



**UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**  
**CARRERA INGENIERÍA MECÁNICA**

Proyecto de investigación previo a la  
obtención del Título de Ingeniero  
Mecánico

**Proyecto de Investigación**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO CALENTADOR POR  
INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA PARA TRATAMIENTO TÉRMICO  
SUPERFICIAL DE ALEACIONES FERROSAS**

**Autores**

Carlos Eugenio Olvera Peña  
William Rafael Montenegro Parco

**Director del proyecto de investigación**

Ing. Gabriel Alejandro Arellano Ortiz. Msc

**Quevedo – Los Ríos - Ecuador**

**2017- 2018**



## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS**

Yo, **Carlos Eugenio Olvera Peña**, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se influyen en este documento.

La Universidad Técnica Estatal de Quevedo, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

**CARLOS EUGENIO OLVERA PEÑA**

**C.I.: 1311154866**

**AUTOR**



## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS**

Yo, **William Rafael Montenegro Parco**, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se influyen en este documento.

La Universidad Técnica Estatal de Quevedo, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

**WILLIAM RAFAEL MONTENEGRO PARCO**

**C.I.: 1718298274**

**AUTOR**



## **CERTIFICACIÓN DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

El suscrito, **ING. GABRIEL ALEJANDRO ARELLANO ORTIZ MSC.** docente de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, certifica que los **Sres. CARLOS EUGENIO OLVERA PEÑA** y **WILLIAM RAFAEL MONTENEGRO PARCO**, realizaron el Proyecto de Investigación de grado titulación “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO CALENTADOR POR INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA PARA TRATAMIENTO TÉRMICO SUPERFICIAL DE ALEACIONES FERROSAS**”, previo a la obtención del título de, **Ingeniero Mecánico**, bajo mi dirección, habiendo cumplido con las disposiciones reglamentarias establecidas para el efecto.

---

**Ing. Gabriel Alejandro Arellano Ortiz, Msc.**

**DIRECTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**



## **CERTIFICADO DEL REPORTE DE LA HERRAMIENTA DE PREVENCIÓN DE COINCIDENCIA Y/O PLAGIO ACADÉMICO**

Por medio de la presente me permito certificar, que los **Sres. CARLOS EUGENIO OLVERA PEÑA** y **WILLIAM RAFAEL MONTENEGRO PARCO**, egresados de la carrera de Ingeniería Mecánica, una vez revisada la tesis de grado titulada “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO CALENTADOR POR INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA PARA TRATAMIENTO TÉRMICO SUPERFICIAL DE ALEACIONES FERROSAS**”, tengo a bien informar que se realizó la revisión respectiva por medio del sistema Urkund, con un porcentaje favorable del **3%**, cumpliendo con el reglamento de Graduación de Estudiantes de Pregrado y la Normativa establecida por la Universidad.

Se adjunta el resultado del sistema URKUND

URKUND	
Documento	<a href="#">Tesis-Calentador-de-inducción- Montenegro y Olvera 4.pdf</a> (D43885476)
Presentado	2018-11-12 11:45 (-05:00)
Presentado por	Ernesto Ruano (eruano@uteq.edu.ec)
Recibido	eruano.uteq@analysis.urkund.com
	3% de estas 31 páginas, se componen de texto presente en 6 fuentes.

---

**Ing. Gabriel Alejandro Arellano Ortiz, Msc.**

**DIRECTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

# **CERTIFICADO DE APROBACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**



**UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**

**TÍTULO**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO CALENTADOR POR  
INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA PARA TRATAMIENTO TÉRMICO  
SUPERFICIAL DE ALEACIONES FERROSAS**

Presentado al Consejo Académico como requisito previo a la obtención del título de  
Ingeniero Mecánico.

**Aprobado por**

---

Ing. José David Barros Enríquez

**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE TESIS**

---

Ing. Ernesto Javier Ruano Herrería  
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE TESIS**

---

Ing. Marcelo Rodrigo García Saquicela  
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE**

**TESIS**

**QUEVEDO – LOS RÍOS - ECUADOR**

2018

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco infinitamente y de manera primordial a Dios por darme la vida y brindarme la salud necesaria para llegar a cumplir este objetivo. De igual manera a mis padres Eugenio y Narcisa, por brindarme el apoyo necesario para subir cada escalón de la vida y cumplir cada objetivo que me propongo.

A mi hermana, que con sus consejos me ha ayudado a afrontar los retos que se me han presentado a lo largo de mi vida.

De igual manera agradecer al Ing. Gabriel Alejandro Arellano Ortiz por toda la colaboración brindada, durante la elaboración de este proyecto, por su ayuda práctica y por su moralidad en su profesión como docente, por sus consejos, que ayudan a formarte como persona e investigador.

A la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, por darme la oportunidad de estudiar y lograr este título de Ingeniero Mecánico.

**Carlos Eugenio Olvera Peña**

**“El valor es la más importante de todas las virtudes, porque sin coraje, no puedes practicar ninguna otra virtud de forma consistente”**

## **AGRADECIMIENTO**

Todos estamos destinados a vivir el fracaso al menos una vez en la vida, pero vale más perder algunos combates luchando por alcanzar nuestros sueños y anhelos, que ser derrotados sin entender si quiera por qué estamos luchando.

En estas líneas quiero agradecer a Dios por haberme permitido culminar este ciclo de preparación profesional, a todas las personas que de una u otra manera estuvieron conmigo en los momentos difíciles, de alegría, y tristeza. Estas palabras son para ustedes. A mis padres por todo su amor, comprensión y apoyo, pero sobre todo gracias infinitas por la paciencia que me han tenido. No tengo palabras para agradecerles las incontables veces que me brindaron su apoyo en todas las decisiones que he tomado, gracias por darme la libertad de desenvolverme como ser humano

Agradezco a la Universidad Técnica Estatal de Quevedo por la oportunidad de culminar con mis estudios, al Ing. Gabriel Arellano por la tutoría para el desarrollo del presente proyecto, a la colaboración directa de los Docentes, Ing. Jorge Luis Guadalupe Almeida, por sus conocimientos impartidos y la toma de decisiones.

**William Rafael Montenegro Parco**

**“El coraje no siempre ruge, algunas veces sólo es una silenciosa pero poderosa voz interior que dice; mañana lo volveré a intentar”**

## **DEDICATORIA**

Este proyecto de investigación, si bien ha demandado de mucho esfuerzo y dedicación, no hubiese sido posible su culminación sin la cooperación desinteresada de todas y cada una de las personas que me acompañaron en el recorrido laborioso de este trabajo y muchas de las cuales han sido un soporte muy fuerte en momentos de angustia y desesperación, el presente suscrito va dedicado a Dios, por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el ciclo de preparación profesional en especial a mis padres.

**Carlos Eugenio Olvera Peña**

## **DEDICATORIA**

Este proyecto de investigación, si bien ha demandado de mucho esfuerzo y dedicación, no hubiese sido posible su culminación sin la cooperación desinteresada de todas y cada una de las personas que me acompañaron en el recorrido laborioso de este trabajo y muchas de las cuales han sido un soporte muy fuerte en momentos de angustia y desesperación, el presente suscrito va dedicado a Dios, por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el ciclo de preparación profesional en especial a mi padre.

**William Rafael Montenegro Parco**

## RESUMEN

Las electrotecnologías son sistemas y equipos que utilizan electricidad para producir y procesar partes y piezas mecánicas de maquinaria. También pueden ser usados en procesos industriales tales como tratamientos térmicos en metales, y calentamiento en superficies de materiales ferromagnéticos de forma eficiente permitiendo reducir los costos de producción, aumentando la productividad, así como mejorar la seguridad y condiciones de trabajo. La fabricación de los componentes de maquinaria agrícola engloba una gran cantidad de procesos de manufactura como son: maquinado, cepillado y tratamientos térmicos superficiales, entre otros. La gran mayoría de los componentes mecánicos son fabricados a partir de aceros aleados, aceros al carbono de baja y media aleación los cuales son posteriormente tratados térmicamente para mejorar sus propiedades mecánicas como la dureza superficial. Uno de los tratamientos térmicos más utilizados es el temple superficial, el cual tiene como objetivo principal endurecer la superficie del componente mecánicos para mejorar su resistencia al desgaste por fricción. La inducción electromagnética, o simplemente "inducción", es una técnica de calentamiento moderna para materiales eléctricamente conductores como los metales obteniéndose capas finas de austenita en ciclos cortos de tratamiento. Los resultados obtenidos en la memoria son: el análisis termodinámico de la pieza de trabajo, el diseño del inductor se lo realizó mediante el software COIL 32v 11.5, la simulación del comportamiento térmico se lo hizo con el software COMSOL Multiphysics y SOLIDWORKS.

**Palabras claves:** Aceros Aleados, Inducción Electromagnética, Tratamiento térmico superficial.

## ABSTRACT

Electrotechnologies are systems and equipment that use electricity to produce and process mechanical parts and parts of machinery. They can also be used in industrial processes such as heat treatment in metals, and heating on surfaces of ferromagnetic materials efficiently allowing to reduce production costs, increasing productivity, as well as Improve safety and working conditions The manufacture of agricultural machinery components includes a large number of manufacturing processes such as: machining, brushing and surface heat treatments, among others. The vast majority of mechanical components are manufactured from alloyed steels, low-and medium-alloy carbon steels which are subsequently thermally treated to improve their mechanical properties such as surface hardness. One of the most used heat treatments is the surface hardening, which has as its main objective to toughen the surface of the mechanical component to improve its resistance to friction wear. Electromagnetic induction, or simply "induction", is a modern heating technique for electrically conductive materials such as metals obtaining thin layers of austenite in short treatment cycles. The results obtained in the memory are: The thermodynamic analysis of the work piece, the design of the inductor was made by the software COIL 32v 11.5, the simulation of thermal behavior was done with the software COMSOL Multiphysics and SOLIDWORKS.

**Key words:** steels, electromagnetic induction, surface heat treatment.

## ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
1.1. Problema de la investigación.....	4
1.1.1. Planteamiento del problema.....	4
1.1.2. Formulación del problema .....	5
1.1.3. Sistematización del problema .....	6
1.2. Objetivos .....	7
1.2.1. Objetivo general.....	7
1.2.2. Objetivos Específicos.....	7
1.3. Justificación.....	8
CAPÍTULO II FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN.....	9
2.1. Definiciones.....	10
2.1.1. Eje .....	10
2.1.2. Hornos de Inducción electromagnética.....	10
2.1.3. Inducción electromagnética .....	10
2.1.4. Bobina de inducción .....	10
2.1.5. Transformador .....	11
2.1.6. Tratamiento térmico superficial.....	11
2.1.7. Templabilidad del acero.....	11
2.1.8. Diseño asistido por computadora (CAD).....	11
2.1.9. Campo magnético .....	12
2.1.10. Ensayo de dureza .....	12
2.2. Marco referencial .....	13
2.2.1. Endurecimiento superficial de aleaciones ferrosa.....	13
2.2.2. Principio de calentamiento por inducción electromagnética .....	14
2.2.3. Aplicaciones.....	18
2.2.4. Ley de Lenz .....	19
2.3. Variables de control de un sistema de calentamiento por inducción.....	20
2.3.1. Energía transferida en forma de calor .....	20
2.3.2. Profundidad de penetración .....	21
2.3.3. Resistividad equivalente .....	22
2.3.4. Factor de acoplamiento .....	22
2.3.5. Impedancia superficial .....	23
2.3.6. Resistencia por vuelta .....	24

2.3.7.	Rendimiento del calentamiento.....	24
2.3.8.	Frecuencia crítica.....	25
2.4.	Diseño básico de inductores.....	25
2.4.1.	Geometrías de bobinas de inducción.....	25
2.4.2.	Componentes de un sistema de calentamiento por inducción.....	26
2.4.3.	Principio de fabricación.....	27
2.5.	Aleaciones Ferrosas.....	30
2.5.1.	Características del Acero AISI-SAE 4340.....	30
2.5.2.	Influencia de los elementos de aleación en las propiedades del acero.....	32
2.5.3.	Fases del acero.....	34
2.5.4.	Propiedades electromagnéticas de los materiales ferrosos.....	35
2.5.5.	Aplicaciones.....	35
2.5.6.	Descarburización del acero.....	35
2.5.7.	Características de materiales endurecidos en la superficie.....	36
2.5.8.	Metalografía.....	37
2.5.9.	Norma ASTM E -3.....	37
2.5.10.	Dureza Norma E 384.....	38
	<b>CAPÍTULO III MÉTODOLÓGÍA DE LA INVESTIGACION.....</b>	<b>40</b>
3.1.	Localización.....	41
3.2.	Límites geográficos.....	41
3.3.	Tipos de investigación.....	42
3.3.1.	Investigación bibliográfica.....	42
3.3.2.	Investigación descriptiva.....	42
3.3.3.	Investigación aplicada.....	42
3.4.	Métodos de investigación.....	43
3.4.1.	Método Analítico.....	43
3.4.2.	Alternativas de diseño.....	43
3.4.3.	Método bibliográfico.....	50
3.4.4.	Método Experimental.....	50
3.5.	Fuentes de recopilación de información.....	50
3.6.	Diseño de la Investigación.....	51
3.6.1.	Proceso del Diseño.....	52
3.6.2.	Instrumentos de la investigación.....	53
3.7.	Recursos humanos y materiales de investigación.....	53
3.7.1.	Recurso Humano.....	53
3.7.2.	Recurso Material.....	53
	<b>CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>55</b>

4.1.	Análisis Geométrico del inductor.....	56
4.1.1.	Bobina de inducción .....	56
4.1.2.	Manufacturación de la bobina.....	57
4.1.3.	Descripción del modelo .....	57
4.2.	Simulación in CAD .....	60
4.3.	Análisis electrónico del prototipo.....	62
4.4.	Diseño del calentador por inducción electromagnética.....	69
4.5.	Análisis térmico del AISI 4340 .....	71
4.6.	Diseño de la estructura de la máquina.....	73
4.2.1.	Diseño del riel deslizante .....	75
4.7.	Selección de los componentes eléctricos.....	76
4.8.	Selección de los elementos mecánicos .....	79
4.9.	Selección de los componentes eléctricos.....	79
4.10.	Diseño del sistema de enfriamiento para eje inducido .....	81
4.10.1.	Elementos del sistema de refrigeración .....	81
4.10.2.	Cantidad de Refrigerante .....	83
4.11.	Preparación de probetas para ensayo metalográfico.....	84
4.12.	Medición de dureza y comparación.....	86
4.13.	Presupuesto.....	89
4.14.1.	Herramientas y materiales para la estructura metálica.....	89
4.14.2.	Presupuesto de construcción del prototipo.....	90
	<b>CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>91</b>
5.1.	Conclusiones .....	92
5.2.	Recomendaciones.....	94
	<b>CAPÍTULO VI BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>95</b>
6.1.	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>96</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>98</b>
7.1.	Anexo 1 : Guía de temperatura del acero según el tono de coloren la superficie.....	98
7.2.	Anexo 2: Tubo cuadrado estructural .....	99
7.3.	Anexo 3: Max 6675.....	100
7.4.	Anexo 4: Lamina de tol Negro .....	101
7.5.	Anexo 5: Ejes de acero AISI 4340. ....	102
7.6.	Anexo 6: Diagrama de componentes del circuito del termopar .....	103
7.7.	Anexo 7: Código y tutorial para configurar arduino. ....	104
7.8.	Anexo 8:Tabla de conversión para valores de dureza .....	105
7.9.	Anexo 9:PLANOS.....	106



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Densidad y calor específico. ....	21
<b>Tabla 2:</b> Composición química del acero AISI 4340, expresada en % en peso. ....	31
<b>Tabla 3:</b> Propiedades mecánicas Acero Bonificado (valores típicos).....	31
<b>Tabla 4.</b> Matriz de ponderación para las características del bloque .....	49
<b>Tabla 5.</b> Matriz de decisión para las alternativas de diseño .....	49
<b>Tabla 6:</b> Descripción de requerimiento de software .....	53
<b>Tabla 7:</b> Descripción de equipos Varios .....	54
<b>Tabla 8:</b> Propiedades de la pieza de trabajo Acero AISI 4340 .....	58
<b>Tabla 9:</b> Propiedades de la bobina de cobre.....	59
<b>Tabla 10.</b> Parámetros de diseño para bobina .....	63
<b>Tabla 11:</b> Resultados arrojados del software COIL 32v. ....	65
<b>Tabla 12:</b> Valores de frecuencia y para la dureza .....	69
<b>Tabla 13:</b> Elementos de riel deslizante .....	75
<b>Tabla 14:</b> Comparación de metalográficas apoyadas en artículo científico del AISI 4340.....	85
<b>Tabla 15:</b> Determinación de dureza .....	87
<b>Tabla 16:</b> Elementos utilizados en la etapa de construcción del prototipo. ....	89
<b>Tabla 17:</b> Elementos eléctricos de conforman el prototipo .....	90
<b>Tabla 18:</b> Presupuesto total de fabricación del proyecto .....	90

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Gráfico 1:</b> Región de transición. ....	14
<b>Gráfico 2:</b> Campo magnético $B \vec{}$ producido por un inductor. ....	16
<b>Gráfico 3:</b> Sistema básico de calentamiento por Inducción .....	17
<b>Gráfico 4:</b> Dirección de las corrientes inducidas creciente y decreciente.....	20
<b>Gráfico 5:</b> Distancia de separación entre bobina de inducción y pieza a calentar. ....	23
<b>Gráfico 6:</b> Diferentes geometrías de bobinas para inducción. ....	26
<b>Gráfico 7:</b> Sistema de calentamiento por inducción. ....	27
<b>Gráfico 8:</b> Elementos básicos que conforma un sistema de calentamiento por inducción. ....	28
<b>Gráfico 9:</b> Patrón de calentamiento inductivo en una barra cilíndrica, producido por una bobina. ....	29
<b>Gráfico 10:</b> Descarburización de una aleación ferrosa. ....	36
<b>Gráfico 11:</b> Diagrama TTT del acero AISI-4340.....	37
<b>Gráfico 12 :</b> Ubicación geográfica. ....	41
<b>Gráfico 13:</b> Límites Geográficos del Cantón Quevedo.....	41
<b>Gráfico 14:</b> Calentamiento por flama método combinado. ....	44
<b>Gráfico 15:</b> Tratamiento térmico superficial por inducción electromagnética. ....	45
<b>Gráfico 16 :</b> Nitruado de elementos mecánicos. ....	47
<b>Gráfico 17:</b> Diagrama de flujo de la construcción del prototipo calentador por inducción electromagnética.....	52
<b>Gráfico 18:</b> Descripción del modelo de estudio. ....	57
<b>Gráfico 19:</b> Análisis de la densidad de flujo magnético en un eje de acero con Comsol Multiphysics. ....	60
<b>Gráfico 20:</b> Gradiente de temperatura sobre el eje de acero. ....	61
<b>Gráfico 21:</b> Análisis termodinámico del eje sometido a un campo electro-magnético.....	61
<b>Gráfico 22:</b> Resultado térmico del análisis al eje.....	62
<b>Gráfico 23:</b> Ingreso de parámetros geométricos en el software Coil32v. ....	64
<b>Gráfico 24:</b> Obtención de Resultados .....	64
<b>Gráfico 25:</b> Relación a considerar entre el diámetro y la longitud de la bobina para la obtención de un Q de selectividad elevado. ....	66
<b>Gráfico 26:</b> Profundidad de penetración en función de la frecuencia. ....	70
<b>Gráfico 27:</b> Rendimiento del sistema inductor.....	71

<b>Gráfico 28:</b> Soporte estructural. ....	74
<b>Gráfico 29:</b> Estructura base del prototipo .....	74
<b>Gráfico 30:</b> Riel deslizante con su respectiva manivela.....	75
<b>Gráfico 31:</b> Circuito electrónico para inducción electromagnética.....	76
<b>Gráfico 32:</b> Alambre de cobre con recubrimiento electro-térmico con terminales revestidos con termofundible. ....	77
<b>Gráfico 33:</b> Esquema general de la bobina inductora y su aplicación. ....	77
<b>Gráfico 34:</b> Conector para termocupla MAX 6675.....	78
<b>Gráfico 35:</b> Temperatura de temple superficial para AISIE 4340 .....	78
<b>Gráfico 36:</b> Cajetín de interruptores.....	79
<b>Gráfico 37:</b> Conductor de cobre blando, aislación de PVC, pantalla de alambres de cobre, cubierta de polietileno. ....	80
<b>Gráfico 38:</b> Transformador convertidor 500W .....	80
<b>Gráfico 39:</b> Descripción geométrica de la ducha de enfriamiento para el eje inducido .....	81
<b>Gráfico 40:</b> Bomba de agua 35W LG/Klein 2 salidas.....	82
<b>Gráfico 41:</b> Reservorio de agua y suministro a la bomba .....	82
<b>Gráfico 42:</b> Procesos de enfriamiento del eje una vez alcanzada su temperatura de temple .	83
<b>Gráfico 43:</b> Puntos en los cuales se mide la dureza .....	86
<b>Gráfico 44:</b> Dureza Vs penetración. ....	88

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>(Ec.1)</b> Despeje de la fórmula de campo magnético .....	14
<b>(Ec.2)</b> Campo magnético .....	14
<b>(Ec.3)</b> Efecto magnético .....	15
<b>(Ec.4)</b> Inegral de campo magnético .....	15
<b>(Ec.5)</b> Ley de ampere .....	15
<b>(Ec.6)</b> Fuerza Electromotriz .....	15
<b>(Ec.7)</b> Potencia de calentador .....	16
<b>(Ec.8)</b> Energía Calorifica .....	17
<b>(Ec.9)</b> Energía calorifica en funcion del tiempo .....	17
<b>(Ec.10)</b> Ley de Lenz .....	19
<b>(Ec.11)</b> Energía tranferida en forma de calor .....	20
<b>(Ec.12)</b> Profundidad de penetración .....	21
<b>(Ec.13)</b> Resistividad equivalente .....	22
<b>(Ec.14)</b> Factor de corrección de la resistencia equivalente .....	22
<b>(Ec.15)</b> Factor de acoplamiento .....	23
<b>(Ec.16)</b> Impedacia superficial .....	24
<b>(Ec.17)</b> Resistencia por vuelta .....	24
<b>(Ec.18)</b> Rendimiento del calentador .....	24
<b>(Ec.19)</b> Frecuencia crítica .....	25
<b>(Ec.20)</b> Dureza Vichers .....	39
<b>(Ec.21)</b> Longitud de alambre inductor .....	57
<b>(Ec.22)</b> Factor Q de selectividad para la bobina .....	65

## CÓDIGO DUBLÍN

Título	Diseño y construcción de un prototipo calentador por inducción electromagnética para tratamiento térmico superficial de aleaciones ferrosas			
Autores	Montenegro Parco William Rafael Olvera Peña Carlos Eugenio			
Palabras claves	Inducción Electromagnética	Temple	Tratamiento Térmico	Aceros Aleados
F. publicación				
Editorial	Quevedo: UTEQ, 2018			
Resumen	<p>Las electrotecnologías son sistemas y equipos que utilizan electricidad para producir y procesar partes y piezas mecánicas de maquinaria. También pueden ser usados en procesos industriales tales como tratamientos térmicos en metales, y calentamiento en superficies de materiales ferromagnéticos de forma eficiente permitiendo reducir los costos de producción, aumentando la productividad, así como mejorar la seguridad y condiciones de trabajo. La fabricación de los componentes de maquinaria agrícola engloba una gran cantidad de procesos de manufactura como son: maquinado, cepillado y tratamientos térmicos superficiales, entre otros. La gran mayoría de los componentes mecánicos son fabricados a partir de aceros aleados, aceros al carbono de baja y media aleación los cuales son posteriormente tratados térmicamente para mejorar sus propiedades mecánicas como la dureza superficial. Uno de los tratamientos térmicos más utilizados es el temple superficial, el cual tiene como objetivo principal endurecer la superficie del componente mecánicos para mejorar su resistencia al desgaste por fricción. La inducción electromagnética, o simplemente "inducción", es una técnica de calentamiento moderna para materiales eléctricamente conductores como los metales obteniéndose capas finas de austenita en ciclos cortos de tratamiento. Los resultados obtenidos en la memoria son: el análisis termodinámico de la pieza de trabajo, el diseño del inductor se lo realizó mediante el software COIL 32v 11.5, la simulación del comportamiento térmico se lo hizo con el software COMSOL Multiphysics y SOLIDWORKS.</p> <p><b>Abstract.</b> - Electrotechnologies are systems and equipment that use electricity to produce and process mechanical parts and parts of machinery. They can also be used in industrial processes such as heat treatment in metals, and heating on surfaces of ferromagnetic materials efficiently allowing to reduce production costs, increasing productivity, as well as Improve safety and working conditions The manufacture of agricultural machinery components includes a large number of manufacturing processes such as: machining, brushing and surface heat treatments, among others. The vast majority of mechanical components are manufactured from alloyed steels, low-and medium-alloy carbon steels which are subsequently thermally treated to improve their mechanical properties such as surface hardness. One of the most used heat treatments is the surface hardening, which has as its main objective to toughen the surface of the mechanical component to improve its resistance to friction wear. Electromagnetic induction, or simply " induction ", is a modern heating technique for electrically conductive materials such as metals obtaining thin layers of austenite in short treatment cycles. The results obtained in the memory are: The thermodynamic analysis of the workpiece, the design of the inductor was made by the software COIL 32v 11.5, the simulation of thermal behavior was done with the software COMSOL Multiphysics and SOLIDWORKS.</p>			
Descripción	130 hojas: Dimensiones 29x21 cm			
URI				

## NOMENCLATURA

Símbolo	Definición	Unidades
$\mu_0$	Permeabilidad del vacío	Tm/A
$f$	Frecuencia de trabajo	kHz
$h$	Coeficiente de transferencia de calor por convección	$\frac{W}{m^2 K}$
V	Voltaje	V
Q	Flujo de calor	Kcal
P	Potencia de trabajo	W
$C_p$	Calor específico a presión constante	$\frac{Kcal}{Kg \text{ } ^\circ C}$
$u$	Densidad de la energía	$\frac{J}{m^3}$
$X_L$	Reactancia inductiva	$\Omega$
L	Inductancia	$\mu H$
Re	Resistencia equivalente	K $\Omega$
P	Impedancia	$\Omega$
Fsr	Frecuencia de autoresonancia de una bobina	MHz
Cs	Autocapacitancia	Pf
B	Magnitud del campo magnético	T (Teslas)
$R_a$	Resistencia del alambre	$\Omega$
$T_{max}$	Temperatura máxima	$C^0$
T	Tiempo	S
$\mu$	Permeabilidad magnética	Adimensional
l	Longitud	m
A	Área	$m^2$

$N$	Número de espiras de la bobina	Adimensional
$D$	Diámetro de bobina	Mm
$Ph$	Pérdida por histéresis	Adimensional
$T$	Temperatura	$C^0$
$I$	Corriente eléctrica	A
$Q$	Energía de activación	Adimensional
$\eta_{cal}$	Rendimiento del calentamiento	Adimensional
$Z_s$	Impedancia superficial	Adimensional
$\varepsilon$	fuerza electromotriz	$m^2 * Kg * S^{-3} * A^{-1}$
$\delta$	Profundidad estándar de penetración	Mm
$P_0$	Potencia disipada en la superficie	W
$J_0$	Densidad de corriente en la superficie	$A * m^{-2}$
$\Delta T$	Diferencial de temperatura	$C^0$
$m$	Masa	Kg
$T_0$	Temperatura inicial	$C^0$
$L_0$	Inductancia al vacío	$\mu H$

# INTRODUCCIÓN

Todos los materiales conductores de electricidad oponen una resistencia al flujo de las cargas eléctricas, dicha resistencia produce la transformación de la energía eléctrica en energía térmica, ocasionando así un incremento de temperatura en un material conductor, esta transferencia de energía es descrita por la ley de Joule. El calentamiento por inducción electromagnética es una aplicación directa de las leyes de Faraday-Maxwell.

