

**DISEÑO, AUTOMATIZACION DE UN SISTEMA DE TEMPLE POR
INDUCCION PARA ACEROS CON DIAMETRO DE
5-40mm**

**ERIC ADRIÁN RAMÍREZ OTERO
COD: 18200022**

Director del Proyecto : ALBAN JAIMES



**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BUCARAMANGA
ESCUELA DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA MECATRÓNICA
BUCARAMANGA**

2005

**DISEÑO, AUTOMATIZACION DE UN SISTEMA DE TEMPLE POR
INDUCCION PARA ACEROS CON DIAMETRO DE
5-40mm**

**ERIC ADRIÁN RAMÍREZ OTERO
COD: 18200022**

Director del Proyecto: ALBAN JAIMES

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero
Mecatronico



**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BUCARAMANGA
ESCUELA DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA MECATRÓNICA
BUCARAMANGA**

2005

Nota de Aceptación

Firma del Presidente

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Fecha 21/11/2005

DEDICATORIA

A Dios y a la Santísima Virgen por haberme guiado día a día para enfrentar los obstáculos que se me presentaron.

A mis padres JAIME ENRIQUE RAMIREZ y FANNY DEL CARMEN OTERO por su confianza y apoyo.

A mis hermanos ZINNIA ADRIANA Y ALEX ENRIQUE RAMIREZ OTERO por su tolerancia y sacrificio, y mi novia ZULAY BARRERA por su colaboración.

A mis compañeros por su solidaridad en los buenos y malos momentos y finalmente a la Universidad Autónoma de Bucaramanga (UNAB) por brindarme las bases del conocimiento para ser un profesional.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar, automatizar un sistema de temple por inducción para aceros con formas cilíndricas de dimensiones inferiores a 40 mm.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Realizar el diseño del sistema eléctrico del sistema de generación de calor mediante la generación de corrientes inducidas generadas por medio de bobinas ó inductores.
- Diseñar y construir los inductores en función de temperatura de calentamiento la que es establecida en un rango de 870-200 grados centígrados el tamaño, teniendo en cuenta la geometría de la pieza a templar, y número de espiras.
- Diseñar el sistema de automatización del sistema de temple, principalmente en las etapas: Generación de corriente, el nivel de la frecuencia de la corriente circulante, el caudal del medio templante, y la velocidad de avance del sistema de temple.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los elementos de máquina que se encuentran sometidos a situaciones de desgaste, rozamiento, fricción, fatiga, necesitan presentar en su superficie niveles adecuados de dureza, generalmente esta debe ser superior a la del material con el que estén en contacto, por ejemplo: engranajes, ejes de transmisión. Además de esto deben mantener un núcleo con una combinación óptima de resistencia mecánica y ductilidad para mantener un adecuado desempeño en servicio y no presentar fallas prematuras.

Para mejorar las propiedades mecánicas existen los tratamientos térmico localizados, los termoquímicos y los tratamientos térmicos totales (Temple, revenido, recocido, austempering, martempering).

El tratamiento térmico localizado de temple por inducción suministra a la superficie:

Niveles de dureza superiores al del núcleo, esfuerzos de compresión los que mejoran el desempeño en fatiga de estos materiales, y en forma global un componente con excelentes propiedades en servicio.

Con el desarrollo de este proyecto de investigación se pretende crear un dispositivo que suministre un calentamiento superficial a materiales con formas cilíndricas en un rango de temperaturas de 200-870 °C, mediante la generación de corrientes inducidas, el que dará respuesta a las necesidades de mejoramiento de las propiedades mecánicas de los materiales, y contribuirá al fortalecimiento del área de Procesos de Manufactura y Materiales de la Universidad.

ALCANCES DEL PROYECTO

Con el desarrollo de este proyecto de investigación se obtuvo:

Un prototipo que maneje un rango de temperaturas de calentamiento entre 870-200 grados centígrados, con sistema de automatización del nivel de la frecuencia, velocidad de avance del sistema de inducción y caudal del medio templante.

También se espera contribuir con este proyecto de investigación al área de Procesos de Manufactura y Materiales de la universidad

HIPOTESIS

Mediante un adecuado diseño de la fuente de potencia se desarrollará una eficiente conversión de la energía eléctrica en energía calorífica, lo cual mediante el fenómeno de inducción electromagnética aumentará la temperatura del material a templar hasta el rango de austenización del material a tratar térmicamente.

TABLA DE CONTENIDO

1. MARCO TEÓRICO	1
1.1. Temple	1
1.2 Recocido	2
1.3 Revenido	3
1.3.1 Fragilidad Por Revenido	3
1.3.2 Efecto De Los Elementos De Aleación	5
1.3.2.1 Acero 4130	6
1.3.2.2 Acero 4140	8
1.3.2.3 Acero 4340	10
1.4 TEMPLES LOCALIZADOS	14
1.4.1 Temple Por Inducción	14
1.4.2 La Inducción Electromagnética	15
1.4.3 Efecto Superficial O Profundidad De Penetración	17
1.2.4 Temple	22
1.5 Composición De Una Instalación De Calentamiento Por Inducción	25
1.5.1 Generador	25
1.5.2 Estación De Calentamiento	25
1.5.3 Inductor	25
1.5.4 Máquina De Presentación	26
1.5.5 Equipos De Refrigeración	26
1.5.6 Profundidad De Penetración	26
1.5.7 Potencia Transmitida A La Carga	27
1.5.8 Rendimiento Del Calentamiento Por Inducción	35
1.5.9 Factor De Potencia.	40
1.6 TRANSMISIÓN DEL CALOR	43
1.6.1 Transferencia De Calor	43
1.6.2 Transmisión De Calor En La Carga.	45
1.6.2 Pérdidas De Calor Por Radiación	52
1.6.3 Pérdidas De Calor Por Convección.	54
1.6.4 Pérdidas De Calor Por Inducción	55
1.6.5 Pérdidas Por El Agua De Refrigeración.	57
1.7 CONSIDERACIONES DE INGENIERIA ELECTRÓNICA	59
1.7.1 Comparativa De Tecnologías.	59
1.7.2 Factores Exigidos.	60
1.7.3 Alternativas.	61
1.7.3.1 Tecnología Mecánica	61
1.7.3.2. Tecnología Cableada.	61
1.7.3.3 Para El Control.	62
1.7.3.4 Como Accionador.	63
1.7.3.5 Tecnología Cableada Fluídica.	64
1.7.3.6 Cableado Eléctrico A Relés.	66
1.7.3.7 Cableado Con Elementos De Electrónica Estática.	68
1.5.3.8 Tecnología Programada	70
1.7.3.9 Microcontroladores	72

1.8 Autómatas Programables Industriales (API).	74
1.9 DISEÑO METODOLOGICO	83
2. PROPUESTA DE DISEÑO MECATRONICO	84
2.1 DISEÑO MECATRONICO	85
2.1.1 DISEÑO MECÁNICO	86
2.1.1.1 Factor de Potencia	91
2.1.2 Diseño Electrónico	93
2.1.2.1. Diseño De La Fuente De Potencia	93
2.1.2.1.1. Potencia Transmitida A La Carga	93
2.1.2.2. Construcción De La Fuente De Potencia	95
2.1.2.2.1. Introducción A Los Inversores Resonantes	95
2.1.2.2.1.1. Parámetros Característicos De Un Inversor	95
2.1.2.2.2. Diagrama Eléctrico De La Fuente	96
2.1.2.2.4. Circuito Eléctrico Del Rectificador	96
2.2. El Sistema De Control	97
2.2.1. Microcontrolador PIC16F873	97
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	97

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1 Efecto de la temperatura de revenido sobre las propiedades mecánicas para un acero 4130.	7.
Tabla 2. Efecto de la temperatura de revenido sobre las propiedades mecánicas para un acero 4140 templado en aceite.	9.
Tabla 3. Efecto de la temperatura de revenido sobre las propiedades mecánicas para un acero 4340 templado en aceite.	11.
Tabla 4. Tenacidad a la entalla y tenacidad a la fractura de un acero 4340 revenido a diferentes durezas.	11.
Tabla 5 Cuadro Comparativo	69.
Tabla 6. Cuadro Comparativo Entre A.P.I. Y Microcontrolador.	79.
Tabla 7. Ventajas y desventajas de la ubicación del sistema de temple.	86.
Tabla 8. Análisis de deformaciones y Factor de Seguridad.	91.

LISTADOS DE GRAFICOS.

Figura 1. Energía de impacto vs. Temperatura de revenido para un acero 4340.	5.
Figura 2. Diagrama TTT para un acero 4140.	10.
Figura 3. Relación tratamientos térmicos - energía de impacto medida en el ensayo Charpy.	13.
Figura 4. Diagrama de Inducción Electromagnética	15.
Figura 5. Esquema de principio.	20.
Figura 6. Profundidad de penetración.	21.
Figura 7. Cilindro o Placa Infinita	31.
Figura 8. Factor de Corrección F1	31.
Figura 9. Factor de Corrección F2.	33.
Figura 10. Factor de Corrección F3.	33.
Figura 11. Rendimiento Eléctrico.	40.
Figura 12. Rendimiento Eléctrico para Calentadores de Aceros.	40.
Figura 13. Factor de Potencia para Calentadores de Inducción.	42.
Figura 14. Calentamiento de redondeo no Férrico.	47.
Figura 15. Calentamiento de redondeo Magnético.	48.
Figura 16. Evolución de Temperatura en un Redondo.	49.
Figura 17. Representación Adimensional.	49.
Figura 18. Relación de la Temperatura Real/Ideal.	51.
Figura 19. Variación de la Temperatura Durante el Empapado.	51.
Figura 20. Perdidas por Radiación.	53.
Figura 21. Factor de Corrección.	54.
Figura 22. Esquema de un Horno de Inducción.	56.
Figura 23. Perdidas por calor por el agua de refrigeración.	59.
Figura 24. Etapas preliminares para la formulación del proyecto.	84.
Figura 25. Etapas de desarrollo del trabajo.	85.
Figura 26. Estructura del prototipo de máquina.	87.
Figura 27. Perfil de deformaciones sobre la estructura.	88.
Figura 28. Factor de Seguridad.	90.
Figura 29. Diagrama de la Fuente.	92.
Figura 30. Diagrama de Bloques de la Fuente.	94.
Figura 31. Inversor Puente completo.	94.
Figura 32. Rectificador Trifásico.	95.
Figura 33. Circuito de Control de Inversor.	97.

LISTADOS DE ANEXOS

Anexo 1. Análisis de estructura.	101.
Anexo 2. Microcontrolador.	111.
Anexo 3. Planos.	113.

1. MARCO TEORICO

A continuación se muestran algunas características generales relacionadas a los tratamientos térmicos de los materiales metálicos.

1.1. Temple

Temple, en metalurgia e ingeniería, es un proceso que consiste en aumentar la temperatura del material hasta el rango monofásico, para los aceros este rango monofásico corresponde a la fase de austenita, la cual es estable a temperaturas por encima de 800° C.

Los artículos de acero calentados a 900 °C y enfriados rápidamente en aceite o agua se vuelven duros y quebradizos. Si se vuelven a calentar a una temperatura menor se reduce su dureza pero se mejora su tenacidad. El equilibrio adecuado entre dureza y tenacidad se logra controlando la temperatura a la que se recalienta el acero y la duración del calentamiento.

La temperatura se determina con un instrumento conocido como pirómetro; en el pasado se hacía observando el color de la capa de óxido que se formaba sobre el metal durante el calentamiento.

Existen varios tipos de temple, clasificados en función del resultado que se quiera obtener y en función de la propiedad que presentan casi todos los aceros llamada templabilidad (capacidad a la penetración del temple), que a su vez depende, fundamentalmente, del diámetro o espesor de la pieza y de la calidad del acero.

El término temple también se utiliza para describir un proceso de trabajo en frío que aumenta la dureza del metal, sobre todo en el caso de aceros con bajo contenido en carbono y de metales no ferrosos.

1.2 Recocido

Proceso de tratamiento térmico por el que el vidrio y ciertos metales y aleaciones se hacen menos quebradizos y más resistentes a la fractura. El recocido minimiza los defectos internos en la estructura atómica del material y elimina posibles tensiones internas provocadas en las etapas anteriores de su procesado.

Los metales ferrosos y el vidrio se calientan a alta temperatura y posteriormente se enfrían lentamente; Cuando el volumen de metal o vidrio es grande suele enfriarse dentro del horno de calentamiento; las láminas suelen recocerse en un horno de proceso continuo. El material a recocer se traslada sobre un tablero móvil a través de una cámara de gran longitud con un gradiente (diferencia gradual) de temperaturas cuidadosamente fijado, desde un valor inicial justo por debajo del punto de ablandado hasta la temperatura ambiente en el extremo final. El tiempo de recocido, sobre todo en el caso del vidrio, varía mucho según el espesor de cada pieza; el vidrio de ventana, por ejemplo, requiere varias horas; el vidrio cilindrado necesita varios días, y los espejos de vidrio para telescopios reflectores, varios meses. El recocido es necesario como paso intermedio en procesos de manipulación de metales, como la fabricación de alambre o el estampado en latón, para recuperar la ductilidad que el metal a tratar pierde debido al endurecimiento producido durante la operación de modelado, y para obtener los más bajos valores de resistencia a la deformación.

También existen diferentes tipos de tratamientos térmicos de recocido aplicados a los aceros. El recocido de regeneración se utiliza para los aceros que presentan efectos de fatiga debido al trabajo que realizan determinadas piezas en el conjunto de las máquinas; este recocido tiene por objeto afinar el grano de las piezas de acero sobrecalentado. El recocido contra acritud se aplica a los aceros que han sido deformados en frío; mediante este

tratamiento se recupera parte de las propiedades iniciales. El recocido globular se aplica a los aceros para facilitar su mecanizado. El recocido de estabilización tiene por objeto eliminar las tensiones internas de las piezas forjadas o trabajadas en frío, y el recocido de ablandamiento se emplea cuando hay que mecanizar piezas templadas.

1.3 Revenido

Revenido: el revenido es un recalentamiento del acero para aliviar los esfuerzos internos, ablanda el material e incrementa su tenacidad.

En general, los aceros de alta resistencia son tratados térmicamente utilizando equipos y técnicas similares a las que se emplean para el tratamiento térmico de aceros para construcción. Estos aceros pueden ser templados y revenidos a durezas específicas, pero para aplicaciones críticas es necesario estirar los materiales para asegurar una combinación adecuada de resistencia y ductilidad. Para asegurar que se ha alcanzado una resistencia a la fractura frágil se deben realizar ensayos de tenacidad a la fractura y ensayo de impacto Charpy.

Para la familia de aceros 4130, 4140, 4340, 6150, antes de hacer el proceso de maquinado se tiene como práctica usual normalizar a 870 – 925 °C, y revenir a 650 – 975 °C.

1.3.1 Fragilidad por revenido

Este fenómeno se presenta en los aceros cuando se calientan a ciertos intervalos de temperaturas, a continuación se describen los tipos de fenómenos de fragilidad por revenido que se pueden presentar.

En forma general, la fragilidad por revenido se presenta cuando el material es calentado en un rango de temperaturas de 345 – 540 °C, el mecanismo que

se presenta es de segregación y difusión. A altas temperaturas se presenta una rápida difusión, pero el fenómeno de segregación es de pequeña magnitud; a temperaturas cerca al límite inferior del intervalo de fragilidad por revenido, el fenómeno de difusión es lento, y la segregación es alta.

Fragilidad en el revenido¹⁹: se manifiesta en cierto rango de temperaturas dependiendo de la composición química del acero. Se conocen dos regiones en las cuales se da este fenómeno.

Tipo 1. Ocurre en el rango de 250 – 400 °C.

Este intervalo de fragilidad se encuentra en la mayoría de los aceros no aleados y en los de baja aleación, de construcción o herramientas. Se presume que se debe al reemplazo del carburo épsilon por cementita intertiras, y la inestabilidad mecánica de la cementita intertiras cuando se aplican cargas. Se puede presentar en aceros como el 4140 cuando se revienen a temperaturas entre 230 – 370 °C.

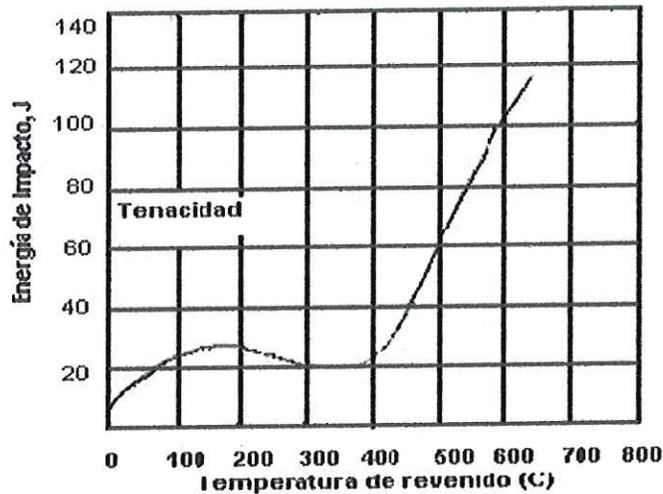
Tipo 2. Ocurre en el rango de 400 – 560 ° C.

Se presenta cuando ciertos aceros al cromo – níquel permanecen o se enfrían lentamente a través de este rango de temperaturas. Esta fragilidad se manifiesta como una pérdida de cohesión en los límites de grano de la austenita madre.

A partir de la literatura el fenómeno de fragilización por revenido se puede presentar en los aceros 4140.

La figura muestra una relación entre la temperatura de revenido y la energía de impacto para un acero 4340, de esta figura se puede analizar que en el rango de temperaturas de 180-380 ° C se presenta una disminución en la tenacidad a la entalla, de acuerdo al rango de temperaturas en que se presenta este fenómeno, puede decirse que este acero presenta fragilización en el revenido.

Figura 1. Energía de impacto vs. Temperatura de revenido para un acero 4340.



Fuente: Engineering Properties of Steel, Harvey Philip, American Society for Metals, 1982

A continuación se mencionan los efectos que tienen los elementos de aleación sobre las propiedades de los aceros.

1.3.2 Efecto de los elementos de aleación.

Carbono: Elemento de aleación esencial en todos los aceros, proporciona mayor endurecimiento. Con el aumento del contenido de carbono en la varilla, aumenta su resistencia a la tensión, dureza, y susceptibilidad al tratamiento térmico.

Manganeso: Su adición actúa como desoxidante, aumenta la dureza, resistencia a la corrosión del acero, aumenta la resistencia a la fluencia. Es un elemento gamágeno o estabilizador de la fase austenita.

Silicio: Es muy usada en aceros sometidos a un alto grado de oxidación, tales como en refinerías, la mayoría de las varillas contienen 0.15 – 0.35 % de este elemento, es un estabilizador de la fase ferrítica.

Níquel: Tiene un efecto positivo en la dureza del acero debido a que el efecto corrosivo del sulfuro de hidrogeno y otros gases que pueden tener el crudo, se contrarrestan si la varilla tiene níquel como elemento de aleación, además es el elemento que aumenta la tenacidad del acero, aumenta el nivel de templabilidad y aumenta el límite de fatiga.

Cromo: Forma un carburo estable y contribuye grandemente en la dureza del acero, sin embargo es menos efectivo que el níquel a la resistencia corrosiva del sulfuro de hidrogeno. A niveles del 12-13% Cr, la resistencia a la corrosión por H₂S es significativa.

Molibdeno: Es uno de los más poderosos elementos que contribuye en la dureza del acero, aunque no en forma igual al carbono, ayuda a mejorar la templabilidad. En pequeñas adiciones elimina la fragilidad inducida por el tratamiento térmico de revenido debido a que reacciona con el fósforo que migra a los límites de grano formando el Mo_3P que se precipita en el interior del grano.

A continuación se mencionan los principales tratamientos térmicos realizados a los materiales de alta resistencia mecánica.

1.3.2.1 ACERO 4130.

Es un acero templable en agua de baja a media templabilidad.

Los siguientes tratamientos térmicos aplican a esta familia de aceros.

- Normalizado: calentamiento a 870 ° C –975 ° C y sostenimiento a un tiempo que depende del espesor de la sección transversal, posteriormente se deja enfriar al aire. Revenido a 480 ° C.
- Temple: calentamiento a 845 ° C –875 ° C, se mantiene a esta temperatura, se temple en agua, o en aceite.
- Revenido: como mínimo se deja media hora en rangos de 200 – 700 °C; se enfría en aire o agua.

En la tabla 1 se muestra el efecto de la temperatura de revenido sobre el esfuerzo de fluencia, y la energía de impacto para un acero 4130 templado en agua y en aceite.

Tabla 1 Efecto de la temperatura de revenido sobre las propiedades mecánicas para un acero 4130.

Temperatura de revenido (° C)	Esfuerzo de fluencia (ksi)	Energía de impacto (lb.pie)
Templado en agua y revenido		
205	220	13
260	208	10
315	195	10
540	145	60
650	120	100
Templado en aceite y revenido		

Temperatura de revenido (° C)	Esfuerzo de fluencia (ksi)	Energía de impacto (lb.pie)
205	195	
260	185	
315	175	
540	122	
650	97	

Fuente: Metals Handbook, ASM, 1981, pags 121-122

1.3.2.2 ACERO 4140

Es un acero con composición similar al 4130, excepto por su mayor contenido de carbono. Los siguientes son los tratamientos térmicos realizados a este tipo de aceros.

- Normalizado. Calentamiento a 845 ° C –875 °C, enfriamiento al aire.
- Temple: calentamiento a 830 ° C –870 °C, sostenimiento a esta temperatura; temple en aceite, el agua es muy poco utilizada como medio de enfriamiento.
- Revenido: como mínimo se deja media hora en rangos de 175 – 230 °C ó 370 – 675 °C; se enfría en aire o agua. Las temperaturas de revenido y el tiempo dependen de la dureza deseada, para evitar la fragilización en azul, el acero 4140 no es revenido entre 230 - 370 °C.

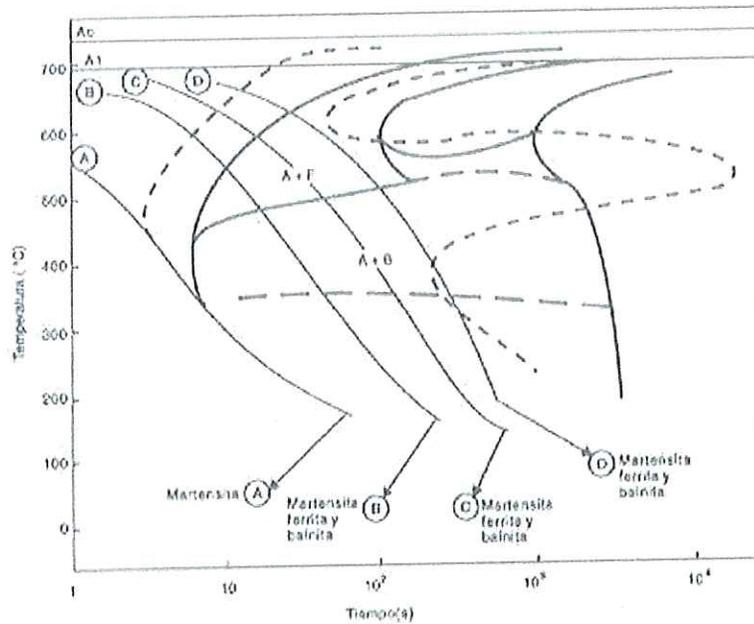
En la tabla 2 se muestra el efecto de la temperatura de revenido sobre el esfuerzo de fluencia, y la energía de impacto para un acero 4140 templado en aceite.

Tabla 2. Efecto de la temperatura de revenido sobre las propiedades mecánicas para un acero 4140 templado en aceite.

Temperatura de revenido (° C)	Esfuerzo de fluencia (ksi)	Energía de impacto (lb.pie)
205	252	11
260	240	8
315	228	7
370	212	11
425	195	21
480	175	34
540	152	48
650	114	83

En la figura 2 se presenta un diagrama TTT para un acero 4140 donde se pueden observar las velocidades críticas de temple para obtener martensita, cabe notar que este acero presenta un rango de templabilidad considerable.

Figura 2. Diagrama TTT para un acero 4140



Fuente: Transformaciones de fase en metalurgia, Valencia Asdrubal, Editorial Universidad de Antioquía, pagina 209.

1.3.2.3 ACERO 4340

Los siguientes son los tratamientos térmicos que se aplican a este acero:

- Normalizado: calentamiento a 845 – 900 °C, y sostenimiento a un tiempo que depende del espesor de la sección transversal; se enfría posteriormente al aire.
- Temple: calentamiento a 800 ° C –845 °C, sostenimiento por 15 minutos por cada 25 mm de espesor, temple en aceite por debajo de 65° C.
- Revenido: como mínimo se deja media hora en rangos de 650 °C, se enfría en aire. Las temperaturas de revenido y el tiempo dependen de la dureza deseada.

En la tabla 3 se muestra el efecto de la temperatura de revenido sobre el esfuerzo de fluencia, y la energía de impacto para un acero 4340 templado en aceite.

Tabla 3. Efecto de la temperatura de revenido sobre las propiedades mecánicas para un acero 4340 templado en aceite.

Temperatura de revenido (° C)	Esfuerzo de fluencia (ksi)	Energía de impacto (lb.pie)
205	270	15
315	235	10
425	198	12
540	168	35
650	125	74

Fuente: Metals Handbook, ASM, 1981, pags 122-123.

En la tabla 4 se muestra el efecto de la dureza ó temperatura de revenido sobre la tenacidad a la entalla y la tenacidad a la fractura de un acero 4340.

Tabla 4. Tenacidad a la entalla y tenacidad a la fractura de un acero 4340 revenido a diferentes durezas.

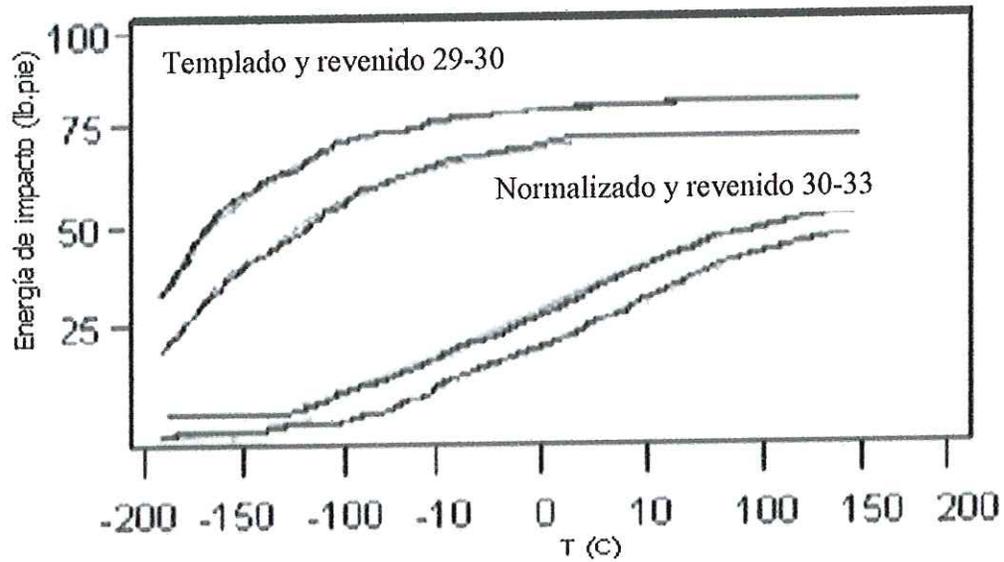
Dureza (HBN)	Resistencia mecánica (MPa)	Energía de impacto (lb.pie)	Tenacidad a la fractura (ksi.plg ^{1/2})
550	2040	14	48
430	1520	22	68

Dureza (HBN)	Resistencia mecánica (MPa)	Energía de impacto (lb.pie)	Tenacidad a la fractura (ksi.plg^{1/2})
380	1290	31	100

En la figura 3 se observa la relación que existe entre el tipo de tratamiento térmico, el nivel de dureza, la tenacidad a la entalla medida en el ensayo Charpy, y la temperatura, para un acero 4340; a temperatura ambiente una microestructura templada y revenida suministra valores de tenacidad mayores que una microestructura normalizada y revenida.

Los tratamientos térmicos que se aplican a las tuberías de perforación principalmente son el temple y revenido indicando mejores comportamiento en cuanto a tenacidad al impacto, y niveles de dureza mas bajos; en las tuberías de producción los tratamientos térmicos mas comunes son el normalizado y revenido presentando menores valores de tenacidad al impacto y niveles de dureza mas altos, como conclusión se tiene que: Los tratamientos térmicos de normalizado y revenido (típicos en los procesos de manufactura de las tuberías de producción) producen niveles de dureza mas altos y menores valores en tenacidad al impacto causando desempeños en fatiga inferiores a los obtenidos en los tratamientos térmicos típicos de las tuberías de perforación (temple y revenido).

Figura 3. Relación tratamientos térmicos - energía de impacto medida en el ensayo Charpy.



Fuente: Engineering Properties of Steel, Harvey Philip, American Society for Metals, 1982.

1.4 TEMPLES LOCALIZADOS

Los principales tipos de temple realizados a la superficie del material a templar son:

- Temple a la llama
- Temple por inducción

En el desarrollo de este proyecto se desarrolla un prototipo con el fin de desarrollar tratamientos térmicos a los aceros en forma superficial. Seguidamente se muestran los conceptos relacionados al proceso de temple por inducción.

1.4.1 Temple Por Inducción

Se debe hacer un análisis de la función del temple superficial por inducción, como se realiza función, movimiento, mecanismos, resultado y demás factores que influyen para hacer un breve contexto del tema a seguir:

Hay aspectos fundamentales en los que hay que hacer énfasis para entender el calentamiento por inducción entre ellos se encuentra que un conductor crea un campo magnético al momento de pasar corriente eléctrica sobre el, si este conductor es una bobina, el campo magnético fluye por ella y persiste el campo, aun cuando se inserte una barra metálica.

