (ejes y engranes).

Dato	Valor obtenido
$\eta_{\text{t\u00e9rmica m\u00ednima}}$, %	99.96
$\eta_{\text{t\u00e9rmica m\u00e1xima}}$, %	99.99
$\eta_{\text{el\u00e9ctrica m\u00ednima}}$, %	67.28
$\eta_{\text{el\u00e9ctrica m\u00e1xima}}$, %	99.87
$\eta_{\text{t m\u00ednimo}}$, %	64.61
$\eta_{\text{t m\u00e1ximo}}$, %	99.87
$P_{\text{c m\u00ednimo}}$, kW	0.935
$P_{\text{c m\u00e1ximo}}$, kW	177.000

En base a los datos obtenidos anteriormente (ver, Tablas 2.4 y 2.5) se puede proceder a la siguiente parte la cual es la toma de decisi\u00f3n para elegir el equipo que se utilizar\u00e1 en el laboratorio de tratamientos t\u00e9rmicos superficiales por inducci\u00f3n.

2.4. SELECCI\u00d3N DE EQUIPOS DE LABORATORIO Y SU RESPECTIVA CARTA T\u00c9CNICA

A partir de ciertas investigaciones, debido a la calidad de los servicios y garant\u00edas que ofrecen los equipos ELDEC, se ha optado como opci\u00f3n primordial para cotizaciones futuras, debido a que tambi\u00e9n cuentan con una amplia variedad de equipos adaptables a las necesidades.

2.4.1. SELECCI\u00d3N DE LA FUENTE

La tecnolog\u00eda de inducci\u00f3n perfeccionada de los generadores ELDEC permite establecer un suministro de energ\u00eda extraordinariamente eficiente para todos los tipos de sistemas de calentamiento, as\u00ed como m\u00e1quinas de temple inductivo las cuales representan la base para unas cadenas de producci\u00f3n s\u00f3lidas. Debido a esto se encontraron las principales ventajas de los equipos de ELDEC (ver, Tabla 2.18).

Tabla 2.18. Ventajas de equipos ELDEC [13].

Ventajas de equipos ELDEC
Protección de los aparatos por la robusta técnica de transistores IGBT: a prueba de cortocircuitos y de funcionamiento en circuito abierto. Incluso un contacto accidental con la pieza de trabajo no daña el generador.
Alto grado de eficiencia: en todas las clases de potencia > 90 %.
Transmisión de energía flexible: los generadores ELDEC están disponibles con conjuntos de mangueras de hasta 15 m de longitud.
Adaptación automática a la frecuencia de resonancia y las dimensiones del inductor.
Dosificación precisa de la energía (+/- 2 %) para una alta reproducibilidad y, en consecuencia, la capacidad óptima en el proceso (SPC).
Alta densidad de potencia gracias a la construcción optimizada de todos los componentes
Máximo margen de frecuencia, potencia y adaptación.
No es necesario aplicar mayor mantenimiento.
Operación y manejo sencillos.
Integración en sistemas de fabricación superiores con la ayuda de diferentes interfaces (analógicas y bus).
Amplia oferta de salidas de potencias múltiples: salidas múltiples conmutables 2A, 3A, 4A, 5A, 6A.
Todos los datos de potencia en base a una duración de conexión del 100 %. Aumento de potencia de corta duración a petición.
Multitud de funciones y posibilidades para la vigilancia de la calidad.

2.4.2. ELECCIÓN DEL GENERADOR

Debido a la amplia gama de generadores de la marca ELDEC, se han considerado 3 equipos del catálogo de 2016, se mostrarán las diferentes características de cada uno y se deberá de hacer una evaluación económica como recomendación para poder elegir el modelo más conveniente (ver, Tablas 2.15 - 2.22).

Generadores eldec

PICO de eldec Generador	eldec ECO LINE Generadores para HF y MF	eldec CUSTOM LINE Generadores para HF, MF, DF, LF y SDF*
		
Pequeños, rojos, potentes: just heat. Fuentes de energía económicas con una salida y un manejo intuitivo extremadamente sencillo. MF y HF 5 – 150 kW.	La clase media: Fuentes de energía con salida simple o múltiple como solución independiente o para la incorporación en sistemas globales. MF y HF 5 – 150 kW.	Todo es posible: Fuentes de energía personalizadas con salida simple o múltiple, así como numerosas combinaciones de potencia y frecuencia. LF, MF, HF, DFG, SDF* 20 – 3000 kW.

Fig. 2.15. Tipos de generadores de ELDEC [13].

MFG / HFG potencia 5 – 150 kW



MF potencia: 5 – 150 kW
HF potencia: 5 – 75 kW

MF gamas de frecuencia:
8 – 20 kHz o 16 – 40 kHz
HF gamas de frecuencia:
100 – 250 kHz o 160 – 400 kHz

Tipo / potencia nominal	Conexión de red + 10 % 50/60 Hz		Consumo de agua refrigerante sin inductor	Dimensiones / peso Generador	
	V	A		l/min	An x Al x P mm
PICO-S 5 MF	3 x 400	10	8	450 x 280 x 510	50
PICO-S 10 MF	3 x 400	20	8	450 x 280 x 510	50
PICO-S 15 MF	3 x 400	32	8	450 x 280 x 510	50
PICO-S 20 MF	3 x 400	35	10	450 x 280 x 510	50
PICO-S 30 MF	3 x 400	63	12	450 x 280 x 510	60
PICO-S 5 HF	3 x 400	10	8	450 x 280 x 510	50
PICO-S 10 HF	3 x 400	20	8	450 x 280 x 510	50
PICO-S 15 HF	3 x 400	32	8	450 x 280 x 510	50
PICO-M 50 MF	3 x 400	100	27	550 x 560 x 510	120
PICO-M 75 MF	3 x 400	160	32	550 x 560 x 510	120
PICO-M 25 HF	3 x 400	50	11	550 x 560 x 510	110
PICO-M 35 HF	3 x 400	63	12	550 x 560 x 510	110
PICO-L 100 MF	3 x 400	200	37	550 x 910 x 800	170
PICO-L 150 MF	3 x 400	315	50	550 x 910 x 800	200
PICO-L 50 HF	3 x 400	100	27	550 x 910 x 800	160
PICO-L 75 HF	3 x 400	160	32	550 x 910 x 800	180

Fig. 2.16. Generador PICO de ELDEC y sus características [13].

HFG potencia 5 – 15 kW



Generadores eldec ECO LINE HF

La clase media: fuentes de energía con salida simple o múltiple como solución autónoma o para la incorporación en sistemas globales.

HF potencia: 5 – 75 kW

HF gamas de frecuencia: 140 – 350 kHz
(Otras frecuencias a petición)

Tipo / potencia nominal	Conexión de red + 10 % 50/60 Hz		Consumo de agua refrigerante sin inductor l/min	Dimensiones / peso Generador		Dimensiones transformador coaxial	
	V	A		An x Al x P mm	kg	ø x L mm	
HFG 5	3 x 400	10	5	553 x 320 x 600	40	45 x 120-250	
HFG 10	3 x 400	20	6	553 x 320 x 600	40	45 x 120-250	
HFG 15	3 x 400	32	8	553 x 320 x 600	45	45 x 120-250	

Fig. 2.17. Generador ECO LINE de ELDEC y sus características [13].

ECO LINE Opciones para MFG	ECO LINE Opciones para HFG
Tensión de red 200 V, 380 V, 400 V, 480 V, 560 V	Tensión de red 200 V, 380 V, 400 V, 480 V, 560 V
Conjunto de mangueras de hasta 15 m de longitud	Conjunto de mangueras de hasta 15 m de longitud
Interfaz Profibus, Profinet para la modulación mediante conmutador paralelo-serie	Interfaz Profibus, Profinet
Frecuencia 16 – 40 kHz	Conmutación de devanado coaxial
Conmutación de frecuencia 8 – 20 / 16 – 40 kHz	Control de cortocircuito a tierra
Dispositivo de cambio rápido (coaxial / caja de cables)	Controlador de energía
Control de cortocircuito a tierra	Regulación de temperatura con pirómetro
Controlador de energía	Registrador de temperatura
Regulación de temperatura con pirómetro	Interruptor de pedal / pedal
Registrador de temperatura	Pistola de soldadura
Caja de cables con cable calefactor para aplicaciones de contracción	Indicación de intensidad y de tensión
Interruptor de pedal / pedal	Sistemas de refrigerante a petición
Pistola de soldadura	
Indicación de intensidad y de tensión	
Sistemas de refrigerante a petición	

Fig. 2.18. Equipamiento y opciones del generador ECO LINE de ELDEC [13].

eldec CUSTOM LINE – MF/HF/LF



Generadores eldec CUSTOM LINE MF/HF/LF

Fuentes de energía personalizadas con salida simple o múltiple, así como numerosas combinaciones de potencia y frecuencia. LF, MF, HF, DF, SDF® 20 – 3000 kW.

MF potencia: 200 – 1500 kW
MF gamas de frecuencia: 8 – 40 kHz

HF potencia: 100 – 1500 kW
HF gamas de frecuencia: 80 – 400 kHz

LF potencia: 50 – 500 kW
LF gama de frecuencia: 2 – 5 kHz

Fig. 2.19. Información básica del generador CUSTOM LINE de ELDEC [13].

Equipamiento:	Opciones:
Modos de servicio: continuo, por pulsación, por temporizador	Posibilidad de control mediante pedal e interfaz externa
Tipos de regulación: potencia, intensidad, temperatura (pirómetro)	Pistola de soldadura eldec disponible
8 temporizadores diferentes con un tiempo de funcionamiento de 600 s máx. cada uno	Interfaz Profibus / Profinet a petición
Manejo intuitivo mediante teclado de membrana y pantalla	Paquete opcional para PICO-M, -L: carcasa elevable con grúa con grado de protección IP54 y mecanismo de traslación
Para PICO-M y L: parada de emergencia 2 canales	

Fig. 2.20. Equipamiento y opciones del generador PICO de ELDEC [13].

