

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES
FACULTAD DE TECNOLOGIA
CARRERA DE ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES



**“CALENTADOR DE INDUCCIÓN CONTROLADO BAJO
UN SISTEMA DE CONTROL ELECTRÓNICO EN BASE A
TIEMPO Y TEMPERATURA”**

**Trabajo de aplicación – Examen de Grado presentado para obtener el Grado de
Licenciatura**

POR: HERNÁN MAMANI HUANCA

LA PAZ - BOLIVIA

2019

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo a mis padres Cecilio Mamani Laura y Trinidad Huanca, a mi hermana María L. Mamani, como también mi esposa Prof. Julia Margarita Laruta Cabrera, de quienes siempre tuve el apoyo incondicional para realizar mis estudios y formarme como profesional.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar agradezco a Dios y luego a todos los docentes de la Carrera de Electrónica y Telecomunicaciones (U.M.S.A.), quienes me apoyaron y brindaron sus conocimientos desprendidamente, al igual que a mis compañeros, con quienes estudiamos y nos colaboramos, para nuestra formación profesional.

RESUMEN

El siguiente proyecto de aplicación, Calentador de Inducción Controlado Bajo un Sistema de Control Electrónico en Base a Tiempo y Temperatura, está basado en base al circuito resonante de baja frecuencia LF, una bobina inductora, el cual siguiendo una secuencia lógica y didáctica de cada uno de los temas tratados, tomando modelos matemáticos y utilizando en algunos, con el objeto de demostrar los efectos de la inducción electromagnética en los metales y el calentamiento de estos por el efecto de la corriente.

El circuito tanque LC, de baja frecuencia, es un generador de corriente que va ha inducir, sobre el material con grado alto de permeabilidad magnética (metal), debido al efecto piel propio de la frecuencia radiada.

La bobina inductora, es un conductor, en forma de espiras que incide una corriente en la carga o material a ser tratado.

El sistema cuenta con un control de temperatura y tiempo de tal forma que protege al circuito, para este fin se utiliza la placa Arduino por su entorno amigable y practico.

Para que exista resonancia se utiliza como dispositivo principal y activo el transistor MOSFET, ya que este por sus propiedades detalladas en los capítulos posteriores brinda mejores condiciones para este tipo de funcionalidades, como ser alto grado en manejo de corriente, buena estabilidad.

Por otro lado se menciona como recomendación que el suministro de energía para este tipo de circuitos es elevado, llegando a superar fácilmente los 10 Amperios de consumo.

Finalmente se recalca que el presente proyecto es un prototipo, porque los rangos de potencia son menores a los ofrecidos en el mercado comercial.

ÍNDICE

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	ii
RERUMEN	iii

CAPITULO I

1.1. INTRODUCCION.....	1
1.2. ANTECEDENTES	2
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.4. OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	4
1.4.1. OBJETIVO GENERAL.....	4
1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
1.5. JUSTIFICACIÓN	5
1.5.1. TECNOLÓGICA.....	5
1.5.2. ECONÓMICA.....	5
1.5.3. ACADÉMCA.....	6
1.5.4. SOCIAL.....	6
1.6. DELIMITACIÓN	7
1.6.1. ESPACIAL.....	7
1.6.2. TEMPORAL.....	7
1.6.3. SEMÁNTICA.....	7
1.7. METODOLOGÍA	9

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO.....	10
2.1. INTRODUCCIÓN	10
2.2. CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA.....	11
2.3. TANQUE RESONANTES.....	11
2.4. EFECTO PIEL	13
2.5. EL ARDUINO (PLACA DE DESARROLLO CON MICROCONTROLADOR)..	15
2.6. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE ARDUINO UNO R3.....	16
2.7. TIPOS DE PLACAS ARDUINO.....	17
2.8. SENSORES DE TEMPERATURA.....	18

2.8.1. SENSOR ECT (ENGINE COOLANT TEMPERATURE SENSOR).....	18
2.9. EL TRANSISTOR MOSFET.....	19
2.10. MOSFET DE ENRIQUECIMIENTO DE CANAL N.....	20
2.11. REGIONES DE OPERACIÓN.....	24
2.11.1. REGIÓN DE CORTE.....	24
2.11.2. REGIÓN ÓHMICA.....	25
2.11.3. REGIÓN DE SATURACIÓN.....	25
2.11.4. REGIÓN DE RUPTURA.....	26

CAPITULO III

INGENIERIA DE PROYECTO.....	27
3.1. INTRODUCCION.....	27
3.2. PARTES DEL SISTEMA DEL CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN.....	27
3.3. PRINCIPIO DE CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN SOBRE LA PIEZA...	28
3.4. CONSTRUCCIÓN DE LA BOBINA DE TRABAJO.....	30
3.5. EL BANCO DE CONDENSADORES.....	31
3.6. CIRCUITO GENERADOR (INVERSOR).....	33
3.7. ETAPA ALIMENTACION VDC.....	36
3.8. DISEÑO DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN.....	37
3.8.1. EL TRANSFORMADOR REDUCTOR.....	37
3.8.2. CÁLCULO DE LOS DIODOS RECTIFICADORES.....	41
3.8.3. CALCULO DEL CONDENSADOR.....	41
3.9. ETAPA DE CONTROL.....	43
3.10. SISTEMA DE REFRIGERACIÓN.....	47
3.11. NIVEL DE TENSIÓN Y CORRIENTE DE LOS INTERRUPTORES.....	48
3.12. CIRCUTO DEL CALENTADOR INDUCTIVO.....	49

CAPITULO IV

ANALISIS DE COSTOS.....	55
4.1. COSOS FIJOS.....	55
4.2. COSTOS VARIABLE.....	57

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	58
-------------------------------------	----

4.1. CONCLUSIONES.....	58
4.2. RECOMENDACIONES.....	58
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60
ANEXOS.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Inducción de corriente en un material conductor de electricidad.....	11
Figura 2.2. Bobina del calentador.....	12
Figura 2.3. Diagrama de bloques del convertidor electrónico.....	14
Figura 2.4. Diagrama de bloques de los elementos del Hardware de un Arduino UNO.....	15
Figura 2.5. Tipos de Placa Arduino.....	17
Figura 2.6. Sensor ECT.....	18
Figura 2.7. Estructura MOSFET de canal N.....	20
Figura 2.8. Transistor MOSFET de canal N en conducción	21
Figura 2.9. Símbolo del MOSFET a)Canal N b)Canal P c)Forma física.....	22
Figura 2.10. MOSFET de canal N polarizado.....	22
Figura 2.11. Zonas de trabajo del MOSFET de canal N.....	24
Figura 3.1. Diagrama de bloques del calentador de inducción.....	28
Figura 3.2. Acción de corriente electromagnética generada por la bobina a la pieza metálica.....	29
Figura 3.3. Efecto cortical a consecuencia de: a)frecuencia alta b)frecuencia baja.....	30
Figura 3.4. Cálculos de la bobina.....	30
Figura 3.5. Equivalencia de la bobina de inducción.....	31
Figura 3.6. Equivalencia del condensador en paralelo.....	32
Figura 3.7. Circuito inversor de potencia con transistores MOSFET.....	33
Figura 3.8. Características del MOSFET IRFP250.....	34
Figura 3.9. Región de trabajo del MOSFET.....	35
Figura 3.10. Sección del núcleo del transformador.....	38
Figura 3.11. Rectificador puente.....	41
Figura 3.12. Fuente de alimentación.....	42
Figura 3.13. Batería de automóvil de 50 a 70 amperios.....	43
Figura 3.14. Conexión del termistor y Arduino en la entrada analógica.....	44
Figura 3.15. Bomba de agua.....	48
Figura 3.16. Circuito de control de bomba.....	48

Figura 3.17. Circuito calentador inductivo.....	49
Figura 3.18. Diseño de la placa impresa del circuito inductor.....	50
Figura 3.19. Posición de los dispositivo electrónicos en la placa.....	50
Figura 3.20. Placa del circuito final de la bobina de inducción.....	51
Figura 3.21. Circuito de control para el encendido y apagado del calentador inductivo.....	52
Figura 3.22. Circuito prototipo final del calentador inductivo, vista superior.....	53
Figura 3.23. Circuito prototipo final del calentador inductivo, vista frontal.....	54
Figura 4.1. Calentador inductivo 15 kW.....	55
Figura 4.2. Calentador inductivo 30 kW.....	55
Figura 4.3. Calentador inductivo 10 kW.....	55
Figura 4.4. Calentador inductivo 1 kW.....	55
Figura 4.6. Calentador inductivo de 100 w.....	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Conceptos Semánticos.....	8
Tabla 2.1. Propiedades de los dispositivos de conmutación.....	19
Tabla 3.1. AWG de conductores.....	40
Tabla 4.1. Costo del proyecto.....	57

CAPITULO I

1.1. INTRODUCCIÓN

Al iniciar con el presente proyecto de aplicación se analizó las diferentes problemáticas, en microempresas formales e informales, que se dedican al ámbito del trabajo con metales (hierro), con temperatura, realizando de esta forma, trabajos de diferente índole.

Por esta razón se analiza los antecedentes, en el cual se señala la demanda del producto y las dificultades que conlleva el comprar ciertos equipos, así también se hace el planteamiento de problema y los objetivos que pretende alcanzar el proyecto aplicativo. Dando los lineamientos del mismo, para justificar en los diferentes ámbitos de análisis, delimitando la operabilidad del proyecto, en base las pruebas realizadas, utilizando metodologías, que contribuyeron para la implementación del proyecto.

Es importante notar que los datos fueron realizados haciendo una encuesta reducida pero verídica, como ser el trabajo actual en las microempresas informales, precios de productos en el mercado internacional, de determinados equipos, recabados de anuncios publicitarios de oferta.

Todo ello se analiza y se menciona en los siguientes párrafos, del presente informe.

1.2. ANTECEDENTES

La demanda en las diferentes áreas relacionadas con el manejo de diferentes metales, como ser la herrería y diseño de artesanías metálicas, hacen que se tenga necesidad de calentadores y hornos de fundición para el trabajo del producto final que se va realizando cotidianamente, en las microempresas formales e informales.

Para este fin en su mayoría y comúnmente se utiliza hornos a combustión, que tienen un costo adicional elevado, aparte de que se vuelve en un peligro, ya que podría tener tendencias explosivas si no se tiene la seguridad industrial necesaria. Este hecho de efecto adicional hace que el producto final, tenga que tener, costos económicos elevados, en algunos casos inaccesibles para el usuario o cliente final.

En el mercado internacional existe los llamados Calentadores de Inducción que dependiendo a la potencia de trabajo hacen costoso la importación del mismo ya se tiene precios de 500 \$us para un equipo de 10kW y a 8000 \$us para un equipo de 35kW de potencia, esto hace inviable, para las microempresas de escasos recursos. Por ello la mayoría no optan por estas propuestas, y la competencia en el mercado hace que se tenga que realizar de la forma tradicional para realizar los trabajos solicitados por los clientes.

En este sentido lo que se pretende es realizar un sistema que sea viable tanto económicamente como práctica, adaptable a los entornos socioeconómicos y físicos de la sociedad, de tal forma que la microempresa sea capaz de producir y agilizar los trabajos con un sistema de control eléctrico y electrónico práctico y sencillo, y no se tenga que hacer ninguna adaptación adicional, para el entorno, ya que esto implicaría otro costo y tiempo.

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Inicialmente, se menciona que en las microempresas de la ciudad de La Paz, los trabajos de herrería y pequeñas artesanías de material fundido como el plomo o estaño, es de manera tradicional, en hornos de combustión, peligrosos y caros, el cual involucra costo adicional, al producto final que se ofrece.

Un horno de combustión generalmente está conformado de una serie de elementos de fundición, como ser carbón, soplete de combustión, el horno mismo, y lo más importante el combustible, que para fines artesanales es, un botellón de gas licuado de petróleo (GLP).

Cabe destacar que para los trabajos se necesita dos botellones, cuando se trata de un día entero de trabajo, donde uno está sometido a la exposición involuntaria de calor, en el momento del trabajo.

La incomodidad, para realizar este tipo de trabajos es compleja ya que comprende ciertas dificultades que a la larga se convierten en desgaste físico y baja remuneración en algunos aspectos, es así que se menciona estos inconvenientes:

- Inicialmente son enfermedades del trabajo, para los trabajadores, como ser exposición en periodos largos de tiempo al calor.
- Se consume tiempo y material, en el momento de tratar de calentar o fundir un material que bien puede ser aprovechado para otros trabajos cotidianos.

Aproximadamente según los estudios realizados, una pieza de herrería toma media hora (una punta de cincel), hasta 3 horas cuando se trata de materiales con ciertas características especiales.

La falta de combustible para que el horno mantenga el calor necesario, retrasa los trabajos, solicitados por los clientes.

Los problemas descritos, son una realidad para todo el contexto de las microempresas dedicadas a este rubro.

La no atención a este problema, conlleva a la baja en la producción de la demanda requerida en el mercado, y por ende, no existe movimiento económico el cual constantemente “empobrece a las microempresas”.

Por las razones mencionadas es imprescindible ejecutar un proyecto que dé solución a estos problemas, y de esta manera pueda llevarse un mejoramiento y apoyo, dando mejores condiciones de trabajo, y mayor rendimiento en la producción.

1.4. OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar un calentador por inducción electromagnética, aplicando bajas frecuencias y tratamientos térmicos de los metales de reacción térmica baja, utilizando conocimientos adquiridos en áreas como, campos electromagnéticos, circuitos eléctricos, para aplicaciones de herrería y artesanías que trabajan con metales.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Calentar un material ferromagnético a alta temperatura mediante la inducción electromagnética a baja frecuencias (LF).
- Definir el procedimiento a seguir en la construcción de un calentador inductivo a nivel didáctico, tanto en la parte potencia y la de control.
- Construir un circuito oscilador LC como parte integral y fundamental de un calentador por inducción.

1.5. JUSTIFICACIÓN

1.5.1. TECNOLÓGICA

Con relación al hardware, la implementación del circuito electrónico inductivo llega a ser sencillo y fácil de elaborar, práctico, portable en algunos, el cual ocupe poco espacio físico.

Otro aspecto que vale destacar es, a la parte lógica de control del sistema, en el que se emplea, elementos y dispositivos comerciales, (fácil acceso), costos económicos para implementación en el diseño del sistema.

Cabe resaltar que las características de potencia, en el consumo de energía, no llegan a ser excesivas, por lo que el único elemento, capaz de consumir energía a potencia relativamente moderada es el circuito oscilador, que de igual forma gracias al diseño del circuito, con los elementos adecuados reducen este efecto.

En relación al mando de control que cuenta para el operador, es de relativa sencillez, de carácter intuitivo, con señalizadores claramente identificados.

Contará con sistemas de protección, ante excesivas subidas de temperatura, y si por alguna razón existiera alguna falla que haya sido provocado, involuntariamente por mala maniobra o subidas y bajadas intempestivas de corriente, los dispositivos del mismo son de fácil recambio y muy comerciales, no teniendo que esperar importación de algún elemento o dispositivo electrónico..

1.5.2. ECONÓMICA

El presente proyecto pretende reducir costos operacionales el cual beneficiara grandemente a las microempresas dedicadas al rubro de herrería y artesanías que operan con material metálico de reacción térmica no muy elevadas.

Además se reducirá enormemente los costos en tiempo que se emplea en la actividad de calentado del metal con relación a lo que se realiza en la actualidad, de forma manual, en hornos costosos y de combustión, esto hará que se reduzca costos en otros aditamentos que actualmente se realizan, como ser constante consumo de gas, espacio físico de los hornos, etc., que muy bien puede ser aprovechando en otra actividad.

1.5.3. ACADÉMICO

El presente proyecto es una recopilación de máquinas industriales existentes en el mercado exterior, pero poniendo en práctica todos los conocimientos adquiridos en el proceso de la formación profesional de rama, se ha podido realizar un modelo didáctico (Prototipo), es así que se pone en práctica los conocimientos, con relación al hardware, como ser manejo de ciertos dispositivos eléctricos y electrónicos, que se tuvieron en el proceso de aprendizaje.

Con ello se fomenta a la creatividad, emprendimiento, para la nueva generación de ideas socio productivas, que se integran a la sociedad, dando una ayuda y contribución a la sociedad a través de los conocimientos adquiridos en la carrera y avance tecnológico.

1.5.4. SOCIAL

Como punto final podemos mencionas que este proyecto puede llegar a ser de gran impacto social, referente a las microempresas que se dedican y trabajan con hornos de fundición, ya que en el país aún no se ha llegado a conocer, y si lo existe llega a ser muy costoso.

Este desarrollo puede llegar a alcanzar, grandes expectativas por su costo, en el mercado nacional, alivianando costos económicos.

1.6. DELIMITACION

1.6.1. ESPACIAL

El presente proyecto de aplicación pretende llegar a aquellas microempresas a nivel local, aun no pudiendo extenderse o adaptarse a otras regiones del país debido a que el estudio realizado fue en tiempo corto por lo que arrojaría datos erróneos para la toma de decisiones, como ser la obtención de muestras estadísticas, de la cantidad de microempresas que necesitan este tipo de equipos, lo que imposibilitaría la adaptación a otras entidades o entornos que si bien podrían ser similares no llegarán a ser iguales y estas diferencias son impedimentos grandes.