El calentamiento por inducción se basa en tres principios:

- La inducción electromagnética
- El efecto superficial
- La transferencia calor.

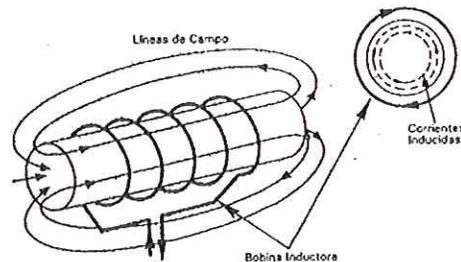
El flujo magnético es generado por una corriente alterna de alta frecuencia se da origen a corrientes de EDDY en la superficie de la barra metálica produciendo luego un calentamiento.

1.4.2 La Inducción Electromagnética:

Todos los metales se calientan al ser recorridos por una corriente eléctrica, debido a la resistencia del metal.

Una pieza metálica situada en el interior de una bobina recorrida por una corriente alterna, funciona como transformador. El primario es el inductor y el secundario la pieza metálica, que esta en cortocircuito.

Figura 4. Diagrama de Inducción Electromagnética.



La corriente alterna, que circula por la bobina o inductor crea un campo magnético. El campo magnético alterno induce en la pieza la aparición de una corriente eléctrica.

Esta corriente eléctrica al circular por la pieza produce el calentamiento de la misma. El calor desarrollado en la pieza depende de la resistencia eléctrica que es una característica del material, y del cuadrado de la intensidad que circula, que es una característica de las corrientes aplicadas a la bobina.

El efecto de película es un fenómeno que se produce por las corrientes inducidas en la pieza por la corriente de alta o media frecuencia atravesando la bobina en su mayor parte en las capas superficiales.

$$I_x = I_0 \cdot e^{-X/d}$$

I_x = Densidad de corriente a la profundidad x

I_0 = Densidad de corriente en la superficie

d = Profundidad de penetración

Gracias al efecto de película, el calentamiento por inducción es más adecuado para el temple superficial de aceros.

El procedimiento de temple por inducción, se hace teniendo en cuenta la profundidad por el temple requerido, cuando se necesita una capa delgada se usa corriente de alta frecuencia si se hace un calentamiento más profundo se usa frecuencias intermedias y bajas. Algo para resaltar es que la mayoría de las aplicaciones requiere alta densidad de potencia y ciclos cortos de calentamiento, para procurar la restricción del calentamiento del área superficial.

Hay tres clases de bobinas diseñadas para calentamiento interno externo y de superficies planas, según el tipo empleado, el acero luego de haberse calentado se enfría con aceite, agua y algunas veces con aire.

Hay diferentes métodos para el enfriamiento y calentamiento entre ellos se tienen:

- a) Temple en una sola etapa: la pieza se posiciona y se calienta después se enfría:
 - Sumergiéndose en el líquido a mano o en forma que caiga sola

- Al terminar el calentamiento automáticamente, a través de una ducha de temple en la maquina de templado
- La bobina se puede proveer de una ducha de temple que empieza a operar cuando se desconecta la corriente de alta frecuencia.

- b) Temple progresivo o por avance: se utiliza cuando la potencia no es adecuada para el temple en una sola etapa o si requieres una etapa muy delgada endurecida.

El método se usa para partes muy largas por que la bobina se desplaza linealmente a lo largo de la pieza o esta pasa a través de la bobina. Detrás de la bobina se sitúa la ducha y el enfriamiento se realiza en una sola operación. Durante la operación, el componente puede girar proporcionando un calentamiento uniforme y evitando y regularidades.

- c) En materiales que presentan un buen grado de templabilidad por inducción: se requiere aumenta la dureza superficial, los aceros que se utilizan tiene contenidos de Carbono entre 0.30 y 0.50% que dan dureza de 50 a 60 RC. La dureza superficial que se puede alcanzar aumenta con el contenido de carbono y el limite superior es limitado por el contenido de carbono. Se puede conseguir una resistencia mediante un tratamiento previo de temple y revenido.

1.4.3 Efecto Superficial O Profundidad De Penetración:

Debido a que el campo magnético aplicado es alterno, la corriente inducida no se reparte por igual en toda la sección de la pieza.

Esta corriente inducida, es la que calienta la pieza, es nula en el centro y máxima en la superficie. Por tanto circula preferentemente en las capas superficiales. Este fenómeno se conoce con el nombre de "efecto pelicular" o "efecto Kelvin".

Como medida de esta distribución irregular de la corriente, se toma un valor δ denominado "profundidad de penetración" de la corriente. se define como la distancia a la superficie en la que la corriente es 36,7% de la que circula en la superficie. En esta capa de espesor δ es donde se genera el 86 % de la potencia total inducida en la pieza.

$$\text{Profundidad de penetración} = \sqrt{\frac{\text{Resistividad}(\rho)}{\text{Permeabilidad}(\mu) \times \text{Frecuencia}(f)}} \quad (1.1)$$

- ρ es la resistividad el material a calentar en $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$.
- f la frecuencia de trabajo en Hz.
- μ la permeabilidad magnética del Material

La permeabilidad magnética de la expresión anterior la debemos obtener de la siguiente formula:

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

donde :

$$\mu_0 = \text{permeabilidad magnética del vacío} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m,}$$

$$\mu_r = \text{permeabilidad magnética relativa.}$$

De la expresión anterior se deduce que, la "profundidad de penetración" depende de la frecuencia de las corrientes que recorren la bobina y de las

características intrínsecas del metal. También nos permite aclarar conceptos como:

-Disminuyendo la frecuencia, se aumenta la profundidad de penetración.

-Aumentando la frecuencia se disminuye la profundidad de penetración.

-A la misma frecuencia, la profundidad de penetración es menor en los aceros magnéticos, que en los materiales no magnéticos: aluminio, latón, cobre.

- Proporcional a la raíz cuadrada de la resistividad de la carga. Materiales más

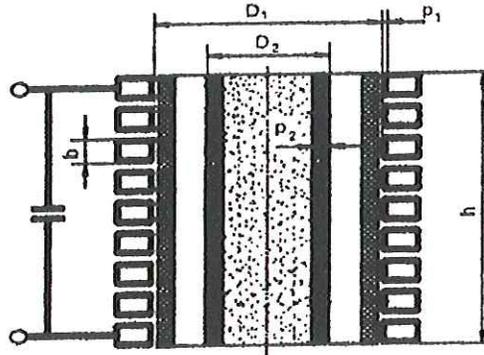
Conductores (cobre, aluminio) que otros (acero, fundición) darán lugar a menores valores de p .

- Inversamente a la raíz cuadrada de la frecuencia. Al pasar la frecuencia de 50Hz a 5000 Hz se reduce p a la décima parte (piezas de menor diámetro requieren mayor frecuencia).

- El valor de la permeabilidad magnética relativa μ_r , para materiales no magnéticos (cobre, aluminio, aceros magnéticos y aceros magnéticos por encima del punto de Curie, hacia 730°C) es $\mu_r = 1$.

A continuación se muestra el caso que se presenta en el temple por inducción. En este se puede explicar el funcionamiento y características de los equipos de inducción corresponde a los equipos de inducción equipados con una bobina cilíndrica de diámetro interior D_1 y altura h que envuelve a un cuerpo macizo conductor de la corriente eléctrica de diámetro exterior D_2 y la misma altura.

Figura 5. Esquema de principio.



Como la intensidad inducida en la carga decrece desde un valor i_0 en la superficie hasta un valor prácticamente nulo en el centro, para el caso de un redondo de gran altura h respecto al diámetro D_2 , se puede considerar que la variación es exponencial según la expresión:

$$i = i_0 \cdot e^{-x/p} \quad (1.2)$$

donde p se define como profundidad de penetración que permite sustituir la intensidad decreciente de la superficie al centro por la intensidad superficial i_0 , constante en el espesor p , y nula en el resto (figura 6). Así a la profundidad p realmente la intensidad se ha reducido al 37%:

$$i_p = i_0 \cdot e^{-1} = 0.37 \cdot i_0 \quad (1.3)$$

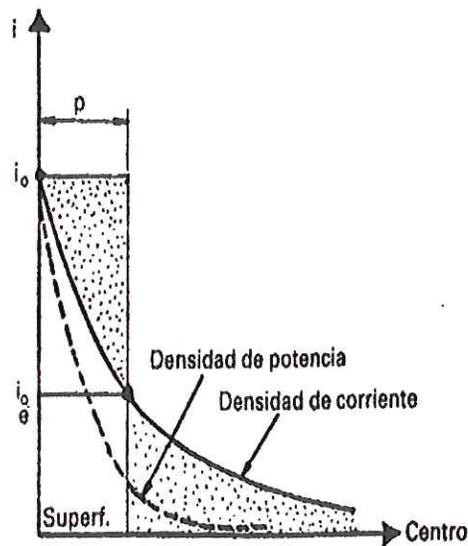
A doble profundidad $x = 2 \cdot p$ la intensidad será realmente el 14%:

$$i_p = i_0 \cdot e^{-2} = 0.14 \cdot i_0 \quad (1.4)$$

Esta profundidad de penetración en la que i_0 es constante, sólo es aplicable cuando el radio de la carga es varias veces mayor que p . Se considera que, cuando el radio es de $5 \cdot p$, el error cometido al considerar constante i_0 , en el

espesor p , en el cálculo de la potencia transmitida a la carga, es inferior al 10%.

Figura 6. Profundidad de penetración.



Como la potencia generada por efecto Joule en la carga es proporcional a i^2 , resulta que en el espesor p de carga se ha generado el 86% de la potencia total:

$$(1-0.37^2) \cdot 100 = 86\% \quad (1.5)$$

Cuando se trata de una carga tubular de pequeño espesor y gran diámetro es admisible considerar constante la intensidad en dicho espesor.

1.2.4 Temple

Al analizar los principios que rigen el calentamiento por inducción, que una de sus características fundamentales es la posibilidad de regular la profundidad de penetración de la capa calentada en función de la frecuencia elegida. Esta característica encuentra su aplicación fundamental en el temple superficial por inducción.

El procedimiento consiste en colocar una bobina de la forma adecuada en las proximidades de la zona a calentar y sometida la zona a templar a la acción del campo magnético inducido por la bobina, se eleva la temperatura del material por encima del punto de austenización, produciendo la transformación del material. El enfriamiento brusco de la pieza, en agua u otro fluido de temple, provoca la transformación de austenita en martensita y por tanto el endurecimiento del metal.

Pueden así obtenerse piezas con una gran dureza superficial, lo que las hace resistentes al desgaste mientras que el núcleo de la pieza permanece blando y por tanto sin el problema de fragilidad que se produce en las piezas totalmente templadas.

Las deformaciones sufridas por las piezas calentadas por inducción son mucho menores que las producidas por cualquier otro tratamiento térmico y normalmente del mismo orden de valor que las tolerancias admitidas en las operaciones de rectificado. El endurecimiento pues, puede ser considerado como una operación final, lo cual conduce evidentemente a una reducción de los gastos de fabricación y a una disminución de rechazos por piezas defectuosa.

Tres valores de profundidad de penetración que pueden originar alguna confusión.

- La Profundidad De Penetración De La Corriente.

Es un valor ligado a la frecuencia de trabajo empleada y que considera que el calentamiento en la pieza se produce de una forma instantánea, lo cual evidentemente no corresponde a la realidad. Es pues un valor exclusivamente teórico.

- La Profundidad De Penetración Del Calor.

Es el espesor del material cuya temperatura está situada por encima de la temperatura de austenización. Este espesor de material depende en consecuencia, no sólo de las frecuencias utilizadas, sino también de la potencia específica permitida, transmitida de la duración del calentamiento y de la conductividad térmica del material.

-La Profundidad De Endurecimiento.

Que es el valor que normalmente se da en los planos de tratamientos, es otro concepto, que depende no solamente del ciclo de calentamiento utilizado, sino también de la templabilidad del metal, de la conducción térmica, que permite un enfriamiento más o menos rápido y sobre todo del sistema e intensidad de enfriamiento escogido. Las densidades de potencia que se utilizan en el temple superficial, son normalmente elevadas con el objeto de reducir los tiempos de calentamiento y en consecuencia, la transmisión de calor hacia el interior de la pieza. Los valores habituales se sitúan entre 0,5 KW/cm² y 10 KW/cm².

Los tiempos de calentamiento son normalmente muy cortos situándose entre fracciones de segundos y algunos segundos.

Habida de los cortos tiempos de calentamiento si la forma geométrica de la pieza lo permite, siempre es recomendable que la pieza gire en el interior del inductor durante el proceso de temple, con el objeto de conseguir una homogeneidad en el tratamiento en todo el diámetro de la pieza.

Cuando la pieza a tratar o bien la zona que debe ser templada dentro de esta pieza es de grandes dimensiones, se hace difícil el temple de toda la zona simultáneamente, porque necesitaríamos en función de las necesidades de potencia establecidas, una gran potencia de salida del generador.

En estos casos se recurre sistemáticamente a lo que se llama "temple al desfile". Según los casos, la pieza o el inductor se desplaza a lo largo de la zona de temple, produciendo el calentamiento y enfriamiento progresivo de la pieza a templar.

La elección en la máquina, de desplazar la pieza o el conjunto formado por el inductor de calentamiento y la ducha de enfriamiento depende fundamentalmente del peso y dimensión de la pieza a tratar.

Si esta pieza es de pequeñas dimensiones, está claro que resulta más económico desplazar la pieza, mientras que para piezas de grandes dimensiones, resulta más económico el desplazamiento del conjunto inductor-ducha.

1.5 Composición De Una Instalación De Calentamiento Por Inducción

Una instalación de calentamiento por inducción se compone básicamente de los siguientes elementos.

- Generador.
- Estación de calentamiento.
- Inductor.
- Máquina de presentación.
- Equipos de refrigeración.
- Equipo eléctrico y de control

1.5.1 Generador

Es el elemento encargado de transformar la energía eléctrica de la red de suministro, en energía eléctrica de frecuencia y voltaje adecuados para que al ser entregada al inductor produzca un calentamiento en la pieza.

1.5.2 Estación De Calentamiento

La función de la estación de calentamiento será la de acoplar el inductor de calentamiento a las características eléctricas del generador, de tal forma que con un inductor determinado extraigamos la máxima potencia del generador. Está construida con elementos estándar, y en general permite, con algunos ajustes, acoplar una gama de inductores diversa.

1.5.3 Inductor

Es el elemento encargado de transmitir energía a la pieza con el objeto de producir su calentamiento. Su diseño depende de la forma de la pieza y del calentamiento que se precise realizar. Es, en consecuencia, un componente de la instalación que hay que diseñar para cada aplicación concreta.

1.5.4 Máquina De Presentación

Es la parte mecánica de la instalación que incluye todos los automatismos necesarios para la perfecta manipulación de la pieza y para conseguir la circulación de ésta a través del inductor.

1.5.5 Equipos De Refrigeración

Son necesarios para evacuar las pérdidas de potencia en forma de calor que se producen en los diferentes componentes de la instalación, y cuando el tratamiento térmico lo requiere para producir el enfriamiento de las piezas.

A continuación se muestran las expresiones para realizar el cálculo de los parámetros eléctricos, térmicos asociados al temple por inducción.

1.5.6 Profundidad De Penetración

Aplicando de forma simplificada, las leyes de Maxwell al esquema de principio de la figura 6 se obtiene como expresión de la profundidad de penetración:

$$P = \sqrt{\rho / \pi \cdot f \cdot \mu} \quad (1.6)$$

Donde:

ρ = resistividad de la carga en ohmios. m ($\Omega \cdot m$)

f = frecuencia en hercios (Hz)

μ = permeabilidad magnética en henrys/ m (H/m). se aplica en la práctica.

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (1.7)$$

Donde:

$\mu_0 =$ permeabilidad magnética del vacío $= 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$,

$\mu_r =$ permeabilidad magnética relativa.

Se obtiene finalmente la expresión:

$$p = 503 \cdot \sqrt{p / f \cdot \mu_r (m)} \quad (1.8)$$

Se deduce que la profundidad de penetración es:

- Proporcional a la raíz cuadrada de la resistividad de la carga. Materiales mas conductores (cobre, aluminio) que otros (acero, fundición) darán lugar a menores valores de p .
- Inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la frecuencia. Al pasar la frecuencia de 50 Hz a 5.000 Hz se reduce p a la décima parte (piezas de menor diámetro exigen mayor frecuencia).
- En los materiales no magnéticos (cobre, aluminio, aceros amagnéticos y aceros magnéticos por encima del punto de Curie, hacia 730° C) el valor de $\mu_r = 1$. Por tanto, en los hornos de fusión siempre se aplicará en los cálculos con el baño fundido $\mu_r = 1$.

1.5.7 Potencia Transmitida A La Carga

De una forma simplificada y partiendo del concepto de profundidad de penetración la resistencia eléctrica de la carga será:

$$R_2 = p \cdot \frac{1}{h} = \frac{p \cdot \pi \cdot D_2}{h} = 6,24 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{D_2 \sqrt{p \cdot f \cdot \mu_r}}{h} \quad (1.9)$$

Energía disipada en la carga por efecto Joule:

$$P^2 = I_2^2 \cdot R_2 \quad (1.10)$$

Siendo I_2 la intensidad eficaz en la carga (correspondiente a la intensidad periódica i_0 antes definida).

Aplicando la relación de intensidades (I_1 en el inductor, I_2 en la carga), equivalente a la relación del número de espiras (n_1 en el inductor $n_2 = 1$ en la carga), se tiene:

$$I_2 = I_1 \cdot n_1 \quad (1.11)$$

El campo magnético eficaz se define como los amperios-vuelta ($I_1 \cdot n_1$) por la unidad de longitud:

$$H_e = \frac{I_1 \cdot n_1}{h} \quad (1.12)$$

Sustituyendo y operando resulta:

$$P_2 = 6,24 \cdot 10^{-3} \cdot H_e^2 \cdot D_2 \cdot h \cdot \sqrt{\rho \cdot \mu_r} \cdot f \quad (\text{W}). \quad (1.13)$$

Interesan también:

1. la potencia por unidad de altura de bobina- carga:

$$\frac{P_2}{h} = 6,24 \cdot 10^{-3} \cdot H_e^2 \cdot D_2 \cdot \sqrt{\rho \cdot \mu_r} \cdot f \quad (\text{W/m}) \quad (1.14)$$

2. la potencia específica por unidad de superficie de carga:

$$\frac{P_2}{\pi.D_2.h} = 2.10^{-3}.H_e^2.\sqrt{p.\mu_r.f} \quad (\text{W/m}^2) \quad (1.15)$$

Que se puede escribir del modo siguiente:

$$\frac{P_2}{\pi.D_2.h} = 4.10^{-6}.H_e^2..\frac{p}{p} \quad (\text{W/m}^2) \quad (1.16)$$

De la expresión anterior se deduce que, para aumentar la potencia específica transmitida a la carga (kW/m^2), es preciso:

- Aumentar la frecuencia, aunque con limitaciones, ya que se limita la potencia a una capa superficial de espesor p (el 86 por 100) y no resulta adecuada mas que para calentamiento superficial.
- Aumentar el campo magnético, es decir, los amperios-vuelta $n_1 I_1$ de la bobina inductora. Viene limitado por las dificultades de aumentar n_1 en una altura h definida por el tamaño del horno o calentador, que conllevaría un menor valor de la altura de cada espira, lo que podría ser insuficiente para la intensidad I_1 requerida en el primario.

Las propiedades físicas son, a este respecto, muy importantes:

- Una resistividad baja (cobre, aluminio) conduce a un menor valor de la potencia específica. El aumento de la resistividad con la temperatura influye favorablemente, sobre todo en los hornos de fusión, ya que el cambio de estado de sólido a líquido da lugar a un notable aumento de la resistividad.
- En los materiales magnéticos se puede jugar con la frecuencia y la permeabilidad magnética, de modo que, hasta el punto de Curie, se opera a frecuencia reducida (se utiliza, si es posible 50Hz en

calentadores de inducción para deformación plástica) y, por encima del punto Curie, a mayor frecuencia.

Las expresiones anteriores están basadas en hipótesis simplificadoras importantes (corriente uniforme en la capa superficial definida por la profundidad de penetración, campo magnético uniforme, perfecto acoplamiento magnético inductor- carga, diámetro de la carga mucho mayor que la profundidad de penetración, pieza cilíndrica, etc.). Sin embargo, es frecuente utilizar las expresiones anteriores (1.13), (1.16) introduciendo un factor de corrección F_1 para tener en cuenta el diámetro o espesor de la carga.

En la figura 7 se muestran esquemáticamente un cilindro de diámetro D y una placa de espesor D , supuestas de longitud infinita y calentados por bobinas inductoras arrolladas en la forma indicada. La potencia transmitida por inducción a la carga viene dada por la expresión (1.13) corregida por el factor F_1 :

$$P_2 = 6,24 \cdot 10^{-3} \cdot H_e^2 \cdot D \cdot h \cdot \sqrt{p \cdot \mu_r} \cdot f \cdot F_1 \quad (\text{W}) \quad (1.17)$$

Donde F_1 , se determina en la figura 8 a partir de la abscisa (relación del diámetro o espesor a la profundidad de penetración).

En un cuerpo cilíndrico F_1 alcanza un valor de 0,7 para una relación $D/p = 6$. Claramente se aprecia la relación entre el diámetro de la carga y la frecuencia adecuada de calentamiento que determina el valor de p para un material determinado.

En una placa se alcanza un valor de F_1 de 0,80 para una relación $D/p = 2$. Cuando la sección de la carga es cuadrada de lado a se suele asimilar a una carga cilíndrica de diámetro $D = 1,2 \cdot a$.

Figura 7. Cilindro o Placa Infinita

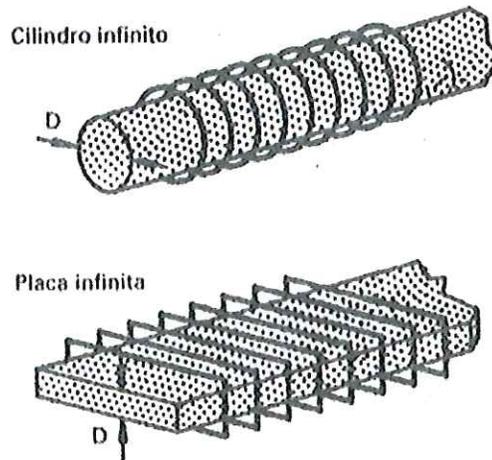
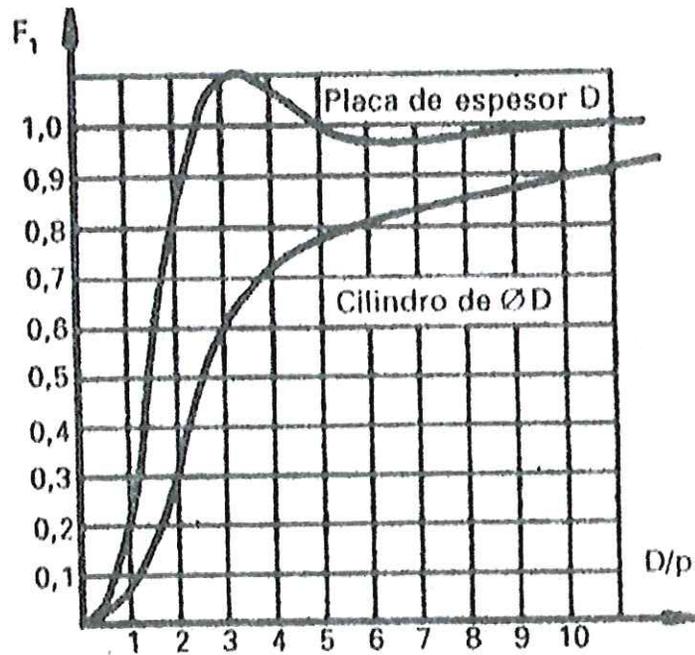


Figura 8. Factor de Corrección F_1



Una mayor frecuencia para un diámetro D_2 y un material dados, supone un menor valor de p y, por tanto, un mayor valor de F_1 , lo que hace aumentar doblemente el valor de P_2 (Adecuado para tratamientos térmicos, donde se apunta a potencias específicas de 1 a 4 kW/cm²). Una menor frecuencia da lugar a un menor valor de F_1 y una reducción doble de P_2 (adecuado para

fusión donde, en otro límite, se apunta a potencias específicas de 30 a 300 W/ cm²). Es interesante deducir de los valores anteriores que en el calentamiento por inducción se alcanzan específicas notablemente superiores a las normales en hornos de calentamiento por resistencias y de llamas, en los que suelen ser de orden de 1 a 10 W/ cm².

Como hemos indicado el factor de corrección F_1 tenía en cuenta la relación D/p , pero se refería a un cuerpo de longitud infinita. Cuando el cuerpo es finito se produce un efecto de borde que causa en los extremos una dispersión del campo magnético. Además, el diámetro exterior de la carga es siempre inferior al diámetro interior de la bobina (más acentuado en los hornos de fusión que en los calentadores para deformación plástica y en estos que en los equipos de tratamiento térmico), lo que da lugar a una nueva dispersión de flujo magnético. Ambos efectos se corrigen introduciendo un nuevo factor F_2 cuyos valores se muestran en la figura 9.

La potencia transmitida a la carga sería:

$$P_2 = 6,24 \cdot 10^{-3} \cdot H_e^2 \cdot D \cdot h \sqrt{p \cdot \mu_r} \cdot f_0 \cdot F_1 \cdot F_2 \quad (\text{W}). \quad (1.18)$$

Finalmente, en el caso de carga cilíndrica hueca de diámetro D y espesor a , sigue siendo aplicable el concepto de profundidad de penetración, pero la corriente inducida se desarrollará únicamente en el espesor a . Si la relación a/D es grande (comprendido entre 0,2 y 0,5 - cilindro macizo) el campo magnético es variable en el espesor a y, consiguientemente, la corriente inducida es variable. Si la relación a/D es pequeña (menor de 0,1) el campo magnético y la corriente inducida son prácticamente constantes en el espesor a . De todos modos, la potencia transmitida a la carga viene dada por la misma expresión introduciendo un factor F_3 :

$$p_2 = 6,24 \cdot 10^{-3} \cdot H_e^2 \cdot D \cdot h \cdot \sqrt{\rho \cdot \mu_r} \cdot f_0 \cdot F_3 \quad (W) \quad (1.19)$$

El valor de F_3 se muestra en la figura 10. En la misma figura se ha superpuesto el valor anterior de F_1 . Para cilindro macizo para el que $a/D = 0,5$.

Figura 9. Factor de Corrección F2

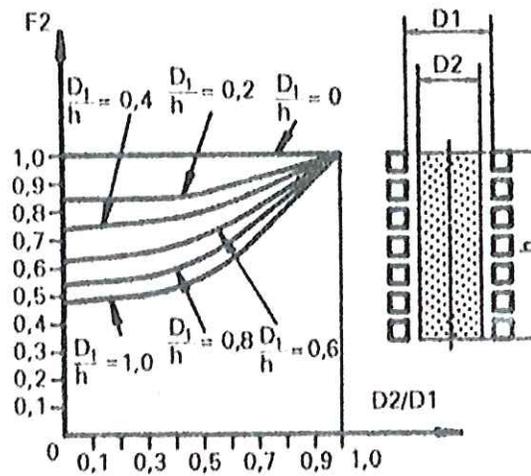
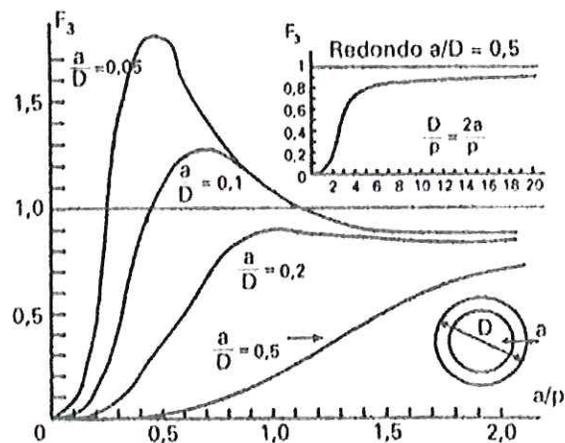


Figura 10. Factor de Corrección F3

Tubo de espesor a



Se aprecia que para valores de $\left(\frac{a}{p}\right) \leq 1$ y tubos delgados $\left(\frac{a}{D}\right) \leq 0,1$ el valor de F_3 presenta un máximo que dará lugar a un máximo en la potencia transmitida a la carga. Una expresión suficientemente aproximada de F_3 es la siguiente:

$$F_3 = \frac{\left(\frac{a}{p}\right)^3}{\left(\frac{a}{p}\right)^3 + 4 \cdot \mu_r^2 \cdot \left(\frac{a}{D}\right)^2} \quad (1.20)$$

Que da lugar a un máximo de valor:

$$\left(F_3\right)_{m\acute{a}x} = \frac{D}{4 \cdot \mu_r^2 \cdot p} \quad (1.21)$$

El equipo óptimo lo podemos plantear de dos formas:

- Cual es la frecuencia óptima de calentamiento de un tubo de unas determinadas dimensiones. Resulta:

$$f = 8,8 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{p}{a \cdot D} \text{ (Hz)} \quad (1.22)$$

- Cuando el espesor óptimo de un crisol de grafito u otro material para fusión de metales férricos o para actuar de susceptor magnético, calentando un producto no conductor de la corriente eléctrica, situando en su interior (típico de algunos hornos de vacío). Resulta:

$$a = 2 \cdot \mu_r \cdot \frac{p^2}{D} \quad (1.23)$$

Si el material del interior del crisol es conductor y el espesor a resulta inferior a la profundidad de penetración, se introducirá por inducción un calentamiento, tanto del crisol como de la carga, lo que reduce el gradiente térmico entre ambos y permite aplicar una mayor potencia inducida.

