

N° tesis:

PROYECTO FIN DE CARRERA

Presentado a

**LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

Para obtener el título de

INGENIERO ELECTRÓNICO

por

Lady Jarleth Lozada Prado

***ADQUISICIÓN DE DATOS PARA EL ANÁLISIS DE CALIDAD DE
LA POTENCIA USANDO LABVIEW***

Sustentado el día mes de año frente al jurado:

Composición del jurado

- *Asesor:* Gustavo Ramos, Profesor Asociado, Universidad de Los Andes
- *Jurados :* Mario Alberto Rios

Contenido

1	INTRODUCCIÓN	4
2	OBJETIVOS	5
2.1	Objetivo General	5
2.2	Objetivos Específicos	5
2.3	Alcance y productos finales	5
3	DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA Y JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO	6
4	MARCO TEÓRICO, CONCEPTUAL E HISTÓRICO	6
4.1	Marco Teórico.....	6
4.1.1	CALIDAD DE LA POTENCIA.....	6
4.1.2	TRANSFORMADA DE WAVELET	9
4.1.3	LABVIEW	10
4.2	Marco Conceptual.....	11
4.3	Marco Histórico	12
5	DEFINICIÓN Y ESPECIFICACION DEL TRABAJO	12
5.1	Definición	12
5.2	Especificaciones.....	13
6	TRABAJO REALIZADO	13
6.1	Descripción del Resultado Final	16
7	VALIDACIÓN DEL TRABAJO	25
7.1	Metodología de prueba	25
7.2	Validación de los resultados del trabajo	25
8	DISCUSIÓN	26
9	CONCLUSIONES.....	27
10	AGRADECIMIENTOS.....	28
11	REFERENCIAS	28

Lista de figuras

Figura 1. Ejemplo de Transiente Oscilatorio de baja frecuencia.....	7
Figura 2. Ejemplo de un Sag	7
Figura 3. Ejemplo de Swell	8
Figura 4. Ejemplo de una armónico para la onda de corriente	8
Figura 5. Bloques de LabVIEW para crear la señal Seno	16
Figura 6. Señal seno generada	16
Figura 7. Señal seno con un fenómeno de Sag con magnitud de 0.5 pu	16
Figura 8. Señal seno con un fenómeno Swell con magnitud de 0.25 pu	17
Figura 9. Señal seno con un fenómeno de Armónico 3.....	17
Figura 10. Señal seno con un fenómeno de Armónicos 3,5 y 7	17
Figura 11. Diagrama usado en LabVIEW para hallar los coeficientes y energía de una señal.	18
Figura 12. Contenido en el bloque 2 de la Figura 11	18
Figura 13. Coeficientes detallados y aproximados de Wavelet para la simulación en LabVIEW para una señal seno de 120 V de amplitud con 60 Hz de frecuencia.....	19
Figura 14. Coeficientes detallados y aproximados de Wavelet para la simulación en LabVIEW para una señal seno de fenómeno sag	19
Figura 15. Coeficientes detallados y aproximados de Wavelet para la simulación en LabVIEW para una señal seno de fenómeno swell	19
Figura 16. Coeficientes detallados y aproximados de Wavelet para la simulación en LabVIEW para una señal seno de fenómeno armónicos 3,5 y 7	20
Figura 17. Resultados de la simulación en LabVIEW para una señal seno de 120 V de amplitud con 60 Hz de frecuencia y un fenómeno sag.....	20
Figura 18. Resultados de la simulación en LabVIEW para una señal seno de 120 V de amplitud con 60 Hz de frecuencia y un fenómeno swell.....	21
Figura 19. Resultados de la simulación en LabVIEW para una señal seno de 120 V de amplitud con 60 Hz de frecuencia y armónicos 3,5, 7 y 11 y diferentes combinaciones de estos.	22
Figura 20. Modulo de Comparación para el pico o el valle	23
Figura 21. Diagrama de Bloques completo en LabVIEW	24
Figura 22. Interfaz grafica que ve el usuario.	24

Lista de tablas

Tabla 1. Categorías y Características Típicas de los Fenómenos Electromagnéticos de Sistemas de Potencia	9
Tabla 2. Ondas generadas con armónicos	22
Tabla 3. Resumen de resultados	26

1 INTRODUCCIÓN

El sector industrial ha crecido en los últimos años gracias a los avances tecnológicos que en parte son impulsados por fenómenos como la globalización, sin embargo el desarrollo tecnológico no es sostenible sin la utilización de la energía. Los países más desarrollados también son los que hacen mayor uso y más eficiente de la energía eléctrica. Para que los avances de tecnología funcionen correctamente la potencia eléctrica debe ser de alta calidad, confiabilidad y actualmente que contribuya con el medio ambiente. [1]

Esto ha hecho que los países y empresas se enfoquen en suministrar un mejor servicio de energía eléctrica, la industria no es ajena a este proceso, en especial cuando la ingeniería electrónica, fuente de tecnología, usa cargas que no tienen un comportamiento lineal, generando fenómenos en las ondas de tensión y de corriente y a la vez poco resistivas por lo que introducen distorsiones a la red y generan un deterioro en la calidad de la potencia eléctrica. [2] El esfuerzo en muchas de estas industrias se centra en mejorar la calidad de la potencia y tomar decisiones a tiempo para evitar daños mayores. Los costos en lo que incurren las industria por problemas de calidad de la potencia son variados pero además son cada vez más frecuentes, por lo que se hace necesario buscar alternativas y soluciones que permitan reducir costos ofreciendo el mejor servicio. [3]

Los profesionales en ingeniería electrónica debemos contribuir a que la calidad de la potencia eléctrica se mejore, para esto se debe llevar a cabo un proceso que permita analizar los datos de la potencia eléctrica con rapidez, confiabilidad y eficiente. Este proceso comienza con la adquisición de los datos, se requiere una alta capacidad para tomar datos que sean exactos y veraces y que a su vez reduzcan los costos, luego se pasa a un paso de tratamiento de las señales en donde se toman los datos anteriores y se hace uso únicamente de los datos que son útiles para el análisis. Finalmente se hace un análisis de calidad de la potencia usando diferentes herramientas, como lo es la transformada de Wavelet (usada en este proyecto), la transformada de Fourier o la de Clarke.

Es necesario el desarrollo de estos proyectos porque permiten adaptarse a una necesidad mundial por mejorar el suministro y uso de la energía eléctrica sin interferir en los avances tecnológicos que se han desarrollado hasta el momento, como por ejemplo los dispositivos que usan la electrónica de potencia y contribuyen a la eficiencia de los procesos industriales.

El mundo ve como una necesidad la caracterización sencilla, rápida y eficiente de las variaciones de voltaje y corriente que pueden afectar a los equipos sensibles de los

clientes. [1] Por este motivo se quiere según las necesidades actuales implementar un programa que sea capaz de desarrollar una técnica adecuada, fácil de usar, que sea rápida para que se detecten a tiempo los fenómenos y luego se puedan tomar decisiones correctas y además eficientes.

Se hace uso de la herramienta LabVIEW que posee la universidad para la adquisición y tratamiento de la señal que permite la detección y clasificación de fenómenos de la calidad de la potencia, usando herramientas como la transformada de Wavelet. Además es una herramienta que es de fácil uso y permite un procedimiento óptimo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Implementar un programa en LabVIEW para el análisis de la calidad de la potencia en los sistemas eléctricos, considerando que la entrada es una señal de tensión, que sea capaz de tomar muestras, adquirir las señales correctamente y hacerle el tratamiento adecuado para identificar si se presentan fenómenos de calidad de la potencia. Con base en la transformada de Wavelet, y todo el procedimiento para tratamiento de señales, se realizara un programa que pueda identificar claramente que tipo de fenómeno de la calidad de la potencia se está presentando.

2.2 Objetivos Específicos

- Plantear y ejecutar modelos para tratamiento y entrenamiento de la señal
- Usar la herramienta LabVIEW para la adquisición y tratamiento de datos de señales eléctricas
- Diseñar todo el programa que permita con una señal de entrada hacer un análisis de calidad de la potencia a esta señal.

2.3 Alcance y productos finales

Se deseaba desarrollar un programa en el software LabVIEW que implemente la metodología necesaria para hacer el análisis sobre la calidad de potencia de una señal de entrada, el programa además debía disponer de un modulo de visualización fácil para el usuario que clasificara el fenómeno de la calidad de la potencia para que se hiciera más sencilla la toma de decisiones.

Como producto final se consiguió un programa sencillo, que tomando una señal de entrada le hace un procedimiento con las herramientas de LabVIEW de transformada de Wavelet y otras para la clasificación de los fenómenos asociados a calidad de la

potencia, para mostrar como resultado final el tipo de fenómeno de calidad de la potencia que contiene la señal.

