



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA CONTROL Y REDES  
INDUSTRIALES**

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE PROCESAMIENTO DE PLÁSTICOS POR  
CALENTAMIENTO BASADO EN EL PRINCIPIO DE INDUCCIÓN  
ELECTROMAGNÉTICA**

**TESIS DE GRADO**

**Previo a la obtención del título de:**

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA CONTROL Y REDES INDUSTRIALES**

**PRESENTADO POR:**

**CARINA ELIZABETH PAREDES FIERRO**

**ALEX JAVIER ORTEGA FUENTES**

**Riobamba – Ecuador**

**2014**

Agradecemos a nuestro director, el Ingeniero Fernando Chávez por su guía y conocimiento, que nos ha permitido cristalizar este sueño.

Al Ingeniero Jorge Luis Paucar por su ayuda y consejos para la elaboración del presente documento.

A la fábrica PARTIPLAST por haber confiado en nuestras capacidades y habernos dado total apoyo y prestarnos todas las facilidades para poder cumplir los objetivos trazados.

A todos quienes nos brindaron su apoyo para no decaer ante las adversidades.

Dedicado a Dios por siempre bendecir mi camino y darme fortaleza para no declinar ante las adversidades.

A mis padres, Kleber y Mercedes por el apoyo incondicional para cumplir mis sueños.

A mis hermanos, Fabián y Kleber por siempre acompañarme y apoyarme en todos los momentos.

A mi novio, Alex por siempre compartir conmigo los malos y peores momentos de mi vida y por todo su apoyo para cumplir este y todos mis objetivos, y por siempre brindarme su mano amiga y comprensión.

A todas las personas que de una u otra manera nos ayudaron a cumplir esta meta.

*Carina*

Dedico esta tesis primero a Dios por darme la fuerza para seguir adelante y por protegerme en todo momento.

A mis padres Miriam y Ciriano que gracias a su sacrificio, cariño y buenos valores he podido llegar hasta estas instancias de mi vida y ser la persona que soy para cumplir este sueño tan anhelado.

A mi hermano David que siempre ha esperado lo mejor para mí y a quien deseo lo mismo.

A mi tío Juan, porque ha sido como un padre más para mí por su gran apoyo durante todos estos años.

A mi novia Carina, que además ha sido mi gran amiga y compañera de estudios, con quien he compartido gratos momentos y me ha ayudado a superar grandes dificultades.

*Alex*

**FIRMAS DE RESPONSABILIDAD Y NOTA**

<b>NOMBRE</b>	<b>FIRMAS</b>	<b>FECHA</b>
Ing. Iván Menes <b>DECANO DE LA FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA</b>	.....	.....
Ing. Alberto Arellano <b>DIRECTOR DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA CONTROL Y REDES INDUSTRIALES</b>	.....	.....
Ing. Luis Fernando Chávez <b>DIRECTOR DE TESIS.</b>	.....	.....
Ing. Jorge Luis Paucar <b>MIEMBRO DEL TRIBUNAL</b>	.....	.....
<b>DIRECTOR DPTO DOCUMENTACIÓN</b>	.....	.....

**NOTA DE LA TESIS** .....

## **TEXTO DE RESPONSABILIDAD**

Nosotros, **CARINA ELIZABETH PAREDES FIERRO** y **ALEX JAVIER ORTEGA FUENTES** declaramos ser autores del presente trabajo de tesis “DESARROLLO DE UN SISTEMA DE PROCESAMIENTO DE PLÁSTICOS POR CALENTAMIENTO BASADO EN EL PRINCIPIO DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA”, haciéndonos responsables de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en esta tesis; y, el patrimonio de la misma pertenece a la **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**.

.....

**Carina Elizabeth Paredes Fierro**

**CI. 060375026-6**

.....

**Alex Javier Ortega Fuentes**

**CI. 172310153-9**

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

**A:** Área

**A:** Ánodo

**ABS:** Acrilonitrilo butadieno estireno

**B:** Campo magnético

**BI:** Bobina de inducción

**BPA:** Bisfenol A

**C:** Capacitancia

**c:** Calor específico

**CA:** Corriente alterna

**CC:** Corriente continua

**Cos:** Coseno

**d:** Diámetro externo de la pieza a calentar

**D:** Diámetro interno de la bobina

**d:** Distancia entre placas

**D:** Drain      Drenador

**E:** Eficiencia

**Ec.:** Ecuación

**ESR:** Equivalent Series Resistance      Resistencia Serie Equivalente

**F:** Faradio

**f:** Frecuencia

**Fem:** Fuerza electromotriz

**f<sub>r</sub>:** Frecuencia de resonancia

**G:** Galvanómetro

**G:** Gate      Compuerta

**H:** Intensidad de campo magnético

**H:** Henrio

**Hz:** Hertz

**I:** Intensidad de corriente

**I<sub>F</sub>:** Corriente de Foucault

**J:** Densidad de corriente

**J<sub>0</sub>:** Densidad de corriente en la superficie

**K:** Factor de corrección

**K:** Cátodo

**KCal:** Kilocaloría

**Kg:** Kilogramo

**KP:** Capacitores compuestos por placas de metal y como aislante el polipropileno

**K<sub>R</sub>:** Factor de corrección de la resistencia equivalente

**KS:** Capacitores compuestos por placas de metal y como aislante el poliestireno

**L:** Inductancia

**l:** Longitud

**m:** Metro

**m:** Masa

**MK:** Capacitor con armadura de metal vaporizado

**MKC:** Capacitores compuestos por placas de metal vaporizado y como aislante policarbonato

**MKP:** Capacitores compuestos por placas de metal vaporizado y como aislante polipropileno

**MKT:** Capacitores compuestos por placas de metal vaporizado y como aislante poliéster

**MKY:** Capacitores compuestos por placas de metal vaporizado y como aislante polipropileno de alta calidad

**MOSFET:** Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor Transistor de Efecto de Campo Metal Óxido Semiconductor

**N:** Número de espiras

**P:** potencia

**PA:** Poliamidas



**$P_{act}$** : Potencia activa

**$P_0$** : Potencia disipada en la superficie

**PC**: Policarbonato

**PE**: Polietileno

**PEAD**: Polietileno de alta densidad

**PEBD**: Polietileno de baja densidad

**PET** Polietileno tereftalato

**PH**: Phenolics Resinas fenólicas

**PIC**: Programmable Interrupt Controller      Controlador Programable de Interrupciones

**PMMA**: Polimetacrilato de metilo

**POM**: Polioximetileno

**PP**: Polipropileno

**$P_{react}$** : Potencia reactiva

**PS**: Poliestireno

**PUR**: Poliuretano

**PVC**: Policloruro de vinilo

**$Q$** : Factor de calidad

**$Q$** : Energía transferida en forma de calor

**$q$** : Carga eléctrica

**$r$** : Radio

**$R_e$** : Resistencia eléctrica

**$R_{eq}$** : Resistencia eléctrica equivalente

**S**: Superficie

**S**: Source      Fuente

**s**: Interruptor

**SAN**: Acrilonitrilo estireno

**SI**: Sistema internacional

**SP**: Set point      Punto de ajuste

**T:** Tesla

**T:** Temperatura

**t:** Tiempo

**USD:** United States Dollar      Dólar de Estados Unidos

**V:** Voltio

**Wb:** Webber

**X<sub>Cr</sub>:** Reactancia capacitiva

**X<sub>Lr</sub>:** Reactancia inductiva

**ZCS:** Zero Current Switching      Conmutación a cero corriente

**ZVS:** Zero Voltage Switching      Conmutación a cero voltaje

**δ:** Profundidad estándar de penetración.

**ℰ:** Fuerza electromotriz inducida

**μ<sub>r</sub>:** Permeabilidad magnética relativa

**μ<sub>0</sub>:** Constante de permeabilidad en el vacío

**ρ:** Densidad

**ρ:** Resistividad

**ω:** Frecuencia angular

**Φ<sub>B</sub>:** Flujo magnético

**ε:** Permitividad

**ΔT:** Diferencial de temperatura

**°C:** Grado centígrado

# ÍNDICE GENERAL

PORTADA

AGRADECIMIENTO

DEDICATORIA

FIRMAS DE RESPONSABILIDAD Y NOTA

TEXTO DE RESPONSABILIDAD

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

INTRODUCCIÓN

## CAPÍTULO I

I.	GENERALIDADES .....	- 21 -
1.1.	ANTECEDENTES.....	- 21 -
1.2.	JUSTIFICACIÓN .....	- 23 -
1.3.	OBJETIVOS .....	- 24 -
1.3.1.	OBJETIVO GENERAL .....	- 24 -
1.3.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	- 24 -
1.4.	HIPÓTESIS .....	- 24 -

## CAPÍTULO II

II.	MARCO TEÓRICO.....	- 25 -
2.1.	Principio de calentamiento por inducción electromagnética.....	- 25 -
2.1.1.	Ley de Ampere.....	- 26 -
2.1.2.	Ley de Faraday .....	- 27 -
2.1.3.	Ley de Lenz.....	- 28 -
2.1.4.	Efecto Joule.....	- 30 -
2.1.5.	Pérdidas por corrientes de Foucault .....	- 31 -
2.1.6.	Pérdidas por Histéresis .....	- 33 -
2.2.	Características de un sistema de calentamiento por inducción .....	- 34 -
2.2.1.	Energía transferida en forma de calor .....	- 34 -
2.2.2.	Profundidad de penetración.....	- 35 -
2.2.3.	Resistencia equivalente .....	- 39 -
2.2.4.	Rendimiento .....	- 39 -

2.2.5.	Impacto ambiental .....	- 40 -
2.3.	Componentes básicos de un sistema de calentamiento por inducción .....	- 40 -
2.3.1.	Alimentación eléctrica .....	- 41 -
2.3.1.1.	Transformador.....	- 41 -
2.3.2.	Etapa de rectificación.....	- 43 -
2.3.2.1.	Puente de diodos .....	- 43 -
2.3.2.2.	Condensadores .....	- 45 -
2.3.3.	Convertidor resonante y circuito RLC .....	- 47 -
2.3.3.1.	Resistencias .....	- 53 -
2.3.3.2.	Diodo Schottky.....	- 54 -
2.3.3.3.	Transistor MOSFET .....	- 55 -
2.3.3.4.	Capacitores de plástico.....	- 57 -
2.3.3.5.	Bobina de inducción.....	- 58 -
2.3.3.6.	Carga .....	- 61 -
2.3.4.	Sistema de refrigeración.....	- 62 -
2.3.5.	Sistema de control .....	- 62 -
2.4.	Aplicaciones del calentamiento por inducción electromagnética .....	- 62 -
2.4.1.	Temple .....	- 62 -
2.4.2.	Revenido .....	- 63 -
2.4.3.	Braseado.....	- 63 -
2.4.4.	Curado.....	- 63 -
2.4.5.	Soldadura .....	- 63 -
2.4.6.	Recocido.....	- 63 -
2.4.7.	Precalentamiento .....	- 63 -
2.4.8.	Postcalentamiento .....	- 64 -
2.4.9.	Forja .....	- 64 -
2.4.10.	Producción de plasma .....	- 64 -
2.4.11.	Enderezado.....	- 64 -
2.4.12.	Fusión.....	- 64 -
2.4.13.	Cocinas de inducción .....	- 64 -
2.5.	Procesamiento de plásticos .....	- 66 -
2.5.1.	Introducción .....	- 66 -
2.5.2.	Clasificación de los plásticos .....	- 66 -

2.5.2.1.	Elastómeros .....	- 66 -
2.5.2.2.	Termoestables .....	- 67 -
2.5.2.3.	Termoplásticos .....	- 67 -
2.5.3.	Polipropileno .....	- 70 -
2.5.4.	Procesamiento del plástico .....	- 71 -
2.5.4.1.	Moldeado por Inyección.....	- 71 -
2.6.	Sistema de control de temperatura on-off .....	- 72 -
2.6.1.	Funcionamiento del control on-off.....	- 74 -
2.6.2.	Elementos de un sistema de control de temperatura .....	- 75 -
2.6.2.1.	Sensor .....	- 75 -
2.6.2.2.	Acondicionador de señal .....	- 75 -
2.6.2.3.	Controlador .....	- 76 -
2.6.2.4.	Indicador .....	- 77 -
2.6.2.5.	Actuador.....	- 77 -

### CAPÍTULO III

#### III. DESARROLLO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO PARA EL PROCESAMIENTO DE PLÁSTICOS BASADO EN EL PRINCIPIO DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA..... - 78 -

3.1.	Determinación de parámetros .....	- 78 -
3.1.1.	Obtención de parámetros.....	- 80 -
3.1.1.1.	Cálculo térmico para obtención de la potencia necesaria.....	- 80 -
3.1.1.2.	Parámetros para la etapa de rectificación .....	- 92 -
3.1.1.3.	Parámetros de la etapa del convertidor resonante y circuito RLC .....	- 93 -
3.2.	Diseño e implementación del sistema de calentamiento por inducción .....	- 98 -
3.3.	Diseño e implementación del sistema de control de temperatura .....	- 106 -

### CAPÍTULO IV

#### IV. ANÁLISIS COMPARATIVO DEL SISTEMA CONVENCIONAL CON EL NUEVO SISTEMA..... - 114 -

4.1.	Pruebas .....	- 114 -
4.1.1.	Pruebas de funcionamiento .....	- 114 -
4.1.2.	Pruebas de funcionamiento continuo .....	- 115 -
4.2.	Comparación del nuevo sistema de calentamiento por inducción versus el sistema convencional .....	- 116 -
4.2.1.	Análisis comparativo en base al consumo energético .....	- 116 -

4.2.2.	Análisis comparativo en base a la eficiencia.....	- 119 -
4.2.3.	Análisis comparativo en base a la productividad .....	- 121 -
4.3.	Presupuesto del sistema de calentamiento por inducción desarrollado.....	- 124 -

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

RESUMEN

ABSTRACT

REFERENCIAS

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura II.1. Corriente eléctrica $I$ atravesando una superficie $S$ .....	- 26 -
Figura II.2. Montaje de experimento realizado por Faraday .....	- 27 -
Figura II.3. Dirección de la corriente inducida aumentando.....	- 29 -
Figura II.4. Dirección de la corriente inducida disminuyendo.....	- 29 -
Figura II.5. Sistema básico de calentamiento por inducción.....	- 32 -
Figura II.6. Circuito equivalente de calentamiento por inducción.....	- 32 -
Figura II.7. Pérdidas por histéresis.....	- 33 -
Figura II.8. Distribución de la corriente y potencia en función de la profundidad. ....	- 36 -
Figura II.9. Curva de la profundidad de penetración en función de la frecuencia para ciertos materiales. ....	- 37 -
Figura II.10. Acople entre bobina de inducción y pieza a calentar. ....	- 40 -
Figura II.11. Esquema de un sistema de calentamiento por inducción .....	- 41 -
Figura II.12. Alimentación eléctrica .....	- 41 -
Figura II.13. Transformador.....	- 42 -
Figura II.14. Etapa de rectificación.....	- 43 -
Figura II.15. Polarización de un diodo.....	- 44 -
Figura II.16. Configuración puente de diodos.....	- 44 -
Figura II.17. Conducción de diodos en semiciclo positivo .....	- 44 -
Figura II.18. Conducción de diodos en semiciclo negativo .....	- 45 -
Figura II.19. Forma de onda del voltaje de salida.....	- 45 -
Figura II.20. Condensador con polarización .....	- 46 -
Figura II.21. Encendido y apagado con ZCS .....	- 48 -
Figura II.22. Encendido y apagado con ZVS .....	- 48 -
Figura II.23. Circuito equivalente serie de la bobina .....	- 50 -
Figura II.24. Circuito equivalente paralelo de la bobina y resistencia de la carga.....	- 51 -
Figura II.25. Circuito RLC paralelo .....	- 51 -
Figura II.26. Convertidor resonante y circuito RLC .....	- 52 -
Figura II.27 . Resistencias o resistores.....	- 53 -
Figura II.28. Símbolo de un diodo Schottky .....	- 54 -
Figura II.29. Curva característica de un diodo Schottky .....	- 55 -
Figura II.30. Estructura interna simplificada de un MOSFET de potencia canal n. ....	- 56 -
Figura II.31. Símbolo y curva característica de un transistor MOSFET .....	- 56 -

Figura II.32. Símbolos de los diferentes tipos de bobina .....	- 59 -
Figura II.33. Bobina solenoide.....	- 59 -
Figura II.34. Bobina toroidal.....	- 60 -
Figura II.35. Ejemplo de configuraciones típicas para bobinas de inducción.....	- 61 -
Figura II.36. Patrón de calentamiento producido por una bobina de una espira en un objeto cilíndrico. ....	- 61 -
Figura II.37. Aplicaciones del calentamiento por inducción .....	- 65 -
Figura II.38. Varios plásticos .....	- 66 -
Figura II.39. Símbolo del polipropileno.....	- 70 -
Figura II.40. Máquina inyectora de plástico .....	- 72 -
Figura II.41. Señal de salida vs señal de error en un control on off.....	- 73 -
Figura II.42. Acción de control on-off .....	- 74 -
Figura II.43. Acción de control on-off con histéresis .....	- 74 -
Figura II.44. Esquema del sistema de control de temperatura .....	- 75 -
Figura II.45. Termocupla tipo k .....	- 75 -
Figura II.46. Diagrama de bloques funcional del acondicionador de señal AD595.....	- 76 -
Figura II.47. PIC 16F877A .....	- 76 -
Figura II.48. LCD LM032L .....	- 77 -
Figura II.49. Relé electromecánico .....	- 77 -
Figura III.1. Etapa de calentamiento de la máquina inyectora de plástico.....	- 78 -
Figura III.2. Esquema de componentes de cada sistema de calentamiento por sección .....	- 79 -
Figura III.3. Transformador utilizado .....	- 98 -
Figura III.4. Diseño de la etapa rectificadora realizada en ISIS.....	- 99 -
Figura III.5. Diseño de la etapa rectificadora realizada en ARES .....	- 99 -
Figura III.6. Pistas del circuito electrónico de la etapa de rectificación .....	- 99 -
Figura III.7. Pistas en baquelita de la etapa de rectificación.....	- 100 -
Figura III.8. Fuentes de alimentación implementadas .....	- 100 -
Figura III.9. Diseño del circuito convertidor resonante realizado en ISIS.....	- 101 -
Figura III.10. Diseño del circuito convertidor resonante realizado en ARES.....	- 101 -
Figura III.11. Pistas del circuito convertidor resonante .....	- 102 -
Figura III.12. Placa con los circuitos convertidor resonante implementada (vistas frontal y posterior).....	- 102 -
Figura III.13. Planchas de cobre y rieles de aluminio para bancos de capacitores .....	- 103 -



Figura III.14. Bancos de capacitores implementados .....	- 103 -
Figura III.15. Esquema general de las bobinas de inducción.....	- 104 -
Figura III.16. Bobina de inducción elaborada.....	- 104 -
Figura III.17. Caja de trabajo (vistas lateral y superior) .....	- 105 -
Figura III.18. Ubicación de los circuitos en el interior de la caja de trabajo .....	- 106 -
Figura III.19. Termostato mecánico.....	- 107 -
Figura III.20. Circuito de la fuente de alimentación de 5V.....	- 107 -
Figura III.21. Conexión básica del AD595 con una sola fuente de operación.....	- 108 -
Figura III.22. Circuito indicador de temperatura .....	- 108 -
Figura III.23. Diseño de circuitos de alimentación 5V, acondicionador e indicador realizado en ISIS .....	- 109 -
Figura III.24. Diseño de circuitos de alimentación 5V, acondicionador e indicador realizado en ARES .....	- 109 -
Figura III.25. Pistas de los circuitos de alimentación 5V, acondicionador e indicador .....	- 110 -
Figura III.26. Placa implementada con circuitos de alimentación 5V, acondicionador e indicador.....	- 110 -
Figura III.27. Diseño del relé electromecánico realizado en ISIS.....	- 111 -
Figura III.28. Diseño del relé electromecánico realizado en ARES .....	- 111 -
Figura III.29. Pistas del relé electromecánico .....	- 112 -
Figura III.30. Placa implementada con el relé electromecánico .....	- 112 -
Figura III.31. Sistema de control de temperatura implementado (vistas superior y frontal).-	- 113 -
Figura III.32. Diagrama de flujo del sistema completo.....	- 113 -
Figura IV.1. Consumo mensual en KWh de los sistemas de calentamiento comparados.....	- 118 -
Figura IV.2. Costo mensual en USD de los dos sistemas de calentamiento comparados.....	- 118 -
Figura IV.3. Eficiencia en porcentaje de cada sistema de calentamiento analizado .....	- 121 -
Figura IV.4. Producción mensual de armadores con cada sistema de calentamiento .....	- 123 -
Figura IV.5. Utilidad mensual en USD con cada sistema de calentamiento.....	- 123 -

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla II-I. Densidad y calor específico de materiales de interés.....	- 35 -
Tabla II-II. Eficiencia de un calentador de inducción típico.....	- 38 -
Tabla II-III. Frecuencias aproximadas para el calentamiento de ciertos materiales .....	- 38 -
Tabla II-IV. Características típicas de capacitores comerciales de plástico.....	- 58 -
Tabla II-V. Permeabilidad relativa de materiales más comunes .....	- 60 -
Tabla II-VI. Tecnologías aplicadas para ciertas aplicaciones industriales.....	- 65 -
Tabla II-VII. Características y propiedades de los elastómeros.....	- 66 -
Tabla II-VIII. Propiedades de los termoestables .....	- 67 -
Tabla II-IX. Propiedades de los termoplásticos .....	- 68 -
Tabla II-X. Símbolos y aplicaciones de los termoplásticos .....	- 69 -
Tabla III-I. Tabla de energías y potencias requeridas por cada sección y energía total requerida .....	- 91 -
Tabla III-II. Colores de núcleos toroidales y sus frecuencias asociadas .....	- 94 -
Tabla III-III. Valores de inductancias para cada bobina de inducción.....	- 95 -
Tabla III-IV. Datos técnicos de cables de cobre AWG.....	- 105 -
Tabla IV-I. Datos obtenidos en las pruebas de funcionamiento.....	- 115 -
Tabla IV-II. Datos obtenidos en las pruebas de funcionamiento .....	- 116 -
Tabla IV-III. Consumo energético del sistema de calentamiento basado en resistencias eléctricas.....	- 117 -
Tabla IV-IV. Consumo energético proyectado del sistema de calentamiento basado en inducción electromagnética .....	- 117 -
Tabla IV-V. Energía consumida por sistema de calentamiento basado en resistencias eléctricas.....	- 119 -
Tabla IV-VI. Energía consumida proyectada para sistema de calentamiento por inducción	- 120 -
Tabla IV-VII. Comparación entre sistemas de calentamiento de productividad.....	- 122 -
Tabla IV-VIII. Elementos utilizados en la etapa de alimentación eléctrica .....	- 124 -
Tabla IV-IX. Elementos utilizados en la etapa de rectificación eléctrica. ....	- 124 -
Tabla IV-X. Elementos utilizados en la etapa del convertidor resonante .....	- 125 -
Tabla IV-XI. Elementos utilizados para los bancos de capacitores .....	- 125 -
Tabla IV-XII. Elementos utilizados en el sistema de control e indicador de temperatura....	- 126 -
Tabla IV-XIII. Elementos utilizados para la caja de trabajo y bobina de inducción.....	- 127 -
Tabla IV-XIV. Costos varios .....	- 128 -

## INTRODUCCIÓN

La fusión de plásticos es un proceso físico, el cual se produce por un aumento de temperatura proveniente de una fuente de calor que cambia el material de estado sólido a líquido para posteriormente moldearlo.

Para la generación de calor existen varias técnicas basadas en electricidad o en la quema de combustibles fósiles, provocando grandes consumos de energía y contaminación ambiental.

PARTIPLAST es una empresa riobambeña dedicada a la producción de armadores plásticos de polipropileno la cual cuenta con una máquina inyectora de plásticos para tal fin, máquina que fue utilizada con el fin de obtener los parámetros necesarios para el desarrollo de un sistema de calentamiento por inducción.

El desarrollo de la presente tesis de tipo investigativo y aplicativo está basado en el principio de calentamiento por inducción electromagnética, el mismo que suministra calor de forma rápida, estable, pura y eficiente, para su uso en la fundición de plásticos.

Se realizó un sistema de calentamiento por inducción electromagnética que cubrirá los requerimientos de una sección de la etapa de calentamiento de la máquina inyectora de plástico perteneciente a la empresa PARTIPLAST, conjuntamente se desarrolló un óptimo control de temperatura.

El presente documento consta de cuatro capítulos:

El capítulo I describe los antecedentes, justificación, objetivos e hipótesis planteada en la tesis de grado.

En el capítulo II se presenta el marco teórico relacionado al principio de calentamiento por inducción como las características, componentes y aplicaciones de un sistema

basado en este principio, además información sobre el procesamiento de plásticos así como los principios de un sistema de control de temperatura.

En el capítulo III se describe todo los procedimientos referentes al desarrollo del sistema de calentamiento y del sistema de control de temperatura, además se incluyen los diseños e implementación.

El capítulo IV indica las pruebas y resultados obtenidos con el desarrollo del sistema.

Finalmente se presentan las conclusiones, recomendaciones, resumen, referencias, bibliografía y anexos.

## **CAPÍTULO I**

### **I. GENERALIDADES**

#### **1.1. ANTECEDENTES**

Desde hace varios años, alrededor del mundo, las industrias han venido empleando un método muy práctico y eficaz para generar calor en un lugar determinado, este método se denomina calentamiento por inducción electromagnética, el cual ofrece ventajas sobre otras técnicas de calentamiento entre las que se pueden mencionar el aumento en las tasas de productividad, eficiencia energética, mejor control y automatización del proceso, mejor calidad del producto, mayor contribución con el medio ambiente y menor costo de mantenimiento de la máquina calentada por inducción.

En la actualidad el calentamiento por inducción electromagnética es utilizado ampliamente en industrias, que en su gran mayoría están localizadas en Estados Unidos, Asia y Europa, y se ha implementado con satisfacción para procesos tales como el recocido, endurecimiento superficial, fusión, forjado en caliente, perforado, soldaduras, entre otras, demostrando así la versatilidad y efectividad de esta técnica.

Debido a la falta de información sobre esta técnica en el Ecuador y particularmente en la ciudad de Riobamba, este método de calentamiento no ha sido utilizado con el debido interés por parte de las industrias existentes.

El desarrollo de esta tesis tendrá un impacto de tipo innovación ya que esta técnica es muy poco empleada en el Ecuador y sería un gran aporte para futuros desarrollos basados en este principio.

También tendrá un impacto de tipo ambiental pues en este método de calentamiento no se queman combustibles fósiles, evitando de esta forma las emisiones tóxicas propias de los métodos de calentamiento tradicionales.

## **1.2. JUSTIFICACIÓN**

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

Con el desarrollo de esta tesis se contará con un método innovador en el Ecuador para el sistema de calentamiento en el procesamiento de plásticos, sistema que ha demostrado ser muy eficiente en muchas aplicaciones en las más grandes industrias alrededor del mundo.

Este nuevo sistema de calentamiento ofrecerá múltiples beneficios pues es una técnica limpia ya que no emite sustancias nocivas que contaminen el medio ambiente, es segura debido a que el calentamiento es dirigido a una sección específica evitando accidentes involuntarios y además se conseguirá un sistema eficiente por el considerable ahorro energético obtenido. Todas estas características se encuentran contempladas en los planes y programas para el uso eficiente de la energía impulsados por el gobierno.

En adición, con el desarrollo de este proyecto de tesis se pretende fomentar futuras investigaciones en esta área tan interesante y con tanto potencial, ya que el calentamiento por inducción electromagnética encierra grandes capacidades en muchos campos diferentes de aplicación, no sólo en el campo de la tecnología industrial.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar un sistema de procesamiento de plásticos por calentamiento basado en el principio de inducción electromagnética.

#### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Estudiar el principio de inducción electromagnética para el calentamiento en el procesamiento de plásticos.
- Desarrollar un control de temperatura óptimo para el nuevo sistema de calentamiento.
- Aplicar el nuevo sistema de calentamiento en una máquina inyectora de plástico.
- Evaluar la eficiencia en función del tiempo considerando el nuevo sistema de calentamiento versus el sistema convencional.

### **1.4. HIPÓTESIS**

Mediante la implementación de estudios de sistemas de calentamiento para el procesamiento de plásticos basado en el principio de inducción electromagnética se mejorará la productividad de las máquinas.



## **CAPÍTULO II**

### **II. MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Principio de calentamiento por inducción electromagnética**

El calentamiento mediante inducción electromagnética es una técnica basada en la inducción de un campo magnético variable en el tiempo sobre un conductor.

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

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

Con la inducción electromagnética es posible trabajar sobre un área determinada del objeto a ser calentado, ayudando a tener un mayor control del proceso.

### 2.1.1. Ley de Ampere

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

Suponiendo una superficie abierta  $S$  cualquiera con su curva limitadora  $l$  en una región del espacio por donde circulan corrientes eléctricas, las componentes del campo magnético  $B$  a lo largo de dicha curva, están relacionados con la corriente neta  $I$  que pasa por la superficie en su sentido hacia afuera a través de la expresión:

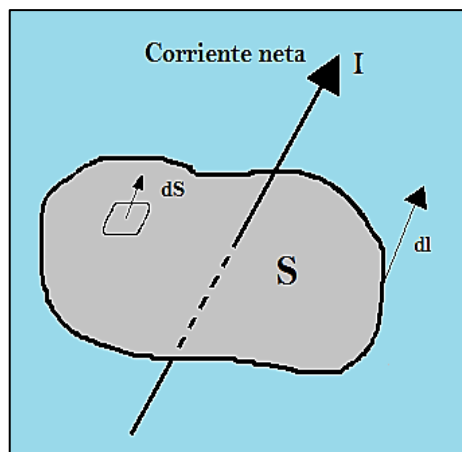
$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I \quad (\text{Ec. 1})$$

Siendo:

$\oint d\mathbf{l}$ : Integral cerrada de la línea.

$I$ : Corriente neta que atraviesan la superficie  $S$  que describe la trayectoria cerrada  $d\mathbf{l}$ .

$\mu_0$ : Constante de permeabilidad en el vacío =  $4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2} \left[ \frac{\text{Weber}}{\text{Amp-metro}} \right]$



**Figura II.1.** Corriente eléctrica  $I$  atravesando una superficie  $S$

**Fuente:** Infante, P. (2009). Electromagnetismo Básico e Introducción a los Circuitos Eléctricos. Primera edición. Riobamba: E-COPYCENTER. P. 188.

La ecuación que describe el efecto magnético de campos eléctricos o corrientes variables es:

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \left( \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} + I \right) \quad (\text{Ec. 2})$$

Si en un inductor, el cual por lo general se trata de una bobina de un material conductor, circula una corriente eléctrica se formará un campo magnético donde su distribución y amplitud están dadas por la ley de Ampere:

$$NI = \oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = H l \quad (\text{Ec. 3})$$

Siendo:

N: El número de espiras del inductor.

I: Corriente que atraviesa por el inductor.

H: Intensidad del campo magnético.

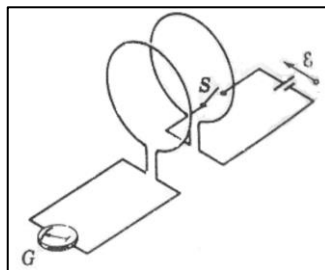
l: Longitud del inductor.

Mientras que si la corriente es alterna entonces se utiliza la ecuación de Faraday explicada en breve. Por lo tanto, la Ley de Ampere es válida para:

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

### 2.1.2. Ley de Faraday

Cuando circula una corriente eléctrica continua por un conductor se produce un campo magnético alrededor de éste, es así que Michael Faraday (1831) tuvo la idea de que un campo magnético estacionario podía generar una corriente. Para demostrar su teoría, Faraday realizó una serie de experimentos como el de la figura II.2:



**Figura II.2.** Montaje de experimento realizado por Faraday  
**Fuente:** <http://ing.unne.edu.ar/pub/fisica3/170308/teo/teo5.pdf>

Este experimento consistía en colocar dos bobinas en reposo una con respecto a la otra, como se ve en la figura anterior, y cerrar un interruptor (s) provocando así que circule una corriente constante en el bobinado derecho, entonces el galvanómetro (G) se desviaba por un instante y cuando el interruptor se abría el galvanómetro se desviaba otra vez. Con este experimento, Faraday demostró que siempre que cambiara la corriente en la bobina derecha, se generará una fuerza electromotriz (*fem*) inducida, siendo de mayor importancia la rapidez con la que varía la corriente y no su magnitud.

La ley de Faraday expresa que la *fem* inducida ( $\mathcal{E}$ ) en un circuito será igual al valor negativo de la rapidez con la que se encuentra variando el flujo ( $d\Phi_B$ ) que se encuentra atravesando el circuito. Esta ley viene dada por la expresión:

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (\text{Ec. 4})$$

Este signo negativo indica el sentido de la fuerza electromotriz inducida. Si la bobina tiene varias espiras o vueltas, surgirá una fuerza electromotriz inducida en cada una de las espiras, así la *fem* inducida será:

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (\text{Ec. 5})$$

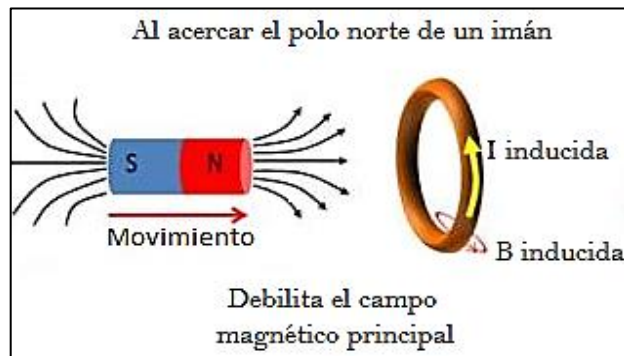
En pocas palabras la fuerza electromotriz que se induce en un circuito es directamente proporcional al número de vueltas que posee el inducido y proporcional a la rapidez con la que cambia el flujo magnético que atraviesa el circuito.

### 2.1.3. Ley de Lenz

La ley de Lenz expresada en términos del aporte de la corriente inducida sobre el campo magnético total puede ser de la siguiente forma: “*el sentido de la corriente inducida es tal que su contribución al campo magnético total se opone a la variación del flujo de*

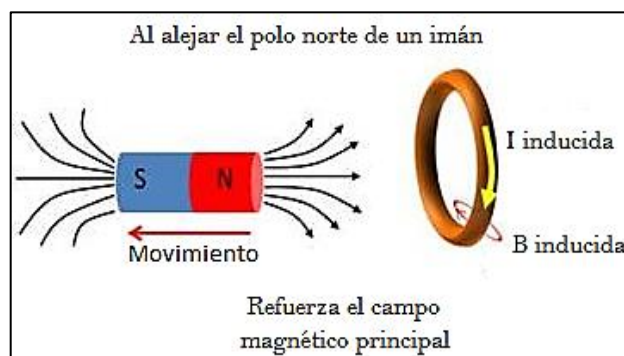
*campo magnético que produce la corriente inducida*”[1], en otras palabras podemos decir que la corriente inducida aparece en un sentido tal que se opone a la causa que la produce.

El signo negativo en la Ley de Faraday sugiere esta oposición, lo que significa que, si el flujo magnético que está atravesando el interior de una espira se encuentra en aumento (figura II.3) la corriente inducida crea un flujo en dirección opuesta para que se oponga a este aumento. Inversamente si el flujo magnético que está atravesando el interior de una espira se encuentra disminuyendo (figura II.4) entonces la corriente inducida crea un flujo en la misma dirección para que se oponga a esta disminución.



**Figura II.3.** Dirección de la corriente inducida aumentando.

**Fuente:** [http://fisica.cubaeduca.cu/medias/interactividades/inducci%C3%B3nelect/co/modulo\\_%20contenido\\_32.html](http://fisica.cubaeduca.cu/medias/interactividades/inducci%C3%B3nelect/co/modulo_%20contenido_32.html)



**Figura II.4.** Dirección de la corriente inducida disminuyendo.

**Fuente:** [http://fisica.cubaeduca.cu/medias/interactividades/inducci%C3%B3nelect/co/modulo\\_%20contenido\\_32.html](http://fisica.cubaeduca.cu/medias/interactividades/inducci%C3%B3nelect/co/modulo_%20contenido_32.html)

El flujo de un campo magnético uniforme a través de un circuito plano viene dado por:

$$\Phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{S} \cdot \cos\alpha \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

$\Phi$  = Flujo magnético. La unidad en el SI es el weber (Wb).

$B$  = Inducción magnética. La unidad en el SI es el tesla ( $T$ ).

$S$  = Superficie del conductor. ( $m^2$ )

$\alpha$  = Ángulo que forman el conductor y la dirección del campo.

#### 2.1.4. Efecto Joule

Una corriente eléctrica es un movimiento de electrones los cuales tienen masa, y por tener una velocidad, adquieren cierta energía cinética. Además el movimiento de estos electrones es desordenado.

Cuando una corriente eléctrica circula por un material conductor, los electrones chocan con las moléculas de dicho conductor, hallando de esta forma un problema para circular libremente, el mismo que depende del material del conductor y que es conocido como resistencia eléctrica, lo cual provoca pérdidas de potencia y tensión y a su vez dan origen a un calentamiento del conductor. Este efecto es conocido como el efecto Joule.

El efecto Joule fue definido de la siguiente forma: *“La cantidad de energía calorífica producida por una corriente eléctrica, depende directamente del cuadrado de la intensidad de la corriente, del tiempo que ésta circula por el conductor y de la resistencia que opone el mismo al paso de la corriente”* [2].

Y se la expresa de la siguiente manera:

$$Q = I^2 R_{eq} t \quad (\text{Ec. 7})$$

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

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

Donde:

$Q$  = Energía calorífica producida por la corriente expresada en Julios [W.s]

$I$  = intensidad de la corriente que circula

$R_{eq}$  = resistencia eléctrica equivalente del conductor

$t$  = tiempo

$P$  = Potencia disipada en el inducido

### **2.1.5. Pérdidas por corrientes de Foucault**

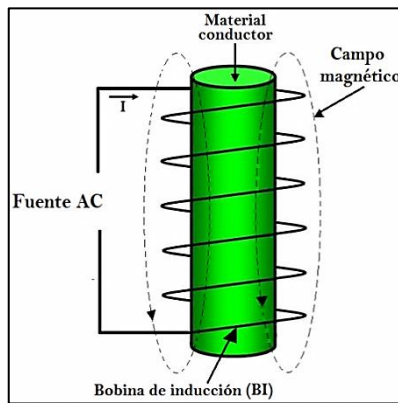
Las corrientes de Foucault (también conocidas como corrientes parásitas, corrientes torbellino, o Eddy currents en inglés) es un fenómeno eléctrico descubierto por el físico francés Léon Foucault en 1851. Se produce cuando un conductor (con o sin propiedades magnéticas) atraviesa un campo magnético variable, o viceversa. Este movimiento relativo causa una circulación de electrones, o corriente inducida dentro del conductor. Estas corrientes circulares de Foucault crean electroimanes con campos magnéticos que se oponen al efecto del campo magnético aplicado (Ley de Lenz). Cuanto más fuerte sea el campo magnético aplicado, o mayor la conductividad del conductor, o mayor la velocidad relativa de movimiento, mayores serán las corrientes de Foucault y los campos opositores generados.

Las corrientes de Foucault crean pérdidas de energía a través del efecto Joule. Más concretamente, dichas corrientes transforman formas útiles de energía, como la cinética, en calor no deseado, por lo que generalmente es un efecto inútil, sin embargo para el desarrollo de la presente tesis serán de gran importancia.

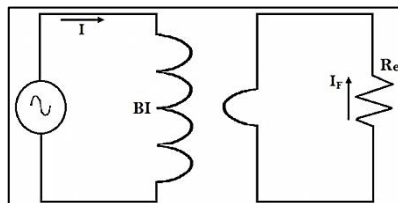
Para comprender este efecto se toma como ejemplo, un material conductor de forma cilíndrica introducido dentro una bobina solenoide, (Figura II.5), por la cual se hace circular corriente alterna (CA). Con esto, la magnitud y dirección del campo magnético,

que rodea a la bobina, varían en el tiempo acorde varía la magnitud y la dirección de la corriente a través de la bobina produciendo que el número de líneas en el campo magnético, o flujo magnético, que cortan de un lado a otro al material conductor, varíe. Esta variación en el flujo induce un voltaje, o fuerza electromotriz,  $\mathcal{E}$ , cuya intensidad depende del número de vueltas de la bobina; lo que se conoce como la Ley de Faraday (Ecuación 3).

Este voltaje inducido produce las corrientes parásitas de Foucault,  $I_F$ , cuya magnitud dependerá de la resistencia eléctrica del material y su signo es opuesto a la corriente en la bobina (Figura II.6). Utilizando la Ley de Ohm se obtiene que  $I_F = \mathcal{E}/R_e$ , donde  $R_e$  es la resistencia eléctrica de la pieza. Estas corrientes inducidas en el interior del material conductor producen el calentamiento térmico, debido al Efecto Joule, disipando potencia en la resistencia del objeto. La potencia en mención será proporcional al cuadrado de la corriente en el elemento resistivo ( $I_F^2 * R_e$ ).