1.6.2. TEMPORAL

Según el análisis realizado en el campo se deduce, que el diseño, la cotización de costos para presupuestos en su implementación a diseño final llegaría a ser de aproximadamente de 2 meses con pruebas de funcionamiento.

Cabe resaltar que el tiempo estimado de acabado, está sujeto a diversos factores como ser, la adquisición de dispositivos electrónicos, diseño de la placa impresa y otros pero que a medida que se implemente más de estos equipos, el tiempo llegaría a reducirse, pero se recomienda que como mínimo de un mes y medio.

1.6.3. SEMANTICA

En el presente proyecto de aplicación se pretende aclarar los conceptos señalados para una buena interpretación de presente trabajo.

Inducción	Es el fenómeno que origina la producción de fuerzas electromotrices, en un medio o cuerpo expuesto. Variación de líneas de campo que atraviesan una superficie mediante un giro.
Calentador	Dispositivo termodinámico que utiliza energía para elevar la temperatura de una determinada materia.
Térmico	Estudio de los cambios físicos y químicos de un material o mineral durante su calentamiento
Frecuencias bajas	Son oscilaciones de energía en un tiempo que esta comprendida entre 30 kHz a 300kHz
Electromagnetismo	Estudio de las relaciones entre la electricidad y el magnetismo, que crea corrientes eléctricas.
Optimizador de tiempo	Utilizar el tiempo de una manera adecuada para realizar una determinada labor o funcionamiento del circuito.
Control Electrónico	Circuito con dispositivos eléctricos o electrónicos que realizan el mando y una determinada operación o función.
Sistema	Conjunto ordenado de normas y procedimientos que regulan el funcionamiento de un conjunto o grupo, para un determinado fin.

Tabla 1.1. Conceptos semánticos

Con lo mencionado se establece que el presente proyecto de aplicación no está diseñado para fundir metales ya que se requiere un diseño y análisis más profundo de los dispositivos, como los elementos oscilantes, ya porque este proyecto es de carácter didáctico (Prototipo) pero funcional para algunas aplicaciones y que a través de ello se tenga una visión de desarrollo tecnológico.

1.7. METODOLOGÍA

En el proyecto de aplicación se utiliza la metodología explicativo-experimental, ya que se pretende justificar ciertos fenómenos físicos que intervienen en el proyecto, orientándonos a la comprobación del fenómeno, bajo estudios ya realizados con anterioridad. Experimentando posteriormente las teorías analizadas, realizando pruebas, así para poder identificar la base del experimento.

Por ello se pretende fundamentalmente, en caracterizar un fenómeno o situación concreta indicando sus rasgos más peculiares o diferenciadores.

Respondiendo a las siguientes cuestiones:

- **¿Qué es?**
- **¿Cómo es?**

los cuales darán respuestas orientando al proyecto, a una comprensión de lo que se pretende, al realizar el estudio del mismo.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. INTRODUCCIÓN

Un método ampliamente utilizado en la industria, cuando se requiere el calentamiento o fundición de metales, es el calentamiento por inducción electromagnética. Este proceso se puede está demostrado mediando la utilización de las leyes de Faraday, Ampere y la aplicación del efecto Joule.

Para aumentar la temperatura del metal que se desea fundir o calentar se requiere someter la muestra a un campo magnético variable en el tiempo, y de amplitud considerable. Bajo las condiciones, en el interior de la muestra de inducen corrientes que producen disipación de potencia, la cual se manifiesta con un incremento en la temperatura, pudiendo llegar al valor correspondiente que permita la fundición.

Los fenómenos electromagnéticos siempre ha contribuido con buenas utilidades en el campo de la industria, esto ha hecho posible diseñar muchos equipos, entre ellos está, el calentador inductivo.

Este equipo, (el calentamiento por inducción electromagnética), es un método que se ha utilizado de manera exclusiva en aplicaciones industriales tales como fundición, y tratamiento térmico; en la actualidad también es utilizado en la cocción de alimentos. Es una tecnología que no se desarrolla en Bolivia, por lo que se tiene que importar de países desarrollados como Estados Unidos, España y Japón, etc. Entre las marcas líderes del mercado se encuentran: InductoHeat y GH. Dicha situación también provoca que el costo de un equipo de calentamiento y su mantenimiento sea elevado, al igual que la importación.

Con este tipo de equipos, se realiza la mejor manera de montar dispositivos o elementos metálicos y la mayor ventaja con respecto a otros métodos de

calentamiento, es que el calentador no daña a la pieza, dándole un mayor rendimiento.

2.2. CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

El calentamiento por inducción es un método que utiliza un campo magnético variante con el tiempo para inducir corrientes eléctricas, llamadas **corrientes de remolino**, las cuales disipan energía y producen calor al fluir a través de la resistencia de un material conductor de electricidad,

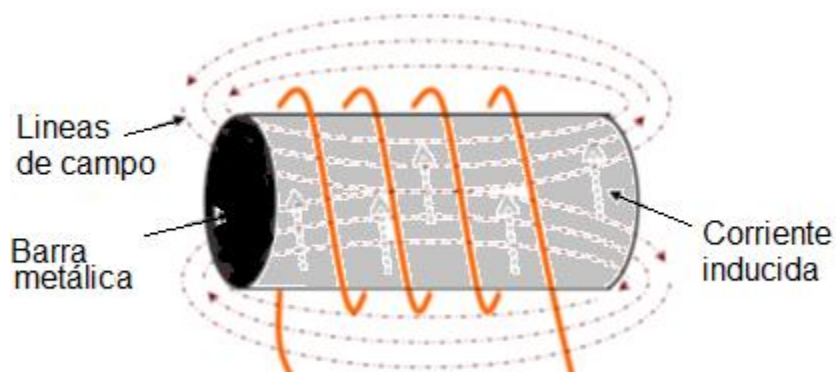


Figura 2.1. Inducción de corriente en un material conductor de electricidad.

Fuente: [Pistas Educativas, México, Instituto Tecnológico de Celaya]

El nivel de penetración del campo magnético en la pieza está en función de su frecuencia y las propiedades del material. Un material con propiedades ferromagnéticas tiene una permeabilidad magnética muy alta, provocando que el campo magnético se intensifique dentro del material y por consiguiente la corriente inducida es mayor, de tal forma que la potencia disipada en la superficie de la pieza es muy grande. En frecuencias altas se induce un nivel de corriente mucho mayor en la superficie de la pieza que cuando se trabaja con niveles de frecuencia bajos.

2.3. TANQUES RESONANTES

El campo magnético debe ser lo suficientemente intenso para inducir el nivel de corriente que pueda elevar la temperatura de un material ferromagnético en un

tiempo muy corto. Se necesita un campo con más potencia cuando se trabaja con materiales que no poseen propiedades ferromagnéticas.

La construcción de la bobina de calentamiento determina el nivel de corriente que se le debe suministrar. Suponiendo que se necesita una intensidad de campo “H” y la bobina (tipo solenoide) consta de pocas espiras, entonces el nivel de corriente debe ser muy grande para obtener la intensidad del campo magnético “H1”, según la relación para un solenoide.

$$H = \frac{N * I}{L}$$

Ecuación 2.1.

En donde:

H : Intensidad de campo magnético;

N : Número de espiras;

I : Corriente que circula a través de la bobina.

L : Longitud del solenoide

Por el contrario, si se requiere la misma intensidad de campo “H” y el número de espiras es grande, se debe amplificar el voltaje para que circule un nivel de corriente bajo y evitar grandes pérdidas por conducción ya que la resistencia de la bobina se ha incrementado.

Normalmente, los niveles de corriente o voltaje que se aplican a la bobina sobrepasan la capacidad que puede suministrar un convertidor convencional debido a que demandan una gran cantidad de potencia reactiva. Para evitar estos problemas, se suele utilizar tanques resonantes, en donde, al sintonizarlo en su frecuencia de resonancia se amplifica de forma natural el voltaje o la corriente.

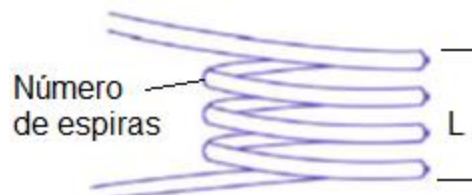


Figura 2.2. Bobina del calentador

Fuente: [Pistas Educativas, México, Instituto Tecnológico de Celaya]

Las configuraciones de tanques resonantes se pueden clasificar según el número de elementos reactivos, de aquí que podemos encontrar tanques de dos, tres o de más de tres elementos reactivos.

Los tanques de más de dos elementos surgen de la necesidad de una mayor amplificación en las variables, un mejor acoplamiento de impedancia o de que una variable se componga de múltiples frecuencias a fin de proporcionar diversos niveles de profundidad de penetración para realizar algún tratamiento térmico en un sólo paso.

Un tanque resonante puede ser alimentado en voltaje o en corriente, los tanques de dos elementos reactivos conectados en paralelo deben alimentarse en corriente, teniendo en cuenta que un capacitor se considera una fuente de voltaje; una configuración serie se alimenta por voltaje puesto que el inductor se considera una fuente de corriente.

2.4. EFECTO PIEL

El efecto piel representa la disminución de la densidad de corriente desde el contorno hacia el centro del conducto por el cual circula una corriente alterna.

Una propiedad importante en el calentamiento inductivo es que la distribución de las corrientes inducidas en el interior de la pieza no ocurre de forma uniforme. Este efecto es conocido como efecto piel y depende fundamentalmente de la frecuencia de operación, de la forma y del tipo de material a ser calentado. Este fenómeno puede ser entendido utilizándose el principio de la inducción electromagnética. La corriente inducida en la pieza siempre genera un campo magnético que se opone al campo magnético que lo creó. Se puede dividir la pieza en conjuntos imaginarios, donde la corriente inducida en los conjuntos más externos de la pieza, tiende a reducir el campo magnético de inducción de los conjuntos más

internos de la pieza resultando una densidad de corriente mayor en la superficie, reduciéndose en dirección al centro de forma exponencial.

El sistema de calentamiento se basa en un tanque resonante tipo LC cuya frecuencia de resonancia se encuentre entre 80 kHz – 90 kHz y demanda una potencia de 500 watts, alimentándose desde la red eléctrica con un voltaje pico de 170 volts. El sistema debe de alcanzar temperaturas de hasta 600 °C en materiales de acero al carbón.

Estos sistemas están conformados por un convertidor electrónico que alimenta a la bobina de calentamiento; para medir la temperatura por lo general se utiliza un termopar tipo K, la señal que proporciona se filtra y acondiciona para ser transmitida a la tarjeta de adquisición de datos y en la interfaz gráfica de usuario se monitorea la evolución de la temperatura, tal como se muestra en figura 2.3.

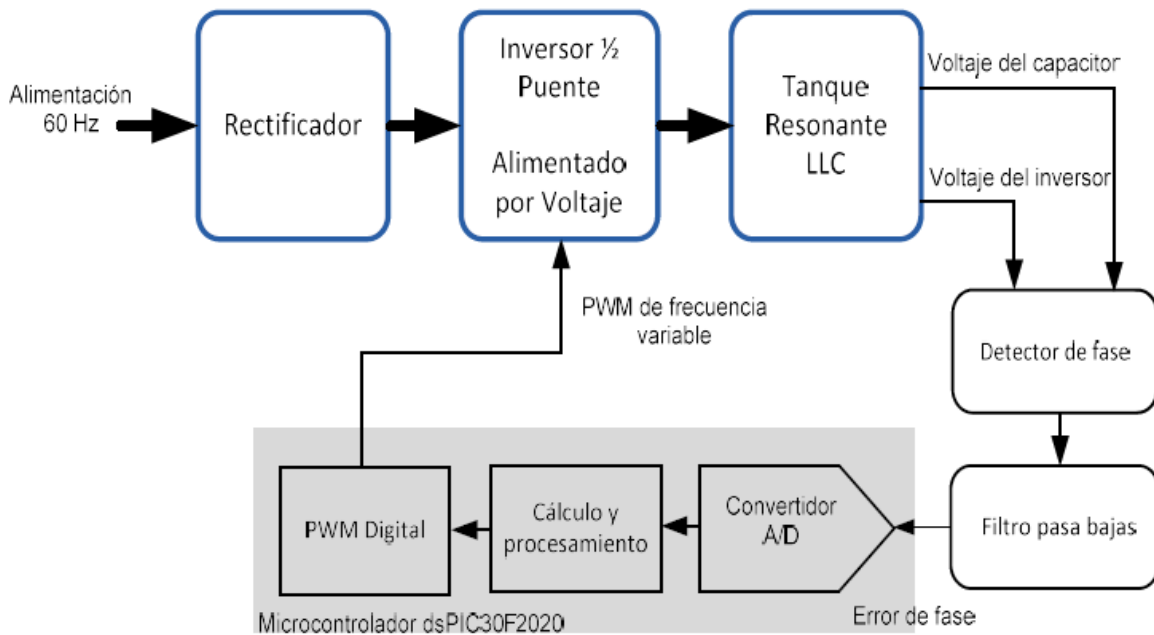


Figura 2.3. Diagrama a bloques del convertidor electrónico

Fuente: [Pistas Educativas, México, Instituto Tecnológico de Celaya]

2.5. EL ARDUINO (PLACA DE DESARROLLO CON MICROCONTROLADOR)

Arduino es una plataforma de creación de electrónica de código abierto, la cual está basada en hardware y software libre, flexible y fácil de utilizar para los creadores y desarrolladores. Esta plataforma permite crear diferentes tipos de microordenadores de una sola placa a los que la comunidad de creadores puede darles diferentes tipos de uso.

Por otro lado el software libre son los programas informáticos cuyo código es accesible por cualquiera para que otro si desea pueda utilizarlo y modificarlo.

Arduino ofrece la plataforma Arduino IDE (Entorno de Desarrollo Integrado), que es un entorno de programación con el que cualquiera puede crear aplicaciones para las placas Arduino, de manera que se les puede dar todo tipo de utilidades.

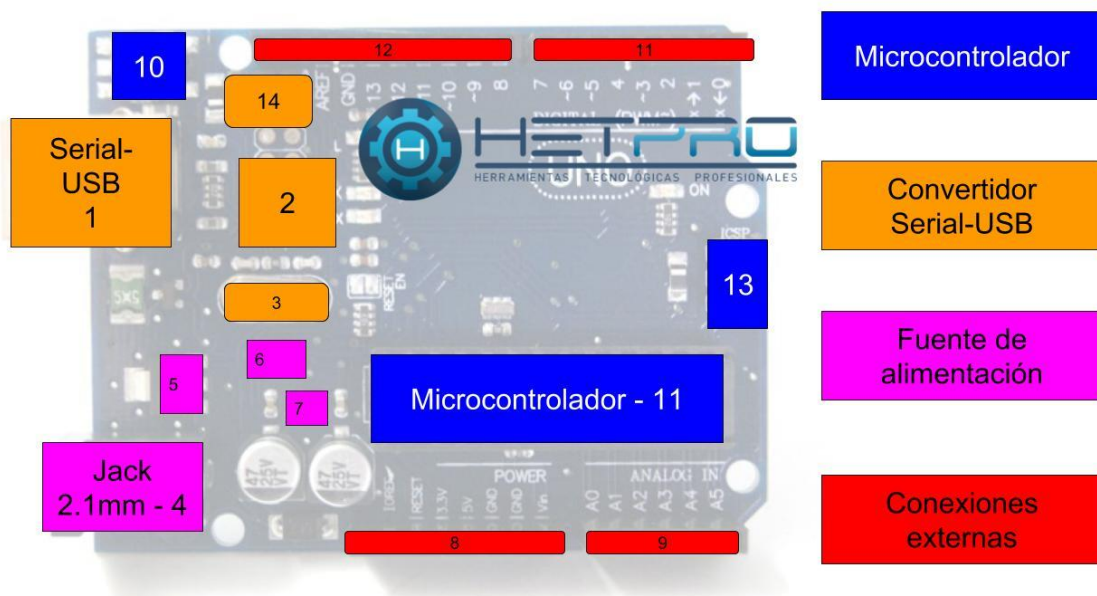


Figura 2.4. Diagrama de bloques de los elementos del Hardware de un Arduino UNO

Fuente: [<https://hetpro-store.com/que-es-arduino/>]

El Arduino es una placa basada en un microcontrolador ATMEL. Los microcontroladores son circuitos integrados en los que se pueden grabar instrucciones, las cuales pueden ser escritas con el lenguaje de programación utilizando el entorno Arduino IDE. Estas instrucciones permiten crear programas que interactúan con los circuitos de la placa.

El microcontrolador de Arduino posee lo que se llama una **interfaz de entrada**, que es una conexión en la que podemos conectar en la placa diferentes tipos de periféricos. La información de estos periféricos que conecta se trasladará al microcontrolador, el cual se encargará de procesar los datos que le lleguen a través de ellos.

También cuenta con una **interfaz de salida**, que es la que se encarga de llevar la información que se ha procesado en el Arduino a otros periféricos. Estos periféricos pueden ser pantallas o altavoces en los que reproducir los datos procesados, pero también pueden ser otras placas o controladores.