3 DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA Y JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

El proyecto está dedicado a la solución de un problema que actualmente tiene una gran importancia en el mundo y en el país, este es la calidad de la potencia que se suministra a los usuarios. Esto se ha dado como una respuesta a los avances tecnológicos que se han logrado y que ha conseguido que se requiera una mejor calidad en el servicio. Con este proyecto se quiere dar una solución a la detección y clasificación rápida de los fenómenos de la calidad para que se puedan tomar decisiones a tiempo.

La solución está diseñada para las industrias en las que estos fenómenos pueden causar grandes impactos económicos, las que requieren que las decisiones se tomen rápido para evitar daños mayores o costos más elevados. Se cree que el proyecto es importante porque permite una solución sencilla, rápida y eficiente a este problema de detección y clasificación. Pero también puede ser un proyecto interesante para trabajar en la universidad dentro de las clases del departamento porque es sencillo de entender y se cuenta con las licencias de LabVIEW, lo que permitiría obtener un aprendizaje mayor.

4 MARCO TEÓRICO, CONCEPTUAL E HISTÓRICO

4.1 Marco Teórico

El marco teórico que se presenta para el proyecto está dividido en tres partes que son: la primera hace referencia a la calidad de la potencia y los fenómenos que se presenta y en la segunda parte es sobre la transformada de Wavelet y finalmente se menciona la herramienta LabVIEW que se usa para el desarrollo del proyecto.

4.1.1 CALIDAD DE LA POTENCIA

La calidad de la potencia es un término usado para describir la calidad de las formas de onda de la tensión y de la corriente.[1] Según el *“Electric Power Research Institute”* (EPRI) la Calidad de la Potencia Eléctrica se define como: *“Cualquier problema de potencia manifestado en la desviación de la tensión, de la corriente o de la frecuencia que ocasione falla o mala operación del equipo de un usuario”*. Según [4], internacionalmente el concepto de calidad de la potencia se refiere fundamentalmente a la calidad del voltaje, pero en el país se incluye en el concepto la continuidad y confiabilidad der servicio de suministro. [4]

Para este caso se analizarán alguno de los fenómenos de la calidad de la potencia que se incluyen en la norma IEEE 1159 y que se pueden clasificar como se muestra en la Tabla 1. De estos se tratan en este proyecto solo los sag, swell y armónicos. A continuación se describen algunos de los fenómenos de calidad de la potencia según la IEEE 1159:

Transitorios: Es un cambio repentino entre estados estables, con una duración despreciable con respecto al tiempo de medición, puede ser impulsivo si el cambio es unidireccional en la polaridad de la frecuencia de su condición nominal en la tensión, en la corriente o en ambos o puede ser oscilatorio si el cambio es en ambos valores de polaridad (negativo y positivo) en la frecuencia de estado estacionario en la tensión, la corriente o ambos. En la Figura 1 se muestra un ejemplo de transitorio.

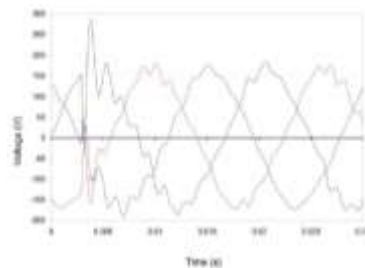


Figura 1. Ejemplo de Transiente Oscilatorio de baja frecuencia¹

Sag: es la caída de tensión en el valor RMS. Cae generalmente entre valores de 0.1 pu y 0.9 pu con una duración de 0.5 ciclos a 1 minuto. En la Figura 2 se muestra un ejemplo de Sag

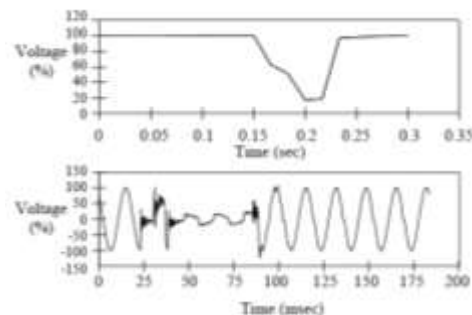
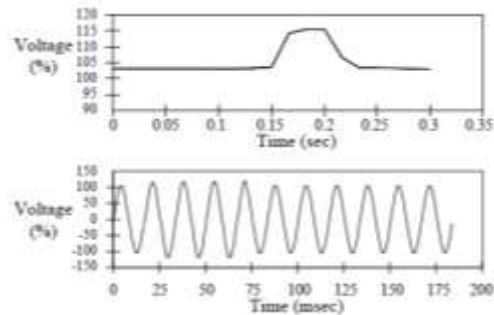


Figura 2. Ejemplo de un Sag²

Swell: Es un incremento en el valor rms de la tensión. Generalmente puede estar entre un valor de 1.1 pu y 1.9 pu, la duración está entre 0.5 ciclos y 1 minuto. En la Figura 3 se muestra un ejemplo de swell

¹ Imagen tomada de la Norma IEEE 1159, figura 3.

² Imagen tomada de la Norma IEEE 1159, figura 6.

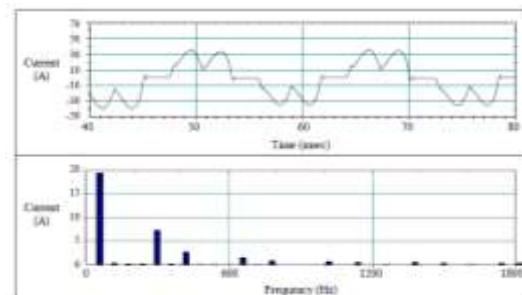
Figura 3. Ejemplo de Swell³

Sobretensiones: es un aumento en el valor RMS de la tensión AC mayor que 1.1 pu y por una duración mayor a un minuto

Subtensiones: es un decremento en el valor RMS de la tensión AC menor a 0.9 pu y por una duración mayor a un minuto.

Interrupciones sostenidas: es el decremento menor al 10% del valor nominal en las fuentes de alimentación de tensión para un tiempo mayor a un minuto.

Armónicos: los armónicos son tensiones o corrientes sinusoidales con frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental para la que está diseñado el sistema de alimentación. Cuando se combinan las ondas de armónicos con las ondas de frecuencia fundamental se produce una distorsión en la forma de la onda.

Figura 4. Ejemplo de una armónico para la onda de corriente⁴

Variaciones de frecuencia: Las variaciones de Frecuencia se definen como la desviación de la frecuencia fundamental de su valor nominal específico. La frecuencia está relacionada en cualquier momento con el equilibrio entre la generación y la carga disponible. Cuando existe un cambio en el equilibrio dinámico entre generación y demanda de potencia, se presenta un cambio en la frecuencia. Según el estándar IEEE 1159, la duración de este fenómeno es menor a 10 s y la desviación están $\pm 0.10\text{Hz}$.

³ Imagen tomada de Norma IEEE 1159, Figura 8.

⁴ Imagen tomada de Norma IEEE 1159, Figura 10.

Tabla 1. Categorías y Características Típicas de los Fenómenos Electromagnéticos de Sistemas de Potencia⁵

Categorías	Contenido espectral típico	Duración típica	Magnitud de tensión típica
1.0 Transitorios 1.1 Impulsivos 1.1.1 Nanosegundos 1.1.2 Microsegundos 1.1.3 Milisegundos 1.2 Oscilatorios 1.2.1 Baja frecuencia 1.2.2 Frecuencia media 1.2.3 Altas frecuencias	5 ns de elevación 1 μs de elevación 0.1 ms de elevación < 5 kHz 5-500 kHz 0.5 – 5 MHz	< 50 ns 50 ns - 1 ms > 1 ms 0.3 - 50 ms 20 μs 5 μs	0-4 pu 0-8 pu 0-4 pu
2.0 Variaciones de en el valor RMS de corta duración 2.1 Instantáneas 2.1.1 Sag 2.1.2 Swell 2.2 Momentáneas 2.2.1 Interrupción 2.2.2 Sag 2.2.3 Swell 2.3 Temporales 2.3.1 Interrupción 2.3.2 Sag 2.3.3 Swell		0.5 – 30 ciclos 0.5 – 30 ciclos 0.5 ciclos – 3 s 30 ciclos – 3 s 30 ciclos – 3 s > 3 s - 1 min > 3 s - 1 min > 3 s - 1 min	0.1 – 0.9 pu 1.1 – 1.8 pu < 0.1 pu 0.1 – 0.9 pu 1.1 – 1.4 pu < 0.1 pu 0.1 – 0.9 pu 1.1 – 1.2 pu
3.0 Variaciones rms de larga duración 3.1 interrupciones sostenidas 3.2 sub-Tensiones 3.3 sobre-Tensiones 3.4 sobrecarga de corriente		> 1 min > 1 min > 1 min > 1 min	0.0 pu 0.8 – 0.9 pu 1.1 – 1.2 pu
4.0 Desbalance 4.1 Tensión 4.2 Corriente		Estado estacionario Estado estacionario	0.5 – 2% 1.0 – 30%
5.0 Distorsión de forma de Onda 5.1 Offset DC 5.2 Armónicos 5.3 Inter-armónicos 5.4 Notching 5.5 Ruido	0 – 9 kHz 0 – 9 kHz Banda ancha	Estado estacionario Estado estacionario Estado estacionario Estado estacionario Estado estacionario	0 – 0.1% 0 – 20% 0 – 2% 0 – 1%
6.0 Fluctuaciones de tensión	< 25 Hz	Intermitente	0.1 – 7%
7.0 Variaciones de frecuencia- potencia		< 10 s	± 0.10 Hz

