



UAEM

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

CIICAP

Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas

**GENERADOR DE INDUCCIÓN DE BAJA TEMPERATURA
PARA AHORRO ENERGÉTICO**

Tesis que para obtener el grado de
Maestría en Sustentabilidad Energética

Presenta

I.E Elías Vázquez García

Asesor:

Dr. Jesús Escobedo Alatorre

Coasesor:

Dr. Said Robles Casolco

Nombre de los sinodales:

Dr. J. Jesús Escobedo Alatorre

Dr. Said Robles Casolco

Dr. Juan Carlos García Castrejón

Dr. Álvaro Zamudio Lara

Dr. José Antonio Marbán Salgado

Cuernavaca, Mor. a 24 de mayo del 2018

DICTAMEN



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Instituto de
Investigación en
Ciencias
Básicas y
Aplicadas

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

Jefatura de Posgrado en Sustentabilidad Energética



Cuernavaca, Morelos, a 30 de mayo de 2018.

DR. DIEGO SEURET JIMÉNEZ
COORDINADOR DE POSGRADO EN
SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA
P R E S E N T E

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada "Generador de inducción de baja temperatura para ahorro energético" que presenta el alumno **ELÍAS VÁZQUEZ GARCÍA**, para obtener el título de **MAESTRÍA EN SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA**.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es:

NOMBRE	DICTAMEN	FIRMA
DR. ÁLVARO ZAMUDIO LARA	Aprobado	
DR. JOSÉ ANTONIO MARBÁN SALGADO	Aprobado	
DR. JUAN CARLOS GARCÍA CASTREJÓN	Aprobado	
DR. SAID ROBLES CASOLCO	Aprobado	
DR. J JESÚS ESCOBEDO ALATORRE	Aprobado	

PLAZO PARA LA REVISIÓN 20 DÍAS HÁBILES (A PARTIR DE LA FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO)

NOTA. POR CUESTION DE REGLAMENTACIÓN LE SOLICITAMOS NO EXCEDER EL PLAZO SEÑALADO, DE LO CONTRARIO LE AGRADECEMOS SU ATENCIÓN Y NUESTRA INVITACIÓN SERÁ CANCELADA.

RESUMEN

En el presente trabajo, se ha diseñado un generador de Inducción electromagnética (GI) con el fin de calentar el agua destinada al aseo personal, el cual será alimentado mediante paneles solares para hacer un proyecto sustentable.

El generador de inducción, se diseñó para realizar su función de calentamiento en el tradicional depósito de agua ubicado abajo del tinaco elevado.

El objetivo fue proyectar un dispositivo no solo eficiente sino también de bajo costo económico que sustituya los calentamientos tradicionales de agua como son los efectuados mediante gas L.P y resistencia eléctrica, los cuales tienen eficiencias bajas y funcionan con energías no renovables.

En el estudio se determinó cual fue el material adecuado del dispositivo donde se iba a depositar el agua. En seguida se realizó un análisis numérico, para determinar las características de la bobina eléctrica adecuada para el GI. El paso final fue diseñar y armar el circuito electrónico, el cual constará de un circuito oscilador y un inversor para proporcionar una salida de corriente alterna a frecuencia alta que alimentará la bobina.

Los resultados fueron satisfactorios ya que se logró obtener eficiencias de calentamiento del orden del 73%, las cuales son superiores a las comúnmente encontradas en el gas y en la resistencia eléctrica.

ABSTRACT

In this work, an electromagnetic induction generator (GI) has been designed to heat the water used for personal hygiene, which will be powered by solar panels to make a sustainable project.

The induction generator was designed to perform its heating function in the traditional water tank located below the elevated tank.

The objective was to design a device that is not only efficient but also has a low economic cost that replaces traditional water heating, such as those made with L.P gas and electrical resistance, which have low efficiencies and operate with non-renewable energies.

In the study it was determined which was the appropriate material of the device where the water was going to be deposited. A numerical analysis was then carried out to determine the characteristics of the electric coil suitable for the GI. The final step was to design and assemble the electronic circuit, which will consist of an oscillator circuit and an inverter to provide an alternating current output at high frequency that will feed the coil.

The results were satisfactory since it was possible to obtain heating efficiencies in the order of 73%, which are higher than those commonly found in gas and electrical resistance.

AGRADECIMIENTOS

Con un profundo agradecimiento por todo su apoyo:

- .- A mi Madre.
- .- A mi hermana Esthela
- .- A mi sobrina Alhelí.
- .- A mi Suegra.
- .
- .- A los doctores asesores Said Robles Casolco y J. Jesús Escobedo Alatorre.
- .- A los doctores Juan Carlos García Castrejón y Susana Silva Meza .

DEDICATORIAS

- .- A mi Padre Elías (†)
- .- A mi hija Alejandra
- .- A mi esposa M^a Victoria

ÍNDICE

Dictamen	ii
Resumen.....	iii
Abstract.....	iv
Agradecimientos	v
Dedicatorias	vi
Nomenclatura	xi
Lista de figuras.....	xiii
Lista de tablas.....	xiv

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

Introducción	1
Hipótesis	4
Objetivo general	5
Objetivos específicos:	5
Justificación	5
Alcance	6

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1 Relación entre electricidad y magnetismo	7
2.1.1 Experimento de Oersted	7
2.2 Leyes Elementales del Electromagnetismo	8
2.2.1 Ley de Ampere	8
2.2.2. Ley de Biot-Savart	11
2.2.3. Ley de Faraday	12
2.3 Fenómenos relacionados con el calentamiento por Inducción	15

2.3.1	El efecto Joule	15
2.3.2	Las Corrientes parásitas	16
2.3.3.	Histéresis Magnética	17
2.3.4	Efecto Piel	18
2.4	Ventajas del calentamiento por inducción	19
2.5	Fundamentos del calentamiento por inducción.....	21
2.5.1	Principio de Funcionamiento.....	21
2.5.2	El circuito Electrónico.....	23
2.5.2.1	Inversores o convertidores.....	23
2.5.2.2	Convertidor de carga resonante.....	25
2.5.2.3	Inversor de medio puente.....	26
2.5.2.4	Semiconductores del puente inversor	27
2.5.2.5	Tiempos muertos	28

CAPÍTULO III DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1	Cálculo de parámetros eléctricos	29
3.1.1	Cálculo de frecuencia de resonancia.....	29
3.1.2	Cálculo de profundidad de penetración	31
3.1.3	Cálculo de resistencia equivalente	32
3.1.4	Cálculo de corriente en circuito oscilador	33
3.1.5	Voltaje en pieza de trabajo.....	33
3.1.6	Corriente en el primario	33

3.2	Selección de componentes del generador de inducción	35
3.2.1	Selección del depósito de agua (pieza de trabajo).....	35
3.2.2.	Selección del material de la bobina	35
3.2.3	Panel solar	36
3.2.4	Inversor	36
3.2.5	Topología del inversor	37
3.2.6	Transformador	37
3.2.7	Circuito oscilador o circuito tanque	38
3.2.8	Dispositivo controlador	38
3.3	Lista de material	39
3.4	Circuito de prueba	40
3.5	Modo de funcionamiento	40
3.6	Pruebas	41

CAPÍTULO IV ANÁLISIS DE RESULTADOS 45

CAPÍTULO V CONCLUSIONES

5.1	Conclusiones	51
5.2	Perspectivas	52
	Apéndice 1	53
	Apéndice 2	56

Apéndice 3	59
Apéndice 4	62
Bibliografía	63

NOMENCLATURA

GI	Generador de Inducción Electromagnética
CI	Calentamiento por Inducción.
L.P.	Licuado de Petróleo
Mbdglpe	Miles de barriles diarios de gas L.P. equivalentes
Fem	Fuerza electromotriz
C.A.	Corriente alterna
C.C.	Corriente Continua
C.D.	Corriente Continua
ACD.	Amperes de corriente alterna
Mosfet	Transistor de efecto de campo metal-oxido-semiconductor.
EMI	Interferencia Electromagnética
PWM	Modulación por ancho de pulsos
VSI	Inversor alimentado por voltaje
CSI	Inversor alimentado por corriente
DLC	Diodo de libre circulación
ω	Frecuencia angular
δ	Profundidad de penetración
ρ	Resistividad eléctrica
μ_R	Permeabilidad relativa
Vei	voltaje de entrada inversor

LISTA DE FIGURAS

Página

Figura 1 Demanda nacional de combustibles del sector residencial, 2015 (Secretaría de energía 2016).....	1
Figura 2. Esquema de conexiones entre panel solar (1), tinaco (2), generador de inducción en depósito de agua (3). El color verde es tubería de agua y el color amarillo es tubería eléctrica	4
Figura 3 Experimento de Oersted (Área tecnología 2015).....	8
Figura 4 Campo magnético en un conductor rectilíneo. (Univ.de Vigo)	9
Figura 5 (a) Campo magnético producido por un solenoide	10
(b) Campo magnético producido por un imán. (HyperPhysics).....	10
Figura 6 Campo magnético de un Toroide (2015).....	11
Figura 7 Campo magnético producido por un elemento infinitesimal (Físicap)..	12
Figura 8 Demostración del principio de Inducción electromagnética (Zamarro).	13
Figura 9 Ciclo de Histéresis (Lecciones de electrónica)	17
Figura 10 Comparación de eficiencias con diferentes tipos de calentamiento (Karunanithy, 2016).	20

LISTA DE FIGURAS

Página

Figura 11 Campo magnético generado por una bobina (Olmo)	21
Figura 12 Esquema de conexión de un sistema de calentamiento por inducción Electromagnética	22
Figura 13 Generación de corrientes parásitas debidos a los efectos del campo magnético	22
Figura 14 Clasificación de los inversores en base a su conmutación	23
Figura 15 Inversor de carga resonante en serie (Flores 2009)	26
Figura 16 Topología de medio puente (Martínez 2013)	26
Figura 17 Inversor con diodos DLC (Martínez 2013)	29
Figura 18 Diagrama de bloques del calentamiento mediante generador de inducción electromagnética	36
Figura 19 Circuito de prueba	40
Figura 20 Conexión de los elementos del circuito	41
Figura 21 Conexión de los equipos de medición	42
Figura 22 Registro de lecturas de los equipos de medición al inicio de las pruebas.....	443

Figura 23 Toma de temperatura de las paredes del depósito.....44

LISTA DE TABLAS

Página

Tabla 1 Lista de material que se ocupará en el circuito39

Tabla 2 Lecturas de medición en la prueba.....44

Tabla 3 Costo de material50

Parte de este trabajo de tesis, fue presentado en el Congreso internacional: **Titulado “Tercer encuentro y primer congreso internacional de la red temática en sustentabilidad energética, medio ambiente y sociedad (Red Sumas)**. Dicho evento se llevó a cabo del 11 al 15 de septiembre del 2017, en la ciudad de Cuernavaca, Morelos en el CIICAp (Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas) de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En México, según datos de la Secretaría de energía (SENER), la demanda nacional de combustibles en el sector residencial del año 2016 fue de la siguiente manera:

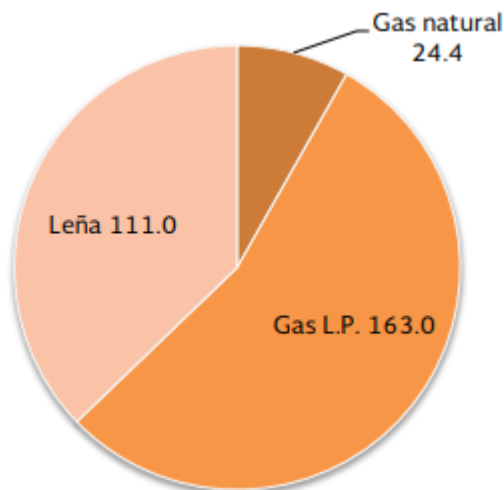


Figura 1. Demanda nacional de combustibles del sector residencial, 2016, en Mbdglpe. [Secretaría de Energía, 2017].

Como observamos en la figura anterior, la gráfica nos muestra que en el año 2016, en México, alrededor del 54.6% de la demanda nacional de combustible del sector residencial fue de gas L.P., lo que representa como vemos en la gráfica 163.0 Mbdglpe (miles de barriles diarios de gas L.P. equivalente) o lo que es lo mismo 1.025 millones de metros cúbicos diarios [Secretaría de Energía, 2017].

El gas L.P. es un combustible esencial en la vida diaria de todos los mexicanos, el 75% de los hogares utiliza este combustible como principal fuente de energía y contribuye al bienestar de la población. El sector residencial fue el mayor consumidor de gas L.P. en el 2016. (Secretaría de Energía 2017).

La enorme cantidad del consumo de gas L.P. en nuestro país, obliga a nuestra sociedad, a buscar aplicaciones más eficientes en el uso de energías renovables, además de mejorar la eficiencia de los electrodomésticos usados en el hogar.

El Calentamiento por inducción (CI) representa una opción viable para mejorar significativamente la eficiencia en el uso de energías renovables ya que proporciona calor en forma eficiente, rápida, limpia y segura.

El CI es un método por el que se consigue el calentamiento por lo general de materiales ferromagnéticos, al aplicar corriente eléctrica de alta frecuencia en un inductor o bobina la cual generará un campo magnético variable en el tiempo que inducirá un voltaje sobre un material conductor expuesto a ese campo magnético. El voltaje inducido dará lugar a que se creen corrientes parásitas en el material a calentar. Al circular dichas corrientes, crearán el efecto Joule que da lugar a la elevación de temperatura en el material ferromagnético. También el calentamiento en el metal se origina por el fenómeno de histéresis que se produce solo en materiales magnéticos y que consiste en un magnetismo remanente que origina fricción entre las moléculas dando lugar a la elevación de temperatura en el metal, sin embargo, el fenómeno de la histéresis solo contribuye con un 10% al calentamiento total del objeto metálico, correspondiendo el 90% restante de generación de calor a las corrientes parásitas.

La primera aplicación industrial de este método fue en 1887 cuando Ferrati diseñó un horno de fusión; en 1915 Wyatt utilizó la inducción electromagnética para la fundición de latón, posteriormente Midvale aplicó este calentamiento para el temple del acero, (H. L. Torres, 2016). Actualmente con el avance científico que se tiene en la electrónica de potencia, la aplicación del calentamiento por inducción ha ido creciendo de manera significativa en la metalúrgica, en la industria de los semiconductores, en el calentamiento de termoplásticos, en la industria textil, alimentos y actualmente en aplicaciones domésticas.

La eficiencia del CI se debe a que calienta directamente el material de interés, lo que nos evita pérdidas por disipación de calor y grandes ahorros de Energía. El calentamiento por Inducción presenta eficiencias de hasta el 82%, mientras que el efectuado mediante gas L.P. del 28% y el de resistencia eléctrica es del 39% [Karunanithy, 2016]. Es decir su valor de eficiencia es de más del doble en comparación con las otras formas comunes de generación de calor que tenemos actualmente. La generación de calor por inducción es rápida ya que se obtienen altas temperaturas en cuestión de segundos, se obtiene calor en forma limpia debido a que no genera residuos ya que no se quema ni se emite ningún gas, su aplicación es segura porque no existe riesgo por contacto físico.

Este proyecto fue dirigido a elaborar un generador de inducción electromagnética a bajo costo, destinado a calentar el agua que se ocupa para el aseo personal. El fin fue tratar de abaratar hasta donde sea posible el dispositivo, para que realmente represente una opción para la ciudadanía. Es decir, se diseñó un dispositivo lo más elemental posible, pero cuidando que cumpla con los requisitos generales para un buen funcionamiento.

Este generador será alimentado mediante paneles solares, los cuales nos van a proporcionar una corriente directa, que será llevada al circuito electrónico, el cual entregará una salida de corriente alterna de alta frecuencia de 97956 Hz a la bobina, para generar el calentamiento en el depósito de agua. Para efectuar dicha salida, el circuito electrónico estará constituido por un circuito inversor formado por 2 transistores, un circuito tanque resonante paralelo constituido por la bobina de trabajo diseñada y un juego de 10 capacitores con un valor de capacitancia total acumulada de 1.0 μ F. Este diseño de carga resonante tiene la característica de ser adecuado para alta potencias y permite utilizar frecuencias altas de trabajo. Los dispositivos de conmutación son transistores MOSFET (Transistor de Efecto de Campo de Metal-Óxido-Semiconductor por sus siglas en inglés) canal N, alimentado con voltaje

Los componentes básicos de un generador de Inducción son:

- .- Fuente de Potencia.
- .- El circuito electrónico.
- .- La bobina de trabajo.
- .- El objeto a calentar.

El uso del Panel Solar es con la idea de hacer de este trabajo un proyecto realmente sustentable que nos permita utilizar energía renovable para lograr el calentamiento del agua. El fin, es contribuir para incrementar el uso de este tipo de energía en nuestro país donde al cierre del 2016 las energías renovables se incrementaron en 10.17% la capacidad instalada respecto al año anterior. (Secretaría de energía. Prospectiva de energías renovables 2017-2031).

Considerando todo lo anterior visto en esta introducción, en este trabajo se presenta el diseño de un generador de inducción aplicado al depósito de agua ubicado dentro de lo que comúnmente conocemos como boiler. Este generador de inducción como ya lo comentamos anteriormente será alimentado mediante paneles solares. La siguiente figura 2 nos muestra la ubicación física del generador de inducción dentro del esquema de conexiones en un hogar.