Por la gran flexibilidad que ofrece esta placa desarrollo, y su amigable plataforma de programación aptos para realizar los programas, que permitan el control del calentador inductivo mediante sensores insertos en el sistema.

2.6. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE ARDUINO UNO R3

- Microcontrolador: ATmega328
- Voltage: 5V
- Voltage entrada (recomendado): 7-12V
- Voltage entrada (limites): 6-20V
- Digital I/O Pins: 14 (de los cuales 6 son salida PWM)
- Entradas Analógicas: 6
- DC Current per I/O Pin: 40 mA
- DC Current parar 3.3V Pin: 50 mA

- Flash Memory: 32 KB (ATmega328) de los cuales 0.5 KB son utilizados para el arranque
- SRAM: 2 KB (ATmega328)
- EEPROM: 1 KB (ATmega328)
- Clock Speed: 16 MHz

2.7. TIPOS DE PLACAS ARDUINO



Figura 2.4. Tipos de placa Arduino

Fuente: [<https://www.xataka.com/makers/empezar-con-arduino-genuino-como-elegir-la-placa-modelos-compatibles-y-kits-de-iniciacion>]

2.8. SENSORES DE TEMPERATURA

Un sensor de temperatura es aquel elemento que percibe los cambios físicos de temperatura en su entorno, transformándolo en otra magnitud física, como puede ser resistencia o voltaje.

2.8.1. SENSOR ECT (ENGINE COOLANT TEMPERATURE SENSOR)

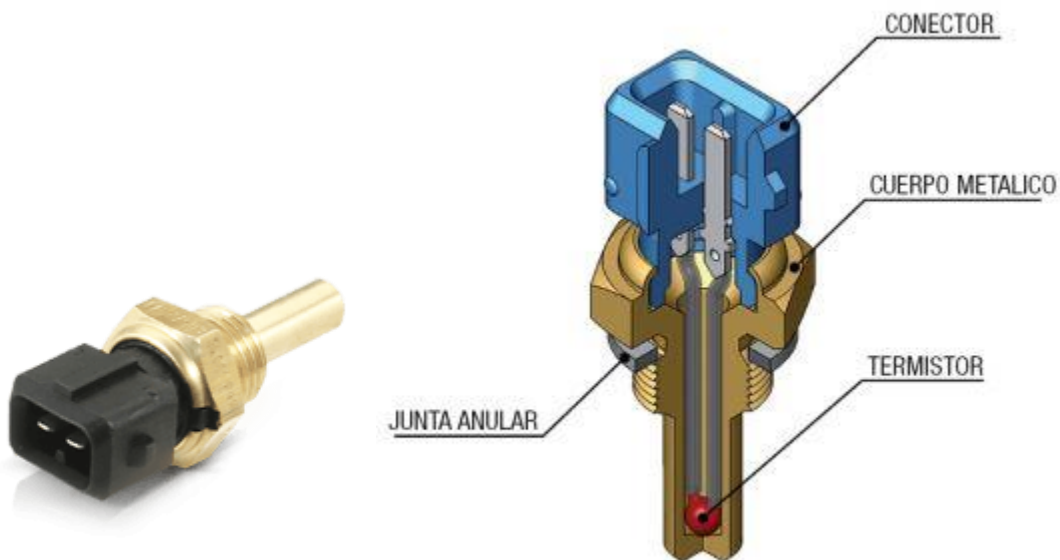


Figura 2.5. Sensor ECT

Fuente: [<http://www.fae.es/es/productos/sensor-temperatura>]

El **sensor ECT (engine coolant temperature sensor)** es un termistor (una resistencia que cambia con respecto a la **temperatura**). Entre más se calienta el **sensor** menor es su resistencia. El **sensor ECT** está generalmente enroscado dentro del bloque del motor, en el múltiple de la toma inferior o en el cabezal del cilindro para proveer un contacto directo con el **refrigerante**.

Por su construcción práctica, se optó por la utilización de este modelo, el costo aproximado es de 14 \$us, aproximadamente.

2.9. EL TRANSISTOR MOSFET

Los transistores MOSFET son transistores en base a semiconductores, que a diferencia de los transistores BJT, soportan una gran cantidad de corriente, y su física de funcionamiento para el flujo de corrientes es distinta al anterior, esto se debe a la construcción y adición de nuevos elementos.

Los MOSFET de potencia son muy populares para aplicaciones de baja tensión, baja potencia y conmutación resistiva en altas frecuencias, como fuentes de alimentación conmutadas, motores sin escobillas y aplicaciones como robótica, CNC y electrodomésticos.

La mayoría de sistemas como lámparas, motores, drivers de estado sólido, electrodomésticos, etc. utilizan dispositivos de control, los cuales controlan el flujo de energía que se transfiere a la carga. Estos dispositivos logran alta eficiencia variando su ciclo de trabajo para regular la tensión de salida. Para realizar la parte de conmutación, existen varios dispositivos semiconductores, a continuación se muestra una tabla con algunos de ellos.

La siguiente es una tabla comparativa de las diversas capacidades entre potencia y velocidad de conmutación de los tipos de dispositivos.

Dispositivo	Capacidad de potencia	Velocidad de conmutación
BJT/MD	Media	Media
MOSFET	Baja	Rápida
GTO	Alta	Lenta
IGBT	Media	Media

Tabla 2.1. Propiedades de los dispositivos de conmutación

2.10. MOSFET DE ENRIQUECIMIENTO DE CANAL N

Bajo el terminal de Puerta existe una capa de óxido (SiO_2) que impide prácticamente el paso de corriente a su través; por lo que, el control de puerta se establece en forma de tensión. La calidad y estabilidad con que es posible fabricar estas finas capas de óxido es la principal causa del éxito alcanzado con este transistor, siendo actualmente el dispositivo más utilizado.

Además, este transistor ocupa un menor volumen que el BJT, lo que permite una mayor densidad de integración. Comencemos con la estructura básica del MOSFET, seguido de sus símbolos.

Se trata de una estructura MOS, de cuatro terminales, en la que el sustrato semiconductor es de tipo p poco dopado. A ambos lados de la interfase *Oxido-Semiconductor* se han practicado difusiones de material n , fuertemente dopado (n^+).

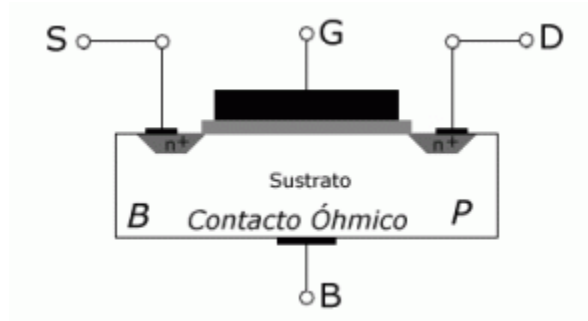


Figura 2.6. Estructura MOSFET de canal N

Fuente: [<https://www.diarioelectronico hoy.com/blog/el-transistor-mosfet>]

Cuando se aplica una tensión positiva al terminal de puerta de un MOSFET de tipo N, se crea un campo eléctrico bajo la capa de óxido que incide perpendicularmente sobre la superficie del semiconductor P. Este campo, atrae a los **electrones** hacia la superficie, bajo la capa de óxido, repeliendo los huecos hacia el sustrato. Si el campo eléctrico es muy intenso se logra crear en dicha superficie una región muy rica en electrones, denominada canal N, que permite el

paso de corriente de la Fuente al Drenador. Cuanto mayor sea la tensión de Puerta (*Gate*) mayor será el campo eléctrico y, por tanto, la carga en el canal. Una vez creado el canal, la corriente se origina, aplicando una tensión positiva en el Drenador (*Drain*) respecto a la tensión de la Fuente (*Source*).

En un MOSFET tipo P, el funcionamiento es a la inversa, ya que los portadores son huecos (cargas de valor positivas, el módulo de la carga del electrón). En este caso, para que exista conducción el campo eléctrico perpendicular a la superficie debe tener sentido opuesto al del MOSFET tipo N, por lo que la tensión aplicada ha de ser negativa. Ahora, los **huecos** son atraídos hacia la superficie bajo la capa de óxido, y los electrones repelidos hacia el sustrato. Si la superficie es muy rica en huecos se forma el canal P. Cuanto más negativa sea la tensión de puerta mayor puede ser la corriente (más huecos en el canal P), corriente que se establece al aplicar al terminal de Drenador una tensión negativa respecto al terminal de Fuente. La corriente tiene sentido opuesto a la de un MOSFET tipo N.

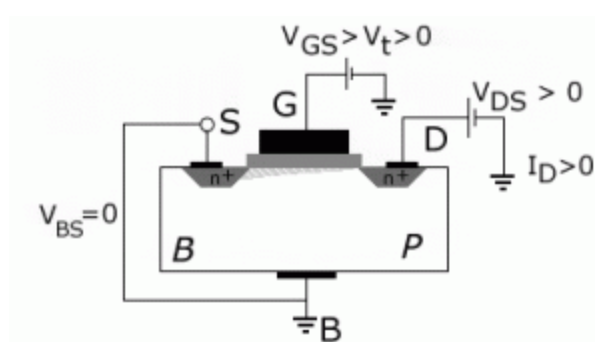


Figura 2.7. Transistor MOSFET de canal N en conducción

Fuente: [<https://www.diarioelectronico hoy.com/blog/el-transistor-mosfet>]

Cuando existe tensión de Puerta a partir de la cual se produce canal, se conoce como tensión umbral, V_T . El terminal de sustrato sirve para controlar la tensión umbral del transistor, y normalmente su tensión es la misma que la de la Fuente.

En el MOSFET tipo N el terminal de mayor tensión actúa de Drenador (recoge los electrones), siendo el de menor tensión en el tipo P (recoge los huecos).

En la figura 2.7, se muestra el funcionamiento de un transistor MOSFET tipo N de enriquecimiento.

El símbolo más utilizado para su representación a nivel de circuito se muestra en la figura siguiente. La flecha entre el terminal de Fuente y Gate, nos informa sobre el sentido de la corriente.

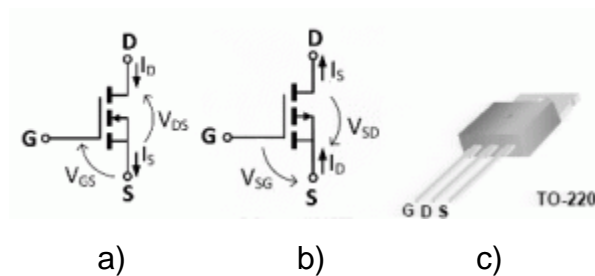


Figura 2.8 Simbolo del MOSFET a) Canal N b) Canal P c) Forma física
Fuente: [<https://www.diarioelectronico hoy.com/blog/el-transistor-mosfet>]

En la estructura MOSFET de la siguiente figura, aparecen diversas fuentes de tensión polarizando los distintos terminales: V_{GS} , V_{DS} . Los terminales de sustrato (B) y Fuente (S) se han conectado a GND. De este modo, $V_{SB}=0$ (tensión Surtidor-sustrato=0), se dice que no existe *efecto sustrato*.

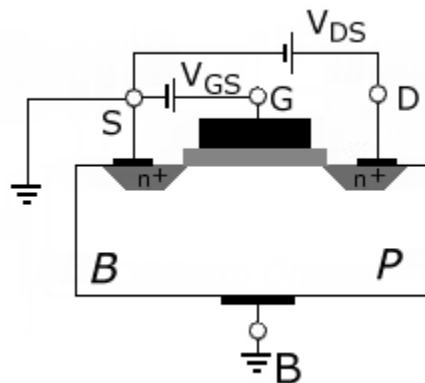


Figura 2.9 MOSFET de canal N polarizado

Fuente: [<https://www.diarioelectronico hoy.com/blog/el-transistor-mosfet>]

Según los valores que tome la tensión V_{GS} , se pueden considerar tres casos:

1) $V_{GS}=0$. Esta condición implica que $V_{GS}=0$, puesto que $V_{SB}=0$. En estas condiciones, no existe efecto campo y no se crea el canal de e^- , debajo de la Puerta. Las dos estructuras PN se encuentran cortadas (B al terminal más negativo) y aisladas. $I_{DS}=0$ aproximadamente, pues se alimenta de las intensidades inversas de saturación.

2) La tensión $V_{GS}>0$, se crea la zona de empobrecimiento o depleción en el canal. Se genera una carga eléctrica negativa e^- en el canal, debido a los iones negativos de la red cristalina (similar al de una unión PN polarizada en la región inversa), dando lugar a la situación de ***inversión débil*** anteriormente citada. La aplicación de un campo eléctrico lateral $V_{DS}>0$, no puede generar corriente eléctrica I_{DS} .

3) La tensión $V_{GS}\gg 0$, da lugar a la inversión del canal y genera una población de e^- libres, debajo del oxido de Puerta y p^+ al fondo del sustrato. Se forma el CANAL N o canal de electrones, entre el Drenador y la Fuente (tipo n^+) que, modifica las características eléctricas originales del sustrato. Estos electrones, son cargas libres, de modo que, en presencia de un campo eléctrico lateral, podrían verse acelerados hacia Drenador o Surtidor. Sin embargo, existe un valor mínimo de V_{GS} para que el número de electrones, sea suficiente para alimentar esa corriente, es V_T , denominada **TENSIÓN UMBRAL** (en algunos tratados se denomina V_{TH}).

Por lo tanto, se pueden diferenciar dos zonas de operación para valores de V_{GS} positivos:

– Si $V_{GS} < V_T$ la intensidad $I_{DS}=0$ (en realidad sólo es aproximadamente cero) y decimos que el transistor opera en ***inversión débil***. En ella, las corrientes son muy pequeñas y su utilización se enmarca en contextos de muy bajo consumo de potencia. Se considerará que la corriente es siempre cero. De otro lado;

– Si $V_{GS} \geq V_T$, entonces I_{DS} es distinto de cero, si V_{DS} es no nulo. Se dice que el transistor opera en **inversión fuente**.

Cuanto mayor sea el valor de V_{GS} , mayor será la concentración de cargas libres en el canal y por tanto, será superior la corriente I_{DS} .

2.11. REGIONES DE OPERACIÓN

Cuando ya existe canal inducido y V_{DS} va aumentando, el canal se contrae en el lado del Drenador, ya que la diferencia de potencial Puerta-canal es en ese punto, más baja y la zona de transición más ancha. Es decir, siempre que exista canal estaremos en **región óhmica** y el dispositivo presentará baja resistencia.

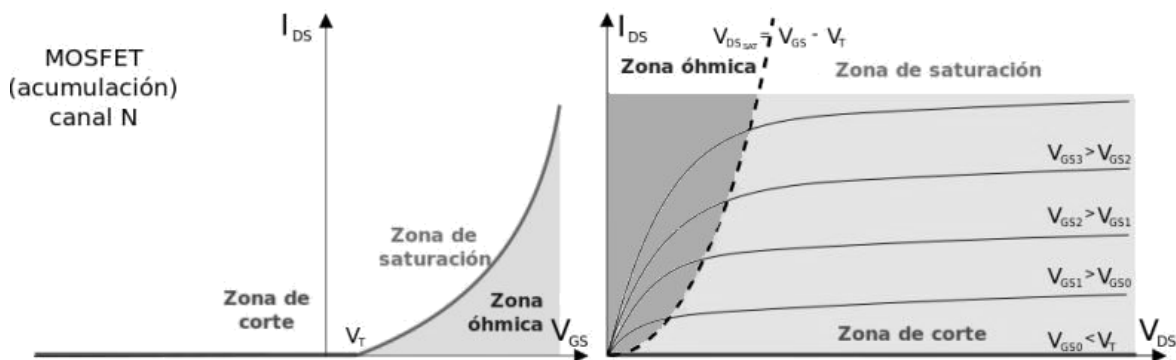


Figura 2.10 Zonas de trabajo del MOSFET de canal N

Fuente: [<https://www.diarioelectronicohoy.com/blog/el-transistor-mosfet>]

La operación de un transistor MOSFET se puede dividir en tres regiones de operación diferentes, dependiendo de las tensiones en sus terminales. Para un transistor MOSFET N de enriquecimiento se tienen las siguientes regiones: **región de corte**, **región óhmica** y **región de saturación**.

2.11.1. REGIÓN DE CORTE

El transistor estará en esta región, cuando $V_{GS} < V_t$. En estas condiciones el transistor MOSFET, equivale eléctricamente a un circuito abierto, entre los

terminales del Drenador-Surtidor. De acuerdo con el modelo básico del transistor, en esta región, el dispositivo se encuentra apagado. No hay conducción entre Drenador y Surtidor, de modo que el MOSFET se comporta como un interruptor abierto.

2.11.2. REGIÓN ÓHMICA

Cuando un MOSFET está polarizado en la *región óhmica*, el valor de $R_{DS(on)}$ viene dado por la expresión:

$$V_{DS(on)} = I_{D(on)} \times R_{DS(on)}$$

Ecuación. 2.2.

En casi todas las hojas de datos, asocian el valor de $R_{DS(on)}$ a una corriente de Drenaje (I_D) específica y el voltaje Puerta-Surtidor.