MFG Carcasa de armario de distribución, potencia 200 – 1500 kW						
Tipo / potencia nominal	Conexión de red + 10 % 50/60 Hz		Consumo de agua refrigerante sin inductor	Dimensiones / peso Generador		Dimensiones transformador coaxial / transformador de salida
	V	A		l/min	An x Al x P mm	
MFG 200	3 x 400	400	70	1000 x 2100 x 600	310	180 x 400 o
MFG 250	3 x 400	500	75	1000 x 2100 x 600	320	2 uds. 120 x 380
MFG 300	3 x 400	630	80	1400 x 1980 x 600	450	370 x 400 x 500
MFG 400	3 x 400	800	100	1400 x 1980 x 600	550	370 x 400 x 500
MFG 500	3 x 400	1000	120	2000 x 2000 x 1200	700	370 x 400 x 500
MFG 600	3 x 400	1200	140	2000 x 2000 x 1200	750	370 x 400 x 500
MFG 700	3 x 400	1400	160	2000 x 2000 x 1200	800	370 x 400 x 500
MFG 800	3 x 400	1500	200	2000 x 2000 x 1200	820	370 x 400 x 500
MFG 1000	3 x 400	2000	250	2000 x 2000 x 1200	950	370 x 400 x 500
MFG 1500	3 x 400	3000	350	2000 x 2000 x 1200	1100	370 x 400 x 500

Fig. 2.21. Generador CUSTOM LINE de ELDEC y sus características [13].

CUSTOM LINE Opciones para MFG	CUSTOM LINE Opciones para HFG
Tensión de red 200 V, 380 V, 400 V, 480 V, 560 V	Tensión de red 200 V, 380 V, 400 V, 480 V, 560 V
Conjunto de mangueras de hasta 15 m de longitud	Conjunto de mangueras de hasta 15 m de longitud
Interfaz Profibus	Interfaz Profibus
Conmutador paralelo-serie	Conmutación de devanado coaxial
Frecuencia 16 – 40 kHz	Control de cortocircuito a tierra
Conmutación de frecuencia 8 – 20 / 16 – 40 kHz	Controlador de energía
Dispositivo de cambio rápido (coaxial / caja de cables)	Regulación de temperatura con pirómetro
Control de cortocircuito a tierra	Registrador de temperatura
Controlador de energía	Interruptor de pedal / pedal
Regulación de temperatura con pirómetro	Pistola de soldadura
Registrador de temperatura	Indicación de intensidad y de tensión
Caja de cables con cable calefactor para aplicaciones de contracción	Sistemas de refrigerante a petición
Interruptor de pedal / pedal	eQC + salidas múltiples
Pistola de soldadura	
Indicación de intensidad y de tensión	
Sistemas de refrigerante a petición	

Fig. 2.22. Equipamiento y opciones del generador CUSTOM LINE de ELDEC [13].

2.4.3. SELECCIÓN DE LAS BOBINAS

Ya que el sistema será diseñado para fines didácticos, no se considerará necesario incluir una gran variedad de bobinas, ya que los elementos en su mayoría serán engranes, ejes y otros componentes mecánicos pequeños, se tomarán en cuenta las bobinas de inducción de una espira, de varias espiras y de placa. Por conveniencia, se continuará trabajando con las bobinas que ELDEC ofrece en el catálogo de 2016 (ver, Fig. 2.23).

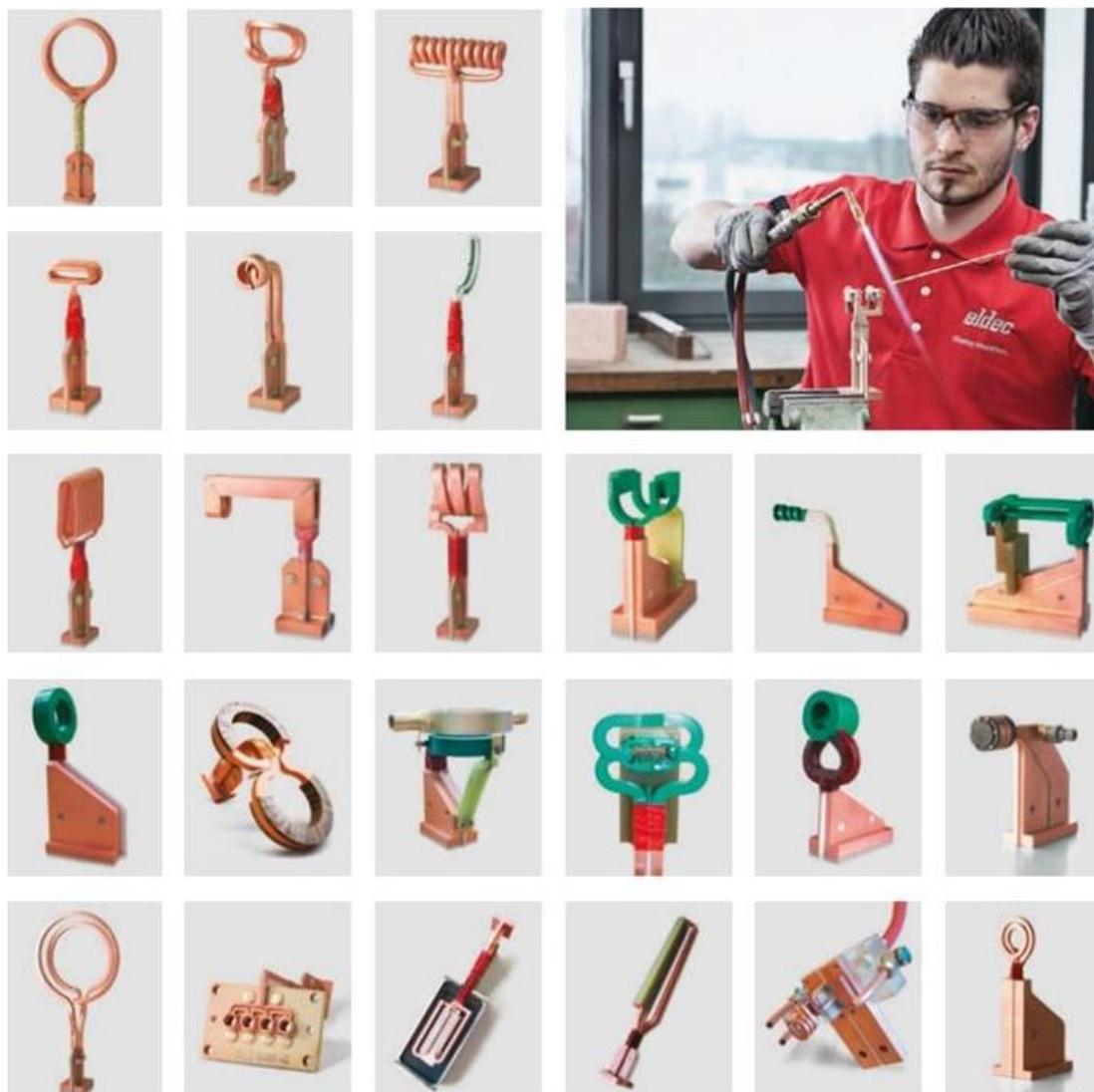


Fig. 2.23. Distintos tipos de bobinas que ofrece ELDEC [13].

2.5. SELECCIÓN DE SISTEMAS DE CONTROL Y EQUIPOS DE SEGURIDAD

Ya que se ha tomado la decisión en cuanto a los equipos a utilizar, se pueden tomar en cuenta los requerimientos para el control y seguridad de los mismos y del operario, así se puede mantener un área de trabajo sistematizada y segura para lograr la mayor eficiencia y seguridad posible, debido a que se ha seleccionado ya un proveedor de los equipos, no será necesario buscar sistemas de control externos, ya que estos vienen incluidos

en el catálogo de ELDEC; a continuación, se seleccionará el sistema de control que mejor se acople a los equipos seleccionados.

2.5.1. SELECCIÓN DE SISTEMAS DE CONTROL

Como todo equipo de tratamientos térmicos superficial, es necesario mantener un control sobre las variables de proceso y un monitoreo constante, ya que ELDEC ofrece equipos y servicios completos, se utilizarán los sistemas de mando y control del catálogo de 2016 (ver, Figs. 2.24 y 2.25).



Aparato de mando:

- Tamaño de la pantalla: 7,5"
- Memoria: 32 MB
- Conexiones universales con otros sistemas:
 - 1 interfaz Ethernet y 2 interfaces serie
 - 2 USB
 - 1 ranura para tarjeta SD
- Grado de protección: IP65; lavable
- Pantalla plana sin cavidades
- Manejo sencillo e intuitivo
- Guía de menús claramente organizada
- Posibilidad de selección directa de los modos de servicio del generador
- Mayor superficie de pantalla
- Solo se muestran los elementos de mando necesarios

Fig. 2.24. Características del aparato de mando que ofrece ELDEC [13].

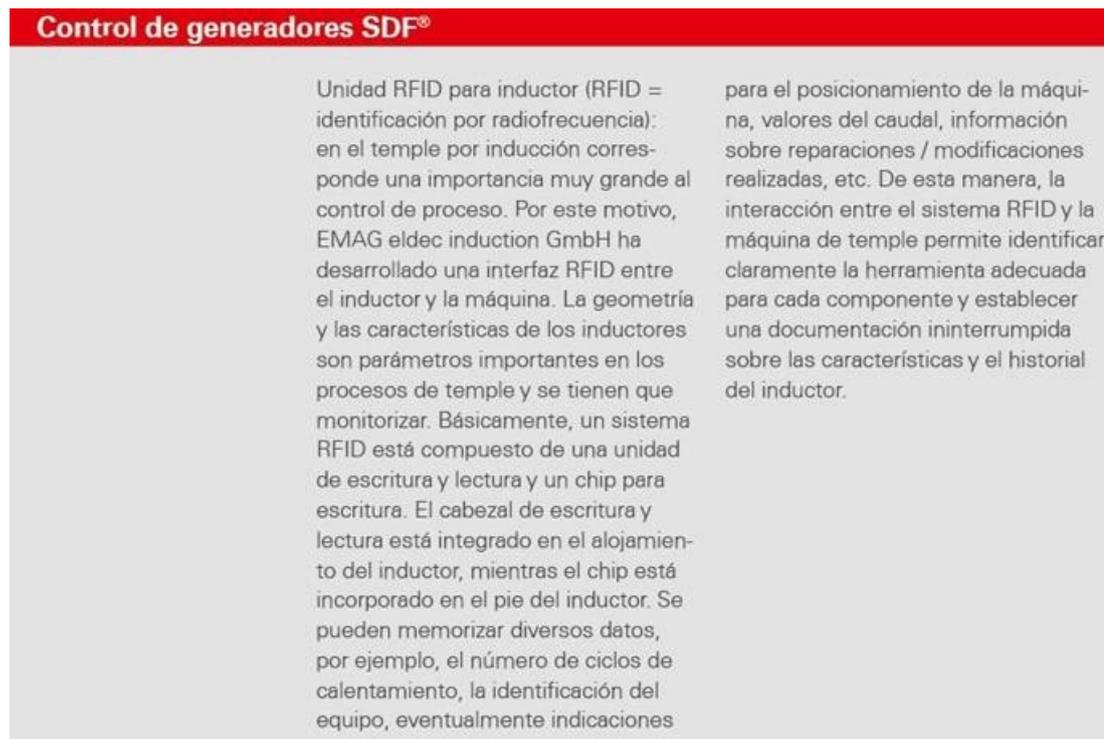


Fig. 2.25. Características del sistema de control que ofrece ELDEC [13].