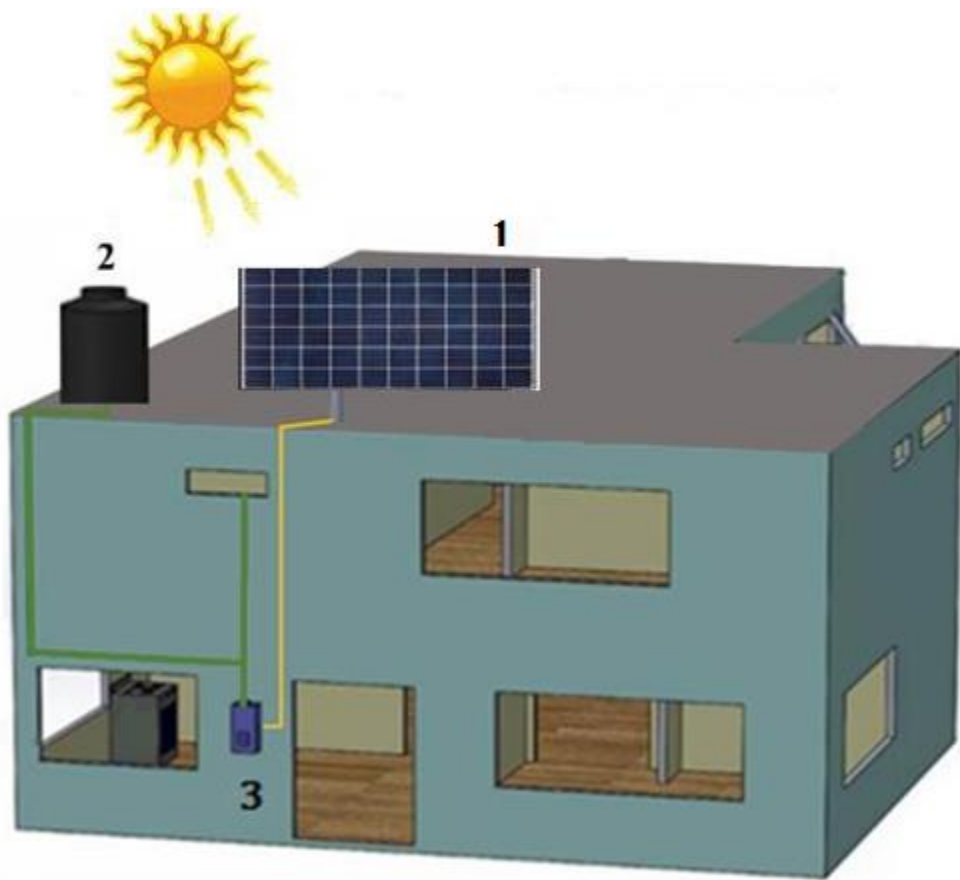


Figura 2. Esquema de conexiones eléctricas (tubería amarilla) entre panel solar(1), y generador de inducción (ubicado en depósito de agua(3)) y conexiones hidráulicas(tubería verde) entre tinaco(2) y depósito de agua(3).

HIPÓTESIS

El calentamiento por inducción, aplicado en las paredes de un depósito cilíndrico metálico puede generar elevación de temperatura en dichas paredes en tiempos cortos del orden de segundos. Dicho calor será trasladado al agua que contendrá el depósito, para poderla utilizar esta para el aseo personal. La energía consumida por el generador de Inducción será renovable ya que será la proporcionada por el panel solar.

Se espera obtener una temperatura adecuada en el agua que permita utilizarla para el aseo personal, este calentamiento se espera también sea en forma rápida de tal manera que el generador de inducción tenga un valor de eficiencia arriba del 70%.

OBJETIVO GENERAL

Diseñar y fabricar un generador de Inducción electromagnética eficiente y a bajo costo que produzca un calentamiento adecuado en las paredes de un depósito metálico que contendrá agua para poder utilizar esta en el aseo personal.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

.- Hacer un estudio para seleccionar el material adecuado para fabricar el depósito de agua donde se generará el calentamiento mediante la inducción electromagnética. Las dimensiones de este depósito también serán determinadas aquí.

.- Diseñar y fabricar la bobina que se encargará de generar el campo magnético para inducir las corrientes parásitas en el depósito de agua. La magnitud de este campo magnético deberá inducir corrientes capaces de generar un calentamiento adecuado en el depósito.

.- Diseñar y fabricar el circuito electrónico necesario para obtener la salida en corriente alterna de alta frecuencia, con que será alimentada la bobina de trabajo para que esta genere la inducción electromagnética adecuada.

JUSTIFICACIÓN

Las cada vez disminuidas, reservas mundiales de hidrocarburos, obligan a la sociedad, a encontrar métodos alternativos que nos permitan sustituir el uso de estos derivados del petróleo por energías renovables aplicadas en dispositivos que tengan un nivel de eficiencia adecuado.

Si se considera que el generador de inducción electromagnética será alimentado mediante paneles solares, las ventajas son aún mayores dado que se ocupan energías renovables para su funcionamiento. Este hecho toma relevancia si consideramos que nuestro país ocupa uno de los primeros lugares en el mundo en irradiación solar, lo que nos permitirá un funcionamiento adecuado del dispositivo.

Para abaratar costos de fabricación del generador de Inducción, se considerará un diseño elemental que cumpla con su función básica pero que entregue resultados satisfactorios en su funcionamiento y eficiencia.

ALCANCE

Con el Generador de Inducción fabricado se pretende lograr valores de eficiencia arriba del 70%, lo que representaría una opción muy adecuada considerando que se utilizará energía renovable mediante los paneles solares para su funcionamiento.

El fin es lograr un diseño eficiente y funcional, alimentado por paneles solares, que nos permita promocionarlo entre la ciudadanía para lograr la eliminación gradual de los tradicionales boiler que ocupan para su funcionamiento energías no renovables como el gas L.P. y la electricidad.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Relación entre Electricidad y Magnetismo

Dado que el calentamiento por inducción es generado por el magnetismo que emite una bobina por la que se hace circular una corriente eléctrica, lo primero que tenemos que hacer para entender el funcionamiento del generador de inducción, que es tema primordial en este proyecto, es explicar la relación tan estrecha que existe entre ambos fenómenos, la electricidad y el magnetismo.

2.1.1 Experimento de Oersted

En 1820, Hans Christian Oersted, físico y químico de origen danés, realizó un experimento que representó un parteaguas en el estudio del magnetismo ya que fue a partir de su experimento que se pudo establecer una relación entre electricidad y magnetismo lo que hasta antes de esa fecha era totalmente desconocido.

Su experimento consistió, en colocar un hilo conductor de electricidad perpendicular a la aguja de una brújula, en seguida hizo pasar la electricidad de una batería por el hilo conductor, y observó que la aguja giraba colocándose perpendicular al hilo. Al intercambiar la conexión del hilo a la batería, repitió la prueba y observó que ahora la aguja giraba al revés colocándose nuevamente perpendicular al hilo.

La conclusión a la que llegó Oersted es que las corrientes eléctricas generan fuerzas magnéticas a la que llamó campos magnéticos, y en su experimento el campo magnético generado provocaba el movimiento de la aguja. El cambio de giro de la aguja al variar la conexión a la batería se debe a que sentido de la corriente se modifica y esto último modifica también el sentido del campo magnético.

El descubrimiento del científico danés fue de tal impacto que a partir de este momento muchos hombres de ciencia se interesaron en estudiar tan importante fenómeno.

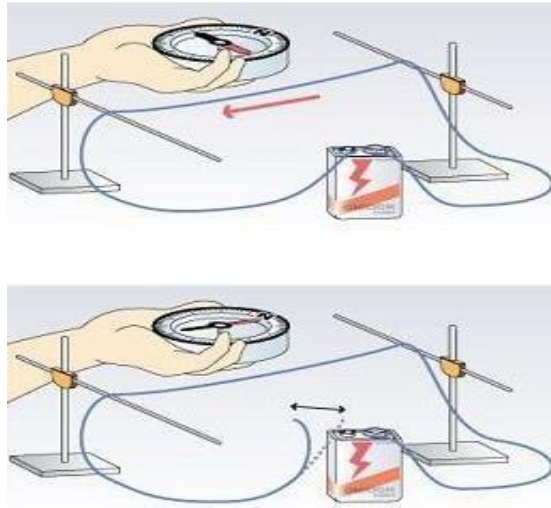


Figura 3 Experimento de Oersted (Área tecnología)

2.2 LEYES ELEMENTALES DEL ELECTROMAGNETISMO

2.2.1 Ley de Ampere

André Marie Ampere fue un matemático y físico francés. A raíz del descubrimiento de Oersted, se dedicó a estudiar de manera profunda los fenómenos electromagnéticos y fue tan importante su contribución al estudio del electromagnetismo que la comunidad científica mundial decidió nombrar con su apellido a la unidad de corriente eléctrica. Fundamentalmente A. M. Ampere obtuvo las leyes cuantitativas que relacionan los campos magnéticos producidos por corrientes en conductores

La ley de Ampere establece que, la integral de línea del campo magnético (B) a lo largo de cualquier trayectoria cerrada multiplicado por los elementos de longitud (dl) a lo largo de la trayectoria es igual a la permeabilidad del vacío (μ_0) multiplicada por la corriente (I) encerrada en dicha trayectoria.

$$\oint B dl = \mu_0 I \quad \dots\dots\dots(1)$$

Es decir:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2 \pi r} \quad \dots\dots\dots (2)$$

Donde:

μ_0 = permeabilidad magnética del vacío igual a $4 \pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$

r = distancia del centro del conductor al punto donde se desea saber el campo magnético.

Amper estableció algunos principios, entre los cuales destacan:

.- La corriente eléctrica (I) que circula en una conductor rectilíneo, crea a su alrededor un campo magnético formado por círculos concéntricos al conductor. Éste campo magnético será siempre perpendicular al conductor y para calcularlo en un punto p , situado a una distancia r del conductor (Ver figura 4), tendremos que aplicar la ecuación de la ley de Ampere.

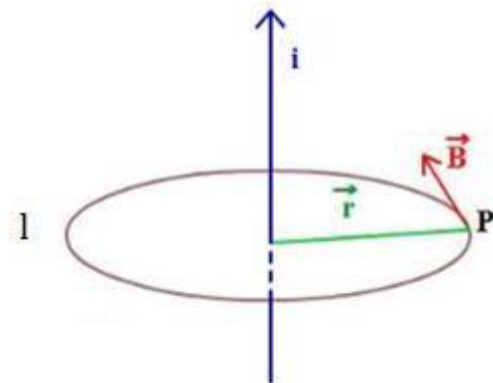


Figura 4 Campo magnético en un conductor rectilíneo. (Universidad de Vigo)

.- El campo magnético (B) a lo largo de un conductor rectilíneo varía con la distancia al alambre (r) de manera inversa al cuadrado de dicha distancia. Es decir:

$$B \propto \frac{I}{r^2}$$

Donde I = Corriente en el conductor.

.- El campo magnético en una bobina de N vueltas será igual:

$$B = \mu_0 N I \quad \dots\dots(3)$$

.- La ley de Ampere, también relaciona la intensidad de campo magnético (H) con la corriente (I) que origina el campo magnético.

$$\oint H dl = I \quad \dots\dots\dots(5)$$

Y la intensidad de campo magnético en una bobina de N vueltas es:

$$\oint H dl = N I \quad \dots\dots\dots(6)$$

.- Una bobina en forma de solenoide crea un campo magnético muy parecido al de un imán en forma de barra. (ver figura 5). El campo magnético de un solenoide se concentra en su centro, siendo su campo uniforme. El campo exterior es débil.

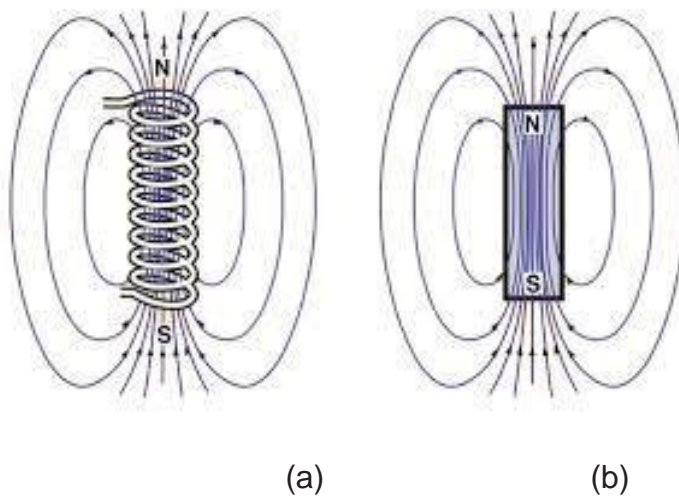


Figura 5 (a) Campo magnético producido por una bobina en forma de solenoide. (b) Campo magnético producido por un imán. (HyperPhysics).

.- Si el solenoide se hace en forma de circunferencia cerrada, la figura formada recibe el nombre de toroide. El Campo magnético de un toroide está contenido totalmente dentro del interior de la circunferencia, no habiendo líneas de campo en el exterior. (ver figura 6).

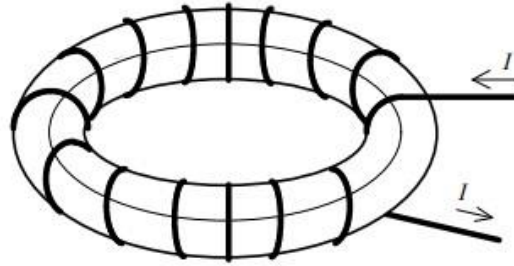


Figura 6 Campo magnético de un toroide (Universidad de Oviedo)

2.2.2. Ley de Biot-Savart

Los físicos Jean Baptiste Biot y Félix Savart también realizaron aportes al estudio del electromagnetismo. Establecieron que el campo magnético producido por elemento $I dl$ a una distancia r del mismo se calcula con la siguiente fórmula:

$$\vec{dB} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \vec{r}}{r^2} \dots\dots\dots(7)$$

En la siguiente figura 7 podemos observar que cada elemento infinitesimal de corriente $I dl$ crea en P1 un campo magnético infinitesimal dB que es perpendicular a r y a $I dl$. El campo magnético total en P1 será la suma de todos los dB originados por todos los elementos de corriente.

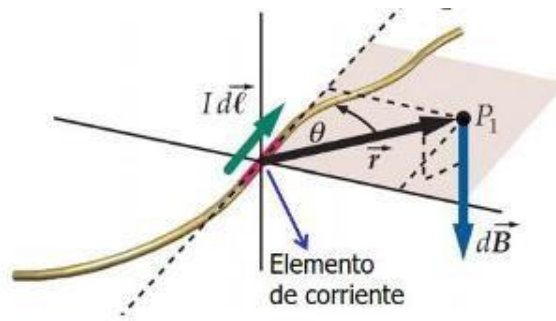


Figura 7 Campo magnético producido por un elemento infinitesimal $I d\ell$ (Físicap)
 La magnitud del campo magnético se obtiene mediante la fórmula (ver figura 6):

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl \sin \theta}{r^2} \dots\dots\dots(8)$$

2.2.3. Ley de Faraday

Michael Faraday fue un físico y químico británico, que se especializó en estudios de electromagnetismo y electroquímica. Hizo importantes aportaciones en el campo del electromagnetismo siendo tal vez el más importante el descubrimiento de lo que llamó Inducción Electromagnética donde introdujo los conceptos de “líneas de fuerza y campos”.

Demostró que si un conductor eléctrico en forma de espira se expone a una variación de campo magnético se induce una fuerza electromotriz (fem) o voltaje en el conductor. La fem será directamente proporcional a la variación de campo magnético en el tiempo que enlaza a la espira (ver figura 7). Esta demostración realizada por Faraday es a lo que llamó inducción electromagnética, lo que constituyó un hecho relevante para la historia de la electricidad ya que bajo el principio de la inducción electromagnética se puede generar electricidad. Al final del siglo XIX, los estudios realizados por Faraday, sirvieron de base al físico de origen serbio Nikola Tesla para realizar el primer generador de corriente alterna.

En la figura 8 se demuestra el principio de Inducción electromagnética descubierto por Faraday; en él se realiza un movimiento de la barra imantada, introduciéndola y sacándola en el interior de la bobina para producir un campo magnético variable que es una condición indispensable para inducir una corriente eléctrica en la bobina. Se muestra un amperímetro conectado al solenoide, en el cual la corriente inducida será

directamente proporcional a la variación de campo magnético, es decir entre más rápido se mueva la barra imantada mayor corriente indicará el amperímetro.

Si observamos la figura, el polo norte de la barra es el que entra primero a la bobina, si se realizará una prueba posterior en la que entrará primero el polo sur, originaría que al indicar un valor de corriente el amperímetro, la aguja girará al revés de cómo se movió en la primera prueba.