1.5.8 Rendimiento Del Calentamiento Por Inducción.

El rendimiento eléctrico es la relación entre la potencia transmitida a la carga y la potencia total consumida en las bornas del inductor, es decir:

$$\eta_e = \frac{p_2}{p_1 + p_2} = \frac{1}{1 + p_1/p_2} \quad (1.24)$$

Donde:

p_2 = potencia transmitida a la carga

p_1 = potencia perdida por efecto Joule en el inductor.

Si la resistencia eléctrica del inductor es R_1 y la intensidad que circula I_1 resulta:

$$P_1 = I_1^2 \cdot R_1 \quad (1.25)$$

Para aumentar el rendimiento interesa reducir P_1 lo que supone disminuir al máximo el valor de R_1 (utilizar un material buen conductor de la corriente eléctrica, por ejemplo, cobre electrolítico desoxidado, para que la resistividad sea mínima, y dar a las espiras del inductor la máxima sección posible).

La altura de cada espira viene limitada por la altura disponible del inductor en la relación a la carga y el número de espiras requerido. A este respecto se suele considerar un factor de llenado del inductor que tiene en cuenta el

espesor de aislamiento entre espiras. Si el espesor de una espira (en sentido axial es e) el factor de llenado será:

$$K = \frac{n_1 \cdot e}{h} \quad (1.26)$$

Donde n_1 es el número de espiras del inductor.

Sustituyendo el valor de P_2 de la expresión (2.14) en la formula 2.20 resulta:

$$\eta_e = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{p_1}{p \cdot \mu_r} \cdot \frac{1}{F_1 \cdot F_2 \cdot K} \cdot \frac{C_1}{C_2} \cdot \frac{h_1}{h_2}}} \quad (1.27)$$

Donde:

p_1 = resistividad del material del inductor. Para cobre electrolítico de alta conductividad vale $1,72 \cdot 10^{-8} \cdot \Omega \cdot m$,

p = resistividad de la carga. Un análisis para diferentes materiales se verá en el apartado 2.3.1,

F_1 = factor de corrección por el diámetro o espesor de la carga,

F_2 = factor de corrección por las dimensiones relativas de inductor y carga,

K = factor de llenado del inductor por el aislamiento de las espiras,

C_1 y C_2 = perímetros respectivos de inductor y carga. Cuando ambos son circulares, evidentemente, $C_1/C_2 = D_1/D_2$,

h_1 y h_2 = alturas o longitudes respectivas de inductor y carga,

μ_r = permeabilidad relativa de la carga.

El valor de μ_r es 1 para los materiales no magnéticos. Incluso para el acero magnético $\mu_r = 1$ por encima del punto de Curie, como ya se ha indicado anteriormente. Se puede determinar μ_r en los materiales magnéticos mediante la expresión aproximada

$$\mu_r \approx \frac{1,3 \cdot B_s}{\mu_0 \cdot H} \quad (1.28)$$

Donde:

B_s = campo saturante es Tesla ($\approx 2,2$ T para el acero a 20° C)

μ_0 = permeabilidad del vacío ($4 \pi \cdot 10^{-7}$).

H = campo magnético ($n_1 \cdot I_1 / h$ en la que n_1 = número de espiras, I_1 = intensidad, h = altura del inductor).

La relativa complicación de la formula del rendimiento, permite deducir unas consecuencias claras de diseño para conseguir su optimización:

1. interesa que p_1 sea mínima lo que se aconseja construir el inductor con perfil de cobre electrolítico de alta conductividad. Además, como la resistividad del cobre aumenta sensiblemente con la temperatura (31,4 por 100 de 20 a 100° C), es importante refrigerar fuertemente el inductor para mantener baja su temperatura. (Normalmente se disipan las pérdidas por efecto Joule en el inductor mediante un sistema completo de refrigeración por agua en circuito cerrado).
2. El factor F_1 debe mantenerse en un valor razonable (mínimo 0,7) lo que exige una relación D_2/p adecuadamente. Sin embargo, como ya hemos indicado anteriormente, disminuir excesivamente el valor de p a base de aumentar la frecuencia puede presentar dificultades, por ejemplo, en fusión, por aplicarse la potencia transmitida a la carga en una capa superficial muy reducida. Por el contrario, es lo adecuado el calentamiento para tratamientos térmicos. En resumen, es

fundamental, para una aplicación dada, fijar la frecuencia mínima por debajo de la cual el rendimiento eléctrico sería excesivamente bajo.

3. El acoplamiento entre inductor y carga debe ser lo mejor posible por la influencia en el factor F_2 y en la relación C_1/C_2 . Esto es posible en calentamiento por inducción para deformación plástica (el aislamiento del inductor es pequeño), pero difícil en hornos de fusión, ya que, por la temperatura del baño, se precisa un revestimiento refractario de espesor adecuado (80-200 mm).
4. El perfil de cobre del inductor debe ser elegido adecuadamente teniendo en cuenta la frecuencia elegida. El efecto pelicular o Kelvin también se presenta en el inductor con una penetración de la corriente de valor (en cobre de alta conductividad a 70° C: $p_1 = 2,06 \times 10^{-8} \Omega.m$) para una frecuencia $f = 50\text{Hz}$:

$$p_1 = 5033 \cdot \sqrt{\frac{p}{\mu \cdot f}} = 5033 \cdot \sqrt{\frac{2,06 \cdot 10^{-8}}{1 \cdot 50}} = 10,2\text{mm} \quad (1.29)$$

Si el espesor radial del inductor es superior o del mismo orden de la profundidad de penetración de la corriente, la resistencia eléctrica se calculará por la fórmula normal teniendo en cuenta la sección útil en cada espira. Por el contrario, si la profundidad de la penetración es netamente inferior al espesor radial útil del inductor, la corriente se concentra en la superficie interior del inductor, la corriente se concentra en la superficie interior del inductor y la sección utilizada para el cálculo de la resistencia debe ser el producto de la altura de la espira por la profundidad de penetración. Desde un punto de vista eléctrico, es ineficaz aumentar el espesor del inductor.

5. Una permeabilidad magnética elevada afecta al rendimiento de dos formas:

- Directamente, como $\sqrt{\mu_r}$, aumentando el rendimiento;
- Indirectamente, al disminuir la profundidad de penetración en la carga y aumentar el valor de F_1 .

Para el acero, hasta el punto de Curie, μ_r , varia entre 20 y 100 y p es mucho mayor que p_1 por lo que el rendimiento eléctrico es muy elevado (superior al 80 por 100). Por encima del punto Curie $\mu_r = 1$, pero p sigue siendo mayor que p_1 y se obtiene un rendimiento eléctrico del orden del 70-80 por 100.

Para calentamiento de cobre a 20° C el rendimiento es del 50 por 100, pero aumenta sensiblemente con la temperatura.

Como indicación del rendimiento eléctrico en equipos normales de calentamiento por inducción se señalan las siguientes cifras:

Acero magnético hasta 700-750° C.....	90 por 100.
Acero amagnético.....	70-75 por 100.
Aluminio.....	50 por 100.
Cobre.....	45 por 100.

Para cada aplicación concreta se pueden trazar gráficos que muestren el rendimiento eléctrico en función de la variable que mas interese manteniendo las demás.

En las figuras 11 y 12 se muestran dos de tales gráficos.

Figura 11. Rendimiento Eléctrico

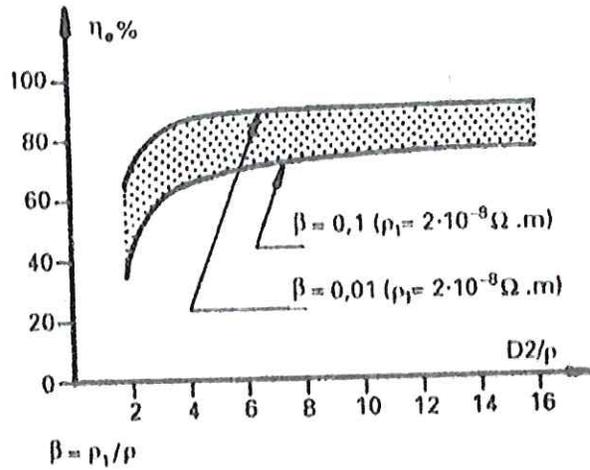
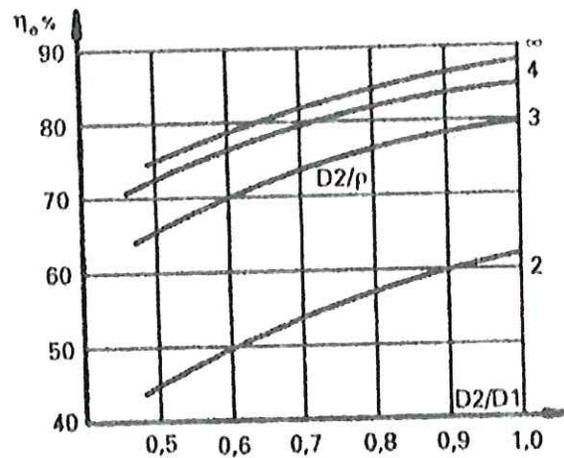


Figura 12. Rendimiento Eléctrico para Calentadores de Aceros



1.5.9 Factor De Potencia.

Aunque en los hornos de canal para fusión y mantenimiento de metales, el factor de potencia es superior a 0,5 es notablemente inferior en los hornos de crisol y los equipos de tratamientos térmicos e intermedio en los calentadores para deformación plástica. En general, en los equipos sin núcleo magnético varía entre 0,08 y 0,40 en función de la carga, el acoplamiento entre el inductor y carga y la frecuencia. En todo caso, se dispone una batería de condensadores de corrección del factor de potencia hasta un valor 1.

Una formula general del factor de potencia es:

$$\cos \varphi = \frac{P_1 + P_2}{(Q_e + Q_2)^2 + (P_1 + P_2)^2} \quad (1.30)$$

- P_1 y P_2 son las potencias de pérdidas por efecto Joule en el primario o inductor y la transmitida a la carga o secundario.
- Q_e la potencia reactiva por el mal acoplamiento entre inductor o carga (denominada también por el entrehierro).
- Q_2 la potencia reactiva por la carga referida al primario.

Los valores de P_1 y P_2 han sido definidos y calculados anteriormente. El valor Q_e se obtiene por la formula:

$$Q_e = \frac{\mu_0 \cdot \pi^2 \cdot (D_1^2 - D_2^2) \cdot f \cdot n_1^2 \cdot I_1^2}{2 \cdot h} \quad (1.31)$$

Donde:

μ_0 = permeabilidad magnética al vacío = $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m.

Asimismo, Q_2 , se calcula por la formula:

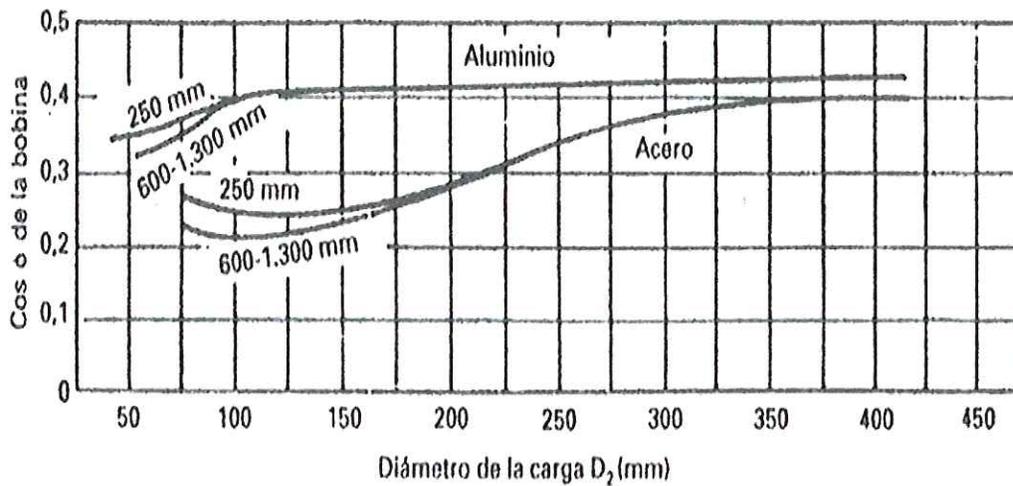
$$Q_2 = K \cdot \frac{\pi \cdot D_2 \cdot p \cdot n_1^2 \cdot I_1^2}{h \cdot p} \quad (1.32)$$

Donde K es un factor que depende de D_2/p . Unos valores típicos son:

D_2/p	0	0,75	1,50	2,0	3	4	5	6
K	0	0,25	0,60	1,0	1,10	1,05	1,01	1.

En la figura 13 se muestra el factor de potencia para calentadores de inducción de aluminio (20 a 540° C) y acero (760 a 1260° C) para diferentes longitudes de bobina, $f = 50$ Hz, $p(Al) = 6 \cdot 10^{-8} \Omega m$ y $p(Ac) = 115 \cdot 10^{-8} \Omega m$, $(D_1 = d_2)/2 = 25$ mm para Al y 60 mm para acero.

Figura 13. Factor de Potencia para Calentadores de Inducción



250, 600, 1.300 mm · longitudes de la bobina

1.6 TRANSMISIÓN DEL CALOR

1.6.1 Transferencia de calor:

Como se ha demostrado la frecuencia de la corriente empleada determina la profundidad de la capa calentada. Es pues, la frecuencia de trabajo, un factor importantísimo en el desarrollo de un proceso de calentamiento.

Obviamente en la práctica esto no sucede exactamente así, ya que se debe de tener en cuenta el tiempo durante el cual el calor está penetrando hacia el interior de la pieza por conducción, ya que el proceso de calentamiento no se realiza instantáneamente por lo que el tiempo que dura la aplicación el calor se transfiere:

Por radiación

Desde la pieza caliente al ambiente .Las perdidas por radiación son proporcionales a la cuarta potencia de la temperatura .Por esta razón, las perdidas por radiación son mas importantes en los procesos de forja (temperatura aprox. 1200°C), que en los de temple (aprox. 850°C).

Por convección

Las corrientes de aire se llevan parte del calor e las piezas .No son demasiado importantes en aplicaciones de calentamiento por inducción.

Por conducción

A través del propio material de la pieza. Aumentan con la conductividad térmica del material .En consecuencia serán más importantes en materiales buenos conductores del calor como el aluminio o el cobre.

Pero sobre todo aumenta con el tiempo de calentamiento .Si queremos una capa calentada muy delgada tendremos que calentar en un tiempo muy corto (gran densidad de potencia).Si por el contrario necesitamos un calentamiento homogéneo y profundo, tendremos que tener la pieza mas tiempo en el inductor, como es el caso de la forja.

Por tanto la selección de la frecuencia de trabajo viene influenciada no solamente por la profundidad de penetración de las corrientes, sino también por el tiempo durante el cual las piezas están calentándose.

Prácticamente, la frecuencia de trabajo para el calentamiento de piezas de acero debe estar situada en la gama comprendida entre:

$$f_{\max} = \frac{3,6 \times 10^7}{d^2}$$
$$f_{\min} = \frac{5,8 \times 10^6}{d^2} \quad (1.33)$$

Siendo:

- (d) el diámetro de la pieza (en mm).
- (f) la frecuencia (en Hz).

Es importante reseñar, aunque brevemente, las características diferenciales del calentamiento por inducción, que hace que sea un procedimiento ventajoso en las aplicaciones que se describen más adelante.

El calor generado por inducción en la carga, bien en el anillo secundario o canal en los hornos de este tipo, bien en la periferia de la carga en los calentadores de masa y en los equipos de tratamientos térmicos, se transmite al resto de la carga por inducción en los sólidos y por convección

en los líquidos, produciéndose además pérdidas por radiación y convección al ambiente y por conducción a través del revestimiento del horno o aislamiento refractario de la bobina. Se trata de analizar la transmisión de calor en la carga y valorar las diferentes pérdidas de calor.

1.6.2 Transmisión de calor en la carga.

En los hornos de fusión de crisol el calor es inducido en la carga, eleva su temperatura, provocando, en un tiempo relativamente corto, su fusión en la periferia. Como consecuencia de las fuerzas electromagnéticas que se originan se produce un movimiento del metal fundido que provoca la introducción del metal sólido en el baño, dando lugar finalmente a un baño fundido con una temperatura prácticamente uniforme.

En los equipos de tratamientos térmicos por inducción, sobre todo en el caso más frecuente de temple, se utiliza una fuerte potencia específica superficial y una frecuencia adecuada, de modo que se calienta durante el proceso una capa superficial hasta la temperatura de temple, no dando tiempo a la transmisión de calor por conducción al resto de la carga.

Por el contrario, en los calentadores de inducción para deformación plástica es necesario conseguir una cierta uniformidad de temperatura en la carga no siendo admisible sobrepasar un gradiente de temperatura entre la superficie y la parte central de la carga. Dado que el calor se genera en la periferia (el 86 por 100 dentro de la profundidad de penetración definida en el apartado 2.1), se requiere un tiempo para que el calor se difunda por conducción en la carga.

En transmisión del calor por conducción se demuestra que la magnitud característica básica de la carga es la difusividad térmica:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \left(m^2/s \right) \quad (1.34)$$

Donde:

λ = Conductividad térmica del material (W/mK),

p = Densidad de la carga (Kg/m³),

c = Calor específico (kJ/Kg . K).

La densidad y el calor específico varían poco con la temperatura, pero la conductividad tiene una gran variación. Es normal utilizar números adimensionales en los cálculos y en los gráficos. El de tiempo se define para un cilindro por:

$$t = \frac{a \cdot t}{R^2} \quad (1.35)$$

Denominado número de Fourier F_0 , donde:

a = difusividad térmica en m^2/s ,

t = el tiempo (s),

R = el radio de cilindro en m.

En la figura 14 se muestra el calentamiento típico a lo largo del tiempo de un redondo de metal no férnico (no afectado por el punto de Curie) con las temperatura de la superficie, del centro y del punto mas caliente (ligeramente dentro del redondo). Se aprecian claramente tres periodos:

1. El inicial t_i de transmisión, en el que la temperatura sube rápidamente en la superficie y lentamente en el centro.
2. El siguiente t_p de elevación permanente en toda la masa del redondo que termina con la desconexión del equipo.
3. El final t_e de empapado en que tienden a igualarse las temperaturas en todo el redondo.

En los materiales magnéticos debe tenerse en cuenta la influencia de la permeabilidad en la profundidad de penetración. Para una frecuencia determinada dicha profundidad p es muy pequeña, el calentamiento se concentra en la superficie, que aumenta rápidamente su temperatura hasta llegar al punto de Curie, a partir del cual p es mucho mayor y disminuye la velocidad de calentamiento, tal como se muestra en la figura 15 las temperaturas superficial, del centro y del radio medio. Se señalan también la evolución de la potencia y la intensidad de la corriente en el inductor.

Figura 14. Calentamiento de redondeo no Férrico

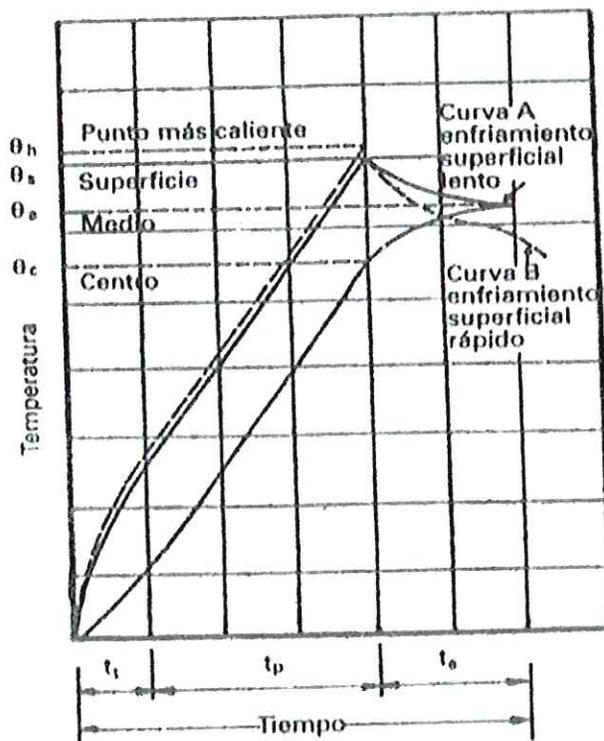
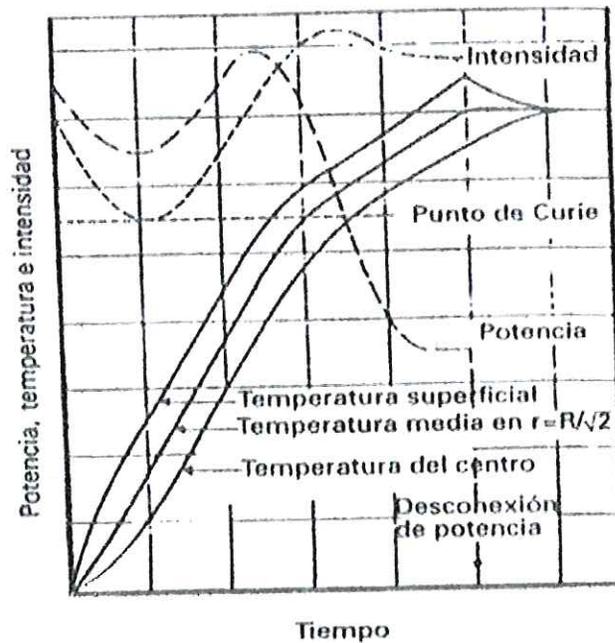


Figura 15. Calentamiento de redondeo Magnético



La diferencia de temperatura entre centro y superficie puede ser muy grande al principio del calentamiento. En la figura 16 se representa la evolución de la temperatura en un redondo de acero de 90mm de diámetro, sometido a un campo magnético de 90 kA/m y frecuencia 1.090 Hz. Al cabo de 40 segundos la diferencia es de 500° C, reduciéndose a 125° C al cabo de 228 s por la disminución de la potencia transmitida a la carga. En la parte derecha de la figura se muestra la igualación de la temperatura con el tiempo después de desconectar el equipo.

Expresando la temperatura a partir de la magnitud de tiempo adicional $t \geq 0,25$ se obtiene como expresión general de la temperatura:

$$\theta = \frac{P_c \cdot R}{\lambda} \cdot \left(2t + \frac{r^2}{2R^2} - \frac{1}{4} \right) \quad (1.36)$$

La temperatura en la superficie será:

$$\theta_s = \frac{P_c \cdot R}{\lambda} \cdot \left(2t + \frac{1}{4} \right) \quad (1.37)$$

Figura 16. Evolución de Temperatura en un Redondo

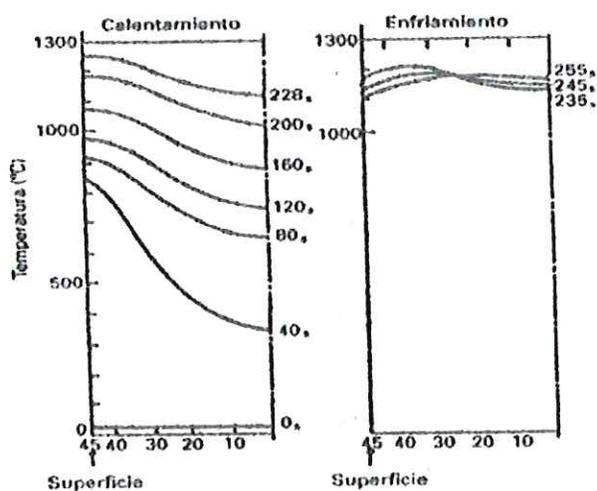
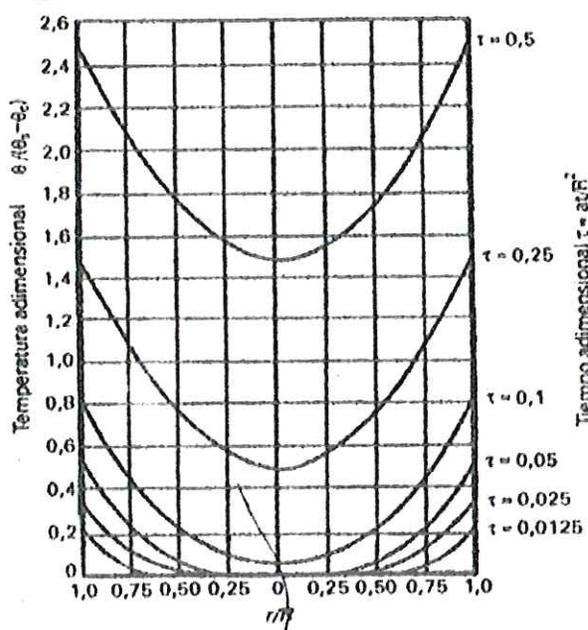


Figura 17. Representación Adimensional



Asimismo, la temperatura en el centro será:

$$\theta_c = \frac{P_c \cdot R}{\lambda} \left(2t - \frac{1}{4} \right) \quad (1.38)$$

Y operando:

$$\theta_s - \theta_c = \frac{P_c \cdot R}{2\lambda} \quad (1.39)$$

$$\frac{\theta}{\theta_s - \theta_c} = \left(4t - \frac{1}{2} \right) + \frac{r^2}{R^2} \quad (1.40)$$

Distribución parabólica que se muestra en la figura 17, siendo la abscisa r/R y el parámetro $at/R^2 = F_0$. La expresión 2.33 permite calcular la diferencia de temperatura $(\theta_s - \theta_c)$ que se mantiene constante a partir de $t = 0,25$ para un valor fijo de P_c y un valor medio de λ .

En lo que antecede se ha supuesto que la potencia P_c se generaba en la superficie del redondo. Realmente, P_c se genera en todo el radio R pero concentrada al 86 por 100 en la profundidad de penetración p . La figura 18 muestra la relación entre:

$$\frac{(\theta_s - \theta_c)_{real}}{(\theta_s - \theta_c)_{ideal}} \quad (1.41)$$

Figura 18. Relación de la Temperatura Real/Ideal

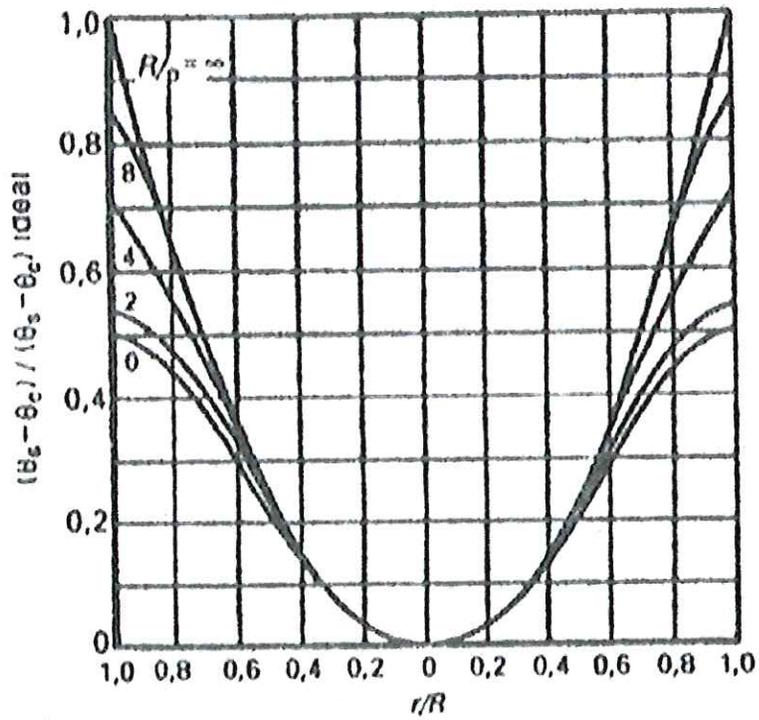
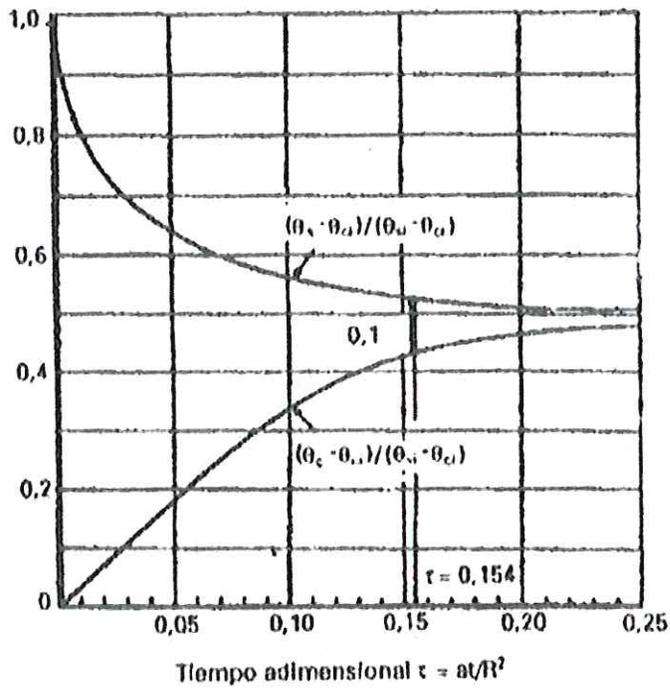


Figura 19. Variación de la Temperatura Durante el Empapado



Siendo $(\theta_s - \theta_c)$ ideal el calculado anteriormente. La relación indicada se expresa en función de diferentes valores de R/p . Naturalmente, para $R/p = \infty$ se obtiene la curva ideal anterior.

