



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CALENTADOR DE AGUA EN BASE AL ANÁLISIS DE UN SISTEMA EFICIENTE DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA PARA HOGARES PERTENECIENTES AL SECTOR SOCIOECONÓMICO MEDIO.**

**AUTORES: JACOBO JAVIER CÁCERES  
BYRON VINICIO MONTERO**

**DIRECTOR: ING. WILSON TRÁVEZ  
LATACUNGA  
2016**



# ***OBJETIVO GENERAL***

**DISEÑAR Y CONSTRUIR UN CALENTADOR DE AGUA EN BASE AL ANÁLISIS DE UN SISTEMA EFICIENTE DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA PARA HOGARES PERTENECIENTES AL SECTOR SOCIOECONÓMICO MEDIO.**





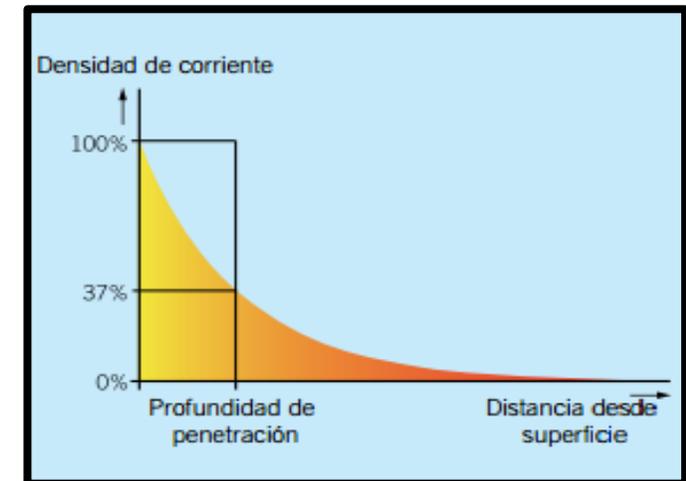
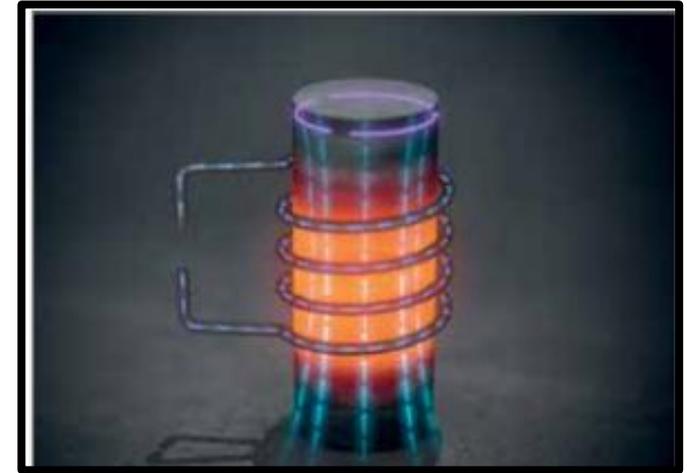
# ***INTRODUCCIÓN***

- Crear sistemas que presenten una mayor eficiencia en el calentamiento de agua.
- El proceso de calentamiento por inducción radica en utilizar las corrientes eléctricas inducidas en un material para producir calor.

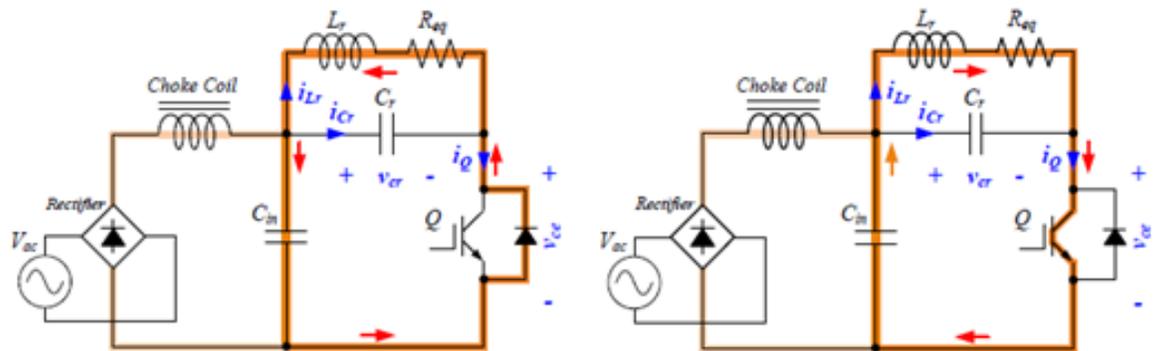


# PRINCIPIOS DEL CALENTAMIENTO

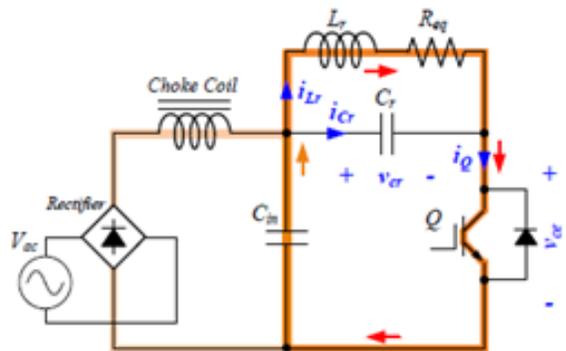
- **CORRIENTES PARÁSITAS O FOUCAULT.**
- **LEY DE AMPERE.**
- **LEY DE FARADAY.**
- **EFECTO JOULE.**
  
- **EFECTO PIEL.**
- **PARÁMETROS QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO DE CALENTAMIENTO.**
- **VENTAJAS DEL PROCESO DE CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN**



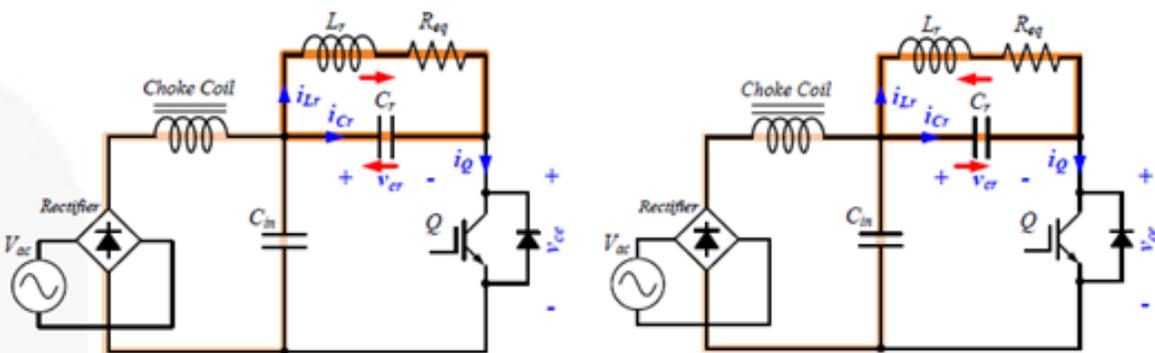
# Modos de operación del IGBT.