2.5.2. SELECCIÓN DE EQUIPOS DE SEGURIDAD

Debido a que el objetivo es meramente didáctico, las medidas de seguridad que se deben de tomar tienen que ser más exigentes debido al incremento del riesgo de accidentes por trabajar con personas no familiarizadas con los equipos, debido a esto se debe de tomar en cuenta los distintos tipos de riesgos que pueden existir en los talleres de mecánica junto con los equipos de inducción. A continuación, mediante la Tabla 2.19 se ejemplificarán los principales peligros de los equipos en talleres que aplican al área de tratamientos térmicos superficiales por inducción.

Se considerará que cumplen con los requisitos esenciales de seguridad y salud, las máquinas y componentes de seguridad que estén provistas de una declaración CE de conformidad. Éste es un documento que garantiza que la máquina es segura. Se obtiene a partir del cumplimiento de una serie de requisitos comprobados por organismos de control acreditados también debe de estar marcado “CE”. Las máquinas, y otros objetos, que han pasado estos

controles de seguridad, deben llevar bien visible una etiqueta con las siglas CE (ver, Tabla 2.19) [18].

Tabla 2.19. Principales peligros en los talleres de tratamientos térmicos superficiales por inducción [18].

Tipo de riesgo	Efectos
Peligro térmico	Pueden originarse quemaduras por contacto con materiales o piezas a temperaturas extremadamente frías o muy calientes.
Peligro por exposición a vibraciones	Pueden ocasionar trastornos musculares además de trastornos de tipo neurológico y vascular.
Peligro eléctrico	Puede producir lesiones o la muerte debido al choque eléctrico. También pueden producirse quemaduras internas y/o externas. El peligro eléctrico puede originarse por: <ul style="list-style-type: none"> • Contacto eléctrico directo, con conductores activos. • Contacto eléctrico indirecto, con elementos puestos accidentalmente en tensión. • Fenómenos electrostáticos. • Fenómenos térmicos relacionados con cortocircuitos o sobrecargas.
Peligro por radiación	Éstas pueden ser: <ul style="list-style-type: none"> • Ionizantes, procedentes de fuentes radiactivas como: equipos de radiografía, eliminadores de cargas estáticas radiactivas. • No ionizantes, que las podemos encontrar en hornos de microondas, en procesos de calentamiento por inducción y dieléctrico, en operaciones de soldadura al arco eléctrico, en técnicas de impresión por ultravioleta.
Peligro debido a la exposición a sustancias peligrosas y a la emisión de polvo, gases, etc.	Éstos pueden desprenderse en el procesado de los materiales, ocasionando riesgo higiénico para los operarios que pudieran inhalarlos o entrar en contacto con ellos.
Peligros debidos a defectos ergonómicos	El operador puede sufrir trastornos físicos por la adopción de posturas incorrectas o la necesidad de realizar esfuerzos mayores que los que serían propios de la tarea.

En base a esto, se puede seleccionar el tipo de equipos de protección que se le puede brindar al operario para minimizar los riesgos previamente contemplados, los cuales se denominan Equipos de Protección Individual (EPIs).

La protección Individual tiene por objeto proteger al trabajador o trabajadora frente a peligros potenciales que se producen durante una actividad laboral determinada. Puede tomarse como la última barrera entre el hombre y el riesgo y debe considerarse como una técnica complementaria a la protección colectiva, ya que esta última se diseña y aplica con el fin de eliminar la situación de riesgo, mientras que la protección individual pretende

eliminar, o en su defecto mitigar, las consecuencias que para la salud del trabajador se derivan de la situación de riesgo [18].

Los equipos de protección personal deben ser de uso individual y justarse a las características anatómicas del usuario.

Cada usuario debe ser instruido sobre las características de los equipos que se le entregan, de sus posibilidades y de sus limitaciones. A continuación, se presentan los principales EPIs que pueden ser utilizados en un laboratorio de tratamientos térmicos superficiales por inducción (ver, Tabla 2.20) [18].

Tabla 2.20. Principales EPIs que pueden ser utilizados en un laboratorio de tratamientos térmicos superficiales por inducción [18].

Tipo de protección	Ejemplo	Imagen de referencia
Protección del cráneo	<ul style="list-style-type: none"> Casco de seguridad 	
Protección de la cara y el aparato visual	<ul style="list-style-type: none"> Pantallas faciales Gafas 	
Protección del aparato auditivo	<ul style="list-style-type: none"> Orejas Tapones Cascos que protegen la cabeza y el oído 	
Protección de las extremidades inferiores	<ul style="list-style-type: none"> Calzado de seguridad, con puntera reforzada, frente a riesgos eléctricos, etc, Plantillas de seguridad 	
Protección de las extremidades superiores	<ul style="list-style-type: none"> Guantes Manoplas Dediles Resistentes a la electricidad 	
Protección de las vías respiratorias	<ul style="list-style-type: none"> Mascarillas Máscaras 	

Continúa.

Continuación.- Tabla 2.20. Principales EPIs que pueden ser utilizados en un laboratorio de tratamientos térmicos superficiales por inducción [18].

Tipo de protección	Ejemplo	Imagen de referencia
Protección frente a riesgos eléctricos	<ul style="list-style-type: none"> • Alfombras aislantes • Banquetas aislantes 	
Ropa de seguridad	<ul style="list-style-type: none"> • Ropa de trabajo • Prendas de señalización 	

2.6. ESTIMACIÓN DE LAS ADECUACIONES NECESARIAS AL ESPACIO DE TRABAJO

Debido a que se planea montar el laboratorio en la escuela de ingeniería mecánica de la Universidad de El Salvador, es necesario plantear las consecuencias que el uso del equipo puede generar. Para esto se deben de evaluar los principales riesgos que el equipo presenta, los cuales ya se analizaron en la Tabla 2.7; los peligros para personas que no estén presentes son los debidos a radiación y exposición a sustancias nocivas.

Para solventar esta situación se debe de crear un aislamiento para mitigar la exposición a ambas, el laboratorio de metalurgia de la escuela de ingeniería mecánica es la ubicación seleccionada y se puede adecuar el aislamiento para la misma.

2.6.1. BLINDAJE ELECTROMAGNÉTICO

Al diseñar un sistema, primero se debe considerar el entorno electromagnético en el que va a funcionar. Usualmente, los sistemas funcionan bien en el laboratorio, pero pueden fallar cuando se usan en su entorno electromagnético si no se diseñan correctamente. Una de las primeras decisiones que se toman es seleccionar el material y la configuración del recinto donde se alojarán los cables, los conectores y todo el resto de los componentes que conforman cualquier producto electrónico [19].

Para decidir correctamente el material de la caja, se debe considerar si se desea diseñar como un blindaje, o no. Si se decide que el recinto no debe comportarse como un blindaje, se puede seleccionar una caja de plástico sin ningún tipo de metalización. Si se decide usar una caja metálica, debe ser diseñada correctamente para que se comporte como un blindaje [19].

Si no se diseña correctamente, aunque la caja sea metálica, será únicamente un recinto configurado con piezas metálicas unidas mecánicamente pero no unidas de manera eléctrica y no será un blindaje adecuado [19].

Un blindaje es una pared metálica dispuesta entre dos regiones del espacio, que atenúa la propagación de los campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos: sirve tanto para no dejar salir ni entrar el flujo de los campos de la zona que encierra, es decir, reducir las emisiones radiadas. Un blindaje también sirve para evitar que los campos externos penetren dentro de la zona que encierra, es decir, para evitar tener problemas de inmunidad radiada. Un equipo bien protegido contra campos exteriores gracias a la buena atenuación del blindaje. En cambio, el equipo puede tener problemas de inmunidad debido a la interferencia de campos exteriores a través de la ranura [19].

2.6.2. EFECTIVIDAD DEL BLINDAJE ELECTROMAGNÉTICO

Al incidir una onda electromagnética en una superficie metálica, la onda es parcialmente reflejada por la superficie (como si fuera un espejo), y la parte transmitida (no reflejada) es atenuada al pasar a través del blindaje por absorción. Las pérdidas por reflexión dependen de la impedancia de onda y no son iguales en los campos cercano y lejano. En cambio, las pérdidas debido a absorción son las mismas tanto en campo lejano como en campo cercano [19].

La efectividad total de un blindaje es igual a la suma de las pérdidas por reflexión más las pérdidas por absorción, más un factor que contabiliza las múltiples reflexiones en los blindajes [19].

Las pérdidas por reflexión en la frontera entre dos medios (aire y blindaje) están relacionadas con las impedancias características de cada uno de los dos medios. Cuando una onda atraviesa un blindaje encuentra dos cambios de medio, y si el blindaje es delgado en comparación con la profundidad de penetración, al tener pocas pérdidas de absorción se producirán múltiples reflexiones. Si el área que rodea el blindaje es aire, la mayor reflexión ocurre cuando la onda incidente penetra la pared exterior del blindaje, en el caso de campos eléctricos y cuando la onda deja la cara interna del blindaje, en el caso de campos magnéticos; por ello, para los campos eléctricos, los blindajes delgados también son efectivos. Sin embargo, si se trata de campos magnéticos, al producirse la reflexión principal en la segunda superficie, se tienen múltiples reflexiones y, por lo tanto, la efectividad del blindaje queda reducida. Las pérdidas por reflexión crecen al disminuir la frecuencia y aumentar la conductividad del material [19].