Por ejemplo, si $V_{DS(on)}=1V$ y $I_{D(on)}=100mA = 0'1 A$; entonces,

$$R_{DS(on)} = \frac{1V}{100mA} = 10 \text{ Ohms}$$

Ecuación 2.3.

Así mismo, el transistor estará en la *región óhmica*, cuando $V_{GS} > V_t$ y $V_{DS} < (V_{GS} - V_t)$.

El MOSFET equivale a una resistencia variable conectada entre el Drenador y Surtidor. El valor de esta resistencia varía dependiendo del valor que tenga la tensión entre la Puerta y el Surtidor (V_{GS}).

2.11.3. REGIÓN DE SATURACIÓN

El transistor MOSFET entra en esta zona de funcionamiento cuando la tensión entre el Drenador y el Surtidor (V_{DS}) supera un valor fijo denominado tensión de saturación ($V_{ds \text{ sat}}$) *Drenador-Surtidor*, este valor viene determinado en las hojas características proporcionadas por el fabricante. En esta zona, el MOSFET

mantiene constante su corriente de Drenador (I_D), independientemente del valor de tensión que haya entre el Drenador y el Surtidor (V_{DS}). Por lo tanto, el transistor equivale a un generador de corriente continua de valor I_D .

Es decir; el MOSFET estará en esta región, cuando $V_{GS} > V_t$ y $V_{DS} > (V_{GS} - V_t)$. O sea, estaremos en la región de saturación cuando el canal se interrumpe o estrangula, lo que sucede cuando:

$$V_{DS} \geq V_{GS} - V_T \rightarrow \text{Región de saturación}$$

Ecuación 2.4.

Cuando la tensión entre Drenador y Fuente supera cierto límite, el canal de conducción, bajo la Puerta sufre un estrangulamiento en las cercanías del Drenador y desaparece. La corriente entre Fuente y Drenador no se interrumpe, es debido al campo eléctrico entre ambos, pero se hace independiente de la diferencia de potencial entre ambos terminales.

2.11.4. REGIÓN DE RUPTURA

Esta zona apenas se utiliza porque el transistor MOSFET pierde sus propiedades semiconductoras y se puede llegar a romper el componente físico. La palabra ruptura hace referencia a que se rompe la unión semiconductor de la parte del terminal del drenador.

CAPITULO III

INGENIERIA DE PROYECTO

3.1. INTRODUCCION

En el desarrollo del proyecto de aplicación Calentador de inducción controlado bajo un sistema electrónico en base a tiempo y temperatura, se emplea el método explicativo-experimental ya que inicialmente se detallara las funcionalidades de cada una de las etapas con las que cuenta el presente proyecto.

Inicialmente se menciona genéricamente el funcionamiento del circuito implementado, bajo un diagrama de bloques, del cual se va detallando, etapa tras etapa, para luego mencionar las pruebas y / o cálculos realizados de algunos dispositivos del circuito, para luego ilustrar con gráficos el resultado final del proyecto.

3.2. PARTES DEL SISTEMA DEL CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN

Un equipo de calentamiento por inducción se compone esencialmente de los siguientes elementos:

1. **Uno o varios inductores de calentamiento.** El inductor es el responsable directo de la generación de los campos magnéticos en las proximidades del material a calentar.

2. **Sistemas de alimentación eléctrica.** Es necesario un generador eléctrico para la alimentación del inductor con la frecuencia y potencia que requiere la aplicación.

3. **Batería de condensadores de compensación.** Se requiere alta corriente para conseguir que el factor de potencia de la carga del sistema de alimentación

eléctrica sea próximo a la unidad cuando está funcionando a la frecuencia de resonancia el calentador.

4. **Equipo de refrigeración.** El inductor y demás componentes (condensador, elementos de potencia, etc.) necesitan disipar grandes potencias. El elemento refrigerante usado suele ser agua en la mayoría de los casos.

5. **Sistema de control de la aplicación.** Comprende la parte de manipulación de la pieza y un control de los parámetros del calentamiento (potencia, tiempo de calentamiento, temperatura, etc.).

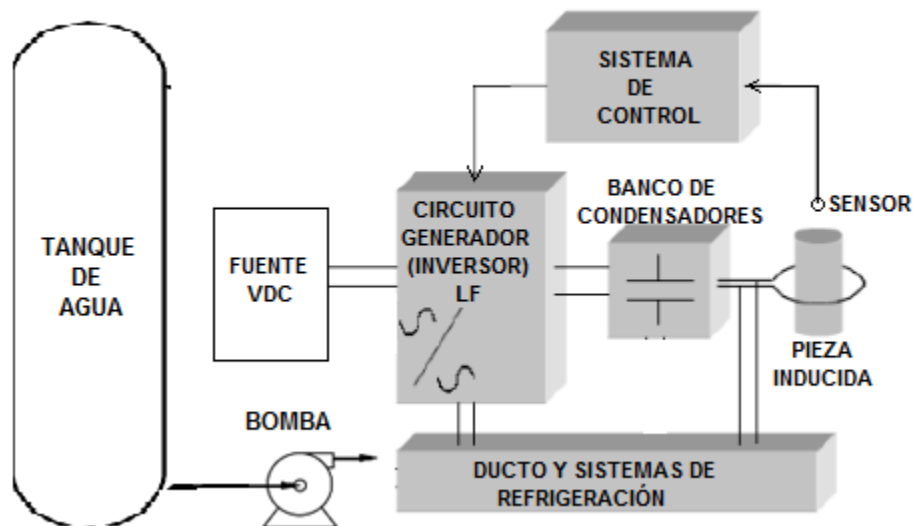


Figura 3.1. Diagrama de bloques del calentador por inducción

Fuente [Elaboracion propia]

3.3. PRINCIPIO DE CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN SOBRE LA PIEZA

Cuando una corriente alterna se aplica al primario de un transformador, se genera un campo electromagnético. Según la Ley de Faraday, si el secundario del transformador se coloca dentro del campo magnético, se induce una corriente eléctrica.

En una configuración básica de calentamiento por inducción, una fuente de alimentación genera una corriente alterna que atraviesa un inductor (normalmente una bobina de cobre) y la pieza a calentar se sitúa dentro de dicho inductor.

El inductor actúa de primario del transformador y la pieza metálica como del circuito secundario. Cuando la pieza metálica es atravesada por el campo magnético, se inducen corrientes de Foucault en dicha pieza, produciendo calor, esto es también porque en el elemento inducido se generan corrientes de remolino, como una especie de vaivén, por la oscilación constante del campo electromagnético.

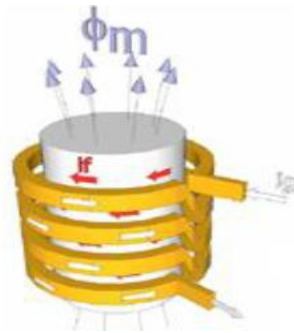


Figura 3.2 Acción de corriente electromagnética generada por la bobina a la pieza metálica.

Fuente: [Pistas educativas, Mexico, Instituto Tecnológico de Celaya, 2015]

Al efecto de que la corriente inducida sea mucho mayor en la superficie que en el interior de la pieza (provocado por la frecuencia y la permeabilidad magnética) se le llama efecto cortical.

Cuando una sección de una pieza está más caliente que otra, el calor comienza a viajar inmediatamente por conducción hacia la parte más fría, causando que con el tiempo la temperatura sea uniforme en la misma.

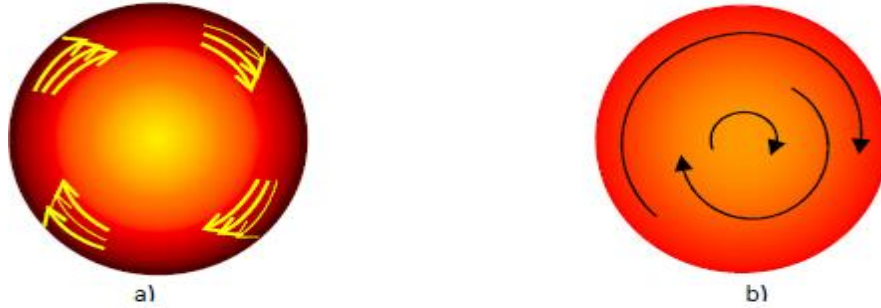


Figura 3.3 Efecto cortical a consecuencia de: a) frecuencia alta, b) frecuencia baja.

Fuente: [Pistas educativas, Mexico, Instituto Tecnológico de Celaya, 2015]

Si se requiere que la superficie de la pieza tenga un nivel de temperatura mucho mayor que en su interior, se requiere mantener elevados los niveles tanto de potencia como de frecuencia; de esta manera, se puede calentar la superficie de la pieza muy rápidamente (por efecto cortical) de tal forma que el calor no tiene suficiente tiempo para viajar muy lejos antes de que la superficie alcance la temperatura deseada.

Por el contrario, para calentar de manera uniforme la sección transversal de la pieza, se utilizan niveles de frecuencia y potencia bajos, con la finalidad de dar suficiente tiempo al calor de viajar al centro antes de que la superficie esté demasiado caliente.

3.4. CONSTRUCCIÓN DE LA BOBINA DE TRABAJO

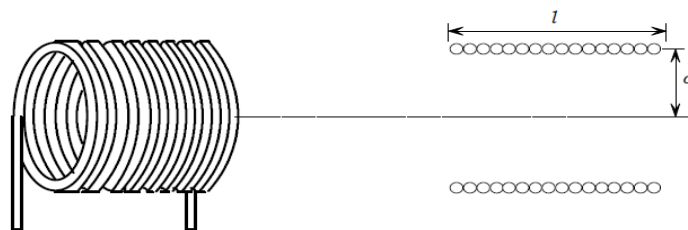


Figura 3.4. Calculo de la bobina

Fuente [Pistas Educativas, México, Instituto Tecnológico de Celaya]

$$L = \frac{0.0395 a^2 N^2}{l} \text{ [uH]}$$

Ecuación 3.1.

a y l en centímetros

$$L = \frac{0,0395 * 1,5^2 * 7^2}{4} = 1,08 \text{ uH}$$

Ecuación 3.2.

Dónde:

L= valor de la bobina en uH

a= radio de la bobina [cm]

N= número de espiras de la bobina de trabajo

l= longitud de la bobina [cm]

3.5. EL BANCO DE CONDENSADORES

El banco de condensadores conjuntamente con la bobina de inducción y la resistencia equivalente, conforman una carga para el circuito y/o etapa inversora. La bobina de calentamiento y la pieza a calentar pueden ser representados por una inductancia y una resistencia en serie, cuyos valores se obtienen estudiando las relaciones electromagnéticas existentes entre estas; este fenómeno electromagnético se asemeja al principio de funcionamiento de un transformador, en donde la bobina de inducción representa el devanado primario y la pieza a calentar el devanado secundario de tal solo una espira, esto debido a la naturaleza conductora de la pieza.

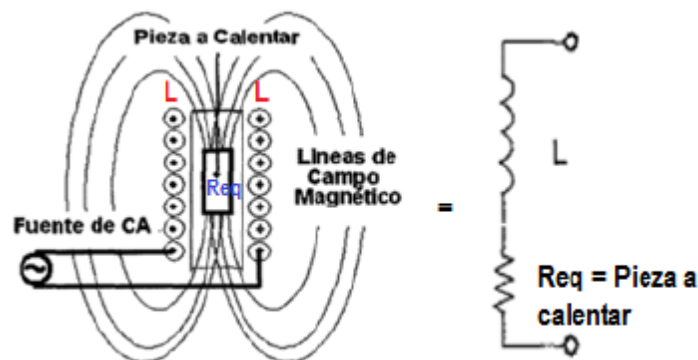


Figura 3.5. Equivalencia de la bobina de inducción

Fuente [Escuela de Ingeniería Eléctrica, Calentamiento Inductivo, Bermúdez P.

Leandro]

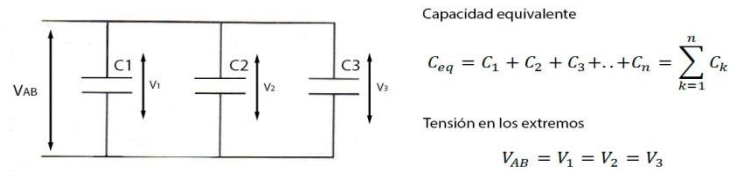


Figura 3.6 Equivalencia del condensador en paralelo

Fuente [Escuela de Ingeniería Eléctrica, Calentamiento Inductivo, Bermúdez P. Leandro]

$$CT=11*0,33\mu F=3,3\mu F \text{ de } 250 \text{ voltios}$$

Con los valores obtenidos de los cálculos de la bobina y el banco de condensadores se tiene que la frecuencia de resonancia es de:

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Ecuación 3.3

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{1,08 \mu H * 3,3\mu F}}$$

$$f_o = 84,3 \text{ kHz}$$

El resultado obtenido es la frecuencia a la que oscila el circuito tanque.

La bobina de trabajo hará de esta forma que el campo inducido vaya variando de tal forma que cuando se tenga la pieza metálica ferromagnética, del capo, los electrones colisiones unos con otros produciendo calor sobre el cuerpo.

Este efecto de calentamiento dependerá mucho del volumen de la pieza metálica ferromagnético.

De ser mayor el volumen mayor tiempo consumirá para que la pieza llegue a calentarse.

Finalmente se realiza el cálculo de las bobinas toroidales el cual dependiendo de ciertas características se tiene el siguiente calculo:

$$L(mH) = \frac{A_L * N^2}{10000}$$

Ecuación 3.4.

$$L(mH) = \frac{26 * 15^2}{10000}$$

$$L(mH) = 586mH$$

3.6. CIRCUITO GENERADOR (INVERSOR)

Es necesaria la implementación de una fuente de alimentación de alta frecuencia encargada de alimentar la carga resonante. Para esto se emplea un circuito inversor el cual es el encargado de realizar la transformación DC/AC a una frecuencia determinada, generalmente la frecuencia es igual o aproximada a la de resonancia de la carga.

El componente principal para esta etapa, es el transistor MOSFET IRFP250, es cual es de alta potencia, dicho componente trabaja en la zona de corte y saturación, para así generar oscilaciones en el circuito tanque resonante de trabajo.

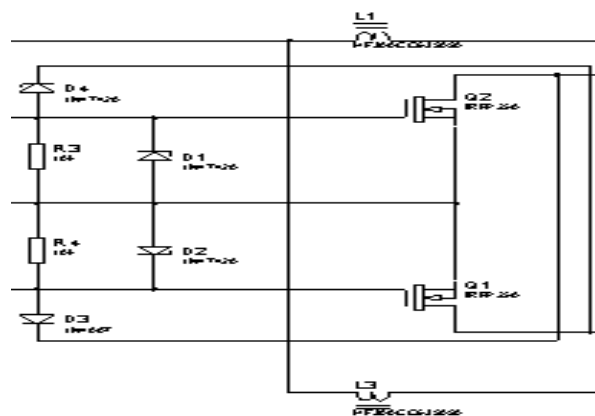


Figura 3.7. Circuito inversor de potencia con transistores MOSFET

Fuente: [Elaboración propia]

La conmutación sucede, intercalando los trabajos entre uno y otro MOSFET, estos soportan corrientes mayores a 10 amperios, pudiendo trabajar hasta 24 voltios como máximo, esto debido a las características mismas del circuito, para que exista la resonancia inductiva en el circuito tanque.

N-CHANNEL 200V - 0.073Ω - 33A TO-247 PowerMesh™II MOSFET

TYPE	V _{DSS}	R _{DS(on)}	I _D
IRFP250	200V	< 0.085Ω	33 A

- ▀ TYPICAL R_{DS(on)} = 0.073Ω
- ▀ EXTREMELY HIGH dv/dt CAPABILITY
- ▀ 100% AVALANCHE TESTED
- ▀ NEW HIGH VOLTAGE BENCHMARK
- ▀ GATE CHARGE MINIMIZED

DESCRIPTION

The PowerMESH™II is the evolution of the first generation of MESH OVERLAY™. The layout refinements introduced greatly improve the Ron*area figure of merit while keeping the device at the leading edge for what concerns switching speed, gate charge and ruggedness.