**Figura II.5.** Sistema básico de calentamiento por inducción.  
**Fuente:** Realizado por los autores.

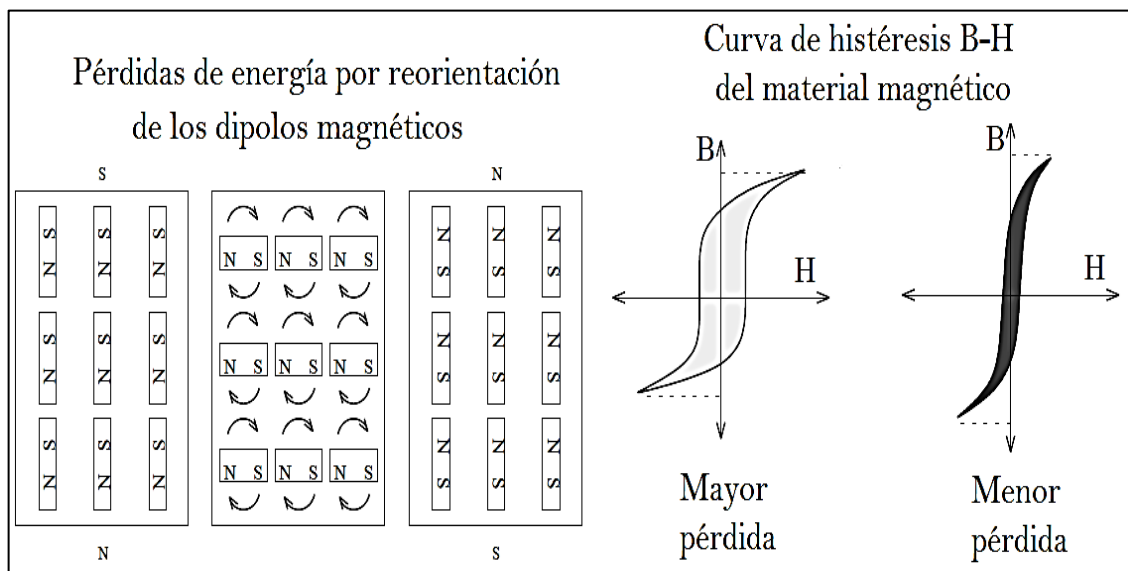


**Figura II.6.** Circuito equivalente de calentamiento por inducción.  
**Fuente:** Realizado por los autores.



### 2.1.6. Pérdidas por Histéresis

Cuando un material conductor presenta propiedades magnéticas, además de las pérdidas por corrientes parásitas se añaden las pérdidas por histéresis. Este tipo de pérdidas es provocado por la fricción entre las moléculas del material a calentar, cuando éste es magnetizado de forma alterna, es decir primero en una dirección y luego en otra. A las moléculas se las puede considerar como pequeños magnetos que se hacen girar con cada inversión de dirección del campo magnético. La energía requerida para girar estas moléculas se convierte en calor y se incrementa a medida que aumenta la frecuencia del campo magnético, además es proporcional al área encerrada por la curva de histéresis B-H del material magnético (respuesta magnética B del material y el campo H externo aplicado). Esta histéresis es provocada por una discontinuidad de los valores de magnetización en un material magnético debido al cambio de los campos magnéticos. Sin embargo las pérdidas por corrientes de Foucault aportan con mayor calentamiento que las pérdidas por histéresis.



**Figura II.7.** Pérdidas por histéresis

**Fuente:** González, W. (2008). Diseño y Construcción de Bobina de Calentamiento por Inducción para Fundición de Titanio (Tesis de Grado). Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Venezuela. P. 7.

## 2.2. Características de un sistema de calentamiento por inducción

### 2.2.1. Energía transferida en forma de calor

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

El calor es una forma de energía, la cual es transmitida entre dos cuerpos o sistemas, causado por un cambio de temperatura.

La diferencia de temperatura de cada sistema dependerá entre otras, del calor específico del elemento que forma el cuerpo.

*“El calor específico se define como la cantidad de calor necesaria para que una unidad de masa de sustancia incremente su temperatura en un grado” [3]. Se representa:*

$$c = \frac{1}{m} \frac{\delta Q}{dT} \quad (\text{Ec. 10})$$

Siendo  $\delta Q$  el calor requerido por el objeto con masa  $m$ , para que varíe el valor de su temperatura en  $dT$ .

Para variaciones no muy grandes en la temperatura del cuerpo, el valor de  $c$  es considerado como constante, entonces el valor de la energía transferida en forma de calor se expresa como:

$$Q = m c \Delta T \quad (\text{Ec. 11})$$

Donde:

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

m: Masa del objeto a calentar. [Kg]

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

$\Delta T$ : Diferencial de temperatura del objeto. [°C]

**Tabla II-I.** Densidad y calor específico de materiales de interés.

Material	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Calor específico (Kcal/Kg°C)
Acero	8238	0,11
Polipropileno	946	0,48
Tungsteno	19250	0,037

**Fuente:** [http://www.esi2.us.es/~jfc/Descargas/TC/Coleccion\\_tablas\\_graficas\\_TC.pdf](http://www.esi2.us.es/~jfc/Descargas/TC/Coleccion_tablas_graficas_TC.pdf)

### 2.2.2. Profundidad de penetración

La profundidad de penetración representa la distancia medida desde la superficie del objeto a calentar hasta el interior del mismo, distancia a la cual se realiza el cálculo de la densidad de corriente. Una de las características importantes que se tiene en el calentamiento por inducción es que la distribución de las corrientes inducidas en el interior del objeto no es uniforme, este fenómeno se conoce con el nombre de efecto piel, cuyo enunciado dice *“Contra más grande sea la frecuencia de las corrientes en un conductor más se concentrarán estas en su superficie”*[4].

Para una carga de forma cilíndrica, con radio lo suficientemente grande, es posible obtener la potencia total disipada (**P**) y la densidad de corriente (**J**) que está atravesando la pieza mediante las ecuaciones:

$$P = \int_0^{\infty} P_0 e^{-\frac{2x}{\delta}} dx = P_0 \frac{\delta}{2} \quad (\text{Ec. 12})$$

$$J = \int_0^{\infty} J_0 e^{-\frac{x}{\delta}} dx = J_0 \delta \quad (\text{Ec. 13})$$

Dónde:

$P_0$ : Potencia disipada en la superficie

$J_0$ : Densidad de corriente en la superficie

$\delta$ : Profundidad estándar de penetración.

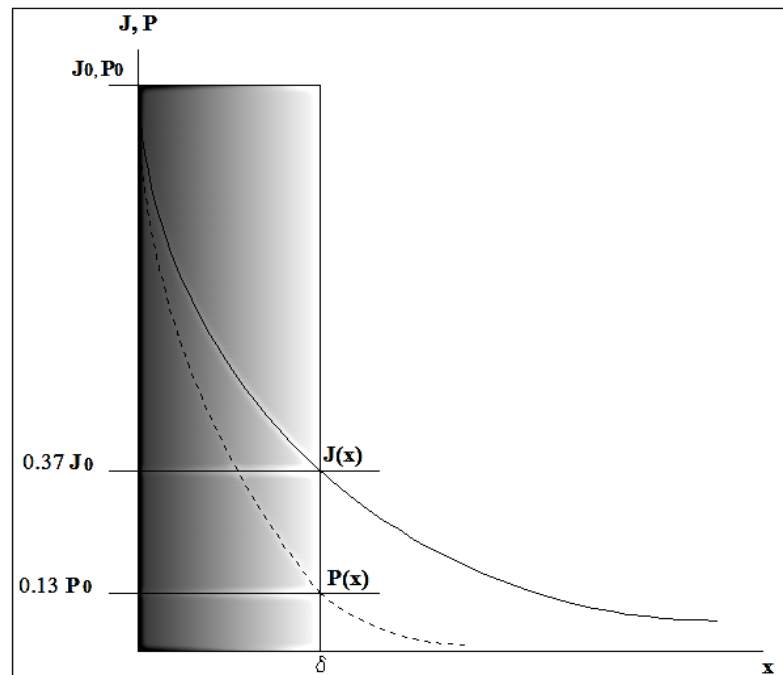
Si utilizamos la igualdad  $x=\delta$  en las ecuaciones anteriores, se tiene:

$$P(\delta) = P_0 \frac{1}{2e} \approx 0,13P_0 \quad (\text{Ec. 14})$$

$$J(\delta) = J_0 \frac{1}{e} \approx 0,37J_0 \quad (\text{Ec. 15})$$

Es así entonces que en la capa de espesor  $\delta$  se tiene un 87% de la potencia total disipada debida a un 63% de la densidad total de la corriente. Por lo tanto se puede afirmar que el efecto calorífico se encuentra ubicado en esta zona.

La figura II.8 representa gráficamente la distribución de la corriente y la potencia disipada desde la superficie hacia el interior del objeto a calentar.



**Figura II.8.** Distribución de la corriente y potencia en función de la profundidad.

**Fuente:** Gómez, E. (1999). Influencia de los Componentes Parásitos en el Análisis y Diseño de Inversores Resonantes Paralelo para Aplicaciones de Calentamiento por Inducción (Tesis Doctoral). Universidad de Valencia, Valencia, España. P.10.

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

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_0 \mu_r}} \quad (\text{Ec. 16})$$

De donde se tiene que:

$\rho$ : resistividad del material

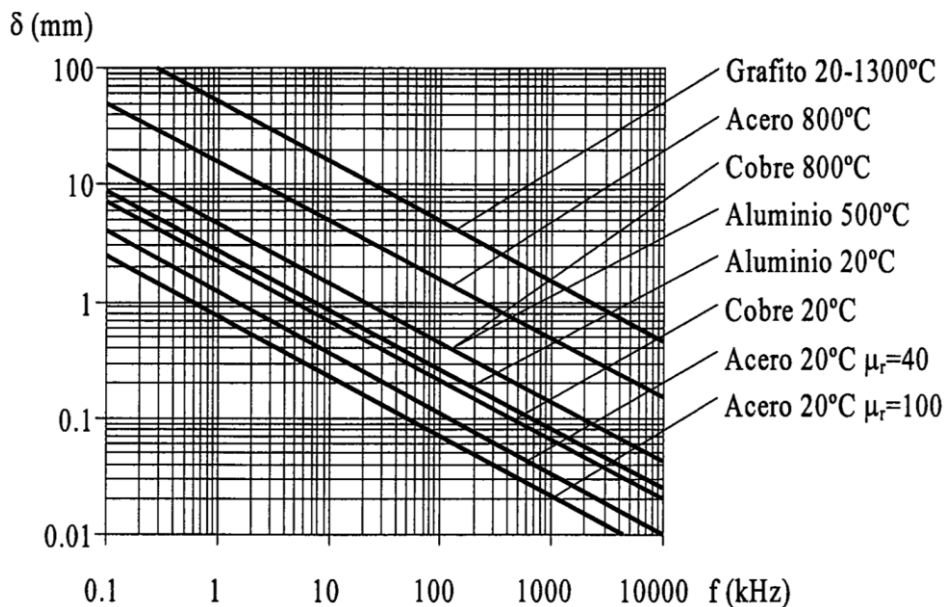
$f$ : frecuencia de trabajo

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

$\mu_r$ : permeabilidad magnética relativa del material.

Por lo tanto podemos ver que la profundidad de penetración depende de las características del material a calentar ( $\rho$ ,  $\mu_0$ ,  $\mu_r$ ) y de la frecuencia de trabajo, es así que la profundidad de penetración aumenta cuando la resistividad del objeto es mayor, y disminuye si la frecuencia es alta o la permeabilidad magnética relativa del objeto aumenta.

En la Figura II.9 se puede observar las curvas de la profundidad de penetración versus la frecuencia para ciertos materiales.



**Figura II.9.** Curva de la profundidad de penetración en función de la frecuencia para ciertos materiales.  
**Fuente:** Gómez, E. (1999). Influencia de los Componentes Parásitos en el Análisis y Diseño de Inversores Resonantes Paralelo para Aplicaciones de Calentamiento por Inducción (Tesis Doctoral). Universidad de Valencia., Valencia, España, P.11.

A continuación se muestra una tabla con los niveles de eficiencia de un calentador de inducción típica a determinadas temperaturas.

**Tabla II-II.** Eficiencia de un calentador de inducción típico

Material	Temperatura final (°C)	Eficiencia
Acero al carbono	1250	0,65
Acero al carbono	700	0,80
Acero inoxidable	1250	0,60
Latón	800	0,50
Cobre	900	0,40
Aluminio	500	0,40

**Fuente:** <http://www.efdinduction.com/~media/PDF/Applications/ApplicationsESP.ashx>

En la siguiente tabla podemos ver las frecuencias a determinadas temperaturas y profundidades de penetración de ciertos materiales típicos:

**Tabla II-III.** Frecuencias aproximadas para el calentamiento de ciertos materiales

Material					Frecuencia
Acero no magnético	Acero magnético	Latón	Cobre	Aluminio y aleaciones de aluminio	Hz
Temperatura final					
1,200°C	700°C	800°C	850°C	500°C	
Ø mm	Ø mm	Ø mm	Ø mm	Ø mm	
150-500	27-75	110-	50-	50-	50
60-250	8-35	35-440	22-800	22-800	500
40-175	6-25	30-300	15-600	15-600	1000
25-100	3,5-14	15-180	9-350	9-350	3000
20-85	2,5-10,5	10-130	7-260	7-260	5000
14-60	2-8,5	8-100	5-180	5-180	10000
10-40	1,5-5,5	6-75	3-125	3-125	20000
5-22	0,7-3,0	3,5-40	2-75	2-75	60000
4-17	0,5-2,0	2,5-30	1,5-60	1,5-60	100000
1,8-8	0,2-1,0	1,2-15	0,6-20	0,6-20	500000

**Fuente:** <http://www.efdinduction.com/~media/PDF/Applications/ApplicationsESP.ashx>

### 2.2.3. Resistencia equivalente

La obtención de este parámetro es importante para realizar el cálculo de la potencia disipada en la pieza a ser calentada (Ecuación 8) y que es producida por el efecto Joule, donde de forma análoga, la pieza a calentar se considera como el secundario de un transformador con una sola espira por donde circulará la corriente inducida y cuya resistencia equivalente para piezas con geometría cilíndrica se la puede expresar de la siguiente manera:

$$R_{eq} = K_R N^2 \rho \frac{2\pi r}{\delta l} \quad (\text{Ec. 17})$$

$$K_R = 1 - e^{-\frac{2r}{\delta}} \quad (\text{Ec. 18})$$

Siendo:

$K_R$ : Factor de corrección de la resistencia equivalente

$N$ : Número de espiras de la bobina de inducción

$\rho$ : Resistividad del objeto a calentar

$r$ : Radio del objeto a calentar

$\delta$ : Profundidad de penetración

$l$ : Longitud del objeto a calentar

### 2.2.4. Rendimiento

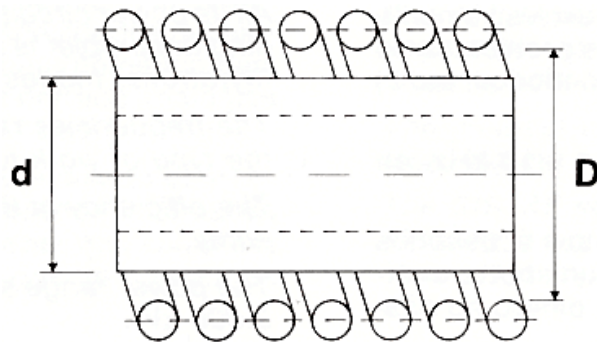
El rendimiento de un sistema de calentamiento por inducción se puede ver como una relación entre pieza e inductor, como concepto de la eficacia con la que la bobina de inducción calentará a un objeto. Esta relación se verá favorecida por factores como:

- Una resistividad elevada del objeto a ser calentada.
- Una resistividad reducida del inductor.
- Propiedad ferromagnética del material del objeto a calentar.

- Excelente acoplamiento geométrico entre la bobina de inducción y la pieza a calentar, el cual depende del factor  $K$ , calculado así:

$$K = \left(\frac{d}{D}\right)^3 \quad (\text{Ec. 19})$$

Siendo  $d$  es el valor del diámetro exterior de la pieza y  $D$  el diámetro interior de la bobina de inducción. El valor de  $K$  generalmente varía entre 0 y 1, entre más sea su valor próximo a 1 mayor será el rendimiento del sistema.



**Figura II.10.** Acople entre bobina de inducción y pieza a calentar.

**Fuente:** <http://electromagnetismo2010a.wikispaces.com/file/view/FUNDAMENTOS+DE+CALENTAMIENTO+POR+INDUCCION.docx>

### 2.2.5. Impacto ambiental

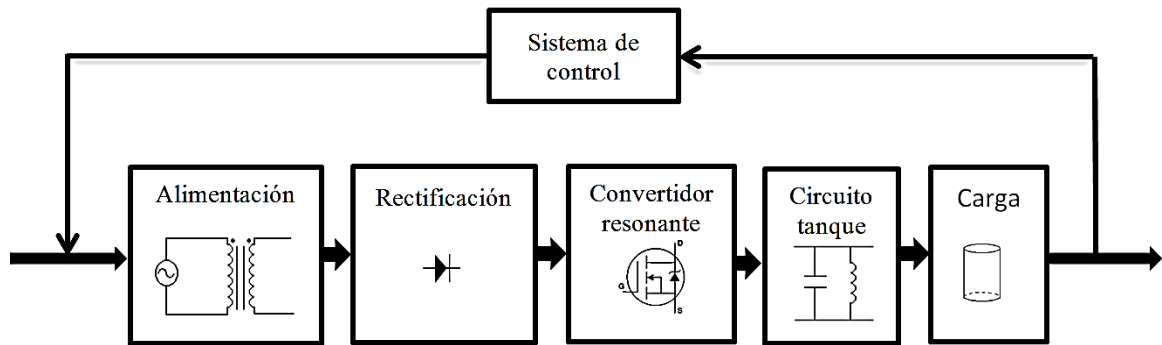
Los procesos que utilizan sistemas de calentamiento por inducción son procesos limpios, pues no se queman combustibles fósiles como en otros sistemas tradicionales colaborando así con la protección del medioambiente, además con este tipo de sistema se mejora notablemente el ambiente laboral para los trabajadores pues el humo desaparece del proceso así como las emisiones dañinas, calor descontrolado y ruido.

En adición con este proceso los objetos no conductivos no sufren riesgo de daño y es posible colocarlos en áreas cercanas a donde se está produciendo el calentamiento.

### 2.3. Componentes básicos de un sistema de calentamiento por inducción

Los componentes a continuación son los básicos y comúnmente utilizados para realizar sistemas de calentamiento que se basan en el principio de inducción electromagnética.

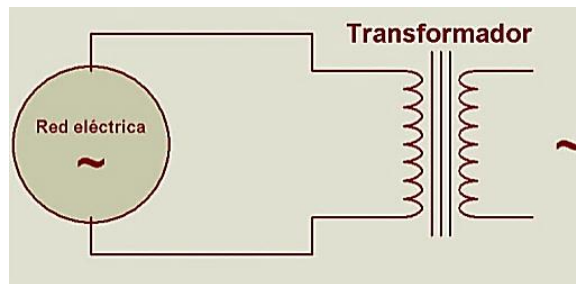




**Figura II.11.** Esquema de un sistema de calentamiento por inducción  
**Fuente:** Realizado por los autores

### 2.3.1. Alimentación eléctrica

El sistema de alimentación eléctrica consta de un transformador que recibe la alimentación de la red para reducir su voltaje a valores requeridos por el circuito. El esquema se muestra en la figura II.12.

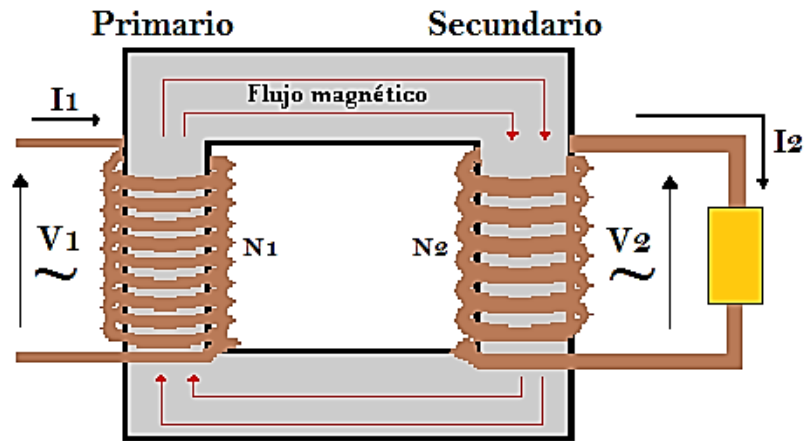


**Figura II.12.** Alimentación eléctrica  
**Fuente:** Realizado por los autores

#### 2.3.1.1. Transformador

Un transformador es un dispositivo eléctrico que trabaja con tensiones alternas y que normalmente disminuye el voltaje suministrado por la red, el cual por lo general es de 120V ó 220V, a un voltaje apropiado para su uso en diferentes equipos eléctricos.

Un transformador está conformado por dos bobinados, un primario y un secundario, situados en un núcleo de hierro. Estos bobinados tienen la característica de ser autónomos y la forma de transferir energía eléctrica desde el bobinado primario, que se encuentra conectado a la red, hacia el secundario, es como energía magnética a través de su núcleo. A continuación se muestra un esquema del transformador:



**Figura II.13.** Transformador.  
**Fuente:** Realizado por los autores

Por el bobinado primario circulará una corriente, la misma que produce que una corriente magnética circule a través del núcleo, siendo esta corriente directamente proporcional al número de espiras del bobinado primario.

Mientras que la corriente magnética que está circulando a través del núcleo genera en el bobinado secundario una tensión directamente proporcional, tanto a dicha corriente magnética como al número de espiras del bobinado secundario.

Entonces el voltaje de salida del transformador dependerá del voltaje de entrada y de la cantidad de espiras del primario y del secundario mediante la fórmula general:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (\text{Ec. 20})$$

Donde  $N_1$  es el número de espiras del primario y  $N_2$  del secundario.

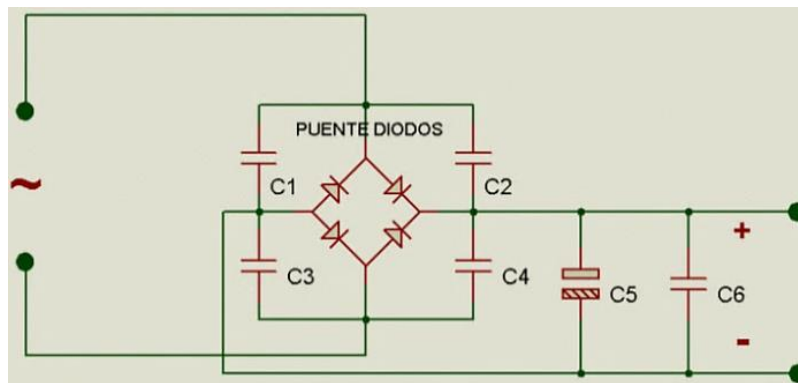
De igual manera que para el voltaje, la corriente también depende de la relación de espiras pero al revés, mediante la fórmula:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (\text{Ec. 21})$$

Siendo  $I_1$  e  $I_2$  las corrientes en el primario y secundario respectivamente.

### 2.3.2. Etapa de rectificación

Esta etapa se encarga de convertir la tensión de corriente alterna de salida del transformador en una tensión de corriente continua, en otras palabras convierte la energía de CA en CC. Para obtener este resultado, en la actualidad existen muchas configuraciones y dispositivos semiconductores para tal fin. Una eficaz configuración se muestra en la figura II.14.



**Figura II.14.** Etapa de rectificación  
**Fuente:** Realizado por los autores

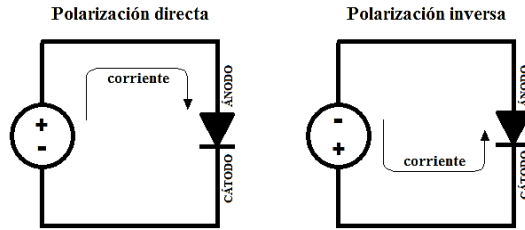
En esta configuración se utiliza un puente de diodos para realizar una rectificación de onda completa, los capacitores cerámicos C1, C2, C3 y C4 se encargan de filtrar señales provenientes del transformador evitando así interferencias indeseadas, mientras que el condensador electrolítico C5 y el capacitor cerámico C6 son los encargados de filtrar la señal de corriente continua pulsante.

#### 2.3.2.1. Puente de diodos

El diodo es un dispositivo semiconductor que desempeña un papel importante en los sistemas electrónicos. Posee características que son muy similares a las de un interruptor sencillo.

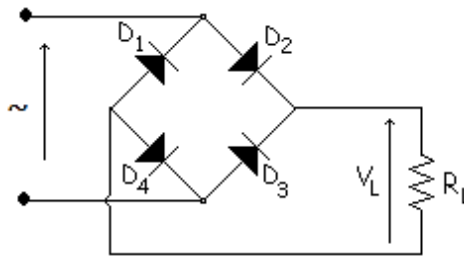
Como el diodo es un dispositivo de dos terminales, conocidos como Ánodo (A) y Cátodo (K), la aplicación de un voltaje a través de sus terminales permite tres

posibilidades: *sin polarización* ( $V_D=0V$ ), *polarización directa* ( $V_D>0V$ ) comportándose como un conductor y *polarización inversa* ( $V_D<0V$ ) comportándose como un circuito abierto.



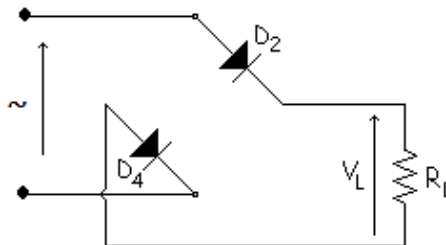
**Figura II.15.** Polarización de un diodo  
**Fuente:** Realizado por los autores

El nivel de CC que se obtienen a partir de una entrada sinusoidal puede mejorar al 100% si se utiliza un proceso que se llama rectificación de onda completa para lo cual se utiliza una configuración de 4 diodos como se muestra en la figura II.16 y que se denomina puente de diodos.



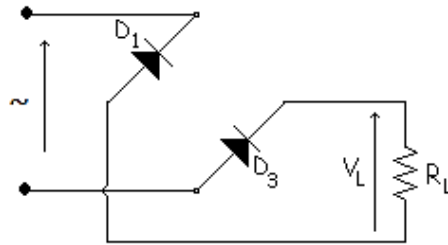
**Figura II.16.** Configuración puente de diodos  
**Fuente:** Realizado por los autores

Durante el semiciclo positivo de la tensión de entrada, los diodos D<sub>2</sub> y D<sub>4</sub> conducen, esto da lugar a un semiciclo positivo en la resistencia de carga.



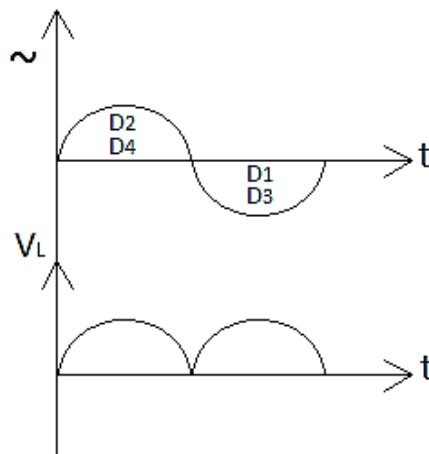
**Figura II.17.** Conducción de diodos en semiciclo positivo  
**Fuente:** Realizado por los autores

Los diodos  $D_1$  y  $D_3$  conducen durante el semiciclo negativo, lo que produce otro semiciclo positivo en la resistencia de carga.



**Figura II.18.** Conducción de diodos en semiciclo negativo  
**Fuente:** Realizado por los autores

El resultado es una señal de onda completa en la resistencia de carga como se puede observar en la figura II.19.



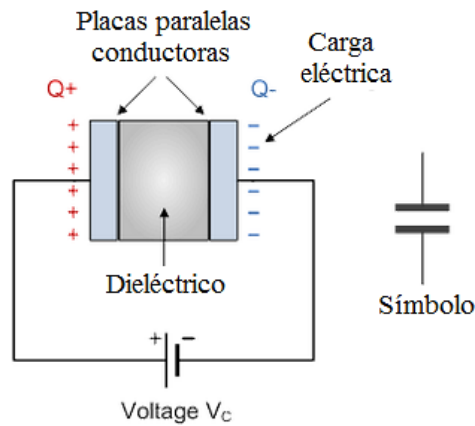
**Figura II.19.** Forma de onda del voltaje de salida  
**Fuente:** Realizado por los autores

### 2.3.2.2. Condensadores

Un condensador o capacitor es un elemento electrónico conformado por dos materiales conductores próximos entre sí, separados por un dieléctrico y que tiene la capacidad de acumular energía eléctrica.

Básicamente un condensador se trata de un dispositivo que posee dos placas metálicas con la misma superficie, una en frente de la otra y una lámina dieléctrica como separador. Cuando una de las placas se conecta a una fuente, esta placa se carga ( $q+$ ) y

en consecuencia genera una carga con signo contrario en la placa opuesta (q-), aunque se indica que el condensador está almacenando una carga q.



**Figura II.20.** Condensador con polarización

**Fuente:** [http://www.globalspec.com/learnmore/passive\\_discrete\\_devices/capacitors/capacitors](http://www.globalspec.com/learnmore/passive_discrete_devices/capacitors/capacitors)

Un condensador posee una característica especial, al trabajar con corriente continua su comportamiento es el de un circuito abierto mientras que en circuitos con corriente alterna funciona como un buen conductor.

Se expresa la capacidad de un condensador como la relación entre la carga almacenada y la diferencia de potencial entre placas, así:

$$C = \frac{q}{V} \quad (\text{Ec. 22})$$

Siendo su medida en Faradios (F).

También es posible definir la capacitancia en función de la geometría del capacitor, así:

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (\text{Ec. 23})$$

Donde:

ϵ: Permitividad del dieléctrico

A: Área de la placa

d: Distancia entre placas

### 2.3.3. Convertidor resonante y circuito RLC

El convertidor resonante se trata básicamente de un puente inversor monofásico que realiza la transformación CC/CA y cuya salida tiene una amplitud variable con una frecuencia igual o aproximada a la de resonancia del circuito RLC, este último es el encargado de generar la frecuencia de trabajo mediante la disposición de un condensador y una bobina (inductor de calentamiento) conectados entre sí en serie o en paralelo.

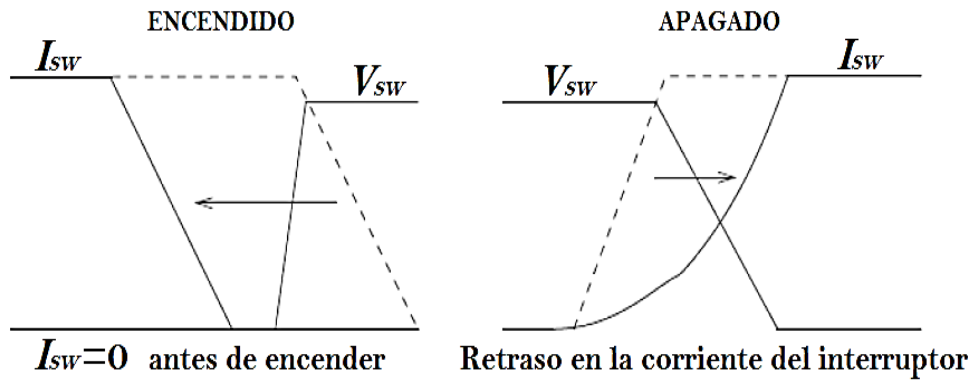
El término R se refiere a la resistencia que presenta el objeto a calentar que es donde se van a inducir las corrientes de Foucault. Tanto el capacitor como la bobina trabajan como un almacén de energía reactiva, eléctrica en el caso del condensador mientras que magnética para el caso de la bobina de inducción.

Un convertidor resonante tiene una característica diferente a los inversores tradicionales, la cual consiste en utilizar una técnica conocida como conmutación suave que puede ser a cero corriente ZCS (Zero Current Switching) o conmutación a cero voltaje ZVS (Zero Voltage Switching), utilizados para minimizar las pérdidas de potencia que surgen en los dispositivos semiconductores encargados de realizar las transiciones.

En la conmutación ZCS un inductor  $L_r$  se conecta en serie con el interruptor semiconductor  $S$  (transistor) para poder obtener la conmutación a cero corriente. Cuando el interruptor se enciende empieza a fluir la corriente y se incrementa desde cero para que comience a oscilar.

El interruptor estará listo para conmutar a cero corriente cuando se apague el transistor.

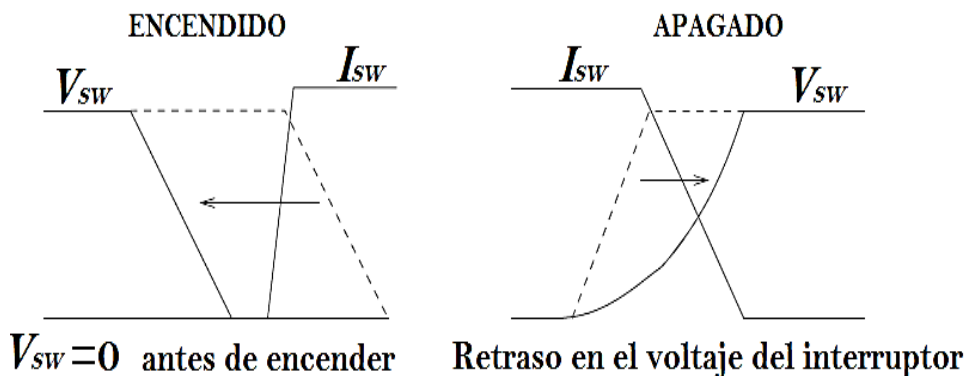
En la figura II.21 se muestra esta operación en el interruptor.



**Figura II.21.** Encendido y apagado con ZCS

**Fuente:** [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lem/juarez\\_h\\_ii/capitulo5.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/juarez_h_ii/capitulo5.pdf)

Mientras que en la conmutación ZVS, un capacitor se encuentra en paralelo con el interruptor para realizar la conmutación a cero voltaje. Si el interruptor es unidireccional el voltaje a través del capacitor puede oscilar en el ciclo positivo y negativo la mitad del período, entonces el interruptor opera en modo de onda completa. Si se conecta un diodo de rápida respuesta en paralelo con el interruptor unidireccional el voltaje en el capacitor obligará a que el voltaje en el interruptor sea cero durante la mitad del ciclo negativo y opere en modo de media onda. La conmutación ZVS usa el circuito resonante durante el tiempo de apagado para crear una condición de voltaje a cero cuando el interruptor se encienda. En la figura II.22 se puede observar las transiciones.



**Figura II.22.** Encendido y apagado con ZVS

**Fuente:** [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lem/juarez\\_h\\_ii/capitulo5.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/juarez_h_ii/capitulo5.pdf)

Como se había mencionado antes el circuito RLC se puede implementar en dos configuraciones: en serie y en paralelo.



Para el desarrollo de la presente tesis se ha utilizado un circuito resonante paralelo. En este caso se pone en paralelo con la salida del convertidor resonante, una bobina y un condensador, con el objetivo de que su frecuencia de resonancia coincida con la frecuencia de trabajo. El condensador y la bobina conectados juntos causan que una corriente eléctrica pueda alternar entre ellos a una frecuencia angular:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (\text{Ec. 24})$$

En el interior de la bobina se genera un campo magnético el cual es alterno y variable, y es el encargado de inducir corrientes de Foucault en el objeto a calentar.

Para que suceda este fenómeno se requiere que una corriente sinusoidal fluya a través de la bobina L, lo que se logra obtener mediante el efecto de resonancia.

*“El efecto de resonancia ocurre cuando la reactancia inductiva ( $X_{L_r}$ ) y la reactancia capacitiva ( $X_{C_r}$ ) son iguales, la frecuencia a la que se da esta igualdad es llamada frecuencia de resonancia y es demostrada como sigue:”[5]*

$$X_{L_r} = X_{C_r} \quad (\text{Ec. 25})$$

$$\omega L_r = \frac{1}{\omega C_r} \quad (\text{Ec. 26})$$

Si convertimos la frecuencia angular a Hertz, tenemos la siguiente expresión:

$$2\pi f_r L_r = \frac{1}{2\pi f_r C_r} \quad (\text{Ec. 27})$$

Por último despejando la frecuencia de resonancia tenemos:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}} \quad (\text{Ec. 28})$$

Además podemos obtener el valor de la corriente de resonancia y la capacitancia mediante las siguientes ecuaciones:

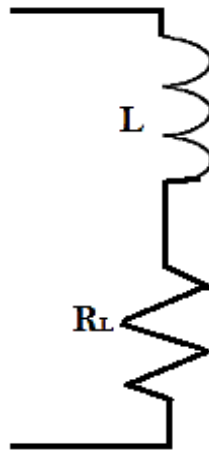
$$I_r = \frac{2\pi P}{V} \quad (\text{Ec. 29})$$

$$C = \frac{1}{2\pi f_r V_c} \quad (\text{Ec. 30})$$

Otro parámetro importante a tener en cuenta es el factor de calidad  $Q$ , que da la relación entre la potencia reactiva (que corresponde a la almacenada en el inductor) y la potencia activa (energía que se disipa en la resistencia). Para cualquier impedancia se expresa así:

$$Q = \frac{|P_{react}|}{P_{act}} \quad (\text{Ec. 31})$$

Como sabemos el circuito equivalente de la bobina presenta una resistencia conectada en serie, como se muestra en la figura II.23:



**Figura II.23.** Circuito equivalente serie de la bobina  
**Fuente:** Realizado por los autores

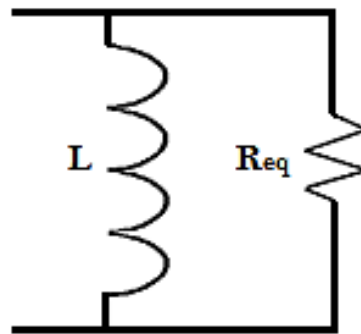
En este modelo se define al factor de calidad  $Q$  como:

$$Q = \frac{\omega L}{R_L} \quad (\text{Ec. 32})$$

A este modelo se lo puede expresar en paralelo mediante la fórmula que relaciona la resistencia de la bobina y la resistencia de la carga:

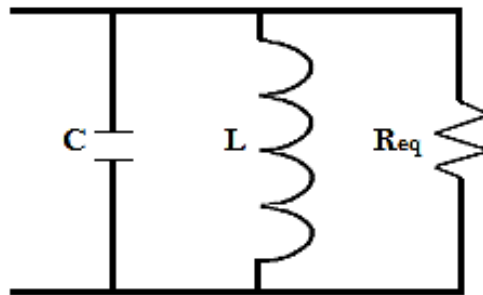
$$R_{eq} = R_L Q^2 \quad (\text{Ec. 33})$$

Gráficamente será:



**Figura II.24.** Circuito equivalente paralelo de la bobina y resistencia de la carga  
**Fuente:** Realizado por los autores

Después de introducir el capacitor en paralelo con el nuevo circuito equivalente paralelo se obtiene:



**Figura II.25.** Circuito RLC paralelo  
**Fuente:** Realizado por los autores

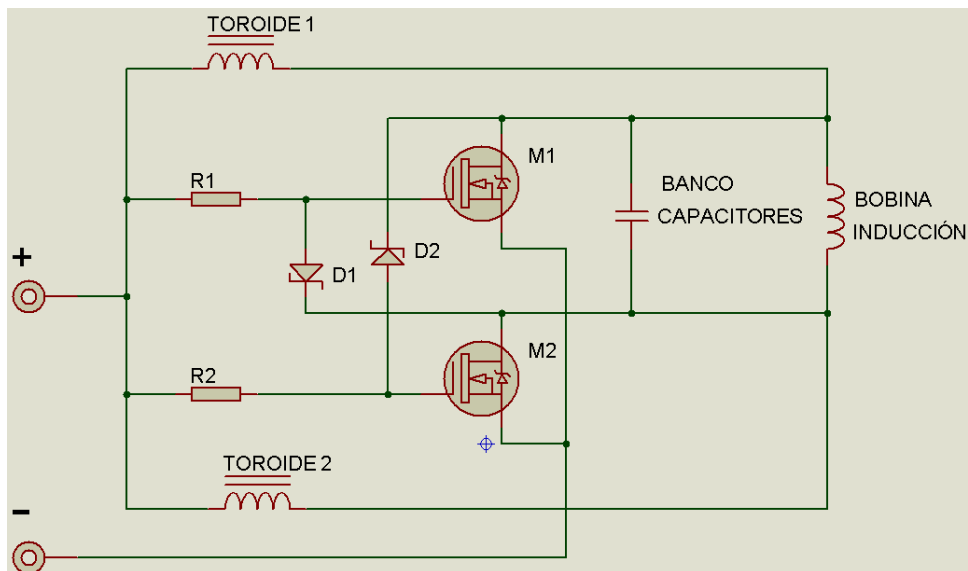
Analizando este circuito se deduce que:

- A frecuencia de resonancia el circuito se comporta como resistivo puro y la corriente de la bobina es  $Q$  veces la de entrada.
- El circuito se comporta como bobina a frecuencias por debajo de la de resonancia.
- A frecuencias superiores a la de resonancia el circuito se comporta como un condensador.

Entonces se puede ver que el factor  $Q$  depende de la calidad de la bobina, de la ESR (Resistencia Serie Equivalente) de los condensadores, entonces es importante seleccionar estos componentes con la mayor calidad posible con el fin de aumentar la  $Q$  y por ende la corriente de inducción. Además la  $R_{eq}$  que presenta la pieza a calentar

debe ser lo más grande posible con el fin de aumentar la potencia disipada ya que esta resistencia tiende a bajar el  $Q$  y con este la corriente.

Para el desarrollo de esta tesis se ha decidido utilizar un convertidor resonante paralelo, basado en el circuito Mazzilli Flyback, como se muestra en la figura II.26:



**Figura II.26.** Convertidor resonante y circuito RLC  
**Fuente:** Realizado por los autores

El circuito tiene ciertas ventajas de relativa simplicidad y la operación de resonancia propia. La cantidad de corriente extraída de la alimentación variará con la temperatura y el tamaño del objeto que está siendo calentado.

Las resistencias R1 y R2 son resistencias de potencia que determinan la rapidez con la que los transistores MOSFET se encienden, y deben tener un valor moderadamente bajo. No deben ser demasiadas pequeñas ya que se llevan a tierra a través del diodo cuando el transistor opuesto se enciende.

Los diodos D1 y D2 son diodos de rápida respuesta, se utilizan para descargar las compuertas del MOSFET. Deben ser diodos con una caída de tensión baja, de modo que la compuerta esté bien descargada y el MOSFET totalmente apagado cuando el otro esté encendido.