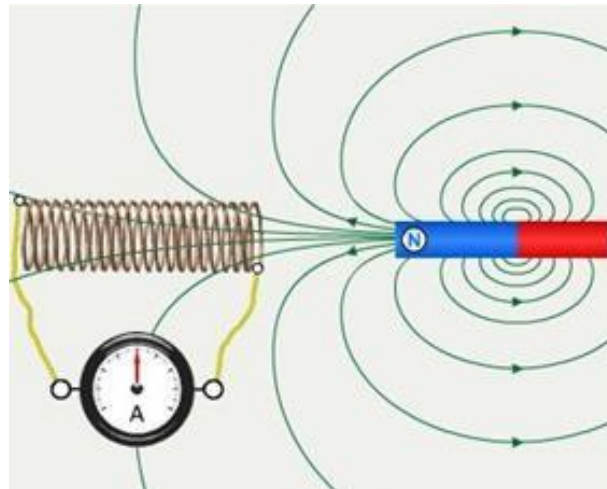


Figura 8.- Demostración del principio de Inducción electromagnética (Zamarro).

En fórmula la inducción electromagnética se muestra de la siguiente manera:

$$E = \frac{d\phi}{\Delta t} \quad \dots\dots\dots(9)$$

donde:

E = voltaje inducido en la espira

ϕ = flujo magnético

Siempre que haya un movimiento relativo entre una espira y la intensidad de campo magnético al que está expuesta dicha espira, se inducirá un voltaje en el conductor. Es decir, el campo magnético lo podemos variar por ejemplo, al acercar y alejar en

repetidas ocasiones una barra de imán a una espira, o mantener el imán estático y acercar y alejar en repetidas ocasiones la espira al imán.

La polaridad de la tensión inducida viene dada por la ley de Lenz, la cual menciona que el sentido del voltaje inducido en una espira es tal que su contribución al campo magnético se opone a la variación de flujo del campo magnético que lo produjo. Con la ley de Lenz la fórmula 9 cambia así:

$$E = - \frac{d\phi}{dt} \quad \dots\dots\dots(10)$$

La fórmula anterior es lo que es la representación matemática de lo que se llama la Ley de Faraday-Lenz. El signo menos indica el sentido de la fem inducida. En términos de corriente podemos decir que el flujo de la corriente inducida en una espira es tal que es contraria al flujo de la corriente que la produjo, es decir la corriente inducida produce un campo magnético contrario al campo que la originó, a este fenómeno del sentido inverso de la corriente generada Lenz lo atribuyó que se debía al principio general de conservación de la energía en que dado que la generación de una corriente eléctrica requiere un consumo de energía y la acción de una fuerza desplazando su punto de aplicación supone la realización de un trabajo (catedra).

2.3 FENÓMENOS ELÉCTRICOS QUE SE PRESENTAN EN EL CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN

2.3.1 El efecto Joule

Habiendo ya visto los fenómenos del electromagnetismo y las leyes que lo rigen se verá ahora el estudio de un fenómeno más, que también es importante para el fin que se persigue de conocer a fondo como se produce el calentamiento por Inducción, este es el efecto Joule llamado así en honor de su descubridor el físico inglés James Prescott Joule.

El efecto Joule consiste en que, cuando una corriente eléctrica circula por un conductor, los electrones colisionan con los átomos que encuentran en su camino cediendo los electrones parte de su energía cinética que adquieren a los átomos, originándose vibraciones en la red cristalina del conductor, esta energía termina degradándose en forma de calor.

James P. Joule definió que la cantidad de energía calorífica producida por una corriente eléctrica depende directamente del cuadrado de la intensidad de corriente, del tiempo que esta circula por el conductor y de la resistencia que opone el mismo al paso de la corriente. Su fórmula es:

$$Q = I^2 R t \quad \dots\dots\dots(11)$$

Donde:

Q = Energía calorífica producida por la corriente.

R = resistencia del conductor.

t = tiempo que circula la corriente por el conductor

I = corriente que circula por el conductor

la potencia calorífica disipada por el conductor será:

$$P = I^2 R \quad \dots\dots\dots(12)$$

2.3.2 Las Corrientes parásitas

Cuando un material conductor es sometido a un campo magnético variable aparece sobre éste una fuerza electromotriz que hace circular sobre el material unas corrientes llamadas parásitas o corrientes torbellino o corrientes de Foucault. Este último nombre es en honor al físico francés León Foucault quién las descubrió.

Las corrientes parásitas aparecen en los núcleos de transformadores o de generadores de energía y generan calentamiento que causan enormes pérdidas de eficiencia en estos dispositivos, lo que obliga a laminar los núcleos para contrarrestar el calor producido. Sin embargo, para el calentamiento por inducción las corrientes parásitas serán un factor fundamental para originar la elevación de temperatura de un material.

En la medida que aumentemos el campo magnético, las corrientes parásitas aumentarán su magnitud en el material, también el aumento de la frecuencia provocará un incremento de las corrientes, caso contrario sucede con la resistividad que es inversamente proporcional a ellas. Su fórmula es la siguiente:

$$I_{\text{parasit}} = \frac{B f}{\rho} \dots\dots\dots(13)$$

- B = campo magnético que enlaza al material.
- f = frecuencia del voltaje que provoca la inducción.
- ρ = resistividad del material.

Y la potencia de pérdidas que provocan dichas corrientes es:

$$P_{\text{parasit}} = K \frac{B^2 f^2}{\rho} \dots\dots\dots (14)$$

Donde:

- K = es una constante que depende del material
- P parasit. = potencia de pérdidas por corrientes parásitas

2.3.3 Histéresis Magnética

La histéresis magnética se presenta en materiales como el hierro, el níquel y el acero y ocurre cuando a un material sobre el que actuando un campo magnético, se le quita de manera rápida dicho campo magnético, el material no anula completamente su magnetismo, sino que permanece un cierto magnetismo residual. Esto es ocasionado por la tendencia del material a mantener su imanación u oponerse a una variación de imanación. La histéresis magnética se define como la tendencia de un material a mantener su señal magnética a pesar del retiro del campo magnético que la ha inducido.

La histéresis se manifiesta en la ambigüedad de las cantidades físicas que caracterizan el estado de la materia, bajo el cambio cíclico de algunos factores externos. La causa de la histéresis está asociada con la existencia en la materia de estados metaestables y la transición irreversible entre ellos. La histéresis es un fenómeno natural y varios modelos matemáticos se utilizan para su descripción. (Starodubtsev Y. N. 2018)

En la figura siguiente, se muestra el ciclo de histéresis de un material magnético, una bobina de N espiras por la que circulará una corriente I , creará sobre el material una intensidad de campo magnético H que provocará que el material genere una inducción o campo magnético B .

Para una intensidad de campo H_0 corresponderá un campo magnético B_0 , si ahora aumentamos H (ya sea aumentando la corriente en la bobina o aumentando el número de vueltas sobre la bobina) hasta un valor H_1 , B también aumentará hasta B_1 . Si ahora regresamos H a su valor original H_0 , B no vuelve a B_0 , sino que toma un valor diferente B_2 , obsérvese que para regresar B a su valor 0(cero), es necesario aplicar sobre la bobina una corriente de signo contrario.

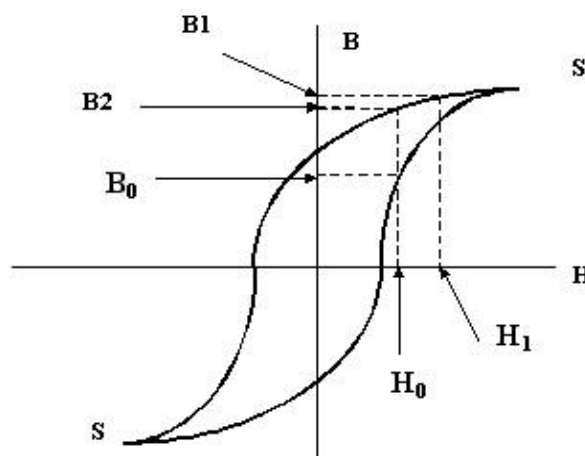


Figura 9 Ciclo de Histéresis (Lecciones de electrónica)

Observamos también en la figura anterior que S representa la saturación del núcleo magnético, es decir aquel punto en que por más que aumentamos H, el valor de B ya no aumenta, aquí decimos que el material llegó a su saturación magnética. Cada material tiene su punto de saturación diferente. También cada material tiene su propia curva de ciclo de histéresis.

La histéresis en los materiales magnéticos provoca calentamientos en el mismo material, que ocasionan problemas de eficiencia en la máquina donde se haya utilizado dicho material (se utiliza como núcleo magnético en motores, generadores, transformadores, entre otros).

2.3.4 Efecto Piel

El efecto piel (δ), también llamado efecto peculiar o efecto skin, este último por su traducción al inglés, es un fenómeno mediante el cual, la circulación de corriente se distribuye en la superficie de su sección de acuerdo a la frecuencia de dicha corriente. Se define como la distancia desde la superficie en la cual el valor de la corriente se ha reducido un 38% del valor que se tiene en la superficie. Este fenómeno solo se presenta en corriente alterna a altas frecuencias. (Rodríguez Domínguez 2017).

El efecto piel provoca que la resistencia efectiva en C.A. sea mayor que la resistencia óhmica de C.C. lo que provoca que la resistencia en C. A. este variando constantemente en función de la variación de frecuencia. La existencia del efecto peculiar demuestra la dificultad de los campos electromagnéticos para penetrar en los conductores.

En el calentamiento por inducción, cuando la pieza se somete a campos magnéticos variables, empieza a circular sobre ella corrientes eléctricas que se distribuyen en forma exponencial decreciente, siendo máximas en la superficie y despreciable a profundidades mayores a la longitud de penetración. Se dice que el 86% de la potencia será concentrada entre la superficie y el valor de profundidad del efecto piel. El valor cuantitativo del efecto piel es la profundidad de penetración y viene dado por la siguiente fórmula:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\omega\sigma}} = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}} \dots \dots \dots (15)$$

Donde:

δ = Profundidad de penetración del efecto piel

μ = permeabilidad magnética del material

σ = conductividad eléctrica del material

ρ = resistividad del material

ω = frecuencia angular

2.4 VENTAJAS DEL CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN

El calentamiento por Inducción es un método para proporcionar calor en forma eficiente, rápida, limpia, consistente y segura. Su uso es muy variado aplicándose principalmente en manufactura, en partes metálicas u otros materiales conductores de electricidad. Desde principios del siglo XX, este sistema de calentamiento ha sido utilizado ampliamente debido a sus enormes ventajas (Hincapié N.J. 2013).

Otras virtudes del calentamiento por inducción son (Lucía O., 2014):

- .- Ausencia de contacto físico entre la bobina y la pieza de trabajo.
- .- Generación de calentamiento en el lugar requerido.
- .- Ausencia de pérdidas en transferencias caloríficas.
- .- Precisión y rapidez.
- .- Fácil automatización y control del ciclo de trabajo.

Algunas aplicaciones del calentamiento por inducción (Guamán J. 2014) son:

- .- Estufas
- .- Tratamientos térmicos: recocido, templado y endurecido superficial.
- .- Fusión: forjado en caliente.
- .- Soldadura de bronce.
- .- Calentamiento de termoplásticos.
- .- Expansión para embutido.
- .- Aplicación de revestimientos.
- .- Revenido, braseado, forjado y curado en metalurgia.
- .- Calentamiento de materiales susceptibles para transferir el calor a materiales no conductores como:
 - .- El vidrio.

- Sellado de plásticos.
- Líquidos en tuberías.
- Curado de adhesivos.
- Secado de pinturas.
- Fabricación de semiconductores
- Sellado de envases

La rapidez del calentamiento por inducción es una de sus principales virtudes, lo que conlleva también a tener una eficiencia adecuada. En seguida observamos en la siguiente figura una gráfica de los resultados de eficiencia de una prueba donde se calentó 1 L de agua, utilizándose 3 diferentes métodos de calentamiento como son: Resistencia eléctrica, gas natural e inducción electromagnética.

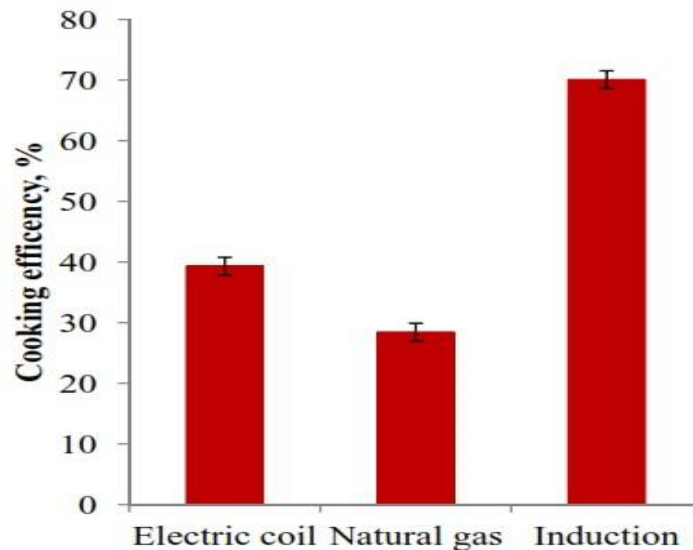


Figura 10 Comparación de eficiencias de cocción con diferentes tipos de calentamiento (Karunanithy, 2016).

Como se observa, la eficiencia del calentamiento por inducción es casi el doble comparado con el producido por resistencia y más del doble que el producido a gas.

2.5 FUNDAMENTOS DEL CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN

2.5.1 principio de Funcionamiento

El calentamiento por inducción electromagnética se modela mediante la utilización de la ley de Amper, el principio de inducción de Faraday y el efecto Joule. Para lograr un aumento de temperatura en un material conductor, se requiere en primera instancia generar un campo magnético de amplitud considerable y variable en el tiempo, de esta manera el proceso del calentamiento por inducción, comienza cuando se hace circular por un conductor en forma de bobina una corriente eléctrica la cual generará un campo magnético alrededor de la bobina. La intensidad del campo magnético será directamente proporcional a la magnitud de corriente circulante y al número de espiras de la bobina. El campo magnético generado tendrá mayor concentración en el centro de la bobina que en los alrededores de la misma. Como se muestra en la figura siguiente.

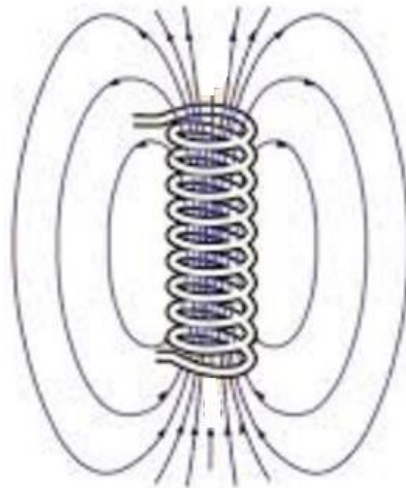


Figura 11 Campo magnético generado por una bobina (Olmo)

Las características eléctricas de la señal de corriente las proporcionará el circuito electrónico, siendo fundamental que la frecuencia tenga que estar en el rango de los kHz, dado que solo en frecuencias de esta magnitud y hacia arriba se logran tener eficiencias adecuadas en el calentamiento por inducción.

Habiéndose generado el campo magnético mediante la bobina, lo que se hace ahora es colocar dentro de ésta la pieza a calentar para someterla a dicho campo. En la figura siguiente se muestra el esquema donde se observa la colocación de los elementos que intervienen en el calentamiento por inducción:

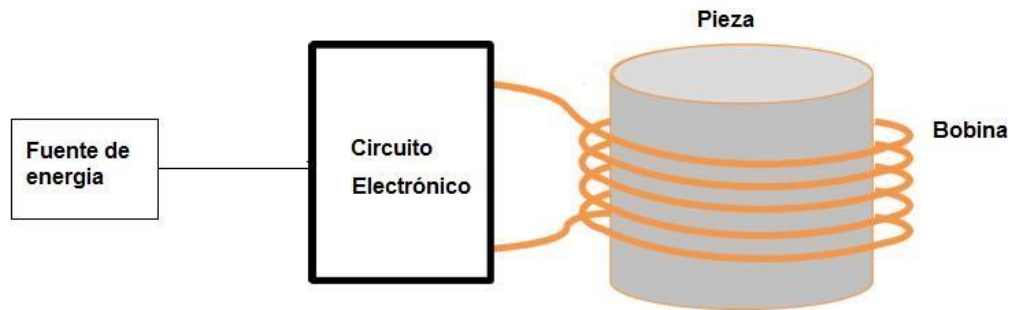


Figura 12 Esquema de conexión de un sistema de calentamiento por inducción electromagnética.

Al someterse la pieza al campo magnético generado por la bobina se inducen sobre ella corrientes eléctricas llamadas corrientes parásitas o de Foucault o torbellino, como se observa en la figura 13.

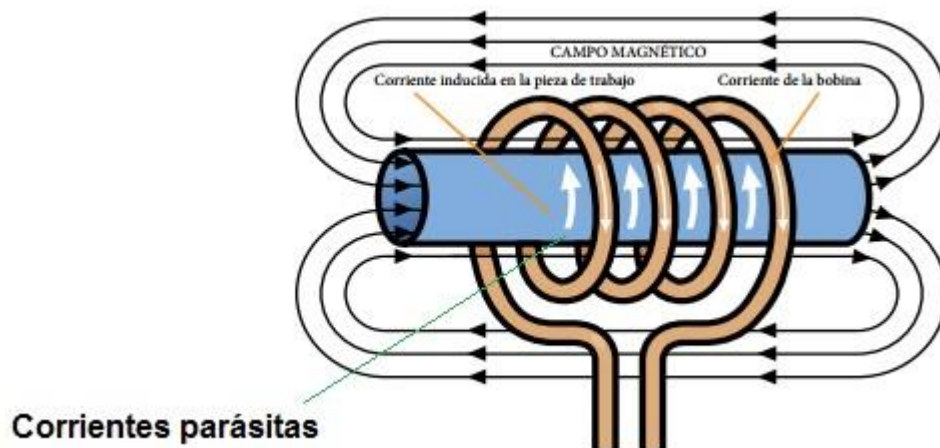


Figura 13 Generación de corrientes parásitas debidas a los efectos del campo magnético.