Una vez desconectado el equipo de inducción, se inicia el periodo de igualación de la temperatura. A partir de temperatura entre superficie y centro en ese instante $(\theta_s - \theta_c)_i$, se determinan las temperaturas en el centro y la superficie mediante la figura 19, considerando despreciables las pérdidas por radiación. La diferencia inicial antes citada se reduce 10 por 100 para $t = 0,154$, es decir, para un tiempo t dado por la expresión:

$$t = 0,154 \cdot \frac{R^2}{a} (s) \quad (1.41)$$

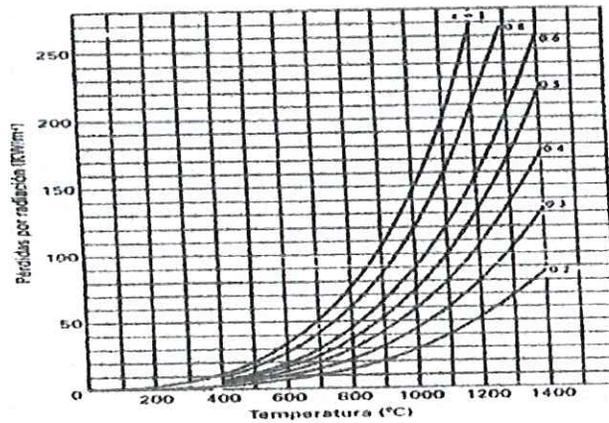
1.6.2 Pérdidas de calor por radiación

Las pérdidas por radiación tienen escasa importancia en los equipos de calentamiento por inducción, sobre todo en los tratamientos térmicos, pero deben tenerse en cuenta en los balances energéticos finales.

En los calentadores de inducción se producen unas pérdidas por radiación por la boca de salida que se calculan en la figura 20 para un ambiente a 20° C. corresponden a la expresión:

$$P_r = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot e [T_s^4 - T_a^4] (w/m^2) \quad (1.42)$$

Figura 20. Perdidas por Radiación



Donde:

e = emisividad superficial de la carga,

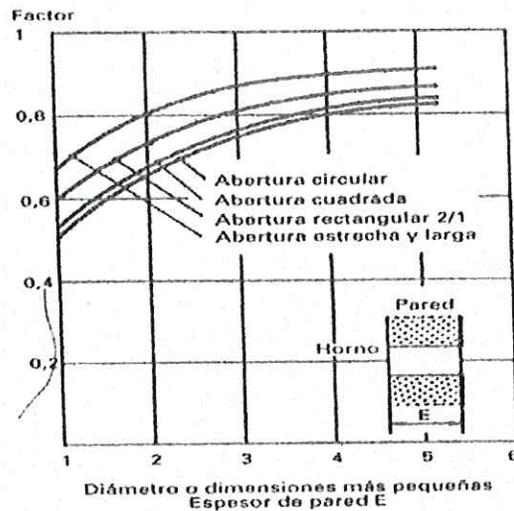
T_s = temperatura superficial en K ,

T_a = temperatura ambiente en K .

Como valores de e pueden tomarse: 0,8 para acero, 0,5 para cobre y latón y 0,3 para aluminio oxidado.

En los hornos de fusión sin tapa (figura 22), se reproduce una radiación del baño que corresponde a $e = 1$, pero que debe corregirse por la relación del diámetro del crisol d_2 a la distancia de la boca al nivel del baño E , según la figura 21.

Figura 21. Factor de Correccion



1.6.3 Pérdidas de calor por convección.

Cuando una pieza calentada por inducción pasa al aire ambiente, además de las pérdidas por radiación antes calculadas, se producen unas pérdidas por convección natural que pueden calcularse por las expresiones (α = coeficiente por convección, P_c = pérdidas de calor por convección):

- para un redondo horizontal de diámetro $D(m)$:

$$\alpha = 1,31 \cdot (\Delta\theta / D)^{0,25} (W / m^2 K) \quad (1.43)$$

$$P_c = 1,31 \cdot (\Delta\theta / d)^{0,25} \cdot \Delta\theta (W / m^2) \quad (1.44)$$

- para una superficie horizontal hacia arriba, típica en los hornos de fusión:

$$\alpha = 2,49 \cdot (\Delta\theta)^{0,25} (W / m^2 K) \quad (1.45)$$

$$P_e = 2,49 \cdot (\Delta\theta)^{0,25} (W/m^2) \quad (1.46)$$

Donde $\Delta\theta$ es la diferencia de temperatura entre la superficie y el aire ambiente.

1.6.4 Pérdidas De Calor Por Inducción

Se presentan, sobre todo, en los hornos de fusión a través del revestimiento refractario, desde el interior del crisol hasta la bobina de cobre refrigerada por agua (ver figura 2.18). Si el revestimiento esta compuesto de dos capas de espesores e_1 y e_2 y conductividades térmicas λ_1 y λ_2 , el coeficiente de transmisión total K (asimilando a una pared cilíndrica por ser normalmente pequeños e_1 y e_2 respecto al diámetro del crisol D) será:

$$\frac{1}{K} = \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} \quad (1.47)$$

Y las pérdidas de calor por conducción:

$$P_p = K \cdot (\theta_c - \theta_b) (W/m^2) \quad (1.48)$$

Donde:

θ_c = Temperatura del baño o carga.

θ_b = Temperatura de la bobina.

Cuando el baño esta cubierto por la capa las pérdidas de calor a su través se calculan a partir de un coeficiente de transmisión total:

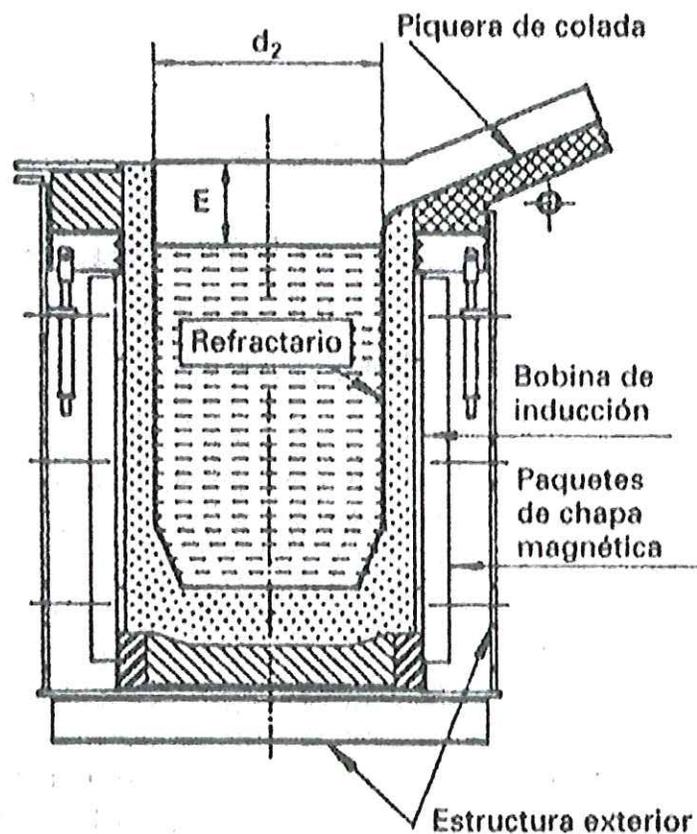
$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_e} \quad (1.49)$$

Donde:

α_1 y α_e = coeficientes combinados por radiación y convección en el interior y el exterior, respectivamente.

$$P_c = K \cdot (\theta_c - \theta_a) \quad (1.50)$$

Figura 22. Esquema de un Horno de Inducción



Donde

P_c = Pérdidas de calor por inducción,

θ_a = Temperatura ambiente exterior.

1.6.5 Pérdidas Por El Agua De Refrigeración.

El agua se utiliza ampliamente en los equipos de calentamiento por inducción para refrigeración de muchos elementos (bobinas, placas exteriores, caldererías sometidas a campos magnéticos, fondos de los hornos, cables flexibles, inductores de temple, etc.), circulando normalmente por el interior de tubos de sección circular, rectangular o combinada.

El calor absorbido por el tubo pasa al agua por convección estableciéndose un balance térmico:

$$P_a = G_a \cdot C_a \cdot \Delta\theta \quad (\text{kW}) \quad (1.51)$$

Donde:

P_a = pérdidas de calor al agua de refrigeración,

G_a = Gasto o caudal de agua en kg/s,

C_a = Calor específico del agua en kJ/kg · K,

$\Delta\theta$ = Elevación de temperatura del agua en K.

Debe conducir con

$$P_a = \alpha \cdot S \cdot (\theta_{tm} - \theta_{am}) \quad (\text{kW}) \quad (1.52)$$

Donde:

α = Coeficiente por convección del tubo de agua (W/m²K),

S = Superficie interior del tubo (m²),

θ_{tm} = Temperatura media de la superficie interior del tubo,

θ_{am} = Temperatura media del agua.

El valor de α puede obtenerse de la expresión:

$$N_u = 0,023 \cdot R_e^{0,8} \cdot P_r^{0,4} \quad (1.53)$$

Donde:

$N_u =$ Número de Nusselt = $\alpha \cdot D / \lambda_f$.

$\alpha =$ coeficiente por convección,

$D =$ Diámetro interior del tubo,

$\lambda_f =$ Conductividad térmica del agua.

$R =$ Número de Reynolds = $V \cdot D / \nu$.

$V =$ Velocidad del agua,

$\nu =$ Viscosidad cinemática del agua.

$P_r =$ Número de Prandtl = ν / a .

$a =$ Difusividad térmica del agua.

Las propiedades del fluido, variables con la temperatura, deben tomarse a la temperatura media característica θ_c :

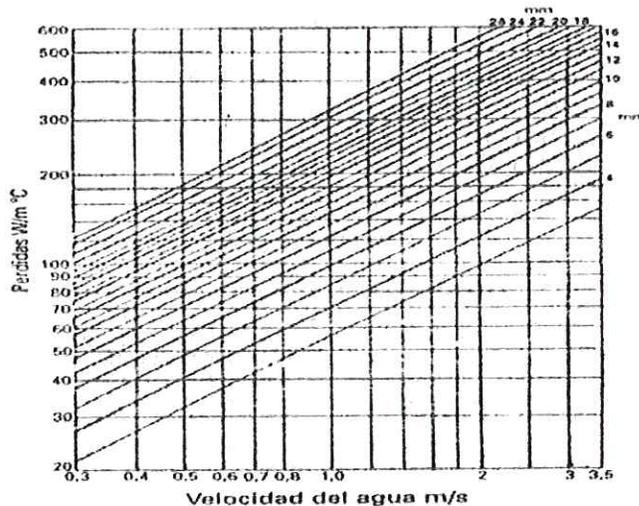
$$\theta_c = \frac{\theta_{tm} + \theta_{am}}{2} \quad (1.54)$$

Siendo θ_{tm} y θ_{am} las temperaturas de la superficie del tubo y del agua.

En la figura 23 se determina el coeficiente de transmisión del calor, referido a m de longitud del tubo, en función de la velocidad del agua y el diámetro interior del tubo, para una temperatura $\theta_c = 20^\circ \text{C}$. Para otras temperaturas características debe aplicarse un factor de corrección:

$$f = 0,84 + 0,008\theta_c \quad (1.55)$$

Figura 23. Pérdidas por calor por el agua de refrigeración



En el caso de bobinas o inductores el valor de P_a calor que debe evacuarse por el agua, comprende las pérdidas por efecto Joule ($I_1^2 R_1$) y las pérdidas por conducción a través del aislamiento.

1.7 Consideraciones De Ingeniería Electrónica

1.7.1 Comparativa De Tecnologías.

Antes de iniciar el estudio y diseño de nuestro sistema es necesario introducirnos en el campo del control industrial y estudiar las distintas alternativas que podemos tomar para cumplir con éxito nuestros objetivos.

Teniendo presentes las necesidades ya expuestas, que impulsan al desarrollo del sistema de control objeto de este proyecto, y atendiendo igualmente a las limitaciones impuestas, se encuentran el siguiente grupo de alternativas, del que se elegirá la más adecuada o la combinación de ellas que mejor cumpla las funciones exigidas.

Las alternativas existentes pueden agruparse básicamente en tres bloques:

1.- Tecnología mecánica.

2.- Tecnología cableada que nos ofrece a su vez diferentes opciones:

- neumática.
- fluídica.
- eléctrica, con dos alternativas:
 - relés.
 - electrónica estática.

3.- Tecnología programada:

- microcontroladores.
- autómeta programable.

1.7.2 Factores Exigidos.

Para el desarrollo del sistema de control y automatización expuesto anteriormente, se deben de satisfacer las siguientes necesidades:

- Permitir el inicio del ciclo automático sólo cuando se cumplan todas las condiciones necesarias, es decir, cuando la máquina esté en las condiciones mecánicas y eléctricas adecuadas para el correcto inicio del ciclo del funcionamiento de la maquina.
- Permitir poder parar el proceso inmediatamente cuando sea necesario.
- Permitir poder accionar manualmente determinados elementos.

- Poder iniciar el ciclo, con la posibilidad de realizarlo con calentamiento o sin calentamiento.
- Fácil mantenimiento.
- Posibilidad de introducir cambios en la estructura del proceso.
- Posibilidad de modificar los parámetros del proceso.
- Permitir la detección de errores de funcionamiento, su señalización, causa y solución.

1.7.3 Alternativas.

En este apartado indicaremos las ventajas e inconvenientes de las tecnologías anteriormente mencionadas, para justificar así la decisión tomada para este proyecto.

1.7.3.1 tecnología Mecánica

Técnica basada en transmisiones mecánicas y obtención de funciones elementales (temporizaciones, regulaciones,...) a partir de elementos mecánicos. Es una técnica que no puede responder a todas las exigencias manifestadas para este sistema, está muy limitada en cuanto a funciones de control y necesitaría un mantenimiento elevado.

Sin entrar en más profundidades se detecta que esta solución es inviable para el sistema de control, por lo que queda desechada.

1.7.3.2. Tecnología Cableada.

Este sistema de automatización, totalmente neumático sería inviable debido a:

1) La complejidad, así como la cantidad de variables que forman las funciones de control, harían necesario un sistema muy voluminoso, muy costoso (debido a que los elementos de actuación y control neumáticos son más caros que los equivalentes eléctricos y son necesarios en gran cantidad) y con grandes posibilidades de fallos en el funcionamiento, dada la gran cantidad de conexiones necesarias.

2) Hay funciones que inexcusablemente deben ser eléctricas.

En lo referente a la valoración de los factores a tener en cuenta, hay que distinguir entre emplear la neumática para efectuar el control o para ejecutar acciones.

1.7.3.3 Para El Control.

La velocidad de respuesta es menor que la de un sistema electrónico, lo que se agrava debido a la gran cantidad de variables que entran en la materialización de las funciones de control. Este retraso en la respuesta, provoca una disminución de la productividad debido a los retrasos producidos en la toma de decisiones.

Es un sistema rígido, puesto que las funciones son implementadas por interconexión, mediante tubos de transporte de aire comprimido, de válvulas y accionadores neumáticos, lo que hace que la introducción de una modificación de cualquier tipo, requiera el cambio de elementos del circuito neumático.

No permite la detección y la visualización de errores de funcionamiento, así como tampoco realizar una comunicación operario-máquina más allá de órdenes a través de pulsadores, que por otra parte serían muy numerosos y voluminosos.

Por todo esto, la técnica neumática no es adecuada para las funciones de control del automatismo.

1.7.3.4 Como Accionador.

La técnica neumática permite la mecanización de una actividad, es decir la sustitución de la potencia muscular del hombre, por una potencia proveniente de una fuente exterior de energía, a la que se gobierna con débiles esfuerzos.

Los accionadores neumáticos aventajan a los eléctricos en circunstancias en que se precisen movimientos lineales rápidos, sin gran importancia en la posición de inicio y final de recorrido, que deban desarrollarse de una forma uniforme. Así como cuando se requieran fijar elementos a través de mecanismos de sujeción, ya que el cilindro neumático actúa sobre el mecanismo de sujeción rápidamente y de una manera firme, sin padecer desgaste de transmisiones, husillos, ni engranajes que necesitarían una fijación por motor eléctrico.

Luego los accionadores neumáticos, ofrecen la ventaja sobre los eléctricos de facilitar los movimientos lineales, al evitar la necesidad de transmisiones mecánicas del tipo: rodamientos, engranajes, piñones de módulo cónico, reenvíos de ángulo, de realizar el avance con rapidez, de hacerlo uniforme, disminuir los costes de accionamientos mecánicos y no complicar el mantenimiento. Sin embargo no serán adecuados para posicionarse con

exactitud en un punto determinado, para lo cual es preferible utilizar un motor eléctrico dadas las mejores posibilidades de control que ofrece.

De todo esto se llega a la conclusión que estos accionamientos son adecuados para algunas partes del proceso.

1.7.3.5 Tecnología Cableada Fluídica.

En esta tecnología no existen partes móviles, por que tienen mayor rapidez de respuesta que los sistemas neumáticos convencionales. Sin embargo son mucho más lentos (500 Hz frente a MHz) que los sistemas electrónicos.

En su aplicación combinada con elementos neumáticos, tienen el inconveniente de precisar distinta presión (del orden de 0,2 bar. frente a 310 bar de los actuadores neumáticos) lo que hace necesario el obtener dos presiones de aire comprimido, que en el caso de la fluídica debe ser además filtrado y seco.

Por otra parte, no puede materializar todas las funciones de control y diálogo exigidas y en el caso de que las que pudiera desarrollar ocuparían un gran volumen, serían complejas y por tanto propensas a fallos de funcionamiento. En general, valen las mismas consideraciones expuestas en el párrafo dedicado al control mediante tecnología neumática convencional.

Tecnología cableada eléctrica.

Se pueden implementar sistemas de control y accionamiento a base de relés o con elementos de electrónica estática.

Los sistemas eléctricos aportan las siguientes ventajas frente a los sistemas de control neumáticos:

- Gran vida útil.

- Sistemas menos voluminosos, debido al menor tamaño de los componentes.

- Mayor velocidad de respuesta, por eliminar desplazamientos de partes móviles e inercias mecánicas.

- Menores costes de mantenimiento, debido a los gastos que originan los desgastes mecánicos de los elementos neumáticos.

- Más económicos, ya que para implementar una función con los mismos componentes, estos resultan más baratos individualmente para un sistema eléctrico que para un sistema neumático.

- Mayores posibilidades de control, debido a la existencia de multitud de funciones implementadas en componentes eléctricos, que no pueden conseguirse con elementos neumáticos.

- Mayor sencillez de los sistemas, debido a la existencia de componentes con funciones combinadas (temporizadores, reguladores de magnitudes eléctricas, contadores, comparadores).

Por otra parte, los sistemas de control eléctrico se encuentran en desventaja sobre los neumáticos en los siguientes puntos:

- Vulnerables a fallos debidos a interferencias eléctricas, muy normales en ambiente industrial, con lo que hay que prever los circuitos de protección frente a interferencias.

- En las situaciones en que son más adecuados los actuadores neumáticos (cilindros neumáticos) que los eléctricos (motores eléctricos), el sistema se ve obligado a incluir elementos de adaptación del tipo electroválvulas. De todas formas es más sencillo atacar a un cilindro a partir de una señal eléctrica de control, que atacar a un motor eléctrico a partir de una función de control neumático.

- Los elementos eléctricos producen una disipación de calor que puede ser perjudicial incluso para ellos mismo.

- Los equipos eléctricos están limitados a funcionar en condiciones ambientales determinadas.

Además de estas desventajas frente a los neumáticos, los sistemas de control mediante tecnología cableada eléctrica presentan las siguientes desventajas frente a otros sistemas:

- El cableado es un sistema muy poco flexible.

- Pueden haber fallos de precisión, debido a que estamos interconectando elementos con diferentes valores reales de tensiones y corrientes de activación.

- Se generan retrasos acumulados al atacar elementos de conmutación a otros elementos.

- Se pueden conseguir sistemas menos complejos a través de técnicas de programación.

1.7.3.6 Cableado Eléctrico A Relés.

Las ventajas que puede presentar el cableado a base de relés frente al cableado de elementos de electrónica estática son las siguientes:

- Simplicidad de circuitos de disparo y bloqueo.
- No incorpora niveles de tensión y corrientes residuales.
- Los técnicos de mantenimiento de la mayoría de las empresas, están mas familiarizados con los relés, que con los elementos de electrónica estática, por lo que los costes del personal de mantenimiento son menores, ya que pueden hacerse con personal menos cualificado.
- Posibilidad de trabajar en corriente continua o alterna.
- Más económicos que los elementos estáticos equivalentes.
- Posibilidad de obtener varios contactos NA o NC en un solo elemento y controlado por la misma señal.
- Aislamiento eléctrico entre los equipos de control y los de potencia.
- Mayor capacidad para soportar condiciones de trabajo adversas.

Los inconvenientes que presenta el cableado por relés son:

- Menos posibilidades de control, limitándose a trabajar con control todo/nada.

- Mayores posibilidades de fallos de los contactos mecánicos del relé, ya sean por defecto de los contactos, por soldadura debida a sobrecalentamientos, pro carbonizarse...

- Tiene menos velocidad de respuesta.

- Inviabilidad de realizar controles, en los que se requiera un gran intercambio de información debido a su baja frecuencia de trabajo.

- Complejidad para implementar sistemas con abundantes variables.

1.7.3.7 Cableado Con Elementos De Electrónica Estática.

Ventajas que pueden ofrecer un sistema cableado a base de elementos de electrónica estática.

- Grandes posibilidades de control, debido a la gran cantidad de funciones incorporadas en elementos comerciales. Por tanto, cualquier tipo de control que deseemos efectuar va a poder ser viable a partir de estos elementos.

- Mayor rapidez de respuesta que el relé.

- Válido para trabajar en ambientes con peligro de explosión, debido a que no produce chispas en la conmutación.

- Menores costos de mantenimiento, debido a que no se producen desgastes de contactos, con lo que la duración de estos elementos es mayor.

- Posibilidad de modificar el tipo de señal eléctrica existente.

Inconvenientes que presenta el cableado con electrónica estática:

- En OFF presentan una corriente residual y en ON presentan una caída de potencial residual.

- Mayor complejidad en los circuitos de disparo y bloqueo.

- Necesidad de trabajar con tensión continua de bajo valor, al menos para el circuito de control, con lo que al trabajar con pequeños valores de c.c., es mas fácil que se introduzcan interferencias que falseen los niveles del circuito de control.

- Montajes más caros debido al mayor precio de los interruptores estáticos.

- Menor capacidad para soportar sobretensiones y sobreintensidades.

En el siguiente cuadro resumen posemos ver una comparativa entre tecnología cableada a relees y el cableado a elementos de lógica estática

Tabla 5. Cuadro Comparativo

CARACTERÍSTICAS	RELÉS	ELEMENTOS DE LÓGICA ESTÁTICA
Simplicidad circuitos de disparo	SI	NO
Niveles de tensiones y corrientes residuales	NO	SI

Varios contactos de un elemento controlados por una sola señal	Si, posibilidad de contactos NA o NC	NO
Soporta condiciones de trabajo adversas	SI	No, se ven afectados por sobretensión/sobreintensidad
Tipo de control	Control todo/nada	Cualquier tipo de control
Posibilidad de fallo	Alta, ya que tiene contactos mecánicos	Baja
Velocidad de respuesta	Baja	Alta
Frecuencia de trabajo	Baja	Alta
Costes elementos	Bajos	Altos
Coste personal mantenimiento	Bajo	Alto, ya que se requiere personal cualificado
Coste mantenimiento	Altos, debido a desgastes mecánicos	Bajos, ya que no tiene contactos de conmutación
Posibilidad de cambiar el tipo de señal eléctrica existente	NO	SI

1.5.3.8 Tecnología Programada

La tecnología programada nos ofrece un método distinto para obtener las funciones de control de un sistema.

Todo el conjunto de relés, temporizadores y demás funciones auxiliares de un automatismo eléctrico pueden sustituirse por un sistema programable. El sistema programable está formado por una unidad central o procesador que, se encarga de crear y controlar el flujo de datos a partir de las instrucciones recibidas en la memoria. En esta parte de la memoria, se encuentra almacenado el programa, cuya ejecución implementa las funciones deseadas. En otra zona de la memoria y en registros auxiliares se encuentran las variables, y los datos que entran a formar parte en la ejecución del programa.

Por último se encuentran las unidades de entrada y salida, con las que el programa se ejecuta tomando datos y dando órdenes. Los módulos de entrada adaptan la tensión de los captadores al nivel necesario de la unidad de control y a su vez los módulos de salida adaptan las señales de salida a niveles que pueden actuar sobre los accionadores.

Las **ventajas** que ofrece un sistema programable frente a uno cableado son:

- Posibilidad de trabajo de cálculo y gestión de datos, por lo que permite desarrollar cualquier tipo de función y trabajar con mayor precisión.

- Debido a la existencia de memoria es posible la implementación de funciones combinatorias y secuenciales sin necesidad de cableado, con lo que se ahorra espacio, se simplifica el desarrollo de funciones y se obtiene un sistema flexible, pues se pueden variar las funciones de control con sólo variar el software.

- Mayor velocidad de respuesta (ejecución de instrucciones en segundos y mili segundos).

- Preparado para tomar decisiones en función de múltiples variables.
- Gran facilidad para implementar funciones por software, para las que de otra forma habría que utilizar uno ó varios componentes para cada una de ellas.
- Permite la comunicación entre el operario y el sistema.

Los **inconvenientes** que presenta un sistema programable son los siguientes:

- Necesidad de circuitos de adaptación de nivel para los sistemas de entrada y salida.
- Coste inicial mayor.
- Mayor sensibilidad, lo que los hace más vulnerables a fallos ocasionados por trabajar en ambiente industrial debido a los parásitos e interferencias que se generan por la conmutación de grandes potencias inductivas.

1.7.3.9 Microcontroladores

Los microcontroladores son sistemas integrados cuyas características principales son las siguientes:

- Una estructura de sistema integrada que resulta atractiva en aquellos campos en donde sea necesario un grado de alta integración.

- Una gran capacidad para atender a interrupciones en cuanto a rapidez y gestión de prioridades.

- Arquitectura dotada de multiprocesamiento (donde la CPU principal se encarga de la supervisión de los microcontroladores esclavos que tratan las operaciones de bajo nivel).

- Controladores de periféricos adaptados para aplicaciones específicas y cada vez más inteligentes para aliviar las tareas de más bajo nivel de la CPU.

- Memoria RAM y ROM interna de gran capacidad y facilidad para implementarla exteriormente.

- Versiones de bajo consumo para aplicaciones especiales.

- Protección de los programas internos a prueba de intrusismo.

- Inmunidad al ruido eléctrico.

Los microcontroladores se utilizan actualmente para resolver problemas planteados en el control de diversos campos:

- En informática como controlador de periféricos, como pueden ser impresoras, plotters, terminales, unidades de disco, teclados, comunicaciones, etc.

- En la industria de electrodomésticos: para control de calefacciones, lavadoras, lavavajillas, cocinas eléctricas, etc.

- En la industria del automóvil: para control del motor, ordenador de ruta, alarmas, regulador del servofreno, dosificador, etc.

- En la industria de la imagen y sonido :para control de la imagen y sonido, magnetófonos, control de motores de arrastre de giradiscos, vídeo, etc.

- En la industria en general:

Regulación: Todas las familias de microcontroladores incorporan algún miembro con convertidores A/D y D/A para la regulación de la velocidad de máquinas, de los niveles de temperatura.

Automatismos: La enorme cantidad de entradas y salidas y el procesado booleano hacen que sea muy valioso para el control secuencial de procesos.

Robótica: Para control de motores y captura de señales de los diferentes sensores.

- En medicina, aplicaciones militares, edificios inteligentes, etc.

Sin embargo a pesar de todas las características anteriormente citadas hay que decir que existen limitaciones en cuanto a velocidad, capacidad de memoria, set de instrucciones, etc..., que en nuestro caso repercuten negativamente desde el punto de vista técnico.

Además hay que tener en cuenta que la programación y mantenimiento de los microcontroladores exige personal informático especializado, no tratándose por tanto de la mejor elección para esta aplicación, ya que la máquina en cuestión debe poder ser manejada por personal de mantenimiento no especializado.

1.8 Automatas Programables Industriales (Api).

El autómata programable industrial es un equipo electrónico programable en lenguaje no informático, diseñado para controlar en tiempo real y ambiente industrial procesos secuenciales.

El autómata programable es un sistema construido por dos elementos básicos:

- La unidad central de proceso, junto a la memoria.
- El sistema de entradas y salidas.

Con estos elementos y la fuente de alimentación el sistema ya es operativo pero además existen otros componentes periféricos (como equipos de programación unidades de diálogo y de test, impresoras, visualizadores,...) que agrandan el campo de actuación del autómata.

Las ventajas que ofrece un control mediante el autómata programable industrial frente a uno con lógica cableada son:

- La bifurcación autómata-proceso no necesita más que una lista de asignación de entradas y salidas (variables lógicas y tecnológica).

- El autómata programable es independiente del proceso siendo fácilmente reutilizable.

- Presenta una gran flexibilidad de aplicación y adaptación.

- Su compacidad da lugar a una economía de espacio y a una mayor fiabilidad.

- Los gastos de estudio, programación, de prueba y puesta en funcionamiento son en general, y para los sistemas simples, reducidos porque permite la simulación del proceso.

- El mantenimiento preventivo y curativo de los sistemas se simplifica.

- La concepción de entradas y salidas (modularidad, variedad) está adaptado a las condiciones industriales.

- El autómata programable industrial es favorable a los tratamientos evolucionados: cálculos numéricos, regulación, toma de decisiones, etc.

- Está bien adaptado a la vigilancia en la línea de funcionamiento de la ley de mando: visualización de entradas y salidas, tratamientos lógicos, etc.

