

**DISEÑO DE UN GENERADOR DE SEÑALES PARA VALORAR EL  
FUNCIONAMIENTO DE UN MEDIDOR DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

**OSCAR ANDRÉS PRADA VELANDIA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2015**

**DISEÑO DE UN GENERADOR DE SEÑALES PARA VALORAR EL  
FUNCIONAMIENTO DE UN MEDIDOR DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

**Autor:**

**OSCAR ANDRÉS PRADA VELANDIA**

**Trabajo de Grado para optar por el título de  
Ingeniero Electrónico**

**Director:**

**MPE. Jaime Guillermo Barrero Pérez**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2015**

## **DEDICATORIA**

Dedico este logro a TODOS mis familiares, padres, hermanos, sobrinos, tíos y cuñados, que siempre estuvieron pendientes y me han apoyado en todo momento.

Especialmente a mi madre ELENA ALICIA VELANDIA DE PRADA, quién con su fe y oraciones siempre estuvo a mi lado espiritualmente en cada paso dado.

A LUCY GARNICA MAYORGA, que siempre ha estado a mi lado, me ama y me apoya incondicionalmente.

A mi hija ANNIE MARIAM PRADA GARNICA porque ella aún a su corta edad me enseña constantemente de la vida y de lo maravilloso que es compartirla con ella, eres mi motivación más grande, te AMO.

A mis amigos y compañeros que también estuvieron pendientes y me apoyaron incansablemente OMAR JULIAN PADILLA ESTUPIÑAN, OMAR FERNANDO PINTO QUINTERO, CARLOS EUSEBIO LAGUADO.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mi director de proyecto el profesor JAIME GUILLERMO BARRERO PÉREZ, quien me apoyó y asistió en cada proceso académico y administrativo, para dar conclusión a mi proyecto.

Al profesor OSCAR MAURICIO REYES TORRES, quien desinteresadamente me apoyó y me colaboró en los trámites administrativos pertinentes para poder culminar mis estudios profesionales.

A los ingenieros KEVIN ANDRÉS POLO JARAMILLO y WILSON JAIR RODRÍGUEZ LEÓN, quienes fueron un apoyo primordial para la culminación de mi proyecto.

A mis amigos y compañeros de estudio, CESAR BARAJAS GUAVA Y EFREN DARÍO ACEVEDO, quienes siempre creyeron en mí, me apoyaron y empujaron a culminar mi etapa profesional.

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	15
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	21
1.1. GENERADORES DE SEÑALES.....	21
1.2. CONVERTIDOR ANALÓGICO-DIGITAL “DAC” .....	23
1.2.1. Definiciones Y Conceptos Básicos De La Conversión Digital-Analógica. ....	24
1.2.1.1. Comportamiento Estático Y Dinámico.....	25
1.3. ANÁLISIS DE COMPONENTES ARMÓNICAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS .....	36
1.3.1. Análisis de Fourier. ....	39
1.3.2. Fuentes de Distorsión de Señales Eléctricas.....	40
1.3.3. Efectos de las Señales Distorcionadas .....	42
1.4. SISTEMA DE DESARROLLO .....	43
2. GENERADOR DE SEÑALES, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN .....	45
2.1. ETAPA DE ALIMENTACIÓN .....	46
2.2. ETAPA DE GENERACIÓN .....	48
2.2.1. Arquitectura.....	49
2.2.2. Programación.....	53
2.2.3. Software Compilador. ....	55
2.2.3.1. Mikroc Pro For Dspic:.....	55
2.2.3.2. Visual TFT.....	57
2.2.4. Establecimiento del Programa. ....	58
2.2.4.1. Módulo De Lectura De Datos Desde La Microsd: .....	61
2.2.4.2. Módulo De Generación De Señales A Partir De Sus Componentes Armónicas .....	69
2.2.4.3. Módulo de Generación de Señales Típicas .....	73

2.2.4.4. Envío de Datos y Comunicación Spi.....	74
2.3. ETAPA DE CONVERSIÓN Y AMPLIFICACIÓN .....	77
2.3.1. Conversor Digital-Analógico “DACs”.....	77
2.3.2. Adecuación de la Señal de Salida. ....	81
2.3.3. Fabricación Placa De Circuito Impreso.....	84
2.4. ENSAMBLAJE DEL MODELO ELECTRONICO DEL GENERADOR .....	85
3. PRUEBAS Y RESULTADOS .....	87
3.1. PRUEBAS DEL MÓDULO DE SEÑALES GENERADAS POR COMPONENTES ARMÓNICAS .....	88
3.2. PRUEBAS DEL MÓDULO DE SEÑALES GENERADAS CON DATOS EXTERNOS .....	93
3.3. PRUEBA DEL MÓDULO DE SEÑALES TÍPICAS .....	96
3.4. PRUEBAS GENERALES .....	98
4. CONCLUSIONES .....	99
5. RECOMENDACIONES.....	101
BIBLIOGRAFÍA.....	103

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Características de la fuente de alimentación .....	47
Tabla 2. Comparación de tres distintos DACs .....	78
Tabla 3. Verificación de los parámetros de las señales generadas por el módulo de señales generadas por armónicos desde la pantalla. ....	88
Tabla 4. Verificación de la magnitud, posición y la fase de señales generadas por el módulo de ingreso de señales externas con MicroSD. ....	93
Tabla 5. Barrido de frecuencia del modelo electrónico - señal sinusoidal.....	97

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Esquema típico de un sistema electrónico de proceso de señal .....	24
Figura 2. Curva de transferencia ideal de un Convertidor Digital-Analógico.....	26
Figura 3. Error de exactitud en un conversor digital analógico .....	27
Figura 4. Error de escala en un conversor digital analógico. La recta ideal es la punteada.....	28
Figura 5. Error de offset en un conversor digital analógico.....	29
Figura 6. Error de no linealidad en un conversor digital-analógico.....	30
Figura 7. Error de no linealidad diferencial en un conversor digital-analógico.....	31
Figura 8. Fenómeno de “glitch” en la conmutación entre dos valores que implican el cambio simultáneo de muchos bits.....	33
Figura 9. Tiempo de establecimiento en un conversor digital-analógico.....	35
Figura 10. Señal Sinusoidal sin contenido armónico en “Por Unidad” .....	38
Figura 11. Señal Sinusoidal con contenido armónico de 30% del 5º armónico .....	39
Figura 12. Fuente de alimentación.....	48
Figura 13. Sistema de desarrollo Mikromedia For dsPIC33EP® .....	50
Figura 14. Diagrama del micro-controlador dsPIC33EPMC810.....	51
Figura 15. Arquitectura del micro-controlador dsPIC33EPMC810.....	52
Figura 16. Imagen de un Programador “Microprog” .....	53
Figura 17. Pantalla Principal del programador “USB HID Bootloader” .....	54
Figura 18. Interfaz “MikroC Pro for dsPIC” .....	57
Figura 19. Interfaz “Visual TFT” .....	58
Figura 20. Diagrama de flujo general del modelo .....	59
Figura 21. Pantalla de inicio del modelo electrónico del generador de señales.....	60
Figura 22. Pantalla de selección del método de obtención de los datos.....	61
Figura 23. Desplazamiento vertical de una señal (Normalización) .....	63

Figura 24. Diferentes pantallas de interacción para generar señales a partir de armónicos en un entorno WEB. ....	64
Figura 25. Línea de código lectura de archivo memoria externa. ....	66
Figura 26. Línea de código convertir cadena de caracteres. ....	67
Figura 27. Línea de código obtener el vector “numeros”. ....	68
Figura 28. Pantallas del módulo de ingreso de datos desde una MicroSD.....	69
Figura 29. Módulo de ingreso de armónicos, primera pantalla .....	70
Figura 30. Módulo de ingreso de armónicos, segunda pantalla.....	71
Figura 31Línea de código con la función para obtener el vector con la suma de los armónicos.....	72
Figura 32. Módulo de generación de señales típicas, ingreso de variables para cada canal. ....	73
Figura 33. Línea de código para normalizar el vector a enviar a los DAC .....	74
Figura 34. Arquitectura de la comunicación serial SPI para más de un dispositivo esclavo.....	75
Figura 35. Línea de código para habilitar envío .....	76
Figura 36. Línea de código para el envío de la señal a los DAC. ....	77
Figura 37. Esquemático de conexión del DAC8830.....	80
Figura 38. Configuración de la adecuación de la señal de salida. ....	81
Figura 39. Simulación la señal de entrada y de salida.....	83
Figura 40. Respuesta en frecuencia de la señal de salida de la adecuación implementada .....	84
Figura 41. Placa de circuito impreso de la etapa de Conversión y Amplificación ..	84
Figura 42. Modelo Electrónico del Generador de Señales.....	85
Figura 43. GW Instek GDS-2062 (Izquierda), BK Presicion 4040a (derecha). ....	87
Figura 44. a) Señal en pantalla del osciloscopio en tiempo y en frecuencia, b) comparación de la señal en tiempo y frecuencia, con una de referencia generada en Matlab [ANEXO 5: ALL9999] .....	89

Figura 45. a) Señal en pantalla del osciloscopio en tiempo y en frecuencia, b) comparación de la señal en tiempo y frecuencia, con una de referencia generada en Matlab [ANEXO 5: ALL0000] .....	91
Figura 46. a) Señal en pantalla del osciloscopio en tiempo y en frecuencia, b) Comparación de la señal en tiempo y frecuencia, con una de referencia generada en Matlab [ANEXO 5: ALL0011] .....	92
Figura 47. Comparación de la señal en tiempo y frecuencia, con una de referencia generada en Matlab [ANEXO 5: ALL0001] .....	95
Figura 48. Comparación de la señal en tiempo y frecuencia, con una de referencia generada en Matlab [ANEXO 5: ALL0002] .....	95
Figura 49. Comparación de la señal en tiempo y frecuencia, con una de referencia generada en Matlab [ANEXO 5: ALL0007] .....	96

## RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO DE UN GENERADOR DE SEÑALES PARA VALORAR EL FUNCIONAMIENTO DE UN MEDIDOR DE ENERGÍA ELÉCTRICA\*

AUTOR: OSCAR ANDRÉS PARADA VELANDIA\*\*

PALABRAS CLAVE: GENERADOR DE SEÑALES, CONVERTOR DIGITAL-ANALÓGICO, MODELO ELECTRÓNICO, SISTEMA DE DESARROLLO

### DESCRIPCIÓN:

Un generador de señales es un dispositivo capaz de constituir diferentes tipos señales con formas de onda dependientes del tiempo y con la posibilidad de hacerle variaciones a sus parámetros de amplitud y frecuencia. El generador se compone de manera general de una fuente generadora de la señal, un dispositivo procesamiento digital de la señal y una etapa de conversión digital-analógica, que es la encargada de entregar la señal reconstruida con sus características definidas.

El objetivo principal de este proyecto es el diseño y la construcción de un modelo electrónico funcional de un generador, con dos señales de tensión simultáneas e independientes, con un ancho de banda de 1 *KHz*. cada una, una amplitud pico a pico de 10 *Volts* cada una y que además funcione para modelar formas de onda semejantes a las que una red eléctrica común puede tener, con las posibles perturbaciones inherentes a la transmisión y las cargas que en un determinado periodo de tiempo tenga, pero a baja potencia.

Dentro del documento se presentan antecedentes, se definen ciertos parámetros que sientan la base para la realización del proyecto, se describe el proceso de diseño y construcción del modelo electrónico del generador de señales; además se realizan y analizan algunas pruebas realizadas al equipo para verificar su correcto funcionamiento y limitaciones; y finalmente se desarrollan las conclusiones y recomendaciones.

La ventaja de trabajar con señales normalizadas es que se aprovecha mejor el rango de trabajo y en consecuencia la relación señal/ruido del dispositivo no afecta tanto.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: MPE. Jaime Guillermo Barrero Pérez.

## ABSTRACT

TITLE: DESIGN OF A SIGNAL GENERATOR TO ASSESS THE PERFORMANCE OF ELECTRIC POWER METER<sup>\*</sup>

AUTHOR: OSCAR ANDRES PRADA VELANDIA<sup>\*\*</sup>

KEYWORDS: SIGNAL GENERATOR, DIGITAL-ANALOG CONVERTER, MODEL ELECTRONIC, SYSTEM DEVELOPMENT.

### DESCRIPTION:

A signal generator is a device able to provide different types signals with waveforms dependent on time and with the possibility of making changes to its amplitude and frequency parameters. The generator is composed generally of a generating source of the signal, a digital signal processing and digital-analog stage conversion, which it is responsible for delivering the reconstructed signal with defined characteristics.

The main objective of this project is the design and construction of a functional electronic model of a generator, with two signals simultaneous and independent tension, with a bandwidth of 1 kHz. each, a peak to peak amplitude of 10 *volts* each, and further work to model wave forms such that a common electrical network can, with possible disturbances from the transmission and the loads in a certain period of time has, but at low power .

Within the document background information, certain parameters that provide the basis for the project are defined, the process of design and construction of electronic model to signal generator is described; also they performed some tests and analyze the model to verify proper operation and limitations; and finally develop the conclusions and recommendations.

The advantage of working with standard signals is that the signal / noise ratio of the device is not so much better use of labor and the range accordingly.

---

<sup>\*</sup> Bachelor Thesis

<sup>\*\*</sup>Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: MPE. Jaime Guillermo Barrero Pérez.

## INTRODUCCIÓN

Con el avance de la electrónica se han podido implementar nuevos circuitos que hacen posible el desarrollo de la tecnología digital, por ejemplo, se han implementado sistemas y equipos eléctricos con un conjunto de técnicas electrónicas de última generación tanto para uso industrial como casero. El desarrollo de nuevas tecnologías y su rápido crecimiento y expansión crea a la par una inherente necesidad de analizar estos sistemas y equipos para valorar su comportamiento. De esta forma las empresas encargadas de la distribución eléctrica en el país y empresas privadas, cuentan con equipos especializados que le hacen pruebas de calibración a medidores digitales y analógicos de energía eléctrica<sup>1</sup>. En los laboratorios de calibración se cuenta con un sistema que se compone de tres partes fundamentales: El generador de señales que produce señales con características fijas de tensión corriente y frecuencia, la mesa de calibración o fuentes que en resumen es la etapa de potencia del sistema y el patrón o medidor de comparación<sup>2</sup>.

Por otra parte la red eléctrica es variante en el tiempo, selectiva en frecuencia y exhibe marcadas diferencias entre distintas ubicaciones, según su topología (normalmente desconocida), el tipo de cables instalados y los dispositivos que tenga conectados como variadores de velocidad, convertidores, rectificadores, reactancias, equipos de soldadura, dispositivos de arco entre otras. Las distorsiones de las señales de tensión y corriente que se pueden producir en la red

---

<sup>1</sup> OSORIO VILLAMIZAR, Secundino. Medidores Técnica Equipos SA. VERIFYLAB. [en línea]. Disponible en: <<http://www.verifylab.com/>>. [10 de junio de 2015]

<sup>2</sup> ESSA, Electrificadora de Santander S.A. E.S.P. Laboratorio de medidores [en línea]. Disponible en: <<https://www.essa.com.co/site/clientes/es-es/nuestrosproductosyservicios/laboratoriomedidores.aspx>>. [26 de junio de 2015]

pueden causar errores adicionales en las lecturas de los medidores de electricidad, las fuerzas electrodinámicas producidas por las corrientes distorsionadas, causan vibraciones y ruido acústico en transformadores, reactores y máquinas rotativas. También causan interferencias en las comunicaciones y en los circuitos de control y provocan la disminución del factor de potencia. La distorsión de la señal de tensión puede provocar disturbios en los sistemas electrónicos entre otros problemas asociados<sup>3</sup>.

Se han desarrollado modelos para representar la estructura física de las redes eléctricas reales, que permiten generar comportamientos esperables, en función de los parámetros de los elementos de la estructura, uno de ellos constituye la aproximación más común y consiste en ver la red como un sistema lineal e invariante en el tiempo que presenta un ruido aditivo con componentes estacionarias e impulsivas. El segundo, contiene un sistema lineal pero variante en el tiempo periódicamente y un ruido cuyos parámetros estadísticos también son periódicos. En la adopción de un modelo u otro es determinante la forma de representar el comportamiento de los dispositivos, en una doble faceta: como cargas y como generadores de ruido<sup>4</sup>.

Para caracterizar el comportamiento de los diversos elementos que pueden componer una determinada red y/o los equipos asociados, existen también diferentes adelantos que relacionan diferentes tipologías y tecnologías, siendo estos instrumentos especializados la base para la parametrización de equipos y sistemas. La metrología es otro aspecto importante que sienta la base para este

---

<sup>3</sup> KAI, Grupo de Gestión Eficiente de Energía y DR. CAMPOS AVELLA, Juan Carlos (Investigador principal). "Calidad de la Energía Eléctrica". UPME, Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia y COLCIENCIAS, Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia Y La Tecnología. Colombia, 2007. 25 p.

<sup>4</sup> CAÑETE CORRIPIO, Francisco Javier. TESIS DOCTORAL. "Caracterización y Modelado de Redes Eléctricas Interiores como Medio de Transmisión de Banda Ancha". Universidad de Málaga, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación. España, 2004. 245p.

proyecto, pues un generador de señales que pueda simular una red o sus diferentes tipologías y/o perturbaciones, proporciona un camino confiable para hacerle análisis a dispositivos de medición.

En la Universidad Industrial de Santander se desarrolló un proyecto en el cual se construyó un medidor digital de energía eléctrica<sup>5</sup> [05], el cual puede ser valorado en su comportamiento, sometiéndolo a pruebas con señales distorsionadas que simulen las existentes en la red. Anteriormente se desarrollaron otros proyectos de grado de equipos generadores de señales con 7 salidas para simular las tres señales de tensión, y cuatro de corriente, los proyectos denominados “Diseño e Implementación de un Sistema Generador de formas de onda de Tensión y de Corriente para sistemas trifásicos”<sup>6</sup>[06], y “Diseño e Implementación de un Generador de Señales Trifásico”<sup>7</sup> [07], ambos cumplieron con los objetivos planteados pero en sus varias recomendaciones demuestra la necesidad de utilizar un microcontrolador con mejores características.

Existiendo ya antecedentes en la universidad de modelos electrónicos diseñados para generar señales, la necesidad es diseñar un nuevo generador que supere los inconvenientes presentados en el anterior apartado y que además cuente con mejores características. Es así que tomando en cuenta también trabajos realizados en la universidad con algunos sistemas de desarrollo enfocados a la

---

<sup>5</sup> PÉREZ DÍAZ, Wilson Andrés, QUIROGA JORDAN, Juan Manuel y ROMERO LEÓN, Oscar Fernando. “Diseño e Implementación de un Prototipo de Contador de Energía Trifásico utilizando un Procesador de Señales Digitales (DSP)”. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2006. 185 p.

<sup>6</sup> ESTÉVEZ RODRÍGUEZ, Fredy Ferney y PEÑA RODRÍGUEZ, Elkin Omar. Diseño e implementación de un sistema generador de formas de ondas de tensión y corriente para sistemas trifásicos. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2009. 133 p. Disponible en:<  
<http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2009/132265.pdf> > [citado última vez: 09 de julio de 2015].

<sup>7</sup> MERCHAN VILLALBA, Luis Ramón. “Diseño e Implementación de un Generador de Señales Trifásico”. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2013. 127 p. Disponible en:<  
<http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2013/149721.pdf> > [citado última vez: 09 de julio de 2015].

obtención, programación y generación de señales<sup>8 9</sup>, se optó por utilizar este tipo sistema como base de este trabajo de grado.

El objetivo principal del trabajo de grado es el diseño y construcción un generador de señales de dos canales, mediante la implementación y uso de un sistema de desarrollo, para valorar el funcionamiento de medidores monofásicos de energía eléctrica.

Sus objetivos específicos son:

- Diseñar un generador de dos señales de tensión simultáneas, con un ancho de banda de 1 kHz cada una, una resolución de 10 bits por canal, una amplitud pico a pico de 10 V. y una potencia menor a 1 W.
- Desarrollar una interfaz que permita al usuario modificar con facilidad los diferentes parámetros de las señales analógicas que se van generar con el equipo.
- Construir el generador de señales con el hardware necesario, definiendo las tres etapas básicas: La etapa de alimentación, la etapa de procesamiento y generación de las señales y la etapa de conversión y amplificación, verificando su correcto funcionamiento.

---

<sup>8</sup> CORZO, Oscar Leonardo y ROJAS MUÑOZ, Luis Felipe. "Implementación de una Toolbox para Señales Digitales utilizando una plataforma de desarrollo con DSP". Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2015. 100 p

<sup>9</sup> POLO JARAMILLO, Kevin Andrés y RODRÍGUEZ LEÓN, Wilson Jair. "Obtención de los Principales Parámetros de las Señales de Tensión y Corriente presentes en un Sistema Monofásico utilizando un Sistema Digital". Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2015. 79 p. Disponible en:< <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2015/156385.pdf> > [citado última vez: 31 de julio de 2015].