APPLICATIONS

- ▀ HIGH CURRENT, HIGH SPEED SWITCHING
- ▀ UNINTERRUPTIBLE POWER SUPPLIES (UPS)
- ▀ DC-AC CONVERTERS FOR TELECOM, INDUSTRIAL, AND LIGHTING EQUIPMENT

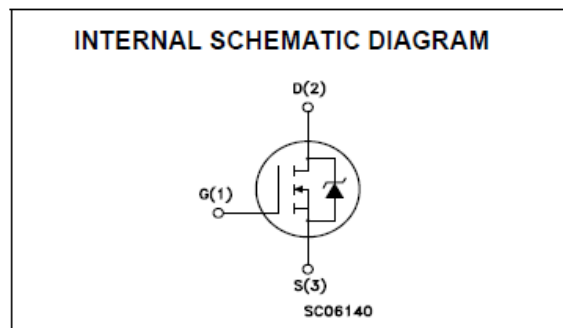
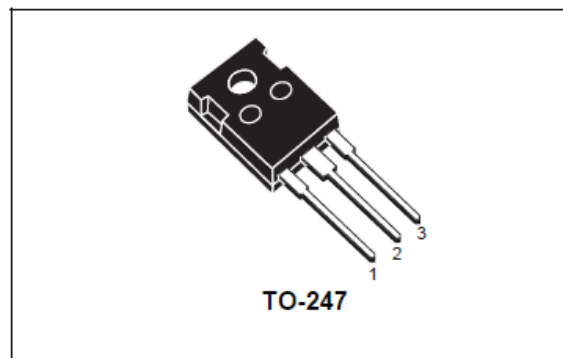


Figura 3.8. Características del MOSFET IRFP250

Fuente: [Hoja de especificaciones, <http://www.digchip.com>]

La topología de la configuración de los transistores, que se implementa en el sistema es la de simetría complementaria, formado por 2 transistores MOSFET, en donde, un instante de tiempo se activa el transistor complementándose uno con el otro, es decir en un instante funciona (Q1) permitiendo la circulación de corriente en una dirección a través de la carga y los otros está completamente desactivados. En el siguiente instante se apagan el transistores que estaban en

conducción y se activan los otros dos (Q2) permitiendo la circulación de corriente en la otra dirección teniendo al final un ciclo completo ya que aparece en el primer instante sobre la carga una tensión igual a la de la fuente VDC y en el siguiente instante una tensión VDC negativa.

La frecuencia de operación del sistema es una de las variables más importantes del proceso y está determinada por los valores de la capacitancia y la inductancia de la carga. Su valor siempre deberá ser superado a los 20kHz dado que se evita la contaminación auditiva en el lugar de operación. El valor máximo lo determina la velocidad de conmutación de los interruptores (transistores MOSFET), que no solo deben estar en capacidad de manejar la potencia sino también la frecuencia. Sin embargo en el escenario local, otro elemento también limita la frecuencia máxima de operación y es el condensador, pero existen carencias de estos dispositivos.

En definitiva en el contexto en el que se desarrolla este proyecto de aplicación están disponibles condensadores que soportan tensiones de 250 a 275 VAC corrientes eficaces de 25 amperios y valor de capacitancia de 0.33uf. Teniendo en cuenta el valor del condensador y la geometría de las posibles inductancias que se pueden fabricar, en valor máximo de frecuencia de trabajo se puede acortar a los 84 kHz.

Cabe destacar que según las curvas de respuesta del transistor MOSFET, en particular el IRFP250N, tiene un voltaje compuerta fuente ($V_{GS} = 20$ voltios), por tal motivo, una baja caída en este punto llega a el transistor trabajo en la zona Óhmica, esto provocará un calentamiento en el dispositivo.

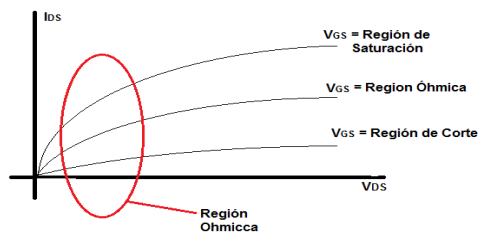


Figura 3.9 Región de trabajo del transistor MOSFET

Fuente [Elaboración propia]

Por el punto mencionado se recomienda que:

- Si se trabaja con tensiones de 12 voltios no opere más de 1 minuto ya que el transistor podría llegar a dañarse por sobrecalentamiento.
- Si se trabaja con tensiones de 24 voltios se garantiza que la tensión en GATE, sea igual a 12 voltios, esto debido al diodo zener conectado al transistor, garantizando la que trabaje en las zonas de corte y saturación.

Con estas características mencionadas tanto de la bobina de trabajo, condensadores, y transistor, en el cual, realizando las mediciones respectivas, se observó que el consumo de corriente es de 15 A, con una tensión de alimentación igual a 12 VDC

3.7. ETAPA DE ALIMENTACION VDC

Es la encargada de alimentar al circuito tanto de trabajo como de control, este debe otorgar una tensión DC, en donde podemos encontrar.

La fuente de alimentación debe suministrar la suficiente corriente para que el circuito resonante pueda operar sin dificultades y así no tener inconvenientes.

Se podría optar por implementar una fuente de características tipo conmutada con las siguientes etapas.

Rectificador no controlado: Se caracteriza por estar conformado por arreglo de diodos en donde no se tiene ningún control sobre el voltaje DC de salida, este voltaje siempre es fijo.

Filtrado: se caracteriza porque de ella se obtiene tensión DC ya filtrada pero no regulada, esto hace referencia que si existe subidas o bajadas de tensión en la salida se tendrá el mismo efecto por lo que se dice no regulada.

Conmutación y salida: En el cual se existe un conmutados que trabaja con dispositivos activos como ser transistores MOSFET o BJT, en la región de corte y saturación permitiendo de esta forma el control de la tensión y corriente a la salida, a esto se los conoce como fuentes conmutadas.

3.8. DISEÑO DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN

Conociendo los datos anteriores se realiza el cálculo del diseño de una fuente convencional que proporcione o supere los niveles de corriente, por ello se realiza los siguiente cálculos del transformador primeramente, luego los niveles de tensión que otorgara con la etapa de rectificación y finalmente el valor del condensador para tener una fuente estable, en el ámbito de una tensión VDC con el menor voltaje rizo.

3.8.1. EL TRANSFORMADOR REDUCTOR

En principio se tiene como dato que el consumo de corriente para el circuito en general es de 15 amperios. Esto implica tener un buen transformador que suministre esta cantidad de corriente.

Realizando las mediciones de la sección del núcleo del transformador con el que actualmente se cuente se tiene.

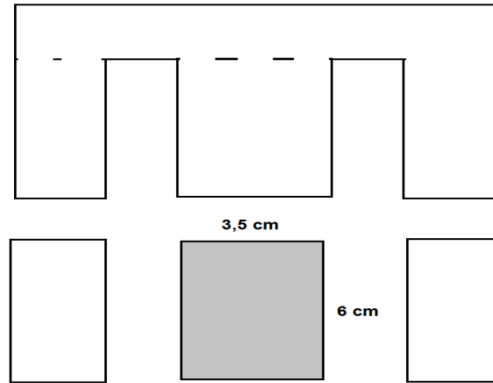


Figura. 3.10. Sección del núcleo del transformador
Fuente [Elaboración propia]

$$S = l \times l = 3,5 * 6$$

Ecuación 3.5.

$$S = 21 \text{ cm}^2$$

Esta es la sección el núcleo del transformador, el cual nos permitirá realizar el cálculo de potencia y por ende la corriente proporcionara.

Según el cálculo de potencia mediante la sección del núcleo se tiene:

$$S = \sqrt{P}$$

Ecuación 3.6.

Siendo:

S = sección del núcleo en cm. cuadrados

P = potencia del transformador

$$P = S^2$$

$$P = 21^2 = 441 \text{ w.}$$

Con la potencia obtenida procedemos a calcular la corriente del bobinado del secundario y se tiene:

$$P_2 = I_2 * V_2$$

Ecuación 3.7.

$$I_2 = \frac{P_2}{V_2}$$

$$I_2 = \frac{441 \text{ w}}{12 \text{ v}} = \mathbf{36,75 \text{ Amperios}}$$

Este último cálculo nos indica claramente que el transformador encontrado es más que adecuado para el circuito calentador inductivo.

De la misma manera procedemos a realizar los cálculos de corriente para el bobinado primario utilizando la ecuación 3.5.

$$P_1 = I_1 * V_1$$

$$I_1 = \frac{441 \text{ w}}{220 \text{ v}} = \mathbf{1,99 \text{ Amperios}}$$

Posteriormente se calcula la relación de espiras:

$$NE = \frac{42}{S}$$

Ecuación 3.8.

$$NE = \frac{42}{21} = 2 \text{ vueltas}$$

Con la relación de vueltas, encontraremos el número de espiras tanto del primario como del secundario.

Para el bobinado primario:

$$NP = V_1 * NE$$

Ecuación 3.9.

$$NP = 220 * 2 = 440 \text{ vueltas.}$$

Para el bobinado secundario:

$$NS = V_2 * NE$$

$$NS = 12 * 2 = 24 \text{ vueltas.}$$

Con ello ya se tiene lo necesario para realizar el bobinado de transformador, pero se debe aclarar que las corrientes encontradas tanto para el devanado primario como el secundario, son utilizadas para determinar el número de cable según tabla AWG, mostrada en la siguiente imagen:

AWG	Dia mm	SWG	Dia mm	Max Amps	Ohms / 100 m
11	2.30	13	2.34	12	0.47
12	2.05	14	2.03	9.3	0.67
13	1.83	15	1.83	7.4	0.85
14	1.63	16	1.63	5.9	1.07
15	1.45	17	1.42	4.7	1.35
16	1.29	18	1.219	3.7	1.48
18	1.024	19	1.016	2.3	2.04
19	0.912	20	0.914	1.8	2.6
20	0.812	21	0.813	1.5	3.5
21	0.723	22	0.711	1.2	4.3
22	0.644	23	0.610	0.92	5.6
23	0.573	24	0.559	0.729	7.0
24	0.511	25	0.508	0.577	8.7
25	0.455	26	0.457	0.457	10.5
26	0.405	27	0.417	0.361	13.0
27	0.361	28	0.376	0.288	15.5
28	0.321	30	0.315	0.226	22.1
29	0.286	32	0.274	0.182	29.2
30	0.255	33	0.254	0.142	34.7
31	0.226	34	0.234	0.113	40.2
32	0.203	36	0.193	0.091	58.9
33	0.180	37	0.173	0.072	76.7
34	0.160	38	0.152	0.056	94.5
35	0.142	39	0.132	0.044	121.2

Tabla 3.1. AWG de conductores

Fuente [<https://pepegreen.com/awg-que-es/>]

3.8.2. CALCULO DE LOS DIODOS RECTIFICADORES

La tensión que suministra el secundario del transformador se dirige a la etapa rectificadora, es de esta forma que a la salida del rectificador se tiene una tensión:

$$V_{CC} = 2 \frac{V_{max} - 1,4}{\pi}$$

Ecuación 3.10.

$$V_{CC} = 2 \frac{(12 * \sqrt{2}) - 1,4}{\pi}$$

$$V_{CC} = 9,9 \text{ v}$$

En esta sección se verifica la cantidad de corriente que consumirá la carga, el circuito calentador por inducción.

Esto es:

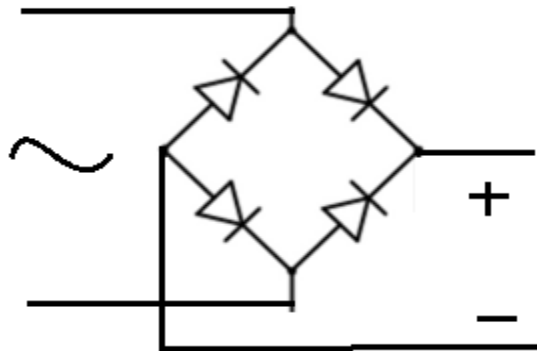


Figura. 3.11. Rectificador puente

Fuente [Elaboración propia]

Haciendo un análisis de la configuración siempre funcionaran 2 diodos por lo que la corriente de carga será igual a la mitad, ósea 7.5 amperios

3.8.3. CALCULO DEL CONDENSADOR

Como último punto y tener una corriente continua lo suficientemente estable es importante considerar el cálculo del condensador o filtro, esto debido a que no

debe colocarse uno de mucha dimensión ya que esto afectaría a los diodos rectificadores y al transformador.

Para este punto se recomienda un rizo del 10% y se tiene la siguiente ecuación, el cual nos permitirá calcular el condensador:

$$C = \frac{I}{2 * f * Vr_{iz}}$$

Ecuación 3.11.

$$C = \frac{15}{2 * 50 * 1.7} = 88000\mu F$$

Con este último cálculo se tendría la fuente básica para alimentar al circuito, calentador inductivo, llegando a consumir una potencia de 180 W.

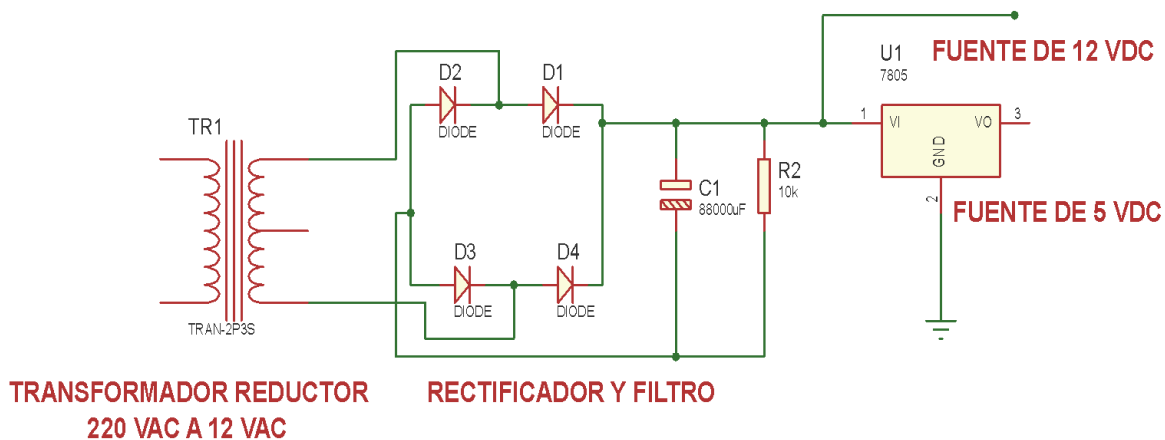


Figura. 3.12. Fuente de alimentación
Fuente [Elaboración propia]

Las dificultades que puede presentar el diseño son las dimensiones de los componentes, y que en algún momento pueda presentar inestabilidad al momento de conectar la carga.

Por esta causa se recomienda la utilización de baterías de automóvil con una corriente de 50 o 70 amperios, ya que estos son muy estables, y tienen un buen rendimiento.



Figura 3.13. Batería de automóvil de 50 a 70 amperios

Fuente: [<https://www.todobateriasarequipa.com/baterias-automoviles-la-marca-bosch-arequipa/>]

3.9. ETAPA DE CONTROL

En la etapa de control se encuentra el Arduino el cual bajo un programa de control y detección de variables analógicas pueda controlar al circuito.

También existe con ello la interfaz de usuario está conformada por la visualización y pulsadores de mando, que están controlados por el microcontrolador (ARDUINO). En la parte de la visualización tenemos una LCD 16x2 en la que se puede ver el valor de temperatura con la que queremos calentar la pieza de trabajo. También hay un tercer pulsador que nos indica cuando iniciar o suspender el proceso de calentamiento.

En el siguiente fragmento de código se observa como realiza la lectura de temperatura en la bobina de trabajo, mediante el sensor de temperatura.

```

temperatura = analogRead(A0); //asigna el valor leído de la entrada analógica
temperatura = temperatura*0.2;//multiplica el valor por un factor
lcd.setCursor(0,0);//posiciona el cursor del LDC (0,0), columna y fila
lcd.print("Temp *C =");//imprime el texto en LCD "Temp *C ="
lcd.setCursor(11,0);//mueve el cursor a la columna 11 fila 0
lcd.print(temperatura);//imprime el valor de temperatura
delay(500);//espera un tiempo
lcd.clear();//limpia la pantalla
if(temperatura >=0 && temperatura <=100){//pregunta si está el rango de T°C
  digitalWrite (relee, 1); //pone el alto la salida digital
  lcd.setCursor(0,1);//mueve el cursor a la columna 0 y fila 1
  lcd.print ("REGULAR");// imprime texto
}

```

Una vez que exista cambio de temperatura del material inducido este será visualizado en una pantalla LCD, indicando de esta manera al operario la temperatura en el cual se está trabajando.

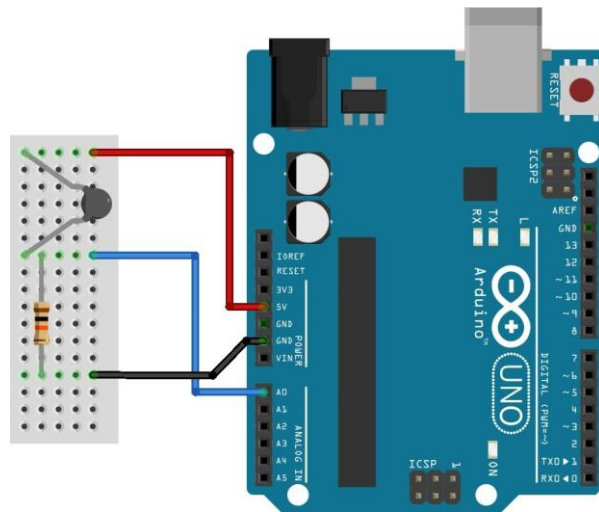


Figura 3.14. Conexión del termistor y Arduino en la entrada analógica

Fuente: [<http://www.iescamp.es/miarduino/2016/04/14/contador-de-tiempo/>]

En el siguiente fragmento de código se muestra un contador de tiempo para proteger los dispositivos del calentador inductivo, esto debido a que no se puede mantener mucho tiempo encendido ya que sería un desperdicio de potencia para los transistores MOSFET.