- Facilita la documentación de las aplicaciones y por tanto de su mantenimiento.

- Su funcionamiento sincrónico (en ciclo) elimina las "barreras críticas".

- Sus posibilidades de comunicación son interesantes para construir sistemas jerarquizados o distribuidos.

- Los API de seguridad o arquitecturas equivalentes permiten ajustar la disponibilidad del sistema a sus necesidades.

- Es manipulable por personal de cualificación media.

Los inconvenientes que presenta este sistema frente a la lógica cableada son los siguientes:

- El API no suprime todos los relés.

- Su velocidad puede resultar insuficiente en algunos casos.

- Necesita una inversión inicial elevada y, por lo tanto, no es rentable para problemas muy pequeños.

- Aunque no deja de ser válida la calificación y organización de estos equipos introduce nuevos métodos de trabajo, la noción de programa puede causar reticencias.

- La elección de una máquina necesita un estudio preliminar de los equipos y, por lo tanto la creación de una competencia en nivel de decisión.

Por otra parte las ventajas que ofrece el API frente al microcontrolador son las siguientes:

- El autómata programable está adaptado al ambiente industrial en particular. Ausencia de memoria masiva en el funcionamiento normal, lo que aumenta la fiabilidad del sistema y permite un ambiente difícil y severo.

- El constructor maximiza la disponibilidad del autómata programable por la adecuación de la tecnología de concepción a las necesidades y limitaciones del automatismo.

- Las arquitecturas multiprocesadores, duales o de seguridad, permiten adaptar el sistema a las necesidades y limitaciones del automatismo.

- Las facilidades de comunicación y principalmente las redes locales industriales sitúan al autómata al nivel del microprocesador para la realización de conjuntos distribuidos o jerarquizados.

- La consola de explotación (color y gráfico) favorece la representación de fenómenos estándar del usuario (en los mismos términos de su aplicación), y facilitando así la vigilancia, el paso de consigna, la reanudación (total o parcial) del pilotaje o control, y la gestión técnica del conjunto automatizado.

- La variedad, modularidad, calidad de las entradas y salidas industriales, satisfacen la gran mayoría de las necesidades y en particular, las medidas y las acciones a distancia.

- La separación física de las funciones de desarrollo de puesta a punto y de test de las funciones de ejecución de las aplicaciones, simplifica la utilización del sistema y optimiza la gestión interna de la máquina.

- Además, el funcionamiento cíclico elimina casi en su totalidad el tiempo máquina necesario para su gestión correcta (salvo en las arquitecturas de seguridad o de multiprocesador).

- No es necesario recurrir a los conceptos informáticos para la utilización corriente de los autómatas programables: programación, organización de tareas.

- El autómata programable es una máquina lenguaje: es utilizable por el técnico de software o de automática.

- El coste total de una aplicación es a priori favorable al Autómata Programable Industrial.

Las desventajas de los autómatas programables industriales frente al los microcontroladores son:

- El desarrollo cíclico de los programas puede resultar un factor de complejidad y limitar las posibilidades de organización de las tareas.

- La prestación de velocidad puede no ser muy satisfactoria en caso de incidente.

- Los cálculos numéricos son más abordables en las generaciones actuales de los API, pero a veces aún son difíciles y, en principio están menos adaptados que los microcontroladores.

- Las máquinas (multiprocesadores) multilenguaje son una solución para la observación precedente, pero introducen simultáneamente una cierta complejidad de aplicación que requiere competencias que se aproximan más a las del informático.

- Los lenguajes informáticos empleados en perspectiva no parecen los mejor adaptados a las necesidades y limitaciones de la aplicación.

Tabla 6. Cuadro Comparativo Entre A.P.I. Y Microcontrolador.

CARACTERÍSTICAS	A.P.I.	MICROCONTROLADOR
Adaptación al ambiente industrial	Alta	Baja
Facilidad de comunicación mediante redes locales	SI	SI
Funcionamiento Cíclico	Si, aunque puede resultar complejo a veces	NO
Posibilidad de realizar medidas y acciones a distancia	SI	NO

Separación entre funciones de desarrollo y de ejecución	SI	NO
Conocimiento de lenguajes informáticos	NO	SI
Complejidad	Si, debido a su funcionamiento cíclico	No, ya que su funcionamiento no es cíclico
Velocidad	Menor que en los microcontroladores	Mayor que en los autómatas
Cálculos numéricos	Complejos	Sencillos

A la vista de esta argumentación, se observa que el autómata programable no constituye simplemente otra manera de presentar las soluciones existentes, sino que realiza una misión importante entre el cableado lógico y la microinformática, ofreciendo:

- Una notable adaptación al ambiente industrial.
- Un concepto de máquina lenguaje.
- La separación de las funciones de producción y ejecución de los programas (consola, unidad central, etc.)
- Un nuevo método en tiempo real para su funcionamiento síncrono

Ventajas y limitaciones

Como consecuencia de sus características principales, las **ventajas** del calentamiento por inducción pueden resumirse en:

- El calor se genera en la propia pieza metálica. El elemento que transmite el calor (el inductor) está frío.
- La inercia térmica de los equipos es muy reducida.
- Se puede controlar y localizar el calor en zonas exactas de la pieza sin afectar al resto de la pieza.
- El proceso es repetitivo y fácilmente controlable.
- Se controla el desarrollo del proceso mientras se produce, en lugar de una verificación posterior del resultado.
- Flexibilidad de trabajo, pudiendo variarse fácilmente tiempos, temperaturas, potencias, caudales, etc...
- El procedimiento es muy fiable y especialmente indicado para series largas o medias.
- Las tolerancias en temperatura y perfil de temple que se obtiene son muy estrechas.
- Mejor calidad de la superficie tratada.
- Disponibilidad inmediata. No hay pérdidas si se interrumpe el funcionamiento.
- Mejor utilización de los materiales. Pocas pérdidas de material al fuego.
- Mayor rendimiento energético y por lo tanto, menor consumo.

- Posibilidad de introducir la unidad de calentamiento en la cadena de producción.
- Es posible realizar una automatización total del proceso.
- Es un proceso muy indicado para procesos continuos de trabajo.
- Mejora las condiciones ambientales de trabajo.
- La potencia específica (KW / m o KW / m^3) es muy alta, con lo que los tiempos de calentamiento son muy cortos.

Como consecuencia de sus características principales, las **limitaciones** del calentamiento por inducción pueden resumirse en:

- La inversión económica es normalmente mas elevada que en un horno convencional.
- No es adecuado para series de piezas cortas. Hay que hacer un inductor para cada modelo de pieza.

1.9 DISEÑO METODOLOGICO

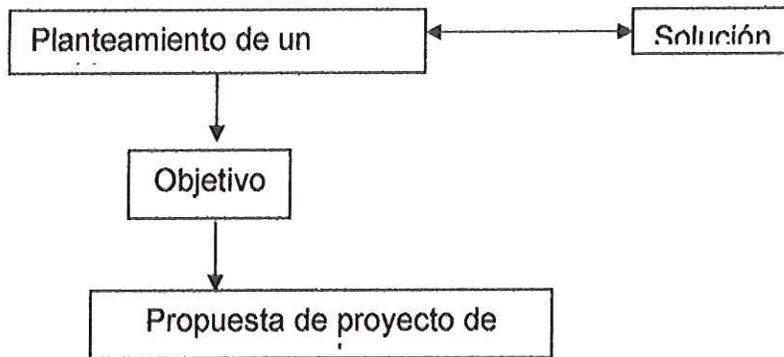
El presente proyecto de investigación será desarrollado en las siguientes fases:

1. Recolección de la información necesaria para el desarrollo y ejecución de la misma. Las principales fuentes de información serán: Internet, Bibliotecas UIS, UNAB e ICP.
2. Selección de la forma geométrica, tamaño y dimensiones de las bobinas o espiras a utilizar: En esta etapa de la investigación se determinaran las dimensiones, forma y tamaño de las espiras utilizadas para realizar el temple por inducción.
3. Selección de los equipos (generador de potencia, reóstatos, termocuplas, sistema de almacenamiento de la probeta de temple): Se determinaran los equipos necesarios para la construcción del sistema de temple por inducción, estos parámetros debe estar en función del tipo de materiales y dimensiones de los materiales a templar.
4. Diseño estructural del sistema de temple por inducción: En esta etapa de la investigación se diseñará el sistema estructural, entendiéndose por esto, se construirán los planos del sistema de temple, el sistema de avance de los inductores, y el sistema de enfriamiento.
5. Diseño del sistema de automatización, control y adquisición de datos en el sistema:
6. Construcción del sistema de temple por inducción:
7. Calibración del sistema de control, medición de temperatura, combinación frecuencia, voltaje-amperaje

2. PROPUESTA DE DISEÑO MECATRONICO

A continuación se muestra las etapas iniciales a la formulación de este trabajo:

Figura 24. Etapas preliminares para la formulación del proyecto.



Después del proceso de definición de los objetivos del proyecto, se procedió al desarrollo del mismo, para esto se tuvo en cuenta tres aspectos principalmente:

1. Cumplimiento de los objetivos.
2. Metodología de desarrollo del proyecto (en este aspecto se tiene el diseño mecatrónico del prototipo, es decir, se consideran el diseño mecánico, electrónico, ergonómico del prototipo a desarrollar).
3. Pruebas experimentales al prototipo.

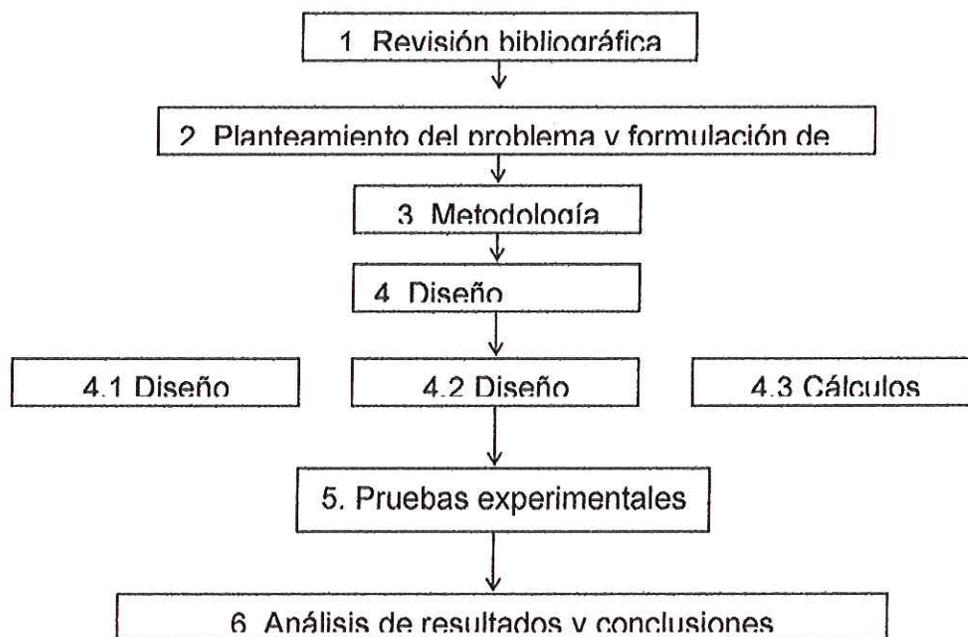
A continuación los aspectos 2 y 3 se van a llamar diseño mecatronico, y aquí se incluyen las consideraciones de diseño mecánico - electrónico, cálculos realizados, y pruebas desarrolladas.

2.1 DISEÑO MECATRONICO

Para desarrollar este diseño mecatronico se parte de la necesidad de diseñar y construir un equipo que cumpla con la función específica de calentar piezas metálicas de geometría cilíndrica hasta su rango de austenización, para posteriormente enfriarla rápidamente con el fin de obtener un material con alta dureza y con esfuerzos de compresión en la superficie, estas características en servicio aumentan considerablemente el comportamiento a la fatiga y la resistencia al desgaste.

En la siguiente figura se muestra un diagrama que muestra las etapas que se tuvieron en cuenta para el desarrollo del trabajo.

Figura 25. Etapas de desarrollo del trabajo.



2.1.1 DISEÑO MECÁNICO

Consideraciones iniciales:

En cuanto al diseño mecánico del prototipo de temple inicialmente se tenía que determinar la forma de ubicar el sistema de temple (vertical u horizontal), cada una de las ubicaciones anteriores ofrecía ventajas y desventajas que en la siguiente tabla se muestra:

Tabla 7. Ventajas y desventajas de la ubicación del sistema de temple.

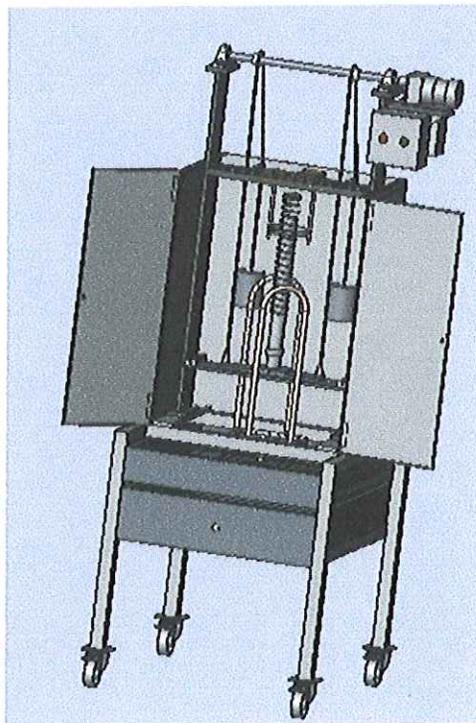
Ubicación	Ventajas	Desventajas
Vertical	<ul style="list-style-type: none">❖ Se le puede dar diferentes diámetros a la pieza.❖ No se tiene ningún perjuicio por vapores emitidos por el material témplate❖ Se mas practica en reducción de espacio.	<ul style="list-style-type: none">❖ Es muy limitado en sentido de longitud porque puede alcanzar hasta 40 cm.
Horizontal	<ul style="list-style-type: none">❖ Se le pueda dar para mayor longitud de la pieza se puede decir que de metros	<ul style="list-style-type: none">❖ Perjuicio por vapores emitidos por la parte de enfriamiento o material témplate❖ No es practica por el espacio que ocupa❖ El diámetro y tamaños pequeños no se puede templear.

		de pieza a temprar es estándar
--	--	--------------------------------

Finalmente, para el cumplimiento de los objetivos y la eficiencia del proceso de temple se opto por una ubicación vertical del sistema de temple.

Con base en la ubicación vertical del sistema de temple se diseño la estructura del prototipo de temple, en la siguiente figura 24 se muestra una representación de la estructura del prototipo.

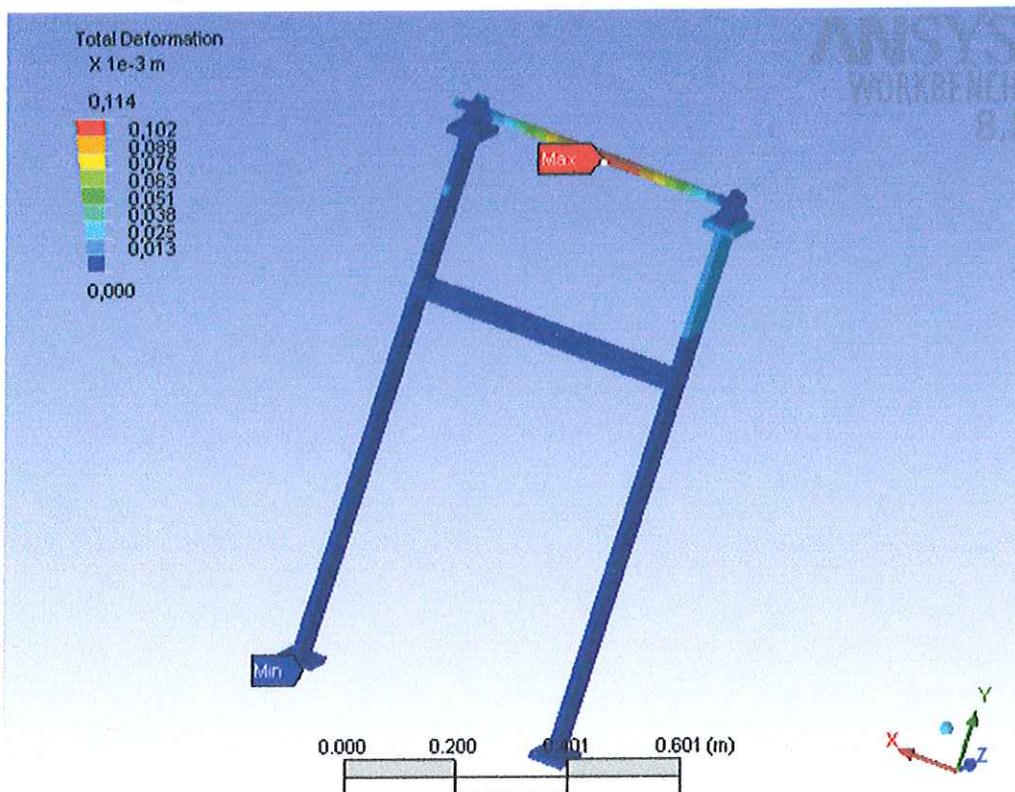
Figura 26. Estructura del prototipo de máquina.



A continuación se muestran los resultados del proceso de simulación de esfuerzos y deformaciones realizado mediante el software ANSYS 8.0.

En esta sección presentará los datos obtenidos a partir del análisis de esfuerzos y deformaciones obtenidas mediante el software ANSYS WORKBENCH 8.1. En la siguiente figura se muestra el perfil de deformaciones dados sobre la estructura de la maquina. De esta figura se puede observar que los niveles mas altos de deformación se inducirán sobre el eje que sirve para transportar el sistema de temple.

Figura 27. Perfil de deformaciones sobre la estructura.



2.1.1 Primer Escenario

Para el desarrollo del modelo se tuvieron en cuenta las siguientes condiciones:

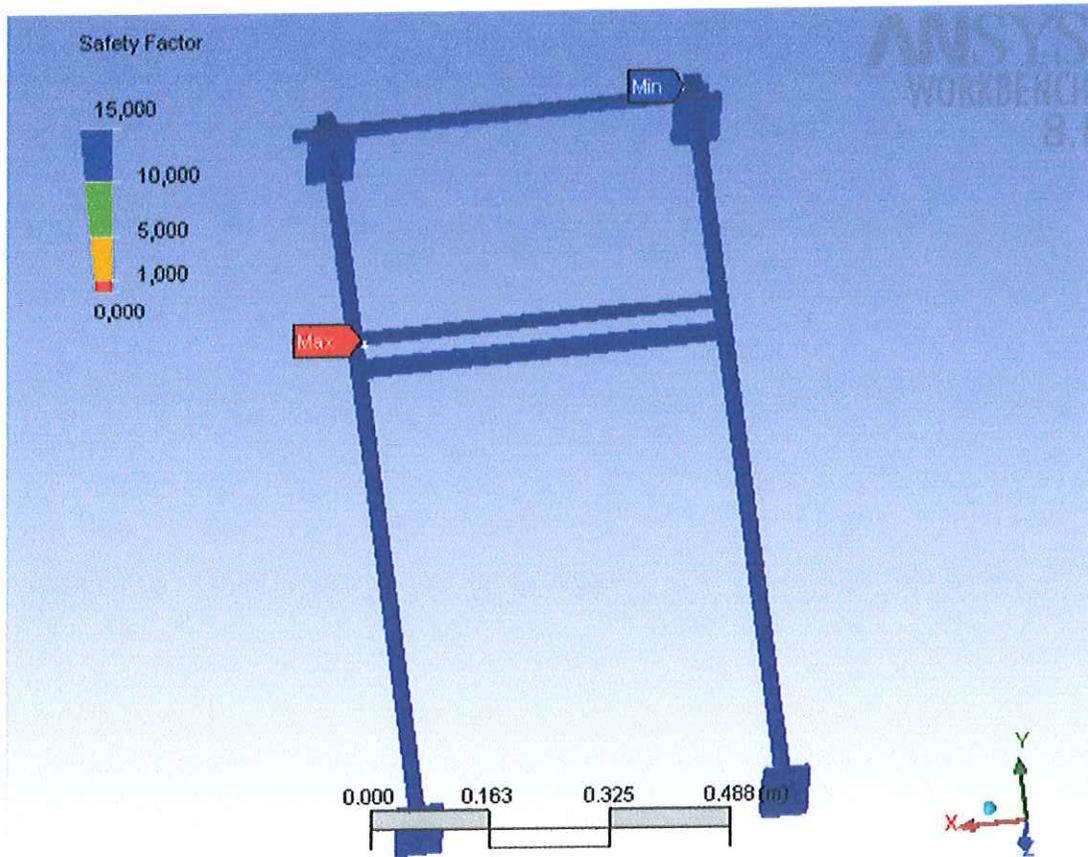
- La unidad de simulación para todos los cuerpos posicionados en el modelo tiene como dimensiones: 0.58 x 1.08 x 0.13 m a lo largo de los ejes X, Y, y Z respectivamente.
- El modelo tiene una masa total de 26.53 Kg.
- El modelo tiene un volumen de 3.38×10^{-3} Kg.

Tabla 8. Analisis de deformaciones y Factor de Seguridad

Nombre	Material	Bounding Box (m)	Masa (kg)	Volumen (m³)	Nodos	Elementos
"angulo de 19.05x 3.18x512.75-1"	"Structural Steel"	0.51, 1.91×10^{-2} , 1.91×10^{-2}	0.44	5.57×10^{-5}	1428	673
"eje-1"	"Structural Steel"	0.56, 2.02×10^{-2} , 2.02×10^{-2}	1.2	1.53×10^{-4}	1664	806
"chumacera de 17-2@SY_17_TF_PART3-4"	"Structural Steel"	6.75×10^{-3} , 9.53×10^{-3} , 9.53×10^{-3}	1.26×10^{-3}	1.61×10^{-7}	426	234
"chumacera de 17-2@SY_17_TF_PART3-5"	"Structural Steel"	6.75×10^{-3} , 6.74×10^{-3} , 6.74×10^{-3}	1.26×10^{-3}	1.61×10^{-7}	426	234
"chumacera de 17-2@SY_17_TF_PART3-3"	"Structural Steel"	6.75×10^{-3} , 9.53×10^{-3} , 9.53×10^{-3}	1.26×10^{-3}	1.61×10^{-7}	426	234
"chumacera de 17-2@SY_17_TF_PART3-2"	"Structural Steel"	6.75×10^{-3} , 9.53×10^{-3} , 9.53×10^{-3}	1.26×10^{-3}	1.61×10^{-7}	426	234
"chumacera de 17-2@SY_17_TF_PART2-1"	"Structural Steel"	2.74×10^{-2} , 3.99×10^{-2} , 4.0×10^{-2}	0.09	1.11×10^{-5}	33747	19070
"chumacera de 17-2@SY_17_TF_PART3-1"	"Structural Steel"	6.75×10^{-3} , 9.53×10^{-3} , 9.53×10^{-3}	1.26×10^{-3}	1.61×10^{-7}	426	234
"chumacera de 17-2@SY_17_TF_PART3-8"	"Structural Steel"	6.75×10^{-3} , 6.74×10^{-3} , 6.74×10^{-3}	1.26×10^{-3}	1.61×10^{-7}	426	234
"chumacera de 17-2@SY_17_TF_PART1-1"	"Structural Steel"	3.2×10^{-2} , 5.79×10^{-2} , 0.13	0.55	7.0×10^{-5}	9034	5215
"chumacera de 17-2@SY_17_TF_PART3-7"	"Structural Steel"	6.75×10^{-3} , 6.74×10^{-3} , 6.74×10^{-3}	1.26×10^{-3}	1.61×10^{-7}	426	234
"chumacera de 17-2@SY_17_TF_PART3-6"	"Structural Steel"	6.75×10^{-3} , 6.74×10^{-3} , 6.74×10^{-3}	1.26×10^{-3}	1.61×10^{-7}	426	234
"chumacera de 17-1@SY_17_TF_PART3-4"	"Structural Steel"	6.75×10^{-3} , 9.53×10^{-3} , 9.53×10^{-3}	1.26×10^{-3}	1.61×10^{-7}	426	234
"chumacera de 17-1@SY_17_TF_PART3-5"	"Structural Steel"	6.75×10^{-3} , 6.74×10^{-3} , 6.74×10^{-3}	1.26×10^{-3}	1.61×10^{-7}	426	234
"chumacera de 17-1@SY_17_TF_PART3-3"	"Structural Steel"	6.75×10^{-3} , 9.53×10^{-3} , 9.53×10^{-3}	1.26×10^{-3}	1.61×10^{-7}	426	234
"chumacera de 17-1@SY_17_TF_PART3-2"	"Structural Steel"	6.75×10^{-3} , 9.53×10^{-3} , 9.53×10^{-3}	1.26×10^{-3}	1.61×10^{-7}	426	234
"chumacera de 17-1@SY_17_TF_PART2-1"	"Structural Steel"	2.74×10^{-2} , 3.99×10^{-2} , 4.0×10^{-2}	0.09	1.11×10^{-5}	33747	19070
"chumacera de 17-1@SY_17_TF_PART3-1"	"Structural Steel"	6.75×10^{-3} , 9.53×10^{-3} , 9.53×10^{-3}	1.26×10^{-3}	1.61×10^{-7}	426	234
"chumacera de 17-1@SY_17_TF_PART3-8"	"Structural Steel"	6.75×10^{-3} , 6.74×10^{-3} , 6.74×10^{-3}	1.26×10^{-3}	1.61×10^{-7}	426	234
"chumacera de 17-1@SY_17_TF_PART1-1"	"Structural Steel"	3.2×10^{-2} , 5.79×10^{-2} , 0.13	0.55	7.0×10^{-5}	9034	5215
"chumacera de 17-1@SY_17_TF_PART3-7"	"Structural Steel"	6.75×10^{-3} , 6.74×10^{-3} , 6.74×10^{-3}	1.26×10^{-3}	1.61×10^{-7}	426	234

"chumacera de 17-1@SY_17_TF_PART3-6"	"Structural Steel"	6.75×10^{-3} , 6.74×10^{-3} , 6.74×10^{-3}	1.26×10^{-3}	1.61×10^{-7}	426	234
"soportes-1"	"Structural Steel"	0.06, 1.02, 0.13	11.58	1.48×10^{-3}	1407	628
"soportes-2"	"Structural Steel"	0.06, 1.02, 0.13	11.58	1.48×10^{-3}	1407	628

Figura 28. Factor de Seguridad



2.1.2 Factor de potencia

Datos de entrada:

Masa a trasladar (P)= 100daN

Rendimiento mecanismo piñón (η)=0.95

Velocidad lineal (V) = 1m/s

Coefficiente de rozamiento (μ)=0.05

Aceleración (a)= 3m/s².

Coefficiente de seguridad preseleccionado (C) = 3

Aceleración de gravedad (g) = 9.81m/s².

Datos de salida:

Fuerza tangencial horizontal real (For)

$$For = \frac{P \cdot (g \cdot \mu + a)}{10}$$

$$For = \frac{100 \cdot (9.81 \cdot 0.05 + 3)}{10} = 34.905 daN$$

Fuerza tangencial horizontal virtual (Fov)

Fov= For.C

Fov= 34.905 · 3= 523.5 daN

En base a los diagramas de elección del modulo “DMD · DME”, se determina la tipología y la dimensión de la piñones necesaria según los materiales y los tratamientos disponibles.

Material seleccionado; material C45 UNI bonificado $R \geq 70Kg/mm^2$

Tipo de dentado: helicoidal $\beta = (19^{\circ}31'42'')$

Modelo elegido (m); 4

Fuerza tangencial declarada; ($\geq Fov$);561 daN

MATERIAL: UNI C45 Bonificado (UNE F114)

Suponiendo que tenemos un grupo motorreductor con las siguientes características:

Par sobre el piñón (M) = 100Nm

-numero revoluciones del piñón (n)=180 t.p.m

Se determina la dimensión del piñón a acoplar a la cremallera.

Diámetro primitivo corregido (dp)

$$dp = \frac{M \cdot 100 \cdot 2 \cdot \eta}{For}$$

$$dp = \frac{100 \cdot 2 \cdot 100 \cdot 0.95}{174.5} 108.88mm$$

Numero dientes piñón correspondiente (Z)

Z= 26 dientes

2.1.2 Diseño Electrónico

En esta sección se presentan los cálculos eléctricos, electrónicos, térmicos desarrollados especialmente en el sistema de conversión de energía eléctrica en energía térmica, los cálculos y consideraciones para la construcción de la fuente de potencia y el sistema de desplazamiento de la pieza a temprar.