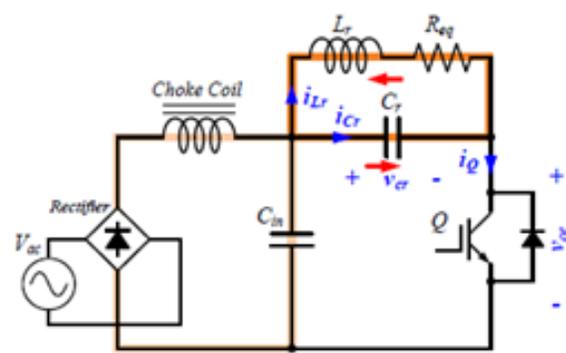
Modo I



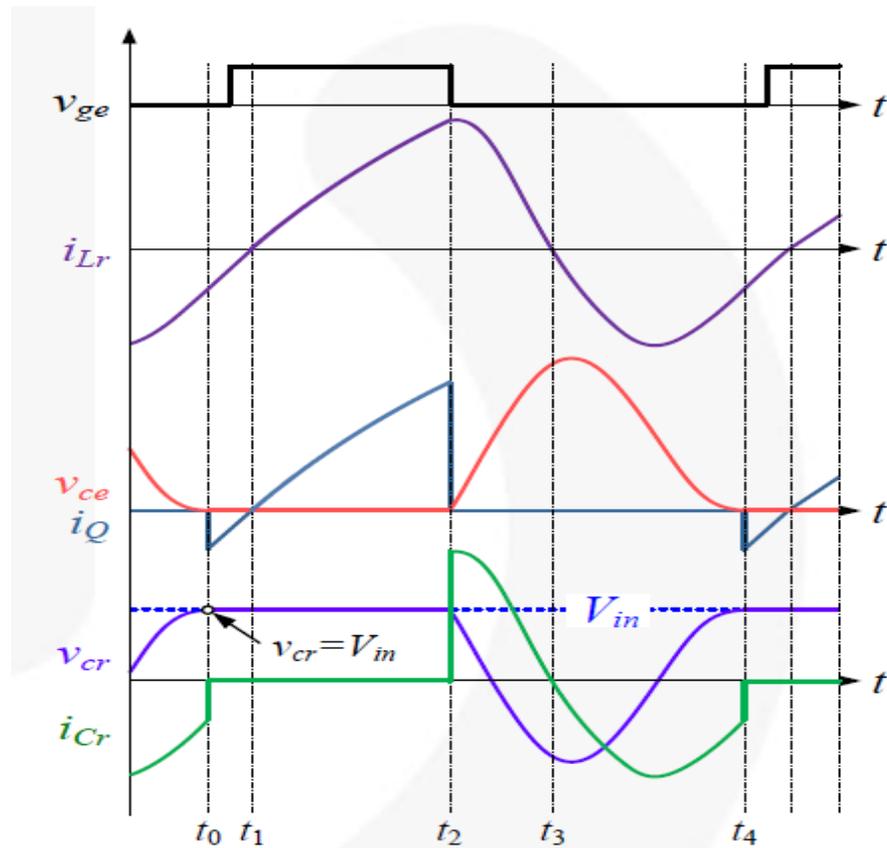
Modo II



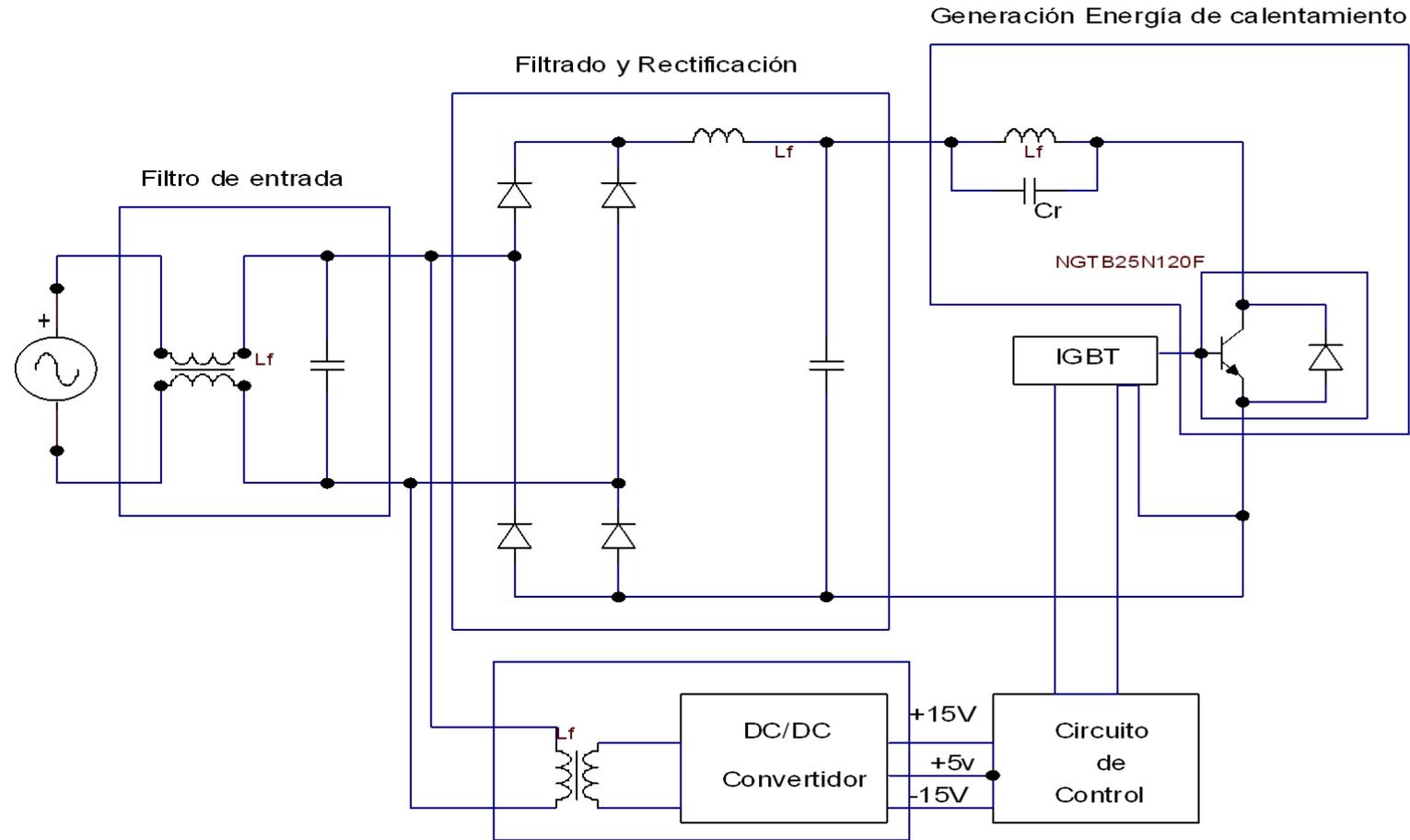
Modo III



Modo IV



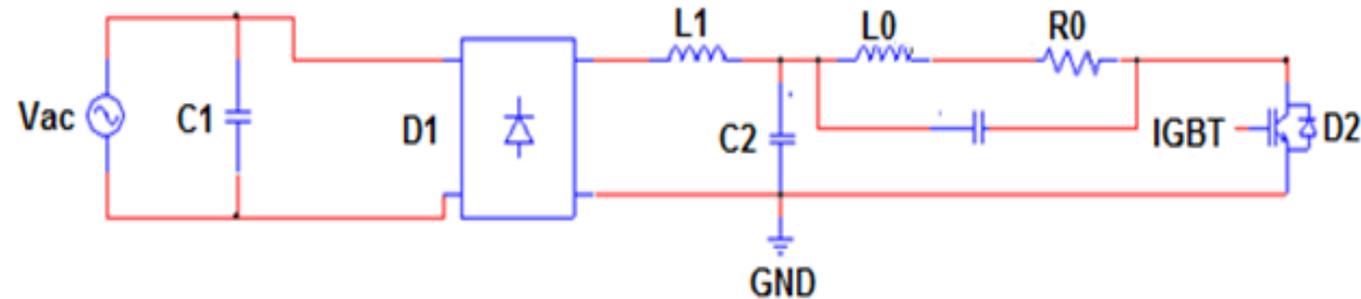
# Diagrama de bloques del sistema.