Una vez concluido el tiempo de aproximadamente 30 o 40 segundos el arduino será quien manda una orden de apagar el sistema. Pero no así del funcionamiento de la bomba.

```
#include <LiquidCrystal.h>//librería del LCD para ARDUINO
LiquidCrystal lcd(1,2,4,5,6,7);//configurando las terminales del ARDUINO para LCD

int T=0;//inicialización de la variable T en 0
lcd.setCursor(11,1);// mueve el cursor en columna 11 fila 1
  lcd.print(T);//imprime el valor de T
  lcd.setCursor(14,1);//mueve el cursor
  lcd.print("s");//imprime el caracter
  T=T+1;//incremente el valor de T en una unidad
  if(T>=30){//pregunta si el valor de T es mayor o igual a 30 segundos
    digitalWrite (relee, 0);//coloca en estado bajo la salida del ARDUINO
    T=0;//coloca en 0 la variable T
  }
```

De la misma forma existe un fragmento de código donde se controla el funcionamiento de la bomba de agua, el cual seguirá funcionando un tiempo después de que el circuito inductor para luego este quede sin energía.

Para mayor detalle y visualizando todo el programa encargado de la parte de control de apagado y encendido del circuito se muestra a continuación.

```
#include <LiquidCrystal.h>//librería del LCD para ARDUINO
LiquidCrystal lcd(7,6,5,4,3,2);//configurando las terminales del ARDUINO para LCD
int T=0;//inicialización de la variable T en 0
float temperatura;
int relee = 8;
int bomba = 9;

void setup(){
  lcd.begin(16,2);
```

```

pinMode(relee,OUTPUT);
pinMode(bomba,OUTPUT);
}

void loop(){
    temperatura = analogRead(A0); //asigna el valor leído de la entrada analógica
    temperatura = temperatura*0.2;//multiplica el valor por un factor
    lcd.setCursor(0,0);//posiciona el cursor del LDC (0,0), columna y fila
    lcd.print("Temp *C =");//imprime el texto en LCD "Temp *C ="
    lcd.setCursor(11,0);//mueve el cursor a la columna 11 fila 0
    lcd.print(temperatura);//imprime el valor de temperatura
    delay(1000);//espera un tiempo
    lcd.clear();//limpia la pantalla

    if(temperatura >=0 && temperatura <=100 && T<=30){//pregunta si está el rango de T°C
        digitalWrite (bomba,1);
        digitalWrite (relee, 1); //pone el alto la salida digital
        lcd.setCursor(0,1);//mueve el cursor a la columna 0 y fila 1
        lcd.print ("REGULAR");// imprime texto
    }

    if((temperatura >=101 && temperatura <=120)||T>=31){//pregunta si está el rango de T°C
        digitalWrite (relee, 0); //pone el alto la salida digital
        lcd.setCursor(0,1);//mueve el cursor a la columna 0 y fila 1
        lcd.print ("*T ALTO");// imprime texto
    }

    if((temperatura >=121 && temperatura <=180)||T>=31){//pregunta si está el rango de T°C
        digitalWrite (relee, 0); //pone el alto la salida digital
        lcd.setCursor(0,1);//mueve el cursor a la columna 0 y fila 1
        lcd.print ("MUY ALTO OFF");// imprime texto
    }
}

```



```

lcd.setCursor(13,1);// mueve el cursor en columna 11 fila 1
lcd.print(T);//imprime el valor de T
lcd.setCursor(15,1);//mueve el cursor
lcd.print("s");//imprime el caracter
T=T+1;//incremente el valor de T en una unidad

if(T>=30){//pregunta si el valor de T es mayor o igual a 30 segundos
    digitalWrite (relee, 0);//coloca en estado bajo la salida del ARDUINO
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print(" OFF TIEMPO ");
}

if(T>=60){//pregunta si el valor de T es mayor o igual a 30 segundos
    digitalWrite (relee, 0);//coloca en estado bajo la salida del ARDUINO
    T=0;
}

if(T>=45){//pregunta si el valor de T es mayor o igual a 30 segundos
    digitalWrite (bomba, 0);//coloca en estado bajo la salida del ARDUINO
}
}

```

3.10. SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

El sistema de refrigeración está constituido por un sistema de cañería o ducto que se conecta con la bonina de trabajo, y esto es así porque, esta diseñado de un tubo de 0.5 centímetros, y material de cobre, por ellos debe circular agua constantemente, y justamente es la bomba el cual debe hacer circular el agua por todo el ducto.

La bomba se convierte en un una elemento principal para que evitar el calentamiento de la bobina de trabajo.

Este elemento trabaja con una corriente de trabajo igual a 2 amperios, que de igual forma tanto su activación o su paro dependerá de las ordenes que se genera, bajo ciertas condiciones, que son el tiempo y la temperatura.



Figura 3.15 Bomba de agua
Fuente [Elaboración propia]

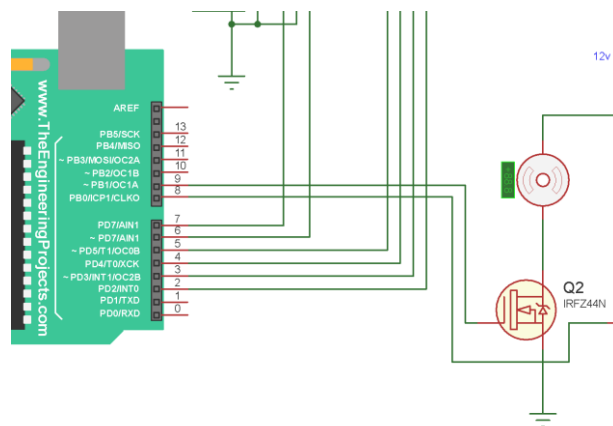


Figura. 3.16 Circuito de control de la bomba
Fuente [Elaboración Propia]

3.11. NIVEL DE TENSIÓN Y CORRIENTE DE LOS INTERRUPTORES

Si en el sistema de calentamiento se pretende energizar a la red eléctrica disponible en los ambientes, el máximo nivel de tensión disponible es de 220 VAC,

lo cual implica, una alimentación de 12 a 24 VDC con una potencia de 180W, máxima, para el circuito calentador inductivo.

Dados los niveles de potencia, la frecuencia de operación y la eficiencia, los dispositivos adecuados para la construcción de un calentador inductivo son los transistores MOSFET y los transistores IGBT.

La utilización, de uno u otro de estos dispositivos, será fundamentalmente, mas, sin embargo el nivel de ruptura de cualquiera de las tecnologías se puede definir en este momento y no debe ser superado a los 600 voltios. En el mercado se encuentra productos que soportan tensiones de ruptura de 1200 voltios, sin embargo el tamaño de las difusiones y la geometría asociada a un dispositivo con este nivel de ruptura, impiden la operación a las frecuencias de interés de la aplicación.

3.12. CIRCUITO DEL CALENTADOR INDUCTIVO

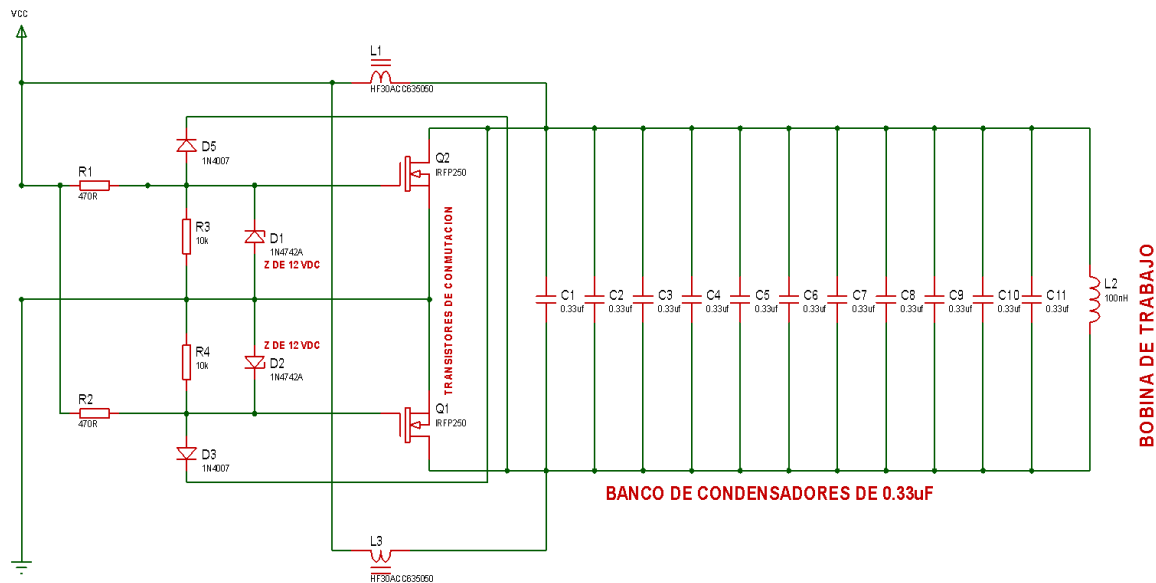


Figura 3.17. Circuito calentador inductivo

Fuente: [Elaboración propia]

Este es el circuito calentador inductivo implementado al igual que su diseño en placa impresa, cabe señalar el consumo de corriente en funcionamiento puede llegar a los 24 A o mayor por lo que es necesario que los condensadores estén en paralelo, para la carga se distribuya y no afecte a un solo condensador.

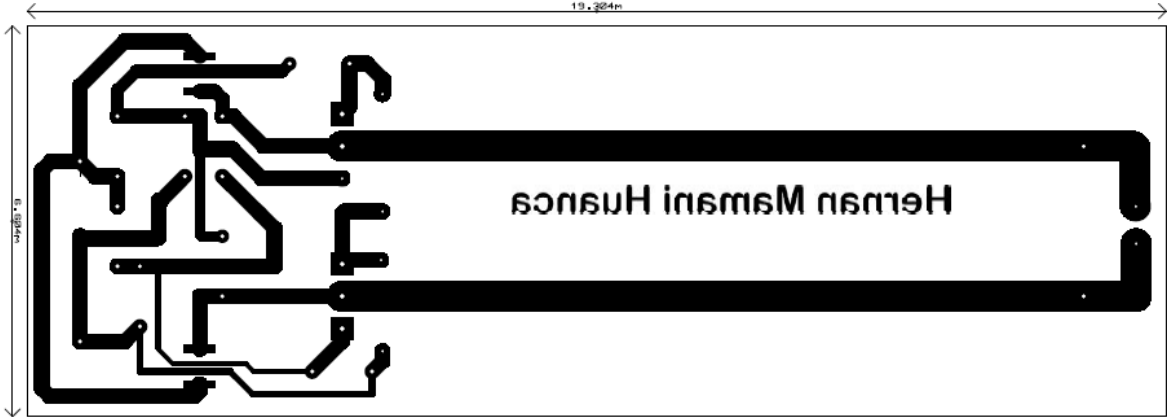


Figura 3.18. Diseño de la placa impresa del circuito inductor

Fuente: [Elaboración propia]

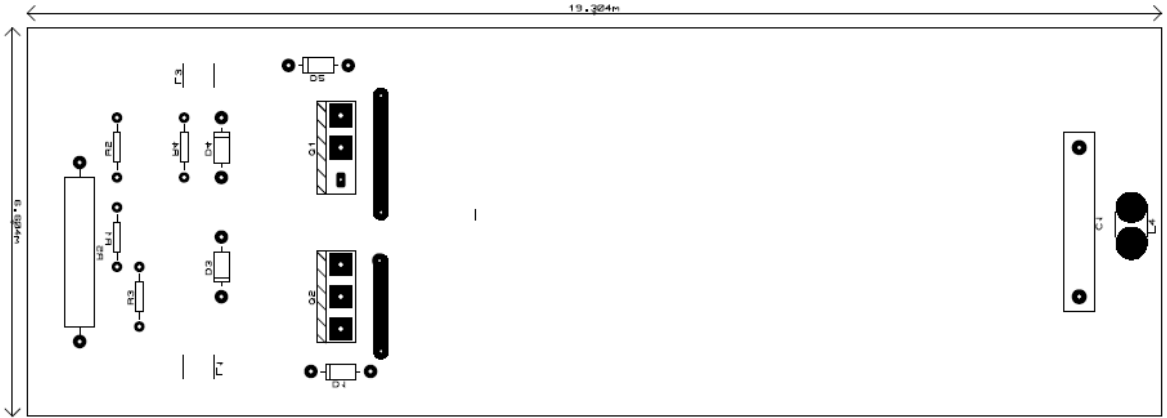


Figura 3.19 posición de los dispositivos electrónicos en la placa

Fuente: [Elaboración propia]



Figura 3.20. Placa de circuito final de la bobina de inducción.

Fuente: [Elaboración propia]

Si bien en el diseño solo está conectado un condensador en la práctica cuenta con 11 capacitores de 0.33uf de 250 voltios en paralelo, como se muestra en la figura 3.13.

En el siguiente diagrama de circuito, se muestra claramente las conexiones que cuenta, la etapa de control, que está encargada de accionar el circuito inductivo por tiempo y temperatura, para evitar posibles daños de sobrecalentamiento, en los transistores MOSFET, los cuales trabajan a altas corrientes.

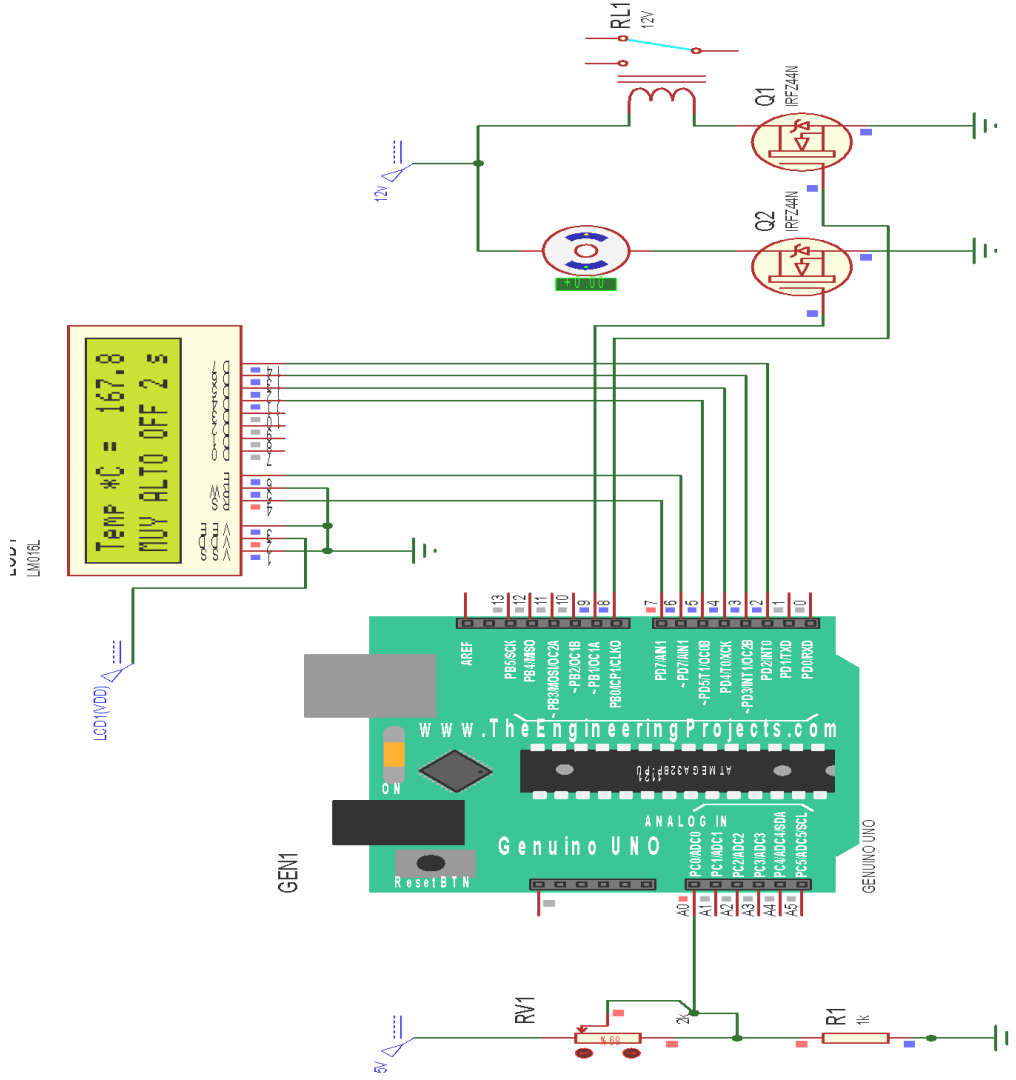
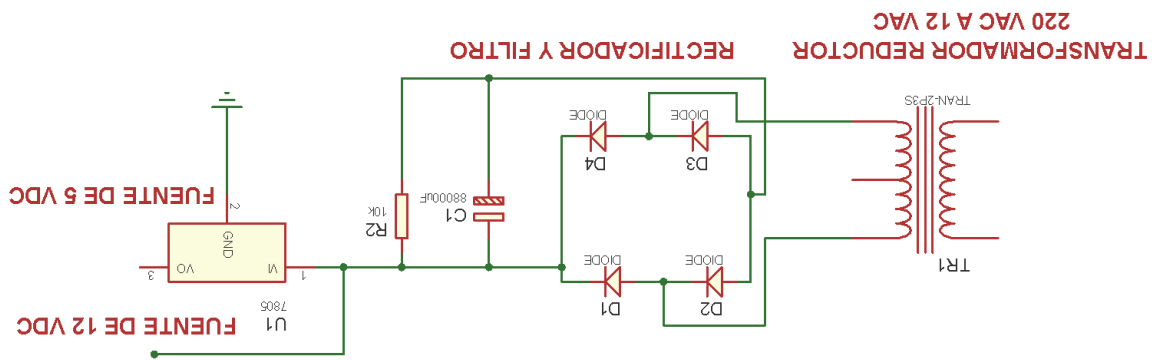