Estas corrientes parásitas, al circular en la pieza generan grandes calentamientos en ésta debido al efecto Joule. Este calor generado en la pieza será aprovechado en el caso de este proyecto para incrementar la temperatura del agua. La magnitud del calentamiento generado dependerá de la magnitud de dichas corrientes quienes a su vez dependerán del campo magnético generado por la bobina.

2.5.2 El circuito Electrónico

2.5.2.1 Inversores o convertidores

Sabiendo que en el funcionamiento del generador de inducción electromagnética se tiene que hacer pasar una señal de corriente alterna a alta frecuencia por la bobina de inducción, se hablará ahora del circuito electrónico que es el encargado de generar este tipo de señal.

Para generarla, tenemos primero que a partir de una fuente de corriente directa (C D), la cual provendrá de un panel solar, se alimentará un circuito inversor cuya función es modificar la señal de C.D. en corriente alterna (C.A.), además el inversor tiene la cualidad de que a esta salida de alterna se le puede modificar la frecuencia a los valores deseados.

Una clasificación de los inversores en base a su tipo de conmutación es la que se muestra en la siguiente figura 14

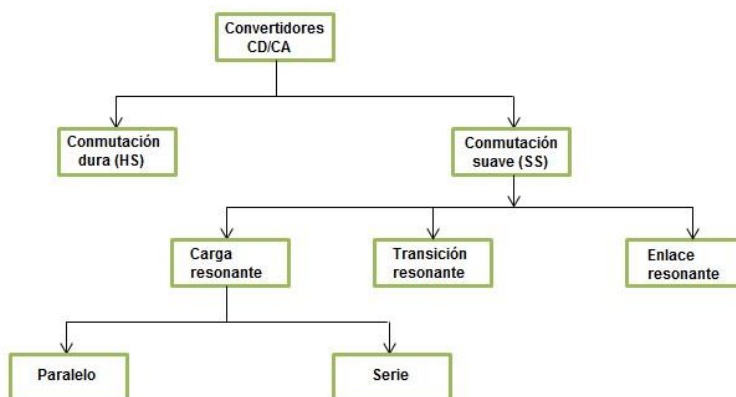


Figura 14 Clasificación de los inversores por su conmutación.

Existen diversas maneras de clasificar a los inversores, la que nos interesa para los fines de este proyecto, es la que los ordena de acuerdo a su tipo de conmutación dividiéndose en:

- 1.- Inversores de conmutación dura o HS (hard switching).
- 2.- Inversores de conmutación suave o SS (soft switching).

1.- Inversores de conmutación dura:

En el inversor de conmutación dura los interruptores que lo conforman operan en un modo conmutado donde se requiere que conduzcan o interrumpen toda la corriente de carga durante cada conmutación. Aunque este tipo de inversores son de interés en algunas aplicaciones, producen efectos que en muchos casos no son aceptables como es el hecho de que sus interruptores se encuentran sujetos a grandes esfuerzos y grandes pérdidas de potencia de conmutación que aumentan si los tiempos de conmutación son elevados, además de que el cambio brusco de la tensión y la corriente origina problemas severos de interferencia electromagnética (EMI) que afecta los circuitos de control. (Burak A. 2017)

2.- Inversores de conmutación suave:

Debido a todos los problemas que ocasiona la conmutación dura, fue necesario generar técnicas que hicieran que estas pérdidas por transiciones de voltaje y corriente sean menores, una de estas técnicas es la conmutación suave, donde los efectos se minimizan si los interruptores del convertidor cambian su estado (de activo a inactivo o viceversa) cuando el voltaje y/o la corriente a través de ellos es cero en el instante de la conmutación. (Burak A. 2017)

Este tipo de inversores de conmutación suave requieren alguna forma de resonancia LC y son conocidos como convertidores resonantes o de conmutación suave. Los convertidores de conmutación suave se clasifican en base a la posición de la red resonante en su esquema, dividiéndose en: carga resonante, transición resonante y enlace resonante. Para los fines de este estudio nos enfocaremos en los convertidores de carga resonante dado que son los utilizados en el calentamiento inductivo.

2.5.2.2 Convertidor de carga resonante.

El convertidor de carga resonante, está constituido por un inversor más un circuito resonante LC serie o paralelo. Mediante la conmutación de las llaves del inversor generan una forma de onda cuadrada a partir de una fuente de alimentación continua. Esta forma de onda es directamente aplicada al circuito resonante que da a la salida una forma de onda cercana a la sinusoidal. Al hacer resonar el circuito tanque se producen tensiones y corrientes oscilantes dando como resultado que las llaves del conmutador conmuten con cero corriente. Este modo de control es conocido como PWM (pulse width modulation) modulación por ancho de pulsos.

En este tipo de convertidores debido a la conmutación suave de sus interruptores no hay pérdidas al apagarse, además de ser especialmente adecuados para aplicaciones de alta potencia ya que permiten utilizar frecuencias altas de operación para la reducción del tamaño y peso del equipo sin sacrificar la eficiencia de la conversión en los interruptores. La principal razón del uso de este convertidor en los calentamientos inductivos es que permite obtener altos niveles de corriente circulando por el inductor, con un número reducido de pérdidas de energía de conmutación y bajo contenido de armónicos. En este tipo de convertidores la red resonante se coloca del lado de la carga. Los convertidores de carga resonante se clasifican en:

- 1.- Convertidor resonante serie.
- 2.- Convertidor resonante paralelo.
- 3.- Convertidor resonante serie-paralelo.

Convertidor de carga resonante serie:

Es un inversor con tanque resonante que alimenta a un circuito que está formado por dos elementos físicos reales, un condensador y una inductancia L, siendo esta última la bobina de trabajo, y una resistencia R que no es real sino representativa de la energía en forma de calor que se produce en el material. Estos tres elementos C, L y R están conectados en serie como se muestra en la figura 15. La topología resonante en serie amplifica el voltaje en la bobina de trabajo a un nivel superior al suministrado por el inversor y la corriente que circula en el tanque es de tipo senoidal.

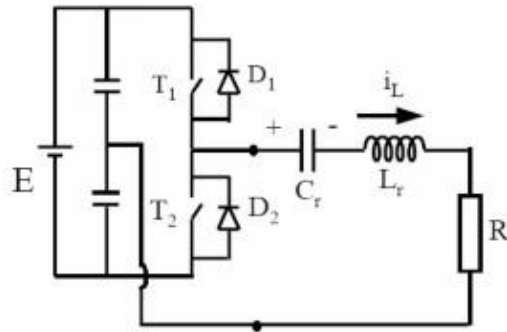


Figura 15 Inversor de carga resonante en serie (Flores 2009)

Por otra parte los inversores que se ocuparon en este proyecto del calentamiento por inducción son monofásicos y pueden ser alimentados por una fuente de voltaje (VSI) o por una fuente de corriente (CSI). Para este proyecto ocuparemos de los alimentados por fuente de voltaje, siendo éstos los más usados normalmente.

Existe una clasificación más dentro de las topologías de los inversores resonantes VSI, se dividen en: Configuración de medio puente, puente completo y push-pull. Nos enfocaremos a estudiar solamente la configuración de medio puente que es la se utilizó en este proyecto.

2.5.2.3 Inversor de medio puente

Como se observa en la figura 16, este inversor emplea 2 capacitores para crear un punto a una tensión flotante igual a la mitad de la tensión de entrada. En la parte derecha de la figura se observa que la señal cuadrada bipolar de valor máximo igual a $E/2$, esta señal corresponde a la tensión de salida:

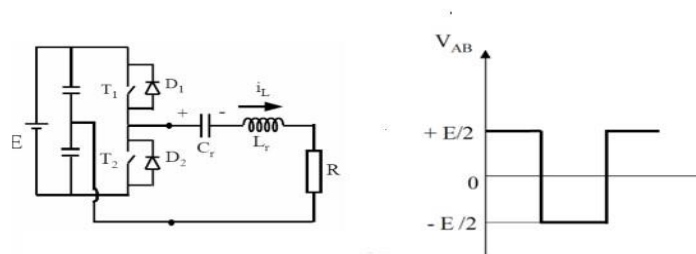


Figura 16 Topología de medio puente

Dentro de las ventajas de este tipo de configuración tenemos:

- Presenta una conmutación estable y menores esfuerzos en los interruptores de potencia.
- Es de bajo costo.
- Emplea solo 2 interruptores.
- Al ser la señal bipolar no aplica componentes de CD al circuito resonante.
- El diseño del componente de control de conmutación dentro de un circuito puede ser racionalizado.

Dentro de las desventajas tenemos:

- El empleo de 2 interruptores para su conmutación vuelve el proceso de trabajo más complicado. Estos interruptores soportarán el doble de tensión aplicada al circuito resonante.
- Se requiere de tierras aisladas.
- Como S1 no está referido a tierra es necesario emplear algún tipo de circuito de disparo que permita aplicar una tensión flotante.

2.5.2.4 Semiconductores del puente inversor

El puente inversor estará formado por semiconductores necesarios para la conmutación, los cuales serán transistores MOSFET (metal oxide semiconductor field effect transistor, por sus siglas en inglés) los MOSFET son ocupados para altas frecuencias con bajas potencias de trabajo. Este transistor es con enriquecimiento de canal n.

Los transistores MOSFET tienen 3 zonas de funcionamiento: zona óhmica, zona de corte y zona de saturación. En electrónica de potencia solo se utilizan 2 estados ya que el transistor trabajará como interruptor. La zona de corte corresponde en forma equivalente a un circuito abierto entre las terminales del drenador y el surtidor, en esta región el dispositivo se encuentra apagado, es decir se comporta como interruptor abierto. La zona óhmica corresponde a interruptor cerrado.

El funcionamiento como inversor del transistor MOSFET N, se basa en sus características en conmutación pasando de la región de corte a la región óhmica. Se denomina inversor porque la tensión de salida es de nivel opuesto a la tensión de entrada. Lo único que se requiere en los circuitos de conmutación es que las tensiones de entrada y salida se puedan reconocer fácilmente ya sea en nivel alto o bajo.

Las principales ventajas del MOSFET son su gran velocidad y pérdidas mínimas de conmutación, su poca variación de comportamiento con respecto a la temperatura, su pequeña potencia de control y alta impedancia de entrada que le permite realizar el control desde los circuitos integrados.

Dentro de sus desventajas es que son sensibles a las cargas electrostáticas y se tiene dificultad para protegerlo.

2.5.2.5 Tiempos muertos

En un inversor ideal sus llaves conmutan en tiempo cero y responden sin retardo a la señal de comando, esto significa que el inversor trabaja precisa y rápidamente como las señales del PWM. En la práctica las llaves del inversor son transistores los cuales tienen tiempos de conmutación finitos. (Ludek Buchta, 2015)

Dado que el tiempo de apagado es mayor que el de encendido, debe introducirse un tiempo de seguridad para evitar un cortocircuito en la columna del inversor, este tiempo de seguridad se denomina comúnmente tiempo muerto.

El tiempo muerto es un tiempo de retardo en las señales de activación de los dispositivos. El tiempo de retardo queda determinado por el valor máximo del tiempo de almacenamiento (este es el tiempo de retardo de apagado), más un intervalo de tiempo adicional por seguridad que comúnmente se toma igual a 3 o 4 veces el tiempo de almacenamiento.

Si bien el tiempo muerto garantiza una operación segura, también afecta de manera adversa al inversor debido a que mientras transcurre el tiempo muerto, las dos llaves están abiertas y la tensión en la columna está impuesta por la carga de tal manera que la forma de onda de salida es distinta de la generada por el modulador repitiéndose una y otra vez para cada instante de conmutación. Esto se conoce como efecto de tiempo muerto.

CAPÍTULO III

DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS.

Resumiendo, en un esquema de bloques, todas las etapas del funcionamiento del generador de inducción que se tiene en el proyecto, se puede esquematizar de la siguiente manera:

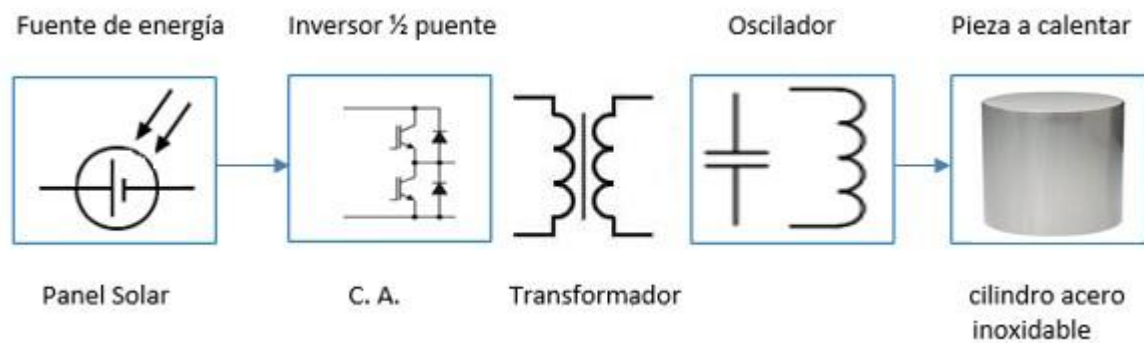


Figura 17 Diagrama de bloques del calentamiento mediante generador de Inducción electromagnética

Antes de seleccionar los componentes de nuestro generador de inducción, lo primero que tenemos que hacer es realizar todos los cálculos de las variables eléctricas que nos permitan seleccionar la capacidad de dichos componentes.

3.1.1 Cálculo de frecuencia de Resonancia:

Primero se calculó la frecuencia (f) de resonancia del circuito, es decir aquella frecuencia donde se presentará la máxima transferencia de energía a la pieza de trabajo.

Partiendo de la fórmula para el cálculo de la frecuencia de resonancia se tiene:

$$\omega = 1 / \sqrt{LC} \quad \dots\dots\dots (16)$$

Donde:

ω = Frecuencia angular = $2\pi f$

L = Inductancia de la bobina (bobina de trabajo)

C = Capacitancia (referente al capacitor del circuito tanque)

Despejando (f):

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \dots\dots\dots (17)$$

Para poder determinar el valor de (f) debemos establecer de principio el valor de capacitancia de los capacitores que utilizaremos en el tanque resonante.

Se decidió utilizar un capacitor de 0.1 μ F esta magnitud se seleccionó para poder tener un valor de frecuencia (f) alto, en base a fórmula (17).

Se determinó también colocar 10 capacitores en paralelo para que puedan soportar la corriente con la que se trabajará en este circuito, la cual debe ser así para que pueda trabajar correctamente el generador de inducción.

La capacitancia total será la suma de los 10 capacitores en paralelo, por lo tanto:

$$C = 10 \times 0.1 \mu\text{f} = 1 \mu\text{f}$$

La inductancia de la bobina de trabajo se calculará por la fórmula de Wheeler:

$$L = \frac{r^2 N^2}{23r + 25l} \dots\dots\dots (18)$$

Donde:

r = radio de la bobina.

N = vueltas o espiras de la bobina.

l = altura de la bobina.

Al igual que con el capacitor, fue necesario aquí determinar de principio las dimensiones de nuestra bobina de trabajo que utilizaremos, considerando que en el interior de dicha bobina deberá tener cabida el depósito donde calentaremos el agua. De esta manera el radio de la bobina será de 0.11 m, el número de vueltas será de 4, y la altura de la bobina tendrá 0.19m.

Sustituyendo en (18)

$$L = \frac{(11)^2 (4)^2}{23(11) + 25(19)} = 2.6593 \mu\text{H}$$

Sustituyendo en (17):

$$f = 1 / 2 \pi \sqrt{(2.6593 \times 10^{-6} \text{ H}) (1 \times 10^{-6} \text{ F})}$$

$$f = 97956 \text{ Hz}$$

La cual será nuestra frecuencia de resonancia que tendremos que generar en nuestro circuito electrónico.

3.1.2.- Cálculo de profundidad de penetración (efecto piel)

Esto se realizará mediante la fórmula siguiente:

$$\delta = 503 \sqrt{\rho / \mu r f} \dots\dots\dots (19)$$

Donde:

ρ = Resistividad del acero inoxidable (ρ)

μr = permeabilidad relativa del material de la pieza (acero inoxidable 430)

f = frecuencia de resonancia

Por lo que se observa, para poder realizar este cálculo, fue indispensable determinar el material del depósito que utilizaremos para calentar el agua, al cual llamaremos de ahora en adelante pieza de trabajo, más adelante se indicarán los parámetros que se tomaron en cuenta para seleccionar la pieza, por lo pronto se tiene que el material seleccionado es acero inoxidable 430 cuyo valor de resistividad eléctrica (ρ) es de $6 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$ y su permeabilidad relativa es de 500 (adimensional).

Sustituyendo en (19):

$$\delta = 503 \sqrt{(6.25 \times 10^{-7} \text{ ohm} \cdot \text{m}) / (500) (97596 \text{ Hz})}$$

$$\delta = 5.69 \times 10^{-5} \text{ m}$$

3.1.3.- Cálculo de la resistencia equivalente (Req.)