En el caso de campos electromagnéticos (campo lejano), antes de penetrar en el blindaje, la impedancia es igual a la impedancia característica del vacío y cuanto menor es la impedancia del material del blindaje, mayores son las pérdidas por reflexión. En el campo cercano, la impedancia depende de la fuente del campo (antena transmisora) y no del medio de propagación, al contrario de lo que ocurre en el campo lejano. Un campo eléctrico con alta impedancia tiene una mayor reflexión que una onda plana, y un campo

magnético de baja impedancia tiene menor reflexión que una onda plana, debido a que las pérdidas por reflexión son una función del cociente entre la impedancia de onda y la impedancia del blindaje. Las pérdidas por reflexión constituyen el principal mecanismo de apantallamiento en el caso de campos eléctricos. El mejor blindaje contra campos eléctricos es una jaula de Faraday. Una jaula de Faraday es una envolvente metálica completamente cerrada que protege de los campos. La jaula de Faraday se emplea para proteger los equipos de los campos externos, ya que en su interior el campo eléctrico es nulo. En el caso del laboratorio de tratamientos térmicos por inducción, pueden utilizarse para aislar en mayor medida el campo saliente de los equipos [19].

2.6.3. SELECCIÓN DE MATERIALES DE AISLAMIENTO

Si en un blindaje se usa un material magnético en lugar de un material conductor, se tendrá un incremento de permeabilidad y una reducción de la conductividad. Esto implicará un aumento de las pérdidas de absorción y una disminución de las pérdidas de reflexión. Si en la fuente se tiene un campo magnético de baja frecuencia, este hecho significa una ventaja, debido a que los campos magnéticos no tienen casi pérdidas por reflexión [19].

Los materiales de alta permeabilidad son adecuados para frecuencias menores a 10 kHz. Es necesario no llegar a la saturación magnética del material y, para ello, se deben consultar las curvas de imantación de cada material, para asegurar que la intensidad de campo no sea tan alta. La máxima permeabilidad y, por ello, la efectividad máxima del blindaje se tendrá a un nivel medio de la intensidad de campo [19].

Tanto a baja, como a alta intensidad de campo, la permeabilidad es baja y, en consecuencia, la efectividad del blindaje también es baja. Para evitar la saturación se pueden utilizar materiales distintos superpuestos, combinando adecuadamente sus permeabilidades, es decir, disponiendo el material de baja permeabilidad de cara a la fuente y el de alta permeabilidad en el interior del blindaje, donde habrá menor intensidad de campo. En el caso de campos

magnéticos de 1 kHz es mejor el acero que el cobre, y éste mejor que el aluminio, pero a 100 kHz, aunque el acero sigue siendo mejor, la diferencia es muy pequeña. Entre 100 kHz y 1 MHz es claramente mejor el cobre que el acero. A 100 kHz tanto el acero, como el cobre y el aluminio son mejores [19].

En todo el espectro de frecuencias dicho, el cobre es mejor que el aluminio. Estas comparaciones están hechas teniendo en cuenta que en todos los casos se trata de un campo cercano y el espesor del blindaje varía entre 0.08 y 1.5 mm, de modo que en esta gama de espesores las características antes dichas son válidas. En resumen, un material magnético (permeabilidad alta) tiene una mayor efectividad de apantallado magnético a bajas frecuencias en comparación con los buenos conductores como el cobre. A altas frecuencias, los buenos conductores tienen mayor efectividad de aislamiento magnético, aumentando su efectividad al incrementar la frecuencia. En base a esto, debido a aislamiento magnético más efectivo, se seleccionará hierro para la jaula de Faraday (ver, Fig. 2.26) [19].

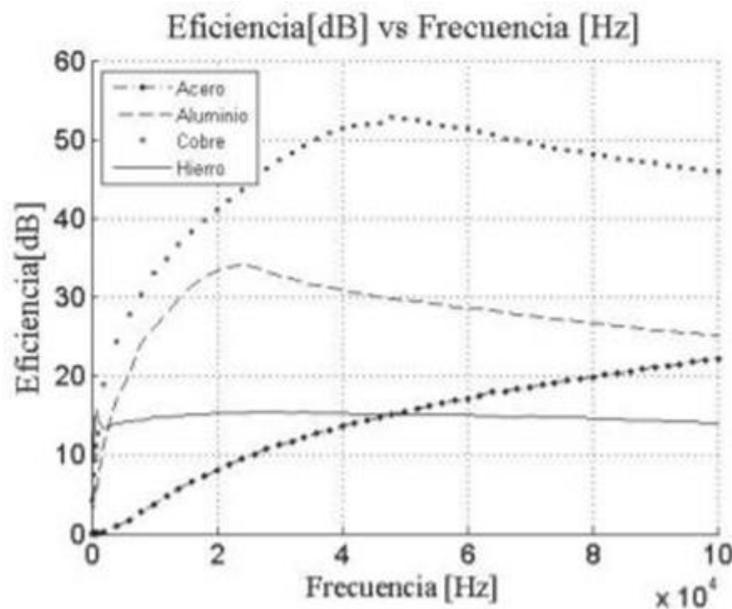


Fig. 2.26. Curva de Eficiencia vs. frecuencia para acero, hierro, cobre, aluminio 60 a 100,000 Hz. Datos experimentales [19].

2.6.4. UNIONES EN LOS BLINDAJES

En la selección de envolventes y cajas para circuitos sometidos a interferencias debe tenerse en cuenta la continuidad eléctrica de las uniones de las piezas metálicas que conforman el blindaje. Estas uniones están unidas mecánicamente, pero muchas veces esta unión no es eléctricamente correcta y pueden tener fugas. Para evitar estas fugas se usan juntas electromagnéticas que mejoran la unión eléctrica entre las piezas. Cuando se configura un blindaje a partir de piezas metálicas a medida, la unión entre ellas debe realizarse con tornillos y arandelas antes de pintarlas, asegurando tener una buena superficie de contacto. Luego, una vez unidas, se pueden pintar.

Este descenso de efectividad depende principalmente de la máxima dimensión lineal de la ranura (no de su superficie), de la impedancia de onda incidente y de la frecuencia de la fuente del campo. La ranura se comporta como una antena que redirecciona el campo que le llega desde el exterior hacia dentro o desde el interior hacia fuera [19].

Un número elevado de pequeñas ranuras provocan un descenso menor de efectividad que una gran ranura con la misma superficie total, al provocar una menor distorsión en las líneas de campo. Una junta estrecha y larga puede causar más fugas que una fila de agujeros con un área total mayor, una ranura se comporta similar a un dipolo equivalente con polarización [19].

2.7. PROPUESTA DE DISTRIBUCIÓN EN PLANTA

Teniendo ya la percepción de las consecuencias del uso del equipo, dimensiones aproximadas y adecuaciones de espacio se puede plantear una propuesta de espacio, se presenta una tentativa de diseño final ya instalado en planta sin dimensiones establecidas a modo de brindar una aproximación del diseño de planta final que se planea tener en el laboratorio de metalurgia de la escuela de ingeniería mecánica (ver, Figs. 2.27 y 2.28) [19].

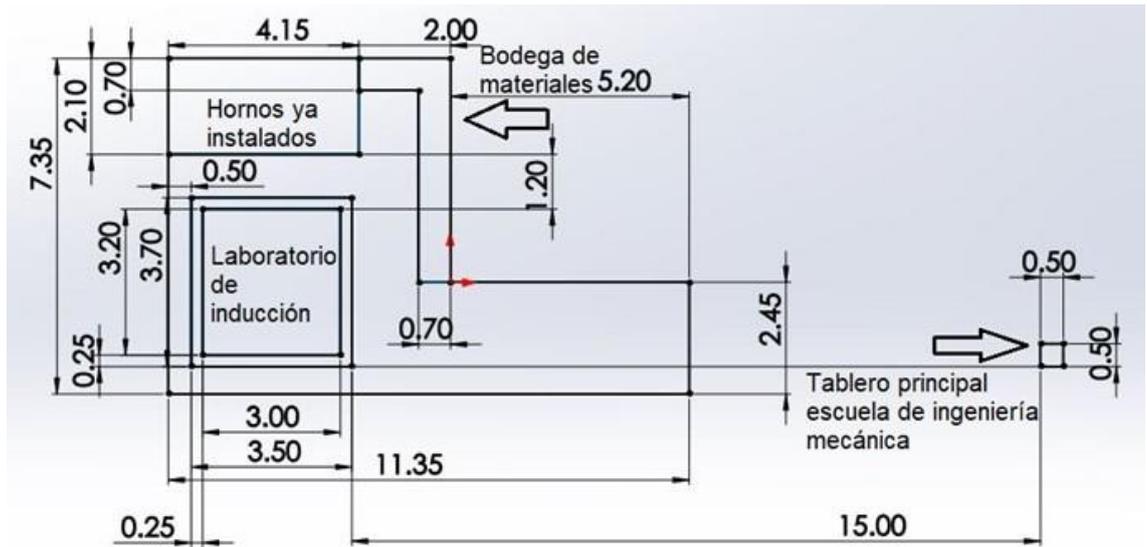


Fig. 2.27. Distribución en planta (distancia en m).