- Valorar el comportamiento del equipo para establecer sus prestaciones y limitaciones.

El cumplimiento de estos objetivos está orientado a satisfacer dos necesidades técnicas principales. De una parte, tener un dispositivo capaz de generar señales que simulen los inconvenientes que se presentan en redes eléctricas cuya causa principal es la inyección de componentes armónicos por diversas circunstancias, enfatizando en el hecho de que se analizarán estos componentes a una baja potencia, pues el modelo electrónico de este trabajo es una de varias etapas que pudiesen necesitarse a la hora de pensar en analizar redes eléctricas de forma directa. La otra es que el con este dispositivo no sólo se pudiesen verificar y evaluar equipos como los medidores de energía, sino que también el sistema de desarrollo para la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander se puede convertir en una herramienta versátil cuya utilización puede masificarse dentro de la escuela y consolidar nuevas aplicaciones en diferentes campos de la electrónica.

Para terminar esta introducción, se presenta el primer capítulo que sirve de preámbulo al estudio de los generadores de señales, describiendo sus características más generales y presentando los conceptos teóricos y la tecnología y matemática presente en este campo. El segundo describe por completo el modelo electrónico realizado con sus tres etapas principales detallando gran parte de su estructura y programación, además de enfocarse en ayudar a comprender y a familiarizar al lector con el software asociado al sistema de desarrollo. En el tercer capítulo están organizadas las distintas pruebas elaboradas para verificar y establecer las características del modelo electrónico, además de su comportamiento frente a equipos de laboratorio como el osciloscopio y el

generador se señales. Y en el cuarto y quinto capítulo se presentan las conclusiones y las recomendaciones.

## 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Dentro del capítulo se presenta un resumen teórico de conceptos y generalidades de los elementos asociados a la realización de modelo electrónico del que trata este trabajo de grado.

### 1.1. GENERADORES DE SEÑALES

La función de los generadores de señal es producir una señal dependiente del tiempo con unas características determinadas de frecuencia, amplitud y fase. En algunos casos, estas características son controladas a través de señales externas denominadas "de control". Para ejecutar la función de los generadores de señales se emplean algunos lazos de realimentación con dispositivos que tengan características de tensión y corriente dependientes del tiempo (normalmente condensadores). Hay dos categorías de generadores de señal: *osciladores sintonizados o sinusoidales* y *osciladores de relajación*. Los osciladores sintonizados emplean un sistema que crea pares de polos conjugados exactamente en el eje imaginario para mantener de manera sostenida una oscilación. Los osciladores de relajación emplean bi-estables tales como conmutadores, disparadores "Schmitt", puertas lógicas, comparadores y "flip-flops" que periódicamente cargan y descargan condensadores. Las formas de onda típicas que se obtienen con este último método son del tipo triangular, cuadrada, exponencial o de pulso.

Los generadores de señales básicos cuentan con ciertas características que se aprovechan para aplicaciones diversas; algunas características que debe tener cualquier generador de señales son:

- Deben ser versátiles, con varias formas de onda de salida, frecuencia y amplitud. Es necesario que tanto la amplitud como la frecuencia sean estables, incluso ante variaciones de temperatura del dispositivo.
- La onda sinusoidal es utilizada generalmente para el análisis del ancho de banda de amplificadores y para verificar el funcionamiento de filtros (pasa banda, pasa bajos o pasa altos). También se utiliza en los generadores de señales para los bancos de calibración de medidores de energía eléctrica monofásicos o trifásicos.
- La onda cuadrada se utiliza generalmente en el estudio de circuitos digitales para comprobar retardos de tiempos de subida y bajada.
- La onda triangular se aplica, en determinados casos, como un complemento para conseguir ondas sinusoidales en redes no lineales. La linealidad de este tipo de onda debe ser lo suficientemente adecuada como para que a simple vista no sea perceptible.
- Un generador de funciones puede considerarse como un conjunto de bloques independientes pero con sus parámetros relacionados. Los bloques principales son: Una fuente de alimentación, un oscilador o fuente de señal programable por software y una etapa de amplificación<sup>10 11</sup>.

---

<sup>10</sup>MARÍN, William F. "Materiales del Curso Circuitos Discretos". Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. [en línea]. Disponible en: <<http://www.ie.itcr.ac.cr/marin/lic/el3212/Libro/Tema10.pdf>>. [citado última vez: 09 de junio 2015].

## 1.2. CONVERTIDOR ANALÓGICO-DIGITAL “DAC”

Por el hecho de ser magnitudes físicas, las variables que proporcionan información eléctrica (corriente y diferencia de tensión) son analógicas en su estado natural. Sin embargo, para efectos de procesado y transmisión, resulta más conveniente representar dichas variables en forma digital, ya que los requerimientos de precisión se ven rebajados enormemente. De esta forma el esquema de procesado de un sistema electrónico adopta típicamente el esquema de la Figura 1. Una señal eléctrica proveniente de un sensor o de otro sistema, es convertida de analógica a digital previo filtrado para su adecuación. Una vez en este estado es procesada y/o transmitida, y finalmente es convertida de nuevo a magnitud analógica que convenientemente también tiene un filtro de adecuación y amplificación de la señal y que actuará sobre algún instrumento. De esta forma se puede observar cómo, respecto a un sistema de transmisión y procesado totalmente analógico, aparecen dos nuevos bloques, como son el convertidor analógico/digital y el convertidor digital/analógico. El auge de las telecomunicaciones ha llevado a un rápido crecimiento de los “*chips*” que incorporan circuitos analógicos y circuitos digitales (circuitos integrados mixtos), en los cuales los convertidores de señal son un componente fundamental y de difícil diseño si los requerimientos de precisión y velocidad son grandes.

---

<sup>11</sup> MARÍN, Jorge. “Generador de Funciones”. PCE Instruments. Instrumento de Medida. España. [en línea] Disponible en: <[https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/generador-de-funciones-kat\\_71552\\_1.htm](https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/generador-de-funciones-kat_71552_1.htm)>. [citado última vez: 28 de junio de 2015].

**Figura 1. Esquema típico de un sistema electrónico de proceso de señal**



Fuente: RUBIO, Antonio, ALTET, Josep, ARAGONÉS, Xavier, GONZÁLEZ, José Luis y MATEO, Diego. “Diseño de Circuitos y Sistemas Integrados”. México: Francesc Moll. 1 ed. Alfa omega Grupo Editor, 2005. p 316-332. ISBN 970-15-0776-2.

### **1.2.1. Definiciones Y Conceptos Básicos De La Conversión Digital-Analógica.**

Un conversor digital-analógico (que en adelante se llamará DAC) genera una señal continua en el tiempo a partir de muestras tomadas de una señal digital. Cada una de estas muestras se debe entregar al DAC a una misma frecuencia de muestreo que permita cumplir con el teorema de *Nyquist* para poder recuperar la señal deseada. La salida de un DAC puede ser una señal de corriente o tensión, la cual puede necesitar o no de un filtro y un amplificador dependiendo del dispositivo, pues la impedancia de salida del DAC no permite conectar directamente cargas.

Las características principales de un DAC que hay que tomar como referencia a la hora de utilizar uno u otro son:

- Número de bits: Parámetro con el cual se tiene la resolución que puede brindar el dispositivo.

- Tiempo de establecimiento: Es el tiempo que demora en establecerse la salida una vez tomada la señal digital a la entrada del DAC.
- Rango de salida: Especifica la excursión de tensión que puede presentar el dispositivo en su salida.
- Número de canales: Indica la cantidad de salidas presentes en un integrado.
- Errores: Alteraciones internas y/o externas que pueden llegar a perturbar el funcionamiento ideal de un DAC.

**1.2.1.1. Comportamiento Estático Y Dinámico.** Una palabra digital se representa como una cadena de n bits,  $b_1, b_2, b_3...b_n$ , representando en codificación binaria un número de valor:

$$D = \frac{b_1}{2^1} + \frac{b_2}{2^2} + \frac{b_3}{2^3} + \dots + \frac{b_n}{2^n}$$

Este número puede adquirir  $2^n$  valores comprendidos entre 0 y  $1 - \frac{1}{2^n}$ , equiespaciados  $\frac{1}{2^n}$ .

El bit  $b_1$  es el que tiene mayor contribución al valor D, por lo que se denomina *bit más significativo* (MSB), mientras que en el extremo opuesto el bit  $b_n$  es el *bit menos significativo* (LSB). En un convertidor digital analógico, a partir de una palabra digital se obtiene una tensión a la salida proporcional al valor D, y a una tensión de referencia del convertidor  $V_{ref}$ . Para generalizar se añade un factor de

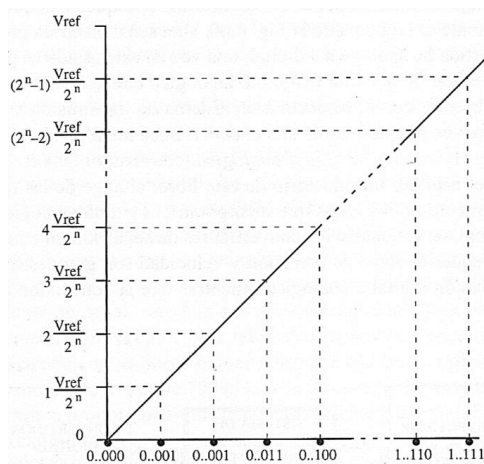
escala  $K$ , y la tensión de salida de un convertidor se expresa de la siguiente manera:

$$V_{out} = K * V_{ref} * D = K * V_{ref} * \left( \frac{b_1}{2^1} + \frac{b_2}{2^2} + \frac{b_3}{2^3} + \dots + \frac{b_n}{2^n} \right)$$

Los requerimientos sobre los convertidores se centran en la resolución y en la velocidad de conversión; sin embargo, éstas no son las únicas características a tener en cuenta, ya que, debido a tolerancias de los componentes integrados, variaciones de proceso, variaciones de parámetros con la temperatura, etc., la curva de transferencia se aleja de la ideal mostrada en la Figura 2, y aparecen una serie de errores que determinaran también la calidad del convertidor.

Estos errores se clasifican en función del efecto que tienen sobre la curva de transferencia, y se pueden dividir en estáticos y dinámicos.

**Figura 2. Curva de transferencia ideal de un Convertidor Digital-Analógico**



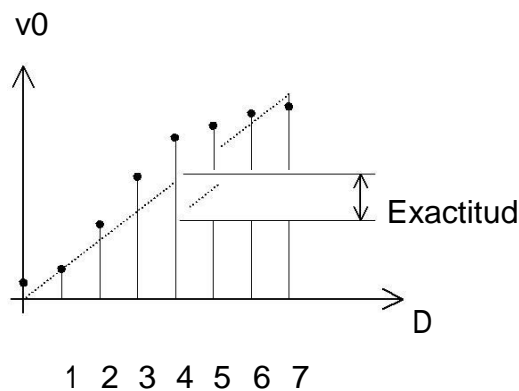
Fuente: Libro de diseño de circuitos y sistemas integrados [12].

A continuación se presenta una descripción de las especificaciones más importantes.

**Resolución:** es la cantidad de bits o dígitos binarios que acepta en su entrada. También puede expresarse como el porcentaje del valor nominal máximo (fondo de escala). La resolución por sí sola no indica nada respecto a la precisión del conversor.

**Exactitud:** es la máxima desviación respecto a la línea recta que une el mínimo y el máximo valor. Se expresa en LSB (least significant bit), lo cual significa que se usa el salto mínimo nominal como unidad. Otra forma de expresarlo es en porcentaje del valor máximo nominal. La exactitud ideal es 0 LSB. Es necesario tener en cuenta que esta especificación incluye todos los errores posibles del conversor (ver Figura 3).

**Figura 3. Error de exactitud en un conversor digital analógico**

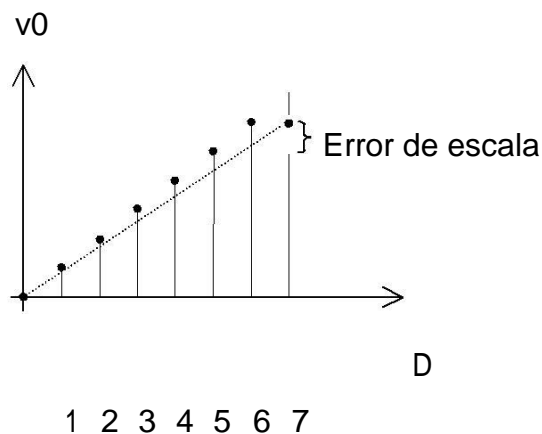


Fuente: MIYARA, Federico. "Conversores D/A y A/D". Universidad Nacional de Rosario, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Escuela de Ingeniería Electrónica, Departamento de Electrónica, Electrónica III. Argentina: segunda edición. [en línea]. 2004. 43 p. Disponible en:

<<http://www.fceia.unr.edu.ar/enica3/da-ad.pdf>>. [citado última vez: 31 de julio de 2015].

**Error de escala:** Es el error que se obtiene a fondo de escala con respecto al valor ideal (ver Figura 4). Se debe en general a errores de ganancia, en la referencia o en la red resistiva. Se expresa también en LSB a fondo de escala. El error de escala ideal es 0 LSB.

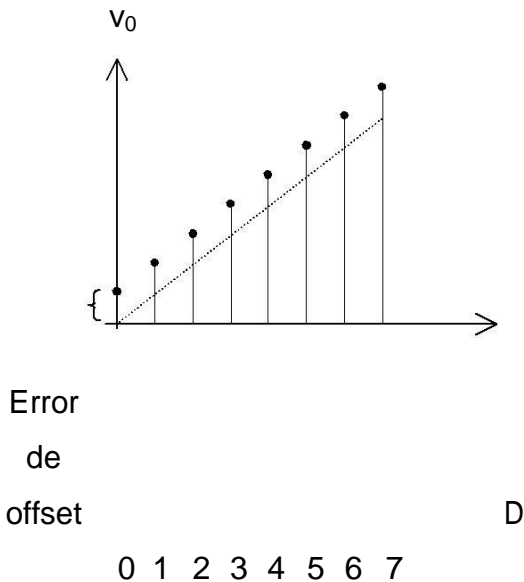
**Figura 4. Error de escala en un conversor digital analógico. La recta ideal es la punteada.**



Fuente: MIYARA, Federico. “Conversores D/A y A/D”. Universidad Nacional de Rosario, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Escuela de Ingeniería Electrónica, Departamento de Electrónica, Electrónica III. Argentina: segunda edición. [en línea]. 2004. 43 p. Disponible en: <<http://www.fceia.unr.edu.ar/enica3/da-ad.pdf>>. [citado última vez: 31 de julio de 2015].

**Error de offset:** Es el valor de salida obtenido cuando la entrada es nula. Se mide en porcentaje del máximo nominal o en LSB (ver Figura 5). El valor ideal es 0 LSB.

**Figura 5. Error de offset en un conversor digital analógico.**



Fuente: MIYARA, Federico. "Conversores D/A y A/D". Universidad Nacional de Rosario, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Escuela de Ingeniería Electrónica, Departamento de Electrónica, Electrónica III. Argentina: segunda edición. [en línea]. 2004. 43 p. Disponible en: <<http://www.fceia.unr.edu.ar/enica3/da-ad.pdf>>. [citado última vez: 31 de julio de 2015].

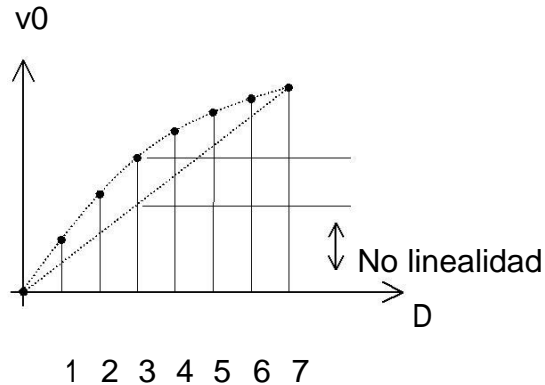
**Error de Ganancia:** Un error de ganancia existe cuando la pendiente de la función de transferencia del DAC es diferente a la pendiente de la función de transferencia ideal.

El error de *offset* se puede definir también como un desplazamiento constante de

toda la curva de transferencia; y el error de *ganancia* como una pendiente errónea de la curva de transferencia. El exceso de *offset* o de *ganancia* provoca un valor de fondo de escala superior al ideal, mientras que un defecto de *offset* o de *ganancia* provoca un valor de fondo de escala bajo. Aunque el *offset* o la *ganancia* de la curva sean los ideales, los incrementos de tensión a la salida entre dos valores digitales consecutivos pueden ser diferentes para cada valor originando otros errores como son: El error de no linealidad diferencial (DNL), el error de no linealidad integral (INL) y el error de no monotonía (MNE).

**No linealidad:** Indica la máxima separación de la línea recta que resulta luego de eliminar los errores de escala y de offset (ver Figura 6). El valor ideal es 0 LSB.

**Figura 6. Error de no linealidad en un conversor digital-analógico.**

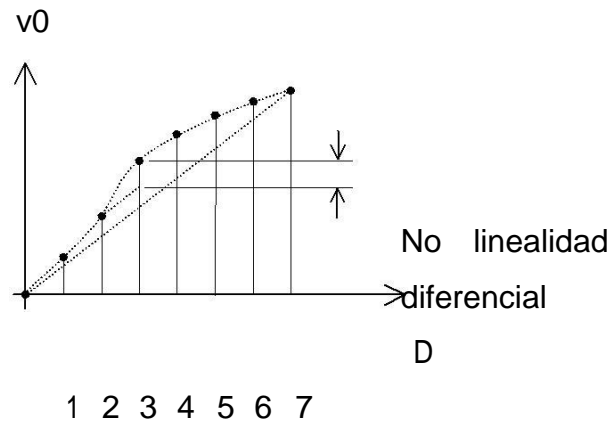


Fuente: MIYARA, Federico. "Conversores D/A y A/D". Universidad Nacional de Rosario, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Escuela de Ingeniería Electrónica, Departamento de Electrónica, Electrónica III. Argentina: segunda edición. [en línea]. 2004. 43 p. Disponible en: <<http://www.fceia.unr.edu.ar/enica3/da-ad.pdf>>. [citado última vez: 31 de julio de 2015].

**No linealidad diferencial:** Es la máxima diferencia entre un salto a la salida debido a un cambio de 1 LSB y el salto ideal (ver Figura 7). Se expresa como porcentaje del máximo nominal o en LSB. El valor ideal es 0 LSB.

$$DNL = \frac{V_{OUT}(Di + 1) - V_{OUT}(Di) - \frac{V_{ref}}{2^N}}{\frac{V_{ref}}{2^N}}, \text{ para } i = 0, 1, \dots, 2^N - 2$$

**Figura 7. Error de no linealidad diferencial en un conversor digital-analógico.**



Fuente: MIYARA, Federico. “Conversores D/A y A/D”. Universidad Nacional de Rosario, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Escuela de Ingeniería Electrónica, Departamento de Electrónica, Electrónica III. Argentina: segunda edición. [en línea]. 2004. 43 p. Disponible en: <<http://www.fceia.unr.edu.ar/enica3/da-ad.pdf>>. [citado última vez: 31 de julio de 2015].

**No Linealidad Integral:** En general la linealidad de un DAC puede ser especificada en términos de la no linealidad integral (INL). La INL es una medida de la desviación de la tensión de salida real del DAC de la línea ideal.

$$INL = \frac{V_{OUT}(Di) - \left(\frac{V_{ref}}{2^N} * i\right)}{\frac{V_{ref}}{2^N}}$$

**Monotonía:** Es la cualidad de generar valores analógicos crecientes ante códigos digitales de entrada crecientes. A veces se especifica como aquella resolución en bits para la cual se puede garantizar la monotonía. Por ejemplo, un conversor podría tener una resolución de 8 bits pero una monotonía de 7 bits, en caso de que algunos saltos de 1 LSB produzcan inversiones, pero que ningún salto del segundo bit menos significativo produzca tales inversiones. Idealmente, la monotonía debe ser igual a la resolución. La monotonía está relacionada con la no linealidad. Una no linealidad mayor de  $\pm 0,5$  LSB podría provocar una pérdida del carácter monótono de la respuesta, especialmente cuando en un código el error es por exceso y en el que le sigue es por defecto. Esta situación puede darse en el salto que se produce en el punto medio de la escala (01...1 a 10...0).