4.1.2 TRANSFORMADA DE WAVELET

La transformada de Wavelet, toma ventanas modulares que se pueden ajustar a la frecuencia de oscilación de la señal, lo que permite obtener una familia completa de nuevas señales que se pueden modular mediante translaciones de tiempo. La función de entrada debe cumplir con ciertas condiciones para poder ser analizada, a la función de entrada normalmente se le llama Wavelet madre y a las que genera se le llaman wavelets. La función madre debe estar localizada en el tiempo y que la

⁵ Tabla tomada de la Norma IEEE 1159, Ver Tabla 2

transformada al dominio de la frecuencia se comporte como un filtro continuo pasabanda.

La transformada discreta permite que con base en unos parámetros que se pueden definir, la función siempre cumpla con las condiciones que se mencionaron en el párrafo anterior. Con esto podemos hallar algunos parámetros que se acomodan a nuestras necesidades, a continuación se muestra como es la ecuación que describe la transformada Wavelet discreta:

$$DW_{\psi} s(j, k) = \langle s, \psi_{jk} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi_{jk}(t) dt$$

En síntesis:

$$s(t) = \sum_j \sum_k C_{jk} \psi_{jk}(t) \approx \sum_j \sum_k \langle s, \psi_{jk} \rangle \psi_{jk}(t)$$

La transformada de Wavelet descompone la señal en dos coeficientes, los coeficientes detallados y los aproximados, esto se puede ver las siguientes ecuaciones:

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a(k) * \varphi_k(t) + \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_j(k) * \psi_{j,k}(t)$$

Donde $x(t)$: es la señal en el tiempo, en este caso es la señal de tensión a analizar
 $a(k)$: son los coeficientes aproximados de la señal
 $d_j(k)$: son los coeficientes detallados de la señal para el nivel j de
 $\varphi_k(t)$: Wavelet madre
 $\psi_{j,k}(t)$: Wavelet en el nivel j

En este proyecto se usara la transformada de Wavelet Discreta de Daubechies que fue formulada en 1988 por el matematico belga Ingrid Daubechies y se basa en el uso de relaciones de recurrencia de la señales para generar muestras cada vez mas finas, cada resolución es el doble de la escala anterior.

La transformada de Wavelet en muchas ocasiones mejora la transformada de Fourier, sin embargo no se puede considerar que una reemplaza a la otra y para ciertos tratamientos va a ser más eficiente usar una o las otra.

4.1.3 LABVIEW

Es un entorno de programación gráfica usado para desarrollar mediciones, pruebas y sistemas de control con iconos gráficos y cables de conexión que se asemeja a formar un diagrama de flujo. Además permite la integración con dispositivos

hardware para tener un completo y sofisticado programa para generar importantes aplicaciones. También permite el uso de toolbox integradas para el análisis avanzado y la visualización de datos.

En LabVIEW se puede desde adquirir las señales a analizar por medio de los Data Acquisition Devices (DAQ), que es una interfaz entre el hardware para adquirir la señal y el computador en el que se realiza el procesamiento de señales. Luego se hace el tratamiento necesario dentro del panel de diagrama de bloques que permite conectar los bloques necesarios para el uso y finalmente muestra los resultados en el panel frontal.

LabVIEW es una herramienta disponible en el laboratorio de la universidad que permite analizar los datos y hacerles un tratamiento adecuado para conseguir los resultados esperados sin necesidad de cable o de implementar un hardware que puede ser muy costoso.

4.2 Marco Conceptual

En el desarrollo de este proyecto se usa principalmente la Norma IEEE 1159 (Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality) que permite observar los fenómenos asociados a la calidad de la potencia y su calcificación, además se usa de esta norma las definiciones y graficas mencionadas en el numeral anterior.

Uno de los conceptos que son importante es el **Valor RMS** de una señal (**rms** son las siglas de las palabras en inglés **Root Mean Square**, o en español Raíz Media Cuadrática) o también conocido como el valor eficaz. Este valor hace referencia a la capacidad de suministro de energía de una onda e indica la potencia que entregaría una onda de corriente alterna si se sustituyera por una onda de Corriente Directa. Se calcula como:

$$Valor_{RMS} = \frac{\sqrt{2}}{2} Valor_{PICO}$$

El valor por unidad de una tensión es el cociente entre el valor real de la tensión y el valor base del sistema. Es decir que se desea que el valor por unidad sea 1 para las mediciones de la tensión o de la corriente para que el valor real sea igual al esperado.

4.3 Marco Histórico

Se desea realizar un proyecto que sea capaz de identificar los fenómenos de calidad de la potencia usando la transformada de Wavelet, para esto se usó el trabajo de Cabrera y Taboada [5], realizado como proyecto de grado en la Universidad de Los Andes, en el que realizan un procedimiento similar, pero usan MatLab como herramienta computacional. Este proyecto se puede encontrar los pasos que se desarrollan y los resultados que se obtienen. De hecho este documento junto con el de Resende, Chaves y Penna [6] permitieron realizar paso a paso el proyecto que aquí se muestra.

También se usan otros documentos disponibles en la base de datos IEEEExplore, como:

- En el documento de Liyan Liu y Zhezhao Zeng [7], se puede encontrar cómo funciona el paquete de transformada de Wavelet para detectar en una señal perturbaciones, este documento muestra el tratamiento matemático que se hace y luego muestra algunas simulaciones que permite tener una idea de cómo deben ser los resultados. Este documento permite.
- En el documento de Dash, Panigrahi, Sahoo y Panda [8], se puede ver también el tratamiento que se hace a un sistema para identificar con la transformada de Wavelet las perturbaciones que sufren las señales de tensión.
- Finalmente se puede tomar el documento de Santoso, Powers y Mack Grady [9], en el que se puede encontrar el análisis que se hace cuando se usa la transformada de Wavelet para la detección de los fenómenos de calidad de la potencia.

Existen más documentos, ya que el tema ha sido muy investigado por la relevancia que ocupa en el mundo actualmente la calidad de la potencia y además se han buscado soluciones que sean económicas, sencillas, rápidas y sin gran costo computacional.

5 DEFINICION Y ESPECIFICACION DEL TRABAJO

5.1 Definición

El problema que se tiene en el mundo de la energía eléctrica hoy en día es la calidad del servicio que se presta, no es solo necesario que se tenga disponibilidad del servicio sino que este sea adecuado para las necesidades de los equipos y que funcione bajo los parámetros para los cuales son diseñados. Los fenómenos que pueden afectar la calidad de la potencia son muchos sin embargo este trabajo se concentrará en tres, que son los sags, swells y armónicos.

Además se requiere que el programa dé respuesta rápidamente porque en caso que suceda un evento que afecte la calidad, el tiempo es importante para tomar decisiones adecuadas y evitar peores daños.

5.2 Especificaciones

El programa debe ser capaz de tomar una señal AC, hacer el tratamiento necesario para la detección y clasificación de los fenómenos de Sag's, Swell's y armónicos a la señal de entrada y luego debe mostrar claramente que tipo de fenómeno presenta la onda. Esto es importante porque el correcto desarrollo de estas funciones conduce al cumplimiento del objetivo general de este proyecto.

Una de las restricciones que se tienen para el desarrollo de este proyecto es que el programa sea eficiente, rápido, certero y adecuado. Además se requiere usar del software LabVIEW y que los resultados obtenidos permitan la detección y clasificación de los fenómenos de calidad de la potencia.

Las restricciones que se ponen son totalmente compatibles con las funciones del proyecto, de hecho estas solo llevan a poner mayor atención sobre lo que se desea lograr como resultado final y los que se espera que contenga este resultado.

Es importante cumplir con la restricción presentada anteriormente porque de lo contrario no se obtendrá ningún resultado. Adicionalmente para que el programa cumpla con las funciones requeridas se hace necesaria la investigación de las probabilidades.