Fuente de alimentación para el control electrónico.



## *Diseño electrónico del sistema.*



**Se presenta la configuración genérica del circuito de potencia, en base a este diseño se realiza los cálculos para obtener los valores a usar en la simulación e implementación.**



## ***Diseño electrónico del sistema.***

- **Elección filtro capacitivo**

$$C1 = 2\mu f \text{ a } 250 V$$

- **Diseño del rectificador de onda completa**

$$P = 1000 W$$

$$P = V * I$$

$$I = \frac{1000W}{120V}$$

$$I = 8.33 A$$

$$V_{pico_{inv}} = 120 * \sqrt{2}$$

$$V_{pico_{inv}} = 169.70 V$$

$$fs = 2$$

*Rectificador a 340 V y*

*> 16,6 A*

$$V_{dc} = \frac{2 * V_{max}}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}Vf}{\pi} = \frac{2\sqrt{2} * 120Vac}{\pi} = 108.03 V$$

$$I_{dc} = \frac{P}{V_{dc} * n} = \frac{1000}{108.03 * 0.8} = 11.57 A$$

$$I_{rms} = \frac{I_{dc}}{\sqrt{2}} = \frac{11.57 A}{\sqrt{2}} = 8.18 A$$

*Puente Rectificador*

*I<sub>rms</sub> > 8,18A    V<sub>dc</sub> > 108,3 V    V<sub>pico inverso</sub> > 339,4*

*Escogemos 2 puentes rectificadores MB354G*



## ***Diseño electrónico del sistema.***

- **Diseño del filtro LC.**

Asumimos  $C = 10\mu f$

$$f_0 = \frac{1}{\pi\sqrt{L_0 C_0}}$$

$$L = \frac{1}{C(f_c * \pi)^2} =$$

$$\frac{1}{10\mu f (31000 * \pi)^2}$$

$$L = 10.54\mu H$$

- **Diseño del inversor Cuasi-Resonante**

$$P = 1000 W$$

$$I = 8,33 A$$

$$f = 31kHz$$

$$f_0 = \frac{1}{\pi\sqrt{L_0 C_0}}$$

$$L_0 = \frac{1}{C_0(f_0 * \pi)^2} =$$

$$\frac{1}{0.34\mu f * (31000 Khz * \pi)^2}$$

$$L_0 = 310.09\mu H$$



## ***Diseño electrónico del sistema.***

- **Dimensionamiento del IGBT.**

$$V_{dc} = 108.03 V \rightarrow U_d = 108.03 V$$

$$\text{Asumimos } C = 0,33 \mu f$$

$$f = 31 \text{kHz}$$

$$\text{Asumimos resistencia de la tubería } R_o = 0,341$$

$$L_o = 310.09 \mu H$$

$$\text{Asumimos relación de trabajo } D = 0,5$$

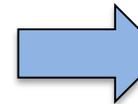
$$t_{on} = D \cdot T = 16,12 \text{ seg}$$

$$t_{off} = T(1-D) = 16,12 \text{ seg}$$

$$i_{L0}(t_{on}) = \frac{U_d}{R_o} * \left(1 - e^{-\frac{R_o t}{L_o}}\right)$$

$$i_{L0} = 39,83 A$$

**SELECCIÓN DEL IGBT**



**INFINEON FF100R12RT4**

$$V_{CE} = 1200V$$

$$I_{C \text{ NOM}} = 100 A$$



## ***Diseño electrónico del sistema.***

- **Capacitor del circuito resonante.**

$$U_c = U_d - U_{ce}$$

$$U_c = 108.03 - 1200$$

$$U_c = 1091,97 V$$

$$C = 0,33\mu\text{f a } 1700 V$$

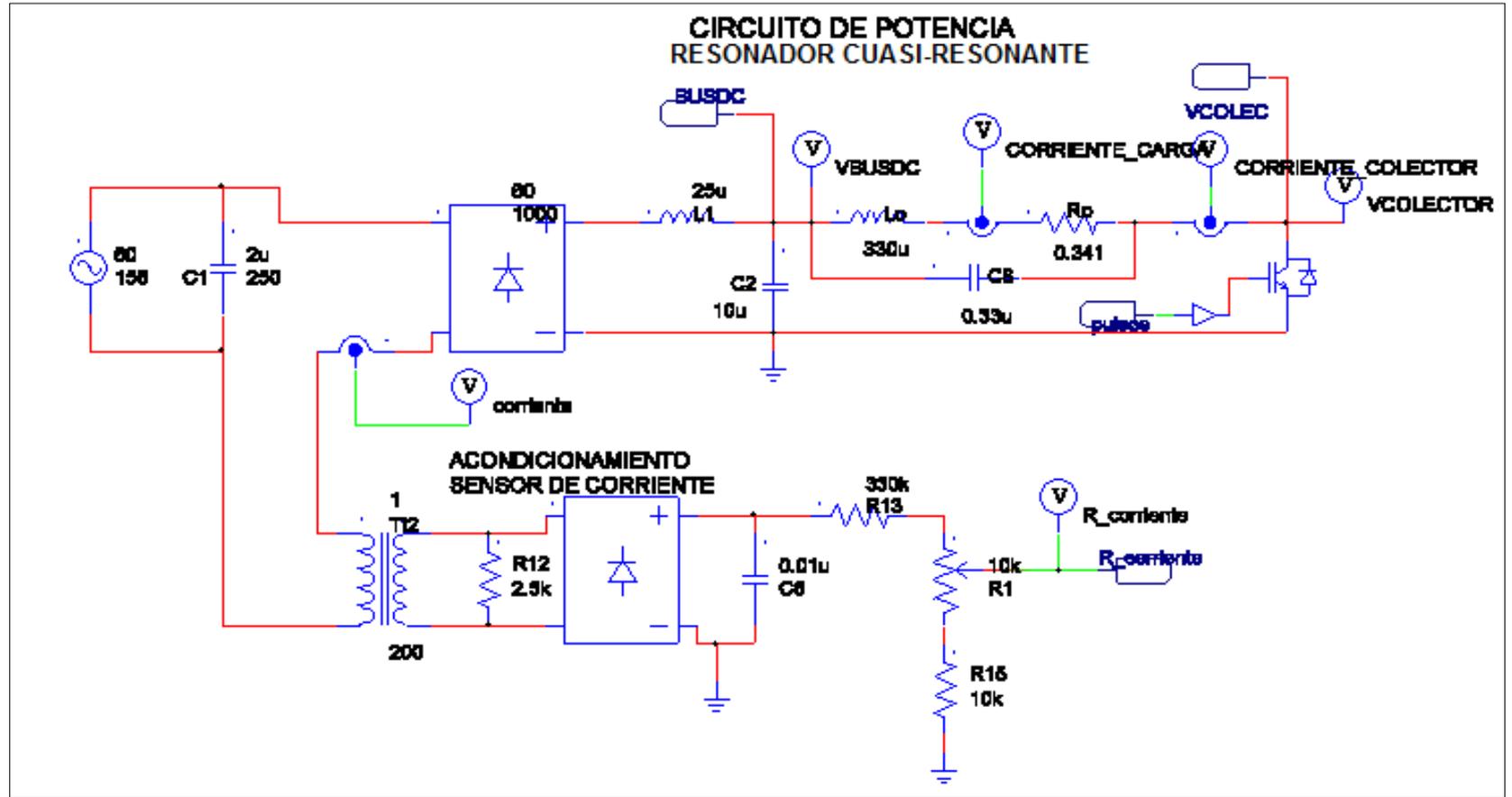
- **Selección del Driver IGBT.**

Recomendado por el fabricante para aplicaciones resonantes.