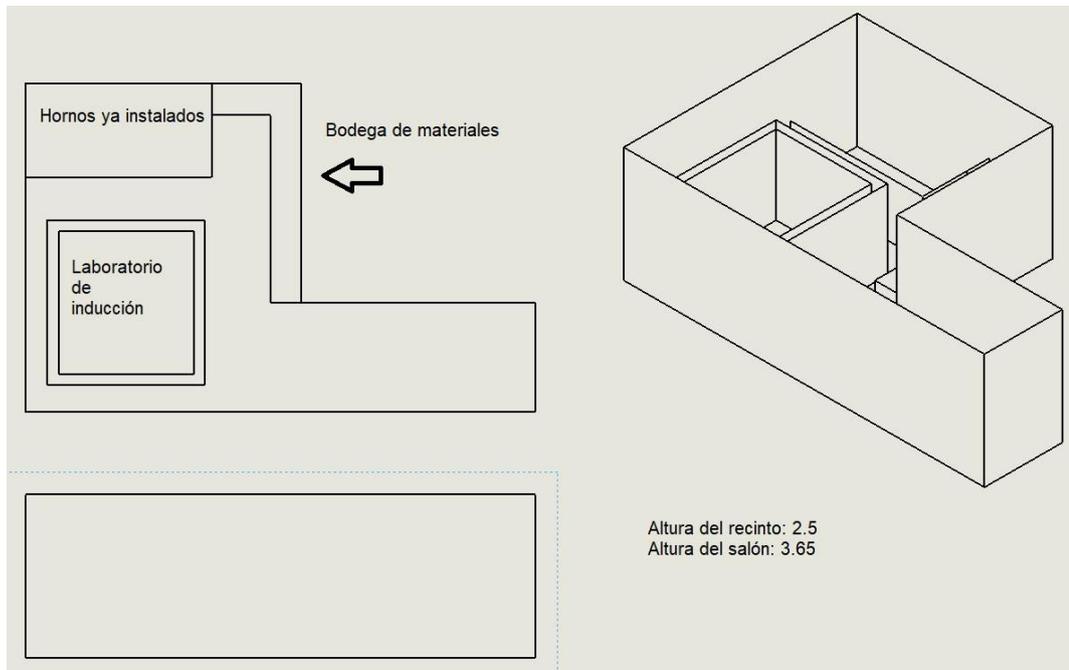


Fig. 2.28. Diferentes vistas de planta (distancia en m).

3. FACTIBILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO

Ya que se han evaluado todos los factores que estarán relacionados con el proyecto se debe de realizar en análisis pertinente para poder comprobar si el proyecto cumple los requisitos mínimos para ser implementados en nuestro entorno evaluando todos los requerimientos que esto implica. Las necesidades económicas, impacto ambiental y de salubridad son cuestiones que se analizarán durante este apartado para poder brindar una perspectiva arbitraria acerca de qué tan aceptable es la implementación de un proyecto de esta índole en la Universidad de El Salvador, más en específico, en la escuela de ingeniería mecánica.

La realidad socioeconómica, factores de riesgo, impacto educativo sobre los estudiantes que harán uso de los equipos y recursos que serán parte del laboratorio serán claves para dejar saber a las autoridades pertinentes si el proyecto será viable para el futuro académico de la escuela y las necesidades de la implementación y mantenimiento.

3.1. REQUERIMIENTOS ENERGÉTICOS Y DE ESPACIO

El primer aspecto, es evaluar las necesidades de energía y de espacio, las cuales son las principales variables a considerar al momento de la planeación; si no se cuenta con la alimentación energética y/o el espacio para colocar los equipos, es imposible continuar con el análisis ya que estos no podrán funcionar sin un espacio de trabajo y las condiciones energéticas pertinentes.

3.1.1. REQUERIMIENTOS ENERGÉTICOS

Al remontarnos al análisis de variables, se llegó a la conclusión que se requiere un mínimo de 208 W y un máximo de 177 kW de acuerdo a los datos obtenidos con anterioridad (ver, Tablas 2.4 y 2.5).

Sobre la base de lo anterior, se puede tomar del catálogo de Eldec anteriormente citado, que se requiere un voltaje de 400 voltios en sistema trifásico con una corriente de 400 Amperios; ya que la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador cuenta con un sistema de alimentación trifásico se pueden realizar las mediciones pertinentes para confirmar si la potencia es admisible, en caso no serlo debido a limitantes por horarios laborales, no se ha podido acercarse a la universidad por lo que la recomendación para no incurrir en gastos adicionales en la adquisición de más transformadores, se pueden eliminar ciertos elementos para realizar el tratamiento térmico o incluso reducir dimensiones o descartar tipos de aceros a tratar, así se podrá reacondicionar la potencia requerida, evaluar nuevos equipos con menor potencia y así poder adaptarse a la potencia con la que cuenta la escuela de ingeniería mecánica actualmente. Sin embargo, para efectos de trabajo, se tomará un valor por debajo del seleccionado, de 150 kW, para efectos de análisis de equipos ya citados en el apartado 2, en base a esto, se seleccionará el equipo Eldec PICO MFG/HFG de entre 160 a 400 kHz con un voltaje de 400 Voltios por fase en arreglo trifásico y una corriente de 315 amperios (ver, Fig. 2.18).

Cabe mencionar que este equipo requiere de un sistema de enfriamiento de 50 litros por minuto y deberá de considerarse en el aspecto de costos de uso del equipo.

3.1.2. REQUERIMIENTOS DE ESPACIO

En base al equipo seleccionado, se conocen las dimensiones del mismo, las cuales son 550 de ancho, 910 de altura y 800 de profundidad en mm; lo cual está dentro de las consideraciones del apartado 2.7. Esto nos deja un margen de trabajo de 1.45 m de ancho, 6.2 m de profundidad y la altura de 3 m que se utilizará para el tipo de aislamiento que se ha seleccionado, el cual será la jaula de Faraday del apartado 2.7, debido al espacio sobrante, se puede agregar un sistema de ventilación, bancos de trabajo y el sistema de refrigeración necesarios para que el equipo funcione en óptimas condiciones

tanto como también tener a la mano los equipos de prevención de accidentes y estante con las muestras o los elementos a tratar mediante inducción electromagnética. Cabe mencionar que, debido a la movilidad de los equipos, la jaula de Faraday será construida para que sea desmontable y permita realizar otras actividades en el laboratorio mientras los equipos no estén en uso.

3.2. ASPECTOS LEGALES Y NORMATIVOS

Como todo equipo de trabajo, los riesgos para la salud y medio ambiente están siempre presentes debido al impacto de los mismos. Esto conlleva a que se deba de regular el uso de los equipos en base a riesgos, normas pre establecidas por gobiernos locales, e instancias internacionales son clave para determinar el uso de los equipos en nuestro país, por lo que es necesario ser conocedores de las normas y estatutos que pueden afectar el desarrollo y uso del laboratorio.

3.2.1. ANTECEDENTES DE SEGURIDAD Y SALUD OCUPACIONAL EN EL SALVADOR

En El Salvador la salud ocupacional nace con el nombre de prevención de riesgos profesionales en el año de 1968 adscrita al departamento de medicina preventiva del Instituto Salvadoreño del Seguro Social [20].

En 1911 se consideran por primera vez compensaciones que se derivan de los accidentes de trabajo, pero fue hasta 1950 cuando se emprende la introducción de estos aspectos en la legislación laboral, al promulgar artículos relacionados a la protección y conservación de la vida, salud e integridad corporal [20].

En 1953 se organiza el Departamento Nacional de Previsión Social en una de cuyas dependencias se establece la sección de Higiene y Seguridad Industrial, la cual comenzó la elaboración del “Anteproyecto General de Higiene y Seguridad en el Trabajo” [20].

En 1956 entra en vigencia un paquete de leyes y reglamentos de riesgos profesionales, mismo que son aplicados en toda la República y dentro del régimen del Seguro Social. En 1963 estas leyes y reglamentados quedaron registrados en el Código de Trabajo y en 1971 se decretó el “Reglamento sobre Seguridad e Higiene en los Centros de Trabajo” [20].

En 1983 se creó la Constitución de la República en donde se hace referencia al bienestar de los trabajadores. En 1,986 se crea el Código de Salud, el cual establece cuales son las obligaciones del Ministerio de Salud para vigilar a las empresas que no cumplan con los requisitos de seguridad e higiene [20].

En el año 2000 se ratifica el Convenio sobre Seguridad y Salud de los Trabajadores y Medio Ambiente de Trabajo, en el año 2002 se aprueba el Reglamento de la Ley de Equiparación de Oportunidades para las Personas con Discapacidad. En 2010 se aprueba la Ley General de Prevención de Riesgos en Lugares de Trabajo creada para establecer los requisitos de seguridad y salud ocupacional que deben aplicarse en los lugares de trabajo, a fin de establecer el marco básico de garantías y responsabilidades que responda a un adecuado nivel de protección de la seguridad y salud de los trabajadores ante los riesgos derivados de las labores que realizan [20].

3.2.2. SERIE DE NORMAS OHSAS 18000

La normativa OHSAS 18000, dando inicio así a la serie de normas internacionales relacionadas con el tema "Salud y Seguridad en el Trabajo", que viene a complementar a la serie ISO 9000 (calidad) e ISO 14000 (Medio Ambiente) [20].

La Norma OHSAS 18001 ha sido diseñada en los mismos parámetros y como herramienta de gestión y mejora toman como base para su elaboración las normas 8800 de la British Standard, basada en el ciclo de mejora continua [20].

Participaron en su desarrollo las principales organizaciones certificadoras del mundo, abarcando más de 15 países de Europa, Asia y América [20].

Su principal objetivo es el de proporcionar a las organizaciones los elementos de un sistema de gestión de seguridad y salud ocupacional eficaz y que sea posible de integrar con otros requisitos de gestión, de forma de ayudarlas a alcanzar sus objetivos de seguridad y salud ocupacional [20].

Sus principales ventajas son que las normas son aplicables a cualquier tamaño y tipo de empresa, no establece criterios específicos para el control de los riesgos de seguridad y salud ocupacional también proporciona un sistema estructurado para lograr el mejoramiento continuo y contiene requisitos que pueden ser objetivamente auditados para fines de certificación y/o auto-declaración [20].

3.2.3. REGLAMENTO GENERAL SOBRE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL SALVADOR

Este reglamento data de 1971, y tiene por objeto establecer los requisitos mínimos de Seguridad e Higiene en que deben desarrollarse las labores en los centros de trabajo, sin perjuicio de las reglamentaciones especiales que se dicten para cada industria en particular [20].

En el Título I, denominado Disposiciones Preliminares, Capítulo I, artículo 1, hace mención que el objetivo de este reglamento es establecer los requisitos mínimos de higiene y seguridad en los centros de trabajo, sin perjuicio de las reglamentaciones especiales que se dicten para cada industria en particular [20].