2.1.2.1. Diseño De La Fuente De Potencia

Para poder diseñar la fuente de potencia se tuvo que tener en cuenta la el espesor de penetración de la corriente inducida y la calculamos con la ecuación (1.1) teniendo en cuenta

$$\mu = 1.25 \times 10^{-6}$$

$$f = 20 \text{Khz}$$

$$p = 0.8 \times 10^{-6}$$

$$p = \sqrt{\frac{0.8 \times 10^{-6} \Omega m}{\pi \times 20000 \times 1.25 \times 10^{-6}}} = 3.59 \times 10^{-3}$$

2.1.2.1.1. Potencia Transmitida A La Carga

Teniendo en cuenta la profundidad de penetración y se necesita saber que valor de resistencia eléctrica de la carga se determino por medio de la formula numero 1.9

$$R = 6.24 \times 10^{-3} * 0.4 \times 10^{-2} \sqrt{\frac{0.8 \times 20000 * 1.25 \times 10^{-6}}{0.1}} = 1.11 \times 10^{-5}$$

La Energía disipada en la carga se determino por la formula 1.10

$$p = 48^2 \times 1.11 \times 10^{-5} = 2 \times 10^{-2}$$

Campo magnetico

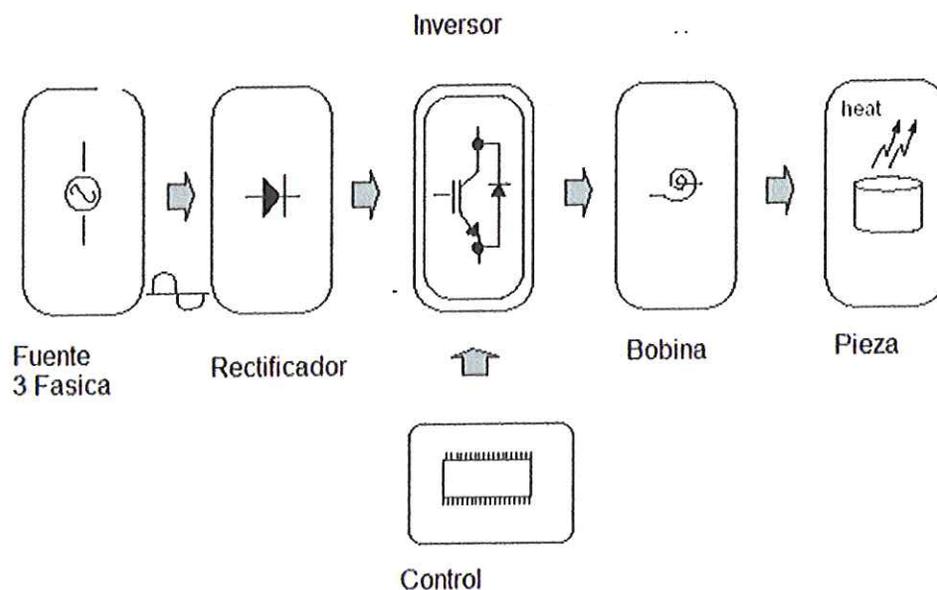
$$H_e = \frac{48.2_1}{4} = 24$$

El factor de potencia transmitida y sustituyendo de la formula 1.13

$$P_2 = 6,24 \cdot 10^{-3} \times .24^2 \times .0.04 \times 20 \cdot \sqrt{2 \times 10^{-2} \times 1_r} \times 20000 = 6W$$

2.1.2.2. Contruccion De La Fuente De Potencia

Figura 29. Diagrama de la Fuente.



2.1.2.2.1 Introducción A Los Inversores Resonantes

La función de un inversor consiste en la generación de una onda de tensión o de corriente alterna de una determinada magnitud y frecuencia a partir de una fuente de energía continua.

Su funcionamiento cae por tanto en el campo de la conversión CC-CA y sus aplicaciones son muy numerosas.

La presente lección se centrará en los inversores resonantes de alta frecuencia, y especialmente aquellos cuya fuente primaria de alimentación corresponde a una fuente de tensión. En estos inversores se genera una onda de tensión cuadrada o cuasi-cuadrada de alta frecuencia (por encima de 20kHz), que posteriormente es filtrada por medio de un circuito tanque resonante para obtener una onda de alta frecuencia con bajo contenido en armónicos. Finalmente esta onda es empleada para alimentar una determinada carga.

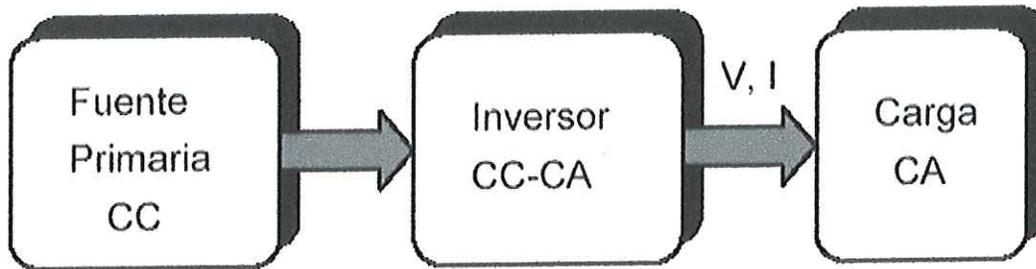
Esto es debido al amplio número de aplicaciones que han venido apareciendo en los últimos años para este tipo de convertidores de potencia. Entre ellas cabe destacar las siguientes:

- Ultrasonido
- Soldadura
- Procesos Electroestáticos

2.1.2.2.1.1 Parámetros Característicos De Un Inversor

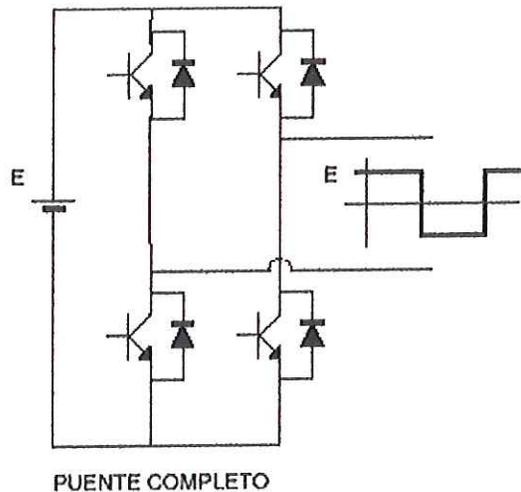
un inversor alimentando una carga genérica. El inversor se caracteriza básicamente por la calidad de su onda de salida, que en general puede ser una tensión o una corriente. Cuanto menor sea el contenido en armónicos de la onda de salida más próxima será ésta a una onda senoidal pura.

Figura 30. Diagrama de Bloques de la Fuente.



2.1.2.2.2 Diagrama Eléctrico De La Fuente

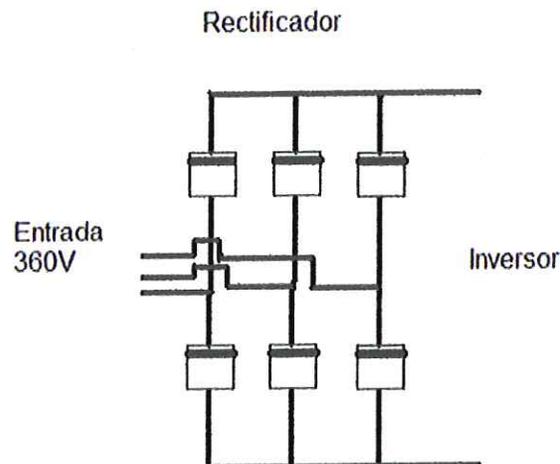
Figura 31. Inversor Puentes completo



Para el puente completo de rectificación se utilizó SCR nte5540 que maneja un voltaje de 800V y una corriente 55 Amp, actos para la fuente que se realizo porque se va a manejar una corriente de 48Amp y un voltaje de 340 Volteos Rms.

2.1.2.2.4. Circuito Electrico Del Rectificador

Figura 32. Rectificador Trifásico



2.2 El Sistema De Control

2.2.1 Microcontrolador PIC16F873

Para este proyecto, optamos por los microcontroladores PIC16F873 debido a que éstos poseen características afines a los sistemas electrónicos y de control necesarios para el desarrollo del modelo. Estas son:

- 40 pines a 8 Bits
- Captura de entradas
- Timer's

Otras fabricantes como Motorota ofrecen alternativas similares como el 68HC908JK1-JK3. Este parámetro fundamental en los sistemas de control de posición implementados en el proyecto. Por esta razón son insuficientes ante nuestros problemas de diseño. Además, microchip ofrece precios más asequibles que ATMEL y tiene una gama de instrucciones para realizar las

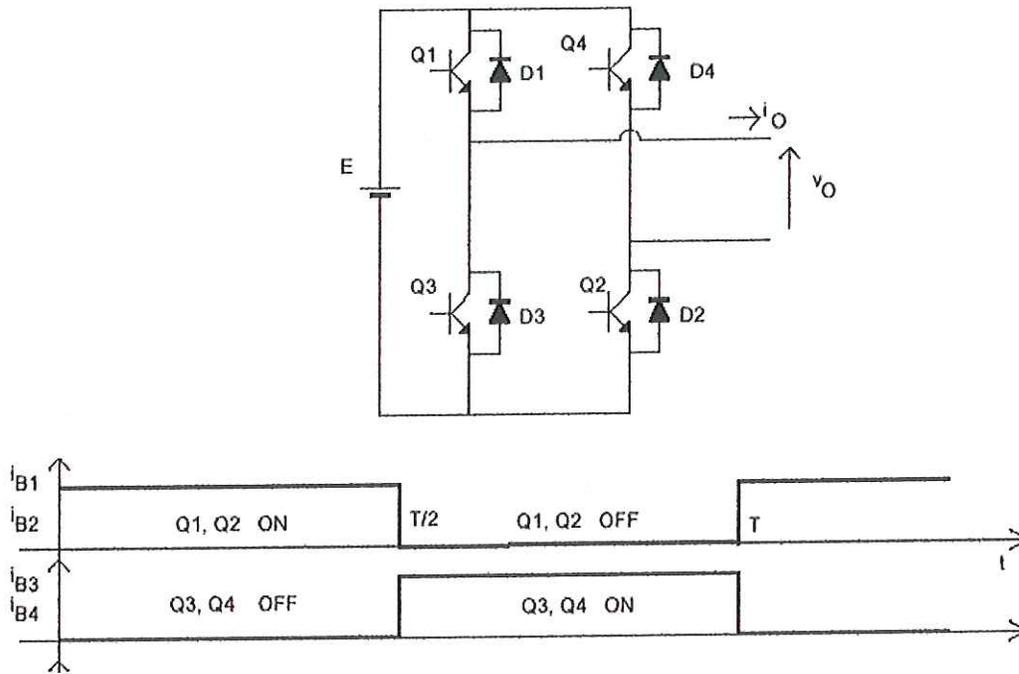
operaciones matemáticas básicas, las cuales no están contempladas por motorola.

Un microcontrolador es un circuito integrado que contiene toda la estructura de un microcomputador, o sea, CPU (Unidad Central de Proceso), memoria RAM, memoria ROM, circuitos de entrada-salida (y/o) y otros módulos con aplicaciones especiales. Es llamado microcontrolador debido a su tamaño y a que se utiliza principalmente para controlar otros circuitos o dispositivos eléctricos, mecánicos, etc.

La posibilidad de manejar señales de entrada y de salida, así como su capacidad para procesar datos y tomar decisiones, lo convierten en un elemento electrónico muy versátil. Los dispositivos de entrada son elementos que pueden cambiar su estado ante una determinada condición y generar una señal que pueda ser utilizada por el microcontrolador para tomar alguna decisión; por ejemplo un teclado, un interruptor, un sensor, un transductor, etc. Los dispositivos de salida, pueden ser indicadores visuales, audibles o actuadores, entre otros.

En el sistema de control se hizo para dar la frecuencia desea se utilizo un microcontrolador PIC 16F873 quien es que nos va dar la señal de encendido o apagado para el rectificador de puente completo como se muestra en la figura 33

Figura 33. Circuito de Control de Inversor



Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

Con el desarrollo de este proyecto de grado, se ha logrado hacer un aporte significativo al estado del arte al área de materiales en la Universidad, al diseñar, construir y documentar un sistema de Temple por Inducción, que servirá de precedente para futuros trabajos e investigaciones.

Se diseñó un sistema eléctrico de generación de calor mediante corrientes inducidas por medio de una bobina o inductores, donde se le da la frecuencia que se va a trabajar para dar la profundidad requeridas.

Se diseñó un sistema mecánico donde se da el transporte de la pieza hacia el inductor, y se le da el tiempo que debe durar la pieza pasando por las corrientes inducidas.

Recomendaciones

La utilización de una banda transportadora donde traiga el material a temprar y lleve el material témpate hacia el lugar de corte o la zona del durometro, la colocación de un manipulador que pueda colocar y retirar la pieza de la maquina.

Ampliación de la fuente de potencia en la parte de frecuencia, se le recomienda que utilice Mosfet de potencia porque su apagado forzado es menos complejos.

3. ANEXOS

ANEXO 1. Análisis de estructura.

TABLA 9. Deformaciones.

Nombre	Tipo	Cuerpos asociados	Alcance	Rigidez	Comportamiento
"Contact Region"	Limitado	"soportes-1" and "angulo de 19.05x 3.18x512.75-1"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region 2"	Limitado	"soportes-2" and "angulo de 19.05x 3.18x512.75-1"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region 3"	Limitado	"chumacera de 17- 2@SY_17_TF_PART3-5" and "eje-1"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region 4"	Limitado	"chumacera de 17- 2@SY_17_TF_PART2-1" and "eje-1"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region 5"	Limitado	"chumacera de 17- 2@SY_17_TF_PART3-8" and "eje-1"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region 6"	Limitado	"chumacera de 17- 2@SY_17_TF_PART3-7" and "eje-1"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region 7"	Limitado	"chumacera de 17- 2@SY_17_TF_PART3-6" and "eje-1"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region 8"	Limitado	"chumacera de 17- 1@SY_17_TF_PART3-5" and "eje-1"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region 9"	Limitado	"chumacera de 17- 1@SY_17_TF_PART2-1" and "eje-1"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region"	Limitado	"chumacera de 17-	Face, Face	Program Controlled	Symmetric

10"		1@SY_17_TF_ PART3-8" and "eje-1"			
"Contact Region 11"	Limitado	"chumacera de 17- 1@SY_17_TF_ PART3-7" and "eje-1"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region 12"	Limitado	"chumacera de 17- 1@SY_17_TF_ PART3-6" and "eje-1"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region 13"	Limitado	"chumacera de 17- 2@SY_17_TF_ PART2-1" and "chumacera de 17- 2@SY_17_TF_ PART3-4"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region 14"	Limitado	"chumacera de 17- 2@SY_17_TF_ PART1-1" and "chumacera de 17- 2@SY_17_TF_ PART3-4"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region 15"	Limitado	"chumacera de 17- 2@SY_17_TF_ PART2-1" and "chumacera de 17- 2@SY_17_TF_ PART3-5"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region 16"	Limitado	"chumacera de 17- 2@SY_17_TF_ PART1-1" and "chumacera de 17- 2@SY_17_TF_ PART3-5"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region 17"	Limitado	"chumacera de 17- 2@SY_17_TF_ PART2-1" and "chumacera de 17- 2@SY_17_TF_ PART3-3"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region 18"	Limitado	"chumacera de 17- 2@SY_17_TF_	Face, Face	Program Controlled	Symmetric

		PART1-1" and "chumacera de 17- 2@SY_17_TF_ PART3-3"			
"Contact Region 19"	Limitado	"chumacera de 17- 2@SY_17_TF_ PART2-1" and "chumacera de 17- 2@SY_17_TF_ PART3-2"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region 20"	Limitado	"chumacera de 17- 2@SY_17_TF_ PART1-1" and "chumacera de 17- 2@SY_17_TF_ PART3-2"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region 21"	Limitado	"chumacera de 17- 2@SY_17_TF_ PART3-1" and "chumacera de 17- 2@SY_17_TF_ PART2-1"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region 22"	Limitado	"chumacera de 17- 2@SY_17_TF_ PART3-8" and "chumacera de 17- 2@SY_17_TF_ PART2-1"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region 23"	Limitado	"chumacera de 17- 2@SY_17_TF_ PART1-1" and "chumacera de 17- 2@SY_17_TF_ PART2-1"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region 24"	Limitado	"chumacera de 17- 2@SY_17_TF_ PART3-7" and "chumacera de 17- 2@SY_17_TF_ PART2-1"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region 25"	Limitado	"chumacera de 17- 2@SY_17_TF_	Face, Face	Program Controlled	Symmetric

		PART3-6" and "chumacera de 17- 2@SY_17_TF_ PART2-1"			
"Contact Region 26"	Limitado	"chumacera de 17- 2@SY_17_TF_ PART1-1" and "chumacera de 17- 2@SY_17_TF_ PART3-1"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region 27"	Limitado	"chumacera de 17- 2@SY_17_TF_ PART1-1" and "chumacera de 17- 2@SY_17_TF_ PART3-8"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region 28"	Limitado	"chumacera de 17- 2@SY_17_TF_ PART3-7" and "chumacera de 17- 2@SY_17_TF_ PART1-1"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region 29"	Limitado	"chumacera de 17- 2@SY_17_TF_ PART3-6" and "chumacera de 17- 2@SY_17_TF_ PART1-1"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region 30"	Limitado	"soportes-2" and "chumacera de 17- 2@SY_17_TF_ PART1-1"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region 31"	Limitado	"chumacera de 17- 1@SY_17_TF_ PART2-1" and "chumacera de 17- 1@SY_17_TF_ PART3-4"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region 32"	Limitado	"chumacera de 17- 1@SY_17_TF_ PART1-1" and "chumacera de 17-	Face, Face	Program Controlled	Symmetric

		1@SY_17_TF_ PART3-4"			
"Contact Region 33"	Limitado	"chumacera de 17- 1@SY_17_TF_ PART2-1" and "chumacera de 17- 1@SY_17_TF_ PART3-5"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region 34"	Limitado	"chumacera de 17- 1@SY_17_TF_ PART1-1" and "chumacera de 17- 1@SY_17_TF_ PART3-5"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region 35"	Limitado	"chumacera de 17- 1@SY_17_TF_ PART2-1" and "chumacera de 17- 1@SY_17_TF_ PART3-3"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region 36"	Limitado	"chumacera de 17- 1@SY_17_TF_ PART1-1" and "chumacera de 17- 1@SY_17_TF_ PART3-3"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region 37"	Limitado	"chumacera de 17- 1@SY_17_TF_ PART2-1" and "chumacera de 17- 1@SY_17_TF_ PART3-2"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region 38"	Limitado	"chumacera de 17- 1@SY_17_TF_ PART1-1" and "chumacera de 17- 1@SY_17_TF_ PART3-2"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region 39"	Limitado	"chumacera de 17- 1@SY_17_TF_ PART3-1" and "chumacera de 17-	Face, Face	Program Controlled	Symmetric

		1@SY_17_TF_ PART2-1"			
"Contact Region 40"	Limitado	"chumacera de 17- 1@SY_17_TF_ PART3-8" and "chumacera de 17- 1@SY_17_TF_ PART2-1"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region 41"	Limitado	"chumacera de 17- 1@SY_17_TF_ PART1-1" and "chumacera de 17- 1@SY_17_TF_ PART2-1"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region 42"	Limitado	"chumacera de 17- 1@SY_17_TF_ PART3-7" and "chumacera de 17- 1@SY_17_TF_ PART2-1"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region 43"	Limitado	"chumacera de 17- 1@SY_17_TF_ PART3-6" and "chumacera de 17- 1@SY_17_TF_ PART2-1"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region 44"	Limitado	"chumacera de 17- 1@SY_17_TF_ PART1-1" and "chumacera de 17- 1@SY_17_TF_ PART3-1"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region 45"	Limitado	"chumacera de 17- 1@SY_17_TF_ PART1-1" and "chumacera de 17- 1@SY_17_TF_ PART3-8"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region 46"	Limitado	"chumacera de 17- 1@SY_17_TF_ PART3-7" and "chumacera de 17-	Face, Face	Program Controlled	Symmetric

		1@SY_17_TF_ PART1-1"			
"Contact Region 47"	Limitado	"chumacera de 17- 1@SY_17_TF_ PART3-6" and "chumacera de 17- 1@SY_17_TF_ PART1-1"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region 48"	Limitado	"soportes-1" and "chumacera de 17- 1@SY_17_TF_ PART1-1"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region 49"	Limitado	"angulo de 19.05x 3.18x512.75-2" and "soportes-1"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric
"Contact Region 50"	Limitado	"angulo de 19.05x 3.18x512.75-2" and "soportes-2"	Face, Face	Program Controlled	Symmetric

Enmallado

La malla contiene 99712 y 55722 elementos.

La siguiente tabla muestra las cargas locales aplicadas a cada geometría específica.

Carga estructural

Tabla 10. Cargas estructurales.

Nombre	Tipo	Valor	Vector	Fuerza en reacción	Momento de reacción	Vector Momento de reacción	Cuerpos asociados
"Force"	Fuerza superficial	300.0 N	[0.0 N x, - 300.0 N y, 0.0 N z]	N/A	N/A	N/A	"eje-1"

Soportes estructurales.

Tabla 11. Soportes estructurales.

Nombre	Tipo	Fuerza de reacción	Vector Fuerza de reacción	Momento de reacción	Vector momento	Cuerpos asociados
"Soporte fijo"	Fijo	299.88 N	[1.35×10^{-6} N x, 299.88 N y, 3.73×10^{-6} N z]	3.36 N·m	[-0.35 N·m x, -9.53×10^{-3} N·m y, 3.35 N·m z]	"soportes-2" and "soportes-1"

Definición de acero estructural.

Tabla 12. Propiedades del acero estructural.

Nombre	Valor
Modulo de elasticidad	2.0×10^{11} Pa
Poisson	0.3
Densidad	7,850.0 kg/m ³
Coefficiente de expansión térmica	1.2×10^{-5} 1/°C
Conductividad térmica	60.5 W/m·°C
Calor específico	434.0 J/kg·°C

Todas las anteriores propiedades se toman como independientes de la temperatura.

Figura 35. Curvas de fatiga para el acero estructural seleccionado.

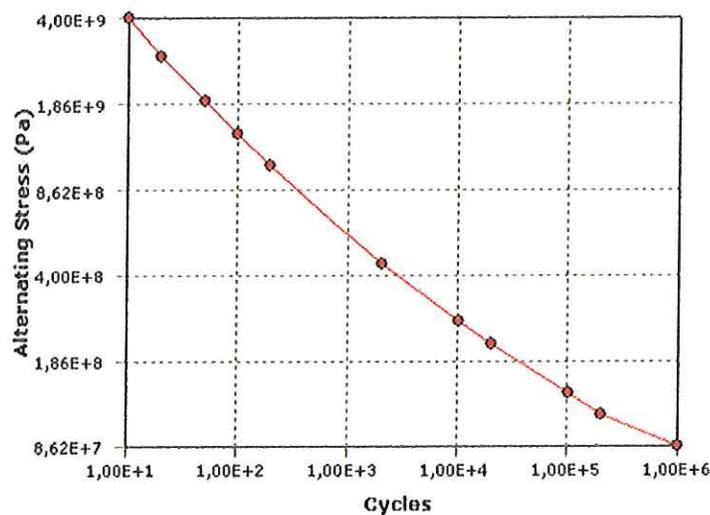
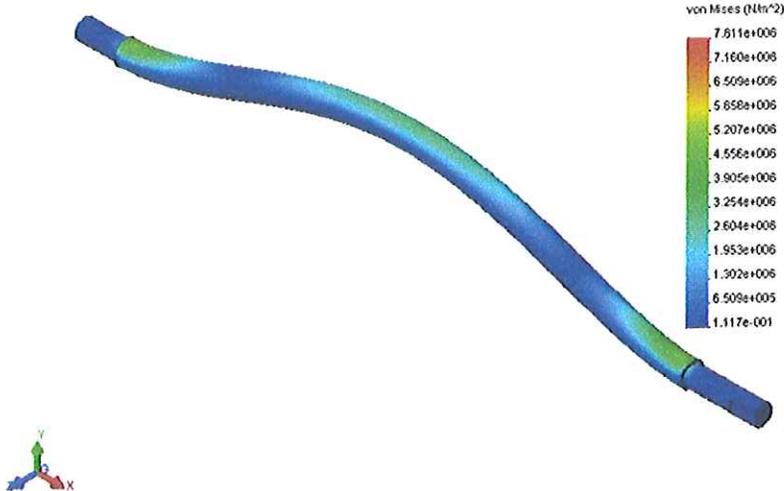
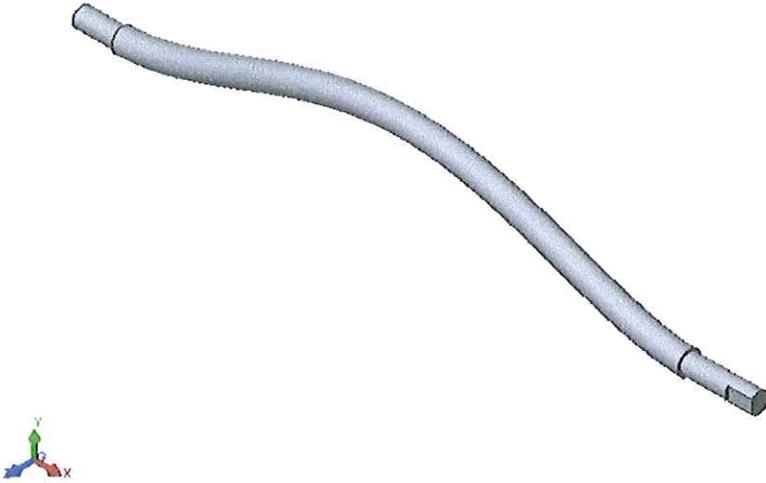


Figura 36 .Demostración de deformación del eje con un diámetro mas pequeño

Nombre de modelo: eje
Nombre de estudio: COSMOSXpressStudy
Tipo de trazado: Stático Esfuerzo nodal-Trazado1
Escala de deformación: 2561.99



Nombre de modelo: eje
Nombre de estudio: COSMOSXpressStudy
Tipo de trazado: Deformación -Trazado2
Escala de deformación: 2561.99



Anexo 2. Programa del microcontrolador

Programa de microcontrolador realizado en visual

```
; Begin
    R0L EQU 0xC
    R0H EQU 0xD
    R1L EQU 0xE
    R1H EQU 0xF
    R2L EQU 0x10
    R2H EQU 0x11
    R3L EQU 0x12
    R3H EQU 0x13
    R4L EQU 0x14
    R4H EQU 0x15
    R5L EQU 0x16
    R5H EQU 0x17
    W_TEMP EQU 0x4F
    STATUS_TEMP EQU 0x4E
    ORG 0x0000
    BCF PCLATH,3
    BCF PCLATH,4
    GOTO L0005
    ORG 0x0004
    MOVWF W_TEMP
    SWAPF STATUS,W
    CLRF STATUS
    MOVWF STATUS_TEMP
    CALL L0006
    SWAPF STATUS_TEMP,W
    MOVWF STATUS
    SWAPF W_TEMP,F
    SWAPF W_TEMP,W
    RETFIE
L0005:
loop: L0001:
    TRISA = 0x00 'set all PORTA pins as outputs
    BSF STATUS,RP0
    CLRF 0x05
    BCF STATUS,RP0
    PORTA = 0 'make all PORTA pins high
    CLRF 0x05
    INTCON.INTE = 1 'enable RB0/INT interrupts
    BSF 0x0B,4
```

```

INTCON.GIE = 1 'enable all un-masked interrupts
BSF 0x0B,7
If PORTB = 2 Then
MOVWF 0x06,W
SUBLW 0x02
BTFSS STATUS,Z
GOTO L0007
PORTA = 1
L0002:
MOVLW 0x01
MOVWF 0x05
WaitUs 60
MOVLW 0x3C
MOVWF R4L
CALL X001
PORTA = 0
CLRF 0x05
WaitUs 60
MOVLW 0x3C
MOVWF R4L
CALL X001
Goto uno
GOTO L0002
Endif
L0007:MOVLW 0x1F
ANDWF STATUS,F
If PORTB = 4 Then
MOVWF 0x06,W
SUBLW 0x04
BTFSS STATUS,Z
GOTO L0008
dos: PORTA = 1
L0003:
MOVLW 0x01
MOVWF 0x05
WaitUs 55
MOVLW 0x37
MOVWF R4L
CALL X001
PORTA = 0
CLRF 0x05
WaitUs 55
MOVLW 0x37
MOVWF R4L
CALL X001
Goto dos
GOTO L0003

```

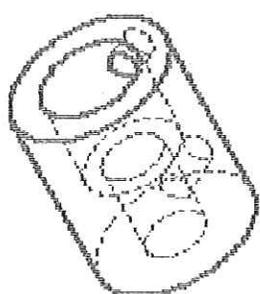
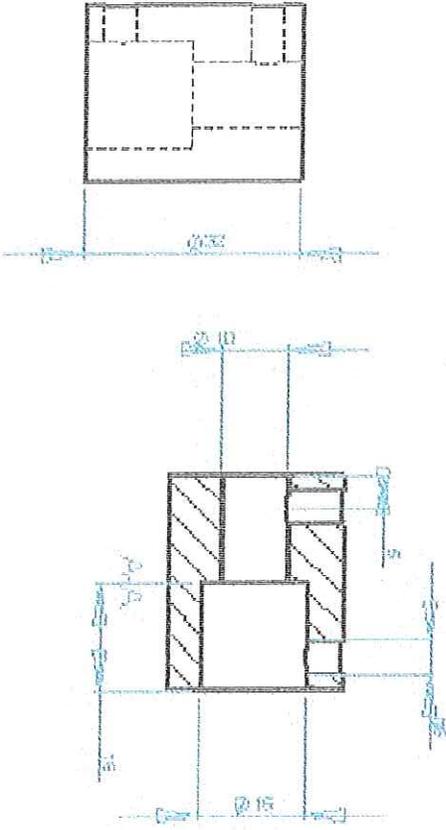
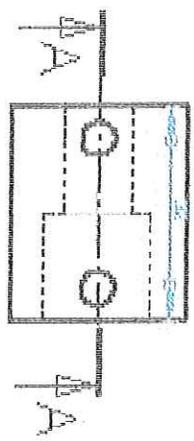
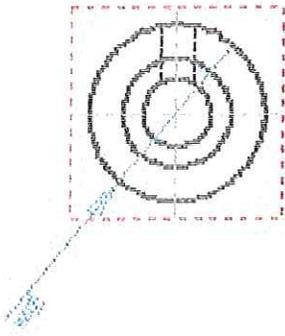
```

Endif
L0008:MOVLW 0x1F
ANDWF STATUS,F
If PORTB = 8 Then
MOVF 0x06,W
SUBLW 0x08
BTFSS STATUS,Z
GOTO L0009
tres: PORTA = 1
L0004:
MOVLW 0x01
MOVWF 0x05
WaitUs 65
MOVLW 0x41
MOVWF R4L
CALL X001
PORTA = 0
CLRF 0x05
WaitUs 65
MOVLW 0x41
MOVWF R4L
CALL X001
Goto tres
GOTO L0004
Endif
L0009:MOVLW 0x1F
ANDWF STATUS,F
Goto loop
GOTO L0001
End
L0010:GOTO L0010
L0006:
PORTB = 0
CLRF 0x06
PORTA = 0
CLRF 0x05
INTCON.INTF = 0 BCF 0x0B,1
GOTO L0001

RETURN
L0011:GOTO L0011
X001: MOVLW 0x0A
SUBWF R4L,F
BTFSS STATUS,C
RETURN
GOTO X002
X002: MOVLW 0x06