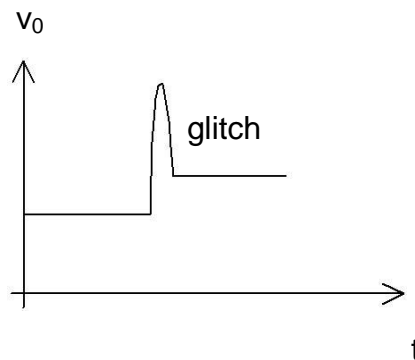
**Tiempo de establecimiento:** Es el máximo tiempo transcurrido luego de un cambio de código de entrada arbitrario para alcanzar el valor analógico correspondiente con un error de a lo sumo  $\pm 0,5$  LSB. El tiempo de establecimiento de un conversor D/A tiene dos componentes: una debida al comportamiento dinámico lineal y otra debido al *slew-rate* del amplificador operacional (fenómeno no lineal). La primera se debe a las capacidades parásitas en paralelo con las llaves analógicas, que hacen que la conmutación entre un código de entrada y otro no sea instantánea. Sus características son similares a las de cualquier transitorio, con una aproximación exponencial al valor final. La componente debida al *slew-rate* del amplificador se caracteriza por un crecimiento lineal con pendiente fija, por lo cual cuanto mayor sea la amplitud del salto (por ejemplo un cambio en la entrada de 00 ...0 a 11...1) mayor será el tiempo de crecimiento. En general predomina el efecto del *slew-rate*, salvo que se usen

amplificadores de muy alta velocidad.

**Slew- rate:** es la máxima pendiente de la salida ante una conmutación del código de entrada. Su efecto es más notorio en las transiciones grandes (o a fondo de escala). En general, se debe no a la red sino al amplificador que convierte corriente en tensión.

**Sobre-pico y glitch:** El sobre-pico es el resultado de una respuesta sub-amortiguada en el amplificador. El **glitch** es un efecto similar a lo que en lógica se denomina “aleatorio”, que consiste en que los *switches* no conmutan instantáneamente ni simultáneamente. Así, en un DAC de 8 bits, al pasar del código 127 al 128 en la entrada, podría haber un momento en que todos los *switches* conducen (es decir que se encienda el que corresponda al MSB antes de apagarse los restantes), o viceversa. El resultado es un pico de corriente corto (de uno u otro signo) pero de gran amplitud (ver Figura 8). Este pico podría atenuarse debido al *slew-rate* del amplificador de salida.

**Figura 8. Fenómeno de “glitch” en la conmutación entre dos valores que implican el cambio simultáneo de muchos bits.**



*Fuente:* MIYARA, Federico. “Conversores D/A y A/D”. Universidad Nacional de Rosario, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Escuela de Ingeniería Electrónica, Departamento de Electrónica, Electrónica III. Argentina:

segunda edición. [en línea]. 2004. 43 p. Disponible en: <<http://www.fceia.unr.edu.ar/enica3/da-ad.pdf>>. [citado última vez: 31 de julio de 2015].

El glitch puede eliminarse con un **deglitcher**, circuito que consiste esencialmente en un *sample and hold* que valida el dato convertido recién un tiempo después del cambio.

**Área Glitch:** El área máxima bajo el glitch de la salida cuando la palabra de entrada cambia es llamada área glitch (en la Figura 8 se aprecia el glitch).

**Derivas con la temperatura:** cada uno de los parámetros anteriores es susceptible de cambiar con la temperatura, por ejemplo el error de no linealidad o de fondo de escala (error de escala). Se especifica en % del fondo de escala nominal por °C (% FS / °C).

**Deriva por envejecimiento:** El envejecimiento también altera los valores especificados. Una de los más importantes es la deriva del error de escala debido al envejecimiento de la  $V_{ref}$ .

**Tiempo de establecimiento:** Los cambios que experimenta la salida del DAC son producto de las variaciones de la palabra digital de entrada, estos cambios no ocurren instantáneamente, se necesita de un tiempo para que la señal se establezca dentro de un error límite llamado tiempo de establecimiento (ver Figura 9).

**Figura 9. Tiempo de establecimiento en un convertor digital-analógico.**



Fuente: [15] NASSER kehtarnavaz – MANSOUR keramat. DSP System Design Using The TMS320C6000. Prentice Hall, 2001.

**Latencia:** Es el retardo total para obtener una salida válida después de que la palabra de entrada cambie.

**Relación Señal a Ruido + Distorsión:** Resolución es el término utilizado para describir el mínimo nivel de señal que un DAC puede resolver. El límite fundamental de un DAC es gobernado por el ruido de cuantización. Si la palabra de entrada digital es de N-bits el mínimo paso que el DAC puede dar es  $\left(\frac{V_{ref}}{2^N}\right)^2$ . Si las tensiones de salida son reproducidas con este mínimo paso de incertidumbre, un DAC ideal debe tener una mínima relación “señal a ruido” de:

$$\left(\frac{V_{ref}}{2^N}\right)^2 / 2$$

$$SNR = 10 \log \frac{\left(\frac{V_{ref}}{2^N}\right)^2}{\frac{1}{12} * \left(\frac{V_{ref}}{2^N}\right)^2} = 10 \log \frac{3}{2} * 2^{2N} = 6,02N + 1,76(dB)$$

El cálculo de número de bits efectivos de un convertidor se hace una vez implementado el circuito, a partir de la medida de la relación señal a ruido más distorsión (SNDR)

$$N(\text{numero efectivo de bits}) = \frac{SNDR(dB) - 1.76}{6.02}$$

En cuanto a otros aspectos dinámicos el parámetro más importante es *la velocidad de conversión*, es decir, cuánto tiempo se tarda en obtener el valor de tensión analógica final a partir del valor digital de entrada, y por tanto cuántas conversiones se podrían hacer por unidad de tiempo<sup>12 13 14</sup> .

### 1.3. ANÁLISIS DE COMPONENTES ARMÓNICAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS

Las componentes armónicas permiten representar las distorsiones de las ondas sinusoidales de tensión y/o corriente de los sistemas eléctricos, debido al uso de cargas no lineales y/o variantes en el tiempo. En general al uso de equipos que necesiten realizar conmutaciones en su operación normal.

La aparición de corrientes y/o tensiones distorcionadas en el sistema eléctrico crea problemas tales como, el aumento de pérdidas de potencia activa, sobretensiones

---

<sup>12</sup> RUBIO, Antonio, ALTET, Josep, ARAGONÉS, Xavier, GONZÁLEZ, José Luis y MATEO, Diego. "Diseño de Circuitos y Sistemas Integrados". México: Francesc Moll. 1 ed. Alfa omega Grupo Editor, 2005. p 316-332. ISBN 970-15-0776-2.

<sup>13</sup> JOHNS, David y MARTIN, Ken. Analog Integrated Circuit Desing. Canadá: 2 ed. Jhon Wiley & sons Inc, 1997. p 446 – 459. ISBN 0-471-14448-7.

<sup>14</sup> [MIYARA, Federico. "Convertidores D/A y A/D". Universidad Nacional de Rosario, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Escuela de Ingeniería Electrónica, Departamento de Electrónica, Electrónica III. Argentina: segunda edición. [en línea]. 2004. 43 p. Disponible en: <<http://www.fceia.unr.edu.ar/enica3/da-ad.pdf>>. [citado última vez: 31 de julio de 2015].

en los condensadores, errores de medición, mal funcionamiento de las protecciones eléctricas, daño en los aislamientos, deterioro de dieléctricos, disminución de la vida útil de los equipos, entre otros.

Las soluciones a dicho problema se realizan en forma jerarquizada; primero en forma particular, resolviendo el problema de inyección de armónicos por parte del usuario al sistema (diseñando y ubicando filtros en el lado de baja tensión, usando el transformador como barrera); y segundo, resolviendo el problema en forma global, buscando reducir las pérdidas y mantener los niveles armónicos por debajo de los límites permitidos, en este caso, se trata de un problema de optimización donde se determina la ubicación de los compensadores (condensadores, filtros pasivos, filtros activos).

Independientemente del tipo de compensador utilizado para reducir los niveles de distorsión en el sistema o en el usuario, se debe analizar la forma en que el compensador afecta a la impedancia al variar la frecuencia, esto con el fin de determinar resonancias serie (baja impedancia al paso de corriente) y paralelo (baja admitancia a la tensión de alimentación) <sup>15</sup>.

Las distorsiones de las señales de tensión y corriente son un fenómeno que genera problemas tanto para los usuarios como para la entidad encargada de la prestación del servicio de energía eléctrica ocasionando diversos efectos nocivos en los equipos de la red.

---

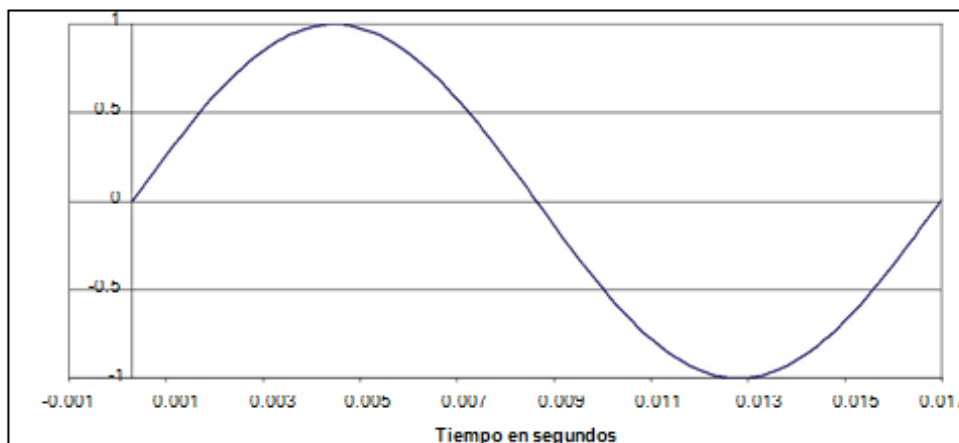
<sup>15</sup> [UPO DE INVESTIGACIÓN en Planeamiento de Sistemas Eléctricos. "Análisis de Armónicos en Sistemas eléctricos". UTP, Universidad Tecnológica de Pereira, Programa de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Tecnológica de Pereira. [en línea]. Disponible en: <[http://www.utp.edu.co/~planeamiento/prod\\_aca/articulos/Analisis\\_Armonicos.pdf](http://www.utp.edu.co/~planeamiento/prod_aca/articulos/Analisis_Armonicos.pdf) >. [citado última vez: 04 de agosto de 2015].

La forma de la onda sin componentes armónicas se representa en la Figura 10 en ella se aprecia la calidad de la onda de tensión la cual debe tener amplitud y frecuencia constantes al igual que una forma sinusoidal, con una frecuencia constante de 60Hz y una amplitud constante de  $1pu$  (Uno en por unidad).

Cuando una señal periódica no tiene la forma sinusoidal que se muestra en la Figura 10, se dice que se distorsiona, lo cual puede alterar su valor pico y/o valor RMS, causando alteraciones en el funcionamiento normal de los equipos que estén sometidos a esta tensión.

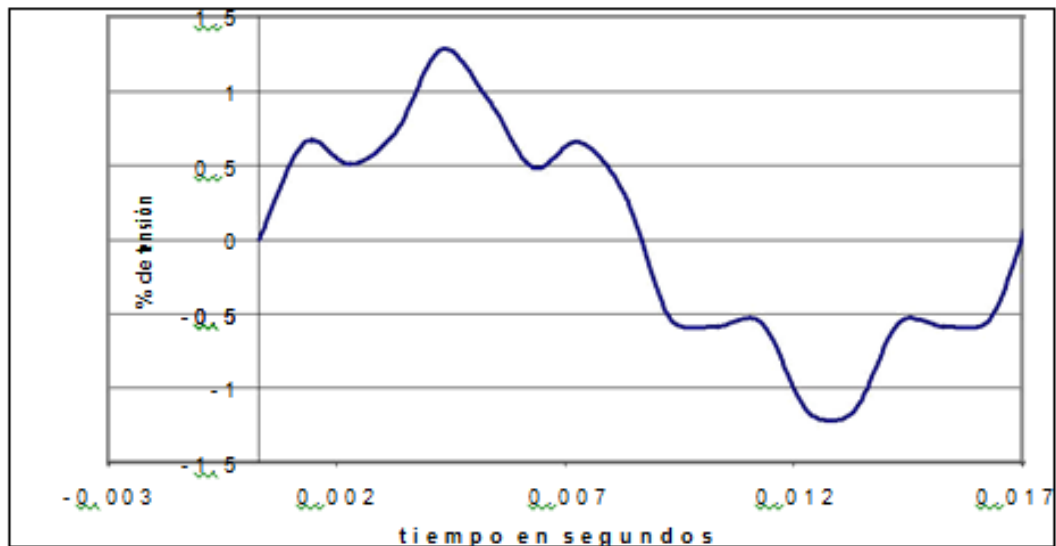
La frecuencia de la señal periódica se denomina frecuencia fundamental y las componentes armónicas son señales cuya frecuencia es un múltiplo entero de esta frecuencia. Como puede observarse en el ejemplo de la Figura 11, el contenido de componentes armónicas de esta onda ha aumentado en un 30% su valor pico.

**Figura 10. Señal Sinusoidal sin contenido armónico en “Por Unidad”**



Fuente: Autor

**Figura 11. Señal Sinusoidal con contenido armónico de 30% del 5º armónico**



Fuente: Autor

**1.3.1. Análisis de Fourier.** La serie de Fourier establece que toda señal periódica no sinusoidal puede ser descompuesta como la suma de señales sinusoidales, siempre y cuando se cumplan las siguientes condiciones:

- Que la integral a lo largo de un periodo de la función sea un valor finito.
- Que la función posea un número finito de discontinuidades en un periodo.
- Que la función posea un número finito de máximos y mínimos en un periodo.

Cualquier función  $F(x)$  con periodo  $2\pi$  tiene su representación en series de Fourier de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Y(x) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \text{sen}(kx) + B_k \cos(kx)$$

En donde:

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} Y(x) dx$$

$$A_k = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} Y(x) \text{sen}(kx) dx$$

$$B_k = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} Y(x) \cos(kx) dx$$

$$A_k \text{sen}(kx) + B_k \cos(kx) = R_k \text{sen}(kx + \Phi_k)$$

$$R_k = \sqrt{(A_k^2 + B_k^2)} \quad \Phi_k = \tan^{-1} \left( \frac{B_k}{A_k} \right)$$

Con  $k=1,2,3,4,\dots$

Con el uso de las ecuaciones anteriores se pueden encontrar las componentes armónicas de las ondas más comunes en los sistemas de potencia, de distribución o industriales.

**1.3.2. Fuentes de Distorsión de Señales Eléctricas.** Las distorsiones de las

señales son el resultado de cargas no lineales, las cuales ante una señal de tipo sinusoidal presentan una respuesta no sinusoidal. Las principales fuentes de distorsión de señales eléctricas son:

- Hornos de arco y otros elementos de descarga de arco, tales como lámparas fluorescentes. Los hornos de arco se consideran más como generadores de componentes armónicas de tensión que de corriente, apareciendo típicamente todas las componentes armónicas (2<sup>o</sup>, 3<sup>o</sup>, 4<sup>o</sup>, 5<sup>o</sup>,) pero predominando los impares con valores típicos con respecto a la fundamental de: 20% del 3er armónico; 10% del 5<sup>o</sup>; 6% del 7<sup>o</sup> y 3% del 9<sup>o</sup>.
- Núcleos magnéticos en transformadores y máquinas rotativas que requieren señales de corriente distorsionadas con una componente importante del tercer armónico para excitar el hierro.
- La distorsión de la corriente *Inrush* de los transformadores se representa con componentes armónicas de orden dos y cuatro.
- Controladores de velocidad ajustables usados en ventiladores, bombas y controladores de procesos.
- *Swiches* en estado sólido que modulan corrientes de control, intensidad de luz, calor, etc.
- Fuentes controladas para equipos electrónicos.
- Rectificadores basados en diodos o tiristores para equipos de soldadura, cargadores de baterías, etc.

- Compensadores estáticos de potencia reactiva.
- Estaciones en DC de transmisión en alto tensión.
- Convertidores de AC a DC (inversores).
- Lámparas ahorradoras de energía.
- Balastos electrónicos.
- Iluminación LED (*Ligth Emitting Diode*).
- Televisión, radio, computadores, cargadores de celulares, etc.

**1.3.3. Efectos de las Señales Distorcionadas.** Los efectos producidos por señales distorsionadas de tensión y corriente presentes en los componentes de los sistemas eléctricos han sido analizadas. Sin embargo en algunos casos es difícil cuantificarlos en forma específica puesto que dependen de muchos factores. Los efectos más relevantes que se presentan en una red de distribución común son:

- Efecto sobre los cables
- Efecto sobre los transformadores
- Efecto sobre los capacitores
- Efecto sobre los motores
- Efecto sobre otros equipos electrónicos

Con respecto a equipos de “medición e instrumentación”, estos SON afectados por las componentes armónicas de las señales distorsionadas, principalmente si se tienen condiciones de resonancia que causen altas tensiones debidas a las componentes armónicas en los circuitos. Para el caso de medidores se pueden tener errores positivos o negativos, dependiendo del tipo de medidor y de las componentes armónicas involucradas<sup>16 17 18</sup>

#### 1.4. SISTEMA DE DESARROLLO

Actualmente se ha trabajado en diferentes dispositivos con tecnología DSPIC (*Digital Signal Processing in to Peripheral Interface Controller*), utilizada para manejar digitalmente las señales analógicas del mundo real, como los sonidos y las imágenes. A principios de la década de los 80 del siglo pasado ya se comercializaban varios modelos de DSP, siendo pioneros los fabricantes Texas Instruments, NEC e Intel. En la actualidad Texas Instruments mantiene el liderazgo en el mercado de DSR (*Data set Ready*) fabricando modelos cada vez más potentes para acoplarse a las aplicaciones más complejas y cambiantes.

Los DSP pueden asemejarse a los clásicos micro-controladores, pero incorporando arquitecturas y recursos especiales para poder controlar de forma

---

<sup>16</sup> IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. Industry Applications Society/Power Engineering Society, IEEE Std. 519-1992: IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Systems. New York, USA, 1993. 101 p.

<sup>17</sup> [IEEE Report, "The Effects of Power System Harmonics on Power System Equipment and Loads," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-104, NO. 9, pp. 2555-2563, September 1985.

<sup>18</sup> ARCILA, José Dariel. “Armónicos en Sistemas Eléctricos”. Firma de consultoría especializada en Ingeniería Eléctrica. Medellín, 2010. 26 p. [en línea]. Disponible en: < <http://www.ieb.com.co/> >. [citado última vez: 21 de julio de 2015].

óptima los requerimientos específicos y los algoritmos manejados en el procesamiento digital de señales analógicas.

Se destacan las siguientes prestaciones de los DSP:

- Los micro-controladores clásicos, denominados de forma resumida MCU (*Microcontroller Unit*), son circuitos-integrados que contienen un procesador digital completo junto a diversos periféricos auxiliares que facilitan el desarrollo de las aplicaciones a las que se dedican.
- Su parecido con los DSP es muy grande, pero las diferencias que los distinguen hacen que sus campos de aplicación sean diferentes. De forma resumida puede decirse que los DSP son micro-controladores dotados de los recursos físicos y lógicos necesarios para poder soportar las aplicaciones específicas del procesamiento digital de señales.
- Las instrucciones aritméticas complejas de los MCU se ejecutan en varios ciclos, mientras que las de los DSP sólo precisan uno.
- En los DSP siempre se dispone de conversores AD. Dado el carácter marcadamente matemático de los programas para DSP éstos están preparados para ser programados con lenguajes de alto nivel, como el lenguaje C.
- La velocidad y el rendimiento de los DSP son muy superiores a los habituales en los MCU. [20]

## 2. GENERADOR DE SEÑALES, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

El generador de señales está compuesto de tres etapas principales, la primera es la etapa de alimentación con la que se le entrega a diferentes partes del sistema la potencia necesaria para su funcionamiento. La segunda es la etapa de generación, que contiene un sistema de desarrollo basado en el micro-controlador DSPIC33EP810 de 16 bits y una pantalla integrada táctil que permite la interacción del usuario con el sistema. En la pantalla se aprecia una interfaz de tres módulos para generar las señales por medio de tres diferentes configuraciones:

- La generación de señales típicas como la onda cuadrada, la onda sinusoidal y la triangular.
- La generación de señales por medio de sus componentes armónicas ingresadas desde su propia pantalla táctil.
- La generación de señales basado en datos ingresados de manera externa también con componentes armónicas por medio de su memoria MicroSD y con una interfaz con plataforma WEB diseñada exclusivamente para este proyecto.

La tercera es la etapa de conversión analógica y amplificación, que cuenta con dos canales independientes (salidas) diseñados con los Convertidores Digital-Analógico “DAC 8830” y los amplificadores operacionales “OPAM LF351”.

## 2.1. ETAPA DE ALIMENTACIÓN

Según los requerimientos del sistema, es necesario tener varias salidas de tensión en la etapa de alimentación, una salida de cinco *Volts* (5V) para alimentar el sistema de desarrollo y los Conversores Digital-Analógico (DACs) y dos salidas adicionales, una de doce *Volts* positivos (12V) y otra de doce *Volts* negativos (-12V), para alimentar a la etapa de amplificación.