Los transistores M1 y M2 son transistores MOSFET los cuales sirven para realizar las conmutaciones y obtener una salida de tensión alterna a partir de una entrada de voltaje continuo. Son recomendables los MOSFET que tengan una resistencia de drenaje-fuente bajos y tiempos de respuesta rápidos.

Las bobinas toroidales 1 y 2 se utilizan como estranguladores para mantener las oscilaciones de alta frecuencia fuera de la fuente de alimentación y limitar las corrientes a niveles admisibles. Estos deben tener una inductancia grande y contar con el alambre lo suficientemente grueso para soportar toda la corriente de alimentación.

El banco de condensadores C1 y la inductancia L1 de la bobina de inducción forman el circuito tanque resonante. Tanto los condensadores como la bobina tienen que ser capaces de soportar las grandes corrientes y temperaturas que se producen durante el calentamiento.

A continuación se detallan los elementos utilizados para este circuito.

### 2.3.3.1. Resistencias

La resistencia es un componente ampliamente utilizado en los circuitos electrónicos debido a su relativa simplicidad de construcción y también de funcionamiento. El término resistencia es debido a que este componente se opone al libre paso de la corriente eléctrica. Su unidad de medida es el ohmio ( $\Omega$ ).



**Figura II.27 .** Resistencias o resistores

**Fuente:** <http://www.forosdeelectronica.com/tutoriales/resistencia.htm>

Un aspecto muy importante a tener en cuenta de una resistencia es su cualidad para disipar el calor generado sin destruir el dispositivo físico, cualidad que se registra en vatios. Una resistencia de un gran vatiaje poseerá un tamaño considerablemente mayor que una resistencia de bajo vatiaje.

Se pueden construir resistencias en varios tipos, tamaños, valores, formas y se dividen en dos grupos, las resistencias de valor fijo y las resistencias de valor variable.

Entre las resistencias fijas se encuentran las resistencias de alambre, como las utilizadas en esta tesis. Estas resistencias están construidas con un filamento de aleación de níquel y cromo que se envuelve en un aislante de cerámica y se le da un recubrimiento de esmalte vítreo, protegiendo así a la resistencia de posibles golpes y contra la corrosión. Están fabricadas para resistir altas temperaturas sin que su valor se vea alterado, y son aquellas resistencias mayores a cinco vatios.

### 2.3.3.2. Diodo Schottky

El diodo Schottky también llamado diodo de recuperación rápida (Fast Recovery), es un dispositivo ampliamente empleado en aplicaciones donde se requiera una conmutación de alta velocidad, generalmente se encuentra formado por la unión de dos metales el platino y el silicio, posee una caída de tensión directa muy baja y operan a altas velocidades, motivo por el cual son muy utilizados en fuentes de poder, sistemas digitales y en circuitos que trabajan con altas frecuencias.

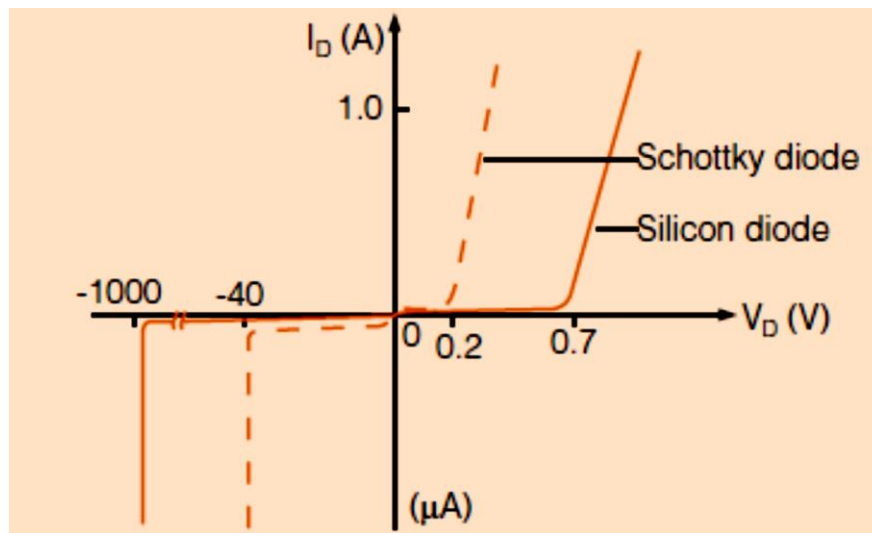


**Figura II.28.** Símbolo de un diodo Schottky  
**Fuente:** Realizado por los autores

Este tipo de diodo está compuesto por una lámina metálica en contacto con un semiconductor, entonces este metal se sitúa en un material tipo n, ya que los portadores

de este tipo de material tienen una mayor movilidad, siendo así el ánodo la parte metálica y el cátodo el semiconductor.

La curva característica de un diodo Schottky en comparación con la curva de un diodo de silicio se muestra en la siguiente figura:



**Figura II.29.** Curva característica de un diodo Schottky

**Fuente:** <http://www.electrosector.com/wp-content/ftp/descargas/diodo.pdf>

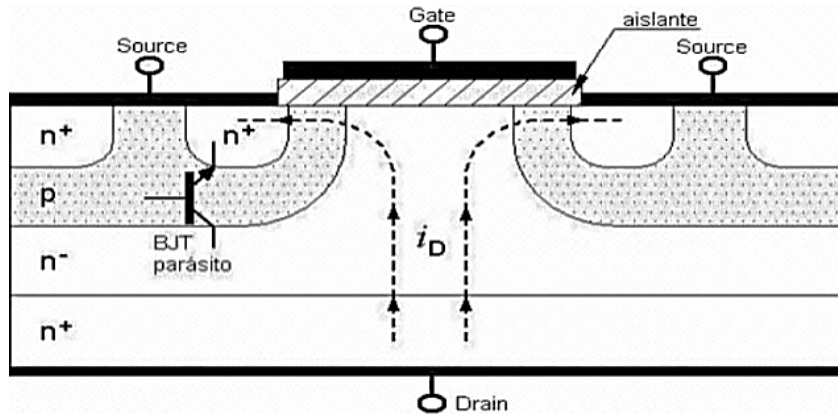
### 2.3.3.3. Transistor MOSFET

Con el desarrollo de la tecnología MOS (*Metal Oxide Semiconductor*) para los circuitos microelectrónicos se abrió el camino para la creación de los transistores MOSFET (*MOS Field Effect Transistor*). Este tipo de dispositivos, son unipolares, en otras palabras, sólo utilizan portadores mayoritarios para la conducción.

El transistor MOSFET es un dispositivo de tres terminales, llamados gate (*G*), drain (*D*) y source (*S*). El terminal gate está unido a un material aislante dentro del dispositivo, lo que implica una alta impedancia de entrada y muy baja corriente. La corriente de salida es controlada por la tensión aplicada  $V_{GS}$ .

Este es el más rápido de los dispositivos de conmutación, con frecuencias de operación superiores a los MHz, tensiones de operación de hasta 1000V y corrientes de hasta 50A. Sus principales aplicaciones se encuentran en los inversores y los circuitos troceadores.

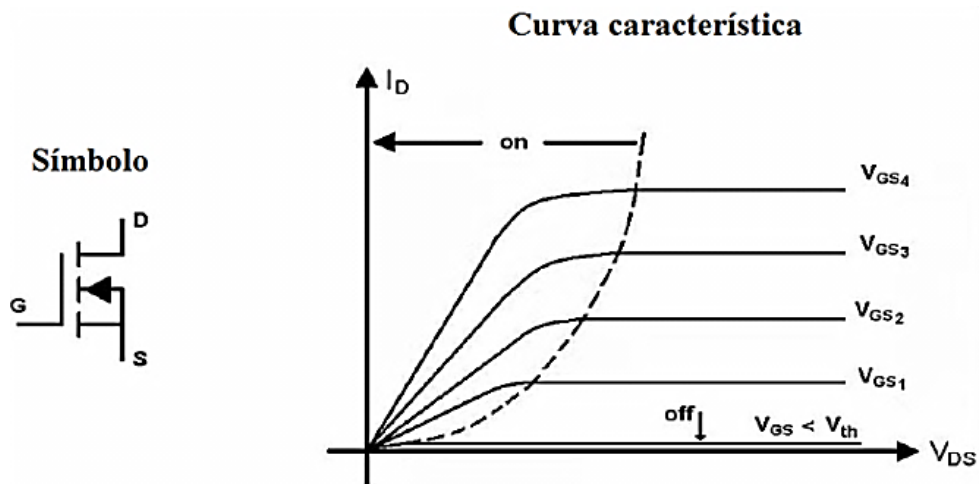
El transistor MOSFET de potencia tiene una estructura vertical de cuatro capas de materiales p y n como se muestra en la figura II.30. La zona tipo p es también llamada body, y es la región donde se genera el canal. La zona n- es una región con bajo dopado y se agrega a los dispositivos de potencia con el objetivo de aumentar el voltaje de ruptura.



**Figura II.30.** Estructura interna simplificada de un MOSFET de potencia canal n.

**Fuente:** Quiroz, S., Sánchez, J. (2008). Diseño y Especificaciones de una Fuente de Tensión para un Sistema de Inyección de Corriente (Tesis de Grado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. P. 20.

En la figura II.31 se presenta el símbolo y la curva característica de salida  $I_D$  vs.  $V_{DS}$  para un MOSFET de canal tipo n.



**Figura II.31.** Símbolo y curva característica de un transistor MOSFET

**Fuente:** Quiroz, S., Sánchez, J. (2008). Diseño y Especificaciones de una Fuente de Tensión para un Sistema de Inyección de Corriente (Tesis de Grado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. P. 20.



Se pueden distinguir tres regiones de operación: la región de corte (off), la región óhmica (on) y la región activa.

El MOSFET se encuentra en la región de corte cuando  $V_{GS} < V_{th}$ . En la mayoría de los MOSFET el valor del voltaje umbral ( $V_{th}$ ) está comprendido entre 4 y 10V. El dispositivo se comporta como un circuito abierto, la corriente del drain es cero, lo cual significa que el transistor debe soportar altas tensiones en polarización inversa.

El dispositivo entra en esta región de operación cuando  $V_{GS}$  es mayor a  $V_{th}$  y el voltaje  $V_{DS}$  es pequeño. Es decir  $V_{GS} - V_{th} > V_{DS} > 0$ . El MOSFET se comporta como un interruptor cerrado, con bajas pérdidas de potencia.

Finalmente cuando el MOSFET entra en la región activa la corriente  $I_D$  es independiente del voltaje  $V_{DS}$  y depende únicamente del voltaje  $V_{GS}$ . En el límite entre la región óhmica y la región activa, se tiene  $V_{GS} - V_{th} = V_{DS}$ . Se debe evitar que el dispositivo entre en esta región de operación, debido a que se generan grandes pérdidas de potencia al trabajar con altos valores de corriente y tensión en forma simultánea.

#### **2.3.3.4. Capacitores de plástico**

Entre los tipos de capacitores existentes se encuentran los capacitores de plástico (ver anexo 1), como los utilizados para el desarrollo del banco de capacitores de esta tesis.

Este tipo de capacitores tienen la característica de poder soportar altas temperaturas de trabajo y poseer elevadas resistencias de aislamiento. Dependiendo de la fabricación se pueden diferenciar dos grupos de capacitores de plástico, los tipo K y los tipo MK, donde los de tipo K poseen armaduras de metal mientras que las armaduras de los capacitores tipo MK son de metal vaporizado.

En base al material utilizado como aislante se pueden diferenciar los siguientes tipos de capacitores comerciales:

- ⊗ KP: Capacitores compuestos por placas de metal y como aislante el polipropileno.
- ⊗ KS: Capacitores compuestos por placas de metal y como aislante el poliestireno.
- ⊗ MKY: Capacitores compuestos por placas de metal vaporizado y como aislante polipropileno de alta calidad.
- ⊗ MKC: Capacitores compuestos por placas de metal vaporizado y como aislante policarbonato.
- ⊗ MKT: Capacitores compuestos por placas de metal vaporizado y como aislante poliéster.
- ⊗ MKP: Capacitores compuestos por placas de metal vaporizado y como aislante polipropileno.

A continuación se muestra una tabla con las características más importantes de estos capacitores:

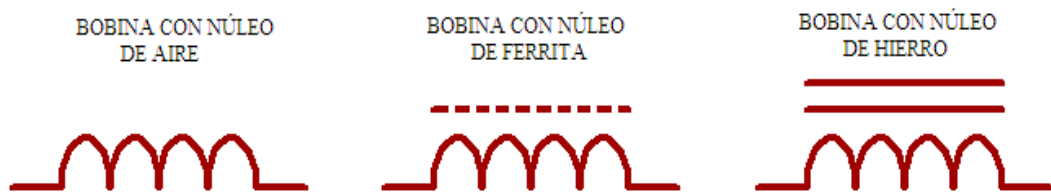
**Tabla II-IV.** Características típicas de capacitores comerciales de plástico

Tipo	Capacidad	Tolerancia	Tensión	Temperatura
<b>KS</b>	2pF-330nF	+/-0,5% +/-5%	25V-630V	-55°C-70°C
<b>KP</b>	2pF-100nF	+/-1% +/-5%	63V-630V	-55°C-85°C
<b>MKP</b>	1,5nF-4700nF	+/-5% +/-20%	0,25KV-40KV	-40°C-85°C
<b>MKY</b>	100nF-1000nF	+/-1% +/-5%	0,25KV-40KV	-55°C-85°C
<b>MKT</b>	680pF-0,01mF	+/-5% +/-20%	25V-630V	-55°C-100°C
<b>MKC</b>	1nF-1000nF	+/-5% +/-20%	25V-630V	-55°C-100°C

**Fuente:** <http://www.inele.ufro.cl/bmonteci/semic/apuntes/capacitores/capacitores.htm>

### 2.3.3.5. Bobina de inducción

La bobina o inductor es un elemento pasivo que debido a su forma almacena energía en forma de campo magnético. De acuerdo a su núcleo se puede clasificar a las bobinas en tres tipos: bobinas con núcleo de aire (utilizadas para sistemas de radiofrecuencias), bobinas con núcleo de ferrita (más empleados en filtros para evitar interferencias) y bobinas con núcleo de hierro (para realizar bobinas con muy alta impedancia).



**Figura II.32.** Símbolos de los diferentes tipos de bobina  
**Fuente:** Realizado por los autores

La unidad de medida de la inductancia de una bobina es el Henrio ( $H$ ) y para una bobina tipo solenoide como el de la figura II.33 viene dada por:

$$L = \frac{\mu N^2 A}{l} \quad (\text{Ec. 34})$$

Donde:

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

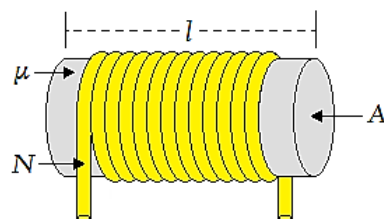
$\mu_0$ : Permeabilidad magnética del vacío ( $4\pi * 10^{-7}$ )

$\mu_r$ : Permeabilidad magnética relativa del núcleo de la bobina.

$N$ : Número de espiras de la bobina

$A$ : Área de la sección transversal del núcleo

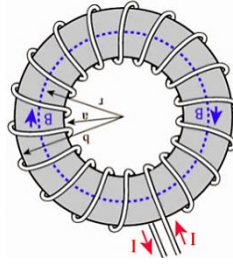
$l$ : Longitud de la bobina solenoide



**Figura II.33.** Bobina solenoide

**Fuente:** [http://gemini.udistrital.edu.co/comunidad/grupos/gispud/ac/cap\\_2/11\\_bobina\\_ideal.html](http://gemini.udistrital.edu.co/comunidad/grupos/gispud/ac/cap_2/11_bobina_ideal.html)

La bobina toroidal es un tipo de bobina cuya forma es la de un toroide como se ve en la figura II.34 y que tiene una característica especial, las líneas de inducción magnética tienden a estar situadas en su interior y no dispersarse en sus proximidades como ocurre en un solenoide.



**Figura II.34.** Bobina toroidal

**Fuente:** <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/magnetic/indtor.html>

La inductancia de una bobina toroidal o toroide viene dada por:

$$L = \frac{\mu N^2 A}{2\pi r} \quad (\text{Ec. 35})$$

Donde:

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

$\mu_0$ : Permeabilidad magnética del vacío ( $4\pi * 10^{-7}$ )

$\mu_r$ : Permeabilidad magnética relativa del núcleo de la bobina.

N: Número de espiras de la bobina

A: Área de la sección transversal del bobinado

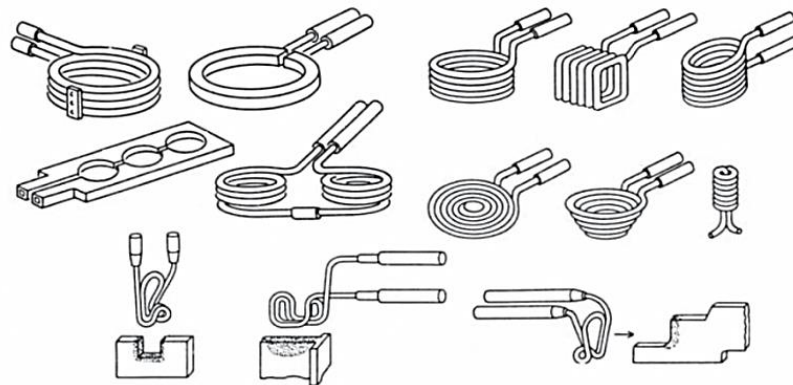
En la siguiente tabla se encuentran los valores de  $\mu_r$  para diferentes materiales usados comúnmente.

**Tabla II-V.** Permeabilidad relativa de materiales más comunes

Material	Permeabilidad relativa $\mu_r$
Ferrita amarilla con blanco	27
Niquel-Ni	100
Hierro-Fe	200
Permalloy 78,5% Ni, 21,5%Fe	8000
Mumetal 75%Ni, 18%Fe, 5% Cobre, 2% Cobre	20000

**Fuente:** <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/solids/ferro.html#c5>

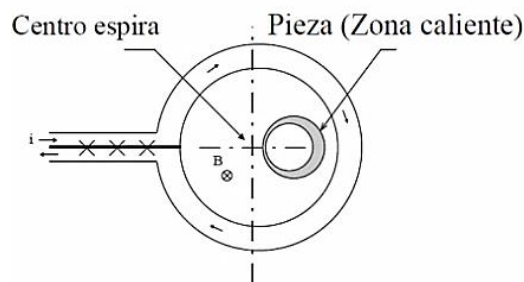
En cuanto a las geometrías en bobinas de inducción, pueden variar conforme a su aplicación y en general no deben tener una forma específica, pues cuando por un material conductor se encuentran circulando corrientes alternas, se genera un campo magnético alterno, y que a su vez creará corrientes inducidas sobre un objeto de material conductor que se encuentre ubicado en su cercanía.



**Figura II.35.** Ejemplo de configuraciones típicas para bobinas de inducción

**Fuente:** [http://its.lnu.edu.ua/edocs1/new\\_doc/en/Zinn%20S.Induction%20coil%20design%20and%20fabrication.Basic%20design%20and%20modifications.pdf](http://its.lnu.edu.ua/edocs1/new_doc/en/Zinn%20S.Induction%20coil%20design%20and%20fabrication.Basic%20design%20and%20modifications.pdf)

Entonces, se puede decir que no hay limitaciones en cuanto a la forma y el tamaño que tenga el objeto a calentar, ya que la bobina de inducción podrá tomar la configuración que más se ajuste a la carga.



**Figura II.36.** Patrón de calentamiento producido por una bobina de una espira en un objeto cilíndrico.

**Fuente:** González, W. (2008). Diseño y Construcción de Bobina de Calentamiento por Inducción para Fundición de Titanio (Tesis de Grado). Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Venezuela. P. 14.

### 2.3.3.6. Carga

Se refiere al objeto que será sometido al campo magnético variable y producir el efecto de calentamiento. Los materiales de tipo ferromagnético son los que se calientan con

más rapidez debido a que se suma al calentamiento por corrientes de Foucault, el calentamiento producido por el efecto de histéresis.

#### **2.3.4. Sistema de refrigeración**

Debido a que disipan potencias altas en los semiconductores y en la bobina de inducción, todos estos elementos requieren de un sistema de refrigeración apropiado para evitar la destrucción de los elementos.

Para cumplir con el objetivo de refrigeración se puede utilizar sistemas con disipadores de calor de aluminio o sistemas de refrigeración por agua, siendo éste último el método más empleado, sin embargo se recomienda una combinación de ambos métodos.

Es imperante mantener las bobinas de inducción a una relativa baja temperatura, razón por la cual se las realiza huecas de manera que se puedan hacer circular agua por su interior.

#### **2.3.5. Sistema de control**

El sistema de control se encarga de controlar la temperatura del proceso mediante el correcto encendido y apagado del sistema de acuerdo a la temperatura de referencia programada.

### **2.4. Aplicaciones del calentamiento por inducción electromagnética**

El calentamiento por inducción se ha venido utilizando por lo general en la industria metalúrgica para varias aplicaciones, entre las cuales se pueden mencionar:

#### **2.4.1. Temple**

En este método se utiliza el calor por inducción y un enfriamiento rápido en el acero mejorando su dureza y durabilidad. Dicho método mejora la productividad siendo un proceso de gran rapidez y que se puede implementar en cualquier línea de producción.

#### **2.4.2. Revenido**

El revenido es un método complementario al temple donde se mejoran las características mecánicas de los objetos calentados, tales como la resistencia y la flexibilidad.

#### **2.4.3. Braseado**

Este proceso funde un material de contribución (antioxidante), para unir dos objetos metálicos sin que la integridad física de estas piezas se vea afectada por el proceso de calentamiento.

#### **2.4.4. Curado**

El curado es un proceso donde se utiliza calentamiento inducido para calentar las piezas a ser curadas con un adhesivo.

#### **2.4.5. Soldadura**

La soldadura por inducción es un proceso ideal para la unión de perfiles en tubos y tuberías al aplicárseles calor por inducción a sus bordes.

#### **2.4.6. Recocido**

El recocido es un método que utiliza el calentamiento por inducción para modificar las características de una pieza que ha pasado por un previo proceso, mejorando la flexibilidad y tensiones internas del objeto.

#### **2.4.7. Precalentamiento**

Con el método de precalentamiento se alivian los metales y se preparan a estos objetos para un siguiente proceso que requiera de mayores temperaturas.

#### **2.4.8. Postcalentamiento**

El postcalentamiento se utiliza para calentar objetos que han sido previamente sometidas a un proceso.

#### **2.4.9. Forja**

Este proceso utiliza el calentamiento inducido para someter a la pieza a un gran calor que permita el fácil moldeo del objeto calentado.

#### **2.4.10. Producción de plasma**

Con el calentamiento inducido se puede crear plasma, que consiste en desprender electrones de átomos y moléculas. Este plasma es usado en varios procesos como la fabricación de fibra óptica, también en la purificación de metales y semiconductores, entre otros.

#### **2.4.11. Enderezado**

Este método consiste en calentar un área específica que se desea enderezar mediante la utilización de una chapa de metal que ayudará a conseguir el objetivo.

#### **2.4.12. Fusión**

Con el proceso de fusión por inducción se funden los materiales en un crisol para su posterior moldeo.

#### **2.4.13. Cocinas de inducción**

Utilizando el calentamiento por inducción se pueden fabricar cocinas las mismas que calientan artículos de metal con propiedades ferromagnéticas usados en la cocción de alimentos.

A continuación se presenta una tabla con las tecnologías recomendadas para ciertas aplicaciones, indicando el rango de la potencia y de la frecuencia que utilizan:



**Tabla II-VI.** Tecnologías aplicadas para ciertas aplicaciones industriales

P (Kw)	F(Khz)	Aplicación	Tecnología
1-200	2-20	Fusión	Tiris/trans
25-10000	0.1-10	Fusión industria	Tir/trans
5-5000	0.25-10	Forja	Trans/válvulas
5-500	2-250	Temple	Trans/válvulas
50-1000	50-500	Soldadura	Trans/válvulas
1-400	200-1000	Especiales	Trans/válvulas

**Fuente:** [http://www.uam.es/personal\\_pas/mcuenca/mifiles/Desarrollo%20de%20un%20equipo%20de%20calentamiento%20por%20induccion.pdf](http://www.uam.es/personal_pas/mcuenca/mifiles/Desarrollo%20de%20un%20equipo%20de%20calentamiento%20por%20induccion.pdf)

La siguiente figura es una miscelánea de las aplicaciones más relevantes que tiene el calentamiento por inducción.



**Figura II.37.** Aplicaciones del calentamiento por inducción

**Fuente:** <http://www.efd-induction.com/~media/PDF/Applications/ApplicationsESP.ashx>

## 2.5. Procesamiento de plásticos

### 2.5.1. Introducción

El plástico es un polímero resistente, no muy pesado, posee cierta flexibilidad, de fácil fabricación y moldeo, además de ser muy buen aislante de electricidad y el calor, debido a lo cual es muy utilizado en el área industrial.



**Figura II.38.** Varios plásticos

**Fuente:** <http://eco13.net/2009/11/un-nuevo-metodo-para-producir-plasticos-ecologicos/>

### 2.5.2. Clasificación de los plásticos

En la actual industria es posible encontrar una amplia variedad de plásticos para varios tipos de aplicaciones. En base a su estructura y conducta frente al calor se puede clasificar a los plásticos en: Elastómeros, Termoestables y Termoplásticos

#### 2.5.2.1. Elastómeros

Esta clase de polímero no es tan resistente al calor y se derrite a medianas temperaturas, además cuando se estira, sus moléculas adquieren una distribución muy bien alineada y retoman su desorden inicial cuando se los deja de estirar.

**Tabla II-VII.** Características y propiedades de los elastómeros

<b>Tipos</b>	<b>Obtención</b>	<b>Propiedades</b>	<b>Aplicaciones</b>
<i><b>Caucho natural</b></i>	Látex	Resistente. Inerte.	Aislamiento térmico y eléctrico.
<i><b>Caucho sintético</b></i>	Derivados del petróleo	Resistentes a agentes químicos.	Neumáticos, volantes, parachoques, pavimentos tuberías, mangueras, esponjas de baño guantes y colchones.
<i><b>Neopreno</b></i>	Caucho sintético	Mejora las propiedades del caucho sintético. Es más duro y resistente. Impermeable.	Trajes de inmersión

**Fuente:** <http://iesvillalbahervastecnologia.files.wordpress.com/2011/09/plasticos-tejina.pdf>

### 2.5.2.2. Termoestables

Estos plásticos únicamente se ablandan al ser calentados por primera vez y cuando se los enfría no es posible su reutilización para posteriores procesos. Son polímeros duros y compactos que soportan altas temperaturas razón por la cual son empleados en aplicaciones con ambientes de elevadas temperaturas.

**Tabla II-VIII.** Propiedades de los termoestables

<b>Nombre</b>	<b>Propiedades</b>	<b>Aplicaciones</b>
<b><i>Poliuretano (PUR)</i></b>	Esponjoso y flexible. Blando y macizo. Elástico y adherente.	Espuma para colchones y asientos, esponjas, aislamientos térmicos y acústicos, juntas, correas para transmisión de movimientos, ruedas de fricción, pegamentos y barnices.
<b><i>Resinas fenólicas (PH): Baquelitas</i></b>	Con fibras, resistentes al choque. Con amianto, resistente térmico. Color negro o muy oscuro. Aislantes eléctricos.	Mangos o asas de utensilios de cocina, ruedas dentadas, carcasas de electrodomésticos, aspiradores, aparatos de teléfono, enchufes, interruptores, ceniceros.
<b><i>Melamina</i></b>	Ligero. Resistente y de considerable dureza. No tiene olor ni sabor. Aislante térmico.	Accesorios eléctricos, aislamiento térmico y acústico, superficies de encimeras de cocina, vajillas, recipientes para alimentos.

**Fuente:** <http://iesvillalbahervastecnologia.files.wordpress.com/2011/09/plasticos-tejina.pdf>

### 2.5.2.3. Termoplásticos

Los termoplásticos son polímeros que al aplicarles la temperatura y presión adecuadas se tornan fácilmente moldeables, se solidifican al ser enfriados y pueden ser transformados en varias ocasiones sin que sus propiedades se vean alteradas. Su temperatura de trabajo, para un correcto procesamiento, es de aproximadamente la mitad de su temperatura de fusión.

**Tabla II-IX.** Propiedades de los termoplásticos



Estructura	Formación	Características	Ejemplo
Amorfa	Las moléculas no presentan ningún tipo de orden: están dispuestas aleatoriamente.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Son normalmente transparentes.</li> <li>• La fusión se realiza en un intervalo de temperatura, no existe un punto de fusión preciso.</li> <li>• A medida que la temperatura aumenta el material pasa de un estado sólido a uno pastoso, hasta convertirse finalmente en un fluido muy viscoso.</li> <li>• En el intervalo de fusión pueden ser manufacturados por inyección, extrusión, soplado, etc.</li> <li>• Sin carga tienen una contracción en el moldeo de 0.3% a 0.9%, con carga este valor es menor.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PVC</li> <li>• PS</li> <li>• SAN</li> <li>• ABS</li> <li>• PMMA</li> <li>• PC</li> </ul>
Cristalina	Al enfriarse, sus cadenas tienden a enlazarse muy ordenadamente por lo que se produce un empaquetamiento muy ordenado, que se denomina cristalización.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Son opacos.</li> <li>• Poseen un punto característico de fusión.</li> <li>• El intervalo útil de transformación está limitado a pocos grados centígrados: un poco abajo del punto de fusión, está todavía sólido y no se puede moldear; y no es prudente superar mucho la temperatura de fusión porque puede intervenir el fenómeno de degradación térmica.</li> <li>• Tienen contracción elevada en el moldeo. La contracción para un polímero no reforzado varía de 1 al 5%.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PE</li> <li>• PP</li> <li>• POM</li> <li>• PA</li> <li>• PET</li> </ul>

**Fuente:** [http://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/2734\\_plimeros.pdf](http://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/2734_plimeros.pdf)

La Sociedad Americana de la Industria Plástica ha creado un código, para la correcta identificación y clasificación de los termoplásticos, código que se lo sitúa en la parte inferior del objeto plástico, consta de tres flechas en sentido de las agujas del reloj y en cuyo interior se encuentra un número identificador.

En la siguiente tabla se indica los diferentes tipos de termoplásticos:

**Tabla II-X.** Símbolos y aplicaciones de los termoplásticos

Termoplástico	Nomenclatura	Símbolo	Aplicaciones
Polietileno tereftalato	PET		Botellas de bebida, botellas de agua, envasado de productos alimenticios, moquetas, refuerzos neumáticos de coches.
Polietileno de alta densidad	PEAD		Botellas para productos alimenticios, bolsas de supermercado, detergentes, contenedores, juguetes, bolsas, embalajes y film, láminas y tuberías.
Policloruro de vinilo	PVC		Tuberías rígidas, marcos de ventanas, revestimientos para suelos, cables aislantes, tarjetas de crédito, envases de productos de uso sanitario.
Polietileno de baja densidad	PEBD		Manteles, film adhesivo, bolsas para basura, envases de cremas y shampoo, tuberías para riego, revestimiento de cubos.
Polipropileno	PP		Envases para productos alimenticios, cajas, piezas de automóviles, alfombras, tapones, mamaderas, componentes eléctricos.
Poliestireno	PS		Vasos, platos y cubiertos desechables, envases de yogurt, helado y margarina, recubrimientos.
Otros	OTROS		Teléfonos, artículos médicos y juguete, platos para hornos de microondas.

**Fuente:** <http://hablemosdetodounpoco68.blogspot.com/2013/02/plasticos-aplicaciones-y-reciclaje.html>

### 2.5.3. Polipropileno

El polipropileno es un polímero termoplástico que es utilizado para una gran variedad de productos los cuales son empleados en diferentes áreas tanto domésticas como industriales, razón por la cual posee una gran acogida en ventas a nivel mundial.

*“La alta demanda de este material guarda relación con sus propiedades, entre las que se encuentran su gran versatilidad y resistencia química, así como también su baja densidad, su alta dureza, rigidez y resistencia al calor”[6].*

Ya que el polipropileno posee dichas características, este producto se ha ubicado como uno de los más usados en la industria pues ha relegado a otros productos como el vidrio, la madera y ciertos metales.

Actualmente la producción de este producto está a manos de diferentes industrias petroleras alrededor del mundo las mismas que elaboran este producto de forma directa o indirecta.



**Figura II.39.** Símbolo del polipropileno

**Fuente:** <http://gestionintegralresiduos.blogspot.com/2010/03/residuos-Solidos-aprovechables.html>

Las características más relevantes del polipropileno son:

- Es un producto libre de BPA (Bisfenol A)
- Completamente impermeable.
- Resiste la corrosión.
- Resistente ambientes con altas temperaturas.
- Resiste bruscos cambios de temperatura sin alteraciones en su estructura.

Por estas características y las excelentes prestaciones que ofrece este plástico, el polipropileno es uno de los polímeros con mayor opción a seguir creciendo en el futuro como lo ha venido haciendo hasta ahora.

#### **2.5.4. Procesamiento del plástico**

El objetivo del tratamiento de los plásticos es la de conseguir productos de calidad, con diferentes formas y destinados a determinadas aplicaciones.

Una variedad de procesos se utilizan para transformar plásticos en los miles de objetos cotidianos que utilizamos. Para moldear o dar forma a los termoplásticos, se suavizan, básicamente, para permitir que el plástico fluya a través de un medio de contraste, para ser inyectada, o formados en o sobre un molde.

Como se observa la semejanza entre todos estos procesos es la utilización de un molde mientras que se diferencian en el modo de darle la forma al plástico.

Una de las técnica de moldeo de plásticos es el moldeo por inyección, técnica de interés en el desarrollo de esta tesis.

##### **2.5.4.1. Moldeo por Inyección**

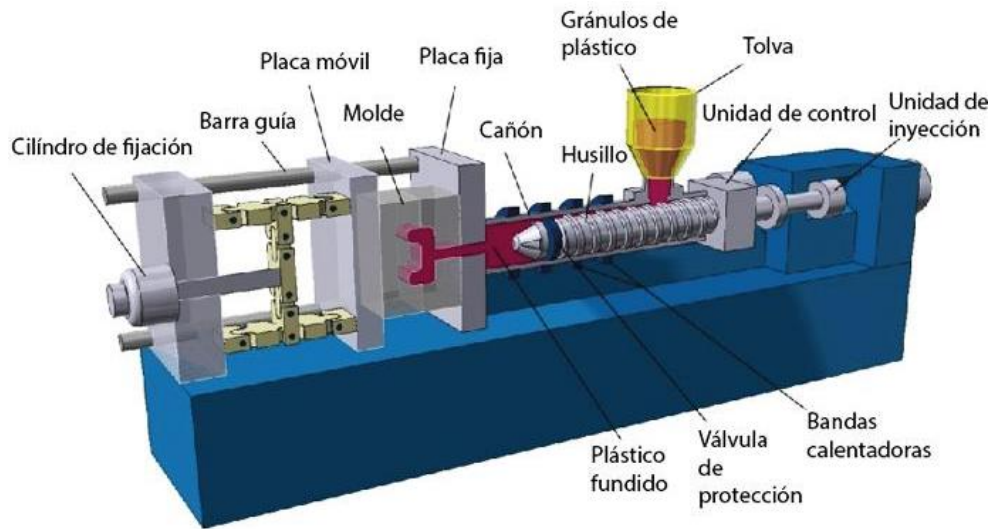
Este es el principal método en la industria moderna para la producción de piezas plásticas que requieren detalles exactos y un acabado de calidad, además necesita de más altas temperaturas y presiones que los otros métodos de moldeo.

El principio del moldeo por inyección consiste en inyectar un termoplástico en un molde que es enfriado para que se solidifique el plástico obteniendo piezas de las más diversas formas.

Los componentes principales de una máquina inyectora de plásticos son la tolva, la unidad de inyección, el sistema de potencia y la unidad de moldeo.

La tolva se une a través de un canal a la camisa o barril donde se funden los polímeros y con la ayuda de un husillo se inyecta el material fundido a la unidad de moldeado.

La unidad de inyección donde se encuentran la camisa y el husillo, tiene un sistema de calentamiento basada en resistencias eléctricas encargadas de generar el calor adecuado para fundir los polímeros y realizar una óptima inyección.



**Figura II.40.** Máquina inyectora de plástico

Fuente: <http://www.doyca.com.mx/img/galAprende/injectora2.jpg>

## 2.6. Sistema de control de temperatura on-off

Un sistema de control es un conjunto de elementos que se encargan de mantener otro sistema, proceso o planta, controlado bajo un programa establecido. Para controlar un proceso se suelen mantener constantes ciertas variables, como por ejemplo, la temperatura, la presión, el nivel, la humedad, etc.

En los sistemas de control, una magnitud física variable es representada generalmente mediante una señal eléctrica que varía de manera tal que describe dicha magnitud, por ejemplo, una señal eléctrica será la variación de la salida de tensión de un termopar la cual mide temperatura y la variación de temperatura es transformada en variación de tensión (voltaje).

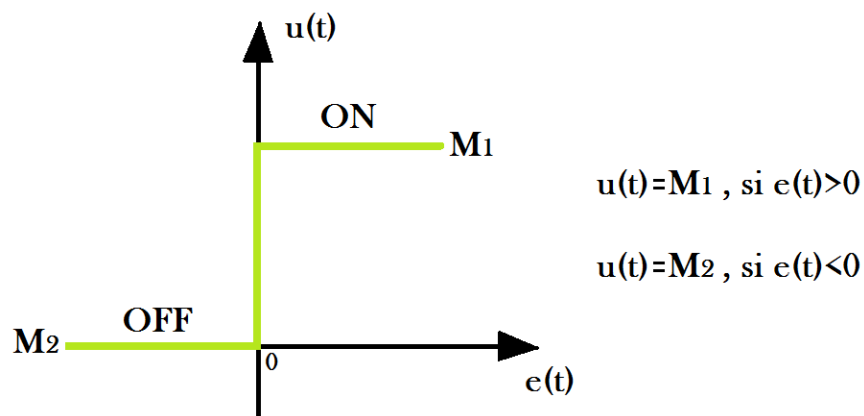


Un buen sistema de control tiene características que son muy difíciles de definir genéricamente y dependen del tipo de planta sobre la que se trabaja. Sin embargo, es posible afirmar que un sistema de control realimentado debe cumplir con las siguientes condiciones:

- Debe ser estable.
- Debe ser lo suficientemente rápido.
- Debe estar adecuadamente amortiguado.
- Debe de tener una determinada precisión en régimen estacionario.
- Debe atenuar los efectos de ruidos, perturbaciones y cambios de carga mientras se mantiene la planta a consigna constante.

Un tipo de control que cumple estos objetivos es el conocido sistema de control on-off o también llamado todo o nada. Este tipo de control es muy utilizado en aplicaciones domésticas e industriales donde no se necesite una elevada precisión.

El control ON-OFF es no lineal y proporciona a su salida únicamente dos valores fijos, que normalmente corresponden a encendido/apagado, según que la señal de error sea positiva o negativa:

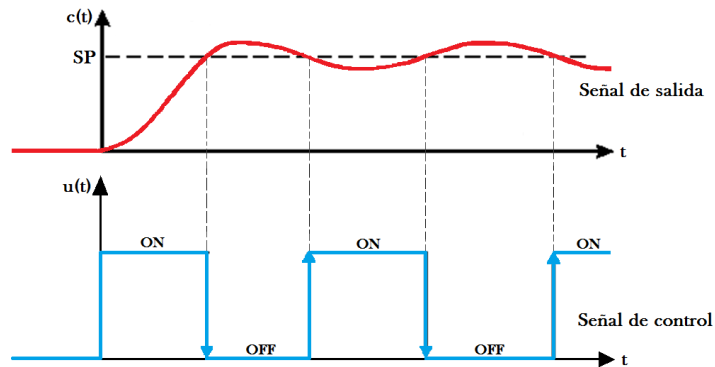


**Figura II.41.** Señal de salida vs señal de error en un control on off

**Fuente:** Realizado por los autores

### 2.6.1. Funcionamiento del control on-off

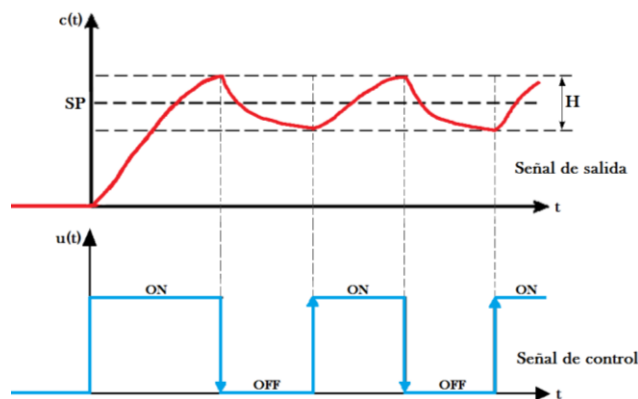
En un control on-off inicialmente, el error es positivo y el control se activa (ON) hasta llegar al valor deseado o también denominado set point (SP). Cuando la salida supera el valor deseado, el error se hace negativo y el controlador se pone a OFF. El proceso se repite continuamente.



**Figura II.42.** Acción de control on-off  
**Fuente:** Realizado por los autores

Esta constante repetición produce una oscilación continua rápida que puede provocar un desgaste excesivo del actuador o actuadores.

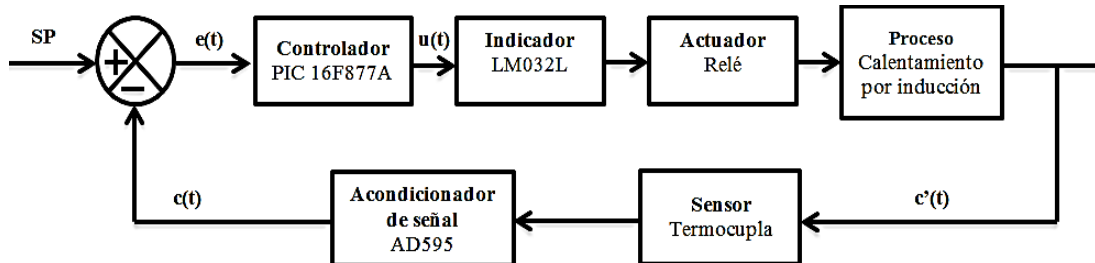
Para evitar una conmutación excesivamente frecuente, es necesario introducir un retardo en la entrada en acción del control ON-OFF, efecto conocido como histéresis. La histéresis provoca que la señal de error deba superar un cierto rango  $H$ , llamado brecha diferencial, antes de que se produzca la conmutación.