Figura 3.2.1. Circuito de control para el encendido y apagado del calentador inductivo

Fuente: [Elaboración propia]

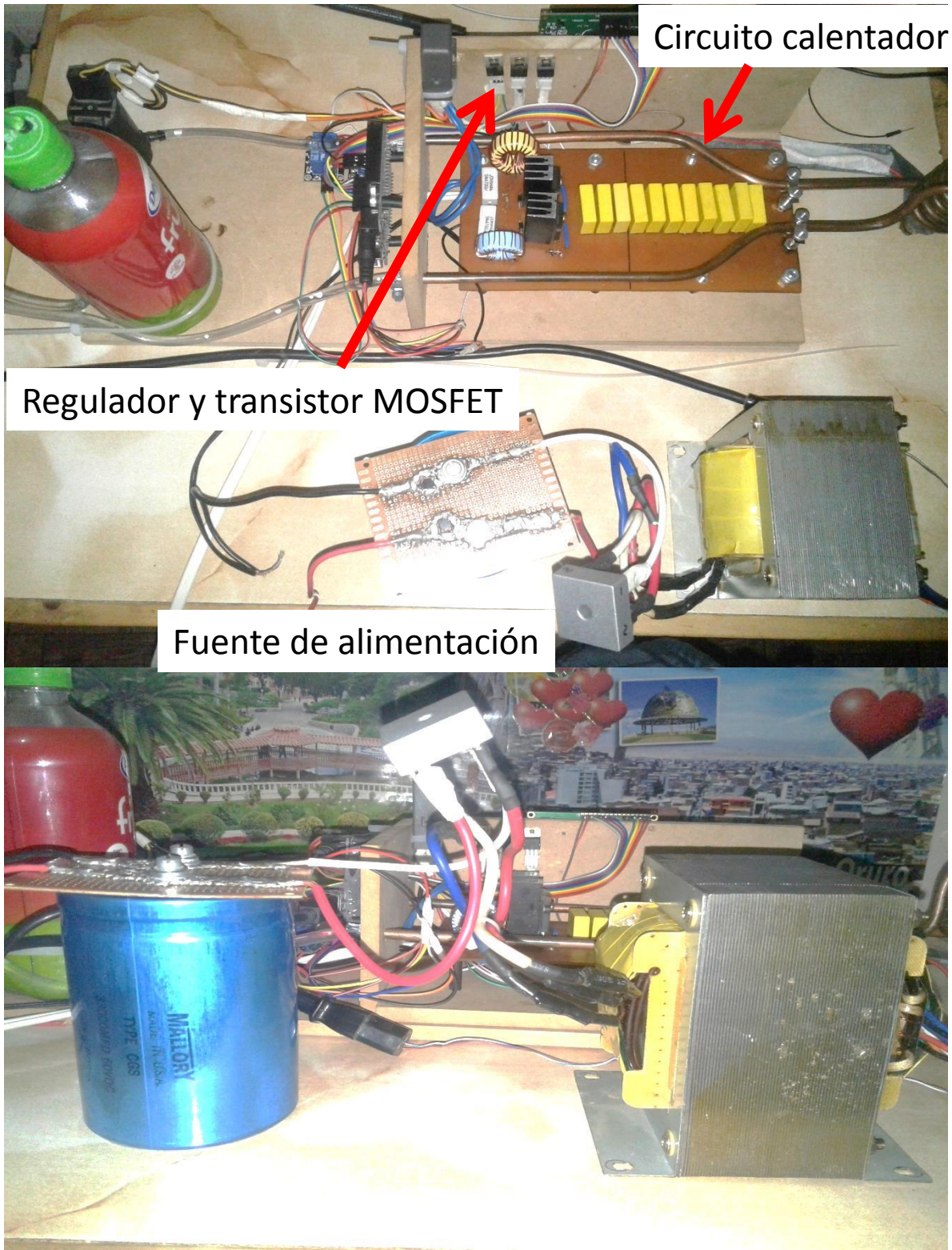


Figura 3.22. Circuito prototipo final del calentador inductivo, vista superior

Fuente: [Elaboración propia]



Figura 3.23 Circuito prototipo final del calentador inductivo, vista frontal

Fuente: [Elaboración propia]

CAPITULO IV ANALISIS DE COSTOS

4.1. COSTOS FIJOS

Según el mercado externo un calentador inductivo, varía según la potencia que este tenga es así que se tiene los siguientes:



38700 \$us

Figura 4.1 Calentador inductivo 15 kW

Fuente [<https://listado.mercadolibre.com.mx/calentador-de-agua-por-induccion#>]



5000 \$us

figura 4.2 Calentador inductivo 30 kW

Fuente: <https://es.aliexpress.com/w/wholesale-induction-heating-furnacer.html>



2000 \$us

Figura 4.3 Calentador inductivo 10 kW

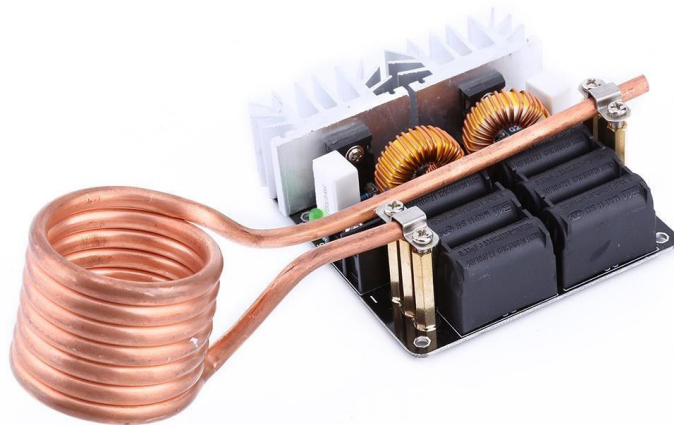
Fuente: <https://es.dhgate.com/product/25kw-30-80khz-high-frequency-induction-heater/389774896.html>



400 \$us

Figura 4.4. Calentador inductivo 1 kW

Fuente: https://es.made-in-china.com/cokiaind/image_1000W-Induction-Heater-for-Bolt-Heating-and-Nut-Heating_ennsgurg.html



400 \$us

Figura 4.5. Calentador inductivo de 100 w

Fuente: [<https://www.amazon.es/Yosoo-inducci%C3%B3n-calefacti%C3%B3n-calentador-bricolaje/dp/B01C70G7Y8>]

Por esta razón, para el análisis de costos se pudo constatar según el mercado local, regional, para ello se observa en la tabla correspondiente los costos de los diferentes elementos o dispositivos empleados en el proyecto de aplicación.

N°	Detalle	Precio Unitario (Bs.)	Cantidad	Precio total (Bs.)
1	Resistencias 10 kOhms ¼ watt	0,5	2	1.-
2	Diodos de silicio 1n4007	0,5	2	1.-
3	Diodo zener de 12 v.	1,5	2	3.-
4	Resistor de 470 Ohms 5 w	3	4	8.-
5	Bobina toroidal de 3,6	10	2	20.-
6	Condensador de 0,33uf 250 VAC	4	11	44.-
7	Transistor MOSFET IRFP	6	2	12.-
8	Disipador	5	2	10.-
9	Placa impresa	7	1	7.-
10	Acido	40	1	40.-

11	Estaño	10	1	10.-
12	2 docenas de Tornillos	10	1	10.-
13	Placa de desarrollo Arduino UNO	75	1	75.-
14	Pantalla LCD	40	1	40.-
15	Sensor de temperatura ECT	65	1	65.-
17	Batería 45	400	1	400.-
18	Tubo de cobre de 2 metros	30	1	30.-
19	Otros (madera, pegamento, alambre de cobre esmaltado)	35	1	35.-
20	Transformador de 400 w	85	1	85
21	Condensador electrolítico 33000uf 60v	75	1	75
22	Diodos rectificadores 50 A	20	1	20
23	Mano de obra	300	1	300.-
Costo total del proyecto aplicativo				1284.-

Tabla 4.1. Costos del proyecto

4.2. COSTOS VARIABLE

Por el consumo de energía que implica el calentar una pieza metálica hace que esto tenga una variación en el costo de pago por energía.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENTACIONES

4.1. CONCLUSIONES

El sistema de calentamiento por inducción electromagnética que se implementa es una buena alternativa para sustituir a los sistemas de calentamiento tradicionales utilizados en los laboratorios de Físico – Química basados en resistencias; Ya que permite alcanzar temperaturas en el orden de los cientos de grados centígrados en tiempos muy cortos.

Con el tanque resonante LC se obtiene el nivel de corriente necesario en la bobina de calentamiento, debido a la terminación paralela en su configuración. La estrategia de control por tiempo y temperatura, implementada con la placa “Arduino”, mantuvo estable entre los voltajes del capacitor y del inversor ante un cambio de carga. Permitiendo de este modo controlar un excesivo consumo de energía de trabajo en la carga.

Las prestaciones del convertidor desarrollado satisfacen los requerimientos de los experimentos realizados sin necesidad de adquirir equipo importado.

4.2. RECOMENDACIONES

En el presente trabajo se aplicó todos los conocimientos adquiridos en proceso de aprendizaje y formación profesional universitaria, por esta razón se recomienda:

- El proyecto de aplicación es un prototipo por lo que, no se debe exceder el tiempo de uso del mismo ya que este podría sufrir daños o incluso explotar, por el constante trabajo.
- Se recalca que se debe utilizar una fuente DC, con una potencia razonable elevada, el cual proporcione buena corriente, mayores a 20 amperios, ya

que de no ser así, la misma fuente podría sufrir daños, por la exigencia misma del circuito.

- Siempre verificar que el sistema de refrigeración este en óptimas condiciones, en buen funcionamiento, porque este es el encargado de mantener a una temperatura baja con relación a la pieza inducida.
- En caso de que el circuito sufriera algún daño, verificar los transistores MOSFET, y condensadores ya son estos los mas propensos a dañarse por la cantidad de corriente que circulan (manejan).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Schilling, D. y Belove, Ch. (1993). *Circuitos Electrónicos*. España: McGraw-Hill

Bermudez, L. (2003). *Estudio y Diseño de un Calentador por Inducción Electromagnética en Alta Frecuencia para el montaje de rodamientos*. (Tesis de grado). Pontificia Universidad Católica Valparaíso: Valparaíso.

Ortega, J. (2015). *Sistema de calentamiento por inducción electromagnética para pruebas experimentales en laboratorios de Físico-Química*(Tesis de grado). Instituto Tecnológico de Celaya: México.

Bolivar, C. (2016). *Diseño e implementación de un calentador por inducción electromagnética par el montaje de rodamientos*, Caldas: Visión Electrónica

Acevedo, A. (2007). *Metodología para la construcción de un horno de Inducción electromagnética*(Tesis de grado). Universidad Industrial de Santander: Bucaramanga.

Perez, C. (2015). Diseño de Bobinas, Universidad de Cantabria

PAGINAS WEB

Hergoros srl, (2015), *¿Qué son los calentadores por inducción?*, Recuperado de: <http://www.hergoros.com/que-son-los-calentadores-por-induccion/>

Electronica, (2000), Calentador por inducción- Induccion Heater. Recuperado de: <http://www.electronica2000.com/especiales/calentador-por-induccion.htm>.

Mercado Libre, (2018), Calentador por inducción. Recuperado de: <https://listado.mercadolibre.com.mx/calentador-de-induccion#>

ANEXOS

isc N-Channel MOSFET Transistor

IRFZ44N

FEATURES

- Drain Current $-I_D=49A@ T_C=25^{\circ}C$
- Drain Source Voltage-
: $V_{DSS}= 55V(\text{Min})$
- Static Drain-Source On-Resistance
: $R_{DS(on)} = 0.032 \Omega (\text{Max})$
- Fast Switching

DESCRIPTION

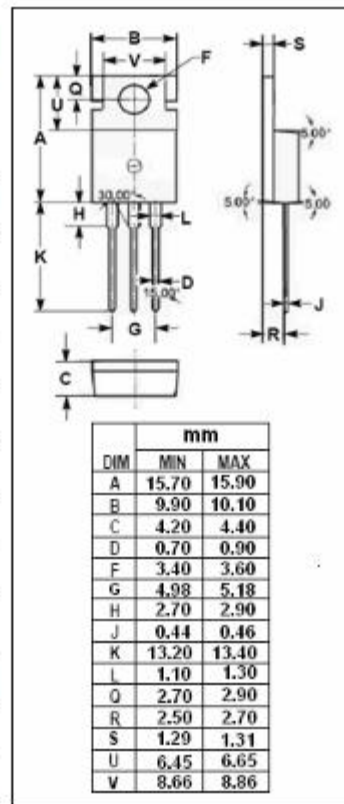
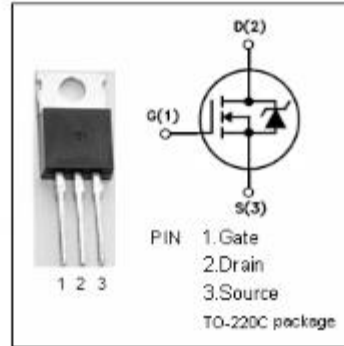
- Designed for low voltage, high speed switching applications in power supplies, converters and power motor controls, these devices are particularly well suited for bridge circuits where diode speed and commutating safe operating areas are critical and offer additional safety margin against unexpected voltage transients.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS($T_a=25^{\circ}C$)

SYMBOL	PARAMETER	VALUE	UNIT
V_{DSS}	Drain-Source Voltage	55	V
V_{GS}	Gate-Source Voltage-Continuous	± 20	V
I_D	Drain Current-Continuous	49	A
I_{DM}	Drain Current-Single Pluse ($t_p \leq 10 \mu s$)	160	A
P_D	Total Dissipation @ $T_c=25^{\circ}C$	94	W
T_J	Max. Operating Junction Temperature	175	$^{\circ}C$
T_{stg}	Storage Temperature	-55~175	$^{\circ}C$

THERMAL CHARACTERISTICS

SYMBOL	PARAMETER	MAX	UNIT
$R_{th(j-c)}$	Thermal Resistance, Junction to Case	1.5	$^{\circ}C/W$
$R_{th(j-a)}$	Thermal Resistance, Junction to Ambient	62	$^{\circ}C/W$



Information furnished is believed to be accurate and reliable. However, STMicroelectronics assumes no responsibility for the consequences of use of such information nor for any infringement of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of STMicroelectronics. Specification mentioned in this publication are subject to change without notice. This publication supersedes and replaces all information previously supplied. STMicroelectronics products are not authorized for use as critical components in life support devices or systems without express written approval of STMicroelectronics.

The ST logo is a trademark of STMicroelectronics

© 2000 STMicroelectronics - Printed in Italy - All Rights Reserved
STMicroelectronics GROUP OF COMPANIES

Australia - Brazil - China - Finland - France - Germany - Hong Kong - India - Italy - Japan - Malaysia - Malta - Morocco -
Singapore - Spain - Sweden - Switzerland - United Kingdom - U.S.A.