El calentamiento inductivo también se basa en el principio descrito por Joule, en la producción de calor por corrientes inductivas en un material conductor en el cual se desea producir una modificación, a este propósito se adhiere una de particular geometría en la cual se produzca un campo magnético uniforme, el material introducido a un campo magnético variable experimenta la formación de corrientes parasitas que son las fuentes de calor que harán que el material alcance una temperatura sobre los 800°C logrando que el metal cambie de fase de martensita a austenita.

En otro ámbito la manera más versátil, drástica y práctica para modificar las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los metales y aleaciones radica en un conjunto de operaciones que tiene por objeto alcanzar distintas temperaturas en procesos de calentamiento y enfriamiento a diferentes velocidades. Estas operaciones, se realizan sobre los metales, recibe el nombre de tratamiento térmicos de los metales. Para la generación de calor existen varias técnicas basadas en electricidad o en la quema de combustibles fósiles, provocando grandes consumos de energía y contaminación ambiental.

En la zona 5 según el Ministerio de Industrias y Productividad se encuentra la Provincia de Los Ríos, zona que demanda de nuevas alternativas de mejoramiento en los procesos de manufactura en los Talleres Industriales.

En Quevedo, en la Av. Walter Andrade Cda. Progreso frente al Cementerio General se encuentra SERVINDUST SALAZAR que se dedica a la construcción y reconstrucción de piezas de máquinas industriales, maquinaria agrícola, cuenta con servicio de torno fresadora, prensa hidráulica, Además presta sus servicios a empresas como: Plantabal

S.A, Taller Automotriz el Gato, Tecniservicios Soria, con la fabricación de equipos y accesorios con los más altos estándares de calidad.

En el desarrollo del presente proyecto de investigación está basado en el principio de calentamiento por inducción electromagnética, el mismo que suministra calor de forma rápida, homogénea, y eficiente para su uso en el tratamiento térmico superficial de piezas circulares construidas con acero aleado AISI-4340. El calentamiento mediante inducción electromagnética es una técnica basada en la inducción de un campo magnético variable en el tiempo sobre un conductor.

Se puede modelar utilizando las leyes de Ampere, Faraday y el efecto Joule. Considerado inicialmente un efecto indeseable en ciertas máquinas como transformadores, generadores y motores eléctricos, el calentamiento por inducción hoy en día es una técnica de mucha importancia en varios procesos industriales tales como los tratamientos térmicos superficiales.

En general para lograr aumentar la temperatura en un conductor se requiere someter al mismo a un campo magnético de amplitud considerable y variable en el tiempo para aprovechar de esta forma el efecto de disipación de potencia en el conductor, llamado efecto Joule, y que se produce por las corrientes inducidas o corrientes de Foucault.

Con la inducción electromagnética es posible trabajar sobre un área determinada del objeto a ser calentado siempre y cuando este sea ferromagnético manteniéndose en un rango considerable de temperatura, ayudando a tener un mayor control del proceso siendo simulado con la ayuda de software como Matlab, Solidworks, y Comsol Multiphysics.

**CAPÍTULO I**  
**CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

## **1.1. Problema de la investigación**

### **1.1.1. Planteamiento del problema**

La energía eléctrica es la forma de energía más versátil y más utilizada en la vida diaria. La calidad de vida y el confort en las sociedades modernas están directamente vinculados al consumo de energía eléctrica, la inducción electromagnética no más que generar un campo electromagnético y hacerlo atravesar a un conductor eléctrico este fenómeno produce que la superficie que es atravesada por un campo magnético convierta el consumo de energía en calor.

En el medio industrial existe el desconocimiento sobre el manejo de las nuevas electrotecnologías existentes a nivel mundial, una de ellas es la manufactura moderna, que utiliza la conversión de energía AC/DC para calentar un determinado metal y así darle una superficie totalmente dura que resista al desgaste por fricción, además, se busca una forma de mejorar las prácticas de manufactura convencional que se siguen manejando dentro de los talleres de metalmecánica e implantar el uso de la inducción electromagnética para dar tratamientos térmicos en piezas mecánicas de sección circular.

En el proyecto se analizó la dependencia funcional entre la frecuencia y la profundidad de penetración sobre la superficie de un metal, para el calentador de inducción electromagnética con sus diferentes variables y parámetros geométricos, son motivo de estudio al momento de diseñar un modelo y este cumpla con los parámetros de eficiencia al momento de su construcción. Se debe considerar que el calor depende directamente de la frecuencia y la geometría que tenga el elemento a tratar.

Razón por la cual se propone el diseño e implementación de un calentador por inducción electromagnética para (templado) superficial en aceros aleados, para mejorar la resistencia al desgaste, el cual será implementado en las instalaciones del Taller metalmecánico Servindust Salazar.

### **Diagnóstico**

No contar con un equipo con tales características con el cual se pueda demostrar el fenómeno que se produce en un material ferromagnético sometido a un campo electromagnético, que a su vez se manifiesta en forma de calor debido a que los electrones se agitan por el paso de una intensidad de corriente.

### **Pronóstico**

Al diseñar, simular y construir el prototipo calentador de inducción electromagnética, hace que esta investigación incentive al cambio de matriz productiva implantando nuevas técnicas de tratamiento térmico superficial del acero, optimizando el tiempo de producción de un elemento mecánico en un taller industrial.

#### **1.1.2. Formulación del problema**

Un acero de construcción como el 705 bonificado de alta templabilidad, alta resistencia mecánica y tenacidad, necesita un tratamiento térmico superficial como el templado para darle una superficie dura y resistente al desgaste.

En términos generales el acero aleado 705 o AISI-SAE 4340 posee buena templabilidad, tenacidad y resistencia a la fatiga, su maquinabilidad es relativamente moderada con las herramientas indicadas se suministra en estado bonificado, ideal para fabricar piezas y herramientas expuestas a tracción, torsión, flexión y que además estén expuestas a altos esfuerzos dinámicos y mecánicos.

En los talleres industriales como Servindust Salazar, se realizan trabajos usando este acero como materia prima para la fabricación de distintos componentes mecánicos, un porcentaje aceptable son de Industrias como Plantabal.

El medio laboral de la industria metalmecánica desconoce sobre las nuevas técnicas en los procesos de manufactura moderna con que cuentan los países industrializados, hay una amplia gama de equipos para realizar tratamientos térmicos superficiales de forma óptima y segura pero el desconocimiento los mantiene inmersos en la utilización de técnicas obsoletas como el calentamiento por flama, razón por la cual en el presente documento se describe los beneficios que ofrece el calentamiento por inducción electromagnética sus ventajas y aplicaciones.

### **1.1.3. Sistematización del problema**

- ¿Existe desconocimiento por parte de los propietarios de talleres industriales sobre las nuevas técnicas de manufacturas existentes en el medio?
- ¿Los operadores están expuestos a sufrir lesiones y accidentes laborales al momento de poner en práctica técnicas obsoletas de manufactura como el calentamiento por flama?
- ¿Cómo incide el tiempo en un proceso de manufactura al momento de aplicar un tratamiento térmico convencional vs tratamiento térmico por inducción electromagnética?
- ¿Cuál es el aporte que nos brinda la inducción electromagnética al momento de aplicar un tratamiento térmico superficial a un elemento mecánico?
- ¿Con que rapidez se puede calentar un acero al momento de inducirlo a un campo magnético?
- ¿Se puede localizar un tratamiento térmico utilizando la inducción electromagnética en un acero aleado?

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

- Desarrollar un sistema de calentamiento basado en el principio de inducción electromagnética, para templado de aleaciones ferrosas de sección circular, mejorando la superficie de contacto.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Seleccionar los elementos y dispositivos adecuados para la construcción del prototipo.
- Diseñar el sistema mecánico y refrigeración del prototipo propuesto.
- Simular el comportamiento térmico de la pieza de trabajo mediante el software SolidWorks, Comsol Multiphysics y Coil32v 11.5.
- Construir el sistema de calentamiento por inducción electromagnética.
- Verificar mediante pruebas la dureza alcanzada del acero tratado térmicamente.

### **1.3. Justificación**

Uno de los nuevos ejes fundamentales en el desarrollo industrial del Ecuador es la búsqueda de sistemas eficientes, eficaces y amigables con el medio ambiente para reorientar el sistema de producción nacional convencional.

Este sistema de calentamiento ofrecerá múltiples beneficios pues es una técnica de manufactura moderna, eficiente y limpia ya que no emite sustancias nocivas que contaminan el medio ambiente, es segura debido a que el calentamiento es dirigido a una sección específica (sectorizada) y solo a materiales ferrosos evitando accidentes involuntarios.

Con el desarrollo de este proyecto de investigación se aportará con un método innovador en los procesos de manufactura para los talleres metalmecánicos, generando calentamiento en superficies circulares "pines" de forma rápida y con un ahorro de energía, dejando de utilizar métodos convencionales como el calentamiento por flama.

Este calentador ayudará al suministro de calor en forma rápida, con ausencia de contacto físico con el equipo, generación del calentamiento en el lugar requerido, ausencia de pérdidas en transferencias calóricas, limpia, y eficiente para distintas aplicaciones de manufactura, sobre piezas o partes metálicas u otros materiales conductores de la electricidad. Todas estas características se encuentran contempladas en los planes y programas para el uso eficiente de la energía impulsados por el gobierno.

**CAPÍTULO II**  
**FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN**

## **2.1. Definiciones**

### **2.1.1. Eje**

Un eje es un elemento rotatorio por lo general, de sección transversal circular, que se emplean para transmitir potencia o movimiento. Constituye el eje de rotación u oscilación de elementos como engranes, poleas, volantes de inercia, manivelas, ruedas dentadas o catarinas o miembros similares y, además, controla la geometría de su movimiento. Un eje es un elemento, normalmente cilíndrico, que gira sobre sí mismo y sirve para sostener diferentes órganos giratorios de las máquinas [1].

### **2.1.2. Hornos de Inducción electromagnética**

Los hornos de inducción electromagnética, se basan en el fenómeno de la inducción electromagnética donde la orientación de un campo magnético variable en el tiempo, da lugar a una inducción de corrientes alternas en el material (conductor) sometido a este, que generan un efecto Joule en el material, aumentando considerablemente su temperatura [3].

### **2.1.3. Inducción electromagnética**

La inducción electromagnética es el fenómeno que origina la producción de una fuerza electromotriz en un cuerpo expuesto a un campo magnético variable. Es así que, cuando dicho cuerpo es un conductor, se produce una corriente inducida. Este fenómeno fue descubierto por Michael Faraday quien lo expresó indicando que la magnitud del voltaje inducido es proporcional a la variación del flujo magnético [4].

### **2.1.4. Bobina de inducción**

Las bobinas comunes de inducción se componen, generalmente, de dos bobinas separadas y arrolladas alrededor de un núcleo construido con alambres de hierro dulce; una de las bobinas se llama bobina o arrollamiento primario y se compone de relativamente pocas vueltas de alambre grueso; la otra, llamada secundaria o arrollamiento secundario, se

compone de muchas vueltas de alambre más delgado que el primario y, a menudo, aunque no siempre, se construye inmediatamente encima y bien apretada contra el primario, y concéntrica con este arrollamiento alrededor del mismo núcleo magnético [5].

### **2.1.5. Transformador**

Se denomina transformador a un dispositivo eléctrico que permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna manteniendo la potencia. Este dispositivo convierte la energía eléctrica alterna de un cierto nivel de tensión, en energía alterna de otro nivel de tensión, basándose en el fenómeno de la inducción electromagnética [1].

### **2.1.6. Tratamiento térmico superficial**

El tratamiento térmico superficial se trata de conseguir que únicamente austenice la zona superficial del acero, siendo en consecuencia lo único que se endurezca tras un enfriamiento rápido posterior. Para ello, habrá que aplicar calor únicamente a la superficie de la pieza, mediante técnicas suficientemente energéticas que permitan calentar rápidamente la superficie a temperaturas muy elevadas (por encima del punto crítico superior), sin un calentamiento significativo del interior [2].

### **2.1.7. Templabilidad del acero**

El tratamiento implica calentamiento y mantenimiento a una temperatura por debajo de la eutectoide durante aproximadamente una hora, seguido de un enfriamiento lento. El resultado es la precipitación de partículas muy finas de carburo de la solución martensítica hierro-carbono y la transformación gradual de la estructura cristalina de BCT a BCC. Esta nueva estructura se llama martensita templada [3].

### **2.1.8. Diseño asistido por computadora (CAD)**

El desarrollo de un sistema CAD se basa en la representación computacional del modelo. Esto permite realizar automáticamente el dibujo de detalle y la documentación del diseño,

y posibilita la utilización de métodos numéricos para realizar simulaciones sobre el modelo, como una alternativa a la construcción de prototipos [4].

### **2.1.9. Campo magnético**

El campo magnético es el efecto sobre una región del espacio, generado por una corriente eléctrica, en la que una carga eléctrica puntual de valor ( $Q$ ), que se desplaza a una velocidad, experimenta los efectos de una fuerza que es perpendicular y proporcional tanto a la velocidad ( $v$ ) como al campo ( $B$ ). Así, dicha carga percibirá una fuerza descrita Donde  $F$  es la fuerza magnética,  $v$  es la velocidad y  $B$  el campo magnético, también llamado inducción magnética [1].

### **2.1.10. Ensayo de dureza**

La dureza es una condición de la superficie del material, no representa ninguna propiedad de la materia y está relacionada con las propiedades elásticas y plásticas del material. Si bien, es un término que nos da idea de solidez o firmeza, no existe una definición única acerca la dureza y se la suele definir arbitrariamente en relación al método particular que se utiliza para la determinación de su valor [9].

La dureza es la propiedad que tienen los materiales de resistir la penetración de un indentador bajo carga. En este sentido definiremos dureza como la resistencia de un material a la deformación plástica localizada [9].

## **2.2. Marco referencial**

### **2.2.1. Endurecimiento superficial de aleaciones ferrosa**

El endurecimiento superficial se realiza calentando la capa superficial del acero hasta una temperatura superior al punto crítico (para austenitización), y con el enfriamiento posterior a una velocidad superior a la crítica para obtención de la martensita [10]. El objetivo fundamental del temple superficial es: aumentar la dureza superficial, la resistencia al desgaste y el límite de fatiga de la pieza que se trata. El núcleo de la pieza se conserva dúctil y tenaz y soporta las cargas de impacto. Los aceros de medio y alto carbono pueden endurecerse en la superficie por endurecimiento mediante flama, por inducción y en electrolito [6].

Endurecimiento por flama este proceso es también conocido como “shorter process”, “shortering”, “flameado”, se emplea para endurecer superficialmente ciertas piezas de acero, que, por su forma o dimensiones, no pueden ser endurecidas por otros métodos, se puede utilizar la flama de oxiacetilénica, gas del alumbrado, gas natural y otros gases derivados del petróleo y de la gasolina. El temple por flama oxiacetilénica es el más utilizado [6].

Los sistemas de calentamiento por inducción se basan en la aplicación de la inducción electromagnética. Los componentes básicos de un sistema como éste incluyen: una fuente de poder de corriente alterna, un inductor (bobina de cobre), y una pieza metálica de trabajo [6].

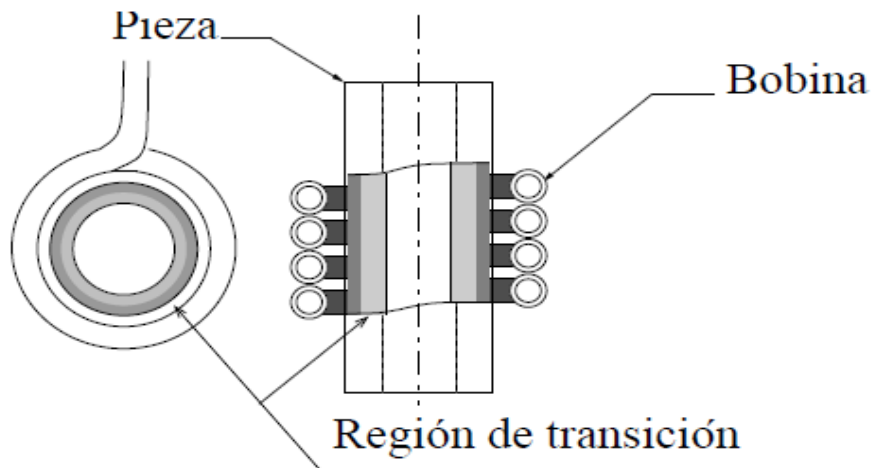
Endurecimiento electrolito la pieza que sirve de cátodo se sumerge en el electrolito (solución acuosa de sosa) y de ánodo sirve el mismo baño. Al cerrar el circuito de corriente continua, alrededor del cátodo (pieza) se forma una camisa hidrogeno alta resistencia eléctrica, lo que contribuye a la creación de una alta temperatura y un calentamiento rápido de la capa superficial del metal [6].

### 2.2.2. Principio de calentamiento por inducción electromagnética

Una fuente de fuerza electromotriz, se define como todo aquel dispositivo capaz de mantener una diferencia de potencial entre dos puntos, siendo su símbolo  $\varepsilon$  y su abreviatura FEM. Como ejemplo podemos mencionar las baterías y los generadores eléctricos. Con una FEM y un circuito compuesto por un alambre conductor se puede establecer una corriente eléctrica capaz de generar un campo magnético  $\vec{B}$  [7].

Este efecto magnético puede intensificarse enrollando el conductor en forma de bobina con múltiples vueltas aisladas eléctricamente esta configuración se conoce como bobina inductora. [7].

**Gráfico 1:** Región de transición.



**Fuente:** González, W. (2008).

$$\epsilon_0 * \oint \vec{E} * d\vec{S} = q \quad (\text{Ec.1})$$

$$\oint \vec{B} * d\vec{S} = 0 \quad (\text{Ec.2})$$

$$\oint \vec{E} * d\vec{l} = -\frac{d\phi_B}{dt} \quad (\text{Ec.3})$$

$$\oint \vec{B} * d\vec{l} = \mu_0 \left( \epsilon_0 * \frac{d\phi_B}{dt} + i \right) \quad (\text{Ec.4})$$

La ecuación 1, describe la relación existente entre una carga q y el campo eléctrico E, la ecuación 2, describe parcialmente el comportamiento del campo magnético, la ecuación 3, describe el efecto eléctrico de campos magnéticos variables y la ecuación 4, describe el efecto magnético de campos eléctricos o corrientes variables. En particular la ecuación ultima describe la fenomenología referida a esta investigación [7].

Si un inductor, que normalmente es el arrollamiento bobinado de un conductor, se hace pasar una corriente eléctrica, se genera un campo magnético cuya amplitud y distribución viene dada por la ley de Ampere [7].

$$N * I = \oint \vec{H} * d\vec{l} = H * l \quad (\text{Ec.5})$$

**Donde:**

**N:** Es el número de espiras del inductor.

**I:** La corriente que lo atraviesa.

**H:** El campo magnético.

**L:** La longitud del circuito.

Ahora si la corriente es alterna entonces por la ecuación de Faraday-Maxwell se induce un campo magnético variable en el tiempo y en consecuencia para un conductor sumergido en este campo una fem, cuyo valor viene dado por la ecuación dada a continuación [7].

$$\varepsilon = -N * \frac{d\phi_B}{dt} \quad (\text{Ec.6})$$

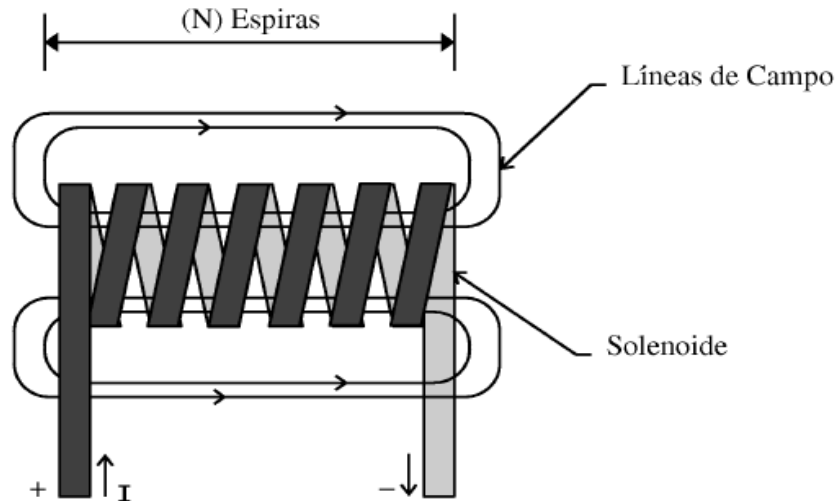
**Donde:**

$\mathcal{E}$ : Es la fuerza electromotriz inducida

$N$ : El número de espiras del inductor

$\phi_E$ : El flujo del campo magnético.

**Gráfico 2:** Campo magnético  $\vec{B}$  producido por un inductor.



**Fuente:** González, W. (2008).

A la corriente establecida en el interior del material que se desea calentar por inducción electromagnética, debido a la fem inducida, se le denomina corriente inducida, se le denomina corriente de Foucault,  $i_f$ , y esta última es la responsable del calentamiento por efecto Joule, cuya ley es descrita por la ecuación 7 [7].

$$P = i^2 f * R_{eq} \quad (\text{Ec.7})$$

**Donde:**

$P$ : Potencia disipada en el inducido.

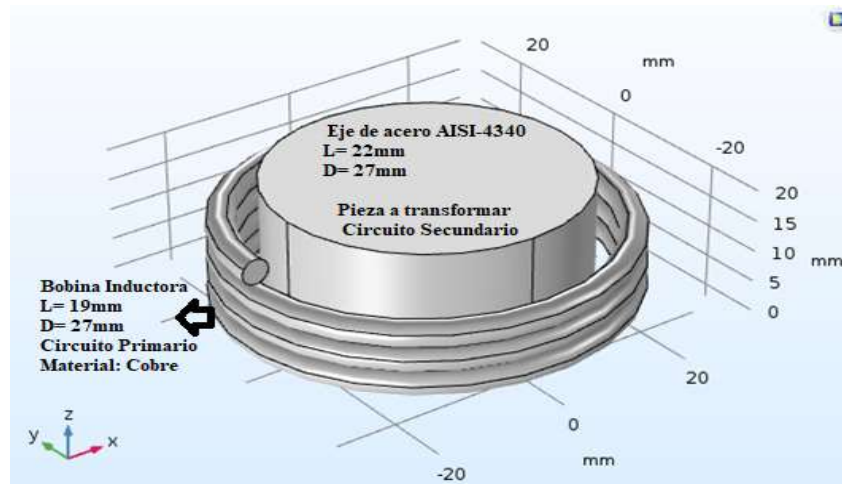
$I$ : Resistencia eléctrica equivalente del conductor.

$f$ : La frecuencia de la corriente en la bobina.

$R_{eq}$ : Resistencia equivalente.

Para comprender este efecto se toma como ejemplo, un material conductor de forma cilíndrica introducido dentro una bobina solenoide, (Gráfico 3), por la cual se hace circular corriente alterna (CA). Con esto, la magnitud y dirección del campo magnético, que rodea a la bobina, varían en el tiempo acorde varía la magnitud y la dirección de la corriente a través de la bobina produciendo que el número de líneas en el campo magnético, o flujo magnético, que cortan de un lado a otro al material conductor, varíe [8].

**Gráfico 3:** Sistema básico de calentamiento por Inducción



**Elaborado por:** Montenegro, Olvera 2018

La cantidad de energía calorífica producida por una corriente eléctrica, depende directamente del cuadrado de la intensidad de la corriente, del tiempo que ésta circula por el conductor y de la resistencia que opone el mismo al paso de la corriente [7].

$$Q = I^2 R_{eq} t \quad (\text{Ec.8})$$

$$Q = P t \quad (\text{Ec.9})$$

**Donde:**

**Q:** Energía calorífica producida por la corriente expresada en Julios [W.s]

**I:** Intensidad de la corriente que circula.

**R<sub>eq</sub>:** Resistencia eléctrica equivalente del conductor.

**t:** Tiempo.

**P:** Potencia disipada en el inducido.

### 2.2.3. Aplicaciones

Los usos principales se dividen en el precalentamiento antes de la manufactura, tratamientos térmicos, soldaduras y fundición de metales. Si bien estos son los usos más comunes, una variedad de otras operaciones, también son susceptibles a los métodos de calentamiento por inducción [9].