6 TRABAJO REALIZADO





Se quiere manejar las principales técnicas de procesamiento de señales que permiten hacer un programa eficiente, que sea capaz de adquirir, detectar y clasificar los fenómenos de la Calidad de la potencia por lo que en LabVIEW, existen algunos bloques que no pueden servir para hacer mediciones, estos bloques son:

- Bloque de filtros de Wavelet: este bloques permite tomar una señal y hacer el tratamiento de Wavelet que consiste en pasar la señal por una serie de filtros que permiten obtener la Wavelet madre. Este bloque se llama "WA Discrete Wavelet" y se puede encontrar en la ruta **Functions Palette >> Signal Processing >>Wavelet Analysis >> Discrete Wavelet >> WA Discrete Wavelet Transform.vi**, el icono que se encuentra es el siguiente:

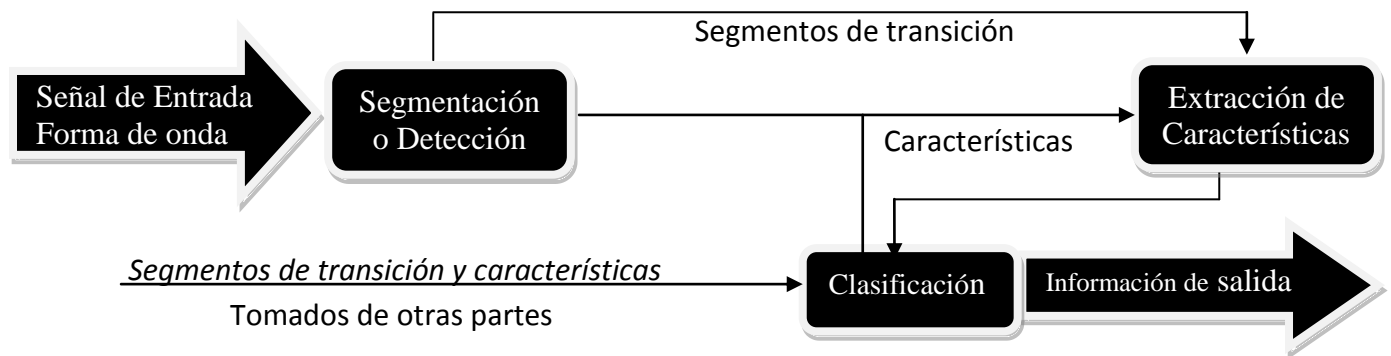


- Bloque para calcular los coeficientes de Wavelet: Este bloque nos permite obtener el valor los coeficientes aproximados y detallados para la señal que ha salido del bloque anterior.



- Bloque de valor absoluto : este bloque calcula el valor absoluto de la señal.
- Bloque para sacar el cuadro de un numero o una señal : este bloque permite obtener el valor al cuadro de un numero o señal
- Bloque de suma de un arreglo de números : permite obtener un número a partir de la suma de todos los componentes de la señal.
- Bloque que suma : permite sumar varias señales
- Además se usan bloques de comparación como mayor o menor

A continuación se describe el diagrama de bloques que compone el proyecto:



Los pasos que se siguen son:

- Paso 1:** Evaluación de la señal de estudio con la transformada discreta de Wavelet, se somete a una serie de filtros que permiten obtener las componentes de la señal de forma discreta.
- Paso 2:** Evaluación de los coeficientes wavelet de la señal en estudio. [6][10]
- Paso 3:** Evaluación de la raíz cuadrada de los coeficientes wavelet que se encuentran en el paso 2 [6][10]

Paso 4: Cálculo de la energía de la señal distorsionada, en cada nivel de coeficiente Wavelet. Con el teorema de Parseval que nos permite obtener la energía a partir de la siguiente ecuación: [6][10]

$$\sum_{n=1}^N |f(n)|^2 = \sum_{n=1}^N |a_j(n)|^2 + \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N |d_j(n)|^2$$

Donde $\sum_{n=1}^N |f(n)|^2$: Energía total de la señal $f(n)$

$\sum_{n=1}^N |a_j(n)|^2$: Energía concentrada en el nivel "j" de la versión aproximada de la señal.

$\sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N |d_j(n)|^2$: Energía total concentrada en la versión detallada para todos los niveles desde 1 hasta "j"

Paso 5: En esta etapa los pasos 1, 2 y 3 se repiten para la correspondiente versión sinusoidal pura "de la señal en estudio. [6][10]

Paso 6: La energía total de la señal distorsionada de la señal en el estudio (que se encuentra en el paso 4) se compara con el correspondiente de la versión de la señal pura (evaluada en el paso 4). El resultado de esta comparación es una desviación que se puede evaluar con la siguiente ecuación: [6][10]

$$dp(j) = \left[\frac{en_dist(j) - en_ref(j)}{en_ref(7)} \right]$$

En donde $dp(j)$: es la desviación entre la distribución de la energía de la señal de estudio y su señal correspondiente sinusoidal en el nivel "j".

$en_dist(j)$: Distribución de energía concentrada en cada nivel de transformada Wavelet de la señal de estudio.

$en_ref(j)$: Distribución de energía concentrada en cada nivel de transformada Wavelet de la señal sinusoidal.

$en_ref(7)$: Distribución de energía concentrada en el nivel 7 de transformada Wavelet de la señal sinusoidal.

Finalmente como algunos patrones que se mostraran en el capítulo siguiente son iguales y solo varían en su magnitud, no se utilizara lógica difusa ni redes neuronales para tomar los patrones y compararlos sino que se decidirán a que fenómeno de calidad de la potencia pertenece los patrones por el rango en el que están las magnitudes de las desviaciones en sus energías.

6.1 Descripción del Resultado Final

A continuación se muestran las señales generadas en LabVIEW para analizar posteriormente. Aunque estos no son todos los casos que se analizan si permiten ver las características de cada fenómeno.

La Figura 6 muestra una señal seno, de 60Hz y 120 V rms de amplitud, creada como se muestra en la Figura 5.



Figura 5. Bloques de LabVIEW para crear la señal Seno

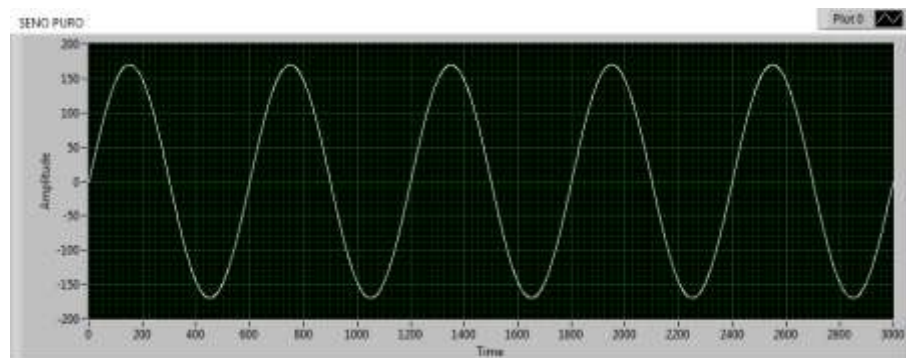


Figura 6. Señal seno generada

La Figura 7 presenta un sag de magnitud 0.5 pu. Adicionalmente se generaron mas muestras de sag como se verá más adelante en la generación de los patrones.

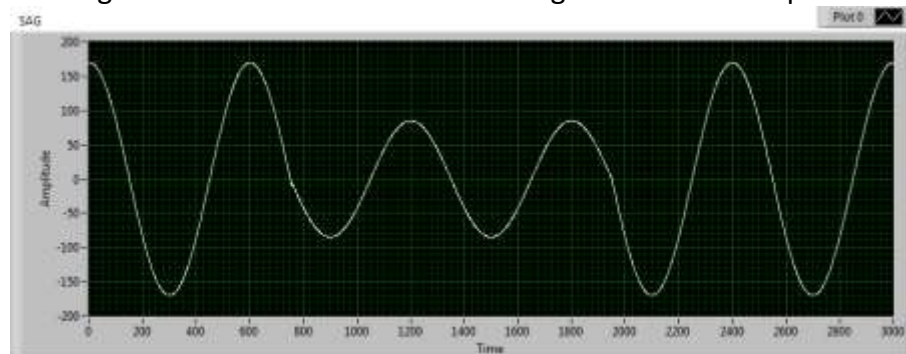


Figura 7. Señal seno con un fenómeno de Sag con magnitud de 0.5 pu

La Figura 8 permite ver una señal seno con un fenómeno de Swell de magnitud 0.25 pu. Más adelante se generan este mismo fenómeno con otras magnitudes

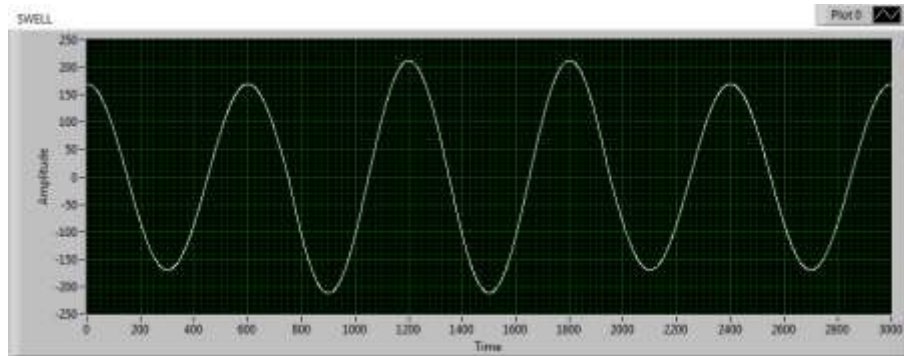


Figura 8. Señal seno con un fenómeno Swell con magnitud de 0.25 pu

Las figuras siguientes muestran una señal seno que presentan fenómeno de armónicos, la Figura 9 muestra un armónico 3, y la Figura 10 los armónicos 5 y 7.

