

---

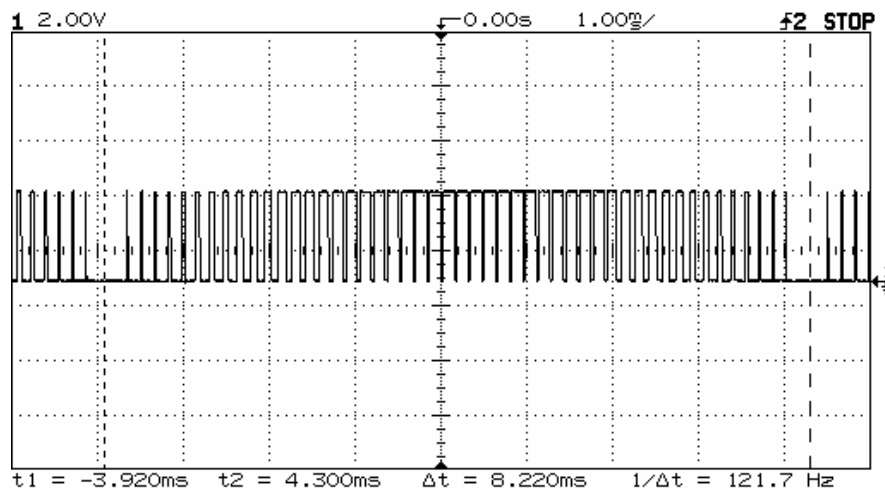
## CAPÍTULO V. PRUEBAS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

### 5.1. Introducción.

En este capítulo se analiza la parte experimental del proyecto, que incluye los resultados reales obtenidos del sistema, las pruebas realizadas y los análisis complementarios. Todo esto, con el fin de mostrar los objetivos logrados mediante este proyecto de tesis.

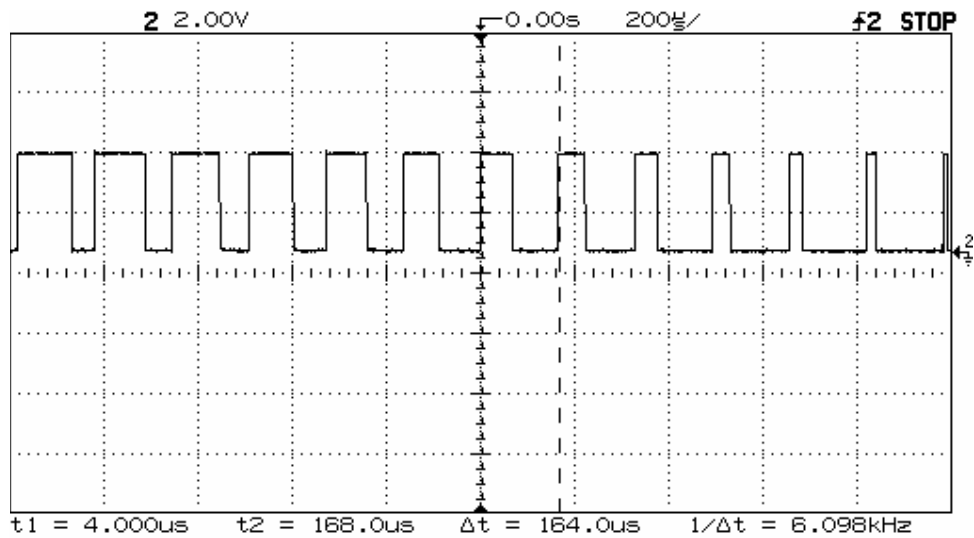
### 5.2. Generación de PWM en FPGA.

Los resultados de la generación de PWM mediante el FPGA se pueden observar en la figura 5.1., que muestra la señal PWM1 de salida del FPGA donde claramente se distinguen las variaciones en el ciclo de trabajo de la señal. Los parámetros de esta señal están ajustados para obtener una señal senoidal de salida con aproximadamente 60 Hz en frecuencia y 19 V en amplitud.



a) Ciclo de señal PWM

Figura 5.1. Señal PWM de salida del FPGA



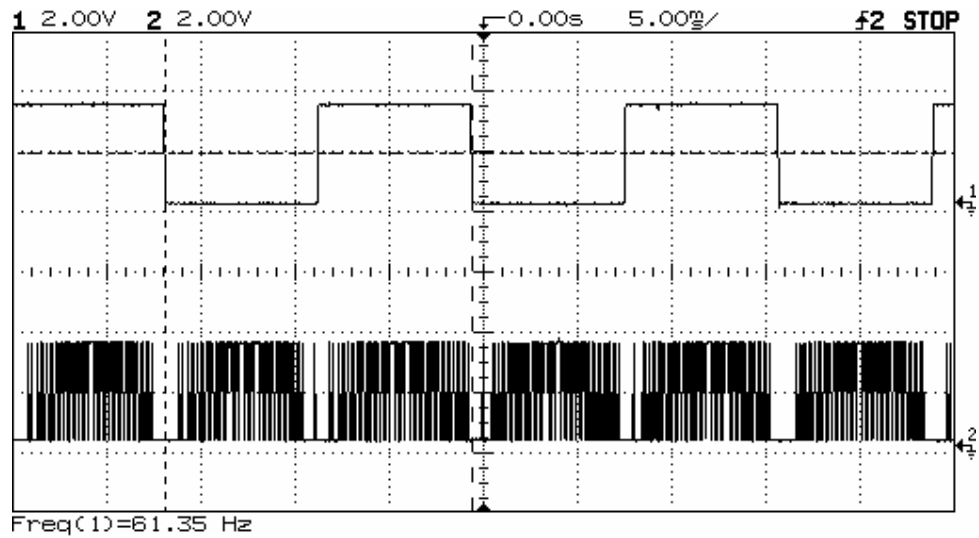
### b) Variaciones del ciclo de trabajo

**Figura 5.1.** Señal PWM de salida del FPGA (Continuación).

Las variaciones en el ciclo de trabajo son directamente proporcionales a los valores de la senoidal, esto se comprueba porque una función senoidal va creciendo hasta llegar a un punto máximo y luego decrece. Y al generar el PWM se observa el mismo comportamiento en el ciclo de trabajo de la señal.

Ahora bien, otra señal que se generó mediante el FPGA fue la de dirección, que permite cambiar la polaridad de la senoidal rectificadora a través del inversor (Puente H), convirtiéndola en una senoidal completa, sin rectificación.

Esta señal de dirección mostrada en la figura 5.2., junto con el PWM, es una señal cuadrada que va de 0 a 3 V aproximadamente. Y cuya frecuencia es la que determina la frecuencia de la señal senoidal de salida.

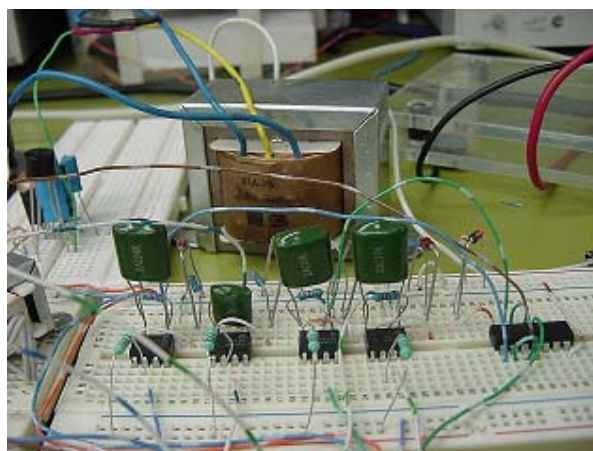


**Figura 5.2.** Señal de dirección y PWM.

### 5.3. Circuito de protección.

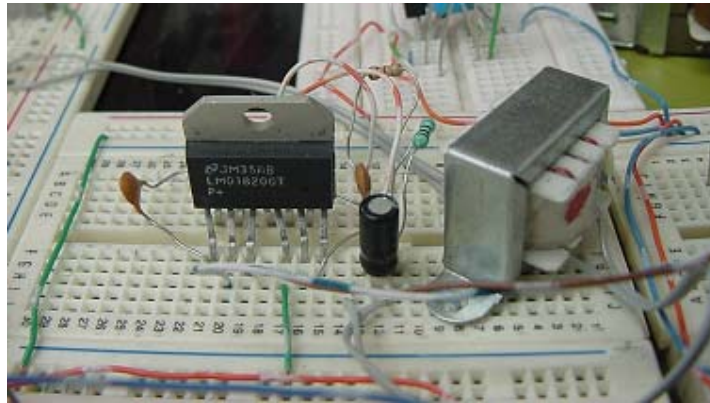
Como se mencionó en los capítulos anteriores, ya que en la práctica el dispositivo se vio afectado por la etapa de potencia fue indispensable aislar las entradas, salidas y la alimentación del FPGA. Esto se hizo mediante el uso de optoacopladores, transformadores y una fuente independiente de alimentación a la etapa de potencia.

La imagen del circuito de protección incluidos los optoacopladores y la fuente regulada independiente de 12 V (ver pag. 32) se muestra en la figura 5.3.



**Figura 5.3.** Circuito de protección con optoacopladores y fuente independiente.

La figura 5.4. muestra la imagen del circuito de salida del puente H y del filtro con el transformador de salida, completando así el aislamiento del circuito de potencia.



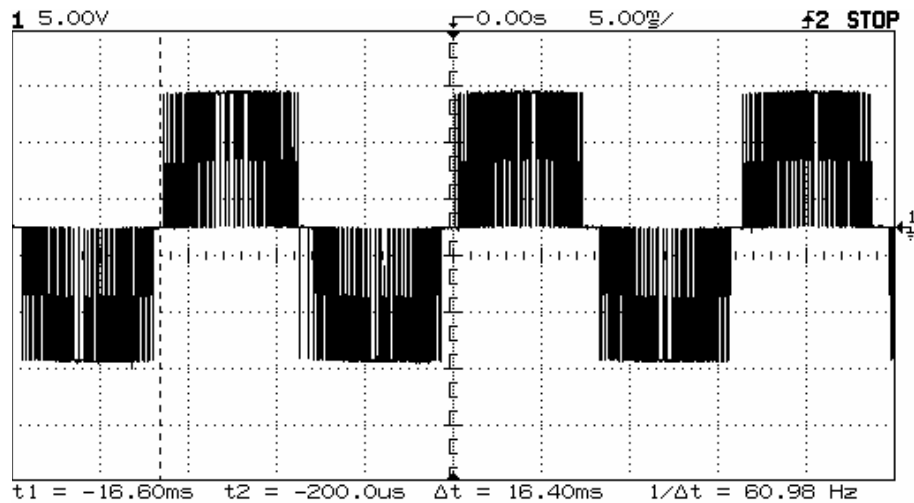
**Figura 5.4.** Circuito de protección con transformador

El diagrama eléctrico de conexiones de los circuitos que se muestran en las figuras 5.3 y 5.4 se encuentran en la figura 3.5.b.

#### **5.4. Inversor (Puente H).**

La configuración y conexiones del circuito inversor LMD 18200T se analizó en capítulos anteriores (ver Pág. 31 y 32). En los resultados ahora de lo práctico tenemos como entradas al inversor la señal de PWM y la señal de dirección que conforme cambia de 0 a 5 volts , va modificando la polaridad de la señal de entrada, en este caso la del PWM. Ambas señales de entrada al inversor se pueden observar en la figura 5.2.

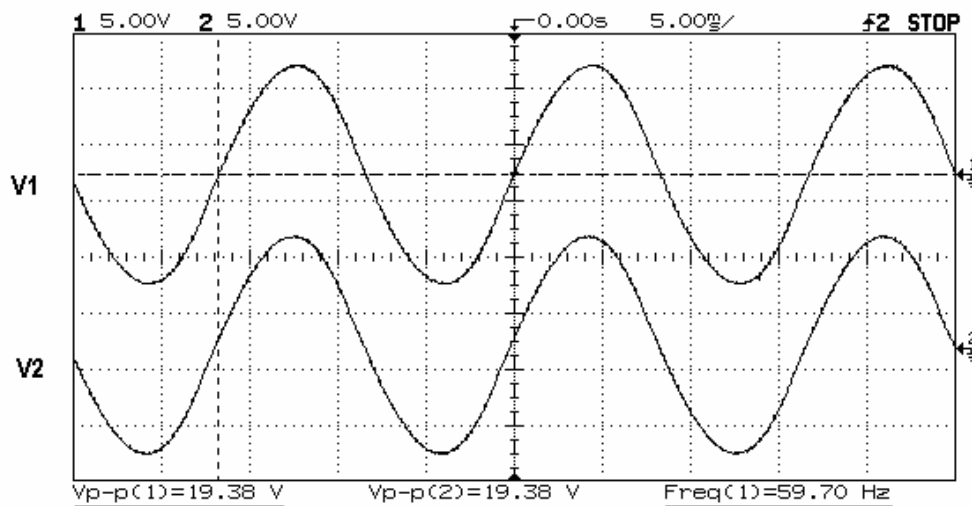
Por lo tanto, la salida del inversor es el mismo PWM pero con semiciclos positivos y negativos como lo muestra el figura 5.5.



**Figura 5.5.** Salida del Puente H.

Por otra parte, al igual que para el inversor el diseño y simulación de la etapa de filtrado se describió en los capítulos anteriores (ver Pág. 40). Por esta razón, en este apartado se analiza solamente la respuesta real del filtro, cuya entrada es la salida del puente H.

La figura 5.6. permite observar las dos señales de salida de su filtro respectivo. Estas señales ya son senoidales debido a que el filtro pasabajas RC ha demodulado ya la señal eliminando la señal cuadrada de PWM.



**Figura 5.6.** Salida del Filtro pasabajas RC.

Esta salida corresponde ya a la salida general del sistema, cuyo objetivo futuro será ser conectada al instrumento digital (con su acondicionamiento adecuado) para calibrarlo con el sistema completo (proyecto que se puede realizar en el futuro), descrito en la introducción.

### 5.5. Pruebas realizadas al Sistema

Lo interesante en el diseño y la implementación de este proyecto es que los parámetros como el índice del divisor de frecuencia (**N**), la amplitud de las señales (**V1** y **V2**) y el ángulo de desfase entre ambas señales (**A**) pueden ser manipulados por el usuario.

Por lo tanto, las pruebas hechas al sistema constan de analizar la respuesta del sistema completo a las variaciones de estos parámetros.

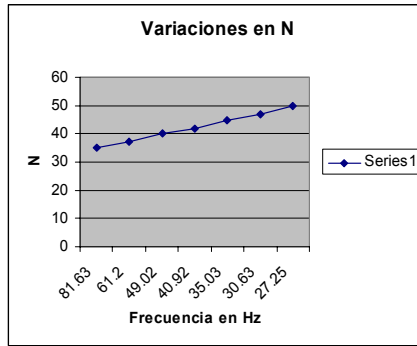
El primer parámetro es **N** y la tabla 5.1 muestra la respuesta del sistema ante estas variaciones:

<b>N</b>	<b>Frecuencia en Hz</b>
35	69.93
37	66.23
40	61.2
42	58.14
45	54.35
47	52.08
50	49.02

**Tabla 5.1.** Relación entre variaciones en N con la Frecuencia

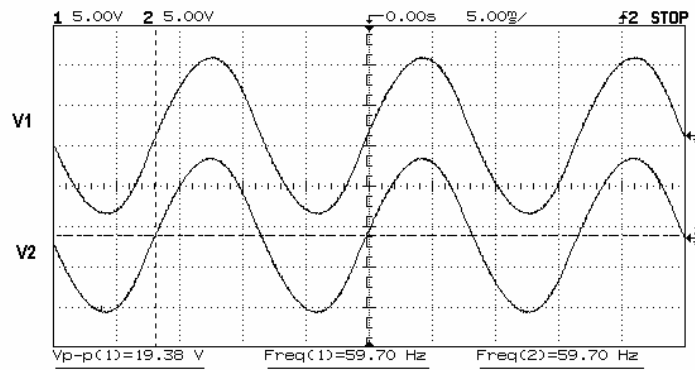
Como se puede observar, los valores que se obtuvieron de prueba se encuentran en un rango de 50Hz a 70 Hz ya que es el rango en el que se desea que la fuente tenga su funcionamiento correcto.

Por otro lado, la tabla 5.1. permite observar que la respuesta de la frecuencia ante los cambios de N es relativamente lineal. Como lo muestra su gráfica:

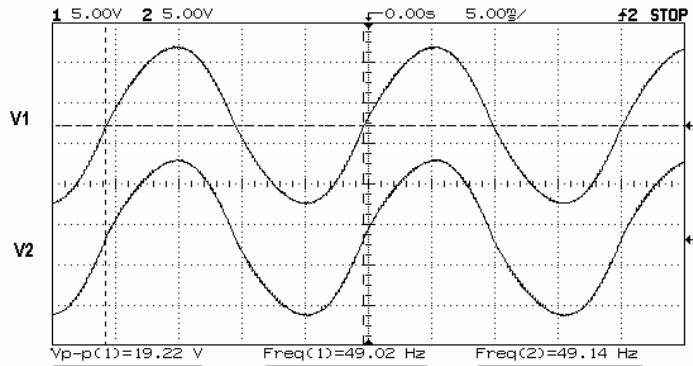


**Figura 5.7.** Grafica de Variaciones en N

Por otro lado, la figura 5.7. muestra algunas imágenes con valores de N variados que nos permiten notar como la frecuencia de las señales de salida cambia al modificar su valor.



**a)** con N= 41



**b)** con N = 50

**Figura 5.8.** Respuesta del Sistema al variar N.

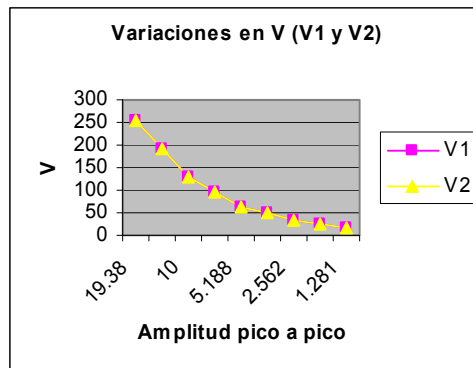
Las figura 5.8.a. nos muestra las señales senoidales de salida cuando el parámetro N es de 41, este valor permite que la señal de salida modifique su frecuencia a 59.70Hz. La figura 5.8.b. muestra de nuevo ambas señales de salida, sin embargo el parámetro N ha sido modificado por un valor de 50 lo que permite que las señales de salida cambien su frecuencia a 49Hz, aproximadamente. Estas figuras demuestran el funcionamiento casi lineal de las variaciones en frecuencia del sistema.

Ahora bien, la respuesta a las variaciones de V se pueden observar con la modificación de la amplitud de las señales. La tabla 5.2. permite analizar la relación de V con los voltajes de ambas señales.

V	Voltaje 1	Voltaje 2
255	19.38	19.38
192	15	14.84
128	10.16	10
96	7.812	7.655
64	5.250	5.188
48	3.938	3.812
32	2.688	2.562
24	2.094	1.93
16	1.406	1.281

**Tabla 5.2.** Relación entre V y los voltajes de salida V1 y V2

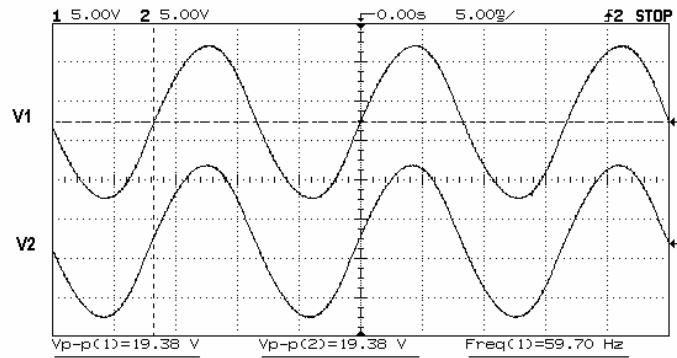
La relación entre V y las amplitudes de las señales demuestran que tiende a ser un poco exponencial. La gráfica muestra el comportamiento de las variaciones en V para cada señal:



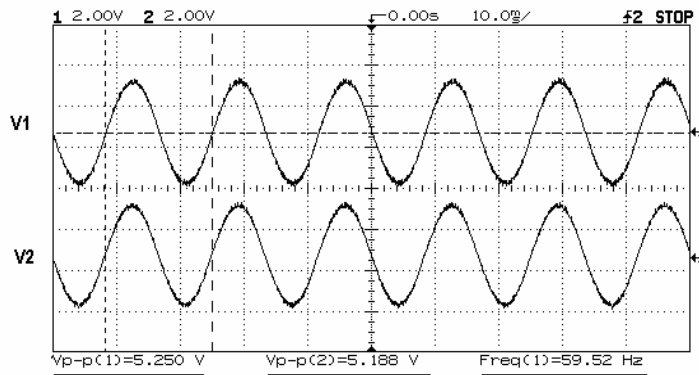
**Figura 5.9.** Gráfica de variaciones en V1 y V2



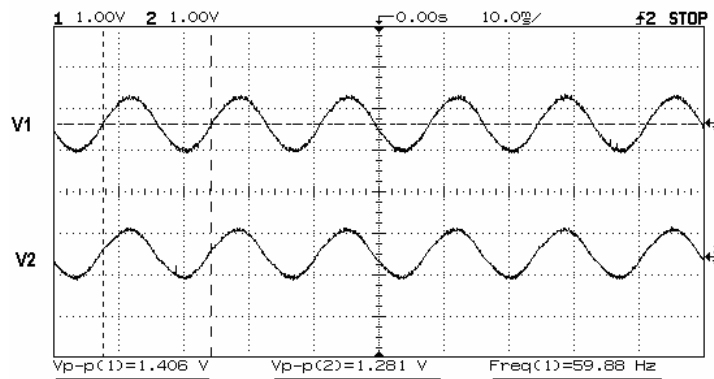
Por otro lado, la figura 5.10. muestra las imágenes obtenidas mediante el osciloscopio de las salidas del sistema al variar el factor  $V$ .



a) con  $V = 255$  para ambas señales



b) con  $V = 64$  para ambas señales



c) con  $V = 16$  para ambas señales

**Figura 5.10.** Respuesta del Sistema al variar  $V$

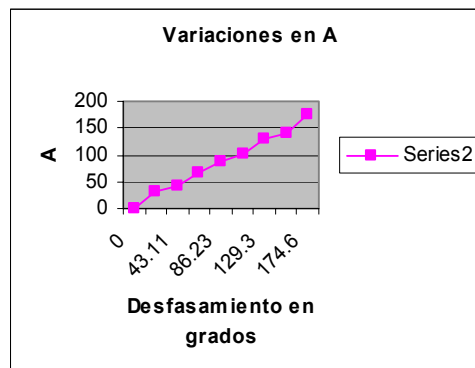
Las imágenes demuestran que al reducir la amplitud de la señal es más perceptible el cambio que hay de voltaje de una muestra a otra, produciéndose un pequeño rizo en la línea de la senoidal. En cada imagen de la figura 5.10. se ha variado el valor de V y estas variaciones se reflejan en la amplitud de las señales, valores que se encuentran subrayados en la parte inferior de cada imagen.

Por último se analiza la respuesta a las modificaciones en el ángulo de fase de las señales. La tabla 5.3. muestra los valores de desfase correspondientes a un valor de A.

A	Desfasamiento (°)
1	0
10	30.18
12	43.11
20	67.70
25	86.23
30	103.2
37	129.3
40	140.7
50	174.6

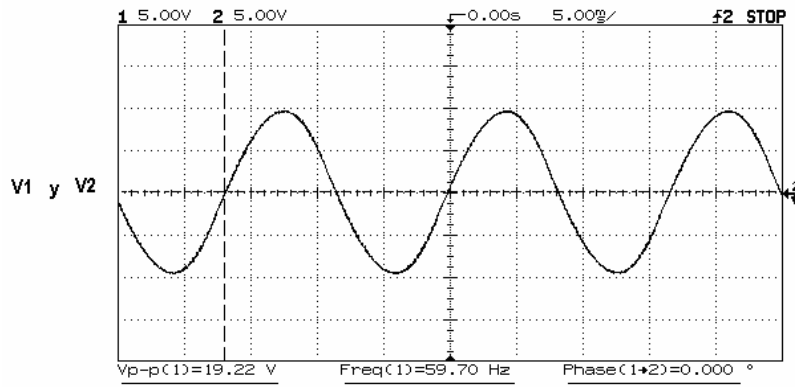
**Tabla 5.3.** Relación entre A y el desfase de las señales

En los valores intermedios se observa que el desfase entre ambas señales tiende a ser lineal pero con ciertas variaciones en los extremos. La figura 5.11 con la gráfica demuestra la relación anterior mostrada en la tabla.

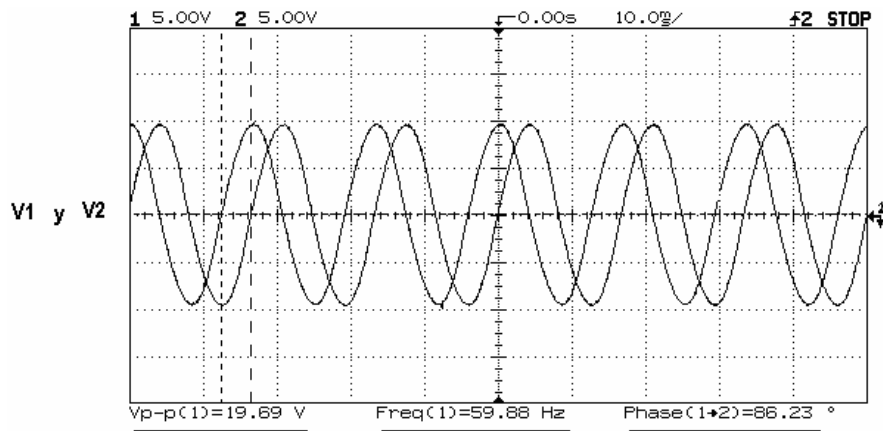


**Figura 5.11.** Gráfica de variaciones en A

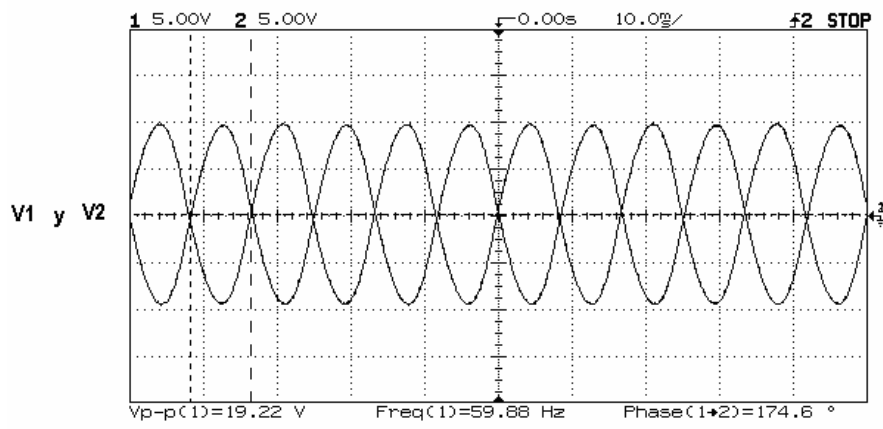
Las imágenes correspondientes a las variaciones de fase de muestran en la figura 5.12.



a) con  $A = 1$



b) con  $A = 25$

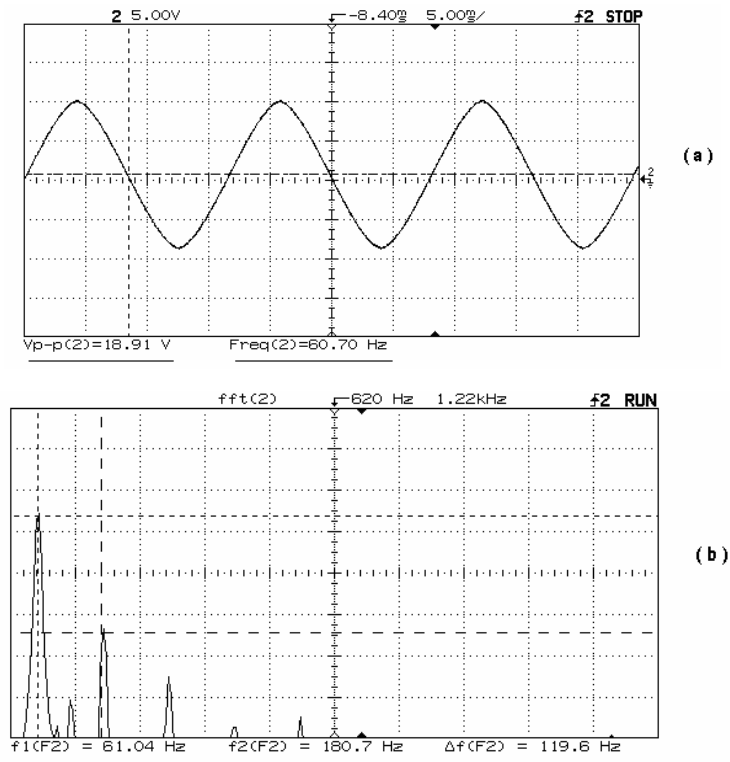


c) con  $A = 50$

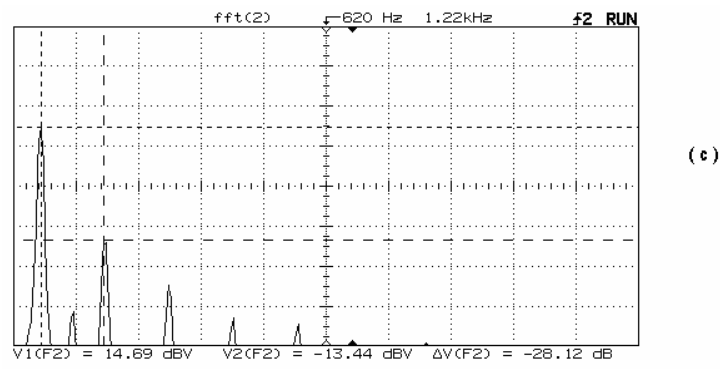
**Figura 5.12.** Respuesta del Sistema al variar A.(Continuación)

En cada una de las gráficas se va observando como el desfaseamiento se va haciendo mayor a medida que el valor de A aumenta. El máximo valor posible de desfaseamiento teóricamente son  $180^\circ$  con un valor de  $A=50$ . Sin embargo, la figura 5.12.c muestra que en la práctica cuando  $A=50$  el desfaseamiento entre las señales es de  $174^\circ$  aproximadamente, esta variación no lineal también se puede observar en la gráfica de la figura 5.11.

Ahora bien, una prueba indispensable para afirmar que estas señales son senoidales es obtener su transformada de Fourier (T.F.), esto se puede definir mediante el comportamiento de los armónicos obtenidos. Las siguientes imágenes de la figura 5.13 muestran la Transformada de Fourier de una señal senoidal obtenida mediante un generador de Funciones Wavetek, esto se hace con el fin de hacer una comparación con las transformadas de Fourier de las señales generadas con el sistema propuesto.



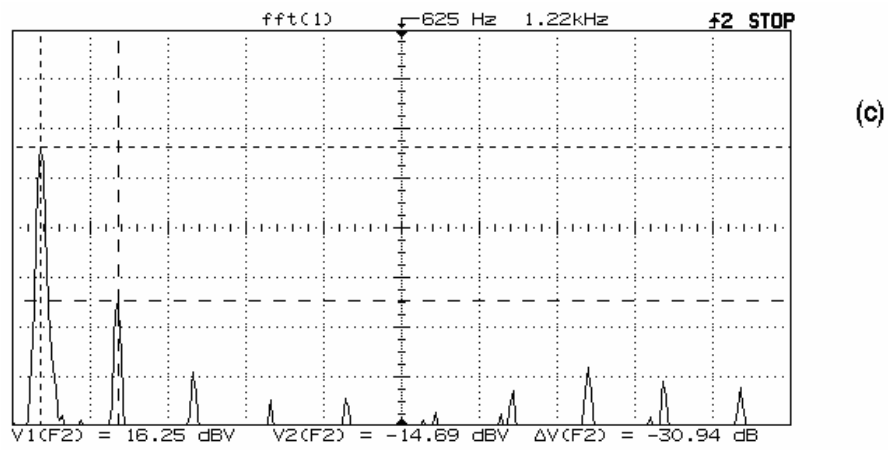
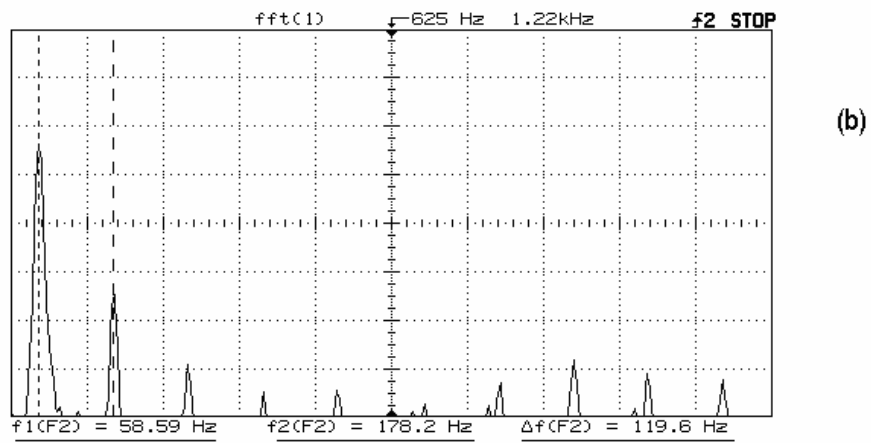
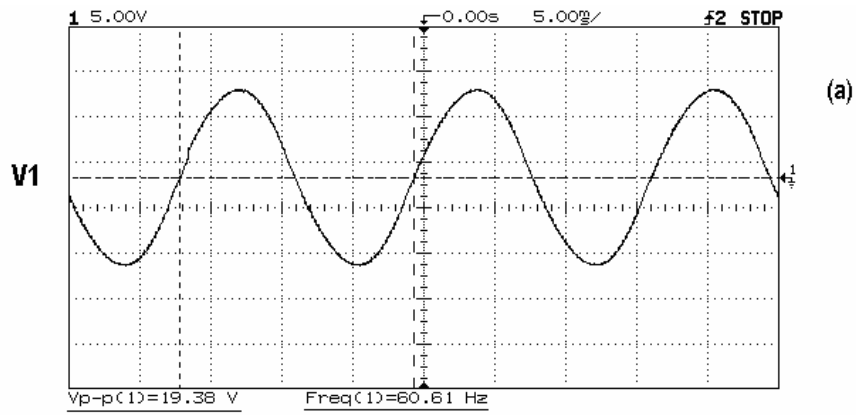
**Figura 5.13.** Transformada de Fourier de la señal senoidal obtenida del generador de funciones Wavetek



**Figura 5.13.** Transformada de Fourier de la señal senoidal obtenida del generador de funciones Wavetek. (Continuación)

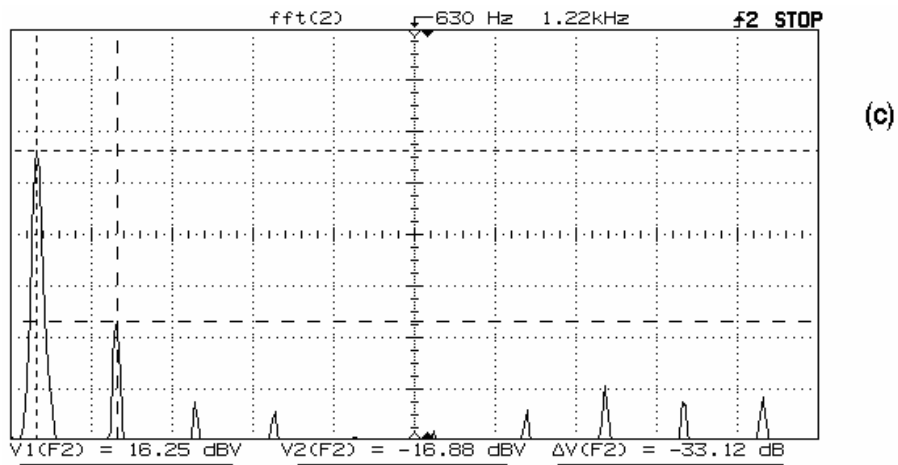
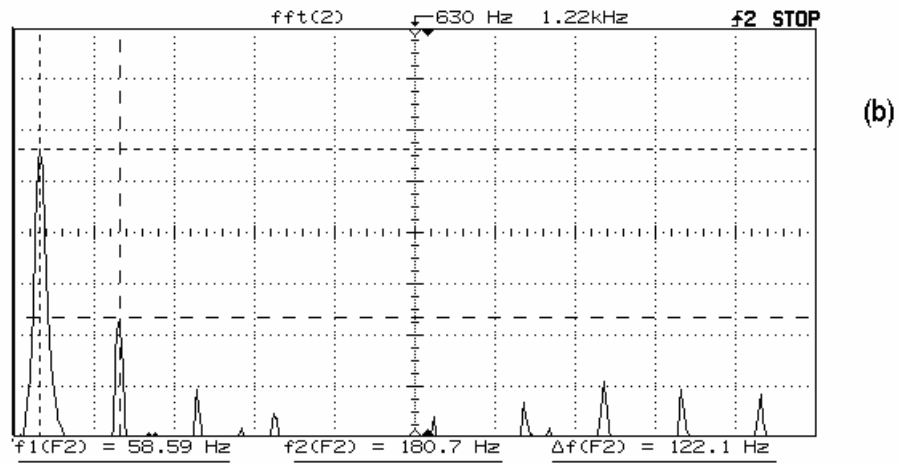
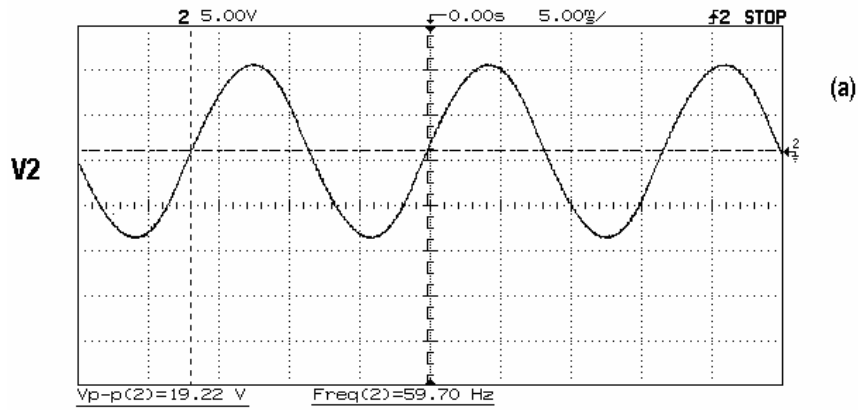
La gráfica de la transformada de Fourier de la señal senoidal obtenida del generador de funciones muestra la componente fundamental en una frecuencia de 61.04 Hz, lo cual es correcto de acuerdo con la frecuencia de la señal (figura 5.13.a.). Por otro lado, la amplitud de la fundamental es de 14.69 dB mientras que las demás componentes armónicas son de amplitud tan pequeña que pudieran despreciarse sin afectar demasiado a señal, por ejemplo, la segunda armónica que tiene una amplitud de -13.44 dB.

Ahora bien, las imágenes de la figura 5.14. nos permiten hacer una comparación entre las características de la T.F. de la señal senoidal anterior (figura 5.13), la cual se utiliza constantemente como señal de prueba para diversos circuitos dentro del laboratorio de electrónica, y las señales generadas mediante el sistema diseñado en este proyecto.



a) Señal 1

Figura 5.14. Transformada de Fourier de las señales de salida del sistema



b) Señal 2

Figura 5.14. Transformada de Fourier de las señales de salida del sistema

(Continuación)

Al analizar las dos transformadas de Fourier se puede notar que su comportamiento muy similar al de la señal senoidal de generador de funciones. Se dice esto, porque ambas transformadas contienen un componente fundamental cuya amplitud es muy grande (de 16 dB aproximadamente) comparada con sus componentes armónicos como se observan los valores de amplitud en la parte inferior de las figuras 5.14.a (c) y b.(c), de igual forma que la transformada de la senoidal del generador. Por otra parte, la frecuencia de la componente fundamental se encuentra a 60 Hz aproximadamente y este resultado es correcto porque la frecuencia de la señal es de 60 Hz. Por lo tanto por los resultados anteriores se puede afirmar que las señales generadas por el sistema propuesto sí se comportan como señales senoidales.

Ahora bien, otro parámetro que se obtuvo al hacer el análisis espectral es el THD, que indica la distorsión armónica total. Este análisis se hizo con la ayuda del analizador de espectro y los resultados fueron los siguientes:

Para la señal 1      THD = 2.36 %

Para la señal 2      THD = 2.97 %

Estos resultados nos indican que aunque no existe en la práctica una senoidal pura, las señales que se tienen tienden a tener muy poca distorsión lo que las acerca más a una senoidal pura.

Por lo tanto, podemos concluir que las pruebas realizadas y los resultados obtenidos demuestran el funcionamiento de la Fuente de Voltaje Programable propuesta en esta tesis. Que corresponde a una fuente que genera dos señales senoidales modificables en amplitud, frecuencia y fase. Estas modificaciones puede hacerlas el usuario de manera sencilla por medio de la computadora.