**Precalentamiento en la manufactura.** Calentar por inducción antes del trabajo metalmeccánico es muy aceptado en la industria de la forja y extrusión. Se adapta fácilmente a través de precalentamiento de aceros, aleaciones de aluminio, y metales especializados tales como el titanio y las aleaciones a base de níquel [9].

**Tratamiento térmico superficial.** El calentamiento por inducción se utiliza en el endurecimiento superficial, templado, y el recocido de los aceros. El templado por inducción, la operación de tratamiento térmico por inducción más común, mejora la resistencia al desgaste, y las propiedades de fatiga de los aceros [9].

**Fundición.** Procesos de inducción se utilizan con frecuencia para fundir aceros de alta calidad y aleaciones no ferrosas (por ejemplo, aluminio y aleaciones de cobre). Las ventajas específicas de la fundición por inducción, en comparación con otros procesos de fusión incluyen una fusión más uniforme y mayor vida para el crisol [9].

**Soldadura.** Soldadura por inducción de alta frecuencia ofrece un ahorro sustancial de energía ya que el calor se concentra en la unión a soldar. La aplicación más común de la soldadura por inducción es en producción de tubería que se presta a un tratamiento automatizado de alta velocidad y alta producción. [9].

**Curado de revestimientos orgánicos.** La inducción se utiliza para curar recubrimientos orgánicos tales como pinturas sobre sustratos metálicos mediante la generación de calor dentro del sustrato. Por este medio, el curado se produce desde el interior, lo que minimiza la tendencia a la formación de defectos de recubrimiento [9].

**Fijación adhesiva.** Ciertas partes de automóviles, tales como placas de embrague y pedales de freno, hacen uso de adhesivos termoendurecibles. Como en el curado de la pintura, el calentamiento por inducción de las piezas de metal a temperaturas de curado puede ser un medio excelente para lograr una unión rápida. [9].

**Chapado.** Recubrimientos de estaño electrolíticamente depositados en acero tienen un acabado mate uniforme. El calentamiento de la hoja a 230 ° C por inducción provoca reflujo del recubrimiento de estaño y resulta en una apariencia brillante y una cobertura uniforme [9].

**Sinterizado.** El calentamiento por inducción es ampliamente utilizado en la sinterización de preformas de carburo, ya que puede proporcionar la temperatura necesaria (2550 °C) [9].

#### 2.2.4. Ley de Lenz

Cualquier tensión generada por inducción debe oponerse al movimiento que produce la tensión inducida. En términos de la tensión inducida producida por la corriente variable, el cambio de la corriente es equivalente al movimiento del flujo magnético y debe oponerse a la tensión inducida. Cuando la corriente aumenta, la tensión inducida se opone a su disminución. En ambos casos, el cambio se enfrenta a la tensión inducida. Por lo tanto, la inductancia es la característica que se opone a cualquier cambio en la corriente [10].

$$L = \frac{n\phi}{I} \quad (\text{Ec.10})$$

**Donde:**

**n** : Es el número de vueltas de la bobina.

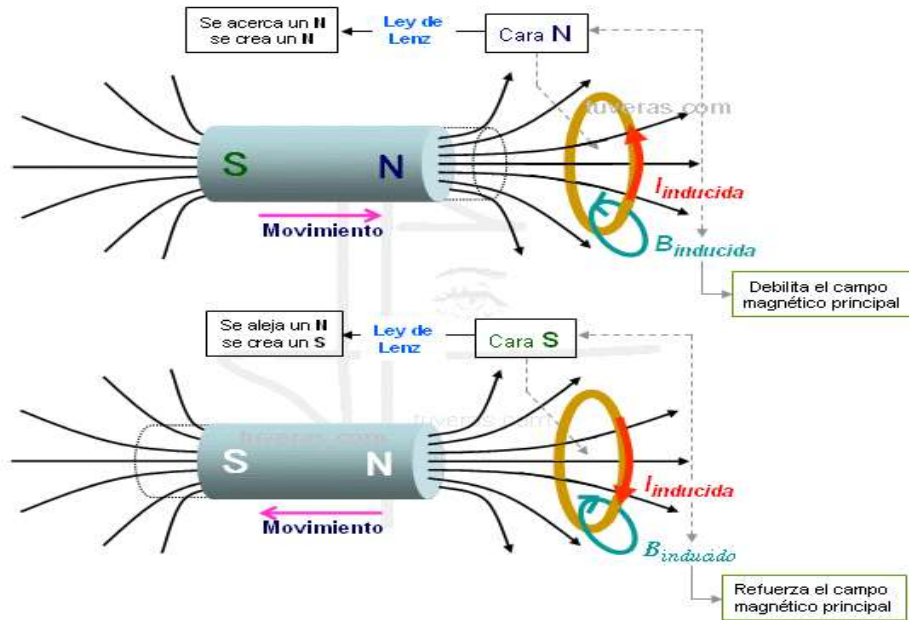
**∅** : Flujo magnético que afecta al inductor, en maxwells

**I**: Intensidad de corriente de la bobina

Cuando en el campo magnético del solenoide introducimos una muestra conductora no magnética, las corrientes inducidas que circulan en la muestra dan lugar a un campo

magnético que se opone y debilita la densidad del flujo magnético total. Este efecto es el resultado de los amperios-vuelta que en oposición generan las corrientes inducidas en la muestra [10].

**Gráfico 4:** Dirección de las corrientes inducidas creciente y decreciente



Fuente: <https://sites.google.com/site/fisicactbis162/services/3-2-7-ley-de-lenz>

## 2.3. Variables de control de un sistema de calentamiento por inducción

### 2.3.1. Energía transferida en forma de calor

La transferencia de calor es aquella ciencia que busca predecir la transferencia de energía que puede ocurrir entre cuerpos materiales, como resultado de una diferencia de temperatura. La termodinámica enseña que esta transferencia de energía se define como calor. La ciencia de la transferencia de calor no sólo trata de explicar cómo puede ser transferida la energía calorífica, sino también trata de predecir la rapidez a la que se realizará este intercambio bajo ciertas condiciones especificadas [7].

$$Q = m c \Delta T = m \cdot c \cdot (T_{final} - T_i) \quad (\text{Ec.11})$$

**Donde:**

**Q:** Energía transferida en forma de calor. [Kcal]

**m:** Masa del objeto a calentar. [Kg]

**C:** Calor específico del objeto a calentar. [KCal/Kg°C]

**ΔT:** Diferencial de temperatura del objeto. [°C]

**Tabla 1** Densidad y calor específico.

Material	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Calor específico (Kcal/ Kg °C)
Acero 4340	7850	0.31

**Fuente:** ACERO-SISA-4340T-Tratado-y- Revenido.

**Elaborado por:** Montenegro, Olvera 2018

### 2.3.2. Profundidad de penetración

Es la distancia medida desde la superficie al interior de la pieza a calentar a la cual se realiza el cálculo de la densidad de corriente, para saber cuánta penetración de corriente se obtiene [7].

La profundidad de penetración se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi * f * \mu_0 * \mu_r}} \quad (\text{Ec.12})$$

**Donde:**

**ρ:** Es la resistividad eléctrica del material,

**f:** La frecuencia de la corriente en la bobina de calentamiento,

**μ<sub>0</sub>:** Permeabilidad magnética del vacío, (4\*π\*10<sup>-7</sup>)

**μ<sub>r</sub>:** Permeabilidad magnética relativa del material.

### 2.3.3. Resistividad equivalente

Es el valor de la resistencia eléctrica equivalente que presenta una pieza cilíndrica situada en el interior de un inductor de calentamiento. Se calcula se la determina mediante la ecuación 13. [7]

$$R_{eq} = K_R N^2 \rho \frac{2\pi r}{\delta l} \quad (\text{Ec.13})$$

**Donde:**

**$K_R$**  : Se denomina factor de corrección de la resistencia equivalente.

**$N$** : Es el número de espiras de la bobina de calentamiento.

El factor de corrección de la resistencia equivalente viene dado por la ecuación 14.

$$K_R = 1 - e^{-\frac{2r}{\delta}} \quad (\text{Ec.14})$$

**Donde:**

**$K_R$** : Factor de corrección de la resistencia equivalente.

**$N$** : Numero de espiras de la bobina de inducción.

**$\rho$** : Resistividad del objeto a calentar.

**$R$** : Radio del objeto a calentar.

**$\delta$** : Profundidad de penetración.

**$l$** : longitud del objeto a calentar.

### 2.3.4. Factor de acoplamiento

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: [12]

- Resistividad elevada de la pieza (aceros, grafitos, latones).
- Resistividad reducida del inductor (cobre).

- Ferromagnetismo del material a calentar (aceros).
- Buen acoplamiento geométrico entre pieza e inductor, el cual depende del factor  $K$  calculado del siguiente modo:

$$K = \left(\frac{d}{D}\right)^3 \quad (\text{Ec.15})$$

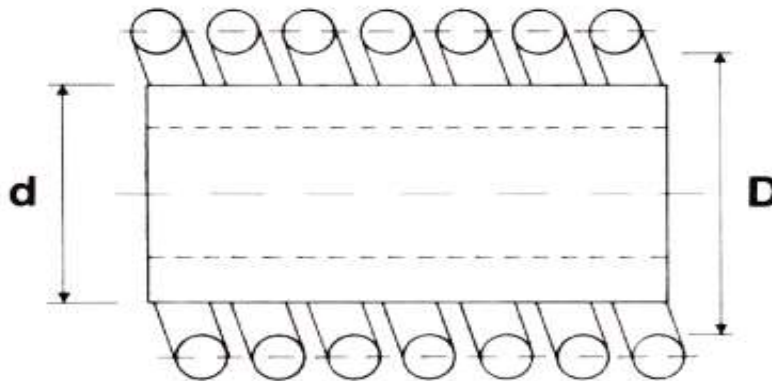
**Donde:**

$d$ : Es el valor del diámetro exterior de la pieza

$D$ : Es el diámetro interior de la bobina,

$K$ : Varia en general entre 0 y 1 entre más se aproxime el valor a 1 mayor será el rendimiento del proceso [12].

**Gráfico 5:** Distancia de separación entre bobina de inducción y pieza a calentar.



**Fuente:** Fundamentos de calentamiento por inducción.

### 2.3.5. Impedancia superficial

Este concepto deriva del análisis de los fenómenos electromagnéticos que se producen entre el conjunto bobina-pieza y expresa la impedancia en la región de transición. El valor de la impedancia viene dado por la siguiente ecuación 16 [7].

$$Z_s = \frac{1 + j}{\sigma * \delta} \quad (\text{Ec.16})$$

**Donde:**

**1 + j:** Representarse como la suma de una parte real y una parte imaginaria.

**σ:** Es la conductividad del material calentado.

**δ:** Profundidad de penetración.

### 2.3.6. Resistencia por vuelta

Concepto que refleja la dependencia geométrica con la resistencia existente en la sección efectiva de la pieza por la que circulan las corrientes superficiales, esta se expresa por medio de la ecuación 17 [7].

$$R_N = \rho * \frac{P}{\delta * l} \quad (\text{Ec.17})$$

**Donde:**

**P:** Es el perímetro de la superficie total calentada.

**l:** longitud del objeto a calentar.

**ρ:** Resistividad del objeto a calentar.

**δ:** Profundidad de penetración.

### 2.3.7. Rendimiento del calentamiento

Las corrientes que circulan por la bobina de calentamiento son elevadas y debido a esto la resistencia asociada a las vueltas de la bobina deben ser consideradas a efectos de eficiencia. El rendimiento del calentamiento se define como  $\eta_{cal}$ , y es el cociente entre la potencia disipada en la pieza, y la suma de la disipada en la pieza más la disipada en el inductor. Esta expresión viene dada por la ecuación [7].

$$\eta_{cal} = \frac{I^2 * R_{eq}}{I^2 * R_{eq} + I^2 * R_p} \quad (\text{Ec.18})$$

**Donde:**

$R_p$ : Es la resistencia del inductor.

$I$ : Corriente a una determinada frecuencia.

$R_{eq}$  = Resistencia eléctrica equivalente del conductor.

### 2.3.8. Frecuencia crítica

La frecuencia crítica es aquella, que por debajo de la cual, el rendimiento de calentamiento disminuye rápidamente, este concepto está íntimamente relacionado con el factor de corrección de la resistencia equivalente  $K_R$ . La frecuencia crítica  $f_{cr}$  viene dada por la ecuación 19 [7].

$$f_{cr} = \frac{4 * \rho}{\pi * \mu * r^2} \quad (\text{Ec.19})$$

**Donde:**

$f_{cr}$ : Es la frecuencia crítica.

$\rho$ : Resistividad del objeto a calentar.

$\mu$ : Permeabilidad magnética

## 2.4. Diseño básico de inductores

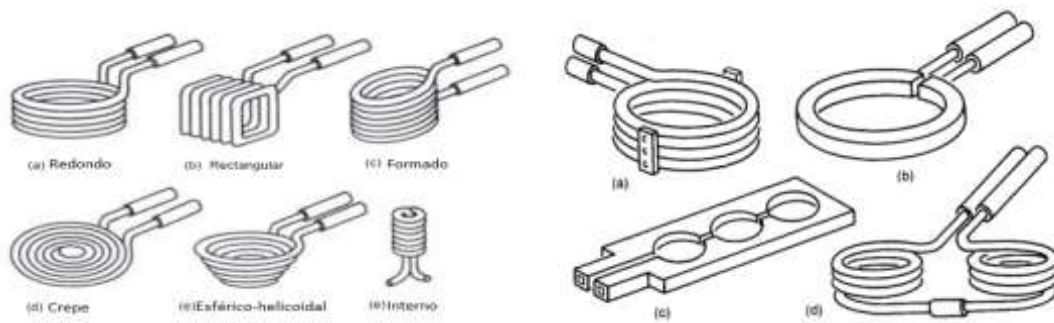
### 2.4.1. Geometrías de bobinas de inducción

Las aplicaciones típicas del calentamiento inductivo están localizadas fundamentalmente en la industria de transformaciones metálicas, tales como soldadura, endurecimiento, precocido, fundición, dilatación, alivio de estrés, templado, etc., así como en otras áreas donde los procesos impiden el uso de otros métodos, tales como el crecimiento del grano en un acero para endurecer una capa para evitar el desgaste cuando está en contacto con otro metal de las mismas características [13].

Las geometrías en las bobinas de inducción varían según su aplicación y en general no tiene por qué tener una forma específica, puesto que cualquier inductor atravesado por corrientes alternas crea un campo magnético también alterno que genera corrientes inducidas en un cuerpo inductor situado en su proximidad. Por lo tanto, se puede decir que no hay ninguna limitación en las dimensiones y forma de material a calentar [13].

Esto supone una nueva ventaja ya que no solo es posible calentar materiales conductores de cualquier dimensión o forma, sino que, además, se puede calentar solo la porción del material que se desea calentar. Es incluso posible calentar diferentes zonas de la pieza con la misma o diferentes temperaturas mediante un diseño correcto de la geometría del inductor o la asociación de varios de ellos [7].

**Gráfico 6:** Diferentes geometrías de bobinas para inducción.

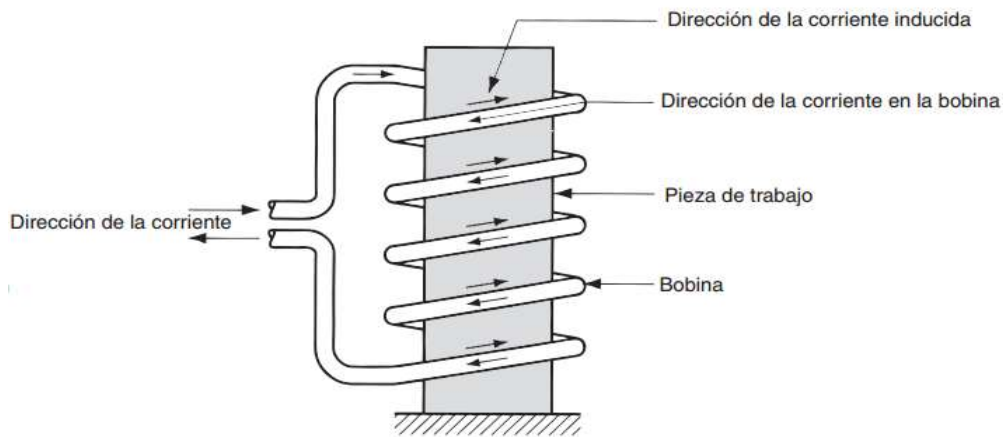


**Fuente:** A. C. Charly Enrique, 2011.

#### 2.4.2. Componentes de un sistema de calentamiento por inducción

Los componentes básicos de un sistema de calentamiento por inducción son una bobina (inductor) de inducción, una fuente de poder de corriente alterna y la propia pieza Gráfico 7. La bobina, que puede adoptar distintas formas, dependiendo del patrón de calentamiento requerido, es conectada a la fuente de poder. el flujo de corriente fluye a través de la bobina generando un campo magnético alterno que corta a través de la pieza de trabajo. es este campo magnético alterno que induce las corrientes parásitas que calientan la pieza de trabajo [3].

**Gráfico 7:** Sistema de calentamiento por inducción.



**Fuente:** M. P. Groover, Fundamentos de Manufactura Moderna, Ciudad de México: S.A. De C.V, 2007.

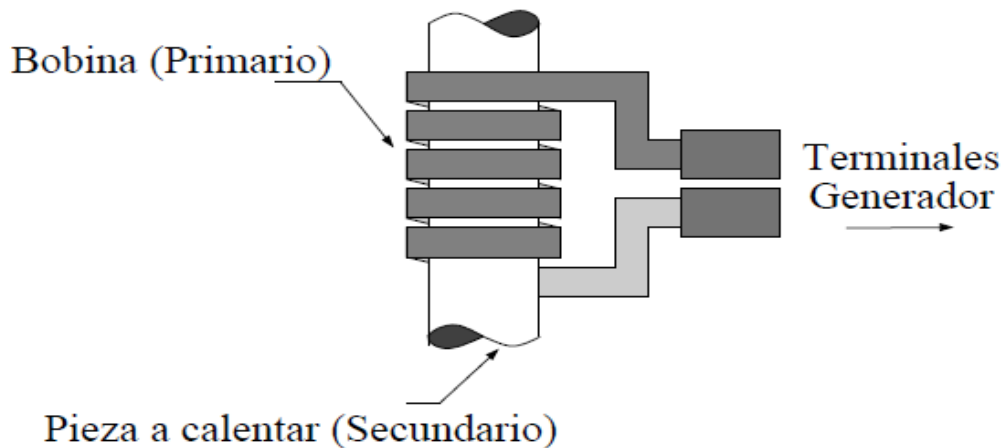
Debido a que la magnitud de las corrientes de Foucault disminuye con la distancia desde la superficie de la pieza, la inducción se puede utilizar para el calentamiento de la superficie y el tratamiento térmico. En contraste, si se permanece el tiempo suficiente para que la conducción de calor haga su trabajo, patrones de calentamiento relativamente uniformes se pueden obtener a través de los efectos de tratamiento térmico, calentamiento para trabajo de metal, y así sucesivamente [14].

### 2.4.3. Principio de fabricación

En general el diseño de bobinas de inducción para calentamiento se basa en datos empíricos y cuyo desarrollo se deriva de los resultados del estudio de formas geométricas simples. Por lo tanto, también en este caso el diseño de la bobina se basa en la poca experiencia adquirida con las necesidades que demandan dentro de un taller industrial [7].

A continuación, se expondrán una serie de consideraciones eléctricas fundamentales que guiará el diseño del inductor. En el gráfico (8), se detallan los elementos básicos que conforma un sistema de calentamiento por inducción [7].

**Gráfico 8:** Elementos básicos que conforma un sistema de calentamiento por inducción.



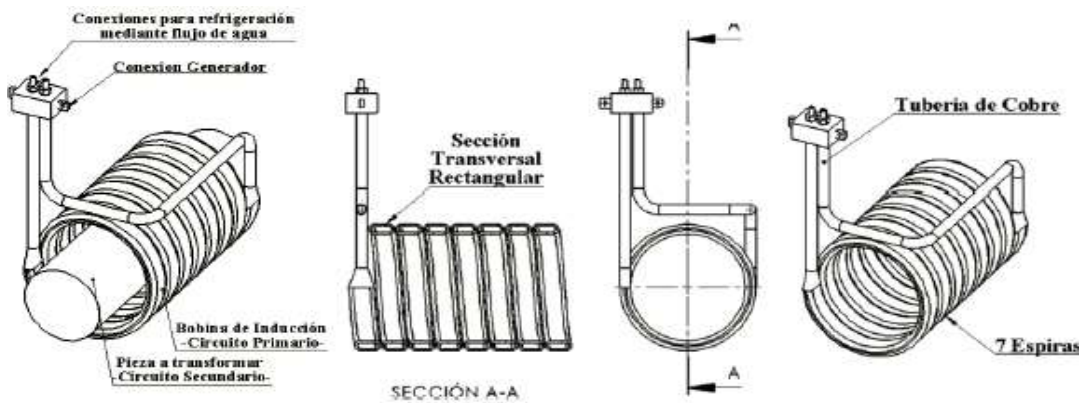
Fuente: González, W, 2008.

- **Acoplamiento y eficiencia:** Como se ha mencionado anteriormente, el inductor es similar al primario de un transformador y la pieza a calentar es equivalente al conjunto núcleo-secundario, por lo tanto, la eficiencia en el acoplamiento entre la bobina y la pieza a calentar, es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos [7].
- **Máxima transferencia de energía:** La distancia entre la superficie de la pieza y el inductor debe ser lo más estrecha posible para garantizar la máxima transferencia de energía, es deseable que el mayor número de líneas de flujo magnético intersecten la pieza en el área donde se desea calentar. El área donde la densidad de flujo magnético  $\phi_B$  está concentrada, será el área con mayor densidad de corriente  $J_o$  [10].
- **Máxima velocidad de calentamiento:** Las líneas de flujo magnético concentradas en el centro de la bobina tipo solenoide proveen la máxima velocidad de calentamiento en el área [7].
- **La pieza a calentar:** la geometría de la pieza a calentar es de gran importancia, ya que determina la forma de la bobina [7].
- **El centro magnético:** el centro magnético del inductor tipo solenoide no es necesariamente el centro geométrico. Esto se debe a la contribución magnética de

las espiras terminales del inductor, las cuales no conservan geometría axial con el resto de las espiras internas. Este efecto se puede visualizar en las bobinas de una sola espira, la corrección se realiza mediante el incremento del número de vueltas y ante la imposibilidad de colocar la pieza en el centro magnético del inductor, será necesario mover la pieza hacia esta área y hacer rotar, para proporcionar una exposición uniforme [7].

- **Prevención de cancelación de campos magnéticos:** algunas bobinas pueden transferir mayor cantidad de energía a la pieza a calentar, debido a su capacidad de concentrar flujo magnético, por lo tanto, para prevenir pérdidas de energía es necesario cancelar la inducción que no contribuye con el calentamiento [7].
- **Tipo de fuente de poder y velocidad de producción:** La fuente de poder puede variar según la aplicación que va a tener, siendo la capacidad de entregar potencia y la frecuencia de trabajo las características más importantes en estos equipos [7].

**Gráfico 9:** Patrón de calentamiento inductivo en una barra cilíndrica, producido por una bobina.



**Fuente:** Diseño y construcción de bobinas de calentamiento para hornos de inducción Electromagnética

- **Movimiento de la pieza relativo a la bobina:** Se refiere al empleo de sistemas donde la pieza es movida dentro y fuera de la bobina, esta consideración puede requerir grandes modificaciones para lograr un diseño óptimo [1].
- **Material de la bobina:** Debe considerarse la resistencia la resistencia baja evita pérdidas de potencia por efecto Joule en el inductor y reduce la necesidad de

refrigeración del sistema. Es necesario emplear un material cuya propiedad de transmisión de calor sea alta para construir la bobina [9].

- **Elección de la geometría:** La elaboración de un inductor depende de la geometría de la pieza a ser tratada, por esto es necesario establecer las condiciones geométricas necesarias para nuestro caso se usará, una geometría redonda con un diámetro superior al del eje estriado [7].
- **Factibilidad:** El proceso de fabricación de la bobina debe considerar los costos asociados al tipo de material utilizado y las ventajas que representa la construcción de una bobina cuya geometría permita el tratamiento térmico de diversos tipos de superficies sin que requieran complejos procesos de manufactura en las mismas [10].

## 2.5. Aleaciones Ferrosas

Las aleaciones ferrosas tienen como elemento mayoritario el Fe y en general, son aleaciones fuertes, maleables, de bajo costo y relativamente fáciles de obtener. La mayor producción de estas son los aceros, aleaciones Fe – C, a los que cambiando el porcentaje de estos elementos y agregando algunos otros, se les pueden dar propiedades específicas, dependiendo de la industria a la que se van a aplicar [15].

Estas aleaciones ferrosas, que se basan en aleaciones de hierro y carbono incluyen los aceros al bajo carbono, los aceros aleados y de herramientas, los aceros inoxidable y los hierros fundidos [16].

### 2.5.1. Características del Acero AISI-SAE 4340

El acero al AISI 4340 (cromo-níquel-molibdeno), se utiliza para la fabricación de elementos de máquinas sometidos a grandes esfuerzos cíclicos y/o estáticos. La primera cifra de la designación 4340, indica el tipo de acero (elemento de aleación principal), el segundo dígito indica el porcentaje (%) en peso aproximado del elemento de aleación

principal, y los dos últimos dígitos proporcionan el contenido medio de carbono en porcentaje en peso (%) [17].

El acero AISI 4340 es conocido por su capacidad para alcanzar una alta resistencia al ser tratado térmicamente, presenta tanto una alta resistencia a la fatiga como también elevada ductilidad y tenacidad. Este acero es considerado como un estándar con el cual se comparan otros aceros de alta resistencia mecánica [6].

El acero AISI 4340 posee alta resistencia a la tracción y torsión, muy buena resistencia al desgaste y al impacto. Se suministra en estado bonificado, es decir templado y revenido, lo que permite en la mayoría de los casos su aplicación sin necesidad de tratamiento térmico posterior. Es utilizado a temperaturas de hasta 500 °C, sin perder su estado bonificado [18].