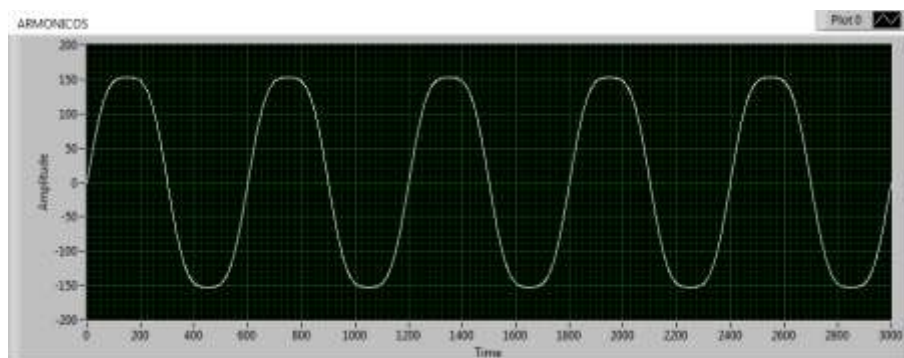


Figura 9. Señal seno con un fenómeno de Armónico 3

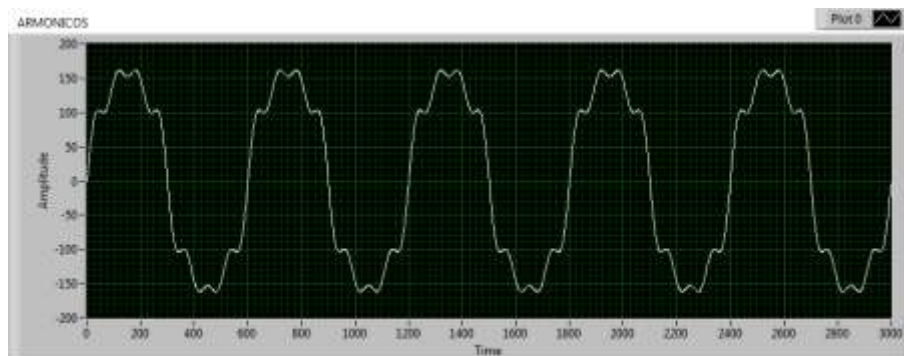


Figura 10. Señal seno con un fenómeno de Armónicos 3,5 y 7

Luego se calculan los coeficientes para la señal de entrada, para esto se utiliza el siguiente diagrama en LabVIEW, que además también calcula la energía de la señal:

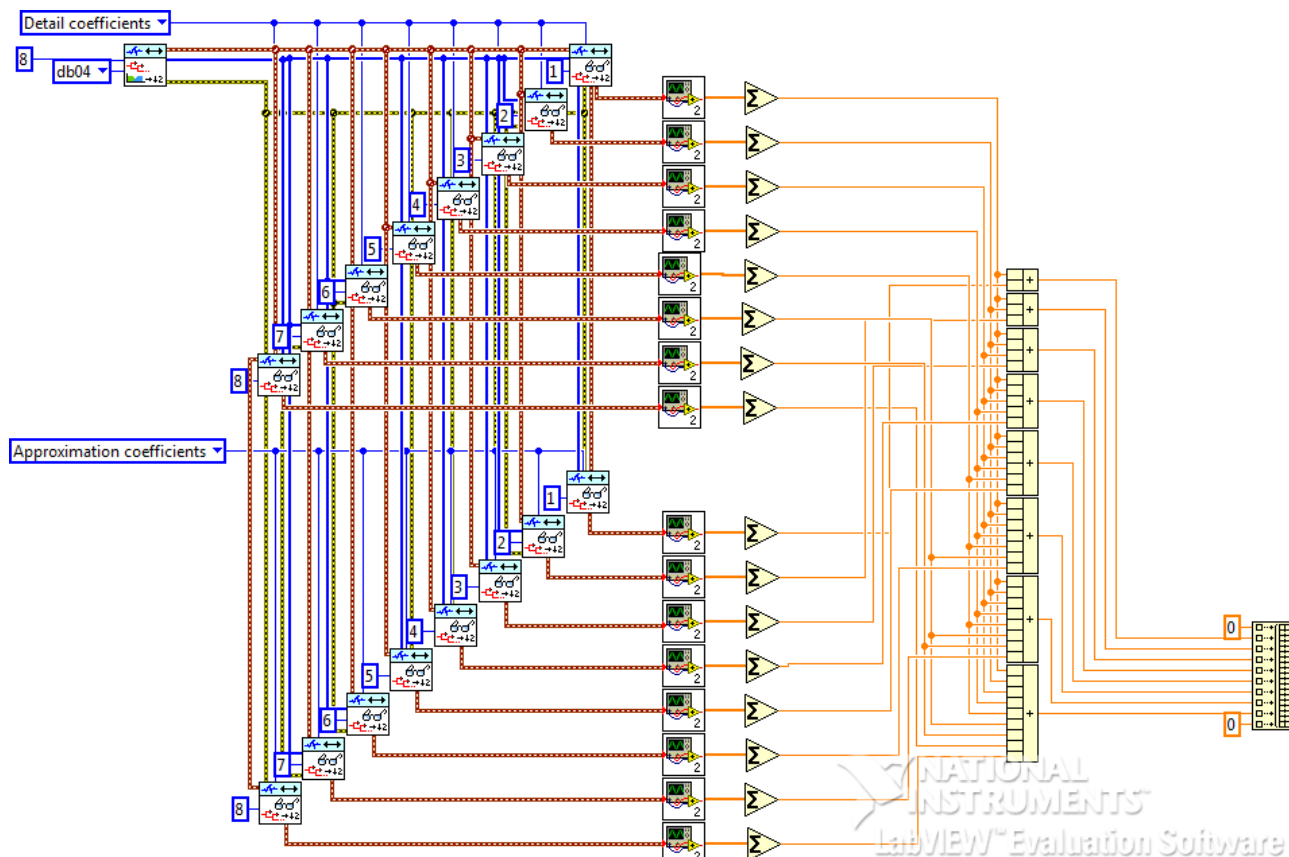


Figura 11. Diagrama usado en LabVIEW para hallar los coeficientes y energía de una señal.

El modulo que se muestra como 2 en la figura anterior contiene los siguientes iconos, que permiten sacar el valor absoluto de la señal y el cuadrado del valor.

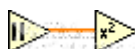


Figura 12. Contenido en el bloque 2 de la Figura 11

Las siguientes figuras muestran los coeficientes tanto detallados como aproximados para las señales a analizar.

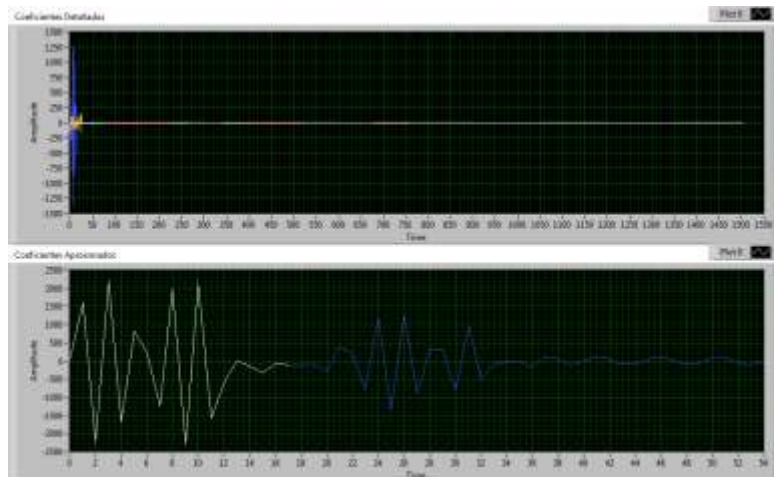


Figura 13. Coeficientes detallados y aproximados de Wavelet para la simulación en LabVIEW para una señal seno de 120 V de amplitud con 60 Hz de frecuencia



