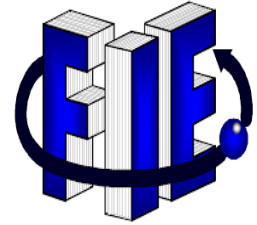


**Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo**



**Facultad de Ingeniería Eléctrica**



***"FUENTE CONMUTADA INALÁMBRICA"***

**TESIS**

**Presenta:**

**Ivan Corona Alcala**

**Que para obtener el Título de  
INGENIERO ELECTRICISTA**

**Asesor de Tesis**

**M.C. Carlos Manuel Sánchez González**

**Morelia Michoacán marzo del 2016**

## Agradecimientos

*Agradezco principalmente a Dios y a mis amados Padres Ma. Salud Alcalá y Ramiro Corona, que con tantos sacrificios, esfuerzo y amor hicieron de mí un persona de bien, sin ustedes jamás lo hubiera logrado gracias papas los amo, a mis tan queridos y divertidos hermanos Aide, Miriam y Ramiro que siempre creyeron en mí y jamás me abandonaron cuando más los necesitaba, a mis tan apreciados amigos que siempre estuvieron ahí cuando las cosas eran difíciles y me apoyaban dándome su compañía incondicional y consejos que aún tengo en mi mente y mi corazón, a mis familiares que aunque no estaban a mi lado siempre se acordaban de mí, a la niña que me robo el corazón, que me acompañó me daba ánimos y compartía mis emociones, a mi novia Isabel que me hace tan feliz, a mi hermosa escuela y profesores, especialmente a mi asesor de tesis Carlos Manuel, que con su conocimiento y fortaleza forjaron en mí una persona con los conocimientos necesarios para servir a los demás, a los personajes de la historia científicos, filósofos, investigadores y los más humildes y sabios maestros que con su ardua perseverancia, sentido de la vida y fugaz imaginación han encontrado la esencia de las cosas y plasmado algunas leyes que describen la majestuosa naturaleza que día a día nos regala una oportunidad más de vida, a mis fieles mascotas que han formado parte de mi vida y han traído alegría a los momentos vividos y por vivir a Coronel, Hotch, Obama, Marlin y al Panfilo.*

## **Dedicatoria**

*Dedico esta sencilla pero muy significativa obra a mis padres, mis hermanos, mis familiares, a mi novia, a todos mis amigos, a las grandes obras de la humanidad, Nikola Tesla, a la naturaleza, y a todos mis amigos y familiares caídos que aún viven en mi corazón día con día.*

## Resumen

Todo es energía en el universo, las señales que existen a nuestro alrededor son invisibles, no por eso dejan de existir la energía se manifiesta en señales físicas; tales como el magnetismo, los colores, el viento y el sol, propositivamente la electricidad.

La electricidad es uno de los más hermosos fenómenos físicos en el universo, una de las ínfimas formas de manifestación de la energía en la que nos damos cuenta que podemos trabajar en armonía con la naturaleza que nos proporciona todo lo que somos y de lo que estamos constituidos. Siendo así la propia electricidad la que nos lleva a crear cosas magnificas y sencillas, sistemas tan complejos como la mente humana y otras tan simples como lo es el frotarse el cabello.

Con lo anterior se puede pensar que es posible crear casi cualquier cosa que nos ayude a mejorar nuestra calidad humana, rompiendo los paradigmas existentes en una vida cotidiana, las fuentes de energía eléctrica suelen ser muchas veces incómodas, voluminosas y con cables en muchas direcciones, presentando inconvenientes para su funcionamiento de una forma segura y práctica, siendo esto así nos aventuramos a experimentar con energía inalámbrica, energía que puede ser generada, transmitida y recibida bajo un pequeño sistema eléctrico/electrónico, sin cables usando el aire como medio en el que la electricidad se pueda captar de una forma práctica y segura satisfaciendo las necesidades presentes y/o futuras para el desarrollo social.

Este proyecto de investigación con esta índole es lo que llevara a implementar una fuente eléctrica; un pequeño dispositivo de energía Inalámbrica.

Energía inalámbrica simple controlada universal

## Abstract

Everything is energy in the universe, the signals that exist around us are invisible, no longer exist so the energy is manifested in physical signs; such as magnetism, colors, wind and sun, purposefully electricity.

Electricity is one of the most beautiful physical phenomena in the universe, one of the lowest forms of manifestation of energy that we realize that we can work in harmony with nature that provides us with everything we are and what we are constituted. making it the electricity itself that leads us to create magnificent and simple things, such complex systems as the human mind and others as simple as is the rub hair.

With the above may think it is possible to create almost anything to help us improve our human quality, breaking existing paradigms in a daily life, the sources of power are usually often uncomfortable, bulky and leads in many directions, presenting problems to operate in a safe and practical way, being so we ventured to experiment with wireless power, energy can be generated, transmitted and received on a small electric / electronic system wirelessly using air as a medium in which electricity can be captured in a practical and safe way to meet the present and / or future for social development.

This research project with this kind is implemented to carry an electrical source; a small device wireless power.

# Contenido

Agradecimientos.....	ii
Dedicatoria.....	iii
Resumen.....	iv
Abstract.....	v
Contenido.....	vi
Lista de Figuras.....	x
Lista de tablas.....	xiv
Lista de símbolos y abreviaturas.....	xv
<b>Capítulo 1. Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1 Objetivo de Tesis.....	1
1.2 Justificación <i>¿A dónde nos lleva una fuente de este tipo?</i> .....	1
1.2.1 Tendencias para el desarrollo humano.....	5
1.3 Metodología.....	7
1.4 Contenido de la Tesis.....	8
<b>Capítulo 2. Conceptos de los circuitos eléctricos y topologías de las fuentes conmutadas</b> .....	<b>9</b>
2.1 Capacitores.....	9
2.2 Inductores.....	13

---

2.3 Inductancia Mutua.....	18
2.4 Interruptores electrónicos.....	21
2.4.1 El diodo.....	21
2.4.2 Tiristores.....	22
2.4.3 Transistores.....	23
2.4.4 El Mosfet.....	24
2.5 Algunas topologías de convertidores de CD-CD.....	25
2.5.1 Un convertidor conmutado básico.....	25
2.5.2 El convertidor reductor.....	26
Análisis con el interruptor cerrado.....	27
Análisis con el interruptor abierto.....	28
2.5.3 El convertidor elevador.....	28
Análisis con el interruptor cerrado.....	28
Análisis con el interruptor abierto.....	29
2.6 Fuentes de alimentación de corriente continúa.....	30
2.6.1 Modelos de transformadores.....	30
2.6.2 El convertidor flyback.....	31
Análisis con el interruptor cerrado.....	33
Análisis con el interruptor abierto.....	34
2.6.3 Modo de corriente discontinua en el convertidor flyback.....	36
2.6.4 Resumen del funcionamiento del convertidor flyback.....	37
2.7 Una condición para la máxima potencia de transferencia: resonancia.....	38

<b>Capítulo 3. Tipos de fuentes de alimentación y componentes de la Fuente Conmutada Inalámbrica</b>	<b>41</b>
3.1 Fuentes de alimentación lineales.....	42
3.2 Fuentes de alimentación conmutadas.....	43
3.3 Fuentes de alimentación inalámbricas.....	44
3.4 Descripción de componentes de la Fuente Conmutada Inalámbrica.....	47
3.4.1 Fuente de poder de CD.....	48
3.4.2 El driver PWM de control.....	48
3.4.3 Ciclo de trabajo D.....	50
3.4.4 Frecuencia de conmutación $f_c$ .....	50
3.4.5 El Mosfet de potencia.....	52
3.4.6 El Clamp.....	53
3.4.7 La bobina primaria $L_1$ .....	54
3.4.8 La bobina secundaria $L_n$ .....	55
El inductor secundario $L_2$ .....	56
El inductor secundario $L_3$ .....	57
3.5 Datos reales de los inductores planos construidos.....	57
3.6 Adaptación propuesta para la bobina $L_n$ remota con un terminal USB.....	60
3.7 Adaptación propuesta para la bobina $L_n$ remota con iluminación.....	61
3.8 Estabilidad de la frecuencia $f$ .....	62



<b>Capítulo 4. Propuesta e Implementación de la Fuente Conmutada Inalámbrica</b>	63
4.1 Propuesta de la Fuente Conmutada Inalámbrica.....	63
4.2 Instrumentos de medición utilizados y pruebas del proyecto.....	67
4.3 Mediciones del inductor primario $L_1$ induciendo a la bobina primaria $L_2$ experimentando una carga Con LED's.....	70
4.4 Mediciones del inductor primario $L_1$ induciendo al Inductor secundario $L_2$ experimentando una carga con una toma USB alimentando un dispositivo móvil.....	78
4.5 Mediciones del inductor primario $L_1$ induciendo al inductor secundario $L_3$ experimentando una carga con LED's.....	85
4.6 Mediciones del inductor primario $L_1$ induciendo al inductor secundario $L_3$ experimentando una carga con una toma USB alimentando un dispositivo móvil.....	93
4.7 Relación de transformación, bobina primaria $L_1$ y secundaria $L_3$ .....	100
4.8 Un transformador plano con núcleo de aire.....	102
4.9 Ecuaciones polinómicas encontradas: Resultado de la información en el laboratorio donde se implementó el F.C.E.I. ....	106
4.10 Resultados de las pruebas realizadas de la Fuente Conmutada Inalámbrica.....	108
<b>Capítulo 5. Conclusiones y trabajos Futuros de la Fuente Conmutada de Energía Inalámbrica</b> .....	113
5.1 Trabajos futuros.....	115
<b>Apéndice A</b> Posición de RT y CT en el driver de control <b>TL494</b> , por <i>Texas Instruments</i> .....	117
<b>Apéndice B</b> Hoja de datos técnicos del <b>IRFZ44N</b> , por <i>Interntional Rectifier IR</i> .....	118
<b>Referencias</b> .....	119

# Lista de Figuras

## Capítulo 1

1.1	Nikola Tesla genio inventor.....	2
1.2	<i>Wardencllyffe</i> o torre Tesla <i>Long Island</i> .....	3
1.3	Derroche y contaminación electrónica.....	4
1.4	Fuente de energía inalámbrica una habitación.....	5
1.5	Fuente de energía inalámbrica en un automóvil.....	6
1.6	Fuente de energía inalámbrica para un automóvil.....	6
1.7	Fuente de energía inalámbrica en el transporte urbano.....	7

## Capítulo 2

2.1	Símbolo de un Capacitor.....	10
2.2	Carga de un capacitor.....	12
2.3	Capacitor real.....	12
2.4	Inductor.....	14
2.5	Símbolo del inductor.....	15
2.6	Tensión-Corriente de un inductor.....	16
2.7	Carga de un inductor.....	17
2.8	Inductor practico.....	18
2.9	Flujo magnético e inductancia mutua.....	19
2.10	Sentido de la corriente en bobinas del transformador.....	21
2.11	Polaridad y corriente en el Diodo.....	22
2.12	Polaridad y corriente en un Tiristor.....	23
2.13	Polaridad y corriente en un Transistor.....	23
2.14	Polaridad y corriente en un Mosfet.....	24
2.15	Interruptor ideal.....	25
2.16	Apertura y cierre del interruptor.....	25
2.17	El convertidor reductor (topología).....	27
2.18	Formas de onda del convertidor reductor.....	27
2.19	El convertidor elevador (topología).....	28
2.20	Formas de onda del convertidor elevador.....	29
2.21	El modelo del transformador.....	30
2.22	La fuente de alimentación Flyback (topología).....	32
2.23	Circuito RLC serie.....	38
2.24	Ancho de banda en un circuito RLC serie.....	39
2.25	Factor de calidad Q.....	40

**Capítulo 3**

3.1	Diagrama de bloques de una fuente de alimentación lineal.....	43
3.2	Diagrama simplificado de un sistema de comunicaciones electrónicas.....	44
3.3	Sistema de transmisión de energía por aire a una carga de Nikola Tesla.....	45
3.4	Sistema de Transmisión Inalámbrico de energía eléctrica de Nikola Tesla.....	46
3.5	Fuente de energía inalámbrica propuesta.....	47
3.6	Fuente de poder de CD.....	48
3.7	Driver de control PWM.....	49
3.8	Onda PWM.....	50
3.9	Ajuste de $F_c$ .....	51
3.10	Elementos Físicos.....	51
3.11	El Mosfet real.....	52
3.12	Circuito Clamp.....	53
3.13	El Clamp real.....	54
3.14	Bobina $L_1$ real.....	54
3.15	Bobina $L_n$ real.....	55
3.16	Curva de un filtro pasivo.....	56
3.17	Bobina $L_2$ real.....	56
3.18	Bobina $L_3$ real.....	57
3.19	Bobina $L_{2 y 3}$ ideal.....	58
3.20	Bobinas $L_{2,3,4 y 5}$ planas construidas.....	59
3.21	Elementos propuestos para USB.....	60
3.22	Adaptación propuesta USB.....	60
3.23	Adaptación propuesta para LED's.....	61
3.24	Resistores propuestos para LED's.....	61

**Capítulo 4**

4.1	Circuito nominal propuesto para la Fuente Conmutada Inalámbrica.....	64
4.2	Fuente Conmutada Inalámbrica Real.....	67
4.3	Fuente de alimentación PWM.....	67
4.4	Fuente de poder de CD (real).....	67
4.5	Multímetro Fluke.....	68
4.6	Multímetro Tulumex.....	68
4.7	Osciloscopio Tektronix.....	68
4.8	Cámara termográfica Flir.....	68

Induciendo  $L_1$  a  $L_2$  con carga tipo LED

4.9	Circuito electrónico Transmisor-Receptor F.C.E.I. y LED's.....	70
4.10	Tendencias de los voltajes.....	74
4.11	Eficiencia y potencia D1.....	74
4.12	Termografía del F.C.E.I. ....	75
4.13	Señales de control y potencia.....	75
4.14	Señales de voltaje inducido.....	76
4.15	Iluminación con fibra óptica.....	77
4.16	F.C.E.I. con LED's operando sin cables.....	77
4.17	LED'S Operando sin cables.....	78

Induciendo  $L_1$  a  $L_2$  con carga tipo USB

4.18	Circuito electrónico Transmisor-Receptor F.C.E.I. y dispositivo móvil....	78
4.19	Tendencia de los voltajes.....	80
4.20	Eficiencia y potencia D1.....	80
4.21	Termografía del F.C.E.I. ....	81
4.22	Señales de control y potencia.....	82
4.23	Señales inducidas de salida.....	83
4.24	F.C.E.I. operando sin cables.....	84

Induciendo  $L_1$  a  $L_3$  con carga tipo LED

4.25	Circuito electrónico Transmisor-Receptor F.C.E.I. y LED's .....	85
4.26	Tendencia de los voltajes.....	87
4.27	Eficiencia y potencia D1.....	88
4.28	Termografía del F.C.E.I. ....	89
4.29	Señales de control y potencia.....	90
4.30	Señales de voltaje inducido.....	91
4.31	LED's operando sin cables.....	91
4.32	Iluminación con Fibra Óptica.....	92
4.33	F.C.E.I. con LED's operando sin cables.....	92

Induciendo  $L_1$  a  $L_3$  con carga tipo USB

4.34	Circuito electrónico Transmisor-Receptor F.C.E.I. y dispositivo móvil....	93
4.35	Tendencia de los voltajes.....	95
4.36	Eficiencia y potencia D1.....	96
4.37	Termografía del F.C.E.I. ....	97
4.38	Señales de control y potencia.....	98
4.39	Señales inducidas de salida.....	99
4.40	F.C.E.I. operando sin cables.....	99
4.41	Circuito electrónico del transformador del dispositivo F.C.E.I. ....	100
4.42	Señales en bobina primaria $L_1$ .....	101
4.43	Señales en bobina secundaria $L_3$ .....	101
4.44	Circuito electrónico y transformador en el medio ambiente con núcleo de aire....	102
4.45	Tendencia de los voltajes pp de transformación $L_1:L_2$ .....	104
4.46	Tendencia de los voltajes RMS de transformación $L_1:L_2$ .....	105
4.47	Inducción electromagnética sin cables.....	105
4.48	Voltajes de salida de la prueba 1.....	109
4.49	Eficiencia de la prueba 1.....	109
4.50	Voltajes de salida de la prueba 2.....	110
4.51	Eficiencia de la prueba 2.....	110
4.52	Voltajes de salida de la prueba 3.....	111
4.53	Eficiencia de la prueba 3.....	111
4.54	Voltajes de salida de la prueba 4.....	112
4.55	Eficiencia de la prueba 4.....	112

## Lista de Tablas

3.1 Datos reales de los inductores construidos.....	58
4.1 Valores medidos de $L_1$ induciendo a $L_2$ con carga tipo LED.....	71
4.2 Valores medidos de $L_1$ induciendo a $L_2$ con carga tipo USB.....	79
4.3 Valores medidos de $L_1$ induciendo a $L_3$ con carga tipo LED.....	86
4.4 Valores medidos de $L_1$ induciendo a $L_2$ con carga tipo USB.....	94
4.5 Valores obtenidos como transformador $L_1:L_3$ con núcleo de aire.....	103
5.1 Comparación de eficiencias.....	114

## Lista de Símbolos y Abreviaciones

p	pico	$d/dt$	Derivada con respecto del tiempo
n	nano	$di/dt$	Derivada de la corriente con respecto del tiempo
$\mu$	micro	$\int dt$	Integral con respecto del tiempo
m	mili	$f$	Frecuencia
K	Kilo	$f_c$	Frecuencia de conmutación
M	Mega	H	Henry
G	Giga	I	Corriente eléctrica
A	Amperes	$i$	Corriente instantánea
A	Área	$j$	Parte imaginaria
B	Ancho de banda	$L$	Inductor o inductancia
C	Capacitor o capacitancia	LED	Diodo Emisor de Luz
$D$	Ciclo de trabajo	$T$	Periodo
$M$	Inductancia mutua	V	Volts
$N$	Número de vueltas	$v$	Voltaje instantáneo
n	Relación de transformación	$V_m$	Voltaje medio
P	Potencia instantánea	$V_S$	Voltaje de la fuente de CD
$P$	Potencia real	$Z$	Impedancia
PWM	Modulación por ancho de pulsos	$\Omega$	Ohms
$Q$	Factor de calidad	$\omega$	Frecuencia angulas
$q$	Carga eléctrica	$\Phi$	Flujo magnético
R	Resistor o resistencia	F	Faradio o Farad
s	Segundos		

F.C.E.I. Fuente Conmutada de Energía Inalámbrica. R.M.S. Root Mean Square ó Valor Cuadrático Medio (Valor Eficaz de una medición eléctrica).

# Capítulo 1

## Introducción

Se creará un dispositivo conmutado electrónicamente; llamado Fuente Conmutada Inalámbrica con la capacidad de crear un campo electromagnético e inducir voltaje a un receptor con la propiedad de recibirlo para aprovechar el fenómeno de la inducción electromagnética y alimentar una carga que consuma energía eléctrica.

Una de las razones que llevaron a desarrollar este dispositivo fue la ventaja de manipular la electricidad sin el uso de cables y conectores, para lo cual se partió de los conceptos más básicos de la física, teorías y fórmulas matemáticas que demuestran la posibilidad de crear elementos sencillos pero muy funcionales, una esbozo de este trabajo es ver una fuente de vibraciones electromagnéticas capaces de viajar en nuestro medio ambiente (transmisor) ; acondicionando su recepción para aprovecharlas al final (receptor). Al trabajar con este tipo de fenómenos fue necesario partir de un diseño abstracto y un tanto lo lógico, que haciendo uso de las leyes físicas nos llevará a la implementación así como afirmar su funcionamiento en nuestro medio ambiente.

### 1.1 Objetivos de la Tesis

Demostrar la capacidad de transmisión sin cables a pequeña escala de electricidad por el medio ambiente, haciendo evidente el fenómeno de la inducción electromagnética para cargas eléctricas así como la implementación de la Fuente Conmutada Inalámbrica para lograr el fenómeno en este tipo de transmisión eléctrica.

### 1.2 Justificación *¿A dónde nos lleva una fuente de este tipo?*

Resulta muy interesante pensar en una fuente que nos proporcione la energía que necesitamos de una forma directa sin una conexión física, tal vez hasta soñada, muy lejos de nuestro alcance pero ya sabemos que no lo es; es posible [5][6][7][8][9], y ya en un



pasado practicado cuando por primera vez se construyera una fuente entre los años 1901 y 1905 en *Shoreham (Long Island)*, a 96.5 Km de *Manhattan New York* de magnitudes extraordinarias y muy adelantada en su tiempo extravagante y poderosa, creada por una de las mentes más brillantes, el Ingeniero electricista y mecánico, matemático y Físico, un inventor casi utópico, Nikola Tesla figura 1.1 quien concebiría por primera vez el concepto "Electricidad sin Cables".



Figura 1.1 *Nikola Tesla Genio inventor 1853-1943*

La fuente era una torre llamada *Wardenclyffe* esta torre era capaz de transferir datos y energía eléctrica a cientos de kilómetros de distancia alimentada de la energía generada en la estación de generación la hidroeléctrica en *Buffalo, New York* , la que sería la primer central hidroeléctrica del mundo (*Niagara Falls power in Buffalo, New York*) y única en su tipo.

Contando una base poligonal, con una altura de 56.9 metros hacia lo alto de su torre se alza una cúpula de cincuenta y cinco toneladas de metales conductores, y debajo de ella se extendía un sistema de raíces de hierro que penetraba más de 36.5 metros en la corteza terrestre, esto era lo que se llamó la torre *Wardenclyffe* o torre Tesla, figura 1.2 y finalmente demolida en 1917 por fines e intereses económicos [4].



Figura 1.2 *Wardencliff* o Torre Tesla *Long Island, Manhattan New York, 1917.*

Teniendo en cuenta un poco de la historia y acuñando el concepto esencial y la inquietud por tener dispositivos capaces de comunicarse con una fuente de forma inalámbrica podemos asegurar el funcionamiento de un sistema libre de cables (relativamente aún), que nos permitan hacer en nuestras vidas las labores más prácticas, útiles y fáciles mejorando nuestra calidad de vida aprovechando más nuestros recursos energéticos.

La fuente Conmutada de Energía Inalámbrica (F.C.E.I.) es entonces una creación inspirada en el concepto de energía eléctrica sin cables, concepto que aprovechamos para llevar a cabo la construcción y operación de nuestro pequeño pero muy funcional dispositivo eléctrico.

A manera de *Justificación* podemos decir que nuestro prototipo cuenta con las siguientes ventajas:

- La conexión es *inalámbrica*.
- Resulta ser un dispositivo muy *práctico*.
- La capacidad para ser *universal*.
- Es *simple*.
- La *flexibilidad* sintonizar la frecuencia.
- Ayudaría a mejorar el *impacto ecológico*.
- En cuestiones de seguridad *aísla* la carga de la fuente.

El derroche de instrumentos de alimentación por tener condones distintas uno de otro figura 1.3 es uno de los motivos que hace que propongamos y pensemos en una fuente universal con el fin de disminuir la contaminación electrónica que a diario usamos en nuestras vidas cotidianas, reduciendo materiales, mejorando el impacto visual así como los costos, pero sobretodo mejorar nuestra calidad de vida.



Figura 1.3 Derroche y contaminación electrónica; Transistores y cargadores electrónicos

### 1.2.1 Tendencias para el desarrollo humano

Es claro que aún falta mucho por investigar, lo que es evidente es que es posible llevar a cabo una conexión inalámbrica de este tipo donde las discrepancias son grandes y los inquietudes aún más; pero a manera de un fenómeno físico-eléctrico es demostrable bajo experimentos en el laboratorio.

Las tendencias son relativamente futuristas no esto imposible; existen sistemas ya en el mercado que nos ofrecen un servicio en estas condiciones pero aun con muchas limitantes, es por esto la necesidad mejorar nuestro dispositivo con la finalidad de hacerlo más eficiente y más práctico; una de las tendencias es implementar el dispositivo en el hogar, oficina o cualquier espacio habitable como el mostrado en la figura 1.4, donde tengamos la necesidad de almacenar o consumir energía para nuestros dispositivos fijos y/o móviles que usamos en nuestra vida cotidiana.

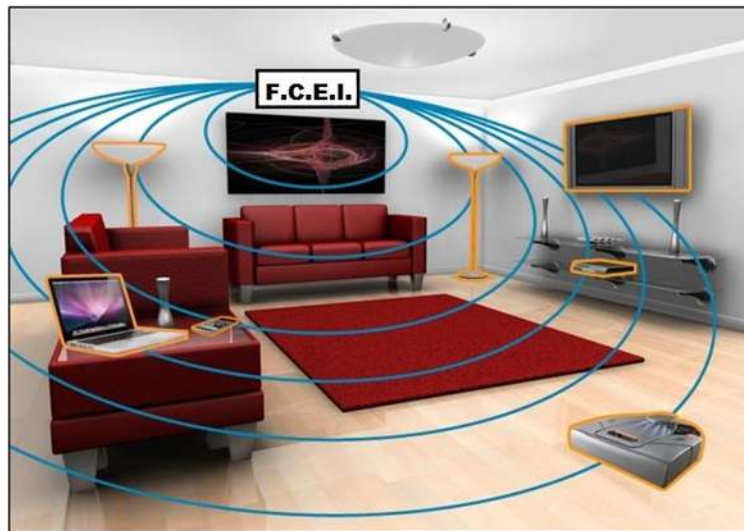


Figura 1.4 Fuente de energía inalámbrica en una habitación

Resultaría aún más práctico si esta fuente la pudiéramos transportar a cualquier lugar donde la utilidad fuera una cuestión primordial como una utilización parlante pudiendo apreciarla en la figura 1.5, donde al igual que en una habitación conectaría todos nuestros móviles e incluso el mismo automóvil.



Figura 1.5 Fuente de energía inalámbrica en un automóvil

Conectarse en un parque eléctrico como el mostrado en la figura 1.6 sin problemas de contar con una conexión física que representará un peligro en caso de una falla eléctrica manifestada en forma de calor o explosión.



Figura 1.6 Fuente de energía inalámbrica para un automóvil

La sociedad siempre está en constante movimiento, el uso del transporte público es inminente donde el desplazamiento de las masas ya es una necesidad urbana, necesidades que tienen que ser cubiertas mediante servicios energéticos modernos y capaces de sustentarse, un prototipo urbano lo podemos apreciar en la figura 1.7, en la que sólo basta tener una posición cercana para conectarse inductivamente.



Figura 1.7 Fuente de energía inalámbrica para el transporte urbano

Los ejemplos anteriores son propuestas y algunos ya son un hecho en la industria que hoy en día se desarrolla en países con donde la tecnología está a la vanguardia, sin embargo nuestro país tiene la capacidad de crear, innovar y mejorar cualquier prototipo en cualquier área de la investigación científica, esto representa mejorar la economía y con esto la calidad de vida de todos los que habitamos este país por el bien de México, es por esto que la propuesta de nuestra investigación que aunque corta pero significativa fuera mejorar, innovar, cambiar, economizar disminuyendo al máximo la contaminación ayudando al medio ambiente con un impacto ecológico amable con nuestro planeta y de esta manera contribuir un poco con el desarrollo científico de nuestro orgulloso país.

### 1.3 Metodología

La forma de abordar e implementar el proyecto de investigación fue la de conocer una necesidad eléctrica cotidiana formular una hipótesis para desarrollar por medio de los conocimientos adquiridos profesionalmente e implementar y analizar un dispositivo eléctrico que satisfaga las necesidades a pequeña escala de problemas que operan bajo principios físicos más fundamentales: como lo es la inducción electromagnética.

## 1.4 Contenido de la tesis

*En el capítulo 1 Se menciona la importancia de forma introductoria el desarrollo de la investigación de la fuente conmutada inalámbrica su justificación y su objetivo en la vida cotidiana.*

*En el capítulo 2 Se Abordan los conceptos básicos de los circuitos eléctricos y topologías de las fuentes conmutadas así como sus antecedentes históricos que son nuestras bases para el desarrollo de la tesis, mencionando autores y el campo tan extenso de la electrónica de potencia; una vez conociendo las necesidades que nos impulsaron a implementar nuestro dispositivo fue necesario dirigirnos a un objetivo claro justificándolo de una forma argumentada.*

*En el capítulo 3 Se menciona las fuentes de alimentación lineales y conmutadas describiendo al mismo tiempo todos y cada uno de los elementos más importantes que la integran y así llevar a cabo su funcionamiento.*

*En el capítulo 4 Se conecta la fuente a los suministros eléctricos y medidores eléctricos para llevar a cabo el funcionamiento de todos sus elementos que la integran, y así efectuar las mediciones de las variables eléctricas y físicas que nos llevarían a un análisis práctico para determinar las condiciones de operación así como la determinación de los resultados más significativos concluyendo las condiciones de operación*

*En el capítulo 5 Se concluye que se logra el objetivo mediante la funcionalidad, practicidad y ergonomía para la Fuente Conmutada Inalámbrica que aprovechó el fenómeno de inducción electromagnética.*

## Capítulo 2

# Conceptos de los circuitos eléctricos y topologías de las fuentes conmutadas

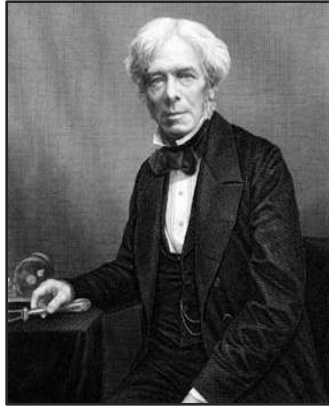
Es de mucha importancia conocer los conceptos más básicos de los elementos que constituyen todo circuito eléctrico, con esto se podrá concebir que es y para que sirve cada elemento que constituye no solo este proyecto de investigación si no todos aquellos que integran un sistema grande o pequeño, por el cual exista la presencia de electricidad bajo cualquier condición física, el sintetizar de una forma entendible el funcionamiento esencial es el objetivo de este pequeño marco teórico.

También el reconocer a los personajes que acuñaron las bases de cada elemento, sus leyes, sus condiciones, características que nos muestra el comportamiento de su propia investigación, el conocimiento es el arma más poderosa del desarrollo de la ciencia, con esto la teoría es el sustento de la invención y la práctica el arte más hermoso que hace él, con, por y para el Hombre.

### 2.1 Capacitores

*Perfiles Históricos.* **Michael Faraday** (1791-1867), químico y físico inglés fue quizá el primer experimentador que haya habido hasta la fecha. Faraday, quién nació cerca de Londres, realizó su sueño de juventud al trabajar con el gran químico sir Humphry Davy en la *Royal Institution*, donde laboró durante 54 años. Hizo varias contribuciones en todas las áreas de las ciencias físicas y acuñó términos como electrolisis, ánodo y cátodo. Su descubrimiento la inducción electromagnética en 1831 fue un gran avance para la ingeniería, porque brindo un medio para generar electricidad. El motor y el generador eléctricos operan con base en ese principio. La unidad de capacitancia, es Farad, se llama así en su honor [1].





Michael Faraday (1791-1867), químico y físico inglés

*Un capacitor* es un elemento pasivo diseñado para almacenar energía en su campo eléctrico. Junto con los resistores, los componentes eléctricos más comunes son los capacitores, los cuales son de amplio uso en la electrónica, comunicaciones, computadoras y sistemas de potencia. Por ejemplo se emplean en los circuitos sintonizadores de radio receptores y como elementos de memoria dinámica en sistemas de comunicación.

Un capacitor se constituye como se indica en la figura 2.1.

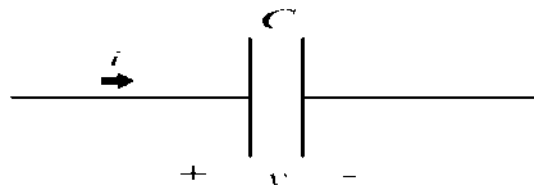


Figura 2.1 Símbolo de un capacitor

Se dice que el capacitor almacena carga eléctrica. El monto de carga almacenada, representado por  $q$ , es directamente proporcional a la tensión aplicada  $v$  en modo que:

$$q = Cv \quad (2.1)$$

Donde  $C$ , la constante de proporcionalidad, se conoce como *capacitancia* del capacitor. La unidad de capacitancia es el farad ( $F$ ), así llamado en honor al físico inglés Michael Faraday (1791-1867). De la ecuación (2.1) puede derivarse la siguiente definición.

*La capacitancia es la proporción entre la carga en una placa de un capacitor y la diferencia de tensión entre las dos placas, medida en Farads ( $F$ ).*

Un Farad = 1 coulomb/volt.

La capacitancia está dada por:

$$C = \epsilon A/d \quad (2.2)$$

Donde  $A$  es el área superficial de cada placa,  $d$  la distancia las placas y  $\epsilon$  la permitividad del material dieléctrico entre las placas. Aunque la ecuación (2.2), solo se aplica en capacitores de placas paralelas, de ello se puede inferir que, en general, *tres factores determinan el valor de la capacitancia*:

1. El área superficial de las placas: cuando más grande es el área mayor capacitancia.
2. El espaciamiento entre las placas: a menor espaciamiento mayor capacitancia.
3. La permitividad del material: a mayor permitividad, mayor capacitancia.

Para obtener la relación corriente-tensión del capacitor, se toma la derivada de ambos miembros de la ecuación (2.1), puesto que:

$$i = dq/dt \quad (2.3)$$

La derivación de ambos miembros de la ecuación (1.1), da como resultados

$$i = C dv/dt \quad (2.4)$$

La relación de tensión-corriente del capacitor puede obtenerse integrando ambos miembros de la ecuación (2.4), Así se consigue:

$$v = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i dt \quad (2.5)$$

o sea:

$$v = \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i dt + vt_0 \quad (2.6)$$

Donde  $vt_0 = q t_0/C$  es la tensión entre el capacitor entre el tiempo ( $t_0$ ).

Con base en le ecuación (2.1) como

$$w = \frac{q^2}{2C} \quad (2.7)$$

Cabe destacar las siguientes importantes propiedades de un capacitor:

1. Como se desprende de la ecuación (2.4.), cuando la tensión entre los extremos de un capacitor no cambia con el tiempo (es decir, cuando la tensión es de CD), la corriente que circula a través del capacitor es de cero. Así,

*Un capacitor es circuito abierto para CD solo si  $dv/dt = 0$*

En cambio, si una batería (tensión de CD) se conecta en un capacitor, este se carga

2. La tensión en el capacitor debe ser continua

*La tensión en un capacitor no puede cambiar abruptamente.*

El capacitor resiste a un cambio abrupto de tensión que ocurre en él. De acuerdo con la ecuación (2.4), un cambio discontinuo de tensión requiere una corriente infinita, lo cual es físicamente imposible. Por ejemplo, la tensión en un capacitor puede adoptar la forma que se muestra en la figura 2.2a), mientras que es físicamente que adopte la forma que se muestra en la figura 2.2b) a causa de cambios abruptos. A la inversa, la corriente que circula por un capacitor puede cambiar de modo instantáneo.

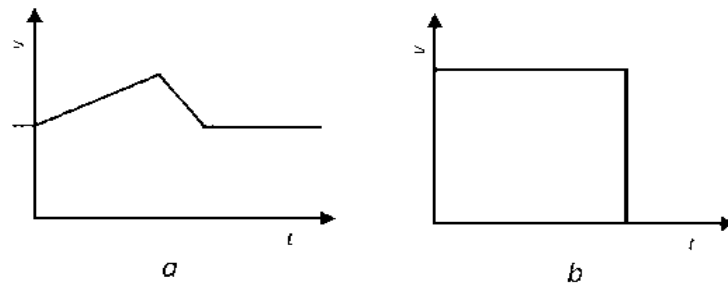


Figura 2.2 Carga de un capacitor

3. El capacitor ideal no disipa energía. Toma potencia del circuito cuando almacena energía en su campo y devuelve la energía previamente almacenada cuando suministra potencia al circuito.
4. Un capacitor real no ideal tiene un modelo con una resistencia de fuga paralelo, como se indica en la figura 2.3 La resistencia de fuga puede ser de hasta  $10\text{ M}\Omega$  y despreciarse en la mayoría de las aplicaciones prácticas [1].

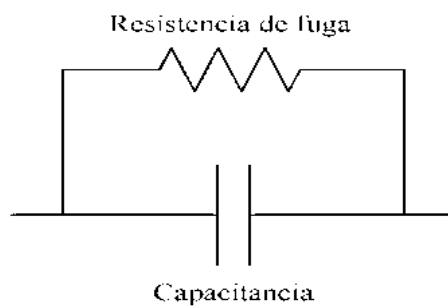


Figura 2.3 Capacitor real

## 2.2 Inductores.

*Perfiles históricos* **Joseph Henry** (1797-1878), físico estadounidense, descubrió la inductancia y armó un motor eléctrico. Henry nació en Albany, Nueva York, se graduó en la *Albany Academy* y enseñó filosofía en la *Princeton University* de 1832 a 1846. Fue el primer secretario de la *Smithsonian Institution*. Realizó varios experimentos de electromagnetismo y desarrollo poderosos electroimanes capaces de levantar objetos de miles de libras de peso. Curiosamente, descubrió la inducción electromagnética antes que Faraday, pero no publicó sus hallazgos. La unidad de inductancia, el Henry, lleva su nombre [1].



**Joseph Henry** (1797-1878), físico estadounidense

**Un inductor** es un elemento pasivo diseñado para almacenar energía en su campo magnético. Los inductores encuentran numerosas aplicaciones en sistemas electrónicos y de potencia. Se usan en alimentaciones de potencia, transformadores, radios, televisores, radares y motores eléctricos.

Todos los conductores de corriente eléctrica tienen propiedades inductivas y pueden considerarse inductores. Pero para aumentar el efecto inductivo, un inductor práctico suele formarse en una bobina cilíndrica con muchas vueltas de alambre conductor como se observa en la figura 2.4 [1].



Figura 2.4 Inductor

Un **inductor** consiste de una bobina de alambre conductor.

Si se permite que pase corriente por un inductor, se descubre que la tensión en el inductor es directamente proporcional a la velocidad de cambio de la transformación de la corriente. Mediante la convención pasiva de los signos,

$$v = L di/dt \quad (2.8)$$

Donde  $L$  es la constante de proporcionalidad, llamada *inductancia* del inductor.

La unidad de inductancia es el Henry (H), así llamado en honor al inventor estadounidense Joseph Henry (1797-1878). De la ecuación (2.8) se deduce claramente que un Henry es igual a 1 volt-segundo por ampere.

*La inductancia es la propiedad por la cual un inductor presenta oposición al cambio de la corriente que luye por él, medida en Henrys (H).*

La inductancia de un inductor depende de sus dimensiones y composición física. Las fórmulas para calcular la inductancia de inductores de diferentes formas se derivan de la teoría electromagnética y pueden encontrarse en manuales estándar de ingeniería eléctrica. Por ejemplo, en relación con el inductor (solenoides) que aparece en la figura 2.5.

$$L = N^2 \mu \frac{A}{l} \quad (2.9)$$

Donde  $N$  es el número de vueltas,  $l$  es la longitud,  $A$  es el área de la sección transversal y  $\mu$  la permeabilidad del núcleo. Mediante la ecuación (2.9), se advierte que la inductancia puede aumentar si se incrementa el número de vueltas de la bobina, usando materiales con mayor permeabilidad a la del núcleo, aumentando el área de la sección transversal o disminución de o disminuyendo la longitud de la bobina.

Al igual que los capacitores, los inductores disponibles comercialmente se presentan en diferentes valores y tipos. Los inductores prácticos usados tienen valores que van desde unos cuantos microhenrys ( $\mu\text{H}$ ), como en los sistemas de comunicación, a decenas de henrys (H), como en los sistemas de potencia. Los inductores pueden ser fijos o variables. El núcleo puede ser de hierro, acero plástico o aire. Los términos *bobina* y *reactancia* se emplean como sinónimos de inductor.

Los símbolos de circuitos de los inductores se presentan en la figura 2.5 siguiendo la convención pasiva de los signos.