**Figura II.43.** Acción de control on-off con histéresis  
**Fuente:** Realizado por los autores

## 2.6.2. Elementos de un sistema de control de temperatura

Los elementos básicos de un sistema de control de temperatura, como se muestra en la figura II.44, se detallan a continuación.



**Figura II.44.** Esquema del sistema de control de temperatura  
**Fuente:** Realizado por los autores

### 2.6.2.1. Sensor

El sensor o también llamado elemento primario es el elemento que mide o sensa el valor de una variable de proceso, como la temperatura, y toma una salida proporcional a la medida, salida que puede o no ser eléctrica. Para evitar introducir error en el sistema es necesario que el sensor tome del sistema la menor cantidad posible de energía.

Un tipo de sensor recomendado para el control de temperatura es la termocupla tipo K, ya que el mismo tiene un rango de trabajo de  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  hasta  $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



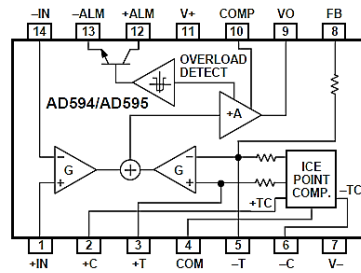
**Figura II.45.** Termocupla tipo k  
**Fuente:** Realizado por los autores

### 2.6.2.2. Acondicionador de señal

El acondicionador de señal es el encargado de convertir, acondicionar y normalizar la señal proveniente del sensor para su posterior procesamiento.

Es necesaria la utilización del integrado AD595 (ver anexo 2) para realizar un circuito de acondicionamiento de la señal.

El integrado AD595 es un amplificador de instrumentación y termopar con una junta fría en un chip como elemento compensador. Este integrado ajusta su punto frío de referencia con un amplificador que se encuentra precalibrado y que origina una tensión que será proporcional a la temperatura en el sensor de 10mV por cada grado centígrado.

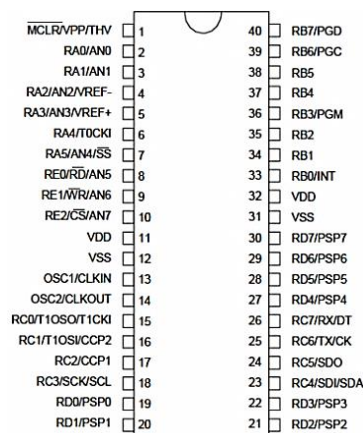


**Figura II.46.** Diagrama de bloques funcional del acondicionador de señal AD595  
**Fuente:** [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD594\\_595.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD594_595.pdf)

### 2.6.2.3. Controlador

El controlador es el elemento que mantiene las variables del proceso constantes mediante la ejecución de un programa establecido con la ayuda de un software. Este programa registrará el comportamiento del sistema.

Para este tipo de controles es usual utilizar un microcontrolador PIC16F877A para trabajar como controlador ya que presenta grandes ventajas como su convertidor analógico-digital interno, su memoria tipo FLASH que permite reprogramar al PIC sin ser borrado con anterioridad, su bajo consumo de potencia, entre otros (ver anexo 3).



**Figura II.47.** PIC 16F877A

**Fuente:** <http://www.utp.edu.co/~eduque/arquitect/PIC16F877.pdf>

#### 2.6.2.4. Indicador

El indicador es el dispositivo que se utiliza para visualizar los parámetros de importancia en el sistema, como es el valor de la variable del proceso y que dependiendo del sistema puede ser presión, voltaje, corriente, temperatura, entre otras. Existen varios tipos de indicadores disponibles en el mercado, uno de ellos es el display de caracteres LCD LM032L como el de la figura II.48.



**Figura II.48.** LCD LM032L  
**Fuente:** Realizado por los autores

#### 2.6.2.5. Actuador

El actuador es el elemento final del sistema de control, encargado de realizar la conmutación (encendido y apagado) del sistema de acuerdo a las condiciones establecidas. Es común emplear como actuadores a relés electromecánicos, como el que se puede ver en la figura II.49, con la ventaja de poder controlar equipos de mediana potencia mediante señales de baja potencia.



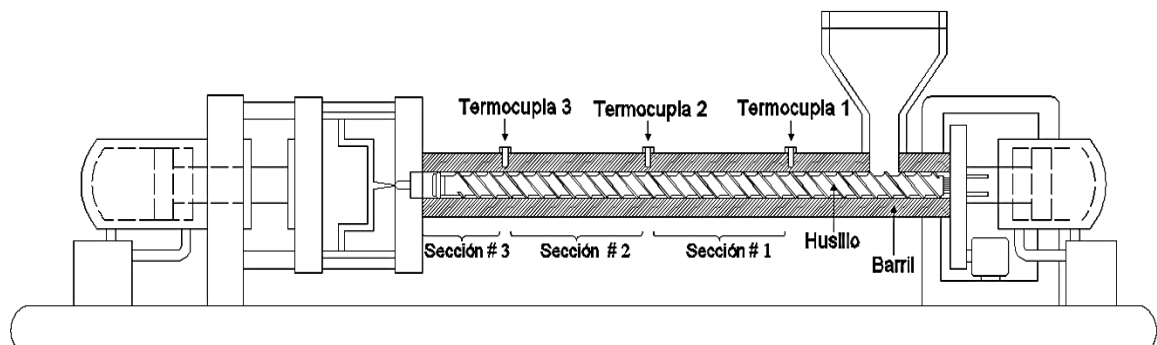
**Figura II.49.** Relé electromecánico  
**Fuente:** Realizado por los autores

### CAPÍTULO III

#### III. DESARROLLO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO PARA EL PROCESAMIENTO DE PLÁSTICOS BASADO EN EL PRINCIPIO DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

##### 3.1. Determinación de parámetros

La fábrica PARTIPLAST tiene como producto estrella los armadores elaborados de polipropileno, para lo cual cuenta con una máquina inyectora de plástico, la misma que tiene una etapa de calentamiento constituida de una camisa o barril de tungsteno de 80 cm de largo, 10 cm de diámetro exterior y 4 cm de diámetro interno. En su interior se encuentra ubicado un husillo de aleación de acero con un diámetro aproximado al diámetro interno del barril (figura III.1).



**Figura III.1.** Etapa de calentamiento de la máquina inyectora de plástico

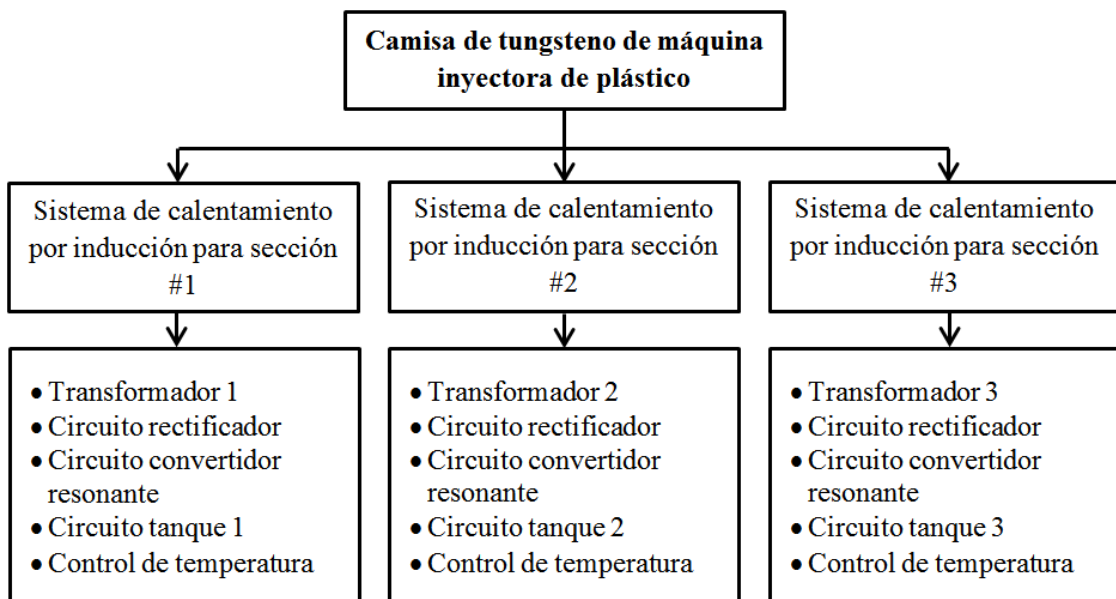
**Fuente:** Realizado por los autores

El barril está limitado en tres secciones, separadas cada una por una termocupla, con el fin de obtener una temperatura diferente en cada sección, indispensable para el correcto proceso del polipropileno.

La primera y segunda sección tienen cada una 26 cm de largo, mientras que la tercera sección es de 16 cm de longitud, sin contar los espacios de holgura de 1 cm para cada termocupla. Las temperaturas de trabajo en cada sección son 160°C en la primera, 180°C en la segunda y 200°C para la tercera.

El sistema de calentamiento convencional se basa en un conjunto de seis resistencias eléctricas, las mismas que están distribuidas equitativamente en cada sección, es decir existen dos resistencias eléctricas por sección.

A continuación se han determinado los parámetros necesarios para realizar el diseño de un sistema de calentamiento por inducción que satisfaga los requerimientos de cada sección de la camisa de tungsteno de la máquina inyectora de plástico de la fábrica PARTIPLAST. Se ha diseñado un sistema de calentamiento por inducción para cada sección como se muestra en el esquema:



**Figura III.2.** Esquema de componentes de cada sistema de calentamiento por sección

**Fuente:** Realizado por los autores

### 3.1.1. Obtención de parámetros

#### 3.1.1.1. Cálculo térmico para obtención de la potencia necesaria

Para calcular la energía requerida y el adecuado transformador de un sistema de calentamiento en cada sección se ha procedido a realizar el cálculo térmico con ayuda de los datos generales obtenidos por investigación (tabla II.I). Para efectos de diseño se decidió aumentar 30 °C en la temperatura final requerida por cada una de las secciones.

Utilizando la ecuación 11 de la energía transferida en forma de calor se tiene:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

#### Datos generales

Densidad polipropileno =>  $\rho_P = 946 \text{ Kg/m}^3$

Calor específico del polipropileno =>  $c_P = 0,48 \text{ KCal/Kg}^\circ\text{C}$

Densidad tungsteno =>  $\rho_T = 19250 \text{ Kg/m}^3$

Calor específico del tungsteno =>  $c_T = 0,037 \text{ KCal/Kg}^\circ\text{C}$

Densidad del acero inoxidable =>  $\rho_A = 8238 \text{ Kg/m}^3$

Calor específico del acero inoxidable =>  $c_A = 0,11 \text{ KCal/Kg}^\circ\text{C}$

#### Cálculo térmico para sistema de calentamiento de sección #1

Diámetro interno de la camisa de tungsteno =>  $d_i = 4 \text{ cm} = 0,04 \text{ m}$

Diámetro externo de la camisa de tungsteno =>  $d_e = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$

Temperatura inicial =>  $T_i = 10^\circ\text{C}$

Temperatura final =>  $T_f = 180^\circ\text{C}$

Altura =>  $h = 26 \text{ cm} = 0,26 \text{ m}$

Cálculos para el polipropileno (materia prima a fundir):

$$V_P = \frac{\pi}{4} (d_i^2) h$$



$$V_P = \frac{\pi}{4} (0,04 \text{ m})^2 (0,26 \text{ m})$$

$$V_P = \frac{\pi}{4} (0,0016 \text{ m}^2) (0,26 \text{ m})$$

$$V_P = 0,00033 \text{ m}^3$$

$$\rho_P = \frac{m_P}{V_P}$$

$$m_P = \rho_P \cdot V_P$$

$$m_P = (946 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}) (0,00033 \text{ m}^3)$$

$$m_P = 0,312 \text{ Kg}$$

$$Q_P = m_P \cdot c_P \cdot \Delta T$$

$$Q_P = m_P \cdot c_P \cdot (T_f - T_i)$$

$$Q_P = (0,312 \text{ Kg}) (0,48 \frac{\text{KCal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}}) (180^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C})$$

$$Q_P = (0,312 \text{ Kg}) (0,48 \frac{\text{KCal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}}) (170^\circ\text{C})$$

$$Q_P = 25,46 \text{ KCal}$$

Cálculos para la camisa o barril de tungsteno:

$$V_{CT} = \frac{\pi}{4} \cdot (d_e^2 - d_i^2) \cdot h$$

$$V_{CT} = \frac{\pi}{4} \cdot [(0,1 \text{ m})^2 - (0,04 \text{ m})^2] \cdot (0,26 \text{ m})$$

$$V_{CT} = \frac{\pi}{4} \cdot (0,0084 \text{ m}^2) \cdot (0,26 \text{ m})$$

$$V_{CT} = 0,00172 \text{ m}^3$$

$$\rho_T = \frac{m_{CT}}{V_{CT}}$$

$$m_{CT} = \rho_T \cdot V_{CT}$$

$$m_{CT} = (19250 \frac{Kg}{m^3})(0,00172 m^3)$$

$$m_{CT} = 33,11 Kg$$

$$Q_{CT} = m_{CT} \cdot c_T \cdot \Delta T$$

$$Q_{CT} = m_{CT} \cdot c_T \cdot (T_f - T_i)$$

$$Q_{CT} = (33,11 Kg)(0,037 \frac{KCal}{Kg^\circ C})(180^\circ C - 10^\circ C)$$

$$Q_{CT} = (33,11 Kg)(0,037 \frac{KCal}{Kg^\circ C})(170^\circ C)$$

$$Q_{CT} = 208,26 KCal$$

Cálculos para el husillo de acero inoxidable:

$$V_H = \frac{3}{4} V_P$$

$$V_H = \frac{3}{4} \cdot 0,00033 m^3$$

$$V_H = 0,0002475 m^3$$

$$\rho_A = \frac{m_H}{V_H}$$

$$m_H = \rho_A \cdot V_H$$

$$m_H = (8238 \frac{Kg}{m^3})(0,0002475 m^3)$$

$$m_H = 2,04 Kg$$

$$Q_H = m_H \cdot c_A \cdot \Delta T$$

$$Q_H = m_H \cdot c_A \cdot (T_f - T_i)$$

$$Q_H = (2,04 \text{ Kg}) \left( 0,11 \frac{\text{KCal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}} \right) (180^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C})$$

$$Q_H = (2,04 \text{ Kg}) \left( 0,11 \frac{\text{KCal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}} \right) (170^\circ\text{C})$$

$$Q_H = 38,15 \text{ KCal}$$

Entonces la Q requerida por la primera sección será:

$$Q_1 = Q_P + Q_{CT} + Q_H$$

$$Q_1 = 25,46 \text{ KCal} + 208,26 \text{ KCal} + 38,15 \text{ KCal}$$

$$Q_1 = 271,87 \text{ KCal}$$

Utilizando la igualdad  $1\text{Kcal} = 0,001164\text{KWh}$

$$Q_1 = 0,316 \text{ KWh}$$

Esta energía requerida se multiplica por un factor de seguridad estimado de 1,3 (30%), correspondiente a la suma de pérdidas por conducción (10%), convección (10%) y radiación (10%) existentes en la carga, entonces:

$$Q_1 = 0,41 \text{ KWh}$$

### **Cálculos para el transformador #1**

$$Q_1 = 0,41 \text{ KWh} = E_{Tr}$$

$$E_{Tr} = P_{Tr} \cdot t$$

Realizando los cálculos para  $t = 0,5$  hora (30 minutos)

$$P_{Tr} = \frac{E_{Tr}}{t}$$

$$P_{Tr} = \frac{0,41 \text{ KWh}}{0,5 \text{ h}}$$

$$P_{Tr} = 820 \text{ W}$$

Ahora para una salida de 40 V en el secundario del transformador:

$$P = V * I$$

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

$$I = \frac{820 \text{ W}}{40 \text{ V}}$$

$$I = 20,5 \text{ A}$$

### **Cálculo térmico para sistema de calentamiento de sección #2**

Diámetro interno de la camisa de tungsteno =>  $d_i = 4 \text{ cm} = 0,04 \text{ m}$

Diámetro externo de la camisa de tungsteno =>  $d_e = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$

Temperatura inicial =>  $T_i = 10^\circ\text{C}$

Temperatura final =>  $T_f = 210^\circ\text{C}$

Altura =>  $h = 26 \text{ cm} = 0,26 \text{ m}$

Cálculos para el polipropileno (materia prima a fundir):

$$V_P = \frac{\pi}{4} (d_i^2) h$$

$$V_P = \frac{\pi}{4} (0,04 \text{ m})^2 (0,26 \text{ m})$$

$$V_P = \frac{\pi}{4} (0,0016 \text{ m}^2) (0,26 \text{ m})$$

$$V_P = 0,00033 \text{ m}^3$$

$$\rho_P = \frac{m_P}{V_P}$$

$$m_P = \rho_P \cdot V_P$$

$$m_P = (946 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}) (0,00033 \text{ m}^3)$$

$$m_P = 0,312 \text{ Kg}$$

$$Q_P = m_P \cdot c_P \cdot \Delta T$$

$$Q_P = m_P \cdot c_P \cdot (T_f - T_i)$$

$$Q_P = (0,312 \text{ Kg}) \left( 0,48 \frac{\text{KCal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}} \right) (210^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C})$$

$$Q_P = (0,312 \text{ Kg}) \left( 0,48 \frac{\text{KCal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}} \right) (200^\circ\text{C})$$

$$Q_P = 29,95 \text{ KCal}$$

Cálculos para la camisa o barril de tungsteno:

$$V_{CT} = \frac{\pi}{4} \cdot (d_e^2 - d_i^2) \cdot h$$

$$V_{CT} = \frac{\pi}{4} \cdot [(0,1 \text{ m})^2 - (0,04 \text{ m})^2] \cdot (0,26 \text{ m})$$

$$V_{CT} = \frac{\pi}{4} \cdot (0,0084 \text{ m}^2) \cdot (0,26 \text{ m})$$

$$V_{CT} = 0,00172 \text{ m}^3$$

$$\rho_T = \frac{m_{CT}}{V_{CT}}$$

$$m_{CT} = \rho_T \cdot V_{CT}$$

$$m_{CT} = (19250 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}) (0,00172 \text{ m}^3)$$

$$m_{CT} = 33,11 \text{ Kg}$$

$$Q_{CT} = m_{CT} \cdot c_T \cdot \Delta T$$

$$Q_{CT} = m_{CT} \cdot c_T \cdot (T_f - T_i)$$

$$Q_{CT} = (33,11 \text{ Kg}) \left( 0,037 \frac{\text{KCal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}} \right) (210^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C})$$

$$Q_{CT} = (33,11 \text{ Kg}) \left( 0,037 \frac{\text{KCal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}} \right) (200^\circ\text{C})$$

$$Q_{CT} = 245,01 \text{ KCal}$$

Cálculos para el husillo de acero inoxidable:

$$V_H = \frac{3}{4} V_P$$

$$V_H = \frac{3}{4} \cdot 0,00033 \text{ m}^3$$

$$V_H = 0,0002475 \text{ m}^3$$

$$\rho_A = \frac{m_H}{V_H}$$

$$m_H = \rho_A \cdot V_H$$

$$m_H = \left(8238 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right)(0,0002475 \text{ m}^3)$$

$$m_H = 2,04 \text{ Kg}$$

$$Q_H = m_H \cdot c_A \cdot \Delta T$$

$$Q_H = m_H \cdot c_A \cdot (T_f - T_i)$$

$$Q_H = (2,04 \text{ Kg}) \left(0,11 \frac{\text{KCal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}}\right) (210^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C})$$

$$Q_H = (2,04 \text{ Kg}) \left(0,11 \frac{\text{KCal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}}\right) (200^\circ\text{C})$$

$$Q_H = 44,88 \text{ KCal}$$

Entonces la Q requerida por la segunda sección será:

$$Q_2 = Q_P + Q_{CT} + Q_H$$

$$Q_2 = 29,95 \text{ KCal} + 245,01 \text{ KCal} + 44,88 \text{ KCal}$$

$$Q_2 = 319,84 \text{ KCal}$$

Utilizando la igualdad 1Kcal= 0,001164KWh

$$Q_2 = 0,372 \text{ KWh}$$

Multiplicando este valor por un factor de 1,3 para compensar las pérdidas por conducción, convección y radiación:

$$Q_2 = 0,48 \text{ KWh}$$

### **Cálculos para el transformador #2**

$$Q_2 = 0,48 \text{ KWh} = E_{Tr}$$

$$E_{Tr} = P_{Tr} \cdot t$$

Realizando los cálculos para  $t = 0,5$  hora (30 minutos)

$$P_{Tr} = \frac{E_{Tr}}{t}$$

$$P_{Tr} = \frac{0,48 \text{ KWh}}{0,5 \text{ h}}$$

$$P_{Tr} = 960 \text{ W}$$

Ahora para una salida de 40 V en el secundario del transformador:

$$P = V * I$$

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

$$I = \frac{960 \text{ W}}{40 \text{ V}}$$

$$I = 24 \text{ A}$$

### **Cálculo térmico para sistema de calentamiento de sección #3**

Diámetro interno de la camisa de tungsteno  $\Rightarrow d_i = 4 \text{ cm} = 0,04 \text{ m}$

Diámetro externo de la camisa de tungsteno  $\Rightarrow d_e = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$

Temperatura inicial  $\Rightarrow T_i = 10^\circ\text{C}$

Temperatura final =>  $T_f = 240^\circ\text{C}$

Altura =>  $h = 16 \text{ cm} = 0,16 \text{ m}$

Cálculos para el polipropileno (materia prima a fundir):

$$V_P = \frac{\pi}{4} (d_i^2) h$$

$$V_P = \frac{\pi}{4} (0,04 \text{ m})^2 (0,15 \text{ m})$$

$$V_P = \frac{\pi}{4} (0,0016 \text{ m}^2) (0,15 \text{ m})$$

$$V_P = 0,00020 \text{ m}^3$$

$$\rho_P = \frac{m_P}{V_P}$$

$$m_P = \rho_P \cdot V_P$$

$$m_P = (946 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}) (0,00020 \text{ m}^3)$$

$$m_P = 0,19 \text{ Kg}$$

$$Q_P = m_P \cdot c_P \cdot \Delta T$$

$$Q_P = m_P \cdot c_P \cdot (T_f - T_i)$$

$$Q_P = (0,19 \text{ Kg}) (0,48 \frac{\text{KCal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}}) (240^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C})$$

$$Q_P = (0,19 \text{ Kg}) (0,48 \frac{\text{KCal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}}) (230^\circ\text{C})$$

$$Q_P = 20,98 \text{ KCal}$$

Cálculos para la camisa o barril de tungsteno:

$$V_{CT} = \frac{\pi}{4} \cdot (d_e^2 - d_i^2) \cdot h$$



$$V_{CT} = \frac{\pi}{4} \cdot [(0,1 \text{ m})^2 - (0,04 \text{ m})^2] \cdot (0,16 \text{ m})$$

$$V_{CT} = \frac{\pi}{4} \cdot (0,0084 \text{ m}^2) \cdot (0,16 \text{ m})$$

$$V_{CT} = 0,0011 \text{ m}^3$$

$$\rho_T = \frac{m_{CT}}{V_{CT}}$$

$$m_{CT} = \rho_T \cdot V_T$$

$$m_{CT} = (19250 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3})(0,0011 \text{ m}^3)$$

$$m_{CT} = 21,18 \text{ Kg}$$

$$Q_{CT} = m_T \cdot c_T \cdot \Delta T$$

$$Q_{CT} = m_T \cdot c_T \cdot (T_f - T_i)$$

$$Q_{CT} = (21,18 \text{ Kg})(0,037 \frac{\text{KCal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}})(240^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C})$$

$$Q_{CT} = (21,18 \text{ Kg})(0,037 \frac{\text{KCal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}})(230^\circ\text{C})$$

$$Q_{CT} = 180,24 \text{ KCal}$$

Cálculos para el husillo de acero inoxidable:

$$V_H = \frac{3}{4} V_P$$

$$V_H = \frac{3}{4} \cdot 0,00020 \text{ m}^3$$

$$V_H = 0,00015 \text{ m}^3$$

$$\rho_A = \frac{m_H}{V_H}$$

$$m_H = \rho_A \cdot V_H$$

$$m_H = (8238 \frac{Kg}{m^3})(0,00015 m^3)$$

$$m_H = 1,24 Kg$$

$$Q_H = m_H \cdot c_A \cdot \Delta T$$

$$Q_H = m_H \cdot c_A \cdot (T_f - T_i)$$

$$Q_H = (1,24 Kg) (0,11 \frac{KCal}{Kg^\circ C}) (240^\circ C - 10^\circ C)$$

$$Q_H = (1,24 Kg) (0,11 \frac{KCal}{Kg^\circ C}) (230^\circ C)$$

$$Q_H = 31,37 KCal$$

Entonces la Q requerida por la tercera sección será:

$$Q_3 = Q_P + Q_{CT} + Q_H$$

$$Q_3 = 20,98 KCal + 180,24 KCal + 31,37 KCal$$

$$Q_3 = 232,59 KCal$$

Utilizando la igualdad  $1 KCal = 0,001163 KWh$

$$Q_3 = 0,270 KWh$$

Multiplicando por 1,3 para compensar las pérdidas por conducción, convección y radiación:

$$Q_3 = 0,35 KWh$$

### **Cálculos para el transformador #3**

$$Q_3 = 0,35 KWh = E_{Tr}$$

$$E_{Tr} = P_{Tr} \cdot t$$

Realizando los cálculos para  $t = 0,5$  hora (30 minutos)

$$P_{Tr} = \frac{E_{Tr}}{t}$$

$$P_{Tr} = \frac{0,35 \text{ KWh}}{0,5 \text{ h}}$$

$$P_{Tr} = 700 \text{ W}$$

Ahora para una salida de 40 V en el secundario del transformador:

$$P = V * I$$

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

$$I = \frac{700 \text{ W}}{40 \text{ V}}$$

$$I = 17,5 \text{ A}$$

Entonces la energía requerida por la camisa de tungsteno de la máquina inyectora de plástico es igual a:

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$Q_T = 0,41 \text{ KWh} + 0,48 \text{ KWh} + 0,35 \text{ KWh}$$

$$Q_T = 1,24 \text{ KWh}$$

**Tabla III-I.** Tabla de energías y potencias requeridas por cada sección y energía total requerida

	<b>Energía requerida [KWh]</b>	<b>Potencia requerida [KW] para t= 30 min</b>
Sección #1 ( <b>Q<sub>1</sub></b> )	0,41	0,82
Sección #2 ( <b>Q<sub>2</sub></b> )	0,48	0,96
Sección #3 ( <b>Q<sub>3</sub></b> )	0,35	0,7
<b>Total (Q<sub>T</sub>)</b>	1,24	

**Fuente:** Realizada por los autores

Para efectos de diseño se ha considerado usar una potencia de 1 KW para los circuitos del sistema de calentamiento por inducción en cada sección.

### 3.1.1.2. Parámetros para la etapa de rectificación

Para cada fuente de alimentación, que alimentará cada circuito conversor resonante, se eligió utilizar un transformador de (120V- 40V), debido a que se ha decidido alimentar cada circuito conversor resonante con un voltaje continuo entre 50 y 60V, lo que se consigue después de la rectificación y su posterior filtrado.

$$V_{out} = \sqrt{2} V_{in} \quad (\text{Ec. 36})$$

$$V_{out} = \sqrt{2} (40V)$$

$$V_{out} = 56,57 V$$

Entonces para el diseño del rectificador se toma en consideración la potencia de trabajo y el voltaje en el secundario del transformador. Utilizando la fórmula general de la potencia (ecuación 37) para una potencia de 1KW (1000W) y un voltaje de 40V en el secundario del transformador determinamos la corriente nominal que circulará por la etapa rectificadora:

$$P = V * I \quad (\text{Ec. 37})$$

$$I_n = \frac{1000W}{40V}$$

$$I_n = 25 A$$

Se dimensiona el rectificador en base al voltaje pico inverso que debe soportar y la corriente que circula por el mismo.

$$V_{\text{pico-inv}} = 2 * 40 * \sqrt{2}$$

$$V_{\text{pico-inv}} = 113 V$$

$$I_{\text{Rect}} = 1,5 I_n$$

$$I_{\text{Rect}} = 37,5 A$$

Por ende se deberá elegir un puente rectificador comercial de 50A y 1000V.

Para la elección del condensador del filtrado se utiliza la regla del 10%, la cual consiste en calcular la capacitancia necesaria para obtener un rizado en el voltaje de salida de un 10%. Utilizando la siguiente fórmula:

$$\mathbf{C} = \frac{5 I_n}{f_{red} V_{out}} \quad (\text{Ec. 38})$$
$$C = \frac{5 (25 A)}{(60 \text{ Hz})(56,57 V)}$$
$$C = 36827,53 \mu\text{F}$$

Se deberá entonces conectar 10 capacitores electrolíticos en paralelo de 3300  $\mu\text{F}$  a 80 V, que son valores estandarizados, para obtener un buen filtrado.

### 3.1.1.3. Parámetros de la etapa del convertidor resonante y circuito RLC

En aplicaciones de calentamiento de este tipo se recomiendan valores de frecuencia de resonancia entre 20 y 30 KHz.

Para el diseño de la etapa del conversor resonante de cada circuito se ha decidido utilizar una frecuencia de resonancia de 23 KHz.

Mediante la ecuación 16 se puede calcular la profundidad de penetración en la carga (barril de aleación de tungsteno y acero), sabiendo que:

$$\rho \text{ para tungsteno} = 5,6 \cdot 10^{-8} [\Omega \text{ m}]$$

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

$$\mu_r \text{ para el tungsteno} = 1,000068$$

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_0 \mu_r}}$$
$$\delta = \sqrt{\frac{5,6 \cdot 10^{-8}}{\pi (23000)(4\pi \cdot 10^{-7}) \mu_r}}$$

$$\delta = 0,000785 \text{ m}$$

Los transistores MOSFET IRFP260N fueron designados como los conmutadores del circuito convertidor resonante, debido a su robustez en comparación con los otros existentes en el mercado, mientras que para los diodos Schottky se ha decidido utilizar el modelo NTE6082. Los detalles de estos dispositivos se muestran en el anexo 4 y el anexo 5.

En cuanto a las bobinas toroidales se ha decidido utilizar bobinas con una inductancia de 130  $\mu\text{H}$ , las mismas que deberán encontrarse sobre un núcleo de ferrita de color amarillo con blanco ya que mediante la tabla III-II se puede observar que este tipo de núcleos es el más adecuado para las frecuencias que se han utilizado en esta tesis.

**Tabla III-II.** Colores de núcleos toroidales y sus frecuencias asociadas

<b>COLOR (ES)</b>	<b>FRECUENCIAS</b>
Amarillo – Blanco	Hasta 100 KHz
Gris	50 KHz – 1 MHz
Rojo – Blanco	0,1 – 3 MHz
Azul	0,5 – 5 MHz
Rojo	1 – 30 MHz
Amarillo	2 – 50 MHz
Negro	5 - 100 MHz
Azul – Amarillo	20 – 200 MHz
Verde – Blanco	20 - 200 MHz
Verde – Naranja	20 - 200 MHz
Marrón	50 - 300 MHz

**Fuente:** [http://www.ce3rkw.net23.net/nucleos\\_toroidales.pdf](http://www.ce3rkw.net23.net/nucleos_toroidales.pdf)

Para las bobinas de inducción se ha resuelto que deberán construirse 3 bobinas, una para cada sección de la camisa de tungsteno, de 8 espiras y 12 cm de diámetro interno cada una, de las cuales 2 serán de 24 cm de longitud y la tercera bobina de 15 cm de largo, dando los siguientes valores de inductancia:

**Tabla III-III.** Valores de inductancias para cada bobina de inducción

<b>Bobina inducción + carga</b>	<b>Inductancia</b>
Bobina 1 <sup>ra</sup> sección	12 $\mu$ H
Bobina 2 <sup>da</sup> sección	12 $\mu$ H
Bobina 3 <sup>er</sup> sección	14 $\mu$ H

**Fuente:** Realizado por los autores

Estos valores fueron obtenidos con la ayuda de un henriómetro (ver anexo 6).

El valor de la constante de acoplamiento se calcula mediante la ecuación 19 y con los datos de los diámetros de la carga y de la bobina de inducción previamente dichos, entonces se obtiene:

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

$$K = \left(\frac{10 \text{ cm}}{12 \text{ cm}}\right)^3$$

$$K = 0,6$$

Es posible observar que se obtendrá un buen factor de acoplamiento que deriva en una buena eficiencia del sistema.

A continuación se procede al cálculo de la capacitancia del circuito tanque para cada sección de la camisa de tungsteno de la máquina inyectora de plástico:

**Para secciones #1 y #2**

Utilizando la ecuación 28:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}}$$

$$C_r = \frac{1}{L_r(2\pi f_r)^2}$$

$$C_r = \frac{1}{12\mu\text{H} (2\pi * 23\text{KHz})^2}$$

$$C_r = 4 \mu\text{F}$$

Empleando la ecuación 29:

$$I_r = \frac{2\pi * P}{V}$$

$$I_r = \frac{2\pi * 1000\text{W}}{40 * \sqrt{2}}$$

$$I_r = 111,1 \text{ A}$$

A partir de la ecuación 30:

$$C = \frac{1}{2\pi f_r V_c}$$

$$V_c = \frac{I_r}{C * 2\pi * f_r}$$

$$V_c = \frac{111,1 \text{ A}}{4\mu\text{F} * 2\pi * 23\text{KHz}}$$

$$V_c = 192,2 \text{ V}$$

Es necesario multiplicar este valor por un factor de seguridad de 1,5.

Entonces para cada una de las secciones #1 y #2 se deberá utilizar un banco de capacitores de 4  $\mu\text{F}$  a 275 V.



**Para la sección #3**

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}}$$

$$C_r = \frac{1}{L_r(2\pi f_r)^2}$$

$$C_r = \frac{1}{14\mu\text{H} (2\pi * 23\text{KHz})^2}$$

$$C_r = 3,42 \mu\text{F}$$

$$I_r = \frac{2\pi * P}{V}$$

$$I_r = \frac{2\pi * 1000\text{W}}{40 * \sqrt{2}}$$

$$I_r = 111,1 \text{ A}$$

$$C = \frac{1}{2\pi f_r V_c}$$

$$V_c = \frac{I_r}{C * 2\pi * f_r}$$

$$V_c = \frac{111,1 \text{ A}}{3,42 \mu\text{F} * 2\pi * 23\text{KHz}}$$

$$V_c = 224,8 \text{ V}$$

Entonces para la tercera sección se deberá utilizar un banco de capacitores de 3,42  $\mu\text{F}$  a 275 V.

Para cumplir con los objetivos trazados en la presente tesis se optó por realizar un sistema de calentamiento por inducción, tomando en consideración los parámetros obtenidos previamente. El sistema que se ha desarrollado cumple con los requerimientos necesarios para alcanzar la temperatura deseada por la sección #3 del

barril de la máquina inyectora de plástico de la fábrica PARTIPLAST, pues esta sección es la que debe alcanzar una mayor temperatura.

### 3.2. Diseño e implementación del sistema de calentamiento por inducción

Para obtener el mejor funcionamiento del sistema de calentamiento por inducción se realizaron varias mejoras en los diseños siguiendo un proceso de experimentación al modificar paulatinamente el tamaño del objeto a calentar hasta cumplir con el requerimiento de carga.

Para iniciar se eligió utilizar un transformador monofásico de 120V a 40V, capaz de suministrar la potencia necesaria. El transformador se muestra en la siguiente figura:

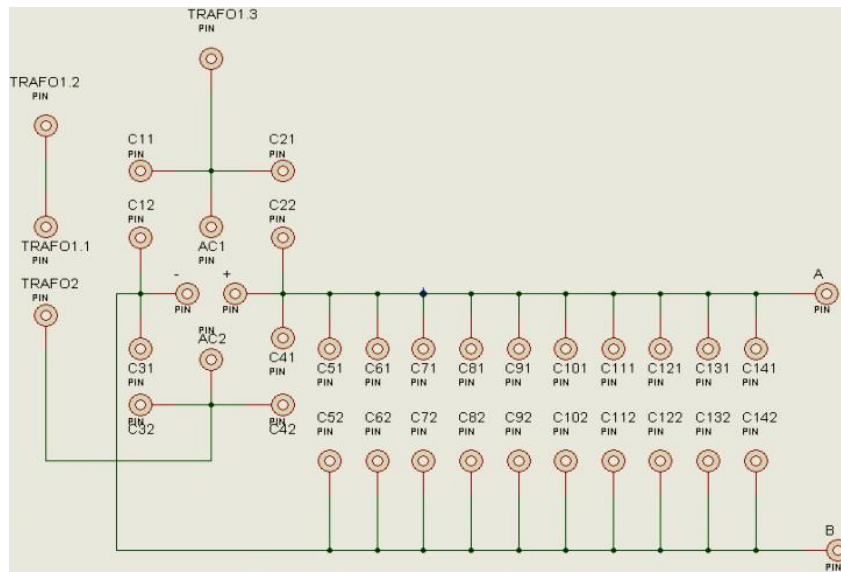


**Figura III.3.** Transformador utilizado  
**Fuente:** Realizado por los autores

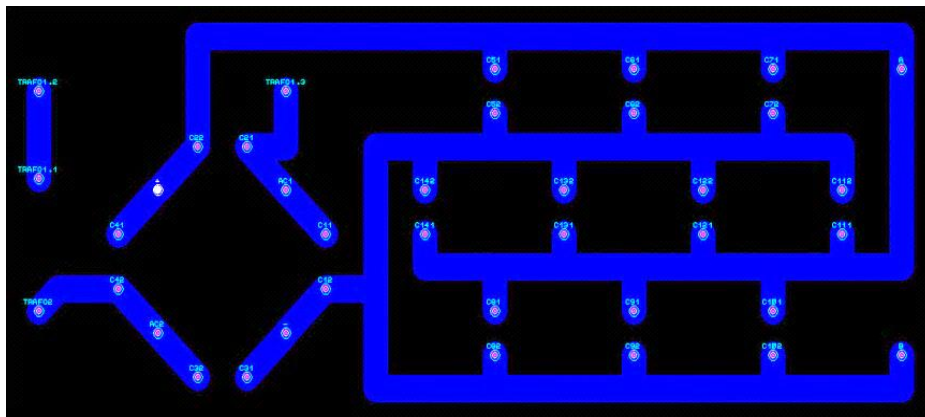
Después de la elección del transformador se ha procedido a realizar el diseño del circuito de la etapa de rectificación la cual consta de un puente de diodos comercial de 50A a 1000V, cuatro capacitores de poliéster en paralelo con cada diodo del puente para evitar interferencias provenientes desde el transformador, diez capacitores electrolíticos de 3300uF a 80V cada uno y un capacitor de poliéster de 1uF a 200V para evitar que ingresen altas frecuencias a la fuente.

Este y los demás diseños de todos los circuitos fueron realizados con la ayuda del software ISIS y ARES de PROTEUS versión 7.7 portable.