```

```
SUBWF R4L,F  
BTFSS STATUS,C  
RETURN  
GOTO X002  
END
```



OBSERVACIONES:

DIBUJO: Eric A Ramirez

DISEÑO: Eric A Ramirez

APROBADO: Alban Jaimes

FECHA: 15/07/2005

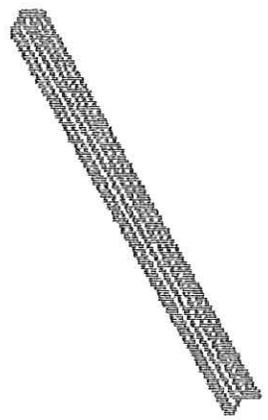
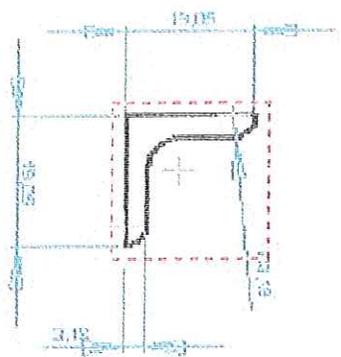
PLANO No. Plano # 2

MÁQUINA DE BAPLE POR INDUCCIÓN

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
BUCHARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERIA
MECATRÓNICA

ESCALA: 1:1

CONVENCIONES



OBSERVACIONES:

DIBUJO: Eric A. Ramirez

DISEÑO: Eric A. Ramirez

APROBADO: Alvan Jaimes

FECHA: 16/07/08

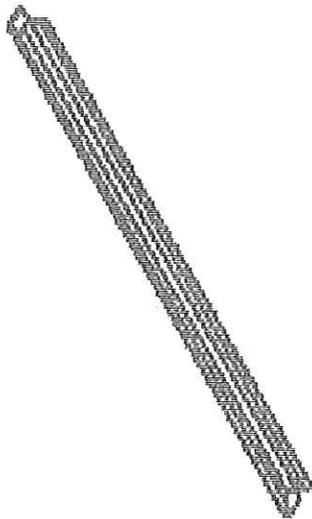
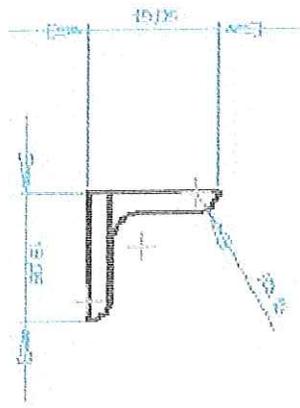
PLANO No. Rama # 3

MÁQUINA DETRABAJE POR INDUCCION

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE
BUENAVISTA
FACULTAD DE INGENIERIA,
MECATRONICA

ESCALA: 1:5

CONVENCIONES



OBSERVACIONES:

DIBUJO: Eric A Ramirez

DISEÑO: Eric A Ramirez

APROBADO: Alcan Jaimez

FECHA: 15/07/05

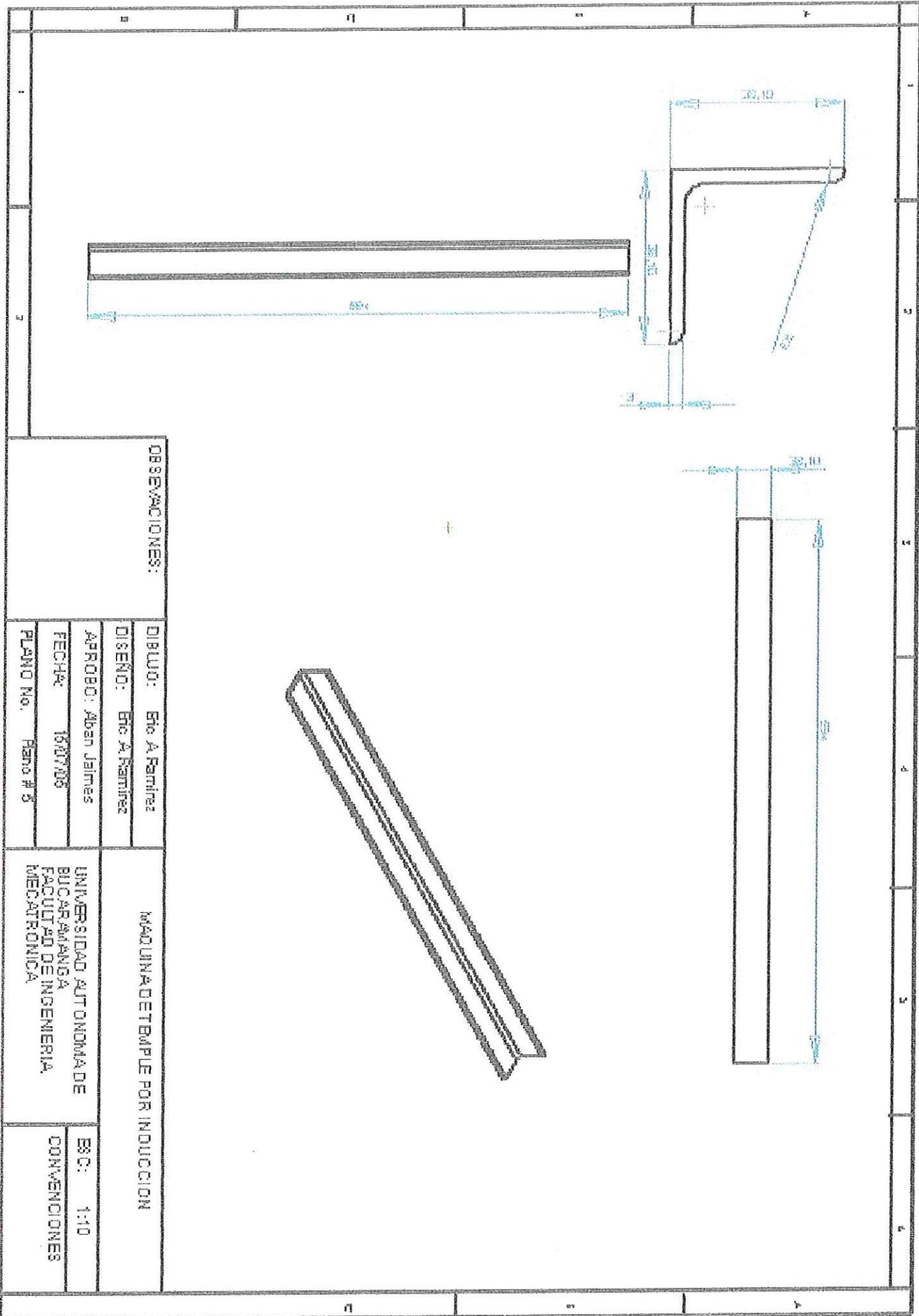
PLANO No. Plano # 4

MÁQUINA DETALLADA POR INDUCCIÓN

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
BUCHARANGA
FACULTAD DE INGENIERÍA
MECATRÓNICA

ESCALA: 1:5

CONVENCIÓNES



OBSERVACIONES:

DIBUJO: Eric A Ramirez

DISEÑO: Eric A Ramirez

APROBADO: Alben Jaimes

FECHA: 15/07/08

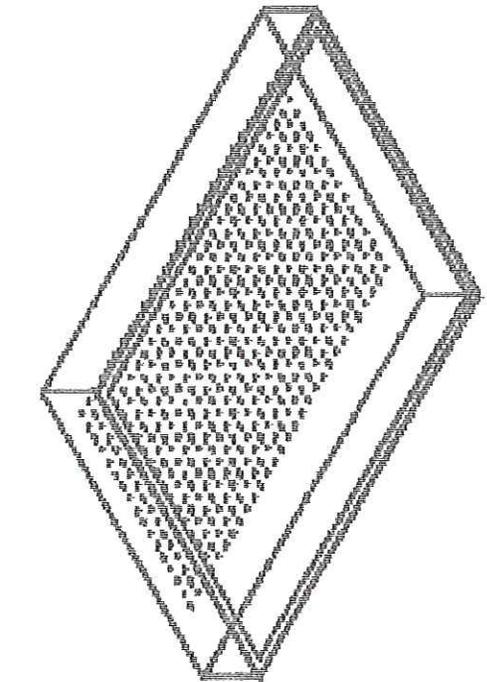
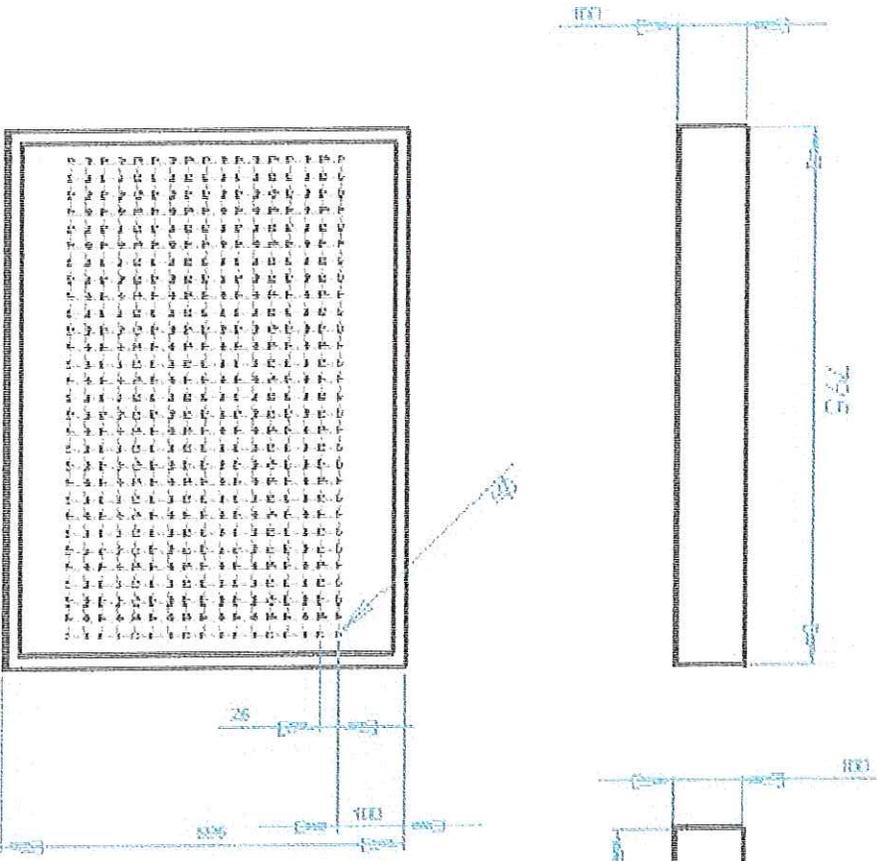
PLANO No. Plano # 3

MADINAJE DE BIPLE POR INDUCCION

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE
BUCARARANGA
FACULTAD DE INGENIERIA
MECATRONICA

ESCALA: 1:10

CONVENCIONES



OBSERVACIONES:

DIBUJO: Eto A Ramirez

DISENO: Eto A Ramirez

APROBADO: Aban Jalimes

FECHA: 15/07/05

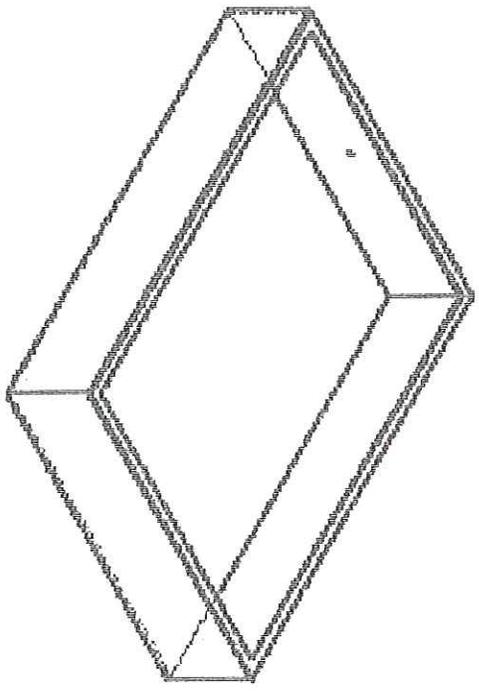
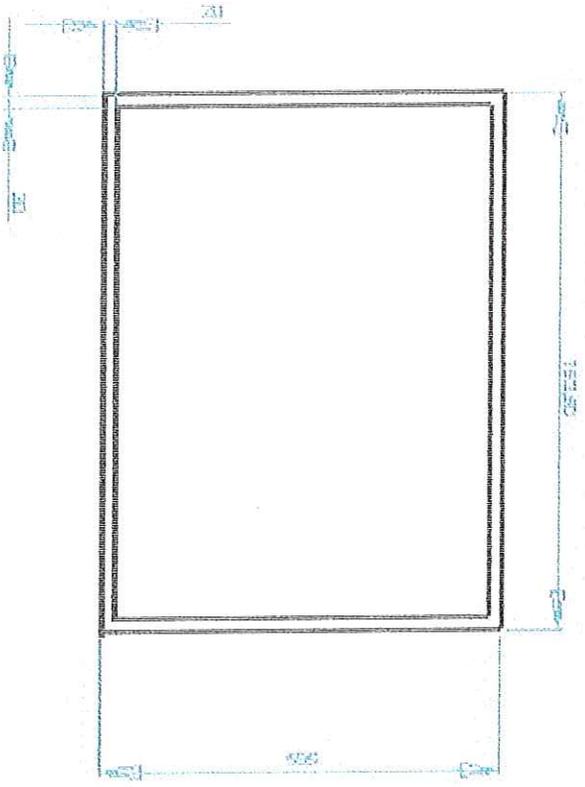
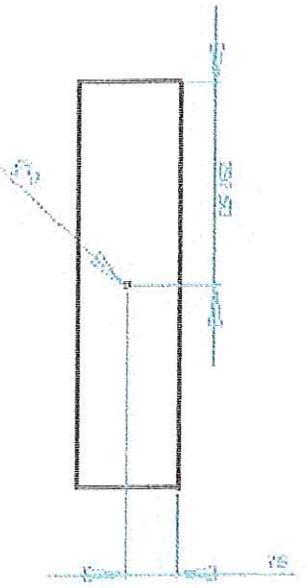
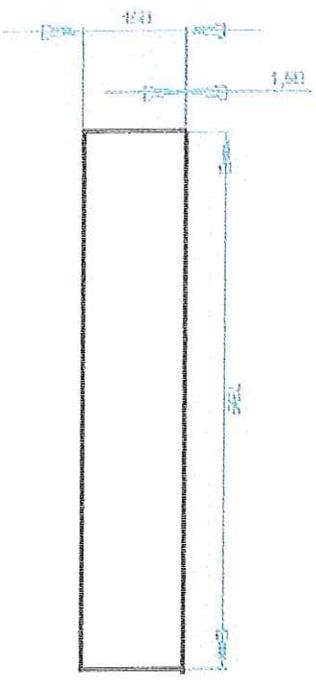
PLANO No. Rano # 7

MAQUINA DE PAPEL POR INDUCCION

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE
BUCHARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERIA
MECATRONICA

ESCALA: 1:10

CONVENCIONES



OBSERVACIONES:

DIBUO: Eric A Ramirez

DISEÑO: Eric A Ramirez

APROBADO: Alben Jaimes

FECHA: 16/07/09

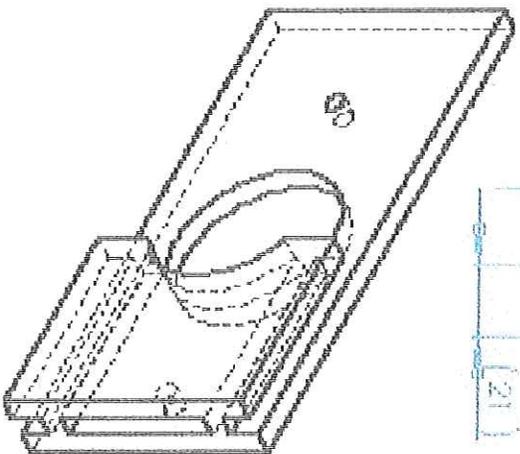
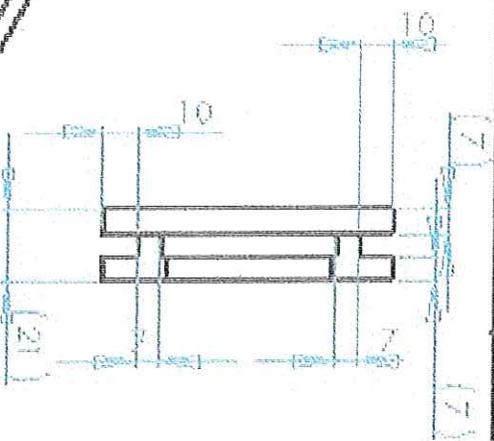
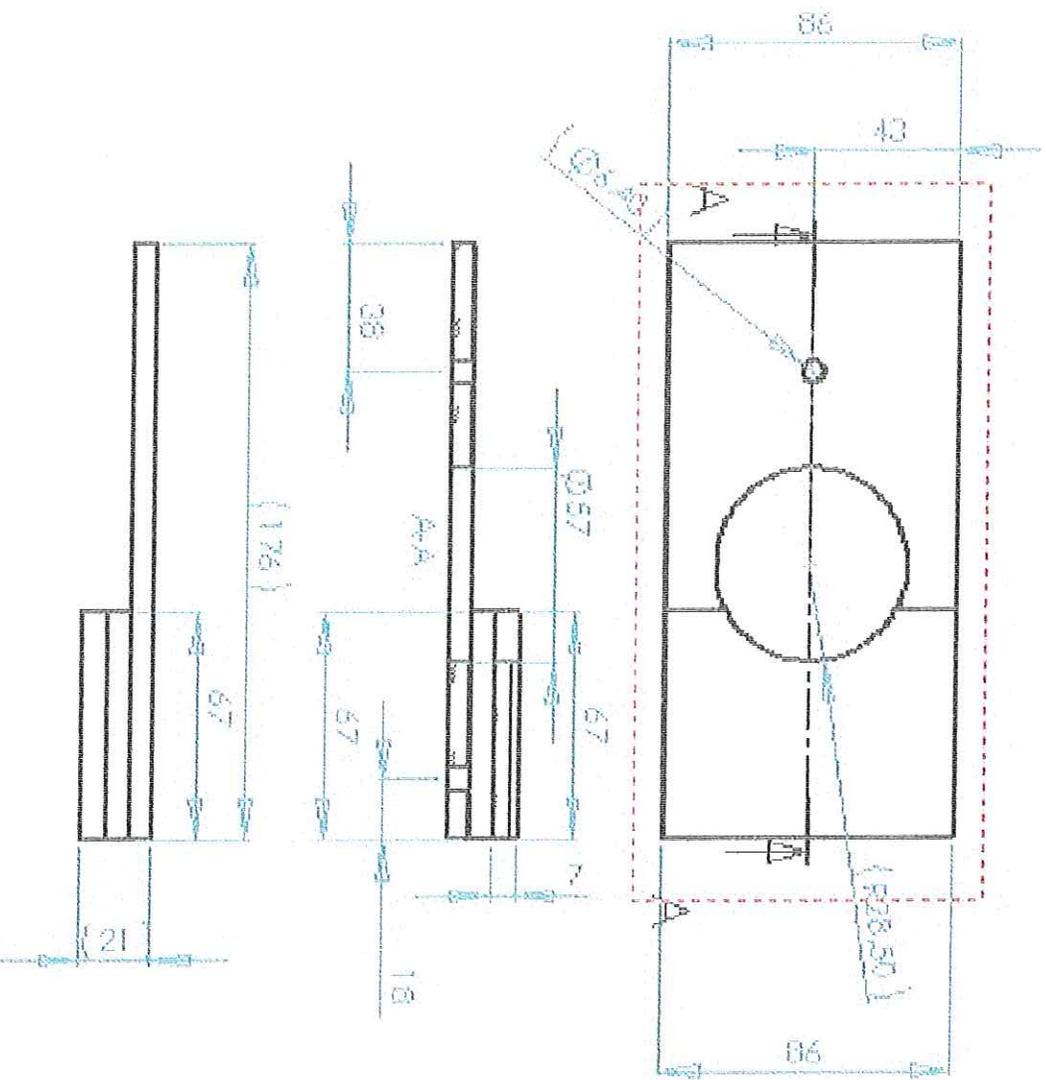
PLANO No. Plano # 8

MAQUINA DE PAPIE POR INDUCCION

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE
BUCARARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERIA
MECATRONICA

ESCALA: 1:10

CONVENCIONES



OBSERVACIONES:

DIBUJO: Eric A. Ramirez

DISEÑO: Eric A. Ramirez

APROBADO: Alban Jaimés

FECHA: 18/07/08

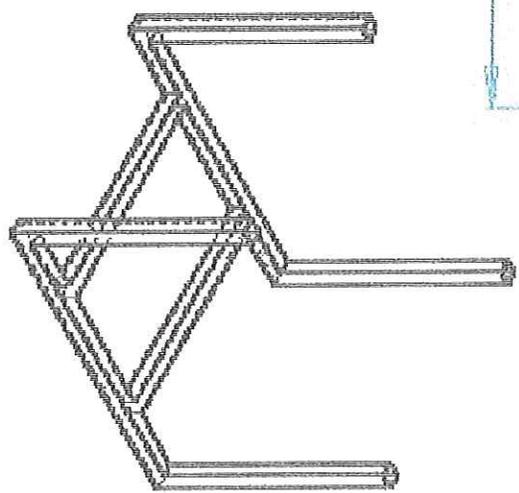
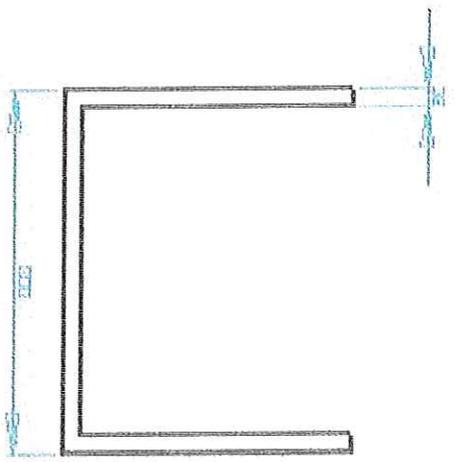
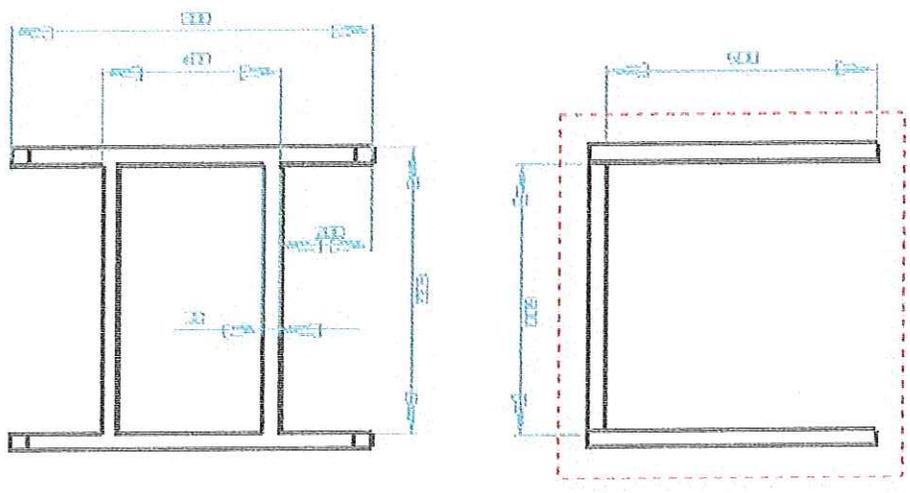
PLANO No. HERR# 9

MAQUINA DE TAPLE POR INDUCCION

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE
BUENARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERIA
MECATRONICA

ES: 1:2

CONVENCIONES



OBSERVACIONES:

DIBUJO: Eto A Ramirez

DISENIO: Eto A Ramirez

APROBADO: Alben Jaitres

FECHA: 16/07/05

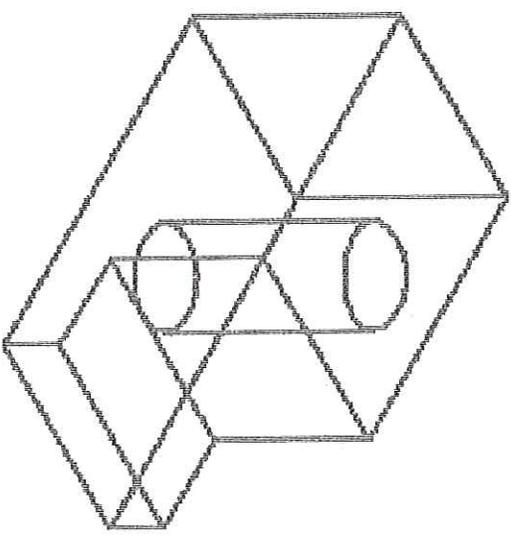
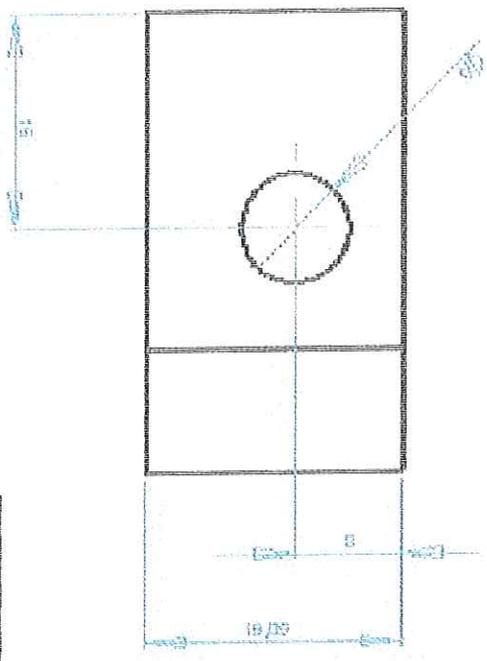
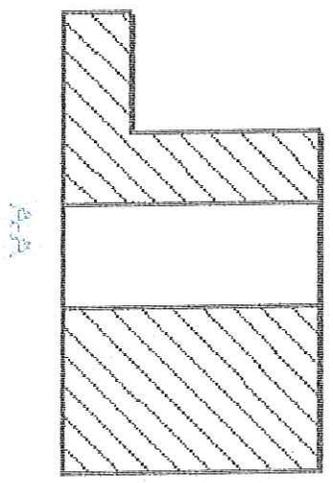
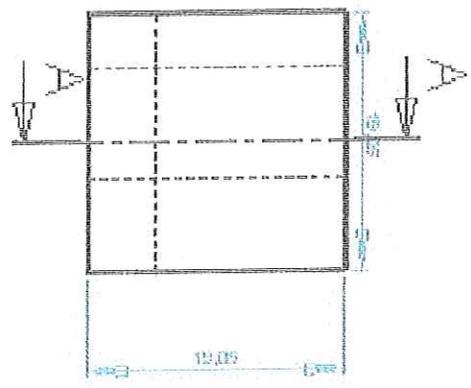
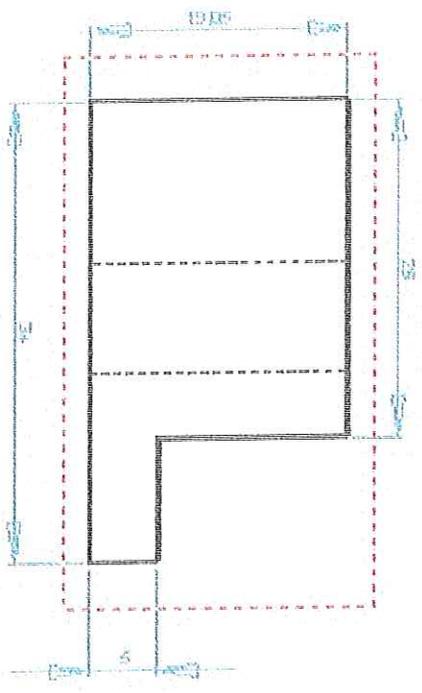
PLANO No. Plano # 10

MADRIDNET BAPLE POR INDUCCION

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE
BUENAVISTA
FACULTAD DE INGENIERIA
MECATRONICA

ESCALA: 1:20

CONVENCIONES



OBSERVACIONES:

DIBUJO: Eric A. Ramirez

DISENIO: Eric A. Ramirez

APROBADO: Alben Jaimes

FECHA: 16/07/03

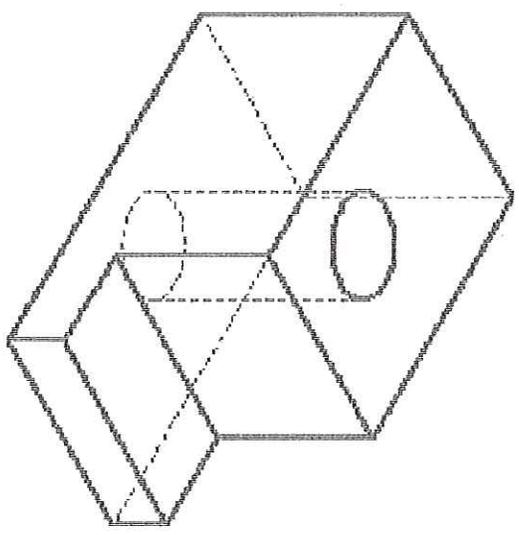
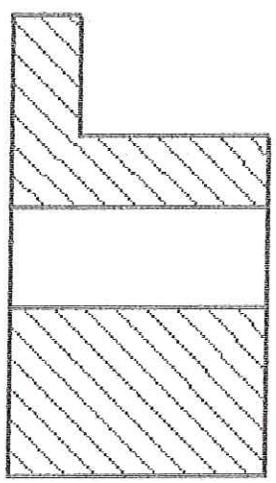
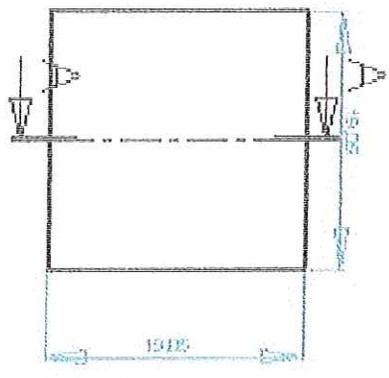
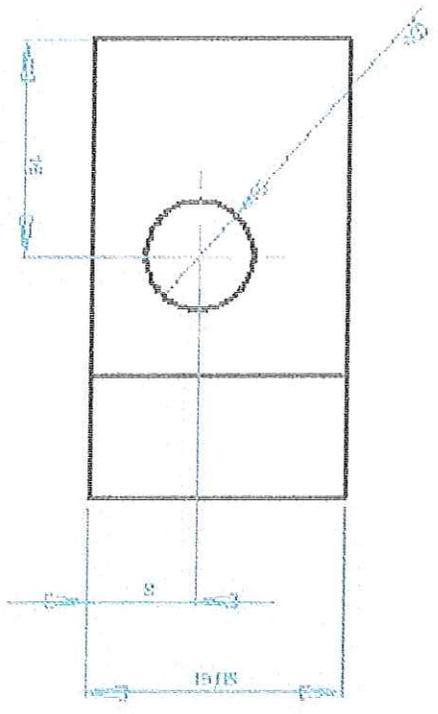
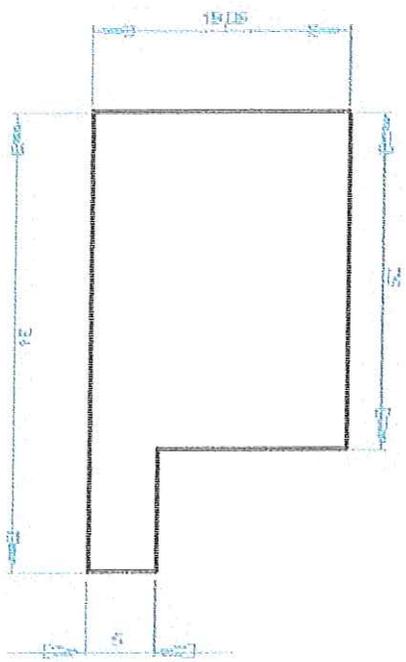
PLANO No. Mano # 11

MAQUINADO DE BOMBA POR INDUCCION

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE
BUENAVISTA
FACULTAD DE INGENIERIA
MECATRONICA

ESCALA: 2:1

CONVENCIONES



OBSERVACIONES:

DIBUJO: Ronny J. Gutierrez

DISENO: Ronny J. Gutierrez

APROBADO: Alvan Jimenez

FECHA: 16/07/05

PLANO No. Plano # 12

MADINA DETALLABLE POR INDUCCION

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE
BUCARARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERIA,
MECATRONICA.