R_{eq} = resistencia de la pieza de trabajo + resistencia de la bobina

Dado que la resistencia de la bobina se considera despreciable por ser un valor tan pequeño, se tiene que la resistencia de la pieza de trabajo será:

$$R_{eq} = \rho / \delta \quad \dots\dots\dots (20)$$

Donde ρ es la resistencia óhmica de la pieza de trabajo y δ es la profundidad de penetración calculada anteriormente. Sustituyendo en (20), tenemos:

$$R_{eq} = (6.25 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}) / 5.55 \times 10^{-5} \text{ m} = 0.011 \text{ Ohms}$$

3.1.4.- Cálculo de la corriente en el circuito oscilador (I_{CO})

Dado que se estableció alimentar el circuito con una potencia de 576 watts, esta será la potencia que se disipará en la carga, la resistencia equivalente calculada fue de 0.011 ohms en la carga, entonces si aplicamos la siguiente fórmula para el cálculo de la corriente en el circuito oscilador (I_{CO}), se tiene:

$$P = I_{CO}^2 R_{EQ} \quad \dots\dots (21)$$

Despejando I_{CO} :

$$I_{CO} = \sqrt{P/R} = \sqrt{576 \text{ W} / 0.011 \text{ ohms}} = 228.83$$

3.1.5.- Voltaje en la pieza de trabajo (V_{PT})

El voltaje de la pieza de trabajo (V_{PT}) será el que se tenga en el secundario del transformador, por lo que:

$$V_{PT} = \sqrt{PR} = \sqrt{576 \text{ W} \cdot 0.011 \text{ ohms}} = 2.51 \text{ V}$$

3.1.6.- Corriente en el primario (I_p):

Ya que la relación de transformación (m) entre el primario y el secundario del transformador se puede calcular de la siguiente manera:

$$m = \frac{V_p}{V_s} \quad \dots\dots\dots(22)$$

Donde:

V_p = voltaje primario

V_s = voltaje secundario

Para el voltaje primario se considerará que para efectos de prueba se colocarán 2 baterías de 12 VCD en serie obteniendo un voltaje de 24VCD.

$$m = \frac{24 V_p}{2.51 V_s} = 9.56$$

Dado que la relación de transformación (m) también es:

$$m = \frac{I_s}{I_p} \dots\dots\dots(23)$$

Despejando I_p de (23):

$$I_p = \frac{I_s}{m} = \frac{228.83 A}{9.56} = 23.93 A$$

3.2 Selección de componentes del generador de inducción

Después de calcular los valores de voltaje, corriente, frecuencia de resonancia y profundidad de penetración del circuito se procederá a la selección de los dispositivos.

3.2.1.- Selección del depósito de agua (pieza de trabajo)

Lo primero que se hizo fue seleccionar el material del depósito de agua que se ocupará en el experimento. Dicho material debe contar con una característica primordial que es tener una permeabilidad muy alta, además de ser comercial para que se pueda encontrar en el mercado y otro detalle importante, debe ser de un precio accesible.

Se seleccionó el acero inoxidable 430 por las siguientes razones (ver apéndices 3 y 4):

1. Tiene un valor de permeabilidad magnética relativa alta (500) dentro de los aceros oxidables que existen.
2. Posee un valor bajo de calor específico (460 J/kg °C) , lo que beneficia para la función que se pretende que realice.
3. Dentro de los aceros inoxidables ferromagnéticos tiene un valor adecuado de conductividad térmica (26.1 W/m °C).
4. Tiene buena resistencia a una amplia variedad de medios corrosivos.

Se mandó fabricar un depósito en forma de cilindro con 19 cm de altura y 20 cm. Las dimensiones de este depósito fueron calculadas para tener una capacidad de 6 L.

3.2.2.- Selección del material de la bobina

Para el diseño de la bobina se partió del hecho de que esta debía ser de una altura de tal manera que cubriera el depósito de agua que iría en su interior. es decir 0.19 m. (ver figura18). Por el mismo motivo el diámetro de la bobina fue de 0.20m.

Se decidió también hacerla de 4 vueltas o espiras para que su valor de inductancia fuera bajo y de esta manera este valor contribuyera a tener un valor alto de frecuencia (ver fórmula 17), que es un requisito indispensable para el buen funcionamiento del generador de inducción. Se devanó la bobina con tubo de cobre flexible de 5/16, por 2 razones principales:

- 1.- Cuando la corriente alterna viaja en altas frecuencias, los electrones solo viajan por el exterior del conductor.

2.- En determinado momento se puede tener la opción de hacer circular agua por el interior del tubo para refrigeración.



Figura 18 Bobina y cilindro a calentar.

Observando la figura 18, se tienen los elementos que intervienen en el proceso del calentamiento por inducción, la selección de cada uno de los componentes se hizo de la siguiente manera:

3.2.3 Panel solar

Será la fuente de energía que nos proporcionará corriente directa, para el funcionamiento del circuito, esta corriente irá directamente al inversor. Dado que se pretende que el diseño del generador de inducción tenga una capacidad nominal de trabajo de 1500 watts, entonces consultando las capacidades comerciales que existen de valores de potencia de estos productos se optó por escoger el de 300 watts, marca ERDM, de 8.47 A y 35.58 VCD de salida, monocristalino, de 60 celdas.

3.2.4 Inversor

Para el funcionamiento del calentamiento por inducción es necesario el uso de una fuente de alimentación de alta frecuencia encargada de alimentar la carga resonante, para tal fin, fue necesaria la utilización de un inversor el cual está compuesto de dos convertidores estáticos de potencia al que comúnmente conocemos como transistores, la función del inversor es convertir un voltaje de

C.D. a un voltaje simétrico de salida en C.A., con la ventaja de poder modular la frecuencia de salida que queramos, para tal fin, se usó un dispositivo semiconductor mosfet (Transistor de efecto de campo metal-oxido semiconductor) alimentado por voltaje, el cual está diseñado para soportar los niveles de potencia que demandará el circuito, además de que puede trabajar a frecuencias altas como el caso de nuestro proyecto.

Los inversores utilizados en el calentamiento inductivo pertenecen a la familia de inversores de carga resonante. Este tipo de inversores cuando están conmutando a la frecuencia de resonancia permiten que los equipos trabajen con alta eficiencia (Martínez 2013). Sin embargo, su principal característica del porque se utilizan en este sistema de calentamiento, es que no obstante que se trabaje con corrientes de gran magnitud en la bobina de trabajo las pérdidas por conmutación en estos inversores no son considerables, debido a que la corriente que circula por el inversor es más pequeña que la que circula por la bobina de trabajo.

El transistor seleccionado para el circuito inversor será el Mosfet IRFP32N50KPBF, de tipo incremental de canal N, monofásico, el cual tiene una alta velocidad de conmutación y será alimentado con voltaje, este dispositivo tiene las siguientes características que son esenciales para el funcionamiento del generador de inducción:

- 1.- Cuando conmuta a la frecuencia de resonancia sus pérdidas son bajas, haciendo con esto que los componentes que conforman el sistema de calentamiento inducción tengan también muy buena eficiencia.
- 2.- Puede trabajar a corrientes altas con un número reducido de pérdidas en conmutación y bajo contenido de armónicos.

Las características técnicas de este dispositivo se podrán encontrar en el apéndice 1.

3.2.5 Topología del inversor

Se utilizará una configuración del inversor de medio puente con carga resonante, se escogió esta configuración debido a que permite que los esfuerzos en los interruptores sean menores, es decir su conmutación es más estable.

3.2.6 Transformador

En seguida tendremos el transformador cuya función será la de aislar físicamente el circuito de control del circuito de carga con el fin de no dañar los elementos del control debido a una falla en el circuito de carga. A este tipo de aislamiento se le conoce como galvánico. Otra característica del transformador será que nos podrá proporcionar valores de corriente de mayor magnitud en el secundario, debido a la relación de transformación con la que se diseñó este dispositivo.

3.2.7 Circuito Oscilador o Circuito Tanque:

El circuito tanque o circuito oscilador, estará formado por el paralelo de una bobina de trabajo y un banco de capacitores. La función del capacitor es vital para el funcionamiento del generador de inducción, dado que si la carga del circuito está conformada solo por la bobina, la carga que será puramente inductiva provocará un defasamiento de 90° entre la tensión y la corriente, yendo la corriente atrasada con respecto al voltaje, generando una componente de potencia reactiva de gran magnitud y provocando con esto una disminución de la energía transferida a la carga, lo que se traduce como una eficiencia bajísima en el generador de inducción.

Si al problema de eficiencia mencionado anteriormente se adiciona que los inversores que se utilizarán en el circuito generan pérdidas en su conmutación el problema es aún mayor.

El fin de colocar el capacitor en paralelo es que este introduzca al circuito la reactancia capacitiva necesaria para anular la reactancia inductiva introducida por la bobina de trabajo para que de esta manera el voltaje y la corriente estén en fase y así la potencia reactiva tenga un valor de cero, lo que finalmente se traduce como que toda la energía proporcionada al circuito será ocupada para realizar trabajo, logrando con esto una eficiencia muy alta en el generador de inducción. De esta manera al colocar el inductor y el capacitor en paralelo se obtiene un circuito resonante. Los valores de capacitancia e inductancia en paralelo ayudarán al cálculo de la frecuencia de resonancia que se aplicará al circuito electrónico.

Los capacitores seleccionados para el circuito tanque serán de cerámica, 2000V y $0.1 \mu\text{F}$, de alta potencia para soportar las condiciones de trabajo del generador de inducción.

3.2.8 Dispositivo controlador:

Como circuito controlador de los transistores mosfet se utilizará el IR2110PBF, este circuito integrado controlará el flujo de corriente y el nivel de voltaje para el accionamiento de los transistores mosfet. Las características técnicas de este dispositivo se podrán encontrar en el apéndice 2. Para el accionamiento de los interruptores de los transistores, este circuito se programó en lenguaje C, compilándolo en seguida, para introducirlo al IR2110PBF.

3.3 Lista de material

La lista de los materiales que se utilizarán en el circuito se muestra a continuación:

	Material	Cantidad
1	Capacitor de Tantalio 10 V, 10 μ F, 20%.	2
2	Capacitor de película 400 VDC, 4.7 μ F.	2
3	Resistor de película metálica, 4.3 ohm, ¼ watt, 1%.	2
4	Capacitor de cerámica, 0.1 μ F, 50 V, 10%.	2
5	Puente rectificador de diodos, 35 A, 1 kV.	1
6	Capacitor de película, 300V, 0-0068 μ F, 20%.	1
7	Rectificador MUR ultra rápido, 600 V, 15A.	4
8	Capacitor electrolítico de aluminio, 200V, 1500 μ F.	2
9	Toroide de ferrita, 65.5 mH.	1
10	Controlador IR2110PBF	1
11	Opto acopladores de alta velocidad 10 Mbd	2
12	Resistor de película de metal, 1/3 W, 1 kohm, 1%.	2
13	Resistor de película de metal, 350 ohm, 1%.	2
14	Resistor de película de metal, 47R , 1%.	2
15	Diodo zener, 15 V, 5W	4
16	Capacitores de disco de cerámica, 100pF, 1 kV.	2
17	Capacitor de cerámica, 0.1 μ F, 2000 V.	10
18	Capacitor de disco de cerámica, 15 pF, 500V	2
19	Mosfet IRFP32N50KPBF, canal N, 500 V, 32 A	2
20	Rectificador BYW29, 200 V, ultra rápido	2
21	Resistor de película metálica, 1.5 kohm, ¼ watt, 1%.	2
22	Rectificador MBR6045, 2x30 A, 45V.	2
23	Capacitor cerámico de disco 15 μ F, 500V, 2%.	1

Tabla 1 Lista de material que se ocupará en el circuito

3.4 Circuito de prueba

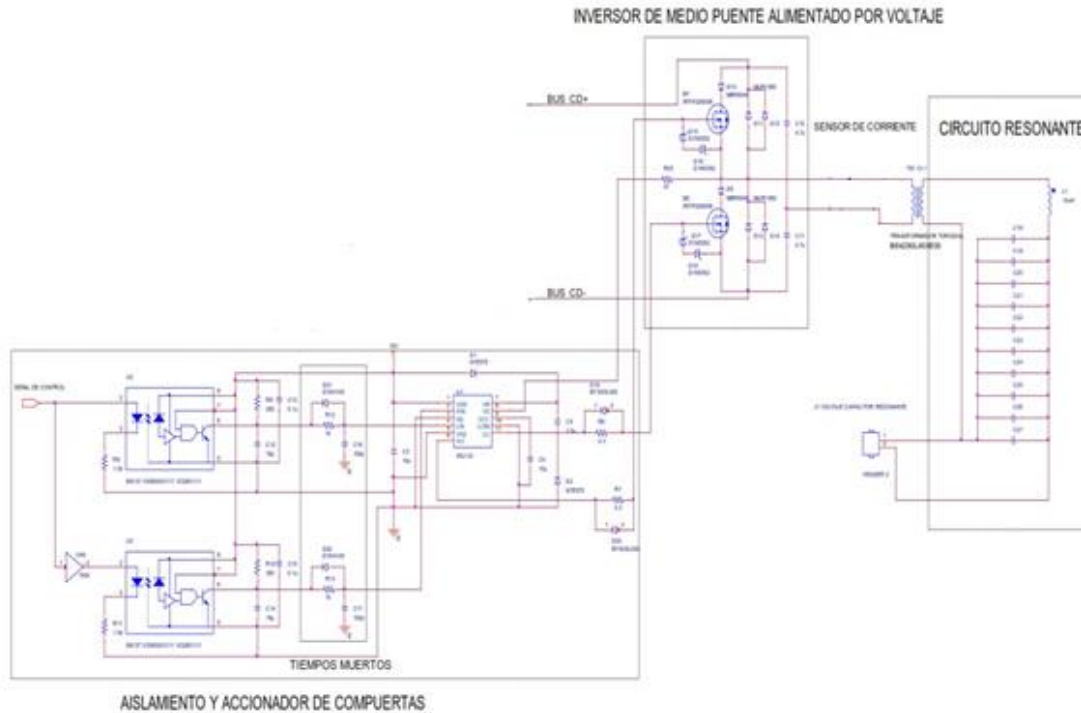


Figura 19 Circuito de prueba

3.5 Modo de funcionamiento

La alimentación de corriente directa proveniente del panel solar será directamente al inversor de medio puente el cual convertirá la corriente directa en alterna con una frecuencia que le será enviada por el dispositivo controlador IR2110PBF.

Es decir, el circuito inversor accionará sus interruptores con la orden que reciba del controlador, el cual será previamente programado para poder dar una salida de frecuencia de 97956 Hz.

El circuito inversor alimentará el transformador de voltaje, el cual, debido a su relación de transformación, permitirá tener valores de corriente mucho más altos en el circuito resonante que en el circuito inversor. El transformador alimentará el circuito oscilador compuesto por la bobina de trabajo y 10 capacitores, ambos conectados en paralelo. La bobina de trabajo tendrá en su interior la pieza de trabajo, que será un depósito de acero inoxidable 430 con capacidad de 6 litros. Este depósito será previamente llenado de agua antes de iniciar las pruebas.

Al entrar en funcionamiento el dispositivo de prueba comenzará a calentar las paredes del depósito, transfiriendo este calor al líquido en su interior.

3.6 Pruebas

En esta etapa se procedió a realizar las pruebas para tratar de obtener los resultados teóricos vistos en este proyecto, se hace la observación que nos fue imposible realizar mediciones de diferentes variables en el circuito de carga debido a no contar con los equipos adecuados para el nivel de frecuencia con que se trabajó en esta parte del circuito.

Se procedió a alambrear el circuito mostrado en hoja anterior:



Figura 20 Conexión de los elementos del circuito

Como se observa en la figura 20, se procedió a conectar los elementos del circuito. Para simular la función del panel solar se utilizaron 2 baterías de 12 VCD conectadas en serie para obtener un voltaje de 24 VCD para alimentar el circuito electrónico. La salida del circuito electrónico alimentará la bobina de trabajo la cual fue devanada con tubo de cobre flexible de calibre 5/16, dicha bobina tendrá en su interior la pieza de trabajo es decir el depósito de acero inoxidable 430 al cual se le colocará 800 ml de agua.