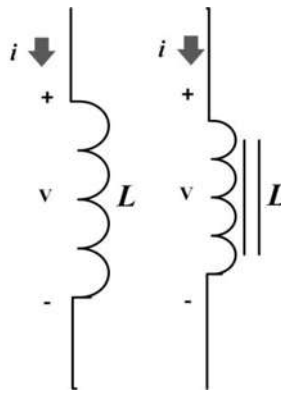


Figura 2.5 Símbolo de un inductor

La ecuación (2.8), es la relación de tensión-corriente de un inductor. En la figura 2.6 se representa gráficamente esta relación respecto de un inductor cuya inductancia es independiente de la corriente.

La relación de corriente-tensión se obtiene de la ecuación (1.8) como:

$$di = \frac{1}{L} v dt \quad (2.10)$$

la integración da por resultado:

$$i = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t v(t) dt \quad (2.11)$$

Esto es:

$$i = \frac{1}{L} \int_{t_0}^t v(t) dt + i(t_0) \quad (2.12)$$

Donde  $i(t_0)$  es la corriente total para  $-\infty < t_0 < t$  e  $i(-\infty) = 0$ .

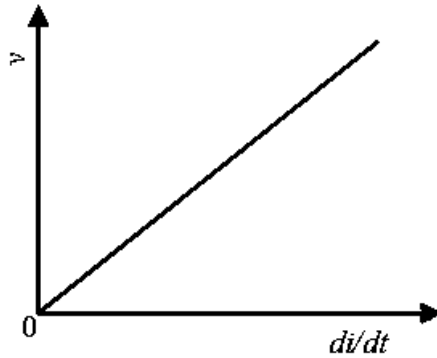


Figura 2.6 Tensión-corriente de un inductor

La energía almacenada puede obtenerse de la ecuación (2.8). La potencia suministrada en el inductor es:  $p$  y

$$p = vi = \left(L \frac{di}{dt}\right)i \quad (2.13)$$

La energía almacenada es :

$$w = \int_{-\infty}^t p dt = \int_{-\infty}^t \left(L \frac{di}{dt}\right)i dt \quad (2.14)$$

Esto es:

$$w = L \int_{-\infty}^t i di = \frac{1}{2} Li^2(t) - \frac{1}{2} Li^2(-\infty) \quad (2.15)$$

Puesto que  $i(-\infty)=0$

$$w = \frac{1}{2} Li^2 \quad (2.16)$$

Cabe destacar las siguientes propiedades importantes de un inductor.

1. Como se desprende de la ecuación (2.8), la tensión en un inductor es de cero cuando la corriente es constante. Así: *“Un inductor actúa como un cortacircuito en CD.”*
2. Una propiedad relevante del inductor es su oposición al cambio en la corriente que fluye por él, *“la corriente que circula por un inductor no puede cambiar instantáneamente”*.

De acuerdo con la ecuación (2.8), un cambio discontinuo en la corriente por un inductor requiere una tensión infinita, lo cual no es físicamente posible. Así un inductor se opone al cambio abrupto de la corriente que circula a través de él. Por ejemplo, la corriente en un inductor puede adoptar la forma que se muestra en la figura 2.7a), pero no el que aparece en el 2.7b), en situaciones reales debido a discontinuidades. En cambio la tensión en un inductor puede cambiar abruptamente.

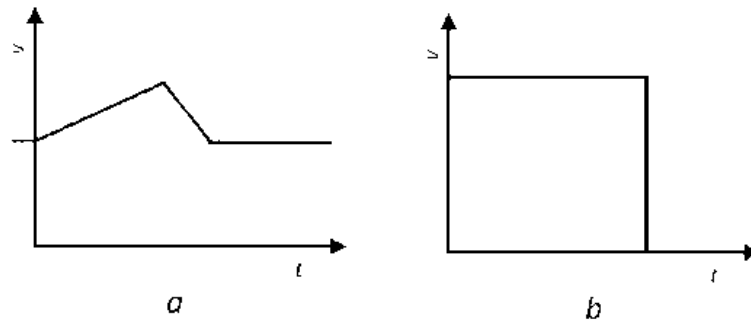


Figura 2.7 Carga de un inductor

3. Como el capacitor ideal, el inductor ideal no disipa energía, la energía almacenada en él puede recuperarse en un momento posterior. el inductor toma potencia del circuito al almacenar la energía y suministrar potencia al circuito al devolver la energía previamente almacenada.
4. Un inductor práctico no ideal tiene una componente resistiva importante, como se muestra en la figura 2.8. Esto se debe al hecho de que el inductor es de un material conductor como cobre, el cual tiene cierta resistencia, que se llama *resistencia de devanado*  $R_w$ , y aparece en serie con la inductancia del inductor. la resistencia de  $R_w$  convierte a este tanto en un dispositivo de almacenamiento de energía como en un dispositivo de disipación de energía. Puesto que usualmente  $R_w$  muy reducida, se le ignora en la mayoría de los casos. El inductor no ideal también tiene una *capacitancia de devanado*  $C_w$ , debida al acoplamiento capacitivo entre las bobinas conductoras  $C_w$  es muy reducida y puede ignorarse en la mayoría de los casos, excepto en altas frecuencias [1].



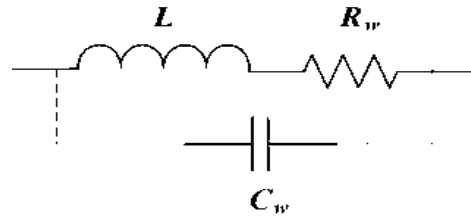
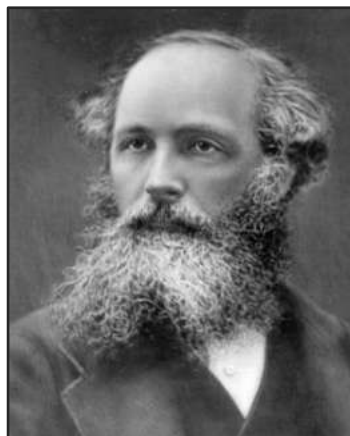


Figura 2.8 Inductor práctico

### 2.3 Inductancia Mutua

*Perfiles Históricos.* James Clerk Maxwell (1831-1879), licenciado en matemáticas por la *Cambridge University*, escribió en 1865 un trabajo notable en el que unificó matemáticamente las leyes de Faraday y Ampere. Esta relación entre el campo magnético y el campo eléctrico fue la base de lo que más tarde se llamaría campos y ondas electromagnéticos, importante área en el estudio de la ingeniería eléctrica. El *institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)* utiliza una representación gráfica de ese principio en su emblema, en el que una flecha recta representa a la corriente y una flecha curva al campo electromagnético. Esta relación se conoce comúnmente como *regla de la mano derecha*.

Maxwell fue un teórico y científico muy activo. Se le conoce principalmente por las “ecuaciones de Maxwell”. El Maxwell, la unidad del flujo magnético lleva su nombre [1].



James Clerk Maxwell (1831-1879), licenciado en matemáticas

*La Inductancia Mutua;* Cuando dos inductores (o bobinas) están en proximidad estrecha entre sí, el flujo magnético causado por la corriente en una bobina se relaciona con la otra bobina, lo que induce tensión en esta última. Este fenómeno se le conoce como *inductancia mutua*. Considere únicamente un solo inductor, una bobina con  $N$  vueltas. Cuando la corriente  $i$  fluye por la bobina, alrededor de ella se produce un flujo magnético  $\phi$  figura 2.9.

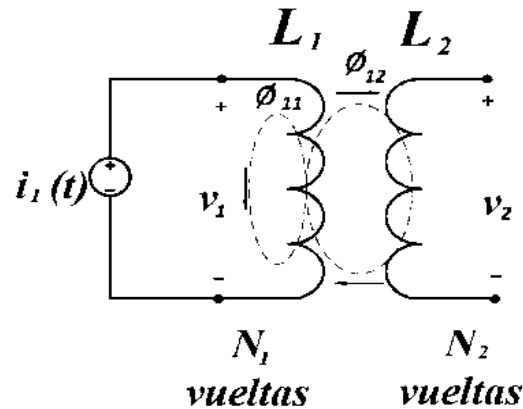


Figura 2.9 Inductancia mutua

De acuerdo con la ley de Faraday, la tensión  $v$  inducida en la bobina es proporcional al número de vueltas  $N$  y a la tasa de cambio del flujo magnético  $\phi$  en el tiempo; es decir,

$$v = N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.17)$$

Pero el flujo  $\phi$  es producto de la corriente  $i$ , de modo que cualquier cambio en  $\phi$  da como resultado un cambio en la corriente. Así, la ecuación (1.17) puede escribirse como:

$$v = N \frac{d\phi}{dt} \frac{di}{dt} \quad (2.18)$$

Reescrita queda:

$$v = L \frac{di}{dt} \quad (2.19)$$

La cual es la relación tensión-corriente en el inductor. A partir de las ecuaciones (1.18) y (1.19), la inductancia  $L$  del inductor la proporciona entonces:

$$L = N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.20)$$

Esta inductancia se llama comúnmente auto inducida, porque relaciona la tensión inducida en una bobina por una corriente variable en el tiempo en la misma bobina.

La bobina 1 tiene  $N_1$  vueltas, mientras que la bobina 2 tiene  $N_2$  vueltas. Con fines de simplificación supóngase que en el segundo inductor no existe corriente. El flujo magnético  $\phi_1$  que emana de la bobina 1 tiene dos componentes: una componente  $\phi_{11}$  enlaza sólo a la bobina  $\phi_1$ , y otra componente  $\phi_{12}$  enlaza ambas bobinas. Por lo tanto,

$$\phi_1 = \phi_{11} + \phi_{12} \quad (2.21)$$

Aunque las dos bobinas están físicamente separadas, se dice que están *acopladas magnéticamente*. Puesto el flujo magnético  $\phi_1$  se une a la bobina 1, la tensión inducida en la bobina 1 es:

$$v_1 = N_1 \frac{d\phi_{12}}{dt} \quad (2.22)$$

Solo el flujo  $\phi_{12}$  enlaza a la bobina 2, de modo que la tensión inducida en la bobina 2 es:

$$v_2 = N_2 \frac{d\phi_{12}}{dt} \quad (2.23)$$

$M_{21}$  se conoce como la inductancia mutua de la bobina 2 respecto a la bobina 1. El subíndice 21 indica que la inductancia  $M_{21}$  relaciona la tensión inducida en la bobina 2 con la corriente de la bobina 1. Así la tensión mutua (o tensión inducida) de circuito abierto para la bobina 2 es:

$$v_2 = M_{21} \frac{di_1}{dt} \quad (2.24)$$

El flujo  $\phi_{21}$  enlaza a la bobina 1, la tensión inducida en la bobina 1 es:

$$v_1 = N_1 \frac{d\phi_{21}}{dt} = N_1 \frac{d\phi_{21}}{di_2} \frac{di_2}{dt} = M_{12} \frac{di_2}{dt} \quad (2.25)$$

*La inductancia mutua es la capacidad de un inductor inducir una tensión en el inductor cercano, medida en Henrys (H).*

Aunque la inductancia mutua  $M$  siempre es una cantidad positiva, la tensión mutua  $M di / dt$  puede ser positiva o negativa, al igual que la tensión autoinducida  $L di/dt$ .

“Si una corriente **entra** a la terminal marcada de la bobina, la polaridad de referencia para la tensión mutua en la segunda bobina es **positiva** en la terminal con la marca de la segunda bobina.” Como se puede apreciar en la Figura 2.10 [1].

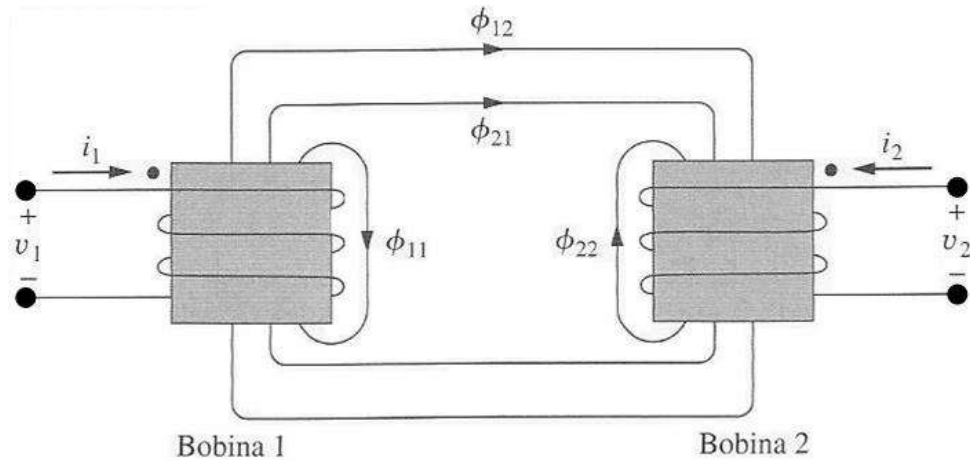


Figura 2.10 Transformador

## 2.4 Interruptores electrónicos

El dispositivo conmutador utilizado en los circuitos electrónicos de potencia variara según el estado actual de la tecnología de dispositivos semiconductores. Normalmente, el comportamiento de los circuitos electrónicos de potencia no se ve afectado de forma particular por el dispositivo real que se utiliza para la conmutación, especialmente si las caídas de y tensión en “bornas” del interruptor en estado de conducción son pequeñas comparadas con otras tensiones del circuito. Por lo tanto, los dispositivos semiconductores se modelan normalmente como dispositivos ideales, con el fin de poder centrarse en el comportamiento del circuito. Los interruptores se modelan como cortacircuitos cuando están activados y como circuitos abiertos cuando no lo están. Se supone que las transiciones entre estos dos estados son instantáneas [2].

### 2.4.1 El Diodo

El diodo es el interruptor electrónico más simple. No puede controlar, en el sentido de que son las tensiones y corrientes del circuito los que determinan los estaos de conducción (activado) y de corte (desactivado) del diodo. El diodo está polarizado en directa (conducción) cuando la corriente  $i_d$ , figura 2.11a) es positiva y esta polarizado en inversa (corte) cuando la tensión  $V_d$  es negativa. En el caso ideal, el diodo se comporta como un cortocircuito cuando está polarizado en directa y se comporta como un circuito abierto cuando esta polarizado en inversa.

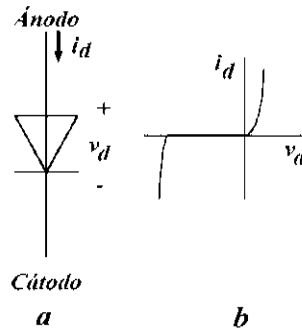


Figura 2.11 Diodo

Una característica dinámica importante de un diodo no ideal es la corriente de recuperación inversa. Cuando un diodo pasa de conducción a corte, la corriente en él disminuye y, momentáneamente, se hace negativa antes de alcanzar el valor cero figura 2.11b). El tiempo  $t_{rr}$  es el tiempo de recuperación inversa, normalmente inferior a  $1\mu s$ . *Este fenómeno puede resultar importante en aplicaciones de alta frecuencia.* Los diodos de recuperación rápida se diseñan de modo que tengan  $t_{rr}$  menores que los diodos diseñados para aplicaciones de 50 Hz [2].

#### 2.4.2 Tiristores

Los tiristores son interruptores electrónicos utilizados en circuitos electrónicos de potencia donde es necesario controlar la activación del interruptor [2]. Los tiristores constituyen una familia de dispositivos de tres terminales, entre los que se encuentran: el rectificador controlado de silicio (SCR), el triodo de corriente alterna (TRIAC), el tiristor por bloqueo de puerta (GTO), y el tiristor MCT o tiristor controlado por MOS (Metal-óxido-semiconductor). Los tres terminales son el ánodo, el cátodo y la puerta. A veces se utilizan los términos *tiristor* y SCR como sinónimos. Los tiristores pueden soportar altas corrientes y altas tensiones de bloqueo en aplicaciones de alta potencia pero las frecuencias de conmutación están limitadas a valores de entre 10 y 20 KHz, aproximadamente.

Para que el SCR entre en conducción, hay que aplicar una corriente de puerta cuando la tensión ánodo- cátodo sea positiva. Una vez que el dispositivo haya entrado en conducción, la señal de puerta deja de ser necesaria para mantener la corriente de ánodo. El SCR continuara conduciendo mientras la corriente de ánodo siga siendo positiva y este por encima de un valor mínimo, denominado nivel de mantenimiento. Las figuras 2.12 a) y 2.12 b) muestra el SCR y la característica corriente-tensión ideal [2].

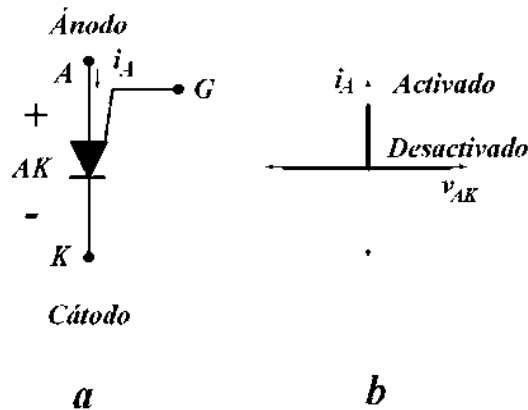


Figura 2.12 Tiristor

### 2.4.3 Transistores

Los transistores son utilizados como interruptores en los circuitos electrónicos de potencia. Los circuitos de excitación de los transistores se diseñan para que estos estén completamente saturados (activados) o en corte (desactivados). Esto difiere de lo que ocurre con otras aplicaciones de los transistores, como, por ejemplo, un circuito amplificador en el que el transistor opera en la región lineal o activa. Los transistores tienen la ventaja de que proporcionan un control de activación y de desactivación, mientras que el SCR solo dispone de control de activación. Los tipos de transistores utilizados en los circuitos electrónicos de potencia incluyen los transistores de unión bipolar (BJT), los MOSFET (Transistor de Efecto de Campo controlado por MOS) y dispositivos híbridos, como por ejemplo, los transistores de unión bipolar de puerta aislada (IGBT). La figura 2.13 muestra el símbolo de un BJT (tipo NPN) correspondiente y su configuración [2].

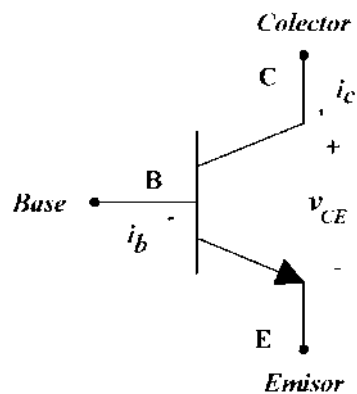


Figura 2.13 Transistor

### 1.4.4 El Mosfet

Es un dispositivo controlado por tensión con las características mostradas en la figura 2.14.

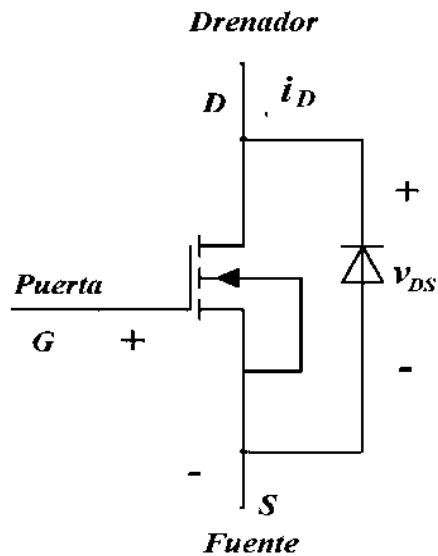


Figura 2.14 Mosfet

Los Mosfet de potencia son fundamentalmente de acumulación más que de empobrecimiento. Una tensión puerta-fuente lo suficientemente grande activara el dispositivo dando lugar a una pequeña tensión drenador-fuente. El circuito de excitación para activar y desactivar un Mosfet es normalmente más sencillo que el utilizado para un BJT. En el estado de conducción, las variables de  $V_{DS}$  son linealmente proporcional a las variaciones de  $i_D$ , por tanto, el Mosfet en estado de conducción puede modelarse como una resistencia de conducción, denominada  $R_{DS(on)}$ . Los Mosfet de baja tensión tienen resistencias de conducción menores que  $0.1 \Omega$ , mientras que los Mosfet de alta tensión tienen resistencias de conducción de unos cuantos ohmios. La construcción de los Mosfet produce un diodo (de cuerpo) parásito, como se muestra en la figura 2.14, lo que se puede utilizar a veces de forma ventajosa en circuitos electrónicos de potencia. Los valores nominales llegan a alcanzar hasta  $1000 \text{ V}$  y  $50 \text{ A}$ . Las velocidades de conmutación del Mosfet son mayores que las del BJT y se utilizan en convertidores que operan por encima de  $100 \text{ KHz}$  [2].

## 2.5 Algunas topologías de Convertidores de CD-CD

Existen diferentes "acomodos" electrónicos con el fin de acondicionar las salidas de las fuentes alimentadas con CD.

### 2.5.1 Un convertidor conmutado básico

Una alternativa más eficiente al regulador lineal es el del convertidor conmutado. En un convertidor conmutado, el transistor funciona como un interruptor electrónico, al estar completamente activado o completamente desactivado (saturación o corte para un transistor bipolar BJT). Este circuito también se denomina "troceador" de continua (CD chopper). Si suponemos que el interruptor de la figura 2.15 es ideal, la salida es igual a la entrada cuando el interruptor está cerrado y es cero cuando está abierto.

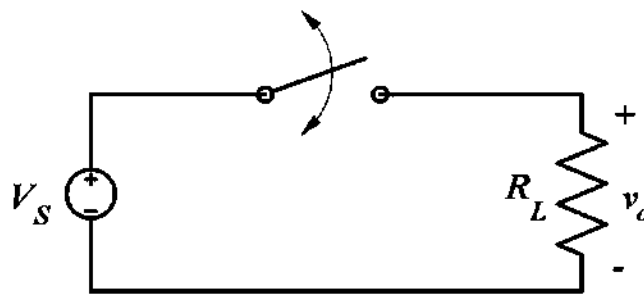


Figura 2.15 Circuito troceador

La apertura y cierre periódicos del interruptor producen la salida de pulsos mostrada en la figura 2.16 la media o componente continua de la salida es:

$$V_0 = \frac{1}{T} \int_0^T v_o(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{DT} V_S dt = V_S D \quad (2.26)$$

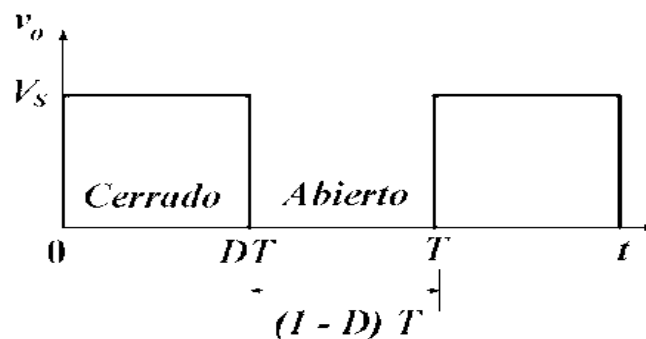


Figura 2.16 Ciclo de trabajo



La componente continua de la salida se controla ajustando el ciclo de trabajo  $D$ , que es la fracción del periodo en la que el interruptor está cerrado:

$$D \equiv \frac{t_{\text{conducción}}}{t_{\text{conducción}} + t_{\text{corte}}} = \frac{t_{\text{conducción}}}{T} = t_{\text{conducción}} * f \quad (2.27)$$

Siendo  $f$  la frecuencia de conmutación en hercios. En este circuito, la componente continua de la salida será menor o igual a la entrada. La potencia absorbida por el interruptor ideal es cero. Cuando el interruptor está abierto, no pasa corriente por él; cuando el interruptor está cerrado, no cae la tensión en el mismo. Por tanto, la carga absorbe toda la potencia y la eficiencia de la energía es del 100 %. **En un interruptor real se producirían pérdidas**, porque la tensión del interruptor no será cero cuando conduzca y el interruptor deberá pasar por la región lineal al pasar de un estado a otro [2].

### 2.5.2 El convertidor reductor

En algunas aplicaciones puede ser suficiente controlar la componente continua de una salida de pulsos como la mostrada en la figura 2.16, pero muchas veces el objetivo es producir una salida que sea continua pura.

Una manera de obtener una salida continua en el circuito de la figura 2.15 es **insertar un filtro paso bajo** después del interruptor. En la figura 2.17 se muestra un filtro paso bajo con una bobina y un condensador ( $L$ - $C$ ) añadido al convertidor básico. El diodo proporciona un camino a la corriente de la bobina cuando el interruptor está abierto y se polariza en inversa cuando el interruptor está cerrado. Este circuito se denomina convertidor o convertidor reductor, porque la tensión de salida es menor que la de la entrada.

Si el interruptor se cierra de forma periódica con un ciclo de trabajo  $D$ , la tensión media en la entrada del filtro es  $V_s * D$ , como se indica en la ecuación (2.26).

Para este análisis suponemos que el diodo está polarizado en directa siempre que el interruptor está abierto, y que la corriente en la bobina es positiva. Una corriente en la bobina que sea positiva en todo en el intervalo de conmutación se denomina *corriente permanente*. Por el contrario, la corriente discontinua se caracteriza por que la corriente de la bobina pasa por cero en cada periodo [2].

### Análisis con el interruptor cerrado

Cuando el interruptor está cerrado en el convertidor reductor de la figura 2.17 el diodo se polariza en inversa y la tensión en la bobina del circuito es:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_S - V_O}{L} \quad (\text{interruptor cerrado}) \quad (2.28)$$

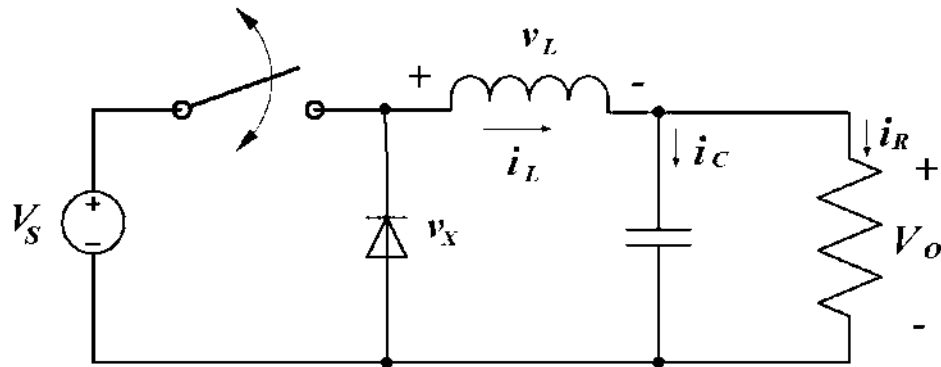


Figura 2.17 Convertidor reductor

Las formas de onda del convertidor reductor de tensión en la bobina, corriente en la bobina y corriente en el condensador se muestra en la figura 2.18 [2].

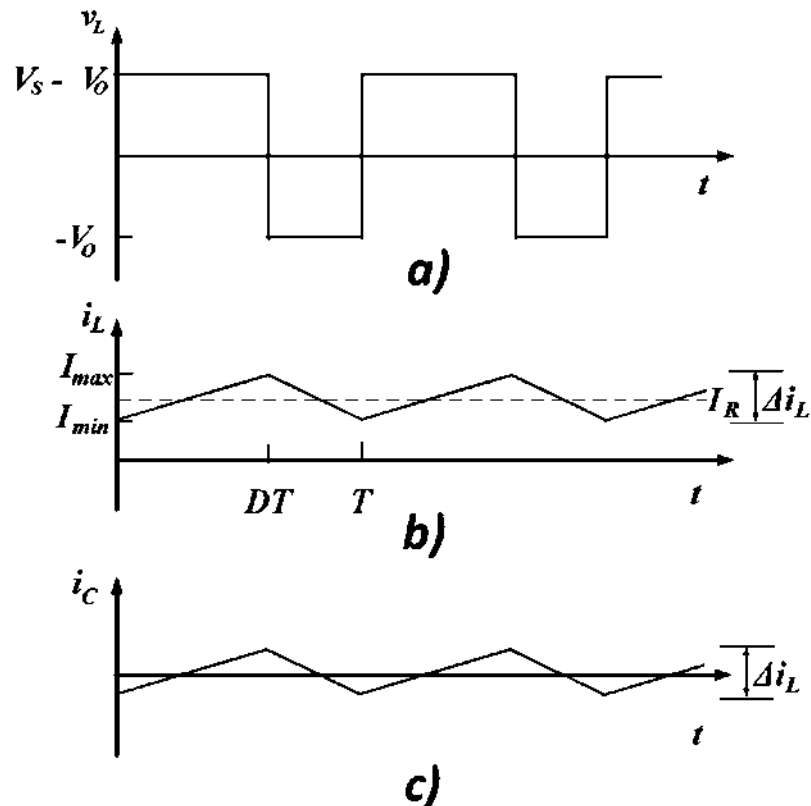


Figura 2.18 Formas de onda del convertidor reductor

### Análisis con el interruptor abierto

Cuando el interruptor está abierto, el diodo se polariza en directa para dejar pasar la corriente de la bobina y se aplica el circuito equivalente de la figura 2.17 [2].

Cuando el interruptor está abierto, tensión en la bobina es:

$$v_L = -V_0 = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.29)$$

Reorganizando los términos obtenemos:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{-V_0}{L} \quad (\text{interruptor abierto}) \quad (2.30)$$

Si fijamos la frecuencia de conmutación deseada,

$$L_{min} = \frac{(1-D)R}{2f} \quad (2.31)$$

### 2.5.3 El convertidor elevador

En la figura 2.19 se muestra el convertidor elevador. Este es otro convertidor conmutado que funciona abriendo y cerrando periódicamente un interruptor electrónico. Se denomina convertidor elevador por que la tensión de salida es mayor que la de entrada [2].

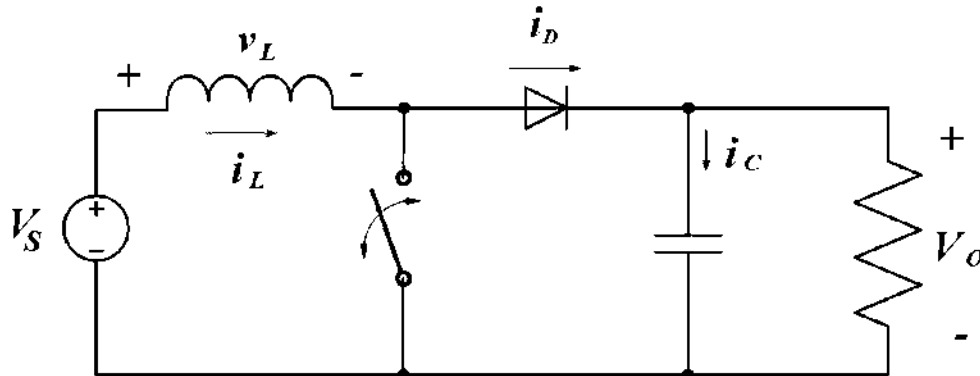


Figura 2.19 Convertidor elevador

### Análisis con el interruptor cerrado

Cuando el interruptor está cerrado, el diodo está polarizado en inversa. La ley de Kirchhoff para las tensiones en la malla que incluye la fuente, la bobina y el interruptor cerrado es:

$$v_L = V_S = L \frac{di_L}{dt} \quad \text{Ó} \quad \frac{di_L}{dt} = \frac{V_S}{L} \quad (2.32)$$

Los cambios  $\Delta i_L$  cuando el interruptor está cerrado:

$$(\Delta i_L)_{\text{cerrado}} = \frac{V_S DT}{L} \quad (2.33)$$

Las formas de onda del convertidor elevador de corriente y tensión en el inductor son las mostradas en la figura 2.20 [2].

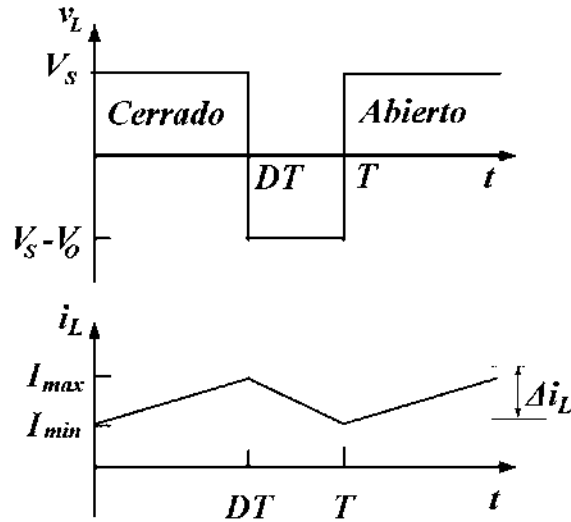


Figura 2.20 Formas de onda del convertidor elevador

### Análisis con el interruptor abierto

Cuando el interruptor está abierto, la corriente en la bobina no puede variar de forma instantánea, por lo que el diodo se polariza en directa para proporcionar un camino a la corriente de la bobina. Suponiendo que la tensión de salida es constante, la tensión en la bobina es:

$$v_L = V_s - V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.34)$$

El ritmo de variación de corriente en la bobina es una constante, por lo que la corriente debe variar linealmente cuando el interruptor este abierto [2]. La variación en la corriente de la bobina con el interruptor abierto es:

$$(\Delta i_L)_{abierto} = \frac{(V_s - V_o)(1 - D)T}{L} \quad (2.35)$$

La combinación mínima de inductancia y frecuencia de conmutación para obtener corriente permanente en el convertidor elevador será:

$$L_{min} = \frac{D(1 - D)^2 R}{2f} \quad (2.36)$$

## 2.6 Fuentes de alimentación de corriente continua

La principal desventaja de los convertidores de corriente continua (CD-CD) descritos en el tema anterior, es la conexión eléctrica entre la entrada y la salida.

Si la fuente de entrada está conectada a masa esa misma masa estará presente en la salida. Si la primera etapa del convertidor CD-CD rectifica tensión alterna pasándola a continua, se puede utilizar un transformador en la parte de alterna. Sin embargo, no todas las aplicaciones requieren una conversión CA-CD en la primera etapa. Además los transformadores que operan a baja frecuencia (60 Hz), precisan un núcleo magnético muy grande, por lo que son relativamente pesados, voluminosos y caros.

Un método más eficaz para aislar eléctricamente la entrada y la salida de un convertidor CD-CD, es utilizar un transformador como parte del circuito en comunicación. La *frecuencia de conmutación* es mucho mayor que la de CA de la red eléctrica, por lo que se puede utilizar un transformador pequeño. Además, la relación de vueltas del transformador proporcionara una mayor flexibilidad de diseño a la hora de fijar la relación global entre la entrada y la salida del convertidor. Podemos diseñar convertidores conmutados utilizando transformadores con múltiples devanados para producir múltiples tensiones de salida [2].

### 2.6.1 Modelos de transformadores

Los transformadores tienen dos funciones básicas: *Proporcionar aislamiento galvánico e incrementar y reducir tensiones y corrientes en el tiempo*, En la figura 2.21a) se muestra un transformador de dos devanados. En la figura 2.21b) se muestra el modelo de un transformador ideal, que presenta las siguientes relaciones entre la entrada y la salida.

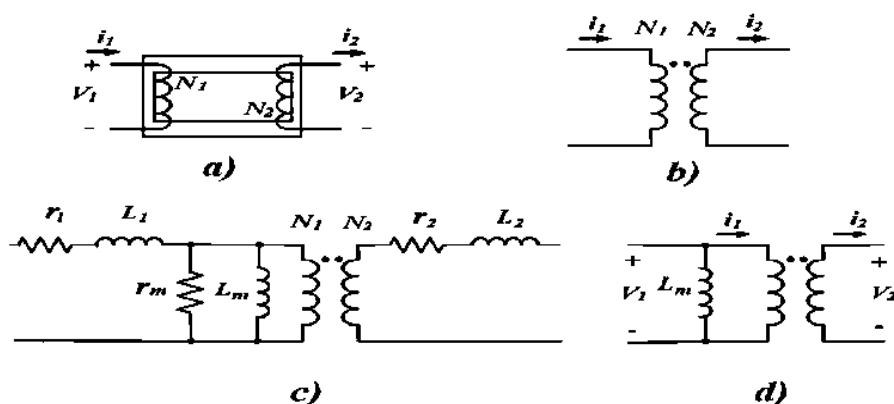


Figura 2.21

$$\text{donde:} \quad \frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.37)$$

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (2.38)$$

Se utilizan puntos para indicar la polaridad relativa entre los devanados. Cuando la tensión en el terminal indicado por un punto en un devanado es positiva, la tensión en el terminal indicado por un punto del otro devanado también es positiva. Cuando la corriente entra por el terminal indicado por un punto en un devanado, la corriente sale por el terminal indicado por un punto del otro devanado.

En la figura 2.21c) se muestra un modelo de transformador más completo.

Las resistencias  $r_1$  y  $r_2$  representan la resistencia de los conductores,  $L_1$  y  $L_2$  representa las inductancias de dispersión en los devanados,  $L_m$  representa la inductancia magnetizante y  $r_m$  representa las pérdidas en el núcleo. Se incluye el transformador ideal en este modelo para representar la transformación de la tensión y corriente entre el primario y secundario.

*El valor de  $L_m$  es un parámetro de diseño importante para el convertidor de retroceso o flyback,  $L_1$  y  $L_2$  son importantes cuando se consideran los transitorios de conmutación.*

*Observación,* en aplicaciones de equipos conectados a la red eléctrica, la inductancia de dispersión suele ser el parámetro de diseño más importante. Para el funcionamiento de un circuito transformador con tensiones y corrientes en régimen permanente, el flujo magnético en el núcleo debe retornar a su valor inicial al final de cada periodo de conmutación. En caso contrario, el flujo aumentará en el núcleo, pudiendo llegar a provocar la saturación. Un núcleo saturado no puede soportar tensión en terminales de un devanado del transformador y esto hará que las corrientes del dispositivo sobrepasen los límites de diseño del circuito [2].

### 2.6.2 El convertidor flyback

El circuito flyback de la figura 2.22a) es un convertidor CD-CD que aísla la entrada de la salida. En un primer análisis, la figura 2.22b) muestra el modelo de transformador que incluye la inductancia magnetizante  $L_m$ , como en la figura 2.22d) los efectos de las pérdidas y las inductancias de fuga son importantes al considerar el comportamiento en conmutación y la protección, pero es más sencillo comprender la operación global del circuito utilizando este modelo de transformador simplificado.

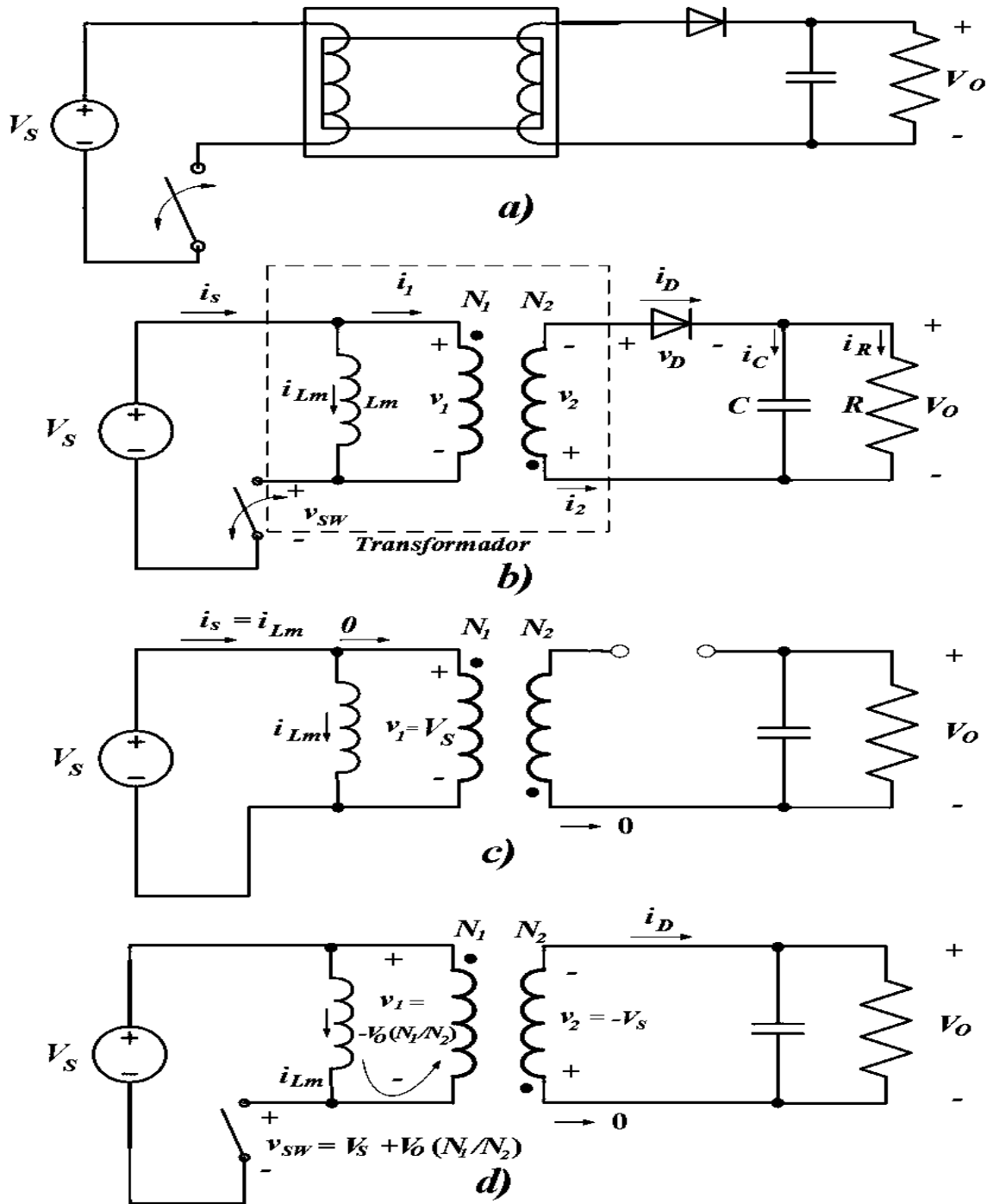


Figura 2.22

Observe la polaridad de los devanados del transformador en la figura 2.22.