<http://www.st.com>

TO-247 MECHANICAL DATA

DIM.	mm			inch		
	MIN.	TYP.	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
A	4.7		5.3	0.185		0.209
D	2.2		2.6	0.087		0.102
E	0.4		0.8	0.016		0.031
F	1		1.4	0.039		0.055
F3	2		2.4	0.079		0.094
F4	3		3.4	0.118		0.134
G		10.9			0.429	
H	15.3		15.9	0.602		0.626
L	19.7		20.3	0.776		0.779
L3	14.2		14.8	0.559		0.582
L4		34.6			1.362	
L5		5.5			0.217	
M	2		3	0.079		0.118

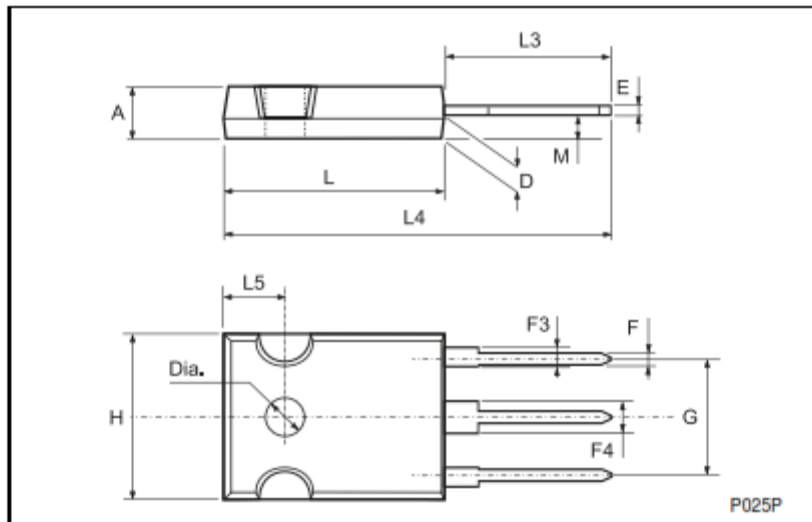


Fig. 1: Unclamped Inductive Load Test Circuit

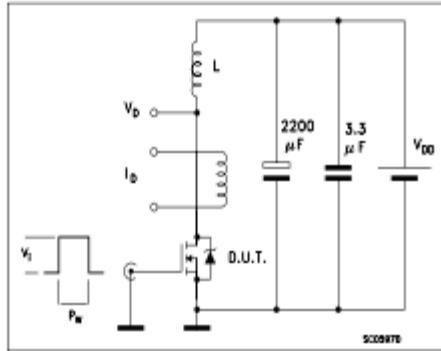


Fig. 2: Unclamped Inductive Waveform

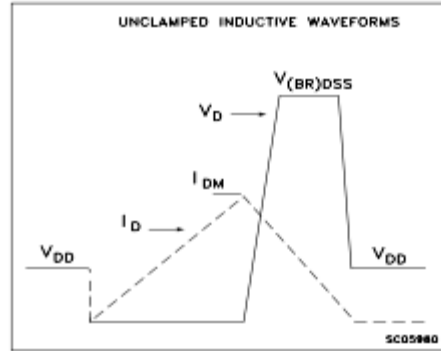


Fig. 3: Switching Times Test Circuit For Resistive Load

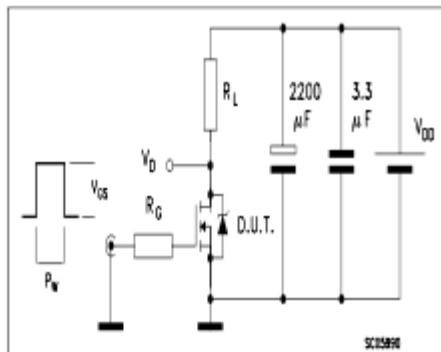


Fig. 4: Gate Charge test Circuit

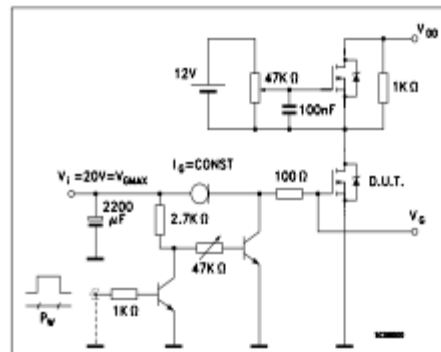
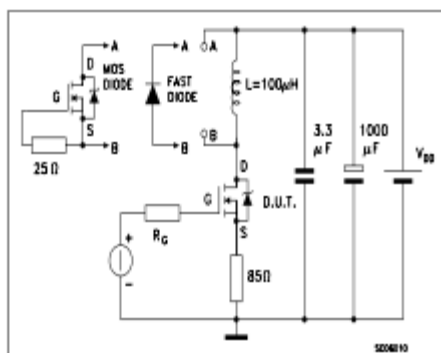
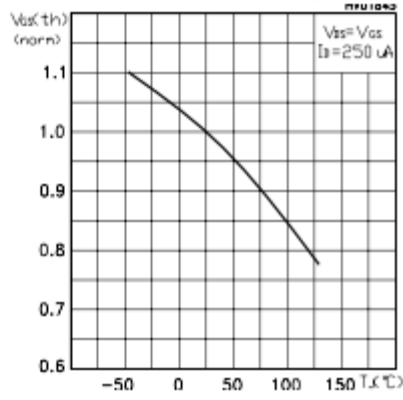


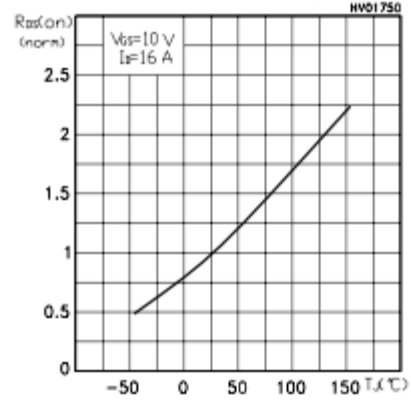
Fig. 5: Test Circuit For Inductive Load Switching And Diode Recovery Times



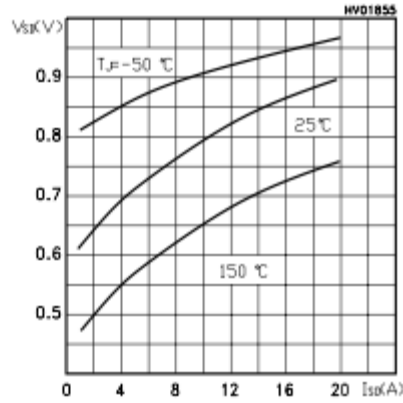
Normalized Gate Threshold Voltage vs Temp.



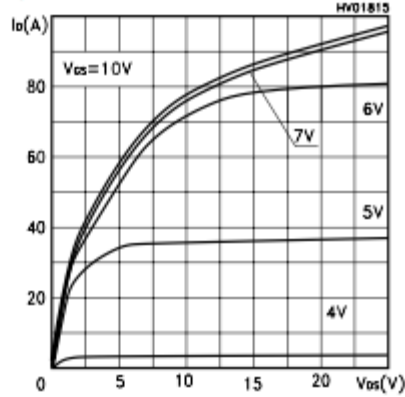
Normalized On Resistance vs Temperature



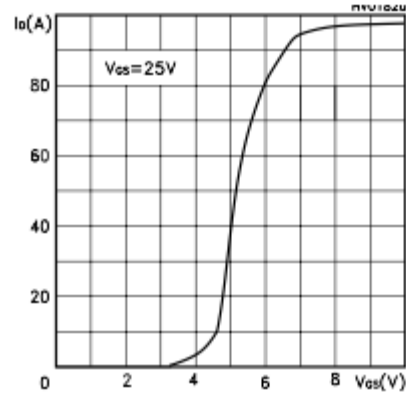
Source-drain Diode Forward Characteristics



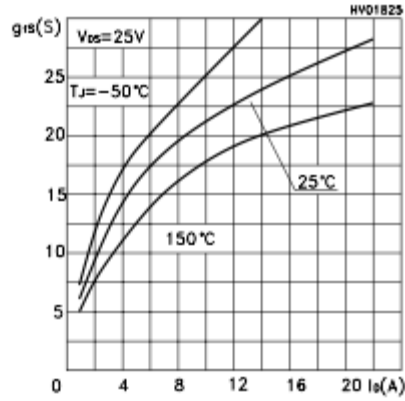
Output Characteristics



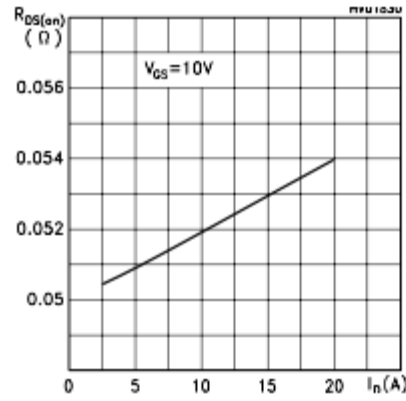
Transfer Characteristics



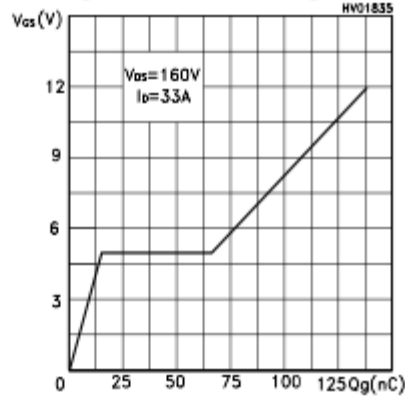
Transconductance



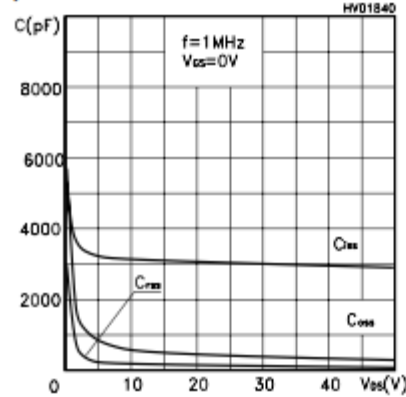
Static Drain-Source On Resistance



Gate Charge vs Gate-source Voltage



Capacitance Variations



ELECTRICAL CHARACTERISTICS (CONTINUED)

SWITCHING ON

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$t_{d(on)}$	Turn-on Delay Time	$V_{DD} = 100V, I_D = 16 A$ $R_G = 4.7\Omega, V_{GS} = 10V$ (see test circuit, Figure 3)		25		ns
t_r	Rise Time			50		ns
Q_g	Total Gate Charge	$V_{DD} = 160V, I_D = 33 A,$ $V_{GS} = 10V, R_G = 4.7\Omega$		117	158	nC
Q_{gs}	Gate-Source Charge			15		nC
Q_{gd}	Gate-Drain Charge			50		nC

SWITCHING OFF

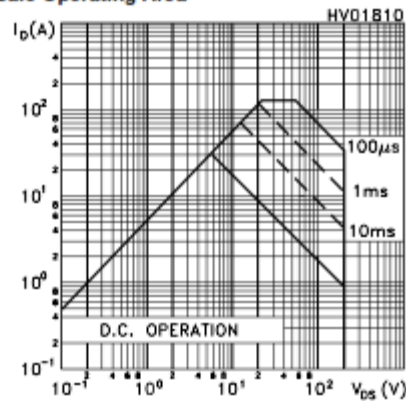
Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$t_{r(voff)}$	Off-voltage Rise Time	$V_{DD} = 160V, I_D = 16 A,$ $R_G = 4.7\Omega, V_{GS} = 10V$ (see test circuit, Figure 5)		60		ns
t_f	Fall Time			40		ns
t_c	Cross-over Time			100		ns

SOURCE DRAIN DIODE

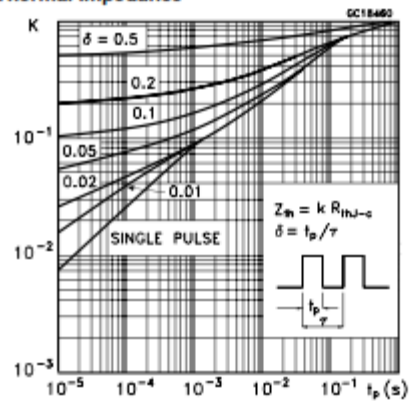
Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
I_{SD}	Source-drain Current				33	A
$I_{SDM} (2)$	Source-drain Current (pulsed)				132	A
$V_{SD} (1)$	Forward On Voltage	$I_{SD} = 33 A, V_{GS} = 0$			1.6	V
t_{rr}	Reverse Recovery Time	$I_{SD} = 33 A, di/dt = 100A/\mu s,$ $V_{DD} = 100V, T_J = 150^\circ C$ (see test circuit, Figure 5)		370		ns
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge			5.4		μC
I_{RRM}	Reverse Recovery Current			29		A

Note: 1. Pulsed: Pulse duration = 300 μs , duty cycle 1.5 %.
2. Pulse width limited by safe operating area.

Safe Operating Area



Thermal Impedance



IRFP250

THERMAL DATA

Rthj-case	Thermal Resistance Junction-case Max	0.66	°C/W
Rthj-amb	Thermal Resistance Junction-ambient Max	30	°C/W
Rthc-sink	Thermal Resistance Case-sink Typ	0.1	°C/W
T _l	Maximum Lead Temperature For Soldering Purpose	300	°C

AVALANCHE CHARACTERISTICS

Symbol	Parameter	Max Value	Unit
I _{AR}	Avalanche Current, Repetitive or Not-Replicative (pulse width limited by T _J max)	33	A
E _{AS}	Single Pulse Avalanche Energy (starting T _J = 25 °C, I _D = I _{AR} , V _{DD} = 50 V)	600	mJ

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (TCASE = 25 °C UNLESS OTHERWISE SPECIFIED)

OFF

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
V _{(BR)DSS}	Drain-source Breakdown Voltage	I _D = 250 μA, V _{GS} = 0	200			V
I _{DSS}	Zero Gate Voltage Drain Current (V _{GS} = 0)	V _{DS} = Max Rating V _{DS} = Max Rating, T _C = 125 °C			1 50	μA μA
I _{GSS}	Gate-body Leakage Current (V _{DS} = 0)	V _{GS} = ±30V			±100	nA

ON (1)

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
V _{GS(th)}	Gate Threshold Voltage	V _{DS} = V _{GS} , I _D = 250 μA	2	3	4	V
R _{DS(on)}	Static Drain-source On Resistance	V _{GS} = 10V, I _D = 16A		0.073	0.085	Ω
I _{D(on)}	On State Drain Current	V _{DS} > I _{D(on)} × R _{DS(on)max} , V _{GS} = 10V	33			A

DYNAMIC

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
g _{fs}	Forward Transconductance	V _{DS} > I _{D(on)} × R _{DS(on)max} , I _D = 16A	10	25		S
C _{iss}	Input Capacitance	V _{DS} = 25V, f = 1 MHz, V _{GS} = 0		2850		pF
C _{oss}	Output Capacitance			420		pF
C _{rss}	Reverse Transfer Capacitance			120		pF



IRFP250

N-CHANNEL 200V - 0.073Ω - 33A TO-247

PowerMesh™II MOSFET

TYPE	V _{DS}	R _{DS(on)}	I _D
IRFP250	200V	< 0.085Ω	33 A

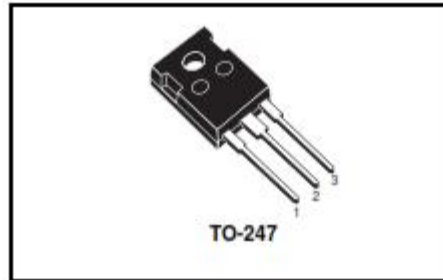
- TYPICAL R_{DS(on)} = 0.073Ω
- EXTREMELY HIGH dv/dt CAPABILITY
- 100% AVALANCHE TESTED
- NEW HIGH VOLTAGE BENCHMARK
- GATE CHARGE MINIMIZED

DESCRIPTION

The PowerMESH™II is the evolution of the first generation of MESH OVERLAY™. The layout refinements introduced greatly improve the Ron*area figure of merit while keeping the device at the leading edge for what concerns switching speed, gate charge and ruggedness.

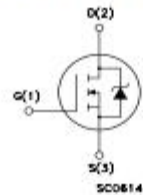
APPLICATIONS

- HIGH CURRENT, HIGH SPEED SWITCHING
- UNINTERRUPTIBLE POWER SUPPLIES (UPS)
- DC-AC CONVERTERS FOR TELECOM, INDUSTRIAL, AND LIGHTING EQUIPMENT



TO-247

INTERNAL SCHEMATIC DIAGRAM



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit
V _{DS}	Drain-source Voltage (V _{GS} = 0)	200	V
V _{DGR}	Drain-gate Voltage (R _{GS} = 20 kΩ)	200	V
V _{GS}	Gate- source Voltage	±20	V
I _D	Drain Current (continuous) at T _C = 25°C	33	A
I _D	Drain Current (continuous) at T _C = 100°C	20	A
I _{DM} (▲)	Drain Current (pulsed)	132	A
P _{TOT}	Total Dissipation at T _C = 25°C	180	W
	Derating Factor	1.44	W/°C
dv/dt(1)	Peak Diode Recovery voltage slope	5	V/ns
T _{stg}	Storage Temperature	-65 to 150	°C
T _J	Max. Operating Junction Temperature	150	°C

(*)Pulse width limited by safe operating area

(1)I_{SO} ≤ 33A, di/dt ≤ 300A/μs, V_{DD} ≤ V_{DS(on)}, T_J ≤ T_{J,MAX}

isc N-Channel MOSFET Transistor**IRFZ44N****ELECTRICAL CHARACTERISTICS** $T_c=25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN	MAX	UNIT
$V_{(BR)DSS}$	Drain-Source Breakdown Voltage	$V_{GS}=0; I_D=0.25\text{mA}$	55		V
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	$V_{DS}=V_{GS}; I_D=0.25\text{mA}$	2	4	V
$R_{DS(on)}$	Drain-Source On-Resistance	$V_{GS}=10\text{V}; I_D=25\text{A}$		0.032	Ω
I_{GSS}	Gate-Body Leakage Current	$V_{GS}=\pm 20\text{V}; V_{DS}=0$		± 100	nA
I_{DSS}	Zero Gate Voltage Drain Current	$V_{GS}=55\text{V}; V_{DS}=0$ $V_{GS}=55\text{V}; V_{DS}=0; T_J=150^\circ\text{C}$		25 250	μA
V_{SD}	Forward On-Voltage	$I_S=25\text{A}; V_{GS}=0$		1.3	V