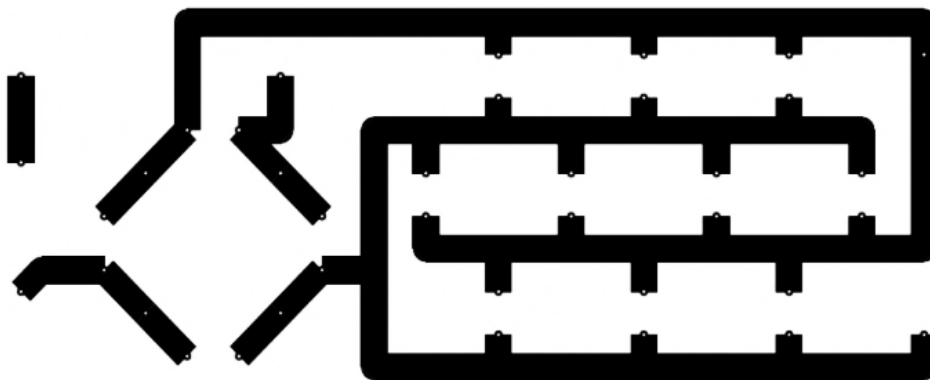
A continuación se muestra el diseño del circuito de la etapa de rectificación:



**Figura III.4.** Diseño de la etapa rectificadora realizada en ISIS  
**Fuente:** Realizado por los autores

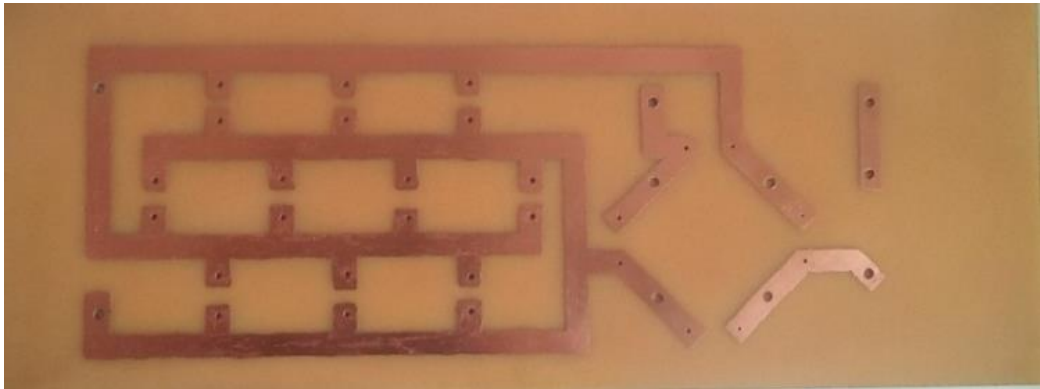


**Figura III.5.** Diseño de la etapa rectificadora realizada en ARES  
**Fuente:** Realizado por los autores



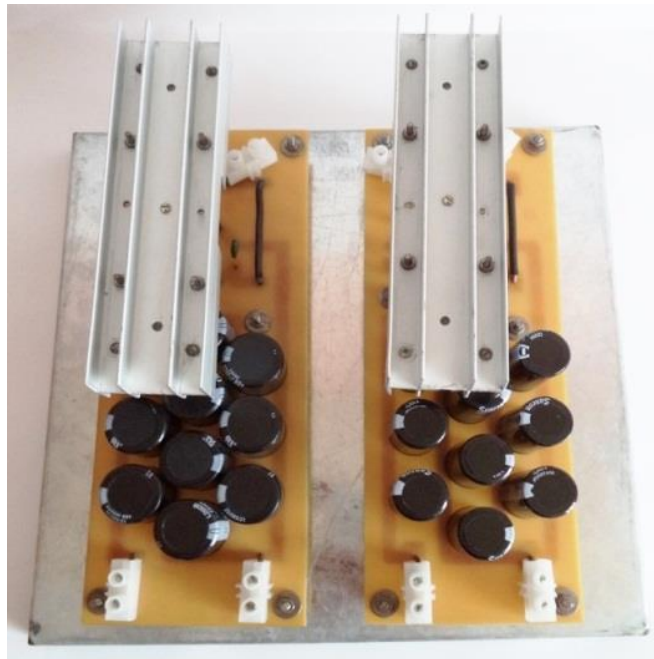
**Figura III.6.** Pistas del circuito electrónico de la etapa de rectificación  
**Fuente:** Realizado por los autores

Debido a que el puente de diodos de la fuente de alimentación presentaba problemas de calentamiento se optó por realizar dos fuentes de alimentación de iguales características entre sí, para dividir la corriente de alimentación. A continuación se muestran las imágenes de su implementación:



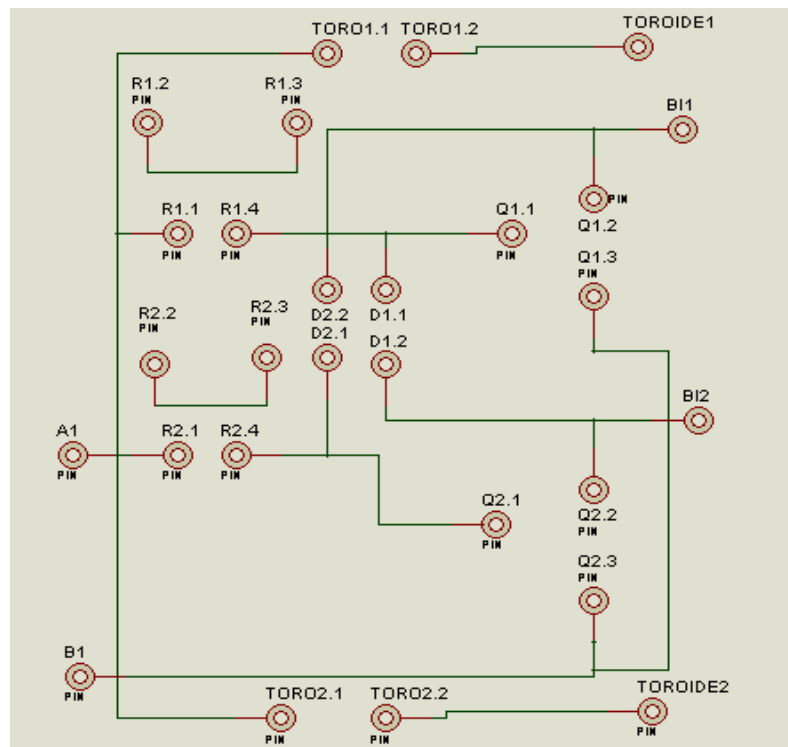
**Figura III.7.** Pistas en baquelita de la etapa de rectificación  
**Fuente:** Realizado por los autores

Como disipadores de calor, para cada puente de diodos, se utilizaron dos rieles de aluminio. Además se utilizaron conectores de 60A con recubrimiento plástico para las entradas y salidas de la fuente.

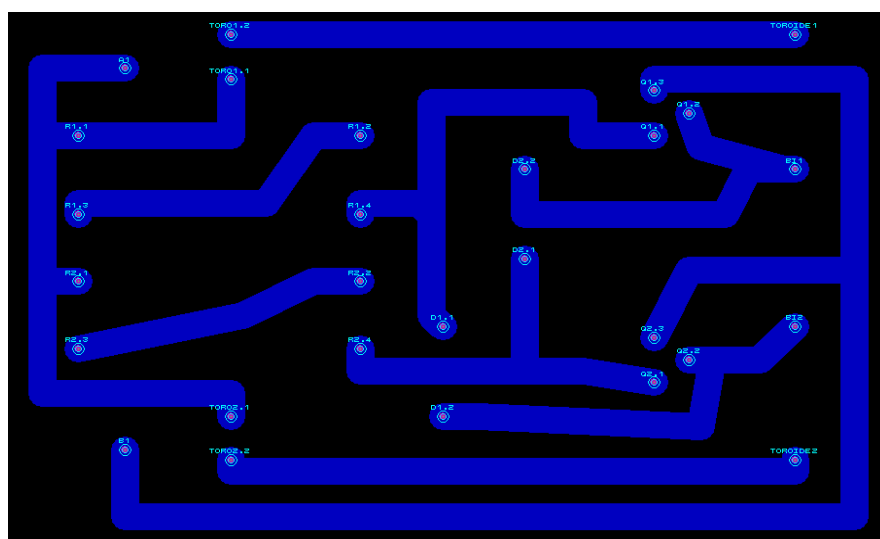


**Figura III.8.** Fuentes de alimentación implementadas  
**Fuente:** Realizado por los autores

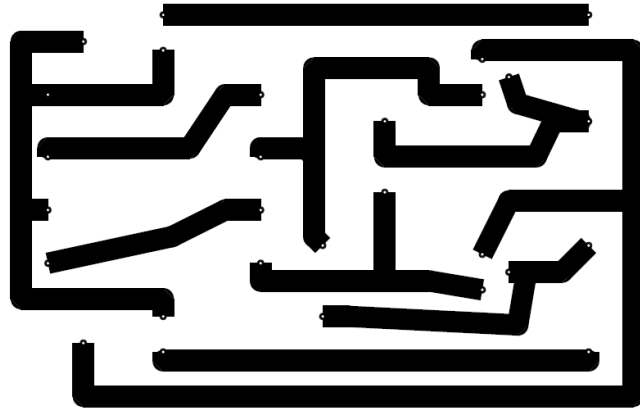
Luego se procedió a realizar los diseños para el circuito convertidor resonante, el mismo que está conformado por cuatro resistencias de potencia a 20 W de las cuales dos son de 330  $\Omega$  y dos de 120  $\Omega$ , dos bobinas toroidales de 130uH, dos diodos Schottky NTE6082 y dos transistores MOSFET IRFP260N.



**Figura III.9.** Diseño del circuito convertidor resonante realizado en ISIS  
**Fuente:** Realizado por los autores



**Figura III.10.** Diseño del circuito convertidor resonante realizado en ARES  
**Fuente:** Realizado por los autores



**Figura III.11.** Pistas del circuito convertidor resonante  
**Fuente:** Realizado por los autores

Ya que se ha trabajado con una carga, que demanda una potencia considerable, se ha decidido implementar dos circuitos convertidor resonante que posteriormente se han conectado en paralelo con el circuito RLC.

Para evitar problemas de calentamiento se emplearon disipadores de calor de aluminio tanto a diodos Schottky como a transistores MOSFET. De igual manera que para las fuentes de alimentación, se utilizaron conectores de 60A con recubrimiento plástico para las entradas y salidas de cada circuito, como se muestra a continuación:

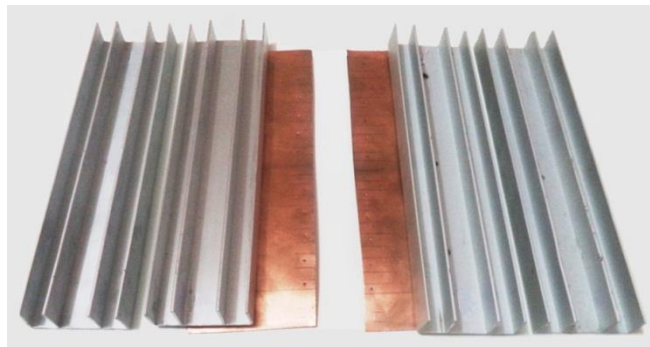


**Figura III.12.** Placa con los circuitos convertidor resonante implementada (vistas frontal y posterior)  
**Fuente:** Realizado por los autores

Posteriormente se continuó con la implementación del circuito tanque compuesto por el capacitor y la bobina de inducción.

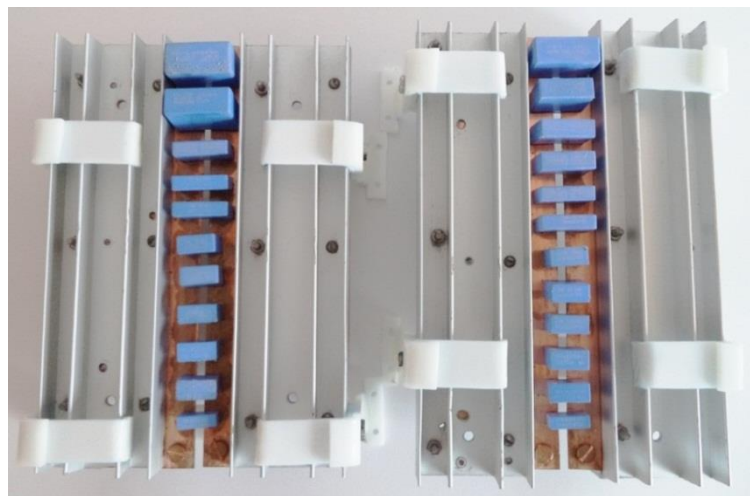
Para realizar las pruebas, se realizaron sólo dos bancos de capacitores de 2uF cada uno, con capacitores MKP, puesto que los mismos fueron de difícil adquisición y su venta en el mercado ecuatoriano es inexistente. Estos capacitores son los recomendados para aplicaciones de calentamiento por inducción.

Los capacitores fueron soldados sobre planchas de cobre para mejorar la conductividad y para refrigerarlos se emplearon rieles de aluminio.



**Figura III.13.** Planchas de cobre y rieles de aluminio para bancos de capacitores  
**Fuente:** Realizado por los autores

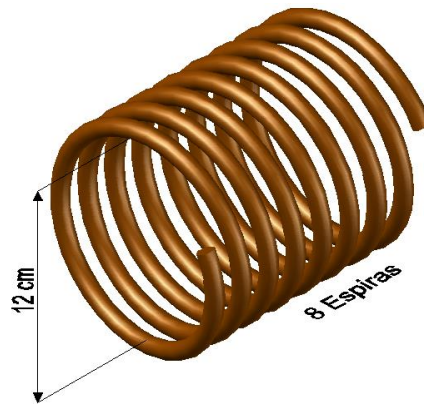
Para una mejor estabilidad de los bancos de capacitores, éstos fueron sujetos transversalmente con tiras de acrílico dobladas sobre los rieles de aluminio.



**Figura III.14.** Bancos de capacitores implementados  
**Fuente:** Realizado por los autores

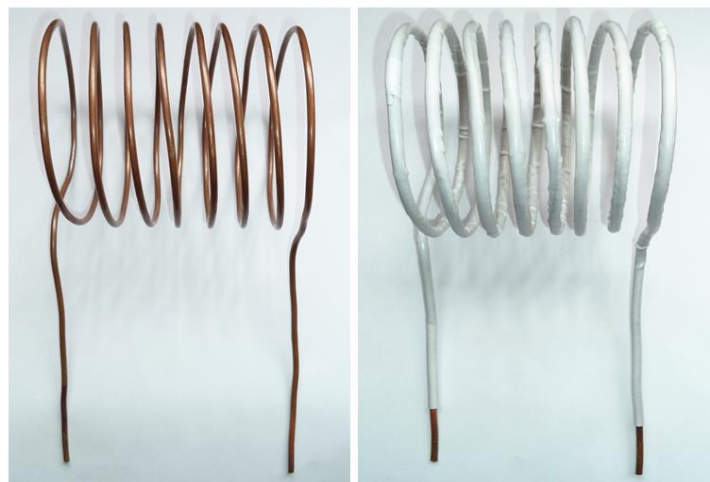


Mientras que para obtener un buen factor de acoplamiento se diseñó una bobina de inducción con 8 espiras y 12 cm de diámetro interno y longitud ajustable a la carga.



**Figura III.15.** Esquema general de las bobinas de inducción  
**Fuente:** Realizado por los autores

La cañería utilizada para implementar la bobina es de cobre de 3/16 de pulgada. Para evitar contactos indeseados entre la bobina y la carga a calentar, se recubrió a la bobina con una funda de fibra de vidrio resistente a altas temperaturas conocida como espagueti.



**Figura III.16.** Bobina de inducción elaborada  
**Fuente:** Realizado por los autores

Los circuitos de las fuentes de alimentación, el convertidor resonante y los bancos de capacitores fueron ingresados en una caja de trabajo que se diseñó de 60 cm de largo, 32 cm de ancho y 34 cm de alto, la caja se muestra en la siguiente figura:





**Figura III.17.** Caja de trabajo (vistas lateral y superior)  
**Fuente:** Realizado por los autores

Se utilizó un interruptor termomagnético bipolar de 32A como protección general y un fusible de cristal de 30A en las líneas del positivo y negativo a la salida de las fuentes de alimentación.

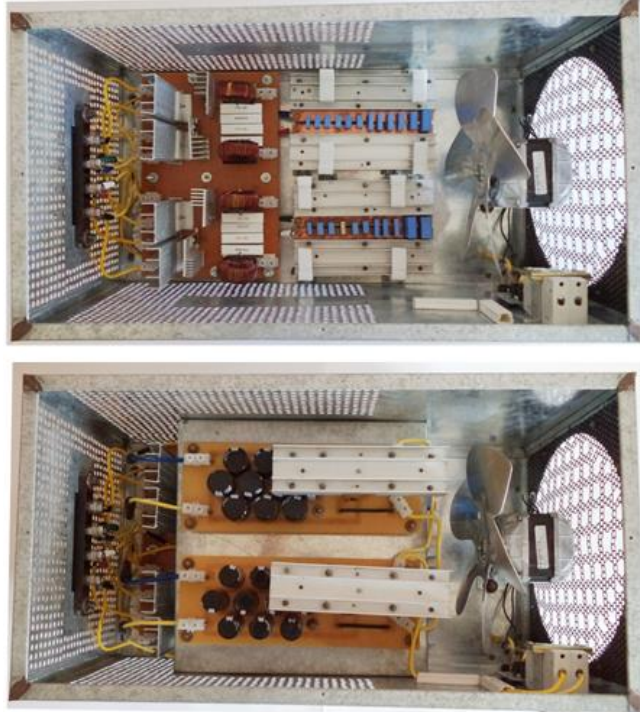
En base a las corrientes calculadas para la etapa de rectificación y mediante la tabla III-IV se eligió el conductor #10 AWG para unir todos los circuitos en el interior de la caja de trabajo. Mientras que para las líneas que llevarán toda la corriente de inducción se eligió utilizar cable #2 AWG.

**Tabla III-IV.** Datos técnicos de cables de cobre AWG.

Amperaje que soportan los cables de cobre					
Nivel de temperatura:	60 °C	75 °C	90 °C	60 °C	
Tipo de aislante:	TW	RHW, THW, THWN	THHN, XHHW-2, THWN-2	SPT	
Medida/ calibre del cable	Amperaje soportado			Medida/ calibre del cable	Amperaje soportado
14 AWG	15 A	15 A	15 A	20 AWG	2 A
12 AWG	20 A	20 A	20 A	18 AWG	10 A
10 AWG	30 A	30 A	30 A	16 AWG	13 A
8 AWG	40 A	50 A	55 A	14 AWG	18 A
6 AWG	55 A	65 A	75 A	12 AWG	25 A
4 AWG	70 A	85 A	95 A		
3 AWG	85 A	100 A	115 A		
2 AWG	95 A	115 A	130 A		
1 AWG	110 A	130 A	145 A		
1/0 AWG	125 A	150 A	170 A		
2/0 AWG	145 A	175 A	195 A		
3/0 AWG	165 A	200 A	225 A		
4/0 AWG	195 A	230 A	260 A		

**Fuente:** <http://www.voltech.com.mx/cables.php>

En adición se integró un ventilador para la correcta disipación de calor. Las fuentes de alimentación se han ubicado en un segundo piso exclusivo para optimizar espacio.



**Figura III.18.** Ubicación de los circuitos en el interior de la caja de trabajo  
**Fuente:** Realizado por los autores

Los planos referente a la caja de trabajo, placas de fuentes de alimentación, placa de convertidores resonantes y banco de capacitores se pueden ver en el anexo 7.

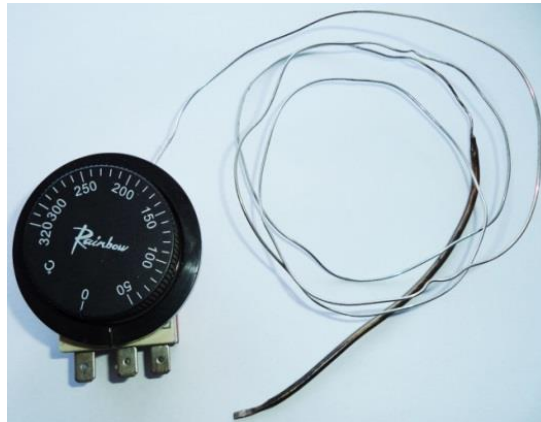
### **3.3. Diseño e implementación del sistema de control de temperatura**

Para realizar el correcto control de temperatura del proceso de calentamiento se ha utilizado un termostato mecánico, dispositivo que se encarga de realizar la conmutación de encendido y apagado del sistema de calentamiento.

Un termostato es un dispositivo el cual cierra o abre un circuito en función de una determinada temperatura.

En el terminal del termostato mecánico existe un gas que se expande con la temperatura y fluye a través de un capilar para hacer girar un serpentín que realiza el switcheo del contactor, incorporado en el termostato, al llegar al valor del setpoint ajustado. El

termostato mecánico utilizado cuenta con un rango de setpoint entre 0 °C y 320 °C y se muestra en la siguiente figura:



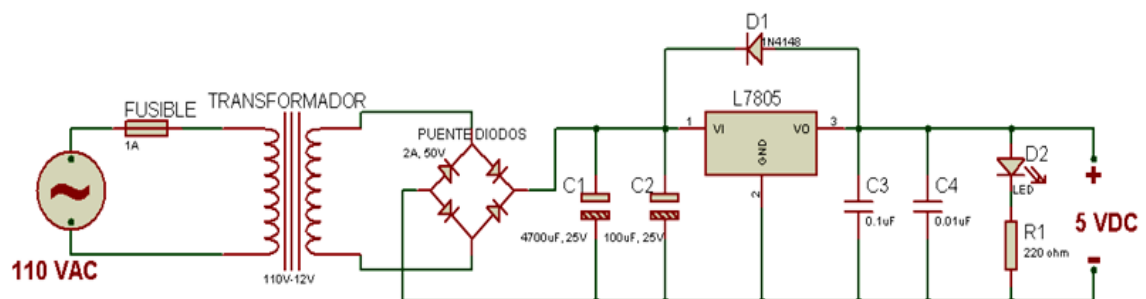
**Figura III.19.** Termostato mecánico  
**Fuente:** Realizado por los autores

Además se ha diseñado un dispositivo para visualizar la temperatura de la carga, dispositivo que se activa cuando el sistema de calentamiento se encuentra apagado.

Este dispositivo está compuesto por un sensor de temperatura, una fuente de alimentación de 5V, un acondicionador de señal, un indicador y un relé electromecánico.

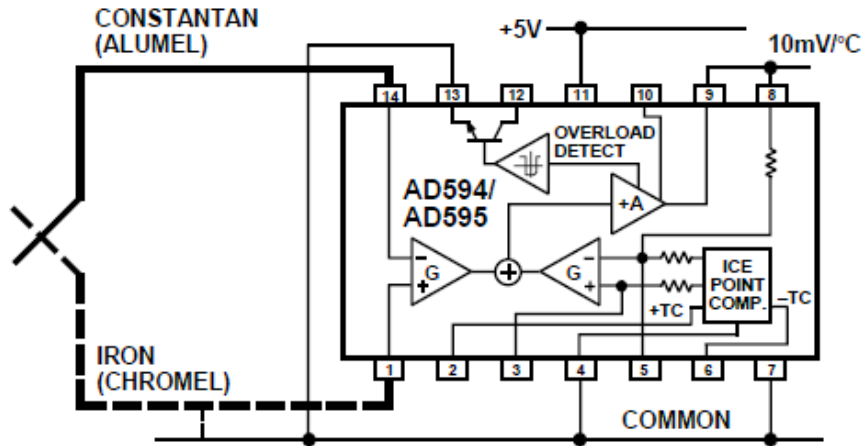
Como sensor de temperatura se ha elegido una termocupla tipo K por su rango de operación, indicado para el desarrollo de esta tesis.

El diseño de la fuente de alimentación de 5V que alimenta el acondicionador de señal y el indicador es el siguiente:



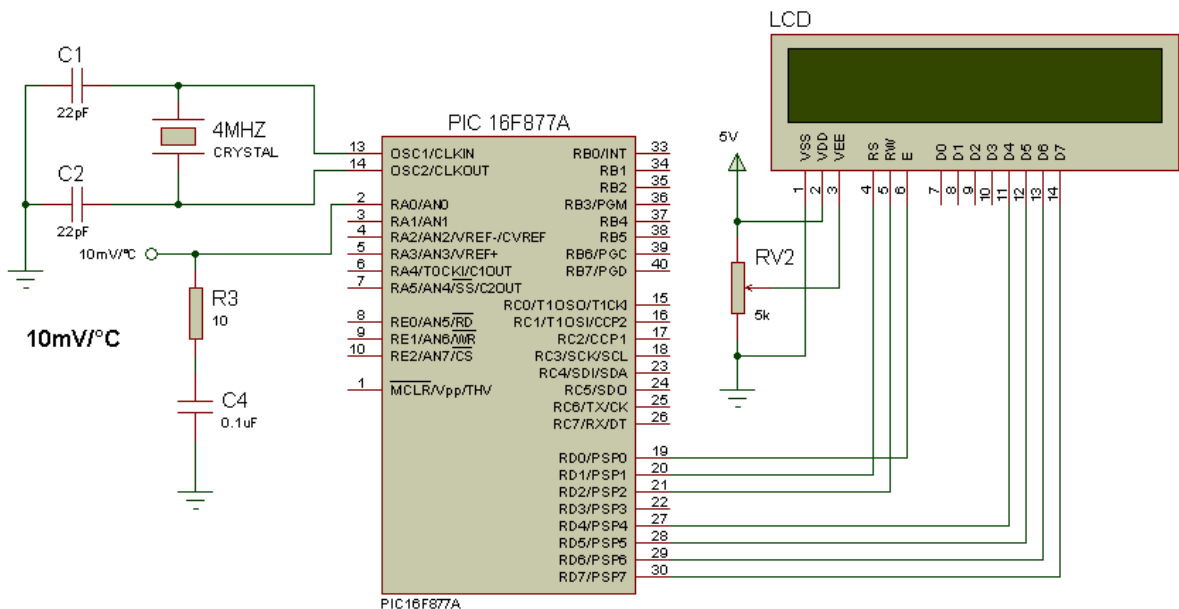
**Figura III.20.** Circuito de la fuente de alimentación de 5V  
**Fuente:** Realizado por los autores

Una vez realizado el diseño de la fuente de alimentación de 5V se ha procedido a analizar la conexión básica del integrado AD595 para realizar el diseño del acondicionador de la señal obtenida por la termocupa tipo K.



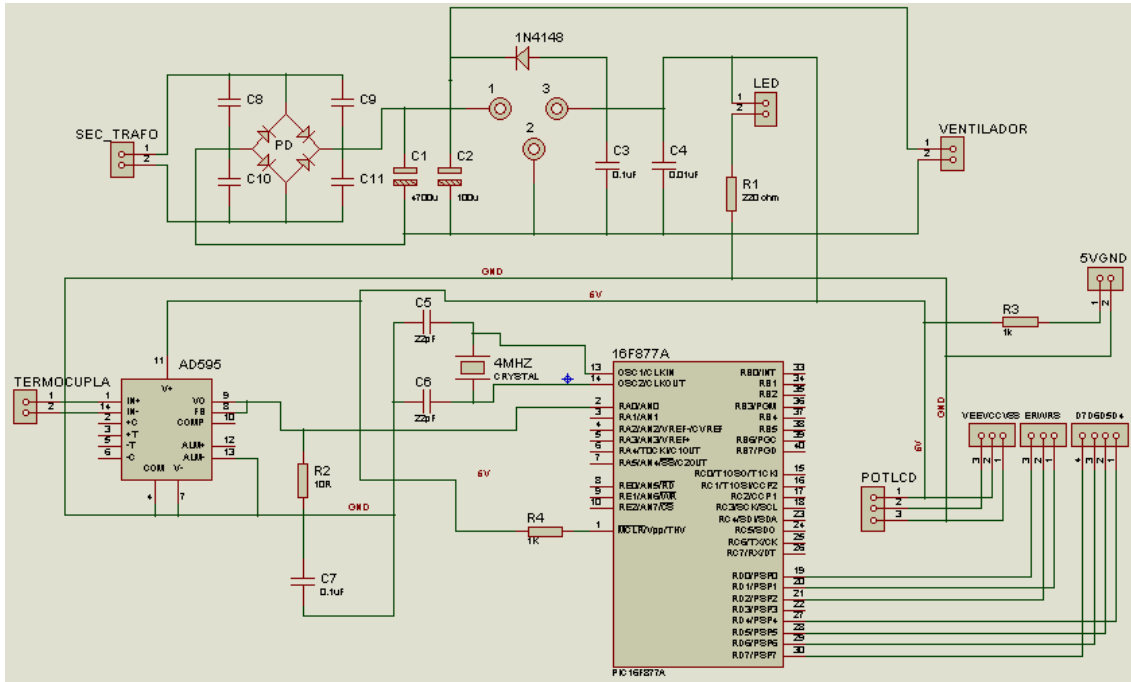
**Figura III.21.** Conexión básica del AD595 con una sola fuente de operación.  
**Fuente:** [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD594\\_595.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD594_595.pdf)

Para utilizar la señal que ha sido amplificada por el integrado AD595 y convertirla de analógica a digital para poder ser visualizada en un LCD LM032L, se ha utilizado un microcontrolador PIC 16F877A. El circuito se muestra en la siguiente figura:

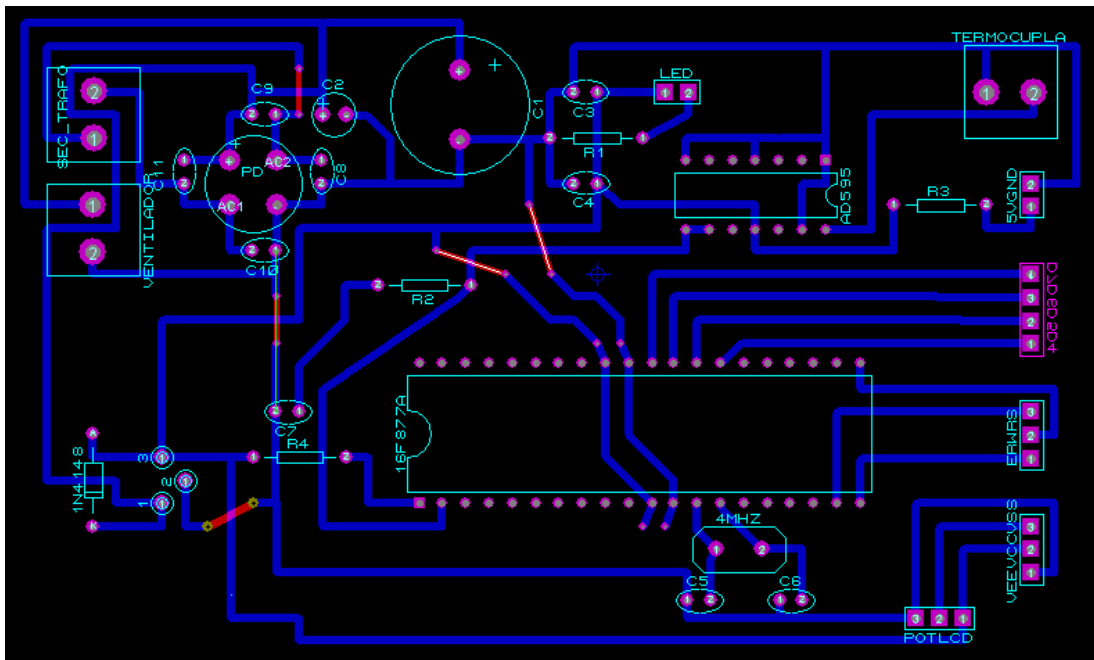


**Figura III.22.** Circuito indicador de temperatura  
**Fuente:** Realizado por los autores

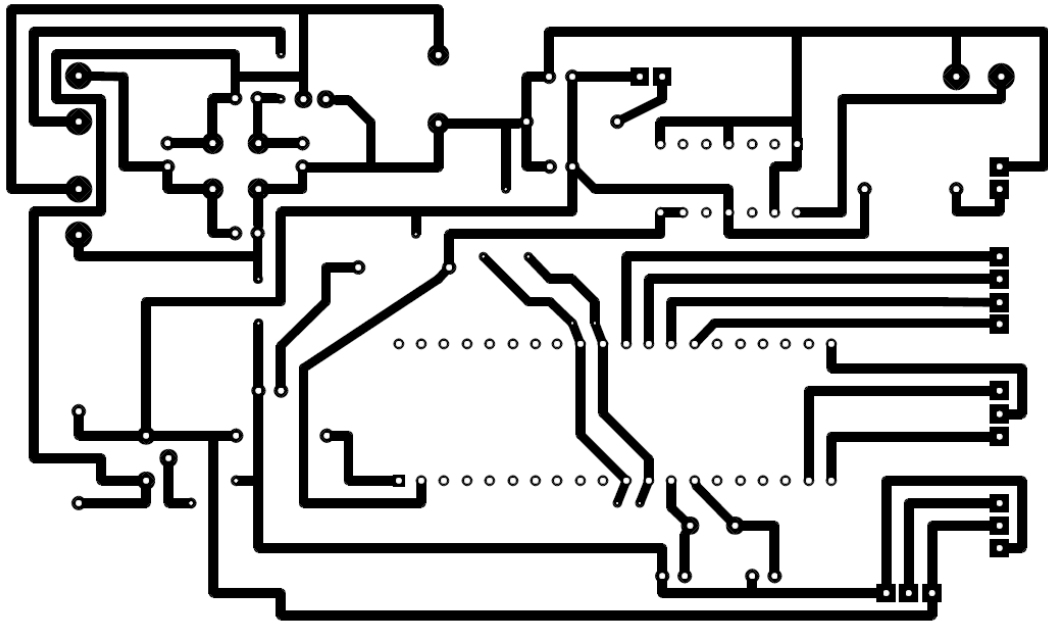
Los diseños de los circuitos de alimentación 5V, acondicionador e indicador, realizados en ISIS y ARES de PROTEUS, se muestran a continuación:



**Figura III.23.** Diseño de circuitos de alimentación 5V, acondicionador e indicador realizado en ISIS  
**Fuente:** Realizado por los autores

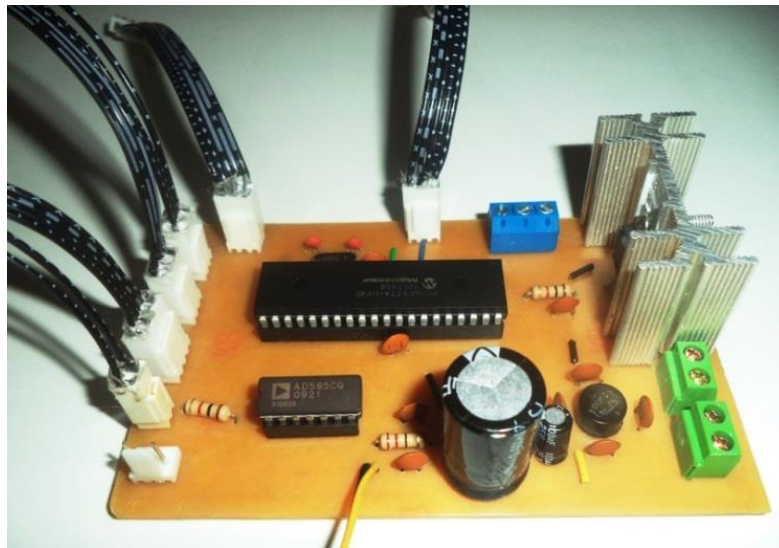


**Figura III.24.** Diseño de circuitos de alimentación 5V, acondicionador e indicador realizado en ARES  
**Fuente:** Realizado por los autores



**Figura III.25.** Pistas de los circuitos de alimentación 5V, acondicionador e indicador  
**Fuente:** Realizado por los autores

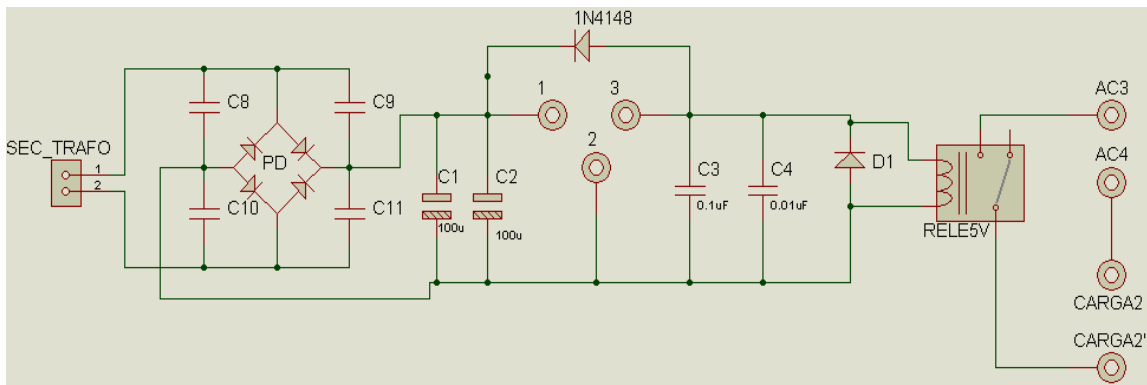
Se realizó una placa con los circuitos mencionados anteriormente. En esta placa se utilizó un disipador de calor de aluminio para el integrado LM7805, además se empleó buses de datos para la comunicación entre el microcontrolador y el display LCD LM032L y para el potenciómetro que regula el brillo de las letras en el LCD.



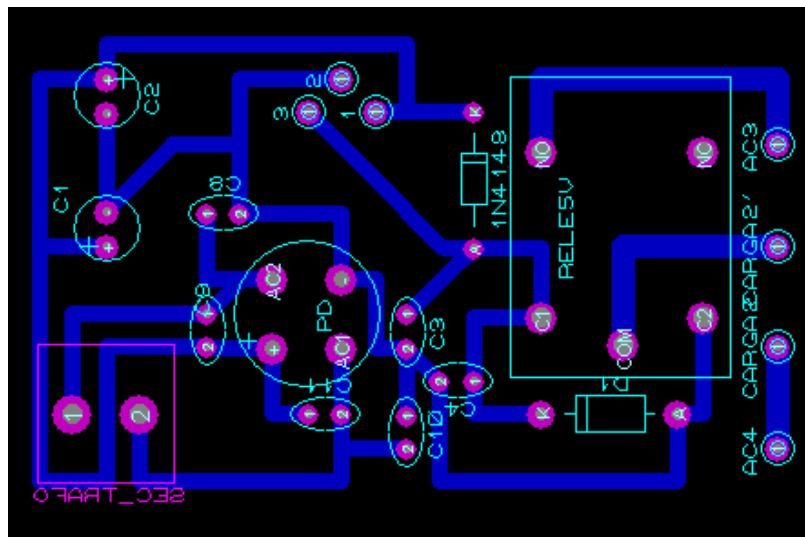
**Figura III.26.** Placa implementada con circuitos de alimentación 5V, acondicionador e indicador  
**Fuente:** Realizado por los autores

Como ya se había mencionado previamente se utilizó un termostato mecánico para realizar la conmutación (encendido y apagado) del sistema de calentamiento y ya que dicho sistema genera grandes interferencias electromagnéticas en el dispositivo indicador de temperatura, se ha decidido que este dispositivo debe funcionar cuando el sistema de calentamiento se encuentra apagado. Para poder cumplir con este requerimiento se ha implementado un relé electromecánico a 6V para realizar la conmutación del dispositivo indicador de temperatura.

El diseño del relé electromecánico implementado se muestra a continuación:

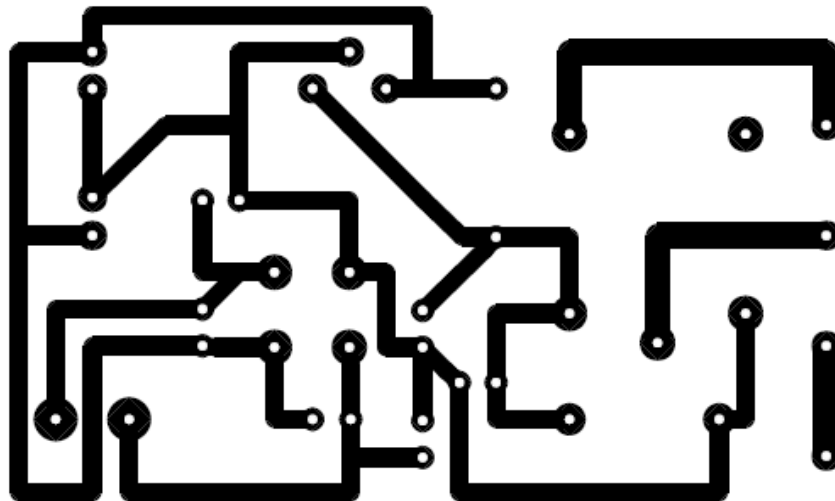


**Figura III.27.** Diseño del relé electromecánico realizado en ISIS  
**Fuente:** Realizado por los autores



**Figura III.28.** Diseño del relé electromecánico realizado en ARES  
**Fuente:** Realizado por los autores





**Figura III.29.** Pistas del relé electromecánico  
**Fuente:** Realizado por los autores

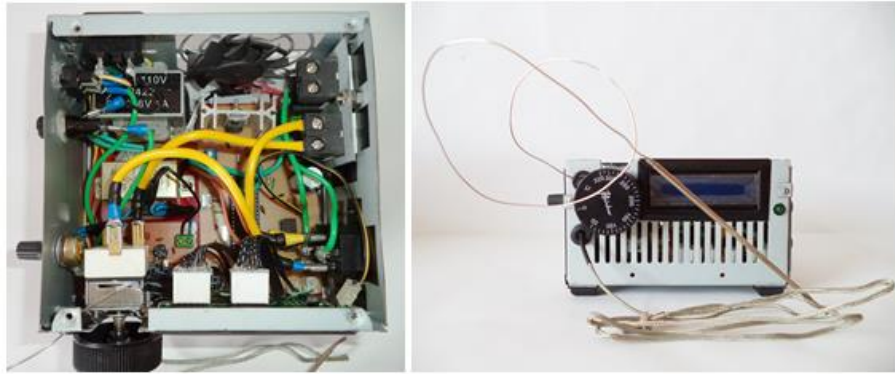
En la siguiente figura se puede observar la placa de baquelita con el relé electromecánico implementado.



**Figura III.30.** Placa implementada con el relé electromecánico  
**Fuente:** Realizado por los autores

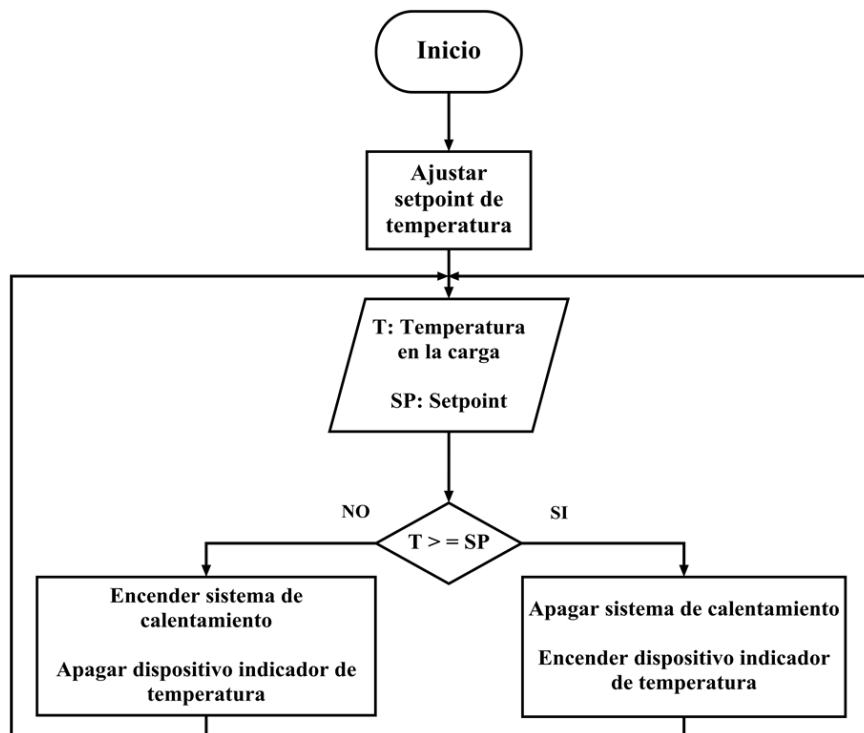
Tanto el termostato mecánico, la placa con los circuitos de alimentación 5V, acondicionador e indicador, y la placa con el relé electromecánico, se han introducido en una caja de trabajo. Esta caja de trabajo fue realizada con una caja de una fuente de poder ATX de un computador. Además se ha añadido un pequeño ventilador de 12 VDC para mantener refrigerados los elementos en su interior.