En el Título II, denominado de la Higiene en los Centros de Trabajo, Capítulo I, Los edificios, sus artículos 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10, están dirigidos a establecer los requisitos necesarios que debe contar un centro de trabajo en lo que se refiere a infraestructura, servicios básicos, características específicas de acuerdo a cada puesto. En el Capítulo II denominado de La Iluminación, artículos 11 y 12, se mencionan las características en cuanto a

iluminación que de preferencia deberán poseer los centros de trabajo de acuerdo con el tipo de actividad que en el que se desempeñe [20].

En el Capítulo III, denominado De la Ventilación, artículos 13, 14, 15, 16, 17, 18, hace énfasis en algunos aspectos que se deben de tomar en cuenta para evitar ocasionar una enfermedad ocupacional debido a la mala ventilación del lugar, donde se llevan a cabo las labores de trabajo, además proporciona recomendaciones y sugerencias de acuerdo al tipo de actividad que se desarrolla, las que deben tomarse en cuenta con el objeto de reducir los riesgos a desarrollar y sufrir de enfermedades profesionales [20].

En el Capítulo IV denominado De la Temperatura y Humedad Relativa, artículo 19, se menciona que la temperatura y la humedad en locales cerrados de trabajo, deberán ser mantenidos dentro de los límites permisibles con el objeto de evitar molestias en la salud de los trabajadores y además se debe de proveer a éstos de protección adecuada en caso de temperaturas no equilibradas [20].

En el Capítulo V denominado De los Ruidos, artículos 20 y 21, menciona que hay un ente encargado para proteger a los trabajadores de los ruidos superiores a los 80 decibeles y está en el Departamento Nacional de Previsión Social. Así como también algunas recomendaciones a poner en práctica con el objeto de reducir la intensidad del ruido que es producido [20].

En los Capítulos VI, VII, VIII, IX, X, XI, denominados respectivamente Locales de espera, comedores, dormitorios, de los exámenes médicos, del servicio de agua y de los sanitarios, en sus respectivos artículos presentan algunas determinaciones importantes que deben ser tomadas en cuenta, con el objeto de proporcionar un lugar de trabajo más digno y comfortable para el trabajador, y así éste realice de forma adecuada sus labores cotidianas y sienta que es importante para la empresa su bienestar personal [20].

En el Capítulo XII, Orden y Aseo de Locales, y en el XIII denominado Asientos para los trabajadores, en sus artículos respectivos se hace mención de algunas normas básicas a seguir con el objeto de que los lugares de trabajo sean más agradables, limpios, seguros y cómodos, tanto para los trabajadores como para el medio que le rodea [20].

En el Título Tercero, de la Seguridad en los centros de trabajo en sus capítulos I y II denominados Medidas de Previsión y de la Seguridad en las ropas de trabajo, dice que las normas de seguridad se deben de respetar cuando se está efectuando un trabajo que requiera hacer uso de maquinaria, equipo, o cualquier elemento que se encuentre en movimiento y que pueda ocasionar un accidente de trabajo, además se debe tener cuidado con el tipo de ropa y equipo de protección que se porta a la hora de efectuar una actividad, ya que debe ser totalmente compatible con el tipo de trabajo a desempeñar [20].

En algunos casos puede servir de protección y en otros convertirse en una acción peligrosa y ocasionar accidentes, también se debe de mantener precaución cuando se trabaja con materiales inflamables o cualquier otra actividad que pueda representar un peligro para el trabajador y ocasione en éste algún daño que afecte su normal desempeño. Además, hace mención que, en todo establecimiento industrial, taller, local o lugar de trabajo de cualquier índole o naturaleza se debe de cumplir con las condiciones mínimas de previsión en materia de Seguridad [20].

El Título Cuarto denominado Disposiciones Generales, regula de forma muy general lo relativo a los equipos de protección personal; y por otra parte trata de las infracciones originadas por no cumplir con este reglamento [20].

3.2.4. CONVENIO CON LA OIT SOBRE SEGURIDAD Y SALUD DE LOS TRABAJADORES

De los convenios ratificados por El Salvador ante la OIT, el número 155 "Sobre Seguridad y Salud de los Trabajadores y Medio Ambiente de Trabajo", es el que regula de forma exclusiva todos los aspectos relacionados en esta materia [20].

Este convenio fue ratificado por El Salvador mediante Decreto Legislativo número 30 de fecha 15 de junio de 2000; y por lo tanto es Ley de la República. Su estructura se divide en cinco partes [20]:

Parte I

Campo de Aplicación. Este convenio se aplica a todas las ramas de la actividad económica incluida la administración pública [20].

Parte II

Principios de una política nacional de SSO. Establece que todo Estado que ratifica el convenio deberá, en consulta con las organizaciones más representativas de empleadores y trabajadores, formular, poner en práctica y reexaminar periódicamente una política nacional en esta materia [20].

Parte III

Acción a nivel Nacional. Establece que deberá adoptarse por vía legislativa o reglamentaria en consulta con las organizaciones representativas de Empleadores y Trabajadores, las medidas necesarias para dar efecto a esta política nacional de SSO [20].

Estipula que el control de la aplicación de las leyes y reglamentos de seguridad e higiene y medio ambiente de trabajo, deberá estar asegurado por un sistema de inspección apropiado y suficiente. Asimismo, dispone que el sistema de control deba prever sanciones adecuadas en caso de infracción a dicha normativa legal. Finalmente prescribe que deberán tomarse las medidas a fin de promover la inclusión de las cuestiones de seguridad, higiene y medio ambiente de trabajo en todos los niveles de enseñanza y formación, incluida la enseñanza superior técnica, médica y profesional. Todo con el objeto de satisfacer las necesidades de formación de todos los Trabajadores [20].

Parte IV

Acción a nivel de empresa. Esta parte establece aspectos generales de gestión de la prevención de riesgos laborales, los cuales deberán ser desarrollados en leyes secundarias; asimismo sienta las bases para implementación de programas y políticas de seguridad y salud ocupacional al interior de las empresas, haciendo énfasis que la cooperación entre empleadores y trabajadores, deberá ser un elemento esencial en las medidas organizativas que se tomen en esta materia. Por otra parte, estipula que las medidas de seguridad e higiene en el trabajo no deberán implicar ninguna carga financiera para los trabajadores [20].

Parte V

Disposiciones Finales. Establece aspectos formales referentes a la ratificación del convenio, y regula las funciones de la oficina internacional del trabajo en este aspecto [20].

3.2.5. PROTOCOLO DEL CONVENIO 155 DE LA OIT

Este Protocolo fue ratificado por El Salvador en abril de 2005, y es uno de los que lo adoptado hasta la fecha. Regula principalmente el tema de las estadísticas de accidentes de trabajo y enfermedades profesionales [20].

Parte I

Definiciones: establece las ya por todas conocidas definiciones de accidente de trabajo y enfermedad profesional, e introduce el termino suceso peligroso [20].

Parte II

Sistemas de Registro y Notificación: manda a los Estados que exijan a las empresas a llevar en su interior un registro de siniestralidad laboral, y estipula también la obligación de notificar los accidentes de trabajo, enfermedades profesionales y sucesos peligrosos [20].

Parte III

Estadísticas Nacionales: exige a los Estados que lo ratifiquen publicar anualmente las estadísticas sobre siniestralidad laboral siguiendo sistemas de clasificación que sean compatibles con los sistemas internacionales establecidos, y que sirvan de punto de referencia a las distintas acciones que se implementen a nivel nacional para mejorar las condiciones de salud en el trabajo [20].

La Normativa Internacional ratificada por El Salvador ya está enmarcada dentro del nuevo enfoque de la SSO, que exige tanto a nivel de empresa como a nivel nacional una serie de entidades e instrumentos a través de los cuales se planifique la prevención de riesgos laborales, de los cuales la mayoría no están contemplados en la legislación actual [20].

3.2.6. INSTITUCIONES NACIONALES E INTERNACIONALES QUE VELAN POR LA SALUD Y SEGURIDAD OCUPACIONAL EN EL SALVADOR

En El Salvador, al igual que en la mayoría de países, el trabajador goza de la protección del Estado por medio de diferentes instituciones que velan por la seguridad y salud en el trabajo; quienes a través de inspecciones que sus entidades realizan identifican situaciones que representan peligro para los trabajadores en sus actividades y medio ambiente. Igualmente, al realizar asesorías y capacitaciones buscan eliminación y corrección de los principales problemas generadores de accidentes y enfermedades profesionales. En vista de lo anterior, a continuación, se presentan aquellas instituciones en El Salvador que velan por la seguridad y salud ocupacional [20].

Tabla 3.1. Instituciones que velan por la salud y seguridad ocupacional en El Salvador [20].

Nombre de la institución	Descripción
Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social (MSPAS)	Incluye en sus inspecciones para otorgar permisos de funcionamiento, aspectos ligados a la Seguridad y Salud en el Trabajo, tales como: equipos de protección personal, manejo de sustancias químicas, calidad del agua que ingieren los trabajadores, etc., amparados en el Código de Salud. Además de realizar actividades de seguimiento y control, los Inspectores formulan y gestionan proyectos.
Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN).	Este ministerio por medio del reglamento especial en material de sustancias, residuos y desechos peligrosos aborda aspectos relacionadas al cuidado de la salud y medio ambiente, así como las relacionadas al manejo de sustancias peligrosas siendo estas normativas complementarias con las establecidas en la ley de prevención de riesgos en los lugares de trabajo y con lo reglamentado en el código de trabajo. Pues la utilización, traslado e importación de sustancias peligrosas está regido por la ley de medio ambiente, en los artículos 21, 57, 59 y 60 entre otros. Para prevenir la contaminación por sustancias, residuos y desechos peligrosos, y con el propósito de lograr el manejo ambientalmente adecuado de los mismos.
Cuerpo de Bomberos de El Salvador	El cuerpo de bomberos institución dependiente del ministerio de gobernación efectúa por medio de inspecciones la aplicación de las medidas de emergencia correctas en los lugares de trabajo. También vela porque todas aquellas condiciones relacionadas con la infraestructura, sustancias inflamables y peligrosas tengan un control adecuado
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)	Esta entidad asiste a desarrollar y crear normas técnicas relacionadas a la seguridad y salud ocupacional y otros temas. En la actualidad el consejo nacional de ciencia y tecnología ha desarrollado normas técnicas para las diferentes actividades industriales, de comercio y de servicios denominadas NSO (norma salvadoreña obligatoria) y NSR (norma salvadoreña recomendada).