Dentro de la etapa de alimentación se analizaron algunas configuraciones, como la alimentación del sistema de desarrollo por medio de una batería de Ion-Litio de 3,7 *Volts*, una fuente adicional independiente de dos salidas (12 V y -12 V) para la etapa de amplificación y otra de 5 *Volts* para entregarle a los DACs la tensión de alimentación requerida ( $V_{cc}$ ), esta configuración se descartó porque implicaba más de tres elementos adicionales al sistema, que involucraban coste en dinero y espacio. Otra configuración fue la de alimentar el dispositivo sólo con batería, esto implicaba tener una batería que proporcionara más de 12 *Volts* y con ella adecuar las salidas necesarias para la alimentación de los diferentes dispositivos del sistema; se descartó esta porque las baterías existentes en el mercado con esas características de tensión son comparativamente grandes para el dispositivo a implementar y su costo injustificado, además de ser necesario una etapa más de adecuación para entregar los diferentes niveles de tensión requeridos.

La fuente de alimentación que finalmente se seleccionó fue una fuente de alimentación múltiple con la capacidad de entregar tres niveles de tensión independientes de  $\pm 12$  *Volts* y 5 *Volts* respectivamente, de un tamaño adecuado para este dispositivo, utilizada en dispositivos electrónicos como reproductores de CD, DVD, BLUE-RAY, entre otros; y contempla las siguientes características. La Tabla 1 muestra un resumen de las características de la fuente de alimentación.

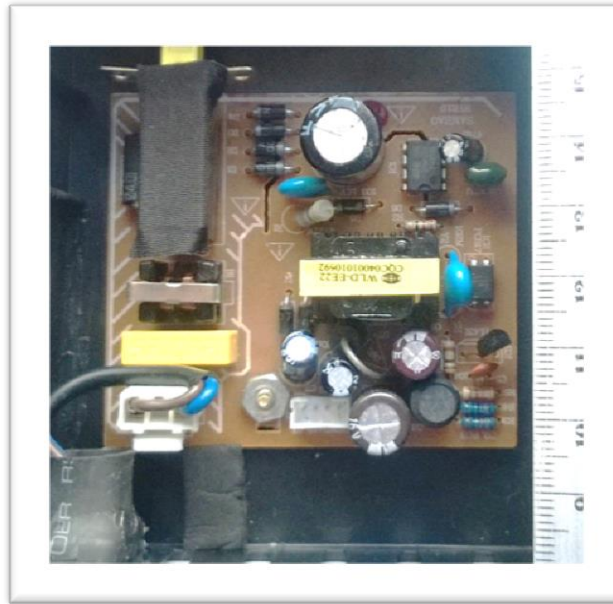
**Tabla 1. Características de la fuente de alimentación**

<b>Descripción</b>	<b>Sím.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Típ.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Unid.</b>
<b>Entrada</b>					
Tensión	$V_{IN}$	90	110	260	VAC
Frecuencia	$f_{IN}$		50/60		Hz
Potencia				20	W
<b>Salida 1</b>					
Tensión de salida	$V_{OUT1}$	4,75	4,87	5,25	V
Tensión de rizado	$V_{RIPPLE1}$			60	mV
<b>Salida 2</b>					
Tensión de salida	$V_{OUT2}$	9,75	12	13,23	V
Tensión de rizado	$V_{RIPPLE2}$			90	mV
<b>Salida 3</b>					
Tensión de salida	$V_{OUT3}$	-9,85	-12	- 13,04	V
Tensión de rizado	$V_{RIPPLE3}$			90	mV
<b>Eficiencia</b>					
	$\eta$			75	%

Fuente. Autor.

La Figura 12 muestra una fotografía de la fuente de alimentación utilizada en la implementación del modelo electrónico.

**Figura 12. Fuente de alimentación**



Fuente: Autor.

## **2.2. ETAPA DE GENERACIÓN**

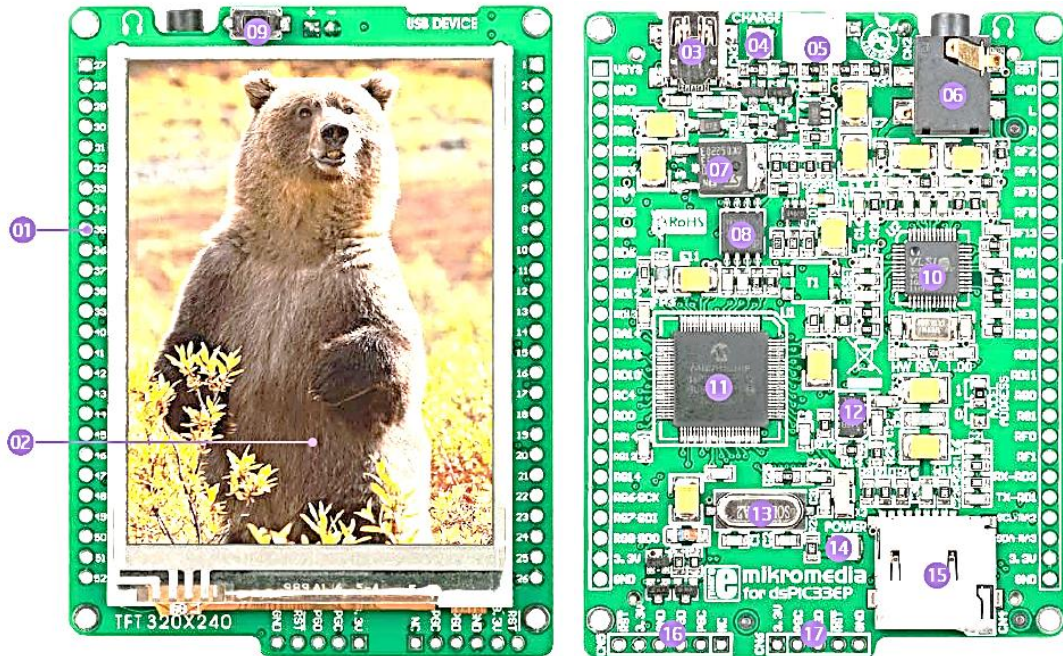
En esta etapa su principal elemento es el sistema de desarrollo denominado “Mikromedia for DSPIC33EP®”, este es un sistema robusto, con gran capacidad de procesamiento y de almacenamiento, variedad de módulos integrados y cuyo núcleo central es el micro-controlador “dsPIC33EP512MU810” de 16 Bits. Los detalles del sistema de desarrollo y del micro-controlador se encuentran en el Anexo 1 (Manual de usuario del Sistema de desarrollo) y el Anexo 2 (Datasheet mikro dsPIC33EPMC810) del libro; aquí se presentan algunas de sus características principales:

**2.2.1. Arquitectura.** Esta tarjeta ofrece una plataforma de desarrollo compacto de alta calidad para dispositivos multimedia y con el poderoso microcontrolador dsPIC33EP512MU810. Cuenta con numerosos módulos incluidos, que le permiten escribir aplicaciones multimedia. Esta placa se puede utilizar para el desarrollo y/o también como un producto final.

Características físicas notables del sistema de desarrollo, indicadas en la Figura 13:

1. PADS de conexión.
2. Pantalla táctil TFT de 320x240 pixeles.
3. Conector USB MINI-B.
4. Indicación LED de carga.
5. Conector para batería de litio-polímero.
6. Conector de auriculares de 3,5 mm.
7. Regulador de suministro de energía.
8. Memoria flash.
9. Botón de reinicio.
10. Codificador-Decodificador MP3 VS1053.
11. dsPIC33EP512MU810 microcontrolador.
12. Acelerómetro.
13. Cristal oscilador.
14. Indicación LED de encendido.
15. Ranura para tarjeta microSD.
16. ICD2 conector / 3.
17. Conector para el programador mikroProg.

**Figura 13. Sistema de desarrollo Mikromedia For dsPIC33EP®**



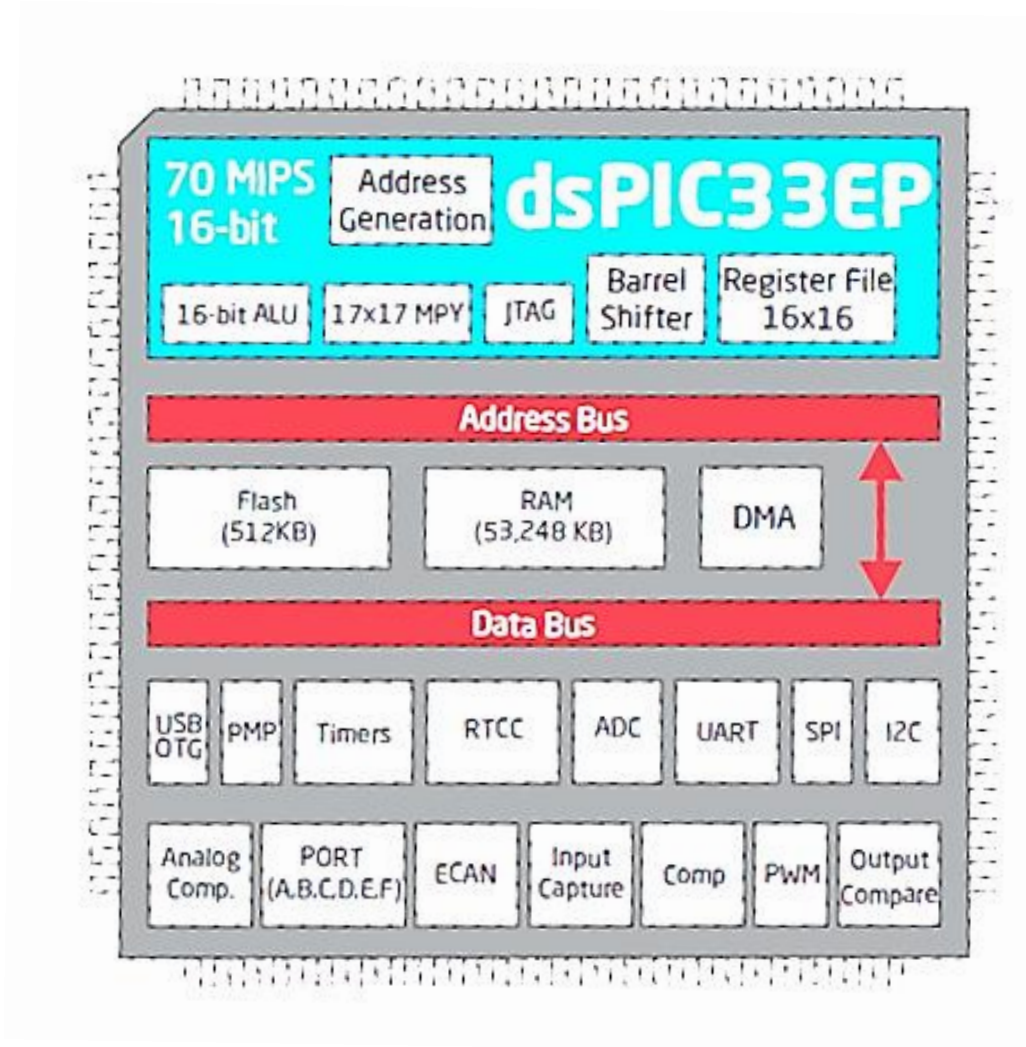
Fuente: Manual de usuario del sistema de desarrollo – Anexo 1.

Características principales del micro-controlador dsPIC33EPMC810, indicadas en la Figura 14 y la Figura 15:

1. Hasta 70 MIPS de operación.
2. Arquitectura de 16 bits.
3. 512 KB de memoria de programa.
4. 24KB de flash auxiliar.
5. 53.248 bytes de memoria RAM.
6. 83 pines Entrada/Salida.
7. Oscilador interno 7,37 MHz, 32 kHz; RTCC.
8. Característica NanoWatt: Wake Fast / Fast Control.
9. 4 puertos UART, cuatro puertos SPI, 2 puertos I2C, 2 puertos CAN, 1 puerto USB 2.0 OTG.

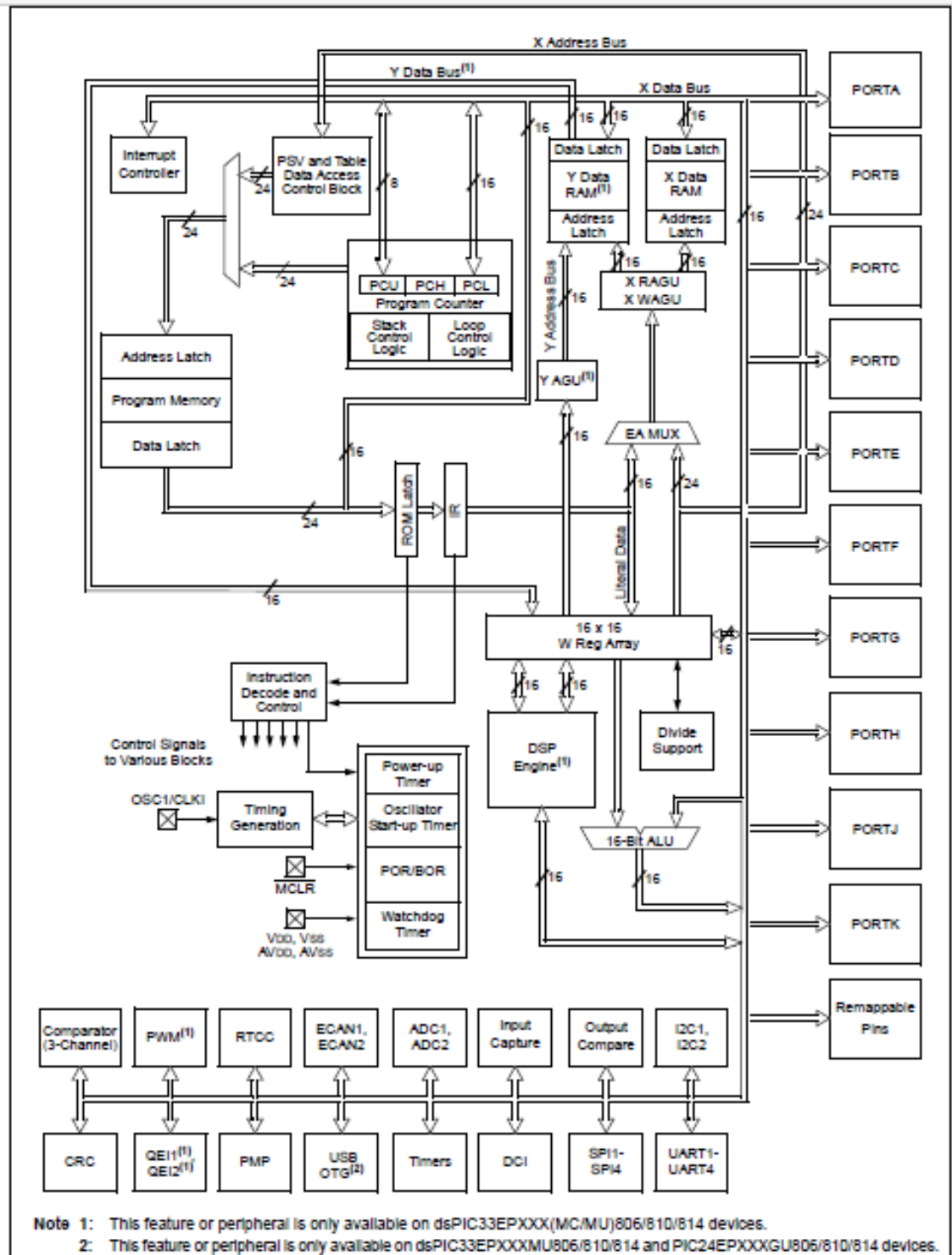
10. Otros puertos para DACs, ADCs, etc.

Figura 14. Diagrama del micro-controlador dsPIC33EPM810



Fuente: Manual de usuario del sistema de desarrollo – Anexo 1.

Figura 15. Arquitectura del micro-controlador dsPIC33EPMC810



Fuente: Datasheet Micro-controlador dsPIC33EPMC810 - Anexo 2.

**2.2.2. Programación.** El sistema de desarrollo cuenta con tres alternativas para su programación. La primera de ellas es con un dispositivo programador que hace el puente entre el computador y la tarjeta o sistema de desarrollo, llamado “MikroProg”, que básicamente se encarga de entregar a la tarjeta la programación necesaria, pero traducida al lenguaje que el sistema de desarrollo reconozca.

MikroProg™ es un rápido programador USB 2.0 con hardware mikroICD™ In-Circuit Debugger. Su desarrollada ingeniería permite a MikroProg™ apoyar en la programación a los dispositivos PIC12®, PIC16®, PIC18®, dsPIC30/33®, PIC24® y PIC32® soportando hasta 897 microcontroladores de la familia MICROCHIP.

**Figura 16. Imagen de un Programador “Microprog”**

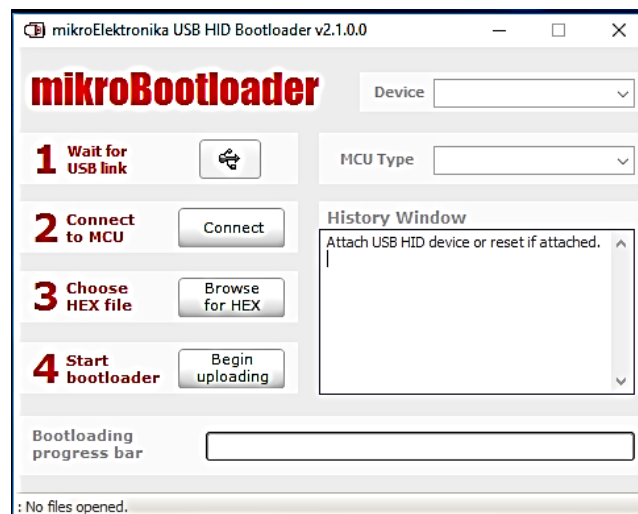


*Fuente: Recurso en línea de Mikroelectronika - <http://www.mikroe.com/>*

Otro método de programación es el método directo, donde se conecta la tarjeta solamente a la PC por medio de un cable USB y con un software denominado

“USB HID Bootloader” se le carga a la tarjeta un único archivo con extensión “.HEX”, que es generado siempre que se programa y compila en el software asociado a la tarjeta, que para el sistema de desarrollo de este proyecto es el compilador “MikroC Pro for DSPIC”. Cabe aclarar que no todos los modelos de las tarjetas pueden programarse con este método. La desventaja de la programación por medio del “USB HID Bootloader” es que se utiliza parte de la memoria interna de la tarjeta, reduciendo la memoria interna de trabajo. Pero esto se puede compensar utilizando una memoria externa extraíble que se puede vincular como periférico en los puertos de la tarjeta desarrollados para tal fin.

**Figura 17. Pantalla Principal del programador “USB HID Bootloader”**



Fuente: Software instalado en el computador del Autor

La programación por medio del software “USB HID Bootloader” se puede resumir en cuatro simples pasos:

*Primer paso:* Conectar el sistema de desarrollo al computador donde se encuentre “USB HID Bootloader” esperar que lo reconozca y darle “**Connect**”

*Segundo paso:* Buscar el archivo con extensión “**.HEX**” en su computador, dando clic en el botón “**Browse for HEX**” y cargarlo al software.

*Tercer paso:* Cargar el archivo “**.HEX**” dando clic en el botón “**Begin uploading**” y espere que la barra de progreso termine de llenarse.

*Cuarto paso:* En ventana emergente dar “**OK**” para reiniciar el sistema de desarrollo, esperar alrededor de 5 segundos y listo, la tarjeta ya está programada con los datos suministrados en el archivo “**.HEX**”.

Las instrucciones detalladas para utilizar uno u otro método de programación del sistema de desarrollo se encuentran en el Anexo 1.

**2.2.3. Software Compilador.** Existen dos software más asociados al sistema de desarrollo, el “MikroC Pro for DSPIC” y el “Visual TFT”.

**2.2.3.1. MikroC Pro For Dspic:** El software “**MikroC Pro for dsPIC**” es una poderosa herramienta de desarrollo para programar microcontroladores de la familia dsPIC30 / 33 y PIC24 de MICROCHIP. Está diseñado para suministrarle al programador la solución más fácil posible a la hora del desarrollo de aplicaciones para sistemas embebidos, sin comprometer el rendimiento o control.