**Figura III.31.** Sistema de control de temperatura implementado (vistas superior y frontal)  
**Fuente:** Realizado por los autores

Como todo sistema presenta un algoritmo a seguir, se ha diseñado un diagrama de flujo para el correcto funcionamiento del sistema completo (calentamiento por inducción y control de temperatura), el diagrama se observa en la siguiente figura:



**Figura III.32.** Diagrama de flujo del sistema completo  
**Fuente:** Realizado por los autores

La programación del PIC 16F877A (ver anexo 8) fue realizado en el software PCWHD Compiler, el cual trabaja con un lenguaje de alto nivel con la velocidad del lenguaje ensamblador.

## **CAPÍTULO IV**

### **IV. ANÁLISIS COMPARATIVO DEL SISTEMA CONVENCIONAL CON EL NUEVO SISTEMA**

#### **4.1. Pruebas**

Para realizar las pruebas del sistema de calentamiento por inducción se ocuparon tres tipos de cargas: una barra de acero de 43 cm de longitud y 0,8 cm de espesor, un cilindro de acero al tungsteno de 18 cm de largo y 1,5 cm de espesor y como tercera carga la sección #3 de la camisa o barril de tungsteno de la máquina inyectora de plástico en la empresa PARTIPLAST.

Para fines explicativos se han denominado a las cargas de la siguiente manera:

Carga 1: Barra de acero de 43 cm de longitud.

Carga 2: Cilindro de acero al tungsteno de 18 cm de longitud.

Carga 3: Sección #3 de la camisa de tungsteno.

##### **4.1.1. Pruebas de funcionamiento**

Las pruebas de funcionamiento del sistema de calentamiento por inducción se las realizó por un período no mayor a 3 minutos (0,05 horas) en cada carga, tiempo suficiente para obtener los datos necesarios en el primario del transformador. Como no

fue necesario realizar un control de la temperatura en la carga, el sistema de control de temperatura no fue aplicado para estas primeras pruebas.

Los resultados se detallan en la siguiente tabla:

**Tabla IV-I.** Datos obtenidos en las pruebas de funcionamiento

	<b>Carga 1</b>	<b>Carga 2</b>	<b>Carga 3</b>
<b>Voltaje RMS [V]</b>	118	115	114
<b>Corriente [A]</b>	1,8	6,1	8,5
<b>Potencia [KW]</b>	0,212	0,702	0,969
<b>Tiempo de operación [h]</b>	0,05	0,05	0,05

**Fuente:** Realizado por los autores

Todas estas pruebas de funcionamiento se las realizó utilizando la misma bobina de inducción de 8 espiras, 15 cm de longitud y 12 cm de diámetro interno.

Se pudo observar que mientras más grande era la carga, mayor era su consumo de potencia.

#### **4.1.2. Pruebas de funcionamiento continuo**

Las pruebas de funcionamiento continuo consistieron en hacer funcionar el sistema de calentamiento por inducción y el de control de temperatura en cada carga y llegar desde una temperatura ambiente hasta la temperatura deseada de 200 °C. Los datos de voltaje, corriente y potencia fueron adquiridos en el primario del transformador del sistema de calentamiento.

En la siguiente tabla se muestran los resultados de las pruebas en funcionamiento continuo que se realizó para cada carga.

**Tabla IV-II.** Datos obtenidos en las pruebas de funcionamiento

	<b>Carga 1</b>	<b>Carga 2</b>	<b>Carga 3</b>
<b>Voltaje RMS [V]</b>	118	115	114
<b>Corriente [A]</b>	1,8	6,1	8,5
<b>Potencia [KW]</b>	0,212	0,702	0,969
<b>Tiempo operación [h]</b>	0,55	0,48	0,61
<b>Temperatura inicial [°C]</b>	16	17	17
<b>Temperatura final [°C]</b>	200	200	200

**Fuente:** Realizado por los autores

Se pudo observar que la carga 1 necesitó de un tiempo mayor al esperado, en alcanzar la temperatura deseada, considerando que su masa es mucho menor a las otras dos cargas analizadas, esto es debido a que la bobina utilizada para estas pruebas no tenía un buen factor de acoplamiento con la carga 1.

Mientras que con las otras cargas, se tenía un buen factor de acoplamiento, entonces los tiempos en alcanzar la temperatura requerida estuvieron dentro de lo previsto.

#### **4.2. Comparación del nuevo sistema de calentamiento por inducción versus el sistema convencional**

A continuación se han realizado una serie de análisis entre estos dos sistemas de calentamiento: el sistema convencional basado en un conjunto de resistencias eléctricas y el sistema desarrollado que se basa en el principio de inducción electromagnética, para comparar sus resultados en base a consumo, eficiencia, producción y utilidad.

##### **4.2.1. Análisis comparativo en base al consumo energético**

Para realizar el análisis del consumo energético de la etapa de calentamiento en la máquina inyectora de plástico, se han determinado datos importantes para obtener el consumo en cada sección de la camisa de tungsteno de la máquina, y así obtener el

consumo total diario y mensual del sistema de calentamiento tanto en el sistema basado en resistencias eléctricas como en el sistema basado en inducción electromagnética. Cabe señalar que para el cálculo del consumo energético del sistema de calentamiento por inducción se ha realizado una proyección al multiplicar por tres el consumo de la sección #3 de la camisa de tungsteno.

**Tabla IV-III.** Consumo energético del sistema de calentamiento basado en resistencias eléctricas

	Sección #1	Sección #2	Sección #3
<b>Número de resistencias eléctricas</b>	2	2	2
<b>Potencia individual [KW]</b>	1,1	1,1	1,1
<b>Potencia total [KW]</b>	2,2	2,2	2,2
<b>Tiempo promedio trabajo diario de resistencias eléctricas [h]</b>	5,7	6	5,8
<b>Energía consumida diaria [KWh]</b>	12,54	13,2	12,76
<b>Energía consumida mensual [KWh] (16 días promedio)</b>	200,64	211,2	204,16
<b>Total energía consumida mensual [KWh]</b>			616

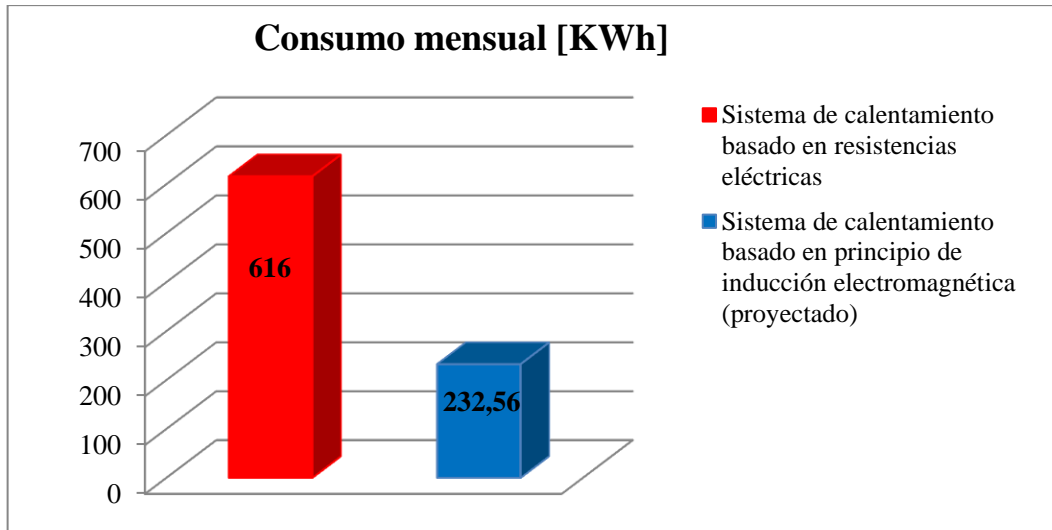
**Fuente:** Realizado por los autores

**Tabla IV-IV.** Consumo energético proyectado del sistema de calentamiento basado en inducción electromagnética

	Sección #3
<b>Potencia [KWh]</b>	0,969
<b>Tiempo promedio de trabajo [h]</b>	5
<b>Energía consumida diaria [KWh]</b>	4,845
<b>Energía consumida mensual [KWh] (16 días promedio)</b>	77,52
<b>Proyección de energía mensual consumida por un sistema de calentamiento completo [KWh]</b>	
	232,56

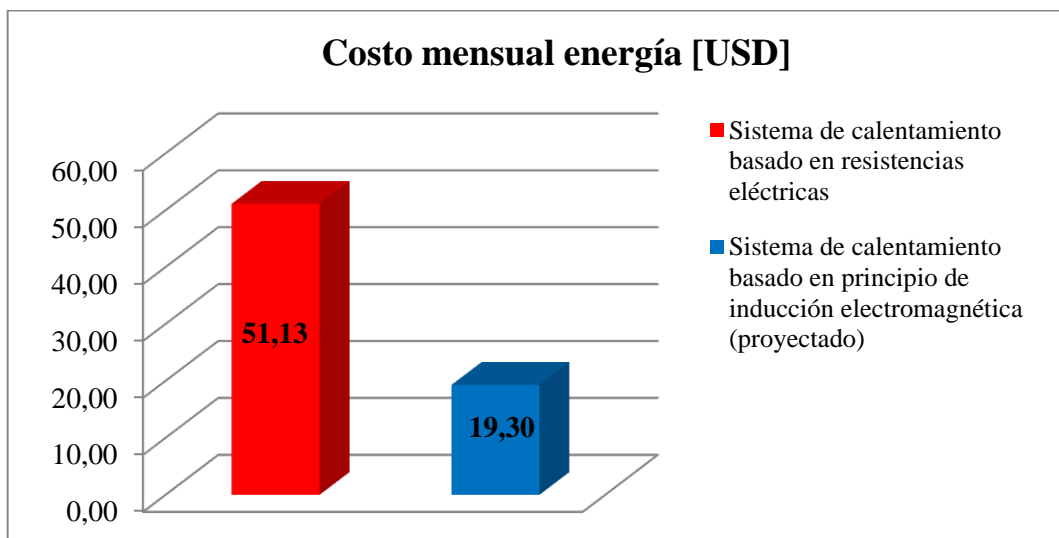
**Fuente:** Realizado por los autores

En la siguiente figura se muestra la gráfica resultante del consumo energético mensual entre los dos sistemas de calentamiento comparados.



**Figura IV.1.** Consumo mensual en KWh de los sistemas de calentamiento comparados  
**Fuente:** Realizado por los autores

Para obtener el costo mensual en USD consumido por cada sistema de calentamiento analizado, se ha multiplicado los valores de consumos energéticos mensuales de las tablas IV-III y IV-IV por un valor comercial del KWh en la ciudad de Riobamba de \$0,083, tarifa impuesta para la zona industrial [7]. En la siguiente figura se muestra la gráfica resultante:



**Figura IV.2.** Costo mensual en USD de los dos sistemas de calentamiento comparados  
**Fuente:** Realizado por los autores

Como se puede observar en las gráficas anteriores, con el sistema de calentamiento por inducción electromagnética existiría un ahorro en el consumo energético de un 62% en comparación con el sistema de calentamiento basado en resistencias eléctricas y por ende un ahorro en el costo energético en el mismo porcentaje.

#### 4.2.2. Análisis comparativo en base a la eficiencia

El cálculo de la eficiencia en porcentaje de un sistema en general se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Eficiencia (\%)} = \frac{\text{Energía requerida}}{\text{Energía consumida}} * 100 \quad (\text{Ec. 39})$$

Para calcular la eficiencia del sistema de calentamiento basado en resistencias eléctricas, utilizamos los datos obtenidos en la tabla III-I, obteniendo así la energía requerida de 1,24 KWh., para calentar las tres secciones de la camisa de tungsteno de la máquina inyectora de plástico y llegar a las temperaturas deseadas.

Mientras que la energía consumida por el sistema de calentamiento basado en resistencias eléctricas para calentar las secciones mencionadas se obtiene de la siguiente tabla:

**Tabla IV-V.** Energía consumida por sistema de calentamiento basado en resistencias eléctricas

	Sección #1	Sección #2	Sección #3
<b>Potencia [KW]</b>	2,2	2,2	2,2
<b>Tiempo en alcanzar temperatura deseada [h]</b>	1,8	2	1,9
<b>Energía consumida para alcanzar temperatura deseada [KWh]</b>	3,96	4,4	4,18
<b>Total energía consumida [KWh]</b>			12,54

**Fuente:** Realizado por los autores

Entonces la eficiencia del sistema de calentamiento basado en resistencias eléctricas es:

$$E_{SCRE}(\%) = \frac{1,24 \text{ KWh}}{12,54 \text{ KWh}} * 100$$

$$E_{SCRE}(\%) = 9,89\%$$

El cálculo de la energía consumida del sistema de calentamiento por inducción electromagnética para obtener la eficiencia, consistió en obtener la energía consumida para alcanzar la temperatura de 200 °C en la sección #3 de la camisa de tungsteno de la máquina inyectora de plástico. Se realizó una proyección del consumo total multiplicando por tres la energía consumida en la sección #3.

**Tabla IV-VI.** Energía consumida proyectada para sistema de calentamiento por inducción

	Sección #3
Potencia [KWh]	0,969
Tiempo en alcanzar 200 °C [h]	0,6
Energía consumida para alcanzar 200 °C [KWh]	0,58
Proyección de energía consumida por un sistema de calentamiento completo [KWh]	1,74

**Fuente:** Realizado por los autores

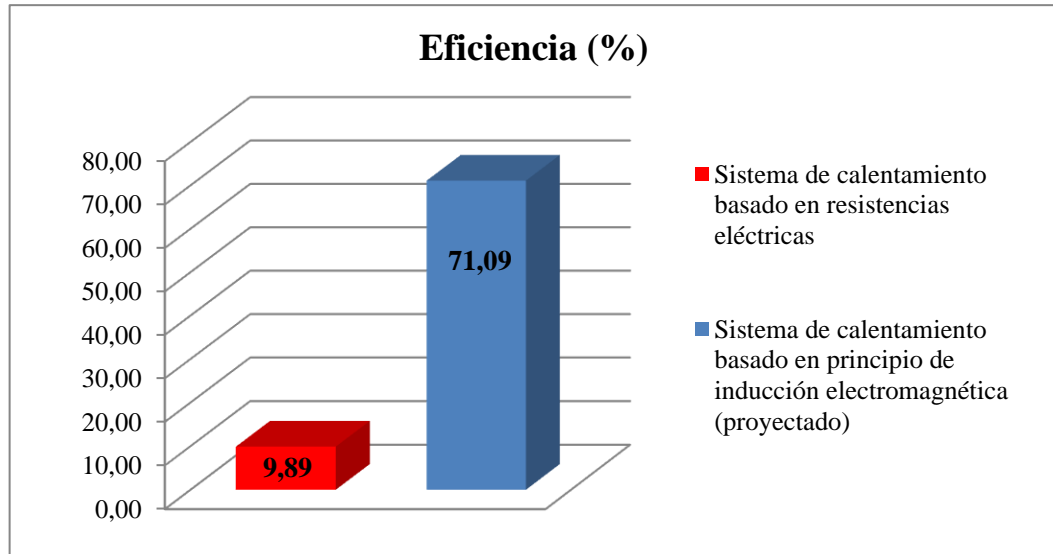
Con estos datos la eficiencia del sistema de calentamiento basado en el principio de inducción electromagnética es:

$$E_{SCIE}(\%) = \frac{1,24 \text{ KWh}}{1,74 \text{ KWh}} * 100$$

$$E_{SCRE}(\%) = 71,09\%$$



En la siguiente figura se puede ver la gráfica comparativa resultante de la eficiencia de cada sistema de calentamiento:



**Figura IV.3.** Eficiencia en porcentaje de cada sistema de calentamiento analizado  
**Fuente:** Realizado por los autores

Se puede observar que el sistema de calentamiento por inducción electromagnética presentaría una eficiencia notablemente mayor a la del sistema de calentamiento convencional. Este resultado es el esperado puesto que el tiempo que demoraría el sistema de calentamiento por inducción en alcanzar la temperatura deseada para calentar las secciones de la camisa de tungsteno de la máquina inyectora de plástico, es mucho menor al tiempo que se demoran las resistencias eléctricas en calentar dichas secciones.

#### **4.2.3. Análisis comparativo en base a la productividad**

Con el sistema de calentamiento basado en resistencias eléctricas, la máquina inyectora de plástico de la fábrica PARTIPLAST realiza un proceso de inyección de polipropileno fundido en un molde de 2 armadores cada 30 segundos. El tiempo de trabajo de la máquina inyectora es de 6 horas diarias, ya que existe un tiempo muerto de producción

de 2 horas en la que el sistema de calentamiento alcanza la temperatura deseada para una correcta fundición del polipropileno.

Con este tiempo de trabajo y con una eficiencia de armadores obtenidos no defectuosos del 75%, produce una cantidad promedio de 1080 armadores diarios. La máquina inyectora de plástico trabaja un promedio de 4 días a la semana produciendo al mes la cantidad de 17280 armadores de polipropileno. Teniendo una utilidad de \$0,015 USD por armador de polipropileno la utilidad mensual es de \$259,20 USD.

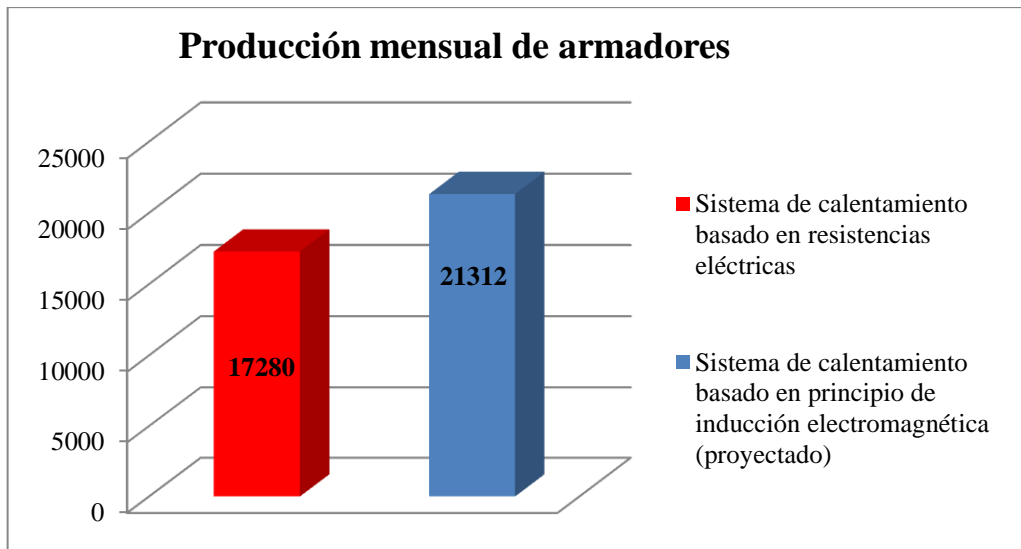
Según los datos obtenidos en la tabla IV-VI se puede observar que el tiempo requerido por un sistema de calentamiento por inducción, para alcanzar la temperatura idónea que se requiere en la fundición del polipropileno, es de sólo 36 minutos (0,6 horas), con lo cual se tiene un tiempo adicional de trabajo en la máquina inyectora de 1,4 horas obteniendo un aumento en la producción de armadores de polipropileno y en la utilidad. En la siguiente tabla se muestra la comparación de producción y utilidad entre los dos sistemas de calentamiento analizados:

**Tabla IV-VII.** Comparación entre sistemas de calentamiento de productividad

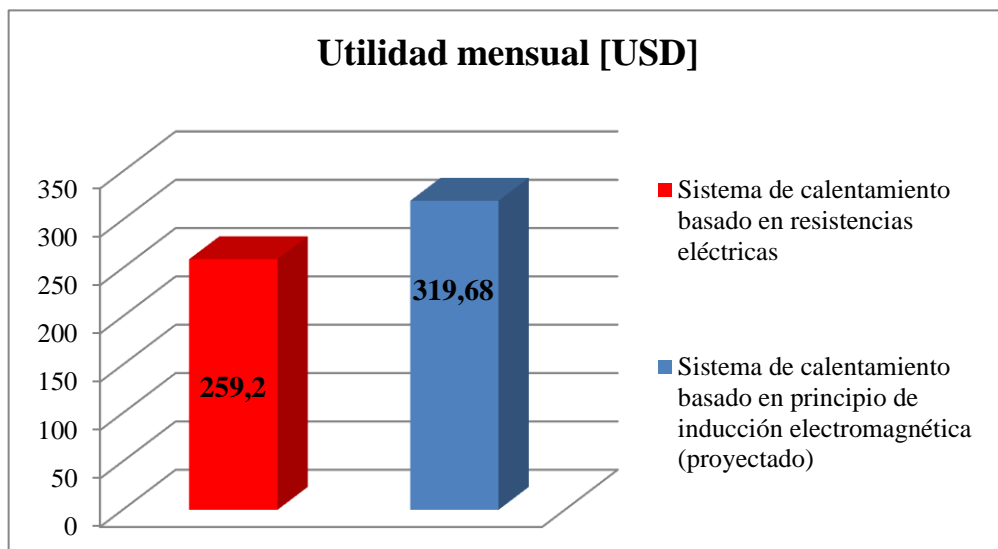
	<b>Sistema de calentamiento basado en resistencias eléctricas</b>	<b>Sistema de calentamiento basado en principio de inducción electromagnética (proyectado)</b>
<b>Inyecciones por minuto</b>	2	2
<b>Armadores por inyección</b>	2	2
<b>Tiempo de trabajo diario de máquina inyectora [h]</b>	6	7,4
<b>Producción diaria de armadores</b>	1080	1332
<b>Producción mensual de armadores</b>	17280	21312
<b>Utilidad por armador [USD]</b>	0,015	0,015
<b>Utilidad mensual [USD]</b>	259,2	319,68

**Fuente:** Realizado por los autores

Las siguientes gráficas demuestran los resultados obtenidos de la comparación de los sistemas en base a producción y utilidad mensual.



**Figura IV.4.** Producción mensual de armadores con cada sistema de calentamiento  
**Fuente:** Realizado por los autores



**Figura IV.5.** Utilidad mensual en USD con cada sistema de calentamiento  
**Fuente:** Realizado por los autores

Como se observa en las gráficas anteriores con el sistema de calentamiento por inducción, podría haber un aumento de 4032 armadores mensuales, lo que significa un aumento en la producción mensual del 23,3% y por ende un aumento de igual porcentaje en la utilidad mensual.

### 4.3. Presupuesto del sistema de calentamiento por inducción desarrollado

A continuación se detallan los costos y cantidades de los elementos utilizados en cada etapa del sistema de calentamiento por inducción desarrollado.

**Tabla IV-VIII.** Elementos utilizados en la etapa de alimentación eléctrica

Cantidad	Medida	Descripción	P/ Unitario [USD]	P/ Total [USD]
1	1 unidad	Transformador 110 - 40 V 1,5KVA	300	300
1	1 metro	Cable flexible 3 x 14 AWG	1,3	1,3
2	2 metros	Cable flexible # 10 AWG	1	2
2	2 unidades	Enchufes aterrizados 127V 15A	1,5	3
1	1 metro	Cubierta espiral transparente	0,5	0,5
<b>Total (USD)</b>				<b>306,8</b>

**Fuente:** Realizado por los autores

**Tabla IV-IX.** Elementos utilizados en la etapa de rectificación eléctrica.

Cantidad	Medida	Descripción	P/ Unitario [USD]	P/ Total [USD]
1	1 unidad	Placa de baquelita 30 x 20 cm	5	5
1	1 unidad	Papel transfer formato A4	0,2	0,2
2	2 unidades	Fundas de percloruro férrico polvo ácido	1	2
8	8 unidades	Conectores cubierta plástica 60A 250V	0,25	2
2	2 unidades	Puente de diodos de 1000 V 50 A	3,5	7
8	8 unidades	Capacitores poliestireno 0,1 uF 100 V	0,5	4
20	20 unidades	Condensadores electrolíticos 3300uF 80V	4,2	84
1	1 unidad	Rollo de estaño	7,5	7,5
4	4 unidades	Riel de aluminio 20 x 5 cm	0,7	2,8
1	1 metro	Cable sólido # 10 AWG	0,6	0,6
14	14 unidades	Pernos	0,15	2,1
50	50 unidades	Tuercas	0,05	2,5
14	14 unidades	Arandelas planas	0,03	0,42
12	12 unidades	Arandelas de presión	0,05	0,6
12	12 unidades	Conectores cubierta plástica 30A 250V	0,2	2,4
2	2 metros	Cable flexible #10 AWG	1	2
4	4 unidades	Portafusible	1	4
4	4 unidades	Fusible de vidrio 25A 250V	0,15	0,6
<b>Total (USD)</b>				<b>129,72</b>

**Fuente:** Realizado por los autores

**Tabla IV-X.** Elementos utilizados en la etapa del convertidor resonante

<b>Cantidad</b>	<b>Medida</b>	<b>Descripción</b>	<b>P/ Unitario [USD]</b>	<b>P/ Total [USD]</b>
1	1 unidad	Placa de baquelita 30 x 20 cm	5	5
1	1 unidad	Papel transfer formato A4	0,2	0,2
1	1 unidad	Marcador permanente para placas	3,5	3,5
2	2 unidades	Fundas de percloruro férrico polvo ácido	1	2
21	21 unidades	Conectores cubierta plástica 60A 250V	0,25	5,25
4	4 unidades	Resistencia 330 $\Omega$ a 20 W	0,6	2,4
4	4 unidades	Resistencia 120 $\Omega$ a 20 W	0,6	2,4
4	4 unidades	Bobinas toroidales	168	672
4	4 unidades	Diodo Schottky NTE6082	7,5	30
4	4 unidades	Mosfet IRFP260N	4,75	19
1	1 unidad	Rollo de estaño	7,5	7,5
1	1 metro	Cable sólido # 10 AWG	0,6	0,6
4	4 unidades	Disipador	1	4
4	4 unidades	Riel de aluminio 13 x 5 cm	0,46	1,84
2	2 metros	Cable flexible #10 AWG	1	2
9	9 unidades	Pernos	0,2	1,8
9	9 unidades	Arandelas planas	0,05	0,45
9	9 unidades	Arandelas de presión	0,08	0,72
36	36 unidades	Tuercas	0,07	2,52
8	8 unidades	Arandelas planas de cobre	0,5	4
4	4 unidades	Arandelas de presión	0,25	1
8	8 unidades	Tuercas de acero inoxidable	0,4	3,2
8	8 unidades	Conectores de oreja	0,25	2
<b>Total (USD)</b>				<b>773,38</b>

**Fuente:** Realizado por los autores

**Tabla IV-XI.** Elementos utilizados para los bancos de capacitores

<b>Cantidad</b>	<b>Medida</b>	<b>Descripción</b>	<b>P/ Unitario [USD]</b>	<b>P/ Total [USD]</b>
1	1 lámina	Cobre puro 0,5mm espesor (20 x 30) cm	30	30
20	20 unidades	Capacitores 0,22 MKP 275 V	2	40
3	3 unidades	Pasta refrigerante	0,5	1,5
8	8 unidades	Riel de aluminio 20 x 5 cm	0,7	5,6
8	8 unidades	Conectores de oreja	0,25	2
1	1 lámina	Acrílico (20 x 30) cm	5	5
24	24 unidades	Pernos	0,1	2,4
16	16 unidades	Arandelas planas	0,03	0,48
16	16 unidades	Arandelas de presión	0,05	0,8
24	24 unidades	Tuercas	0,05	1,2
4	4 unidades	Pernos con tuercas de cobre	0,75	3
2	2 metros	Cable flexible #10 AWG	1	2
<b>Total (USD)</b>				<b>93,98</b>

**Fuente:** Realizado por los autores

**Tabla IV-XII.** Elementos utilizados en el sistema de control e indicador de temperatura

<b>Cantidad</b>	<b>Medida</b>	<b>Descripción</b>	<b>P/ Unitario [USD]</b>	<b>P/ Total [USD]</b>
1	1 unidad	Caja para fuente ATX	4	4
1	1 unidad	Placa de baquelita 20 x 10 cm	3	3
1	1 unidad	Papel transfer formato A4	0,2	0,2
1	1 unidad	Funda de percloruro férrico polvo ácido	1	1
1	1 lámina	Acrílico (10 x 10) cm	2	2
2	2 unidades	Tomacorrientes individuales aterrizados	2	4
3	3 unidades	Jack macho para cable de poder	0,75	2,25
4	4 unidades	Pernos pequeños	0,05	0,2
4	4 unidades	Tuercas pequeñas	0,05	0,2
1	1 unidad	Transformador 110V-12V 2A	7	7
1	1 unidad	Transformador 110V-6V 0,5A	5,5	5,5
2	2 unidades	Integrados LM7805	1,2	2,4
12	12 unidades	Capacitores cerámicos 104	0,15	1,8
2	2 unidades	Capacitores cerámicos 103	0,15	0,3
3	3 unidades	Condensadores electrolíticos 100µF 16V	0,5	1,5
1	1 unidad	Condensador electrolítico 4700µF 16V	1,5	1,5
5	5 unidades	Borneras de 2 vías	0,5	2,5
1	1 unidad	Integrado AD595	27	27
1	1 unidad	Zócalo 14 pines	0,25	0,25
1	1 unidad	Microcontrolador PIC 16F877A	8	8
1	1 unidad	Zócalo 40 pines	0,5	0,5
1	1 unidad	Termocupla tipo K	15	15
1	1 unidad	Relé electromecánico a 6V	0,75	0,75
1	1 unidad	Switch 110V	0,6	0,6
1	1 unidad	Portafusible pequeño	0,35	0,35
1	1 unidad	Fusible de vidrio 1A 250V	0,1	0,1
1	1 unidad	Termostato mecánico 0-320°C	14	14
1	1 unidad	LCD LM032L	12	12
2	2 unidades	Resistencias 1KW	0,1	0,2
1	1 unidad	Potenciómetro 1KW	0,5	0,5
1	1 unidad	Led	0,1	0,1
2	2 unidades	Buses de datos de 6 hilos	2	4
1	1 unidad	Bus de datos de 3 hilos	1	1
1	1 unidad	Bus de datos de 2 hilos	0,6	0,6
1	1 unidad	Regleta de pines	0,75	0,75
2	2 metros	Cable flexible #14 AWG	0,75	1,5
1	1 metro	Cable flexible #10 AWG	1	1
12	12 unidades	Conectores fast on	0,25	3
<b>Total (USD)</b>				<b>130,55</b>

**Fuente:** Realizado por los autores

**Tabla IV-XIII.** Elementos utilizados para la caja de trabajo y bobina de inducción

<b>Cantidad</b>	<b>Medida</b>	<b>Descripción</b>	<b>P/ Unitario [USD]</b>	<b>P/ Total [USD]</b>
1	1 unidad	Caja de Trabajo (34 x 32 x 60) cm	30	30
1	1 unidad	Interruptor termomagnético 32A	15	15
1	1 metro	Malla	5	5
1	1 unidad	Tomacorriente individual aterrizado	2	2
1	1 unidad	Jack macho para cable de poder	0,75	0,75
2	2 unidades	Fibra (2 x 16 x 1)	5	10
2	2 unidades	Tuercas	0,05	0,1
2	2 unidades	Pernos	0,3	0,6
2	2 unidades	Arandelas de presión	0,1	0,2
4	4 unidades	Arandelas planas	0,08	0,32
4	4 unidades	Espárragos de cobre	20	80
4	4 unidades	Arandelas de presión	0,25	1
8	8 unidades	Tuercas de acero inoxidable	0,4	3,2
8	8 unidades	Arandelas de cobre	0,5	4
6	6 metros	Cañería de cobre 3/16 "	2,5	15
6	6 metros	Espagueti eléctrico	0,5	3
2	2 unidades	Conectores dobles	3	6
8	8 unidades	Tornillos pequeños	0,1	0,8
3	3 metros	Cable flexible #10 AWG	1	3
4	4 metros	Cable superflex #2 AWG	7	28
2	2 unidades	Conectores de oreja	0,25	0,5
2	2 unidades	Conectores de oreja grandes	0,75	1,5
1	1 unidad	Ventilador 110 V 18 W	40	40
<b>Total (USD)</b>				<b>249,97</b>

**Fuente:** Realizado por los autores

**Tabla IV-XIV.** Costos varios

<b>Cantidad</b>	<b>Medida</b>	<b>Descripción</b>	<b>P/ Unitario [USD]</b>	<b>P/ Total [USD]</b>
4	4 litros	Tinher	1,5	6
1	1 unidad	Rollo cinta doble faz	4	4
1	1 unidad	Rollo de taipe	0,65	0,65
3	3 unidades	Cable de poder	2,75	8,25
2	2 unidades	Tomacorrientes dobles aterrizados	1,75	3,5
2	2 metros	Cable flexible 3 x 12 AWG	1,6	3,2
1	1 unidad	Enchufe aterrizado 127V 15A	1,5	1,5
1	1 unidad	Switch 120V	0,9	0,9
1	1 unidad	Caja plástica de trabajo	6	6
1	1 unidad	Voltímetro indicador analógico	3	3
2	2 unidades	Barra de silicona	1	2
22	22 unidades	Aislantes varios tipos	0,15	3,3
1	1 unidad	Funda de pernos pequeñas	2	2
1	1 unidad	Funda de tuercas pequeñas	2	2
Gastos de envío				47
Imprevistos				200
Costo por concepto de ingeniería				600
<b>Total (USD)</b>				<b>893,3</b>

**Fuente:** Realizado por los autores

Entonces el presupuesto total de este sistema de calentamiento por inducción desarrollado es de: **\$2577,70 USD**.

Cabe indicar que este costo es para realizar un solo sistema de calentamiento por inducción electromagnética, si se desearía realizar un sistema para cubrir el requerimiento de la fuente de calor de una máquina inyectora de plástico como la existente en la fábrica PARTIPLAST, se debería multiplicar este valor por 3 y añadirle el costo de ingeniería, pues el sistema de la presente tesis fue desarrollado para cubrir los requerimientos de la sección #3 de la camisa de tungsteno de la máquina inyectora de plástico, pero ha demostrado ser posible su utilización en cualquier sección.



## CONCLUSIONES

- Se desarrolló un sistema de procesamiento de plástico por calentamiento basado en el principio de inducción electromagnética, el mismo que según las proyecciones obtenidas resultó ser un sistema de calentamiento mucho más eficiente que un sistema basado en resistencias eléctricas, al poder disminuir los tiempos muertos de producción en un proceso de elaboración de armadores de polipropileno y por ende aumentar la productividad.
- Para lograr un diseño eficiente del sistema de calentamiento por inducción electromagnética se estudiaron los fundamentos básicos de este principio y se probaron una serie de prototipos en diferentes cargas, lo que sirvió para la obtención del diseño final del sistema desarrollado.
- Después de varias pruebas se desarrolló un óptimo control de temperatura el cual realiza la conmutación del sistema de calentamiento a las temperaturas adecuadas para un correcto proceso del polipropileno.
- El sistema de calentamiento desarrollado fue probado en la sección #3 de la camisa de tungsteno de la máquina inyectora de plástico en la fábrica PARTIPLAST, llegando a la temperatura requerida por la sección.
- El sistema de calentamiento por inducción electromagnética desarrollado alcanzó una eficiencia proyectada del 71% versus un 9,89% de eficiencia del sistema de calentamiento basado en resistencias eléctricas de la máquina inyectora de plástico en la fábrica PARTIPLAST, demostrando así que se puede mejorar la productividad de este tipo de máquinas.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda cambiar las fuentes de calor basadas en resistencia eléctrica por una fuente basada en calentamiento por inducción ya que éste último ha demostrado ser un sistema eficiente.
- Se sugiere que las pistas de los circuitos impresos sean diseñadas con un grosor adecuado para que soporten la intensidad de corriente que circularán por las mismas, además de la utilización de capacitores MKP para obtener un eficiente diseño del sistema de calentamiento por inducción.
- Se recomienda utilizar un termostato mecánico en el control de temperatura ya que éste garantiza que el sistema de control sea inmune a interferencias electromagnéticas generadas por el sistema de calentamiento.
- Se recomienda mantener una distancia entre la bobina de inducción y la carga a calentar lo más cerca posible entre sí, puesto que esto mejora el factor de acoplamiento generando un mayor flujo de corrientes inducidas en la carga para llegar a la temperatura deseada en menor tiempo.
- Es recomendable que este sistema de calentamiento se aplique en diferentes procesos que requieran una fuente de calor, pues al ser un sistema de bajo consumo se contribuiría con el cambio de la matriz energética impulsada por el gobierno ecuatoriano.

## RESUMEN

Se diseñó e implementó un sistema de calentamiento por inducción electromagnética para mejorar la productividad de una máquina inyectora, y disminuir el consumo energético aumentando las utilidades, en comparación con un sistema de calentamiento basado en resistencias eléctricas.

El sistema consta de dos circuitos: uno que realiza el calentamiento y otro que controla la temperatura deseada. Este sistema fue diseñado en base a los requerimientos de una sección del barril de la máquina inyectora de plásticos para generar la temperatura requerida en la fusión de polipropileno, utilizado en la producción de armadores de ropa.

Utilizando el método experimental e inductivo se han mejorado los diseños de los circuitos empleados en el sistema, el cual mediante un set point de temperatura, acciona una fuente de alimentación de corriente continua que alimenta un circuito convertidor resonante, que a su vez alimenta un circuito tanque para generar un campo magnético variable en el tiempo e inducir corrientes de Foucault en la carga que producen calentamiento por el efecto Joule. Los circuitos del sistema fueron realizados usando técnicas de desarrollo de PCBs por papel transfer.

En base a las proyecciones resultantes, el sistema alcanzó una eficiencia del 71%, una disminución en el consumo energético del 62% y un aumento en la producción del 23%, siendo un sistema adecuado e innovador.

Se concluye que el sistema mejora los niveles de productividad además de ahorrar en el consumo de energía contribuyendo así con al medio ambiente.

## **ABSTRACT**

We designed and implemented an electromagnetic induction heating system to improve the injection machine productivity and reduce energy consumption by increasing earnings, compared with a heating system based on electrical resistance.

The system consists of two circuits: one is used to perform heating and the other is used to control the desired temperature. This system was designed based on the requirements of a barrel section of the plastic injection machines to produce the required temperature in the fusion of polypropylene, it is used in the production of clothes hanger.

Using the experimental and inductive method, the design of circuits in the system have been improved, through a set point temperature, operated a power source of current that powers a resonant converter circuit, which also supplies a tank circuit for generating a variable magnetic field in time and induce Foucault currents in the charge which produced heating by the Joule effect. The circuits of system were performed using development techniques of PCBs by transfer paper.

Based on the resulting projections, the system achieved an efficiency of 71%, a decrease in energy consumption of 62% and an increase in production of 23%, being a suitable and innovative system.

We conclude that system improves productivity levels, also save on energy consumption contributing to the environment.

## REFERENCIAS

- [1] Castaño, A.R. (2008). Inducción Electromagnética. *Física III*. Recuperado de <http://ing.unne.edu.ar/pub/fisica3/170308/teo/teo5.pdf>
- [2] Efecto Joule. (2011). *Enciclopedia Libre Universal en Español*. Recuperado de [http://enciclopedia.us.es/index.php/Efecto\\_Joule](http://enciclopedia.us.es/index.php/Efecto_Joule)
- [3] Rodríguez, L. A. (s.f.). Calor Específico de un Sólido: *Practica de laboratorio*. Recuperado de [http://drupal.puj.edu.co/files/OI181\\_Luis%20Alfredo%20Rodriguez.pdf](http://drupal.puj.edu.co/files/OI181_Luis%20Alfredo%20Rodriguez.pdf)
- [4] Gómez, E. (1999). *Influencia de los Componentes Parásitos en el Análisis y Diseño de Inversores Resonantes Paralelo para Aplicaciones de Calentamiento por Inducción* (Tesis doctoral). Universidad de Valencia, Valencia, España.
- [5] Larco, T. V. & Larco, G. D. (2009). *Diseño y Construcción de un Inversor Monofásico de Alta Frecuencia Basado en un Microcontrolador para el Sellado de Materiales Plásticos por Inducción Electromagnética*. Repositorio de la Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil, Ecuador. Recuperado de <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/1076>
- [6] *Qué es el Polipropileno?*. (2005). MIS RESPUESTAS.COM. Recuperado de <http://www.misrespuestas.com/que-es-el-polipropileno.html>
- [7] Consejo Nacional de Electricidad. (2014). *Pliegos y Cargos Tarifarios*. CONELEC. Recuperado de [http://www.conelec.gob.ec/images/documentos/doc\\_10709\\_Cargos%20Tarifarios.pdf](http://www.conelec.gob.ec/images/documentos/doc_10709_Cargos%20Tarifarios.pdf)

## BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo, A., Barrero, J. & Gélvez, J. (2007). Calentamiento por Inducción Electromagnética: diseño y construcción de un prototipo. *UIS Ingenierías*, 6 (1), 69-76. Recuperado de <http://revistas.uis.edu.co/index.php/revistauisingenierias/article/view/1951>
- Analog Devices. (1999). *Monolithic Thermocouple Amplifiers with Cold Junction Compensation*. Recuperado de [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD594\\_595.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD594_595.pdf)
- *Aplicaciones de Calentamiento por Inducción*. (2010). EFD Induction. Recuperado de <http://www.efd-induction.com/~media/PDF/Applications/ApplicationsESP.aspx>
- Boylestad, R. & Nashelsky, L. (2003). *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*. 8va edición. México: PEARSON Educación.
- *Calentamiento por Inducción*. (2011). GH Electrotermia. Recuperado de <http://www.ghinduction.com/sobre-calentamiento-por-induccion/?lang=es>
- Castaño, A.R. (2008). Inducción Electromagnética En: *Física III*. Recuperado de <http://ing.unne.edu.ar/pub/fisica3/170308/teo/teo5.pdf>
- Claudio, M. (2010). *Etapas de Transformación* [Web log post]. Recuperado de <http://fuentedealimentacionvoca3.blogspot.com/2010/11/etapa-de-transformacion.html>
- *Conmutación Suave*. (s. f.). Recuperado de [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lem/juarez\\_h\\_ii/capitulo5.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/juarez_h_ii/capitulo5.pdf)
- *Controladores ON-OFF*. (s.f.). Recuperado de [http://www.frsf.utn.edu.ar/matero/visitante/bajar\\_apunte.php?id\\_catedra=156&id\\_apunte=4276](http://www.frsf.utn.edu.ar/matero/visitante/bajar_apunte.php?id_catedra=156&id_apunte=4276)
- Cuenca, M. (s.f.) Preestudio para el Desarrollo de un Equipo de Calentamiento por Inducción. *Universidad Autónoma de Madrid*. Recuperado de <http://www.uam.es/>

personal\_pas/mcuenca/mifiles/Desarrollo%20de%20un%20equipo%20de%20calentamiento%20por%20inducccion.pdf

- Cushicóndor, E. (2009). *Diseño y Construcción de un Prototipo de una Cocina de Inducción Electromagnética* (Tesis de Grado). Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Departamento de Tecnología. (s.f.). *Plásticos*. Recuperado de <http://iesvillalbahervas-tecnologia.files.wordpress.com/2011/09/plasticos-tejina.pdf>
- Eder. (2012, 14, 05). *Física 2: efecto Joule* [Web log post]. Recuperado de <http://fisica2cchoriente.blogspot.com/2012/05/fisica-2-efecto-joule.html>
- *Fuentes de Alimentación*. (2004). *Electrónica Fácil*. Recuperado de <http://www.electronicafacil.net/tutoriales/Fuentes-alimentacion.php>
- Escuela Colombiana de Ingeniería. (2007). *Plásticos*. Recuperado de [http://www.esuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/2734\\_plimeros.pdf](http://www.esuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/2734_plimeros.pdf)
- Foros de Electrónica. (s.f.). *El Resistor*. Recuperado de <http://www.forosdeelectronica.com/tutoriales/resistencia.htm>
- *Fuentes de Alimentación: diseño y cálculo*. (2013). Recuperado de <http://www.electricosonline.com/Privado/Electronica/fuentes.htm>
- Gemili. (2013). *Tipos de Plásticos*. Club ensayos.com. Recuperado de <http://clubensayos.com/Ciencia/Tipos-De-Plasticos/1313529.html>
- Gómez, E. (1999). *Influencia de los Componentes Parásitos en el Análisis y Diseño de Inversores Resonantes Paralelo para Aplicaciones de Calentamiento por Inducción* (Tesis Doctoral). Universidad de Valencia, Valencia, España.