**1EDI05I12AF**



# Selección e implementación del sensor de corriente.



# Circuito de realimentación de corriente.

- $V_2 = VCC * \frac{R20[R23]}{(R20[R23]+R21)}$

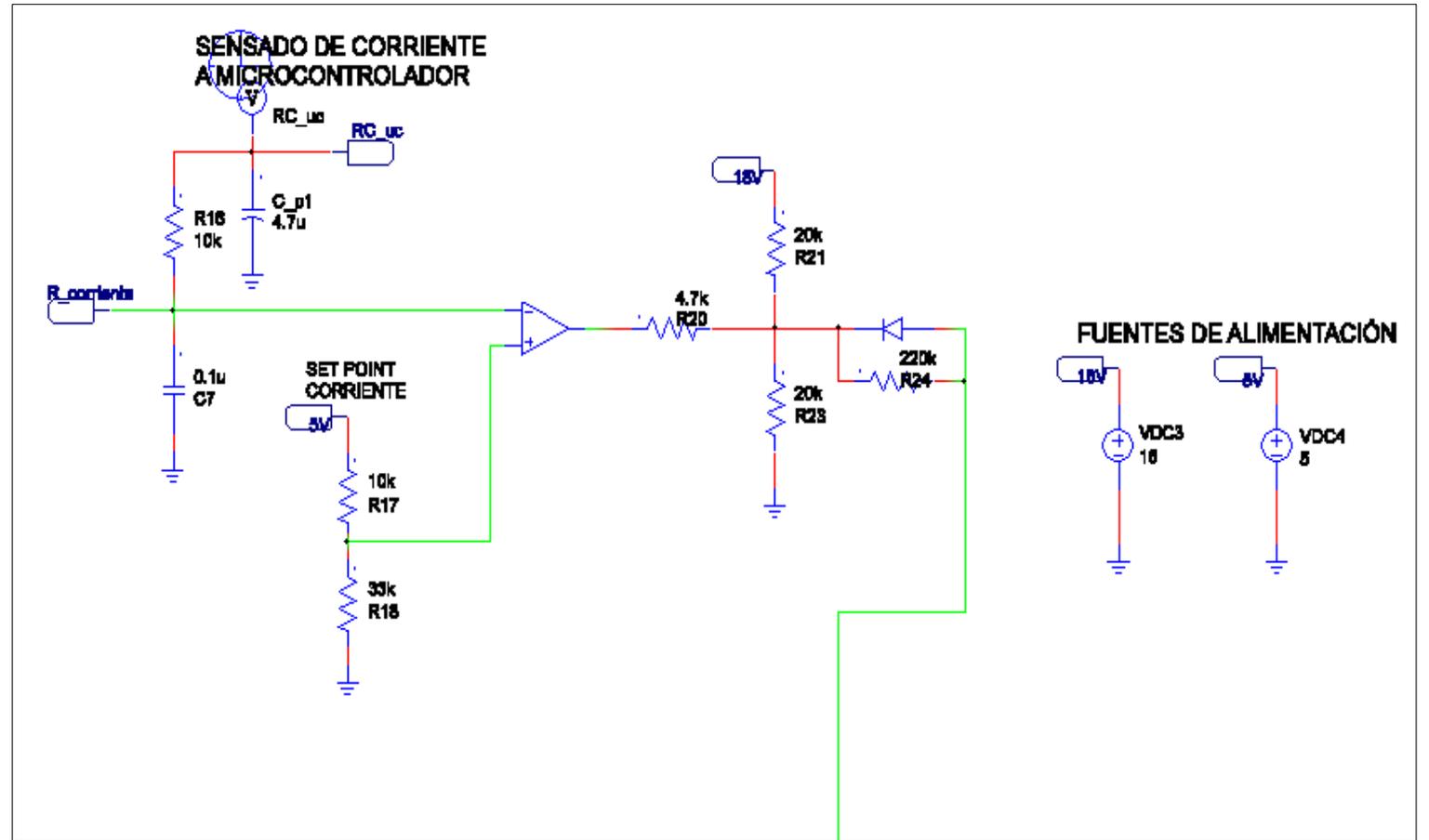
$$V_2 = 18 * \frac{\frac{1}{\frac{1}{4.7} + \frac{1}{20}}}{\left(\frac{1}{\frac{1}{4.7} + \frac{1}{20}}\right) + 20}$$