En la tabla 2, se presenta la composición química del acero AISI 4340, obtenida de la literatura, el cual considera que cantidades pequeñas de ciertos elementos que no están especificados o que no son requeridos pueden estar presentes en los aceros aleados [18].

**Tabla 2:** Composición química del acero AISI 4340, expresada en % en peso.

<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>	<b>Fe</b>
0.38	0.15	0.60	0.035	0.15	0.70	1.62	0.20	95.195
0.43	0.35	0.80		0.35	0.90	2.00	0.30	96.33

**Fuente:** Alloy Steel de NEONICKEL

**Elaborado por:** Montenegro, Olvera 2018

**Tabla 3:** Propiedades mecánicas Acero Bonificado (valores típicos)

<b>Dureza estado bonificado (HV)</b>	<b>Esfuerzo fluencia (Kg/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Esfuerzo tracción (Kg/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Elongación %</b>
286-372	60-70	95-115	10-18

**Fuente:** ACEROSOTERO

**Elaborado por:** Montenegro, Olvera 2018

### 2.5.2. **Influencia de los elementos de aleación en las propiedades del acero**

1. **Cromo:** Es uno de los elementos especiales más empleados para la fabricación de aceros aleados, usándose indistintamente en los aceros de construcción, en los de herramientas, en los inoxidables y los de resistencia en caliente. Se emplea en cantidades diversas desde 0.30 a 30, según los casos y sirve para aumentar la dureza y la resistencia a la tracción de los aceros, mejora la templabilidad, impide las deformaciones en el temple, aumenta la resistencia al desgaste, la resistencia a la corrosión [19].
2. **Fósforo:** Segrega, pero a un grado menor que el carbono y azufre. Incrementando el fósforo incrementa la resistencia y la dureza y decrece la ductilidad y tenacidad en condiciones de laminado. La reducción en ductilidad y tenacidad son mayores en aceros enfriados y templados con alto contenido de carbono. Alto contenido de fósforo es a menudo especificado en aceros maquinables de bajo carbono para mejorar la maquinabilidad [20].
3. **Magnesio:** Este metal está presente en todos los aceros comerciales al carbono en el intervalo de 0.03 a 1.00%. Cuando existe una cantidad de Mn mayor que la requerida para formar MnS, el exceso se combina con carbono para formar el compuesto ( $Mn_3C$ ) que se asocia con el carburo de hierro ( $Fe_3C$ ) en cementita. El manganeso también promueve la solidez de las piezas fundidas al acero a través de su acción de desoxidación en acero líquido [20].
4. **Níquel:** Una de las ventajas más grandes que reporta el empleo del níquel, es evitar el crecimiento del grano en los tratamientos térmicos, lo que sirve para producir en ellos gran tenacidad. El níquel además hace descender los puntos críticos y por ello los tratamientos pueden hacerse a temperaturas ligeramente más bajas que la que corresponde a los aceros ordinarios [19].
5. **Molibdeno:** Es adicionado en aceros de construcción en cantidades entre 0.10 y 1.00%. Cuando el molibdeno está en solución solididad en austenita antes de la

activación, la velocidad de reacción por transformación se vuelve considerablemente lenta como en comparación con los aceros al carbono. El molibdeno puede inducir endurecimiento secundario durante el temple de aceros inactivos y mejora la resistencia a la fluencia de aceros de baja aleación a elevadas temperaturas. Aceros aleados que contienen 0.15 a 0.30% Mo muestran una reducción susceptible a la fragilización por temple [20].

6. **Azufre:** El aumento del contenido de azufre reduce la ductilidad transversal y la tenacidad, pero tiene solo un suave efecto en las propiedades mecánicas longitudinales. Soldabilidad disminuye con el incremento de contenido de azufre. Este elemento es muy determinante para la calidad de la superficie, particularmente en los aceros de bajo carbono y de bajo manganeso. Por estas razones se especifica un único límite máximo para la mayoría de los aceros. La única excepción es el grupo de los aceros maquinables, donde el azufre es adicionado para mejorar la tendencia de segregación que cualquier otro elemento común [20].
  
7. **Silicio:** Es uno de los principales desoxidantes usados en la elaboración de acero, por eso la cantidad de silicio presente está relacionada con el tipo de acero. Aceros laminados y cubiertos (capped) contienen cantidades no significativas de silicio. Aceros semimuecos pueden contener cantidades moderadas de silicio, además hay un límite definido de cantidad máxima tolerada en estos aceros. Aceros muertos al carbono pueden contener cualquier cantidad de silicio hasta 0.6% Si como máximo [20].

El silicio es en tanto menos efectivo que el manganeso en el incremento de dureza y resistencia en laminados. El silicio tiene solo una suave tendencia a la segregación. En aceros de bajo carbono el silicio usualmente es dañino para la calidad de la superficie, y esta condición es más pronunciada en grados de bajo carbono resulfurizado [20].

### 2.5.3. Fases del acero

**Ferrita.** La ferrita es el más blando y dúctil constituyente de los aceros. Cristaliza en una estructura BCC. En los aceros aleados, la ferrita suele contener Ni, Mn, Cu, Si, Al en disolución sólida sustitucional. Al microscopio aparece como granos monofásicos, con límites de grano más irregulares que la austenita. El motivo de esto es que la ferrita se ha formado en una transformación en estado sólido, mientras que la austenita, procede de la solidificación [21].

**Cementita.** Es el constituyente más duro y frágil de los aceros, alcanzando una dureza de 960 Vickers. Cristaliza formando un paralelepípedo ortorrómbico de gran tamaño. Es magnética hasta los 210°C, temperatura a partir de la cual pierde sus propiedades magnéticas [2].

**Martensita.** La martensita es una fase muy dura debido a la fortísima distorsión de la red que provocan los átomos de carbono retenidos intersticialmente en ella, dado que el brusco enfriamiento no le permite expulsarlos a pesar de que el tamaño de los huecos es muy inferior al del carbono [2]. Es el constituyente típico de los aceros templados, se admite que está formado por una solución sólida sobresaturada de carbono en hierro alfa, y se obtiene por enfriamiento rápido de los aceros desde alta temperatura. Su contenido en carbono suele variar generalmente desde pequeñas trazas hasta 1 % de C y algunas veces en los aceros hipereutectoides, aún suele ser más elevado [22].

**Perlita.** Es un constituyente compuesto por el 86.5% de ferrita y el 13.5% de cementita, es decir, hay 6.4 partes de ferrita y 1 de cementita. La perlita tiene una dureza de aproximadamente 200 Vickers, con una resistencia a la rotura de 80 Kg/mm<sup>2</sup> y un alargamiento del 15%. Cada grano de perlita está formado por láminas o placas alternadas de cementita y ferrita [22].

**Austenita.** Este es el constituyente más denso de los aceros, y está formado por la solución sólida, por inserción, de carbono en hierro gamma. La proporción de C disuelto varía desde el 0 al 1.76%, correspondiendo este último porcentaje de máxima solubilidad a la temperatura de 1130 °C. También puede obtenerse una estructura austenítica en los

aceros a temperatura ambiente, enfriando muy rápidamente una probeta de acero de alto contenido de C a partir de una temperatura por encima de la crítica, pero este tipo de austenita no es estable, y con el tiempo se transforma en ferrita y perlita o bien cementita y perlita [22].

#### **2.5.4. Propiedades electromagnéticas de los materiales ferrosos**

Las propiedades electromagnéticas de los materiales es una expresión bastante amplia que se refiere a un número de características electromagnéticas incluyendo permeabilidad magnética, resistividad eléctrica (conductividad eléctrica), densidad de flujo de saturación, fuerza coercitiva, pérdidas de histéresis, permeabilidad inicial, permisividad, susceptibilidad magnética, momentos magnéticos, entre otros [10].

#### **2.5.5. Aplicaciones**

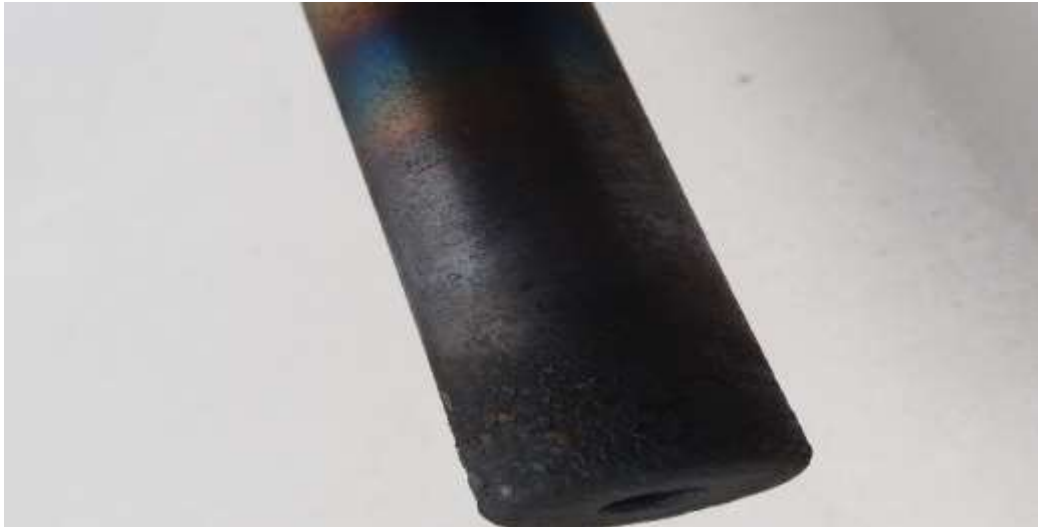
El acero al Cromo-Níquel-Molibdeno, es utilizado en partes de maquinarias sometidas a muy altas cargas dinámicas, por ejemplo: cigüeñales, ejes de leva, árboles de transmisión, barras de torsión, ejes de cardán, ejes de bombas, ejes para hélices de aviones, pernos y tuercas a alta carga de tracción, rodillos de transportadores, vástagos y pines, muñones, brazos de dirección, engranajes, discos de embragues, piezas de chasis, acoples, ejes de piñones, ruedas dentadas, moldes para inyección de plástico [18].

#### **2.5.6. Descarburización del acero**

El fenómeno de la descarburización de los aceros consiste en la pérdida de parte del carbono de su composición química durante un tratamiento a elevada temperatura, debido a su interacción con una atmósfera gaseosa. Esto suele conducir a una disminución de sus propiedades mecánicas, sobre todo en las zonas próximas a la superficie del material. El grado de descarburización está en función de la temperatura, de la composición química del acero y de la composición química de la fase gaseosa con la que reacciona [6].

En estos procesos se requiere una buena predicción de las condiciones en que se verifican estas reacciones, y su extensión. Por tanto, el análisis termodinámico de las reacciones gas-sólido tiene un gran interés [6].

**Gráfico 10:** Descarburización de una aleación ferrosa.



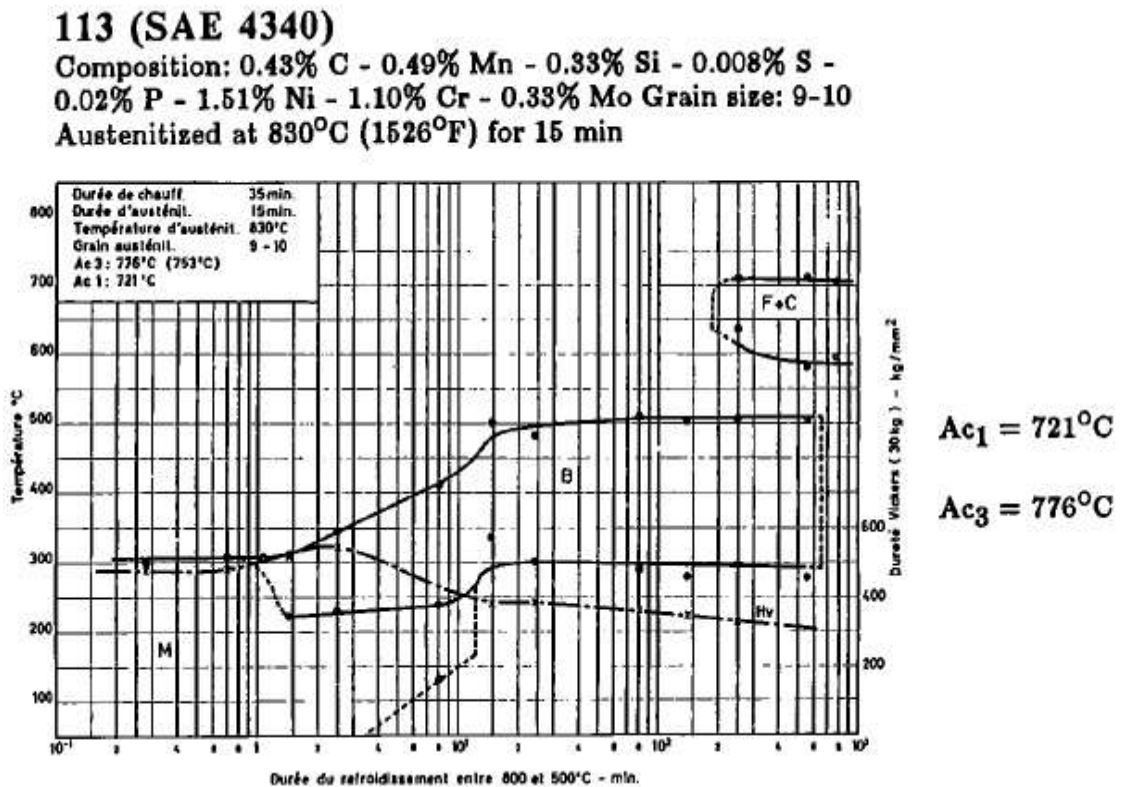
**Fuente:** Investigación de campo

**Elaborado por:** Montenegro, Olvera 2018

### **2.5.7. Características de materiales endurecidos en la superficie**

En el temple superficial se trata de conseguir que únicamente austenizar la zona superficial del acero, siendo en consecuencia lo único que se endurezca tras un enfriamiento rápido posterior. Para ello, habrá que aplicar calor únicamente a la superficie de la pieza, mediante técnicas suficientemente energéticas que permitan calentar rápidamente la superficie a temperaturas muy elevadas (por encima del punto crítico superior), sin un calentamiento significativo del interior. Existen diversas técnicas de calentamiento para conseguir un temple superficial [18]:

**Gráfico 11:** Diagrama TTT del acero AISI-4340



**Fuente:** Catálogo comercial Aceros y Servicios Thyssen-Krupp S.A.

### 2.5.8. Metalografía

La metalografía es la disciplina que estudia microscópicamente las características estructurales de un metal o de una aleación, buscando microestructura, inclusiones, tratamientos térmicos a los que haya sido sometido, microrechupes, con el fin de determinar si dicho material cumple con los requisitos para los cuales ha sido diseñado; además podemos hallar la presencia de material fundido, forjado y laminado. Podremos conocer la distribución de fases que componen la aleación y las inclusiones no metálicas, así como la presencia de segregaciones y otras irregularidades [23].

### 2.5.9. Norma ASTM E -3

Esta norma trata de las correctas técnicas de la preparación de las muestras para el análisis metalográfico, tales como son el corte, el desbastado, el ataque químico, y el análisis. Microestructuras tienen una fuerte influencia sobre las propiedades y aplicación

exitosa de los metales y aleaciones. Determinación y control de la microestructura requiere el uso de un examen metalográfico [23].

**Preparación de muestra metalográfica.** Selección de la muestra metalográfica: La selección de la muestra es muy importante debido a que esta debe ser representativa del material a examinar [24].

**Tamaño de muestra metalográfica.** Por conveniencia, no son mayores de 12 a 25 mm cuadrados, o aproximadamente de 12 a 25 mm de diámetro si el material es cilíndrico. La altura del material no debe ser mayor para ser manejado convenientemente [24].

**Limpieza.** Durante la preparación es importante que todas las grasas, aceites, residuos de los cortes deben ser removidos por un solvente orgánico. La limpieza ultrasónica puede ser efectiva para remover los últimos rastros de residuos en la superficie de la muestra [24].

**Esmerilado y pulido.** Muchas aleaciones y metales pueden ser preparados usando una similar secuencia de esmerilado y pulido. La gran diferencia estará en el pulido final [23].

**Esmerilado.** Este puede ser efectuado en un número de formas, desde frotar la muestra con un papel de abrasivo hasta el uso de equipos automáticos. El número del tamaño del abrasivo se describe a continuación [25].

**Pulido.** -Este se distingue del esmerilado mediante el uso de un abrasivo de pérdida ( $\leq 6\mu\text{m}$ ) utilizándolo en una superficie adecuadamente lubricada. La elección del abrasivo, lubricante, y de pulir la superficie es a menudo específica para el metal y el objeto de la investigación.

## 2.5.10. Dureza Norma E 384

La reciente revisión de la norma E384 de ASTM International, Método de prueba para medir la dureza Knoop y Vickers de materiales, aumenta su alcance de cobertura. La norma está bajo la jurisdicción del Subcomité E04.05 de la ASTM International sobre

pruebas de dureza por microindentación, que forma parte del Comité E04 de ASTM International sobre metalografía [26].

La dureza vickers es un método de ensayo por indentación en donde se utiliza una máquina calibrada con un indentador en forma piramidal con base cuadrada y se mide la diagonal resultante de la impresión luego de remover la carga [27].

Al utilizar este método es necesario trabajar en escala de gf y kgf y siguiendo el sistema internacional las unidades para la fuerza son los Newton y para la longitud los mm o las micras [27].

$$Vh = 1,8544 \frac{F}{d^2} \quad (\text{Ec.20})$$

**Donde:**

**F:** Fuerza dada en gf

**A:** Área de la superficie de indentación en metros cuadrados

**d:** Es la longitud de la diagonal de la indentación

**$\alpha$ :** Ángulo de cara del penetrador en grados. En la práctica es común utilizar la siguiente fórmula debido al valor del ángulo que es de  $136^\circ$  para una pirámide de diamante [27].

**CAPÍTULO III**  
**MÉTODOLOGÍA DE LA INVESTIGACION**

### 3.1. Localización

El presente trabajo se llevó a cabo en la ciudad de Quevedo, provincia de Los Ríos ubicada en la Región Litoral o Costa de la República del Ecuador, en el laboratorio de Mecánica de la Facultad Ciencias de la Ingeniería perteneciente a la Universidad Técnica Estatal de Quevedo.

**Gráfico 12 :** Ubicación geográfica.



Fuente: Google Maps, 2018

### 3.2. Límites geográficos

**Gráfico 13:** Límites Geográficos del Cantón Quevedo.



Fuente: [https://wiki2.org/es/Cant%C3%B3n\\_Quevedo](https://wiki2.org/es/Cant%C3%B3n_Quevedo)

El cantón Quevedo limita al Norte: Cantones de Buena Fé y Valencia; al Este: Quinsaloma; y la Provincia de Cotopaxi; al Sur: Cantón Mocache y Ventanas y al Oeste: Provincia de Guayas.

### **3.3. Tipos de investigación**

#### **3.3.1. Investigación bibliográfica**

La búsqueda de información relevante permitió dar un soporte técnico y respaldar el proyecto de investigación. La búsqueda de información relevante acerca del tratamiento térmico superficial por inducción electromagnética, tipos de bobinas inductoras, diseño del inductor, funcionamiento, caracterización del equipo, aplicaciones, manufactura y eficiencia en los procesos de producción.

#### **3.3.2. Investigación descriptiva**

Esta investigación permitió caracterizar como se da el fenómeno inductivo en un material de baja resistividad eléctrica como el acero, con el fin de alcanzar una agitación en las moléculas, calentándose hasta alcanzar una temperatura de 850 °C para ser tratado térmicamente, y darle una superficie dura con el fin de hacerla resistente a la fricción y por ende al desgaste.

#### **3.3.3. Investigación aplicada**

La aplicación del conocimiento en: Ciencia de los Materiales, Electricidad, Electrónica, transferencia de calor y modelado computacional, partiendo del fundamento teórico los parámetros geométricos del calentador de inducción electromagnética, se determinó sus componentes electrónicos, tipo de acero al que se puede tratar térmicamente, y un sistema de refrigeración para acelerar el proceso de enfriamiento del acero y lograr un temple óptimo en la pieza de trabajo.

### **3.4. Métodos de investigación**

Para el desarrollo de la memoria se emplearon los siguientes métodos de investigación.

#### **3.4.1. Método Analítico**

Una vez definido los conceptos básicos se procederá a desarrollar la metodología del diseño para la construcción del prototipo, esto consiste en realizar un estudio del comportamiento de un acero aleado cuando es calentado superficialmente por medio de inducción electromagnética, esto se llevará a cabo con una matriz de decisión (selección de alternativas). Luego se procederá a estructurar el proceso de construcción del prototipo para finalmente realizar pruebas de funcionamiento del prototipo.

#### **3.4.2. Alternativas de diseño**

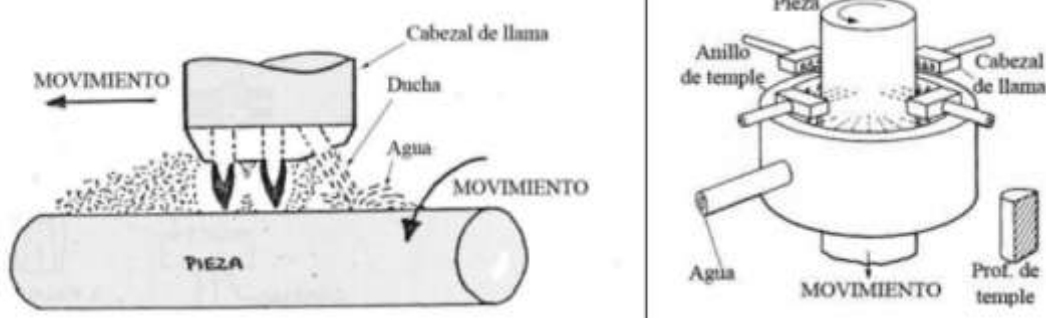
Se proponen tres alternativas de diseño para realizar tratamiento térmico superficial.

##### **Alternativa 1. (Tratamiento térmico superficial por flama)**

El endurecimiento por flama consiste en austenizar la superficie del acero por un calentamiento con una llama oxiacetilénica e inmediatamente templar en agua. Resulta en una capa superficial dura de martensita sobre un interior blando con una estructura de ferrita-perlita. No hay cambio en la composición y, por lo tanto, el acero tratado de esta manera deberá tener un contenido adecuado de carbono para obtener la dureza deseada en la superficie.

La profundidad de la zona endurecida puede controlarse, mediante el ajuste de la intensidad de la llama, el tiempo de calentado o la velocidad de recorrido. Se necesita habilidad para ajustar y operar el equipo que funciona manualmente, a fin de evitar sobrecalentamiento de pieza debido a la alta temperatura de la llama.

**Gráfico 14:** Calentamiento por flama método combinado.



**Fuente:** Temple a la llama by. Carolina Pimienta on Prezi

### Ventajas

- Portabilidad el equipo puede ajustarse para tratar solo el área que se requiere endurecimiento.
- El temple se efectúa completo sin austenita residual, por ende, se obtiene martensita homogénea, fina y dura.
- Proporciona alta dureza una capa de espesor pequeña de una pieza mientras que el interior permanece dúctil.
- Se puede tratar componentes después del maquinado de la superficie.

### Desventajas

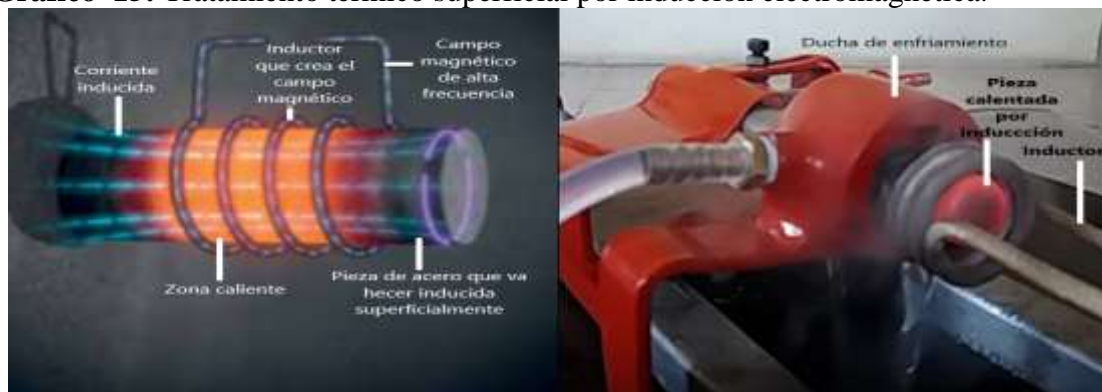
- Focos de sobrecalentamiento dañando de esta manera la pieza.
- Manejo incorrecto de la potencia de los quemadores causa un calentamiento no homogéneo.
- Riegos laborales por quemaduras o explosión del equipo.
- Emanación de gases tóxicos al medio ambiente.

### **Alternativa 2. (Tratamiento térmico superficial por inducción electromagnética)**

Este procedimiento se utiliza para endurecer superficialmente pequeñas piezas de acero, por temple de su zona periférica. El calentamiento por corrientes de alta frecuencia se efectúa en muy pocos segundos, pudiéndose además si se desea, localizar el tratamiento en zonas muy limitadas.

Las piezas que deben tratarse térmicamente se colocan dentro de una bobina de cobre y a continuación se calientan por encima de su temperatura de transformación mediante la aplicación de una corriente alterna a la bobina. La corriente alterna en la bobina induce un campo magnético alterno dentro de la pieza, que hace que la superficie exterior de la pieza se caliente a una temperatura superior a la del rango de transformación, y son sometidas a un enfriamiento rápido (duchado).