Continúa.

Continuación.- Tabla 3.1. Instituciones que velan por la salud y seguridad ocupacional en El Salvador [20].

Nombre de la institución	Descripción
Organización Panamericana de la Salud (OPS)	Esta organización está apoyando la formulación y difusión de programas y metodologías educativas de prevención de riesgos laborales en diferentes sectores económicos del país
Centro Regional de Seguridad y Salud Ocupacional (CERSSO)	El departamento de trabajo de los estados unidos ha patrocinado el proyecto regional de seguridad y salud ocupacional para los siete países centroamericanos y la república dominicana.

3.3. PROPUESTA DE MANUAL DEL USUARIO Y SALUD OCUPACIONAL

El sistema de gestión de seguridad y salud ocupacional es el conjunto de actividades o medidas organizativas que debe adoptar cualquier lugar en el que se desempeñen labores en todas las áreas de la misma con el fin de evitar o disminuir los riesgos derivados del trabajo, cuyo objetivo principal es el diseño de todas estas actividades.

La primera fase para la elaboración de los manuales es la planeación, misma que es indispensable para garantizar la calidad en la elaboración de los mismos, para precisar los pasos que se deben seguir y en qué orden para el sistema de gestión de seguridad y salud ocupacional.

El conocimiento previo obtenido del diagnóstico elaborado al sector en estudio, de las condiciones actuales de los equipos que se planean utilizar y la ubicación de los mismos, permitirá desarrollar un plan de trabajo adecuado y acorde a la situación real.

3.3.1. CONCIENTIZACIÓN DE LOS ENCARGADOS

Los lineamientos de salud y seguridad ocupacional establecen las condiciones y acciones que son necesarias para la seguridad de las personas, pero se debe establecer los mecanismos que permitan que los involucrados cumplan con las medidas que se definan para mejorar las condiciones de trabajo y que las normas de seguridad se cumplan.

Esto se logrará por medio de las capacitaciones a los encargados o usuarios externos del laboratorio, las cuales servirán a fin de brindar la información de higiene y seguridad ocupacional y todo lo relacionado a las áreas de trabajo y el comportamiento dentro de las instalaciones.

Dichas capacitaciones permitirán dar a conocer a los encargados la forma de controlar y reducir los riesgos inherentes a las actividades que desarrollarán los estudiantes durante las sesiones de práctica para definir las medidas preventivas y correctivas. Los encargados deberán transmitir el conocimiento adquirido al grupo de estudiantes de los cuales estarán a cargo, a fin de que estos puedan desarrollar las actividades de seguridad y salud ocupacional necesarias para guardar las condiciones de seguridad en sus puestos de trabajo.

Dentro de los temas a introducir a la seguridad y salud ocupacional a los trabajadores y trabajadoras son los siguientes:

- Riesgos Laborales (específicos de una determinada actividad), y medidas preventivas a adoptar.
- La cultura de la prevención.
- Condiciones de trabajo inseguras.
- Equipos de protección personal para la seguridad y salud en el trabajo que se debe utilizar.
- Prevención y combate de incendios.
- Cómo actuar en caso de emergencias.
- Manejo y almacenamiento de mercancías peligrosas.
- Los accidentes como resultado del comportamiento inadecuado.

3.3.2. REQUERIMIENTOS PARA LA CREACIÓN DE UN PROGRAMA DE SALUD Y SEGURIDAD OCUPACIONAL DENTRO DEL LABORATORIO

En primera instancia se necesitará del recurso informático, una computadora e impresora para desarrollar las actividades necesarias para la implantación del sistema de gestión por medio de la propuesta de diseño del sistema de gestión de seguridad y salud ocupacional.

Posteriormente se deberán de establecer los requerimientos de equipo de señalización y equipo de protección personal, extintores y otros equipamientos, los cuales se deberán adquirir para el funcionamiento de los manuales de seguridad, estos también dependerán de las actividades que se realizarán durante las sesiones de laboratorio.

Debido a factores de costos en infraestructura de las instalaciones no se espera mayores cambios, más bien una adaptación, ubicación de áreas de trabajos, una redistribución de las áreas de ser necesario. Todo ello en búsqueda de controlar y reducir los riesgos identificados en las actividades a realizar durante las prácticas de laboratorio.

3.3.3. SEGURIDAD DEL USUARIO PARA CON LOS EQUIPOS A UTILIZAR EN EL LABORATORIO

Debido a que los equipos ya cuentan con un manual del usuario, es necesario apegarse a las indicaciones del fabricante, esto brindará mayor fidelidad del funcionamiento de los mismos y también, en caso, de necesitar hacer uso de la garantía, se podrá estar seguro que no ha existido ningún factor externo fuera de los estatutos que pueda afectar la garantía.

Los aspectos para la seguridad del usuario al utilizar los equipos podrán tomarse como generales para cualquier laboratorio de tratamientos térmicos. Guantes, protección facial, auditiva y corporal, calzado de seguridad y distancia prudencial de los equipos establecida por el fabricante serán los requerimientos mínimos a tener en cuenta para el manejo de los equipos, también conocer la ubicación de los equipos de seguridad y botiquín en caso de emergencias o accidentes será prioridad al iniciar cada sesión de laboratorio.

3.4. PROPUESTA DE PLAN DE MANTENIMIENTO

Para el mantenimiento de los equipos de laboratorio, se deberá de tener seguir las recomendaciones del fabricante para mantenimiento

preventivo, en caso de necesitar un mantenimiento correctivo, será necesario contactar al fabricante para recibir ayuda o indicaciones directamente de ellos para realizar dicho mantenimiento a fin de no comprometer el buen funcionamiento y garantía de los equipos. De ser necesario, enviar los equipos fuera para el correcto mantenimiento proporcionado por el fabricante deberá estar siempre contemplado en los planes de mantenimiento.

En general, la limpieza del área de trabajo, calibración de los equipos en base a los manuales y revisión constante del inventario de materiales de trabajo, equipos de protección y seguridad será necesario para un mantenimiento preventivo de los equipos.

Como mantenimiento adicional, la revisión constante de la jaula de Faraday que se construirá a base de aluminio para el aislamiento de los equipos a fin de detectar cualquier grieta o daño que esta pueda presentar para realizar reparaciones pertinentes y prevenir fugas o crecimiento de las grietas.

El mantenimiento deberá de ser ejecutado por los encargados del laboratorio. Una revisión semanal de los equipos y materiales será prudencial para tener una buena calibración de las acciones preventivas que se tomarán en caso que se encuentre algún tipo de situación de riesgo para los usuarios y/o equipos. Debido a la situación de la pandemia del COVID-19, no se pudo establecer contacto con la empresa Eldec, fabricante de los equipos estipulados en el laboratorio, por lo que el plan de mantenimiento se mantendrá a niveles generales para poder presentar una propuesta concreta cuando se cuente con mayor información por parte del fabricante.

3.4.1. RUTINAS DE MANTENIMIENTO

Para poder generar un plan de mantenimiento óptimo se debe de generar una rutina a seguir a fin de minimizar el riesgo de necesitar un mantenimiento correctivo, el cual, dejará inhabilitado el laboratorio generando atrasos en las sesiones y demás inconvenientes que esto puede generar. Para esto, una rutina sugerida puede ser la siguiente (ver, Tabla 3.2).

Tabla 3.2. Propuesta de rutinas de mantenimiento para laboratorio de tratamientos térmicos superficiales por inducción.

Rutina	Frecuencia	Personal requerido	Equipo necesario
Mantenimiento básico: Revisión de equipos en búsqueda de daños en los elementos que lo conforman, revisión de luminarias instaladas y revisión de materiales de uso diario.	Diaria	1, el encargado del laboratorio del día correspondiente a la práctica.	Lentes de seguridad y guantes.
Limpieza general del recinto: Limpieza del piso, revisión de los equipos en búsqueda de suciedad que pueda interferir con las actividades normales del laboratorio.	Semanal	1	Equipo básico de limpieza, lentes de seguridad y guantes.
Revisión de equipos de seguridad y botiquín de emergencias: Revisar que todos los equipos de seguridad estén en óptimas condiciones así como también que los componentes del botiquín estén en buen estado para prevenir cualquier eventualidad.	Diaria	1, el encargado del laboratorio del día correspondiente a la práctica.	Lentes de seguridad y guantes.
Mantenimiento preventivo: En base a las especificaciones del fabricante, realizar la limpieza interna de los componentes de los equipos. Revisión del sistema eléctrico, mantenimiento del sistema de enfriamiento y revisión de la jaula de Faraday a fin de encontrar fallas o grietas.	Mensual	3	Lentes de seguridad, guantes equipo anti estática y de limpieza especificado por el fabricante, probador de corriente y demás indumentaria para revisión de sistemas eléctricos.

3.5. DESARROLLO DEL ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PROPUESTA

Para poder contemplar la viabilidad de implementación del proyecto, se debe de realizar el análisis económico de implementación y de uso de los equipos, para esto, se debe de obtener los datos de costos de adquisición de equipos y de consumo energético.

3.5.1. COSTOS DE EQUIPOS

Debido a la situación de la pandemia por COVID-19, no se recibió respuesta a los intentos de contacto hacia la empresa Eldec, por lo que se tomó en cuenta los valores en mercado de la página Canroon para equipos similares por lo que se obtuvo la siguiente información de costos, para los costos de la jaula de Faraday para adecuación del recinto se tomaron datos del sitio web de FREUND El Salvador, también se tomaron costos para el cableado necesario para realizar la instalación de los equipos de la página Foshan Sinfon Electro-Machanical Equipment Co. (ver, Tabla 3.3).

Tabla 3.3. Costos de adquisición de los equipos.