$$V_2 = 2.87 \text{ Voltios}$$

- $V_2 = VCC * \frac{R21}{R21+R23}$

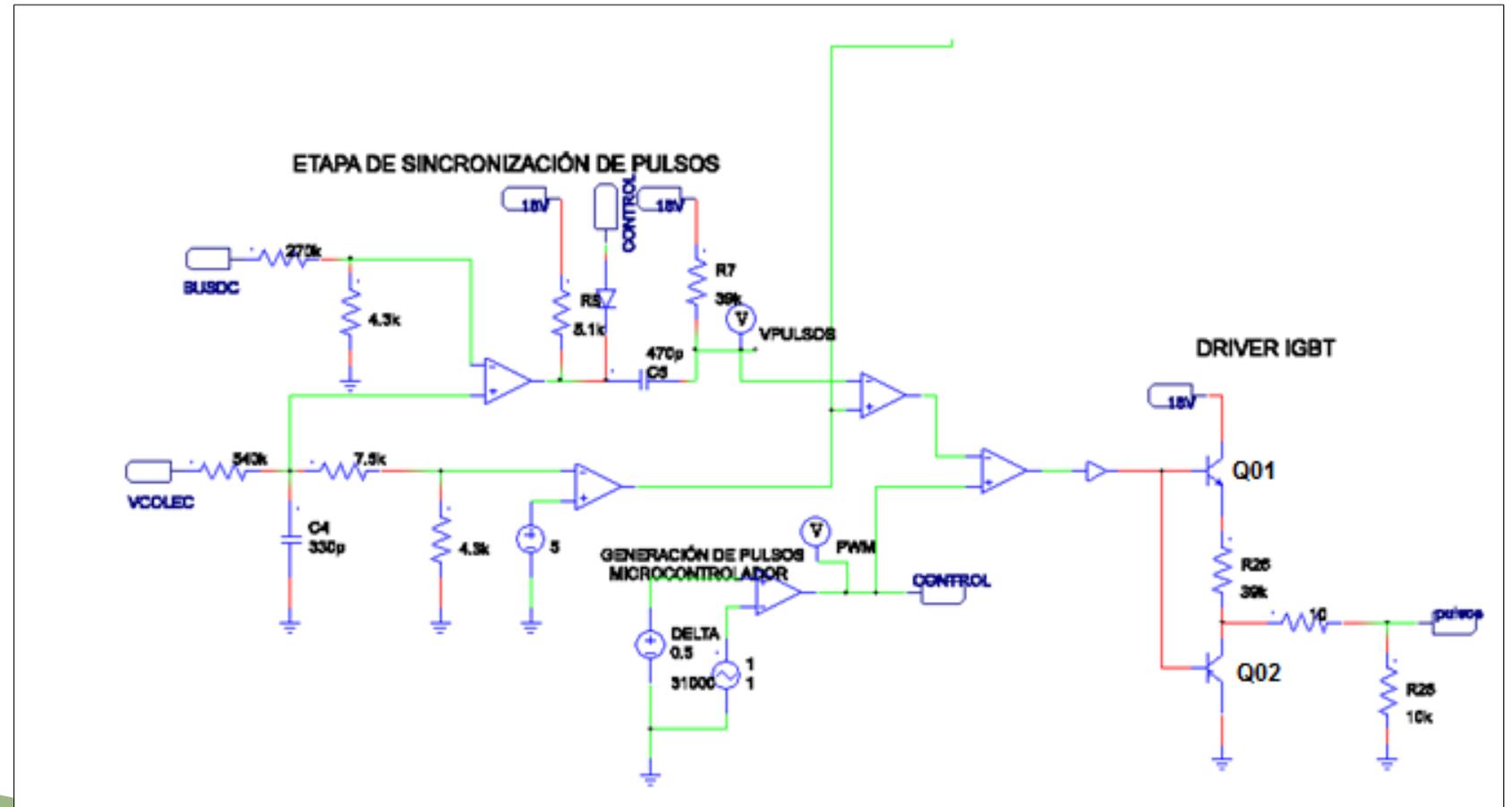
$$V_2 = 18 * \frac{20}{20+20}$$

$$V_2 = 9 \text{ voltios}$$



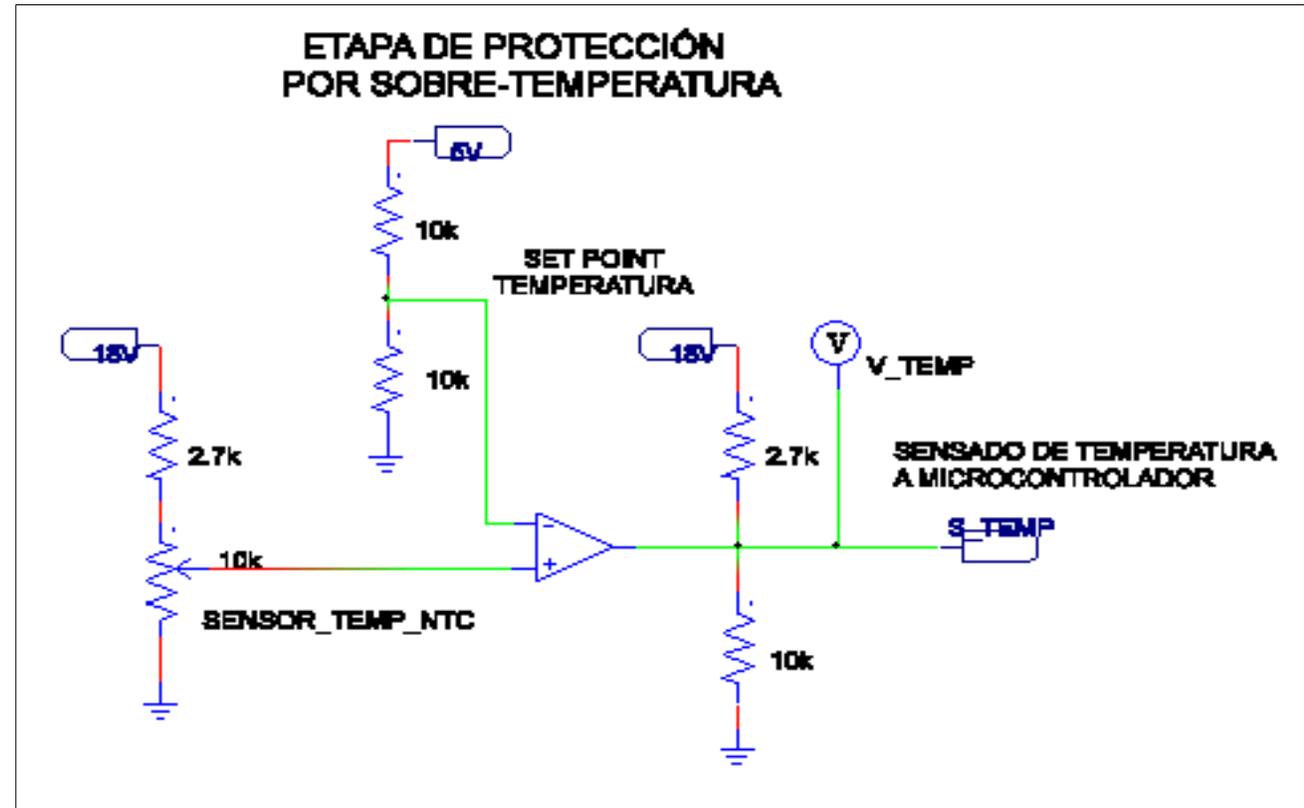


# *Circuito sincronizador de pulsos para control IGBT.*



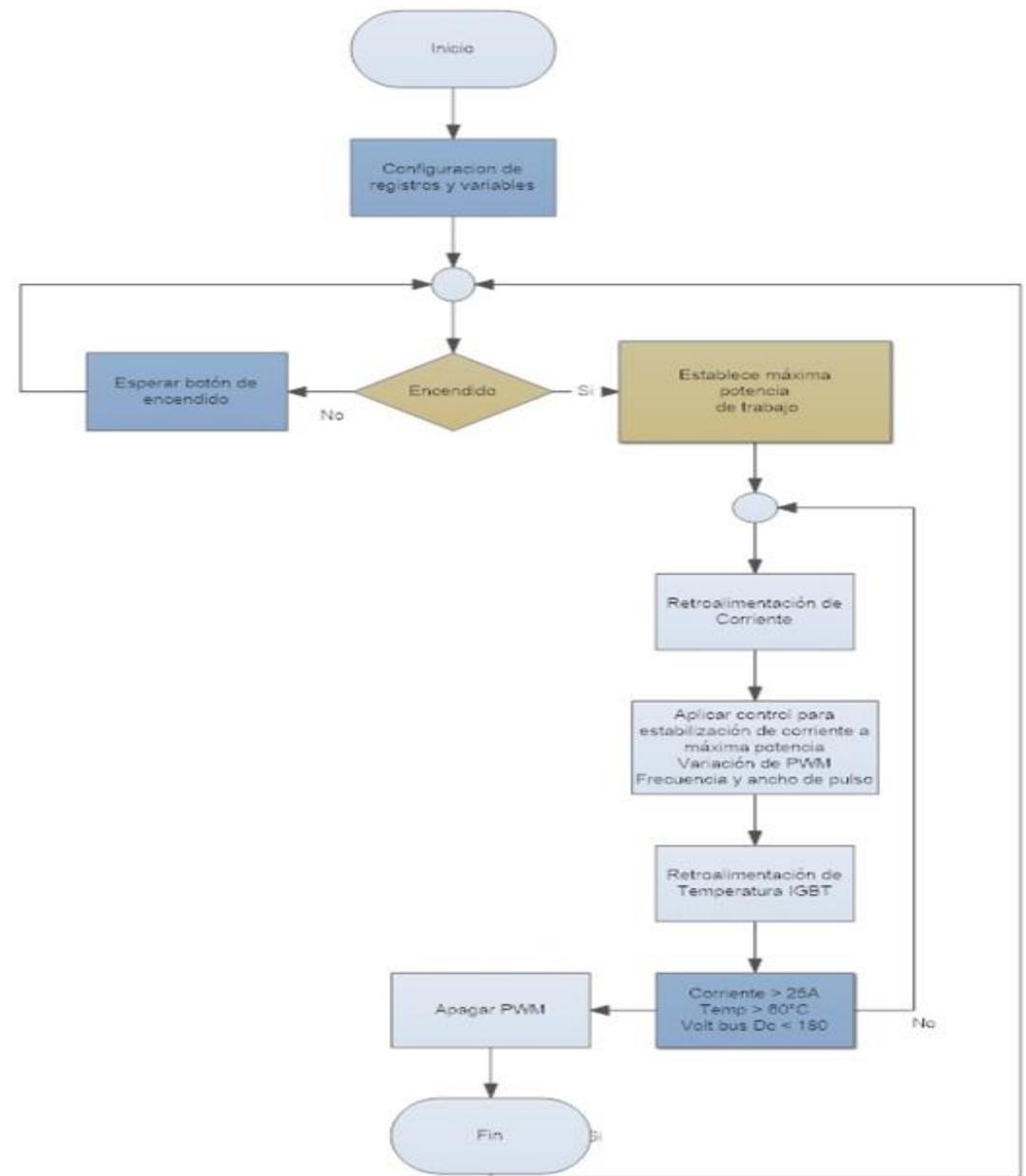
## *Etapa de protección por sobre temperatura.*

Para un funcionamiento óptimo, la temperatura en el IGBT no supera los 85°C.