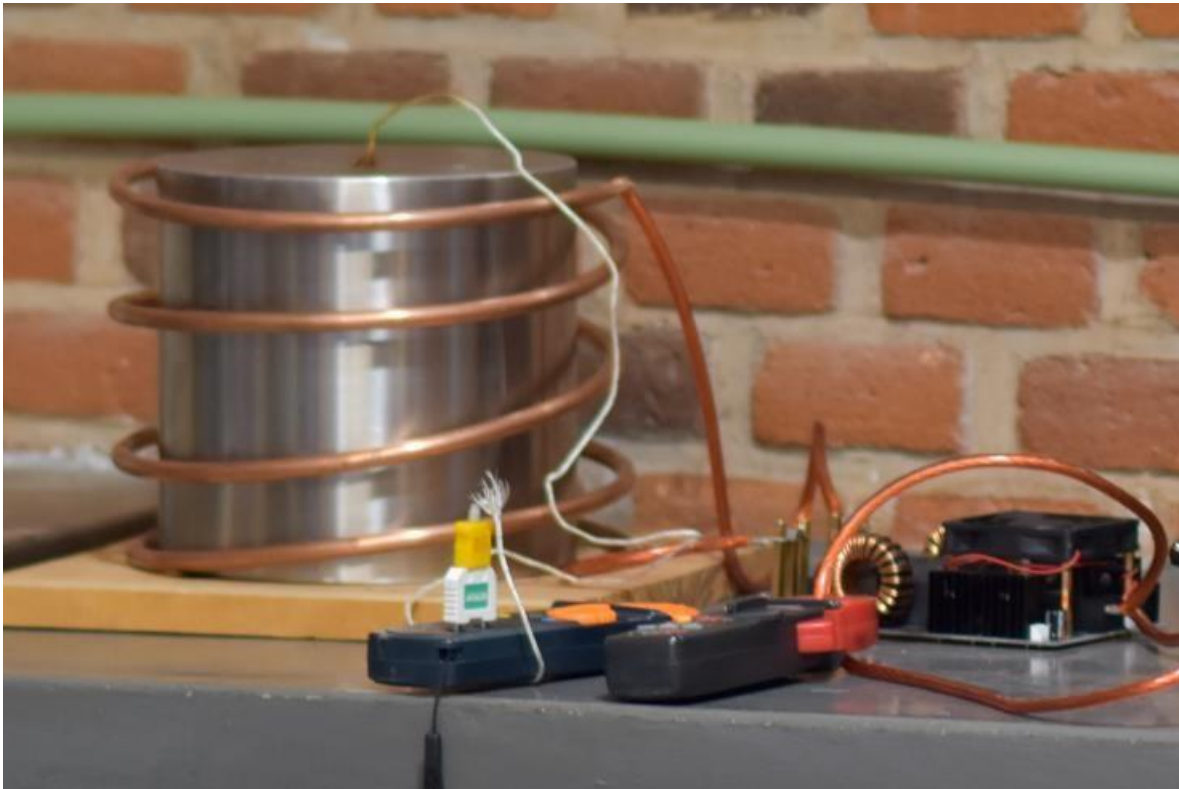


Figura 21 Conexión de los equipos de medición.

En la figura 21 tenemos la conexión de los equipos de medición al circuito, el termómetro (ubicado junto a bobina) el cual es de marca truper, medirá la temperatura del agua en el interior del depósito y el amperímetro (ubicado a la derecha), marca craftsman medirá la corriente a la salida de las baterías.

En la figura 22 que está a continuación, se observa, que se incorporó un voltmetro, marca Unit-T el cual medirá el voltaje de salida de las baterías (ubicado a la izquierda).



Figura 22 Registro de lecturas de los equipos de medición al inicio de las pruebas.

Teniendo todo listo, se procedió a cerrar el circuito, registrándose las siguientes lecturas que se muestran en la tabla 3.

Como se observa el voltaje de las baterías registra 23.24 volts, la temperatura inicial del agua fue de 21°C y la corriente inicial de salida de las baterías fue de 24.9 ACD.

En seguida se tomaron los registros de lectura de los aparatos de medición los cuales se muestran en la tabla 3 que se muestra a continuación.

Tiempo (s)	Corriente (ACD)	Voltaje (VCD)	Temperatura (°C)
0	0	0	21
1	24.1	23.24	21
60	24.9	23.23	23
88	24.5	23.22	27
98	24.5	23.21	30
112	24.4	23.19	35

Tabla 2 Lecturas de medición en la prueba

En seguida se muestra en la imagen 24 el momento cuando la temperatura del agua alcanza los 35°C.



Figura 23 Obtención de los 35°C en el agua

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Si se analiza los resultados obtenidos, se puede deducir que partiendo de la energía necesaria para elevar la temperatura del agua de 21°C a 35 °C como fue el caso de esta prueba, se tiene que:

$$E = m C_p (T_f - T_i) \dots\dots\dots(24)$$

Donde:

C_p = calor específico del agua

T_f = temperatura final del agua

T_i = temperatura inicial del agua

E = Energía

m = masa del agua (0.8 L = 0.8 kg)

Sustituyendo:

$$E = 0.8 \text{ Kg} (4186 \text{ J/kg K}) ((35 + 273.15 \text{ K}) - (21 + 273.15 \text{ K}))$$

$$E = 46883 \text{ J}$$

El valor anterior de energía representa también la energía de salida (E_s) del generador de inducción aplicada a la pieza de trabajo, es decir:

$$E_s = 46883 \text{ J}$$

El valor de la potencia de entrada (P_e) al circuito se puede calcular así:

$$P_e = V \cdot I \quad \dots\dots\dots (25)$$

Donde:

V = Voltaje de entrada al circuito (El que corresponde a la lectura de 35 °C)

I = Corriente de entrada al circuito ((El que corresponde a la lectura de 35 °C)

P = Potencia de entrada al circuito

Sustituyendo en 24:

$$P_e = (24.4 \text{ V}) \cdot (23.19 \text{ A}) = 565.836 \text{ W}$$

Si se multiplica esta potencia por el tiempo que le llevo al circuito elevar el agua de 21 °C a 35 °C, se tiene que la energía de entrada (E_e) al circuito:

$$E_e = P \cdot t \quad \dots\dots\dots(25)$$

Sustituyendo:

$$E_e = (565.836 \text{ W}) (112 \text{ s}) = 63373 \text{ W s} = 63373 \text{ J}$$

Entonces se calcula la eficiencia del generador de inducción (η_{GE}) considerando que:

$$\eta_{GE} = \frac{\text{Energía de salida}}{\text{Energía de entrada}} \cdot 100 \quad \dots\dots\dots (26)$$

$$\eta_{GE} = \frac{46883 \text{ J}}{63373 \text{ J}} \cdot 100 = 74\%$$

.- Análisis de las pérdidas de energía aplicada a la pieza de trabajo

Como mencionamos la energía de salida (E_s) del generador de inducción aplicada a la pieza de trabajo es de 46883 J, si consideramos las pérdidas de la energía de salida aplicada a la pieza de trabajo tendremos la energía real de salida (E_{rs}). Es decir:

$$E_{rs} = (E_s \cdot \eta_T) \dots\dots\dots (27)$$

Donde:

$$\eta_T = \eta_{\text{Térmica}} \cdot \eta_{\text{Eléctrica}} \dots\dots\dots(28) \text{ (Martínez Ledezma)}$$

Eficiencia térmica ($\eta_{\text{Térmica}}$):

$$\eta_{\text{Térmica}} = \frac{E_s}{E_s + \text{Pérdidas térmicas}} \dots\dots\dots(29)$$

y

$$\text{Pérdidas térmicas} = \frac{(3.74 \times 10^{-4}) L_c}{\text{Log}_{10} (dc/dw)} \dots\dots\dots(30) \text{ (Martínez Ledesma)}$$

Donde:

dc = diámetro interior de la bobina = 0.22 m

dw = diámetro de la pieza = 0.2 m

L_c = longitud de la bobina = 3m

Sustituyendo:

$$\text{Pérdidas térmicas} = \frac{(3.74 \times 10^{-4}) (3m)}{\text{Log}_{10} (0.22/0.2)} = 0.027$$

Sustituyendo pérdidas térmicas en (29)

$$\eta_T = \frac{46883 \text{ J}}{46883 \text{ J} + 0.027} = 0.9999$$

Eficiencia eléctrica

$$\eta_{\text{ELÉCTRICA}} = \frac{1}{1 + \frac{d_C + \delta_C}{d_W - \delta_W} \sqrt{\rho_C / \mu_R \rho_W}} \dots\dots\dots (31) \text{ (Martínez Ledesma)}$$

Donde:

δ_C = profundidad de penetración de la bobina

δ_W = profundidad de penetración de la pieza de trabajo = 5.69×10^{-5} m (dato obtenido en página 36 de esta tesis).

μ_R = Permeabilidad relativa de la pieza de trabajo = 500 (del acero inoxidable 430)

ρ_W = Resistividad eléctrica de la pieza de trabajo, Resistividad del acero inoxidable (ρ) = $6 \times 10^{-7} \Omega \text{ m}$

ρ_C = Resistividad eléctrica de la bobina

Para el cálculo de profundidad de penetración de la bobina (δ_C), utilizaremos la fórmula (19).

$$\delta_C = 503 \sqrt{\rho_C / \mu_R f}$$

Donde:

ρ_C = Resistividad de la bobina (cobre = $1.71 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$)

μ_R = permeabilidad relativa del cobre = 1

f = frecuencia de resonancia = 97956 Hz

Sustituyendo:

$$\delta_C = 503 \sqrt{(1.71 \times 10^{-8} \text{ ohm} \cdot \text{m}) / (1) (97596 \text{ Hz})} = 2.1 \times 10^{-4} \text{ m}$$

Sustituyendo en (31):

$$\eta_{\text{ELÉCTRICA}} = \frac{1}{\frac{1 + \frac{0.22\text{m} + 2.1 \times 10^{-4} \text{ m}}{0.2\text{m} - 5.69 \times 10^{-5} \text{ m}} \sqrt{1.71 \times 10^{-8} \Omega \text{ m} / (500 \cdot 6 \times 10^{-7} \Omega \text{ m})}}{.}}$$

$$\eta_{\text{Eléctrica}} = 0.9917$$

Sustituyendo $\eta_{\text{térmica}}$ y $\eta_{\text{eléctrica}}$ en (28)

$$\eta_{\text{T}} = \eta_{\text{Térmica}} \cdot \eta_{\text{Eléctrica}} = (0.9999) \cdot (0.9917) = 0.9916$$

Sustituyendo este valor en (27):

$$E_{\text{rs}} = (E_{\text{s}} \cdot \eta_{\text{T}}) = (46883 \text{ J}) (0.9916) = 46489$$

Sustituyendo este nuevo valor de salida en (26):

$$\eta_{\text{GE}} = \frac{46489 \text{ J}}{63373} \times 100 = 73\%$$

Entonces el generador de inducción tendrá una eficiencia del 73%

Costo del material ocupado:

Los gastos originados por el circuito electrónico, la pieza de trabajo, el circuito oscilador y los paneles solares se muestran a continuación en la siguiente tabla 3:

CostoTotal (\$)	Material	Cantidad
2	Capacitor de Tantalio 10 V, 10 μ F, 20%.	2
127	Capacitor de película 400 VDC, 4.7 μ F.	2
7	Resistor de película metálica, 4.3 ohm, ¼ watt, 1%.	2
2	Capacitor de cerámica, 0.1 μ F, 50 V, 10%.	2
68	Puente rectificador de diodos, 35 A, 1 kV.	1
42	Capacitor de película, 300V, 0-0068 μ F, 20%.	1
123	Rectificador MUR ultra rápido, 600 V, 15A.	4
236	Capacitor electrolítico de aluminio, 200V, 1500 μ F.	2
191	Toroide de ferrita, 65.5 mH.	1
68	Controlador IR2110PBF	1
83	Opto acopladores de alta velocidad 10 Mbd	2
2	Resistor de película de metal, 1/3 W, 1 kohm, 1%.	2
6	Resistor de película de metal, 350 ohm, 1%.	2
23	Resistor de película de metal, 47R , 1%.	2
43	Diodo zener, 15 V, 5W	4
5	Capacitores de disco de cerámica, 100pF, 1 kV.	2
948	Capacitor de cerámica, 0.1 μ F, 2000 V.	10
9	Capacitor de disco de cerámica, 15 pF, 500V	2
301	Mosfet IRFP32N50KPBF, canal N, 500 V, 32 A	2
39	Rectificador BYW29, 200 V, ultra rápido	2
5	Resistor de película metálica, 1.5 kohm, ¼ watt, 1%.	2
157	Rectificador MBR6045, 2x30 A, 45V.	2
10	Capacitor cerámico de disco 15 μ F, 500V, 2%.	1
300	Gastos de bobina	1
60	Gastos de cable	3m
1800	Gastos de cilindro	1
10400	Panel solar	2

Tabla 3 Costo de material

Sumando todo lo anterior, arroja un valor aproximado de \$15027 pesos.

CAPÍTULO V

5.1 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permiten concluir que se cumplió con el objetivo de diseñar y fabricar un generador de inducción electromagnética con el fin de calentar agua ocupada para el aseo personal.

Si se observa la tabla 3, se tiene que se logró alcanzar una temperatura de 35°C en el agua en un tiempo de 112 s, la cual es un valor aceptable de calentamiento del líquido en un tiempo adecuado.

La eficiencia obtenida del generador de inducción fue de 73 %, por lo que se cumple con uno de los objetivos que era fabricar un dispositivo de calentamiento que tuviera un valor de eficiencia arriba del 70%.

Durante las pruebas se encontró con la dificultad de que al poner en funcionamiento el generador de inducción y empezar a calentar el agua, a los pocos segundos frecuentemente, se dejaba de incrementar la temperatura del líquido, lo que se debía a que el circuito perdía su resonancia debido a que se modificaban los valores de resistencia de la pieza de trabajo e inductancia de la bobina por el calor en ambos. Esto dio por consecuencia que se perdiera la eficiencia del dispositivo provocando que las pérdidas de energía fueran enormes y el generador de inducción no hiciera su función adecuadamente.

Al hacer un análisis se encontró que la capacidad del generador de inducción no era la adecuada para la cantidad del líquido a calentar lo que provocó que se tuviera que colocar menos líquido en el depósito de agua obteniéndose mejores resultados Sin embargo, se tendrá que corregir a futuro este problema de pérdida de resonancia en el circuito.

Por otra parte, es importante resaltar que se utilizó como fuente de alimentación un par de baterías que simulan ser lo que en la práctica será un panel solar, lo que otorga amplias ventajas al generador de inducción ya que trabajó con energías renovables.

Sin embargo, en el aspecto económico no se obtuvo el objetivo esperado de fabricar un generador a bajo costo, ya que el precio de los paneles solares eleva bastante el precio final del producto.

5.2 PROSPECTIVAS

- Difundiendo ampliamente en la sociedad las enormes ventajas que otorga el calentamiento mediante inducción electromagnética, permitirá su uso masivo, lo que se traducirá en abaratar los costos del material a utilizar y con ello bajar el costo de producción de este dispositivo.
- Mediante un sistema de control más sofisticado, el funcionamiento del generador del calentamiento por inducción se puede hacer más eficiente, al programar el dispositivo para que solo funcione hasta alcanzar ciertos valores de temperatura, mandar alarmas para evitar sobrecalentamientos innecesarios...etc.

APÉNDICE 1

MOSFET IRFP32N50KBFP



IRFP32N50K, SiHFP32N50K

Vishay Siliconix

Power MOSFET

PRODUCT SUMMARY		
V_{DS} (V)	500	
$R_{DS(on)}$ (Ω)	$V_{GS} = 10$ V	0.135
Q_g (Max.) (nC)	190	
Q_{gs} (nC)	59	
Q_{gd} (nC)	84	
Configuration	Single	

FEATURES

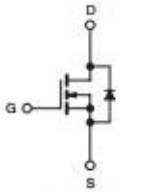
- Low Gate Charge Q_g Results in Simple Drive Requirement
- Improved Gate, Avalanche and Dynamic dV/dt Ruggedness
- Fully Characterized Capacitance and Avalanche Voltage and Current
- Low $R_{DS(on)}$
- Lead (Pb)-free Available



RoHS*
COMPLIANT



TO-247



N-Channel MOSFET

APPLICATIONS

- Switch Mode Power Supply (SMPS)
- Uninterruptible Power Supply
- High Speed Power Switching
- Hard Switching and High Frequency Circuits

ORDERING INFORMATION

Package	TO-247
Lead (Pb)-free	IRFP32N50KPbF SiHFP32N50K-E3
SnPb	IRFP32N50K SiHFP32N50K

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS $T_C = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted

PARAMETER	SYMBOL	LIMIT	UNIT
Drain-Source Voltage	V_{DS}	500	V
Gate-Source Voltage	V_{GS}	± 30	V
Continuous Drain Current	V_{GS} at 10 V	$T_C = 25^\circ\text{C}$	32
		$T_C = 100^\circ\text{C}$	20
Pulsed Drain Current ^a	I_{DM}	130	A
Linear Derating Factor		3.7	W/°C
Single Pulse Avalanche Energy ^b	E_{AS}	450	mJ
Repetitive Avalanche Current ^a	I_{AR}	32	A
Repetitive Avalanche Energy ^a	E_{AR}	46	mJ
Maximum Power Dissipation	$T_C = 25^\circ\text{C}$	P_D	460
Peak Diode Recovery dV/dt ^c		dV/dt	13
Operating Junction and Storage Temperature Range	T_J, T_{stg}	-55 to +150	°C
Soldering Recommendations (Peak Temperature)	for 10 s		300 ^d
Mounting Torque	6-32 or M3 screw		10
			1.1

Notes

- Repetitive rating; pulse width limited by maximum junction temperature.
- Starting $T_J = 25^\circ\text{C}$, $L = 0.87$ mH, $R_G = 25 \Omega$, $I_{AS} = 32$ A.
- $I_{SD} \leq 32$ A, $dV/dt \leq 197$ A/ μs , $V_{DD} \leq V_{DS}$, $T_J \leq 150^\circ\text{C}$.
- 1.6 mm from case.


* Pb containing terminations are not RoHS compliant, exemptions may apply from case.