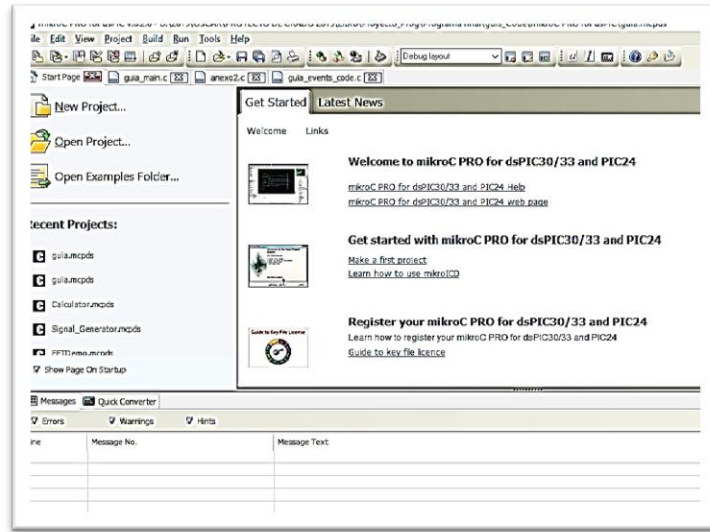
“**MikroC Pro for dsPIC**” está diseñado para trabajar como un “**PIC**” pero con la capacidad de procesar señales digitales, lo que le da una enorme eficiencia y capacidad. También es una gran elección pues ofrece una muy avanzada IDE

(*Integrated Development Environment*), un compilador compatible con ANSI, un amplio conjunto de bibliotecas de hardware, documentación completa, y un montón de ejemplos listos y dirigidos a que el usuario se familiarice rápidamente con el compilador.

Algunas de las características principales del compilador **“MikroC PRO for dsPIC”** son:

- Permite desarrollar e implementar aplicaciones complejas de forma rápida:
- Escribir código fuente utilizando el editor de código (Asistentes de código y parámetros, plegado de código, resaltado de sintaxis, autocorrección, plantillas de código, y más.)
- Utilizar las bibliotecas incluidas para acelerar el desarrollo de aplicaciones: adquisición de datos, memoria, pantallas, conversiones, comunicación, etc.
- Control de la estructura del programa, variables y funciones en el explorador de Código.
- Generar el archivo **“.HEX”** estándar compatible con todos los programadores.
- Utilización de la herramienta integrada de depuración **“mikroICD”** (In-Circuit Debugger) en tiempo real para supervisar la ejecución del programa a nivel de hardware. [*Introduction to mikroC PRO for dsPIC30/33 and PIC24 - Software*]

**Figura 18. Interfaz “MikroC Pro for dsPIC”.**



Fuente: Software compilador “**MikroC PRO for dsPIC**” Versión 6.2.0.

**2.2.3.2. Visual TFT.** El Software “**Visual TFT**” es una herramienta de desarrollo diseñada para crear la interfaz gráfica que el usuario requiere para interactuar con el sistema, en las diversas pantallas que pueden estar presentes en las diferentes tarjetas con sistemas de desarrollo basados en los microcontroladores PIC o dsPIC de MikroElektronika. Este software básicamente genera un código fuente de la interfaz creada y lo entrega a los compiladores para su posterior programación en las diferentes arquitecturas que abarque cada compilador (PIC, dsPIC30, dsPIC33, PIC24, PIC32, AVR and ARM). Los archivos que este software genera poseen la inicialización de los elementos de la tarjeta como la pantalla TFT, el conversor análogo-digital, las características de los elementos de la interfaz gráfica, pines, entre otros.

La gran ventaja de usar este software es que facilita la programación de la interfaz en un entorno amigable y de programación en alto nivel con herramientas visuales y sencillas de usar. [Introduction to Visual TFT - Software]

Figura 19. Interfaz “Visual TFT”



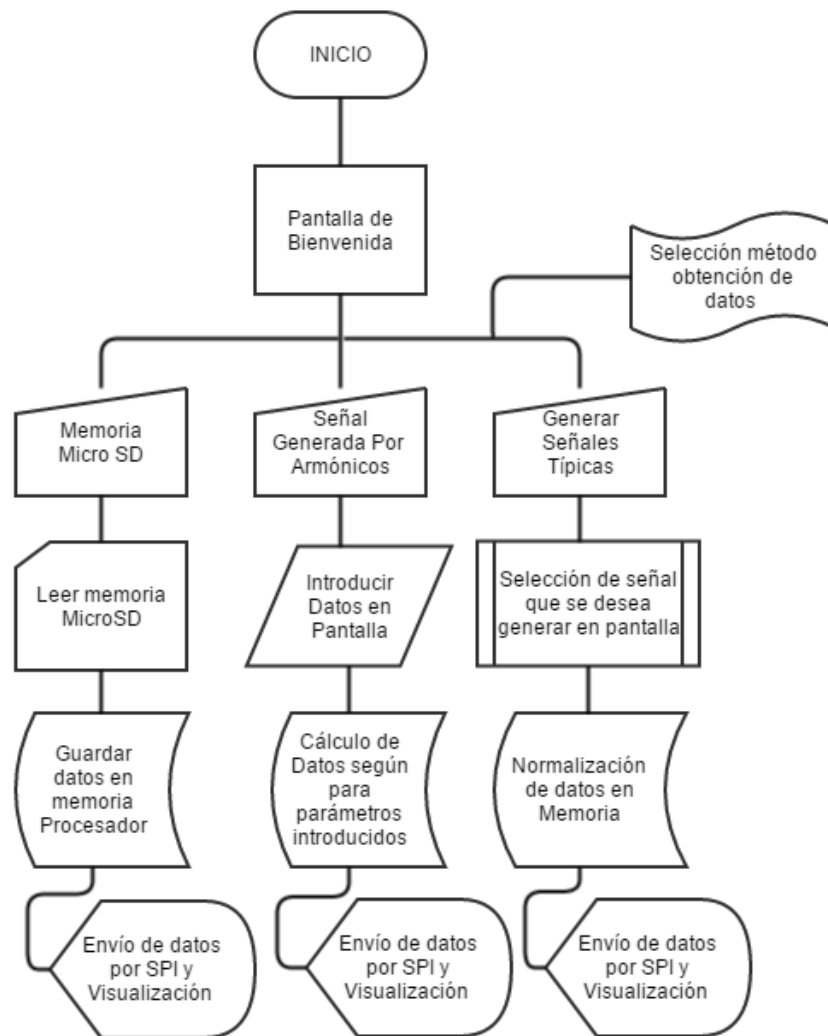
Fuente: Software “Visual TFT” Versión 3.9.0.

**2.2.4. Establecimiento del Programa.** Para la construcción de la rutina implementada se hizo uso de los dos programas ya se ha mencionados en los numerales anteriores, en el “Visual TFT” se desarrolló todo el entorno grafico mostrado en pantalla: botones, color de fondo títulos, etc.; además de esto a cada botón se le adiciona la propiedad de desarrollar una acción al ser pulsado e interactuar con él, el resultado al finalizar el proyecto en “Visual TFT” es un archivo con extensión “.vtf” y una carpeta en donde encontraremos diferentes archivos “.c” pertenecientes al proyecto que se ha creado. Para continuar con la edición del proyecto se hace uso del siguiente programa llamado “MicroC pro for

**DsPic**”, en este se realiza toda la programación requerida en lenguaje C++, integrando la parte grafica ya construida.

Para continuar con la explicación de las rutinas e instrucciones que se programaron, se presenta un diagrama con la rutina general en la Figura 20.

**Figura 20. Diagrama de flujo general del modelo**



Fuente: Autor.

Como se observa en el diagrama de la Figura 20 el sistema se subdivide en tres módulos independientes, el módulo de lectura de datos desde una memoria externa, el módulo de generación de señales a partir de sus componentes armónicas y el módulo de generación de señales típicas (la forma de onda de una señal sinusoidal, cuadrada y triangular). Cada uno de estos módulos se detalla en los numerales siguientes.

Al comenzar a utilizar el modelo electrónico del generador de señales el usuario se encuentra con la pantalla de bienvenida que dura unos segundos (ver Figura 21) dando paso a una nueva pantalla que trae consigo la posibilidad de elegir uno de los tres métodos de ingreso de datos ya mencionados, esta pantalla se presenta en la Figura 22.

**Figura 21. Pantalla de inicio del modelo electrónico del generador de señales**



Fuente: Screen del Software “**Visual TFT**” - Autor.

**Figura 22. Pantalla de selección del método de obtención de los datos**



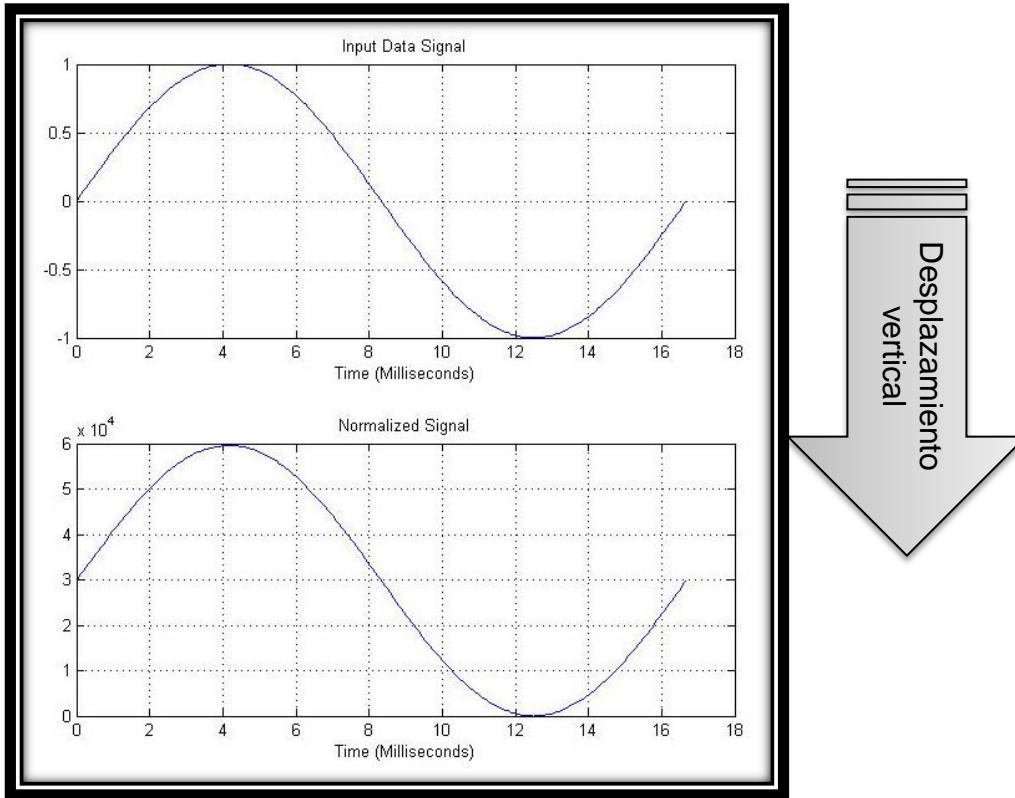
Fuente: Screen del Software “**Visual TFT**” - Autor.

**2.2.4.1. Módulo De Lectura De Datos Desde La Microsd:** Para la primera de las opciones desplegadas en el menú, el usuario tendrá la posibilidad de ingresar datos de una señal cualquiera que desee generar por medio de memoria MicroSD, que se insertará en la ranura dispuesta en el dispositivo, dichos datos pueden ser obtenidos de cualquier software de procesamiento de datos o CAD que usuario prefiera, como por ejemplo *Excel*, *Matlab*, *OrCad*, etc., o bien utilizando las dos herramientas que se entregan en el Anexo 5, que son dos formas de crear señales a partir de armónicos, entregando los datos en el primer caso como un vector que hay que organizar teniendo en cuenta las condiciones que nombran a continuación; y el segundo caso es un software en plataforma *WEB* diseñado para entregar el archivo o archivos con las condiciones requeridas para el ingreso de datos al módulo.

- Los archivos de las señales que deben ir en la memoria son archivos de extensión “.TXT”.

- Como se pueden generar hasta dos señales simultaneas, se pueden guardar entonces dos archivos correspondientes a dos señales distintas, según sea el caso, pero teniendo en cuenta que cada uno de los archivos se debe nombrar de la siguiente manera: "MIKRO00A.TXT" para la señal 1 y/o "MIKRO00B.TXT" para señal 2.
- El vector de las señales debe constituirse por 256 valores correspondientes a un periodo de la señal.
- En el archivo debe ir como primer dato un cero "0", seguido de la frecuencia con que se desea generar la señal (tener en cuenta que el dispositivo diseñado está limitado en frecuencia), en seguida van los 256 datos que integran la señal que se pretende generar.
- Todos los datos deben ir separados por una coma ",", y el ultimo carácter debe ser también una coma "," después del último dato.
- Cada dato debe componerse máximo de cinco caracteres que deben ser números naturales y estar normalizados (realizar un desplazamiento - vertical Figura 23) teniendo en cuenta la máxima excursión del sistema (#bits=>2<sup>16</sup>, salida y ganancia=>3\*3.3).

**Figura 23. Desplazamiento vertical de una señal (Normalización)**



La plataforma WEB se desarrolló para facilitar una herramienta que generase señales a partir de armónicos (con  $n$  armónicos), además de entregar los datos generados con el formato y características necesarias para que el modelo electrónico desarrollado los reconozca. A continuación se presenta en la Figura 24 algunas de las pantallas que se usan en dicha plataforma

Figura 24. Diferentes pantallas de interacción para generar señales a partir de armónicos en un entorno WEB.

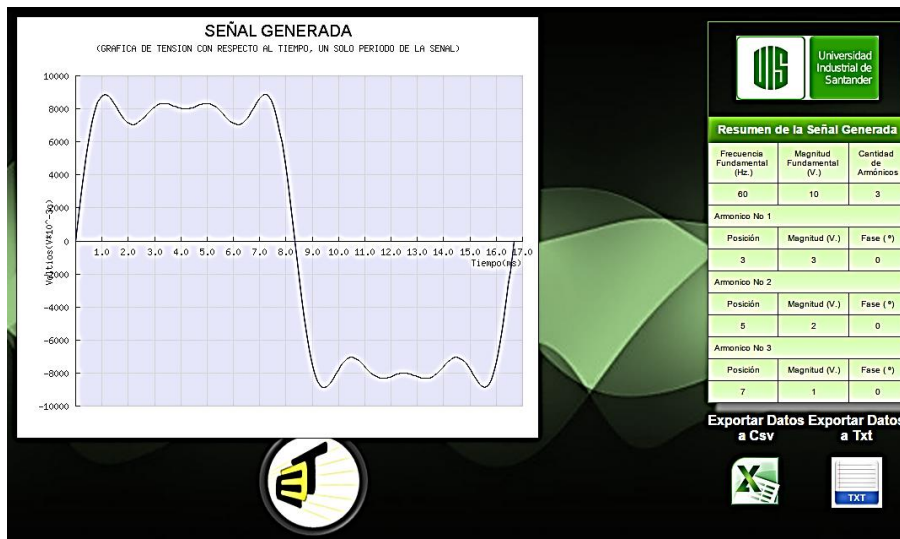


a).

b).



c).



d).

Fuente: Plataforma WEB mostrada desde el navegador “Chrome” - Autor

La imagen a) es la pantalla de inicio donde se valida el ingreso para el uso de la herramienta; La imagen b) es donde se definen las características principales de la señal a generar como frecuencia fundamental, magnitud fundamental y cantidad de armónicos; la imagen c) es donde se ingresan los datos de posición, magnitud y fase de cada uno de los armónicos; la imagen d) es donde se muestran los resultados de tres formas distintas: gráficamente, en un resumen y dos archivos descargables que contienen el vector normalizado para su uso en el modelo electrónico del generador de señales.

Una vez obtenidos los datos y contenidos en el archivo “.TXT” con cualquier método mencionado anteriormente, éstos son leídos carácter a carácter y deben ser traducidos usando una tabla “ASCII” (del inglés *American Standard Code for Information Interchange* — Código Estándar Estadounidense para el Intercambio de Información), el método es para formar una correspondencia entre la cadena de bits que se necesita y la serie de símbolos que tenemos en el archivo “.TXT” al

cual debemos hacerle el procesamiento y el envío para dejarlos estar en formato entero sin signo y guardarlos en la memoria interna del microcontrolador.

Para complementar lo anteriormente expuesto, en la Figura 25 se describe una de las funciones utilizadas para la lectura y obtención de los datos desde la memoria externa del dispositivo.

**Figura 25. Línea de código lectura de archivo memoria externa.**

```
nca=2000;
char filename[14] = "MIKRO00x.TXT";

void M_Open_File_Read()
{
    char character;
    unsigned char numeros[nca];
    unsigned char dato[6];

    Mmc_Fat_Assign(&filename, 0);
    Mmc_Fat_Reset(&size_);

    for (i = 0; i <= size_; i++) {
        Mmc_Fat_Read(&character);
        numeros[i]=character;
    }
}
```

La función “*M\_Open\_File\_Read()*” de la Figura 25, primero localiza el archivo con el nombre especificado (“MIKRO00A.TXT” o “MIKRO00B.TXT”), luego calcula el tamaño de dicho archivo y lo recorre guardando en el vector “*números[]*” cada uno de los caracteres encontrados. Es importante mencionar que los datos están

separados por comas (“,”) y que dichas comas también son caracteres que serán guardados en este vector.

La función “*convertir\_k*” de la Figura 26, toma una cadena de caracteres, calcula la cantidad de caracteres que le han sido introducidos entre 1 y 5, luego convierte dicha cadena en un número con formato entero sin signo. Cada dígito ingresado dependiendo de su posición recibe un peso para retornarlo con el valor correspondiente al sistema de numeración decimal.

**Figura 26. Línea de código convertir cadena de caracteres.**

```
unsigned convertir_k( char *cad) //CONVIERTE CADENA DE CARACTERES EN UN NUMERO
{
    unsigned num = 0;
    int tam=0;
    unsigned digito=0;
    int i;
    tam = strlen(cad); /* Longitud de la cadena recibida */

    for (i = tam ; i >= 1; --i) {

        digito = (int) (cad[i - 1] - 48);
        if((tam - i)==0)
            num += digito;
        if((tam - i)==1)
            num += digito*10;
        if((tam - i)==2)
            num += digito*100;
        if((tam - i)==3)
            num += digito*1000;
        if((tam - i)==4)
            num += digito*10000;
        if((tam - i)==5)
            num += digito*100000;
    }

    return num;
}
```

Complementado la función “*convertir\_k*”, se implementa en un ciclo “*for*” mostrado en la Figura 27 para guardar los números en un vector llamado “*numeros*”. Este ciclo “*for*” almacena en la memoria los datos organizados por la función “*convertir\_k*” y cuando encuentra el carácter 44 (“,”), genera un nuevo campo en dicho vector hasta recorrer toda la cadena.

**Figura 27. Línea de código obtener el vector “numeros”.**

```
x=0;
y1=0;
for(y=0;y<nca;y++){
    if(numeros[y]==44){
        vector[x++]=convertir_k(dato);
        dato[0]=0;
        dato[1]=0;
        dato[2]=0;
        dato[3]=0;
        dato[4]=0;
        dato[5]=0;
        y1=0;
    }
    else{
        dato[y1++]=numeros[y];
    }
}
```

Fuente: Autor.

Una vez obtenido todos los datos se procede a realizar el envío (esta parte del código será explicada al final, dado que para los tres módulos de generación de señales, la forma de envío es la misma).

La pantalla del módulo de señales generadas por datos importados desde la MicroSD se muestra en la Figura 28a. En esta misma pantalla al presionar el botón “*Leer*” se define si existe o no una MicroSD en la ranura, apropiada para la

lectura de datos (para valoración del lector se muestran las dos opciones en la misma pantalla).

Al hacer una correcta lectura de los datos, la pantalla cambia automáticamente a otra con un resumen de la información que se está generando por cada una de los canales; el resumen muestra los primeros datos generados de cada canal y la frecuencia de generación de la señal de cada canal (la Figura 28b es tomada de un ejemplo).

**Figura 28. Pantallas del módulo de ingreso de datos desde una MicroSD.**



*Fuente: Screen del Software “Visual TFT” – Pantalla de modelo electrónico - Autor.*

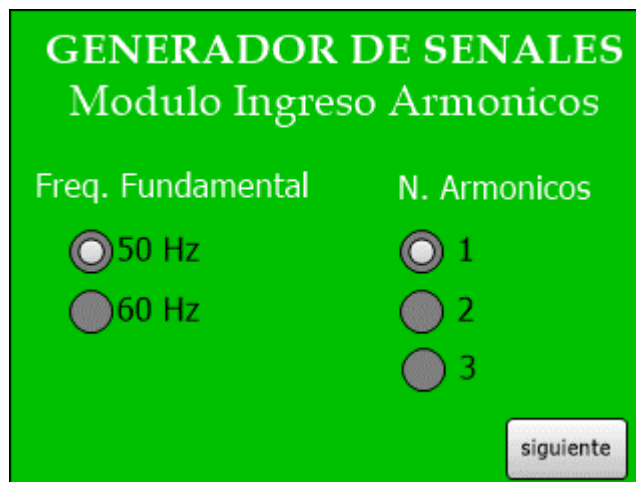
### 2.2.4.2. Módulo De Generación De Señales A Partir De Sus Componentes

**Armónicas:** La segunda forma de generar señales en nuestro modelo electrónico es mediante Las componentes armónicas de una señal particular, el usuario deberá introducir en la primera pantalla los siguientes datos:

- La frecuencia fundamental
- El número de componentes armónicas que desea introducir a la señal (máximo 3 para este módulo).