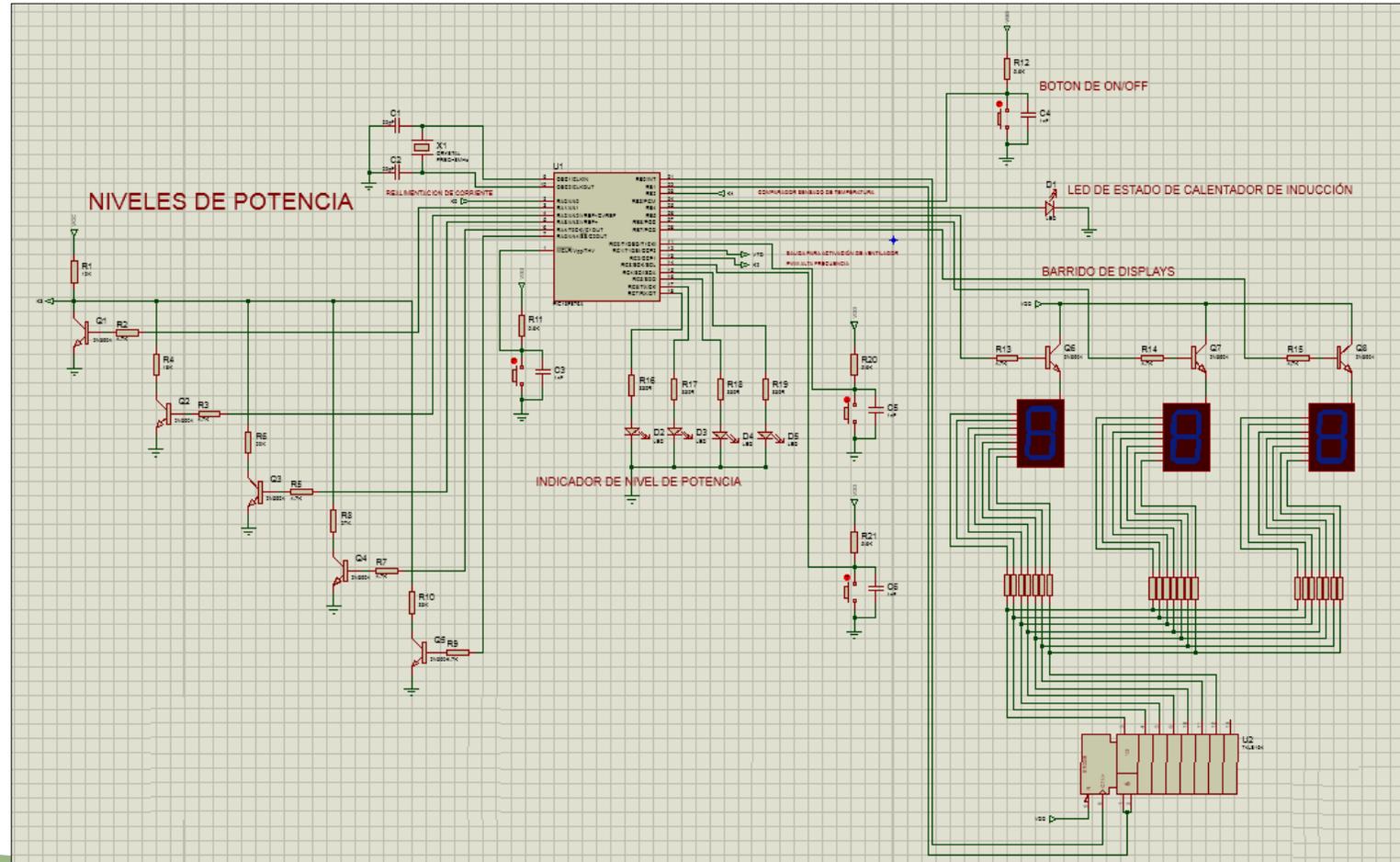


# *Diseño del algoritmo de control para el sistema.*



# Diseño del circuito de control para el sistema.

- Diseño en el Software Proteus.
- PIC 16f631.
- Pulsadores (Nivel de Potencia)
- Display y decodificador 74LS164.





# *Diseño de la bobina de inducción electromagnética.*

$$L = 0.0790 * \frac{a^3}{p^2} * F$$

$$F = 12.658 * \frac{p^2}{a^3} * L$$

$$F = 12.658 * \frac{(0.232\text{cm})^2}{(3.25\text{cm})^3} * 331.11\mu\text{F}$$

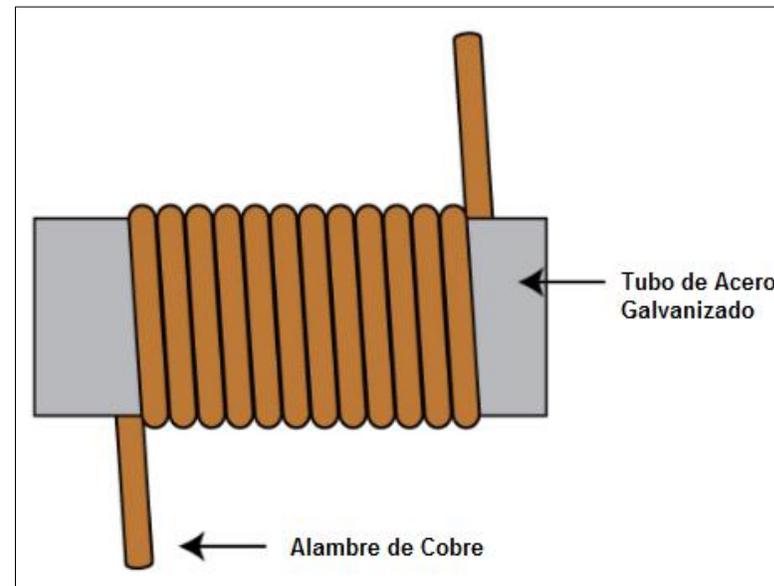
$$F = 6.57$$

$$\frac{2a}{l} = 1$$

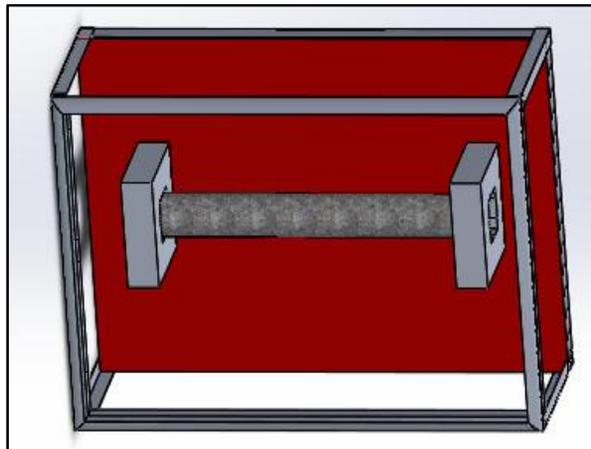
$$l = 6.5 \text{ cm}$$

$$\frac{l}{p} = N$$

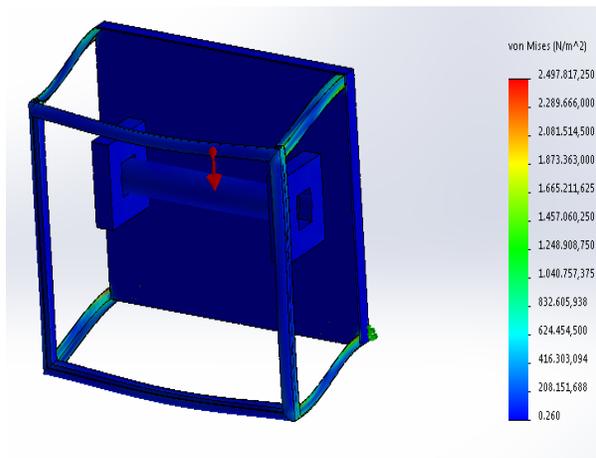
$$N = \frac{6,5}{0,232} = 30 \text{ vueltas}$$