**Gráfico 15:** Tratamiento térmico superficial por inducción electromagnética.



**Fuente:** Investigación de campo y experimentación

**Elaborado por:** Montenegro, Olvera 2018

## Ventajas

- Debido a que los tiempos de calentamiento son cortos, el calentamiento por inducción a menudo provoca aumento de la producción y la reducción de los costos laborales.
- Capacidad para instalar el equipo de manera directa dentro de la línea de producción no demanda de mucho espacio.
- No necesita de técnicos expertos para la manipulación del equipo
- Su calentamiento es casi instantáneo es decir relativamente rápido en tan solo segundos.
- Amigable con el planeta ya que no emana gases tóxicos.
- Este método de calentamiento es seguro ya que no tiene contacto físico con el operador.

## Desventajas

- Costos altos de mantenimiento y capital inicial de adquisición.
- Descargas eléctricas, el tocar partes con carga eléctrica viva puede causar un toque fatal.
- Los campos magnéticos pueden afectar aparatos médicos implantados (marcapasos).
- Pueden causar interferencia.
- El sobre uso puede causar sobrecalentamiento del equipo.

## Alternativa 3. (Tratamiento térmico superficial termoquímico)

Los tratamientos termoquímicos son tratamientos térmicos en los que, además de los cambios en la estructura del acero, también se producen cambios en la composición química de la capa superficial, añadiendo diferentes productos químicos hasta una profundidad determinada. Estos tratamientos requieren el uso de calentamiento y enfriamiento controlados en atmósferas especiales. Entre los objetivos más comunes de estos tratamientos están aumentar la dureza superficial de las piezas dejando el núcleo más blando y tenaz, disminuir el rozamiento aumentando el poder lubricante, aumentar la resistencia al desgaste, aumentar la resistencia a fatiga o aumentar la resistencia a la corrosión. Las sustancias químicas utilizadas normalmente son: carbono, nitrógeno y sulfato, pudiendo estar en estado gaseoso, líquido o sólido.

Ejemplo el proceso de **nitruración** se produce a temperaturas relativamente bajas (500-600°C), y en una atmósfera de amoníaco que al descomponerse desprende nitrógeno elemental capaz de reaccionar con el metal.

La duración de la capa superficial tratada por nitruración es aproximadamente 10 veces mayor que la de la cementación, necesitando unas 20-50 horas para alcanzar una profundidad de 0.2-0.4 mm.

**Gráfico 16 :** Nitrurado de elementos mecánicos.



**Fuente:** <http://kuzudecoletaje.es/tratamientos-termicos-de-los-metales-la-nitruracion/>

### **Ventajas.**

- De los tratamientos superficiales termoquímicos el nitrurado provee mayor dureza alcanzando 70 en la escala Rockwell C.
- La dureza es inmediata, tan pronto la atmosfera del químico tiene contacto con la superficie del metal esta se vuelve dura.
- Trabajan a temperaturas relativamente bajas (400-600°C).

### **Desventajas**

- Es el tratamiento superficial más lento, para completarse requiere varios días; por esta razón, está limitada a capas muy delgadas.
- Es un proceso caro, el gas amoniaco es mucho más costoso que otros gases carburizantes; también el equipamiento es demasiado costoso.
- El proceso de este tipo de endurecimiento requiere un control muy específico, la cámara de calentamiento debe mantenerse a baja temperatura y herméticamente sellada, además el porcentaje de amónico debe ser cuidadosamente regulado por un operador experimentado.
- Se debe tener manejo especial en seguridad cuando se manejan estos químicos puesto que es un proceso riesgoso y los resultados pueden ser fatales.

## **Criterios de Diseño**

Los criterios de diseño sometidos a ponderación para la selección de alternativas son los siguientes:

- **Costos de fabricación:** Se busca un diseño con el cual no se vea afectado su adquisición sin tener que reducir la calidad de cada uno de sus componentes.
- **Capacidad de producción:** Debe tener la capacidad de aumentar la producción y reducir los costos de producción.
- **Mantenimiento:** Se debe considerar su facilidad a la hora de hacer su mantenimiento y reemplazo de componentes, garantizando su competitividad.
- **Velocidad de calentamiento y enfriamiento:** Debe cumplir con los requerimientos indicados para el proceso de tratamiento superficial puesto que de esto depende la dureza alcanzada en la superficie del acero tratado.
- **Capacidad de instalación dentro de la línea de producción:** Al momento de insertar el equipo en la línea de producción se debe observar la demanda de espacio del equipo y compararlo con el espacio que dispone un taller industrial.
- **Operación del equipo:** Al momento de su puesta en marcha se debe considerar si este equipo requiere o no personal capacitado para operarlo.

A continuación, se realiza el método de ponderación de criterios de cada una de las alternativas en base a los criterios expuestos anteriormente para seleccionar la alternativa que cumpla con los requisitos y brinde la mejor solución para el diseño del prototipo.

### **Método de ponderación de criterios de evaluación.**

Se definió la importancia de cada criterio evaluando su impacto al momento del diseño del prototipo para lo cual se consideró: el costo de construcción, la capacidad de

producción, mantenimiento, la velocidad de calentamiento y enfriamiento, la capacidad de instalación dentro de la línea de producción, y por último la operación del equipo.

En la tabla se detalla la evaluación del peso específico de cada criterio.

**Tabla 4.** Matriz de ponderación para las características del bloque

	Capacidad de producción	Costos de fabricación	Velocidad de calentamiento	Capacidad de instalación	Operación	Total	Ponderación (%)
Capacidad de producción		1	1.5	1	3	6.5	23
Costos de fabricación	1		3	2	1	7	23
Velocidad de calentamiento	1.5	1.5		1	2	6	20
Capacidad de instalación	1.5	1.5	3		1	7	22
Operación	1	0.5	1	1		3.5	12
<b>Total</b>						30	100

Elaborado por: Montenegro, Olvera 2018

Obtenido los resultados de la evaluación de cada variable en la matriz de ponderación, se procede a seleccionar la mejor alternativa en la matriz de decisión mostrada en la siguiente tabla.

**Tabla 5.** Matriz de decisión para las alternativas de diseño

Alternativa	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Parámetros			
Cap. De Producción 23%	1.9	2.5	2
Costo 23%	1.7	1.9	1.5
Velocidad de Calentamiento 20%	2	2.5	1.2
Cap. De Instalación 22%	1.8	1.4	1
Operación 12%	1	1.5	1
Total	8.4	9.8	6.7

Elaborado por: Montenegro, Olvera 2018

Su asignación de valores se cumplió con los siguientes requisitos:

- De 2 a 2.5 si el criterio de las filas es superior que las columnas
- De 1 a 1.9 si el criterio de las filas es equivalente o (=) al de las columnas.
- 0 si el criterio de las filas es inferior.

En referencia a la capacidad de producción para cumplir con los objetivos del prototipo se consideró que la alternativa 2 es la que, según sus características, ofrece un calentamiento instantáneo, sin riesgos debido a que no tiene contacto físico con el operador, amigable con el planeta puesto que no emana gases tóxicos, se puede instalar fácilmente a la línea de producción porque no demanda de mucho espacio, el costo de fabricación es justificado por el aumento en la producción, y su operación la puede realizar un personal sin certificación.

### **3.4.3. Método bibliográfico**

Por medio de este método se realizaron consultas en fuentes bibliográfica como: libros, revistas, páginas web, artículos científicos, donde se extraerá la información relevante sobre el principio de funcionamiento de la máquina, como la aplicación en la industria metalmeccánica, las partes y componentes que forman el conjunto del sistema a utilizar para el diseño y construcción de la máquina.

### **3.4.4. Método Experimental**

Una vez seleccionado las partes y componentes del sistema de calentamiento por inducción electromagnética, se procederá a su construcción y puesta a prueba.

## **3.5. Fuentes de recopilación de información**

Toda investigación se basa en la recopilación de información que tenga antecedentes importantes y significativos acorde con lo que se ha planteado. En este proyecto de investigación se empleará fuentes bibliográficas primarias y secundarias, tales como artículos científicos, revistas, libros y la observación del proceso de manufactura en la industria metalmeccánica, la cual conlleva a un sinnúmero de procesos entre esos esta, el

tratamiento de cementado que se le da un metal luego de ser formado cambiando sus características mecánicas.

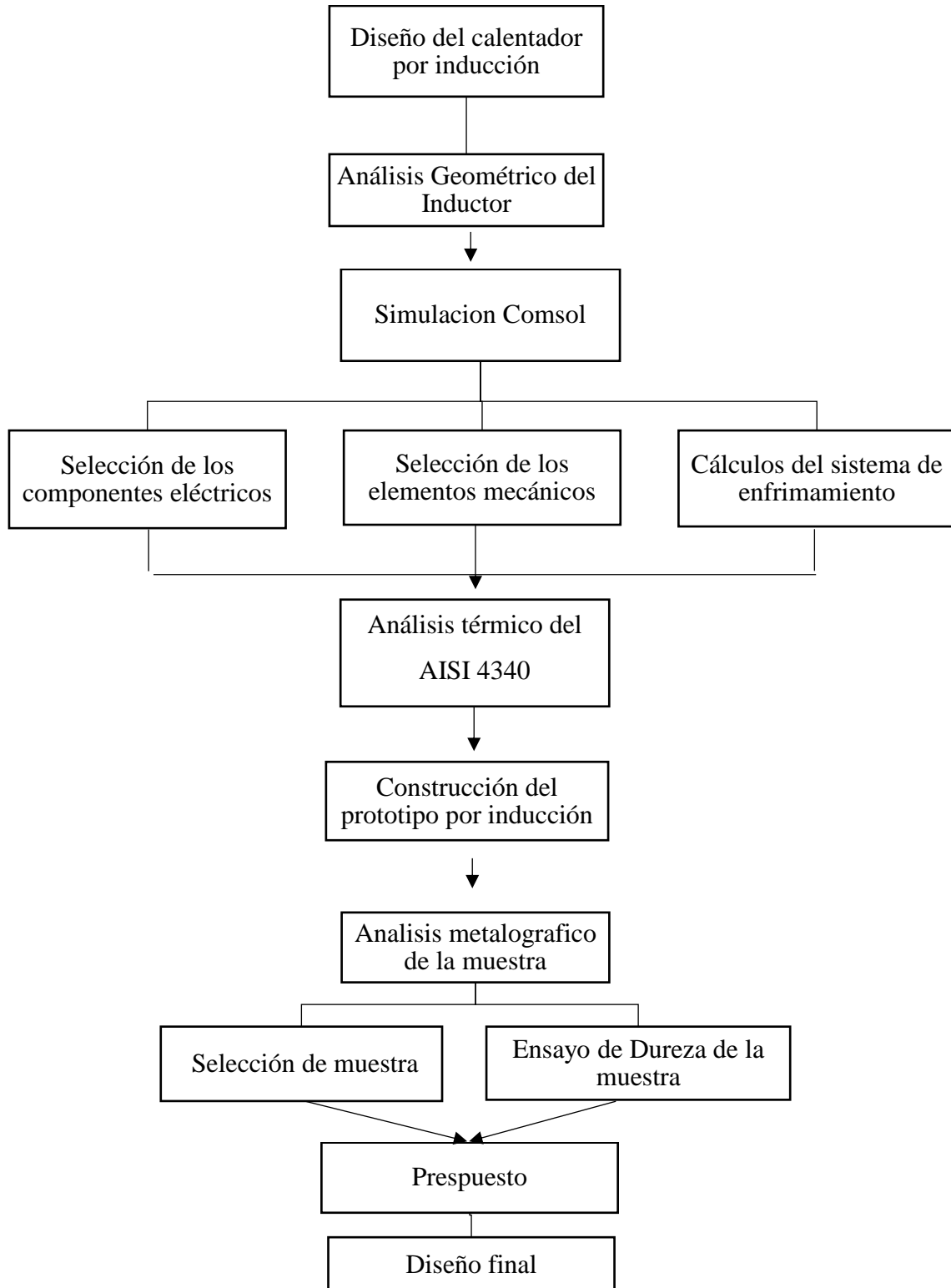
La investigación nace debido a la necesidad de mejorar el proceso de manufactura de elementos mecánicos que se fabrican en el Taller Industrial SERVINDUST SALAZAR.

### **3.6. Diseño de la Investigación**

En la concepción de un proyecto de investigación es necesario seguir una sucesión de pasos. El desarrollo de la investigación comienza con la investigación que comprende el: estudio de los fenómenos que se produce cuando un material conductor (aleación ferrosa) es sometido a un campo magnético atravesado por una corriente que circula (bobina inductora) en forma perpendicular a la superficie, diseños y simulaciones que conllevan al análisis e interpretación de datos determinados en los resultados.

### 3.6.1. Proceso del Diseño

**Gráfico 17:** Diagrama de flujo de la construcción del prototipo calentador por inducción electromagnética.



Elaborado por: Montenegro, Olvera 2018

### 3.6.2. Instrumentos de la investigación

Se establecen parámetros geométricos mediante el análisis del material bibliográfico existente, para obtener un diseño óptimo que cumpla con las especificaciones que recomiendan los fabricantes de distintos aceros, las principales funcionalidades del calentador de inducción electromagnética, para el fin propuesto se predispondrán los siguientes instrumentos: software de diseño 3D y Solidworks o Comsol Multiphysics, Coil32v, que nos permitirá recopilar, tabular y manipular datos en las diferentes condiciones de diseño y simulación.

### 3.7. Recursos humanos y materiales de investigación

#### 3.7.1. Recurso Humano

##### Docentes:

Docentes de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo

#### 3.7.2. Recurso Material

Para la elaboración del siguiente proyecto de investigación se utilizarán los siguientes materiales y equipos.

**Tabla 6:** Descripción de requerimiento de software

Tipo	Descripción
Software Básico	Paquete Office 2010 Coil32v.
Software de Diseño	COMSOL Multiphysics 5.3 a. SOLIDWORKS 2017.
Software de Programación	Arduino

Elaborado por: Montenegro, Olvera 2018

**Tabla 7:** Descripción de equipos Varios

<b>Máquinas y Herramientas</b>	<b>Componentes electrónicos</b>	<b>Materiales adicionales</b>
Soldadura del voltaje continuo para GMAW.		
Oxiacetilénica (Soplete, cilindros de oxígeno y acetileno, válvulas de control).		
Soldadura del corriente continuo para SMAW.	Termocupla Tipo K Regulador de voltaje Condensadores	Tornillería Remaches
Cortadora de Plasma	Fuentes de poder	Discos de corte
Taladro manual	Resistencias Arduino	Disco de pulir Terminales
Taladro de pedestal	Diodos rectificadores	
Torno Paralelo		
Cizalla		
Pulidora		
Tronzadora		

---

**Elaborado por:** Montenegro, Olvera 2018

**CAPÍTULO IV**  
**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

## 4.1. Análisis Geométrico del inductor

Durante el desarrollo del proyecto, se estudiaron las dificultades técnicas que se presentan en la fabricación del sistema, y a su vez hacer la correcta elección de los materiales a ser empleados para la construcción del prototipo, las dificultades presentes en el proceso de construcción se derivan de dos aspectos principales, el primero, la manufacturación de la bobina y el segundo la fuente de alimentación y potencia para la bobina inductora.

### 4.1.1. Bobina de inducción

La construcción de la bobina de inducción se la llevara a cabo por un proceso constante de ensayos y error (prototipos de menor escala), dentro de los parámetros empíricos sugeridos en la literatura, a continuación, se hace una breve descripción de los pasos sugeridos para su manufacturación.

- **Elección de la geometría:** Debido a la capacidad de concentrar flujo magnético en su interior y a la factibilidad de su construcción, la geometría elegida es de tipo solenoide con 4.5 espiras y sección transversal circular, garantizando las condiciones eléctricas fundamentales en el diseño de inductores.
- **Material:** Para la construcción de la bobina, se empleó un alambre de cobre de 4mm de diámetro, y un aislante de alta resistencia térmica, dando como resultado una bobina helicoidal de varias espiras (o solenoide).
- **Refrigeración:** Durante el proceso de calentamiento la bobina experimentará pérdidas por efecto Joule, debido a su resistencia eléctrica, razón por la cual esta se refrigerará al aire.

#### 4.1.2. Manufacturación de la bobina

**Dimensiones:** Considerando la bobina de inducción con un diámetro interno ( $D = 27 * 10^{-3}m$ ), un paso entre cada espira de 0.5 mm y 3.5 espiras, la longitud del alambre de cobre, no debe ser menor.

$$l_{alambre} = \pi * D * \text{número de espiras} * 1,2 \quad (\text{Ec.21})$$

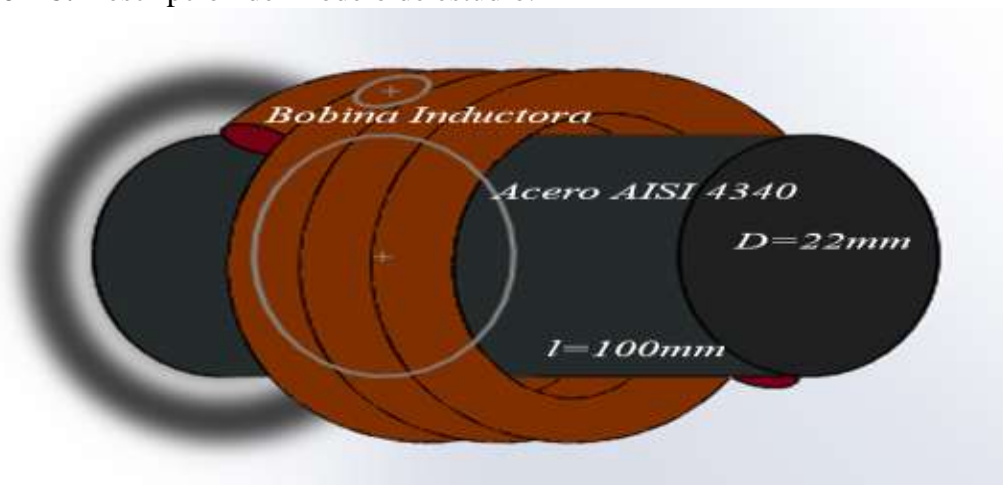
$$l_{alambre} = \pi * (27 * 10^{-3}m) * 3.5 * 1,2 = 0.35 m$$

Donde el factor de (1.2), adopta un 20% más de longitud del alambre para poder conectar a la fuente los terminales de generación electromagnética.

#### 4.1.3. Descripción del modelo

La pieza de trabajo a analizar es un eje de acero de 22mm de diámetro con una longitud de 100mm, bajo la influencia de una bobina de cobre de 3.5 espiras al vacío, sometido a un proceso de cementado luego de ser calentada a 820°C temperatura recomendada por el fabricante del acero AISI 4340.

**Gráfico 18:** Descripción del modelo de estudio.



Elaborado por: Montenegro, Olvera 2018

El acero AISI 4340 se utiliza generalmente en la fabricación de piezas que requieren una buena combinación entre dureza y tenacidad, como: engranajes para máquinas, ejes para vehículos y camiones, discos de freno, cardanes, bielas para motores, árboles para automóviles, ejes de transmisión de grandes dimensiones, entre otras aplicaciones.

Debido a su composición química (Cr, Ni, Mo) tiene un gran rendimiento en piezas sometidas a ciclos de trabajo. Su tratamiento térmico se lo realiza calentando la pieza hasta alcanzar una temperatura de 820°C, luego enfriar al aire, en aceite y por duchas de agua.

**Tabla 8:** Propiedades de la pieza de trabajo Acero AISI 4340

Descripción	Valor
Diámetro	22 mm
Longitud	18 mm
Permeabilidad Relativa	1000
Conductividad Eléctrica	0.1000 [ $\mu S/cm$ ]
Capacidad Calorífica	$950 \left[ \frac{Kcal}{m^3 * ^\circ C} \right]$
Densidad	1000 [ $Kg/m^3$ ]
Coefficiente de expansión térmica	11.5 e-6 [ $1/K$ ]
Conductividad térmica	$50.2 \left[ \frac{W}{m * K} \right]$
Módulo de Young	210 e 9 [ $Pa$ ]

**Elaborado por:** Montenegro, Olvera 2018

La bobina inductora o solenoide (Gráfico 18) es la responsable de proporcionar la inducción electromagnética. Sus propiedades se encuentran en la (tabla 9).

**Tabla 9:** Propiedades de la bobina de cobre.

<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
Diámetro del alambre	4 mm
Diámetro de alambre con aislamiento	4.36 mm
Longitud del alambre con fines	444 mm
Distancia a la superficie	5 mm
Conductividad Eléctrica	5.998e7 [S/m]
Permeabilidad Relativa	1
Densidad	8700 [Kg/m <sup>3</sup> ]
Coefficiente de expansión térmica	17e-6 [1/K]
Conductividad térmica	400 [ $\frac{W}{m \cdot K}$ ]
Módulo de Young	110 e 9 [Pa]
Capacidad calorífica	385 [ $\frac{J}{Kg \cdot K}$ ]
Resistividad de resistencia	1.72e-8 [ $\Omega \cdot m$ ]
Relación de Poisson	0.35
Temperatura de referencia	298 K

**Elaborado por:** Montenegro, Olvera 2018

Finalmente se tiene el medio en el cual se encuentra la bobina, en este caso es aire que rodea el conjunto bobina-eje, indispensable para la transferencia de calor.

**Tabla 10:** Propiedades del aire.

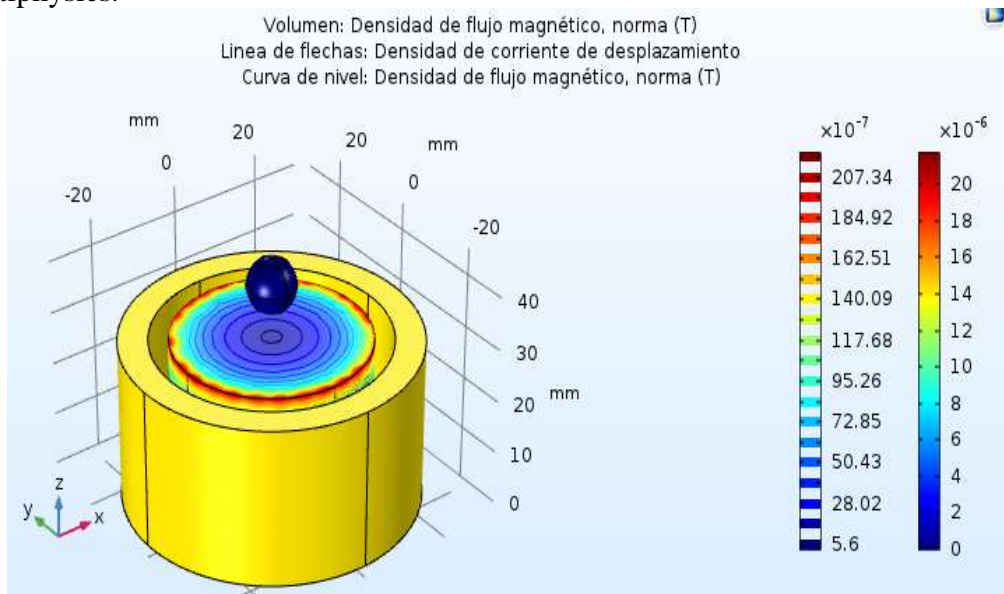
<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
Diámetro del cilindro de aire	50 mm
Longitud del cilindro de aire	80 mm
Conductividad eléctrica	0 [S/m]
Permeabilidad relativa	1
Calor específico	1.4
Viscosidad dinámica	1.805 * 10 <sup>-5</sup> . Pa*s.
Densidad	1,225 kg/m <sup>3</sup>
Conductividad térmica	0,022 W/m <sup>o</sup> K

**Elaborado por:** Montenegro, Olvera 2018

Con la temperatura ambiente de 29.75 °C aproximadamente y la temperatura final de austenización del acero AISI-4340 es de 820°C, estos gradientes de temperaturas representan los puntos de interés en este estudio, con la temperatura inicial en el centro axial de la pieza de acero y la temperatura final en la superficie, se puede hacer notar el efecto piel en el calentamiento por inducción electromagnética sobre la pieza de trabajo.

Con la ayuda del software COMSOL Multiphysics se pudo determinar la densidad de flujo magnético, causante del efecto pelicular y de la transferencia de calor que parte desde el punto externo del eje, y avanza hacia el centro del mismo y con el aparece la descarbonización del carbono existente en el acero y formando una capa de dureza superficial por dicho efecto.

**Gráfico 19:** Análisis de la densidad de flujo magnético en un eje de acero con Comsol Multiphysics.

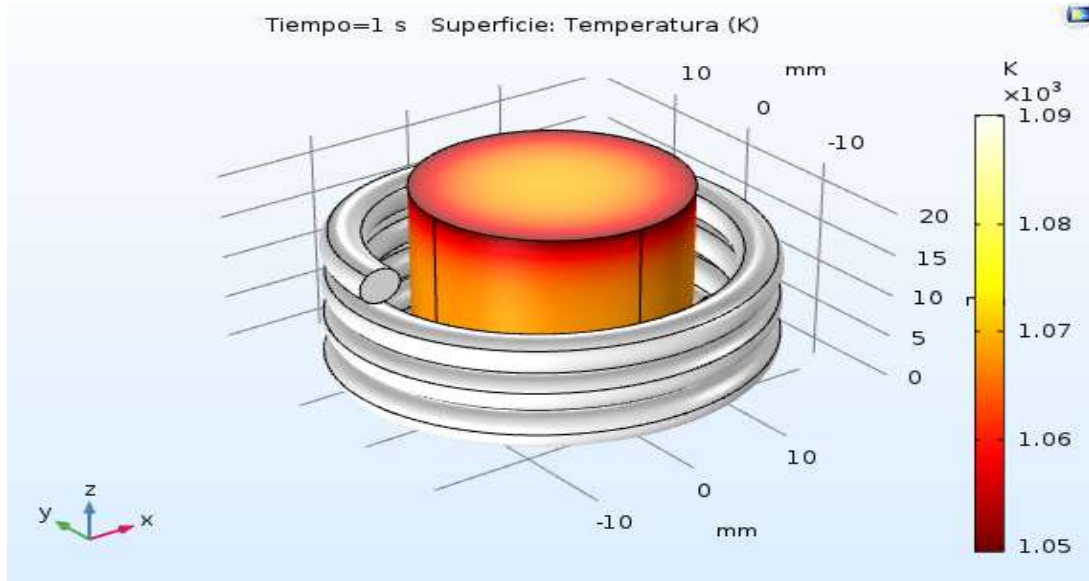


**Fuente:** COMSOL Multiphysics  
**Elaborado por:** Montenegro, Olvera 2018

## 4.2. Simulación in CAD

Con los resultados obtenidos manualmente se procedió a realizar un análisis estático con ayuda de software COMSOL Multiphysics observando el fenómeno de transferencia de calor desde la superficie hacia el interior del eje.