IRFP32N50K, SiHFP32N50K

Vishay Siliconix



THERMAL RESISTANCE RATINGS				
PARAMETER	SYMBOL	TYP.	MAX.	UNIT
Maximum Junction-to-Ambient	$R_{\theta JA}$	-	40	°C/W
Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	$R_{\theta CS}$	0.24	-	
Maximum Junction-to-Case (Drain)	$R_{\theta JC}$	-	0.26	

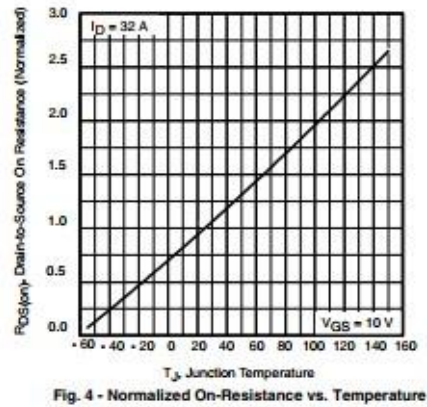
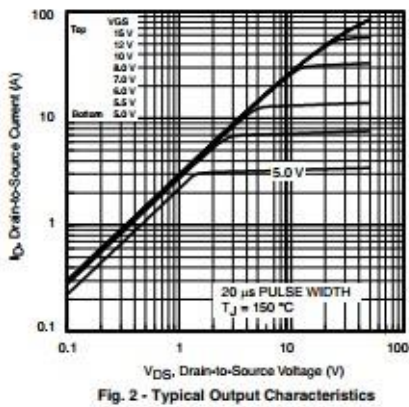
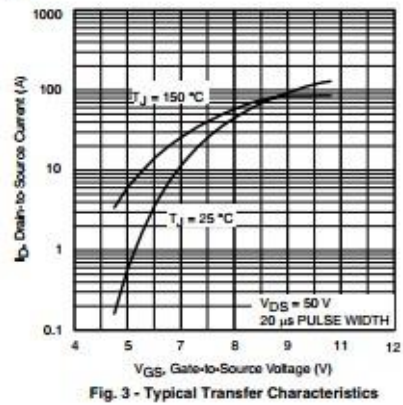
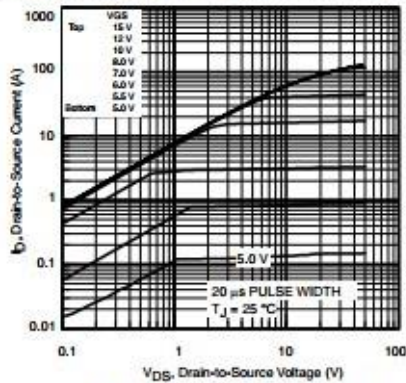
SPECIFICATIONS $T_J = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted							
PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT	
Static							
Drain-Source Breakdown Voltage	V_{DS}	$V_{GS} = 0\text{ V}, I_D = 250\ \mu\text{A}$	500	-	-	V	
V_{DS} Temperature Coefficient	$\Delta V_{DS}/T_J$	Reference to 25°C , $I_D = 1\text{ mA}$	-	0.54	-	V/°C	
Gate-Source Threshold Voltage	$V_{GS(th)}$	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\ \mu\text{A}$	3.0	-	5.0	V	
Gate-Source Leakage	I_{GSS}	$V_{GS} = \pm 30\text{ V}$	-	-	± 100	nA	
Zero Gate Voltage Drain Current	I_{DSS}	$V_{DS} = 500\text{ V}, V_{GS} = 0\text{ V}$	-	-	50	μA	
		$V_{DS} = 400\text{ V}, V_{GS} = 0\text{ V}, T_J = 150^\circ\text{C}$	-	-	250		
Drain-Source On-State Resistance	$R_{DS(on)}$	$V_{GS} = 10\text{ V}, I_D = 32\text{ A}^b$	-	0.135	0.16	Ω	
Forward Transconductance	g_{fs}	$V_{DS} = 50\text{ V}, I_D = 32\text{ A}$	14	-	-	S	
Dynamic							
Input Capacitance	C_{iss}	$V_{DS} = 0\text{ V}, V_{GS} = 20\text{ V}, f = 1.0\text{ MHz}$, see fig. 5	-	5280	-	pF	
Output Capacitance	C_{oss}		-	550	-		
Reverse Transfer Capacitance	C_{rss}		-	45	-		
Output Capacitance	C_{oss}	$V_{GS} = 0\text{ V}$	$V_{DS} = 1.0\text{ V}, f = 1.0\text{ MHz}$	-	5630	-	
Effective Output Capacitance	$C_{oss\text{ eff.}}$		$V_{DS} = 400\text{ V}, f = 1.0\text{ MHz}$	-	155	-	
Total Gate Charge	Q_g	$V_{GS} = 10\text{ V}, I_D = 32\text{ A}, V_{DS} = 400\text{ V}^b$	-	-	190	nC	
Gate-Source Charge	Q_{gs}		-	-	59		
Gate-Drain Charge	Q_{gd}		-	-	84		
Turn-On Delay Time	$t_{d(on)}$	$V_{DS} = 250\text{ V}, I_D = 32\text{ A}, R_{\theta J} = 4.3\ \Omega, V_{GS} = 10\text{ V}^b$	-	28	-	ns	
Rise Time	t_r		-	120	-		
Turn-Off Delay Time	$t_{d(off)}$		-	48	-		
Fall Time	t_f		-	54	-		
Drain-Source Body Diode Characteristics							
Continuous Source-Drain Diode Current	I_S	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode 	-	-	32	A	
Pulsed Diode Forward Current ^a	I_{SM}		-	-	130		
Body Diode Voltage	V_{SD}	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = 32\text{ A}, V_{GS} = 0\text{ V}^b$	-	-	1.5	V	
Body Diode Reverse Recovery Time	t_{rr}	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_r = 32\text{ A}, di/dt = 100\text{ A}/\mu\text{s}^b$	-	530	800	ns	
Body Diode Reverse Recovery Charge	Q_{rr}		-	-	9.0	13.5	μC
Body Diode Reverse Recovery Current	I_{RRM}		-	-	30	-	A
Forward Turn-On Time	t_{on}	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by L_S and L_D)					

Notes

- Repetitive rating; pulse width limited by maximum junction temperature.
- Pulse width $\leq 400\ \mu\text{s}$; duty cycle $\leq 2\%$.
- $C_{oss\text{ eff.}}$ is a fixed capacitance that gives the same charging time as C_{oss} while V_{DS} is rising from 0 to 80% V_{DS} .



TYPICAL CHARACTERISTICS 25 °C, unless otherwise noted



APÉNDICE 2

CONTROLADOR IR2110

International
IR Rectifier

Data Sheet No. PD60147 rev.U

IR2110(-1-2)(S)PbF/IR2113(-1-2)(S)PbF

HIGH AND LOW SIDE DRIVER

Features

- Floating channel designed for bootstrap operation
Fully operational to +500V or +600V
Tolerant to negative transient voltage
dV/dt immune
- Gate drive supply range from 10 to 20V
- Undervoltage lockout for both channels
- 3.3V logic compatible
Separate logic supply range from 3.3V to 20V
Logic and power ground $\pm 5V$ offset
- CMOS Schmitt-triggered inputs with pull-down
- Cycle by cycle edge-triggered shutdown logic
- Matched propagation delay for both channels
- Outputs in phase with inputs

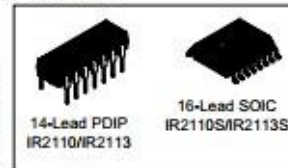
Product Summary

V_{OFFSET} (IR2110)	500V max.
(IR2113)	600V max.
$I_{\text{O}+/-}$	2A / 2A
V_{OUT}	10 - 20V
$t_{\text{on/off}}$ (typ.)	120 & 94 ns
Delay Matching (IR2110)	10 ns max.
(IR2113)	20ns max.

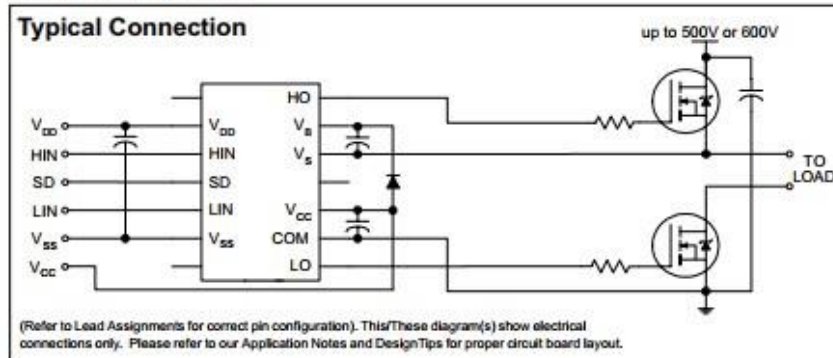
Description

The IR2110/IR2113 are high voltage, high speed power MOSFET and IGBT drivers with independent high and low side referenced output channels. Proprietary HVIC and latch immune CMOS technologies enable ruggedized monolithic construction. Logic inputs are compatible with standard CMOS or LSTTL output, down to 3.3V logic. The output drivers feature a high pulse current buffer stage designed for minimum driver cross-conduction. Propagation delays are matched to simplify use in high frequency applications. The floating channel can be used to drive an N-channel power MOSFET or IGBT in the high side configuration which operates up to 500 or 600 volts.

Packages



Typical Connection



IR2110(-1-2)(S)PbF/IR2113(-1-2)(S)PbF

International
IGR Rectifier

Absolute Maximum Ratings

Absolute maximum ratings indicate sustained limits beyond which damage to the device may occur. All voltage parameters are absolute voltages referenced to COM. The thermal resistance and power dissipation ratings are measured under board mounted and still air conditions. Additional information is shown in Figures 28 through 35.

Symbol	Definition	Min.	Max.	Units	
V_B	High side floating supply voltage (IR2110)	-0.3	525	V	
	(IR2113)	-0.3	625		
V_S	High side floating supply offset voltage	$V_B - 25$	$V_B + 0.3$		
V_{HO}	High side floating output voltage	$V_S + 0.3$	$V_B + 0.3$		
V_{CC}	Low side fixed supply voltage	-0.3	25		
V_{LO}	Low side output voltage	-0.3	$V_{CC} + 0.3$		
V_{DD}	Logic supply voltage	-0.3	$V_{SS} + 25$		
V_{SS}	Logic supply offset voltage	$V_{CC} - 25$	$V_{CC} + 0.3$		
V_{IN}	Logic input voltage (HIN, LIN & SD)	$V_{SS} - 0.3$	$V_{DD} + 0.3$		
dV_S/dt	Allowable offset supply voltage transient (figure 2)	—	50		V/ns
P_D	Package power dissipation @ $T_A \leq +25^\circ\text{C}$	(14 lead DIP)	—	1.6	W
		(16 lead SOIC)	—	1.25	
$R_{\theta JA}$	Thermal resistance, junction to ambient	(14 lead DIP)	—	75	$^\circ\text{C}/\text{W}$
		(16 lead SOIC)	—	100	
T_J	Junction temperature	—	150	$^\circ\text{C}$	
T_S	Storage temperature	-55	150		
T_L	Lead temperature (soldering, 10 seconds)	—	300		

Recommended Operating Conditions

The input/output logic timing diagram is shown in figure 1. For proper operation the device should be used within the recommended conditions. The V_S and V_{SS} offset ratings are tested with all supplies biased at 15V differential. Typical ratings at other bias conditions are shown in figures 36 and 37.

Symbol	Definition	Min.	Max.	Units
V_B	High side floating supply absolute voltage	$V_S + 10$	$V_S + 20$	V
V_S	High side floating supply offset voltage (IR2110)	Note 1	500	
	(IR2113)	Note 1	600	
V_{HO}	High side floating output voltage	V_S	V_B	
V_{CC}	Low side fixed supply voltage	10	20	
V_{LO}	Low side output voltage	0	V_{CC}	
V_{DD}	Logic supply voltage	$V_{SS} + 3$	$V_{SS} + 20$	
V_{SS}	Logic supply offset voltage	-5 (Note 2)	5	
V_{IN}	Logic input voltage (HIN, LIN & SD)	V_{SS}	V_{DD}	
T_A	Ambient temperature	-40	125	

Note 1: Logic operational for V_S of -4 to +500V. Logic state held for V_S of -4V to $-V_{SS}$. (Please refer to the Design Tip DT97-3 for more details).

Note 2: When $V_{DD} < 5V$, the minimum V_{SS} offset is limited to $-V_{DD}$.

Dynamic Electrical Characteristics

V_{BIAS} (V_{CC} , V_{BS} , V_{DD}) = 15V, C_L = 1000 pF, T_A = 25°C and V_{SS} = COM unless otherwise specified. The dynamic electrical characteristics are measured using the test circuit shown in Figure 3.

Symbol	Definition	Figure	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
t_{on}	Turn-on propagation delay	7	—	120	150	ns	$V_S = 0V$
t_{off}	Turn-off propagation delay	8	—	94	125		$V_S = 500V/600V$
t_{sd}	Shutdown propagation delay	9	—	110	140		$V_S = 500V/600V$
t_r	Turn-on rise time	10	—	25	35		
t_f	Turn-off fall time	11	—	17	25		
MT	Delay matching, HS & LS turn-on/off	(IR2110) (IR2113)	—	—	—		10 20

Static Electrical Characteristics

V_{BIAS} (V_{CC} , V_{BS} , V_{DD}) = 15V, T_A = 25°C and V_{SS} = COM unless otherwise specified. The V_{IH} , V_{TH} and I_{IN} parameters are referenced to V_{SS} and are applicable to all three logic input leads: HIN, LIN and SD. The V_O and I_O parameters are referenced to COM and are applicable to the respective output leads: HO or LO.

Symbol	Definition	Figure	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
V_{IH}	Logic "1" input voltage	12	9.5	—	—	V	
V_{IL}	Logic "0" input voltage	13	—	—	6.0		
V_{OH}	High level output voltage, $V_{BIAS} - V_O$	14	—	—	1.2		$I_O = 0A$
V_{OL}	Low level output voltage, V_O	15	—	—	0.1		$I_O = 0A$
I_{LK}	Offset supply leakage current	16	—	—	50	μA	$V_B = V_S = 500V/600V$
I_{OBS}	Quiescent V_{BS} supply current	17	—	125	230		$V_{IN} = 0V$ or V_{DD}
I_{OCC}	Quiescent V_{CC} supply current	18	—	180	340		$V_{IN} = 0V$ or V_{DD}
I_{OOD}	Quiescent V_{DD} supply current	19	—	15	30		$V_{IN} = 0V$ or V_{DD}
I_{IN+}	Logic "1" input bias current	20	—	20	40	V	$V_{IN} = V_{DD}$
I_{IN-}	Logic "0" input bias current	21	—	—	1.0		$V_{IN} = 0V$
V_{BSUV+}	V_{BS} supply undervoltage positive going threshold	22	7.5	8.6	9.7	V	
V_{BSUV-}	V_{BS} supply undervoltage negative going threshold	23	7.0	8.2	9.4		
V_{CCUV+}	V_{CC} supply undervoltage positive going threshold	24	7.4	8.5	9.6		
V_{CCUV-}	V_{CC} supply undervoltage negative going threshold	25	7.0	8.2	9.4		
I_{O+}	Output high short circuit pulsed current	26	2.0	2.5	—		A
I_{O-}	Output low short circuit pulsed current	27	2.0	2.5	—	$V_O = 15V$, $V_{IN} = 0V$ $PW \leq 10 \mu s$	

APÉNDICE 3

Clasificación de aceros según normatividad de AISI (American iron and Steel Insitute).