Figura 14. Coeficientes detallados y aproximados de Wavelet para la simulación en LabVIEW para una señal seno de fenómeno sag



Figura 15. Coeficientes detallados y aproximados de Wavelet para la simulación en LabVIEW para una señal seno de fenómeno swell

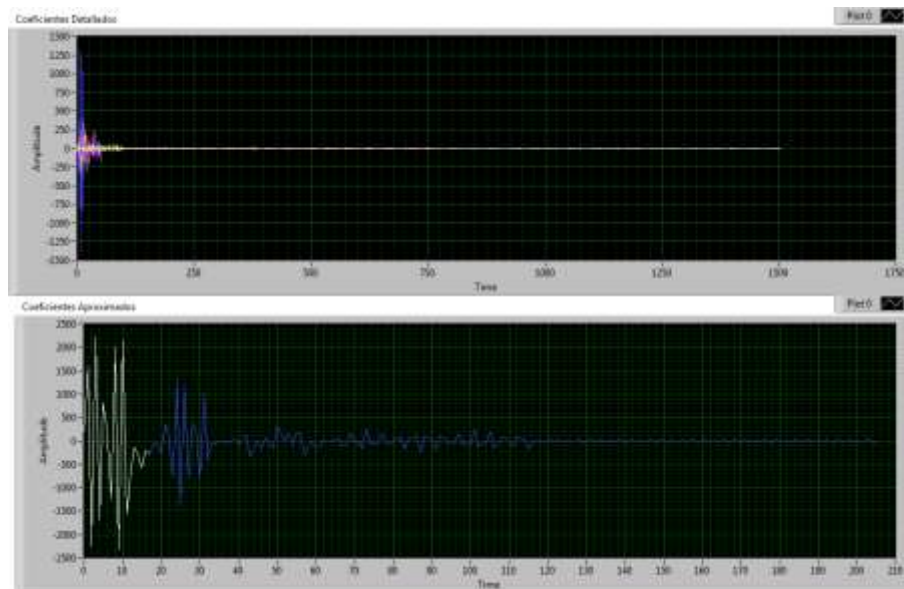


Figura 16. Coeficientes detallados y aproximados de Wavelet para la simulación en LabVIEW para una señal seno de fenómeno armónicos 3,5 y 7

A continuación se muestran los patrones de desviación de la energía para las señales que contienen fenómeno con respecto a la señal de seno puro. La Figura 17 permite ver las desviaciones con de la energía para señales que contienen sag. Se calcula esta desviación para 17 señales que poseen un sag, desde 0.10 pu hasta en 0.90 pu con pasos de 0.05 pu.

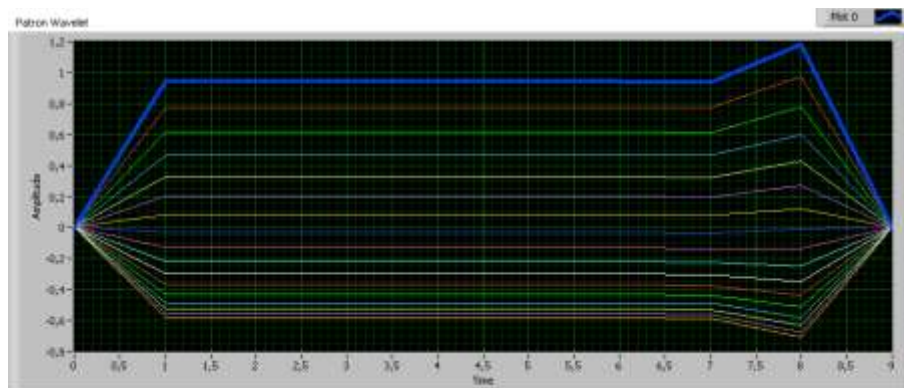


Figura 17. Resultados de la simulación en LabVIEW para una señal seno de 120 V de amplitud con 60 Hz de frecuencia y un fenómeno sag

Como se observa en la Figura 17 no todas las señales tienen el mismo patrón, el pico de la señal es menor a 1.2 para valores positivos y el valle es mayor a -0.8 este valor depende de la magnitud del sag y también de la duración. Si se compara este resultado con los obtenidos en [6] y [10], se encuentran grandes diferencias, por ejemplo para [6] el patrón que se obtiene es similar al que se presenta para las

señales que están por debajo de cero, es decir que la figura tiene un valle en el nivel 7, sin embargo en el documento no se menciona las pruebas que hicieron y ni las características de la señal que se uso, por lo que la diferencia puede deberse a las condiciones de la señal que se probó, como la duración y la magnitud. Si se compara con [10], los patrones son totalmente diferentes, esto no solo puede deberse a las condiciones de las señales que se usan sino también a los selectividad de los filtros usados para seleccionar la información relevante, para este caso se usan filtro muy selectivos debido a que se considera que la información en la señal de entrada puede variar muy poco y es necesario que se identifiquen estas variaciones, además en [10] nunca se menciona que tipo de transformada de Wavelet se uso o el nivel que para ellos tienen mayor relevancia, por lo que las diferencias se pueden deber a estas dos consideraciones.

Para la Figura 18, se puede comprobar que el patrón del fenómeno swell es el mismo para todos los casos que se analizan y que la magnitud del pico va desde 1.9 hasta 7.8 Este patrón es como se esperaba en [6], e incluso el rango esta dentro del que se muestra en el documento de Resende, sin embargo difiere mucho del que se presenta en [10], pero como se menciono anteriormente no se conocen datos sobre el procedimiento que se realizo para este proyecto por lo que las diferencias se puede deber al nivel de energía usado como referencia. Para este caso se usa el nivel 7, pues como se puede ver en [11] este nivel presenta gran información para los fenómenos analizados y para la señal seno sin ninguna perturbación.

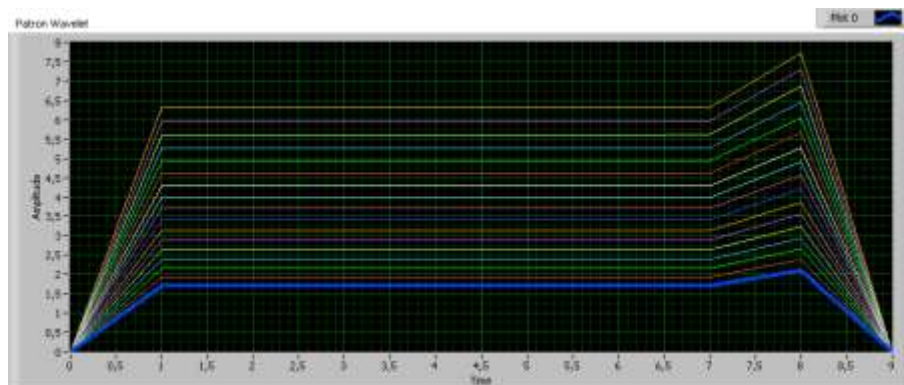


Figura 18. Resultados de la simulación en LabVIEW para una señal seno de 120 V de amplitud con 60 Hz de frecuencia y un fenómeno swell

Finalmente en la Figura 19 se muestra el patrón que sigue el programa para el fenómeno de armónicos, como se puede observar en la figura la magnitud es pequeña por lo que se le da un rango para el pico entre 0.01 y 0.3 para detectar el tipo de fenómeno que es. Este patrón es muy diferente al que se esperaba en los dos documentos ([6] y [10]) en lo que se muestran los patrones. La diferencia puede deberse al tipo de filtro que se hace, pues para las magnitudes como se mostro anteriormente la diferencia de energía se centra en el nivel 7, pero para el cambio en

frecuencia se tiene información relevante en los niveles 4, 5, 6 y 7 por lo que se puede atribuir básicamente a la selectividad de los filtros usados.

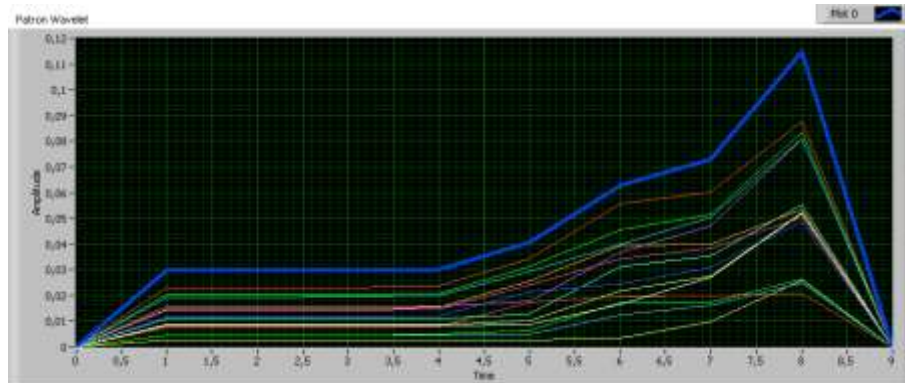


Figura 19. Resultados de la simulación en LabVIEW para una señal seno de 120 V de amplitud con 60 Hz de frecuencia y armónicos 3, 5, 7 y 11 y diferentes combinaciones de estos.