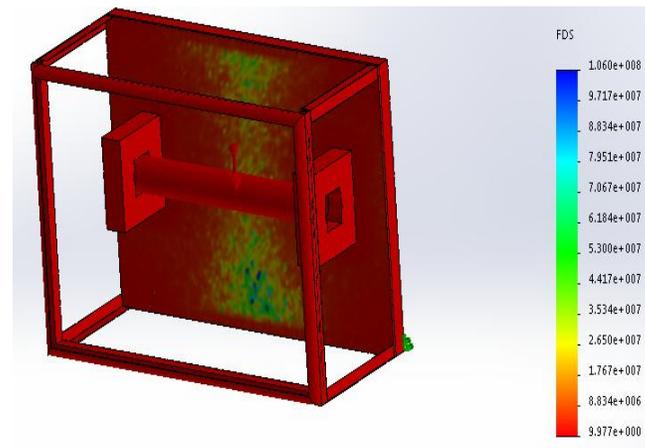
# Diseño mecánico y selección de materiales para la carcasa.



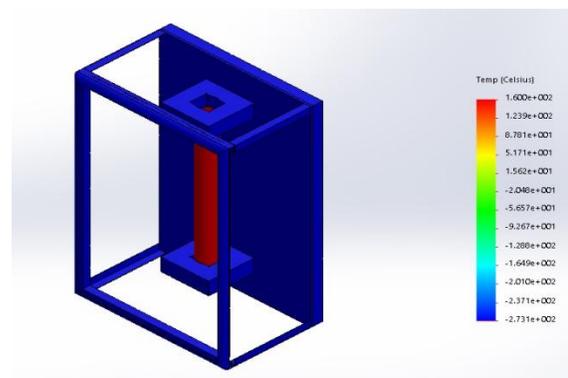
*Diseño Carcasa*



*Análisis Estático*



*Factor de Seguridad*



*Análisis térmico*

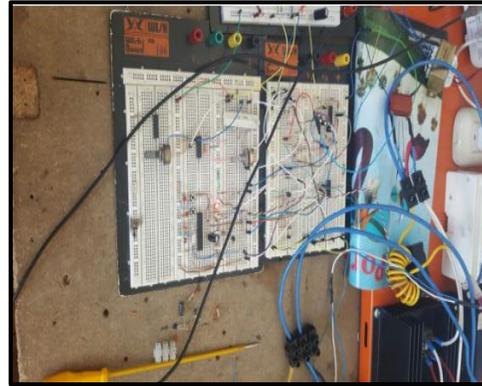
## Materiales:

- Aluminio.
- Alubon.
- Policarbonato
- Acero galvanizado
- Cobre

# CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA



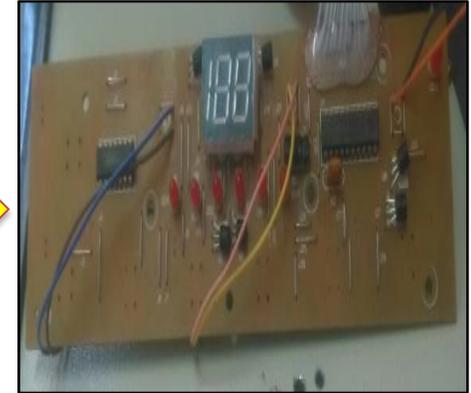
*Construcción Bobina*



*Implementación circuito de control y potencia*



*Implementación bobina y circuito*



*Construcción de placas*



*Montaje en la caja térmica*





# PRUEBAS Y RESULTADOS

*Medición de corriente en el prototipo.*



$$P = V * I$$

$$P = 122.2 \times 7.8$$

$$P = 953.16W$$

$$\eta = \frac{P_{output}}{P_{input}}$$
$$\eta = \frac{989.82W}{1000W} * 100$$
$$n = 95.31\%$$

*Medición de corriente la ducha.*



$$P = V * I$$

$$P = 122.2 \times 35.3$$

$$P = 4313.66 W$$

$$\eta = \frac{P_{output}}{P_{input}}$$
$$\eta = \frac{4313.66W}{5200W} * 100$$
$$\eta = 82.95\%$$



# PRUEBAS Y RESULTADOS

CALENTADOR DE INDUCCION ELECTROMAGNÉTICA		
CAUDAL	TEMPERATURA BOBINA DE INDUCCIÓN	TEMPERATURA DE AGUA A LA SALIDA
0,5 LT/MIN	95	35
1LT/MIN	92	25
1,5LT/MIN	90	22

DUCHA ELÉCTRICA		
CAUDAL	TEMPERATURA NIQUELINA(°C)	TEMPERATURA DE AGUA A LA SALIDA(°C)
0,5 LT/MIN	120	40
1LT/MIN	100	35
1,5LT/MIN	80	32

TEMPERATURA DE FUNCIONAMIENTO CALENTADOR DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA						
TIEMPO (min)	0,5	1	1,5	2	2,5	3
BOBINA (°C)	42	63	85	103	123	153



¿Es posible que el consumo energético de un calentador electrónico de inducción electromagnética sea menor que una ducha eléctrica?

- **Variables Dependientes:**  
Consumo energético.
- **Variables Independientes:**  
Calentador electrónico de inducción electromagnética.

**Hipótesis de Trabajo :** Con los datos obtenidos experimentalmente sobre consumo de potencia , se puede determinar que la hipótesis planteada en el proyecto queda probada.

# Análisis de costos

PLACA DE POTENCIA Y DISPARO				
DESCRIPCIÓN	CÓDIGO	CANTIDAD	P. UNITARIO	P. TOTAL
CIRCUITO INTEGRADO	LM339	1	0,65	0,65
FUENTE VYPER 18 V	A2	1	3,8	3,8
CIRCUITO INTEGRADO	LM7805	1	0,65	0,65
TRANSISTOR	PNP	1	0,25	0,25
TRANSISTOR	NPN	5	0,25	1,25
TRANSFORMADOR DE CORRIENTE	1:200	1	2,5	2,5
PUENTE RECTIFICADOR	MB35	1	16	16
DIODO RECTIFICADOR	1N4007	6	0,15	0,9
CAPACITOR CERÁMICO POTENCIA	22UF	1	4	4
CAPACITOR CERÁMICO POTENCIA	0,27UF	1	4	4
CAPACITOR CERÁMICO POTENCIA	10UF	5	5	25
CAPACITORES ELECTROLITICOS	A16V	1	0,4	0,4
CAPACITORES ELECTROLITICOS	A25V	1	0,4	0,4
CAPACITORES ELECTROLITICOS	A50V	1	0,4	0,4
CAPACITORES CERÁMICOS SEÑAL	S/C	12	0,2	2,4
RESISTENCIA VARIABLE	10KOMH	1	0,5	0,5
RESISTENCIAS	1/4W	24	0,1	2,4
RESISTENCIAS	1/2W	12	0,1	1,2
INDUCTANCIA FILTRO	S/C	1	2	2
BOBINA DE INDUCCION	S/C	1	80	80
TERMISTOR	S/C	1	1,5	1,5
IGBT	FF100R12RT4	1	149	149
CIRCUITO IMPRESO EN PLACA		1	150	150
<b>TOTAL COSTO PLACA DE POTENCIA</b>				<b>449,2</b>