TABLAS TÉCNICAS DEL ACERO INOXIDABLE



irestal Group

 EN	 BSI	
 UNE	 UNI	
 DIN	 SS	 GOST
 AFNOR	 AISI	 JIS

TABLA DE CARACTERÍSTICAS
TÉCNICAS DEL ACERO INOXIDABLE

TABLA DE CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL ACERO INOXIDABLE

		SERIE 300 -							
		Acero al Cromo Níquel							
DESIGNACIÓN	TIPO ASTM (AISI)	301	302	303	304	304 L	321		
	COMPOSICIÓN QUÍMICA	C% 0,15 Máx. Mn% 2,00 Máx. Si% 1,00 Máx. Cr% 16,0018,00 Ni% 0,008,00	C% 0,15 Máx. Mn% 2,00 Máx. Si% 1,00 Máx. Cr% 17,0019,00 Ni% 8,0010,00	C% 0,15 Máx. Mn% 2,00 Máx. Si% 1,00 Máx. Cr% 17,0019,00 Ni% 8,0010,00 S% 0,15 MÍN.	C% 0,08 Máx. Mn% 2,00 Máx. Si% 1,00 Máx. Cr% 18,0020,00 Ni% 8,0010,50	C% 0,030 Máx. Mn% 2,00 Máx. Si% 1,00 Máx. Cr% 18,0020,00 Ni% 8,0012,00	C% 0,08 Máx. Mn% 2,00 Máx. Si% 1,00 Máx. Cr% 17,0019,00 Ni% 9,0012,00 Ti% ≤ 5aC% 0,07		
PROPIEDADES FÍSICAS	PESO ESPECÍFICO (g/cm ³)	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9		
	MÓDULO DE ELASTICIDAD (N/mm ²)	193.000	193.000	193.000	193.000	193.000	193.000		
	ESTRUCTURA	AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO		
	CALOR ESPECÍFICO A 20C (J/Kg K)	500	500	500	500	500	500		
	CONDUCTIBILIDAD TÉRMICA (W/m K)	a 100 C a 150 C	16 21	16 21	16 21	16 21	16 21	16 21,5	
	COEFICIENTE DE DILATACIÓN TÉRMICO MEDIO (x 10 ⁶ C ⁻¹)	0100 C 0300 C 0500 C 0700 C	16,92 17,10 18,18 18,72	17,28 17,82 18,36 18,72	17,3 17,8 18,4 18,7	17,30 17,80 18,40 18,80	17,30 17,80 18,40 18,80	16,74 17,10 18,54 19,26	
	INTERVALO DE FUSIÓN (C)		13981420	13981420	13981420	13981454	13981454	13981427	
PROPIEDADES ELÉCTRICAS	PERMEABILIDAD TÉRMICA EN ESTADO SOLUBLE RECOCIDO	AMAGNÉTICO 1,02	AMAGNÉTICO 1,008	AMAGNÉTICO 1,008	AMAGNÉTICO 1,008	AMAGNÉTICO 1,008	AMAGNÉTICO 1,008		
	CAPACIDAD DE RESISTENCIA ELÉCTRICA A 20C (μΩmm)	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72		
PROPIEDADES MECÁNICAS A 20°	DUREZA BRINELL	RECOCIDO HB CON DEFORMACIÓN EN FRÍO HB	135185 210330	135185 180330	130180 180330	130150 180330	125145 -	130185 -	
	DUREZA ROCKWELL	RECOCIDO HRB CON DEFORMACIÓN EN FRÍO HRC	7992 2541 1/4 DÚRO-DURO	7090 1035	7090 -	7088 1035	7085 -	7088 -	
	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN CON DEFORMACIÓN EN FRÍO Rm(N/mm ²)	RECOCIDO	590750 8701200 1/4 DÚRO-DURO	560720 6801180	530700 -	500700 7001180	500680 -	520700 -	
	ELASTICIDAD CON DEFORMACIÓN EN FRÍO Rp (0,2)(N/mm ²)	RECOCIDO	215340 500900 1/4 DÚRO-DURO	205340 340900	205340 350900	195340 340900	175300 -	205340 -	
		RECOCIDO Rp(1) (N/mm ²) MÍNIMO	225	245	255	235	215	245	
	ALARGAMIENTO 50mm. A(%)		6555 258 1/4 DÚRO-DURO	6050 5010	6050 -	6550 5010	6550 -	6040 -	
	ESTRICCIÓN	RECOCIDO Z (%)	7060	7555	Mín. 50	7560	7560	6550	
	RESILIENCIA	KCVL (J/cm ²) KVL (J/cm ²)	130 140	160 180	Mín. 100 -	160 180	160 180	120 130	
	PROPIEDADES MECÁNICAS EN CALIENTE	ELASTICIDAD DIFERENTES TEMPERATURAS	Rp(0,2) (N/mm ²)	a 300 C a 400 C a 500 C	- - -	- - -	- - -	125 97 93	115 98 88
			Rp(1) (N/mm ²)	a 300 C a 400 C a 500 C	- - -	- - -	- - -	147 127 107	137 117 108
LÍMITE DE FLUENCIA			a 500 C a 600 C a 700 C a 1 / 100.000 / t (N/mm ²) a 800 C	- - - -	- - - -	- - - -	68 42 14,5 4,9	58,5 36 10,5 3,9	
RECOCIDO COMPLETO RECOCIDO INDUSTRIAL (OC) (t)				ENFR. RÁPIDO 10081120	ENFR. RÁPIDO 10081120	ENFR. RÁPIDO 10081120	ENFR. RÁPIDO 10081120	ENFR. RÁPIDO 10081120	ENFR. RÁPIDO 9531120
TEMPLE				NO CÓDE TEMPLE	NO CÓDE TEMPLE	NO CÓDE TEMPLE	NO CÓDE TEMPLE	NO CÓDE TEMPLE	NO CÓDE TEMPLE
INTERVALO DE FORJA			TEMPER. INICIAL TEMPER. FINAL	1200 925	1200 925	1200 925	1200 925	1200 925	1175 925
TRATAMIENTOS TÉRMICOS	TEMPERATURA FORMACIÓN CASCARILLA	SERVICIO CONTINUO SERVICIO INTERMITENTE	900 810	900 810	- 815	925 840	925 840	900 810	
	OTRAS PROPIEDADES	SOLDABILIDAD		MUY BUENA	MUY BUENA	NÓ ACONSEJABLE	MUY BUENA	MUY BUENA	BUENA
MAQUINABILIDAD COMPARADO CON UN ACERO BESSEMER PARA a. B1112			45%	45%	55%	45%	45%	30%	
EMBUTICIÓN			BUENA	BUENA	REGULAR	MUY BUENA	MUY BUENA	BUENA	

AUSTENÍTICO				Acero refractario			SERIE 400 - FERRÍTICO		
Acero al Cromo - Níquel - Molibdeno							Acero al Cromo		
316	316 S	316 L	316 TI	309	310	310 S	409	420	430
C% 0,08 Máx. Mn% 2,00 Máx. Si% 1,00 Máx. Cr% 16,0018,00 Ni% 10,0014,00 Mo% 2,02,50	C% 0,08 Máx. Mn% 2,00 Máx. Si% 1,00 Máx. Cr% 16,0018,00 Ni% 12,0014,00 Mo% 2,503,00	C% 0,03 Máx. Mn% 2,00 Máx. Si% 1,00 Máx. Cr% 16,0018,00 Ni% 10,0014,00 Mo% 2,002,50	C% 0,08 Máx. Mn% 2,00 Máx. Si% 1,00 Máx. Cr% 16,0018,00 Ni% 10,0014,00 Mo% 2,002,50 Ti% 0,80	C% 0,20 Máx. Mn% 2,00 Máx. Si% 1,00 Máx. Cr% 22,0024,00 Ni% 12,0015,00	C% 0,25 Máx. Mn% 2,00 Máx. Si% 1,50 Máx. Cr% 24,0026,00 Ni% 19,0022,00	C% 0,08 Máx. Mn% 2,00 Máx. Si% 1,50 Máx. Cr% 24,0026,00 Ni% 19,0022,00	C% 0,08 Máx. Mn% 1,00 Máx. Si% 1,00 Máx. Cr% 10,511,75 Ti% 0,75	C% 0,15 Min. Mn% 1,00 Máx. Si% 1,00 Máx. Cr% 12-14	C% 0,10 Máx. Mn% 1,00 Máx. Si% 1,00 Máx. Cr% 16,0018,00
7,95	7,95	7,95	7,95	7,9	7,9	7,9	7,7	7,75	7,7
193.000	193.000	193.000	193.000	200.000	200.000	200.000	200.000	200.000	200.000
AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO	FERRÍTICO	MARTENSÍTICO	FERRÍTICO
500	500	500	500	500	500	500	460	460	460
16 21	16 21	16 21	16 21	12,5 17,5	12,5 17,5	12,5 17,5	- -	28 -	26 27
16,02 16,20 17,46 18,54	16,02 16,20 17,46 18,54	16,02 16,20 17,46 18,54	16,50 18,00 19,00 -	14,9 16,7 17,3 18,-	15,9 16,2 16,9 17,5	15,2 16,6 17,6 18,5	11,7 - - 13	10,2 10,8 11,7 12,2	10,4 11,- 11,4 11,9
13711398	13711398	13711398	1370	13981454	13981454	13981454	14271510	14541510	14271510
AMAGNÉTICO 1,008	AMAGNÉTICO 1,008	AMAGNÉTICO 1,008	AMAGNÉTICO 1,02	AMAGNÉTICO 1,008	AMAGNÉTICO 1,008	AMAGNÉTICO 1,008	FERRO- MAGNÉTICO	FERRO- MAGNÉTICO	FERRO- MAGNÉTICO
0,74	0,74	0,74	0,75	0,78	0,79	0,79	0,59	0,55	0,60
130185 -	130185 -	120170 -	130190 -	140185 -	145210 -	145210 -	120150 -	160190 520225 con tratamiento térmico	135180 180230
7085 -	7085 -	7085 -	7085 -	7085 -	7085 -	7085 -	6580 -	23 -	7588 -
540690 -	540690 -	520670 -	540690 -	540690 -	540690 -	520670 -	360420 -	67 84154 con tratamiento térmico	440590 610900
205410 -	205410 -	195370 -	215380 -	215370 -	215370 -	205370 -	205330 -	205330 -	250400 400860
245	245	235	255	265	265	255	235	235	275
6040 -	6040 -	6040 -	6040 -	5540 -	5540 -	6040 -	3025 -	3025 -	3022 202
7560	7560	7565	7560	7050	7050	7055	-	6055	7060
160 180	160 180	160 180	120 130	160 180	160 180	160 180	95 95	8070 6010	50 65
140 125 105	140 125 105	138 115 95	145 135 125	160 150 145	156 147 137	165 156 147	- - -	- - -	245 215 165
166 147 127	166 147 127	161 137 117	176 166 156	- - -	- - -	181 171 137	- - -	- - -	- - -
82 62 20 6,5	82 62 20 6,5	71 53 15,5 5	82 62 20 6,5	- 49 13,6 4,9	- 70,6 30 15,5	- 58,5 19,5 5	- - - -	- - - -	29,42 16,67 5,88 -
ENFR. RÁPIDO 10081120	ENFR. RÁPIDO 10081120	ENFR. RÁPIDO 10081120	ENFR. RÁPIDO 10201070	ENFR. RÁPIDO 10361120	ENFR. RÁPIDO 10361149	ENFR. RÁPIDO 10361149	ENFR. AL AIRE 885	ENFR. LENTO 843899	ENFR. AL AIRE 750815
NÓ COGE TEMPLE	NÓ COGE TEMPLE	NÓ COGE TEMPLE	NÓ COGE TEMPLE	NÓ COGE TEMPLE	NÓ COGE TEMPLE	NÓ COGE TEMPLE	NÓ COGE TEMPLE	9821030C Rev. 149371C	NÓ COGE TEMPLE
1200 925	1200 925	1200 925	1150 750	1175 980	1175 980	1175 980	1150 750	10931149C (retardar enfriamiento)	1060 650
925 840	925 840	925 840	925 840	1090 1000	1120 1035	1120 1030	800 850	648 809	840 890
MUY BUENA	MUY BUENA	MUY BUENA	BUENA	BUENA	BUENA	BUENA	BUENA UNIÓN FRÁGIL	BUENA UNIÓN FRÁGIL	BASTANTE BUENA UNIÓN FRÁGIL
45%	45%	45%	-	45%	45%	45%	50%	45%	55%
BUENA	BUENA	BUENA	BUENA	BUENA	BUENA	BUENA	BASTANTE BUENA	MEDIOCRE	BASTANTE BUENA

Apéndice 4
Ficha técnica del acero inoxidable 430
Publicado por ASTM (American society for testing materials)

ACERO INOXIDABLE 430
(UNS S43000)

1. Descripción: es un acero inoxidable que no es tratable térmicamente que combina la buena resistencia a la corrosión y características de conformado con propiedades mecánicas útiles. Su habilidad de resistir el ataque del ácido nítrico permite usarlo en aplicaciones químicas específicas pero su mayor aplicación es la de fabricación de componentes de adorno. Tiene buena resistencia a una amplia variedad de medios corrosivos, incluyendo el ácido nítrico y otros ácidos orgánicos. Alcanza su máxima resistencia a la corrosión cuando está altamente pulido. Resiste a la oxidación en servicio intermitente hasta 870 °C y hasta 815°C en servicio continuo. Este grado es quebradizo a temperatura ambiente luego de un calentamiento prolongado entre 400 y 595°C. Esto se puede eliminar con el recocido.

2. Normas involucradas: ASTM A 176 / A 240

3. Propiedades mecánicas: Resistencia a la fluencia 205 MPa (30 KSI)
Resistencia máxima 450 MPa (65 KSI)
Elongación 22 % (en 50mm)
Módulo de elasticidad 200 GPa (29000 KSI)

4. Propiedades físicas: Densidad 7.8 g/cm³ (0.28 lb/in³)

5. Propiedades químicas: 0.12 % C
1.00 % Mn
1.00 % Si
16.0 – 18.0 % Cr
0.04 % P
0.03 % S

6. Usos: para adornos, herramientas para chimenea, tanques para ácido nítrico, lavaplatos, cestas para recocido, equipos para restaurantes, cámaras de combustión, campanas de extractores de gases.

7. Tratamientos térmicos: el recocido se da con calentamiento entre 815 – 850 °C, mantenimiento de 30 minutos por cada 13mm de espesor, enfriamiento lento en el horno hasta 625 °C y luego enfriamiento rápido en aire. Este grado no es endurecible por tratamiento térmico.

NOTA:

Los valores expresados en las propiedades mecánicas y físicas corresponden a los valores promedio que se espera cumple el material. Tales valores son para orientar a aquella persona que debe diseñar o construir algún componente o estructura pero en ningún momento se debes considerar como valores estrictamente exactos para su uso en el diseño.

Bibliografías

- Secretaría de energía. (2016). *Perspectivas de gas natural 2016-2030*. (PDF). México. Fuente SENER con base en información del IMP. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/177624/Prospectiva_de_Gas_Natural_2016-2030.pdf
- Secretaría de energía. (2017). *Prospectiva de gas L.P. 2017-2031*. (PDF). México. Fuente SENER con base en información del IMP. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/286235/Prospectiva_de_Gas_LP_2017.pdf
- Secretaría de Energía 2017. *Prospectiva de Energías Renovables 2017-2031*.PDF.
- C. Karunanithy y K. Shafer. (2015). Heat transfer characteristics and cooking efficiency of different sauce pans on various cooktops. *Elsevier*.
- Olmo. M. y R. Nave. *Imán de barra*. Hyperphysics. Recuperado de <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/magnetic/elemag.html>
- B. Akin y M.Hadi S. 2017. *Soft switched SVPWM controlled PRDCL invertir*. Elsevier.
- Área tecnología. Imágen recuperada de <http://www.areatecnologia.com/EL%20MOTOR%20ELECTRICO.htm>
- Universidad de Vigo. *Electromagnetismo*. Recuperado de http://quintans.webs.uvigo.es/recursos/Web_electromagnetismo/electromagnetismo_leyes.htm
- HyperPhysics. *Electricidad y Magnetismo*. Recuperado de <http://hyperphysics.phyastr.gsu.edu/hbasees/magnetic/elemag.html>
- Físicap. *Electromagnetismo, Ley de Biot y Savart*. Recuperado de <http://fiscap4.org/fisica/electro/cm22.html>

Zamarro. J.M. *Inducción Electromagnética*. Universidad de Murcia. Recuperado de http://webs.um.es/jmz/www_electromagnetismo/induccin/induccin.html

Starodubtsev Y. N. and Kataev V. A , et all. 2018. *Dimensionless quantities of hysteresis loops*.Elsevier.

Rodríguez D.Y., Gutiérrez M. A. M., et all. 2017. *Sistema de calentamiento por inducción aplicado a la cocción*. Revista de ingeniería energética.Vol. 39.Universidad tecnológica de la Habana.

Lucía O. 2014. *Induction Heating Technology and Its Applications: Past Developments, Current Technology, and Future Challenges*. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 61.

Guamán J., Guevara D. et all. 2014. *Evolución histórica de los circuitos magnéticos de inducción magnética*. Universidad técnica de Ambato.

Cátedra. *Electromagnetismo*.PDF recuperado de <http://catedra.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/cys/DI/electromagnetismo.pdf>

Real academia española. *Diccionario usual*. Recuperado de <http://dle.rae.es/srv/search?m=30&w=hist%C3%A9resis>

Lecciones de Electrónica. *Histéresis*. Recuperado de <http://www.ifent.org/lecciones/cap07/cap07-06.asp>
Alarcón. S. J. M. *Ciclo de Histéresis*. 2004.Universidad de Murcia

Laboratorio de materiales magnéticos. *Ciclo de histéresis de materiales ferromagnéticos*. PDF.
Recuperado de <https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-17833//Materiales%20magn%C3%A9ticos%202015-16.pdf>

Hincapié N. J., Trejos A., et al. 2013. *Electrónica de Potencia para el calentamiento por inducción doméstico: revisión de estado del arte*. Ingeniería y Ciencia.

Ambrell. Acerca del calentamiento por inducción. Recuperado de https://cdn2.hubspot.net/hubfs/508263/Ambrell_PDFs/411-016916.pdf?t=1477689127410

Torres. G. H. L., (2016). *Desarrollo e implementación de modelo de predicción en procesos de temple por inducción para un acero AISI-SAE 1043*. Tesis en Maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León. 8-9.

Martínez L. J. A. (2013). *Desarrollo de un inversor resonante para calentamiento por inducción electromagnética*. Tesis. Instituto politécnico Nacional. 42-43.

Temas de Electrónica. I-2 Recuperado de <file:///K:/tesis%202017/TEMA%20ELECTR%C3%93NICA/CURVA%20DE%20UN%20mosfet.pdf>

Ludek B., Lukas O., et al. 2015. *Effective Dead-Time Compensation Using Adaptive Harmonic Compensator*. Science Direct.