Tipo de equipo	Costo/unidad, \$	Unidades requeridas	Total por adquisición, \$
Generador de inducción	35000.00	1	35000.00
Unidad de control	1200.00	1	1200.00
Bobinas	137.50	3	412.50.00
Cable conductor para realizar la conexión al tablero (costo/m)	17.00	20	340.00
Lámina negra en frío 3/64 pulg (1.10 mm) 1x2 m	25.50	8	204.00
Lámina negra 1/16 pulg (1.55 mm) 2x1 m	33.00	8	264.00
Total			37420.50

3.5.2. COSTO DE EQUIPOS DE PROTECCIÓN

Debido a que el laboratorio será nuevo, también se deberá de tomar en cuenta el costo inicial de la adquisición de los equipos de protección al usuario de los mismos, se presenta a continuación los costos basados en la página de PID (Proveedor de Insumos Diversos El Salvador) para las alfombras aislantes y de Freund El Salvador de los equipos de seguridad básico para un grupo de 10 personas ya que el recinto no admite esa cantidad de personas, se dejará esa cantidad en caso de necesidad de reemplazo inmediato de la indumentaria para no generar ningún tipo de atraso (ver, Tabla 3.4).

Tabla 3.4. Costos de adquisición de equipos de protección.

Tipo de equipo	Costo/unidad, \$	Unidades requeridas	Total por adquisición, \$
Guante protector de nitrilo/poliéster contra altas temperaturas 200 °C T-10	16.00	10	160.00
Lentes de protección policarbonato claro	3.00	10	30.00
Mangas de cuero	11.00	10	110.00
Delantal de cuero	11.25	10	112.50
Alfombra dieléctrica Switchboard	42.36	3	127.08
Total			539.58

Basados en esta información, se puede determinar un aproximado de la inversión inicial de \$ 37960.08 sin costos de instalación y de construcción del recinto, los cuales deberá de cotizar la escuela directamente.

3.5.3. COSTOS DE FUNCIONAMIENTO

Ya teniendo los equipos instalados se debe de tener en consideración los costos energéticos que mensualmente generará el uso de los mismos, sin embargo, debido a que no se tienen datos de los materiales de mantenimiento que se necesitan, se dejará de lado los costos mensuales para mantenimiento, únicamente se tomará en cuenta los costos de agua y electricidad, los cuales han sido basados en los pliegos tarifarios de CAESS y ANDA. En el caso de CAESS, se tomó el pliego tarifario de grandes demandas a media tensión en calidad de resto (5:00 am – 5:59 pm) a partir del 15 de enero de 2021 debido a que las horas de trabajo serán durante los horarios normales de clases de la facultad. Para el caso de ANDA, se tomará el pliego para tarifas no residenciales.

Se debe de tomar en cuenta que, se planea realizar 1 sesión semanal, los días sábados de 8:00 am a 12:00 pm para dar lugar al consumo de energía de los demás equipos durante la semana y no afectar el banco de transformadores de la escuela de ingeniería mecánica en las cuales los equipos trabajarán cuatro horas por sesión y el sistema de enfriamiento trabajará durante 40 minutos para realizar los cálculos de costos de operación (ver, Tabla 3.5).

Tabla 3.5. Costos de funcionamiento.

Cálculo de costos de funcionamientos de los equipos				
Cálculo de costos por uso de agua.				
Consumo de agua (m ³ /min)	Minutos de uso por sesión	Sesiones por semana	Semanas por mes	Total consumido por mes, lt
0.05	40	1	4	80
Costo por consumo de agua		Cargo por alcantarillado		Total costo por consumo de agua
\$ 0.90		\$ 5.00		\$ 77.00
Cálculo de costos por uso de electricidad.				
Consumo de electricidad (kW/h)	Horas de uso por sesión	Sesiones por semana	Semanas por mes	Total consumido por mes, kW
150	0.5	3	4	900
Costo por energía		Cargo por comercialización	Cargo por distribución	Total costo por consumo de electricidad
\$ 0.108224		\$ 12.253858	\$ 6.881023	\$ 278.87
Total costos de funcionamiento				\$ 355.87

3.5.4. OTROS GASTOS DEBIDO A LA PUESTA EN MARCHA DEL PROYECTO

Debido a que, para la implementación de este proyecto se necesitará de transporte de los equipos, instalación eléctrica y de agua para enfriamiento, adquisición de mesas de trabajo y estantes para almacenar materia prima, producto terminado y equipos de protección, se debe de realizar un presupuesto estimado, sumado a esto, un gasto de imprevistos se debe de tomar en cuenta, este presupuesto debe de ser aproximadamente de 15% del total del capital inicial para la puesta en marcha del proyecto. Dicha inversión se muestra a continuación (ver, Tabla 3.6):

Tabla 3.6. Inversión inicial del proyecto.

Tipo de inversión	Costo, \$
Adquisición de equipos del laboratorio.	37420.50
Adquisición de equipo de seguridad.	539.58
Inversión inicial.	37960.08
Instalación e imprevistos (15%).	5694.01
Total	43654.09

CONCLUSIONES

- El beneficio de la implementación del laboratorio de tratamiento térmico superficial, comparado con los costos y condiciones de funcionamiento provoca que el proyecto sea viable debido a las múltiples aplicaciones tanto didácticas como de posibles investigaciones a futuro en el área metalúrgica. Debido a la facilidad de variación de voltajes y corrientes de salida de los equipos también amplía la cantidad de prácticas que se pueden realizar, lo cual aumentaría el conocimiento técnico desarrollado por los estudiantes el cual es el fin principal del desarrollo e implementación del proyecto.
- Dado que el impacto medioambiental es mínimo, el proyecto, en ese aspecto es viable en su totalidad y se puede tomar como un modelo para fomentar el reciclaje ya que los equipos pueden utilizarse para tratamientos en aluminio y plásticos por lo que se puede considerar para el futuro una estación de reciclaje para la Universidad de El Salvador.
- La puesta en práctica de las medidas de seguridad en el laboratorio puede dar lugar a proyectos paralelos de educación de seguridad en planta que beneficiarán al estudiante al tomar las medidas preventivas para trabajar con equipo de inducción y conocer los elementos de seguridad que serán necesarios para las labores cotidianas dentro del laboratorio.
- La viabilidad educativa del laboratorio de tratamientos térmicos por inducción es el principal objetivo del proyecto, la facilidad de prácticas, cantidad de materiales que puede ser utilizado para los tratamientos, conocimientos que pueden ser adquiridos y competitividad a nivel laboral que se puede dar como valor agregado a los estudiantes justifican la inversión monetaria de la implementación, por lo que, en general, el proyecto presenta un panorama prometedor.
- Debido a problemas de comunicación entre intermediarios contactados para hacer las cotizaciones, hubo un impacto en la información técnica de los equipos obtenida, dicho impacto, deberá de tratarse a futuro para obtener información más apegada a la realidad ya que se han manejado datos hipotéticos. El contacto con el fabricante fue un impedimento de gran impacto para el desarrollo del proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Martín, G A. (2015). Investigación e implementación de mecanismo de temple por inducción. Concepción: Facultad de Ingeniería Mecánica Universidad Bio-Bio.
- [2] Bodycote. (2018). Bodycote Servicios. Obtenido de Temple por inducción: <https://www.bodycote.com/es/servicios/tratamiento-termico/temple-y-revenido/temple-por-induccion/>
- [3] Tratamientos Térmicos Biltra. (2019). Temple inducción. Obtenido de Temple inducción: <http://www.biltra.com/tratamientos-termicos/temple-por-induccion/>
- [4] EMAG eldec Induction GmbH. (2019). Eldec.net. Obtenido de Templado Inductivo: <https://www.eldec.net/es/aplicaciones/templado-inductivo.html>
- [5] EFD Induction. (2010). Aplicaciones de calentamiento por inducción.
- [6] Angie Vanessa Silva. (2018). Tratamientos Térmicos. Neiva-Huila: Corporación Universitaria Del Huila “Corhuila”.
- [7] Díaz Del Castillo Rodríguez, Felipe (2012). Aceros, estructuras y tratamientos térmicos. Cuautitlán Izcalli: Universidad Nacional Autónoma de México.
- [8] GH Electrotermia, S.A.U. (2011). GH Group. Obtenido de Temple y revenido: <http://www.ghinduction.com/process/temple-y-revenido/?lang=es>
- [9] Ledesma, J. A. (2013). Desarrollo de un Inversor Resonante para Calentamiento por Inducción Electromagnética. México D.F.: Instituto Politécnico Nacional.
- [10] Revista Visión Electrónica. (s.f.). Diseño e implementación de un calentador por inducción electromagnética para el montaje de rodamientos. Revista Visión Electrónica, 3-22.
- [11] Ambrell Induction Heating Solutions. (2018). Bobinas de trabajo de calentamiento por inducción. Ambrell Induction Heating Solutions, 2-3.
- [12] Carina Elizabeth Paredes Fierro. (2014). Desarrollo de un sistema de procesamiento de plásticos por calentamiento basado en el principio de inducción electromagnética. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- [13] ELDEC, Una empresa del grupo EMAG. (s.f.). Generadores para calentamiento induc (SURATEP, 2014)tivo. ELDEC, 6-27.
- [14] Lee Springs Catalogue. (2002). Resortes de catálogo: Serie 23. Serie 23: Catálogo de productos.

- [15] Ampiro Rodamientos. (2017). Ejes macizos y ejes huecos: catálogo de productos. Alemania.
- [16] Causer. (2010). Causer: catálogo de productos. EEUU.
- [17] Course Hero. (2018). Universidad Nacional del Santa. Obtenido de Universidad Nacional del Santa: <https://www.coursehero.com/file/52651156/187544737-TRATAMIENTO-TÉRMIICO-DE-ENGRANAJES-docxdocx/>
- [18] Fundación para la prevención de riesgos laborales. (2015). Riesgos relacionados con la seguridad en el trabajo. Obtenido de <https://riesgoslaborales.saludlaboral.org/portal-preventivo/riesgos-laborales/riesgos-relacionados-con-la-seguridad-en-el-trabajo/maquinas/>
- [19] Revista española de electrónica. (2019). Los blindajes y la CEM. Obtenido de <https://www.redeweb.com/articulos/los-blindajes-y-la-cem/>
- [20] Arenas Monsalve, Germán (1991). Los Riesgos de Trabajo y la Salud Ocupacional en Colombia. Bogotá. Legis.