



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

“DISEÑO DE UN GENERADOR DE FUNCIONES”

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO  
(MÓDULO CONTROL Y ROBÓTICA)

PRESENTA:

**HIRATA HERNÁNDEZ KENJI DANIEL**

Director de Tesis:

M.I. Miguel Ángel Bañuelos Saucedo

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D.F. 2010



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Agradecimientos

Primero que nadie, tengo que agradecer a mis padres Adrian Hirata Iwasaki y Rosaura Hernandez Monroy: por siempre haberme apoyado a lo largo de mi vida en mis proyectos, por soportarme por tanto tiempo, que he de admitir es una tarea titánica, por reprenderme siempre que es y será necesario, por todos los caprichos que me cumplieron, por todos los conocimientos que me brindaron, su gran tarea como padres y por supuesto su gran amor que siempre me han mostrado.

A la UNAM que me otorgó una gran formación técnica, científica y humana, ofreciendo siempre una gran variedad de actividades académicas, culturales y deportivas, entre tantas que permiten el desarrollo de México como un país más completo.

Al CCADET que me ofreció la oportunidad de realizar este trabajo de tesis dentro de sus instalaciones, así como a mi director de tesis Miguel Ángel Bañuelos por su apoyo, tutela y dirección a lo largo de este periodo. Sin olvidar, a los maestros dentro del laboratorio: Sergio Quintana, José Castillo y Ricardo Damián a los que siempre pude recurrir por consejo, asesoría, y siempre aportaron humor al laboratorio. De la misma manera agradezco a Gabriel y Carlos que me ayudaron a realizar este proyecto.

También tengo que agradecer a mis amigos por estar conmigo en los momentos alegres y amargos de mi vida; todos ustedes son muy importantes para mí, pero los intentaré agrupar esperando que esto no ofenda a ninguno, ni les de una idea equivocada.

Harus, Aemi, Midori, Pepe, Tato, Danny, Akira, Haydee y Mario, gracias porque aun siendo familia, siempre me han mostrado que son grandes amigos, siempre estando dispuestos a ayudarme en cualquier situación, o salir de fiesta. Es genial tenerlos en mi vida. Por supuesto, agradezco también a todos mis tíos, que también sé que siempre han estado con ayuda o chistes, para mejorar las cosas.

Pancito, Kino, Armi, Confi y Yañez, ustedes me han aportado la porción de diversidad que considero tan importante en mí. Siempre teniendo ideas locas y divertidas, hemos pasado grandes momentos juntos; mostrándome que la mejor forma de ver las cosas malas es con ironía y una sonrisa en la cara.

Martha, Polo y Minel, gracias por siempre ayudarme a regresar a la sensatez, mostrarme el camino más conveniente en mi vida, y todas las veces que me han soportado en mis mala-copas y desfiguros. Siempre estando para ofrecer un sabio consejo.

Rorro, Cabe, Jerry, Elis y Puchis, gracias por siempre ser el mal ejemplo tan divertido en mi vida. Todas las aventuras que hemos vivido son irreemplazables. Gracias por todas las veces que en han cuidado en estado inconveniente.

Fercho, Mariana, Viv, Quiroz, Arturin, Cesar, Stef, Eros y Nando. Gracias por siempre haberme hecho más amena mi estancia en la Facultad, dándome siempre una gran amistad y aceptando a hacer tonterías y ocurrencias conmigo.

Y al final, pero no última a Stephanie, por todo su apoyo, por siempre haberme apurado, y tantas cosas que agradecerle...

No me imagino mi vida sin alguno de todos ustedes, forman una gran parte de mí, no encuentro una mejor forma de agradecerlos, pero sepan que siempre podrán encontrar en mí un amigo dispuesto a ayudar. Gracias.

# Índice general

Agradecimientos	
Introducción	3
I. Problemática y objetivo	
1.1. Problemática	5
1.2. Objetivo	5
1.3. Análisis del problema	6
II. Antecedentes	
2.1. Generadores de señales	8
2.1.1. Generadores de funciones	9
2.2. Generación de onda	10
2.3. Dispositivos lógicos programables	12
2.4. Distorsión armónica total	14
III. Diseño	
3.1. Selección del generador	16
3.2. Selección de frecuencias	24
3.3. Etapa lógica	28
3.4. Etapa de amplificación	35
3.5. Etapa de alimentación	40
3.6. Construcción	41
IV. Pruebas	
4.1. Señal sinusoidal	48
4.1.1. THD	50
4.2. Señal cuadrada	53
4.3. Señal triangular	56
Conclusiones	59
Bibliografía	61

## Introducción

Un generador de señales es uno de los instrumentos más importantes y versátiles utilizados para prueba de equipos electrónicos. Durante el diseño electrónico y la solución de problemas de un circuito, a menudo se requiere una señal controlable para estimular su operación. Las pruebas de sistemas físicos y transductores requieren de igual manera de señales confiables y estables. Siendo requeridas dependiendo de la aplicación distintas amplitudes de voltaje, desde microVolts hasta decenas de Volts.

Los principales usos de este tipo de equipos son:

- Investigación y desarrollo
- Fines didácticos
- Reparación de equipo eléctrico y electrónico
- Pruebas de estímulo-respuesta
- Caracterización de respuesta en frecuencia
- Pruebas de linealidad

El generador de funciones es un instrumento que ha tenido un gran desarrollo durante los últimos sesenta años, en los cuales a partir de su surgimiento ha evolucionando enormemente en términos de desempeño, precisión y facilidad de uso.

Iniciando su haber como dispositivos de veinte kilogramos, basados en bulbos en los años cincuenta, pudieron dar su primer paso evolutivo en 1965, gracias a la inclusión de los transistores. Permitiendo en los años subsecuentes una reducción notable en las dimensiones de los generadores de funciones.

Después tuvieron otro importante avance al hacerlos basados en tecnologías digitales, gracias a mejores convertidores digital-analógico y elementos digitales mucho más veloces, logrando hoy en día una gran versatilidad en este tipo de dispositivos.

En el primer capítulo de esta tesis podemos encontrar las motivaciones por las que se decidió realizar el diseño de un generador de funciones de estas características, así como los objetivos que se buscan en este generador de señales.

En el segundo capítulo se muestran algunos conceptos básicos de los generadores de funciones y su clasificación dentro de los generadores de señales. Por otra parte, en este capítulo podemos encontrar algunos de los conceptos básicos necesarios para comprender el diseño del generador del que es objeto esta tesis, tales como los dispositivos lógico programables que son utilizados en la etapa lógica del generador de funciones.

El tercer capítulo contiene todo el diseño del generador de funciones, dividido en bloques funcionales de: generación de onda, selección de frecuencias, etapa lógica, etapa de amplificación y etapa de alimentación. Finalmente en este capítulo se dan las especificaciones necesarias para la construcción de este generador de funciones, aquí también se adjunta la lista de componentes con su precio.

En el cuarto capítulo se ponen las pruebas realizadas al generador de funciones, de sus formas de onda y características. También aquí se incluyen las consideraciones necesarias para poner a punto el generador de funciones.

## Capítulo I

### Problemática y objetivo

#### 1. 1. Problemática

El amplio uso de los generadores de funciones en el ámbito académico, así como en el desarrollo y prueba de equipos electrónicos, lo convierten en un equipo esencial para cualquier laboratorio de electrónica.

Como cualquier otro equipo, éste y sus componentes son susceptibles al desgaste, lo que puede desembocar en una descompostura, pero las reparaciones en éstos no resultan una tarea trivial. Por lo que la facilidad de la reparación en caso de un fallo resulta un tema relevante.

Partiendo de esto, el laboratorio de electrónica en el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) considera importante el desarrollo de un generador de funciones que ofrezca prestaciones similares a las de un generador comercial y que a su vez resulte más económico de adquirir y reparar.

#### 1.2 Objetivo

El objetivo de esta tesis es diseñar un generador de funciones, el cual se asemeje a uno comercial; en el que se puedan seleccionar señales de tipo sinusoidal, triangular y cuadrada, con un intervalo de operación de 0.1 Hz a 1 MHz, ajuste amplitud de 50 mV a 10 V y ajuste de la componente de directa.

Así mismo se busca que la selección de todas estas opciones sea por medio de botones de presión.

El equipo deberá tener un costo accesible en comparación con los existentes en el mercado, y la reparación en caso de una falla podrá realizarse de una manera sencilla.

### **1.3 Análisis del problema**

El desarrollo de un generador de funciones lleva a dividir el problema en bloques funcionales en los que se resuelve cada uno de los requerimientos del equipo. De esta manera cada uno de los bloques cumple con una de las necesidades del proyecto.

El objetivo principal a resolver es la generación de las diferentes formas de onda, esto puede ser realizado por medio de osciladores sintonizados o de relajación, pero ninguno de éstos entrega las tres formas de onda que necesitamos. Podemos hacer uso de un oscilador de relajación para obtener la señal cuadrada y la triangular; y usar un conformador de onda para obtener la señal sinusoidal.

La selección de frecuencias en el generador de funciones es por medio de un banco de capacitores, en el cual puede ser seleccionado el capacitor deseado por medio de interruptores.

Una interfaz de usuario compuesta por botones de presión, los cuales tienen retorno por resorte, plantea el desafío de no tener la señal de entrada de la selección del usuario durante todo el tiempo de funcionamiento del dispositivo. Esto crea la necesidad de incorporar una etapa lógica, encargada de conservar la selección del usuario.

La manera de poder mantener la señal es haciendo uso de flip flops, los cuales sostienen señales digitales de acuerdo a otra señal de entrada que funciona como reloj. Esta señal de reloj tiene que ocurrir cada que se quiere cambiar la selección, pero debido a que las entradas provienen de la interfaz de usuario es necesario hacer

algunas restricciones, tal como el no poder tener más de una forma de onda seleccionada, ni más de un intervalo de frecuencia al mismo tiempo.

Estas restricciones tienen que ser controladas por un circuito combinacional, que solamente permita el paso de una señal de entrada por cada una de estas opciones. Un dispositivo lógico programable resulta la mejor opción para realizar esta tarea, debido a que todo el circuito combinacional puede ser programado dentro de un solo circuito integrado.

La variación de la amplitud en señal de salida y el ajuste de la componente de directa hacen necesaria una etapa de amplificación, donde el usuario pueda hacer ajustes en estas variables. Para lograr esto es necesario el uso de un amplificador cuya ganancia es ajustable y de un sumador, que tendrá como entradas la señal del generador de funciones y una componente de directa ajustable desde la interfaz de usuario.

Una etapa de alimentación resulta imprescindible, pero este circuito en particular requiere de voltajes lógicos y de voltajes para el generador de funciones, así como los amplificadores, que requieren ser mayores para poder entregar una salida con amplitudes de 10 V.

En la siguiente figura se puede observar el funcionamiento del generador de funciones, de acuerdo a los bloques funcionales antes explicados.

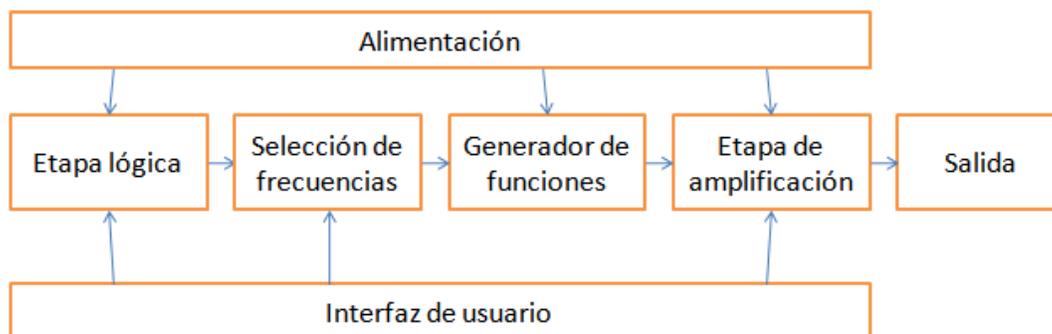


Figura 1.1 Diagrama de bloques del generador de funciones.

## Capítulo II

### Antecedentes

#### 2.1. Generadores de señales

Un generador de señal está encargado de producir una señal eléctrica dependiente del tiempo, con diferentes características de amplitud, frecuencia y forma, que pueden ser fijas o variar dentro de intervalos definidos. Un generador no está encargado de medir la señal que entrega, aún cuando pueda indicarla. Los generadores de funciones son utilizados como alimentación o prueba de circuitos eléctricos o actuadores, tanto en su desarrollo como en la verificación de su funcionamiento.

Algunas aplicaciones específicas de los generadores de señales son: la obtención de respuesta en frecuencia o en tiempo de amplificadores, sintonizar y analizar la linealidad de filtros, probar sistemas digitales y caracterizar componentes en distintas frecuencias.

En general, los generadores de señales se conforman de tres etapas básicas: un oscilador, encargado de entregar la frecuencia de trabajo al sistema, con la posibilidad de que ésta pueda ser regulada; una etapa en la que se determina la forma de onda de la señal; y una etapa de amplificación, donde se ajustan la amplitud de la señal, así como su componente de directa.

Existen dos criterios básicos para la clasificación de los generadores de señales, el rango de frecuencia en el que trabajan y la forma de onda que entregan.

Los principales grupos en la clasificación por rangos de frecuencia se muestran en la *tabla 2.1*.

	Frecuencia mínima	Frecuencia máxima
Generador de audio frecuencia (AF)	< 0.01 Hz	1MHz a 10 MHz
Generador de radiofrecuencia (RF)	1kHz a 10kHz	520 kHz a 4 GHz
Generadores de señales de microondas	10 MHz	50 GHz

*Tabla 2.1* Clasificación de generadores de señales por rangos de frecuencia.

Según la forma de onda a la salida, los generadores de señales se clasifican principalmente en:

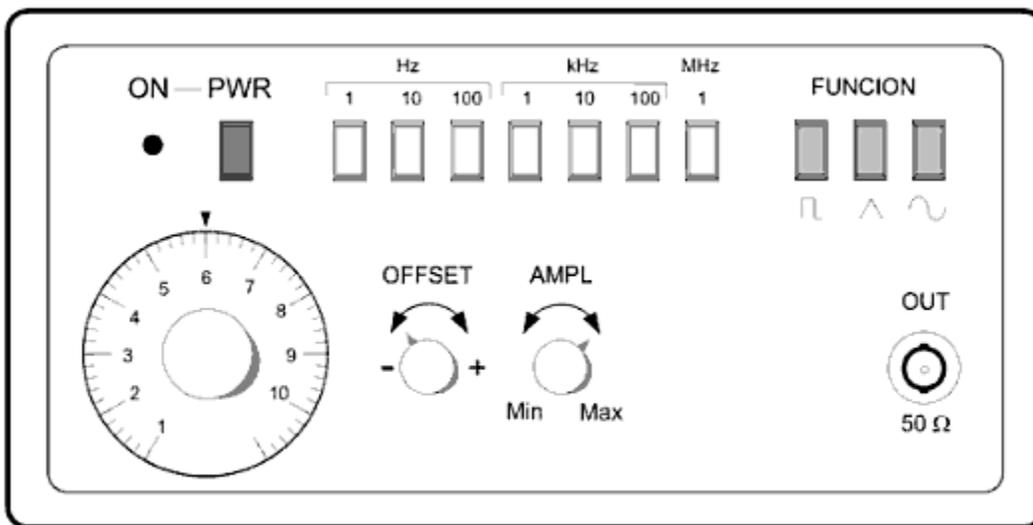
- Generadores de funciones (triangular, cuadrada, sinusoidal)
- Generadores de señales (sinusoidal con modulación)
- Osciladores (sinusoidal con amplitud y/o frecuencia fijas)
- Generadores de barrido (modulación FM lenta y cíclica)
- Generadores de pulsos (pulsos, señal cuadrada)
- Generadores de ruido (señales eléctricas aleatorias)
- Generadores de palabras digitales y datos
- Generadores de miras (señales de TV desde 32 MHz hasta 900 MHz)
- Generadores de ondas con formas arbitrarias

### 2.1.1. Generadores de funciones

Son aquellos equipos que producen señales que pueden ser descritas por fórmulas matemáticas simples (funciones). En éstos se busca más versatilidad que exactitud, y ofrecen una distorsión armónica total (THD) típica de 0.25 % para la señal sinusoidal.

Las formas de onda ofrecidas por el generador de funciones son: la señal triangular, utilizada para medidas de nivel de disparo, estudios de linealidad, entre otros; la señal cuadrada, aplicada para el análisis de respuesta transitoria; y la señal sinusoidal que permite obtener la respuesta en frecuencia.

Éstos cuentan normalmente con un ajuste para la frecuencia, amplitud y offset, como se muestra en la *figura 2.1* que representa la carátula de un generador de funciones.



*Figura 2.1.* Carátula de un generador de funciones.

## 2.2. Generación de onda

La generación de las ondas necesarias para el generador de funciones (sinusoidal, cuadrada y triangular) puede ser efectuada por diversos métodos. Para poder hacer esto es necesario en primer lugar un oscilador.

Un oscilador se refiere a un circuito autónomo capaz de generar una señal periódica, sin necesidad de aplicar ninguna entrada. Existen dos categorías de éstos: los osciladores sintonizados y los osciladores de relajación. Los primeros ocupan un

sistema con pares de polos conjugados sobre el eje imaginario, para mantener sostenida una oscilación sinusoidal. Los segundos emplean dispositivos biestables como conmutadores, disparadores Schmitt, puertas lógicas, comparadores y flip-flops que cargan y descargan repetidamente capacitores.

En el caso de los osciladores de relajación, se requiere de un conformador de onda para poder generar la onda sinusoidal. En la *tabla 2.2*, se puede observar una comparación entre los diferentes métodos para generar la señal sinusoidal, con osciladores sintonizados o a partir de un conformador de onda.

Técnicas de generación de ondas sinusoidal			
Técnica	Frecuencia típica	Distorsión típica (%)	Estabilidad de amplitud típica (%)
Cambio de fase	10 Hz – 1 MHz	1 – 3	3
Puente de Wien	1 Hz – 1 MHz	0.01	1
Resistencia negativa - LC	1 kHz – 10 MHz	1 – 3	3
Transformador sintonizado (diapasón)	60 Hz – 3 kHz	0.25	0.01
Cristal	30 kHz – 200 MHz	0.1	1
Conformador por rectas	<1 Hz – 500 kHz	1 – 2	1
Conformador logarítmico	<1 Hz – 500 kHz	0.3	0.25
DAC con conformador logarítmico	<1 Hz – 500 kHz	0.3	0.25
DAC con excitación ROM	1 Hz – 20 MHz	0.1	0.25

*Tabla 2.2.* Comparación de métodos para generar una señal sinusoidal.

### 2.3. Dispositivos lógico programables

Un dispositivo lógico programable (PLD) es un componente electrónico, usado para construir circuitos digitales reconfigurables. A diferencia de las compuertas digitales los PLDs no tienen una función predefinida, sino que debe ser programada.

El arreglo lógico programable (PAL) es el dispositivo más simple, el cual funciona por medio de: una matriz de conexiones, una matriz de compuertas AND y una de compuertas OR. Las entradas se conectan por medio de fusibles con la matriz de compuertas AND y las salidas de estas compuertas se conectan igualmente por fusibles a la matriz de compuertas OR.

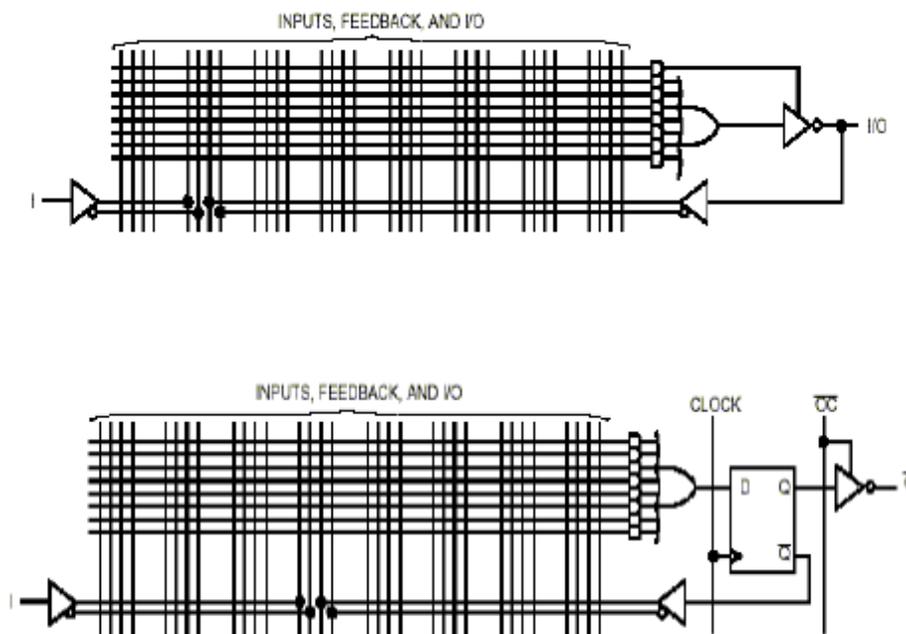


Figura 2.2 Configuración interna de una PAL.

En la figura 2.2 se muestra la parte de la arquitectura de los pal, aquí se puede observar la matriz de interconexiones hacia la compuertas OR donde se conectan tanto las entradas como las salidas de las compuertas OR, la diferencia en las dos arquitecturas es un flip-flop que mantiene las salidas del PLD.

El arreglo lógico genérico (GAL) funciona de una manera similar al PAL sólo que para hacer las conexiones utiliza celdas CMOS programables en lugar de los fusibles, lo que permite su reprogramación.

El dispositivo lógico programable complejo (CPLD) está formado de múltiples bloques lógicos, cada uno similar a un PLD. Los bloques lógicos se comunican entre sí, utilizando una matriz de interconexiones programable. En la siguiente figura se muestra la arquitectura del CPLD donde se pueden ver los bloques lógicos que se comunican por la matriz de interconexión y al bloque de salidas y entradas.

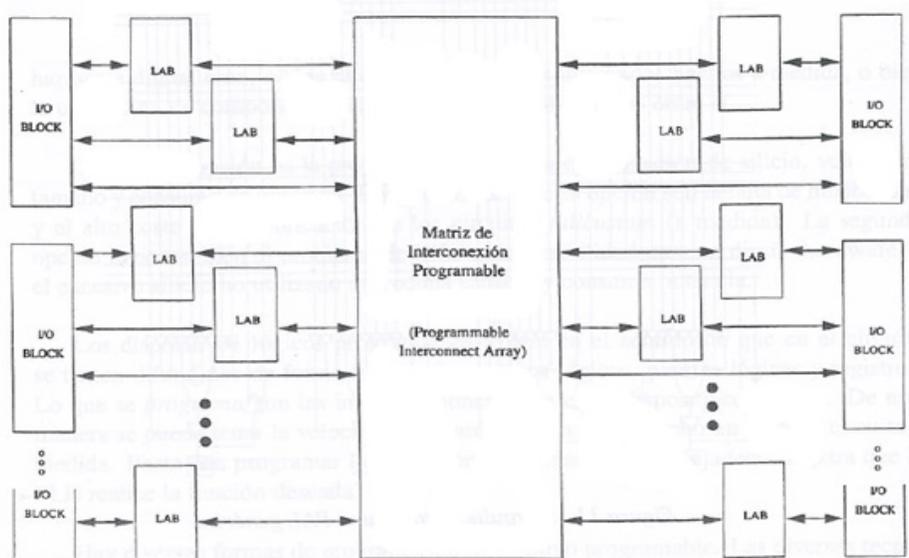


Figura 2.3 Arquitectura del CPLD.

El arreglo de compuertas programable en campo (FPGA) consiste en arreglos de varias celdas lógicas, las cuales se comunican entre sí mediante canales de comunicación. Las principales diferencias entre un CPLD y un FPGA radican en una mayor densidad de elementos lógicos y una mayor flexibilidad de la arquitectura del segundo.

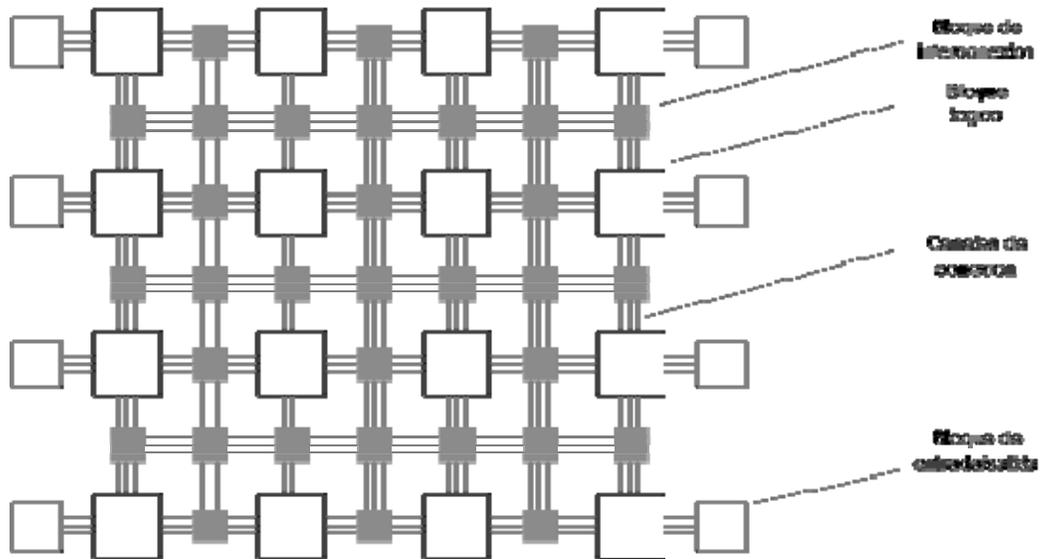


Figura 2.4 Arquitectura del FPGA.

En esta figura se puede ver la arquitectura de un FPGA, en la que se observa un mayor número de bloques lógicos y donde se encuentran interconectados de por medio de varios bloques de interconexión.

## 2.4. Distorsión Armónica Total

La calidad de una señal sinusoidal se expresa a través del coeficiente de distorsión armónica total (THD). Las armónicas son múltiplos enteros en el dominio de la frecuencia de la señal original. La THD es la relación que guarda la suma de las armónicas con la frecuencia principal.

$$\text{THD} = \frac{P_2 + P_3 + P_4 + \dots + P_\infty}{P_1} = \frac{\sum_{n=2}^{\infty} P_n}{P_1}$$

$$\text{THD} = \frac{P_{\text{total}} - P_1}{P_1}$$

(2.1)

La fórmula anterior se refiere a la obtención del THD por medio de potencias, para poder hacer el cálculo por medio de voltajes es necesario utilizar el cuadrado de los voltajes RMS.

$$\begin{aligned} \text{THD} &= \frac{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_\infty^2}{V_1^2} \\ \text{THD} &= \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \end{aligned} \tag{2.2}$$

Una onda sinusoidal pura, al no tener ningún armónico, cuenta con un THD de 0%.

## Capítulo III

### Diseño

#### 3.1. Selección del generador

Debido a que el generador de funciones busca tener un circuito sencillo que facilite su construcción y su mantenimiento, se seleccionó un circuito integrado que nos entrega las formas de onda triangular, cuadrada y sinusoidal.

Se seleccionó el generador de funciones XR2206 de Exar, debido a que éste entrega las tres formas de onda requeridas, así mismo tiene un intervalo de frecuencias similar al requerido y tiene un bajo costo. Éste, de acuerdo a su hoja de especificaciones, presenta una distorsión típica en la onda sinusoidal de 0.5% y una frecuencia máxima de 1 MHz (típica de 500 kHz).

Se compone de cuatro bloques funcionales:

1. Un oscilador controlado por voltaje (VCO)
2. Un multiplicador analógico y formador de onda
3. Una etapa de amplificación
4. Un conjunto de interruptores de corriente

En la *figura 3.1* se muestra el diagrama de bloques del circuito XR2206 propuesto en su hoja de especificaciones.

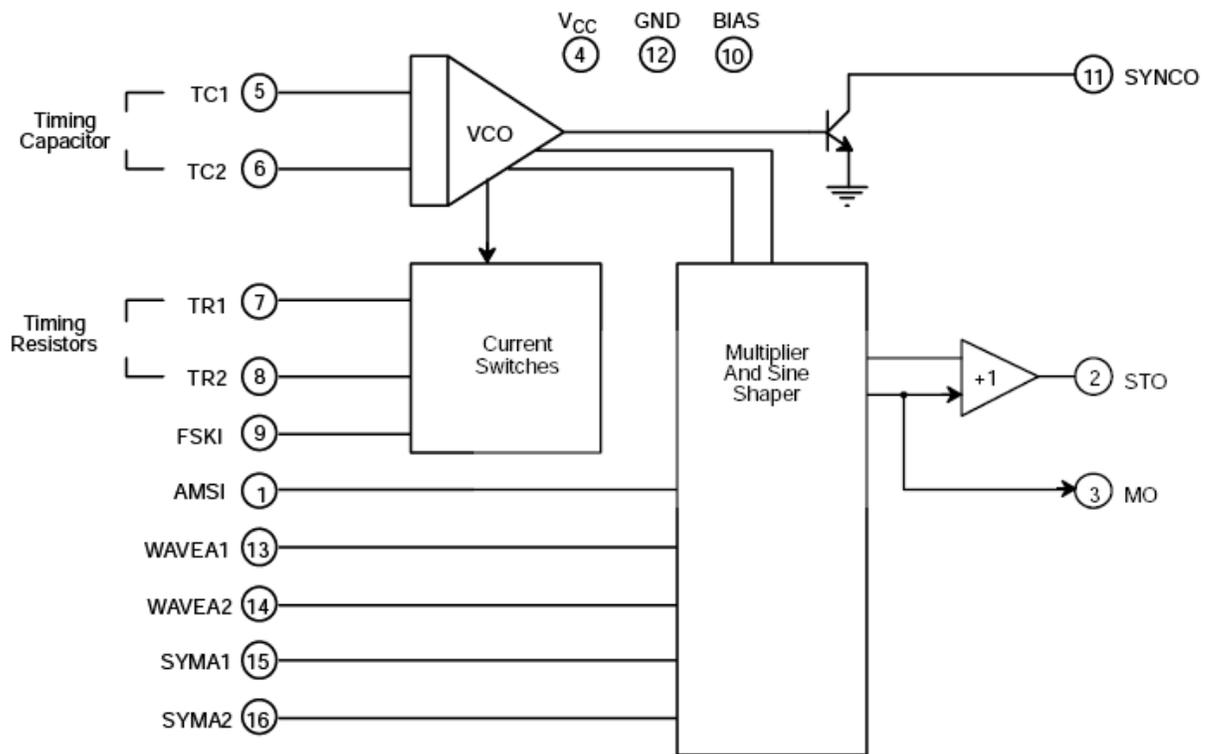


Figura 3.1 Diagrama esquemático del XR2206.

El VCO de este generador funciona por medio de un sistema no lineal, formado por un integrador y un comparador con histéresis. Un capacitor toma la función del integrador, alimentado por una fuente de corriente, la cual cambia de sentido de acuerdo a la salida del comparador, que a su vez compara el valor de tensión entre las terminales del capacitor. Por lo tanto, la frecuencia de este oscilador depende de la magnitud de la corriente y del capacitor utilizado.

En las *figuras 3.2 y 3.3* se ilustra lo explicado en el párrafo anterior, primero con un diagrama general y después en su interpretación eléctrica.

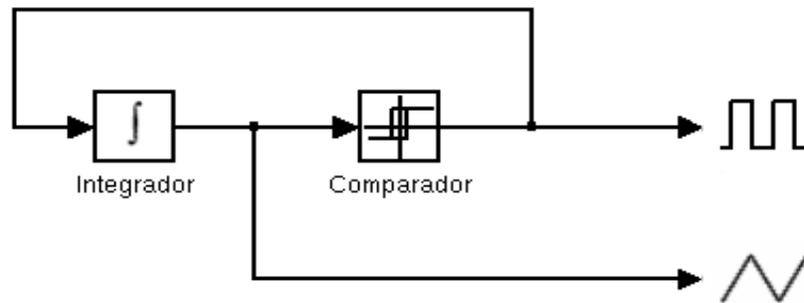


Figura 3.2. Diagrama general del generador de onda cuadrada y triangular.

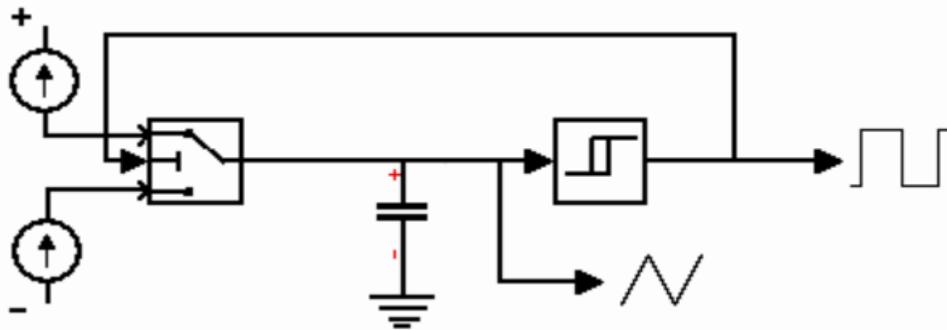


Figura 3.3. Diagrama eléctrico del generador de onda cuadrada y triangular.

De este modo se obtienen las formas de onda triangular y cuadrada. Para poder generar la señal sinusoidal se utiliza el módulo de conformador de onda, explicado más adelante.

Como el VCO entrega una frecuencia proporcional a la corriente, ésta es regulada desde el módulo de interruptores de corriente con resistencias externas; lo cual nos permite colocar un potenciómetro en la terminal siete del XR2206 para variar la frecuencia.

La frecuencia generada por el VCO también varía en función del capacitor conectado entre las terminales cinco y seis. De tal forma que la frecuencia de salida del dispositivo queda en función de R y C, donde R es el valor tomado por el potenciómetro y C el valor del capacitor, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$f = 1 / RC \text{ Hz} \quad (3.1)$$

Se recomienda que se usen capacitores dentro del intervalo de 1000 pF a 100uF, y la resistencia dentro del intervalo de 1 kOhm a 2 MOhm.

El bloque del multiplicador y conformador de onda está encargado de convertir la señal triangular en sinusoidal, así como realizar multiplicaciones con otras ondas, que para propósitos de esta tesis no resultan relevantes.

El conformador de ondas funciona a partir de un circuito no lineal basado en diodos o transistores apareados, a cuya entrada se aplica la señal triangular. Los diodos van variando la pendiente en forma sucesiva, disminuyéndola conforme la entrada es mayor, hasta aproximarse a la onda sinusoidal.

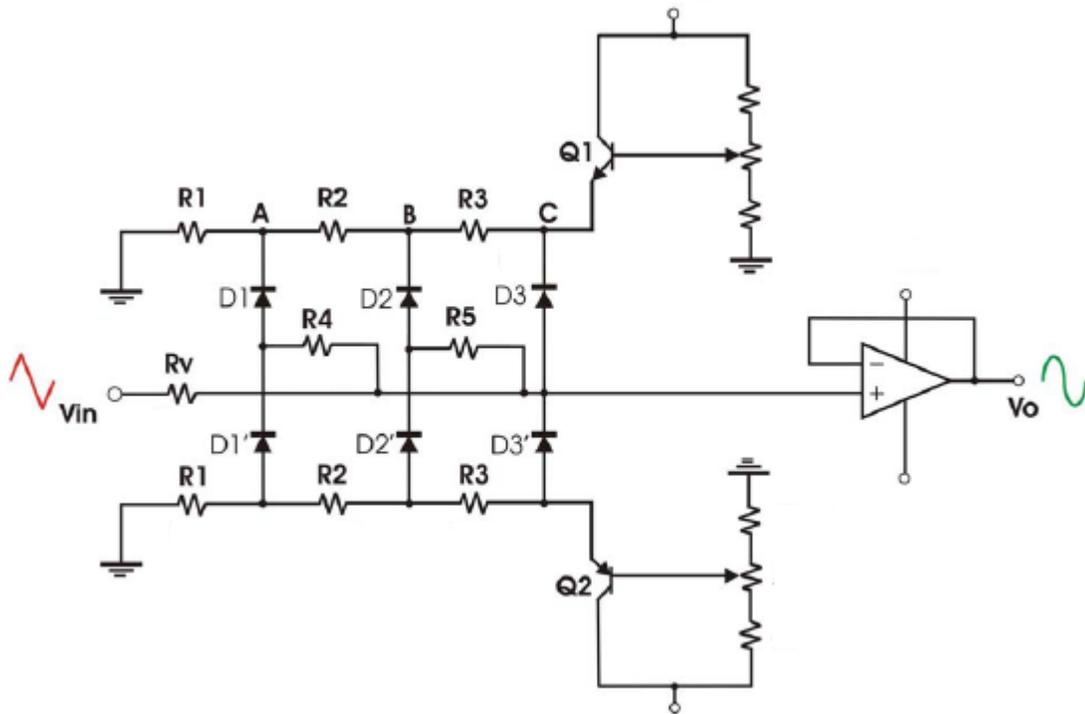


Figura 3.4. Circuito ejemplo de un conformador de ondas.

El circuito de ejemplo de la *figura 3.4* explica el funcionamiento de un conformador de ondas, en el cual a la entrada se encuentra la señal triangular. Los transistores Q1 y Q2 generan una corriente, que gracias a las resistencias R1, R2 y R3 genera diferentes voltajes en los nodos A, B y C. Los diodos estarán polarizados en sentido inverso hasta que el voltaje de la señal aumente por encima del voltaje en A, lo que polariza el diodo D1 en sentido directo. Por lo que el voltaje de salida aumenta más lentamente debido al divisor de tensión Rv-R4.

Este proceso se repite para cada uno de los diodos, pero en el último diodo al no tener una resistencia causa la pendiente nula de la cresta de la onda sinusoidal. Los diodos D1', D2' y D3' corresponden a las tensiones negativas de la señal de entrada. Considerando que los diodos tienen una característica exponencial, mostrada en la fórmula 3.1, se pueden obtener bajos factores de distorsión con un pequeño número de diodos.

$$I = I_S \left( e^{V_D / (nV_T)} - 1 \right) \quad (3.1)$$

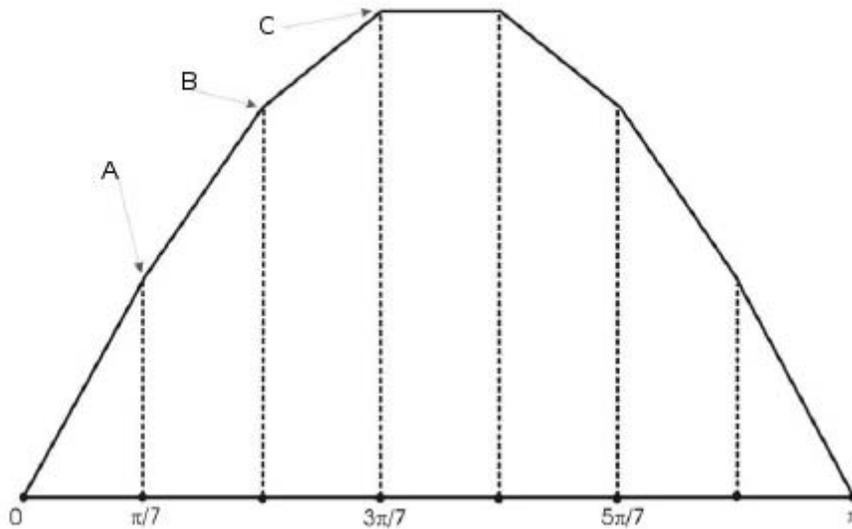


Figura 3.5 Señal de salida del conformador de onda.

En la *figura 3.5* se representa la salida del ciclo positivo que tiene el circuito de la *figura 3.4*, donde se puede observar que se aproxima por medio de rectas a la señal sinusoidal, y cada uno de los voltajes de los diodos forman el punto donde se cambia la pendiente de señal.

La configuración seleccionada para el funcionamiento del XR2206 es la siguiente:

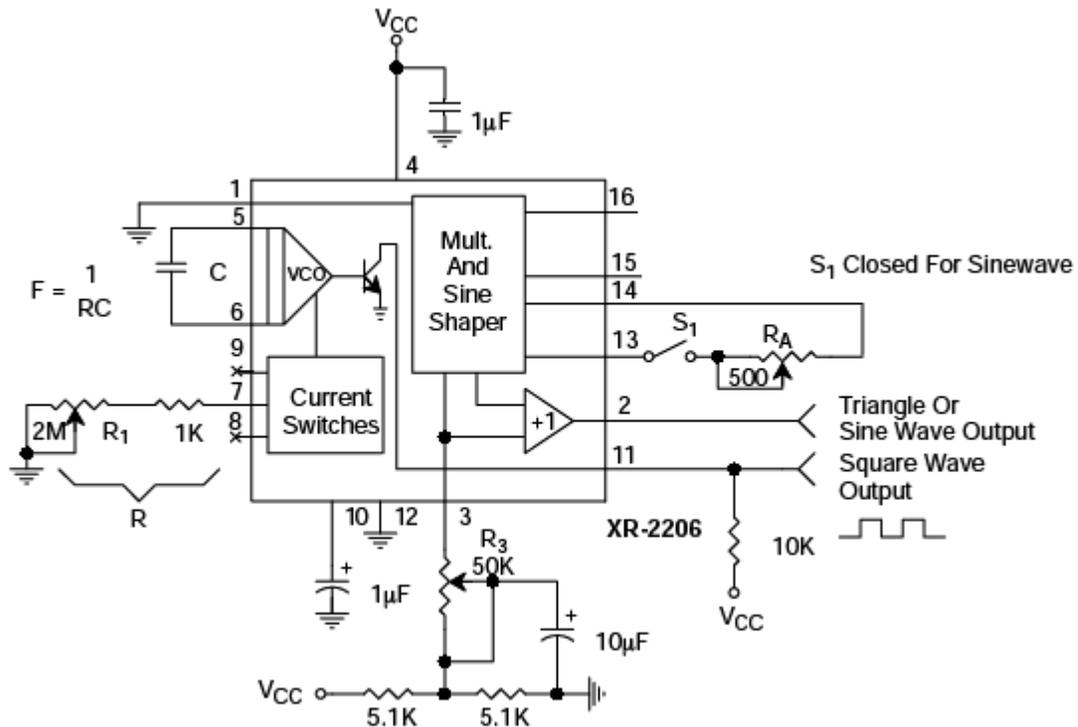


Figura 3.6. Configuración utilizada del XR2206.

En el caso particular de la configuración de la *figura 3.6*, el circuito se encuentra alimentado de  $V_{cc}$  a tierra, haciendo que todas las señales de salida tengan una componente de directa de la mitad de  $V_{cc}$ . Como deseamos una señal sin componente de directa se utiliza una adaptación de esta configuración, alimentando con  $-V_{cc}$  en todos los lugares donde está conectada la tierra en el diagrama y conectando en la terminal tres del circuito, por medio de un potenciómetro, a la tierra del circuito. Esto elimina esta componente de directa. La configuración resultante puede ser observada en la *figura 3.7*.

En la *tabla 3.1* se puede observar una pequeña descripción de las terminales.

Pin#	Uso	Tipo
1	-Vcc	Entrada
2	Salida de la señal triangular y sinusoidal	Salida
3	Ajuste de amplitud	Salida
4	Vcc	
5	Capacitor de frecuencia	Entrada
6	Capacitor de frecuencia	Entrada
7	Resistencia de frecuencia	Salida
8	NC	
9	NC	
10	Referencia de voltaje interno	Salida
11	Salida de la señal cuadrada	Salida
12	-Vcc	
13	Ajuste de forma de onda	Entrada
14	Ajuste de forma de onda	Entrada
15	NC	
16	NC	

Tabla 3.1. Conexiones en las terminales del XR2206.

En la *figura 3.7* se puede ver el diagrama esquemático utilizado para el XR2206. Se utilizan los valores de resistencias sugeridas por el fabricante, cambiando el potenciómetro de 500 Ohms por uno de 1 k, para tener un mayor rango de ajuste en el conformador de onda.

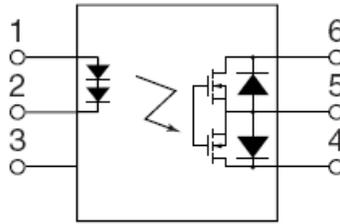


Para poder modificar la capacitancia se utiliza un banco de capacitores, éste permite tener distintos intervalos de frecuencia, el capacitor deseado es seleccionado por la etapa lógica. Esta etapa activa el interruptor correspondiente al capacitor deseado, manteniéndolo cerrado hasta que se pida otro intervalo de frecuencias. Por estos interruptores pasa una corriente en ambas direcciones, haciendo que en la resistencia de este interruptor se presente una caída de voltaje al cambiar la corriente de sentido; este escalón de voltaje afecta nuestra señal, haciendo necesario que la resistencia en los interruptores sea mínima.

Los TBJs fueron descartados como posibles interruptores debido a que éstos son unidireccionales y presentan una caída de potencial, la cual afecta la señal requerida. Por lo que se probó trabajar con JFETs, los cuales funcionan como resistencias controladas por voltaje; pero éstos no lograban ofrecer una resistencia suficientemente baja para no provocar escalones significativos en la señal, por tal motivo fueron descartados también.

Los FETs que proporcionan una resistencia lo suficientemente baja son los MOSFETs, con resistencias menores a 1 Ohm; pero éstos tienen una capacitancia de drain a source muy alta, cuando se encuentran en su región de corte, esto causa que la capacitancia se sume con la del capacitor que tienen en serie, lo que provoca finalmente que todo el banco de capacitores funcione al mismo tiempo, sumándose todas las capacitancias en paralelo.

Finalmente el interruptor seleccionado fue el AQV251, un relevador PhotoMOS, donde por medio de un LED se activa el gate de dos MOSFETs conectados entre sí como se muestra en la *figura 3.8*.



*Figura 3.8.* Diseño esquemático del PhotoMOS AQV251.

Este tipo de configuración presenta tres posibles conexiones, clasificadas en: A) se utilizan ambos MOSFETs en la configuración bidireccional, B) solamente se utiliza alguno de los dos MOSFETs por lo que resulta en una configuración unidireccional y C) se utilizan ambos MOSFETs en paralelo para reducir la resistencia de encendido, pero siendo también unidireccional. Debido a esto se seleccionó la configuración A. Estas configuraciones se muestran en la *figura 3.9*.

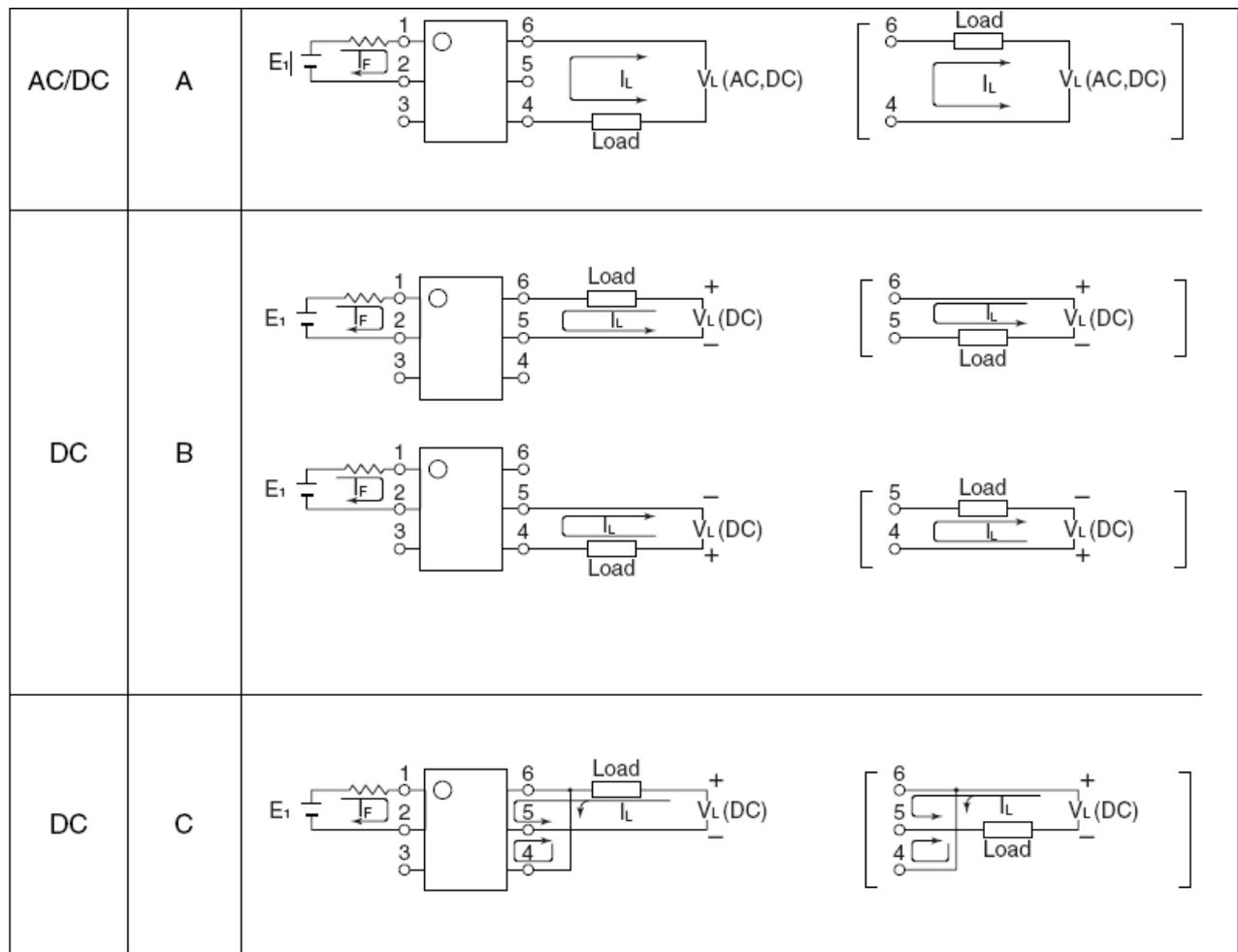


Figura 3.9. Configuraciones del AQV251.

El interruptor deseado se cierra por medio de la etapa lógica, explicada en el siguiente apartado, seleccionando uno de los seis capacitores disponibles en el banco.

Para modificar la resistencia que regula la corriente llegando al capacitor se hace uso de un potenciómetro, el cual permite una variación gradual de resistencia al girar la perilla que puede ser manipulada desde el exterior del generador de funciones. Este potenciómetro funciona como el ajuste fino de frecuencia dentro de los distintos intervalos.

### 3.3. Etapa lógica

La etapa lógica del generador de funciones tiene la tarea de activar y mantener las selecciones hechas por medio de los botones, logrando así que permanezcan cerrados los interruptores adecuados. Debido a que los botones son del tipo push and release resulta indispensable un circuito lógico que sostenga la señal para los interruptores. Los botones están divididos en dos grupos, los que seleccionan el rango de frecuencias y los que seleccionan forma de onda.

La forma para poder mantener la entrada de los botones es por medio de flip-flops tipo D, éstos sostienen la señal hasta que se envía otro pulso de reloj. Ya que los botones se encuentran agrupados en dos tipos, los cuales no dependen uno del otro, los flip-flops están agrupados de la misma manera, en dos circuitos integrados distintos, y así la señal de reloj de cada uno de éstos funciona de manera independiente.

La principal restricción del circuito lógico es que por cada uno de los grupos sólo una señal puede estar en alto, teniendo así sólo un intervalo de frecuencia y una forma de onda activos a la vez. Como la señal de reloj es la que cambia el estado del flip-flop, ésta tiene que ocurrir cuando hay un cambio de estado en alguno de los botones dentro de un grupo, pero si hay más de un estado en alto por grupo, el reloj no debe hacer este cambio.

Para satisfacer estas condiciones la señal de reloj, para los flip-flops, es obtenida de un circuito combinacional; un reloj para cada grupo de flip-flops que cumplen con las siguientes tablas de verdad.

# Diseño de un generador de funciones

## Capítulo III – Diseño

E1[5]	E1[4]	E1[3]	E1[2]	E1[1]	E1[0]	S1
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	1
0	0	0	0	1	0	1
0	0	0	0	1	1	0
0	0	0	1	0	0	1
0	0	0	1	0	1	0
0	0	0	1	1	0	0
0	0	0	1	1	1	0
0	0	1	0	0	0	1
0	0	1	0	0	1	0
0	0	1	0	1	0	0
0	0	1	0	1	1	0
0	0	1	1	0	0	0
0	0	1	1	0	1	0
0	0	1	1	1	0	0
0	0	1	1	1	1	0
0	1	0	0	0	0	1
0	1	0	0	0	1	0
0	1	0	0	1	0	0
0	1	0	0	1	1	0
0	1	0	1	0	1	0
0	1	0	1	1	0	0
0	1	0	1	1	1	0
0	1	1	0	0	0	0
0	1	1	0	0	1	0
0	1	1	0	1	0	0
0	1	1	0	1	1	0
0	1	1	1	0	0	0
0	1	1	1	0	1	0
0	1	1	1	1	0	0
0	1	1	1	1	1	0
1	0	0	0	0	0	1
1	0	0	0	0	1	0
1	0	0	0	1	0	0
1	0	0	0	1	1	0
1	0	0	1	0	0	0
1	0	0	1	0	1	0
1	0	0	1	1	0	0
1	0	0	1	1	1	0
1	0	0	1	1	1	0
1	0	1	0	0	0	0
1	0	1	0	0	1	0
1	0	1	0	1	0	0
1	0	1	0	1	1	0
1	0	1	1	0	0	0
1	0	1	1	0	1	0
1	0	1	1	1	0	0
1	0	1	1	1	1	0
1	1	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	1	0

1	1	0	0	1	0	0
1	1	0	0	1	1	0
1	1	0	1	0	0	0
1	1	0	1	0	1	0
1	1	0	1	1	0	0
1	1	0	1	1	1	0
1	1	1	0	0	0	0
1	1	1	0	0	1	0
1	1	1	0	1	0	0
1	1	1	0	1	1	0
1	1	1	1	0	0	0
1	1	1	1	0	1	0
1	1	1	1	1	0	0
1	1	1	1	1	1	0

Tabla 3.2. Tabla de verdad de la selección de frecuencias.

E2[2]	E2[1]	E2[0]	S2
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	0

Tabla 3.3. Tabla de verdad de la selección de intervalos.

Debido a que realizar el circuito combinacional por medio de compuertas ocupa una gran superficie en el circuito impreso, en su lugar se utiliza una GAL, en la cual se programan ambos circuitos combinacionales con VHDL (mostrado en el *código 3.1*), donde las entradas de los botones son muestreadas conforme a los flancos de subida presentados en un reloj externo, éste último formado por un LM555 en configuración astable que oscila con una frecuencia de 24 Hz. De este modo al haber un flanco de subida en la señal de reloj proveniente del LM555 y encontrar sólo una señal en alto por cada grupo de botones, la GAL entrega una señal alta al grupo de flip-flops correspondiente, la cual es usada como reloj de este grupo.

```
library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;
entity genfun is
port(abotones:in integer range 0 to 32;
      bbotones:in integer range 0 to 7;
      clk1,clk2:out std_logic;
      clk:in std_logic);
end entity;
architecture algor of genfun is
begin
process(clk,abotones)
begin
    if clk'event and clk='1' then
        case abotones is
            when 1 => clk1<='1';
            when 2 => clk1<='1';
            when 4 => clk1<='1';
            when 8 => clk1<='1';
            when 16 => clk1<='1';
            when 32 => clk1<='1';
            when others => clk1<='0';
        end case;
    end if;
end process;
process(clk,bbotones)
begin
    if clk'event and clk='1' then
        case bbotones is
            when 1 => clk2<='1';
            when 2 => clk2<='1';
            when 4 => clk2<='1';
            when others => clk2<='0';
        end case;
    end if;
end process;
end algor;
```

*Código 3.1* Programa para la GAL22V10.

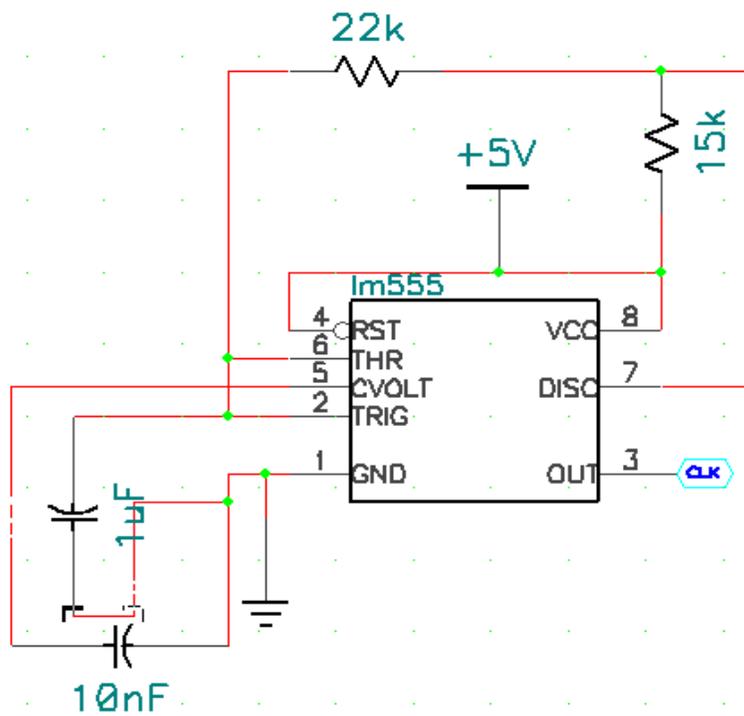


Figura 3.10. Diagrama esquemático del LM555.

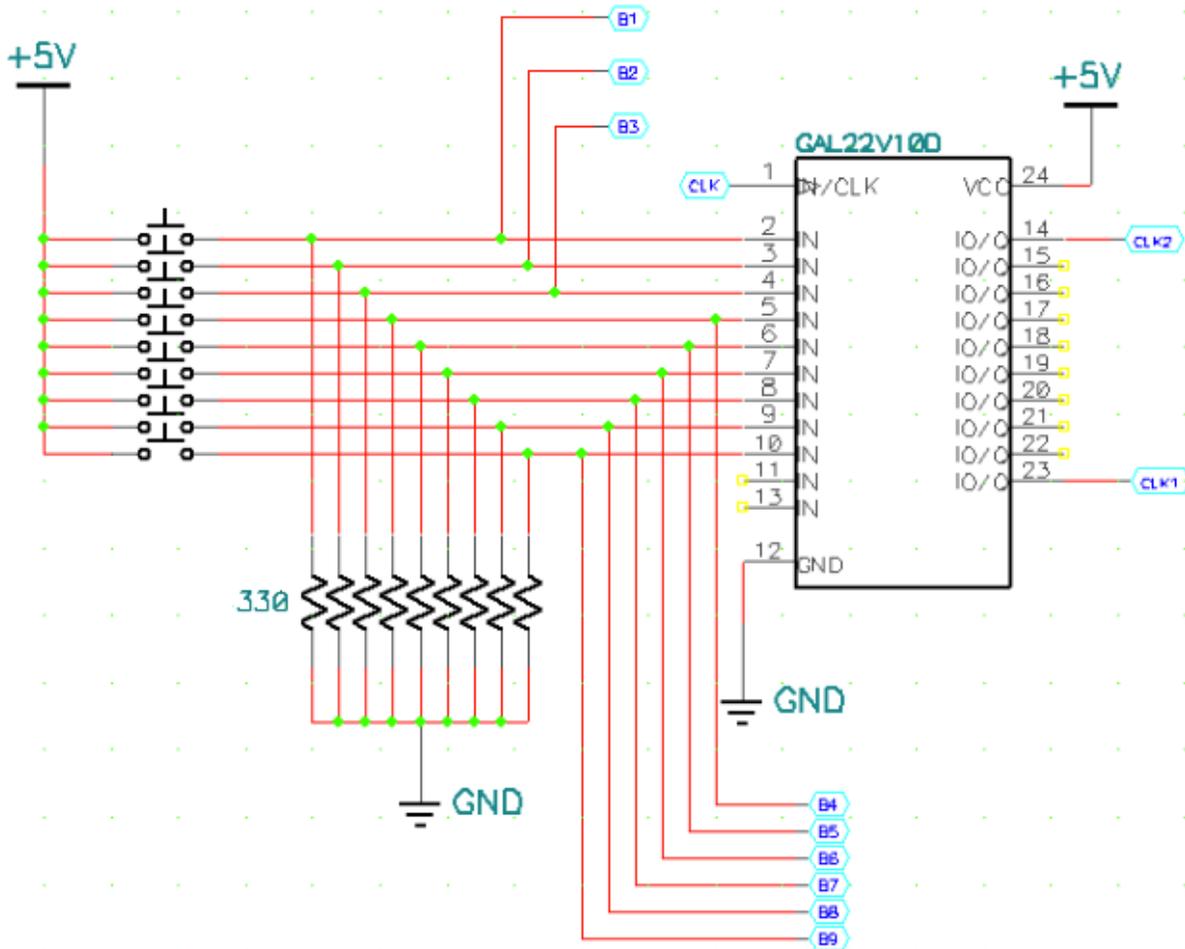


Figura 3.11. Diagrama esquemático de la GAL22V10.

Se hace uso de dos circuitos de flip-flops: el 74HC175 y el 74HC374. El primero tiene cuatro flip-flops en el mismo empaque. Debido a que el interruptor analógico DG211, utilizado para seleccionar la forma de onda del generador de funciones, cierra el interruptor con la entrada en bajo se utiliza la salida negada del flip-flop, por lo que a su salida tendremos señales en alto para las opciones no seleccionadas y señal en bajo para la salida seleccionada, por esta razón los tres LEDs, que indican cual forma de onda está seleccionada, se conectan entre +5V y las salidas del circuito integrado.



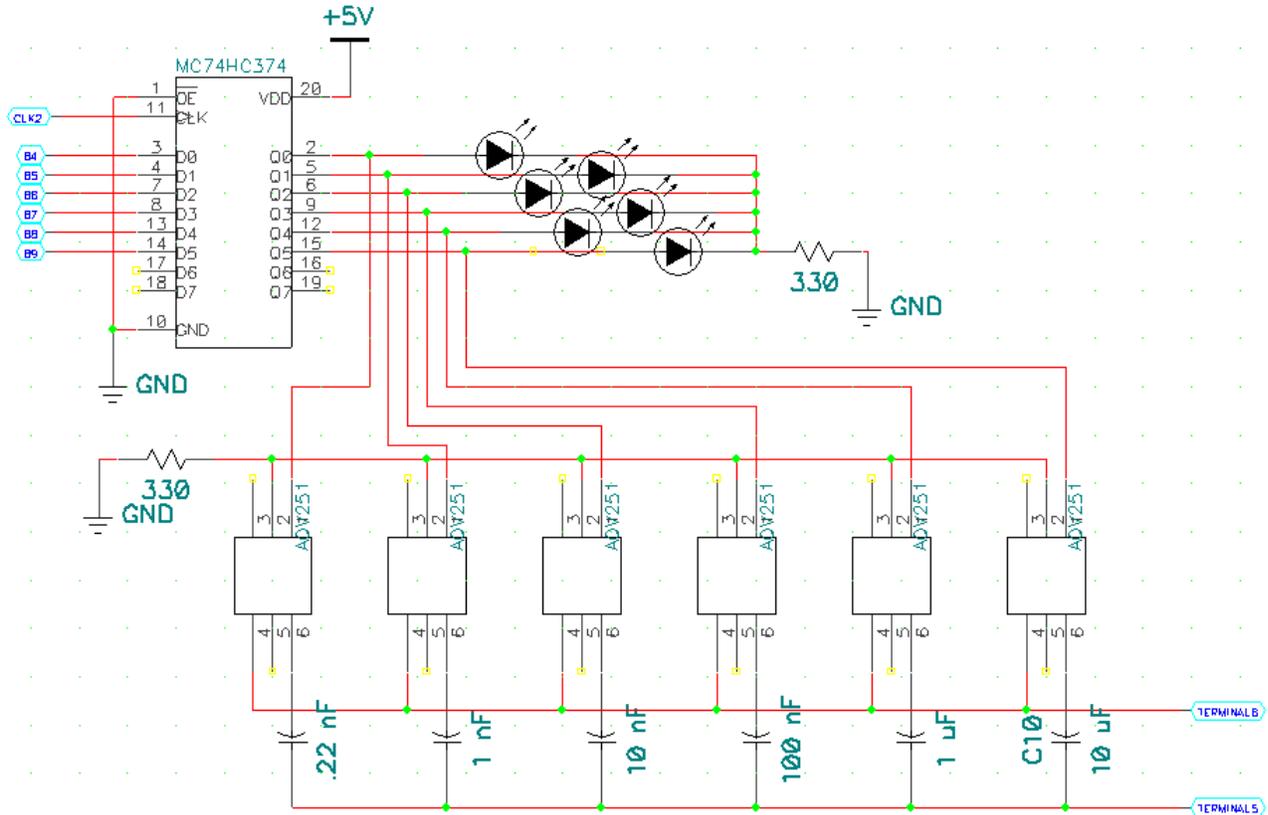


Figura 3.13. Diagrama esquemático del 74HC374.

### 3.4. Etapa de amplificación

En esta etapa es donde se toman las señales que salen del circuito XR2206 y se acondicionan para la salida del generador, lo que involucra darle una ganancia en amplitud y poder adicionar una componente de directa.

Teniendo dos salidas del XR2206, una para la señal cuadrada y otra salida para las señales triangular y sinusoidal, es necesario tener una forma de seleccionar cuál de estas señales se conecta a la salida. Para hacer esto se utiliza un interruptor analógico DG211, al cual se conectan las dos líneas que contienen las señales. La línea que transmite las señales triangular y sinusoidal se conectan al DG211 en dos de sus entradas, una para cada señal; pero la que comunica la señal triangular se le pone una

resistencia de 1 k para poder asemejar su amplitud a la de la sinusoidal, que es menor por especificaciones del fabricante. El DG211 está controlado por la parte de selección de forma de onda de la etapa lógica, esta configuración se observa en la figura 3.12.

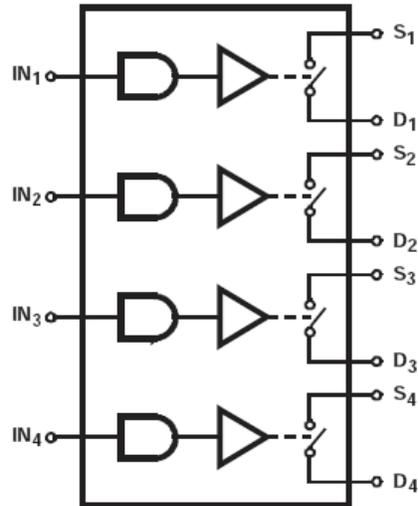


Figura 3.14. Diagrama funcional del DG211.

Entrada	Interruptor
0	Cerrado
1	Abierto

Tabla 3.4. Tabla de verdad del DG211.

La señal cuadrada, antes de llegar al DG211, pasa por un disparador Schmitt donde se ajusta su amplitud para que esté entre +5 V y -5 V y sea más cuadrada la señal. Ya que a la salida del XR2206 la señal tiene una amplitud de -12 V a +12 V. Esto se realiza con ayuda del comparador LM319 utilizando la configuración mostrada en la figura 3.15. La selección de este comparador se debe a su alto slew rate, bajo tiempo de respuesta y bajo costo. Las resistencias de este circuito son calculadas para que tenga el flanco de subida cuando el voltaje es de 5.6 V y el flanco de bajada cuando el voltaje es menor a -

2.4 V, al tener como entrada una señal cuadrada de -12 V a 12 V, estos voltajes nos aseguran que la señal ha cambiado de estado.

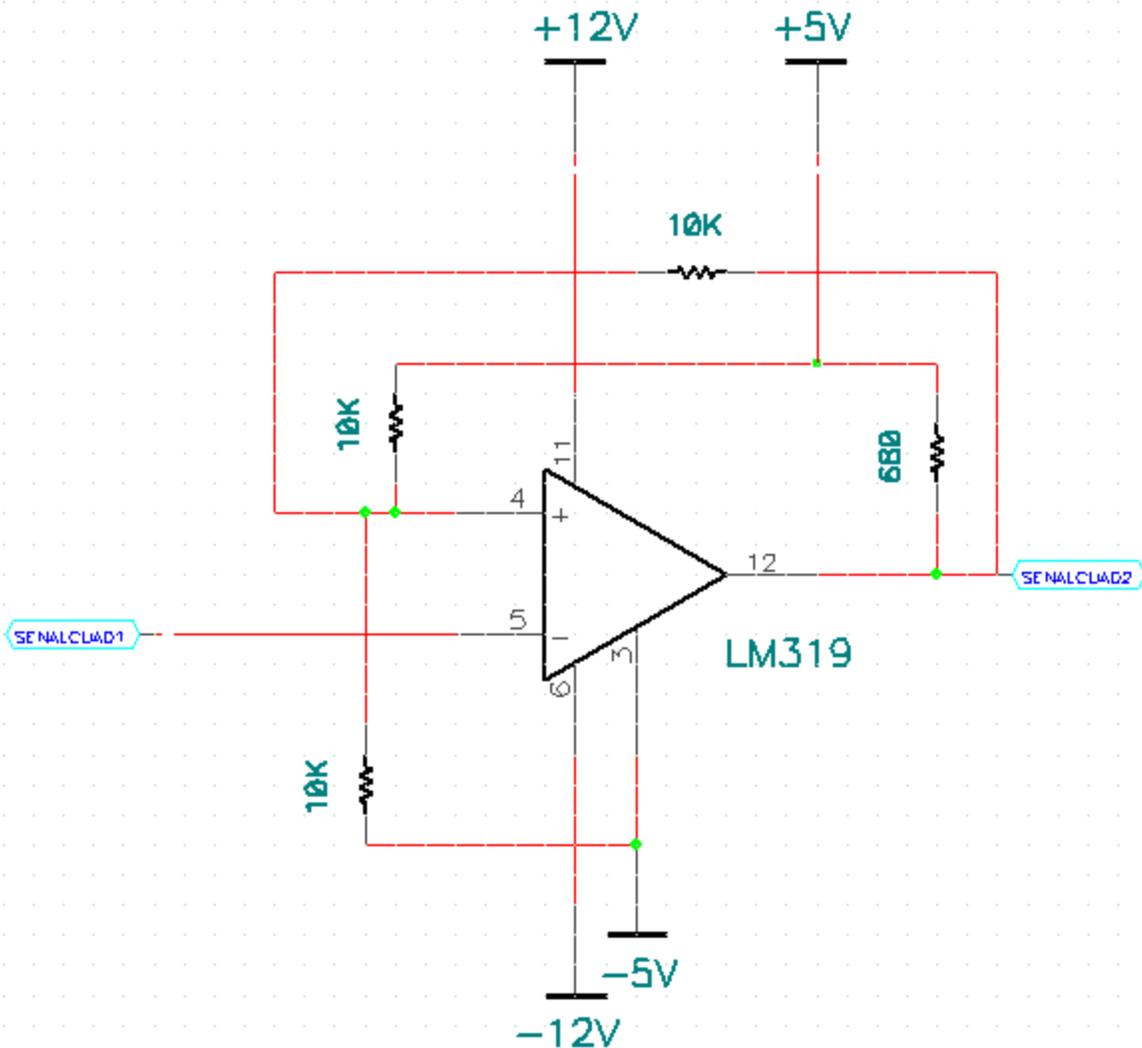


Figura 3.15. Diagrama esquemático del LM319.

Las tres salidas de las señales en el DG211 están interconectadas entre sí, y van por medio de un potenciómetro a tierra, cuyo cursor esta conectado a el amplificador de ganancia de 10. Esto nos permite modificar la amplitud de la señal, por lo que el potenciómetro está colocado en la carátula del dispositivo.

El cursor del potenciómetro está conectado al amplificador LT1363, el cual tiene una ganancia de diez y dependiendo de la posición del potenciómetro varía la amplitud de la señal de entrada. Se seleccionó este amplificador operacional debido a su amplio ancho de banda, que ofrece hasta 70 MHz y gran slew rate. Se utiliza una configuración no inversora en el amplificador operacional con un capacitor en paralelo, como lo recomienda el fabricante para cancelar el polo de entrada que podría causar oscilaciones, debido a la combinación de la capacitancia de entrada con las resistencias en ésta.

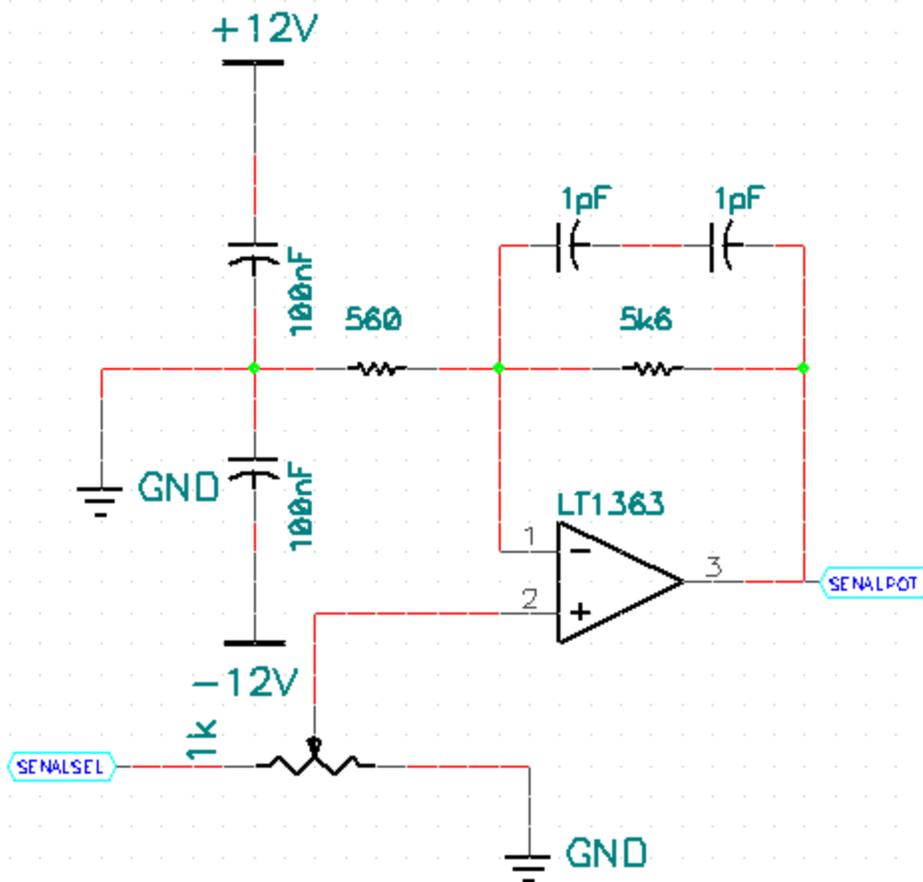


Figura 3.16. Diagrama esquemático del amplificador de amplitud.

Para poder agregar la componente de directa a la señal se hace uso de un potenciómetro de cinco terminales. En este dos de las terminales funcionan como un

interruptor, el cual esta abierto para una posición extrema y cerrado en todo el recorrido del potenciómetro. Esto nos es útil para poder sumar la señal cuando el interruptor esta cerrado y mantenerla separada cuando no se requiera, abriendo el interruptor. Este potenciómetro se conecta al circuito por medio de un conector EIS de cinco terminales, esto se puede observar en la figura 3.17.

El resto del potenciómetro es similar a los normales y se conecta para formar un divisor de voltaje entre + 8 V y -8 V, donde el cursor está conectado al amplificador LF411 con una configuración de seguidor, este amplificador es uno de propósito general, porque al manejar la componente de directa este no requiere un amplio ancho de banda. La salida del seguidor esta conectada al interruptor del potenciómetro de cinco terminales que lo puede o no conectar a un sumador implementado con otro LT1363, donde la señal de directa es sumada con la señal de la forma de onda. Este sumador tiene el capacitor en paralelo para evitar la oscilaciones como lo indica el fabricante.

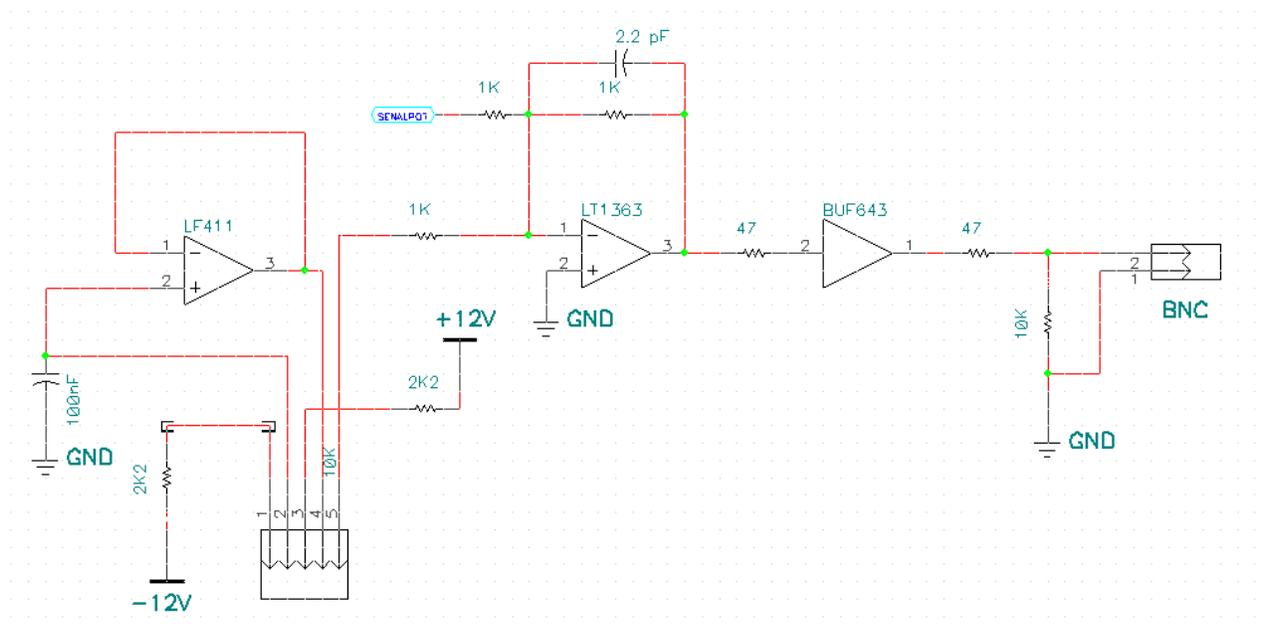


Figura 3.17. Diagrama esquemático del sumador de componente de directa y buffer.

A la salida del sumador está conectado un buffer, el cual entrega una mayor corriente de salida. El buffer BUF643 le da la capacidad al generador de funciones de entregar una corriente de salida de hasta 250 mA, y gracias a sus características de ancho de banda y slew rate, no presenta ninguna distorsión a la señal en las frecuencias utilizadas. El buffer tiene una resistencia de 47 Ohms en serie con la salida encontrada en la carátula del dispositivo, así en caso de producirse un corto circuito al exterior del gabinete quedará una resistencia de 47 Ohms.

### 3.5. Etapa de alimentación

El circuito requiere para su correcto funcionamiento de cuatro voltajes referidos a tierra: +12 V, -12 V, +5 V, -5 V. Esto se debe a que la etapa lógica funciona con +5 V, utilizamos los -5 V para el disparador Schmitt y la etapa de amplificación con +12 V y -12 V.

Todo el sistema se alimenta de la red eléctrica (127 V ~), por lo que se utiliza un transformador para disminuir el voltaje a 30 V, de los cuales se alimentan dos circuitos independientes que funcionan como fuentes de voltaje.

Estas fuentes de voltaje están compuestas por un puente de diodos que alimenta los reguladores lm78xx y lm79xx. A la entrada y salida de estos encapsulados hay capacitores para filtrar la señal.

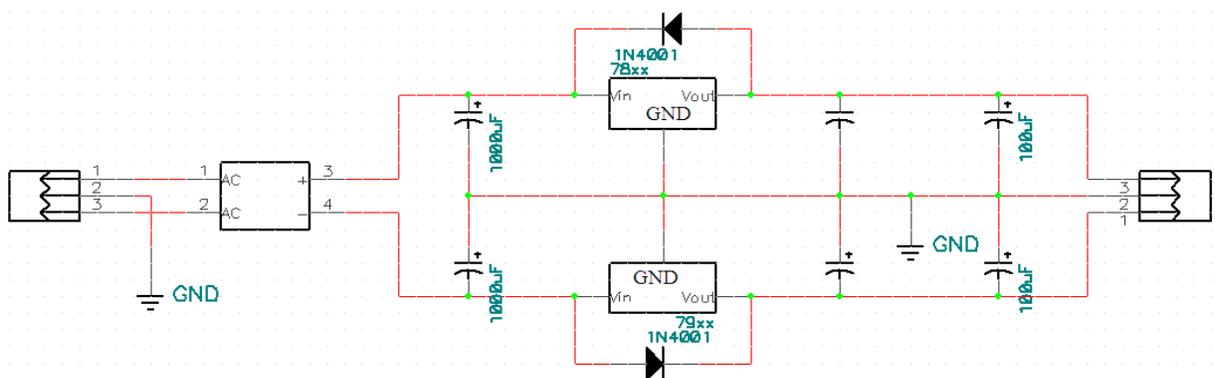


Figura 3.18. Diagrama esquemático de cada etapa de alimentación.

### 3.6. Construcción

En este apartado se hace la descripción del proceso de construcción del instrumento, tanto la parte física como la parte eléctrica.

Para la parte física se utilizó un gabinete plástico de 80 x 20 x 7.5 cm, dentro del cual se encuentran todos los elementos eléctricos y electrónicos. Al frente del gabinete se ubica una placa de aluminio, la cual nos sirve de carátula. Esta placa tiene que ser perforada para poder albergar: el interruptor de encendido, el conector BNC hembra, nueve botones de presión, nueve LEDs y tres potenciómetros.

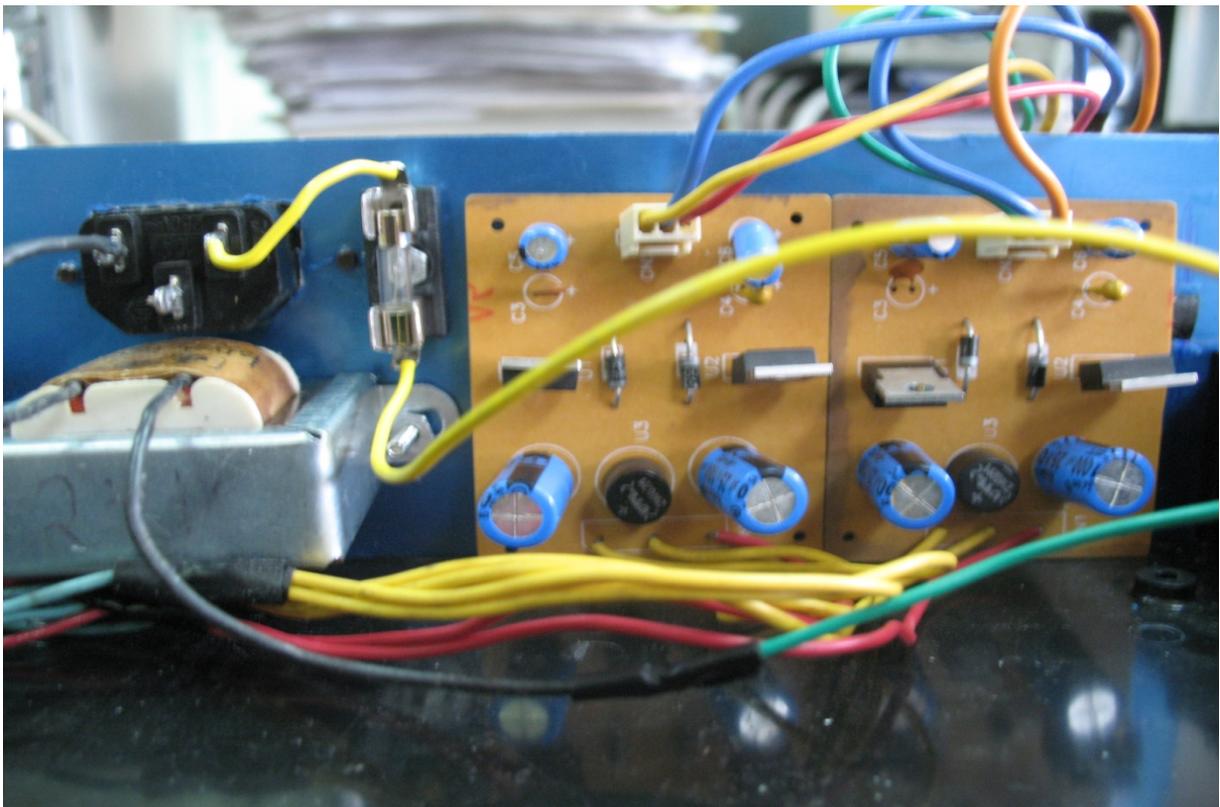


*Figura 3.19. Carátula del generador de funciones.*

En la placa trasera del gabinete se coloca el conector de la alimentación y en la parte interior de la placa se posicionan: un transformador de 120- 30 V, un porta fusibles y los dos circuitos de regulación de voltaje.



*Figura 3.20.* Parte trasera del generador de funciones.



*Figura 3.21.* Circuitos de alimentación y transformador.

En las *figuras 3.22 y 3.23* se muestra el circuito impreso utilizado para la construcción del generador de funciones. Éste es un circuito de doble cara, la cara inferior es en la que se encuentra la etiqueta con el nombre.

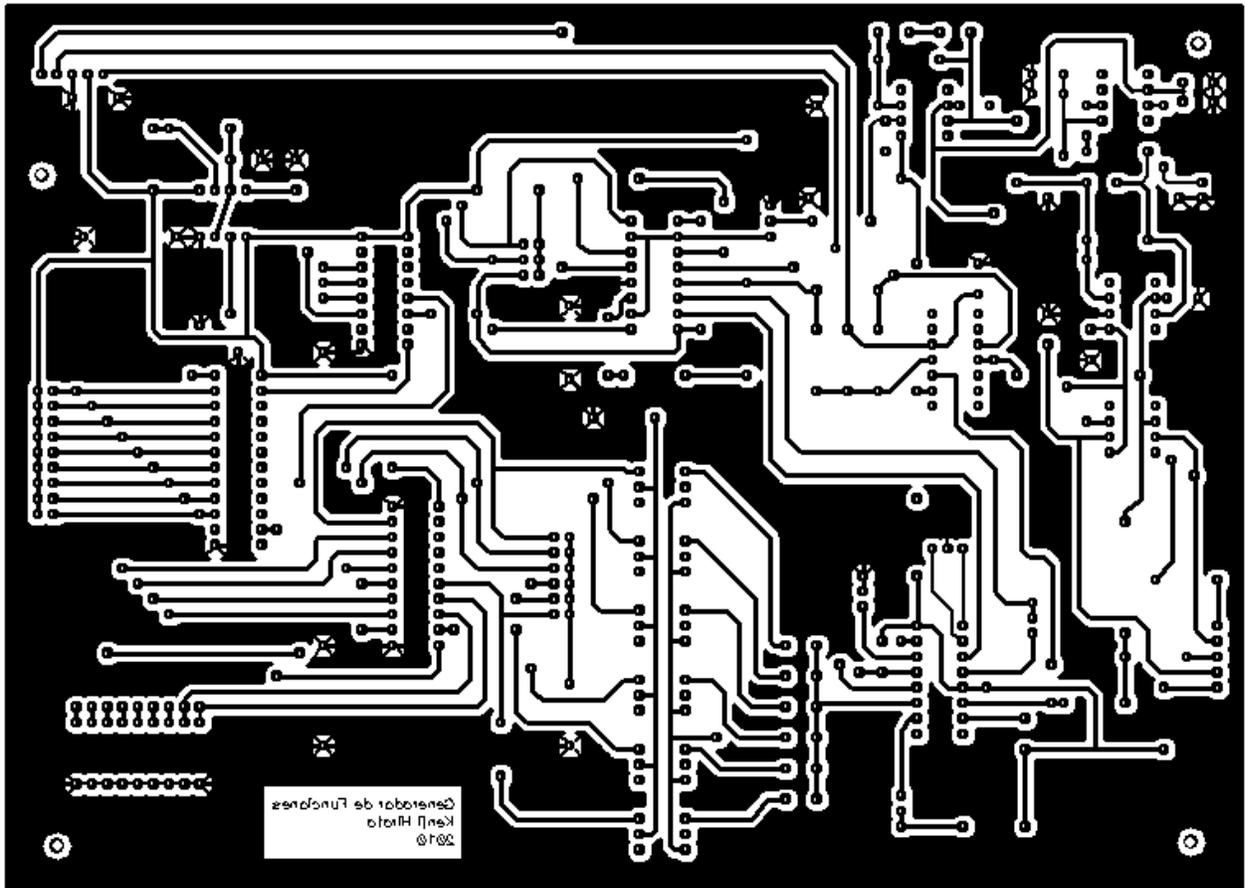
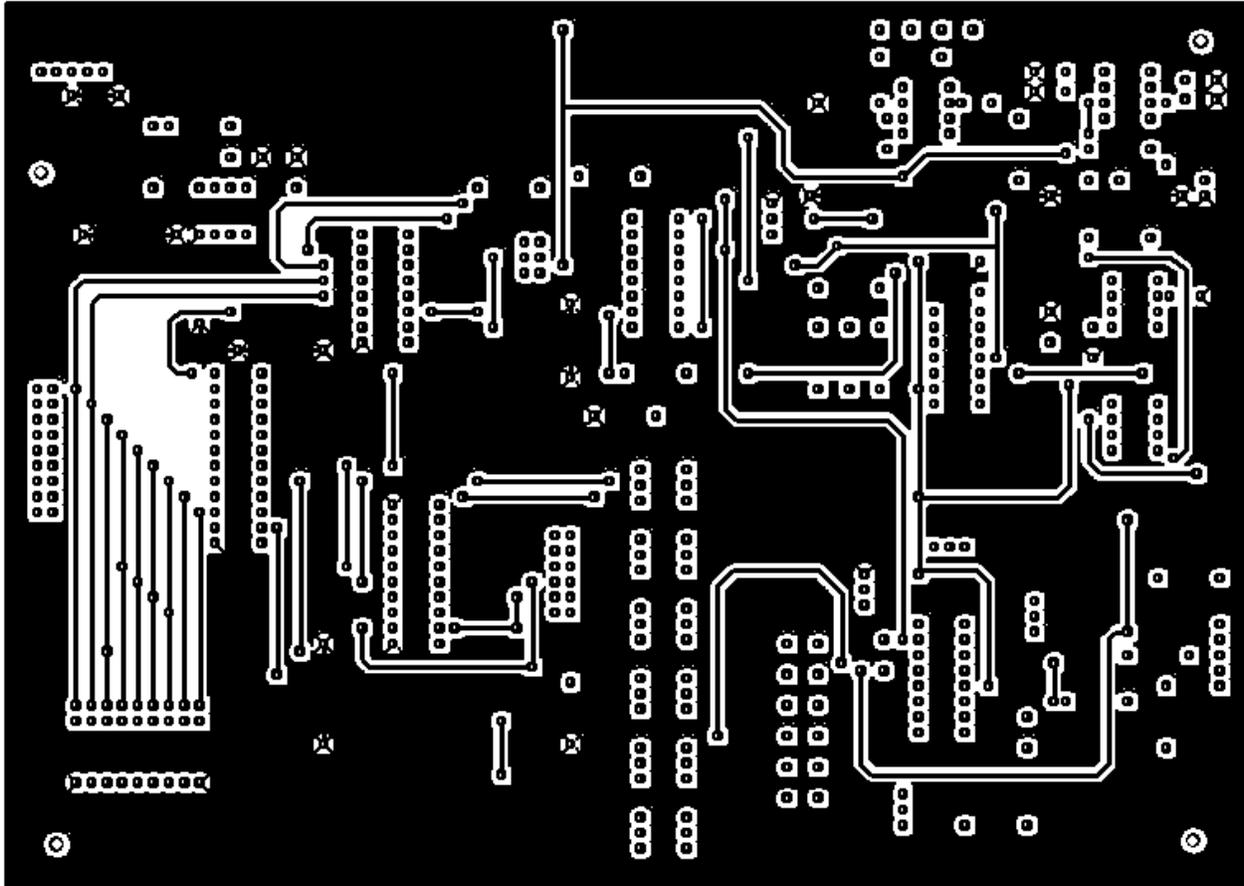


Figura 3.22. Cara inferior del circuito impreso.



*Figura 3.21.* Cara superior del circuito impreso.

En la *figura 3.24* se puede ver el circuito con todos los elementos colocados en su lugar.

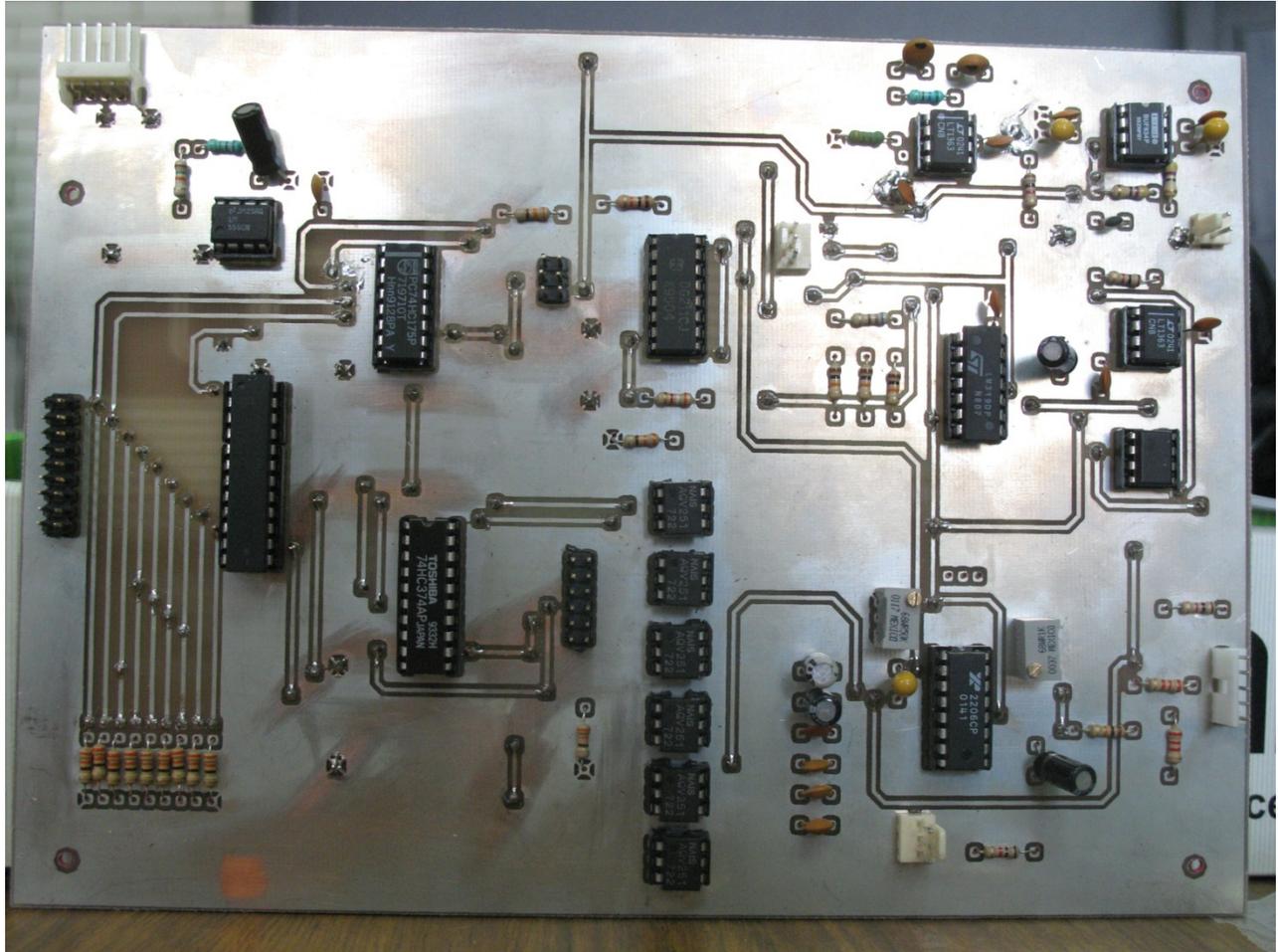


Figura 3.24. Circuito con los elementos.

La conexión de los LEDs y botones al circuito impreso se hace por medio de conectores de cable plano, para reducir el espacio ocupado en el circuito impreso; los potenciómetros, los circuitos de alimentación y la salida son conectados con conectores EIS paso 100.

En la siguiente tabla se agregan los precios de cada uno de los componentes del generador de funciones, para poder hacer un estimado del costo total.

Diseño de un generador de funciones

Capítulo III – Diseño

Pieza	Precio (pesos)	Cantidad	Subtotal (pesos)
XR2206	60	1	60
LT1363	70	2	140
BUF643	70	1	70
LM319	9	1	9
LF411	7	1	7
DG211	18	1	18
AQV251	40	6	240
74HC175	6	1	6
74HC374	7	1	7
GAL22V10	18	1	18
LM555	4	1	4
LM7805	5	1	5
LM7812	5	1	5
LM7905	7	1	7
LM7912	7	1	7
Puente de diodos	4	2	8
Resistencia 47	0,2	2	0,4
Resistencia 330	0,2	12	2,4
Resistencia 560	0,2	1	0,2
Resistencia 680	0,2	1	0,2
Resistencia 1k	0,2	4	0,8
Resistencia 2k2	0,2	2	0,4
Resistencia 3k9	0,2	1	0,2
Resistencia 5k6	0,2	1	0,2
Resistencia 10k	0,2	4	0,8
Resistencia 15k	0,2	1	0,2
Resistencia 22k	0,2	1	0,2
Potenciómetro 1k	10	1	10
Potenciómetro 1M	10	1	10
Potenciómetro c/ switch 10k	20	1	20
Trimpot 1k	13	1	13
Trimpot 50k	13	1	13
Capacitor cerámico 1p	2	2	4
Capacitor cerámico 2.2p	2	1	2
Capacitor cerámico 220p	2	1	2
Capacitor cerámico 1n	2	1	2
Capacitor cerámico 10n	2	2	4
Capacitor cerámico 100n	2	8	16

Diseño de un generador de funciones

Capítulo III – Diseño

Capacitor electrolítico 1u	2	4	8
Capacitor electrolítico 10u	2	1	2
Capacitor electrolítico 100u	2	4	8
Capacitor electrolítico 1m	3	4	12
Capacitor tantalio 1u	4	2	8
Capacitor tantalio 10u	4	3	12
LED	0,5	9	4,5
Diodo 1N4001	1	4	4
Transformador 127-24 .5 A	40	1	40
Interruptor	7	1	7
Botones de presión	6	9	54
Conector BNC hembra	9	1	9
Conector EIS 2	3	1	3
Conector EIS 3	3	4	12
Conector EIS 5	3	2	6
Conector de cable plano 10	3	1	3
Conector de cable plano 16	3	1	3
Conector de cable plano 20	3	1	3
Headers	10	1	10
Conector de alimentación	8	1	8
Porta fusible	3	1	3
Fusible 1 A	1	1	1
Gabinete	200	1	200
Tornillo	0,5	5	2,5
Cables	10	1	10
Total			1146

Tabla 3.5. Tabla de precios de los componentes.

Estos precios pueden variar dependiendo del proveedor y el volumen de compra. El costo total es aproximadamente 1146 pesos.

## Capítulo IV

### Pruebas

#### 4.1 Señal sinusoidal

Antes de cerrar el gabinete es importante hacer los ajustes necesarios para que la señal tenga un estado óptimo.

Estos ajustes involucran la modificación de dos trimpots. El primero que modifica la forma de onda de la señal sinusoidal, es el trimpot con un valor de 1 kOhm localizado entre las terminales trece y catorce del XR2206. Al aumentar la resistencia de este potenciómetro la señal triangular se aproxima a la sinusoidal, por lo que se tiene que ajustar a un valor óptimo con ayuda de un osciloscopio que realice la operación transformada rápida de Fourier (FFT), donde se busca el punto donde las magnitudes de las armónicas sean mínimas; o en caso de no tener disponible uno con estas características, se puede poner una señal de referencia de algún otro generador de funciones y girar el trimpot hasta que la diferencia entre la señal de referencia y la obtenida de este generador de funciones sea aceptable.

El otro trimpot, que es el de 50 kohms, regula con su resistencia la amplitud de las señales sinusoidal y triangular, ésta la ajustamos para que la señal triangular y la cuadrada tengan una amplitud similar a la salida del interruptor analógico DG211. De esta manera, todas las señales tienen una amplitud similar a la salida del generador de funciones.

En las *figuras 4.1 y 4.2*, se aprecia la forma de onda sinusoidal en los valores límites de frecuencia de operación del generador de funciones.

Diseño de un generador de funciones  
Capítulo IV – Pruebas

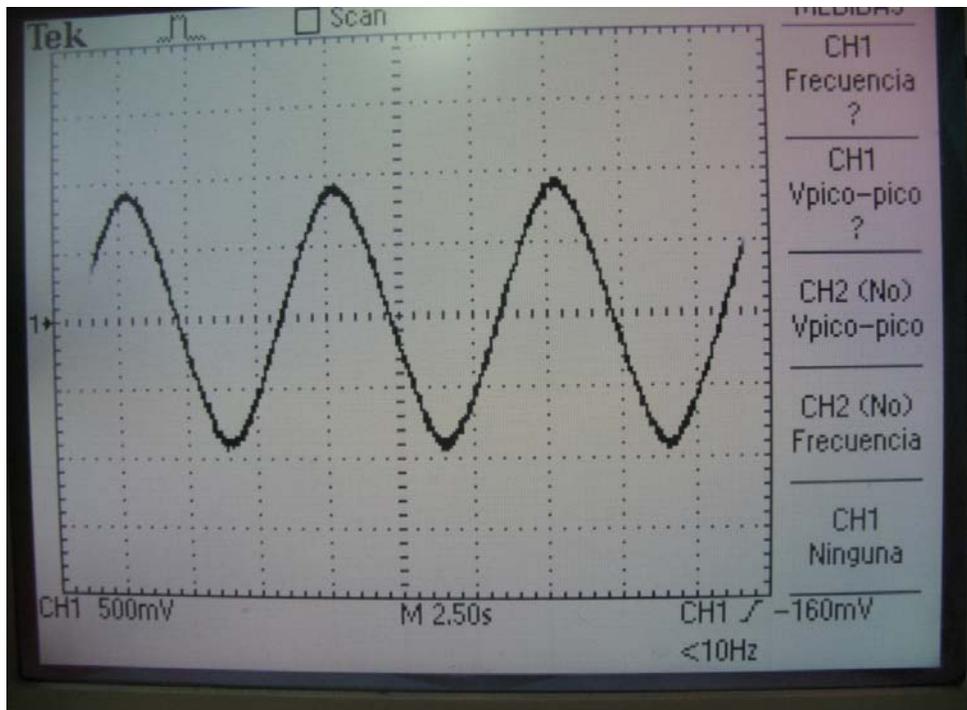


Figura 4.1. Señal sinusoidal a 0.13 Hz.

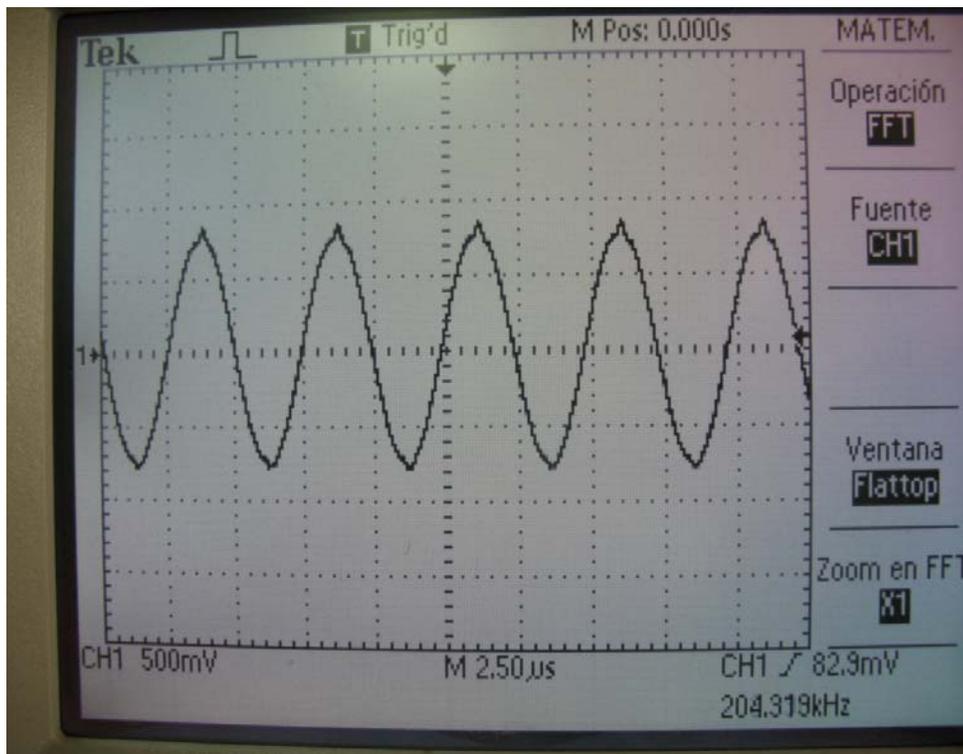


Figura 4.2. Señal sinusoidal a 204 kHz.

#### 4.1.1 Distorsión armónica total (THD)

El cálculo de la THD para la señal sinusoidal se realiza utilizando un osciloscopio que cuente con la transformada rápida de Fourier (FFT). El generador de funciones se conecta a la entrada del osciloscopio, en el modo de FFT y la señal sinusoidal seleccionada en el generador de funciones.

Para poder calcular la THD a partir de las espigas del espectro de frecuencias, debido a que se encuentran en escala de decibeles, es importante primero convertirla a la escala decimal. Para realizar esto se hace uso de la expresión matemática 4.1 que relaciona voltajes con decibeles, antes de aplicar la fórmula de THD.

$$dB = 20 \log \left( \frac{V_o}{V_i} \right)$$

$$V_o = V_i \left( 10^{\left( \frac{dB}{20} \right)} \right) \quad (4.1)$$

Una vez teniendo todas las equivalencias en voltaje de las espigas de las armónicas, se colocan los valores de las armónicas en la ecuación 2.2, para obtener el valor de la THD.

En el espectro de la señal después de la FFT se puede apreciar la frecuencia fundamental como la espiga con el valor más alto y las de menores valores sus armónicos.

Para las muestras de la THD se tomaron las frecuencias extremas del generador de funciones, esto permite ver el comportamiento de la señal sinusoidal a lo largo de todo el intervalo de frecuencias.

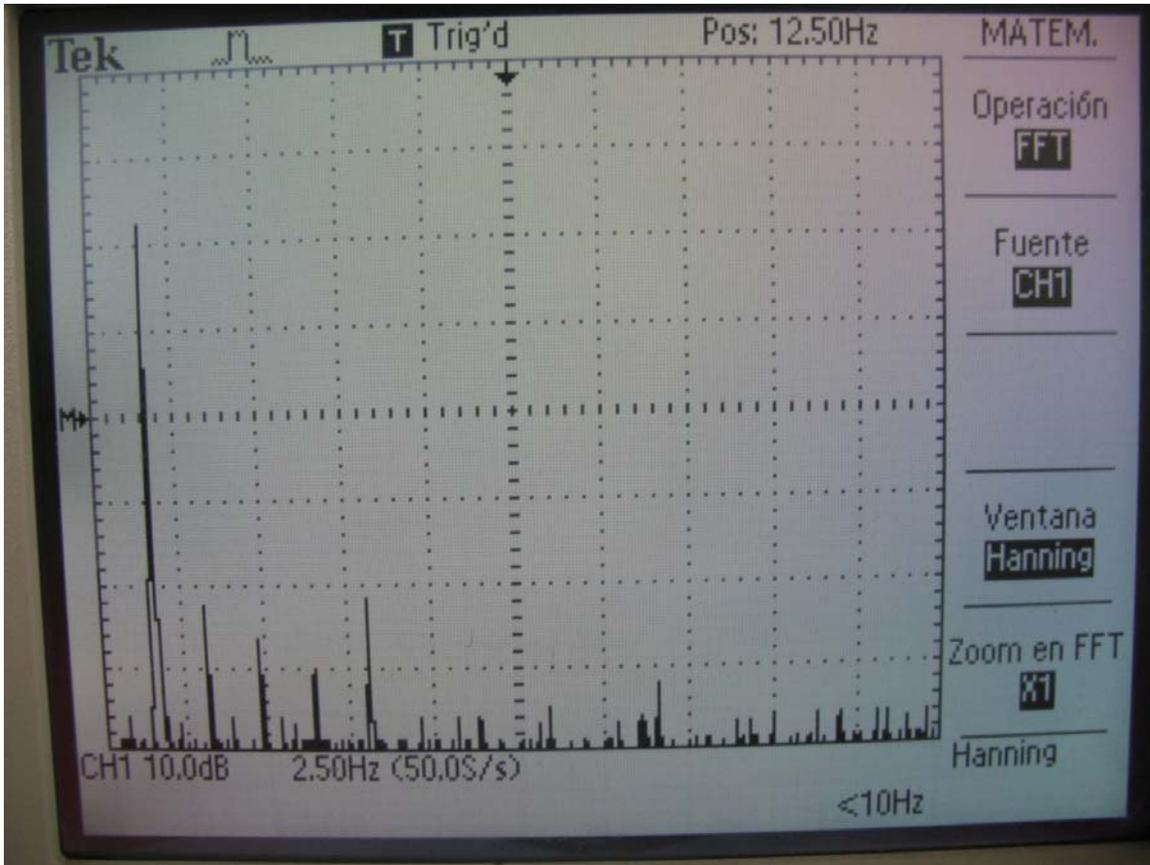


Figura 4.3. FFT de la señal sinusoidal a 1.5 Hz.

En la siguiente tabla se observan los valores de las espigas en decibeles junto con su equivalencia en voltajes considerando el valor de  $V_i$  como uno, dado que es el mismo para todos los valores no afectará la relación.

	f0	f1	f2	f3	f4	f5	f6	f6	f7	f8	f9	f10	f11	f12	f13	f14
dB	62	18	14	10	18	4	4	5	2	8	4	4	4	4	4	4
V	1258.93	7.94	5.01	3.16	7.94	1.58	1.58	1.78	1.26	2.51	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58

*Tabla 4.1. Valores de V y dB.*

A partir de estos valores podemos obtener un THD de 1.13% para la frecuencia de 1.5 Hz.

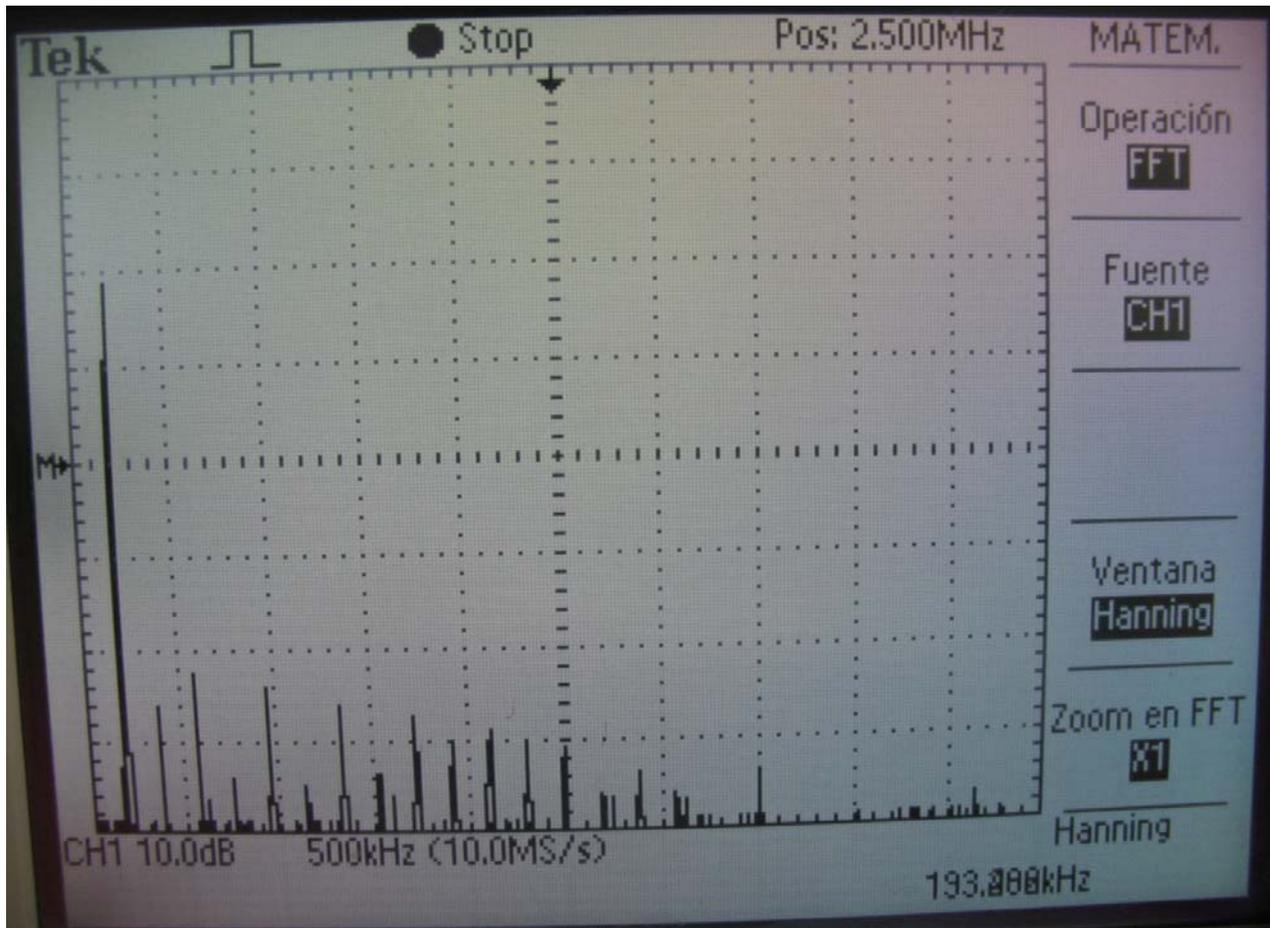


Figura 4.4. FFT de la señal sinusoidal a 193 kHz.

De manera similar la siguiente tabla podemos ver los valores de dB y V de la frecuencia fundamental y sus armónicos.

	f0	f1	f2	f3	f4	f5	f6	f6	f7	f8	f9	f10	f11	f12	f13	f14
dB	59	14	18	6	16	5	14	6	13	10	12	10	9	4	6	4
V	891.2	5.01	7.94	2.00	6.31	1.78	5.01	2.00	4.47	3.16	3.98	3.16	2.82	1.58	2.00	1.58

Tabla 4.2. Valores de V y dB.

En la figura anterior podemos obtener un TDH de 1.73% para la frecuencia de 193 kHz. Este resultado es mayor al encontrado en las bajas frecuencias, resultando éste nuestro peor escenario.

## 4.2 Señal cuadrada

De igual manera, en las siguientes figuras se muestra la señal cuadrada producida por el generador de funciones. Éstas fueron tomadas en los valores extremos de frecuencia de operación del equipo.

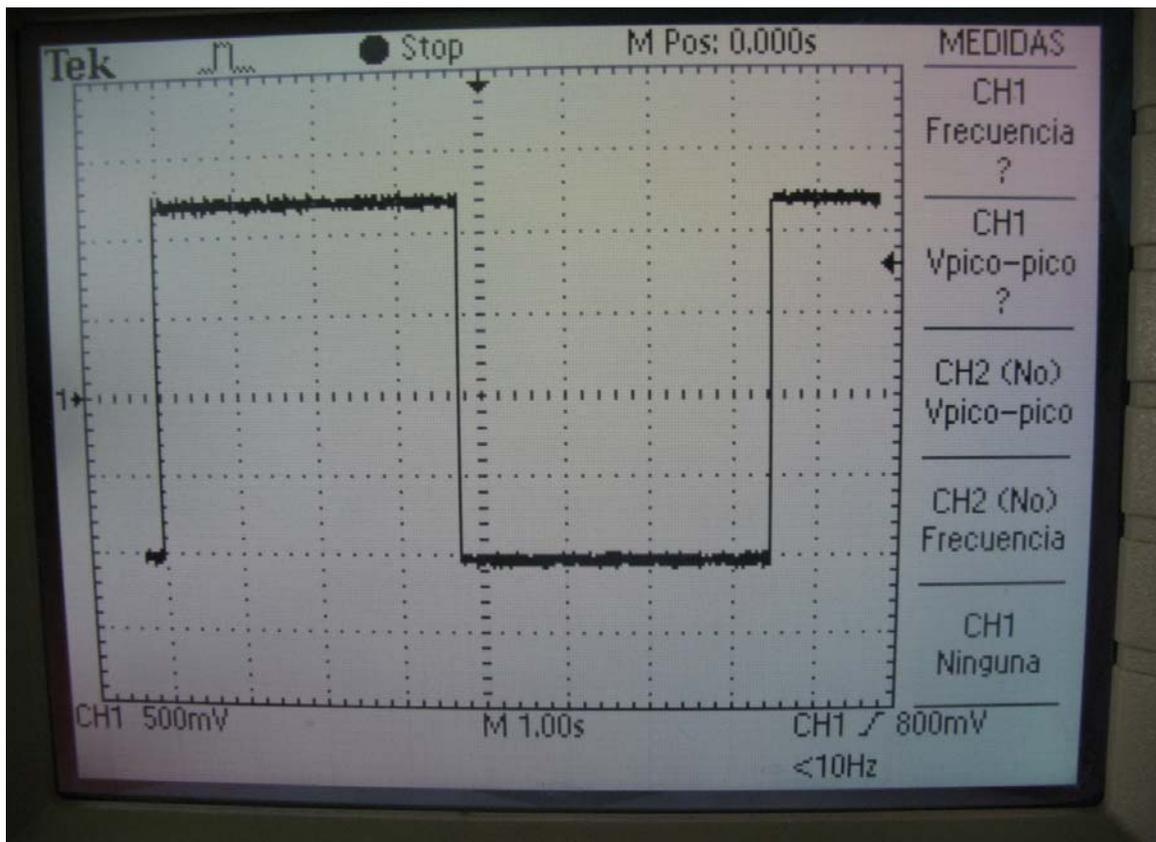


Figura 4.5. Señal cuadrada a 0.13 Hz.

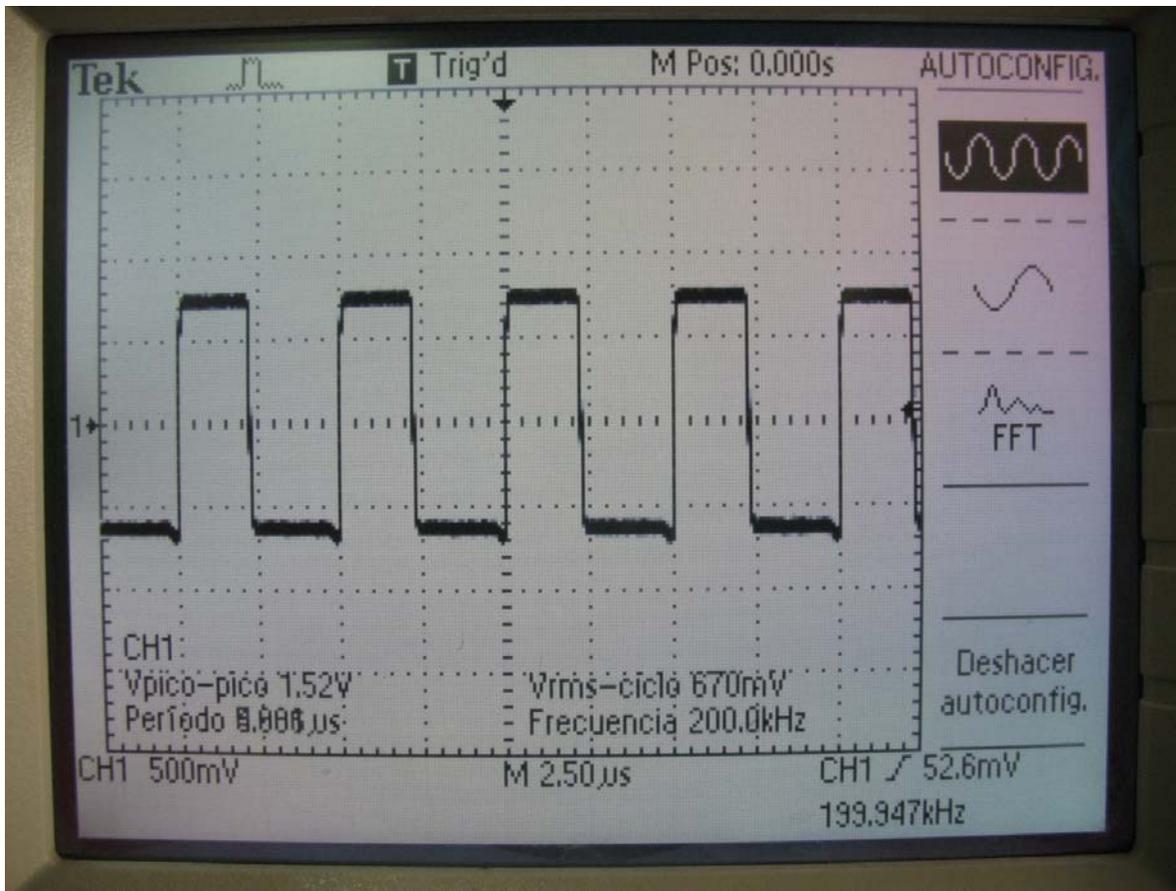


Figura 4.6. Señal cuadrada a 199 kHz.

Las características que más nos interesan conocer de la señal cuadrada son: el tiempo de subida y el tiempo de bajada, los cuales se refieren al tiempo que tarda la señal en cambiar de un estado bajo al estado alto y viceversa. Entre menor es este tiempo la señal es más cuadrada.

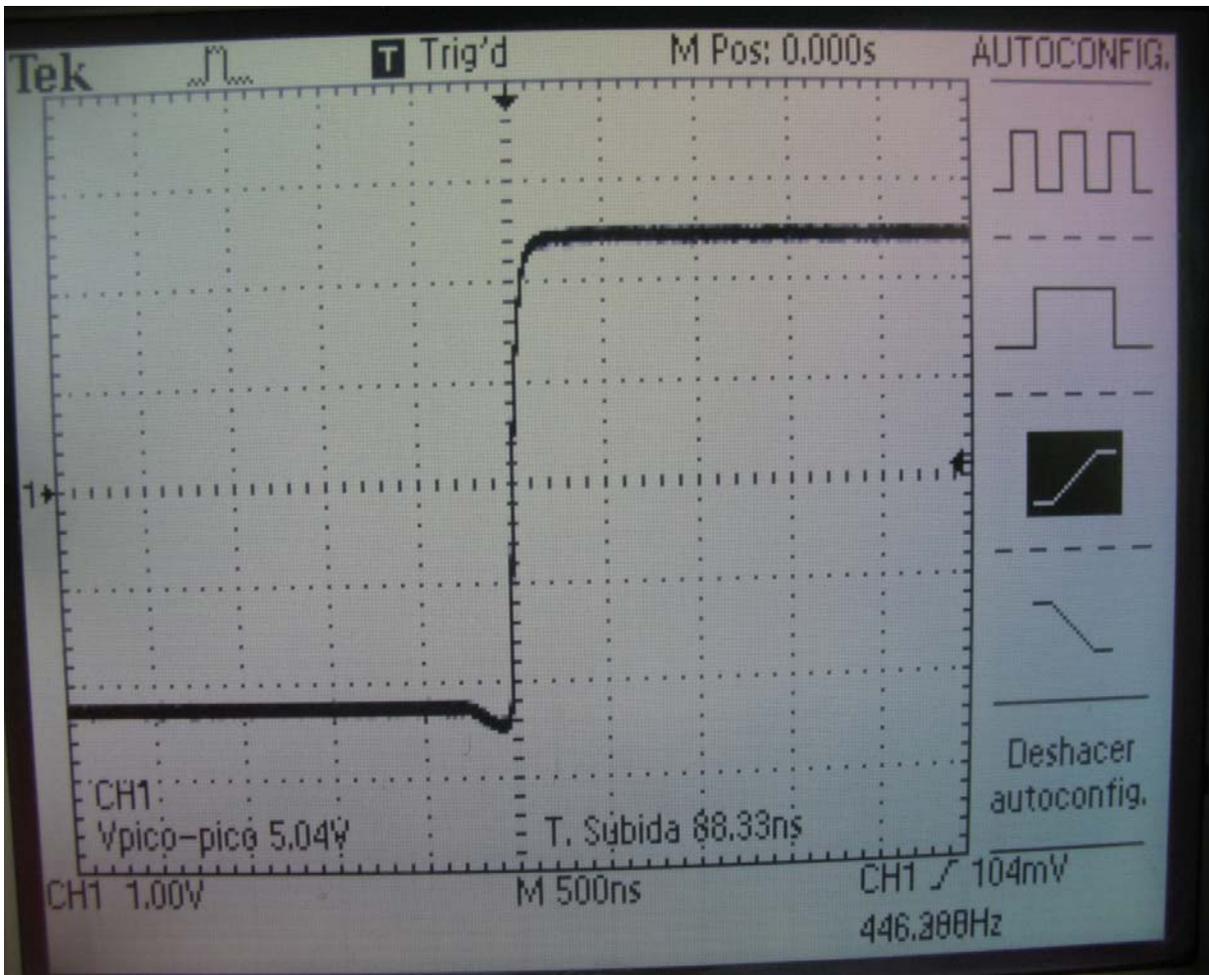


Figura 4.7. Tiempo de subida de la señal cuadrada.

El tiempo de subida de la señal cuadrada es de 88 ns, como se puede ver en la figura 4.7. Este resultado es obtenido con ayuda del osciloscopio. Y se obtuvo un tiempo de bajada ligeramente mayor, con un valor de 118 ns, como se puede observar en la figura 4.8.

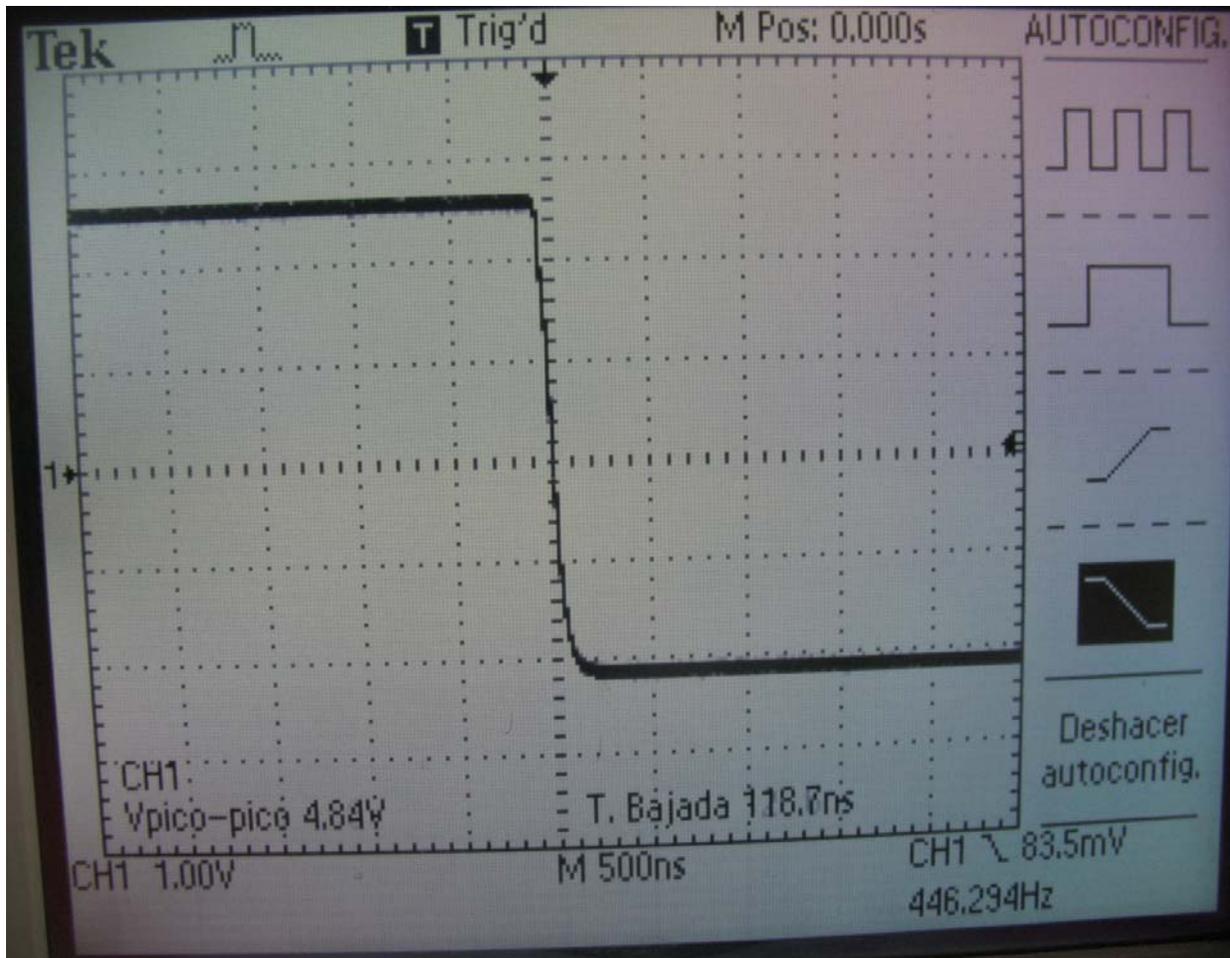


Figura 4.8. Tiempo de bajada de la señal cuadrada.

### 4.3 Señal triangular

En las siguientes figuras se puede observar las señales triangulares entregadas por el generador de funciones. Estos valores fueron tomados en los valores de frecuencia extremos.

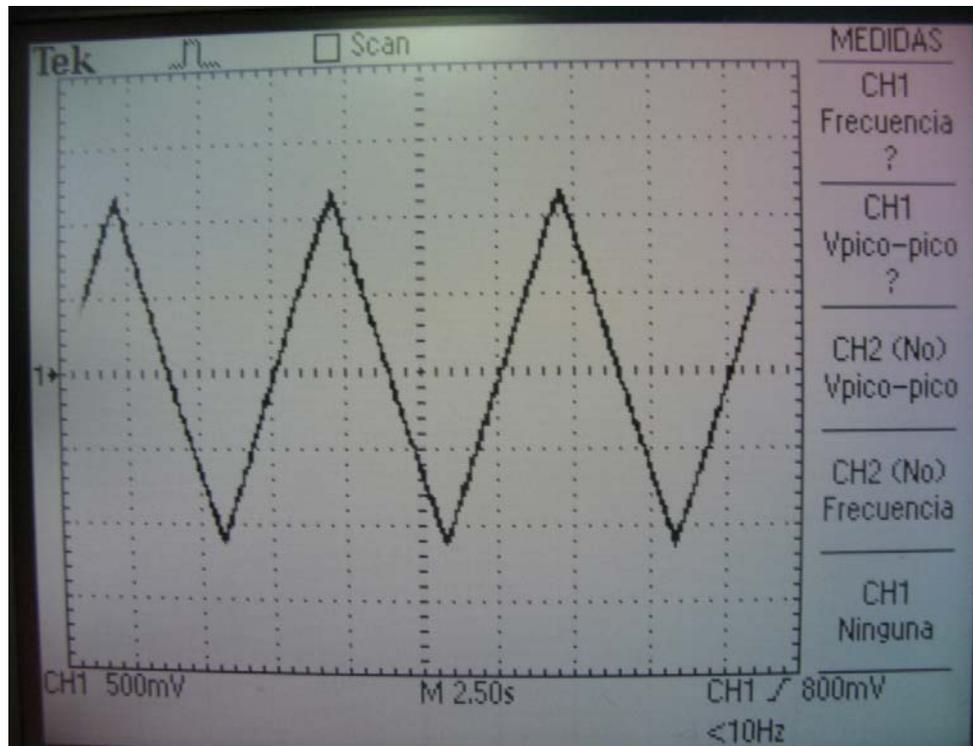


Figura 4.9. Señal triangular a 0.13 Hz.

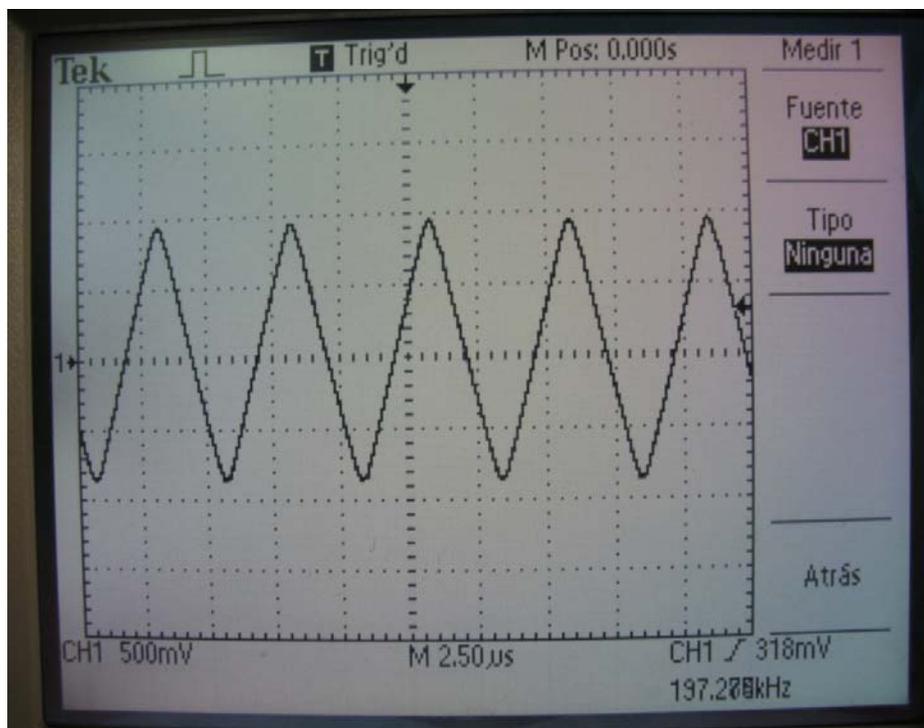


Figura 4.10. Señal triangular a 197 kHz.

Para poder medir la linealidad de la señal, se hizo un muestreo de la pendiente ascendente, para obtener estos datos se utilizó un osciloscopio con salida a un floppy disk. Con el uso de herramientas estadísticas se grafican estos datos y se obtiene la regresión lineal de estos datos, lo que nos entrega una ecuación que modela el comportamiento de estos datos por medio de una recta. Después de obtener la regresión lineal se obtuvo el coeficiente de determinación.

El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) es usado en el contexto de modelos estadísticos, cuyo principal propósito es la predicción de futuros resultados a partir de información relacionada. Es la proporción de variabilidad en los datos adquiridos por el modelo estadístico. Éste proporciona una medición de qué tan acertados los futuros datos pueden ser predichos por el modelo. Los valores que puede tomar este coeficiente son los comprendidos de cero a uno, siendo uno el máximo y cero el mínimo.

En la siguiente gráfica de Excel podemos observar los pares coordenados de puntos obtenidos al muestrear la señal, donde se forma una recta. Se agrega la línea de tendencia y su ecuación propuesta por el programa. Finalmente se encuentra el valor del coeficiente de determinación ( $R^2$ ). Se obtiene el valor de 0.999 lo cual indica una gran linealidad.

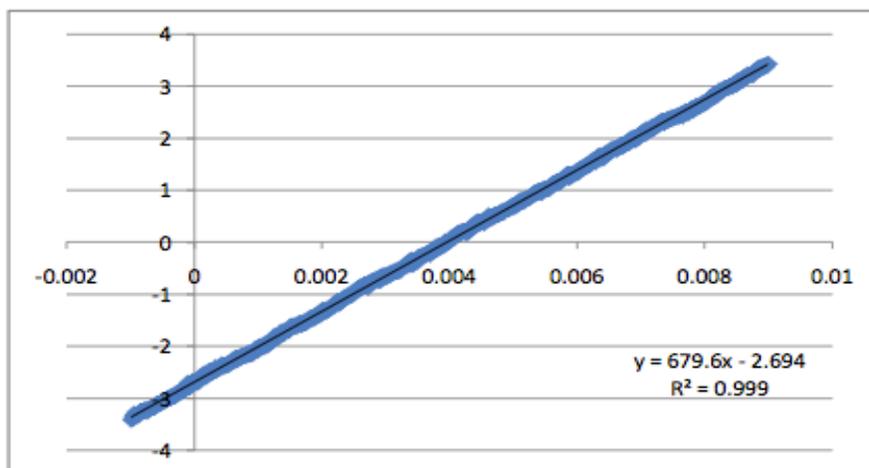


Figura 4.11. Gráfica del muestreo de la señal triangular.

## Conclusiones

Como resultado de este trabajo de tesis se logró construir un generador de funciones, el cual tiene un intervalo de frecuencias, desde valores menores a las unidades de Hertz, hasta poco más de 200 kHz. Éste cuenta con una selección digital de los intervalos de frecuencias y de la forma de onda. Tiene un costo de fabricación menor al costo de un equipo comercial.

Estas características son suficientes y atractivas para que un estudiante pueda desarrollar su propio equipo. Ya que se incluye, para la facilitación de esto, todo lo necesario para su construcción, que son la lista de componentes, el circuito impreso y el programa de la GAL.

Las principales limitaciones de este generador de funciones están acotadas al desempeño del chip generador de funciones XR2206, como son el intervalo de frecuencias típico de 500 kHz, esa es la razón principal por la cual uno de los objetivos principales se vio mermado. Pero debido a la corta gama de este tipo de circuitos integrado no hay muchas opciones disponibles.

Aún con las limitaciones del circuito generador de funciones, la etapa de amplificación está preparada para soportar mayores frecuencias. Por lo que substituyendo el circuito generador por uno de mayores frecuencias, cuyo principio básico de funcionamiento sea el mismo como el max038 ahora discontinuado, se puede obtener un instrumento de mayores prestaciones.

Otra de las limitantes resultan los interruptores de estado sólido, ya que éstos presentan capacitancias parásitas que son significativamente mayores a las presentadas por los interruptores mecánicos. Lo que ocasiona que el banco de capacitancias esté restringido.

Conclusiones

En cuanto a las pruebas realizadas el valor de THD en la señal sinusoidal es menor al 1.7% en todo su rango; el tiempo de subida de 88 ns y el tiempo de bajada de 120 ns para la señal cuadrada; y el coeficiente de determinación de .999 en la señal triangular, resultan valores aceptables para un generador de funciones con estas características.

**Bibliografía:**

- PALLÁS ARENY, Ramón. Instrumentos electrónicos básicos. España 2006. Editorial Marcombo.
- COUGHLIN, Robert F. et all. Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales. 5ta ed. México 2006. Editorial Pearson Education Limited.
- MANDADO PÉREZ, Enrique et al. Instrumentación electrónica. España 1995. Editorial Marcombo.
- VARGAS PÁTRON, Ramón. Redes conformadoras de onda triangular a senoidal.
- NATIONAL SEMICONDUCTOR. Sine wave generation techniques. 1981.

**Hojas de características de componentes:**

- EXAR XR2206 datasheet.
- LINEAR TECHNOLOGY LT1363 datasheet.
- HARRIS SEMICONDUCTOR DG211 datasheet.
- MATSUSHITA ELECTRIC WORKS AQV251 datasheet.