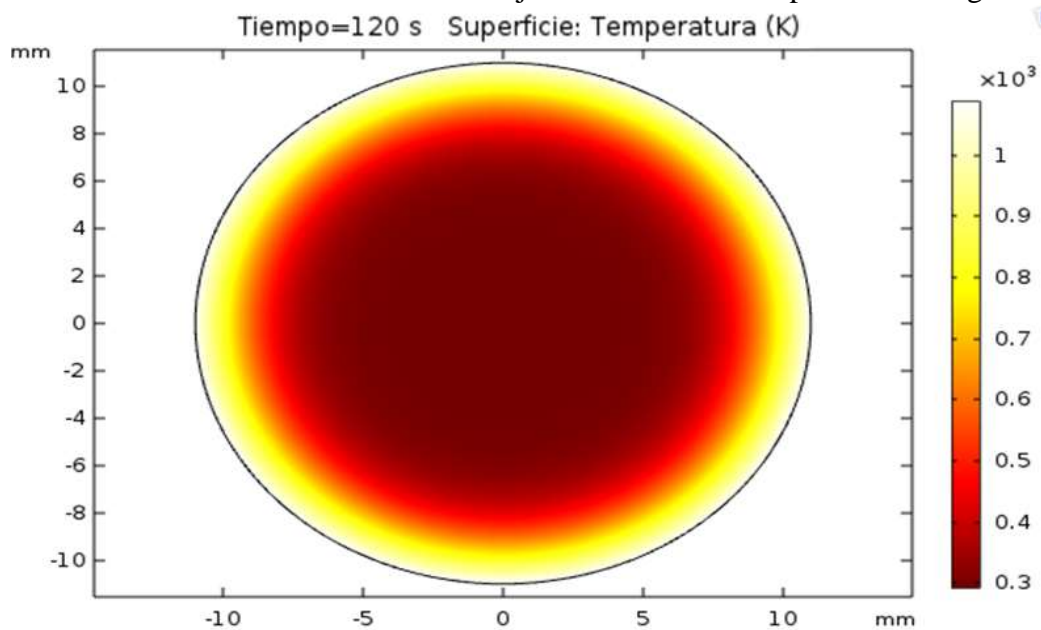
**Gráfico 20:** Gradiente de temperatura sobre el eje de acero.



**Fuente:** COMSOL Multiphysics

**Elaborado por:** Montenegro, Olvera 2018

**Gráfico 21:** Análisis termodinámico del eje sometido a un campo electro-magnético.



**Fuente:** COMSOL Multiphysics

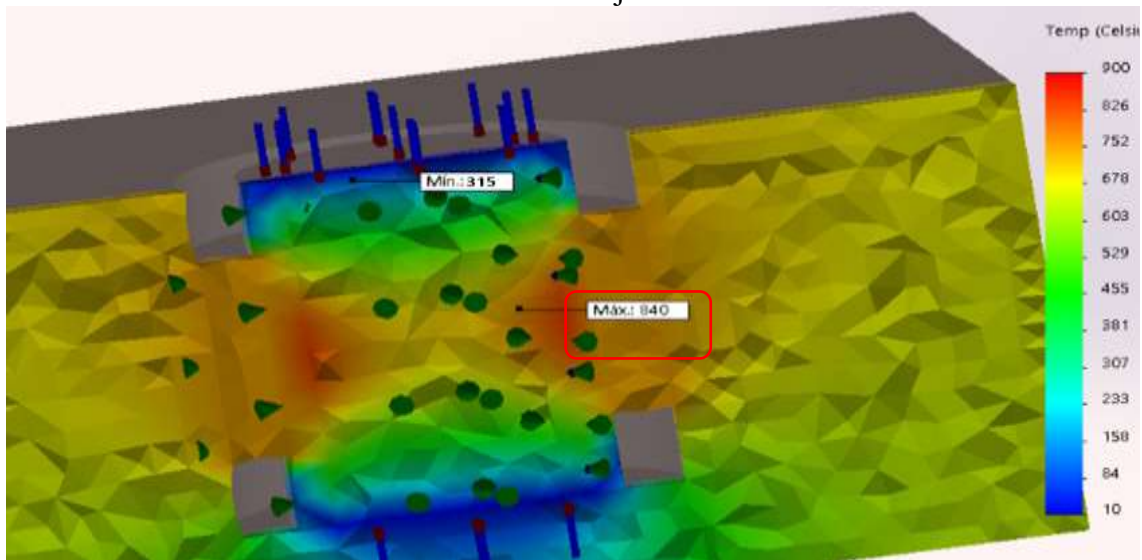
**Elaborado por:** Montenegro, Olvera 2018

Con el análisis se puede decir que la transferencia de energía del campo magnético se manifiesta en forma de calor en la superficie avanzando desde la parte externa hacia el centro del eje, y se puede apreciar en el gráfico (21).

Para seguridad se procedió a realizar un segundo análisis estático con ayuda del software solidworks determinando la máxima temperatura.

Con la simulación que se realizó con ayuda del software Solidworks, la pieza es sometida al calentamiento por inducción electromagnética con una bobina de una capa de espiras de 3.5 vueltas con un diámetro interno de la forma de 27 mm, a una distancia de 8 mm de superficie del eje hacia el borde de las espiras. Para efectos de la simulación se consideró el aire como un sólido y así poder observar la transferencia de calor descrita en la ilustración 24 dando como resultado una temperatura máxima de 840°C dentro del campo magnético y una temperatura sobre los 325°C fuera de los límites de la bobina de inducción dándose una transferencia de calor por conducción.

**Gráfico 22:** Resultado térmico del análisis al eje



**Fuente:** SolidWorks

**Elaborado por:** Montenegro, Olvera 2018

### 4.3. Análisis electrónico del prototipo

Para el análisis y formulación del modelo matemático se parte de la geometría que tiene la pieza de trabajo con estos parámetros el diseño queda de la siguiente manera:

Bobina inductora de 27 mm de diámetro de cobre.

**Tabla 10.** Parámetros de diseño para bobina

Descripción	Valor
Diámetro del hilo (Alambre) $d_a$	4 mm
Número de espiras (Vueltas) $N$	3.5
Diámetro interno de la forma $D$	27 mm
Corriente que circula por la espira	7.5 A
Espacio entre espira	1 mm
Longitud de la bobina	20 mm

Elaborado por: Montenegro, Olvera 2018

### **Determinación de la Inductancia del Alambre.**

$$L = \frac{N^2 * \mu * A}{l}$$

Área de sección transversal del alambre inductor

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$A = \pi(27 * 10^{-3} m)^2 / 4$$

$$A = 5.72 * 10^{-4} m^2$$

### **Permeabilidad Magnética ( $\mu$ )**

$$\mu = \mu_0 * \mu_r$$

### **Permeabilidad de vacío ( $\mu_0$ )**

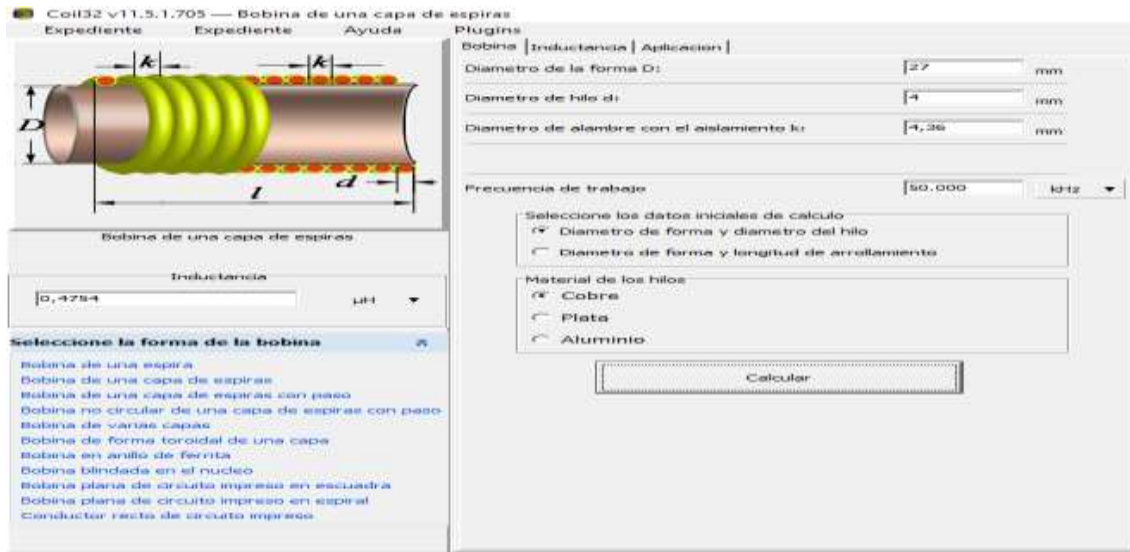
$$\mu_0 = 4\pi * 10^{-7}$$

$$L_0 = \frac{(3.5)^2 * 1.26 * 10^{-6} \frac{H}{m} * 5.72 * 10^{-4} m^2}{20 * 10^{-3} m}$$

$$L_0 = 3.531 * 10^{-7} H \Rightarrow 0.3531 \mu H$$

### Ingresando los datos en el software Coil32 v 11.5.

**Gráfico 23:** Ingreso de parámetros geométricos en el software Coil32v.

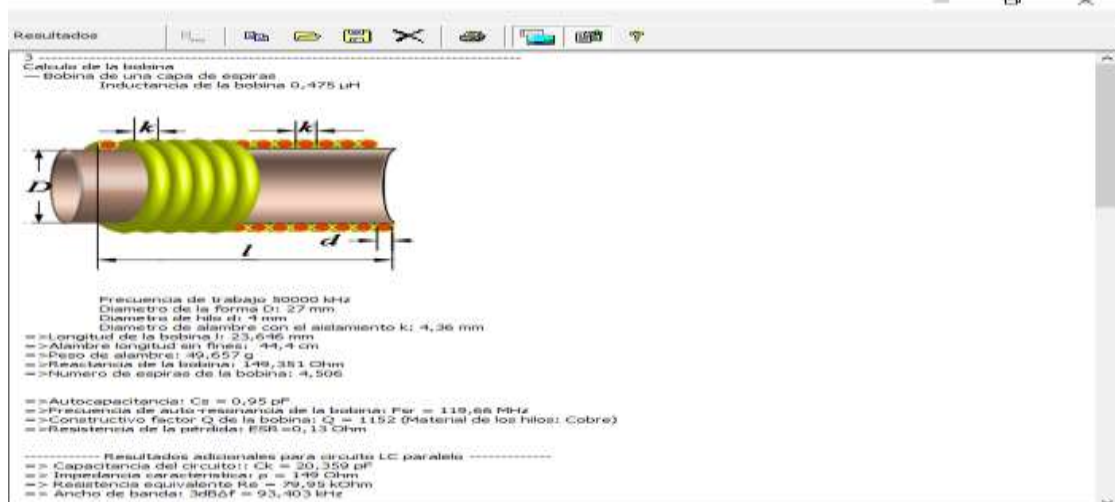


Fuente: software Coil32v

Elaborado por: Montenegro, Olvera 2018

### Obtenemos los siguientes resultados:

**Gráfico 24:** Obtención de Resultados



Fuente: software Coil32v

Elaborado por: Montenegro, Olvera 2018

## Resultados del software para la bobina de 27mm al vacío.

**Tabla 11:** Resultados arrojados del software COIL 32v.

Descripción	Valor
Inductancia de la bobina	0,4754 $\mu$ H
Longitud de la bobina l	23,646 mm
Alambre longitud sin fines	44,4 cm
Peso de alambre	49,657 g
Reactancia de la bobina	149,351 Ohm
Numero de espiras de la bobina	4,506
Autocapacitancia	Cs = 0,95 Pf
Frecuencia de auto-resonancia de la bobina	Fsr = 119,66 MHz
Factor $Q$ de selectividad de la bobina	$Q = 1152$ (Material de los hilos: Cobre)
Resistencia de la pérdida:	ESR=0,13 Ohm

### **Resultados adicionales para circuito LC paralelo**

Capacitancia del circuito:	Ck = 20,359 Pf
Impedancia característica:	$\rho = 149$ Ohm
Resistencia equivalente	Re = 79,95 kOhm
Ancho de banda:	3dB $\Delta$ f = 93,403 kHz

**Fuente:** software Coil32v

**Elaborado por:** Montenegro, Olvera 2018

### **Factor Q de selectividad para la bobina**

El factor  $Q$ , de calidad o selectividad, mide la relación entre la energía reactiva que se almacena y la energía que se disipa, durante el ciclo completo de la señal.

$$Q = \frac{2\pi(\text{energía máxima almacenada por ciclo})}{\text{Energía disipada por ciclo}} \quad (\text{Ec.22})$$

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{2\pi * f * L}{R}$$

$$Q = \frac{149,351 \text{ Ohm}}{0,13 \text{ Ohm}} = 1148.85$$

**Donde:**

$X_L$ :: Reactancia inductiva ( $\Omega$ ).

R: Resistencia de la bobina real ( $\Omega$ ).

f: Frecuencia (Hz).

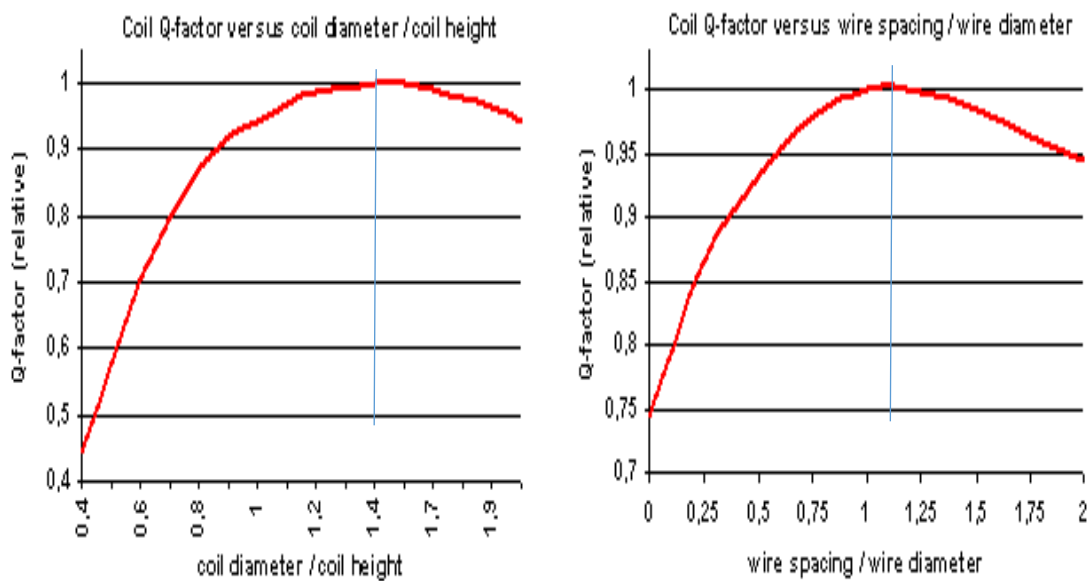
L:: Inductancia ( $\mu\text{H}$ ).

Q: depende de la frecuencia.

Para obtener bobinas de mayor calidad es preciso comprender el siguiente gráfico.

Es decir; cuando hacemos circular una cierta cantidad de energía en la bobina, esta debe ser capaz de almacenar dicha energía para obtener un porcentaje alto de inductancia en cada ciclo de trabajo del inductor.

**Gráfico 25:** Relación a considerar entre el diámetro y la longitud de la bobina para la obtención de un Q de selectividad elevado.



**Fuente:** <http://www.strobbe.eu/on7yd/136ant/>

El diámetro de la bobina debe ser mayor a un 40% que la longitud de la misma, mientras que el diámetro del alambre debe ser igual al paso entre las espiras de la bobina.

### Magnitud del campo magnético.

$$B = \mu_0 * \frac{N}{l} * i$$

$$B = 4\pi * 10^{-7} \frac{H}{m} * \frac{3.5}{20 * 10^{-3}} * 7.5A$$

$$B = 1.649 * 10^{-3} \text{ T (Teslas)}$$

### Densidad de la energía almacenada en el inductor ( $u_i$ )

$$u_i = \frac{1}{2 * \mu_0} * B^2$$

$$u_i = \frac{1}{2(4\pi * 10^{-7})} * (1.649 * 10^{-3})^2$$

$$u_i = 1.08 \frac{J}{m^3}$$

### Energía del inductor

$$u = \frac{1}{2} * l * i^2$$

$$u = \frac{1}{2} * 20 * 10^{-3} * (7.5)^2$$

$$u = 0.5625 \text{ J}$$

### Resistencia del alambre ley de Ohm

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$A = \frac{\pi(4 * 10^{-3})^2}{4} = 1.2566 * 10^{-5}$$

$$R_a = 1.72 * 10^{-8} \Omega \cdot m \frac{0.444 m}{(1.2566 * 10^{-5} m^2)} = 6.07 * 10^{-4} \Omega$$

$$R_{total} = R_a * R_e = 6.07 * 10^{-4} * 79,95 k\Omega = 48,59\Omega$$

Una vez obtenida la resistencia, el cálculo del voltaje es inmediato, sin más que aplicar la ley de Ohm.

$$\Delta V = R * I$$

$$\Delta V = 48.59\Omega * 7.5A$$

$$\Delta V = 364.41 V$$

### **Cálculo para el transformador**

$$Q = 6.989Wh = E_{Tr}$$

$$E_{Tr} = P_{Tr} * t$$

$$P_{Tr} = \frac{6.989Wh}{4.166 * h}$$

$$P_{Tr} = 1677.62 W$$

Ahora para una salida de 220V en el secundario del transformador:

$$P = V * I$$

$$I = \frac{P}{V}$$

$$I = \frac{1677.62 W}{220V}$$

$$I = 7.62$$

## 4.4. Diseño del calentador por inducción electromagnética

### Profundidad de penetración

En este tipo de calentamiento se recomienda utilizar valores de frecuencia 25 y 60KHz. Para nuestro caso de calentador se utiliza una frecuencia de 50Khz, la misma que genera una capa endurecida de aproximadamente 1mm.

Mediante la ecuación 13, se puede determinar la profundidad de penetración estándar en el material.

$\rho$  es la resistividad eléctrica de acero =  $20 * 10^{-8}$  [ $\Omega$  m]

$\mu_0 = 4\pi * 10^{-7}$  [H/m]

$\mu_r$  permeabilidad magnética relativa del acero = 1.00720

$$\delta_1 = \sqrt{\frac{20 * 10^{-8}}{\pi(50000)(4 * \pi * 10^{-7}) * \mu_r}}$$

$$\delta_1 = 0.001002 \text{ m}$$

$$\delta_1 = 1 \text{ mm}$$

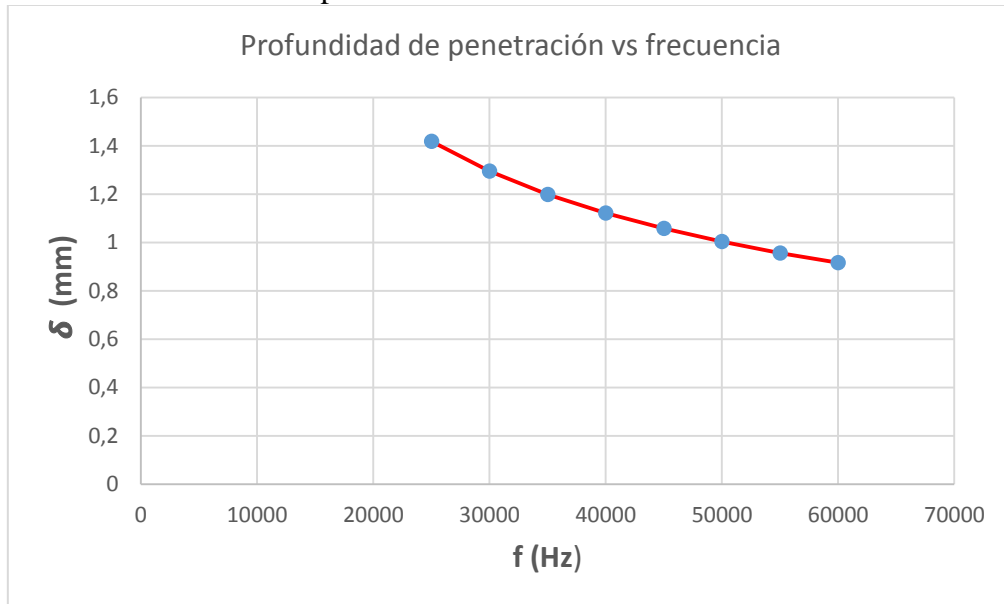
**Tabla 12:** Valores de frecuencia y para la dureza

Frecuencia Vs Penetración	
Frecuencia (Hz)	Penetración (mm)
25000	1,418
30000	1,295
35000	1,199
40000	1,121
45000	1,057
50000	1,003
55000	0,956
60000	0,916

Fuente: Microsoft Excel

Elaborado por: Montenegro, Olvera 2018

**Gráfico 26:** Profundidad de penetración en función de la frecuencia.



**Fuente:** Microsoft Excel

**Elaborado por:** Montenegro, Olvera 2018

**Interpretación:** Como se muestra en la figura los valores más aceptables de frecuencia que nos brinda una penetración de 1mm se encuentra en el rango de (25- 50) kHz. Con estos valores se procedió a diseñar el inductor y el circuito electrónico que va estar alimentando a la bobina de inducción.

### Rendimiento de acoplamiento entre el inductor y la pieza base

La constante de acoplamiento se la determina mediante la ecuación 2.16 con los datos del diámetro del eje, que es la carga a trabajar y la bobina de inducción previamente dicha entonces obtenemos es siguiente valor:

$$K_1 = \left(\frac{22}{27}\right)^3$$

$$K_1 = 0.5$$

$$K_2 = \left(\frac{15}{27}\right)^3$$

$$K_2 = 0.2$$

Donde  $d$  es el valor del diámetro exterior de la pieza, y  $D$  es el diámetro interior de la bobina,  $K$  varia en general entre 0 y 1 entre más se aproxime el valor a 1 mayor será el rendimiento del proceso.

Por lo tanto, se obtiene un buen factor de acoplamiento que deriva en un excelente factor de acoplamiento entre el inductor y la pieza de trabajo a tratar.

**Gráfico 27:** Rendimiento del sistema inductor



Elaborado por: Montenegro, Olvera 2018

#### 4.5. Análisis térmico del AISI 4340

##### Volumen del eje a calentar.

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 * h$$

$$V_{cil} = \frac{\pi}{4} (0.022 \text{ m})^2 * (0.018 \text{ m})$$

$$V_{cil} = 6.842 * 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ despejando } m = \rho * V$$

$$m_{acero} = 7840 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 6.842 * 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$m_{acero} = 0.053 \text{ Kg}$$

### Energía Transferida en forma de calor.

$$Q = m * C_p * \Delta T$$

$$Q = 0.053 \text{Kg} * \left( 0.1098 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}} \right) * (820 - 25)^\circ\text{C}$$

$$Q = 4.626 \text{Kcal} \quad 1 \text{Kcal} = 0.00116222 \text{KWh}$$

$$Q = 0.005376429 \text{ kWh}$$

$$Q = 5.376 \text{ Wh}$$

Esta energía requiere ser multiplicada por un factor de seguridad estimado de 1.3 (30%) correspondiente a la suma de pérdidas por conducción (10%) convección (10%) por radiación (10%) existentes a la carga.

$$Q = 6.989 \text{ Wh}$$

$$Q = 25160.4 \text{ J}$$

Se necesita 25160.4 J para elevar la temperatura del acero desde su temperatura ambiente hasta alcanzar los 840°C, que es la temperatura de austenización del acero 4340 formando el crecimiento del grano, formando una superficie endurecida resistente al desgaste por fricción.

### La potencia disipada la obtenemos por aplicación de la ley de Joule

$$P = I^2 * R$$

$$P = (7.5 \text{ A})^2 * (48,59 \Omega)$$

$$P = 2733.56 \text{ W}$$

$$Q = P * T$$

$$Q = 2733.56 \text{ W} * 120 \text{ s}$$

$$Q = 328027.2 \text{ J}$$

Debido a que la energía que disipa nuestra bobina es mayor que la que necesitamos para calentar el metal requerido podemos decir que el sistema inductor es el indicado para realizar el tratamiento del metal.

### **Coefficiente de convección que debe tener el ambiente para evacuar todo el calor**

Necesitamos alcanzar una temperatura de,  $T_{max} = 1093.15 K$  en un ambiente de que se encuentra a  $300 k$ .

$$h = \frac{P}{\pi * l_a * d_a * (T_{max} - T_{\infty})}$$

$$h = \frac{2733.56W}{\pi * (0.444m) * (4 * 10^{-3} m) * (1093.15 - 300)k}$$

$$h = \frac{2733.56 W}{4.425 m^2K}$$

$$h = 617.70 W/m^2K$$

## **4.6. Diseño de la estructura de la máquina.**

### **Diseño con el software Solidworks**

Para el desarrollo de la estructura se utilizó un tubo cuadrado de  $20 \times 20 \times 1.2$  mm, este se encuentra disponible en la librería del programa.