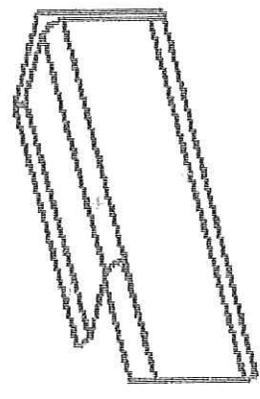
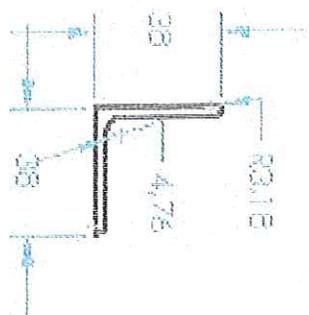
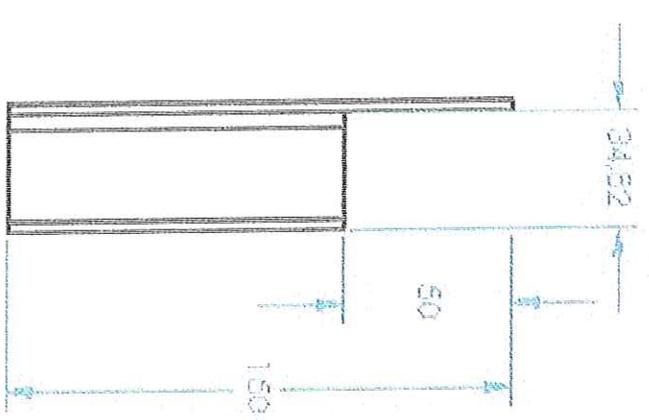
ES.C: 1:1

CONVENCIONES

NORMAS
MTC...

1 2 3

1 2 3 4



OBSERVACIONES:

MAQUINADO EN BAMBUE PARA INDUCCION

DIBUJO: Elio A Ramirez

DISEÑO: Elio A Ramirez

APROBADO: Adan Jaimes

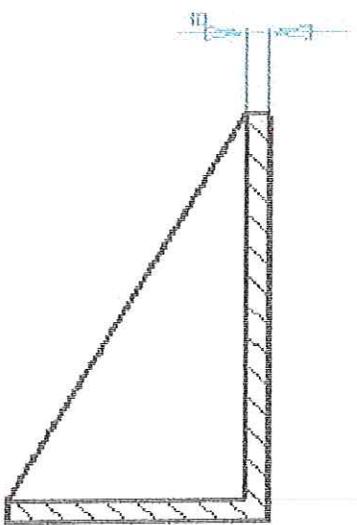
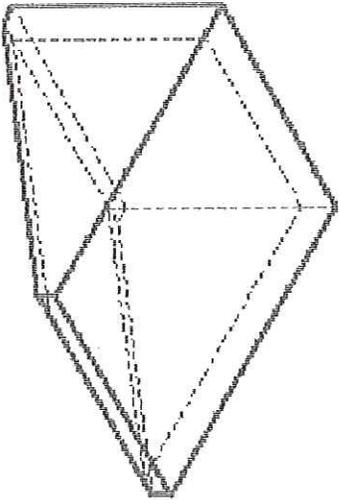
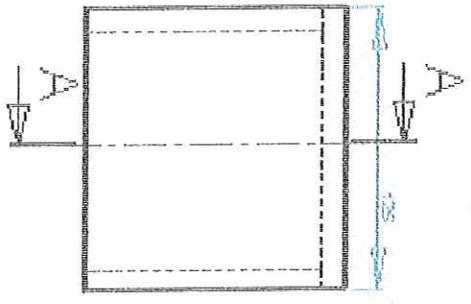
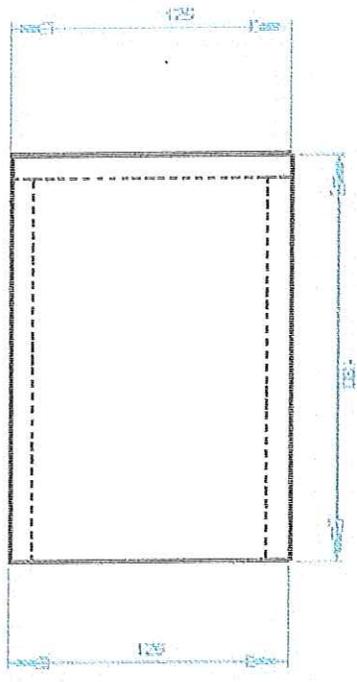
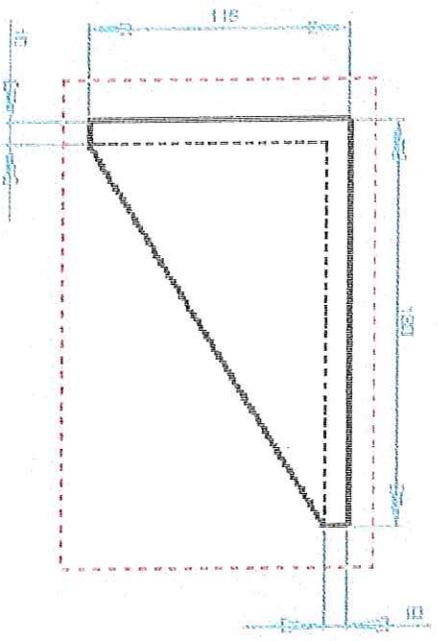
FECHA: 16/07/2025

PLANO No. Plano # 13

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE
BUENAVISTA
FACULTAD DE INGENIERIA,
MECATRONICA

ESCALA: 1:2

CONVENCIONES



A-A (1:3)

OBSERVACIONES:

DIBUJO: Eto A Ramirez

DISEÑO: Eto A Ramirez

APROBADO: Alben Jalimes

FECHA: 16/07/05

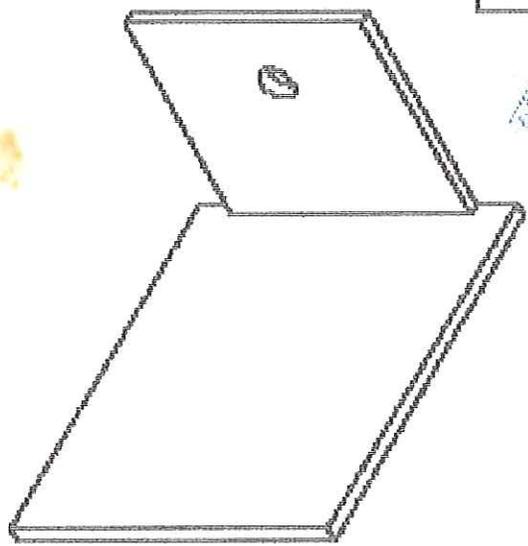
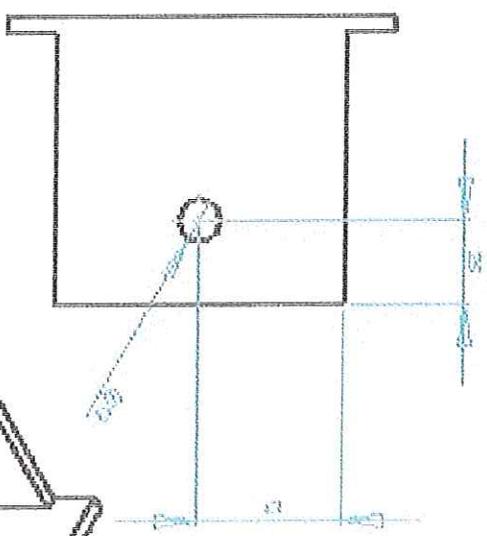
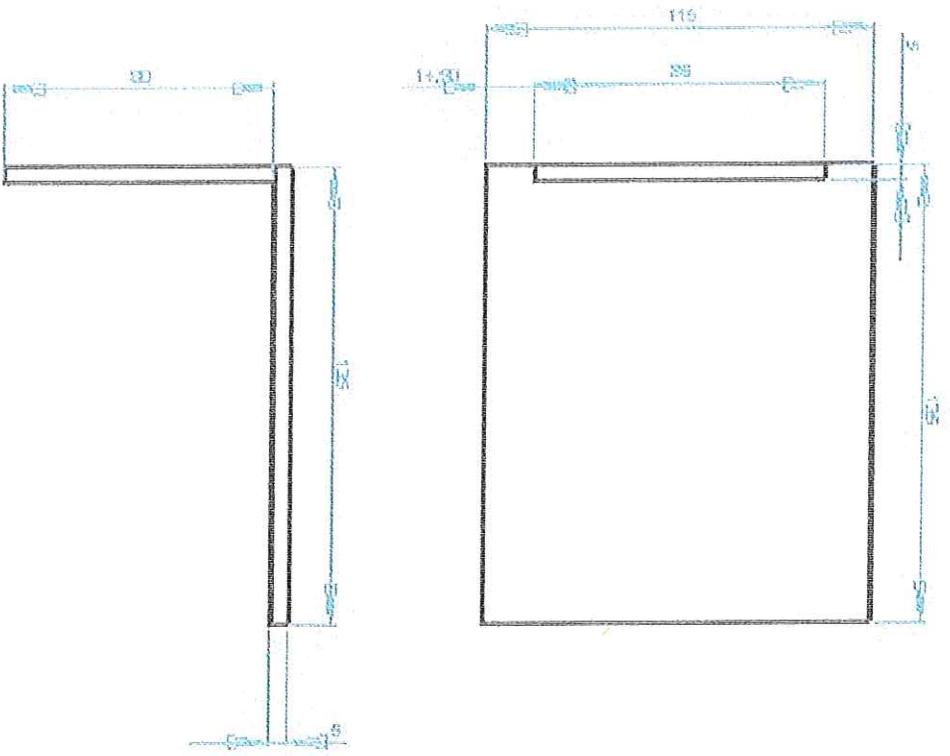
PLANO No. Plano # 14

MAQUINA DETRAPLE POR INDUCCION

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE
BUCHARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERIA
MECATRONICA

ESCALA: 1:5

CONVENCIONES



OBSERVACIONES:

DIBUJO: Eric A Ramirez

DISEÑO: Eric A Ramirez

APROBADO: Alben Jaimies

FECHA: 16/07/06

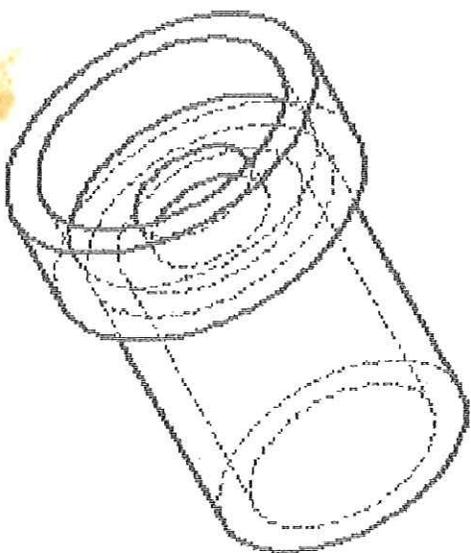
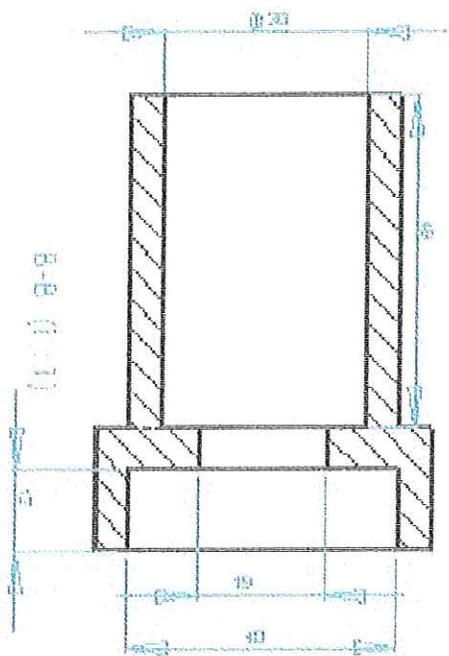
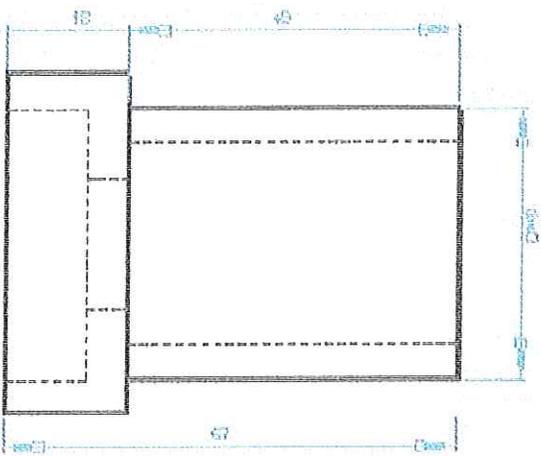
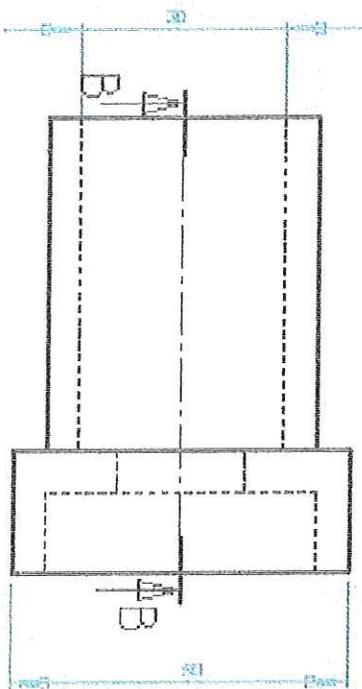
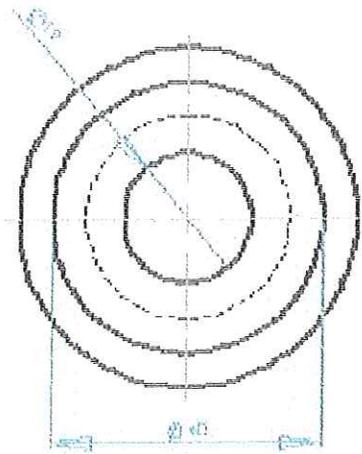
PLANO No. Ramo # 15

MAQUINADO ET BAPLE POR INDUCCION

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE
BUCHARANGA
FACULTAD DE INGENIERIA
MECATRONICA

ESCALA: 1:2

CONVENIONES



099EWAACIONES:

DIBUJO: Eric A. Ramirez

DISENO: Eric A. Ramirez

APROBO: Alvan Jaines

FECHA: 15/07/05

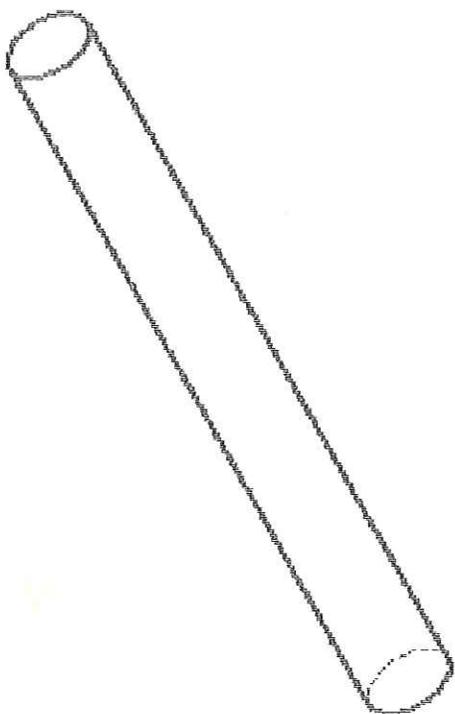
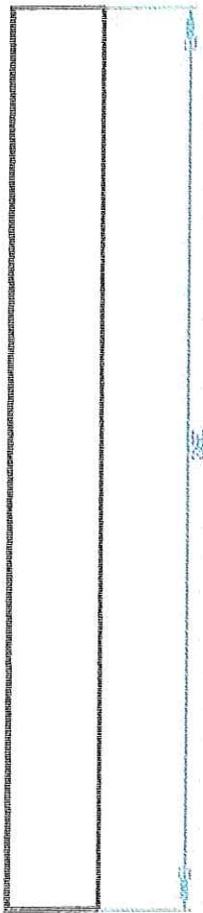
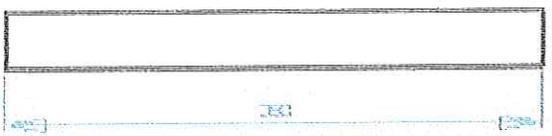
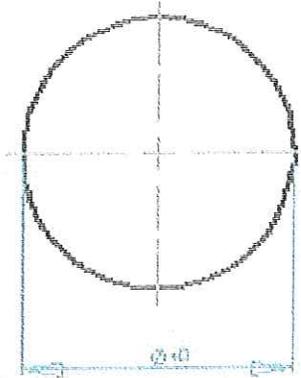
PLANO No. Hando # 15

MAQUINA DETRIBUPE POR INDUCCION

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE
BUCHARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERIA
MECATRONICA

ESC: 12

CONVENCIONES



OBSERVACIONES:

DIBUJO: Eto. A. Ramirez

DISEÑO: Eto. A. Ramirez

APROBADO: Aban Jaimes

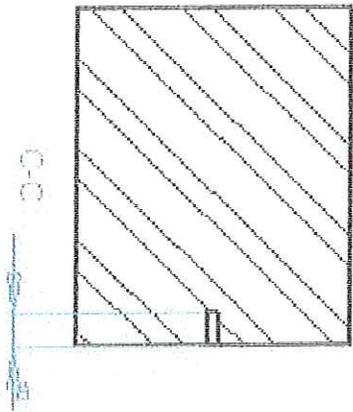
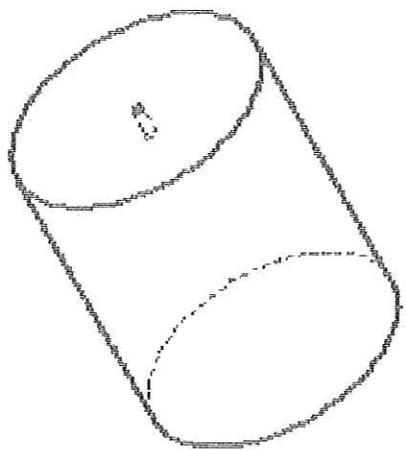
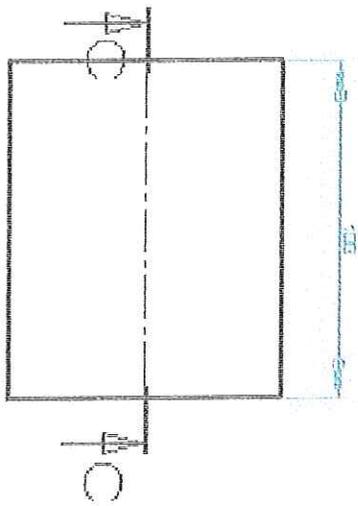
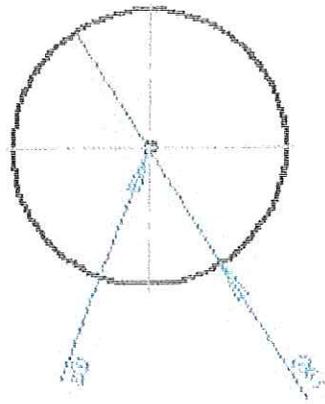
FECHA: 15/07/05

PLANO No. Plano # 17

MADRID DET BIPIE POR INDUCCION

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE
BUENAVISTA
FACULTAD DE INGENIERIA
MECATRONICA

ESCALA: 1:5
CONVENCIONES



OBSERVACIONES:

MADINAJA DE TUBO POR INDUCCION

DIBUJO: Eric A. Ramirez

DISENYO: Eric A. Ramirez

APROBADO: Alben Jaimos

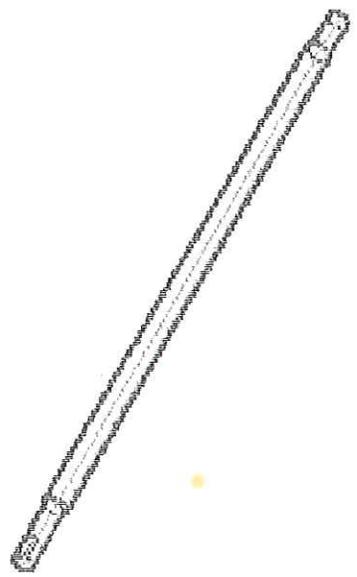
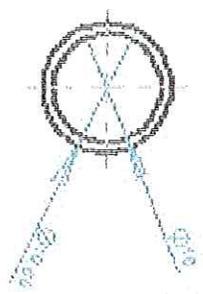
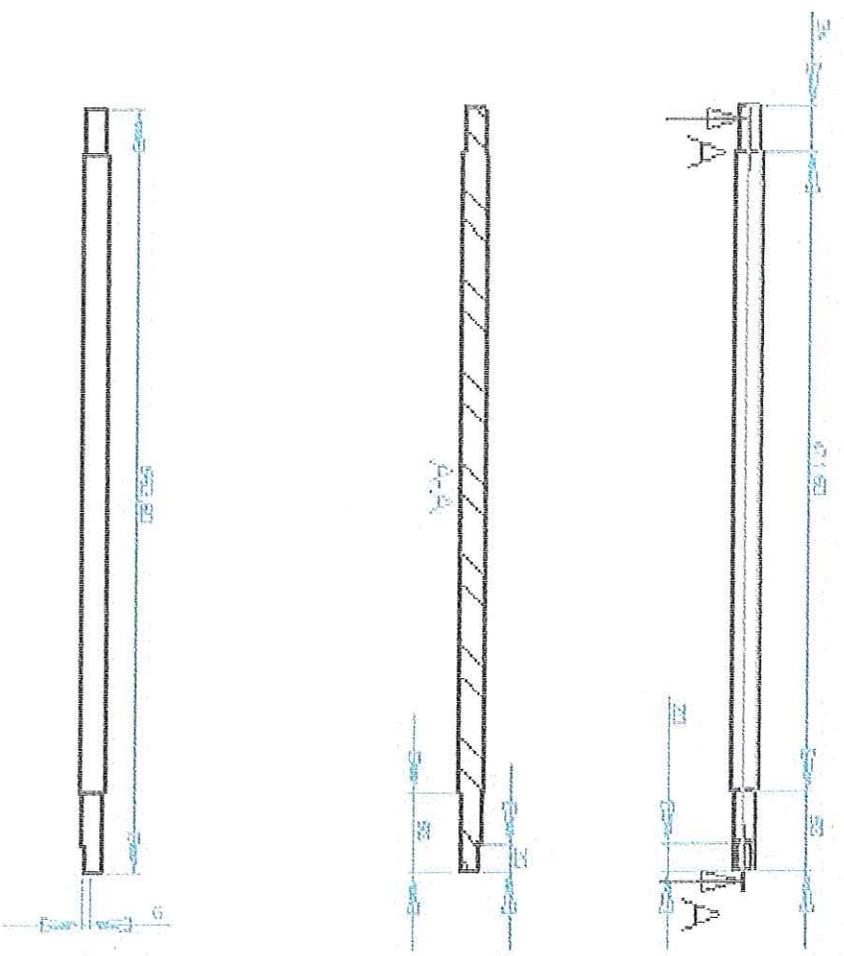
FECHA: 16/07/06

PLANO No. Plano # 18

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE
BUCHARANGA
FACULTAD DE INGENIERIA
MECATRONICA

ESCALA: 1:2

CONVENCIONES



OBSERVACIONES:

DIBUJO: Eto. A Ramirez

DISENYO: Eto. A Ramirez

APROBADO: Alban Jaimas

FECHA: 16/07/08

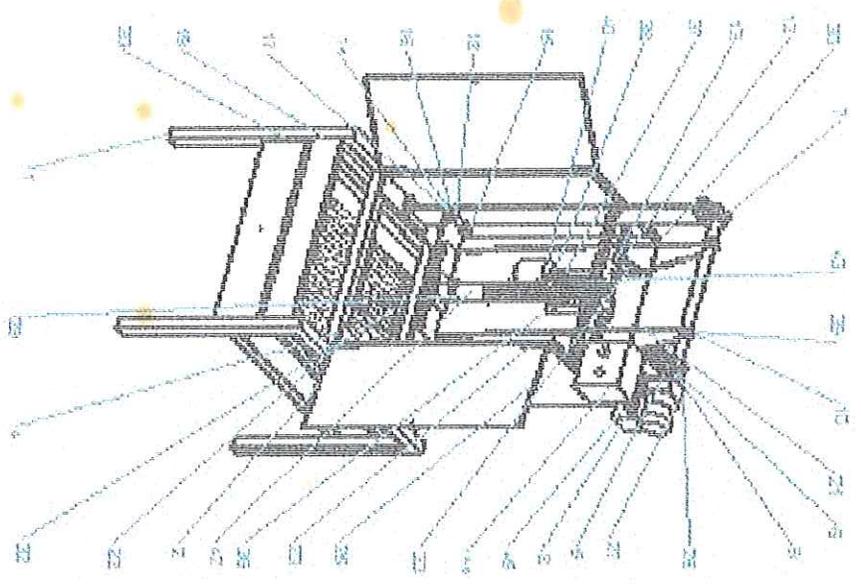
PLANO No. Plano # 18

MAQUINA DE TRIPLE POR INDUCCION

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE
BUENAVISTA
FACULTAD DE INGENIERIA
MECATRONICA

ESCALA: 1:5

CONVENCIONES



1	2	3	4
NUMERO	DESCRIPCION DE PARTES	CANTIDAD POR UNIDAD	UNIDADES
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30

OBSERVACIONES:

DISEÑO: Eric y Rommel
DISEÑO: Eric y Rommel
APROBADO: ...

FECHA: 05/07/05

NORMA: NTC ...

PLANTO No. Ensamble general

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BUENAVISTA FACULTAD DE INGENIERIA MECATRONICA

ESC: 120

CONVENCIONES

MAQUINA DE TIMPLE POR INDUCCION