Para el patrón de armónicos se generan las señales que contienen los fenómenos de armónicos siguientes:

Tabla 2. Ondas generadas con armónicos

Señal	Armónico contenido
1	3
2	5
3	7
4	11
5	3, 5
6	3, 7
7	3, 11
8	5, 7
9	5, 11
10	7, 11
11	3, 5, 7
12	3, 5, 11
13	3, 7, 11
14	5, 7, 11
15	3, 5, 7, 11

Luego de generar los patrones para la desviación de la energía de las señales con fenómeno con respecto a la señal seno pura, se crea el modulo que se muestra a continuación que es llamado de comparación y lo que hace es pedir el pico o el valle de la señal y lo compara con las magnitudes entre las que se encuentran los fenómenos. Para identificar un sag se usa el modulo de detectar picos que se encuentra en LabVIEW y permite tener el valor de los picos o de los valles de la señal. Para el fenómeno de Sag se tiene un pico que puede estar entre 0.09 y 1.9 o un valle entre -1 y 0, para el fenómeno Swell se tiene un pico entre 1.9 y 8 y para armónicos la magnitud del pico está entre 0 y 0.09

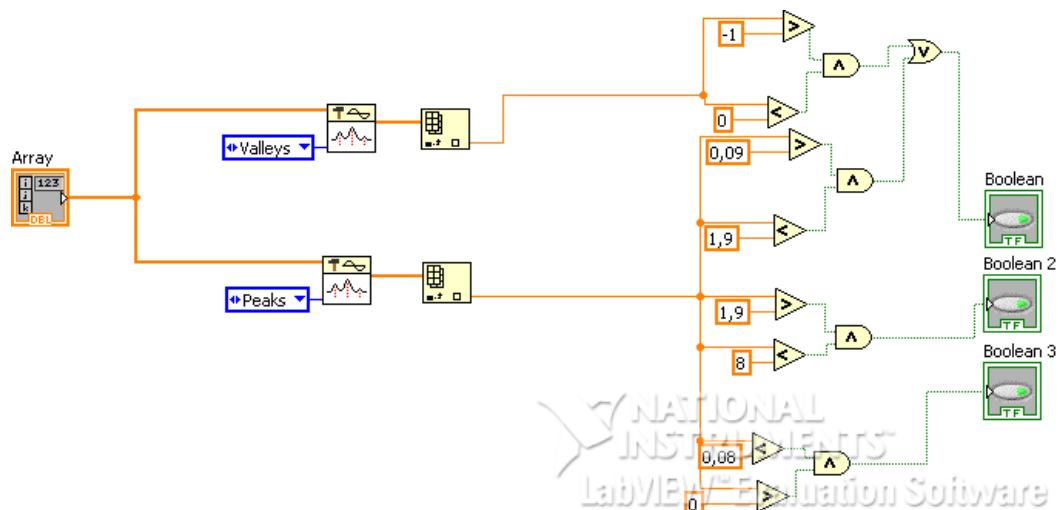


Figura 20. Módulo de Comparación para el pico o el valle

Si la señal de entrada tiene un pico o un valle con la magnitud dada, se enciende el botón correspondiente al fenómeno en el que se clasifica.

La Figura 21 muestra el bloque de diagramas completo en LabVIEW para desarrollar el programa, el sub-bloque (SubVI) llamado 'Señal de Entrada' es el que contiene la señal a evaluar, en este caso se hace por simulación pero puede ser cambiado por un modulo de adquisición de datos en tiempo real. Este no se pone debido a que en el laboratorio del departamento no se cuenta con el dispositivo adecuado y los que hay están diseñados para magnitudes de máximo 20V pico.

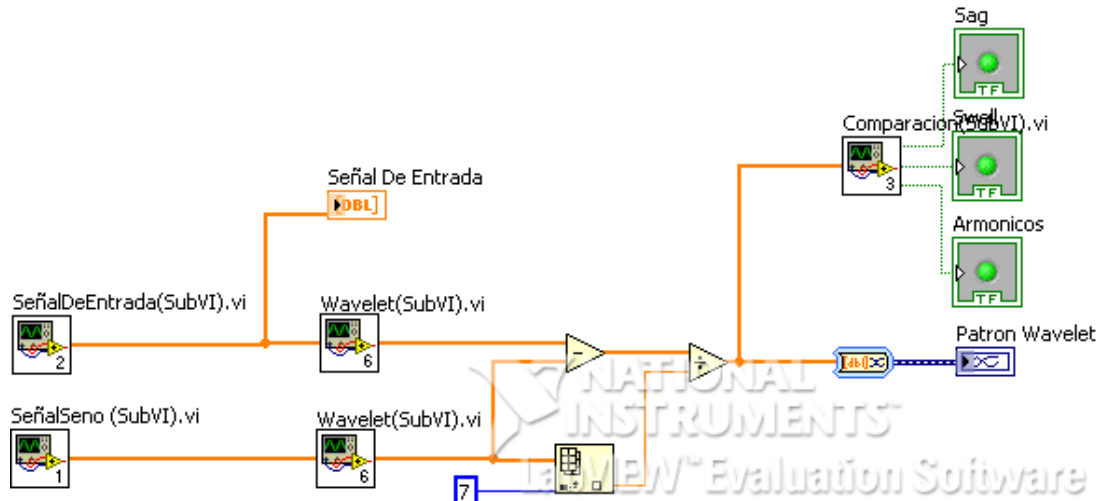


Figura 21. Diagrama de Bloques completo en LabVIEW

El subVI llamado 'Señal Seno' contiene la señal seno generada para ser comparada, esta señal es creada como se muestra en las Figura 5 y Figura 6. Luego se tienen dos subVI que se llaman 'Wavelet' que hace todo el tratamiento Wavelet para hallar las desviaciones entre las energías contenidas en las señales, este modulo se puede ver en la Figura 11 y el SubVI 'comparación' es el que se mostro en la Figura 20.

Finalmente la interfaz grafica que se muestra es la siguiente (Figura 22), que permite ver cuál es la señal que está leyendo el sistema, la desviación de las energías de las señales y finalmente los botones para indicar qué tipo de fenómeno es.

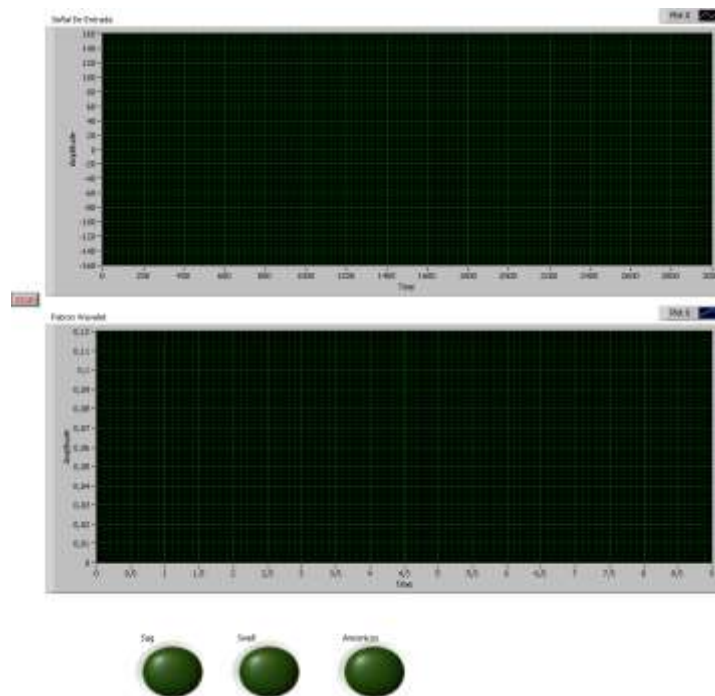


Figura 22. Interfaz grafica que ve el usuario.

7 VALIDACIÓN DEL TRABAJO

7.1 Metodología de prueba

Los que se hace para probar el programa desarrollado es:

Se crean diferentes tipos de ondas que presentan uno de los tres fenómenos, luego aleatoriamente se ponen como señal de entrada y se corre el programa, este describe si la onda tiene un tipo de problema y cuál es.

Luego se comparan los resultados obtenidos con lo que se espera, y se analizan los resultados. Cuando se hizo estas comparaciones se encontraron que algunos fenómenos no estaban siendo tenidos en cuenta por lo que se ajustaron los límites para la clasificación y de nuevo se probó el programa.