**Gráfico 28:** Soporte estructural.

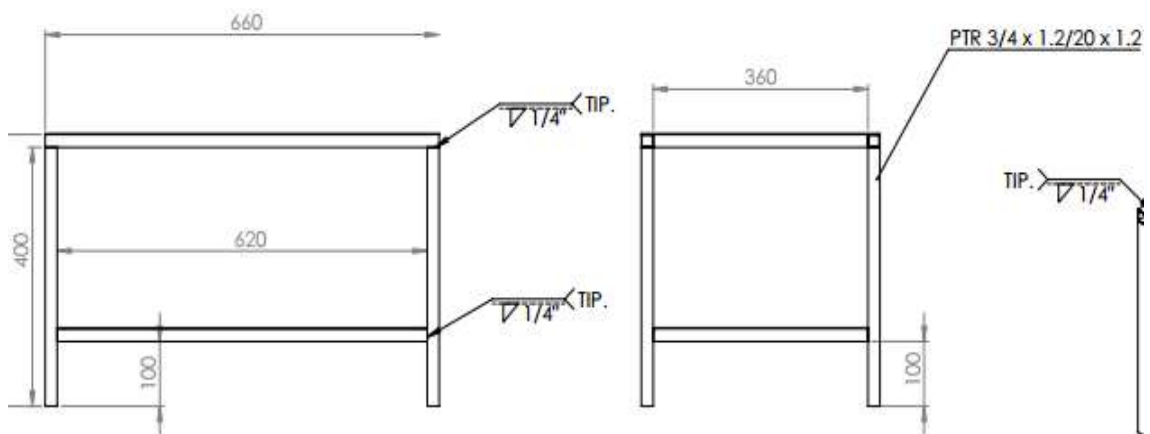


**Fuente:** Solidworks

**Elaborado por:** Montenegro, Olvera 2018

Las dimensiones del prototipo se detallan en el siguiente gráfico, en el se describe el tipo de perfil que se utiliza con sus dimensiones, así como la geometría una vez armada la estructura.

**Gráfico 29:** Estructura base del prototipo



**Fuente:** Solidworks 2017

**Elaborado:** Los autores

### 4.2.1. Diseño del riel deslizante

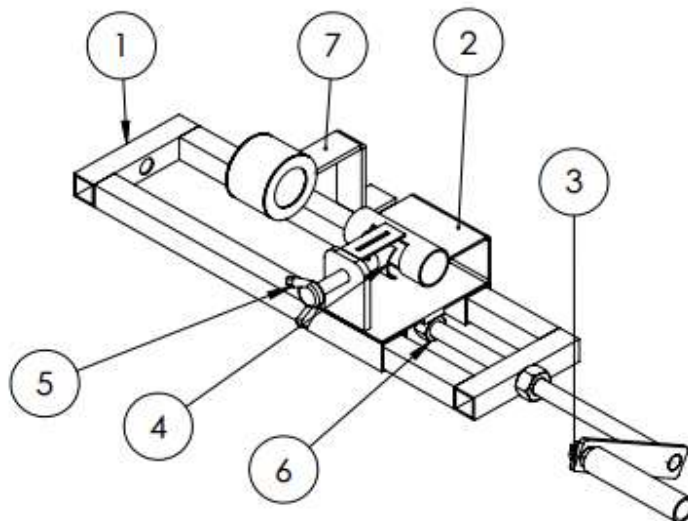
El riel deslizante es un conjunto de siete elementos que se detallan a continuación en la siguiente tabla:

**Tabla 13:**Elementos de riel deslizante

Número	Descripción
1	Marco o soporte inferior
2	Riel deslizante
3	Manivela
4	Media luna de prensa
5	Perno-mariposa para prensa
6	Tuerca de sujeción
7	Ducha

Elaborado por: Montenegro, Olvera 2018

**Gráfico 30:** Riel deslizante con su respectiva manivela



Fuente: Solidworks

Elaborado por: Montenegro, Olvera 2018

El eje deslizante nos permitirá acoplar el eje hacia el interior de la bobina manteniéndolo fijo y a su vez lo más centrado posible, con la finalidad de poder inducirlo con facilidad y obtener un calentamiento homogéneo, sin correr riesgos de quemaduras, otra de las ventajas del riel es que se puede realizar un enfriamiento inmediato después de inducir al eje ya que cuenta con una manivela para producir su desplazamiento horizontal.

#### 4.7. Selección de los componentes eléctricos

Para el funcionamiento del sistema de calentamiento por inducción se utilizó un circuito electrónico AC/DC que se alimenta con corriente trifásica de 220V<sub>o</sub> y 60 Hz, considerando que la potencia que genera su transformador es de 1677.62W, y su frecuencia de trabajo se encuentra en los rangos de (25; 60) KHz.

El cual se muestra en la siguiente figura.

**Gráfico 31:** Circuito electrónico para inducción electromagnética.



**Elaborado por:** Montenegro, Olvera 2018

Mientras que para el conformado de la bobina se utilizó un alambre de cobre de 4 mm de diámetro el mismo que posee un aislamiento térmico de fibra de vidrio, resistente a altas temperaturas.

**Gráfico 32:** Alambre de cobre con recubrimiento electro-térmico con terminales revestidos con termofundible.



**Elaborado por:** Montenegro, Olvera 2018

El inductor utilizado es una bobina de una capa de espiras con geometría circular de 27 mm de diámetro interno, con ayuda del software Coil32v 11.5 se determinó que tendrá 3.5 vueltas y un espacio entre espiras de 1mm generando un campo magnético que sea lo suficientemente capaz para alcanzar la temperatura deseada en la pieza de trabajo.

**Gráfico 33:** Esquema general de la bobina inductora y su aplicación.



**Elaborado por:** Montenegro, Olvera 2018

Para la medición de la temperatura que alcanza el metal tratado térmicamente por inducción electromagnética se utilizó una termocupla Tipo K, una tarjeta arduino, y un Display Lcd 16x2 con interface.

La termocupla es un sensor de temperatura muy sensible y es lo más utilizado a la hora de hacer mediciones en la industria, formados por dos alambres de metal de diferente

material y unidos en uno de sus extremos estos generan un pulso en milivolts y mediante la programación se lo convierte en grados centígrados.

**Gráfico 34:** Conector para termocupla MAX 6675



**Elaborado por:** Montenegro, Olvera 2018

El equipo de medición se encuentra en un rango de temperatura de (-180, 1372) °C, 54.8 Voltios como máximo.

El aumento de la temperatura se la visualiza en una pantalla digital o Display Lcd 16x2 y la cual se monitorea durante el tiempo que se le está suministrando el temple a nuestro metal base llegando a la temperatura de austenización de 820°C recomendado para el acero 4340, el diagrama del circuito se detalla en el anexo10.

**Gráfico 35:** Temperatura de temple superficial para AISIE 4340



**Elaborado por:** Montenegro, Olvera 2018

A contusión se muestra el diagrama del circuito donde se puede verificar cada uno de los componentes que conformar el medidor de temperatura.

Para la programación de nuestra tarjeta arduino se utilizó el programa ARDUINO IDE 1.8.5, con el cual se puede cargar el código de programa en la tarjeta y codificar cada uno de los pines de la tarjeta, el código se detalla en el anexo 11.

#### 4.8. Selección de los elementos mecánicos

Para el desarrollo de la estructura del prototipo se utilizó un tubo cuadrado de 20x20x 1.2 mm, una plancha Galvanizada de 1/32(2x1), electrodos E6011, Remache de 1/4 x 3/8 y tornillos y abrazaderas de diferentes medidas, porque la estructura no demanda mayor esfuerzo se escogió estos elementos, debido a que cumple y satisface las necesidades de nuestro equipo.

#### 4.9. Selección de los componentes eléctricos

El paso de corriente a la máquina se da accionando dos Selectores de 2 posiciones estables, serie NP 2, para 110 voltios el cual abre y cierra el flujo de corriente tanto para la bomba del sistema de refrigeración como la corriente que llega a la placa electrónica o circuito eléctrico, se utilizó un interruptor on/off el cual acciona la bobina inductora para que esta comience a suministrar el flujo de corriente necesario hacia el metal base y genere un campo de inducción magnética.

La geometría de la caja donde se encuentran los interruptores y la bobina es de 200 x140 x 75 mm, la misma que tiene una construcción mixta de acero y madera esto nos ayuda a mejorar la estabilidad del inductor, economiza los costos de fabricación y alivia el peso de la máquina.

**Gráfico 36:** Cajetín de interruptores

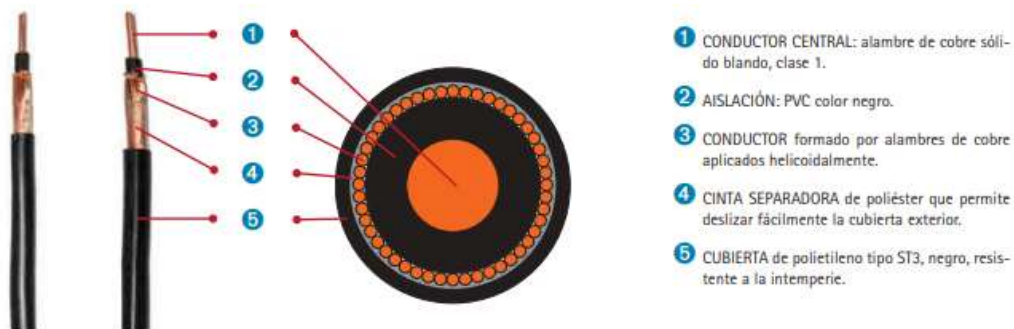


Elaborado por: Montenegro, Olvera 2018

Para la alimentación del circuito desde la línea trifásica se utilizará un cable concéntrico de calibre 2x14 mm, el mismo que tiene una tensión de servicio de 600V, una temperatura de trabajo máxima de 70 °C y capacidad de corriente máxima de 45 A.

El cual posea un enchufe industrial de 50 A en uno de sus extremos, para las conexiones de la bomba y el resto de componentes del circuito se utilizó cable solido calibre 14 el cual se utiliza en tableros eléctricos de control y líneas de 110/220 Voltios, implementados en ambientes secos y húmedos con una temperatura funcional de 60°C y su tensión de servicios para todas sus funciones es 600V.

**Gráfico 37:** Conductor de cobre blando, aislación de PVC, pantalla de alambres de cobre, cubierta de polietileno.



**Fuente:** <https://cdn.generalcable.com/assets/images/latam/Ecuador/CONCENTRICO.pdf?ext=.pdf>

Para la fase inversora de corriente de 220 a 110 Voltios, se utilizó Transformador de 500W (220-110) Voltios, bidireccional, el cual se encuentra conectado desde la línea principal trifásica para luego suministrar el voltaje necesario hacia la bomba.

**Gráfico 38:** Transformador convertidor 500W

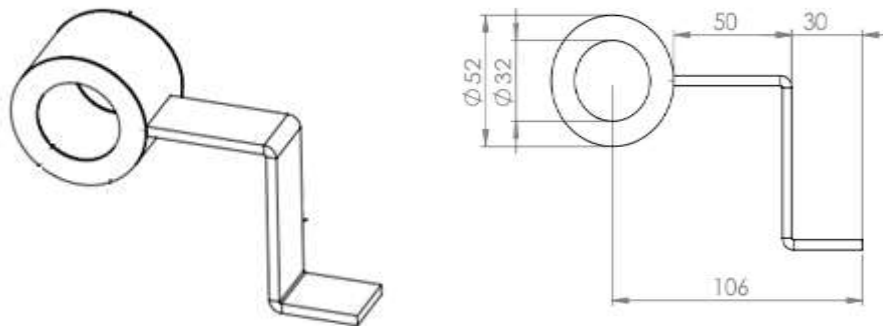


**Elaborado por:** Montenegro, Olvera 2018

#### 4.10. Diseño del sistema de enfriamiento para eje inducido

El sistema cuenta con una serie de elementos, pero el principal es la ducha que se encuentra fija en la parte superior de la mesa de trabajo seguida de la bobina inductora el enfriamiento se lo hace en forma de cascada para homogenizar el proceso de enfriamiento y así obtener una superficie lo más dura y homogénea posible.

**Gráfico 39:** Descripción geométrica de la ducha de enfriamiento para el eje inducido



Fuente: Solidworks

Elaborado por: Montenegro, Olvera 2018

##### 4.10.1. Elementos del sistema de refrigeración

El sistema de enfriamiento cuenta con un depósito, una bomba, y un circuito de cañerías que transportan el fluido.

Para la refrigeración del metal se utilizó una Bomba de agua 35W LG/Klein 2 salidas 110v la cual es alimentada por un depósito de agua de geometría rectangular de 20x15x15 mm con un volumen de 4.5 litros. El fluido que utiliza para realizar el enfriamiento es agua, a temperatura ambiente de 26.75°C

**Gráfico 40:** Bomba de agua 35W LG/Klein 2 salidas



**Fuente:** bomba-de-agua-35w-lavadora-klein-pumps-2-salidas-filtro-pelusas-110v.

Para la conexión o vías de acceso del fluido se utilizó una manguera 1/2 x 100MT transparente estriada, Manguera de 3/4 verde enlonada, tapones 3/4, adaptador 1/2 flexible, abrazaderas 3/4, 1/2 para manguera, un adaptador 3/4 flexible /macho para la conexión de suministro desde el deposito que alimenta a la bomba, la bandeja de drenaje donde cae el fluido que refrigera el metal calentado se dirige nuevamente al punto de suministro de la bomba convirtiéndose en un ciclo cerrado.

**Gráfico 41:** Reservorio de a gua y suministro a la bomba



**Elaborado por:** Montenegro, Olvera 2018

El fluido se aplica en forma de ducha refrigerando el área calentada por la bobina de inducción electromagnética de forma homogénea para manteniendo la dureza de la misma

manera, para la construcción de la ducha se utilizó dos tubos circulares de diferente diámetro, el menor fue perforado con una broca de 2mm, luego se procedió a formar un encapsulado con dos arandelas planas de 2mm de espesor, en la parte superior lateral tiene un acople para manguera de ¾ para el suministro del refrigerante, dispone de un soporte base para fijar y mantener el centro de trabajo del eje con la estructura.

**Gráfico 42:** Procesos de enfriamiento del eje una vez alcanzada su temperatura de temple



Elaborado por: Montenegro, Olvera 2018

#### 4.10.2. Cantidad de Refrigerante

Cuánta agua se necesita para enfriar los 0.053Kg de acero que se encuentra sometido al proceso de inducción sabiendo que la temperatura que alcanza el metal es de 850°C

$$Q_{-} = Q_{+}$$

$$m * C_p * \Delta T = m * C_p * \Delta T$$

$$m_a = \frac{C_p * \Delta T}{C_p * \Delta T}$$

$$m_a = \frac{4.79}{73.15} \text{ Kg}$$

$$m_a = 0.065 \text{ Kg}$$

Sabiendo que 1 litro de agua equivale a 1Kg, entonces se necesita 0.065 Litros de agua para enfriar 0.053 Kg de acero que se encuentra a 850°C y pose una energía de 25160.4J.

$$L= 18\text{mm}$$

$$D=22\text{mm}$$

$$A = 2\pi r h + 2\pi r^2$$

$$A = 2\pi(0.011\text{m})(0.018\text{m}) + 2\pi(0.011\text{m})^2$$

$$A = 2.004 * 10^{-3}\text{m}^2$$

Aplicando la ley de enfriamiento newton puede determinar la perdida de calor que sufre la pieza cuando se está enfriando

$$\dot{Q} = h A (T_s - T_f)$$

$$\dot{Q} = \frac{300\text{W}}{\text{m}^2\text{k}} (2.004 * 10^{-3}\text{m}^2) (1093.15\text{K} - 299.15\text{K})$$

$$\dot{Q} = 477.35 \text{ W} * 1\text{s}$$

$$\dot{Q} = 477.35 \text{ J}$$

$$t = 5.7\text{s}$$

Se debe refrigerar al material durante 5.7s segundos para que se mantenga a temperatura ambiente.





#### **4.11. Preparación de probetas para ensayo metalográfico.**

Para la obtención de una superficie perfectamente plana con pulido especular, permitirá llegar a conclusiones exactas y ello dependerá exclusivamente de la prolijidad y esmero con que se realice dicha tarea, siguiendo las técnicas usuales descritas a continuación.

- Selección de la muestra metalográfica: Es muy importante puesto que esta debe ser representativa del material a examinar, las muestras para realizar el estudio se tomaron muestras de 20 mm de longitud con 22 mm de diámetro.

- **Tamaño de la muestra:** No son mayores de 12 a 25 mm cuadrados, o aproximadamente de 12 a 25 mm de diámetro si el material es cilíndrico.
- **Limpieza:** Durante la preparación es importante que todas las grasas, aceites, residuos de los cortes deben ser removidos por un solvente orgánico, para evitar confusiones al momento de colocar las muestras al microscopio.
- **Pulido:** Se debe frotar la muestra en forma perpendicular de la superficie de contacto con papel abrasivo comenzando por el número P 150, pasamos a las más finas P 240, P 400, P 600, P 1500 hasta el acabado final con la P 2000 y a una presión homogénea, para luego proceder al pulido con alúmina y un paño negro alcanzando una superficie con acabado de espejo.
- **Reactivos de ataque:** Se especifica qué producto químico de ataque se usará, para el caso de estudio se usó nital por un tiempo de 2s, para observar su micrografía después del tratamiento térmico superficial.

**Tabla 14:** Comparación de metalográficas apoyadas en artículo científico del AISI 4340

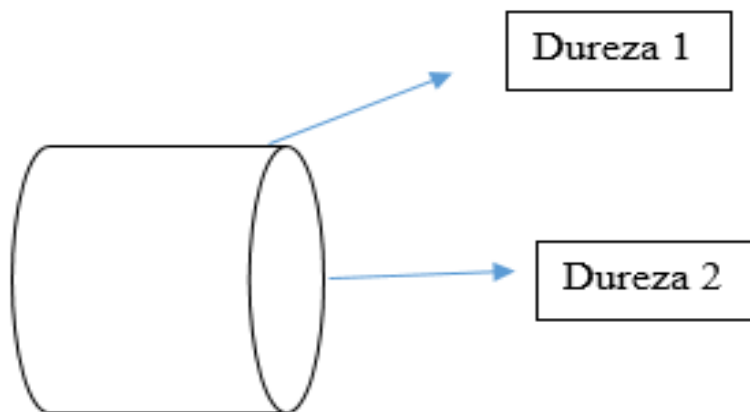
<b>Metalografía para un acero AISI 4340</b>		
	Escala de ampliación micrométrica	Escala de ampliación micrométrica de comparación
Probeta 1 Enfriada por agua	 100x	 50μmm
Probeta 2 enfriada por aire	 100x	 50μmm

Elaborado por: Montenegro, Olvera 2018

Con la ayuda de metalografías encontradas en artículos científicos sobre el AISI 4340 podemos realizar una comparación de las imágenes obtenidas del análisis las cuales brindan resultados favorables con un incremento de la capa superficial austenizada del 65% demostrando que se endureció la superficie tratada térmicamente.

#### 4.12. Medición de dureza y comparación

**Gráfico 43:** Puntos en los cuales se mide la dureza



Elaborado por: Montenegro, Olvera 2018

##### **Probeta 1.**

$$D1=29 * 10^{-6} \text{ m} = 0.029 \text{ mm}$$

$$D2=49 * 10^{-6} \text{ m} = 0.049 \text{ mm}$$

##### **Probeta 2.**

$$D1=49 * 10^{-6} \text{ m} = 0.049 \text{ mm}$$

$$D2=42 * 10^{-6} \text{ m} = 0.049 \text{ mm}$$

Aplicando la ecuación 20 para el cálculo de la dureza se obtiene los resultados que se muestra en la siguiente tabla:

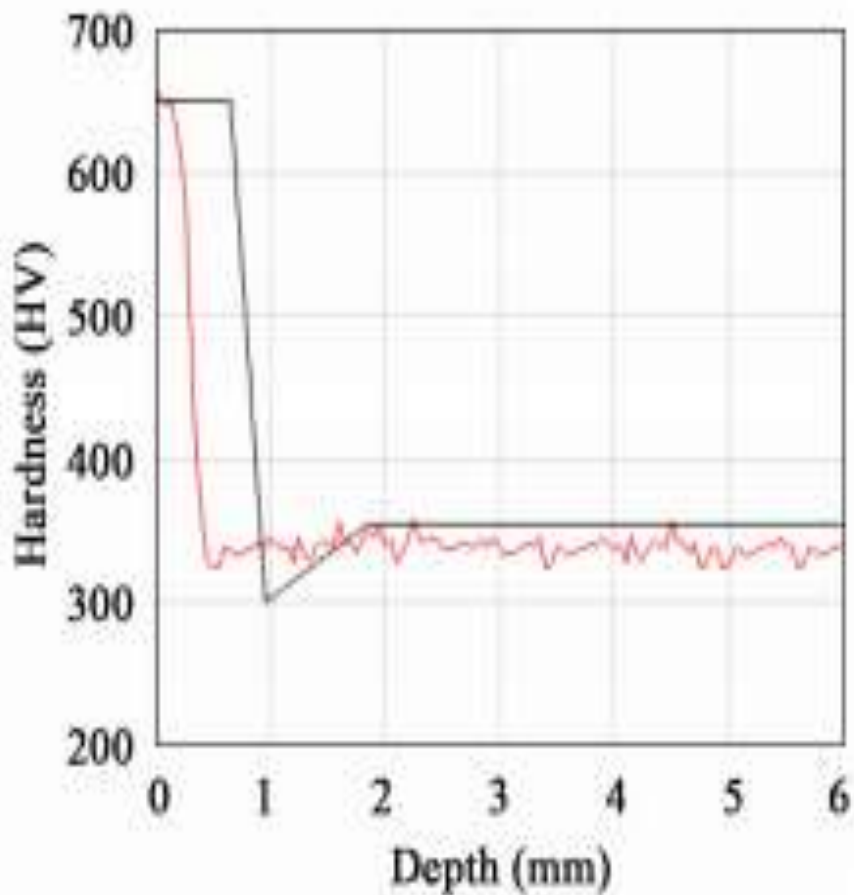
**Tabla 15:** Determinación de dureza

<b>Probeta 1</b>		<b>Probeta 2</b>	
Dureza 1	Dureza 2	Dureza 1	Dureza 2
HV = 661	HV = 232	HV=661	HV=315
<b>Aumento de dureza</b>		<b>Aumento de dureza</b>	
Aumento desde su estado bonificado de 2.84 veces, este valor nos indica que el aumento de la dureza es casi tres veces más desde su estado bonificado hasta recibir el tratamiento térmico.		Con los resultados en la segunda muestra y con el tipo de enfriamiento por aire su aumento de dureza dio un aumento de 2 veces más que su valor iniciales (sin tratamiento).	
<b>Porcentaje de endurecimiento</b>		<b>Porcentaje de endurecimiento</b>	
Con tratamiento	65 %	Con tratamiento	52 %
Sin tratamiento	35 %	Sin tratamiento	48 %
<b>Espesor de capa endurecida</b>		<b>Espesor de capa endurecida</b>	
Se obtuvo una capa superficial $e=0,85\text{mm}$ la cual se aproxima al valor teórico calculado $e= 1\text{mm}$ dando como resultado un porcentaje de error del 15%.		Se obtuvo una capa superficial $e=0,65\text{mm}$ la cual se aproxima al valor teórico calculado $e= 1\text{mm}$ dando como resultado un porcentaje de error del 35%.	

**Elaborado por:** Montenegro, Olvera 2018

Con los resultados obtenidos del cálculo y el análisis se demuestra el aumento de dureza con la formación de una fina capa en la superficie del eje, la cual alcanza un porcentaje del 65% de incremento con relación al núcleo del material tratado. Este valor de dureza obtenido es de 661 HV está dentro de los parámetros establecidos por estudios científicos realizados al mismo material AISI 4340, los cuales sobrepasan los valores de 650 HV según se muestra en la gráfica 44.

**Gráfico 44:**Dureza Vs penetración.



**Fuente:** Study of Frequency Effects on Hardness Profile of Spline Shaft Heat-Treated by Induction.

Los resultados obtenidos de dureza en la segunda muestra tienen un grado de similitud con la primera probeta a diferencia que la dureza del núcleo es de 315HV pero no significa que el núcleo se encuentra afectado, en la fichas técnicas del AISI4340 podemos observar la dureza en estado bonificado lo cual no es superada ver en tabla 3, mientras que en la superficie la dureza de 661HV esto significa que el materiales se endureció en su superficie obteniendo una capa entre el rango de 0 - 1mm la cual se sustenta con la ilustración 43, que se tomó como referencia del artículo científico (Study of Frequency Effects on Hardness Profile of Splines Shaft Heat Treated by Induction [28]), donde se obtiene profundidades o espesores de capas según la dureza que alcanza el material.