PLACA DE CONTROL				
DESCRIPCIÓN	CÓDIGO	CANTIDAD	P. UNITARIO	P. TOTAL
TRANSISTOR	NPN	3	0,25	0,75
TRANSISTOR	PNP	3	0,25	0,75
RESISTENCIA	S/C	35	0,10	3,50
BUS DE COMUNICACIÓN	10 PINES	1	3,50	3,50
PULSADORES	S/C	3	0,50	1,50
DIODOS LED	ROJO	7	0,25	1,75
CAPACITORES CERÁMICOS	22	2	0,15	0,30
CAPACITORES CERÁMICOS	104	2	0,15	0,30
CAPACITOR ELECTROLÍTICO	470UF	1	0,15	0,15
CRISTAL OSCILADOR	8MHZ	1	2,00	2,00
MICROCONTROLADOR	28 PINES	1	8,50	8,50
CIRCUITO INTEGRADO	746S164	1	0,80	0,80
DISPLAY 1 DIGITO	S/C	3	1,00	3,00
CIRCUITO IMPRESO EN PLACA	S/C	1	80,00	80,00
<b>TOTAL COSTO PLACA DE CONTROL</b>				<b>106,8</b>

VARIOS				
DESCRIPCIÓN	CÓDIGO	CANTIDAD	P. UNITARIO	P. TOTAL
CAJA DE ALUMINIO BOBINA DE INDUCCION	S/C	1	74	74
DISIPADOR DE CALOR DE ALUMINIO	S/C	2	15	30
FUSIBLE	S/C	1	1	1
CAJA PARA COMPONENTES ELÉCTRONICOS	S/C	1	45	45
VARIOS	S/C	1	50	50
IMPREVISTOS	S/C	1	50	50
<b>TOTAL COSTO VARIOS</b>				<b>250</b>

COSTO DE INGENIERÍA SEGÚN PERFIL OCUPACIONAL			
B2;INGENIERO ELECTRÓNICO ESPECIALISTA			
EJECUCIÓN	HORAS	COSTO/H	TOTAL
DISEÑO HARDWARE	250	2,46	615
DISEÑO SOFTWARE	250	2,46	615
PRUEBAS PROTOTIPO	20	2,46	49,2
		<b>TOTAL</b>	<b>1279,2</b>

**El Costo total del prototipo de calentamiento de agua de inducción electromagnética tiene un costo total de 2085.20.**





# ***Conclusiones***

- ✓ Se logró diseñar y construir prototipo de calentamiento de agua por inducción electromagnética de bajo consumo y una vez realizadas las pruebas en el prototipo de calentamiento de agua por inducción electromagnética se puede decir que cumple con los parámetros de diseño presentados, tiene un calentamiento eficiente en la zona superficial de la tubería, mostrando en los resultados una temperatura de 153 grados centígrados en tres minutos con un consumo de 953.16 watts.
- ✓ Se diseñó el sistema de calentamiento, mediante una bobina de inducción electromagnética que rodea una tubería de acero galvanizado, de esta manera genera el calentamiento al paso del agua; para las aplicaciones de calentamiento por inducción electromagnética no da buenos resultados la implementación de controles convencionales, ya que trabaja a frecuencia en el caso del prototipo trabaja a en un rango de 31Khz a 45Khz y se requiere una respuesta cada 20 micro segundos, por lo cual se utilizó el circuito sincronizador de pulsos



- ✓ Se diseñaron los circuitos electrónicos que en conjunto forman todo el sistema electrónico encontrando que es necesario el circuito sincronización de pulsos para evitar daños en el IGBT por sobre corriente, ya que en las pruebas realizadas en la implementación, respetando la configuración del tanque resonante el elemento de conmutación fallo por sobre corriente; debido a las conmutaciones a alta frecuencia el IGBT debe tener una buena disipación de calor; se implementó un disipador estático (placa de aluminio) y dinámico (ventilador) , respetando los datos técnicos del fabricante del conmutador en donde a mayor temperatura menor es la corriente que soporta; otra característica del IGBT es, a mayor frecuencia se tiene mayor conmutación y esto genera calor, por lo que se requiere protección sobre temperatura, por lo cual se implementó el circuito para proteger al elemento de conmutación, con la finalidad de asegurar su funcionamiento continuo; como una de las protecciones que el sistema dispone es la medición de corriente, fue necesario la implementación de un circuito adicional, los cuales inhiben la señal al detectar demasiada corriente, de esta manera se garantiza una óptima protección al IGBT.



- ✓ Para la selección de los sensores de corriente en la realimentación se probó el acondicionamiento de varios sensores como por ejemplo el de efecto Hall, resistencia shunt y transformador de corriente; con el sensor de efecto hall no brindo buenos resultados debido al ruido que ingresa al sensor; para el caso de la resistencia shunt, el nivel de voltaje que entrega a la salida es muy bajo y en el acondicionamiento ingresa mucho ruido al sistema, el transformador de corriente no ingresa mucho ruido siendo el más óptimo para la implementación en el prototipo
- ✓ Se diseñó el algoritmo de control tomando en cuenta el funcionamiento esperado del prototipo de esta manera se procedió a la implementación del circuito de control y la programación del microcontrolador.
- ✓ Se realizaron pruebas de funcionamiento y de consumo energético de donde se obtuvo que al comparar la eficiencia energética del calentador de agua por inducción electromagnética y la ducha eléctrica convencional que se basa en el calentamiento resistivo, se puede determinar valores porcentuales de 95.31% y 82.95% respectivamente, se muestra una clara diferencia, entre los dos sistemas de calentamiento; al comparar el consumo energético se tiene 0.95 KW en el calentador de inducción electromagnética y 4.31 KW en la ducha eléctrica, se determina una amplia diferencia en cuanto al consumo.



## ***Recomendaciones***

- ✓ Se recomienda utilizar un mejor elemento para la disipación de calor que genera el IGBT, ya que puede durar hasta 3.5 minutos de funcionamiento continuo, antes de que se muestre el error por sobre temperatura en el IGBT, este tiempo de funcionamiento a la máxima potencia permitió tomar los valores experimentales dando como resultado una buena aproximación para próximos estudios de calentamiento inductivo.
- ✓ El diseño presentado para la bobina de inducción para el calentamiento de agua, no ofrece un calentamiento rápido al paso del agua, por lo que se recomienda para futuros estudios se analice las pérdidas de calor que se producen en la bobina y el diseño de un tanque de almacenamiento o recirculación de agua con la finalidad de obtener mejores resultados de calentamiento.
- ✓ Con el propósito de que pueda pensarse en la producción de este tipo de calentadores en el país se debe realizar un estudio que justifique la inversión, ya que los elementos electrónicos que lo componen son costosos y se los debe importar al país.



- ✓ Para mejorar el diseño del inversor resonante se puede aplicar un inversor de onda completa, con el inconveniente de que usa dos IGBT en paralelo lo mismo que se traduce a alto costo en la implementación.
- ✓ Con la finalidad de aumentar la eficiencia en el calentamiento una etapa inicial puede ser el precalentamiento del agua mediante otros sistemas de calentamiento entre uno de ellos de tipo solar, generando un calentador híbrido que presente mejores prestaciones al calentar el agua.