Para el análisis del circuito, se realizarán las siguientes suposiciones:

1. El condensador de salida es muy grande, por lo que la tensión de salida es una constante  $V_O$ .
2. El circuito opera en régimen permanente, por lo que todas las tensiones y corrientes son periódicas, y comienzan y terminan en los mismos puntos en cada periodo de conmutación.
3. El ciclo de trabajo del conmutador es  $D$ , y estará cerrado en un tiempo  $DT$ , y abierto el resto del tiempo,  $(1-D)T$ , donde  $T$  es el periodo en segundos  $s$ .
4. El interruptor y diodo son ideales.

El funcionamiento básico del convertidor flyback, es similar al del convertidor reductor-elevador descrito anteriormente. La energía se almacena en  $Lm$  cuando el interruptor está cerrado y se entrega a la carga cuando está abierto. Analicemos el circuito en las dos posiciones del interruptor para hallar la relación entre la entrada y la salida [2].

#### **Análisis con el interruptor cerrado**

En el lado del transformador correspondiente a la fuente 2.22c).

$$v_1 = V_S = Lm \frac{diLm}{dt} \quad (2.39)$$

$$\frac{diLm}{dt} = \frac{\Delta iLm}{\Delta t} = \frac{\Delta iLm}{DT} = \frac{V_S}{Lm} \quad (2.40)$$

Calculamos la variación de corriente en la inductancia magnetizante del transformador,

$$(\Delta iLm)_{\text{cerrado}} = \frac{V_S DT}{Lm} \quad (2.41)$$

En el estado del transformador correspondiente a la carga,

$$v_2 = v_1 \left( \frac{N_1}{N_2} \right) = V_S \left( \frac{N_2}{N_1} \right) \quad (2.42)$$



$$v_D = -V_O - V_s \left( \frac{N_2}{N_1} \right) < 0 \quad (2.43)$$

$$i_2 = 0 \quad i_1 = 0. \quad (2.44)$$

Dado que el diodo está en corte,  $i_2 = 0$ , por lo que  $i_1 = 0$ , por tanto cuando el interruptor está cerrado, la corriente aumenta linealmente en la inductancia magnetizante  $L_m$  y no fluye corriente por los devanados del transformador ideal en el modelo.

Recordar que, en el transformador real esto significa que la corriente aumenta linealmente en el devanado primario y no fluirá corriente por el devanado secundario [2].

### Análisis con el interruptor abierto

Cuando se abre el interruptor figura 2.23d), la corriente no puede variar instantáneamente en la inductancia  $L_m$ , por lo que el camino de conducción debe ser a través del devanado primario del transformador ideal, la corriente  $i_{L_m}$  entra en el terminal sin punto del primario y sale por el terminal sin punto del secundario. Esto es posible porque la corriente en el diodo es positiva.

Suponiendo que la tensión de salida permanece constante con un valor  $V_O$ , la tensión en el secundario del transformador  $v_2$  será  $-v_O$ . La tensión en el secundario se transforma hacia el primario, por lo que la tensión en  $L_m$ , será:

$$v_1 = -v_O \frac{N_1}{N_2} \quad (2.45)$$

Las tensiones y las corrientes cuando el interruptor está abierto son:

$$v_2 = -v_O \quad (2.46)$$

$$v_1 = v_2 \frac{N_1}{N_2} = -v_O \frac{N_1}{N_2} \quad (2.47)$$

$$L_m \frac{di_{L_m}}{dt} = v_1 = -v_O \frac{N_1}{N_2} \quad (2.48)$$

$$\frac{di_{L_m}}{dt} = \frac{\Delta i_{L_m}}{\Delta t} = \frac{\Delta i_{L_m}}{(1-D)T} = \frac{-v_O}{L_m} \frac{N_1}{N_2} \quad (2.49)$$

Calculamos la variación de corriente en la inductancia magnetizante del transformador cuando el interruptor está abierto.

$$\Delta i_{L_m} (\text{abierto}) = \frac{-v_O(1-D)T}{L_m} \frac{N_1}{N_2} \quad (2.50)$$

Como la variación neta de corriente en la bobina debe ser cero en un periodo se opera en régimen permanente, obtendremos las siguientes expresiones utilizando las ecuaciones (2.40) y (2.50).

$$\Delta i Lm \text{ cerrado} + \Delta i Lm \text{ abierto} = 0 \quad (2.51)$$

$$\frac{V_S D T}{Lm} = - \frac{V_O (1-D) T}{Lm} \frac{N_1}{N_2} = 0 \quad (2.52)$$

Despejando  $V_O$ ,

$$v_O = V_S \frac{D}{1-D} \frac{N_2}{N_1} \quad (2.53)$$

Observe que la relación entre la entrada y la salida del convertidor flyback es similar a la del convertidor reductor-elevador, pero incluye un término adicional para la relación de transformación.

Cuando el interruptor está abierto, también resulta interesante calcular las siguientes corrientes y tensiones:

$$i_D = -i_1 \left( \frac{N_1}{N_2} \right) = i Lm \left( \frac{N_1}{N_2} \right) \quad (2.54)$$

$$v_{sw} = V_S - v_1 = V_S + V_O \left( \frac{N_1}{N_2} \right) \quad (2.55)$$

$$i_R = \left( \frac{V_O}{R} \right) \quad (2.56)$$

$$i_C = i_D - i_R = i Lm \left( \frac{N_1}{N_2} \right) - \frac{V_O}{R} \quad (2.57)$$

Obsérvese que  $V_{sw}$  la tensión en el interruptor abierto, es mayor que la tensión de la fuente, por ejemplo, si la tensión de salida es igual al de la entrada y la relación de vueltas es la unidad, la tensión en el interruptor será el doble de la tensión de la fuente. En la figura 2.22, se muestran las corrientes del circuito.

*La potencia absorbida por la resistencia de carga debe ser igual que la entregada por la fuente en el caso ideal [2].*

Por lo que:

$$P_S = P_O \quad (2.58)$$

$$\text{ó} \quad V_S I_S = \frac{V_O^2}{R} \quad (2.59)$$

La siguiente es la relación entre la corriente media de la fuente  $I_S$  y la corriente media en la inducción magnetizante:

$$I_S = \frac{(i Lm) D T}{T} = (i Lm) D \quad (2.60)$$

Sustituyendo  $I_S$  en la ecuación (2.59) y despejando  $ILm$ ,

$$V_S ILm D = \frac{V_O^2}{R} \quad (2.61)$$

$$ILm = \frac{V_O^2}{V_S D R} \quad (2.62)$$

Usando la ecuación (2.53) para  $V_S$  la corriente media en la bobina se expresa como:

$$ILm = \frac{V_S D}{(1-D)^2 R} \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2 = \frac{V_O}{(1-D)R} \left( \frac{N_2}{N_1} \right). \quad (2.63)$$

Los valores máximos y mínimos de la corriente en la bobina se obtienen utilizando las ecuaciones (2.63) y (2.41):

$$ILm, max = ILm + \frac{\Delta iLm}{2} \quad (2.64)$$

$$ILm, max = \frac{V_S D}{(1-D)^2 R} \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2 \frac{V_S D T}{2Lm} \quad (2.65)$$

$$ILm, min = ILm - \frac{\Delta iLm}{2} \quad (2.66)$$

$$ILm, min = \frac{V_S D}{(1-D)^2 R} \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2 - \frac{V_S D T}{2Lm}. \quad (2.67)$$

El funcionamiento en corriente permanente requiere que  $ILm, min > 0$ , en la ecuación (2.67). En el límite entre la corriente permanente y discontinua, se cumple que:

$$ILm, min = 0$$

$$\frac{V_S D}{(1-D)^2 R} \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2 = \frac{V_S D T}{2Lm} = \frac{V_S D}{2Lm f} \quad (2.68)$$

Siendo  $f$  la recuancia de conmutación. Resolviendo para hallar el valor mínimo de  $Lm$  que permita que la corriente sea permanente:

$$Lm, min = \frac{(1-D)^2 R}{2f} \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2. \quad (2.69)$$

La configuración de salida del convertidor *flyback* es la misma que la del convertidor reductor-elevador, por lo que el rizado de la tensión de salida de los convertidores también será la misma:

$$\frac{\Delta V_O}{V_O} = \frac{D}{RCf} \quad (2.70)$$

### 2.6.3 Modo de corriente discontinua en el convertidor *flyback*

En el modo de corriente discontinua del convertidor *flyback*, la corriente del transformador aumenta linealmente cuando el interruptor está cerrado, al igual que sucedía

en el modo de corriente permanente. Sin embargo, cuando el interruptor está abierto, la corriente en la inductancia magnetizante del transformador se anula antes del comienzo del siguiente ciclo de conmutación. Cuando el interruptor está cerrado, el aumento de la corriente en la bobina viene dado por la ecuación (2.41). Como el valor inicial de la corriente es cero, obtendremos el valor máximo utilizado también la ecuación (2.41) [2].

$$ILm, max = \frac{V_S DT}{Lm} \quad (2.71)$$

Se puede obtener la tensión de salida en el modo de corriente discontinua analizando las relaciones de potencia del circuito. Si los componentes son ideales, la potencia entregada por la fuente de continua es igual a la potencia absorbida por la resistencia de carga. La potencia entregada por la fuente es igual a la tensión continua multiplicada por la corriente media de alimentación, y la potencia de carga es  $\frac{V_o^2}{R}$ :

$$P_S = P_O \quad (2.72)$$

$$V_S I_S = \frac{V_o^2}{R} \quad (2.73)$$

La corriente media de alimentación es igual al área situada bajo la forma de onda triangular dividida por el periodo. De esta manera obtenemos:

$$I_S = \left(\frac{1}{2}\right) \left(\frac{V_S DT}{Lm}\right) (DT) \left(\frac{1}{T}\right) = \frac{V_S D^2 T}{2Lm}. \quad (2.74)$$

Calculando  $V_o$  cuando el convertidor flyback funciona en modo de corriente discontinua.

$$V_o = V_S D \sqrt{\frac{TR}{2Lm}} = V_S D \sqrt{\frac{R}{2Lmf}} \quad (2.75)$$

#### 2.6.4 Resumen del funcionamiento del convertidor *flyback*

Cuando el interruptor del convertidor *flyback* de la figura 2.23a) está cerrado, la tensión de la fuente se presenta en terminales de la inductancia magnetizante del transformador,  $Lm$  y hace que  $iLm$  aumente lineal mente. Además, mientras que el interruptor esta cerrado, el diodo de la salida estará polarizado en inversa y el condensador de salida suministra la corriente de carga. Cuando el interruptor está abierto, se transfiere la energía almacenada en la inductancia magnetizante a la salida a través del transformador, polarizando el diodo en directa y entregando corriente a la carga y al condensador de salida. La relación entre la tensión de entrada y la tensión de salida es igual a la del convertidor CD-CD elevador en oposición, pero incluye un factor que depende de la relación de vueltas [2].

## 2.7 Una condición para la máxima potencia de transferencia: resonancia

La resonancia es una condición en un circuito RLC; en la cual las reactancias capacitiva e inductiva son de igual magnitud, por lo cual dan lugar a una impedancia resistiva. Los circuitos resonantes (en serie o en paralelo) son útiles para construir filtros, pues sus funciones de transferencia pueden ser altamente selectivas en frecuencia. Se utilizan en muchas aplicaciones, como las de seleccionar las estaciones deseadas en los receptores de radio y de televisión.

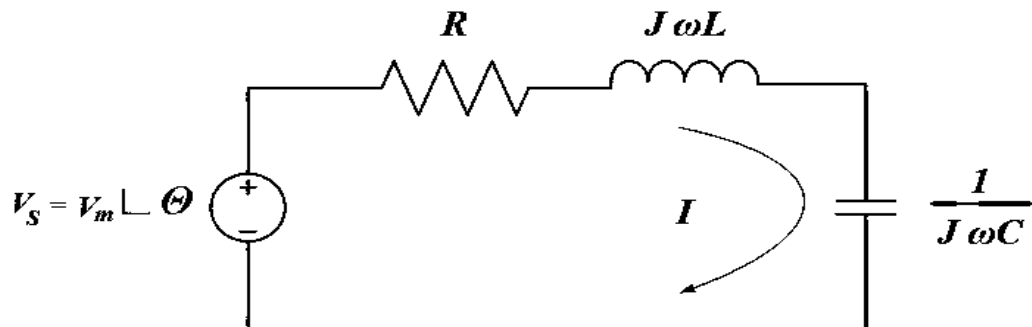


Figura 2.23 Circuito resonante serie RLC

Considerando el circuito RLC que se muestra en la figura 2.23 en el dominio de la frecuencia. La impedancia de entrada es:

$$Z = R + J \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \quad (2.76)$$

La resonancia se produce cuando la parte imaginaria de la función de transferencia es cero, o sea:

$$\text{Im}(Z) = \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0 \quad (2.77)$$

El valor de  $\omega$  que satisface esta condición recibe el nombre de frecuencia resonante  $\omega_0$ . Por lo tanto, la condición de resonancia es:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ rad/s} \quad (2.78)$$

Puesto que  $\omega_0 = 2\pi f_0$ ,

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ Hz} \quad (2.79)$$

Donde:

$f_0$  = Frecuencia de resonancia (Hz)

$Z$  = Impedancia ( $j \Omega$ )

$\omega = \text{velocidad angular} \left( \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right)$  ;  $\omega = 2\pi f$  donde  $f = \text{frecuencia (Hz)}$

Capacitancia (F)

Inductancia (H)

Resistencia ( $\Omega$ )

La respuesta en frecuencia de la magnitud de corriente  $I$  del circuito se observa en la figura 2.24, el diagrama muestra solo la simetría ilustrada en esta grafica cuando el eje de la frecuencia es un logaritmo; donde  $V_m$  = Magnitud del voltaje (V).

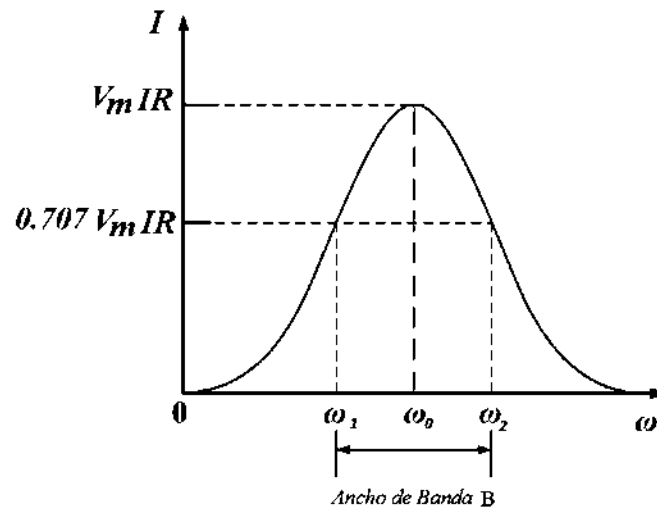


Figura 2.24 Ancho de banda en un circuito RLC serie

La mayor potencia que se disipa ocurre en la resonancia, cuando,  $I = V_m / R$  por lo que:

$$P(\omega_0) = \frac{1}{2} \frac{V_m^2}{R} \text{ (Watts, W)} \quad (2.80)$$

Otra condición del circuito RLC serie se debe al factor de calidad  $Q$ , que es una medida de selectividad (ó "agudeza" de resonancia) del circuito, esto es:

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 CR} \quad (2.81)$$

El factor de calidad es adimensional.

$$y B = \frac{R}{L} = \frac{\omega_0}{Q} \quad (2.82)$$

$$\text{ó } B = \omega_0^2 CR \quad (1.83)$$

por lo tanto: *El factor de calidad  $Q$  de un circuito resonante es la razón entre la frecuencia resonante  $\omega_0$  y su ancho de banda  $B$ .*

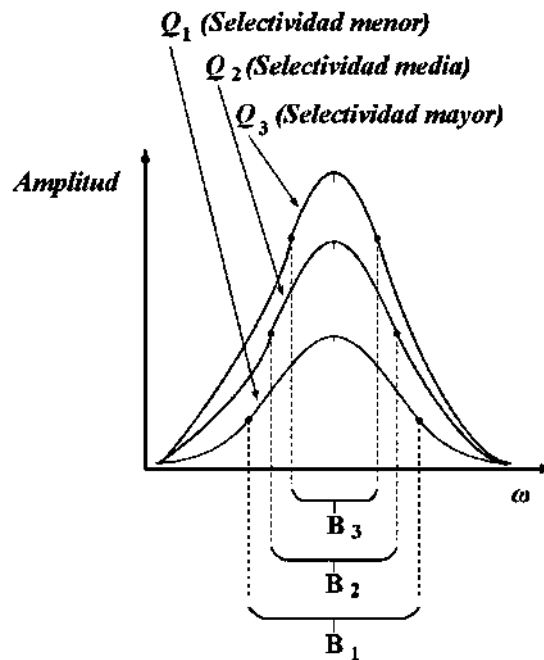


Figura 2.25 Factor de calidad  $Q$

Como se ilustra en la figura 2.25, cuanto más alto el valor de  $Q$ , tanto más selectivo resulta el circuito, aunque el ancho de banda se vuelve más pequeño, la selectividad de un circuito RLC es la capacidad del mismo para responder a cierta frecuencia y discriminar (rechazar) a todas las demás.

El objetivo de intentar construir una fuente resonante de poder es aprovechar en su máxima potencia al máximo el rendimiento eléctrico y físico del flujo de energía eléctrica, para satisfacer las necesidades de la mayoría de los dispositivos tanto eléctricos como electrónicos [1].

## Capítulo 3

# Tipos de fuentes de alimentación y componentes de la Fuente Conmutada Inalámbrica

Las fuentes de alimentación cuentan con diferentes configuraciones electrónicas que dan lugar a los convertidores de potencia; el objetivo de los circuitos electrónicos de potencia consiste en adaptar los requisitos de tensión y corriente de la carga al generador (suministro de energía), los circuito electrónicos de potencia convierten una forma de onda de corriente o tensión de un cierto tipo o nivel en otro; por esto se denominan convertidores. Los convertidores mencionados en el *capítulo 2*, tema *1.5 Algunas topologías de Convertidores de CD-CD*, se clasifican según la relación existente entre la entrada y la salida:

### **Entrada CA/salida CD**

Los convertidores CA-CD producen una salida continua a partir de una entrada alterna. La potencia media se transfiere desde un generador de alterna a una carga de corriente continua. A los convertidores CA-CD se les denomina, específicamente como rectificadores. Por ejemplo, un convertidor CA-CD permite que los circuitos integrados operen a partir de una tensión de alterna de línea de 60 Hz, convirtiendo la señal alterna en una señal continua de la tensión apropiada.

### **Entrada CD/salida CA**

El convertidor CD-CA se denomina, específicamente, como inversor. En el inversor, la potencia media fluye desde el lado de la corriente continua hacia el lado de la corriente alterna. Entre los ejemplos de aplicaciones de los inversores se incluyen la generación de una tensión de 120 V eficaces (rms), a 60 Hz, a partir de una batería de 12 V y la conexión de una matriz de células solares con un aparato eléctrico.



### **Entrada CD/salida CD**

El convertidor CD-CD resulta útil cuando una carga requiere una corriente o una tensión continua específica (normalmente regulada) ver *capítulo 2* tema 2.5.2 *El convertidor reductor*, pero el generador tiene un valor de continua diferente o no regulado. Por ejemplo, a partir de un generador de 12 V y a través de un convertidor CD-CD pueden obtenerse 5 V.

### **Entrada CA/salida CA**

El convertidor CA-CA puede utilizarse para cambiar la amplitud y/o la frecuencia de una señal alterna. Un ejemplo, entre otros, sería un simple atenuador para la iluminación doméstica y un control de velocidad para un motor de inducción.

Alguno circuito convertidores pueden operar en diferentes modos, dependiendo de los parámetros de control y del circuito. Por ejemplo, algunos circuitos rectificadores pueden operar como inversores modificando el método de control de los dispositivos semiconductores. En estos casos, es el sentido en que fluye la potencia media el que determina el tipo de convertidor.

El proceso de conversión de potencia puede suponer un proceso de varias fases y requerir más de un tipo de convertidor. Por ejemplo se puede utilizar una conversión CA-CD-CA para modificar un generador de corriente alterna, obteniendo primero una componente continua y, después convirtiendo dicha señal continua en una señal alterna que tenga una amplitud y una frecuencia diferente a las del generador de corriente alterna original [2].

Las fuentes de alimentación a su vez se pueden separar según su composición eléctrica y elementos físicos; esto es:

## **3.1 Fuentes de alimentación lineales**

Las fuentes de alimentación lineales se caracterizan principalmente por contener elementos en los que el flujo de energía es “lineal o continua”, no interrumpida o conmutada, en cualquier tiempo mientras se tenga un suministro eléctrico, en la figura 3.1 se muestra un diagrama de bloques que contiene las partes una fuente de alimentación lineal típica, así

como la descripción del voltaje en los distintos puntos. El voltaje de CA, por lo regular 120 V rms, se conecta a un transformador, el cual lo disminuye hasta el nivel deseado para la salida de CD. Luego de un rectificador de diodos proporciona un voltaje rectificado de onda completa que inicialmente se filtra mediante un filtro simple de capacitor para producir un voltaje de CD. Este voltaje de CD resultante, por lo general, cuenta con un cierto rizado o variación de voltaje de CA. Un circuito regulador puede utilizar esta entrada de CD con el objetivo de proporcionar un voltaje de CD que no solo tiene un voltaje de rizo mucho menor, sino que también permanezca siendo el mismo voltaje de CD, incluso si el voltaje de CD de entrada varía de alguna forma o la carga conectada al voltaje de salida de CD cambia. Esta regulación de voltaje, por lo regular, se obtiene mediante alguno de los diversos reguladores de voltaje populares [10].

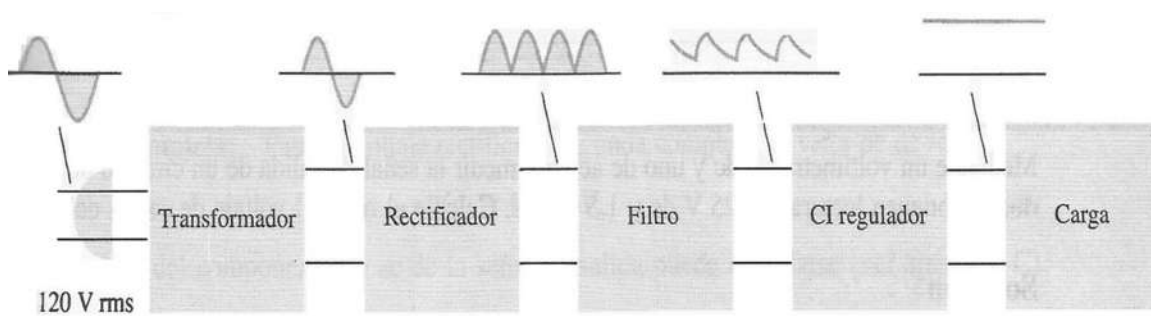


Figura 3.1 Diagrama de bloques que muestra las parte de una fuente de alimentación lineal

### 3.2 Fuentes de alimentación conmutadas

Los convertidores de CD-CD son circuitos electrónicos de potencia que convierten una tensión continua en otro nivel de tensión continua y, normalmente, proporcionan una salida regulada. Los circuitos descritos en el *capítulo 2* se clasifican en las fuentes de alimentación como convertidores CD-CD en modo conmutado o convertidores CD-CD conmutado, que también se denominan fuentes de alimentación conmutadas, que aprovechan el estado encendido y apagado de los transistores de potencia a altas frecuencias disminuyendo la robustez y el costo de las fuentes lineales de alimentación. En el *capítulo 2, 1.5 Algunas topologías de Convertidores de CD-CD* se describieron algunos de los circuitos convertidores conmutados CD-CD básicos [2].

### 3.3 Fuentes de alimentación inalámbricas

Las fuentes inalámbricas de energía de comunicaciones o potencia; son señales pequeñas o grandes que fluyen de un emisor que es el punto de partida hasta un receptor punto final de la energía donde será consumida, por un medio físico como lo es el aire que será el canal por donde viajaran las señales de energía.

Considerando lo anterior, el objetivo fundamental de un sistema electrónico de comunicaciones, es transferir información de un lugar a otro. Por consiguiente se puede decir que las comunicaciones electrónicas son la transmisión, recepción y procesamiento de información entre dos o más lugares, mediante circuitos electrónicos. La fuente original de información puede estar en forma analógica (continua), como por ejemplo la voz humana o la música, o en forma digital (discreta), como por ejemplo los números codificados binariamente o los códigos alfanuméricos; sin embargo, todas las formas de información o energía se deben convertir a energía electromagnética antes de ser propagadas a través de un sistema electrónico de comunicaciones o energía.

En la figura 3.2 se muestra un diagrama de bloques simplificado de un sistema electrónico de comunicaciones, que comprende un transmisor, un medio de transmisión y un receptor.

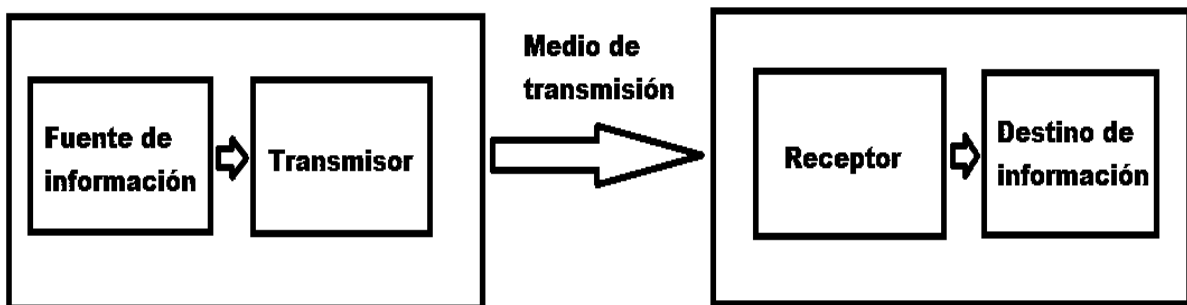


Figura 3.2 diagrama simplificado de bloques de un sistema de comunicaciones electrónicas

Un transmisor es un conjunto de uno o más dispositivos o circuitos electrónicos que convierte la información de la fuente original en un señal que se presta más a su transmisión a través de determinado medio de transmisión.

El medio de transmisión transporta las señales desde el transmisor hasta el receptor, y puede ser tan sencillo como un par de conductores de cobre que propaguen las señales en forma de flujo de corriente eléctrica. También se puede convertir la información a ondas electromagnéticas luminosas, propagarlas a través de cables de fibra óptica hechas de vidrio o de plástico, o bien se puede usar el espacio libre (en su caso aire) para transmitir ondas electromagnéticas de radio, a grandes distancias o sobre terreno donde sea difícil o costoso instalar un cable físico. Un receptor es un conjunto de dispositivos y circuitos electrónicos que acepta del medio de transmisión las señales transmitidas y las reconvierte en su forma original [3].

Donde el objetivo final es la transmisión de energía eléctrica por un medio hasta la carga final que es donde será consumida por la carga; aparato, máquina, etc. Como se puede apreciar en la figura 3.3.

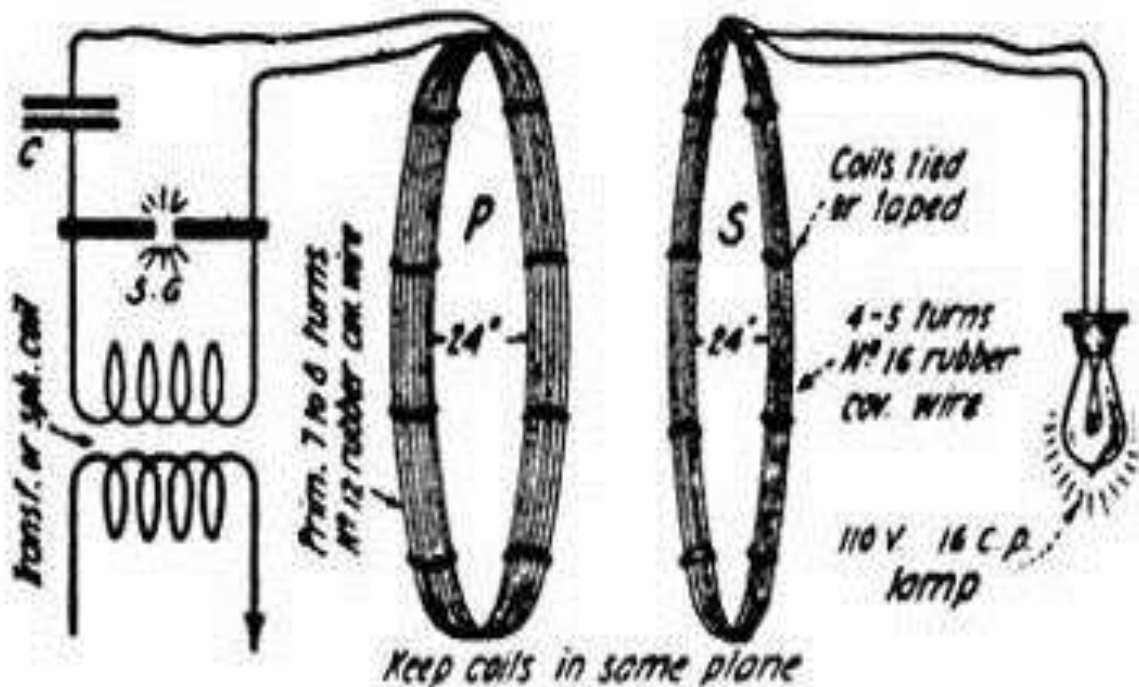


Figura 3.3 Transmisión de energía por aire a una carga realizado por Nikola Tesla.

*Illustration from "Tesla Apparatus and Experiments—How to Build Both Large and Small Tesla and Oudin Coils and How to Carry On Spectacular Experiments With Them," by H. Winfield Secor, Practical Electrics, November 1921.*

Si realizamos una analogía de un sistema de transmisión comunicaciones con un sistema de transmisión de energía eléctrica mostrado en la figura 3.4, nos podremos dar cuenta que es muy similar, la diferencia es la cantidad de energía a transmitir por un sistema de transmisión sencillo y básico.

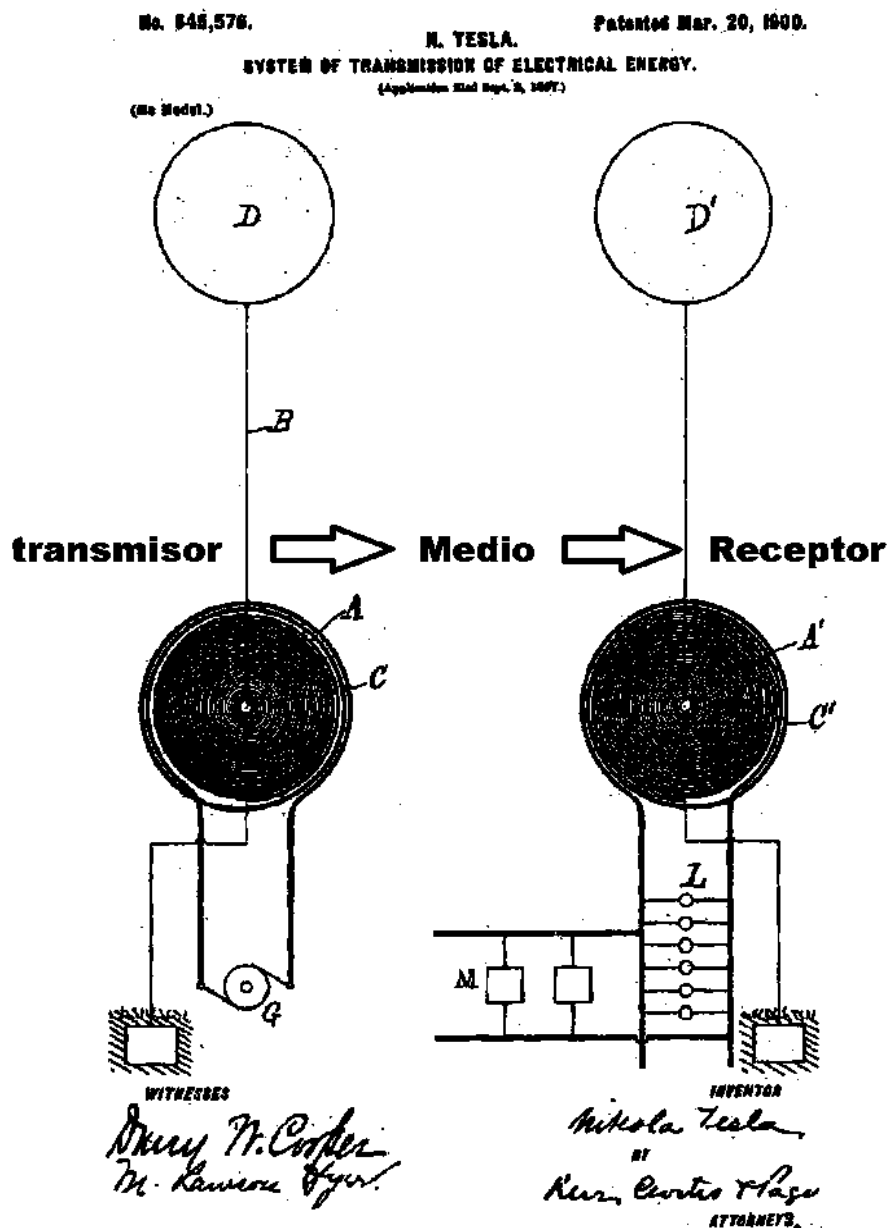


Figura 3.4 Sistema de transmisión inalámbrico de energía eléctrica patentado por Nikola Tesla, patente: 645.576 [11]

Con la información y conceptos anteriores, se construirá la Fuente Conmutada Inalámbrica, siendo este el dispositivo creado de investigación de la tesis describiendo su topología, así como sus propios módulos de funcionamiento arrojando las condiciones, medios y limitantes para la operación de la Fuente Conmutada Inalámbrica; esto es abordar una propuesta con dichos elementos que serán descritos a continuación.

### 3.4 Descripción de componentes de la Fuente Conmutada inalámbrica.

La fuente que se muestra en la figura 3.5, es una combinación entre las topologías de las Fuentes de alimentación Conmutadas y las Fuentes de alimentación Inalámbricas consta principalmente de elementos eléctricos y electrónicos que nos permitirán el flujo de la potencia.

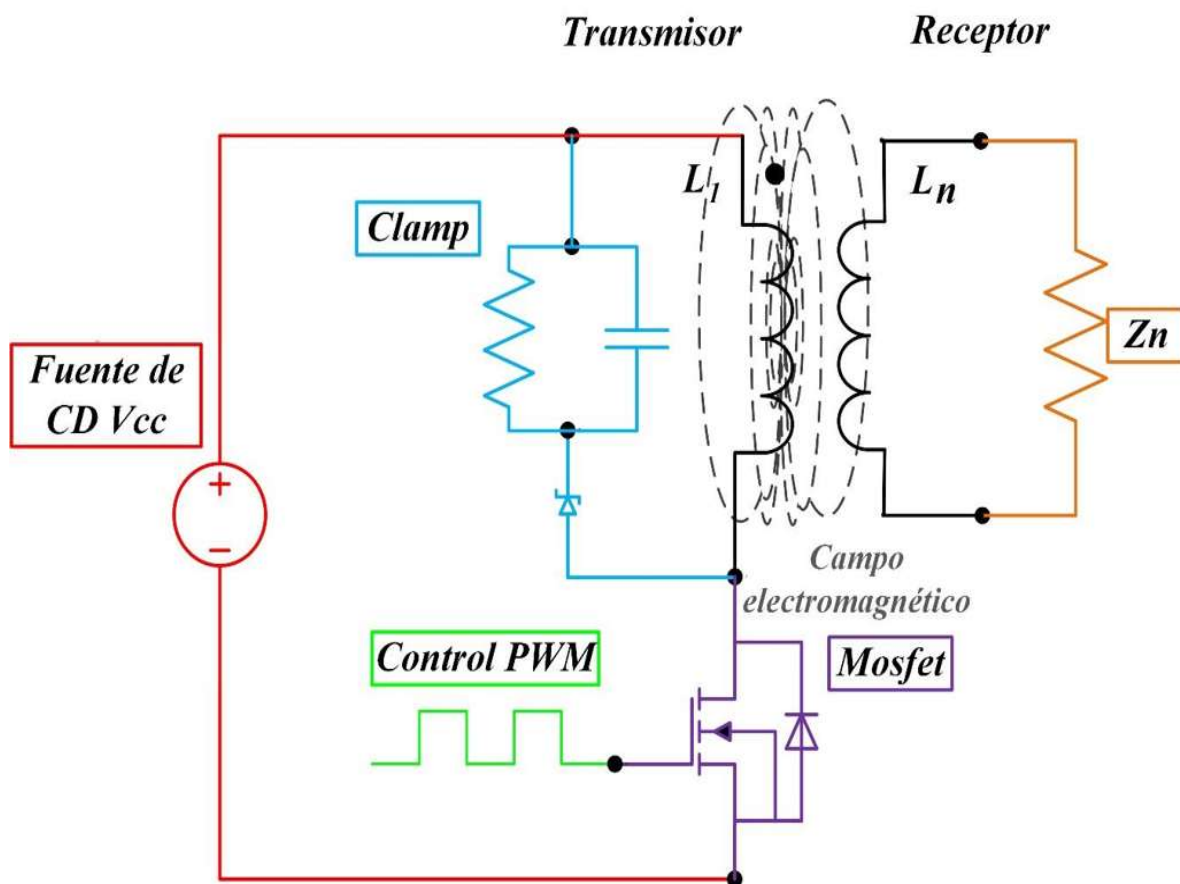


Figura 3.5 Fuente conmutada de energía inalámbrica propuesta

Tales son: *fuelle de poder de CD, driver de control, Mosfet, capacitores, inductores, un núcleo de aire, diodo rectificador de alta velocidad, regulador de tensión (CD).*

La fuente propuesta a lo largo del tema de investigación es una fuente con la característica de utilizar una topología muy parecida en esencia a una *flyback* para la transferencia de energía eléctrica del circuito emisor hasta el receptor con el máximo rendimiento posible. Dichos elementos se describirá la función en cada etapa del circuito de la fuente de conmutada de energía inalámbrica.

### 3.4.1 Fuente de voltaje de CD

La fuente de CD mostrada en figura 3.6 es la parte que proporciona la potencia necesaria para que el circuito propuesto funcione, y este se mantenga en operación para trabajar bajo las características idóneas para abrir y cerrar nuestro Mosfet en nuestra etapa de potencia. La tensión eléctrica de la fuente es de un rango desde 1 hasta 30 VCD, ya que suelen ser valores de tensión comerciales y fáciles de conseguir.

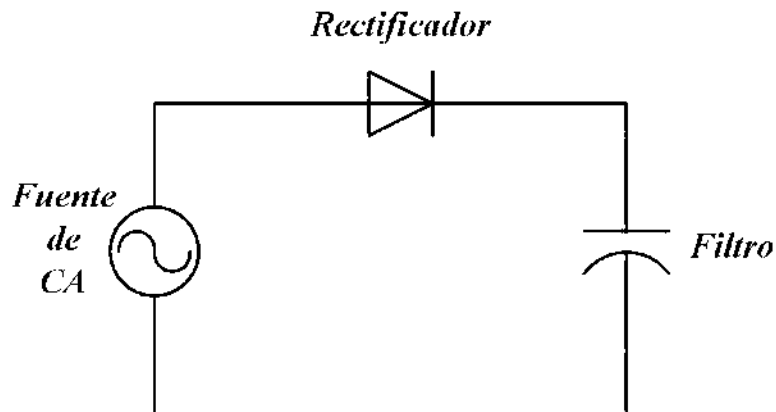


Figura 3.6 Circuito de la fuente de poder de CD

### 3.4.2 El driver PWM de control

Este circuito es nuestra etapa de control y una de las más importantes; el driver de control PWM, figura 3.7 estará conmutando de entre una *f de 5 kHz hasta 150 000 kHz*, para asegurar el cambio de corriente ( $i$ ) y voltaje ( $v$ ) a la salida del inductor  $L_1$ ; y así llevar a cabo la inducción del devanado primario  $L_1$  al devanado secundario  $L_n$ ;

donde:  $L_n = L_2$  ó  $L_3$  .

Existen dos factores muy importantes en el circuito de control tales son frecuencia ( $f$ ) y ciclo de trabajo ( $D$ ), de tales parámetros dependerán nuestras variables eléctricas; cualquier ajuste en el driver de control se reflejara a la salida, tales como corriente y voltaje.

La Modulación por anchura de pulsos PWM (por sus siglas en inglés: *Pulse width Modulation*) son las señales de control. En la modulación PWM, la amplitud de la tensión de salida se puede controlar por medio de las formas de onda moduladoras. Dos ventajas de la modulación PWM son la reducción de los requerimientos de filtro para reducir los armónicos y el control de la amplitud de salida. Entre las desventajas se puede citar que los circuitos de control de los interruptores son más complejos y que hay unas mayores pérdidas debidas a una conmutación más frecuente.

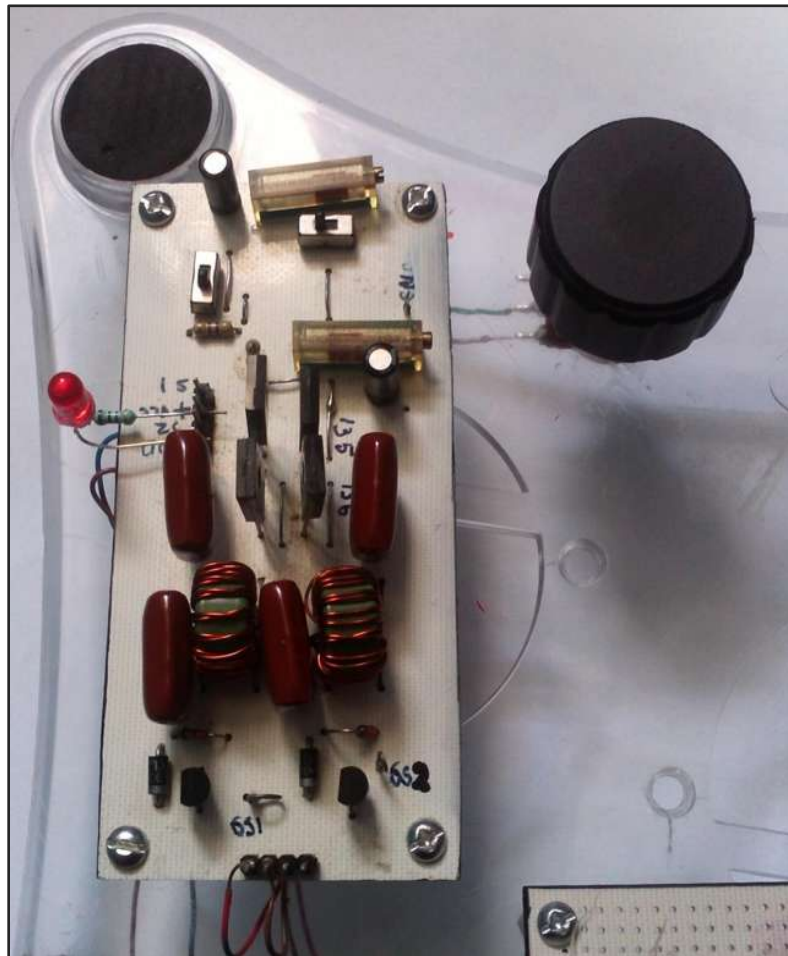


Figura 3.7 Driver de control TL 494



### 3.4.3 Ciclo de trabajo $D$

El ciclo de trabajo mostrado en la figura 3.8 es simplemente una fracción adimensional del periodo en que el interruptor se encuentra activo o cerrado; y retomando la información anterior en el tema de El convertidor flyback del capítulo I, donde se dice que el ciclo de trabajo del conmutador es  $D$ , y estará cerrado un tiempo  $DT$ , y abierto el resto del tiempo,  $(1 - D)T$ , donde  $f_c$  es la frecuencia de conmutación de la señal de control.

$$T = \frac{1}{f_c} \text{ (segundos, s)} \quad (3.1)$$

El ciclo de trabajo del convertidor flyback será entonces:

$$D = \frac{R C f_c \Delta V_0}{V_0} \quad \text{ver figura 2.22 b)} \quad (3.2)$$

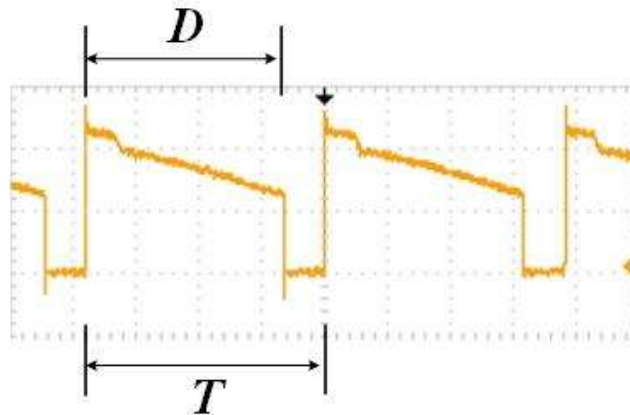


Figura 3.8 forma de onda del PWM

### 3.4.4 Frecuencia de conmutación $f_c$

La frecuencia de conmutación es la señal variante en el tiempo que marcara los cambios de estado del control PWM (alto-bajo ó abierto-cerrado), tal señal es generada por nuestro driver de control y enviada directamente a la compuerta del Mosfet *IRFZ44N* que se definirá más adelante, esta señal idealmente cuadrada, de alta frecuencia y periódica. La frecuencia de conmutación depende del capacitor **CT** y **RT** variable del driver de control, mostrado en la figura 3.9.

En nuestro driver de control contamos con especificaciones técnicas por el fabricante *Texas Instruments* con valores recomendados como CT y RT que serán modificados debido a la adaptación del nuestro dispositivo específicamente de RT.

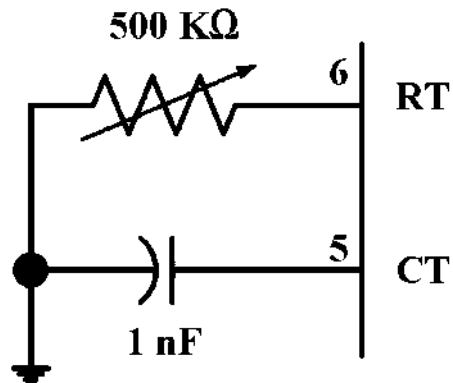


Figura 3.9 Paralelo de RT y CT para el TL 494

Pudiendo apreciar la posición exacta de nuestros elementos pasivos que definen la frecuencia de conmutación  $f_c$ , para efectos de representación simbólica con un circuito y valores típicos recomendado por el fabricante ver Apéndice A.

También es posible apreciar los elementos RT y CT reales en su posición original mostrándose así en la figura 3.10 donde podemos conocer el capacitor CT y el reóstato resistencia variable RT, que en nuestra fuente de poder funcionara como una resistencia variable sintonizadora de la frecuencia  $f_c$  provocando cambios en  $L_1$  los cuales se reflejaran en  $L_n$  y así colocar la posición de frecuencia y obtener mejores resultados en la salida de nuestra bobina remota con el fin de hacerla más funcional a lo largo de las pruebas para cada bobina parlante.

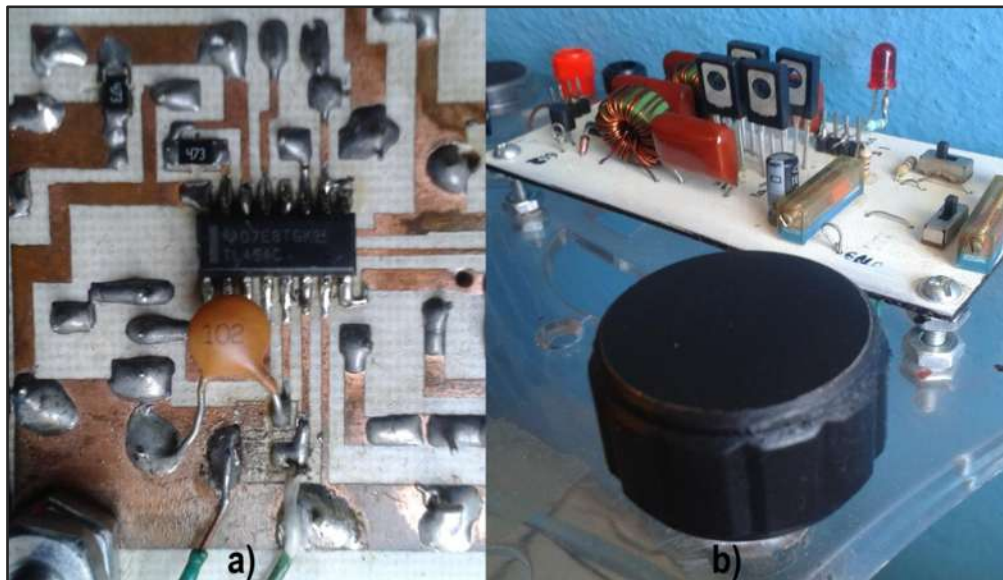


Figura 3.10 Elementos físicos a) CT (capacitor cerámico) b) Reóstato RT (Perilla negra)

El desplazamiento de RT en paralelo con CT como se puede apreciar en la figura anterior definirá la frecuencia  $f_c$  y que podrá sintonizarse con la frecuencia de resonancia de cada bobina remota según sea el caso particular en cada una, siendo una gran ventaja en este dispositivo pues podemos trabajar en un amplio rango de frecuencias en la inducción electromagnética, la frecuencia de conmutación de nuestro driver de control se muestra en la ecuación (3.3).

$$f_c = \frac{1}{C1 R1} = \frac{1}{1 \times 10^{-9} F * 100 \times 10^3 \Omega} = 10000 \text{ Hz ó } 10 \text{ KHz} \quad (3.3)$$

### 3.4.5 El Mosfet de potencia

Existen en el mercado muchos tipos de interruptores tales como los mencionados en el *Capítulo 2* en la sección *2.4 Interruptores electrónicos*, para nuestra topología es necesario un interruptor de conmutación rápida (acción de abrir y cerrar un interruptor electrónico), es necesario uno que además de rápido y compacto sea muy eficiente; así como apropiado para trabajar con el voltaje de la fuente de la sección 3.4 de este capítulo, en la etapa de potencia; dicho interruptor se muestra en la figura 3.11 . Tal es el caso de la selección de un Mosfet IRFZ44N que es un transistor de potencia de conmutación rápida ideal para provocar la inducción.



Figura 3.11 El Mosfét en la etapa de potencia

En la topología propuesta como tipo flyback adecuada, fue necesaria la colocación de una protección para  $L_1$  (Clamp) y el Mosfet de potencia, también el seleccionar el Mosfet de acuerdo a sus características eléctricas y técnicas para su implementación ver apéndice B, dicho Clamp protector se describirá posteriormente en este mismo capítulo.

### 3.4.6 El Clamp

Todo dispositivo electrónico de conmutación rápida y su elemento de transferencia le es necesario una protección para evitar su sobrecarga; en consecuencia su destrucción, ya que existen dos momentos importantes en el desempeño del Mosfet, tales momentos son: conducción y no conducción; o lo que es lo mismo abierto o cerrado.

La función del Clamp mostrado en la figura 3.13 es proteger al Mosfet del inductor  $L_1$  en el modo de no conducción por es Mosfet, o abierto, ya que la energía no consumida por dicho inductor, tiene que ser forzosamente disipada por un elemento de potencia; esto es lo que realiza el Clamp, es importante también mencionar que el inductor emisor se encuentra en modo de conducción continua; es decir la corriente en  $L_1$  nunca llega a ser cero lo que hace aun más necesario.

El Clamp consta de:

- Un capacitor ( $C_c$ ) de tantalio no polarizado de un valor de  $47\text{ nF}$
- Un resistor ( $R_c$ ) disipador de potencia con un valor de  $2\text{ K}\Omega$  a  $5\text{ W}$
- Un diodo ( $D_c$ ) de conmutacion rapida  $1N4937$

Los elementos que constituyen al Clamp se representan el diagrama en la figura 3.12 .

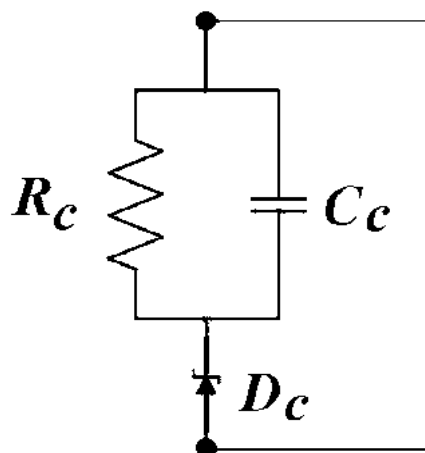


Figura 3.12 Circuito eléctrico del Clamp protector

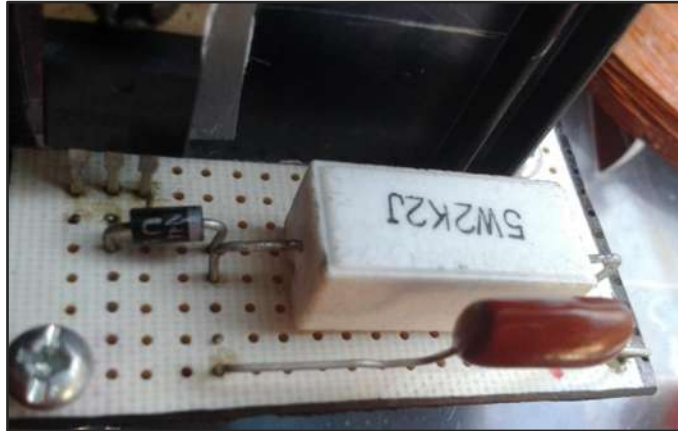


Figura 3.13 Clamp Protector

Los valores de los elementos que constituyen el Clamp son típicamente los valores para disipar no más de 10 W para distintas topologías donde se utilizó electrónica de potencia de conmutación rápida y hasta ultrarrápida ( $f > 1 \text{ GHz} = 1\,000\,000 \text{ Hz}$ ).

### 3.4.7 La bobina primaria $L_1$

Tal inductor en este proyecto de investigación es el dispositivo emisor de energía hacia la bobina o inductor secundario  $L_n$ ; que es nuestro elemento receptor de energía y proveerá de potencia para alimentar nuestros dispositivos remotos móviles.

Dicho inductor emisor se muestra en la figura 3.14 que fue construido como un elemento fundamental y muy importante para lograr el objetivo del proyecto de investigación para hacerlo funcional y práctico.

Figura 3.14 bobina primaria  $L_1$  o emisor de energía

La función del inductor es vibrar a una frecuencia tal que logre la inducción en el secundario o receptor de energía; dicha frecuencia no es tan al azar ya que como todo elemento eléctrico pasivo tiene una condición especial que determina sus características eléctricas, tales condiciones son como frecuencia de resonancia  $f_r$ , resistencia eléctrica  $R$ , capacitancia  $C$ , inductancia  $L$  descritas en el Capítulo 2, estos valores se muestran en la tabla 3.1, temperatura entre otras condiciones físico-eléctricas.

### 3.4.8 La bobina secundaria $L_n$

Hasta aquí el avance en nuestra propuesta es el control, la parte de potencia y emisor, pero otra parte medular del proyecto es la recepción de energía, esta parte desarrolla la función de recibir tal energía para ser acondicionada y consumida; en caso de ser necesario, por el o los dispositivos de carga (LEDs, Celulares, *Notebooks* y dispositivos móviles en general etc.), para consumir la potencia inducida de  $L_1$  a  $L_n$ .

El inductor  $L_n$  mostrado en la figura 3.15 consta de variables y condiciones tanto físicas como eléctricas que la hacen única, así como a  $L_1$ . Estas determinaciones son las que nos permiten aprovecharnos del fenómeno de la inducción, fenómeno eléctrico en el que una bobina produce un voltaje en terminales del inducido al hacer fluir una corriente eléctrica por el interior del conductor que construye la bobina.



Figura 3.15 Inductor  $L_n$

El valor de la bobina receptora tiene distintos valores de capacitancia  $C$ , inductancia  $L$  y resistencia  $R$  (los valores reales medidos de las bobinas planas construidas se mostrarán más adelante) no necesariamente puede ser de las mismas condiciones del emisor,

esto es: puede ser o no ser igual, dentro de un rango que determina su ancho de Banda  $Bw$  (por sus siglas en ingles *Band witch* o simplemente  $B$ ) significa que se comportaría como un filtro pasa altas o bajas, dejando pasar un determinado rango de frecuencias y atenuando otras, dando como resultado gráfico una curva típica de este tipo de filtros pasivos; como la mostrada en la figura 3.16 .

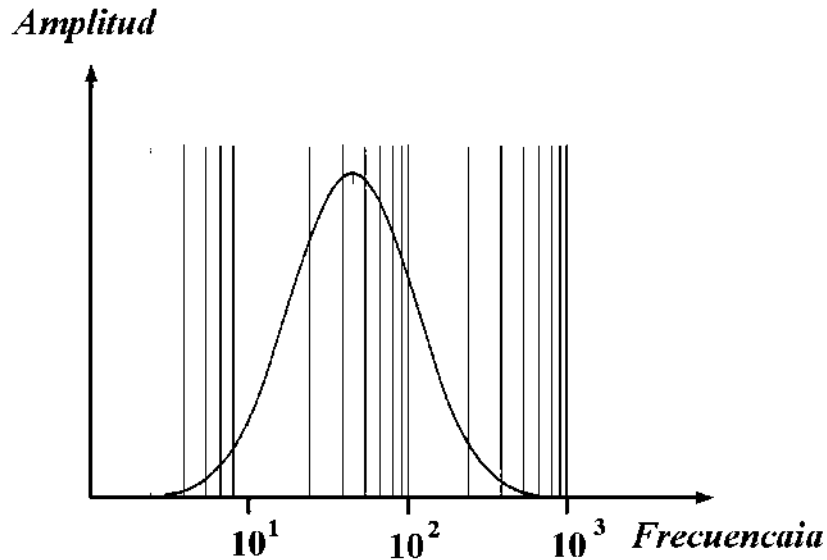


Figura 3.16 Curva típica de un filtro pasivo, con escala logarítmica en el eje de la frecuencia  $f$

### El inductor secundario $L_2$

Esta es la bobina construida remota más grande en magnitud e inductancia; esta se muestra en la figura 3.17.

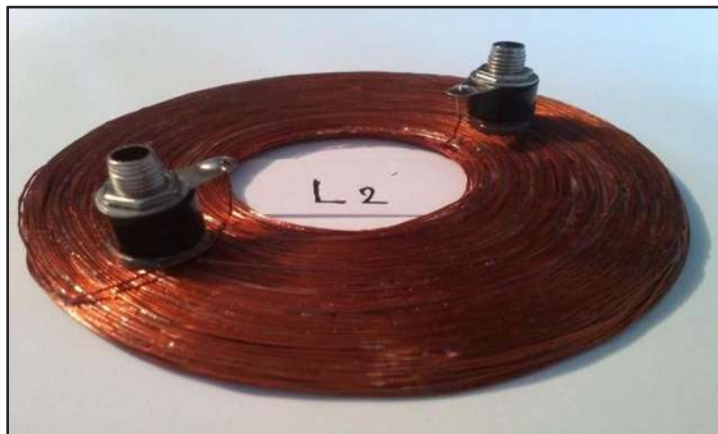


Figura 3.17 Inductor  $L_2$

### El inductor secundario $L_3$

Este inductor remoto es más pequeña que el anterior cambiando en magnitud las mismas variables de interés; esta se muestra en la figura 3.18.



Figura 3.18 Inductor  $L_3$

### 3.5 Datos reales de los inductores planos construidos

Resulta muy práctico conocer los valores reales de los elementos que constituirán nuestra fuente de inalámbrica de poder, ya que de esta manera nos podemos dar cuenta que sus magnitudes para cada variable así como estimar los resultados que nos arroja nuestro dispositivo de transmisión de energía.

Los inductores planos construidos aparte de tener valores muy significativos en cuanto inductancia  $L$  se refiere; también conserva capacitancia  $C$  y resistencia  $R$ , como si fuese un circuito eléctrico en serie con estas dos variables más como se muestra en la figura 3.19 dando como resultado un circuito  $LCR$  serie.

También, los valores reales mostrados en la tabla 3.1, que aunque muy pequeñas no podemos suprimir su existencia, pues en casos muy específicos y especiales es de suma importancia tomar en cuenta estos valores ya que existen circuitos demasitados sensibles a los cambios en magnitud de inductancia, capacitancia y resistencia.

Con la finalidad de experimentar y hacer más práctico el proyecto se construyeron cuatro inductores planos de diferentes magnitudes  $L_n = L_2 \text{ ó } L_3 \text{ ó } L_4 \text{ ó } L_5$ ,

Siendo:

$R_L$  = resistencia interna,  $L_L$  = inductancia interna,  $C_L$  = capacitancia interna



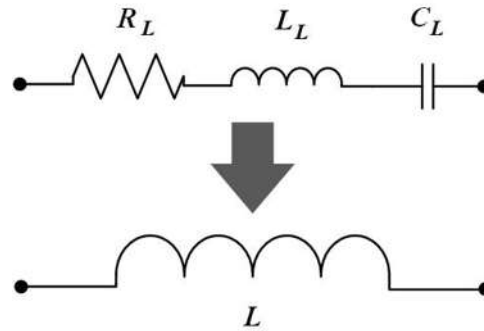


Figura 3.19 Circuito RLC serie

Cambiando totalmente los valores de las variables de interés. NOTA:  $L_4$  y  $L_5$  no se implementaron en las pruebas debido a que sus resultados fueron poco significativos, no por eso dejaron de ser funcionales.

Los datos medidos de las bobinas construidas fueron arrojados por un *medidor digital LCR* de muy alta precisión.

Tabla 3.1 Tabla de valores reales de los inductores construidos

Inductor	Inductancia L [H]	Capacitancia C [F]	Resistencia R [Ω]	Resistencia a 1kHz [Ω]	Número de vueltas [N]
$L_1$	$12.67 * 10^{-3}$	$1800 * 10^{-9}$	$21.1+47.8=68.8$	2059	550
$L_2$	$18.89 * 10^{-3}$	$1293.7 * 10^{-9}$	22.8	596.8	500
$L_3$	$8.05 * 10^{-3}$	$2865 * 10^{-9}$	13.5	201.3	350
$L_4$	$3.77 * 10^{-3}$	$5807 * 10^{-9}$	8.4	74.3	250
$L_5$	$1.48 * 10^{-3}$	$13186 * 10^{-9}$	4.9	22.8	150

Para recordar que algunos de sus prefijos y unidades de medición son:

Inductancia:  $1 \text{ mH} = 1 * 10^{-3} \text{ H}$

Capacitancia:  $1 \text{ pF} = 1 * 10^{-12} \text{ F}$  y  $1 \text{ nF} = 1 * 10^{-9} \text{ F}$ .

Resistencia:  $1 \text{ K}\Omega = 1\,000 \Omega$  y  $1 \text{ M}\Omega = 1\,000\,000 \Omega$

Los inductores de la figura 3.20 son mostrados de forma comparativa para apreciar con mayor visión cada uno de las bobinas planas construidas.

Los inductores utilizados fueron contruidos con alambre magneto calibre #18, con la peculiaridad de ser planos sin núcleo con el fin de optimar espacio, contribuir a la estética, aprovechar el campo tanto eléctrico como magnético a la más alta potencia y eficiencia posible, sin núcleo utilizando el aire como medio ambiente como el espacio de transferencia y así evitar la saturación por las frecuencias R.F. (Radio Frecuencia) de entre los inductores.

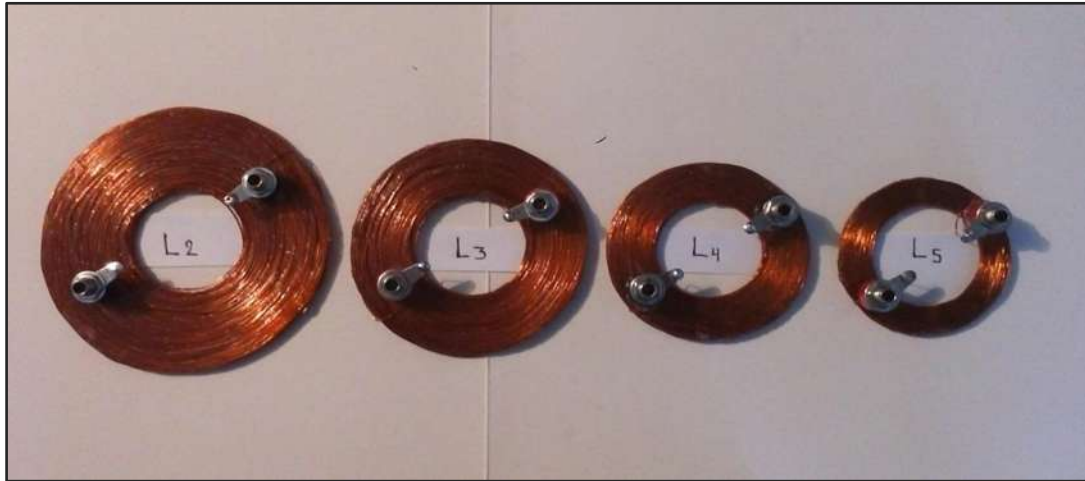


Figura 3.20 Bobinas planas construidas

Utilizando la ecuación (2.79) con los datos de la tabla 2.1 se calcularon las frecuencias de resonancia  $f_0$ , de cada inductor construido esto es para:

$$L_1 \quad f_{0L_1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{12.67 * 10^{-3} * 1800 * 10^{-9}}} = 1053 \text{ Hz} \quad (3.4)$$

$$L_2 \quad f_{0L_2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{18.89 * 10^{-3} * 1293.7 * 10^{-9}}} = 1018 \text{ Hz} \quad (3.5)$$

$$L_3 \quad f_{0L_3} = \frac{1}{2\pi\sqrt{8.05 * 10^{-3} * 2865 * 10^{-9}}} = 1047 \text{ Hz} \quad (3.6)$$

$$L_4 \quad f_{0L_4} = \frac{1}{2\pi\sqrt{3.77 * 10^{-3} * 5807 * 10^{-9}}} = 1075 \text{ Hz} \quad (3.7)$$

$$L_5 \quad f_{0L_5} = \frac{1}{2\pi\sqrt{1.48 * 10^{-3} * 13186 * 10^{-9}}} = 1139 \text{ Hz} \quad (3.8)$$

### 3.6 Adaptación propuesta para la bobina $L_n$ remota con un terminal *USB*

Para lograr la transferencia de electricidad de nuestro dispositivo con energía inalámbrica hacia un elemento remoto, fue necesaria la construcción de una adaptación electrónica; que nos acoplara el flujo de la energía inducida, se utilizaron elementos pasivos que se ilustran en la figura 3.21 tales son: Un capacitor  $C_2$ , un diodo rectificador de alta velocidad  $D_3$  y un regulador de tensión de CD es decir elementos no activos y conductores de cobre así como un laminado especial esto es un molde acoplador o "cople" *USB* tipo hembra.

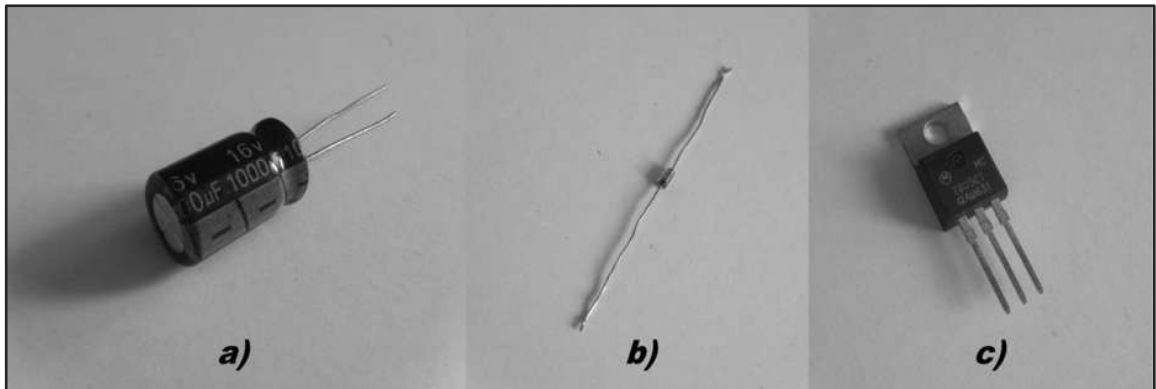


Figura 3.21 a)Capacitor electrolítico  $C_2$  b)Diodo Rápido  $D_3$  c)Regulador de tensión

La adaptación construida es mostrada en la figura 3.22, donde se lleva a cabo la rectificación por el diodo  $D_3$ , el filtrado por el capacitor  $C_2$  y la regulación de tensión a la salida por el regulador; para así conectar dispositivos móviles que satisfacen las necesidades cotidianas y al mismo tiempo concebir el concepto de universalidad en alimentación para dispositivos remotos y/o fijos si así fuera el caso de disponibilidad.

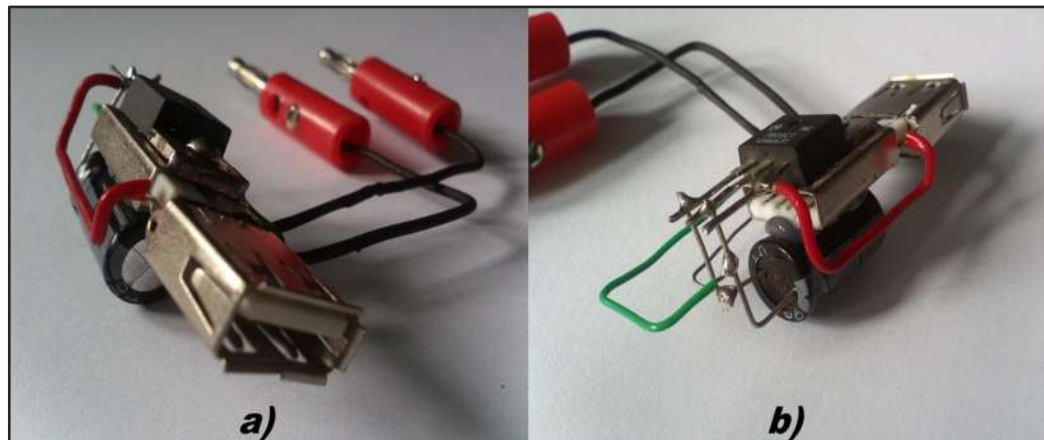


Figura 3.22 Terminal USB a) vista frontal b) vista posterior

### 3.7 Adaptación propuesta para la bobina $L_n$ remota con iluminación

Nuestra fuente de poder además de poder alimentar dispositivos remotos vía USB también puede ser capaz de proveer de energía eléctrica y transformarla en lumínica particularmente por medio de elementos electrónicos como lo son los LED's (Diodo Emisor de Luz), aprovechando que estos elementos pueden funcionar a frecuencias muy altas (10 KHz a 2 Mhz, para las pruebas realizadas que se mostraran más adelante en el *Capítulo 3* siendo imperceptibles para la vista humana dando la apariencia de que nunca se apagasen. Dicha adaptación para iluminación mostrada en la figura 3.23; simplificará aún más la forma de aprovechar la inducción emitida por  $L_1$ , pues comparada con la adaptación USB anterior; no se necesitara rectificación, filtración ni regulación, ya que los LED's rectificarán y responderán casi a cualquier frecuencia manteniéndose activos.

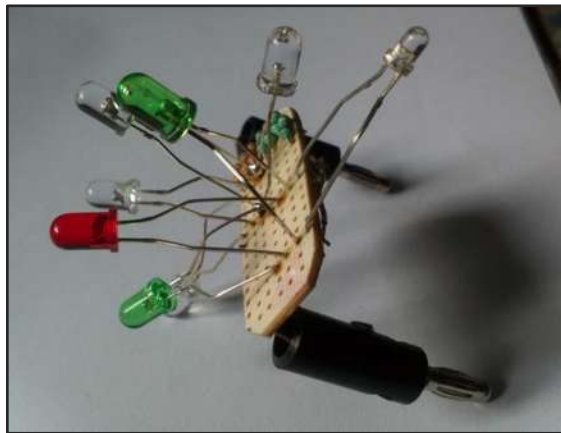


Figura 3.23 Adaptación para LED's

En el caso de iluminación LED solo es necesario limitar la corriente por medio de resistores en la terminal catódica de cada LED; protegiéndolo de una sobre corriente mayor a los 15 mA (corriente máxima tolerante para este tipo de LED's), como se muestra en la figura 3.24.



Figura 3.24 Banco de Resistores en LED's

### 3.8 Estabilidad de la frecuencia $f$

La estabilidad de la frecuencia es la capacidad para de un oscilador para permanecer en una frecuencia fija, y es de primordial importancia en los sistemas de comunicaciones. Con frecuencia, se especifica la estabilidad de la frecuencia como de corto a largo plazo. La estabilidad a corto plazo se afecta principalmente debido a fluctuaciones en los voltajes de operación de CD, mientras que la estabilidad a largo plazo es una función del envejecimiento de los componentes y de cambios en la temperatura y la humedad del ambiente. En los osciladores de circuito tanque LC y de desplazamiento de fase RC son susceptibles a variaciones a corto y largo plazo. Además los factores Q de los circuitos tanque LC son relativamente Bajos y permiten que el circuito tanque resonante oscile dentro de un amplio rango de frecuencias.

Son varios los factores que afectan la estabilidad de un oscilador. Los más obvios son los que afectan en forma directa el valor de los componentes que determinan la frecuencia. Se incluyen los cambios de inductancia, capacitancia y resistencia causados por variaciones ambientales de temperatura y humedad, y cambios en el punto de reposo de los transistores normales y de efecto de campo. También las fluctuaciones de las fuentes de poder de CD afectan la estabilidad. La estabilidad de la frecuencia de los osciladores de RC o de LC se puede mejorar mucho regulando el suministro de CD y minimizando las variaciones ambientales. También se puede usar componentes especiales, independientemente de la temperatura.

La Comisión Federal de Comunicaciones (F.C.C.) ha establecido reglamentos estrictos acerca de las tolerancias de las portadoras de radiofrecuencia. Siempre que se usa la atmosfera (propagación de radio en espacio libre) como medio de transmisión, es posible que las transmisiones de una fuente puedan interferir con las otras fuentes, si se traslapan sus bandas de frecuencia de emisión o de transmisión. Por consiguiente, es importante que todas las fuentes mantengan su frecuencia de operación dentro de una tolerancia específica [3].

## Capítulo 4

# Propuesta e Implementación de la Fuente Conmutada Inalámbrica

En este Capítulo mostraremos el funcionamiento y resultados medidos así como el comportamiento de la transferencia de energía inalámbrica por medio de la inducción electromagnética que es el fenómeno físico que aprovechamos para energizar distintos tipos de cargas.

Al ser este un dispositivo único e implementado por primera vez estaremos expuestos a discrepancia e incertidumbres, tales como pequeñas variaciones en la línea de alimentación de la fuente de CD mostrada en la figura 3.6 del *Capítulo 3*, temperatura ambiente, y pequeñas maniobras a nuestra fuente; las cuales se trataron de minimizar lo más posibles con el fin de disminuir errores y llevar a cabo nuestro objetivo.

### 4.1 Propuesta de la Fuente Conmutada Inalámbrica

Con todo el material y la información anterior podemos definir un dispositivo capaz de transferir energía inalámbricamente, utilizando los elementos propuestos construidos con las variables necesarias que harán que nuestro dispositivo funcione correctamente, cada elemento conserva propiedades únicas que lo hacen distinto a los demás pues sus elaboración y fisionomía definen su propio funcionamiento en su posición en el dispositivo.

Para llevar a cabo la construcción de nuestra fuente de poder inalámbrica, retomaremos la información recabada en el *Capítulo 2* así como los elementos construidos que se han mostrado a lo largo de este capítulo proponiendo y dando como resultado constructivo una ***Fuente Conmutada de Energía Inalámbrica F.C.E.I.***, mostrada en la figura 4.1 .

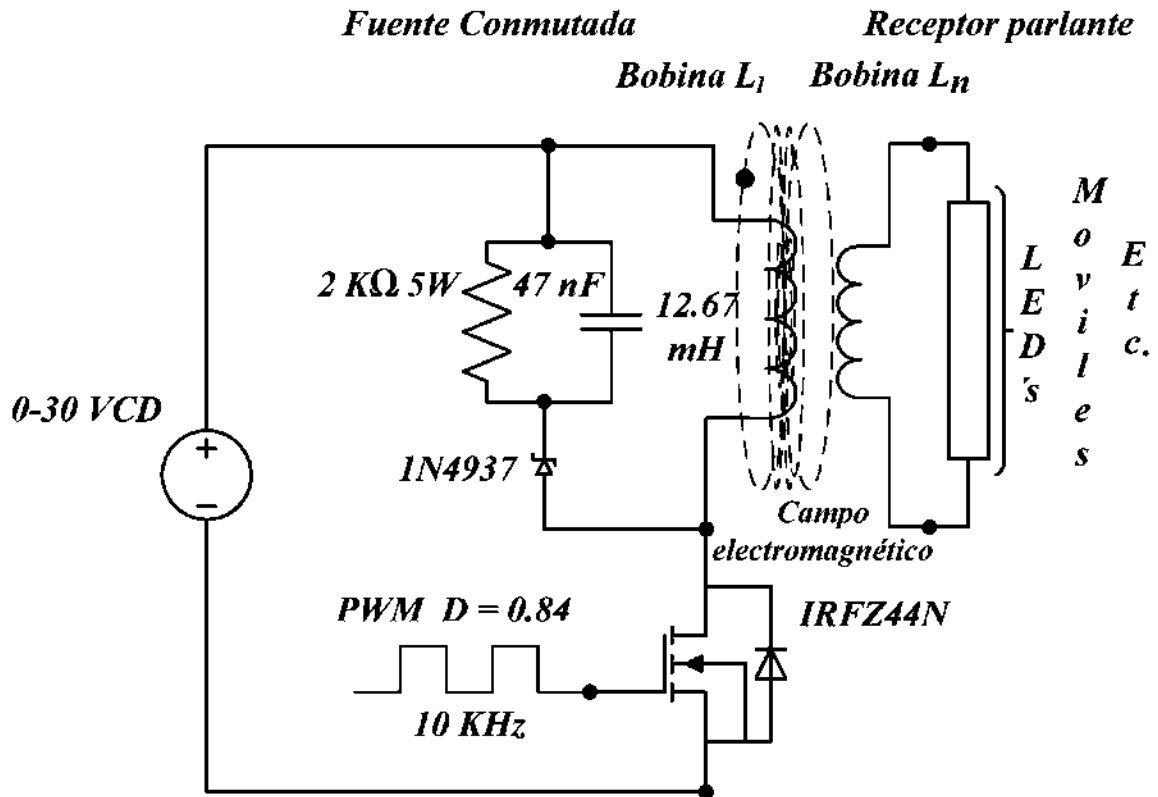


Figura 4.1 Circuito esquemático con datos nominales de la Fuente Conmutada de Energía Inalámbrica *F.C.E.I.*

En nuestro circuito representamos los elementos constitutivos de forma simbólica, con el fin de mostrar cada parte de la fuente así como su posición y valores reales; su función es lo que define su posición, pues el flujo de la energía experimentara cambios a lo largo de los conductores para transferirse a nuestro receptor en las condiciones necesarias para así suministrar de energía al dispositivo remoto.

Dichos elementos constitutivos modularmente son:

- 1.- Fuente de CD
- 2.- Driver de control
- 3- Mosfet de potencia
- 4.- Clamp protector
- 5.- Bobina emisora  $L_1$
- 6.- Bobina receptora  $L_n$

A continuación describiremos brevemente el funcionamiento de cada elemento, esto es:

### **1.- Fuente de Voltaje de CD**

La función de la fuente de CD es proporcionar la energía al dispositivo Fuente de energía inalámbrica así regular la tensión de salida en terminales es decir la amplitud de inducción, figura 3.6.

### **2.- Driver de control**

Esta es la parte quizá más compleja, pues requiere de electrónica precisa de control para asegurar las señales que interpretara nuestro Mosfet de potencia y asegurar la inducción en nuestra bobina primaria, figura 3.7.

### **3- Mosfet de potencia**

El Mosfet de potencia funcionalmente es el elemento de interrupción en el flujo de la corriente eléctrica, pues este abrirá y cerrará en un tiempo determinado por un ciclo de trabajo  $D$  a una frecuencia de conmutación  $f_c$  gobernado por nuestro Driver de control, el Mosfet es el elemento por el cual fluirá la energía que se inducirá en  $L_1$ , figura 3.11.

### **4.- Clamp protector**

La función de nuestro Clamp es la de proteger nuestra topología propuesta principalmente a nuestro Mosfet y a  $L_1$ , ya que nuestra bobina primaria trabajara en modo continuo lo que la hace un elemento que siempre estará energizado generando calor traducido a pérdidas dichas que serán absorbidas por este Clamp protector, figura 3.13.

### **5.- Bobina emisora $L_1$**

Este elemento cumplirá la función de emitir energía, pues al abrir y cerrar el Mosfet efectuara vibraciones muy altas controladas por el Driver de control, a frecuencias determinadas por la perilla de sintonización que no es más que un potenciómetro en paralelo con un capacitor para producir oscilaciones con una amplitud y frecuencia de conmutación definida, figura 3.14.



## 6.- Bobina receptora $L_n$

La bobina receptora no es más que la parte complementaria de  $L_1$ , es decir; es el elemento que por medio de la inducción recibirá la energía en las mismas condiciones de frecuencia afectado por una relación de transformación y otras variables físicas como la temperatura y presión del medio ambiente así como el suministro de la Fuente de CD, produciendo un diferencia de potencia en terminales, para así hacer fluir una corriente que será absorbida por la carga a fin, figura 3.15.

Con nuestro circuito anterior representado en la figura 4.1 llevaremos a cabo la unión de cada elemento para así construir la fuente conmutada inalámbrica de poder; llegando al término de la fase proponiendo e implementando nuestro dispositivo mostrado en la figura 4.2 de una forma física, real y palpable en la que su representación es modular.

La fuente cuenta con terminales de alimentación o bornes de CD para la alimentación del Driver de control PWM y una entrada de una *fuentes de CD* para alimentación del dispositivo en general de 12 VCD en PWM y de 0 a 30 VCD en la entrada de CD respectivamente, Cuenta también con un *Mosfet* de potencia, un *Clamp* protector, un *control de señales PWM*, una *perilla sintonizadora* para la frecuencia de conmutación  $f_c$  y una *bobina emisora primaria* de señales  $L_1$ .

Se encuentra montado en una pequeña tabla de acrílico transparente dieléctrico para aislar cada elemento que conforma nuestro dispositivo, este dispositivo propuesto nos lleva hacia el concepto de energía inalámbrica, un concepto poco explorado pero no imposible, el dispositivo cuenta con los elementos necesarios para llevar a cabo la transferencia de energía que por medio de la inducción electromagnética será aprovechada por casi cualquier dispositivo móvil que utilice tensiones comerciales para su funcionamiento.

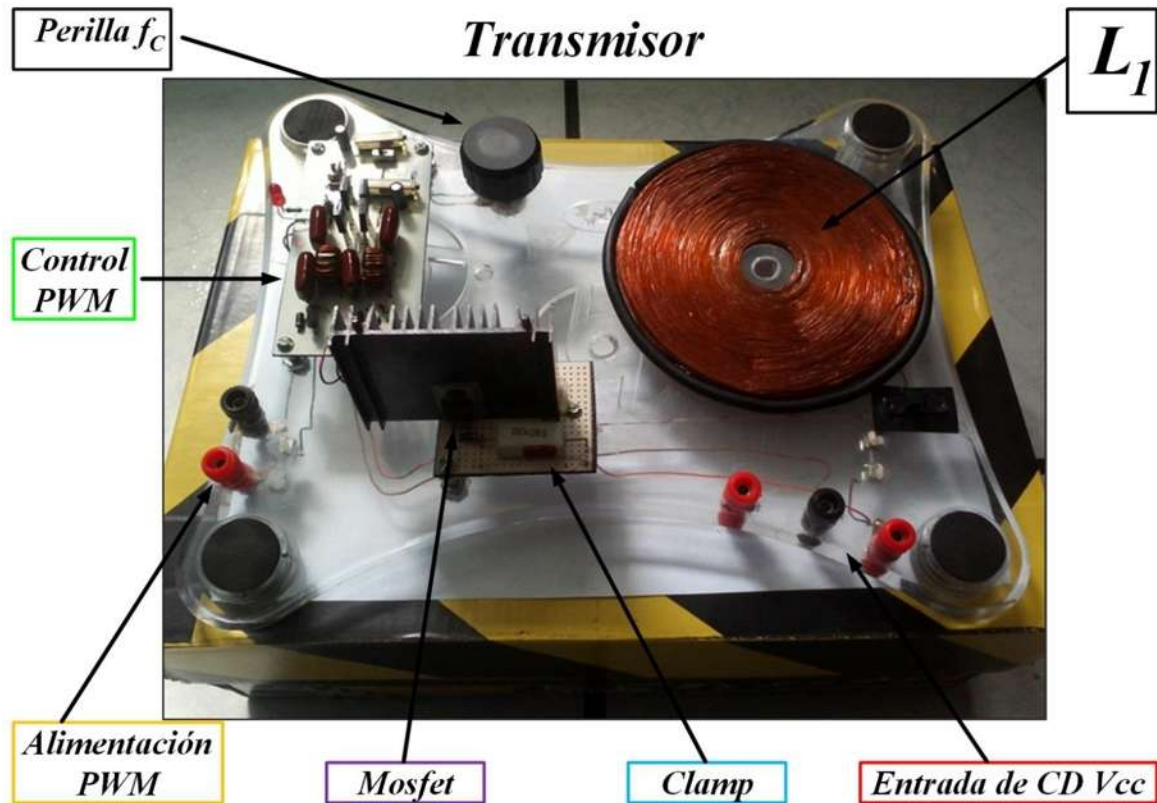


Figura 4.2 Dispositivo F.C.E.I. implementado y propuesto

## 4.2 Instrumentos de medición utilizados y pruebas del proyecto

Cabe mencionar que las mediciones se hicieron con instrumentación muy precisa del Laboratorio de la Facultad de Ingeniería Eléctrica (L.I.E.) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Tales como: *Fuentes de CD Steren* de 100 Watts para alimentar el Driver de control, mostrada en la figura 4.3, fuente de CD variable 0-100 VCD para alimentar la etapa de potencia mostrada en la figura 4.4.



Figura 4.3



Figura 4.4

Figuras 4.3 y 4.4 Fuentes de poder para la alimentación del F.C.E.I.

Multímetros Digitales *Fluke* mostrado en la Figura 4.5 y *Tulmex* en la Figura 4.6, *Osciloscopios digitales Tektronix* mostrado en la Figura 4.7 y un medidor termográfico figura 4.8 .



Figura 4.5



Figura 4.6

Figuras 3.3 y 3.4 Los multímetros digitales utilizados



Figura 4.7 Osciloscopio Tektronix para el monitoreo de las señales producidas en el *F.C.E.I.*



Figura 4.8 Cámara termográfica FLIR E6

Para el funcionamiento y resultados de la Fuente Conmutada Inalámbrica realizaremos cuatro pruebas, en diferentes condiciones pero con la misma topología propuesta en el *Capítulo 2* con la finalidad de demostrar la funcionalidad con diferentes cargas esbozando la universalidad de este prototipo, tales pruebas hechas en el laboratorio y con la instrumentación antes mencionada, estas son:

- ❖ Mediciones del inductor primario  $L_1$  induciendo a la bobina secundaria  $L_2$  experimentando una carga con LED's.
- ❖ Mediciones del inductor primario  $L_1$  induciendo a la bobina secundaria  $L_2$  experimentando una carga con una toma *USB* alimentando un dispositivo móvil.
- ❖ Mediciones del inductor primario  $L_1$  induciendo a la bobina secundaria  $L_3$  experimentando una carga con LED's.
- ❖ Mediciones del inductor primario  $L_1$  induciendo a la bobina secundaria  $L_3$  experimentando una carga con una toma *USB* alimentando un dispositivo móvil.
- ❖ Relación de transformación bobina primaria  $L_1$  y bobina secundaria  $L_3$ .
- ❖ Un transformador plano con núcleo de aire.

Las pruebas que se mencionan son muy importantes pues esta nos arrojaran resultados esperados que no por ser únicos dejan de comportarse como tales; es decir los elementos que constituyen este dispositivo no rompen su esencia solo transforman la energía para llegar un fin.

Dicho fin es la de emitir energía por el medio ambiente sin la necesidad de una conexión física (sin cables), la necesidad de realizar estas implementaciones nos mostrará su funcionalidad, practicidad así como también las limitantes que nos impidiesen obtener resultados más favorables y siendo extremistas hasta su destrucción, con estos parámetros conocidos podremos estimar algunos resultados y afirmar su funcionamiento.

### 4.3 Mediciones del inductor primario $L_1$ induciendo a la bobina secundaria $L_2$ experimentando una carga con LED's.

El arreglo electrónico para las pruebas con una carga de 8 LED's se llevó a cabo con el fin de observar su comportamiento, conocer las características de operación pero sobretodo comprobar su funcionalidad bajo un circuito bien definido que nos permitiese llevar a cabo su operación, dicho circuito para esta prueba se muestra en la figura 4.9.

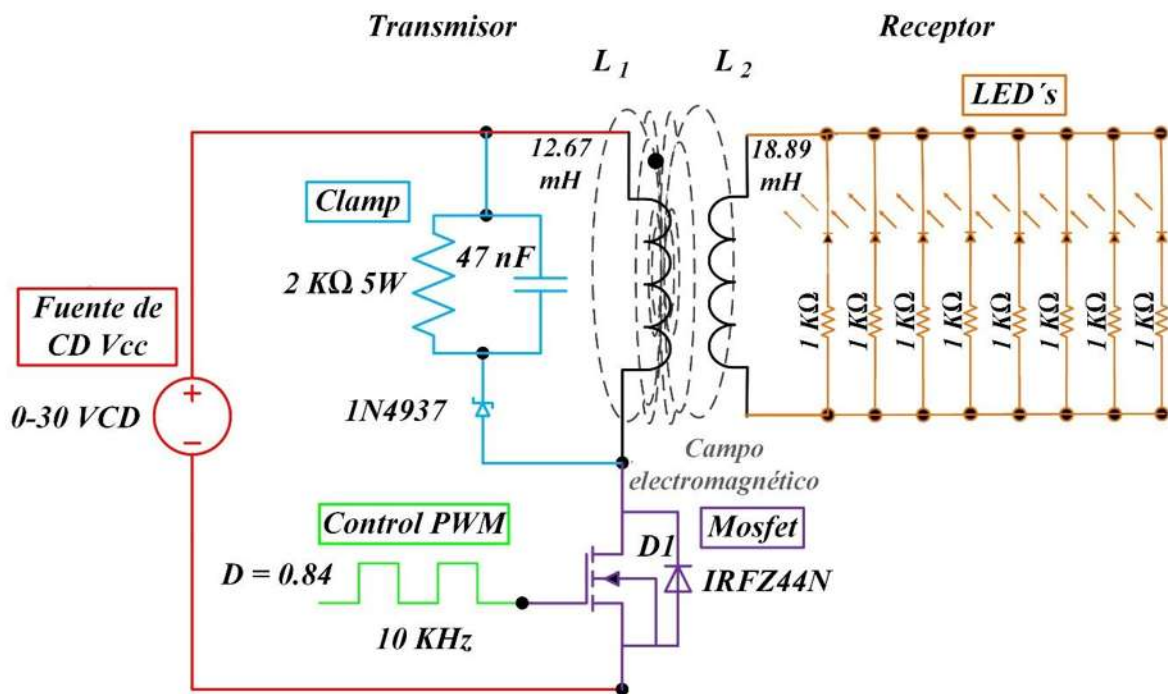


Figura 4.9 Circuito electrónico Transmisor-Receptor con una carga de LED's

El circuito electrónico de la F.C.E.I. mostrado en la figura 4.9 es único ya que cuenta con su propia topología esto hace que el prototipo también mantenga sus propias variables conservando sus constantes, es condiciones son las que definen los parámetros de operación particularmente para esta prueba.

Las mediciones se efectuaron estableciendo variables constantes para homogenizar la captura de datos tales datos arrojados se muestran en las figuras y tablas que a continuación se muestran.

El dispositivo **F.C.E.I.** fue implementado en el laboratorio bajo condiciones distintas estos son valores constantes y variables en el tiempo ( $t$ ).

Tabla 4.1 Valores de  $L_2$  como inducido experimentando una carga de LED's

L2							
<i>Constantes</i>							
<i>D= 0.84</i>							
<i>Fc= 10 KHz</i>							
Vcc	I in	I Out	Vpp Osciloscopio D1	Vo Mul. Fluke L2	Vo Calculado como Flayback	Potencia D1 Osciloscopio	e Fluke
[V]	[mA]	[mA]	[V]	[V]	Vo=Vs [D/1-D] [N2/N1] [V]	[mW]	P=[ Pout/Pin ]100X[0.1] [%]
0.1	0.53	0.03	1.26	0.27	0.47	0.0378	152.8301887
0.5	0.84	0.08	2.8	0.36	2.38	0.224	68.57142857
1	2.35	0.3	4.6	0.59	4.77	1.38	75.31914894
2	16.5	1.34	7.6	0.879	9.54	10.184	35.69272727
3	24.9	2.3	10	1.18	14.31	23	36.33199465
4	33	3.3	12.4	1.55	19.09	40.92	38.75
5	40	3.8	14.8	1.79	23.86	56.24	34.01
7	56.5	6	19.6	2.4	33.4	117.6	36.40960809
10	80	7	25	3.2	47.72	175	28
15	188	3	32	4.13	71.59	96	4.393617021
20	386	2	32	4.3	95.45	64	1.113989637

**De donde:**

$D$  = Ciclo de trabajo [adimensional].

$f_c$  = Frecuencia de conmutación del PWM [Hz].

$V_{cc} = V_S$  = Voltaje de alimentación de la fuente de poder para la etapa de potencia [V].

$I_{in}$  = Corriente de entrada de la fuente de poder en la etapa de potencia al [mA].

$I_{out}$  = Corriente de salida en el inductor  $L_n$ , donde  $L_n$  puede ser  $L_2$  ó  $L_3$  [mA].

$V_{pp}$  Osciloscopio  $D1$  = Voltaje pico a pico captada por el osciloscopio en el diodo del Mosfet [V].

$V_{out}$  Mult. Fluke = Voltaje de salida en  $L_n$  medida por el multímetro Fluke [V].

$V_o$  Calculado = Voltaje calculado como fuente de alimentación con una topología tipo Flyback [V].

Potencia  $D1$  = Potencia disipada por el diodo del Mosfet  $D1$  con datos arrojados por el Osciloscopio [mW].

$\epsilon_{Fluke}$  = Eficiencia del F.C.E.I. con datos arrojados por el Multímetro Fluke [%]

La tabla 4.1 nos describe las magnitudes para cada variable medida, donde los valores de  $f_c$  y  $D$  permanecen constantes con el fin de mantener todas las mediciones afectadas por la mismas constantes y así apreciar con más claridad el comportamiento del F.C.E.I. bajo condiciones eléctricas de amplitud y frecuencia.

La intensidad de corriente y tensión eléctrica fueron medidos para los puntos de medición contemplados; ya que son datos importantes para conocer información física que nos lleve a una mejor concepción del dispositivo en cuestión.

Cabe mencionar también que pueden existir pequeños márgenes de error debido a cambios físicos que no estuvieron en nuestras manos, algunos factores son:

- Variación en la tensión eléctrica (Voltaje) en las instalaciones del laboratorio.
- Cambios en la temperatura ambiente.
- Contaminación armónica de la red.

La figura 4.10 nos describe gráficamente el comportamiento y la tendencia de los voltajes medidos en el diodo  $D1$ , que protege internamente al Mosfet de potencia con 8 LED's como carga experimental, aquí podremos apreciar lumínicamente la intensidad para cada diodo. Es palpable que la descripción grafica para las mediciones en  $DI$  realizadas con el Osciloscopio y para las hechas en  $V_o$  por el Multímetro Fluke, esto nos arroja un comportamiento polinomial ya que depende de variables y constantes ya determinadas para cada medición, siendo de suma importancia conocer el comportamiento matemático que se dará a conocer al final del *Capítulo*, pues este será el modelo que nos describirá para cualquier valor (prácticamente posible) de  $V_{cc}$  correspondiéndole un valor de tensión de salida  $V_{out}$  y  $V_{pp}$  en  $DI$ , siendo  $V_{out}$  y  $V_{pp}$  en  $DI$  las variable dependientes y  $V_{cc}$  la variable independiente.

Lo que respecta a la gráfica de la figura 4.11 es una de la información más determinante pues nos muestra el comportamiento de la eficiencia de F.C.E.I. bajo las condiciones de eléctricas de la tabla de la figura 4.9, siendo este un punto clave pues aquí nos damos cuentas de cuanta energía se aprovecha y cuanta se disipa en el medio para establecer un equilibrio energético. Los valores prácticos más significativos oscilan de entre los 2 a los 10 VCD, siendo estos valores de tensión comerciales, esto es de mucho beneficio pues al ser comerciales podemos desarrollar con más seguridad dispositivos de este tipo; por otra parte como en todo circuito eléctrico el calor es un factor de pérdidas a veces muy severo, que nos evita la conversión de energía y desarrollar una eficiencia de del 100% teóricamente. En la figura 4.12 se muestra una toma termográfica revelando el calor así como su temperatura distribuida en toda la superficie del F.C.E.I., desde la etapa de control hasta la de potencia siendo esta la que más pérdidas tiene. Las señales inyectadas y obtenidas en el F.C.E.I. son muy interesantes pues nos muestran gráficamente el comportamiento eléctrico en cada etapa en las que se analizó el flujo de energía, tales señales fueron captadas con un osciloscopio ya mencionado anteriormente; arrojando datos importantes que nos revelan las condiciones en las que se encuentra cada elemento que integra nuestro dispositivo.

Tales señales las podemos observar en la figura 4.13 ésta gráfica muestra las señales en la etapa de control  $PWM$  y la tensión en  $DI$ , indicando el momento en el que el interruptor



abre e interrumpe el flujo de corriente  $I_{out}$ , y el momento en el que cierra interrumpiendo el flujo en la corriente de salida  $I_{out}$  y creando un diferencia de potencial en  $DI$ .

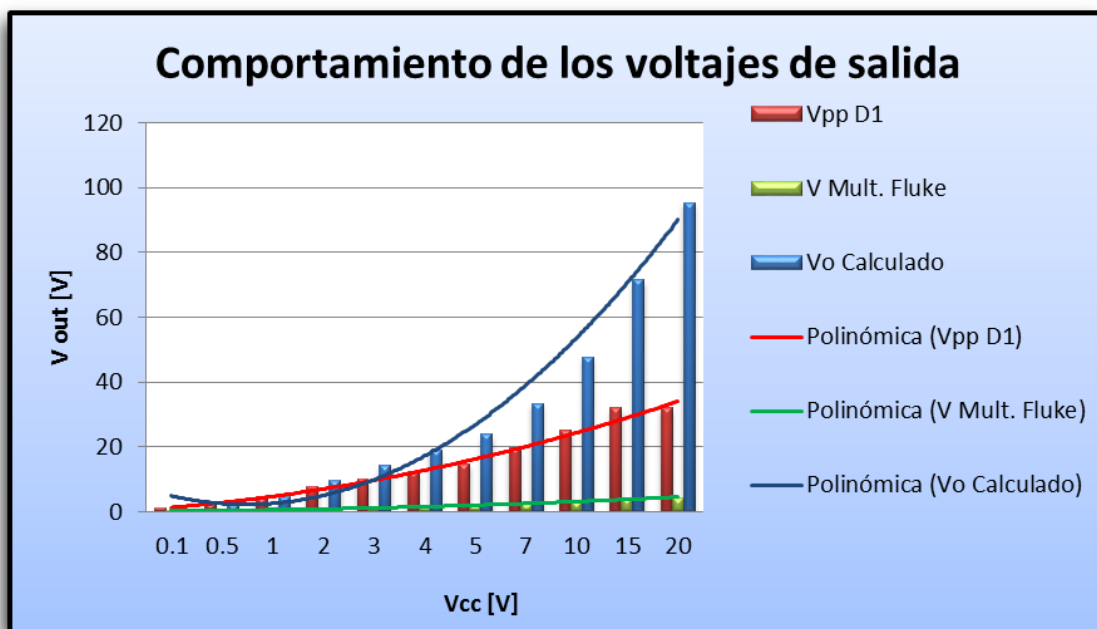


Figura 4.10 Gráfica de las tendencias de los voltajes de salida obtenidos del *F.C.E.I.*; ver ecuación (4.1) y (4.2)

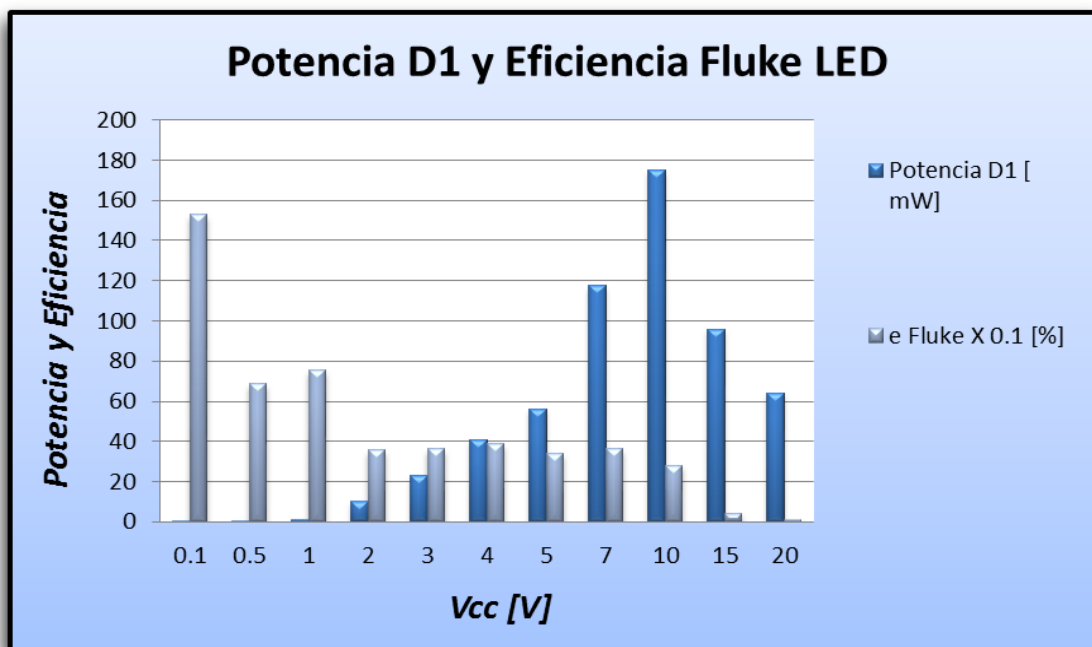


Figura 4.11 Gráfica de Eficiencia y Potencia  $DI$  para diferentes valores de  $V_{cc}$ ; ver ecuación (4.3) y (4.4)

Con las pérdidas es prácticamente inalcanzable una eficiencia del 100%, debido a las características constructivas, físicas, eléctricas de los materiales empleados para todos los dispositivos eléctricos, electrónicos, hidráulicos, térmicos, entre otros.

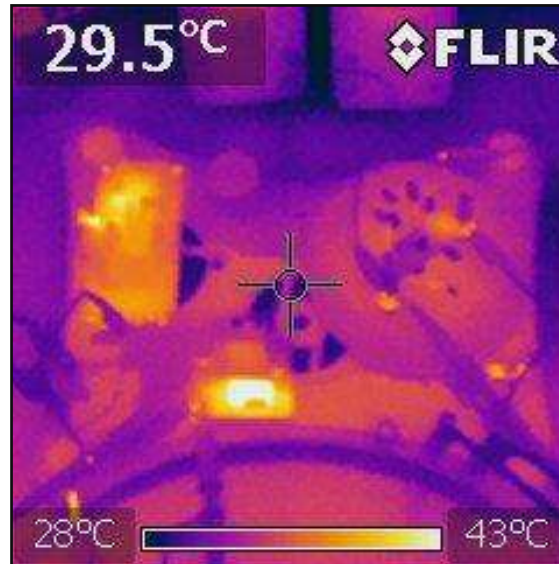


Figura 4.12 Toma termográfica del F.C.E.I. en pleno Funcionamiento LED's para  $L_2$

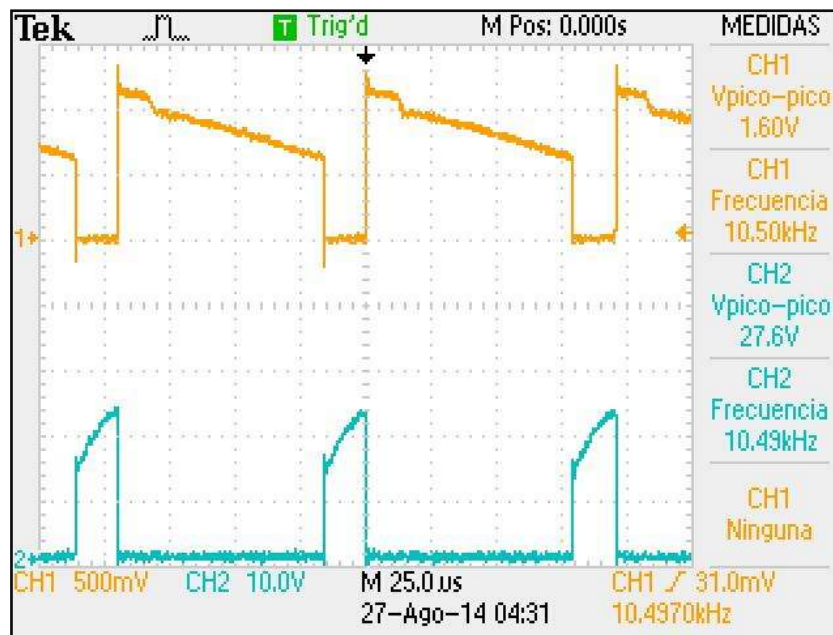


Figura 4.13 Señales de control y potencia por el osciloscopio para un  $V_{cc}=4$  V, teniendo:  
 Canal 1 CH1= Voltaje PWM      Canal 2 CH2= Voltaje en el diodo  $D1$

Las señales mostradas en el Canal 1 *CH1* son creadas por el driver de control PWM, que respecta a la etapa de control gobernando así tanto en frecuencia de conmutación  $f_c = 10 \text{ KHz}$  como en el ciclo de trabajo  $D = 0.84$ , la mostrada en el Canal 2 *CH2* provenientes del diodo *DI* indicando el comportamiento de la diferencia de potencia eléctrica en terminales, y la bobina primaria siendo alimentado por un  $V_{CC} = 4 \text{ V}$ .

Lo que respecta al inducido es aún más interesante en escancia, pues son las señales que se aprovechan de los cambios de corriente en el inductor primario, las señales son mostradas en la figura 4.14 en tiempo real y absorbidas por las carga con LED's.

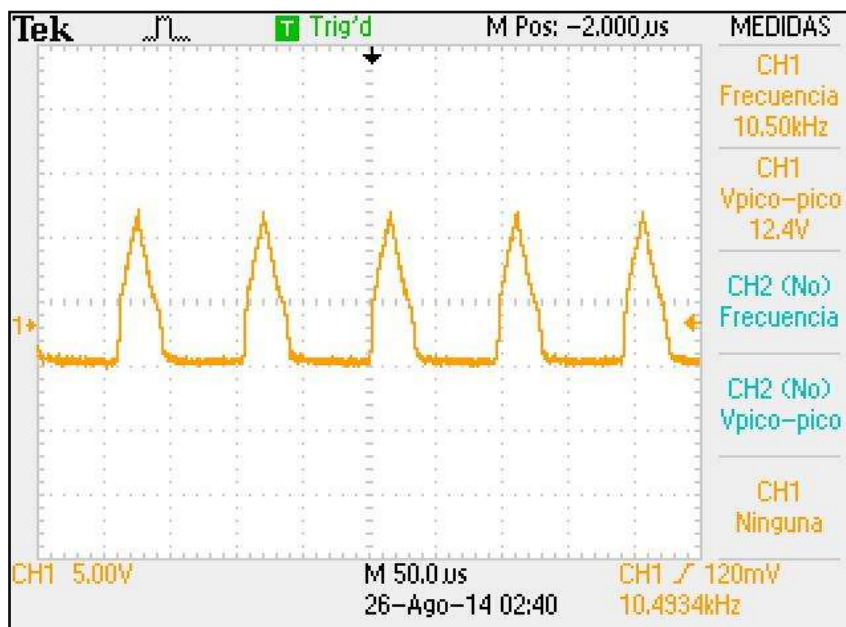


Figura 4.14 Gráfica del voltaje inducido en  $L_2$

El circuito que aprovecha esta energía es un arreglo de LED's en paralelo con las características mencionadas, es muy notables observar que las señales obtenidas son señales pulsantes en el tiempo resultado de los cambios en el flujo de corriente por  $L_1$  lográndose así la inducción en  $L_2$  y alimentar las cargas colocadas en la bobina remota.

Alternativamente se utilizó fibra óptica mostrada en la figura 4.15 con el fin de demostrar lo práctico que fuese este sistema para la iluminación con fibra óptica, siendo esta una forma versátil de manipular la iluminación proveniente de LED's conectados a una bobina inducida.



Figura 4.15 El dispositivo F.C.E.I. para iluminación con fibra óptica

El dispositivo *F.C.E.I.* trabajando con el control *PWM* y una fuente de poder que suministra el  $V_{CC}$  y finalmente colocar los LED's a la misma diferencia de potencial eléctrico de terminales de  $L_2$  mostrada en la figura 4.16 nos ilustra la practicidad en estas condiciones para la iluminación con cargas tipo LED, y en la figura 4.17 una vista más aproximada en la bobina remota  $L_2$ .



Figura 4.16 Bobina  $L_2$  inducida alimentando diodos LED útiles en iluminación

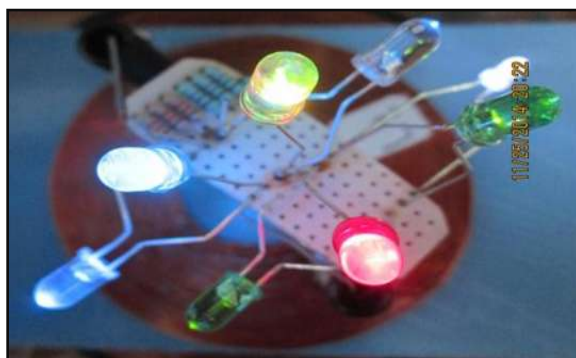


Figura 4.17 Vista más próxima para iluminación tipo LED

#### 4.4 Mediciones del inductor primario $L_1$ induciendo a la bobina secundaria $L_2$ experimentando una carga con una toma USB alimentando un dispositivo móvil.

Al igual que en la prueba anterior, en esta prueba se llevaron a cabo mediciones que nos llevaran a tener resultados más sólidos; conservando el mismo transmisor y variables como ciclo de trabajo  $D$ , frecuencia de conmutación  $f_c$ , como se puede apreciar en el circuito de la figura 4.18 en la que se representan los elementos y módulos que integran dicha prueba realizada en el laboratorio.

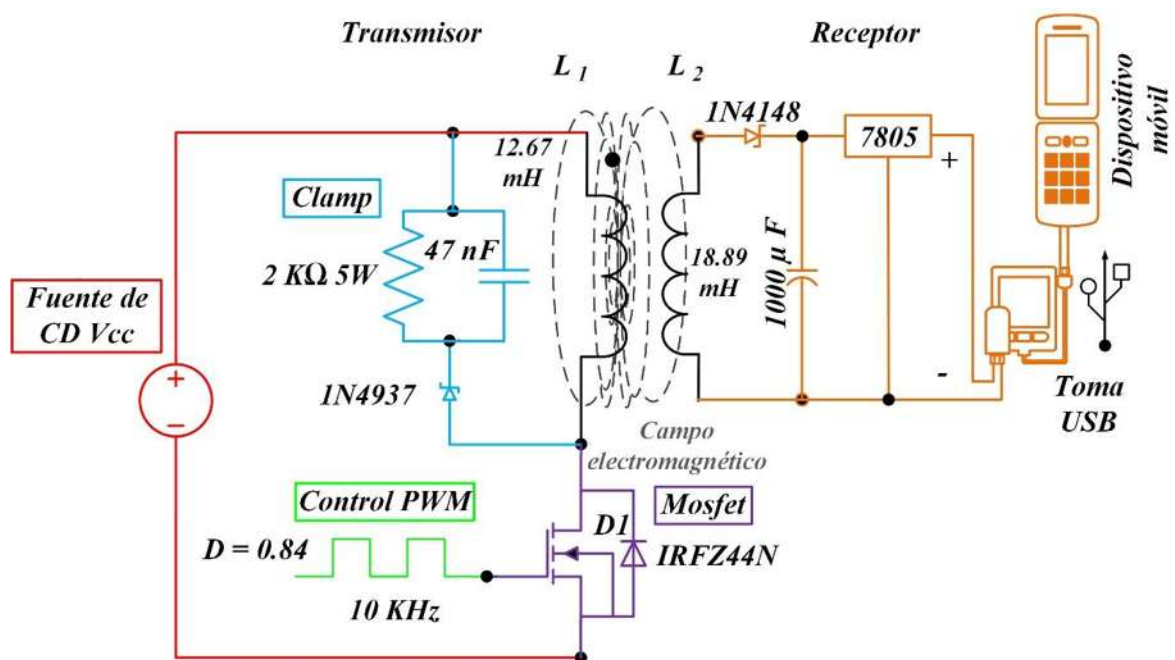


Figura 4.18 Circuito electrónico Transmisor-Receptor con un dispositivo móvil como carga

Mencionando lo anterior, ahora se hará para un dispositivo móvil utilizando  $L_2$  como bobina remota como se muestra en la figura 3.16 en la que se alimenta dicho dispositivo, tomando las mismas lecturas en magnitudes de las variables de control y dependientes de otras magnitudes como es el caso de la eficiencia  $e$ ; datos mostrados en la tabla 4.2 .

Tabla 4.2 Tabla de valores obtenidos con un dispositivo móvil como carga

Vcc	I in	I out	Vpp Osciloscopio D1	Vo Mul. Fluke L2	Vo Calculado como Flayback	Potencia D1 Osciloscopio	e Fluke
[V]	[mA]	[mA]	[V]	[V]	Vo=Vs [D/1-D] [N2/N1] [V]	[mW]	P=[ Pout/Pin ] 100X[0.1] [%]
6	47.69	3.39	16.4	4.77	28.63	55.596	56.511
7	55.7	3.81	16.3	4.9	33.4	62.103	47.881
8	63.5	5.33	16.8	5.12	38.18	89.544	53.719
9	70.4	7	19.4	6.39	42.95	135.8	70.596
10	77.4	9.29	20.2	6.22	47.72	187.658	74.656
11	86.5	11.38	19.4	6.39	52.5	220.772	<b>76.424</b>
12	105.3	12.51	20	7.1	57.27	250.2	70.292
13	130	13.25	22.6	7.9	62.04	299.45	61.937
14	165	13.52	22.8	8.19	66.81	308.256	47.934
15	193	14.07	23	8.33	71.59	323.61	40.484
18	297	15.84	23.4	8.51	85.9	370.656	25.214
20	384	16.21	24	8.57	95.45	389.04	18.088

Aquí las condiciones son diferentes ya que la carga es directamente una batería de iones de Litio (Li-ion), es decir una carga relativamente activa y que al mismo tiempo alimenta partes del dispositivo móvil; tales pantalla, LED's, procesador etc. los datos capturados fueron con una batería casi descargada totalmente con el fin de ser extremista y notar con más claridad los cambios en el comportamiento al inicio de la carga.

El comportamiento de los voltajes de salida  $V_{out}$  son resultados importantes pues nos muestran gráficamente la tendencia de las magnitudes para diferentes valores de la fuente  $V_{cc}$ , tal comportamiento se ilustra en las gráfica de la figura 4.19.

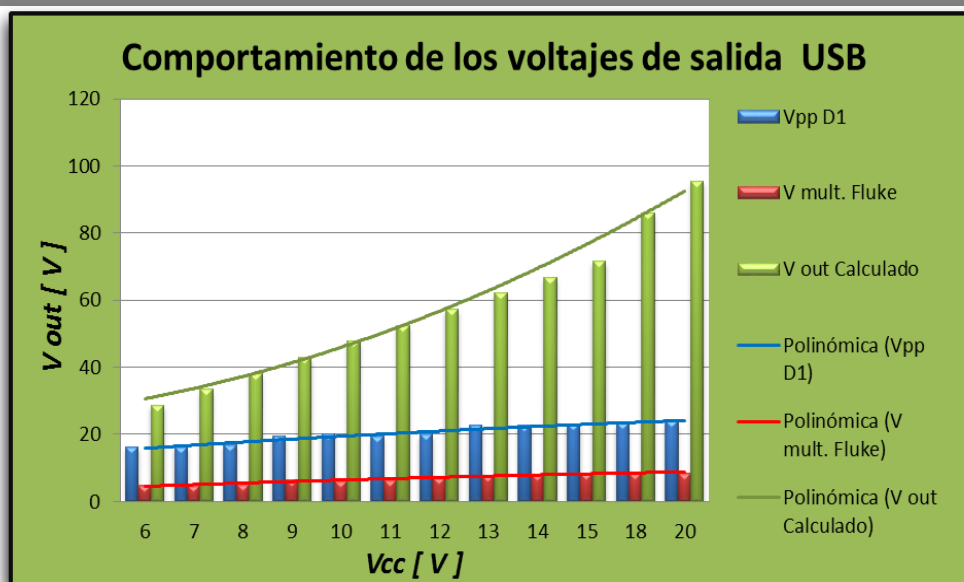


Figura 4.19 Tendencia de los valores de voltaje de salida del F.C.E.I.; ver ecuación (4.5) y (4.6)

Los valores de eficiencia son también datos muy importantes pues con estos nos damos cuenta de cuanta energía y con que magnitud se está aprovechando en la implementación del dispositivo; como lo podemos apreciar en la figura 4.20, marcando así las condiciones más apropiadas para operar y también llegar a una mejora técnica u optimización para en la implementación del proyecto de investigación, experimentando con variables como:  $V_{cc}$ ,  $f_c$ ,  $D$ ; así como un *Clamp* lo más adecuado posible para estas nuevas condiciones de operación funcional.

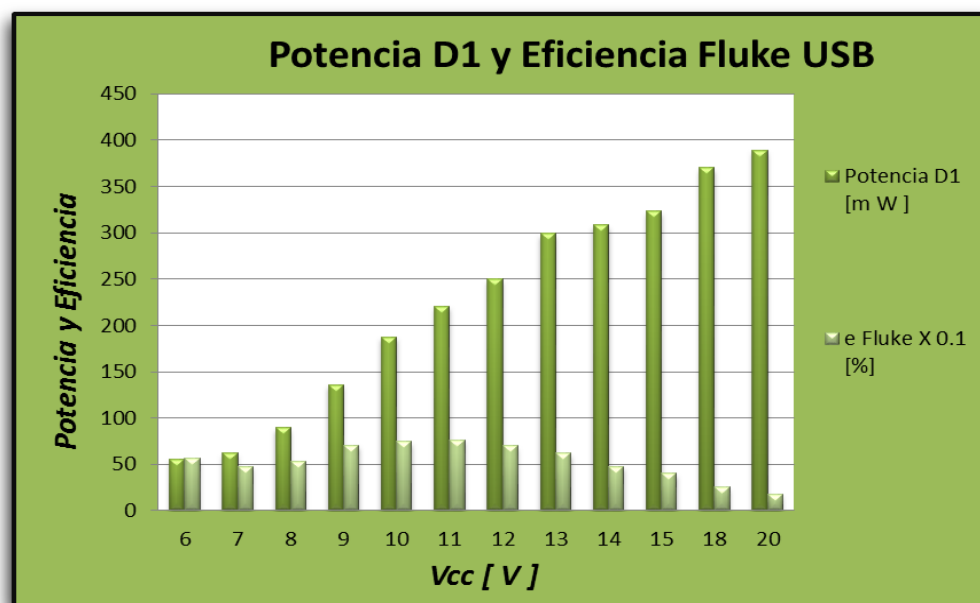


Figura 4.20 Eficiencia del F.C.E.I.; ver ecuación (4.7) y (4.8)

Con estos datos nos podemos dar cuenta que existe un punto en el que la eficiencia es máxima, este punto es clave para el desarrollo de la optimización y/o modificación del proyecto a fin de aumentar la eficiencia a los elementos utilizados y hasta sustituidos sin perder el concepto de transferencia de energía sin cables por medio de la inducción electromagnética; esto significa que nuestro dispositivo es totalmente flexible y manipulable. Teniendo en cuenta que la eficiencia no es un factor muy favorable nos dirigiremos a observar las pérdidas por calor mostradas en la figura 4.21, describiendo de manera gráfica la distribución y colocación de los elementos que integran el dispositivo en cuestión.

A groso modo de comparación entre la eficiencia según las lecturas del multímetro Fluke y la potencia disipada por el diodo de protección interna del *Mosfet* de potencia *DI*, es evidente que la tendencia inicial entre las lecturas en *DI* y la *eficiencia* son semejantes debido al aumento en *Vcc*; sin embargo existe un punto en el que la eficiencia es máxima y decae paulatinamente conforme la tensión de la fuente aumenta, existiendo un consumo de energía significativo por parte del *Clamp* de protección.

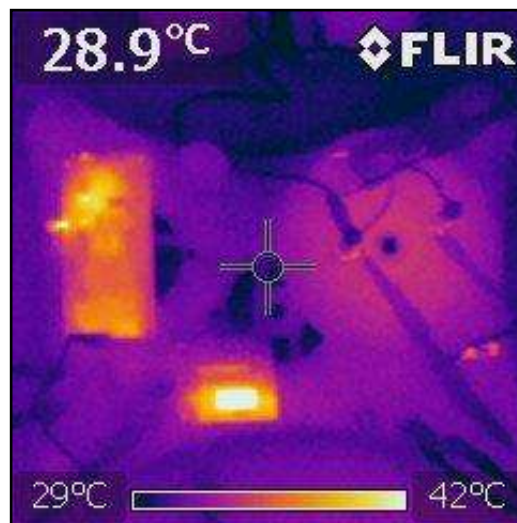


Figura 4.21 Toma termográfica del F.C.E.I. en pleno Funcionamiento *USB*

Es claro que las pérdidas térmicas son muy significativas pero necesarias para el funcionamiento, ya que de no existir nos llevara a eliminar la protección *Clamp* en la etapa de potencia poniendo así en riesgo al *Mosfet* y a la bobina  $L_1$  que hace posible la inducción en nuestras bobinas; tanto en primaria como en la bobina secundaria (también mencionada como bobina parlante).



El *Clamp* es una parte que absorbe la mayoría de la energía suministrada por la fuente de poder  $V_S$  (también llamada  $V_{cc}$ ), al observar la gráfica nos podemos dar cuenta que la temperatura superficial del elemento resistivo es de  $42\text{ }^{\circ}\text{C}$  en su punto más alto; Otro elemento que gráficamente nos denota disipación de calor es la bobina secundaria teniendo un temperatura aproximada de  $33\text{ }^{\circ}\text{C}$  menor a la del *Clamp*, pues al tener un valor de resistencia bajo e inductancia alto lo hace absorber y liberar energía de una forma significativa pero muy funcional, bajo estas características obtenemos las mínimas perdidas; demostrando la capacidad del F.C.E.I. para inducir una corriente eléctrica a lo largo de las espiras  $N$  en cada inductor  $L_n$  luego así cumpliendo el objetivo.

La monitorización de las variables tanto de control como dependientes fueron analizadas para tratar de comprender los fenómenos eléctricos a lo largo del flujo de la corriente eléctrica, las capturas gráficas por el *Osciloscopio* se muestran en la figura 4.22, con un  $V_{cc}=10\text{ V}$  siendo este el valor más alto en lo que a eficiencia se refiere.

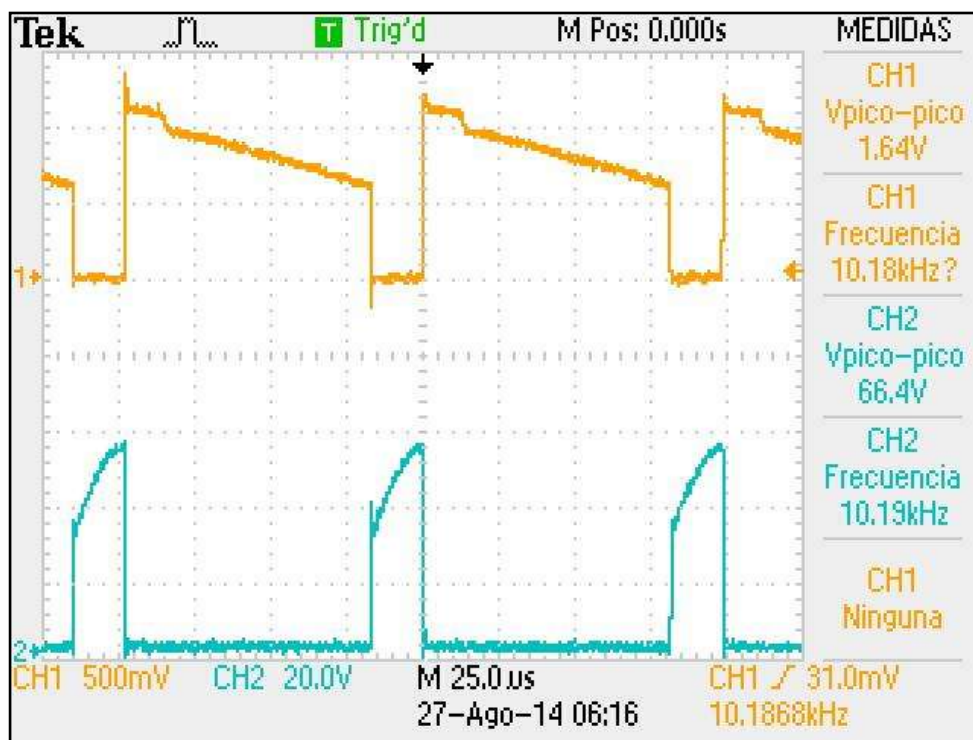


Figura 4.22 Señales de control y potencia por el osciloscopio para un  $V_{cc}=10\text{ V}$ , teniendo:  
 Canal 1 **CH1**= Voltaje PWM    Canal 2 **CH2**= Voltaje en el diodo **D1**

Las mediciones por el *Osciloscopio* que fue nuestro instrumento de monitoreo son muy claras marcando así las pautas en las que el *Mosfet* abre y cierra, pautas indicadas por el

control *PWM* en la compuerta, también designado la frecuencia de conmutación  $f_c$  el ciclo de trabajo  $D$  que no es más que el tiempo en que el interruptor está activo y en conducción.

La señales por el canal dos nos muestran el momento en el que  $D1$  está activo fluyendo por este una corriente y en fluctuante en  $L_1$  capaz de producir un voltaje en las terminales de este para inducirlo al inductor  $L_2$  que afectados por una relación de transformación  $N_2/N_1$ , producirá una diferencia de potencial eléctrico en terminales del inductor secundario  $L_2$  el valor del inducido o bobina parlante es muy importante también, así como las señales que fluyen a lo largo del conductor, las señales mostradas en la Figura 4.23 son las inyectadas para el acondicionamiento en la terminal *USB* que después alimentara un dispositivo móvil.

En este caso podemos observar dos sucesos importantes, una señal cuadrada con amortizaciones en la parte que no es activa totalmente; la linealidad en alto se debe al capacitor electrolítico  $C_2$  mostrado en la figura 3.21a) del *Capítulo 3* colocado a la entrada del acondicionamiento para la toma *USB* que funcionalmente mantiene la tensión a la salida del diodo rectificador  $D_3$  mostrado en la figura 3.21b) del *Capítulo 3* y a la entrada del regulador de voltaje mostrado en la figura 3.21c) del *Capítulo 3* y así mantener los 5 *VCD* que es la tensión nominal para todos los dispositivos móviles con una toma de este tipo.

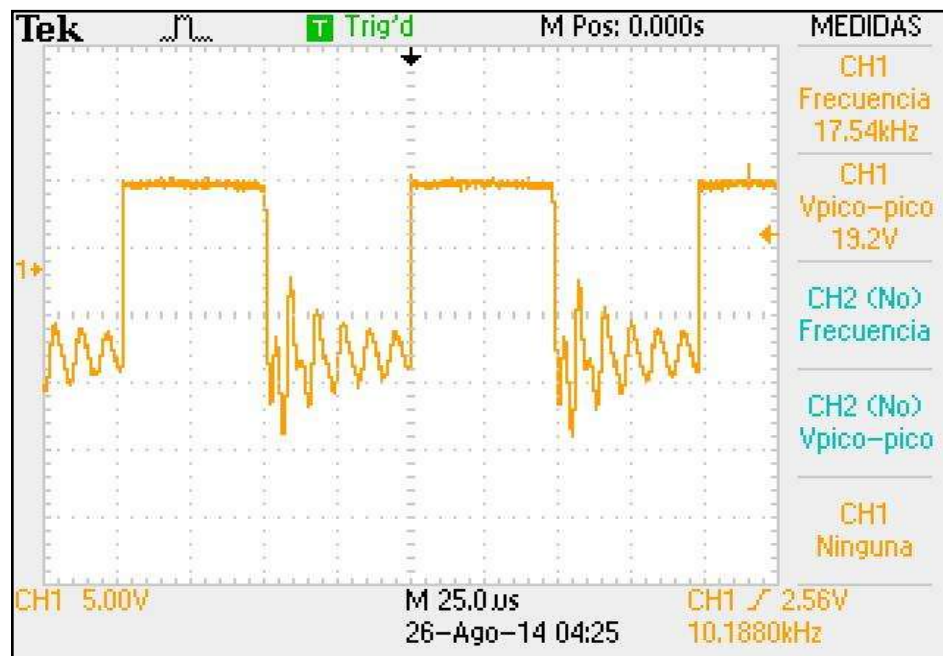


Figura 4.23 Señales de salida en la bobina secundaria para el acondicionamiento tipo *USB*

La amortizaciones son debidas a los cambios de bruscos en la corriente de salida que dependen en gran medida de las oscilaciones de la frecuencia creando ciertos armónicos no significativos para esta implementación, de ahí la importancia del filtrado, rectificación y regulación que hace el elemento construido y mostrado con anterioridad en la figura 3.22 del *Capítulo 3*.

Para esta prueba finalmente se muestra el dispositivo *F.C.E.I.* trabajando a plena carga alimentando un dispositivo móvil mediante el la adecuación mostrada en figura 4.24 y así suministrar de energía eléctrica a nuestro móvil conectado en la terminal *USB*.

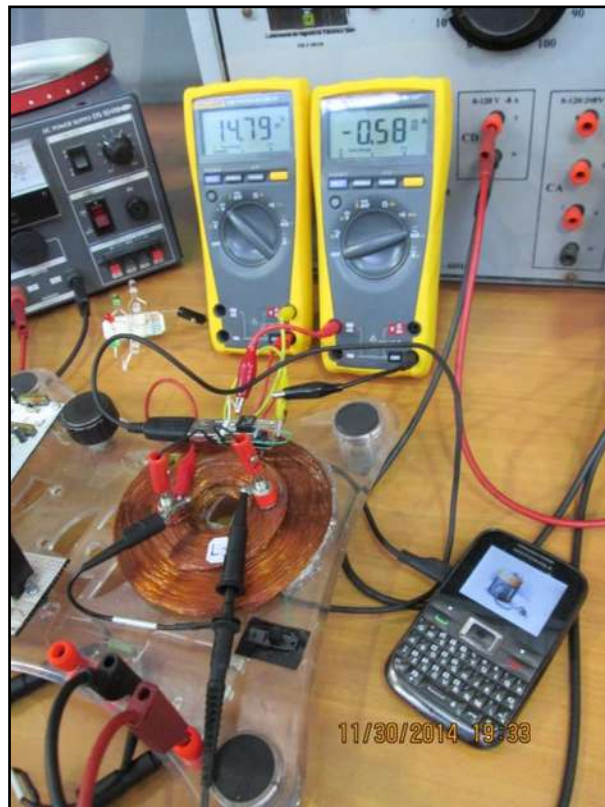


Figura 4.24 El dispositivo *F.C.E.I.* alimentando un dispositivo móvil

A estas alturas podemos asegurar la alimentación a un dispositivo móvil por medio de la inducción electromagnética utilizando una topología tipo flyback que aprovechando los cambios de estado sinusoidalmente del voltaje y corriente logra inducir la energía eléctrica en terminales de la bobina  $L_2$  receptora y alimentar por medio de un puerto *USB*.

#### 4.5 Mediciones del inductor primario $L_1$ induciendo a la bobina secundaria $L_3$ experimentando una carga con LED's

Para la tercer prueba sólo fue necesario cambiar el inductor  $L_2$  por  $L_3$ , esperando características diferentes pos tener un numero de vueltas  $N$  diferente; es decir mismas características cualitativas y diferentes cuantitativas, cualidades que dependieron del circuito mostrado en de la figura 4.25 .

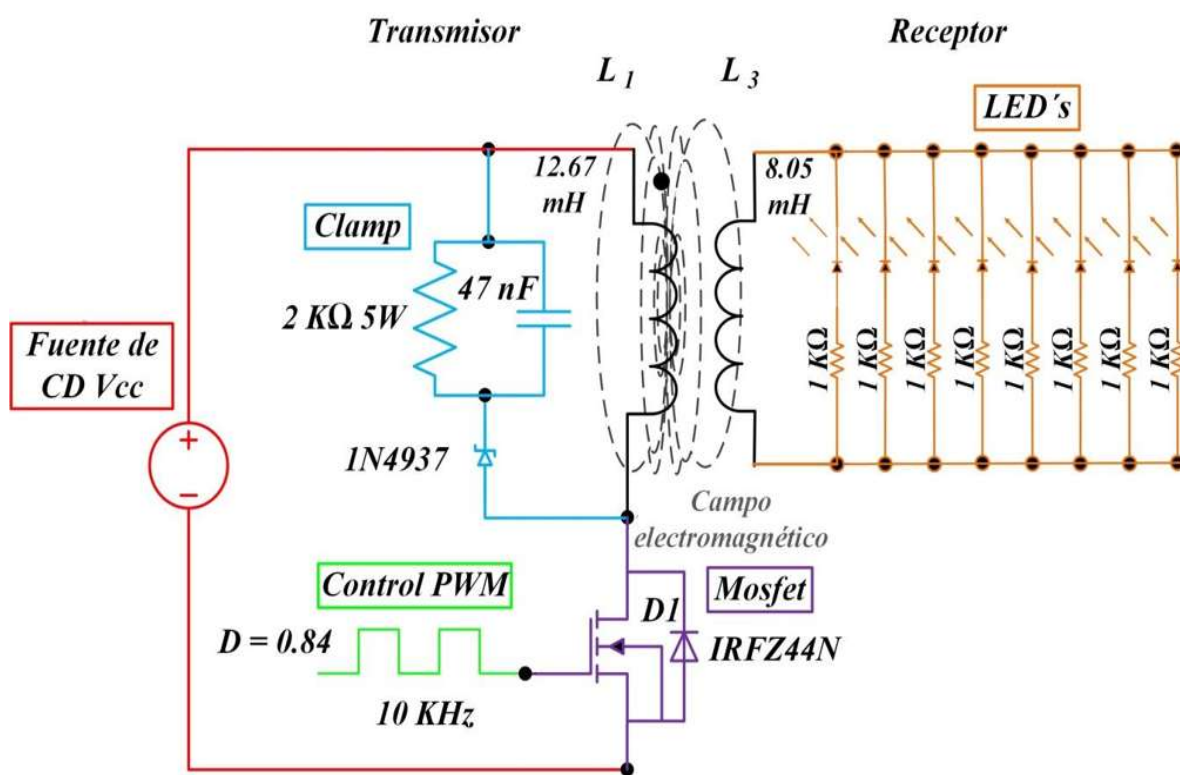


Figura 4.25 Circuito electrónico Transmisor-Receptor con una carga de LED's

Los 8 LED's se utilizaron sólo para efectos de carga ya que al operar a altas frecuencias los hace prácticos para esta prueba; la tabla 4.3 y gráficas de esta prueba pertenecen al circuito de la figura 4.25.

Cabe mencionar que en la construcción de los inductores parlantes  $L_n$  se utilizaron solo dos bobinas secundarias para el efecto de pruebas, ya que con éstas se obtuvieron resultados más significativos a lo largo de las mediciones, ya que estos LED's, mostrados en la figura 4.25 demostrarían más la eficacia del F.C.E.I. con las diferentes variables de control y potencia, así como predecir algunos resultados, mejorarlos para así tener conclusiones más concisas.

Las magnitudes de las variables implicadas se muestra en la tabla 4.3 demostrando resultados comparativamente importantes a efecto de conocer con más precisión las variables físicas en cada etapa funcional del F.C.E.I.

Tabla 4.3 Valores de  $L_3$  como inducido experimentando una carga de LED

<b>L3</b>							
<i>Constantes</i>							
<i>D= 0.82</i>							
<i>Fc= 10 Khz</i>							
Vcc	I in	I Out	Vpp Osciloscopio D1	Vo Mul. Fluke L3	Vo Calculado como Flyback	Potencia D1 Osciloscopio	e Fluke
[V]	[mA]	[mA]	[V]	[V]	Vo=Vs [D/1-D][N3/N1] [V]	[mW]	P=[ Pout/Pin ]100X[0.1] [%]
3	38	2	1.32	1.125	8.69	2.64	19.73684211
4	51	3	1.6	1.35	11.59	4.8	19.85294118
5	63	5	2.1	1.58	14.49	10.5	25.07936508
6	75	6	2.4	1.86	17.39	14.4	24.8
7	88	29	2.7	2.15	20.29	78.3	101.2175325
8	136	60	2.85	2.44	23.19	171	134.5588235
9	350	199	3.64	2.78	26.09	724.36	<b>175.6253968</b>
10	134	3	3.78	2.99	28.98	11.34	6.694029851
11	160	2	4.06	3.108	31.88	8.12	3.531818182
12	198	3	4.2	3.25	34.78	12.6	4.103535354
13	229	1	4	3.25	37.68	4	1.091703057
14	257	2	4	3.25	40.58	8	1.8065592
15	295	1	2.72	3.29	43.48	2.72	0.743502825
20	473	6	3	3.56		18	2.257928118

Para  $L_3$  se realizaron las mismas lecturas con las mismas variables con el fin de comparar resultados y asegurar la funcionalidad en todos los inductores construidos mostrados en la figura 3.20 del *Capítulo 3*; y ahora en particular para  $L_3$  alimentando un grupo de LED's como carga experimental.

Este caso los valores de voltajes de salida mostrados en la figura 4.26 son menos apreciables que el anterior y es de esperarse pues la relación de transformación es distinta y con un comportamiento más lineal lo que nos refleja que es menos sensible a los cambios de la fuente de CD, el número de vueltas  $N$  en la bobina  $L_3$  es menor, lo que significa que nuestro acople magnético nos habla de un transformador reductor con núcleo de aire, teniendo el medio ambiente como espacio de inmersión del campo electromagnético.

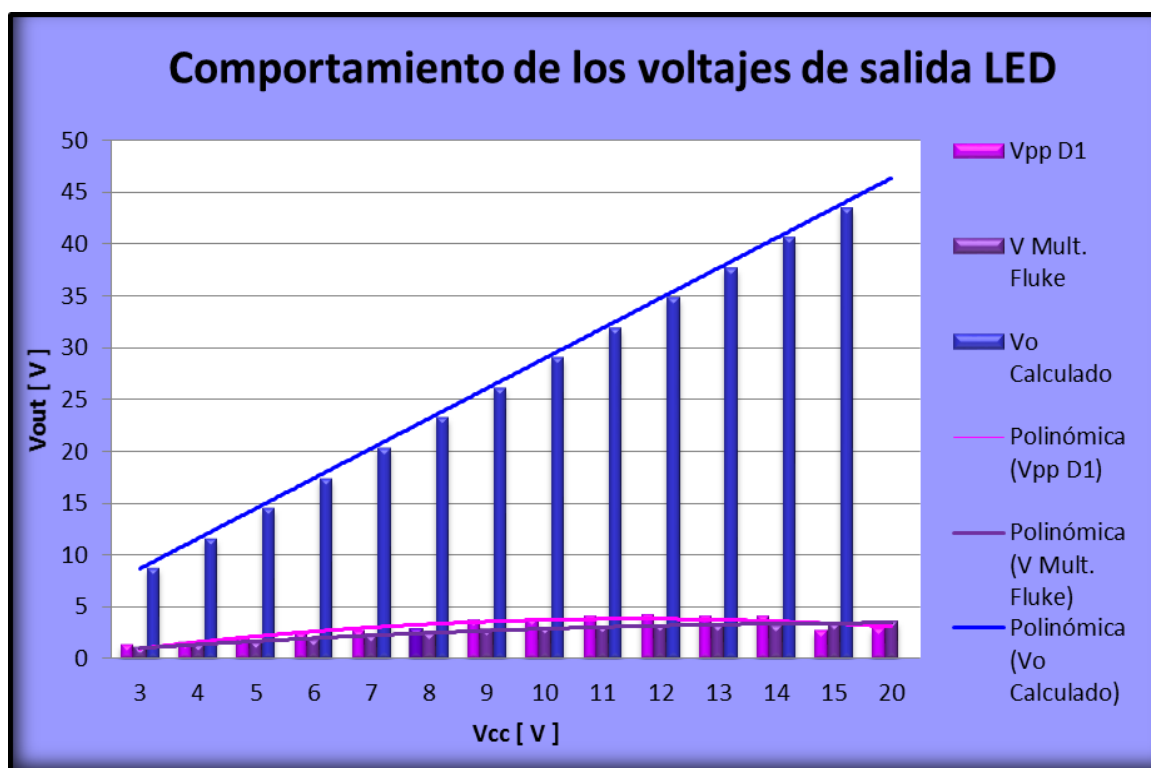


Figura 4.26 Tendencia de los voltaje de salida del *F.C.E.I.*; ver ecuación (3.9) y (3.10)

Los cambios en los diodos emisores de luz, luminiscentes fueron poco perceptibles, pues el consumo de corriente  $I_{out}$  para esta carga fue la necesaria para su funcionamiento; sin embargo, no por eso se dejarían a un lado, la monitorización de las señales se llevaron a cabo.

A decir de la eficiencia que hemos mencionado es un factor importante pero sin problema para llevar a cabo la transferencia de energía de forma inalámbrica; aquí también fue necesaria la adquisición de datos gráficos, mostrados en la figura 4.27 proporcionado para cada valor de  $V_{cc}$  su respectiva eficiencia así como la tendencia al incrementar el voltaje de la fuente de poder que suministra la energía del *F.C.E.I.*

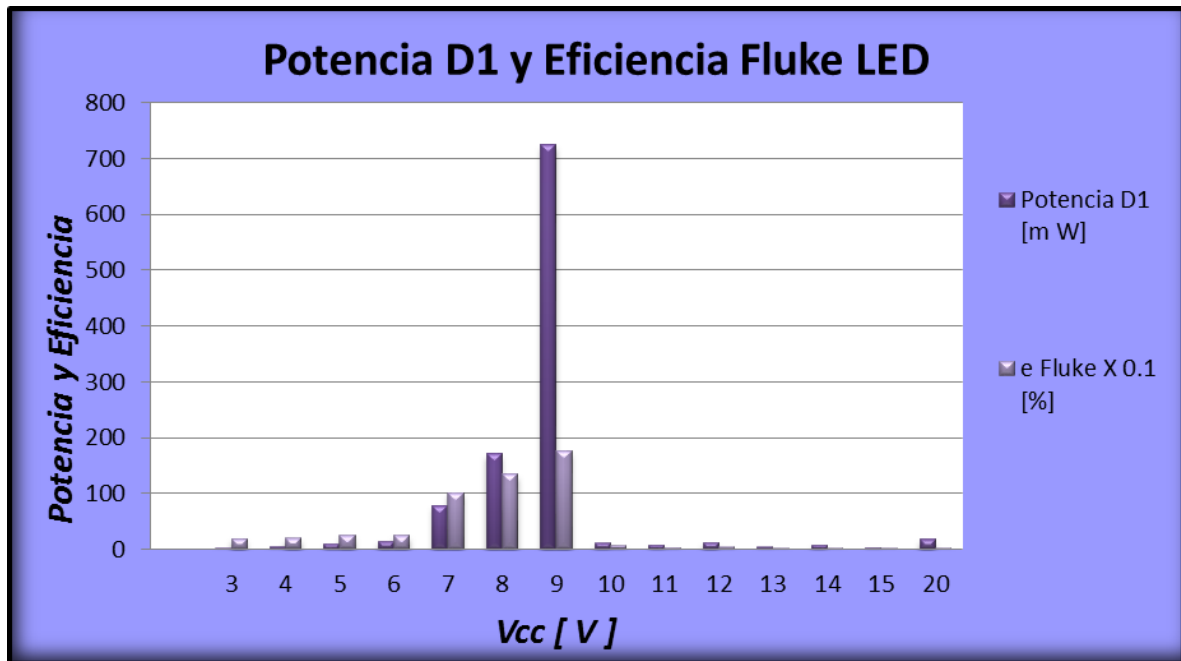


Figura 4.27 Eficiencia del F.C.E.I.; *ver ecuación (3.11) y (3.12)*

Aquí es donde bajo estas circunstancias físicas es apreciable el punto donde la eficiencia es máxima, esto es cuando  $V_{cc}= 9 V$ , en cuestiones de mejoramiento del dispositivo este punto de operación es el ideal para trabajar bajo esas condiciones eléctricas; es decir un  $D = 0.83$  y  $f_c = 10 KHz$ ,  $V_{cc}= 9 V$ , aseguramos los respectivos resultados.

Un aspecto muy importante es también que es totalmente flexible para efectos de modificación de variables y componentes físicos que no hagan perder la esencia del proyecto de investigación.

Con esto aseguramos el correcto funcionamiento del proyecto a lo largo de su operación, también pudieran surgir otras variables, inquietudes que favorezcan la mejora de un dispositivo de este tipo y así satisfacer necesidades futuras y porque no hasta alimentar cargas con un grado de consumo mucho mayor, haciéndolo cada vez más universal,

versátil, práctico, pero sobre todo muy funcional para alimentar sistemas que demanden el consumo eléctrico como la energía necesaria para realizar distintas tareas en un a vida cotidiana o industrial .

Para apreciar con más claridad las pérdidas por calor fue necesaria también la toma de una imagen termográfica mostrada en la Figura 4.28, que indica la distribución del calor a lo largo del F.C.E.I.

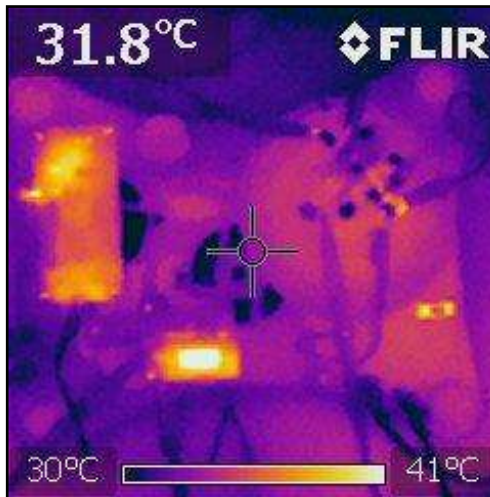


Figura 4.28 Toma termográfica del *F.C.E.I.* en pleno Funcionamiento LED's para  $L_3$

En la Figura 4.28 podemos apreciar el resultado del *Clamp*, y el que térmicamente consume un gran parte de energía de la fuente de alimentación, siendo la resistencia  $R_C$  del mismos *Clamp* la que disipa la mayoría de calor llegando a una temperatura aproximada a los  $41\text{ }^\circ\text{C}$ ; y una temperatura promedio a los  $31.8\text{ }^\circ\text{C}$  en todo el dispositivo como lo marca la cámara térmica; cabe mencionar que nuestro *Driver de control* también se encuentra ligeramente caluroso, pues las oscilaciones que generan el *PWM* inyectadas al terminal Gate o compuerta del *Mosfet*, se traducen a vibraciones oscilatorias a muy altas frecuencias ( $10\text{ KHz}$ ) que producirán calor en la superficie de la placa de nuestro sistema de control, la temperatura está en un rango de los  $34$  a los  $37\text{ }^\circ\text{C}$  significa que el calor no es homogéneo a lo largo y ancho de la placa ni para cada elemento que conforma el dispositivo de control *PWM*.

Para los voltajes tanto de alimentación de nuestro *PWM* como los de alimentación provenientes de la fuente de voltaje de CD, fueron medidas sus magnitudes con el fin de compararlas con los de salida, los voltajes de en nuestro dispositivo y precisamente los de



$L_1$  sus magnitudes se pueden apreciar en la tabla 4.3, así que tomamos un valor de  $V_{cc}$  para analizar su respuesta, mostrada en la figura 4.29 captada por el osciloscopio.

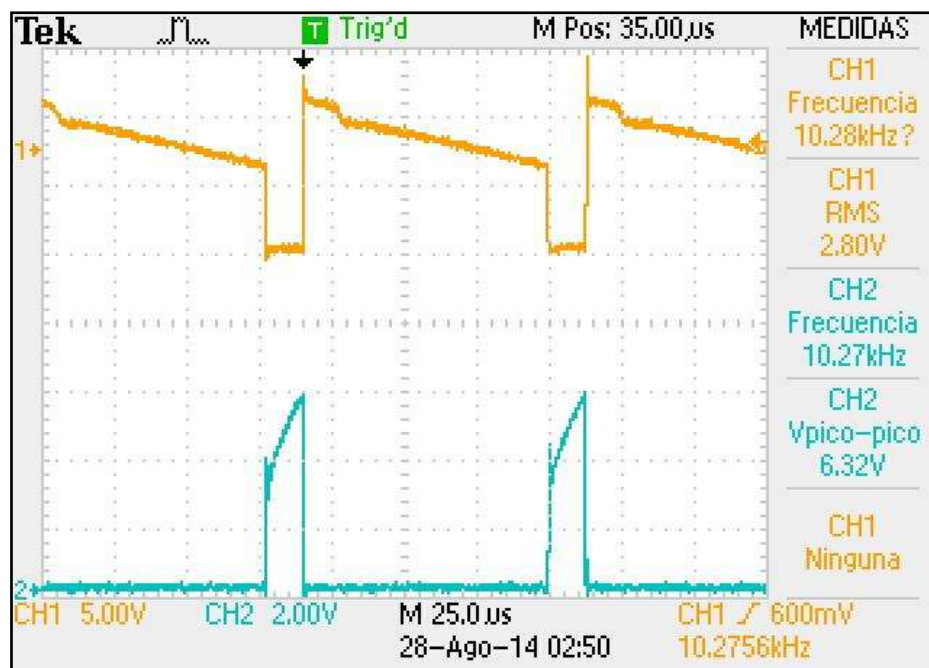


Figura 4.29 Señales de control y potencia por el osciloscopio para un  $V_{cc}=9$  V, teniendo:  
 Canal 1 CH1= Voltaje PWM      Canal 2 CH2= Voltaje en el Diodo D1

La frecuencia de conmutación es igual a la frecuencia del inductor primario, es decir;  $f_c = f$  en  $L_1$ , el voltaje *PWM* se mantiene constante en todas las mediciones efectuadas, teniendo una ligera caída al final del tiempo en alto del  $D$  no por eso es un impedimento para que funciones el *F.C.E.I.*, debido a los cambios en la corriente a través de  $L_1$  generamos una diferencia de potencial eléctrico de aproximadamente  $6.3$  V suficientes para inducir en el inductor secundario  $L_3$  y alimentar pequeñas cargas como *LED's* para efectos de iluminación con pocas pérdidas.

Los voltajes de salida o que es lo mismo los voltajes, los voltajes en  $L_3$  se tomaron mucho en cuenta para conocer la eficiencia que se mencionó anteriormente, analizando los resultados anteriores y llevándonos al punto donde la eficiencia era máxima bajo las condiciones de estipuladas, donde  $V_{cc} = 9$  VCD logrando una eficiencia casi del 17.5 % obtuvimos una tensión de salida mostrada en la figura 4.30 con la misma frecuencia de conmutación  $f_c = 10$  KHz.

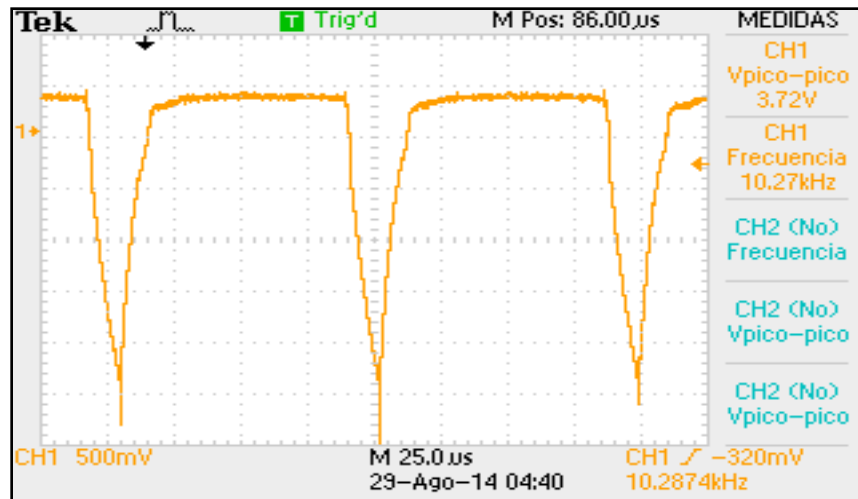


Figura 4.30 Gráfica del voltaje inducido en  $L_3$

Los voltajes de salida son pulsantes igual que los obtenidos en el inductor  $L_2$ , puesto que una característica de la inducción electromagnética donde la tensión de salida  $V_{pp} = 3.72$ , voltaje suficiente para encender un grupo de  $LED$ 's, y hacer fluir una pequeña corriente  $I_{out}$  por ellos, cabe mencionar que el periodo de conmutación entre cresta y cresta es  $\tau = 0.1 \text{ ms}$ , periodo en el que se activa y se desactiva el *Mosfet* de potencia IRFZ44N figura 3.11. Para demostrar el funcionamiento del dispositivo con  $LED$ 's como carga se sometió a inducir  $L_1$  con  $L_3$  y colocar las cargas en terminales de la bobina secundaria, el resultado fue el siguiente mostrado en la figura 4.31, ya teniendo un voltaje en terminales del inducido seguramente activaremos los  $LED$ 's.

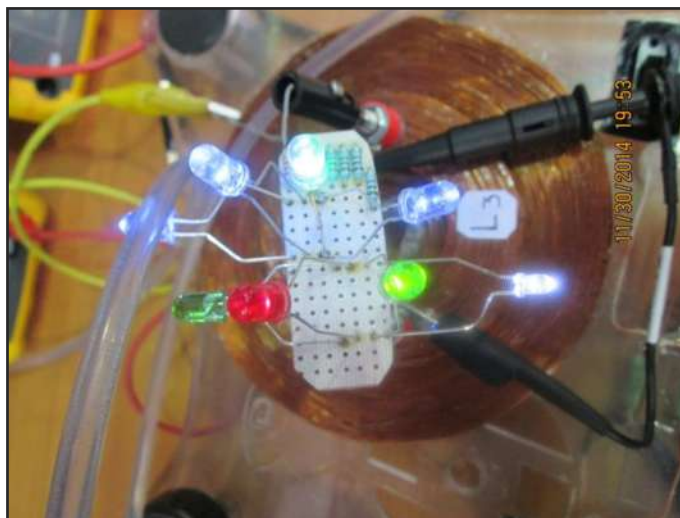


Figura 4.31 Iluminación con  $LED$ 's con  $L_3$  como inducido

Los LED's responden encendiendo cada uno, es importante recalcar que nuestro dispositivo *F.C.E.I.* podrá operar para aumentar o reducir el voltaje de salida, eso lo determinará la relación de transformación de  $L_1$  con  $L_n$ , no necesariamente el inducido tendrá que estar al centro de  $L_1$  que sería lo ideal pues se aprovecharía la mayoría del campo electromagnético, podría estar ligeramente a un extremo sin presentar dificultades de operación. Para hacer al dispositivo más universal y practico utilizamos *Fibra óptica* también para  $L_3$  Mostrado en la figura 4.32, pues al ser la fibra óptica un recurso muy efectivo en la conducción de luz es un material ideal para la iluminación en medios donde sea difícil llevar la iluminación convencionalmente y esta puede ser una alternativa.



Figura 4.32 Iluminación con fibra Óptica con  $L_3$  como inducido

El montaje final de nuestro dispositivo F.C.E.I. como fuente de iluminación inducida bajo las condiciones anteriormente mencionadas se muestra en la Figura 4.33.



Figura 4.33 Dispositivo F.C.E.I. montado en el laboratorio con  $L_3$  como inducido

#### 4.6 Mediciones del inductor primario $L_1$ induciendo a la bobina secundaria $L_3$ experimentando una carga con una toma USB alimentando un dispositivo móvil

En lo que respecta al inductor  $L_3$  con la adaptación de tipo USB mostrada en la figura 3.32 fue conectada un carga para este tipo de salida, no obstante tomando en cuenta los mismos parámetros tales como:  $V_{cc}$ ,  $V_o$ ,  $I_{in}$ ,  $I_o$ ,  $V_{pp}$   $DI$  y la eficiencia  $e$  por parte de las mediciones hechas por el *multímetro Fluke*, *Voltaje Calculado*, *eficiencia Fluke* y las constantes  $f_c=10\text{ KHz}$  y  $D=0.84$  medidos en el circuito de la figura 4.34, y tomando las lecturas mostradas en la tabla 4.4.

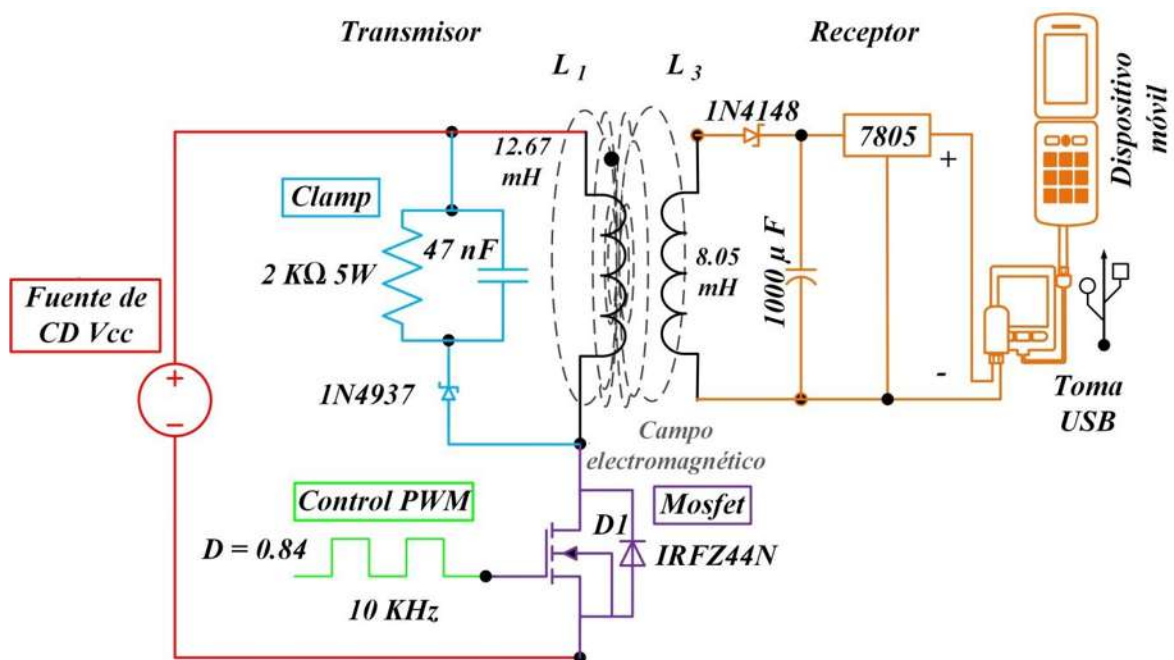


Figura 4.34 Circuito electrónico Transmisor-Receptor con un dispositivo móvil como carga

La única diferencia para este cuarto circuito fue el cambio de inductor secundario, como se hizo en las pruebas anteriores; es decir cambiar  $L_2$  por  $L_3$  con fines comparativos en los que esperamos un decremento en la tensión de salida de  $L_3$  ya que la relación de transformación es aún más pequeña que en la prueba con  $L_2$  como inducido.

Tabla 4.4 valores obtenidos con  $L_3$  remoto con dispositivo móvil como carga

<b>Vcc</b>	<b>I in</b>	<b>I Out</b>	<b>Vpp Osciloscopio D1</b>	<b>Vo Mul. Fluke L3</b>	<b>Vo Calculado como Flayback Vo=Vs [D/1- D][N2/N1]</b>	<b>Potencia D1 Osciloscopio</b>	<b>e Fluke P= [ Pout/Pin ]100X[0.1]</b>
[V]	[mA]	[mA]	[V]	[V]	[V]	[mW]	%
3	35	0.13	2.5	1.4	8.69	0.325	1.733
4	46	0.5	2.88	1.74	11.59	1.44	4.728
5	59	1.03	3.58	2.18	14.49	3.6874	7.611
6	70	2.46	4.14	2.56	17.39	10.1844	14.994
7	95	4.31	4.18	2.9	20.29	18.0158	18.795
8	177	6.46	4.2	3.3	23.19	27.132	15.055
9	212	9.04	6.8	3.7	26.09	61.472	17.530
10	132	11.23	6.26	3.9	28.98	70.2998	<b>33.179</b>
11	152	12.85	6.76	4	33.88	86.866	30.741
12	194	13.9	5.9	4.14	34.78	82.01	24.719
13	223	14.68	6	4.21	37.68	88.08	21.318
14	258	15.68	6.4	4.31	40.58	100.352	18.710
15	297	16.02	6.12	4.39	43.48	98.0424	15.786
16	326	16.46	6.56	4.46	46.38	107.9776	14.074
18	398	17.16	6.4	4.56	52.18	109.824	10.922
20	458	17.79	6.36	4.63	57.97	113.1444	8.99
22	518	18.25	6.56	4.65	63.77	119.72	7.44
24	573	18.65	6.56	4.7	69.57	122.344	6.37
26	618	19.99	6.68	4.77	75.37	133.5332	5.93
28	669	19.37	6.76	4.82	81.17	130.9412	4.98
30	707	19.55	7	4.89	86.96	136.85	4.50

Todos estos datos son de mucha importancia ya que nos dan un panorama más amplio del comportamiento de nuestras variables así como estimar algunos resultados más que no hayan sido obtenidos siempre y cuando sean posibles dentro del marco de construcción y diseño. El análisis gráfico de las tensiones de salida lo podemos llevar a cabo con la gráfica de la figura 4.35, en la que apreciamos las tendencias y los cambios paulatinos a diferentes Voltajes de alimentación  $V_{cc}$ .

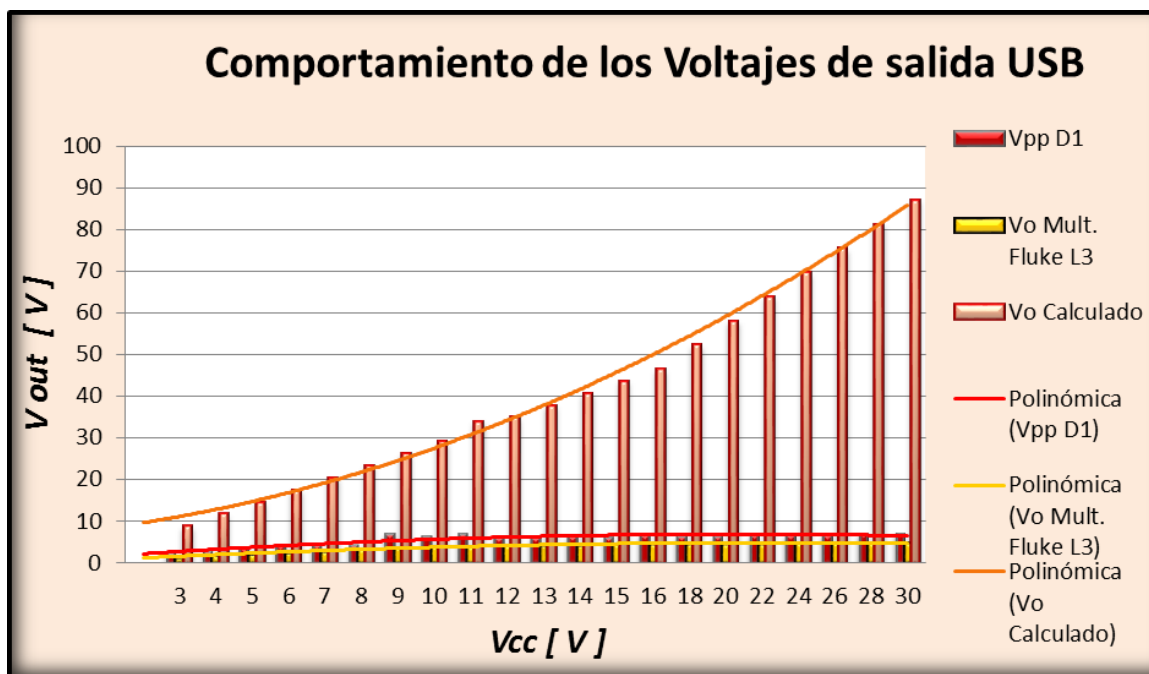


Figura 4.35 Tendencias de los voltajes de salida  $V_o$  del *F.C.E.I.*; ver ecuación (3.13) y (3.14)

En general todos los voltajes de salida son polinomios, es decir crecen a una razón polinomial independiente; esto es que cada voltaje de salida está gobernada por su propia ecuación que serán mostradas al final de este *Capítulo*, con esto comparamos que los valores teóricos y los prácticos considerando nuestra parte de potencia como un convertidor tipo flyback son diferentes en magnitud; sin embargo la forma tendencia ascendente y similar, con esto podemos decir también que aún falta por mejorar las condiciones del *F.C.E.I.* para poder afirmar que se comportara plenamente como un convertidor de este tipo; cabe mencionar que se utilizó y comparo con esta topología al ser la más parecida con la topología del dispositivo propuesto detallado en el *Capítulo 3*.

Otra característica importante es la eficiencia, ya que esta determinara cuanta energía es aprovechada y enviada hasta nuestro dispositivo móvil, dicha eficiencia se muestra en la Figura 4.36, donde se compara también con la potencia disipada por el diodo *DI* del *Mosfet* de potencia.

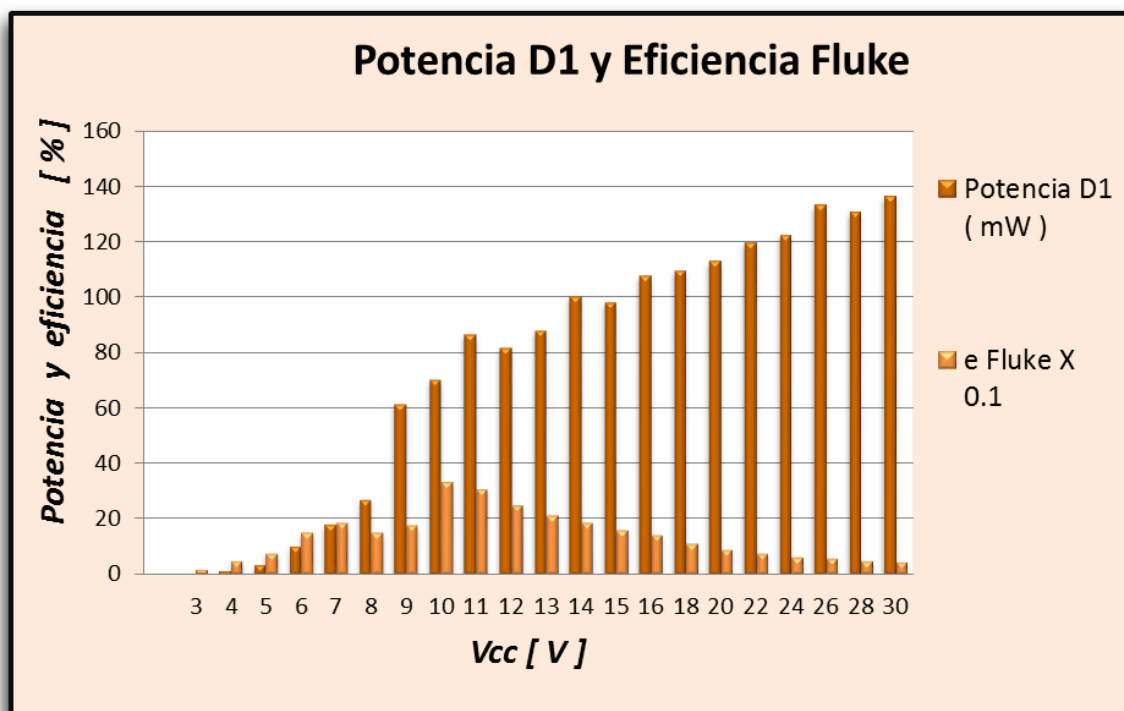


Figura 4.36 Eficiencia del F.C.E.I. con  $L_3$  remota; *ver ecuación (4.15) y (4.16)*

Estos quizá son los resultados más extremos medidos bajo estas condiciones, y es de esperarse pues es resultado de la relación e transformación  $N_3/N_1$ , pues es menor repercutiendo a la potencia de salida y consecuentemente la eficiencia, un hecho palpables es que aunque exista un punto en el que la eficiencia es máxima la potencia del diodo **DI** aumenta casi linealmente afectando su propia eficiencia, así como lo afectan otros componente como el *Clamp* y la resistencia interna  $R_L$  de cada bobina implicada, bobina primario y secundaria o lo que es lo mismo para este caso  $L_1$  y  $L_3$ .

Otra forma de comprobar las pérdidas que generalmente son por calor es haciendo una toma termográfica, la cual nos mostrara las zonas en las que se distribuye el calor, como se muestra en la Figura 4.37; y no solo eso sino también el valor térmico, diferencias de calor a lo largo del *F.C.E.I.*

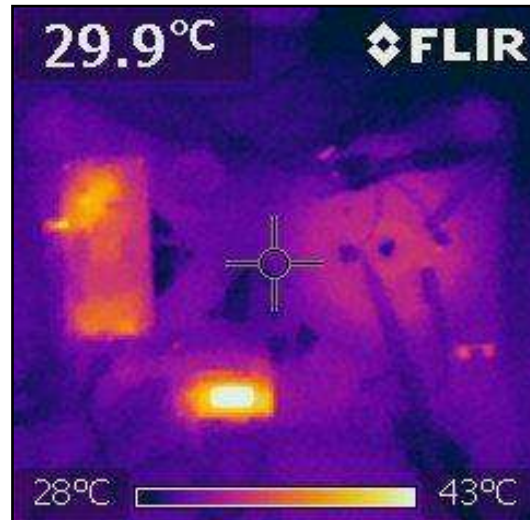


Figura 4.37 Toma termográfica del F.C.E.I. en pleno Funcionamiento USB

En esta toma nos podemos dar cuenta con seguridad donde es que perdemos una gran parte de energía y eficiencia baja, al igual que en los casos anteriores nos podemos dar cuenta que es la protección y particularmente la  $R_C$  del Clamp Protector que es un mal necesario en nuestro primer intento bajo el concepto de tener una fuente de poder inalámbrica con la topología tipo flyback.

Las temperaturas van de un rango de  $28^{\circ}\text{C}$  a  $43^{\circ}\text{C}$  teniendo una temperatura promedio de  $29.9^{\circ}\text{C}$  temperatura en la que el dispositivo funciona. Las pérdidas por calor han sido siempre inevitables en sistemas eléctricos, electrónicos, mecánicos etc.

Lo que nos queda por mejorar es la eficiencia para todos los dispositivos en los que se haga fluir una corriente eléctrica y así contar con elementos eficaces a la hora de operar.

Las condiciones de operación del *PWM* determinan las tensiones de salida  $V_o$ , frecuencia de conmutación  $f_c$ , señales mostradas en la figura 4.38 mismas que fueron captadas por el osciloscopio así como los voltajes y momentos de operación de diodo  $DI$  en los que se activa para conducir en un estado determinado por un ciclo de trabajo  $D$  del *Driver de control*. En forma comparativa nos podemos dar cuenta así como en los casos anteriores que el diodo  $DI$  conduce en el momento en que el PWM está en reposo; es decir una fracción del periodo, esto es  $\tau_{DI} = 1.6 \times 10^{-5} \text{ s}$ , siendo un tiempo muy chico, con esto nos podemos dar cuenta la velocidad de recuperación del diodo  $DI$ , más conocida como tiempo de recuperación rápida *trr* entre los interruptores rápidos y ultrarrápidos, el *PWM* es inverso en conducción con el diodo  $DI$  como se muestra en la figura 4.38.



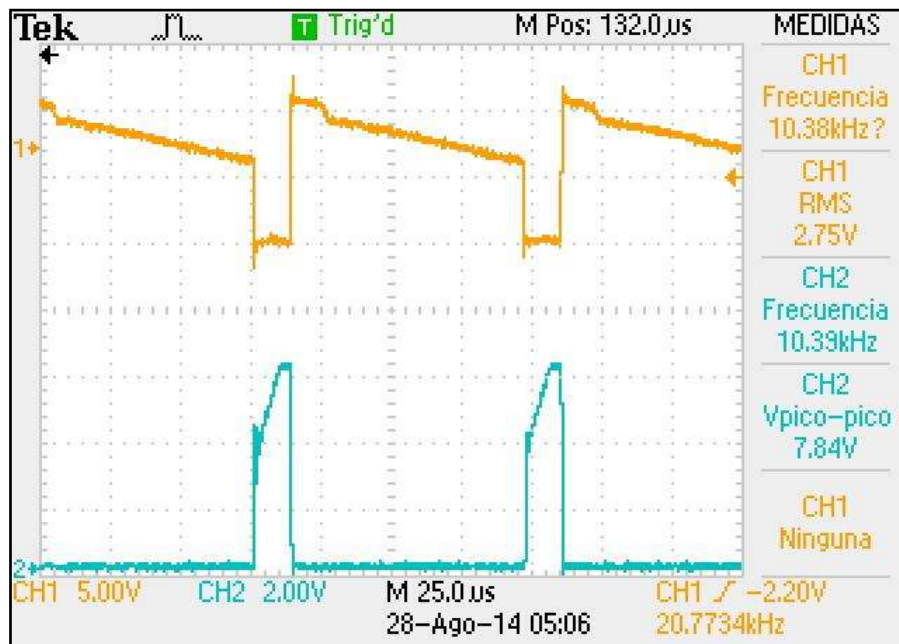


Figura 4.38 Señales de control y potencia por el osciloscopio para un  $V_{cc}=10\text{ V}$ , teniendo:  
 Canal 1 **CH1**= Voltaje PWM      Canal 2 **CH2**= Voltaje en el diodo  $D_1$

Estos cambios son necesario para operar nuestro dispositivo de manera correcta, ya que son condiciones típicas en las que el *Mosfet* de potencia en la figura 4.34 conduce haciéndolo el elemento de potencia principal, los resultados anteriores mostrados en la figura 4.38 corresponden a un voltaje en la fuente  $V_{cc}=10\text{ VCD}$ , siendo esta la tensión en las que el *F.C.E.I.* tuvo su máxima eficiencia de todas las lecturas obtenidas por el multímetro Fluke.

En lo que respecta a las condiciones y tensiones de salida en terminales del inductor  $L_3$  las formas de onda son mostradas en la figura 4.39, ya que demuestran el comportamiento en inducido para así ser inyectada una corriente hasta la carga propuesta en una terminal tipo USB que es un puerto casi universal de alimentación en dispositivos móviles. Las formas de onda deben ser idénticas a las emitidas por  $L_1$ , solo afectadas por la relación de transformación  $N_3/N_1$ , teniendo señales cuadradas pulsantes con una amplitud  $V_{pp\ out}$  y Frecuencia  $f$  ambas constantes en un tiempo  $t$ , señales que serán rectificadas, filtradas y reguladas para alimentar nuestra carga en el puerto *USB*.

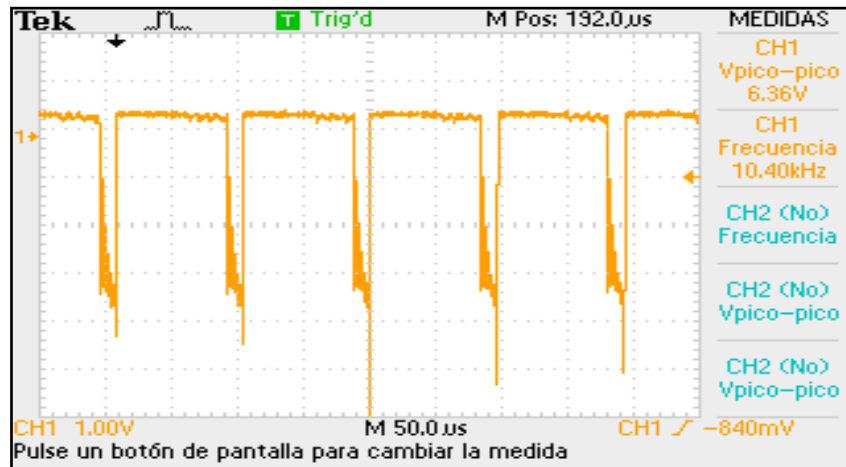


Figura 4.39 Voltaje de salida  $V_o$  en la bobina  $L_3$

El funcionamiento de nuestra fuente garantizará la el concepto que hemos perseguido a lo largo de nuestra investigación. para lo cual fue necesario tanto instrumentación como elementos que hagan funcional esta propuesta, particularmente es este caso en el que se colocó un dispositivo móvil a la salida de nuestro acondicionamiento y así poder alimentarlo eléctricamente, el dispositivo de conecto a una fuente dos fuentes de voltaje de CD una alimentando el driver de control y otra fuente a alimentado al *F.C.E.I.*,  $V_{cc}$ , también dos osciloscopios con el fin de monitorear las señales más importante que nos ayudaron a analizar con detalle cada variable en diferentes condiciones de operación, la utilización de instrumentos de medición tales como *Multímetros Fluke* y una cámara termográfica para observar el espectro térmico, la instalación y operación que podemos apreciar con más detalle en la figura 4.40 .



Figura 4.40 Fuente de Energía Inalámbrica *F.C.E.I.* en operación con un dispositivo móvil

#### 4.7 Relación de transformación bobina primaria $L_1$ y secundaria $L_3$

El comportamiento de las tensiones en la salida del inductor secundario son de suma importancia pues con un análisis obtendremos resultados del F.C.E.I., para obtener un patrón que nos gobierne el comportamiento eléctrico, fue necesario obtener datos que nos ayudaran a establecer dicho patrón, conservando las variables de medición y constantes con las que hemos trabajado tales como:

Valores Constantes:  $f_C = 10 \text{ KHz}$   $D = 0.82$   $V_{cc} = 5 \text{ VCD}$

Variables:  $I_{out} = 5 \text{ mA}$  y  $P = 25 \text{ mW}$

Carga: 8 LED's mostrados en la figura 4.41 .

En esta prueba se pretende ilustrar como es que afecta la relación de transformación con valores constantes y variables suficientes para establecer un modelo que nos ilustre en forma clara los fenómenos eléctricos que acontecen en el F.C.E.I., analizándolo como un pequeño transformador  $L_1$  induciendo a  $L_3$  mostrado en el circuito de la figura 4.41 .

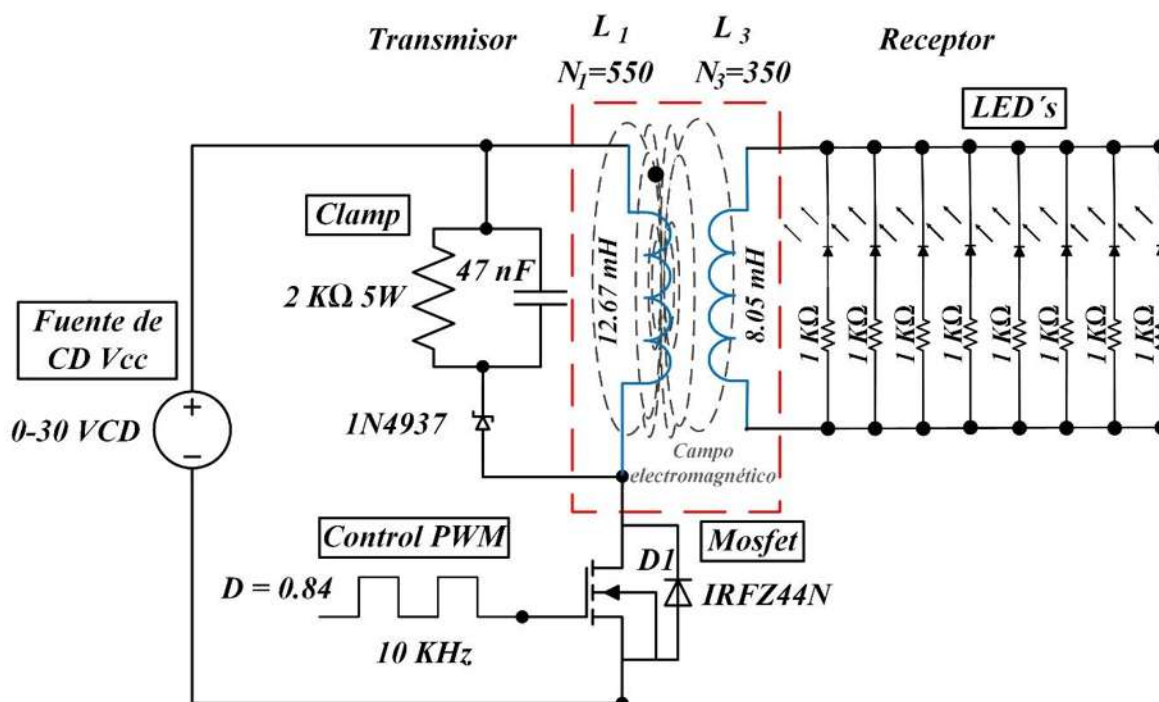


Figura 4.41 Circuito eléctrico del transformador del dispositivo F.C.E.I.

Las señales obtenidas por el osciloscopio se utilizaron para concluir el comportamiento eléctrico en terminales del inductor primario; como la de la figura 4.42, en la que se capta el tipo, forma, amplitud, longitud de onda y frecuencia de la señal eléctrica presente en el inductor  $L_1$ .

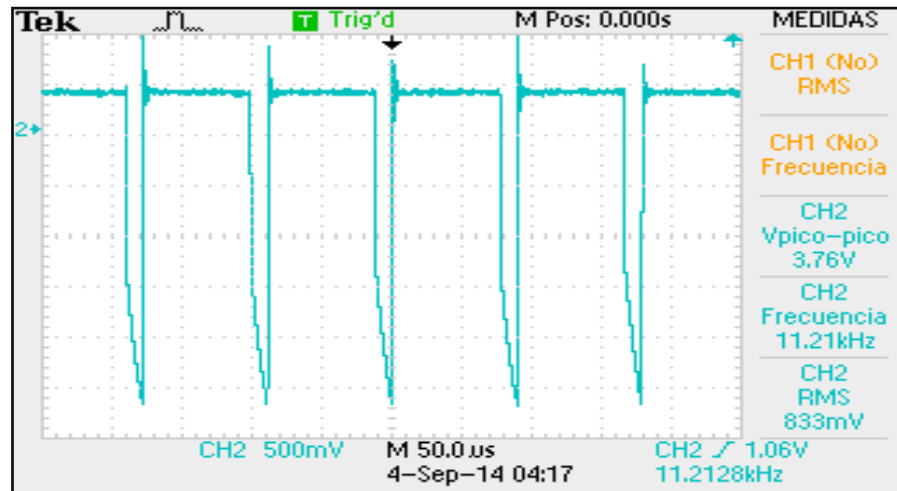


Figura 4.42 Señales en bobina primaria  $L_1$

La gráfica de la figura 4.42 es consecuencia de tener un  $V_{cc} = 5 \text{ VCD}$  conservando las constantes anteriores de  $f_c$  y  $D$ .

Similarmente, la metodología en la obtención de datos fue la misma para el inductor  $L_3$ , actuando como la bobina remota o bien bobina receptora como se le ha llamado. Un comportamiento típico de la señales en estas condiciones es como la mostrada en la Figura 4.43, propiamente señal inducida.

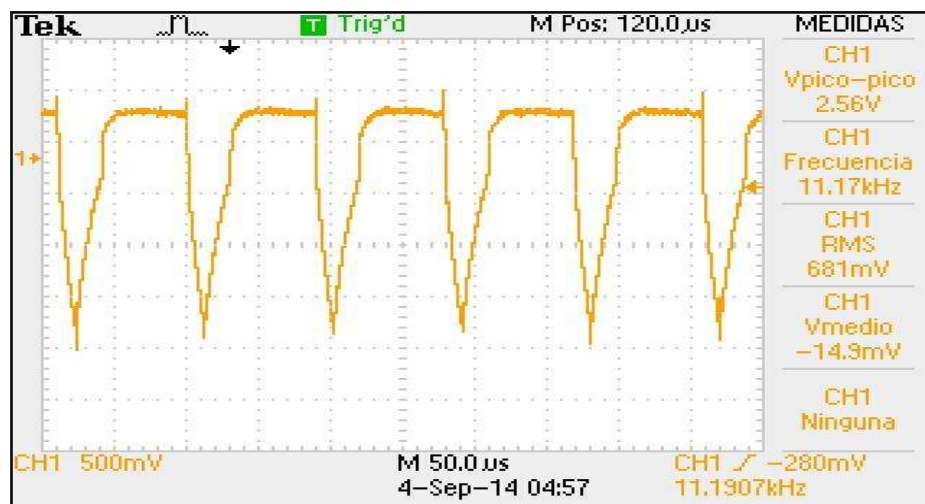


Figura 4.43 Señales en bobina secundaria  $L_3$

En el caso de los diodos *LED*, las pulsaciones inducidas activaban el diodo *LED* emitiendo luz con un valor RMS de 681 mV valor mostrado por el osciloscopio en la figura 4.43, algo imperceptible para el ojo humano ya que en teoría el *LED* se apagaba y se encendía a una razón afectada por la frecuencia de conmutación  $f_c$ , es decir **10 000 veces por segundo**.

Finalmente nuestra relación Teniendo  $N_1 = 550$  y  $N_3 = 350$  vueltas es decir con una relación de transformación de  $350/550$  el factor de transformación es de **0.6363**.

#### 4.8 Un transformador plano con núcleo de aire

Si analizamos nuestro dispositivo con detenimiento nos podremos dar cuenta que desde el punto de vista eléctrico en la parte de la conversión de energía no es más que un transformador con devanados planos como se muestra en la figura 4.44 en la que se representan todos sus elementos destacándolo como la parte modular más importante; es decir cada devanado es el inductores  $L_1$  como primario y  $L_3$  como secundario.

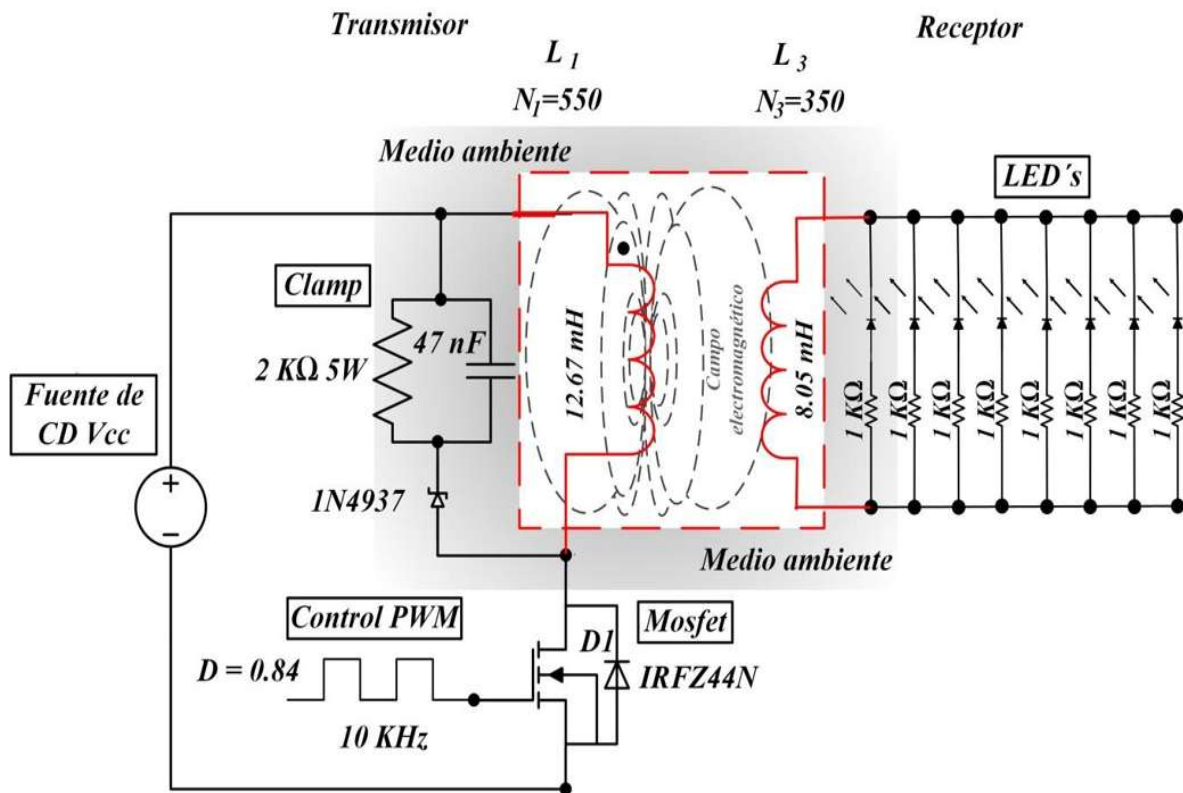


Figura 4.44 Circuito eléctrico y transformador en el medio ambiente con núcleo de aire

Teniendo:  $N_1 = 550$  y  $N_3 = 350$  vueltas; es decir con la relación  $350/550$ ; se obtuvo la serie de datos en el laboratorio con los instrumentos de medición dando un valor para cada una de las bobinas  $L_1$  y  $L_3$  equivalentemente a una maquina erétrica como lo es un transformador de inducción común, para poder apreciar con más precisión sus magnitudes, estas se muestran en la tabla 4.5, denotando magnitud para cada variable involucrada.

Tabla 4.5 de valores obtenidos en un esquema como transformador  $L_1: L_3$

$V_{cc} [V]$	$I_{in} [mA]$	$I_{out} [mA]$	Vout L1		Vout L3	
			$V_{pp} [V]$	$V_{RMS} [V]$	$V_{pp} [V]$	$V_{RMS} [V]$
3	38	2	3.46	0.505	0.744	0.208
5	63	5	3.76	0.833	1.2	0.303
7	88	29	6.72	1.12	1.57	0.407
9	350	199	7.92	1.49	2.08	0.544
11	160	2	8.44	1.86	2.36	0.555
13	229	1	8.48	2	2.58	0.664
15	295	1	8.12	2.06	2.56	0.681
20	473	6	8.32	2	2.78	0.708

Experimentalmente medimos el comportamiento de las diferencias de potencial eléctrico pico a pico por medio del osciloscopio [ $V_{pp}$ ], detalladas en la gráfica de la Figura 4.45, siendo estos valores para dicha medición.

Los resultados gráficos obtenidos son la representación gráfica del comportamiento de las variables eléctricas ( $V_{pp}$  en terminales de los devanados) a una razón de incrementos de  $V_{cc}$  siendo esta nuestra variable independiente y que *parcialmente* es constante.

Todas las pruebas hechas a lo largo del proyecto de investigación se realizaron colocando una bobina sobre otra, solo existía contacto físico pero sin conexión eléctrica, es decir que la distancia entre el inductor primario y el secundario era prácticamente cero, no obstante seguiría operando si se separaban dichos inductores debido al campo electromagnético generado a unos centímetros de distancia lo que hacía aún más emotivo el fenómeno es decir; sin cables, como se puede apreciar en la figura 4.47.

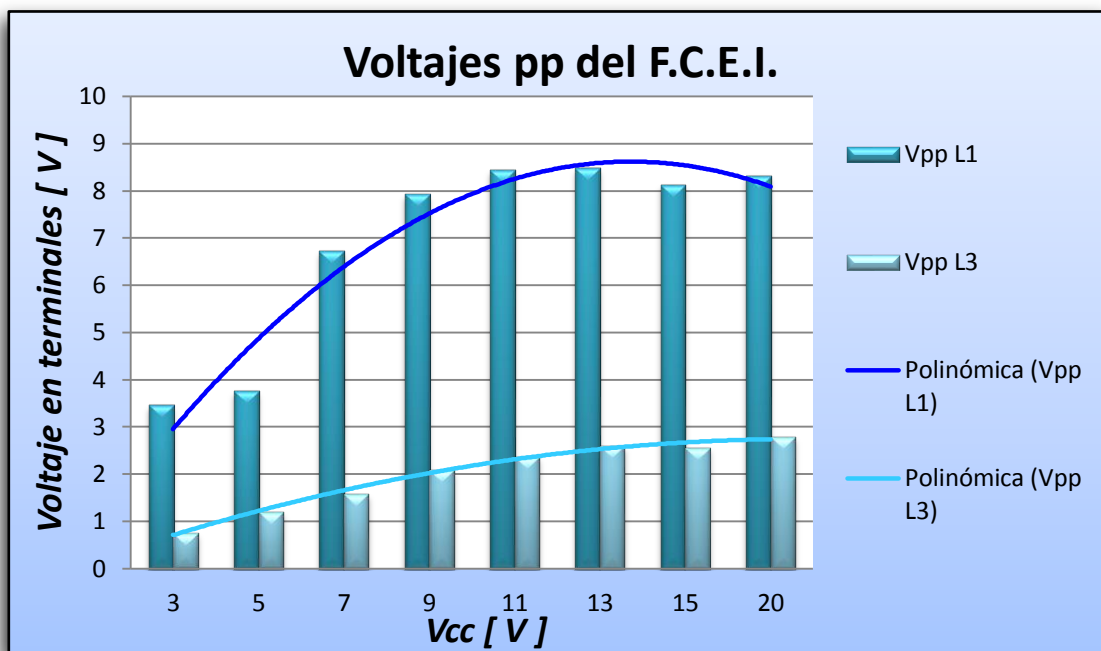


Figura 4.45 Comparación de los voltajes de transformación  $V_{pp}$ ; ver ecuación (3.17) y (3.18)

La línea de tendencia en  $L_1$  nos describe un comportamiento polinómico ver ecuación (4.17) que aumenta si lo hace el voltaje de la fuente, aumentando la tensión como lo hace una topología flyback. A decir de la línea de tendencia de  $L_3$  refleja también un comportamiento polinómico ver ecuación (4.19) a razón de  $V_{pp}$  en  $L_1$ , pero con magnitudes de voltajes menores; es decir comportándose como un transformador reductor a una razón de 350/550, especialmente para este caso donde conservamos las constantes  $D$ ,  $f_c$  y una carga con  $LED$ 's con los inductores  $L_1$  y  $L_3$ . La característica de este transformador es tener un circuito magnético en el aire como el medio donde se llevara a cabo la inducción electromagnética, pudiendo trabajar en cualquier rango de frecuencias ya que a decir del aire es un medio insaturable magnéticamente por parte de la frecuencia de conmutación  $f_c$ , una de las ventajas de nuestro dispositivo es que la frecuencia de conmutación es seleccionable en un rango de 1 KHz hasta 1 MHz, esto nos hace hablar de un dispositivo universal. Para confirmar los comportamientos polinómiales del transformador llevamos a cabo las mediciones en valores RMS, esperando tendencias muy parecidas a los valores  $V_{pp}$ , conservando las mismas variables y constantes anteriores, valores mostrados en gráfica de la Figura 4.46.

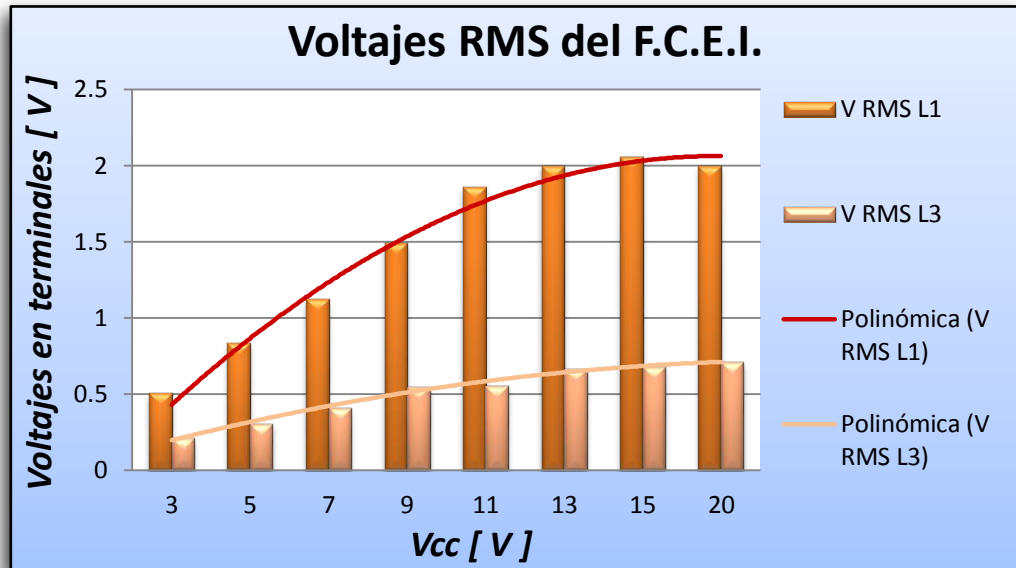


Figura 4.46 Comparación de voltajes del primario y secundario V RMS; *ver ecuación (4.19) y (4.20)*

Con esto podemos afirmar que los comportamientos polinómicos (no en magnitud si no en tendencia) son equivalentes pudiendo tener certeramente una ecuación para  $V_{pp}$  y otra para  $V_{RMS}$  que nos marque un comportamiento analítico con valores continuos en un rango que determinará el F.C.E.I. dados por su propia constitución física, valores analíticos que se mostrarán al final de este *Capítulo 4* con el fin de dar una representación matemática y así poder estimar valores que pudiesen ser primordiales para una investigación futura o a fin de mejorar el desempeño energético de nuestro dispositivo.



Figura 4.47 Inducción electromagnética sin cables



#### 4.9 Ecuaciones Polinómicas Encontradas: información del laboratorio donde se implementó el *F.C.E.I.*

Las ecuaciones construidas para los casos 1,2,3,4 y 5 se hicieron a partir de los datos emitidos en los experimentos de este Capítulo; siendo así una forma empírica pero muy práctica de establecer ecuaciones matemáticas que nos describan la tendencia en cada caso; con las condiciones mostradas a continuación.

Siendo:

$V_{pp} D1$  = El voltaje pico a pico en el diodo **D1** [V]

$V_o Fluke$  = El voltaje de salida mostrado por el **Multímetro Fluke** [V]

$P D1$  = *Potencia disipada en el Diodo 1 del Mosfet de potencia* [mW]

$e Fluke$  = *Eficiencia con los valores por el multímetro Fluke X 0.1* [%]

$V_{pp} L_1$  = *Voltaje pico a pico en terminales del inductor  $L_1$*  [V]

$V_{pp} L_3$  = *Voltaje pico a pico en terminales del inductor  $L_3$*  [V]

$V_{RMS} L_1$  = *Voltaje RMS en terminales del inductor  $L_1$*  [V]

$V_{RMS} L_3$  = *Voltaje RMS en terminales del inductor  $L_3$*  [V]

**Caso 1:** Bobina  $L_1$  con bobina  $L_2$  como inducido experimentando una carga *LED*

$$V_{pp} D1 = 0.1955 V_{cc}^2 + 0.9318 V_{cc} + 0.1509 \quad (4.1)$$

$$V_o Fluke = 0.0347 V_{cc}^2 + 0.0079 V_{cc} + 0.2322 \quad (4.2)$$

$$P D1 = -0.6148 V_{cc}^2 + 20.749 V_{cc} - 43.124 \quad (4.3)$$

$$e Fluke = 1.3875 V_{cc}^2 - 27.178 V_{cc} + 145.74 \quad (4.4)$$

**Caso 2:** Bobina  $L_1$  con bobina  $L_2$  como inducido experimentando una carga con una toma *USB*.

$$V_{pp} D1 = -0.0208 V_{cc}^2 + 1.0247 V_{cc} + 14.825 \quad (4.5)$$

$$V_o Fluke = -0.0118 V_{cc}^2 + 0.5428 V_{cc} + 3.9748 \quad (4.6)$$

$$P D1 = -0.6174 V_{cc}^2 + 40.58 V_{cc} - 5.937 \quad (4.7)$$

$$e Fluke = -1.2704 V_{cc}^2 + 13.449 V_{cc} + 35.039 \quad (4.8)$$

**Caso 3:** Bobina  $L_1$  con bobina  $L_3$  como inducido experimentando una carga LED

$$V_{pp} D1 = -0.0208 V_{cc}^2 + 1.0247 V_{cc} + 14.825 \quad (4.9)$$

$$V_o Fluke = -0.0118 V_{cc}^2 + 0.5428 V_{cc} + 3.9748 \quad (4.10)$$

$$P D1 = -0.6174 V_{cc}^2 + 40.58 V_{cc} - 5.937 \quad (4.11)$$

$$e Fluke = -1.2704 V_{cc}^2 + 13.449 V_{cc} + 35.039 \quad (4.12)$$

**Caso 4:** Bobina  $L_1$  con bobina  $L_3$  como inducido experimentando una carga con una toma USB.

$$V_{pp} D1 = -0.0176 V_{cc}^2 + 0.6122 V_{cc} + 1.4898 \quad (4.13)$$

$$V_o Fluke = -0.0116 V_{cc}^2 + 0.4367 V_{cc} + 0.6782 \quad (4.14)$$

$$P D1 = -0.2689 V_{cc}^2 + 13.912 V_{cc} - 41.104 \quad (4.15)$$

$$e Fluke = -0.2044 V_{cc}^2 + 4.5647 - 4.1341 \quad (4.16)$$

**Caso 5:** Operando como un transformador  $L_1$  induciendo a  $L_3$

$$V_{pp} L_1 = -0.1968 V_{cc}^2 + 2.5046 V_{cc} + 0.6496 \quad (4.17)$$

$$V_{RMS} L_1 = -0.0338 V_{cc}^2 + 0.5378 V_{cc} - 0.0744 \quad (4.18)$$

$$V_{pp} L_3 = -0.037 V_{cc}^2 + 0.6233 V_{cc} + 0.1236 \quad (4.19)$$

$$V_{RMS} L_3 = -0.0078 V_{cc}^2 + 0.1438 V_{cc} + 0.061 \quad (4.20)$$

Nuestro dispositivo F.C.E.I. no es muy eficiente pero es muy simple, funcional, sencillo y práctico cumpliendo el objetivo final, en el que se indujo voltaje por el medio ambiente y se hizo llegar al dispositivo que las aprovecharía para alimentarse de una forma inalámbrica.

#### **4.10 Resultados de las pruebas realizadas de la Fuente Conmutada Inalámbrica**

Al final de la implementación determinamos las ecuaciones que representan el comportamiento matemático de nuestro dispositivo y con esto nos dimos cuenta que los resultados más relevantes se hicieron ver para el inductor  $L_2$  pues su relación de transformación  $n$  era mayor que la de los demás inductores construidos mostrados en la figura 2.16.

Hechas las mediciones del Capítulo 3 y habiendo graficado nos podemos dar cuenta que si no son iguales el comportamiento es muy parecido en algunos casos, y como algo de lo que más interesa es el resultado a la salida de la bobina inducida compararemos las tendencias de las cuatro pruebas bajo carga para concluir tomando en cuenta las tensiones de salida y rendimiento en eficiencia.

Obteniéndose de cada prueba sus propios resultados, tales son:

Prueba 1: Mediciones del inductor primario  $L_1$  induciendo a la bobina secundaria  $L_2$  experimentando una carga con LED's.

Prueba 2: Mediciones del inductor primario  $L_1$  induciendo a la bobina secundaria  $L_2$  experimentando una carga con una toma *USB* alimentando un dispositivo móvil.

Prueba 3: Mediciones del inductor primario  $L_1$  induciendo a la bobina secundaria  $L_3$  experimentando una carga con LED's.

Prueba 4: Mediciones del inductor primario  $L_1$  induciendo a la bobina secundaria  $L_3$  experimentando una carga con una toma *USB* alimentando un dispositivo móvil.

Con los resultados finales de las mediciones hechas en el apartado *4.10 Resultados de las pruebas realizadas de la Fuente Conmutada Inalámbrica* concluiremos particularmente para cada prueba con el comportamiento de su propia curva; siendo esta la descripción gráfica del fenómeno en cada prueba, como se muestra a continuación.

**Prueba 1**

En esta prueba la tensión de salida es la más alta con carga LED y ascendente conforme lo hace el voltaje de alimentación  $V_{cc}$ , la curva tiene pocas variaciones ya que el consumo de energía de los LED's es casi lineal figura 4.48.

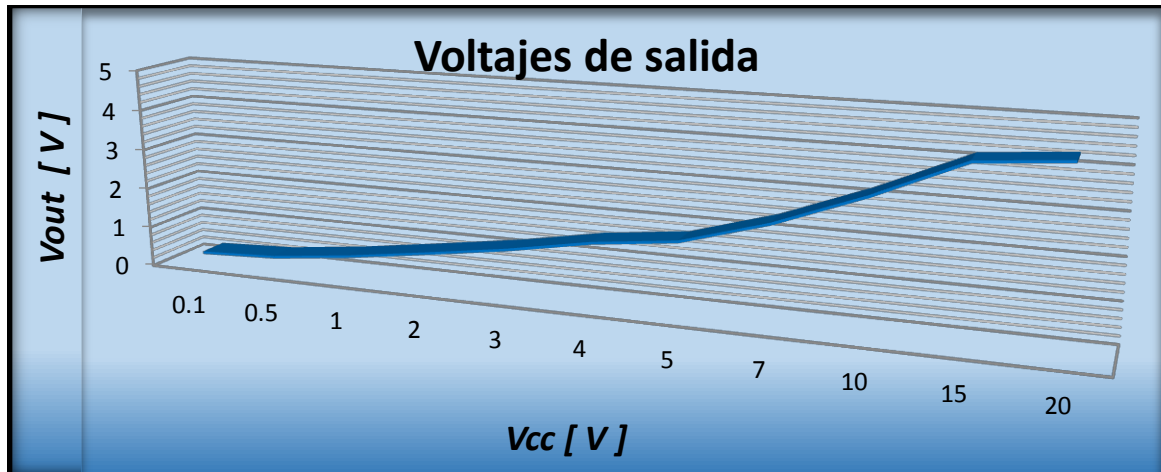


Figura 4.48 Voltajes de salida de la prueba 1

La eficiencia es decreciente debido a que el consumo en los LED's es muy bajo esto era de esperarse pues la mayoría de la potencia se disipa en el Clamp de la figura 4.9, ver figura 4.49 .

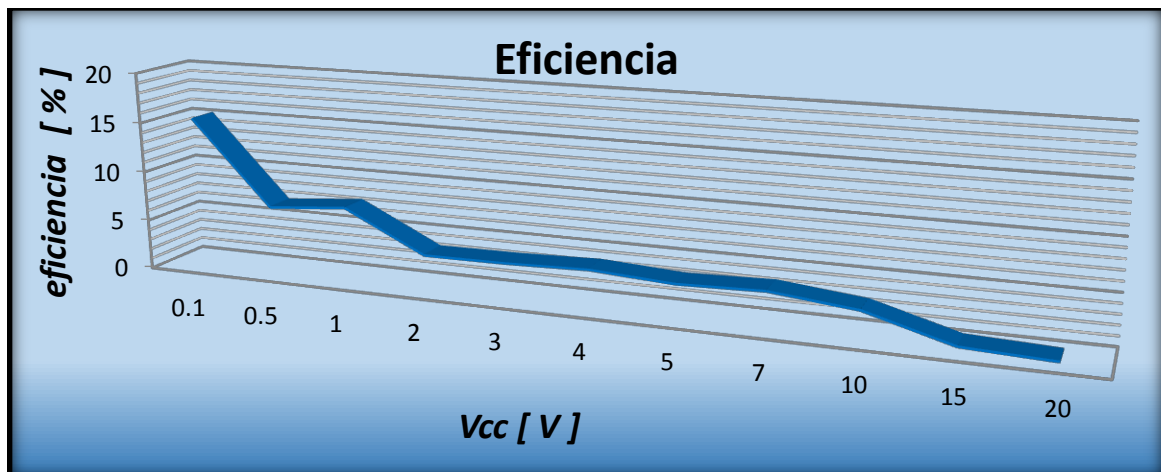


Figura 4.2 Eficiencia de la prueba 1

## Prueba 2

Aquí tenemos casi el doble del voltaje a la salida si lo comparamos con el de la prueba 4 figura 4.54 y el más alto de las cuatro pruebas, debido a que el valor de eficiencia es mayor elevando la tensión y la relación de transformación mayor  $n=0.9090$ ; esto habiendo colocado una carga más grande entregando más potencia a la salida figura 4.50.

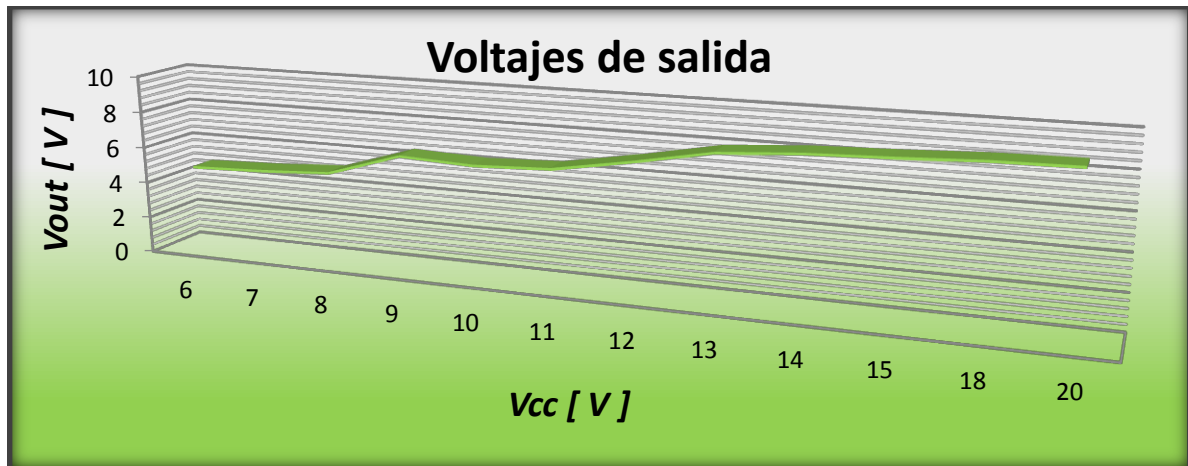


Figura 4.50 Voltajes de salida de la prueba 2

Aumentó la tensión y la eficiencia, para este caso ya que por la bobina fluyó más corriente elevando el rendimiento del prototipo entregando más energía al dispositivo móvil, el comportamiento en esta prueba es la más significativa con carga USB pues cuenta con una relación de transformación  $n=0.9090$  figura 4.51.

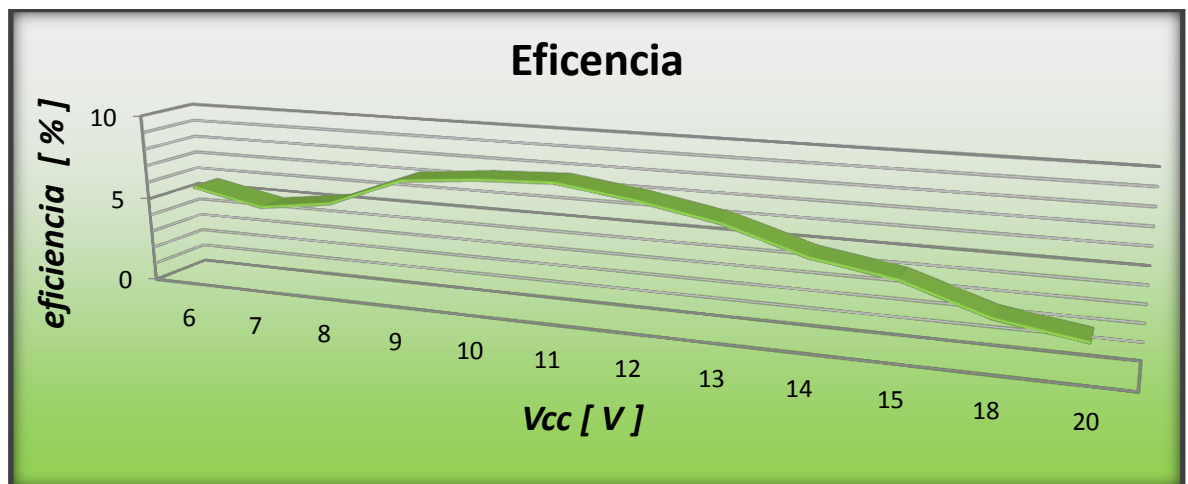


Figura 4.51 Eficiencia de la prueba 2

### Prueba 3

El comportamiento de la tensión a la salida alimentando LED's es muy similar al de la prueba 1 conservando su linealidad, sólo con la diferencia de tener voltajes menores pues cuenta con una relación de transformación menor  $n=0.6363$  y una inducción más baja, disminuyendo así su voltaje de salida figura 4.52.

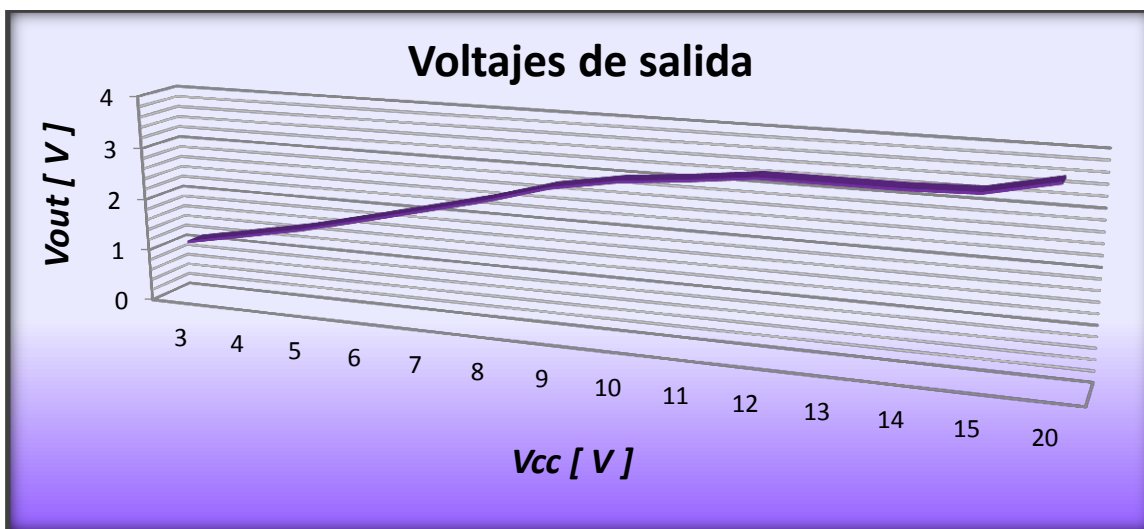


Figura 4.52 Voltajes de salida de la prueba 3

Esta es la mayor eficiencia de las cuatro pruebas realizadas, teniendo una relación de transformación menor pero con menos pérdidas térmicas y con el mayor acople entre inductancia primaria y secundaria para la alimentación con LED's, con un rendimiento del 17.56% e inductancia mutua  $M$  menor figura 4.53.

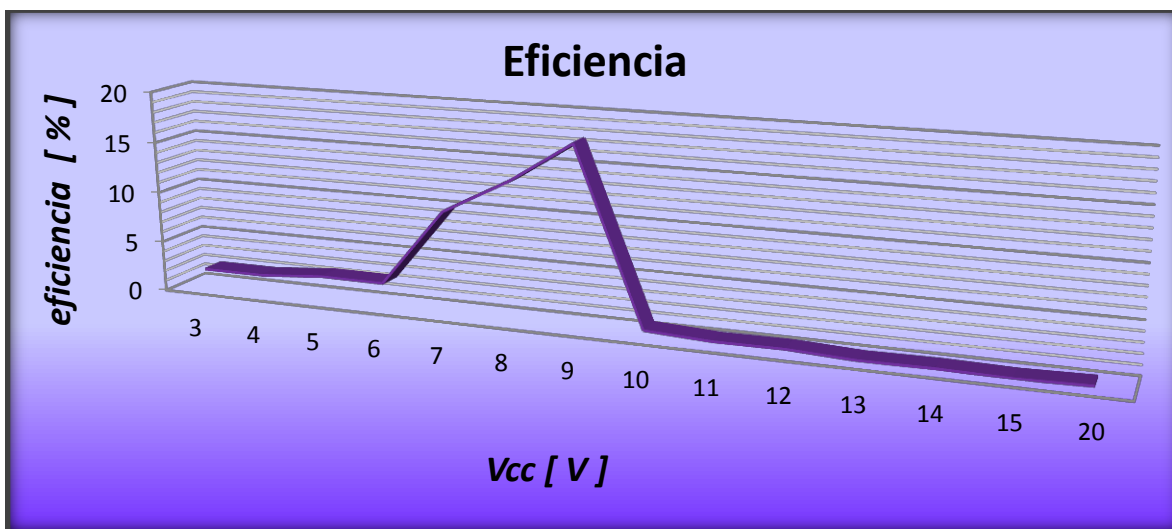


Figura 4.53 Eficiencia de la prueba 3

**Prueba 4**

En esta prueba se tuvieron voltajes bajos esperando fuese así la relación de transformación es la menor  $n=0.6363$  con la carga más grande, no obstante llegó a ser funcional cumpliendo el objetivo figura 4.54, afectando que la inducción e impedancia era menor.

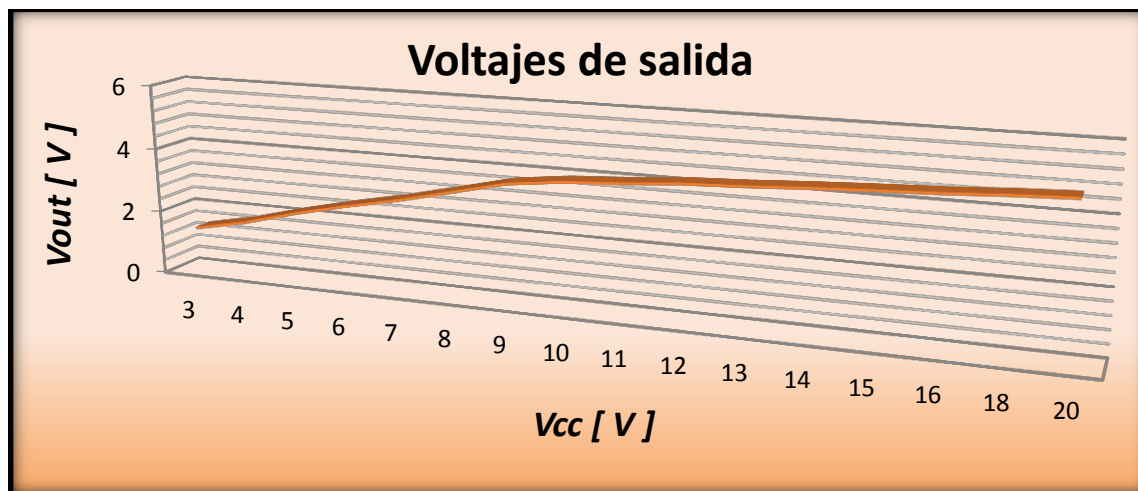


Figura 4.54 Voltajes de salida de la prueba 4

Esta fue la prueba con menos eficiencia 3.31% de las cuatro realizadas, ya que se tenían las condiciones más extremas, la relación de transformación  $n=0.6363$  es más baja y la carga la más grande, bajando así considerablemente el rendimiento, con una inductancia menor y un calentamiento en el alambre más perjudicial, siendo un calibre delgado aumentando el valor de su impedancia, figura 4.55.

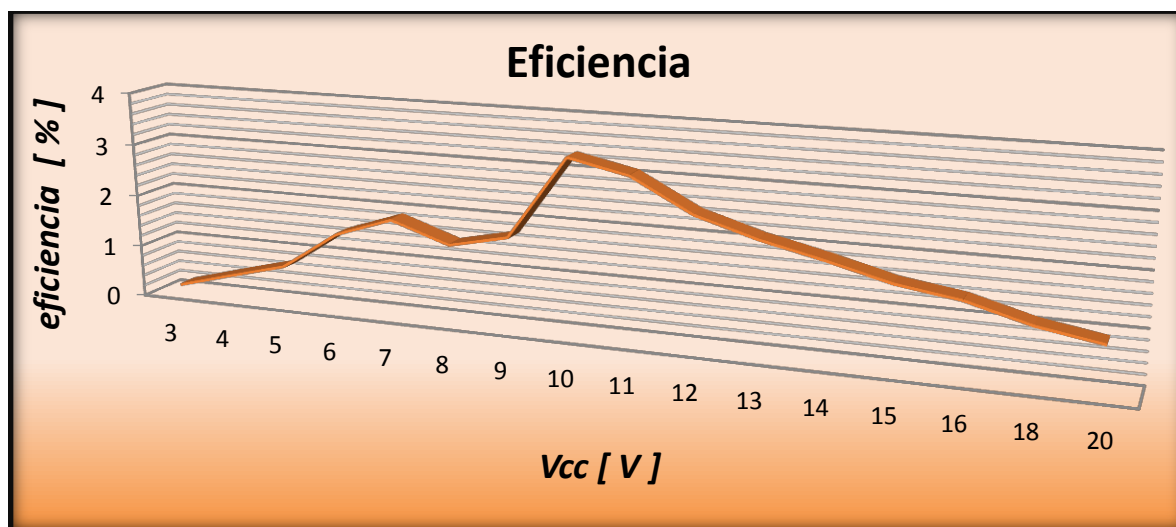


Figura 4.55 Eficiencia de la prueba 4

## Capítulo 5

### Conclusiones y trabajos futuros de la Fuente Conmutada de Energía Inalámbrica

A lo largo de toda nuestra implementación llevando a cabo mediciones, capturas, gráficas, análisis y correcciones que nos permitiesen una descripción más sencilla y clara del prototipo con estas características se percató que el objetivo era posible, la emisión de resultados y determinaciones fue muy concisa en cada experimento; el seccionamiento del Capítulo 3 en la implementación fue de mucha ayuda ya que con esto tuvimos un panorama mucho más amplio para cada variable y acondicionamiento involucrado, así como la operación del dispositivo propuesto F.C.E.I. en un rango de condiciones físicas tales como la temperatura.

Con esto tomamos un criterio de satisfacción, ya que el objetivo inicial en nuestra investigación fue la de inducir una tensión que alimentase en forma inalámbrica un dispositivo eléctrico y finalmente se cumplió, determinando que un dispositivo con estas características y condiciones eléctricas es práctico, funcional y fácilmente manipulable.

Con la información arrojada particularmente datos analíticos como las magnitudes eléctricas en cada sección, siendo procesadas gráfica y analíticamente pudimos obtener las ecuaciones que nos describen el comportamiento con las variables eléctricas involucradas a lo largo de la implementación, variables como tensiones en la fuente de alimentación, corrientes de salida, corrientes de entrada, tensiones de salida, corrientes de salida; estas variables fueron los pilares que nos llevaron a establecer estas representaciones matemáticas con la conservación de las constantes únicas en todas las pruebas efectuadas a la *Fuente Conmutada de Energía Inalámbrica F.C.E.I.*

Resulta útil también pensar que siendo la primera vez que se construyó el dispositivo habiendo cumplido el fin, es también un instrumento modificable, operable, no peligroso y sus elementos eléctricos comerciales; es decir que los elementos que lo constituyen son



fácilmente adquiridos en el mercado eléctrico, esto nos hace aún más alcanzable nuestra Fuente F.C.E.I., nos hace mirar al futuro y romper con los paradigmas de alimentación eléctrica convencional, que aún hay mucho que investigar y mejorar, y que mejor manera de hacerlo que utilizar los recursos de fácil alcance permitiéndonos satisfacer las necesidades impuestas en nuestra vidas cotidianas optimizando recursos dando un paso más a la innovación eléctrica.

Con esto los resultados obtenidos al final del *Capítulo 4* podemos definir que el voltaje de salida  $V_o$ , aumenta conforme lo hace el voltaje de la fuente de voltaje de CD  $V_{cc}$ , es decir; el voltaje de salida es proporcional al voltaje de la fuente a una razón dada por las ecuaciones (4.2), (4.6), (4.10) y (4.14) respectivamente, siendo el voltaje promedio máximo de 5.26 V. A decir de la eficiencia con excepción de la prueba 1, los valores donde se obtuvieron las máximas eficiencia están situados en la parte media de las gráficas al ser estos los valores más adecuados para el mejoramiento a futuro de su rendimiento, la eficiencia promedio máxima para las cuatro pruebas fue de 10.62 %, para comparar mostraremos en la tabla 5.1 el rendimiento ante otras fuentes de alimentación, en las que se logro el objetivo de alimentar una carga sin una conexión física.

Tabla 5.1 Comparación de eficiencias

Referencia	Tipo de fuente	Eficiencia típica
[12] Tema 4. Fuentes de alimentación	<i>Lineal</i>	<i>30-60 %</i>
[12] Tema 4. Fuentes de alimentación	<i>Conmutada</i>	<i>70-90 %</i>
Esta Tesis: Fuente Conmutada inalámbrica	<i>Prototipo F.C.E.I.</i>	<i>3.31-17.56 % *</i>
[2] Libro Ejemplo p. 264	<i>Flay Back Calculada</i>	<i>38.58 %</i>

*\*tomando los valores máximos de las pruebas 1-4*

Logrando así más ergonomía electrónica y universalidad de alimentación en todos los dispositivos electrónicos y eléctricos sin tener que depender una conexión física directa.

Comparando nuestra fuente con las existentes nos damos cuenta que no gana en eficiencia pues trata de un proyecto implementado por primera vez, sin embargo es simple, muy flexible, ergonómico y funcional inalámbricamente.

Se cumple la relación de transformación con un factor de acoplamiento pequeño esto es función de la reluctancia del circuito magnético en el aire siendo este el medio en el que fluye el campo electromagnético.

## **5.1 Trabajos futuros**

Para finalizar esta investigación, analizando las gráficas anteriores se puede dar cuenta que aún faltan muchas cosas por mejorar tal es el caso de la eficiencia, el aumentar el rendimiento energético en nuestro dispositivo F.C.E.I. es un punto muy importante pues de ahí dependerá su futuro; esto lo podemos hacer adecuando los valores de los elementos que integran el Clamp protector.

Otro punto que debemos tomar muy en cuenta es la relación de transformación e inductancia, aquí se puede aumentar con el objetivo de garantizar a la salida un voltaje considerable y evitar la caída de tensión durante su funcionamiento.

A decir del conductor, por el hecho de manejar frecuencias altas lo más apropiado es utilizar un conductor múltiple es decir varios o muchos hilos de cobre muy finos que integren el conductor aislado esto con el fin de evitar el efecto piel que se presenta precisamente a señales de frecuencias muy altas (valores que van desde 1 Khz hasta varios Ghz ) disminuyendo el volumen considerablemente de las bobinas.

Podemos también mejorar la practicidad del dispositivo modificando la fuente de alimentación a valores más comerciales es decir disponer solo de una fuente general de alimentación ajustada a las necesidades del prototipo.

La flexibilidad es un apartado a mejorar también, si bien es funcional a potencias pequeñas se puede hacer funcional a mediana y gran escala aumentando su potencia de salida y simultáneamente alimentando varios dispositivos en una área definida por su campo electromagnético.

El driver de control TI494 es el “corazón” de nuestro dispositivo es por eso que lo más adecuado sería aislarlo del circuito de potencia y hasta hacerlo más simple con el fin de disminuir el consumo de energía y evitar futuras fallas que pusieran en riesgo tanto a las personas como al prototipo mismo.

Debido a que no existe retroalimentación al driver de control un aspecto que lo hiciese más interesante sería la colocación de un sensor que indicara cuando existe carga, el tipo de carga, y hasta cuando esta carga ha sido llenada o satisfecha energéticamente.

A grandes rasgos esta son las mejoras futuras más pertinentes, prácticas y necesarias para la optimización de este proyecto de investigación.

# Apéndice

## Apéndice A

Posición de RT y CT en el driver de control TL494, por *Texas Instruments*.

TL494  
PULSE-WIDTH-MODULATION CONTROL CIRCUITS  
SLVS074E - JANUARY 1983 - REVISED FEBRUARY 2005

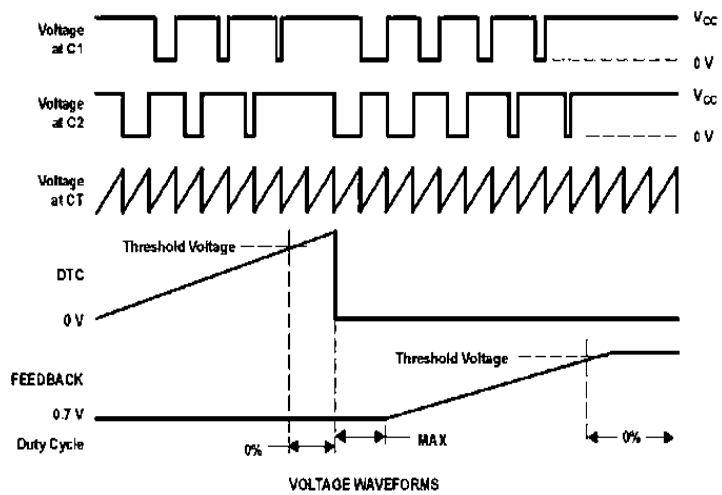
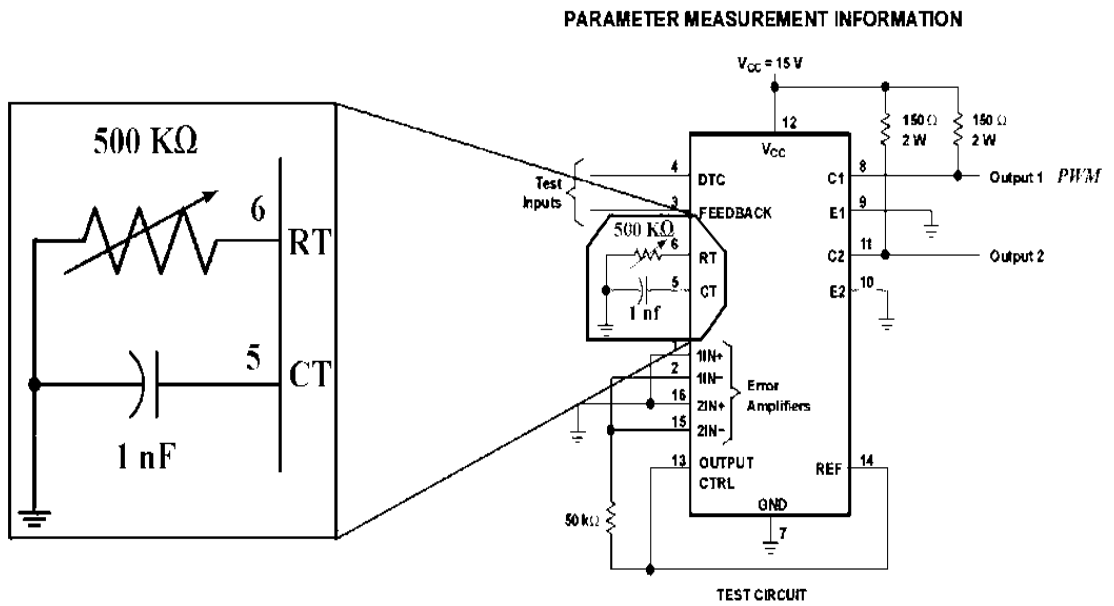


Figure 1. Operational Test Circuit and Waveforms

## Apéndice B

Hoja de datos técnicos del **IRFZ44N**, por *International Rectifier IR*.

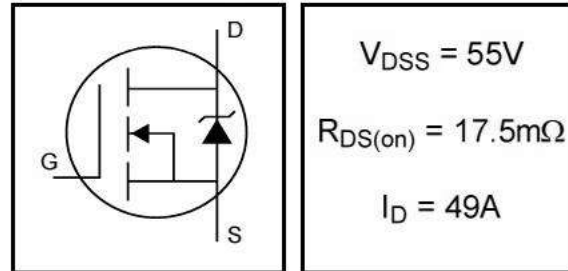
International  
**IR** Rectifier

PD - 94053

# IRFZ44N

HEXFET® Power MOSFET

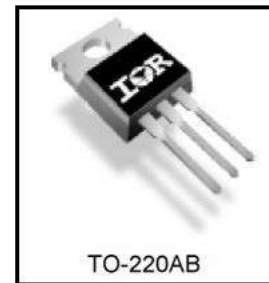
- Advanced Process Technology
- Ultra Low On-Resistance
- Dynamic dv/dt Rating
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Fully Avalanche Rated



### Description

Advanced HEXFET® Power MOSFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. This benefit, combined with the fast switching speed and ruggedized device design that HEXFET power MOSFETs are well known for, provides the designer with an extremely efficient and reliable device for use in a wide variety of applications.

The TO-220 package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contribute to its wide acceptance throughout the industry.



### Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{V}$	49	A
$I_D @ T_C = 100^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{V}$	35	
$I_{DM}$	Pulsed Drain Current <sup>①</sup>	160	
$P_D @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Power Dissipation	94	W
	Linear Derating Factor	0.63	W/°C
$V_{GS}$	Gate-to-Source Voltage	$\pm 20$	V
$I_{AR}$	Avalanche Current <sup>①</sup>	25	A
$E_{AR}$	Repetitive Avalanche Energy <sup>①</sup>	9.4	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt <sup>③</sup>	5.0	V/ns
$T_J$	Operating Junction and	-55 to + 175	°C
$T_{STG}$	Storage Temperature Range		
	Soldering Temperature, for 10 seconds		
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf·in (1.1N·m)	

### Thermal Resistance

	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	1.5	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.50	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	62	

www.irf.com

1

## Referencias

- [1] [N.O. Sadiku & K. Alexander 2007]  
Matthew N.O. Sadiku & Charles K. Alexander, Fundamentos de Circuitos Eléctricos, México, McGraw-Hill Interamericana, Tercera Ed., 2007.
- [2] [Hart 2001]  
Daniel W. Hart, Electrónica de Potencia, España: Prentice Hall, 2001.
- [3] [Tomasi 2003]  
Wayne Tomasi, DeVry Institute of Technology Phoenix, Arizona, Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, México: Prentice-Hall Cuarta Ed. 2003.
- [4] [W. Massie & R. Underhill 1908]  
Walter W. Massie & Charles R. Underhill, The Future of Wireless Art, Wireless Telegraphy & telephony, 1908.
- [5] [Hipertextual 2014]  
Hipertextual, Nikola Tesla, el hombre que cambió el mundo pero fue condenado al Ostracismo, Missing Utopia: The End of Wardenclyffe, ¿Que es lo que descubrió Nikola Tesla?, The 10 inventions of Nikola Tesla that Changed the World, About-History 1900's. 15 de marzo de 2015.  
<http://hipertextual.com/2014/07/nikola-tesla-genios-historia>
- [6] [Tesla Memorial Society of New York 1968]  
Wardenclyffe -A Forfeited Dream by Leland I. Anderson. 18 de marzo de 2015  
<http://http://www.teslasociety.com/wardenclyffe2.htm>  
<http://www.teslasociety.com/dream.htm>
- [7] [Science Center at Wardenclyffe, The history of wardenclyffe 2014]  
Science Center at Wardenclyffe the history of wardenclyffe, Tesla By: (G, Genova, "A history of Tesla's laboratory") appeared as story2 in Newsletter 1 #2, 18 de marzo del 2015.  
<http://www.teslasciencecenter.org/wardenclyffe>

[8] [Tesla Magazine Wardencllyffe 2014]

Tesla Magazine Wardencllyffe, How does Tesla's tower work?  
by: Gary Peterson pp. 22-25, 18 de marzo del 2015.  
<http://www.teslainfo.org/FreeDownloads/WARDENCLYFFE>

[9] [Damn Interesting 2007]

Damn Interesting. Tesla's Tower of Power. 15 de marzo de 2015  
Article #281, written by Alan Bellows  
Published on 10 de July 2007, Article design and artwork by Alan Bellows. Suggest by Matt.  
<http://www.damninteresting.com/teslas-tower-of-power>

[10] [Robert L. Boylestad & Louis Nashelsky]

Electrónica: Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos  
Pearson Educación, 8ª. Edición, México 2003.

[11] OFICINA DE PATENTES DE ESTADOS UNIDOS

NIKOLA TESLA, DE NEW YORK, N.Y.

SISTEMA DE TRANSMISION DE ENERGIA ELECTRICA

Especificación Formando parte de No. De patente 645.576 de 20 de marzo de 1900

Solicitud 02 de septiembre de 1897 No. de serie 650.343 (Modelo No)

Testigos

M. Lawson Dyer

G.W. Martling

[12] [http://ocw.usal.es/enseanzas-tecnicas/electronica/contenido/electronica/Tema4\\_Falimentac.pdf](http://ocw.usal.es/enseanzas-tecnicas/electronica/contenido/electronica/Tema4_Falimentac.pdf)