## 4.13. Presupuesto

### 4.14.1. Herramientas y materiales para la estructura metálica.

**Tabla 16:** Elementos utilizados en la etapa de construcción del prototipo.

<b>HERRAMIENTAS Y MATERIALES PARA LA ESTRUCTURA METÁLICA</b>			
<b>Cantidad</b>	<b>Descripción</b>	<b>V. Unitario</b>	<b>V.Total</b>
1	Plancha Galvanizada 1/32(2x1)	12.46	12,46
2	Tubo cuadrado negro 3/4 x 1.2/20 x 1.2	5.09	10.18
1 lb	Electrodo E 6011	2.59	2,59
1/8 lt	Sintetico Negro	3.50	3,50
1/8 lt	Fondo	4.50	4,50
1 Gl	Tinñer Laca	5.75	5,75
1 Lt	Tinñer Poliuretano	8.50	8,50
1/8 lt	Poliuretano Negro	9.50	9,50
1 Kg	Masilla Ultralijable	5.90	5,90
5	Lija 150	0.55	2,75
1	Lija 30	0.60	0,60
3	Lija 400	0,55	1,65
4	Lija 80	0,62	2,48
1	Taco para lija	3,5	3,5
1 m	Manguera de 3/4 verde enlonada	0,78	0,78
2	Tee ¾	0,36	0,72
2	Adaptador 3/4 flexible/macho	0,35	0,7
8	Abrazadera 3/4 para manguera	0,25	2
2	Tapón de 3/4 roscable	0,55	1,1
2 m	Manguera 1/2 x 100MT 100MT transparente estriada	0,36	0,72
1	Adaptador 1/2 Flexible	0,17	0,17
1	Plancha de triflex 5mm 1/8 m	1,84	1,84
1	Abrazadera 1/2 para manguera	0,22	0,22
66	Tornillos de carne	0,04	2,64
40	Remache de 1/4 x 3/8	0,05	2
<b>Total</b>			<b>\$ 86,75</b>

Elaborado por: Montenegro, Olvera 2018

#### 4.14.2. Presupuesto de construcción del prototipo.

**Tabla 17:** Elementos eléctricos de conforman el prototipo

<b>PRESUPUESTO DE ELEMENTOS ELÉCTRICOS</b>			
<b>Cantidad</b>	<b>Descripción</b>	<b>V. Unitario</b>	<b>V.Total</b>
7 m	Cable sólido N° 14	0,45	3,15
	Transformador convertidor 500W 220-110 bidireccional	25	25
1	Arduino uno R3	14	14
1	Display Lcd 16x2 con interface	5	5
1	Juego cables multipar	3,75	3,75
3	Resistencias	0,05	0,15
6	Potenciómetros (100-10)K	0,5	3
5m	Cable Concéntrico 3 x 14	1,6	8
2	Selector 2 posiciones estables serie NP 2	2	4
1	Circuito electrónico para inducción con accesorios	700	700
1	Interruptor ON/Off	2,5	2,5
1	Regleta de bornes eléctricos	2	2
1	Bomba de agua 35W LG/Klein 2 salidas 110v	16,44	16,44
2	Cinta Autofundente 3M	0,75	0,75
<b>Total</b>			<b>\$ 787,74</b>

Elaborado por: Montenegro, Olvera 2018

**Tabla 18:** Presupuesto total de fabricación del proyecto

<b>Presupuesto total de fabricación del proyecto</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Total</b>
Herramientas y materiales para la estructura metálica	86,75
Presupuesto de elementos eléctricos	787,74
Costos por concepto de ingeniería	400
Costo por envío de circuito electrónico	500
Imprevistos	230
<b>Total</b>	<b>\$ 2004,49</b>

Elaborado por: Montenegro, Olvera 2018

**CAPÍTULO V**  
**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## 5.1. Conclusiones

- Se desarrolló el diseño y construcción de un prototipo calentador por inducción electromagnética para el endurecimiento superficial de aleaciones ferrosas comprobando su funcionamiento con el tratamiento superficial aplicado a una pieza cilíndrica de acero AISI 4340, incrementando su dureza superficial hasta 2,8 veces respecto al centro de la pieza, con una profundidad de 0,89 mm de transformación de austenita a martensita, medida desde la superficie de la pieza tratada.
- Con los parámetros geométricos del eje se seleccionó y construyó el *inductor* de alambre de cobre de 4 mm de diámetro con aislante térmico de lana de vidrio y sus extremos con aislante termofundible. El circuito electrónico consta de un transformador de AC/DC, un puente rectificador GB 4630, condensadores de paso IC4K 2J, Swich de 30A para el arranque del sistema de enfriamiento, un transformador de 500W de (220 a 110) V para la bomba de agua, un enchufe industrial de 50 A, cable sólido calibre 14 para las líneas de alimentación y tablero de mando, siendo estos los componentes principales del prototipo.
- Se diseñó el soporte estructural del calentador por inducción seleccionando un acero estructural A36 por su buena resistencia y bajo costo. Se consideró un riel corredizo que facilita la sujeción, desplazamiento y ubicación de la pieza cilíndrica para el tratamiento localizado de la misma seguido de la aplicación del refrigerante. Se seleccionó una bomba centrífuga de ¼ HP para el enfriamiento rápido de la misma. El costo total del equipo de inducción electromagnética fue de \$ 2004,49.
- Se realizó el análisis del tratamiento térmico superficial en condiciones estáticas mediante una simulación del proceso en el software COMSOL Multiphysics determinándose que la transferencia de calor producida desde la superficie de la pieza por el efecto piel va hacia el centro de la pieza (núcleo). La superficie alcanzó un máximo de 840°C. y la temperatura menor en el centro de la pieza fue de 335 °C. Estos resultados en comparación a la medición experimental

(termocupla tipo K) tiene una variabilidad de 1.1 % respecto a la temperatura superficial y 17 % con la temperatura del centro de la pieza.

- En el análisis metalográfico de las piezas tratadas térmicamente se observó la microestructura del acero AISI-4340 en el centro de las probetas enfriadas al aire y por agua, resultados que tuvieron similitud con la referencia establecida. La profundidad de la transformación superficial de la fase austenita a martensita resultó en mm en la probeta enfriada por agua y mm enfriada al aire, en ambos casos la capa de acero endurecido presentó un brillo distintivo respecto al núcleo de la pieza.
- La dureza superficial aumento en ambos casos, siendo similar a 661 HV, con la diferencia que la enfriada por agua obtuvo un mayor espesor de capa de martensita. Los resultados de comparación se dieron con el resultado en estado normalizado, a simple vista se demarca una capa superficial martensítica por el tono de brillo al momento del pulido de la muestra, el procedimiento fue realizado cumpliendo la norma de la ASTM E-3; E-407. Con estos resultados aseguramos la eficiencia del equipo ya que alcanzo una temperatura de tratamiento térmico adecuada (mayor a temperatura A3) para la obtención del endurecimiento superficial.

## 5.2. Recomendaciones

- Dentro de los procesos de manufactura resulta favorable cambiar las técnicas de manufactura convencional por las técnicas de manufactura moderna (calentamiento por inducción electromagnética) puesto que se ha demostrado que el calentamiento es rápido y a la vez seguro.
- Para el control de temperatura se recomienda utilizar la termocupla tipo K porque arroja mediciones aceptables por la falta de equipos de medición confiables según las experiencias pasadas.
- Una vez que el metal alcanza su temperatura de austenización es necesario sobrepasar  $A_{c3}$  del material con el fin de aumentar la profundidad de transformación martensítica.
- Es necesario mantener la excentricidad y a una distancia mínima no mayor a 2.5 mm desde el inductor a la pieza de trabajo para obtener un mejor factor de acoplamiento generando un mayor flujo de corrientes inducidas sobre el material llegando a la temperatura deseada.
- Una vez realizado el tratamiento térmico se debe vaciar por completo el depósito de suministro de líquido refrigerante puesto que este puede causar daños en el sistema de refrigeración.
- Antes de conectar el equipo a la fuente de poder es obligatorio revisar que el switch de encendido de: bomba y alimentación del inductor estén en posición off para evitar daños en el circuito electrónico.

**CAPÍTULO VI**  
**BIBLIOGRAFÍA**

## 6.1. BIBLIOGRAFÍA

- [1] B. Christie, Sistemas eléctricos de potencia, Ñom Lufke: Prentice Hall, 2008.
- [2] N. M. P. Alfredo Güemes Gordo, Ciencia de Materiales para Ingenieros, Madrid España: P E A R S O N E D U C A C I Ó N . S A . , 2012.
- [3] M. P. Groover, FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNA, México: Mexicana, Reg. Núm. 736, 2007.
- [4] J. Torres, «Diseño Asistido por Ordenador,» Universidad de Granada, España .
- [5] H. E. T. G. E. y. W. C. W. Davis, Ensaye e Inspección de los, McGRAW-HILL, 1964.
- [6] y. A. R. S. Felipe Díaz del Castillo R, Aceros. Estructuras y sus tratamientos térmicos, FES-Cuautitlán, 2004.
- [7] W. Gonzalez, Diseño Y Construcción De Bobina De Calentamiento Por Inducción Para Fundición De Titanio, Caracas (Venezuela ), 2008.
- [8] L. S.R, Applications Guide for Hardness Testers, EEUU: National Institute of Standards and Technology., 2001.
- [9] M. O. S. BALTAZAR, “CALENTAMIENTO DE METALES POR MEDIO DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA Y, México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2014.
- [10] A. C. CHARLY ENRIQUE, «CRITERIOS DE DISEÑO EN LA GENERACIÓN DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA PARA CALENTADORES DE 100 KW PARA APLICACIÓN INDUSTRIAL,» HUANCAYO-PERU, 2011.
- [11] J. P. H. -. P. o. M. Engineering., Transferencia de calor., Mexico : COMPAÑIA CONTINENTAL, S.A. DE C.V., 1999.
- [12] H. B. Ríos, Principios de Electricidad y Magnetismo, Manizales: chiadoeditorial, 2012.
- [13] V. E. Gómez, Influencia de los Componentes Parásitos en el Análisis y Diseño de Inversores Resonantes Paralelo para Aplicaciones de Calentamiento por Inducción, Valencia: UNIVERSITAT DE VALÈNCIA , 1999.
- [14] H. L. T. GARCÍA, «Desarrollo e implementación de modelo de predicción en procesos de temple por inducción para un Acero AISI-SAE 1043,» FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA, Nuevo León , 2016.
- [15] I. L. M. HERNANDEZ., «Todo ingeniería Industrial,» 18 Febrero 2012. [En línea]. Available: <https://todoingenieriaindustrial.wordpress.com>. [Último acceso: 01 Noviembre 2018].

- [16] D. R. Askeland, CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES, Estados Unidos (Universidad de Missouri -Rolla): Ediciones Paraninfo S A, 2001.
- [17] G. M. F. C. N. Caballero Stevens, Medios de enfriamiento para el temple, Cuba: Unidad Docente Metalúrgica (UDM) Antillana de Acero - ISPJAE, 1999.
- [18] C. A. Keyser, Ciencia de materiales para Ingeniería, México: Limusa, 1992.
- [19] F. A. C. G. Luis José Hernández Bolívar, *EVALUACIÓN DEL LÍMITE DE RESISTENCIA A LA FATIGA DE UN ACERO AISI 4340 BONIFICADO RECUBIERTO CON PELÍCULAS DELGADAS MULTICAPAS OBTENIDAS POR DEPOSICIÓN FÍSICA EN FASE DE VAPOR ASISTIDA POR PLASMA.*, Caracas , 2004.
- [20] C. C. C. Molano, «Efectos de los elementos aleantes en los aceros,» Facultad de ingeniería – Ingeniería mecánica, 2016.
- [21] W. Smith, Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales, Nueva York: McGraw-Hill Education, 1988.
- [22] J. A. BARREIRO, Tratamientos térmicos de los aceros, Madrid España , 1 9 4 9.
- [23] G. F. V. Voort, Metalography: Principles and Practice Macrostructure, USA: Copyrigh, 1984.
- [24] F. C. Tomás Gómez-Acebedo, «Descaburizacion de Aceros,» de *Analisis termodinámico de la descaburizacion de aceros* , España, Universidad Navarra, 2015, p. 13.
- [25] P. M. Solá, Tratamientos térmicos de los metales, Barcelona España.: MARCOMBO S.A. , 1991.
- [26] W. M. Edward Tobolski, «STANDARDIZATION NEWS,» ASTM Standardization News, Junio 2010. [En línea]. Available: [https://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPMJ10/e0405\\_spmj10.html](https://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPMJ10/e0405_spmj10.html). [Último acceso: 03 Noviembre 2018].
- [27] M. M. Arias, «Normas ASTM aplicadas a la dureza Brinell, Rockwell y Vickers,» 2015.
- [28] P. M. Solá, Tratamientos térmicos de los metales, Barcelona (España): Boixareu Editores, 1991.
- [29] C. Pimienta, «Preize,» 20 Mayo 2016. [En línea]. Available: <https://prezi.com/user/8fhv0euvhx6g/>. [Último acceso: 08 Noviembre 2018].
- [30] A. E. O. Habib Hammi, «Study of Frequency Effects on Hardness Profile of Spline Shaft Heat-Treated by Induction,» Copyright © 2016 por los autores y de Investigación Científica Publishing Inc, Mathematics, Computer Science and Engineering Department, University of Quebec at Rimouski, Rimouski Canada , 2017.

## Anexos

### 7.1. Anexo 1 : Guía de temperatura del acero según el tono de color en la superficie



## 7.2. Anexo 2: Tubo cuadrado estructural

TUBERIA

# TUBO ESTRUCTURAL CUADRADO



### Especificaciones Generales

- Calidad:** ASTM A-500
- Recubrimiento:** Negro o Galvanizado
- Largo Normal:** 6,00 m
- Otros Largos:** Previa Consulta
- Dimensiones:** Desde 20,00 mm a 100,00 mm
- Espesor:** Desde 1,20 mm a 5,00 mm



Dimensiones			Área	Ejes X-Xe Y-Y		
A mm	Espesor mm (e)	Peso Kg/m	Área cm <sup>2</sup>	I cm <sup>4</sup>	W cm <sup>3</sup>	I cm <sup>3</sup>
20	1,2	0,72	0,90	0,53	0,53	0,77
20	1,5	0,88	1,05	0,58	0,58	0,74
20	2,0	1,15	1,34	0,69	0,69	0,72
25	1,2	0,90	1,14	1,08	0,87	0,97
25	1,5	1,12	1,35	1,21	0,97	0,95
25	2,0	1,47	1,74	1,48	1,18	0,92
30	1,2	1,09	1,38	1,91	1,28	1,18
30	1,5	1,35	1,65	2,19	1,48	1,15
30	2,0	1,78	2,14	2,71	1,61	1,13
40	1,2	1,47	1,80	4,38	2,19	1,25
40	1,5	1,82	2,25	5,48	2,74	1,56
40	2,0	2,41	2,94	6,93	3,46	1,54
40	3,0	3,54	4,44	10,20	5,10	1,52
50	1,5	2,29	2,85	11,06	4,42	1,97
50	2,0	3,03	3,74	14,13	5,65	1,94
50	3,0	4,48	5,61	21,20	4,48	1,91
60	2,0	3,66	3,74	21,26	7,09	2,39
60	3,0	5,42	6,61	35,06	11,69	2,34
75	2,0	4,52	5,74	50,47	13,46	2,97
75	3,0	6,71	8,41	71,54	19,08	2,92
75	4,0	8,59	10,95	89,98	24,00	2,87
100	2,0	6,17	7,74	122,99	24,60	3,99
100	3,0	9,17	11,41	176,95	35,39	3,94
100	4,0	12,13	14,95	226,09	45,22	3,89
100	5,0	14,40	18,36	270,57	54,11	3,84

## 7.3. Anexo 3: Max 6675

19-2226; Rev 1; 3/07

# MAXIM

## Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter (0°C to +1024°C)

**MAX6675**

### General Description

The MAX6675 performs cold-junction compensation and digitizes the signal from a type-K thermocouple. The data is output in a 12-bit resolution, SPI™-compatible, read-only format.

This converter resolves temperatures to 0.25°C, allows readings as high as +1024°C, and exhibits thermocouple accuracy of 8LSBs for temperatures ranging from 0°C to +700°C.

The MAX6675 is available in a small, 8-pin SO package.

### Features

- ◆ Direct Digital Conversion of Type -K Thermocouple Output
- ◆ Cold-Junction Compensation
- ◆ Simple SPI-Compatible Serial Interface
- ◆ 12-Bit, 0.25°C Resolution
- ◆ Open Thermocouple Detection

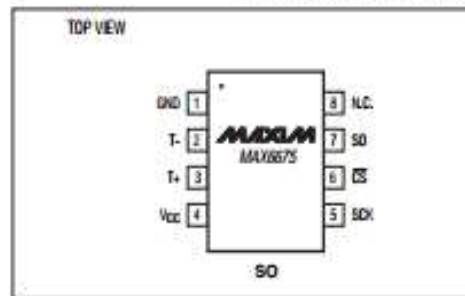
### Ordering Information

PART	TEMP RANGE	PIN-PACKAGE
MAX6675ISA	-20°C to +85°C	8 SO

### Applications

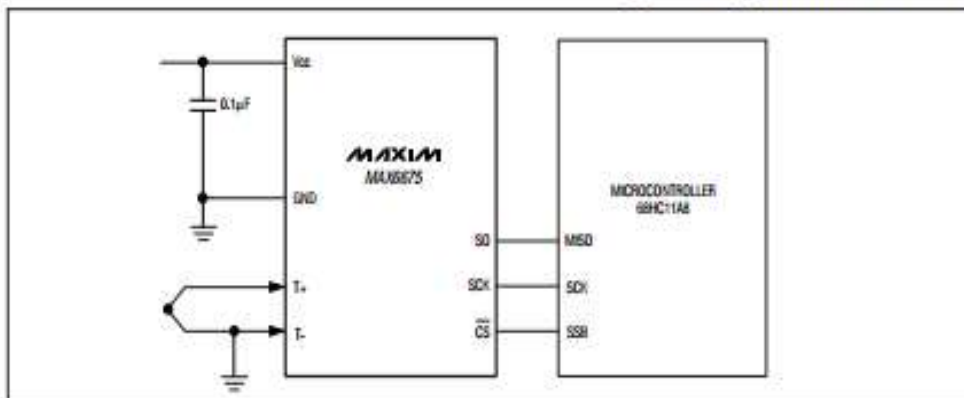
Industrial  
Appliances  
HVAC  
Automotive

### Pin Configuration



SPI is a trademark of Motorola, Inc.

### Typical Application Circuit



**MAXIM**

Maxim Integrated Products 1

For pricing, delivery, and ordering information, please contact Maxim/Dallas Direct! at 1-888-629-4642, or visit Maxim's website at [www.maxim-ic.com](http://www.maxim-ic.com).

## 7.4. Anexo 4: Lamina de tol Negro

### PRODUCTOS para la construcción y metalmecánica

#### LAMINAS

#### Tol negro

Tol negro frío, se lo utiliza mayormente en muebles metálicos, puertas, carpintería metálica, baldes para camionetas, etc. Tol negro caliente, se lo utiliza en la conformación de estructuras en general con elementos de alma llena (flejes), encofrados, placas, calderos, etc.



NORMA: NTE INEN 115

TABLA: TOL NEGRO

1.22 x 2.44 mtrs		1.22 x 2.44 mtrs	
Tol frío Denominación	Peso (kg)	Tol caliente Denominación	Peso (kg)
* 1/40	10.52	1.9mm	43.58
* 1/32	16.36	2mm	46.74
* 1/25	21.03	2.5mm	58.42
* 1/20	25.71	3mm	70.11
* 1/16	32.72	4mm	93.48
		5mm	116.85
Tol perforado		6mm	140.22
Denominación (mm)	Peso (kg)	8mm	186.96
e=0.7 x Ø 6	7.66	10mm	233.70
Formato: 2.00 x 1.00m		12mm	280.44
		15mm	350.55

\* Medidas disponible en tol de segunda

## 7.5. Anexo 5: Ejes de acero AISI 4340.



### Acero AISI 4340

EQUIVALENCIAS:	
BOHLER:	V155
IBCA:	705
UDDEHOLM:	--
DIN:	34CrNiMo4
No. Mat.	1.6565

Tipo de aleación:					
<b>C</b> 0.40	<b>Si</b> 0.20	<b>Mn</b> 0.60	<b>Cr</b> 1.00	<b>Mo</b> 0.20	<b>Ni</b> 1.50 %
Estado de suministro: Bonificado 29 – 34 HRC					



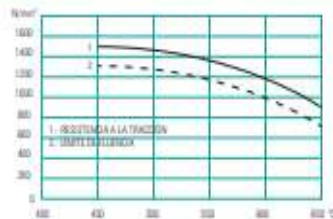
#### PROPIEDADES – APLICACIONES

Acero bonificado al cromo – níquel – molibdeno de alta resistencia mecánica y tenacidad en estado bonificado. Excelente resistencia a la fatiga y torsión. Resistente a la fragilidad de revenido por su aleación de molibdeno. Alta templabilidad.

Para la fabricación de elementos de maquinaria de grandes secciones altamente exigidos, como son: ejes, piñones, pernos grado 6, rotores, levas, bridas de alta presión, piezas de maquinaria pesada, etc.

TRATAMIENTO TÉRMICO	
Forjado:	1050 – 850°C
Recocido:	650 – 700°C (248 HB)
Temple:	830-860°C al aceite
Dureza:	54 – 56 HRC
Revenido:	550-600°C

#### DIAGRAMA DE BONIFICACIÓN

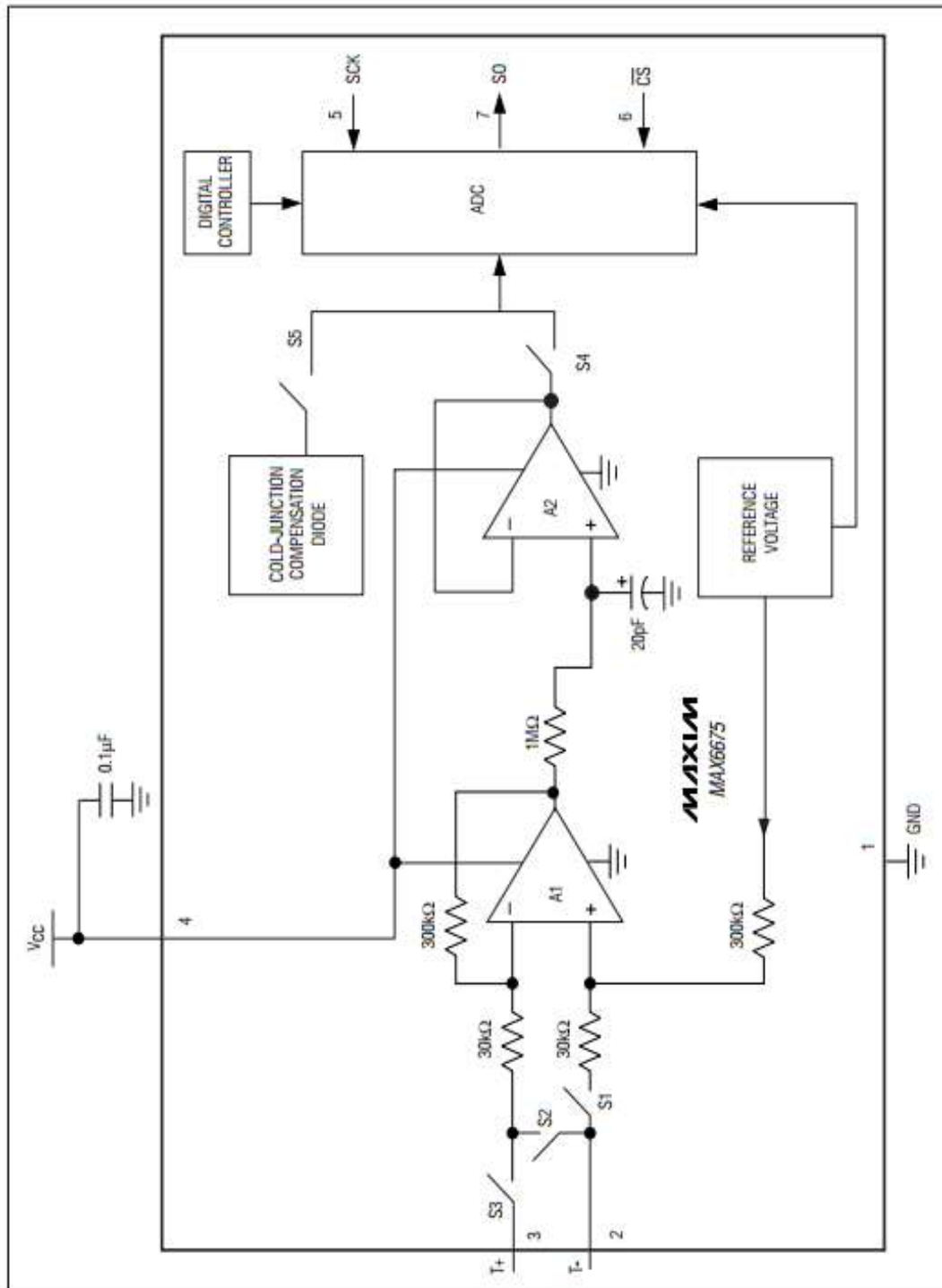


#### PROPIEDADES MECÁNICAS

Diámetro mm	Límite de fluencia N/mm²	Resistencia a la tracción N/mm²
≤ 16	1000	1200 - 1400
≤ 16 ≤ 40	900	1100 - 1300
≤ 40 ≤ 100	800	1000 - 1200
≤ 100 ≤ 160	700	900 - 1100
≤ 160 ≤ 250	600	800 - 950



## 7.6. Anexo 6: Diagrama de componentes del circuito del termopar



## 7.7. Anexo 7: Código y tutorial para configurar arduino.

```
temocupla_tutorial
//MEDIDOR DE TEMPERATURA CON MAX6675, LCD SHIELD.

//Este ejemplo es de dominio publico
//Autor: Sergio A. Yañez M.
//Año: 2017
//Tutorial para el canal AQUILES VAESA

#include "max6675.h"
#include <LiquidCrystal.h>
LiquidCrystal lcd(8, 9, 4, 5, 6, 7); //Define los pines que usa el modulo LCD

float temperatura=0; //Se crea una variable flotante para almacenar la temperatura

//Se definen los pines a usar para conectar el modulo MAX6675

int ktcSO = 11;
int ktcCS = 12;
int ktcCLK = 13;

MAX6675 ktc(ktcCLK, ktcCS, ktcSO);

void setup() {

  //Configurar como salida el pin 10 que controla el backlight del LCD y colocarlo en 1 logico.
  pinMode(10, OUTPUT);
  digitalWrite(10, HIGH);

  //inicializa el LCD.
  lcd.begin(16, 2);
  delay(500);

  //activa comunicacion serial.
  Serial.begin(9600);
  delay(500);

  //activa comunicacion serial.
  Serial.begin(9600);
  delay(500);

  //Muestra un saludo inicial presentacion en la pantalla LCD.
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("TERMOPAR TIPO K");
  lcd.setCursor(3, 1);
  lcd.print("AQUILES VAESA");
  delay(1000);
}

void loop() {

  //Leer temperatura.
  temperatura=ktc.readCelsius();
  //temperatura=ktc.readFahrenheit();

  //Enviar dato de temperatura por el puerto serial.
  Serial.print("Temperatura = ");
  Serial.print(temperatura);
  Serial.println(" C");

  //Mostrar dato de temperatura en LCD.
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Temperatura: ");
  lcd.setCursor(2, 1);
  lcd.print(temperatura);
  lcd.setCursor(9, 1);
  lcd.print("C");

  //Pausa de medio segundo para repetir el proceso
  delay(500);
}
```



## **7.1. Anexo 9: PLANOS**