- González, W. (2008). *Diseño y Construcción de Bobina de Calentamiento por Inducción para Fundición de Titanio* (Tesis de Grado). Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Venezuela.
- Grisales, J. (2010). *Principios del Calentamiento por Inducción*. Universidad Nacional de Colombia Recuperado de <http://electromagnetismo2010a.wikispaces.com/file/view/FUNDAMENTOS+DE+CALENTAMIENTO+POR+INDUCCION.docx>
- Grupo de Investigación GISPUD. (s.f.). *Respuesta del Circuito en Estado Transitorio (dominio del tiempo)*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Recuperado de [http://gemini.udistrital.edu.co/comunidad/grupos/gispud/ac/cap\\_2/11\\_bobina\\_ideal.html](http://gemini.udistrital.edu.co/comunidad/grupos/gispud/ac/cap_2/11_bobina_ideal.html)
- Infante, P. S. (2009). *Electromagnetismo Básico e Introducción a los Circuitos Eléctricos*. Primera edición. Riobamba: E-COPYCENTER.
- International Rectifier. (s.f.). *IRFP260N*. Recuperado de <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irfp260n.pdf>
- Larco, T. V. & Larco, G. D. (2009). *Diseño y Construcción de un Inversor Monofásico de Alta Frecuencia basado en un Microcontrolador para el Sellado de Materiales Plásticos por Inducción Electromagnética*. Repositorio de la Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil, Ecuador. Recuperado de <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/1076>
- *Moldeo por Inyección*. (s.f.). Recuperado de <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Lecion11.MOLDEO.POR.INYECCION.pdf>
- NTE Electronics Inc. (s.f.). *NTE6082 Silicon Schottky Barrier Rectifier*. Recuperado de <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/nte/NTE6082.pdf>



- Ordoñez, R. (1998). *Aspectos Tecnológicos en el Diseño de Inversores Resonantes Aplicados al Calentamiento por Inducción* (Tesis de Grado). Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, México.
- *Plásticos / Extrusión*. (s.f.). Recuperado de <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion10.PLASTICOS.Extrusion.2005.pdf>
- Posada, C. (2008). *Como Evitar Interferencias*. Scribd Inc. Recuperado de <http://es.scribd.com/doc/7229924/Como-Evitar-Interferencias>
- *Qué es el Polipropileno?*. (2005). MIS RESPUESTAS.COM. Recuperado de <http://www.misrespuestas.com/que-es-el-polipropileno.html>
- Quiroz, S. & Sánchez, J. (2008). *Diseño y Especificaciones de una Fuente de Tensión para un Sistema de Inyección de Corriente* (Tesis de Grado). Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- RadioValvular. (s.f.). *Diodo Schottky*. Recuperado de <http://www.radiovalvular.com/Diodo%20Schottky.html>
- Rivera, L. (s.f.). *El Diodo Schottky o Diodo de Barrera*. Casa Bachetti S.A. Recuperado de <http://www.electrosector.com/wp-content/ftp/descargas/diodo.pdf>
- Rodríguez, D., Ribas, D. & Lara, A. (s.f.). *Calentamiento por Inducción*. Industrial Gilba S.L. Recuperado de [http://gilba.com/nuevaweb/textos/universidad/calentamiento\\_por\\_induccion.docx](http://gilba.com/nuevaweb/textos/universidad/calentamiento_por_induccion.docx)
- Rodríguez, L. A. (s.f.). *Calor Específico de un Sólido: Practica de laboratorio*. Recuperado de [http://drupal.puj.edu.co/files/OI181\\_Luis%20Alfredo%20Rodriguez.pdf](http://drupal.puj.edu.co/files/OI181_Luis%20Alfredo%20Rodriguez.pdf)

- Santos, P. (s.f.). *Sistemas de Control*. Recuperado de <http://www.tecnologiaycultura.net/docs/SistemasControl.ppt>
- *Sensor de Temperatura*. (s.f.). Recuperado de [http://cybertesis.urp.edu.pe/urp/2008/raymundo\\_fr/pdf/raymundo\\_fr-TH.5.pdf](http://cybertesis.urp.edu.pe/urp/2008/raymundo_fr/pdf/raymundo_fr-TH.5.pdf)
- Universidad Tecnológica de Pereira. (2009). El Microcontrolador PIC16F877. Recuperado de <http://www.utp.edu.co/~eduque/arquitec/PIC16F877.pdf>
- Villen, M. (2013). *Qué es el Polipropileno (PP)*. Conasi. Recuperado de <http://www.conasi.eu/blog/consejos-de-salud/que-es-el-polipropileno-pp/>
- Vishay BCcomponents. (s.f.). *Interference Suppression Film Capacitor MKP Radial Potted Type*. Recuperado de <http://banelec.online.fr/fab/bcc/condfilm/mkp3355.pdf>
- WikiCiencia. (2000-2008). *Capacitores*. WikiCiencia-CC. Recuperado de <http://www.inele.ufro.cl/bmonteci/semic/apuntes/capacitores/capacitores.htm>

## Anexos

Elementos electrónicos:

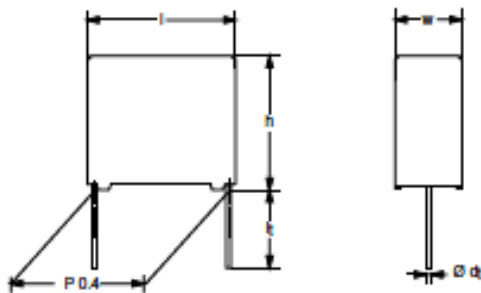
### Anexo 1. Capacitores MKP X2



**MKP 335 5 X2**

Vishay BCcomponents

## Interference Suppression Film Capacitors MKP Radial Potted Type



#### RATED VOLTAGE

AC 275 V; 50 to 60 Hz

#### FEATURES

15 to 22.5 mm lead pitch. Supplied loose  
in box and taped on reel

Lead (Pb)-free product

RoHS-compliant product

#### PERMISSIBLE DC VOLTAGE

DC 630 V

#### ENCAPSULATION

Plastic case, epoxy resin sealed, flame retardant UL-class  
94 V-0

#### CLIMATIC TESTING CLASS ACC. TO EN 60068-1

55/100/56/B

#### CAPACITANCE RANGE (E12 SERIES)

E12 series 0.01 to 0.47  $\mu\text{F}$   
Preferred values acc. to E6

#### CAPACITANCE TOLERANCE

$\pm 20\%$ ;  $\pm 10\%$

#### LEADS

Tinned wire

#### RATED TEMPERATURE

100 °C

#### MAXIMUM APPLICATION TEMPERATURE

100 °C

#### DETAIL SPECIFICATION

For more detailed data and test requirements, contact:  
[rl@vishay.com](mailto:rl@vishay.com)



RoHS  
COMPLIANT

**NO FOCUS PRODUCT:** USE MKP 339 X2

#### APPLICATIONS

X2 class

For X2 electromagnetic interference suppression in across  
the line applications (50/60 Hz) with a maximum mains  
voltage of 275 VAC.

For application limitations please refer page 5.

#### REFERENCE STANDARDS

\*IEC 60384-14 2nd edition and EN 132400\*

\*IEC 60065, pass. flamm. class B\*

250 V: CSA-C22.2 No 1; UL1414

275 V: ENEC; CQC;

#### MARKING

C-value; tolerance; rated voltage; sub-class; manufacturer's  
type designation; code for dielectric material; manufacturer  
location; manufacturer's emblem; year and week

#### DIELECTRIC

Polypropylene film

#### ELECTRODES

Metallized film

#### CONSTRUCTION

Mono construction

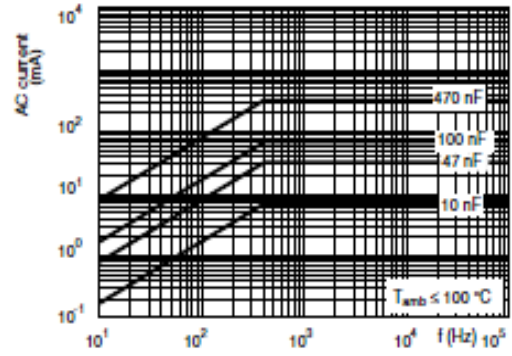
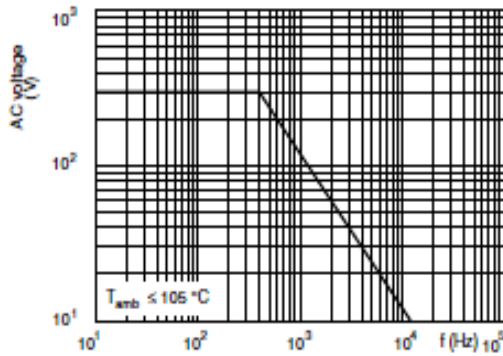
# MKP 335 5 X2

Vishay BCcomponents

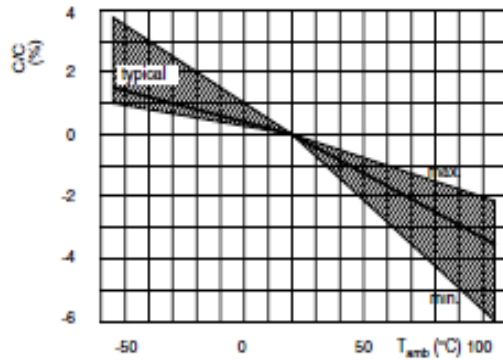
Interference Suppression Film Capacitors



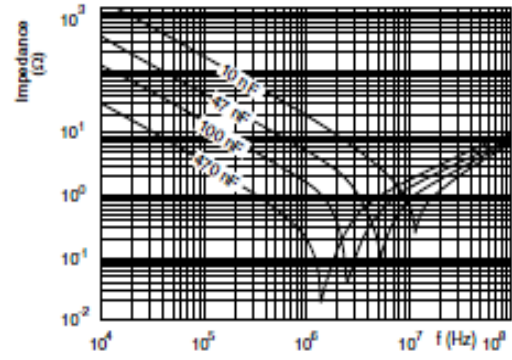
## MAXIMUM RMS VOLTAGE AND AC CURRENT (SINEWAVE) AS A FUNCTION OF FREQUENCY



## CAPACITANCE



## IMPEDANCE



## APPROVALS

COUNTRY	SPECIFICATION	ELECTRICAL VALUES	FILE NUMBERS	APPROVAL MARK
U.S.A. (for AC 250 V)	UL1414	10 nF to 1.0 μF	E112471	
Canada (for AC 250 V)	CSA-C22.2 No.1	10 nF to 1.0 μF	1104861 (LR94054-16)	
China (for AC 275 V)	CQC	10 nF to 1.5 μF	CQC02001001482 (Shanghai factory) CQC03001004371 (Roeseiare factory)	
CB TEST CERTIFICATE (for AC 275 V)		10 nF to 1.5 μF: 55/100/56/B	FI 1185 A2	
Europe (for AC 275 V)	EN132400 IEC 60384-14 2 <sup>nd</sup> edition	10 nF to 1.5 μF	14216	



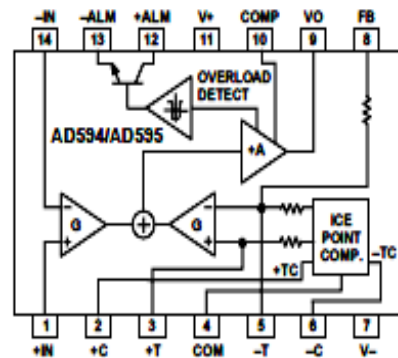
# Monolithic Thermocouple Amplifiers with Cold Junction Compensation

## AD594/AD595

### FEATURES

- Pretrimmed for Type J (AD594) or Type K (AD595) Thermocouples**
- Can Be Used with Type T Thermocouple Inputs**
- Low Impedance Voltage Output: 10 mV/°C**
- Built-In Ice Point Compensation**
- Wide Power Supply Range: +5 V to ±15 V**
- Low Power: <1 mW typical**
- Thermocouple Failure Alarm**
- Laser Wafer Trimmed to 1°C Calibration Accuracy**
- Setpoint Mode Operation**
- Self-Contained Celsius Thermometer Operation**
- High Impedance Differential Input**
- Side-Brazed DIP or Low Cost Cerdip**

### FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



### PRODUCT DESCRIPTION

The AD594/AD595 is a complete instrumentation amplifier and thermocouple cold junction compensator on a monolithic chip. It combines an ice point reference with a precalibrated amplifier to produce a high level (10 mV/°C) output directly from a thermocouple signal. Pin-strapping options allow it to be used as a linear amplifier-compensator or as a switched output setpoint controller using either fixed or remote setpoint control. It can be used to amplify its compensation voltage directly, thereby converting it to a stand-alone Celsius transducer with a low impedance voltage output.

The AD594/AD595 includes a thermocouple failure alarm that indicates if one or both thermocouple leads become open. The alarm output has a flexible format which includes TTL drive capability.

The AD594/AD595 can be powered from a single ended supply (including +5 V) and by including a negative supply, temperatures below 0°C can be measured. To minimize self-heating, an unloaded AD594/AD595 will typically operate with a total supply current 160 µA, but is also capable of delivering in excess of ±5 mA to a load.

The AD594 is precalibrated by laser wafer trimming to match the characteristic of type J (iron-constantan) thermocouples and the AD595 is laser trimmed for type K (chromel-alumel) inputs. The temperature transducer voltages and gain control resistors

are available at the package pins so that the circuit can be recalibrated for the thermocouple types by the addition of two or three resistors. These terminals also allow more precise calibration for both thermocouple and thermometer applications.

The AD594/AD595 is available in two performance grades. The C and the A versions have calibration accuracies of ±1°C and ±3°C, respectively. Both are designed to be used from 0°C to +50°C, and are available in 14-pin, hermetically sealed, side-brazed ceramic DIPs as well as low cost cerdip packages.

### PRODUCT HIGHLIGHTS

1. The AD594/AD595 provides cold junction compensation, amplification, and an output buffer in a single IC package.
2. Compensation, zero, and scale factor are all precalibrated by laser wafer trimming (LWT) of each IC chip.
3. Flexible pinout provides for operation as a setpoint controller or a stand-alone temperature transducer calibrated in degrees Celsius.
4. Operation at remote application sites is facilitated by low quiescent current and a wide supply voltage range +5 V to dual supplies spanning 30 V.
5. Differential input rejects common-mode noise voltage on the thermocouple leads.

# AD594/AD595—SPECIFICATIONS (@ +25°C and $V_S = 5\text{ V}$ , Type J (AD594), Type K (AD595) Thermocouple, unless otherwise noted)

Model	AD594A			AD594C			AD595A			AD595C			Units
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
<b>ABSOLUTE MAXIMUM RATING</b>													
$+V_S$ to $-V_S$			36			36			36			36	Volts
Common-Mode Input Voltage	$-V_S - 0.15$		$+V_S$	$-V_S - 0.15$		$+V_S$	$-V_S - 0.15$		$+V_S$	$-V_S - 0.15$		$+V_S$	Volts
Differential Input Voltage	$-V_S$		$+V_S$	$-V_S$		$+V_S$	$-V_S$		$+V_S$	$-V_S$		$+V_S$	Volts
<b>Alarm Voltages</b>													
+ALM	$-V_S$		$-V_S + 36$	$-V_S$		$-V_S + 36$	$-V_S$		$-V_S + 36$	$-V_S$		$-V_S + 36$	Volts
-ALM	$-V_S$		$+V_S$	$-V_S$		$+V_S$	$-V_S$		$+V_S$	$-V_S$		$+V_S$	Volts
Operating Temperature Range	-55		+125	-55		+125	-55		+125	-55		+125	°C
Output Short Circuit to Common	Indefinite			Indefinite			Indefinite			Indefinite			
<b>TEMPERATURE MEASUREMENT</b> (Specified Temperature Range 0°C to +50°C)													
Calibration Error at +25°C <sup>1</sup>			±3			±1			±3			±1	°C
Stability vs. Temperature <sup>2</sup>			±0.05			±0.025			±0.05			±0.025	°C/°C
Gain Error			±1.5			±0.75			±1.5			±0.75	%
Nominal Transfer Function			10			10			10			10	mV/°C
<b>AMPLIFIER CHARACTERISTICS</b>													
Closed Loop Gain <sup>3</sup>		193.4			193.4			247.3			247.3		
Input Offset Voltage		(Temperature in °C) × 51.70 μV/°C			(Temperature in °C) × 51.70 μV/°C			(Temperature in °C) × 40.44 μV/°C			(Temperature in °C) × 40.44 μV/°C		μV
Input Bias Current		0.1			0.1			0.1			0.1		μA
Differential Input Range	-10		+50	-10		+50	-10		+50	-10		+50	mV
Common-Mode Range	$-V_S - 0.15$		$-V_S - 4$	$-V_S - 0.15$		$-V_S - 4$	$-V_S - 0.15$		$-V_S - 4$	$-V_S - 0.15$		$-V_S - 4$	Volts
Common-Mode Sensitivity – RTO			10			10			10			10	mV/V
Power Supply Sensitivity – RTO			10			10			10			10	mV/V
Output Voltage Range													
Dual Supply	$-V_S + 2.5$		$+V_S - 2$	$-V_S + 2.5$		$+V_S - 2$	$-V_S + 2.5$		$+V_S - 2$	$-V_S + 2.5$		$+V_S - 2$	Volts
Single Supply	0		$+V_S - 2$	0		$-V_S - 2$	0		$+V_S + 2$	0		$+V_S - 2$	Volts
Usable Output Current <sup>4</sup>		±5			±5			±5			±5		mA
3 dB Bandwidth		15			15			15			15		kHz
<b>ALARM CHARACTERISTICS</b>													
$V_{CH(SAV)}$ at 2 mA		0.3			0.3			0.3			0.3		Volts
Leakage Current			±1			±1			±1			±1	μA max
Operating Voltage at –ALM			$+V_S - 4$			$+V_S - 4$			$+V_S - 4$			$+V_S - 4$	Volts
Short Circuit Current		20			20			20			20		mA
<b>POWER REQUIREMENTS</b>													
Specified Performance		$+V_S = 5, -V_S = 0$			$+V_S = 5, -V_S = 0$			$+V_S = 5, -V_S = 0$			$+V_S = 5, -V_S = 0$		Volts
Operating <sup>5</sup>		$+V_S$ to $-V_S \leq 30$			$+V_S$ to $-V_S \leq 30$			$+V_S$ to $-V_S \leq 30$			$+V_S$ to $-V_S \leq 30$		Volts
Quiescent Current (No Load)													
$+V_S$		160	300		160	300		160	300		160	300	μA
$-V_S$		100			100			100			100		μA
<b>PACKAGE OPTION</b>													
TO-116 (D-14)		AD594AD			AD594CD			AD595AD			AD595CD		
Cerdip (Q-14)		AD594AQ			AD594CQ			AD595AQ			AD595CQ		

## NOTES

<sup>1</sup>Calibrated for minimum error at +25°C using a thermocouple sensitivity of 51.7 μV/°C. Since a J type thermocouple deviates from this straight line approximation, the AD594 will normally read 3.1 mV when the measuring junction is at 0°C. The AD595 will similarly read 2.7 mV at 0°C.

<sup>2</sup>Defined as the slope of the line connecting the AD594/AD595 errors measured at 0°C and 50°C ambient temperature.

<sup>3</sup>Pin 8 shorted to Pin 9.

<sup>4</sup>Current Sink Capability in single supply configuration is limited to current drawn to ground through a 30 kΩ resistor at output voltages below 2.5 V.

<sup>5</sup> $-V_S$  must not exceed -16.5 V.

Specifications shown in **boldface** are tested on all production units at final electrical test. Results from those tests are used to calculate outgoing quality levels. All min and max specifications are guaranteed, although only those shown in **boldface** are tested on all production units. Specifications subject to change without notice.

## INTERPRETING AD594/AD595 OUTPUT VOLTAGES

To achieve a temperature proportional output of 10 mV/°C and accurately compensate for the reference junction over the rated operating range of the circuit, the AD594/AD595 is gain trimmed to match the transfer characteristic of J and K type thermocouples at 25°C. For a type J output in this temperature range the TC is 51.70 μV/°C, while for a type K it is 40.44 μV/°C. The resulting gain for the AD594 is 193.4 (10 mV/°C divided by 51.7 μV/°C) and for the AD595 is 247.3 (10 mV/°C divided by 40.44 μV/°C). In addition, an absolute accuracy trim induces an input offset to the output amplifier characteristic of 16 μV for the AD594 and 11 μV for the AD595. This offset arises because the AD594/AD595 is trimmed for a 250 mV output while applying a 25°C thermocouple input.

Because a thermocouple output voltage is nonlinear with respect to temperature, and the AD594/AD595 linearly amplifies the

compensated signal, the following transfer functions should be used to determine the actual output voltages:

$$AD594 \text{ output} = (\text{Type J Voltage} + 16 \mu\text{V}) \times 193.4$$

$$AD595 \text{ output} = (\text{Type K Voltage} + 11 \mu\text{V}) \times 247.3 \text{ or conversely:}$$

$$\text{Type J voltage} = (AD594 \text{ output}/193.4) - 16 \mu\text{V}$$

$$\text{Type K voltage} = (AD595 \text{ output}/247.3) - 11 \mu\text{V}$$

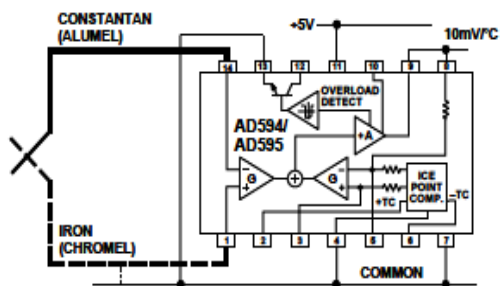
Table I lists the ideal AD594/AD595 output voltages as a function of Celsius temperature for type J and K ANSI standard thermocouples, with the package and reference junction at 25°C. As is normally the case, these outputs are subject to calibration, gain and temperature sensitivity errors. Output values for intermediate temperatures can be interpolated, or calculated using the output equations and ANSI thermocouple voltage tables referred to zero degrees Celsius. Due to a slight variation in alloy content between ANSI type J and DIN Fe-CuNi



**Table I. Output Voltage vs. Thermocouple Temperature (Ambient +25°C,  $V_S = -5\text{ V}, +15\text{ V}$ )**

Thermocouple Temperature °C	Type J Voltage mV	AD594 Output mV	Type K Voltage mV	AD595 Output mV
-200	-7.890	-1523	-5.891	-1454
-180	-7.402	-1428	-5.550	-1370
-160	-6.821	-1316	-5.141	-1269
-140	-6.159	-1188	-4.669	-1152
-120	-5.426	-1046	-4.138	-1021
-100	-4.632	-893	-3.553	-876
-80	-3.785	-729	-2.920	-719
-60	-2.892	-556	-2.243	-552
-40	-1.960	-376	-1.527	-375
-20	-0.995	-189	-0.777	-189
-10	-0.501	-94	-0.392	-94
0	0	3.1	0	2.7
10	.507	101	.397	101
20	1.019	200	.798	200
25	1.277	250	1.000	250
30	1.536	300	1.203	300
40	2.058	401	1.611	401
50	2.585	503	2.022	503
60	3.115	606	2.436	605
80	4.186	813	3.266	810
100	5.268	1022	4.095	1015
120	6.359	1233	4.919	1219
140	7.457	1445	5.733	1420
160	8.560	1659	6.539	1620
180	9.667	1873	7.338	1817
200	10.777	2087	8.137	2015
220	11.887	2302	8.938	2213
240	12.998	2517	9.745	2413
260	14.108	2732	10.560	2614
280	15.217	2946	11.381	2817
300	16.325	3160	12.207	3022
320	17.432	3374	13.039	3227
340	18.537	3588	13.874	3434
360	19.640	3801	14.712	3641
380	20.743	4015	15.552	3849
400	21.846	4228	16.395	4057
420	22.949	4441	17.241	4266
440	24.054	4655	18.088	4476
460	25.161	4869	18.938	4686
480	26.272	5084	19.788	4896
500	27.388	5300	20.640	5107
520	28.511	5517	21.493	5318
540	29.642	5736	22.346	5529
560	30.782	5956	23.198	5740
580	31.933	6179	24.050	5950
600	33.096	6404	24.902	6161
620	34.273	6632	25.751	6371
640	35.464	6862	26.599	6581
660	36.671	7095	27.445	6790
680	37.893	7332	28.288	6998
700	39.130	7571	29.128	7206
720	40.382	7813	29.965	7413
740	41.647	8058	30.799	7619
750	42.283	8181	31.214	7722
760	-	-	31.629	7825
780	-	-	32.455	8029
800	-	-	33.277	8232
820	-	-	34.095	8434
840	-	-	34.909	8636
860	-	-	35.718	8836
880	-	-	36.524	9035
900	-	-	37.325	9233
920	-	-	38.122	9430
940	-	-	38.915	9626
960	-	-	39.703	9821
980	-	-	40.488	10015
1000	-	-	41.269	10209
1020	-	-	42.045	10400
1040	-	-	42.817	10591
1060	-	-	43.585	10781
1080	-	-	44.359	10970
1100	-	-	45.108	11158
1120	-	-	45.863	11345
1140	-	-	46.612	11530
1160	-	-	47.356	11714
1180	-	-	48.095	11897
1200	-	-	48.828	12078
1220	-	-	49.555	12258
1240	-	-	50.276	12436
1250	-	-	50.633	12524

thermocouples Table I should not be used in conjunction with European standard thermocouples. Instead the transfer function given previously and a DIN thermocouple table should be used. ANSI type K and DIN NiCr-Ni thermocouples are composed



**Figure 1. Basic Connection, Single Supply Operation**

of identical alloys and exhibit similar behavior. The upper temperature limits in Table I are those recommended for type J and type K thermocouples by the majority of vendors.

### SINGLE AND DUAL SUPPLY CONNECTIONS

The AD594/AD595 is a completely self-contained thermocouple conditioner. Using a single +5 V supply the interconnections shown in Figure 1 will provide a direct output from a type J thermocouple (AD594) or type K thermocouple (AD595) measuring from 0°C to +300°C.

Any convenient supply voltage from +5 V to +30 V may be used, with self-heating errors being minimized at lower supply levels. In the single supply configuration the +5 V supply connects to Pin 11 with the  $V^-$  connection at Pin 7 strapped to power and signal common at Pin 4. The thermocouple wire inputs connect to Pins 1 and 14 either directly from the measuring point or through intervening connections of similar thermocouple wire type. When the alarm output at Pin 13 is not used it should be connected to common or  $-V$ . The precalibrated feedback network at Pin 8 is tied to the output at Pin 9 to provide a 10 mV/°C nominal temperature transfer characteristic.

By using a wider ranging dual supply, as shown in Figure 2, the AD594/AD595 can be interfaced to thermocouples measuring both negative and extended positive temperatures.

# AD594/AD595

## THERMOCOUPLE BASICS

Thermocouples are economical and rugged; they have reasonably good long-term stability. Because of their small size, they respond quickly and are good choices where fast response is important. They function over temperature ranges from cryogenics to jet-engine exhaust and have reasonable linearity and accuracy.

Because the number of free electrons in a piece of metal depends on both temperature and composition of the metal, two pieces of dissimilar metal in isothermal and contact will exhibit a potential difference that is a repeatable function of temperature, as shown in Figure 14. The resulting voltage depends on the temperatures, T1 and T2, in a repeatable way.

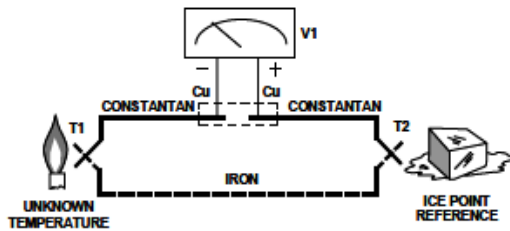


Figure 14. Thermocouple Voltage with 0°C Reference

Since the thermocouple is basically a differential rather than absolute measuring device, a known reference temperature is required for one of the junctions if the temperature of the other is to be inferred from the output voltage. Thermocouples made of specially selected materials have been exhaustively characterized in terms of voltage versus temperature compared to primary temperature standards. Most notably the water-ice point of 0°C is used for tables of standard thermocouple performance.

An alternative measurement technique, illustrated in Figure 15, is used in most practical applications where accuracy requirements do not warrant maintenance of primary standards. The reference junction temperature is allowed to change with the environment of the measurement system, but it is carefully measured by some type of absolute thermometer. A measurement of the thermocouple voltage combined with a knowledge of the reference temperature can be used to calculate the measurement junction temperature. Usual practice, however, is to use a convenient thermoelectric method to measure the reference temperature

and to arrange its output voltage so that it corresponds to a thermocouple referred to 0°C. This voltage is simply added to the thermocouple voltage and the sum then corresponds to the standard voltage tabulated for an ice-point referenced thermocouple.

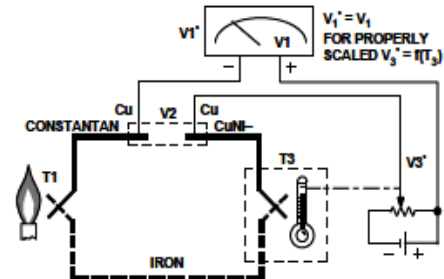


Figure 15. Substitution of Measured Reference Temperature for Ice Point Reference

The temperature sensitivity of silicon integrated circuit transistors is quite predictable and repeatable. This sensitivity is exploited in the AD594/AD595 to produce a temperature related voltage to compensate the reference of "cold" junction of a thermocouple as shown in Figure 16.

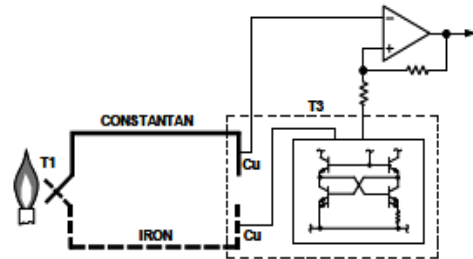


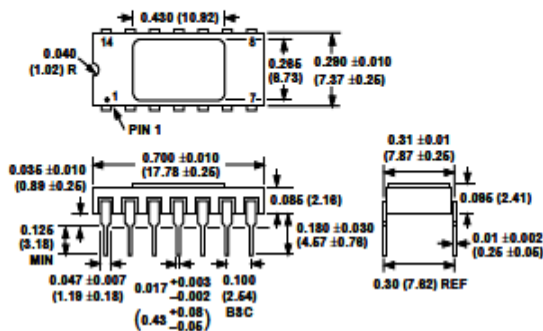
Figure 16. Connecting Isothermal Junctions

Since the compensation is at the reference junction temperature, it is often convenient to form the reference "junction" by connecting directly to the circuit wiring. So long as these connections and the compensation are at the same temperature no error will result.

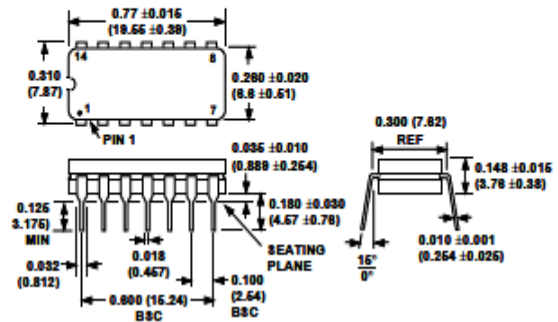
## OUTLINE DIMENSIONS

Dimensions shown in inches and (mm).

### TO-116 (D) Package



### Cerdip (Q) Package





# El Microcontrolador PIC16F877

## Resumen de hoja de datos

El PIC16F877 es un microcontrolador con memoria de programa tipo *FLASH*, lo que representa gran facilidad en el desarrollo de prototipos y en su aprendizaje ya que no se requiere borrarlo con luz ultravioleta como las versiones EPROM, sino que permite reprogramarlo nuevamente sin ser borrado con anterioridad.

El PIC16F877 es un microcontrolador de *Microchip Technology* fabricado en tecnología CMOS, su consumo de potencia es muy bajo y además es completamente estático, esto quiere decir que el reloj puede detenerse y los datos de la memoria no se pierden.

El encapsulado más común para este microcontrolador es el DIP (*Dual In-line Pin*) de 40 pines, propio para usarlo en experimentación. La referencia completa es PIC16F877-04 para el dispositivo que utiliza cristal oscilador de hasta 4 MHz, PIC16F877-20 para el dispositivo que utiliza cristal oscilador de hasta 20 MHz o PIC16F877A-I para el dispositivo tipo industrial que puede trabajar hasta a 20 MHz. Sin embargo, hay otros tipos de encapsulado que se pueden utilizar según el diseño y la aplicación que se quiere realizar. Por ejemplo, el encapsulado tipo *surface mount* (montaje superficial) tiene un reducido tamaño y bajo costo, que lo hace propio para producciones en serie o para utilizarlo en lugares de espacio muy reducido.

### Configuración de pines

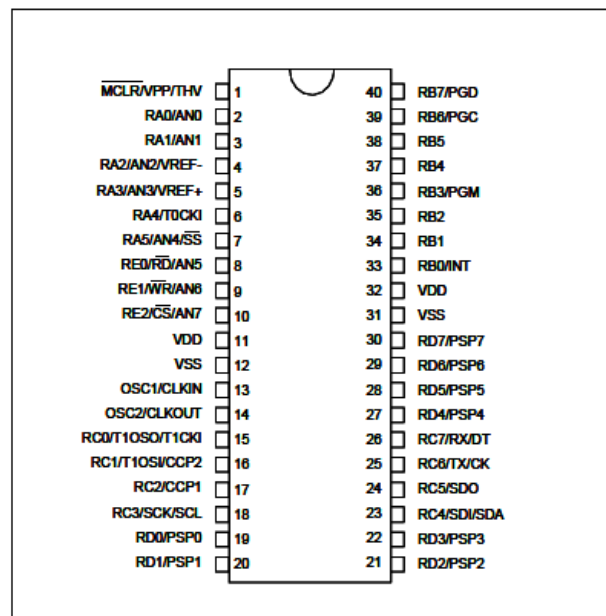
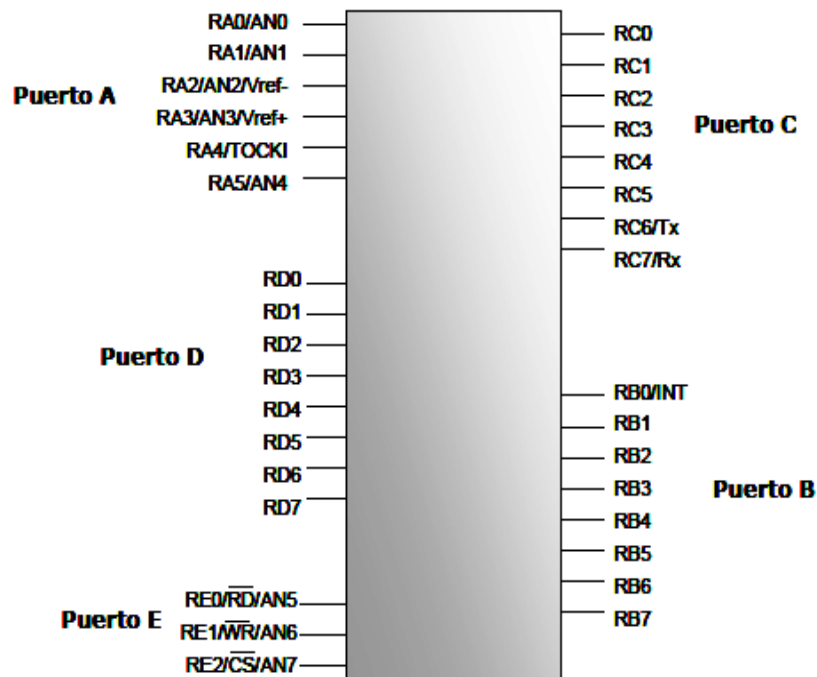


Figura 3.1. Distribución de pines del PIC16F877.

Los pines de entrada/salida de este microcontrolador están organizados en cinco puertos, el puerto A con 6 líneas, el puerto B con 8 líneas, el puerto C con 8 líneas, el puerto D con 8 líneas y el puerto E con 3 líneas. Cada pin de esos puertos se puede configurar como entrada o como salida independiente programando un par de registros diseñados para tal fin. En ese registro un bit en "0" configura el pin del puerto correspondiente como salida y un bit en "1" lo configura como entrada. Dichos pines del microcontrolador también pueden cumplir otras funciones especiales, siempre y cuando se configuren para ello, según se verá más adelante.



**Figura 3.2.** Distribución de los puertos del PIC16F877

Los pines del puerto A y del puerto E pueden trabajar como entradas para el convertidor Análogo a Digital interno, es decir, allí se podría conectar una señal proveniente de un sensor o de un circuito analógico para que el microcontrolador la convierta en su equivalente digital y pueda realizar algún proceso de control o de instrumentación digital. El pin RB0/INT se puede configurar por software para que funcione como interrupción externa, para configurarlo se utilizan unos bits de los registros que controlan las interrupciones.

El pin RA4/TOCKI del puerto A puede ser configurado como un pin de entrada/salida o como entrada del temporizador/contador. Cuando este pin se programa como entrada digital,

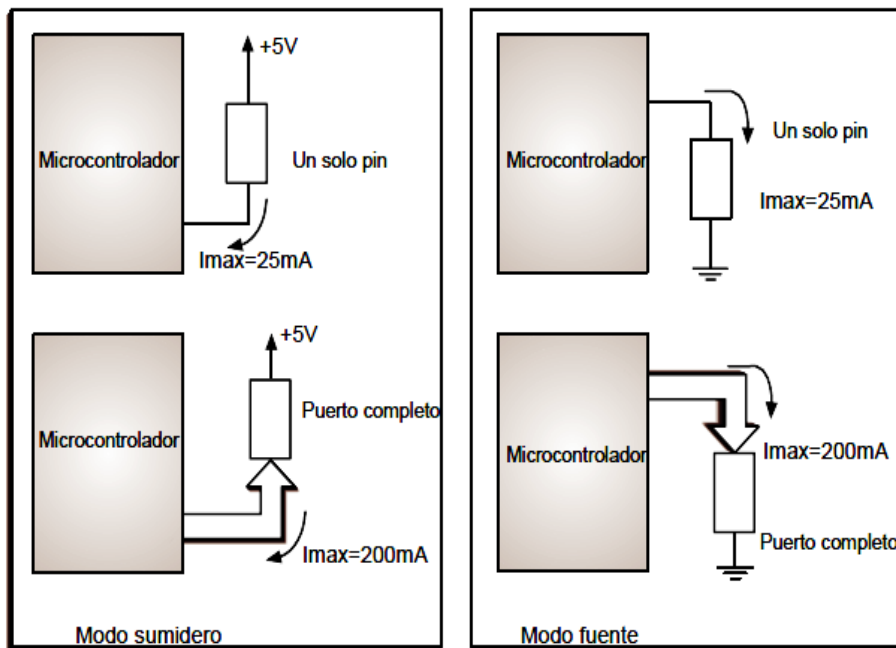
funciona como un disparador de *Schmitt* (*Schmitt trigger*), puede reconocer señales un poco distorsionadas y llevarlas a niveles lógicos (cero y cinco voltios). Cuando se usa como salida digital se comporta como colector abierto (*open collector*), por lo tanto, se debe poner una resistencia de *pull-up* (resistencia externa conectada a un nivel de cinco voltios). Como salida, la lógica es inversa: un "0" escrito al pin del puerto entrega en el pin un "1" lógico. Además, como salida no puede manejar cargas como fuente, sólo en el modo sumidero.

El puerto E puede controlar la conexión en modo microprocesador con otros dispositivos utilizando las líneas RD (*read*), WR (*write*) y CS (*chip select*). En este modo el puerto D funciona como un bus de datos de 8 bits (pines *PSP*).