La Figura 29 muestra la primera pantalla del módulo de generación de señales a partir de sus componentes armónicas. El dato de la magnitud de la componente fundamental de la señal, por conveniencia se ingresa en la pantalla siguiente, que es la del ingreso de las variables del primer componente armónico.

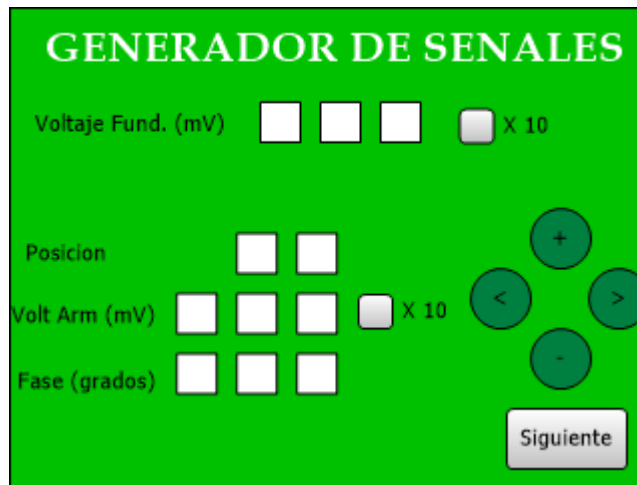
**Figura 29. Módulo de ingreso de armónicos, primera pantalla**



Fuente: Screen del Software “**Visual TFT**” -

En la siguiente pantalla y por cada uno de las componentes armónicas seleccionadas se debe introducir su posición, el nivel de tensión y la fase, además inicialmente se ingresa el tensión pico del armónico fundamental en una interfaz como la mostrada en la Figura 30.

**Figura 30. Módulo de ingreso de armónicos, segunda pantalla**



*Fuente: Screen del Software “Visual TFT” -*

En la pantalla el usuario podrá visualizar cuadros blancos por los cuales podrá navegar con los botones hacia la izquierda ‘<’ o derecha ‘>’, al tiempo que en cada cuadro podrá aumentar o disminuir el dígito correspondiente a dicho cuadro con los botones redondos de + y  $\ominus$ . Así el usuario podrá introducir números de hasta 3 dígitos cada uno, para valores como frecuencia, tensión, posición y desfase. Este proceso se repetirá hasta tres veces, que es la cantidad máxima posible de armónicos para ingresar en este módulo. Una vez introducidos todos los valores se hace la interpretación de datos introduciéndolos en la función que evaluará cada una de las componentes armónicas, incluyendo la componente fundamental y arrojará un vector con los datos que más adelante se enviarán al convertidor DAC.

Para la Figura 31 es necesario enunciar que la amplitud de la componente fundamental fue guardada en la variable “*Ampar1*”, que la frecuencia de dicha componente se encuentra guardada en “*frqFun1*” y que los parámetros de las

componentes armónicas fueron guardados en una matriz de 3x3 donde las **FILAS** corresponden a cada armónico y las **COLUMNAS** a su posición, tensión y fase.

**Figura 31** Línea de código con la función para obtener el vector con la suma de los armónicos

```
unsigned armch1[256];
double const PI=3.141592;
double Armsignal[256],t=0,auxsignal[256];
int r,r1;

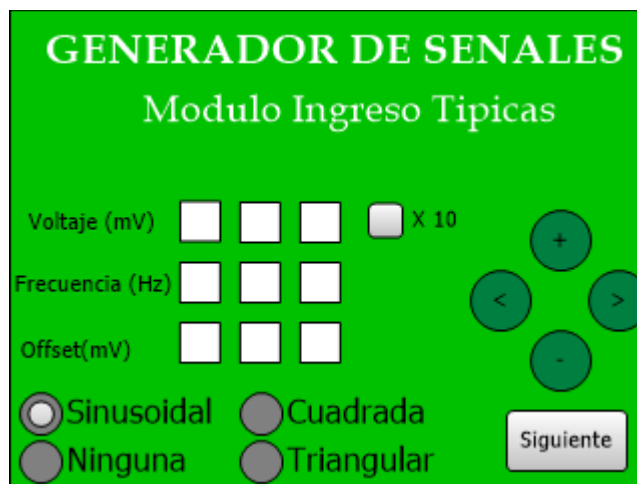
void ecuacion(){
    for(r=0;r<256;r++){
        auxsignal[r]=0;
        t=(double)((r/255.)/frqFun1);
        Armsignal[r]=(float)(Ampar1/1000.)*sin(2*PI*frqFun1*t);
    }

    for(r1=0;r1<narm;r1++){
        for(r=0;r<256;r++){
            t=(r/255.)/frqFun1;
            auxsignal[r]=(Varmonicos[r1][1]/1000.)*sin(2*PI*t*frqFun1*Varmonicos[r1][0]+(Varmonicos[r1][2]*(PI/180)));
            Armsignal[r]+=auxsignal[r];
        }
    }
}
```

En el código mostrado en la Figura 31 se aprecia fácilmente que en el primer ciclo “for” se calcula la variable “t” (tiempo) en función de la frecuencia del fundamental y cada una de los 256 datos que pretende hallarse, luego de definida la variable tiempo se calcula un periodo de la señal solo con el armónico fundamental, seguido a esto se realiza lo mismo con todos los armónicos y el resultado se suma al primer vector hallado.

**2.2.4.3. Módulo de Generación de Señales Típicas:** La tercera forma de generar señales con este modelo electrónico es con el módulo de generación de señales típicas. Aquí el usuario puede escoger entre generar 3 tipos de señales: sinusoidal, cuadrada o triangular o ninguna si no desea generar ninguna señal por alguno de los dos canales con los que se cuenta. Para este fin han sido guardados en memoria tres vectores que contienen la información de un periodo completo de cada una de las señales, una vez el usuario introduce los datos requeridos de las variables de cada señal (tensión pico a pico, frecuencia y offset), dicho vector es normalizado a los parámetros introducidos por el usuario y enviado a la entrada de los DACs con la frecuencia especificada. El procedimiento descrito y mostrado en la Figura 32 se repite para cada canal.

**Figura 32. Módulo de generación de señales típicas, ingreso de variables para cada canal.**



Fuente: Screen del Software “Visual TFT” -

En el cuadro de texto de la Figura 33 se puede observar un ciclo “for” en donde se realiza la normalización del vector o vectores que se enviarán a los DACs.

**Figura 33. Línea de código para normalizar el vector a enviar a los DAC**

```
for(l=0;l<256;l++){
    tempk=((Seno_muestras[l])*amp1)+29789-offs1;
    sig1[l]=(unsigned)floor(tempk);
}
```

Fuente: Autor.

Para el caso específico de la señal sinusoidal, el vector de datos almacenado en la memoria interna del sistema de desarrollo contiene valores positivos y negativos, esto significa que para los requerimientos y límites del sistema, los valores estarán entre “32728 y -32728”, que corresponden a una señal con amplitud de 5 Volts pico en su valor máximo; la variable “*amp1*” disminuirá estos valores según la tensión que el usuario sugiera, luego a la señal se le adiciona el valor 29789 correspondiente a 1.5 Volts en nivel de DC que será retirado luego por hardware.

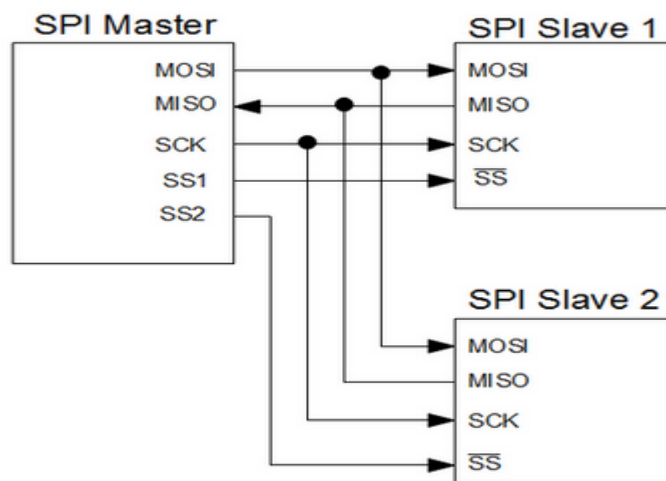
**2.2.4.4. Envío de Datos y Comunicación Spi.** El envío de datos se hace por medio del BUS SPI (del inglés Serial Peripheral Interface), es un estándar de comunicación serial para controlar casi cualquier dispositivo electrónico digital que acepte un flujo de bits serie regulado por un reloj (comunicación sincrónica)<sup>19</sup>. El protocolo SPI Incluye como mínimo cuatro líneas de comunicación: una línea de reloj, una línea para el dato entrante, una línea para el dato saliente y una línea de pin denominado “*chip select*”, que conecta o desconecta la operación del dispositivo con el periférico que desea comunicarse. De esta manera, este protocolo estándar de comunicaciones permite multiplexar las líneas de reloj (ver Figura 34).

---

<sup>19</sup> Definición en línea: [https://es.wikipedia.org/wiki/Serial\\_Peripheral\\_Interface](https://es.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface)

Dentro de este esquema de comunicaciones existirán por lo menos dos dispositivos uno que asumirá el rol de “Master” (maestro), encargado de realizar el envío y otro que recibirá los datos “Slave” (esclavo). Es posible conectar más de un esclavo a un dispositivo maestro (no significa que la comunicación ahora sea paralela).

**Figura 34. Arquitectura de la comunicación serial SPI para más de un dispositivo esclavo**



*Fuente: Datasheet Microcontrolador dsPIC33EPMC810 - Anexo 2.*

Para la aplicación del protocolo de comunicaciones SPI en el modelo electrónico del generador de señales del que trata este libro se estableció que en primera instancia se enviarían los datos a un esclavo que sería el DAC número uno y luego al otro, simplemente activando a desactivando el “*chip select*” de cada uno de los DACs, de esta forma se logran configurar los dos canales y para efectos prácticos se podrán configurar aún más canales con el uso de un solo BUS SPI.

Una vez realizada las configuraciones en Hardware necesarias se procede a declarar los pines de salida necesarios para la comunicación, en la función *“InitMain\_Spi()”* se puede observar en la Figura 35 la configuración de los pines B14 y G14 como *“Chip Select”*, correspondiente a cada uno de los canales que se desea implementar, dentro de esta misma función vemos como se inicializa el puerto SPI2 utilizando el comando *“SPI2\_Init\_Advanced”*.

**Figura 35. Línea de código para habilitar envío**

```
// "DAC module connections"
sbit Chip_Select at LATB14_bit;           //selecciona pin CS
sbit Chip_Select_Direction at TRISB14_bit; //Lo configura como salida.

sbit Chip_Select2 at LATG14_bit;
sbit Chip_Select_Direction2 at TRISG14_bit;
void InitMain_spi() {

    Chip_Select = 1;                       // Deshabilita el DAC
    Chip_Select_Direction = 0;             // establece el pin de CS# como salida

    Chip_Select2 = 1;                      // Deshabilita el DAC
    Chip_Select_Direction2 = 0;            // establece el pin de CS2# como salida

// Configuración del protocolo SPI - Maestro-esclavo
SPI2_Init_Advanced(_SPI_MASTER, _SPI_16_BIT, _SPI_PRESCALE_SEC_8,
_SPI_PRESCALE_PRI_4, _SPI_SS_DISABLE, _SPI_DATA_SAMPLE_MIDDLE, _SPI_CLK_IDLE_HIGH,
_SPI_ACTIVE_2_IDLE);
}
```

Realizados todos los cálculos necesarios en cada uno de los apartados de código de programación hasta ahora mencionados del programa, el proceso que continúa es el de realizar el envío de los datos a los DACs, como se muestra en las siguientes líneas de código de la Figura 36.

Se puede observar que la variable “CurrentValuex” toma un valor del vector en donde se encuentran los datos, luego se activa el “*chip\_select*” de uno de los receptores (primer DAC) y se realiza el envío de datos, luego de ésto se realiza la misma accion con la señal del “*chip\_select*” correspondiente al otro receptor (segundo DAC).

**Figura 36. Línea de código para el envío de la señal a los DAC.**

```
while (1)
{
    CurrentIndex = GetIndex(Frecuencia1);
    CurrentValue =sdch1[CurrentIndex];

    CurrentIndex2 = GetIndex2(Frecuencia2);
    CurrentValue2 =sdch2[CurrentIndex2];

    Chip_Select= 0;
    SPI2_Write(CurrentValue);
    Chip_Select= 1;

    Chip_Select2 = 0;
    SPI2_Write(CurrentValue2);
    Chip_Select2 = 1;
}
```

## **2.3. ETAPA DE CONVERSIÓN Y AMPLIFICACIÓN**

En esta etapa se hace la conversión de los datos digitales entregados por el sistema de desarrollo por medio de dos DACs a datos analógicos y éstos a su vez se adecúan y amplifican en el rango de valores especificado dentro de los objetivos planteados para este proyecto.

**2.3.1. Conversor Digital-Analógico “DACs”.** Como la conversión Digital-Analógica es de vital importancia en el desarrollo del proyecto, se debe contar con

un dispositivo con alta resolución en su salida siendo este el principal parámetro de selección. Según los objetivos del proyecto, el modelo electrónico funcional debe tener dos salidas con dos canales independientes, se decide trabajar con dos DACs de un solo canal, puesto que en un DAC multicanal la multiplexación hace lento el proceso de conversión. Dicho esto, se realiza una comparación entre tres distintos DACs presentes en el mercado, uno sugerido por la empresa fabricante del mismo sistema de desarrollo, el Convertidor Digital-Analógico con referencia: MCP4921 (ANEXO 8 <sup>20</sup>) y que está montado en una placa denominada “DACclick” con tecnología MikroBUS (ANEXO 8 <sup>21</sup>), y dos de la casa fabricante “Texas Instruments®”<sup>22</sup>, con las siguientes referencias: DAC8871 (ANEXO 8 <sup>23</sup>) y DAC8830 (ANEXO 8 <sup>24</sup>); dicha comparación se evidencia en la Tabla 2.

**Tabla 2. Comparación de tres distintos DACs**

DAC	Bits	INL (LSB)	DNL (LSB)	Tiempo de establecimiento [μs]	Interfaz	Precio [US]
MCP4921	12	±2	±0.75	4.5	SPI Serial	18
DAC8871	16	±1	±1	1	SPI Serial	25.29
DAC8830	16	±1	±1	1	SPI Serial	15.96

<sup>20</sup> OSORIO VILLAMIZAR, Secundino. Medidores Técnica Equipos SA. VERIFYLAB. [en línea]. Disponible en: < <http://www.verifylab.com/>>. [10 de junio de 2015]

<sup>21</sup> ESSA, Electrificadora de Santander S.A. E.S.P. Laboratorio de medidores [en línea]. Disponible en: <<https://www.essa.com.co/site/clientes/es-es/nuestrosproductosyservicios/laboratoriodemedidores.aspx>>. [26 de junio de 2015]

<sup>22</sup> Acerca de Texas Instruments: <http://www.ti.com/corp/docs/aboutti.shtml>

<sup>23</sup> KAI, Grupo de Gestión Eficiente de Energía y DR. CAMPOS AVELLA, Juan Carlos (Investigador principal). “Calidad de la Energía Eléctrica”. UPME, Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia y COLCIENCIAS, Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia Y La Tecnología. Colombia, 2007. 25 p.

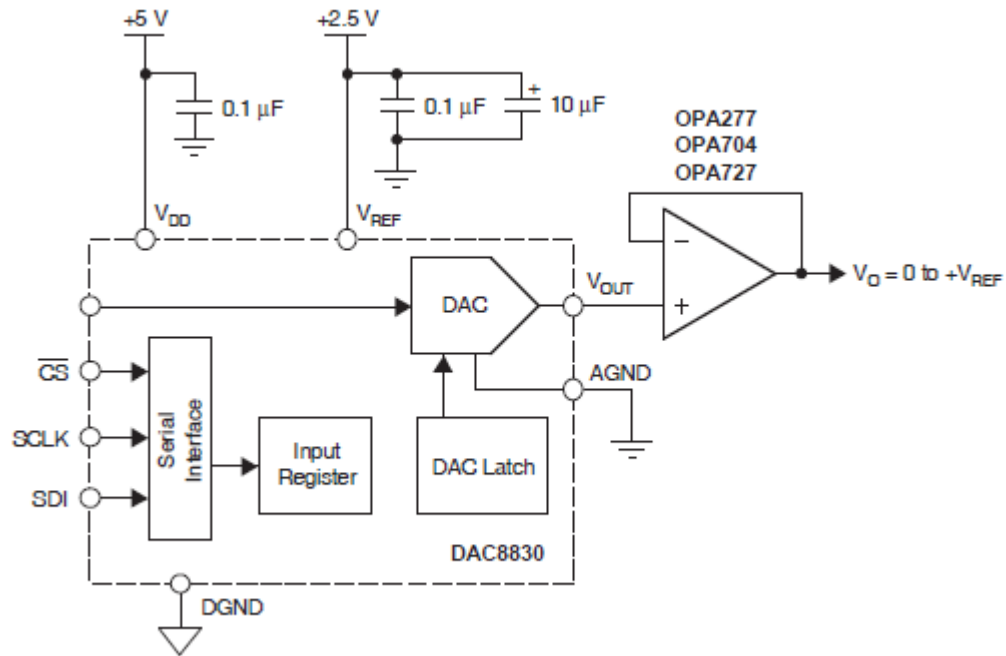
<sup>24</sup> CAÑETE CORRIPIO, Francisco Javier. TESIS DOCTORAL. “Caracterización y Modelado de Redes Eléctricas Interiores como Medio de Transmisión de Banda Ancha”. Universidad de Málaga, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación. España, 2004. 245p.

Se elige utilizar el DAC8830 fabricado por Texas Instruments®, porque además de sus características, es de fácil adquisición y el más económico. A continuación se enuncian las características destacadas del dispositivo elegido:

- Alta resolución de 16 bits.
- Alimentación de operación en el rango de 2.7 a 5.5 [V].
- Bajo consumo de potencia (15 [ $\mu$ W] por 3 [V]).
- Alta precisión.
- Rápido establecimiento (1 [ $\mu$ s]).
- Excelente linealidad (INL: 1 LSB).
- Bajo ruido 10 [ $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ].
- Interface serial rápida SPI a 50 [MHz] para comunicarse con un DSP o microcontrolador, entre otras características.

La configuración de conexión recomendada por el fabricante se muestra en la Figura 37. Con el fin de acoplar el DAC con el sistema de desarrollo se implementa dicha configuración para cada canal.

**Figura 37. Esquemático de conexión del DAC8830**



Fuente: Datasheet DAC8830 – ANEXO 8.

La interfaz digital corresponde a una conexión estándar de tres hilos compatible con SPI, la cual puede operar a velocidades de hasta 50 [Mbits/s]. La transferencia de datos se ve directamente influenciada por la señal de selección  $\overline{CS}$ . Cabe aclarar que el DAC funciona como un bus esclavo. El bus maestro equivale a un reloj síncrono generado, SCLK, la transmisión inicia cuando la señal  $\overline{CS}$  se encuentra en bajo, ya que en alto se no se accede al DAC, ignorándose las señales SCLK y SDI. La transmisión se da por SDI mediante una trama de 16 bits, haciéndose necesario igual número de ciclos de reloj para la correcta operación.

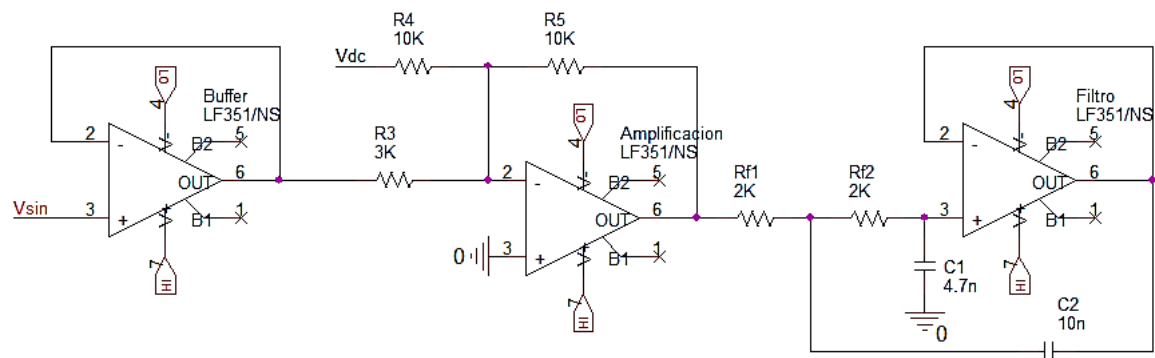
**2.3.2. Adecuación de la Señal de Salida.** Debido a las características de diseño establecidas previamente, se hace necesario adecuar la señal de salida para cumplir a cabalidad con las especificaciones dadas.