En todos los casos que se probaron se obtuvo el resultado esperado, sin embargo es importante resaltar que son muchas las variaciones que se pueden obtener de las señales con fenómenos creadas por lo que los casos que se probaron son solo algunos de los que podrían ocurrir, pero se trató que estos fueran por lo menos los más representativos, como magnitudes muy pequeñas o muy altas para los sags y swell o tiempos cortos y tiempo más largos.

Para probar el programa se debe abrir el archivo de LabVIEW `electronica.vi`, luego en donde dice señal de entrada se elimina este bloque y se pone el bloque que contiene la señal de entrada que se quiere analizar, luego se corre el programa y en la pantalla de visualización se muestran los resultados.

7.2 Validación de los resultados del trabajo

Para comprobar los resultados se hizo 300 pruebas para el fenómeno SAG, 300 para el fenómeno SWELL y para los armónicos se hacen 511 combinaciones de los armónicos 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17 y 19. Para los SAG's y los SWELL se usa la herramienta para generar números aleatorios de LabVIEW, esto se hace para la magnitud y la duración del fenómeno. En el caso de los SAG's la magnitud varía entre 0.1 y 0.9 y para los SWELL entre 1.1 y 1.9. La duración se da en segundos y va desde 0.083 y hasta 3 segundos.

La tabla siguiente muestra los resultados que se obtienen para las pruebas:

Tabla 3. Resumen de resultados

Fenómeno	Casos	Detección correcta	Porcentaje de error
SAG	300	300	0%
SWELL	300	299	0.33%
Armónicos	511	508	0.59%

Como se puede notar la identificación de los sag es muy buena pues no se comente ningún error de los 300 casos que se prueba. Para los swell se comente un error, el programa no lo identifica como un swell ni como ninguno de los otros dos fenómenos porque el valor es muy grande y se sale del rango.

El peor caso está dado para un armónico, que tiene un porcentaje de error más grande, y el programa lo identifica como un sag en dos casos de los que se falla. Esto sucede porque se sale del rango la magnitud del pico más alto definido, y empieza el de los sag, para estos casos se puede tomar otra opción para la identificación, como analizar dos valores de la curva.

En general se puede decir que la efectividad del programa para la clasificación de fenómenos de calidad de la potencia es muy alta. Y que la probabilidad de cometer un error es muy baja y se pueden hacer algunos tratamientos para lograr reducir aun mas estos valores.

8 DISCUSIÓN

El trabajo que se realizo es satisfactorio ya que se cumplió con el objetivo planteado, el programa es sencillo, fácil de usar y los resultados son los esperados en todos los casos.

El principal problema que se tuvo fue el manejo de LabVIEW, ya que las herramientas que este software provee son muy útiles pero en la mayoría de casos no se contaba con los conocimientos para aprovecharlas, por lo que el programa desarrollado pudo ser más exacto y detallado.

Otro problema tuvo que ver con los resultados que se encontraron, ya que estos fueron diferentes a los que están en otros documentos, por lo que se cambio al final la metodología para la clasificación de los patrones y se debió hacer por la magnitud del pico o del valle de la señal. Esta decisión permitió que se tengan los resultados deseados.

En un futuro se puede trabajar sobre el programa desarrollado para lograr clasificar mas fenómenos de los que se mencionan en la Tabla 1. Categorías y Características Típicas de los Fenómenos Electromagnéticos de Sistemas de Potencia, y se puede probar con señales reales

si se cuenta con el hardware necesario para la implementación. Además se pueden generar señales que contengan más de un fenómeno al mismo tiempo y por lo tanto se debe analizar no solo el pico de la señal sino más picos o más valles, para comparar y tener mayor información.

9 CONCLUSIONES

El análisis de las señales no es fácil debido a que los patrones que se encuentran varían de acuerdo a diversos factores como la magnitud del fenómeno, la duración y la ubicación en el tiempo, sin embargo la identificación de los fenómenos es bastante certera.

Se esperaba que los patrones generados fueran distintos entre ellos para cada fenómeno, por lo que se podía utilizar otras técnicas como las redes neuronales o técnicas de lógica difusa para la detección del fenómeno como se hace en [10], pero al ser similares como sucede en el caso de sags y swells no se permite usar estas técnicas, por lo que se detectan los fenómenos por la magnitud del pico en la señal de las desviaciones de energía.

Se encontró que los sags pueden tener distintos patrones para diferentes magnitudes o diferente duraciones, sin embargo también se puede comprobar que los dos tipos de patrones son como los que se mostraron en la figura, por lo que una señal que tenga el pico entre este valor puede ser detectada y clasificada en este fenómeno.

En el caso de tener señales con más de un fenómeno es difícil clasificar el patrón, debido a que como se usa el criterio de la magnitud del pico, este no revela información suficiente ya que varía, este puede salirse de los rangos destinados a cada fenómeno o en algunos casos solo se ubicara en uno de los fenómenos.

No se consideran señales con más de un tipo de fenómenos, pues las herramientas usadas hasta acá no arrojan información suficiente o se no es muy confiable. Para futuros trabajos podría enfatizarse en generar patrones para señales con más de un fenómeno de la calidad de la potencia y observarse cuál es la mejor forma para clasificarlo.

Gracias al análisis por transformada discreta de Wavelet se logra hacer un diseño rápido, sencillo y permite obtener una correcta identificación en caso de fenómenos, además su costo computacional es muy bajo.

Wavelet es una excelente herramienta para el tratamiento de señales en el tiempo porque la descomposición que usa permite que la energía se concentre en algunos de

sus niveles y con esto se puede obtener información relevante de cualquier señal en el tiempo y en la frecuencia.

En este proyecto se puede conseguir la identificación y clasificación correcta de los fenómenos sags, swell y armónicos, sin embargo es necesario que se estudien mas casos y mas fenómenos para que el programa sea desarrollado completamente y además puedas ser una herramienta valiosa para las industrias.

Algo muy valioso de este proyecto es que se pueda usar en futuros laboratorio del departamento pues el desarrollo es sencillo y la universidad cuenta con licencias del programa LabVIEW, con lo que se genera aquí se hace fácil la implementación. Como se puede comprobar a través del trabajo, las herramientas del programa LabVIEW son de gran ayuda para la generación de este proyecto y vuelven sencillo su desarrollo.

10 AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a Dios porque me ha dado todo lo que he necesitado, pero en especial la fuerza que siempre he requerido para salir adelante y porque me ha acompañado cada día de mi vida y de mi carrera. Gracias por la sabiduría y por todo. Gracias a mis padres, a su contribución, su dedicación, apoyo y sacrificio porque me permitieron ser lo que soy y estar aquí y a mi familia porque siempre me han dado bases de una u otra manera para seguir adelante y estar donde estoy. Le agradezco a Jhonatan por su incondicional apoyo y por acompañarme durante estos seis años, en la universidad y en mi vida.

Gracias a la Universidad de Los Andes porque ha sido el mejor centro de educación que hubiera podido tener y con sus avances, laboratorio y personal me ha ensañado y permitido terminando mi carrera como una gran profesional. Y en especial al Dr. Gustavo Ramos López por su apoyo en la realización de este proyecto.

11 REFERENCIAS

- [1] Irene Y.H. Gu, Surya Santoso, Mark F. McGranaghan, Petter Crossley, Moises Ribeiro y Paulo Ribeiro Math H.J. Bollen, "Evaluacion de Calidad en Sistemas de Potencia Usando Técnicas de Procesamiento de Señales," 2009.
- [2] Ancizar Piedrahita Agudelo, La Electrónica ade Potencia Frente a la Calidad de la Potencia Eléctrica, 1994.
- [3] S. y Cano, E.A. Ramírez, Callidad del Servicio de Energía Eléctrica, 2003.
- [4] Luz Angela Ramírez Sarmiento, *Calidad de la potencia eléctrica en el medio hospitalario : caso Clínica Marly y Clínica Reina Sofía*. Bogotá: Uniandes, 2000.
- [5] Juan Camilo Cabrera and Juan David Taboada, Generación de Patrones de Fenómenos Asociados a Calidad de la Potencia Utilizando la Transformada de Wavelet y Redes

- Neuronales, 2003.
- [6] J.W., Chaves, M.L.R., Penna, C. Resende. (2010) Penn State University. [Online]. citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.113.
- [7] Liyan Liu and Zhezhaio Zeng, "The Detection and Location of Power Quality Disturbances Based on Orthogonal Wavelet Packet Transform," *IEEEExplore*, Abril 2008.
- [8] P.K. Dash, B.K. Panigrahi, D.K. Sahoo, and G. Panda, "Power Quality Disturbance Data Compression, Detection, and Classification Using Integrated Spline Wavelet and S-Transform," *IEEEExplore, IEEE Transactions On Power Delivery*, vol. 18, pp. 595-600, