

# Capítulo VI. Resultados

---

## 6.1. Entrehierro de 0.9 mm

Se realizó la construcción del inductor utilizando el núcleo RM14/I, con un total de 33 vueltas. La inductancia medida por medio del medidor de impedancias *RLC meter* PM6303 de *philips*, fue menor a los 196  $\mu\text{H}$  por lo que se requirió de **36 vueltas** en total. Si realizamos el cálculo de la inductancia para  $N1 = 36$  veremos que la inductancia es aproximadamente 230  $\mu\text{H}$ . Esta diferencia se debe principalmente, entre otros factores a que el embobinado no se encuentra distribuido entre las dos mitades.

Posteriormente se implementó el convertidor clase E de la figura 5.3 eliminando la resistencia ya que los capacitores, así como el inductor en sí presentaban una resistencia en serie asociada. Se aseguró que la frecuencia de conmutación fuera de 100 kHz, sin embargo se observó que para una determinada red resonante existe un rango de  $\pm 2\text{kHz}$  de tolerancia con lo que el circuito permanece sintonizado.

Se observó el voltaje y la corriente en el transistor con el fin de determinar su correcta sintonización. En la figura 6.1 se muestra el voltaje  $V_{DS}$  y la corriente  $I_{DS}$  del transistor desintonizados. Se observa que el voltaje en el transistor no tiene valor cero y una pendiente cero cuando el interruptor se enciende. La corriente de igual manera presenta oscilaciones durante el encendido cuyos valores pico llegan a ser muy altos.

En el mejor de los casos, cuando la red resonante se encuentra desintonizada, la transición simultánea entre corriente y voltaje no es muy grande además de ser de poca duración. En el peor de los casos esta puede ser mucho mayor con la posible existencia de

picos de corriente o voltaje mayores a los valores máximos que pueda soportar el transistor.

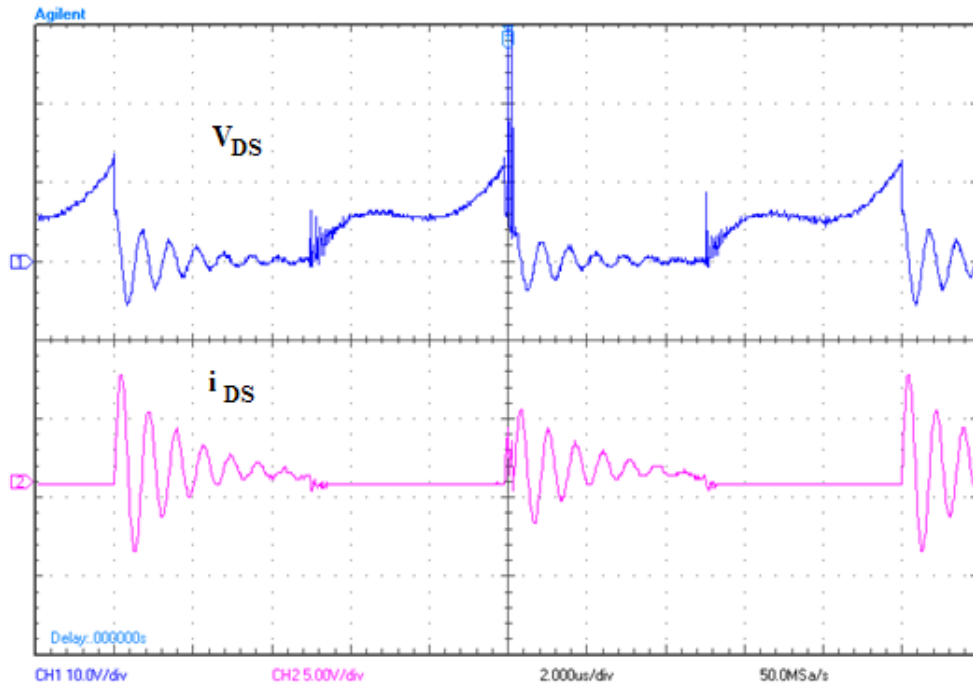


Figura 6. 1 Formas de onda de voltaje y corriente medidos del transistor para Clase E desintonizado.

A partir de la tabla del apéndice B [13] se realizó la sintonización de la carga resonante, modificando el valor de los capacitores con el fin de obtener la forma de onda correcta, mostrada en la figura 1.9. El circuito convertidor Clase E resultante, posterior a la sintonización se muestra en la figura 6.2, integrado al modelo Clase E/Transformador. Las formas de onda del voltaje y la corriente en el transistor se observan en la figura 6.3. El voltaje  $V_{DS}$  es **14.1 volts** y la corriente  $I_{DS}$  pico es de **302 mA**.

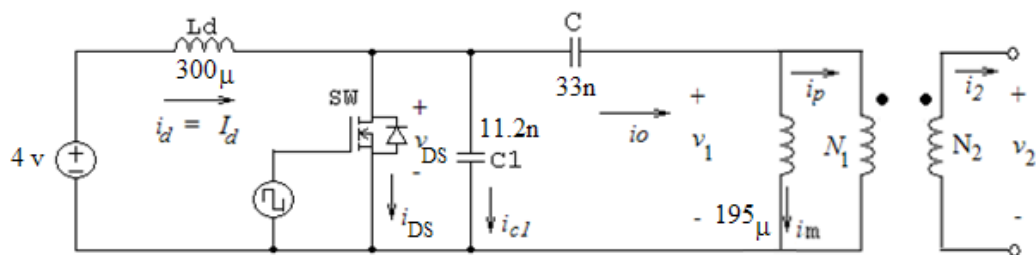
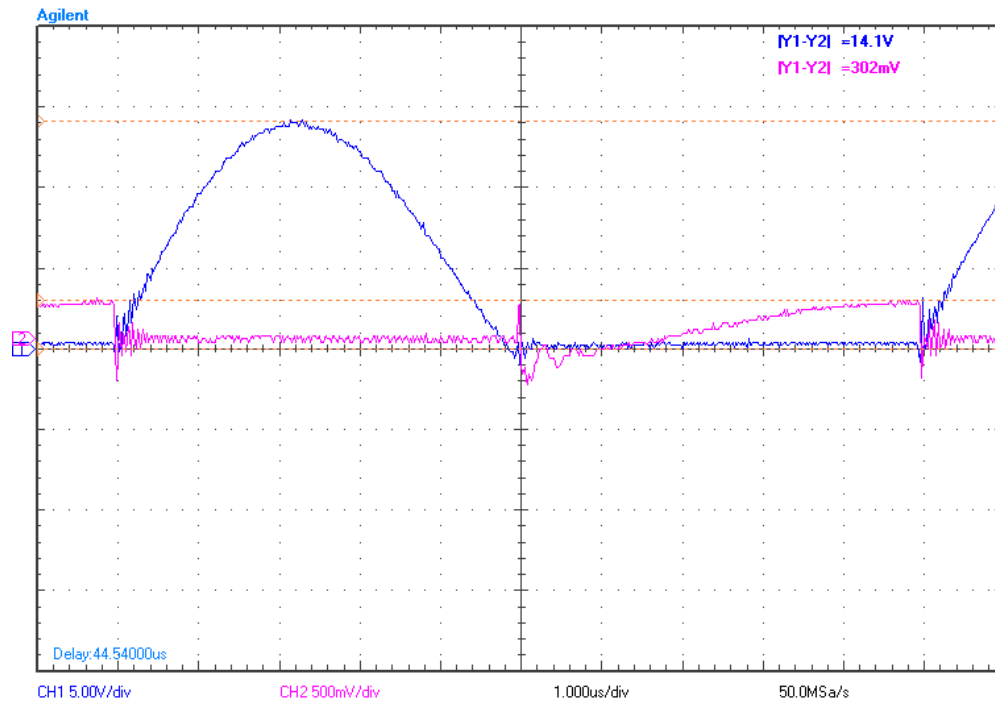


Figura 6. 2 Convertidor resonante para  $l_g = 0.9$  mm con elementos sintonizados.



**Figura 6.3 Voltaje y corriente en el transistor para el circuito de la figura 6.2**

Posteriormente se observó el voltaje en el devanado primario y en el secundario, cuyas formas de onda se muestran en la figura 6.4. El voltaje pico a pico del **devanado primario** tiene un valor de **40.8 volts**, mientras que el voltaje pico a pico del **devanado secundario** tiene un valor de **35 volts**. La diferencia son 5.8 volts. Si observamos con atención veremos que ambos voltajes presentan una ligera deformación y el voltaje pico positivo tiene mayor amplitud que el voltaje pico negativo. En la figura 6.5 se muestran los armónicos del voltaje del devanado primario. Se observa que la frecuencia fundamental se encuentra sobre los 100 kHz y que en 200 kHz se presenta un armónico cuya magnitud es de aproximadamente 2 volts rms.

Posteriormente se colocaron resistencias de diferentes valores en el devanado secundario, cuyo rango fue de 100 a 1 k $\Omega$ . El voltaje en el devanado secundario no presentó ninguna caída de voltaje con ninguno de estos valores. Al conectar cargas menores a 1 k $\Omega$  el voltaje en el devanado secundario presentó pequeñas pérdidas.

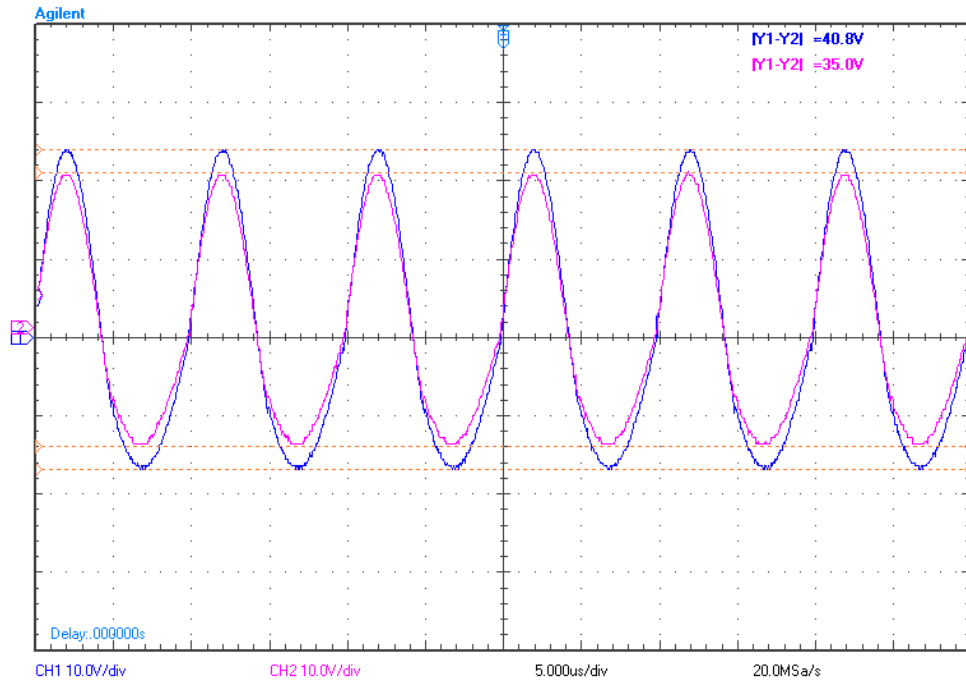


Figura 6. 4 Voltaje en el devanado primario y secundario del circuito de la figura 6.2

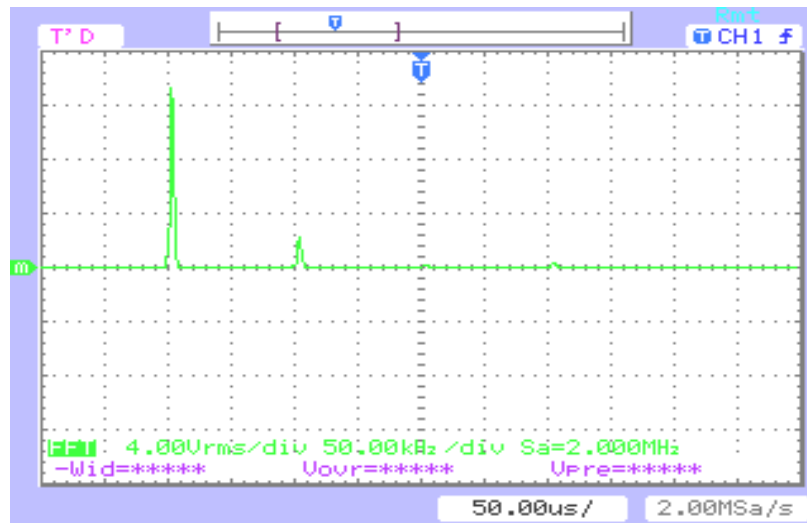


Figura 6. 5 Fourier para el voltaje en el devanado primario del circuito de la figura 6.2

La corriente de entrada se midió y se obtuvo un valor aproximado de **117 mA rms**, cuyo valor es menor a la corriente calculada teóricamente.

## 6.2 Entrehierro de 5mm

Se realizó la implementación y la sintonización del circuito de la figura 5.7 para obtener el circuito resultante mostrado en la figura 6.6. A partir de este circuito se realizaron las siguientes mediciones:

- Voltaje y corriente en interruptor sin carga
- Voltaje de transmisión y recepción sin carga
- Corriente de salida sin carga

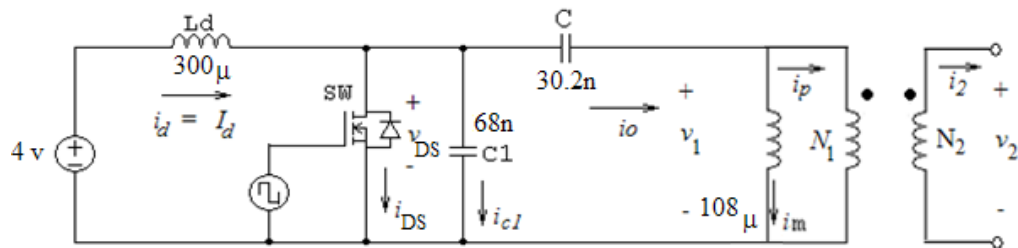


Figura 6.6 Convertidor resonante para  $l_g = 5$  mm con elementos sintonizados

El voltaje y la corriente en el interruptor mostrados en la figura 6.7 tienen como valor máximo **13.9 volts** y **0.686 A**. Se observa que cuando existe voltaje, la corriente es cero, y cuando la corriente comienza a subir hasta su valor máximo, el voltaje es cero. No existen transiciones simultáneas entre voltaje y corriente tal como se muestra en la figura 6.8, el cual es un acercamiento de la señal medida en la figura 6.7.

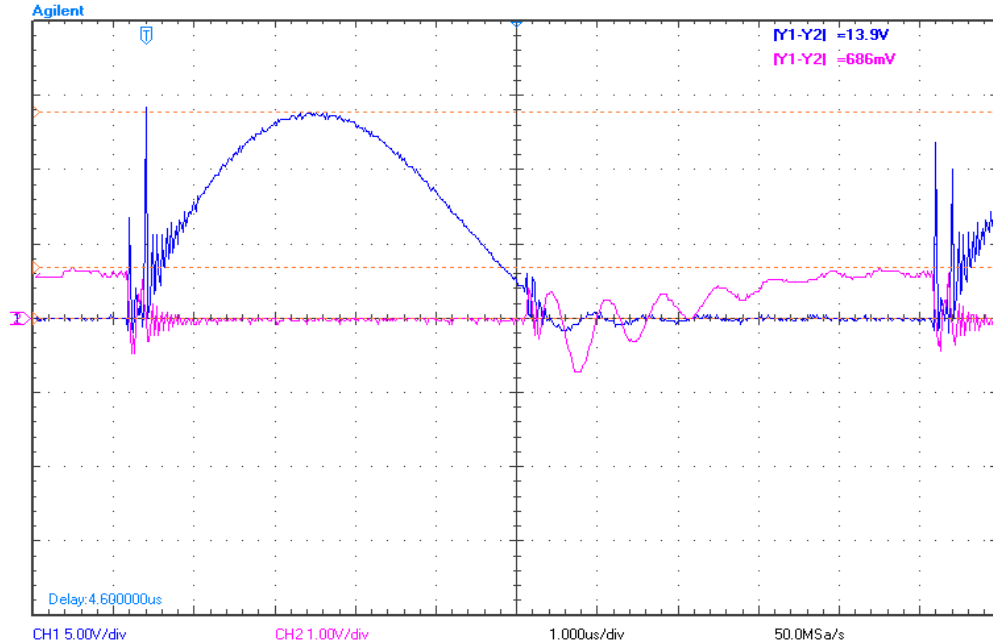


Figura 6. 7 Voltaje y corriente del transistor para el circuito de la figura 6.6

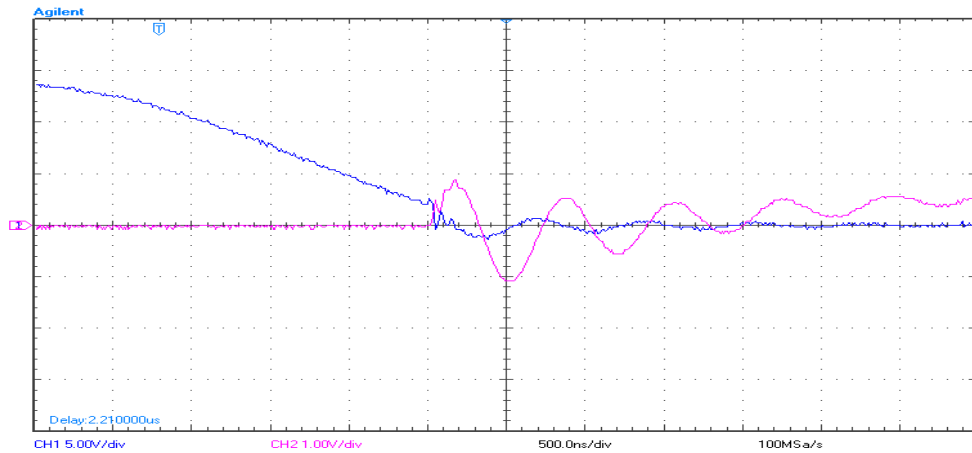


Figura 6. 8 Acercamiento de las formas de onda de la figura 6.7

El voltaje de transmisión y recepción se muestra en la figura 6.9. Los valores medidos fueron el voltaje pico a pico del **devanado primario** de **67.5 volts** y el voltaje pico a pico del **devanado secundario** de **35.6 volts**. El voltaje en el devanado secundario es aproximadamente la mitad del devanado primario. Se perdió aproximadamente el 50% del voltaje inducido en el primario.

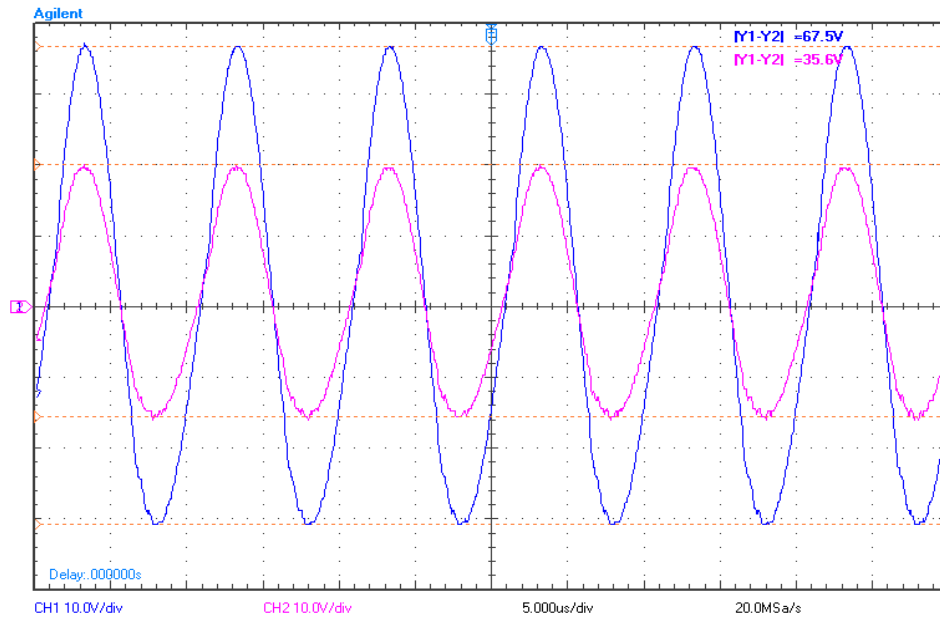


Figura 6. 9 Voltaje en el devanado primario y secundario del circuito de la figura 6.6

La corriente de salida se muestra en la figura 6.10. La corriente pico a pico medida fue de **1 Amper** aproximadamente.

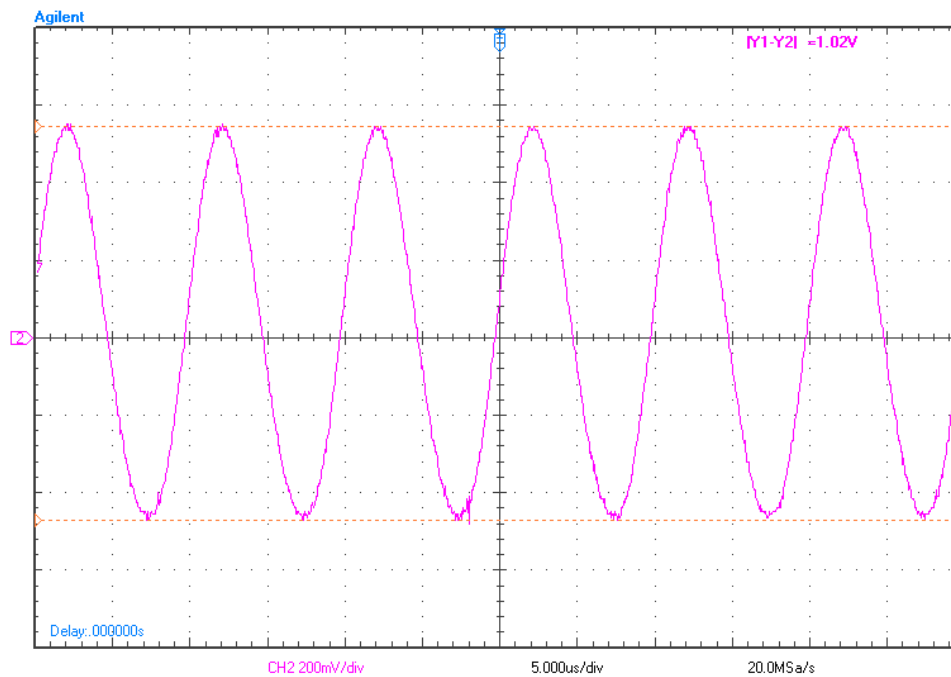
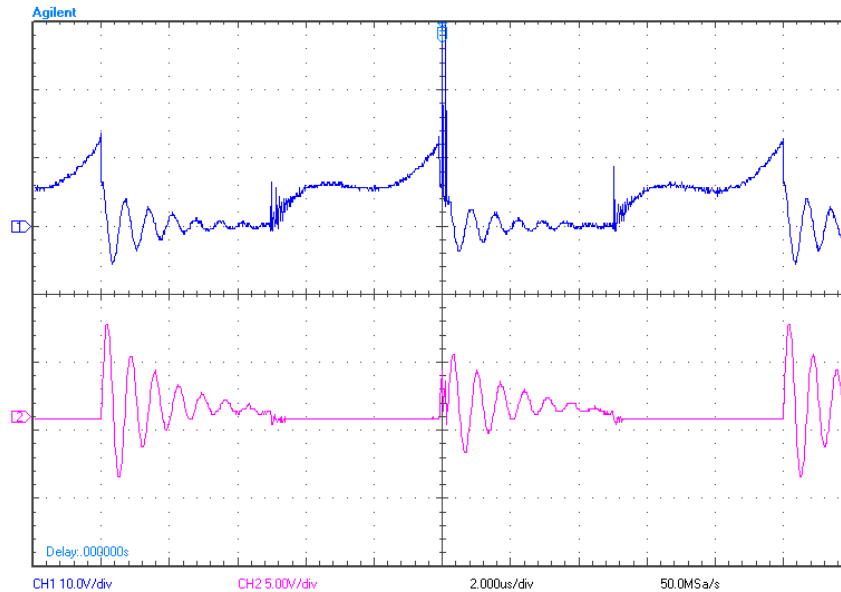


Figura 6. 10 Corriente de salida del circuito de la figura 6.6

En la figura 6.11 se muestra el voltaje y la corriente del interruptor cuando se aleja la mitad del núcleo receptor. Al alejarlo, la inductancia se reduce significativamente,

por lo que ocasiona un cambio en la red resonante y por lo tanto el circuito convertidor Clase E se desintoniza. Se observa que existe un aumento en las oscilaciones de la corriente  $I_{DS}$ , llegando a valores cercanos a los 6 A. Debido a que parte de esta corriente fluye por el capacitor  $C_I$ , estos picos de corriente podrían dañar a los elementos del circuito.



**Figura 6. 11 Voltaje y corriente en el transistor del circuito de la figura 6.6. De-sintonización provocada por alejar la mitad del núcleo receptor.**

Posteriormente se aumentó el voltaje de entrada a 10 volts con ambas mitades del núcleo a 5 mm y se realizaron las siguientes mediciones:

- Voltaje de transmisión y recepción sin carga
- Voltaje y corriente en el transmisor sin carga

El voltaje de transmisión y recepción sin carga se muestran en la figura 6.12. El voltaje pico a pico medido en el **devanado primario** fue de **165 volts**, mientras que el



voltaje pico a pico del devanado secundario alcanzó un valor de **94 volts**. Alrededor del 57% del voltaje en el primario se transmitió al secundario.

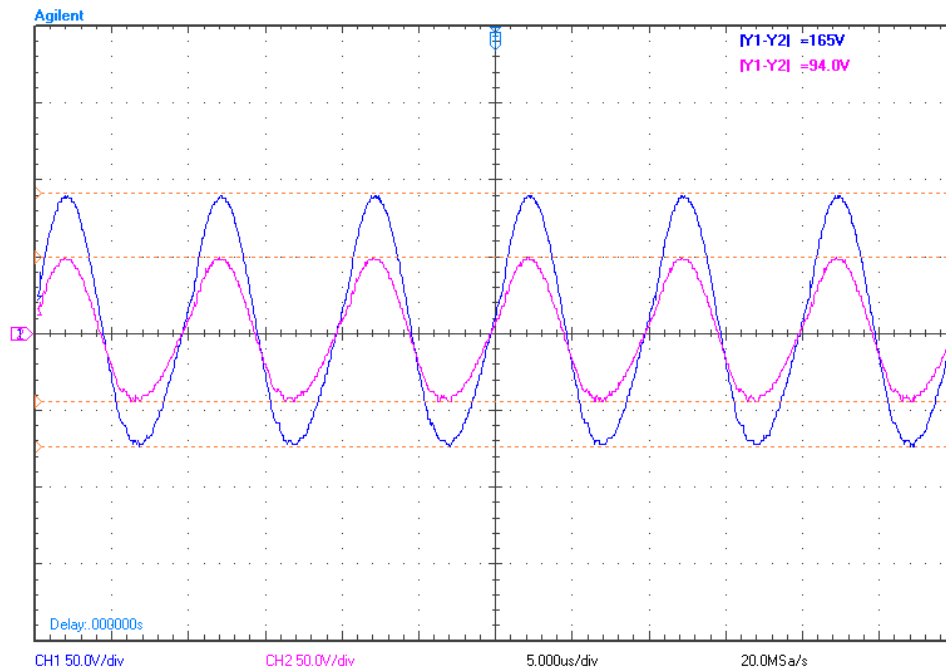


Figura 6. 12 Voltaje en el devanado primario y secundario del circuito de la figura 6.6 al aumentar  $V_d = 10$  volts

El voltaje y la corriente en el **devanado primario sin carga** se muestran en la figura 6.13. Se observa que la **corriente** tiene un valor pico a pico de **2.43 A**. La corriente con respecto al voltaje presenta un desfase de aproximadamente  $90^\circ$ .

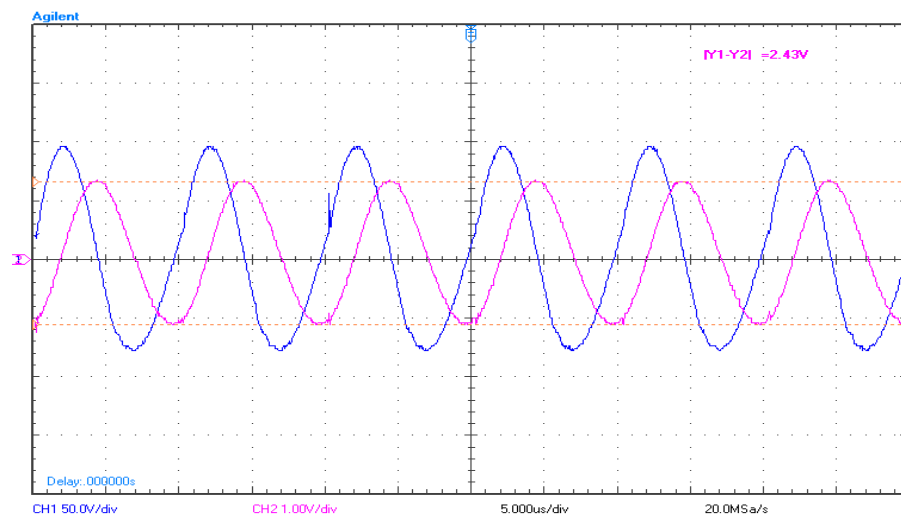


Figura 6. 13 Voltaje y corriente en el devanado primario del circuito de la figura 6.6 al aumentar  $V_d = 10$  volts

Posteriormente se implementó el circuito de la figura 6.14, el cual presenta el cargador de batería conectado al devanado secundario, sin celular. El cargador esta formado por el rectificador de onda completa con carga RC. A partir de este circuito se realizaron las siguientes mediciones

- Voltaje de transmisión y recepción
- Voltaje y corriente en interruptor
- Voltaje y corriente del cargador

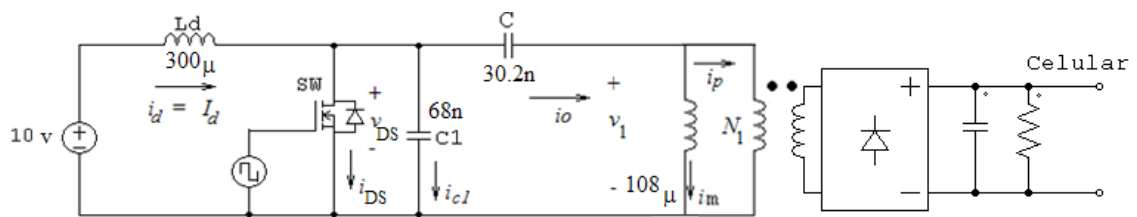


Figura 6. 14 Circuito de la figura 6.6 con rectificador de onda completa y celular en la carga del secundario

El voltaje de transmisión y recepción se muestra en la figura 6.15. Se puede apreciar que el voltaje en el devanado secundario presenta una pequeña distorsión así como una pequeña atenuación que podríamos considerar despreciable, ya que su voltaje pico a pico fue de 92.3 volts.

Una vez conectado el celular al cargador, el voltaje y la corriente en el interruptor se muestran en la figura 6.16. Podemos ver que existe una ligera de-sintonización a causa del celular. Esta de-sintonización se observa en la transición entre voltaje y corriente, ya que el voltaje en el interruptor no alcanza valor cero.

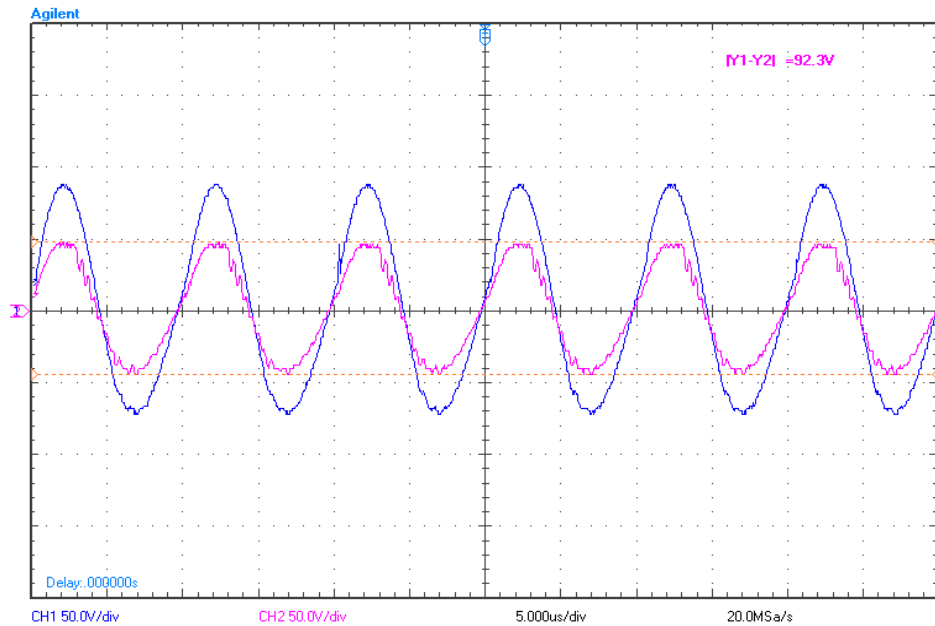


Figura 6. 15 Voltaje en el devanado primario y secundario del circuito de la figura 6.14

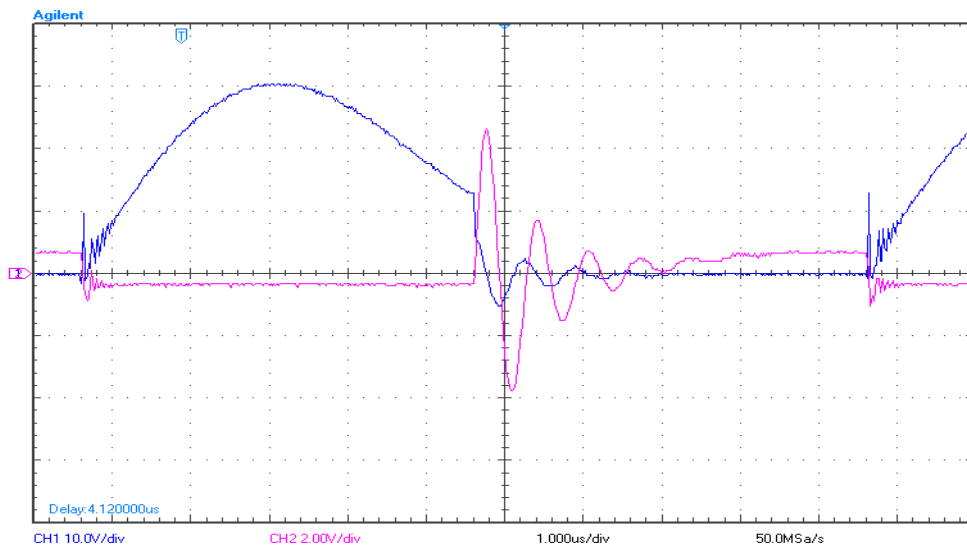


Figura 6. 16 Voltaje y corriente en el interruptor para el circuito de la figura 6.14

El voltaje del devanado secundario, posterior a la rectificación alcanzó un valor de 46 volts, por lo que se utilizó un regulador de voltaje variable. El celular requiere de 10 volts aproximadamente para realizar la carga. Se obtuvo entonces la medición del voltaje regulado y la corriente de carga, las cuales se muestran en la figura 6.17. El voltaje regulado presenta una caída de hasta **7.5 volts**, y la corriente de carga medida fue de **120 mA**, las cuales, de acuerdo al valor de  $C = 200 \text{ mA}$ , presenta una carga de  $0.6C$ .

En la figura 6.18 se representa el momento en el que la parte receptora se aleja de la parte emisora. Esto ocasiona la reducción de la inductancia  $L_m$ , la cual esta formada únicamente de una mitad del núcleo. Este valor se midió por medio del medidor de impedancias y se encontró de  $90 \mu\text{H}$ . En la figura 6.11 se muestra el voltaje y la corriente medidos en el interruptor. Como se mencionó anteriormente, este cambio de inductancia de  $108 \mu\text{H}$  a  $90 \mu\text{H}$  presenta esta de-sintonización, lo cual puede dañar a los elementos del circuito resonante.

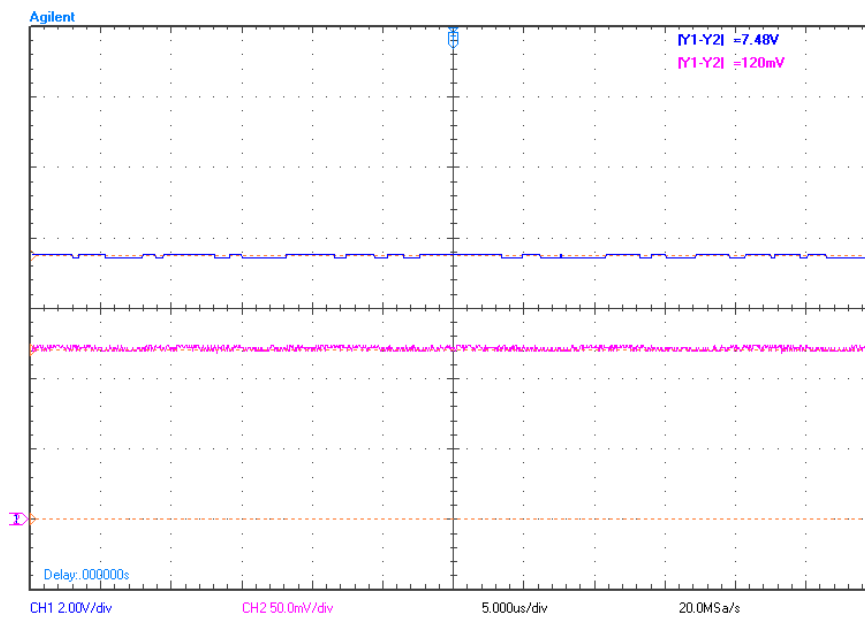


Figura 6. 17 Voltaje y corriente de carga del celular

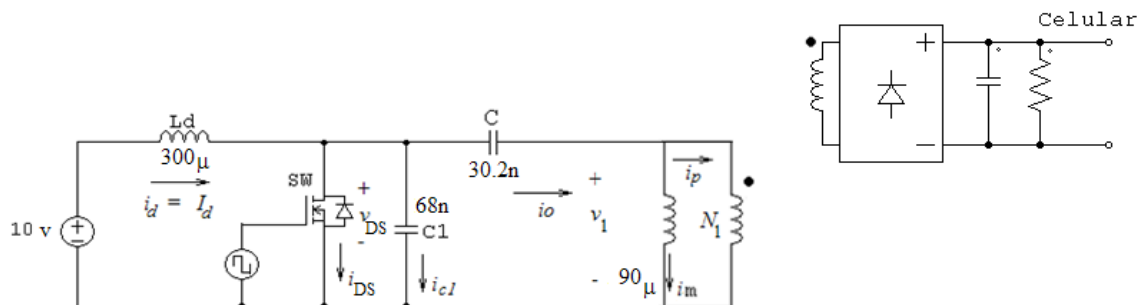


Figura 6. 18 Circuito representativo al alejar la mitad receptora del circuito emisor

Para evitar este efecto, se realizó un re-diseño del circuito utilizando como inductancia resonante el valor de  $90 \mu\text{H}$ . Para esto se realizó el análisis teórico y posteriormente la implementación y la modificación al circuito para obtener el circuito resultante mostrado en la figura 6.19. Este circuito se implementó para posteriormente realizar las siguientes mediciones:

- Voltaje y corriente en el interruptor
- Voltaje de transmisión y de recepción
- Voltaje y corriente en el transmisor

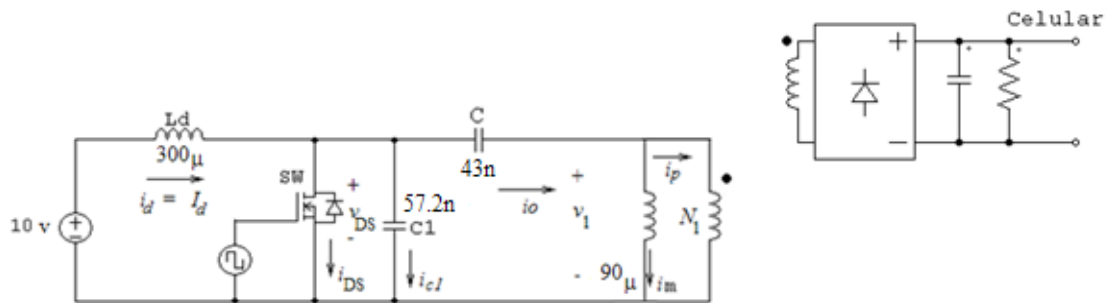
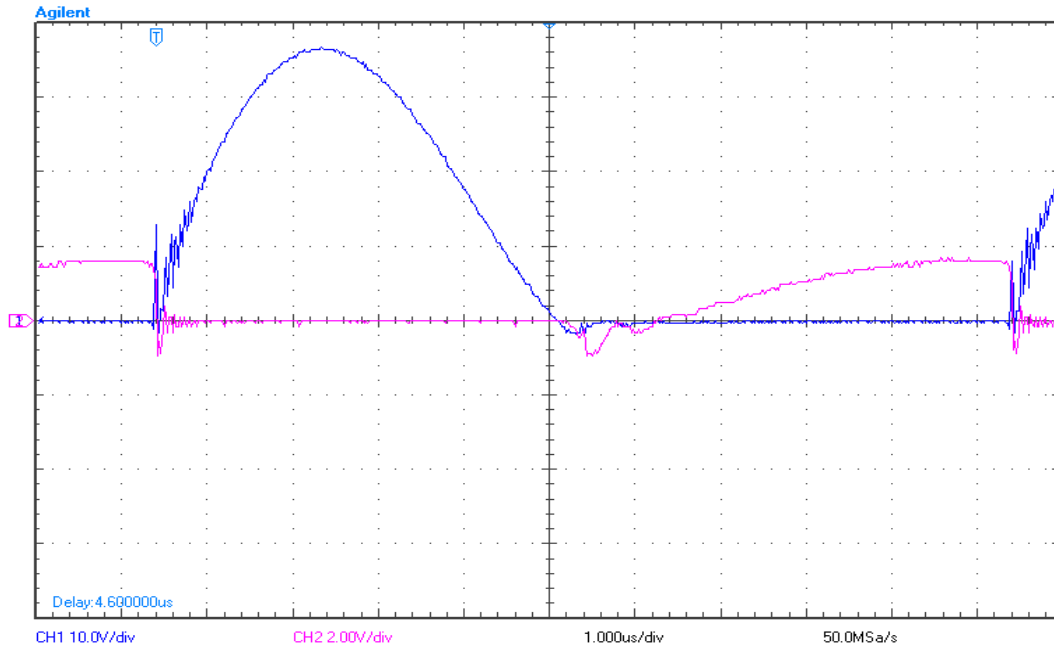


Figura 6. 19 Circuito sintonizado sin parte receptora

El voltaje y la corriente en el interruptor se muestran en la figura 6.20, donde se puede observar que el circuito se encuentra resonando de manera adecuada cuando la parte receptora no se encuentra en la cercanía. El valor máximo del voltaje y de la corriente en el transistor son de aproximadamente 38 volts y 1.8 A respectivamente.



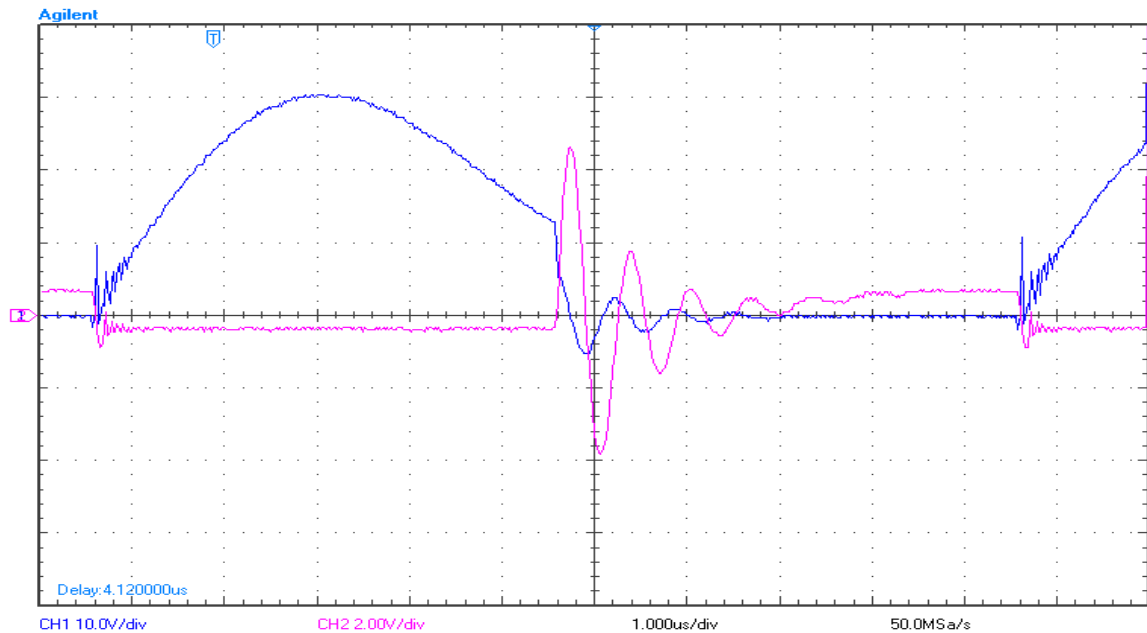
**Figura 6. 20 Voltaje y corriente en el transistor para el circuito de la figura 6.19**

Por último se acercó la parte receptora, lo que ocasiona el aumento de  $L_m$  a 108  $\mu\text{H}$  y se realizaron las siguientes mediciones

- Voltaje y corriente en el interruptor
- Voltaje en el devanado primario y secundario
- Corriente en el devanado primario
- Voltaje y corriente de entrada ( $V_d$  e  $I_d$ )
- Voltaje y corriente en el cargador

Las formas de onda del interruptor de la figura 6.20 se presentan cuando se tiene al receptor alejado. Cuando el cargador (receptor) se aproxima y se empieza a recargar la batería, el circuito presenta una ligera de-sintonización ocasionada por el aumento de la inductancia a 108  $\mu\text{H}$ , figura 6.21. A pesar de esto, se considera que la transición

simultánea entre voltaje y corriente, así como las pérdidas de potencia en conmutación son despreciables.



**Figura 6. 21 Voltaje y corriente en el transistor al momento de acercar la parte receptora (cargador)**

El voltaje de transmisión y recepción se muestran en la figura 6.22. El voltaje pico a pico del devanado primario se encontró de **72 volts**, mientras que el voltaje pico a pico del devanado secundario se encontró de **37 volts**. Esto significa que solo el 51% se transmitió del devanado primario al secundario.

El voltaje y la corriente en el devanado primario se muestran en la figura 6.23. La corriente presenta un valor pico a pico de **1.18 Amperes**.

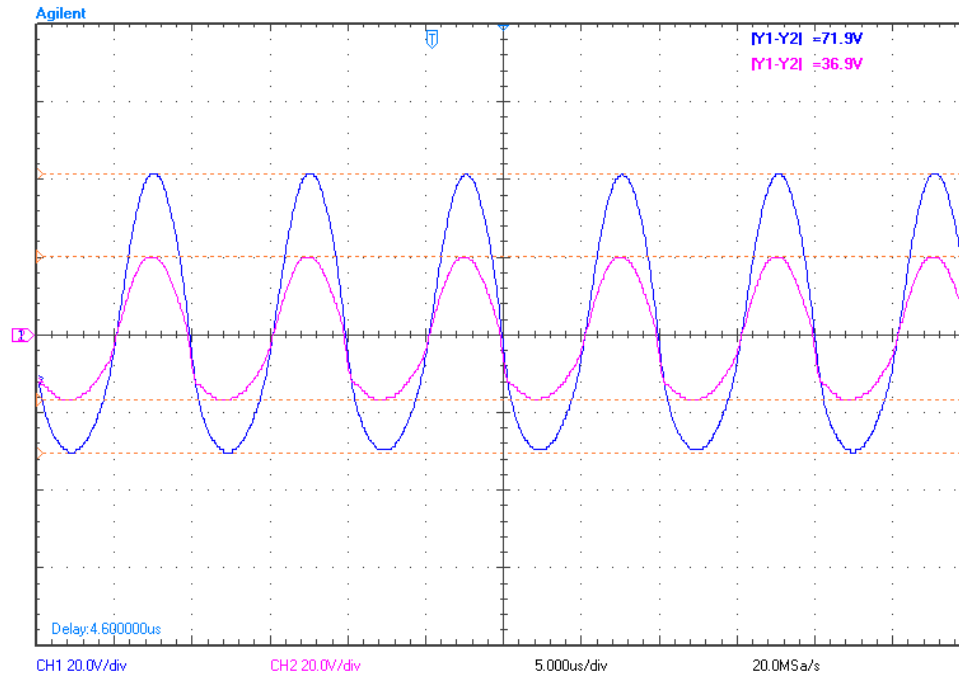


Figura 6. 22 Voltaje en el devanado primario y secundario para el circuito de la figura 6.19

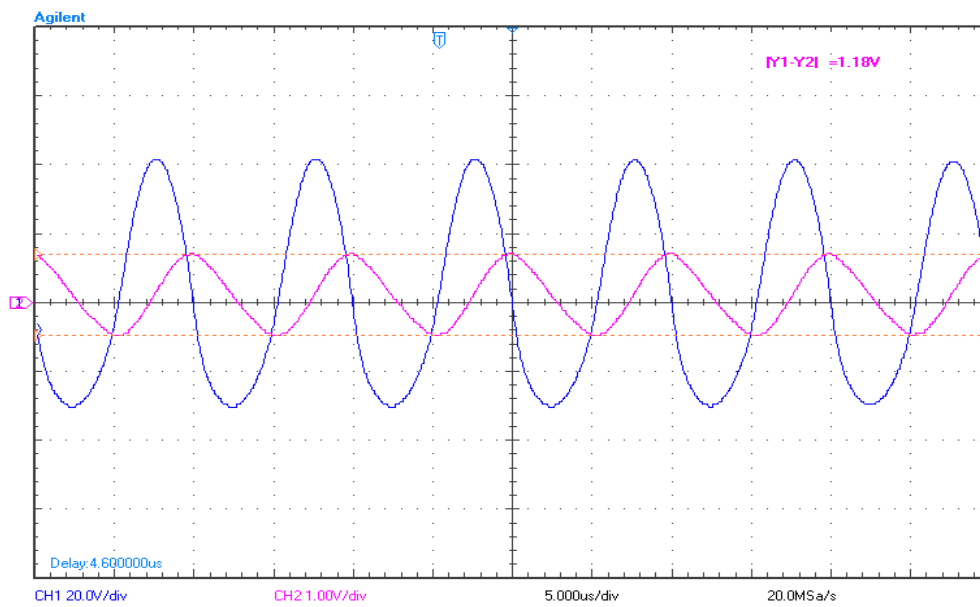


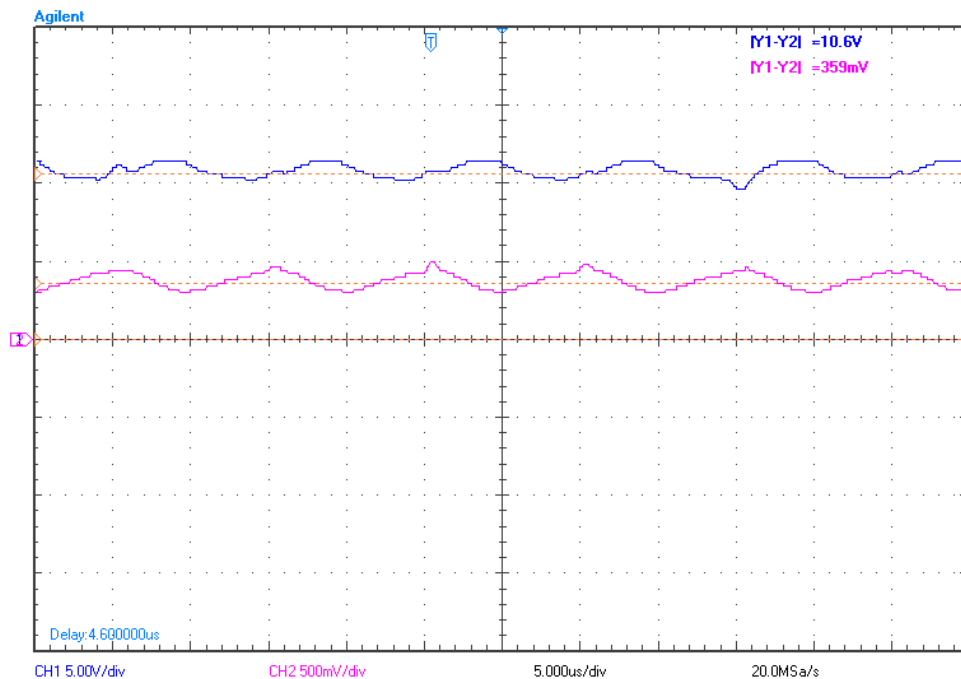
Figura 6. 23 Voltaje y corriente en el devanado primario de la figura 6.19

El voltaje y la corriente de entrada se muestran en la figura 6.24, con un valor de **10 volts** y **0.360 A** respectivamente. La potencia de entrada es de 3.6 watts.

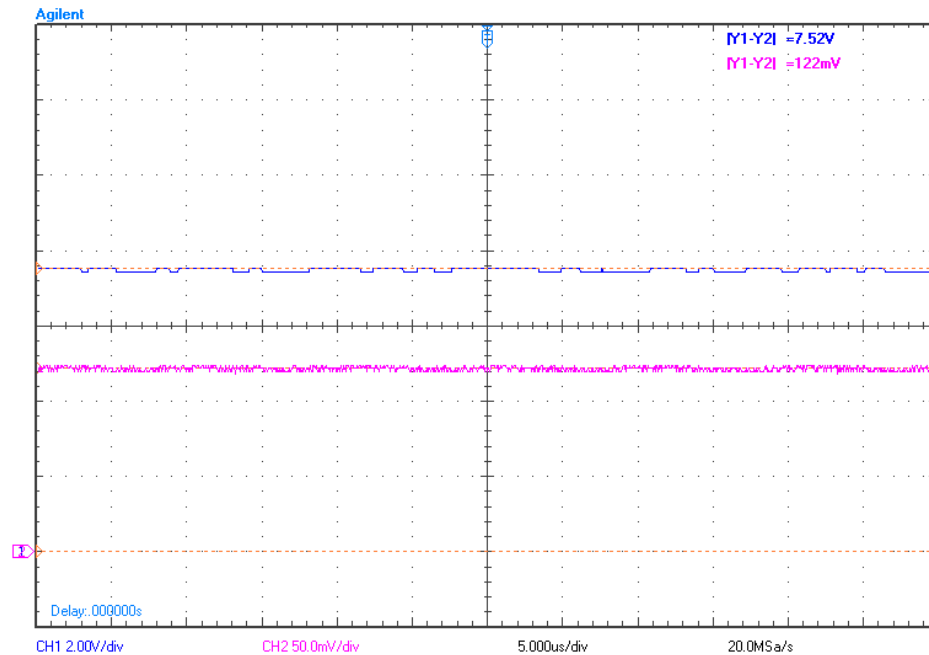


El voltaje y la corriente del cargador se muestran en la figura 6.25, con un valor de **7.5 volts** y **122 mA** respectivamente. Esta corriente representa 0.6 C. La potencia de carga es de 0.915 watts.

La carga de la batería se realizó durante aproximadamente 2 horas y media. Durante las dos primeras horas, la corriente de carga fue de 120 mA aproximadamente. La última media hora se observó que la corriente disminuyó hasta 100 mA, lo cual corresponde a 0.5C. El voltaje del cargador disminuyó de 7.5 volts a 6.5 volts aproximadamente.



**Figura 6. 24 Voltaje y corriente de entrada**



**Figura 6. 25 Voltaje y corriente de carga**

Se implementó un circuito resonante que se encuentra sintonizado cuando la parte receptora (cargador) se encuentra alejada, figura 6.19. Esto con el fin de evitar que el convertidor Clase E, al no tener en la cercanía al cargador, presentara un comportamiento que dañara a los elementos del circuito. Al acercar la parte receptora al circuito emisor, el voltaje y la corriente en el transistor de la figura 6.21 nos indican una ligera desintonización. A pesar de esto, se observa que la transición simultánea entre voltaje y corriente tiene un valor pequeño y es de corta duración.

### 6.3. Prototipo del cargador de batería

El teléfono celular utilizado para la presente tesis se muestra en la figura 6.26. Este teléfono requiere de una base la cual recibe la alimentación del cargador para posteriormente alimentar a la batería. En la figura 6.26b se muestra el receptor de energía en la parte posterior de la base del teléfono celular.



Figura 6. 26 (a) Teléfono celular con base. (b) Parte posterior con circuito receptor de energía.

El circuito de la figura 6.19 se implementó y se construyó el circuito impreso del mismo. El prototipo realizado se muestra en la figura 6.27 en la cual se enmarcan los distintos bloques del modelo propuesto de transmisión de energía de la figura I.1.

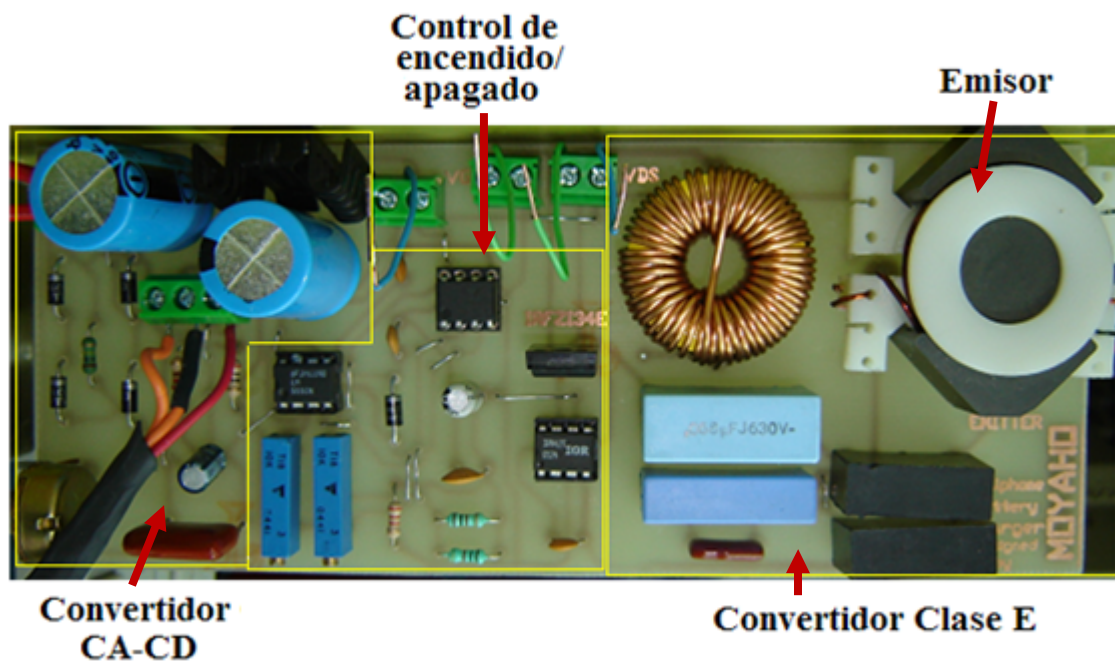


Figura 6. 27 Prototipo del circuito emisor de energía

En la figura 6.28 se muestra el momento en el que el teléfono celular, junto con la base, se encuentran en la proximidad del cargador.



Figura 6. 28 Teléfono celular y base cerca del circuito emisor de energía

En la figura 6.29 se muestran las dos mitades alejadas y a 5 mm de separación, cuya distancia es la óptima para realizar la carga de la batería.

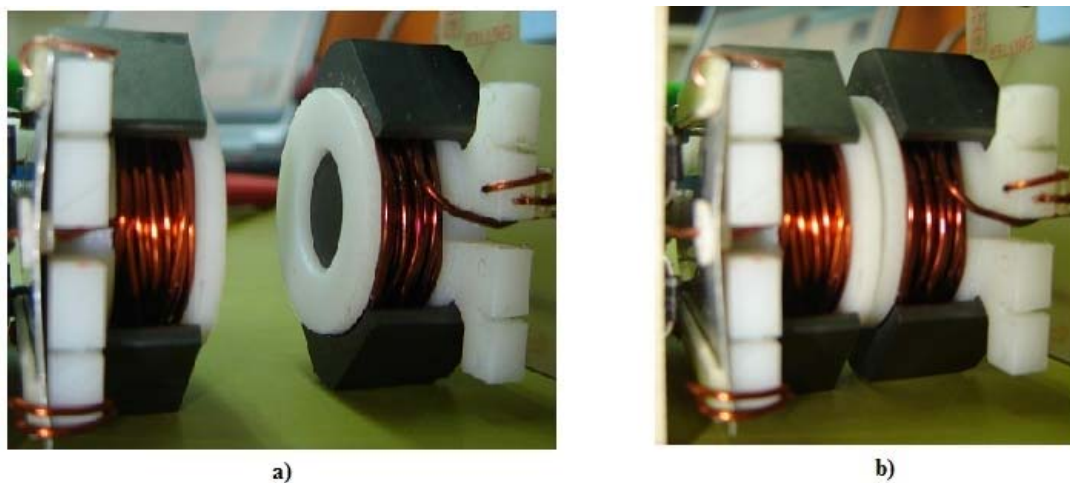


Figura 6. 29 (a) Mitad receptora alejada de la mitad emisora. (b) Ambas mitades unidas. Entrehierro = 5mm.

Con el prototipo desarrollado de la figura 6.27 se realizó la carga de la batería del teléfono celular tal como se indica en la figura 6.28. Se realizó la carga a 5 mm de separación y se obtuvieron los resultados mostrados en la sección 6.2. Esta distancia de transmisión se le consideró la óptima para la carga de la batería a 0.6C en aproximadamente 2 horas y media.

Posteriormente se alejó el teléfono celular del circuito emisor y se observó que a 1.5 cm de separación la red resonante del circuito emisor (Clase E) se comporta de manera sintonizada, figura 6.20. Esto se debe a que a esta distancia, las mitades de los núcleos ya no afectan el valor de la inductancia de cada devanado, sin embargo, siguen interactuando porque la batería del teléfono celular continuó cargándose con una corriente de 6 mA aproximadamente. Esta disminución en la corriente se debe al poco voltaje inducido en el devanado secundario. La carga de la batería del teléfono celular se comprueba por medio de la leyenda “charging” mostrada en la pantalla del teléfono, tal como lo indica la figura 6.30.



**Figura 6. 30 Estado del teléfono celular mostrando la carga de la batería**

Una vez superada la distancia de 1.5 cm, el teléfono celular ya no recibe suficiente potencia para realizar la carga de la batería.