Se debe tener en cuenta que la salida del DAC corresponde a una señal unipolar entre 0 [V] y la tensión de referencia con la que se trabaje, para este caso en particular se decide trabajar con una tensión de referencia de 3.3 [V] dada por el sistema de desarrollo Mikromedia para DSPIC33EP.

La etapa de adecuación de la señal de salida del DAC consta principalmente por una serie de configuraciones en cascada: un buffer, un sumador inversor y finalmente un filtro sellen-key.

La configuración sumador inversor se implementa con una ganancia de 3.3 [V/V], valor elegido para alcanzar el rango especificado entre  $\pm 5$  [V], adicionalmente se introduce un nivel de DC con el fin de eliminar la componente en continua de la señal de entrada. En la Figura 38. Se muestra la configuración implementada.

**Figura 38. Configuración de la adecuación de la señal de salida.**



Fuente: utilizando Orcad®

El Filtro “*Sallen – Key*” se considera importante debido a su simplicidad, pues simplemente está compuesto por un par de resistencias e igual número de capacitores y un solo amplificador operacional.

Mediante la herramienta de diseño y simulación de filtros activos “*FilterPro*”, software desarrollado por Texas Instruments y de uso libre, se diseña un filtro Sallen Key con las siguientes características:

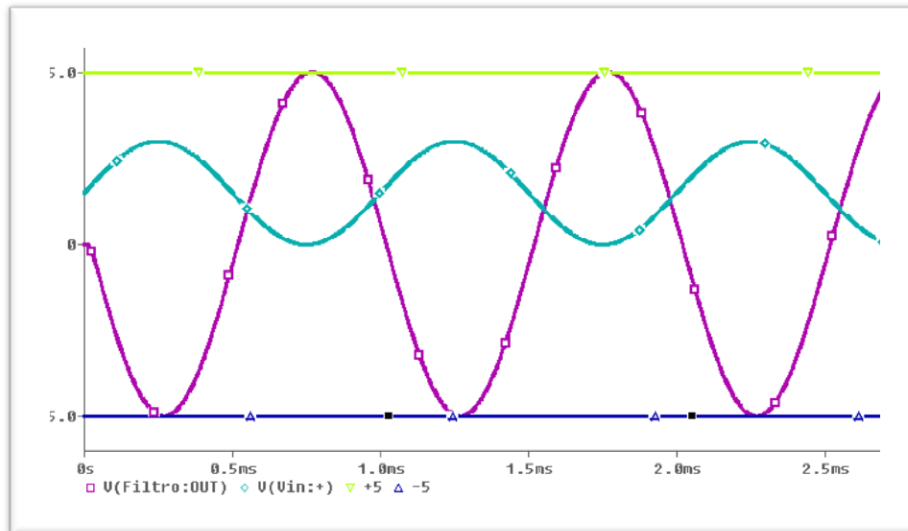
- Filtro “Pasa baja” de segundo orden.
- Ganancia unitaria.
- Frecuencia de corte 10 [KHz].
- Respuesta del filtro tipo “butterworth”.

La respuesta del filtro “butterworth” se escoge, pues se considera más adecuado por su respuesta plana en la banda de paso, acorde al cumplimiento de las especificaciones requeridas en el diseño.

Con el fin de evaluar la funcionalidad del circuito se realiza un análisis en tiempo y frecuencia, mediante la herramienta “*Capture*” de Orcad® se obtiene en simulación los tipos de respuesta para cada ítem, mostrados en la Figura 39 y Figura 40.

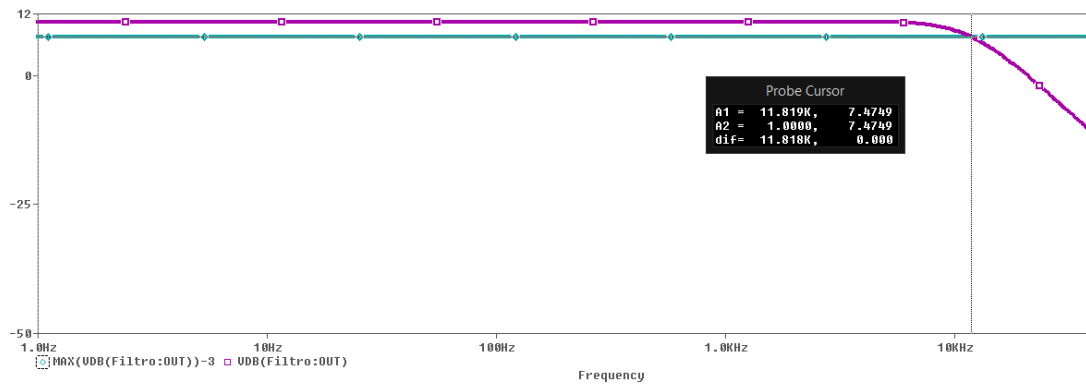
La Figura 39 es la respuesta en el dominio del tiempo de la señal de salida con la adecuación implementada. En ella se observa la salida del DAC entre 0 y 3 [V] (color verde oscuro), rango definido por la tensión de referencia, también la salida con la adecuación de la señal (color morado), que tiene la misma forma de onda de entrada y que además está dentro de los límites definidos en los objetivos del proyecto ( $\pm 5$  [V]).

**Figura 39. Simulación la señal de entrada y de salida.**



Fuente: utilizando Orcad®

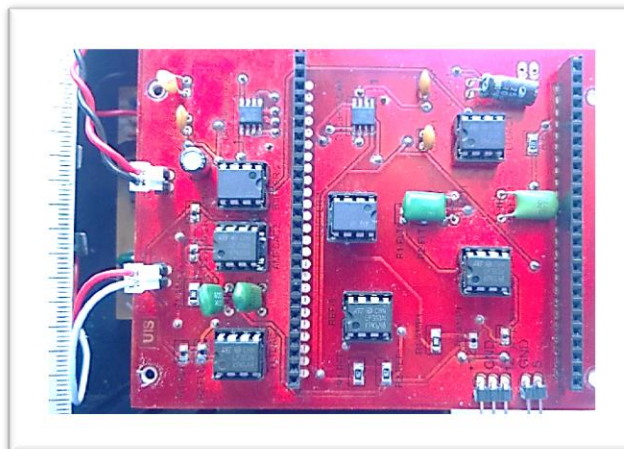
**Figura 40. Respuesta en frecuencia de la señal de salida de la adecuación implementada**



Fuente: utilizando Orcad®

**2.3.3. Fabricación Placa De Circuito Impreso.** Con la ayuda del software “*Eagle Versión 6.5*” (se utilizó la versión Demo) y utilizando los resultados de los apartados anteriores, más la utilización de los elementos pasivos complementarios como los capacitores y resistencias de precisión existentes en el mercado y basados en el diseño de los filtros, se fabricó el circuito impreso cuya imagen se muestra en la Figura 41.

**Figura 41. Placa de circuito impreso de la etapa de Conversión y Amplificación**



En la parte superior izquierda de la fotografía se observan los dos DACs utilizados, además se pueden apreciar también los filtros, la amplificación y el buffer de salida

#### 2.4. ENSAMBLAJE DEL MODELO ELECTRONICO DEL GENERADOR

Al reunir los resultados de las tres etapas del numeral 2, se decidió ensamblar en una sola caja compacta todo el sistema, como se aprecia en la Figura 42, definiéndose una estructura básica con sus entradas y salidas de señal.

**Figura 42. Modelo Electrónico del Generador de Señales.**



Se observan en la parte superior las salidas para los dos canales, en el panel frontal, en la esquina superior izquierda el botón de reinicio y en la parte central la pantalla táctil que maneja el sistema. En el panel derecho se encuentra la

conexión a una fuente de alimentación estándar (110 VAC / 60 HZ), y en el panel izquierdo se encuentra el botón de encendido del sistema.

En el ANEXO 9 se encuentra un manual de uso del modelo electrónico del generador de señales, con instrucciones básicas y específicas para utilizarlo; contiene gráficas ilustrativas para mayor comprensión.

### 3. PRUEBAS Y RESULTADOS

Las pruebas realizadas al equipo verifican su correcto funcionamiento y además establecen cuáles son sus prestaciones y limitaciones. Estas pruebas se fueron hechas con equipos que se encuentran los laboratorios de le escuela de electrónica; para este caso específicamente se utilizó el osciloscopio GW Instek GDS-6062 y el generador de señales BK Precision 4040A, cada uno con sus correspondientes accesorios. Los números de inventario de los equipos propiedad de la Universidad Industrial de Santander son:

- GW Instek GDS-2062: N° 86556
- BK Presicion 4040<sup>a</sup>: N° 86626

**Figura 43. GW Instek GDS-2062 (Izquierda), BK Presicion 4040a (derecha).**



Las pruebas que realizadas fueron las siguientes:

### 3.1. PRUEBAS DEL MÓDULO DE SEÑALES GENERADAS POR COMPONENTES ARMÓNICAS

Se realizó la verificación de la posición, magnitud y fase de los armónicos del módulo de señales generadas por armónicos desde la pantalla, arrojando los siguientes resultados.

**Tabla 3. Verificación de los parámetros de las señales generadas por el módulo de señales generadas por armónicos desde la pantalla.**

Descripción de la Señal	Datos Ingresados			Datos Verificados		
	FREF <sup>25</sup>	MAGF <sup>26</sup>	CARM <sup>27</sup>	FREF	MAGF	CARM
Señal de una componente armónica con un 50% magnitud del valor fundamental <i>Fig.44 (ANEXO 5: ALL9999)</i>	50 Hz	5 Vp	1	48,83 Hz	5 Vp	1
	P <sup>28</sup>	M <sup>29</sup>	F <sup>30</sup>	P	M	F(°)
	200 Hz	2,5 Vp	0°	195,3 Hz	1,99 Vp	0
Señal de tres componentes armónicas con potencias de 30%, 20% y 10% del valor de potencia del Fundamental <i>Fig. 45 (ANEXO 5: ALL0000)</i>	FREF	MAGF	CARM	FREF	MAGF	CARM
	60 Hz	5 Vp	3	58,59 Hz	5,01 Vp	3
	P	M	F	P	M	F
	180 Hz	1,5 Vp	0°	180,7 Hz	1,12 Vp	0°
	300 Hz	1 Vp	0°	297,7 Hz	0,56 Vp	0°
	420 Hz	0,5 Vp	0°	415 Hz	0,13 Vp	0°
Señal con dos componentes armónicas en desfase y con potencias de 50% y 30% respectivamente <i>Fig. 46 (ANEXO 5: ALL0011)</i>	FREF	MAGF	CARM	FREF	MAGF	CARM
	60 Hz	5 Vp	2	58,59 Hz	5 Vp	3
	P	M	F (°)	P	M	F(°)
	180 Hz	2,5 Vp	120	180,7 Hz	1,99 Vp	-o-
	420 Hz	1,5 Vp	45	419,9 Hz	0,71 Vp	-o-

<sup>25</sup> FREF: Frecuencia de la señal fundamental.

<sup>26</sup> MAGF: Magnitud de la señal fundamental.

<sup>27</sup> CARM: Cantidad de componentes armónicas de la señal.

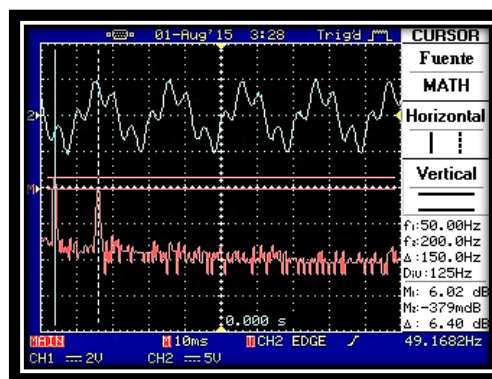
<sup>28</sup> "P" es la Posición de la componente armónica respecto a su frecuencia fundamental.

<sup>29</sup> "M" Es la Magnitud de la componente armónica expresada en un porcentaje del valor de la magnitud fundamental.

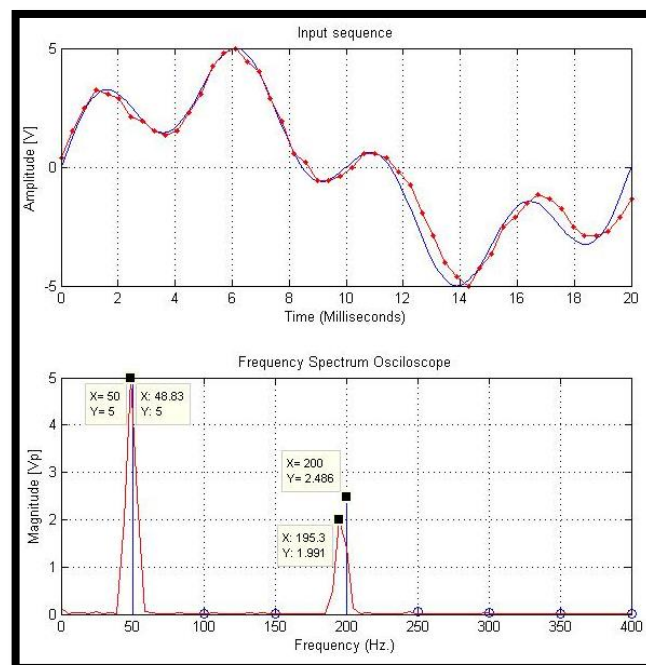
<sup>30</sup> "F" Representa el desfase que el armónico tiene respecto de la fase fundamental.

Las siguientes figuras muestran las señales generadas descritas en la tabla anterior, junto con el análisis espectral realizado en Matlab con la herramienta “*fft*” de la señal de referencia, comparándolo con el vector del análisis en frecuencia generado desde el osciloscopio y analizado en Matlab.

**Figura 44. a) Señal en pantalla del osciloscopio en tiempo y en frecuencia, b) comparación de la señal en tiempo y frecuencia, con una de referencia generada en Matlab [ANEXO 5: ALL9999]**



a).



b).

Matemáticamente la tensión de las componentes armónicas mostradas en la gráfica a), se verifica con la siguiente ecuación:

$$V_{out} = \left(10^{(dB/20)}\right) * V_{int}$$

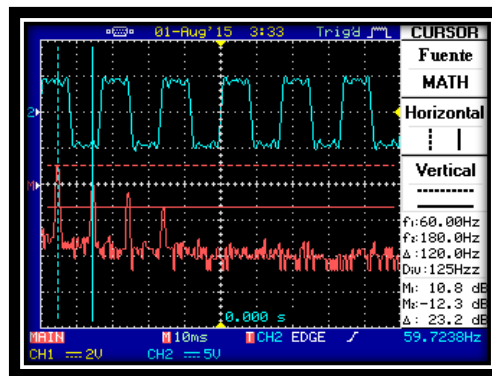
En la gráfica b) se evidencian algunas diferencias tanto en tiempo, como en frecuencia que están plasmadas en la Tabla 3. Para esta gráfica se utilizó la herramienta Matlab haciendo dos “*scripts*” independientes (ANEXO 5: ALL9999: importardatos.m y ANEXO 7), uno para la señal de referencia y otro para extraer los datos de las señales de prueba del osciloscopio.

En la parte superior de la gráfica b) se tiene dos señales función del tiempo: Una señal generada como referencia con el “script” de Matlab del ANEXO 7 (color azul), y la otra extraída de los datos recopilados del osciloscopio “GW Instek GDS-2062” (color rojo, ANEXO 5: ALL0000: importardatos.m). Los puntos de la señal roja son las muestras que el osciloscopio extrae por ciclo de la señal, mientras que la señal de referencia se generó con 256 muestras, una mejor resolución para obtener una mejor comparación de la forma de onda de la señal.

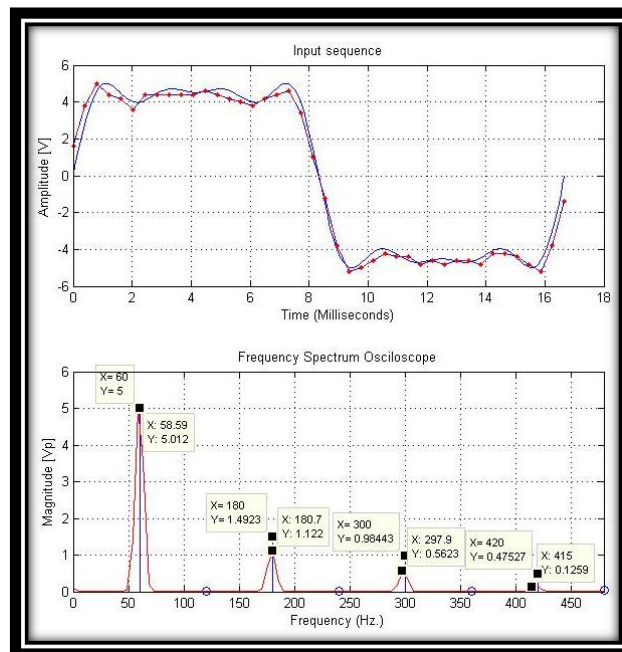
En la parte inferior de la gráfica b) se tienen dos señales función de la frecuencia: la azul corresponde a la respuesta en frecuencia de la señal de referencia, realizada en Matlab y la roja es la respuesta en frecuencia, también realizada en Matlab, de un periodo de la señal importada del osciloscopio, que corresponde a la señal de estudio.

Para valerse de los “scripts” de cada una de las pruebas y el “script” para generar la señal de referencia de cada una de las señales, dentro del ANEXO 7 también se encuentran unas instrucciones básicas que ayudarán a su comprensión y cómoda utilización.

**Figura 45. a) Señal en pantalla del osciloscopio en tiempo y en frecuencia, b) comparación de la señal en tiempo y frecuencia, con una de referencia generada en Matlab [ANEXO 5: ALL0000]**

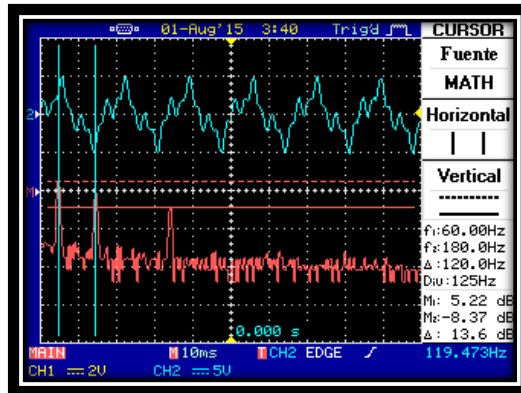


a).

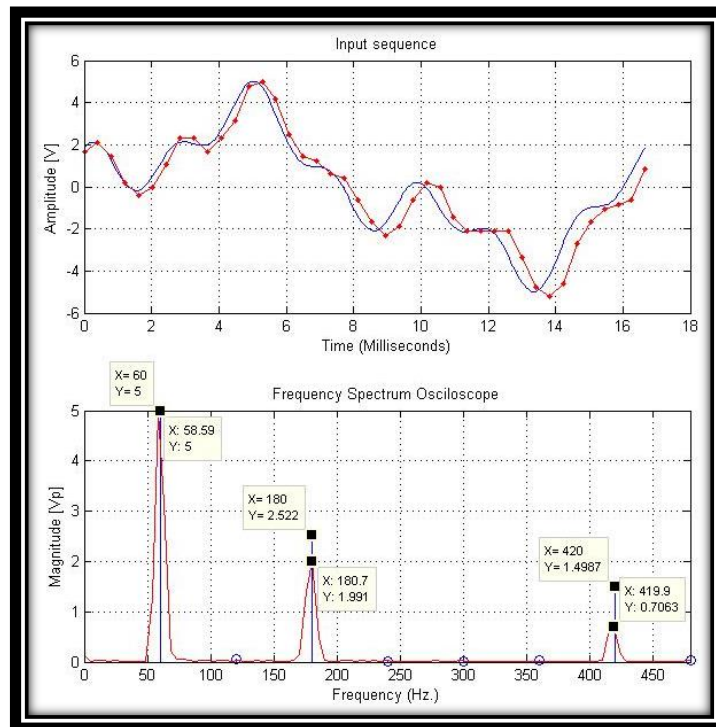


b).

Figura 46. a) Señal en pantalla del osciloscopio en tiempo y en frecuencia, b) Comparación de la señal en tiempo y frecuencia, con una de referencia generada en Matlab [ANEXO 5: ALL0011]



a).



b).

En síntesis, de las figuras 44, 45 y 46, se puede decir de la gráfica b), que al analizar los datos de la señal recogidos del osciloscopio, se presentan errores en

comparación con la señal de referencia, que son producto de las limitantes intrínsecas de los equipos de medida, como el muestreo, reconstrucción de la señal, el hardware, etc., y las aproximaciones que se realizan en el modelo electrónico, en el osciloscopio y en Matlab.

### 3.2. PRUEBAS DEL MÓDULO DE SEÑALES GENERADAS CON DATOS EXTERNOS

Se realizó la verificación de la posición, magnitud y fase de los armónicos del módulo de ingreso de señales por medio de la tarjeta “MicroSD”, arrojando los siguientes resultados.