La máxima capacidad de corriente de cada uno de los pines de los puertos en modo sumidero (*sink*) o en modo fuente (*source*) es de 25 mA . La máxima capacidad de corriente total de los puertos es:

	<b>PUERTO A</b>	<b>PUERTO B</b>	<b>PUERTO C</b>	<b>PUERTO D</b>
Modo sumidero	150 mA	200 mA	200 mA	200 mA
Modo fuente	150 mA	200 mA	200mA	200mA

El consumo de corriente del microcontrolador para su funcionamiento depende del voltaje de operación, la frecuencia y de las cargas que tengan sus pines. Para un oscilador de 4 MHz el consumo es de aproximadamente 2 mA; aunque este se puede reducir a 40 microamperios cuando se está en el modo *sleep* (en este modo el micro se detiene y disminuye el consumo de potencia). Se sale de ese estado cuando se produce alguna condición especial que veremos más adelante.



**Figura 3.3.** Capacidad de corriente de los pines y puertos.

## Descripción de los pines del microcontrolador

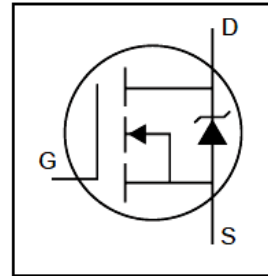
Nombre pin	Pin	Descripción
RA0/AN0	2	E/S Digital o Entrada análoga 0.
RA1/AN1	3	E/S Digital o Entrada análoga 1.
RA2/AN2 $V_{ref-}$	4	E/S Digital o Entrada análoga 2.
RA3/AN3 $V_{ref+}$	5	E/S Digital o Entrada análoga 3.
RA4/T0CKI	6	Bit 4 del puerto A (E/S bidireccional). También se usa como entrada de reloj al temporizador/contador TMR0. Salida de colector abierto.
RA5/SS/AN4	7	E/S Digital o Entrada análoga 4. También lo usa el puerto serial síncrono.
RB0/INT	33	Bit 0 del puerto B (E/S bidireccional). Buffer E/S: TTL/ST. También se usa como entrada de interrupción externa (INT).
RB1	34	Bit 1 del puerto B (E/S bidireccional). Buffer E/S: TTL
RB2	35	Bit 2 del puerto B (E/S bidireccional). Buffer E/S: TTL
RB3/PGM	36	Bit 3 del puerto B (E/S bidireccional). Buffer E/S: TTL (Programación en bajo voltaje)
RB4	37	Bit 4 del puerto B (E/S bidireccional). Buffer E/S: TTL. Interrupción por cambio del pin.
RB5	38	Bit 5 del puerto B (E/S bidireccional). Buffer E/S: TTL. Interrupción por cambio del pin.
RB6/PGC	39	Bit 6 del puerto B (E/S bidireccional). Buffer E/S: TTL/ST. Interrupción por cambio del pin. Entrada de reloj para programación serial.
RB7/PGD	40	Bit 7 del puerto B (E/S bidireccional). Buffer E/S: TTL/ST. Interrupción por cambio del pin. Entrada de datos para programación serial.
RC0/T1OSO/T1CKI	15	E/S Digital. Salida del oscilador Timer 1 o entrada de reloj Timer 1.
RC1/T1OSI/CCP2	16	E/S Digital. Entrada del oscilador Timer 1. Entrada Captura 2; Salida Compara 2; Salida PWM 2
RC2/CCP1	17	E/S Digital. Entrada Captura 1; Salida Compara 1; Salida PWM 1
RC3/SCK/SCL	18	E/S Digital. Línea de reloj serial asíncrono en el modo SPI y el modo I <sup>2</sup> C
RC4/SDI/SDA	23	E/S Digital. Línea de datos en el modo SPI o en el modo I <sup>2</sup> C
RC5/SDO	24	E/S Digital.
RC6/TX/CK	25	E/S Digital. Transmisión asíncrona (USART) o reloj síncrono (SSP).
RC7/RX/DT	26	E/S Digital. Recepción asíncrona (USART) o línea de datos (SSP).
$V_{DD}$	11,32	Voltaje de alimentación DC (+)
$V_{SS}$	12,31	Referencia de voltaje (GND).
MCLR	1	Entrada de RESET al microcontrolador. Voltaje de entrada durante la programación. En nivel bajo resetea el microcontrolador.
OSC1/CLKIN	13	Entrada oscilador cristal / Entrada fuente de reloj externa.
OSC2/CLKOUT	14	Salida oscilador cristal. Oscilador RC: Salida con un ¼ frecuencia OSC1
RD0/PSP0	19	E/S Digital. Puede ser puerto paralelo en bus de 8 bits.
RD1/PSP1	20	E/S Digital. Puede ser puerto paralelo en bus de 8 bits.
RD2/PSP2	21	E/S Digital. Puede ser puerto paralelo en bus de 8 bits.
RD3/PSP3	22	E/S Digital. Puede ser puerto paralelo en bus de 8 bits.
RD4/PSP4	27	E/S Digital. Puede ser puerto paralelo en bus de 8 bits.
RD5/PSP5	28	E/S Digital. Puede ser puerto paralelo en bus de 8 bits.
RD6/PSP6	29	E/S Digital. Puede ser puerto paralelo en bus de 8 bits.
RD7/PSP7	30	E/S Digital. Puede ser puerto paralelo en bus de 8 bits.
RE0/RD/AN5	8	E/S Digital. Puede ser pin de lectura ( <i>read</i> ) en modo microprocesador.
RE1/WR/AN6	9	E/S Digital. Puede ser pin de escritura ( <i>write</i> ) en modo microprocesador.
RE2/CS/AN7	10	E/S Digital. Puede ser pin de selección de chip ( <i>chip select</i> ) en modo microprocesador.



# IRFP260N

HEXFET® Power MOSFET

- Advanced Process Technology
- Dynamic dv/dt Rating
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Fully Avalanche Rated
- Ease of Paralleling
- Simple Drive Requirements



$$V_{DSS} = 200V$$

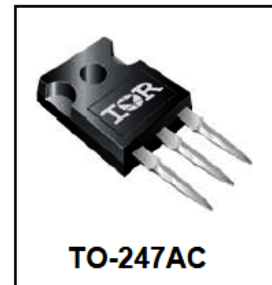
$$R_{DS(on)} = 0.04\Omega$$

$$I_D = 50A$$

## Description

Fifth Generation HEXFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. This benefit, combined with the fast switching speed and ruggedized device design that HEXFET Power MOSFETs are well known for, provides the designer with an extremely efficient and reliable device for use in a wide variety of applications.

The TO-247 package is preferred for commercial-industrial applications where higher power levels preclude the use of TO-220 devices. The TO-247 is similar but superior to the earlier TO-218 package because of its isolated mounting hole.



## Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	50	A
$I_D @ T_C = 100^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	35	
$I_{DM}$	Pulsed Drain Current ①	200	
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	Power Dissipation	300	W
	Linear Derating Factor	2.0	W/°C
$V_{GS}$	Gate-to-Source Voltage	$\pm 20$	V
$E_{AS}$	Single Pulse Avalanche Energy ②	560	mJ
$I_{AR}$	Avalanche Current ①	50	A
$E_{AR}$	Repetitive Avalanche Energy ①	30	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ③	10	V/ns
$T_J$	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to +175	°C
$T_{STG}$			
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf·in (1.1N·m)	

## Thermal Resistance

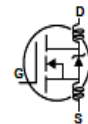
	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	0.50	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.24	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	40	

# IRFP260N

International  
IGR Rectifier

## Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	200	—	—	V	$V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.26	—	V/°C	Reference to $25^\circ\text{C}$ , $I_D = 1mA$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	0.04	$\Omega$	$V_{GS} = 10V, I_D = 28A$ ①
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\mu A$
$g_{fs}$	Forward Transconductance	27	—	—	S	$V_{DS} = 50V, I_D = 28A$ ①
$I_{DSS}$	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	$\mu A$	$V_{DS} = 200V, V_{GS} = 0V$
		—	—	250		$V_{DS} = 160V, V_{GS} = 0V, T_J = 150^\circ\text{C}$
$I_{GSS}$	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{GS} = 20V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100		$V_{GS} = -20V$
$Q_g$	Total Gate Charge	—	—	234	nC	$I_D = 28A$
$Q_{gs}$	Gate-to-Source Charge	—	—	38		$V_{DS} = 160V$
$Q_{gd}$	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	110		$V_{GS} = 10V$ ④
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	17	—	ns	$V_{DD} = 100V$
$t_r$	Rise Time	—	60	—		$I_D = 28A$
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	55	—		$R_G = 1.8\Omega$
$t_f$	Fall Time	—	48	—		$V_{GS} = 10V$ ④
$L_D$	Internal Drain Inductance	—	5.0	—	nH	Between lead, 6mm (0.25in.) from package and center of die contact
$L_S$	Internal Source Inductance	—	13	—		
$C_{iss}$	Input Capacitance	—	4057	—	pF	$V_{GS} = 0V$
$C_{oss}$	Output Capacitance	—	603	—		$V_{DS} = 25V$
$C_{rss}$	Reverse Transfer Capacitance	—	161	—		$f = 1.0MHz$



## Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$I_S$	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	50	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode.
$I_{SM}$	Pulsed Source Current (Body Diode)①	—	—	200		
$V_{SD}$	Diode Forward Voltage	—	—	1.3	V	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = 28A, V_{GS} = 0V$ ④
$t_{rr}$	Reverse Recovery Time	—	268	402	ns	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_F = 28A$
$Q_{rr}$	Reverse Recovery Charge	—	1.9	2.8	$\mu C$	$di/dt = 100A/\mu s$ ④
$t_{on}$	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by $L_S + L_D$ )				

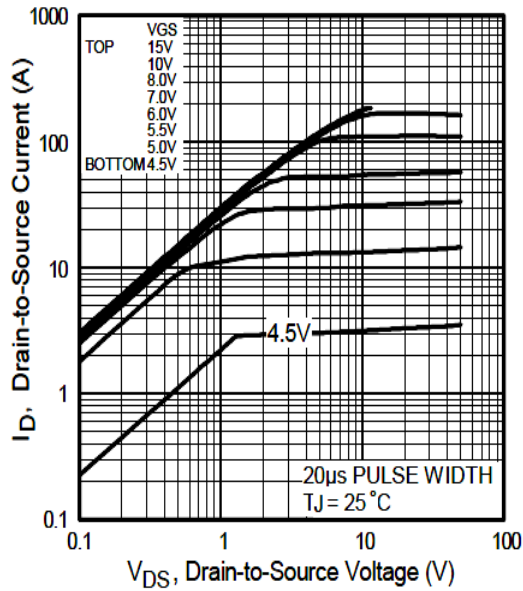
### Notes:

① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature.

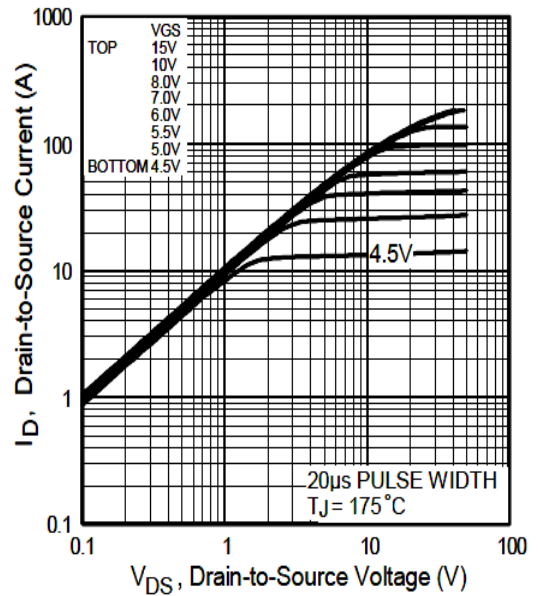
② Starting  $T_J = 25^\circ\text{C}$ ,  $L = 1.5mH$   
 $R_G = 25\Omega$ ,  $I_{AS} = 28A$ .

③  $I_{SD} \leq 28A$ ,  $di/dt \leq 486A/\mu s$ ,  $V_{DD} \leq V_{(BR)DSS}$ ,  
 $T_J \leq 175^\circ\text{C}$

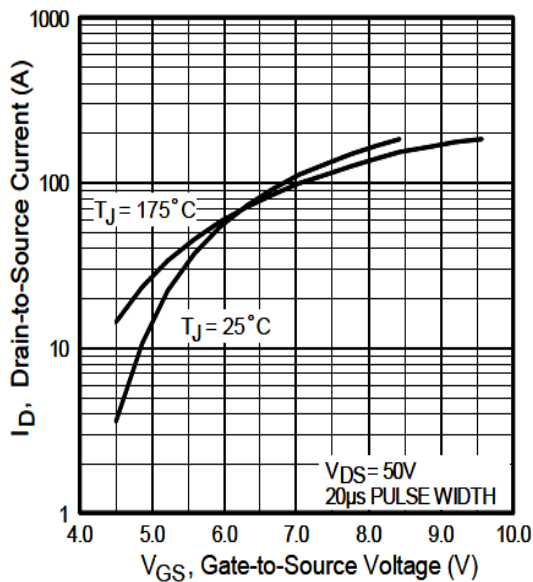
④ Pulse width  $\leq 400\mu s$ ; duty cycle  $\leq 2\%$ .



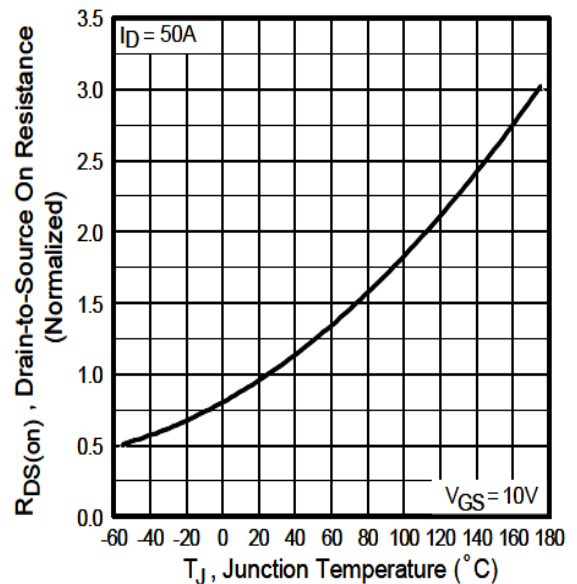
**Fig 1.** Typical Output Characteristics



**Fig 2.** Typical Output Characteristics



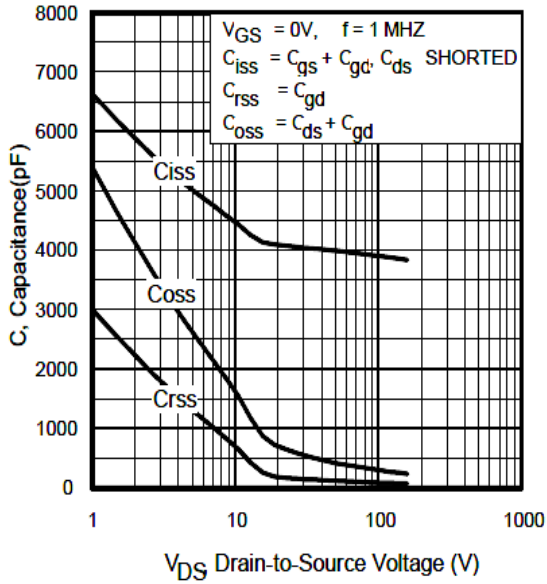
**Fig 3.** Typical Transfer Characteristics



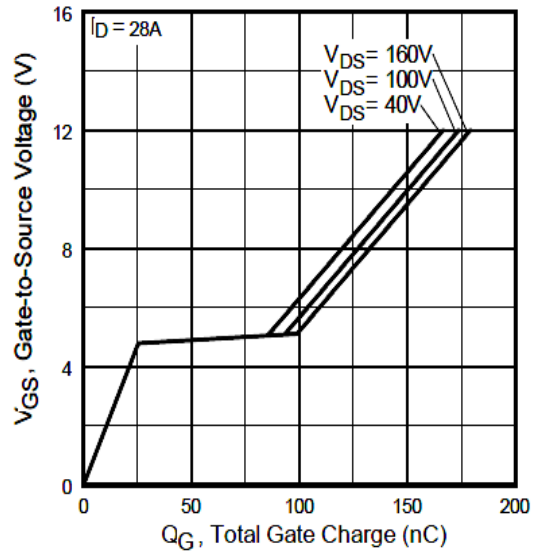
**Fig 4.** Normalized On-Resistance Vs. Temperature

# IRFP260N

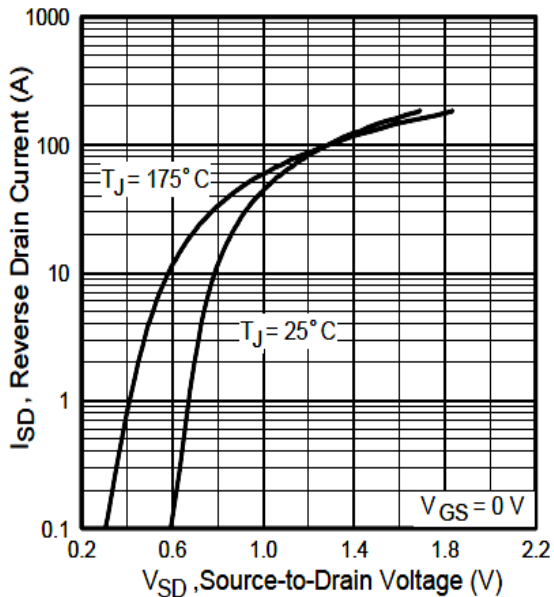
International  
**IR** Rectifier



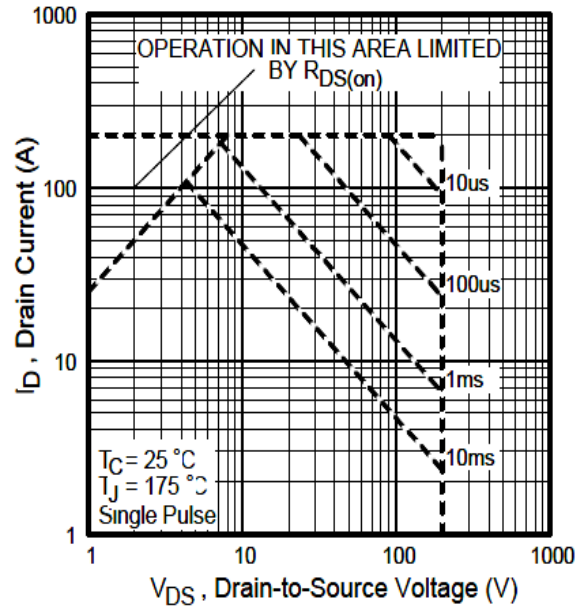
**Fig 5.** Typical Capacitance Vs. Drain-to-Source Voltage



**Fig 6.** Typical Gate Charge Vs. Gate-to-Source Voltage



**Fig 7.** Typical Source-Drain Diode Forward Voltage



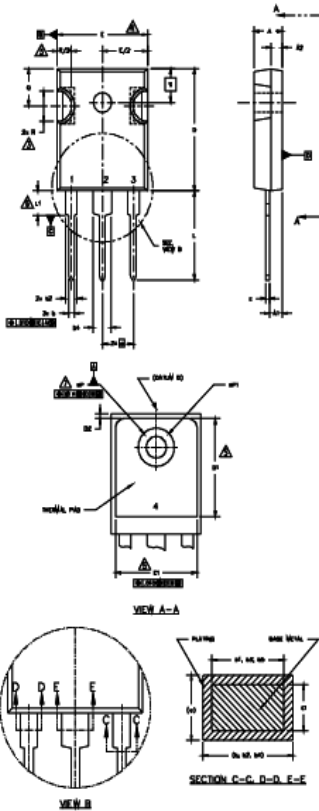
**Fig 8.** Maximum Safe Operating Area



# IRFP260N

International  
**IR** Rectifier

TO-247AC Package Outline Dimensions are shown in millimeters (inches)



- NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ASME Y14.5M 1994.
  2. DIMENSIONS ARE SHOWN IN INCHES [MILLIMETERS]
  3. CONTOUR OF SLOT OPTIONAL.
  4. DIMENSION D & E DO NOT INCLUDE MOLD FLASH. MOLD FLASH SHALL NOT EXCEED .005" (0.127) PER SIDE. THESE DIMENSIONS ARE MEASURED AT THE OUTERMOST EXTREMES OF THE PLASTIC BODY.
  5. THERMAL PAD CONTOUR OPTIONAL WITHIN DIMENSIONS D1 & E1.
  6. LEAD FINISH UNCONTROLLED IN L1.
  7. #P TO HAVE A MAXIMUM DRAFT ANGLE OF 1.5° TO THE TOP OF THE PART WITH A MAXIMUM HOLE DIAMETER OF .154" [3.91]
  8. OUTLINE CONFORMS TO JEDEC OUTLINE TO-247 WITH THE EXCEPTION OF DIMENSION c.

SYMBOL	DIMENSIONS				NOTES
	INCHES		MILLIMETERS		
	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.	
A	.183	.209	4.65	5.31	
A1	.087	.102	2.21	2.59	
A2	.059	.098	1.50	2.49	
b	.039	.055	0.99	1.40	
b1	.039	.053	0.99	1.36	
b2	.065	.094	1.65	2.39	
b3	.065	.092	1.65	2.37	
b4	.102	.135	2.59	3.43	
b5	.102	.133	2.59	3.38	
c	.015	.034	0.38	0.86	
c1	.015	.030	0.38	0.76	
D	.776	.815	19.71	20.70	4
D1	.515	-	13.08	-	5
D2	.020	.030	0.51	0.76	4
E	.602	.625	15.29	15.87	
E1	.540	-	13.72	-	
e	.215 BSC		5.46 BSC		
e1	.010		2.54		
L	.559	.634	14.20	16.10	
L1	.146	.169	3.71	4.29	
N	3		7.62 BSC		
eP	.140	.144	3.56	3.66	
eP1	-	.275	-	6.98	
O	.209	.224	5.31	5.69	
R	.178	.216	4.52	5.49	
S	.217 BSC		5.51 BSC		

**LEAD ASSIGNMENTS**

**HEXFET**

- 1.- GATE
- 2.- DRAIN
- 3.- SOURCE
- 4.- DRAIN

**IGBTs, CoPACK**

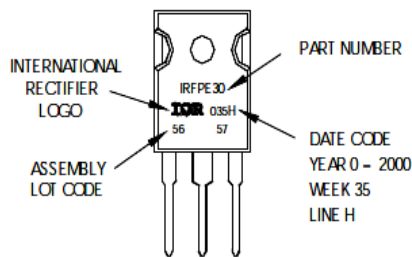
- 1.- GATE
- 2.- COLLECTOR
- 3.- EMITTER
- 4.- COLLECTOR

**DIODES**

- 1.- ANODE/OPEN
- 2.- CATHODE
- 3.- ANODE

## TO-247AC Part Marking Information

EXAMPLE: THIS IS AN IRFPE30  
WITH ASSEMBLY  
LOT CODE 5657  
ASSEMBLED ON WW35, 2000  
IN THE ASSEMBLY LINE "H"  
Note: "P" in assembly line  
position indicates "Lead-Free"



Data and specifications subject to change without notice.  
This product has been designed and qualified for the Automotive [Q101] market.  
Qualification Standards can be found on IR's Web site.

International  
**IR** Rectifier

IR WORLD HEADQUARTERS: 233 Kansas St., El Segundo, California 90245, USA Tel: (310) 252-7105  
TAC Fax: (310) 252-7903  
Visit us at [www.irf.com](http://www.irf.com) for sales contact information. 10/04  
[www.irf.com](http://www.irf.com)

## Anexo 5. Diodo Schottky NTE6082



ELECTRONICS, INC.  
44 FARRAND STREET  
BLOOMFIELD, NJ 07003  
(973) 748-5089

### NTE6082 Silicon Schottky Barrier Rectifier

#### **Description:**

The NTE6082 is a silicon switchmode power rectifier using the Schottky Barrier principle with a platinum barrier metal.

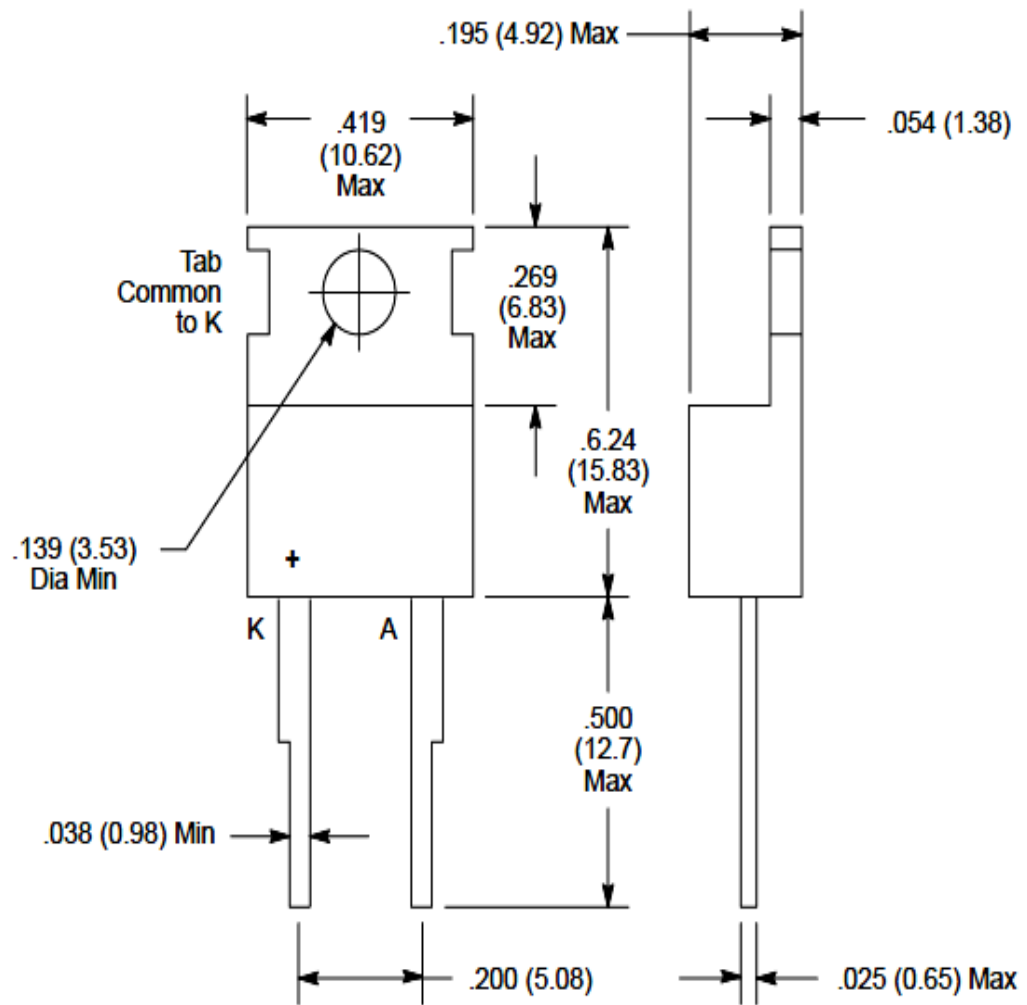
#### **Features:**

- Guardring for Stress Protection
- Low Forward Voltage
- +150°C Operating Junction Temperature

**Maximum and Electrical Ratings:** ( $T_A = +25^\circ\text{C}$  unless otherwise specified. Resistive or inductive load. For capacitive or inductive load, derate current by 20%)

Maximum Peak Repetitive Reverse Voltage, $V_{RRM}$ .....	60V
Maximum Working Peak Reverse Voltage, $V_{RWM}$ .....	60V
Maximum DC Blocking Voltage, $V_R$ .....	60V
Maximum Average Rectified Forward Current ( $T_C = +125^\circ\text{C}$ ), $I_{F(AV)}$ .....	16A
Peak Repetitive Forward Current ( $V_R = 60\text{V}$ , Square Wave, 20kHz, $T_C = +125^\circ\text{C}$ ), $I_{FRM}$ .....	32A
Non-Repetitive Peak Surge Current, $I_{FSM}$ (8.3ms single half sinewave superimposed on rated load) .....	150A
Peak Repetitive Reverse Surge Current (2.0 $\mu\text{s}$ , 1.0kHz), $I_{RRM}$ .....	500mA
Operating Junction Temperature Range, $T_J$ .....	-65° to +150°C
Storage Temperature Range, $T_{stg}$ .....	-65° to +150°C
Voltage Rate of Change ( $V_R = 60\text{V}$ ), $dv/dt$ .....	1000V/ $\mu\text{s}$
Maximum Thermal Resistance, Junction-to-Case, $R_{thJC}$ .....	3°/W
Maximum Instantaneous Forward Voltage (Per Leg, $I_F = 16\text{A}$ ), $V_F$	
$T_C = +125^\circ\text{C}$ (Note 1) .....	0.65V
$T_C = +25^\circ\text{C}$ .....	0.75V
Maximum Instantaneous Reverse Current (Rated DC Voltage), $I_R$	
$T_C = +125^\circ\text{C}$ .....	50mA
$T_C = +25^\circ\text{C}$ .....	1mA

Note 1. Pulse Test: Pulse Width = 300 $\mu\text{s}$ , Duty Cycle  $\leq 2\%$ .



## Anexo 6. Equipos utilizados

Cautín tipo pistola



Amperímetro de gancho



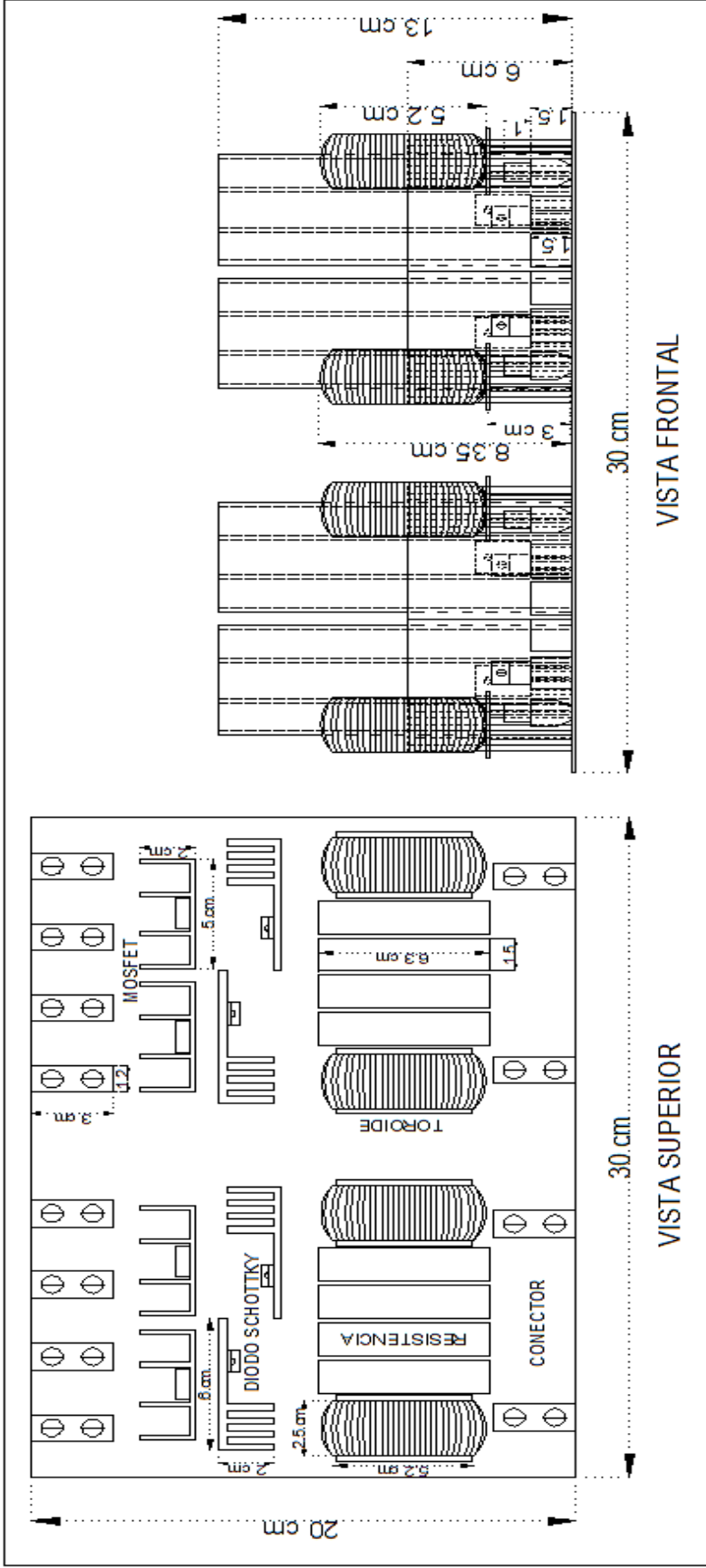
Multímetro con medidor de temperatura integrado



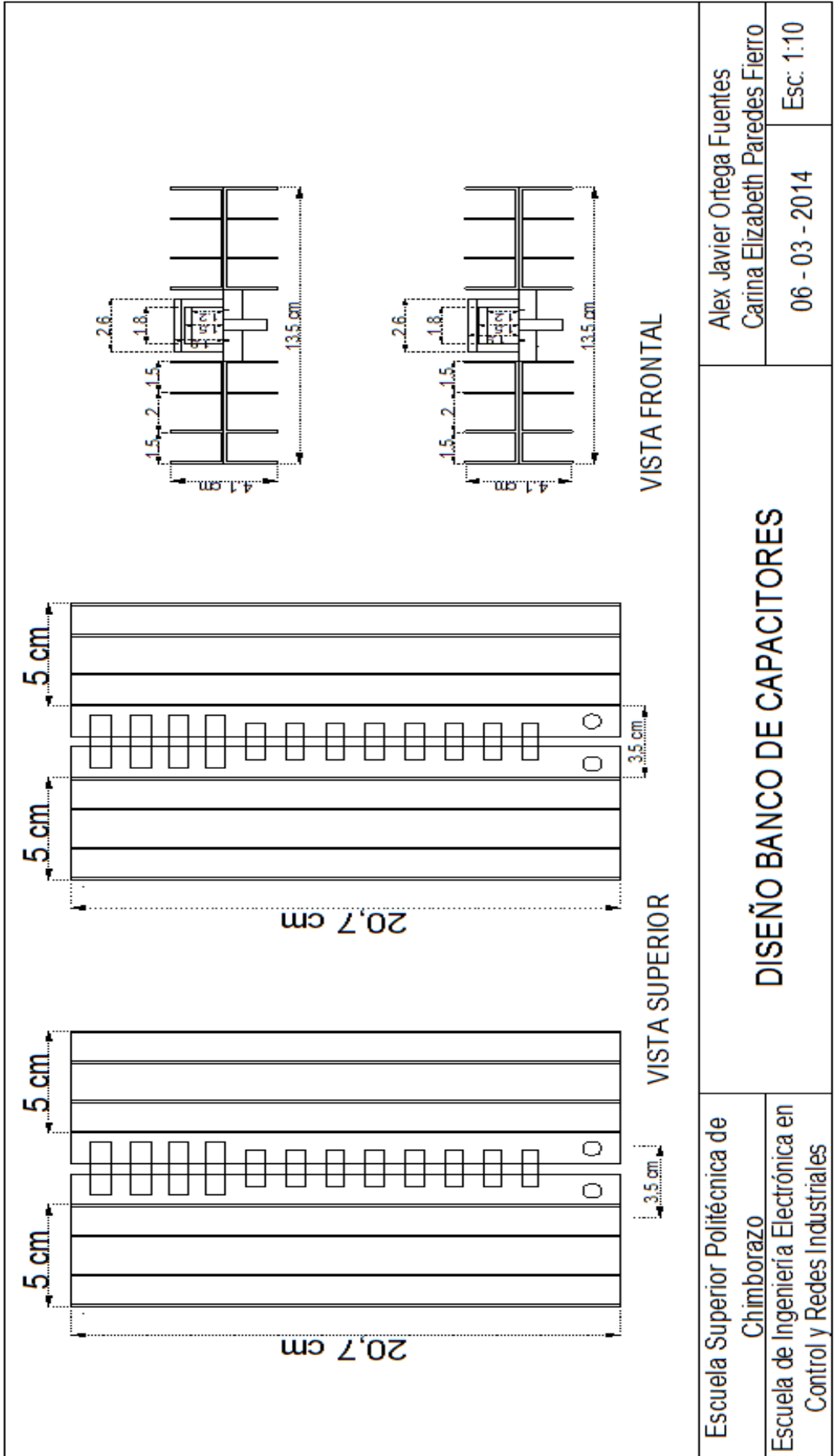
Capacímetro y Henriómetro





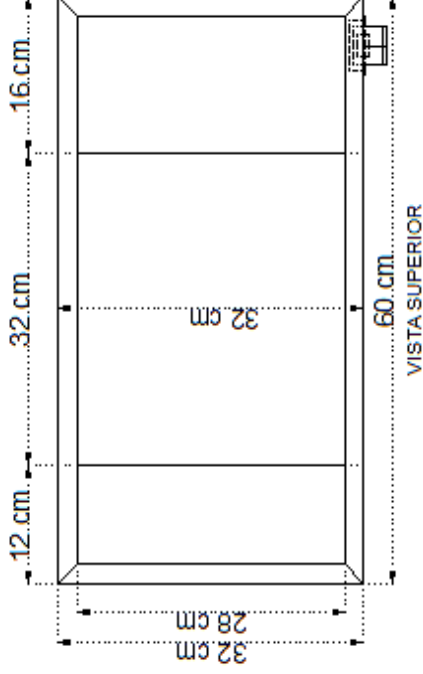
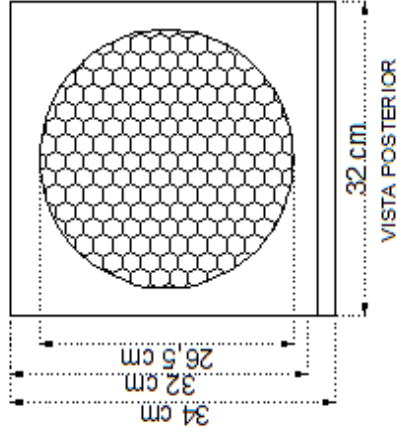
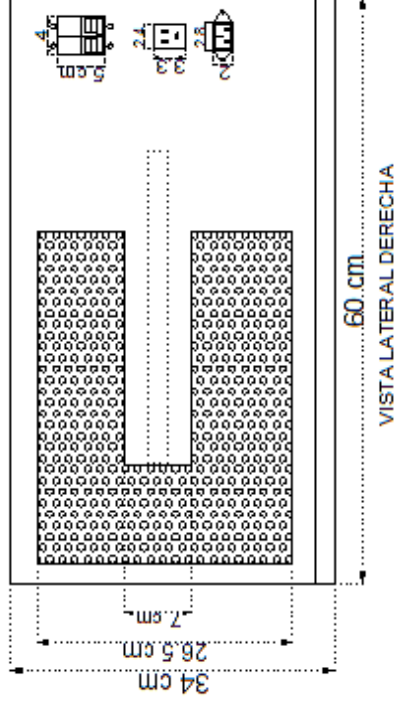
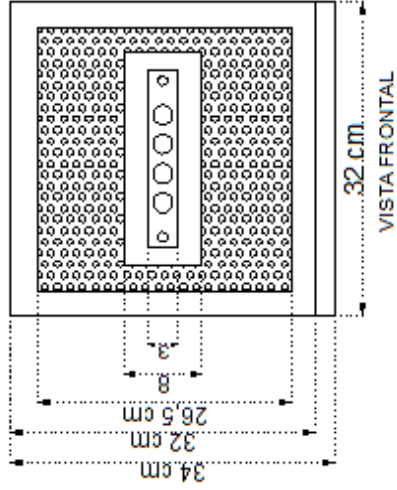


Escuela Superior Politécnica de Chimborazo	<b>DISEÑO DE CIRCUITOS CONVERTIDORES RESONANTES</b>		Alex Javier Ortega Fuentes Carina Elizabeth Paredes Fierro
Escuela de Ingeniería Electrónica en Control y Redes Industriales			04 - 03 - 2014



Escuela Superior Politécnica de Chimborazo	<b>DISEÑO BANCO DE CAPACITORES</b>		Alex Javier Ortega Fuentes
Escuela de Ingeniería Electrónica en Control y Redes Industriales			Carina Elizabeth Paredes Fierro
		06 - 03 - 2014	Esc: 1:10





Escuela Superior Politécnica de  
Chimborazo  
Escuela de Ingeniería Electrónica en  
Control y Redes Industriales

## DISEÑO DE CAJA DE TRABAJO

Alex Javier Ortega Fuentes  
Carina Elizabeth Paredes Fierro

08 - 03 - 2014

Esc: 1:10

## Anexo 8. Programación del microcontrolador

Programación del PIC16F877A para el indicador de temperatura en la carga.

```
#include <16F877A.h>
#device adc=10
#fuses XT,NOWDT
#use delay(clock=4M)
#include <lcd.c>
#include <string.h>
#define use_portd_lcd TRUE
#FUSES XT
#FUSES NOWDT
#FUSES NOPUT
#FUSES NOPROTECT
#FUSES NODEBUG
#FUSES NOBROWNOUT
#FUSES NOLVP
#FUSES NOCPD
#FUSES NOWRT
float temperatura;
void main()
{
  setup_adc_ports(AN0);
  setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL);
  setup_COUNTERS(RTCC_internal.rtcc_div_1);
  lcd_init();
  lcd_gotoxy(5,1);
  printf(lcd_putc,"CONTROL DE");
  lcd_gotoxy(5,2);
  printf(lcd_putc,"TEMPERATURA");
  delay_ms(500);
  lcd_putc("\f");
  while(true)
  {
    set_adc_channel(0);
    delay_us(20);
    temperatura=(float)read_adc()/2; // grados centígrados
    lcd_gotoxy(3,1);
    printf(lcd_putc,"TEMPERATURA:");
    lcd_gotoxy(5,2);
    printf(lcd_putc,"%f",temperatura);
    lcd_gotoxy(11,2);
    printf(lcd_putc,"°C");
  }
}
```