**Tabla 4. Verificación de la magnitud, posición y la fase de señales generadas por el módulo de ingreso de señales externas con MicroSD.**

Descripción de la Señal	Datos Ingresados			Datos Verificados		
	FREF <sup>31</sup>	MAGF <sup>32</sup>	CARM <sup>33</sup>	FREF	MAGF	CARM
Señal con una componente armónica con un 50% magnitud del valor fundamental <i>Fig. 47 (ANEXO 5: ALL0001)</i>	50 Hz	5 V <sub>p</sub>	1	48,83 Hz	5 V <sub>p</sub>	1
	P <sup>34</sup>	M <sup>35</sup>	F <sup>36</sup>	P	M	F
	200 Hz	2,5 V <sub>p</sub>	0°	195,3 Hz	1,58 V <sub>p</sub>	0°

<sup>31</sup> FREF: Frecuencia de la señal fundamental.

<sup>32</sup> MAGF: Magnitud de la señal fundamental.

<sup>33</sup> CARM: Cantidad de componentes armónicos de la señal.

<sup>34</sup> “P” es la Posición de la componente armónica respecto a su frecuencia fundamental.

<sup>35</sup> “M” Es la Magnitud de la componente armónica expresada en un porcentaje del valor de la magnitud fundamental.

<sup>36</sup> “F” Representa el desfase que el armónico tiene respecto de la fase fundamental.

Descripción de la Señal	Datos Ingresados			Datos Verificados		
	FREF	MAGF	CARM	FREF	MAGF	CARM
Señal de tres componentes armónicas con potencias de 30%, 20% y 10% del valor de potencia del fundamental <i>Fig. 48 (ANEXO 5: ALL0002)</i>	60 Hz	5 Vp	3	58,59 Hz	5,01 Vp	3
	P	M	F	P	M	F
	180 Hz	1,5 Vp	0°	180,7 Hz	1 Vp	0°
	300 Hz	1 Vp	0°	297,9 Hz	0,5 Vp	0°
	420 Hz	0,5 Vp	0°	419,9 Hz	0,16 Vp	0°
Señal con dos componentes armónicas en desfase y con potencias de 50% y 30% respectivamente <i>Fig. 49 (ANEXO 5: ALL0007)</i>	60 Hz	5 Vp	2	58,59 Hz	5 Vp	3
	P	M	F (°)	P	M	F(°)
	180 Hz	2,5 Vp	120	180,7 Hz	1,99 Vp	-0-
	420 Hz	1,5 Vp	45	419,9 Hz	0,71 Vp	-0-

En las figuras 47, 48 y 49 están plasmados los análisis en tiempo y frecuencia de las tres señales de prueba de la Tabla 4. Estas gráficas son complementarias a esta tabla y el análisis de describe de la misma manera que para el anterior módulo.

Figura 47. Comparación de la señal en tiempo y frecuencia, con una de referencia generada en Matlab [ANEXO 5: ALL0001]

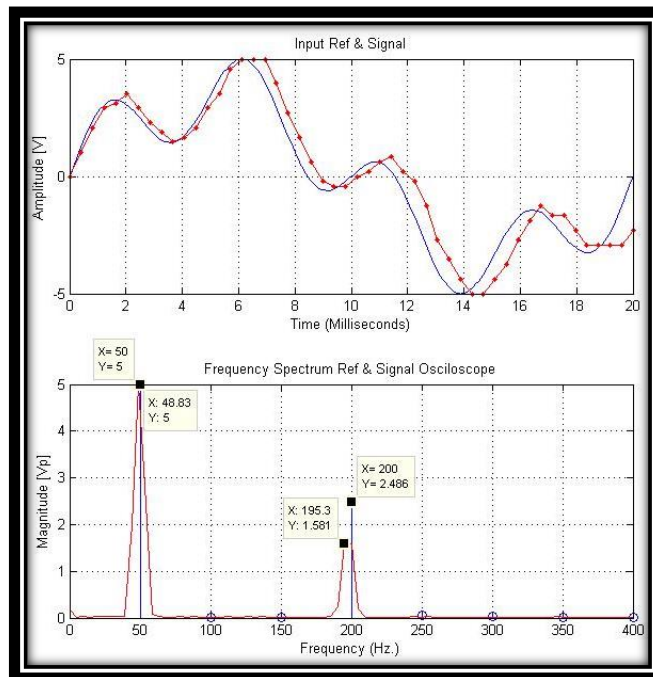
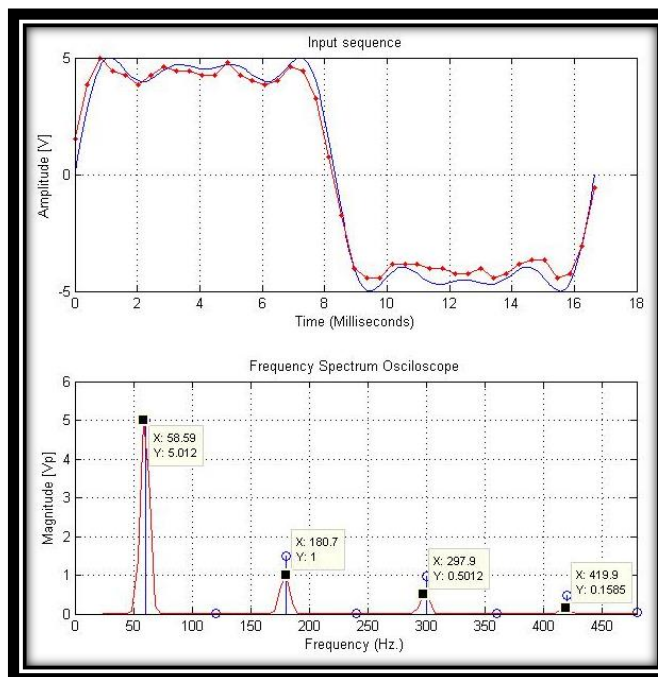
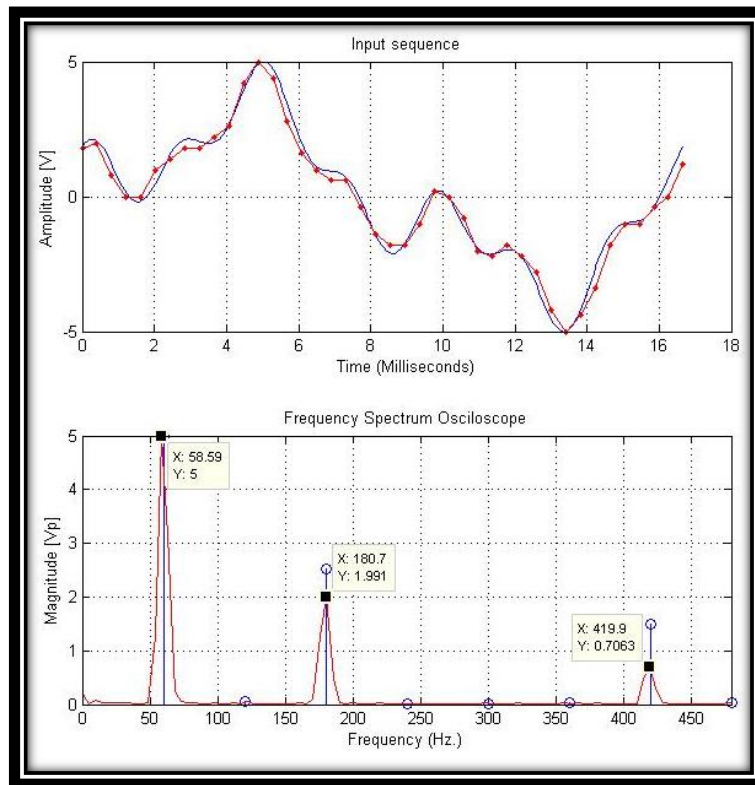


Figura 48. Comparación de la señal en tiempo y frecuencia, con una de referencia generada en Matlab [ANEXO 5: ALL0002]



**Figura 49. Comparación de la señal en tiempo y frecuencia, con una de referencia generada en Matlab [ANEXO 5: ALL0007]**



### **3.3. PRUEBA DEL MÓDULO DE SEÑALES TÍPICAS**

Para estudiar el error en la salida, se generó una señal sinusoidal convencional con un valor de amplitud de 10 [Vpp], y se realizó una variación en la frecuencia en todo el rango de frecuencias recomendado que va desde los 50 *Hz*, hasta los 1000 *Hz*. La amplitud se mantuvo constante para cada una de las señales generadas

En la siguiente tabla se presentan los errores en cada medición de la frecuencia de una señal sinusoidal generada en el modelo electrónico del generador de señales:

**Tabla 5. Barrido de frecuencia del modelo electrónico - señal sinusoidal.**

<b>Señal sinusoidal de 10 Vpp con frecuencia variable</b>					
<b>Canal 1</b>			<b>Canal 2</b>		
Fin [Hz]	Fout [Hz]	% Error	Fin [Hz]	Fout [Hz]	% Error
50,00	49,48	1,04	50,00	49,54	0,92
60,00	59,82	0,30	60,00	59,81	0,32
100,00	99,79	0,21	100,00	99,71	0,29
500,00	501,50	0,30	500,00	500,50	0,10
1000,00	1004,00	0,40	1000,00	1002,00	0,20
	<b>Promedio</b>	<b>0,45</b>		<b>Promedio</b>	<b>0,37</b>

Con la Tabla 5 y la comparación de las señales generadas por el Generador de Señales “BK Presicion 4040<sup>ª</sup>” y las del modelo electrónico fabricado (ANEXO 5: DS00012.BMP, DS00013.BMP, DS00014.BMP, DS00015.BMP, DS00016.BMP, DS00017.BMP, DS00018.BMP, DS00019.BMP, DS00020.BMP, DS00021.BMP y DS00022.BMP), se puede evidenciar la fidelidad de la señal generada con el modelo electrónico.

Se hace énfasis en el hecho de que los mismos equipos de prueba pueden presentar errores en su medición definidos por sus limitaciones de fábrica y que repercuten en las mediciones realizadas en este capítulo. También es de esperarse que existan errores que se deban principalmente al uso de dispositivos no ideales dentro del *hardware*, que en la práctica es común, y teniendo en cuenta

que inicialmente se trabaja con valores teóricos, los calculados para los parámetros como la amplitud o la tensión de offset o la misma frecuencia o rango de frecuencias de trabajo se ven afectados.

### **3.4. PRUEBAS GENERALES**

Se realizaron algunas pruebas físicas y se definieron algunas características para complementar y soportar la utilización del modelo electrónico del generador, teniendo en cuenta que estas últimas también lo describen.

Rango de trabajo: Se recomienda usar el modelo electrónico entre las frecuencias de 50 *Hz* (Mínimo) y 1000 *Hz* (Máximo) y amplitudes de 500 *mVp* (Mínimo) y 5 *Vp* (Máximo).

Repetibilidad: Se sometió el modelo electrónico a una prueba de trabajo repetitivo para comparar la capacidad de reproducir la misma señal múltiples veces y por periodos de tiempo largos (30 minutos - 45 minutos – 1 hora), encontrándose que no existía desplazamiento en el rango de medida y las proporciones entre el valor ingresado y el esperado siempre fueron correctas

No se sometió el modelo electrónico del generador de señales a perturbaciones por condiciones ambientales

#### 4. CONCLUSIONES

- Se ha realizado un modelo electrónico funcional de un generador de señales de dos canales, que pueden manejar señales cuyo rango de medida en frecuencia va desde 50 Hz. hasta 1 KHz. y alcanza 10 Volts pico a pico por cada canal de manera independiente.
- El diseño basado en el sistema de desarrollo con microcontrolador “dsPIC33EP” es capaz de manejar múltiples periféricos, con el protocolo de comunicación SPI, utilizando un sólo puerto de comunicaciones, gracias a las características intrínsecas del protocolo.
- La versatilidad de la pantalla táctil, hace posible una interacción amigable con el dispositivo gracias a que su interfaz se adapta con relativa facilidad, utilizando las herramientas (Software Asociado “Visual TFT”, “MicroC pro for dsPIC” y “mikroBootloader USB HID”) propias y de vanguardia.
- Con el sistema de desarrollo y con base en el trabajo realizado en este trabajo de grado se puede implementar un generador de señales con “ $n$ ” señales simultáneas diferentes para simular el comportamiento de las señales provenientes de circuitos polifásicos.
- La ventaja de trabajar con señales normalizadas es que se aprovecha mejor el rango de trabajo y en consecuencia la relación señal/ruido del dispositivo no afecta tanto.

- Al realizar el diseño e implementar el modelo electrónico del generador de señales sobre la base de un sistema de desarrollo como el “*Mikromedia for dsPIC33EP*”, y los demás sistemas que se mencionaron, analizaron y formaron parte del proyecto, es evidente la posibilidad implementar herramientas para el procesamiento de señales con mayor facilidad, sólo se debe tener en cuenta las limitaciones de cada sistema en cuanto la capacidad de memoria o la disponibilidad de los periféricos requeridos para una aplicación particular.

## 5. RECOMENDACIONES

- La Escuela de ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander debe adquirir equipos especializados para hacerle análisis a instrumentos o modelos electrónicos como el que trata este documento, que incluyan patrones de referencia para múltiples aplicaciones y que ayuden a los estudiantes a caracterizar mejor sus proyectos.
- Debe continuarse trabajando con sistemas de desarrollo como el “*dsPIC33EP*” y la Familia de productos de “Mikroelektronika”. Las herramientas disponibles, como periféricos adaptables con tecnología “*MiKroBus*”, Módulos de comunicaciones, de visualización, de audio, etc., hacen de los microcontroladores herramientas más versátiles.
- Como se entrega el modelo electrónico del generador de señales a la escuela, se recomienda su utilización y su masificación en asignaturas afines como Introducción a la Ingeniería, Circuitos Eléctricos y Dispositivos electrónicos, etc.
- Los diferentes tipos de software vinculados con el sistema de desarrollo como “*MicroC pro for dsPIC2*”, “*Visual TFT*”, “*mikroProg Suite For PIC*”, “*mikroBootloader USB HID*”, hacen de éstos sistemas de desarrollo un proceso a la vista tedioso, que podría mejorarse si sus desarrolladores pudiesen o quisiesen vincular todo, en una sola plataforma. Mientras tanto la recomendación es que desde la universidad se pueda contar con las licencias para que los estudiantes puedan familiarizarse y continúen trabajando con este tipo de sistemas de desarrollo.

- Se recomienda para futuras aplicaciones tener en cuenta que el *slot* de la memoria MicroSD está ubicado en un sitio de difícil acceso y si se llegase a sellar o vincular el sistema de desarrollo a una caja o compartimiento, sería muy incómoda su utilización; así que, se debería pensar en manejar algunos de sus pines para periféricos como un módulo MicroSD externo a la tarjeta principal del sistema de desarrollo.
- Es posible hacer más pequeño un prototipo del modelo electrónico del generador de señales, trabajando en diseñar una placa de circuito impreso (PCB) con todos sus componentes de montaje superficial (SMC) y utilizando una caja de montaje plástica con características ergonómicas. Esto implicaría un mayor costo para su fabricación, pero lo destacaría frente a dispositivos afines.

## BIBLIOGRAFÍA

ARCILA, José Dariel. “Armónicos en Sistemas Eléctricos”. Firma de consultoría especializada en Ingeniería Eléctrica. Medellín, 2010. 26 p. [en línea]. >. [citado última vez: 21 de julio de 2015]. Disponible en: < <http://www.ieb.com.co/>

CAÑETE CORRIPIO, Francisco Javier. TESIS DOCTORAL. “Caracterización y Modelado de Redes Eléctricas Interiores como Medio de Transmisión de Banda Ancha”. Universidad de Málaga, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación. España, 2004. 245p.

CORZO, Oscar Leonardo y ROJAS MUÑOZ, Luis Felipe. “Implementación de una Toolbox para Señales Digitales utilizando una plataforma de desarrollo con DSP”. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2015. 100 p.

ESSA, Electrificadora de Santander S.A. E.S.P. Laboratorio de medidores [en línea]. [Citado 26 de junio de 2015] Disponible en: <<https://www.essa.com.co/site/clientes/es-es/nuestrosproductosyservicios/laboratoriodemedidores.aspx>>.

ESTÉVEZ RODRÍGUEZ, Fredy Ferney y PEÑA RODRÍGUEZ, Elkin Omar. Diseño e implementación de un sistema generador de formas de ondas de tensión y corriente para sistemas trifásicos. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2009. 133 p. [en línea] [citado última vez: 09 de julio de 2015]. Disponible en:< <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2009/132265.pdf> >

GRUPO DE INVESTIGACIÓN en Planeamiento de Sistemas Eléctricos. “Análisis de Armónicos en Sistemas eléctricos”. UTP, Universidad Tecnológica de Pereira,

Programa de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Tecnológica de Pereira. [en línea]. [citado 04 de agosto de 2015]. Disponible en: <[http://www.utp.edu.co/~planeamiento/prod\\_aca/articulos/Analisis\\_Armonicos.pdf](http://www.utp.edu.co/~planeamiento/prod_aca/articulos/Analisis_Armonicos.pdf)>.

IEEE Report, "The Effects of Power System Harmonics on Power System Equipment and Loads," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-104, NO. 9, pp. 2555-2563, September 1985.

IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. Industry Applications Society/Power Engineering Society, IEEE Std. 519-1992: IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Systems. New York, USA, 1993. 101 p.

JOHNS, David y MARTIN, Ken. Analog Integrated Circuit Desing. Canadá: 2 ed. Jhon Wiley & sons Inc, 1997. p 446 – 459. ISBN 0-471-14448-7.

KAI, Grupo de Gestión Eficiente de Energía y DR. CAMPOS AVELLA, Juan Carlos (Investigador principal). "Calidad de la Energía Eléctrica". UPME, Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia y COLCIENCIAS, Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia Y La Tecnología. Colombia, 2007. 25 p.

MARÍN, Jorge. "Generador de Funciones". PCE Instruments. Instrumento de Medida. España. [en línea] [citado 28 de junio de 2015]. Disponible en: <[https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/generador-de-funciones-kat\\_71552\\_1.htm](https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/generador-de-funciones-kat_71552_1.htm)>.

MARÍN, William F. "Materiales del Curso Circuitos Discretos". Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. [en línea]. [citado última vez: 09 de junio 2015]. Disponible en: <<http://www.ie.itcr.ac.cr/marin/lic/el3212/Libro/Tema10.pdf>>.

MERCHAN VILLALBA, Luis Ramón. “Diseño e Implementación de un Generador de Señales Trifásico”. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2013. 127 p. [en línea] [citado última vez: 09 de julio de 2015]. Disponible en: <<http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2013/149721.pdf>>

MIYARA, Federico. “Conversores D/A y A/D”. Universidad Nacional de Rosario, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Escuela de Ingeniería Electrónica, Departamento de Electrónica, Electrónica III. Argentina: segunda edición. 2004. 43 p. [en línea]. [citado última vez: 31 de julio de 2015]. Disponible en: <<http://www.fceia.unr.edu.ar/enica3/da-ad.pdf>>.

NASSER kehtarnavaz – MANSOUR keramat. DSP System Design Using The TMS320C6000. Prentice Hall, 2001.

OSORIO VILLAMIZAR, Secundino. Medidores Técnica Equipos SA. VERIFYLAB. [en línea]. [citado 10 de junio de 2015] Disponible en: <<http://www.verifylab.com/>>.

PABÓN CASTILLO, Cintya carolina, CRUZ ARGUELLO, Oscar Alejandro. “Historia, Manejo y Aplicaciones de los Controladores Digitales de Señales DSPIC”. [en línea]. [citado última vez: 5 de junio de 2015]. Disponible en: <<http://es.scribd.com/doc/45773237/DSPIC#scribd>>.

PÉREZ DÍAZ, Wilson Andrés, QUIROGA JORDAN, Juan Manuel y ROMERO LEÓN, Oscar Fernando. “Diseño e Implementación de un Prototipo de Contador de Energía Trifásico utilizando un Procesador de Señales Digitales (DSP)”. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2006. 185 p.

POLO JARAMILLO, Kevin Andrés y RODRÍGUEZ LEÓN, Wilson Jair. “Obtención de los Principales Parámetros de las Señales de Tensión y Corriente presentes en un Sistema Monofásico utilizando un Sistema Digital”. Universidad Industrial de

Santander. Bucaramanga, 2015. 79 p. [en línea] [citado última vez: 31 de julio de 2015]. Disponible en:< <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2015/156385.pdf> >

RUBIO, Antonio, ALTET, Josep, ARAGONÉS, Xavier, GONZÁLEZ, José Luis y MATEO, Diego. “Diseño de Circuitos y Sistemas Integrados”. México: Francesc Moll. 1 ed. Alfa omega Grupo Editor, 2005. p 316-332. ISBN 970-15-0776-2.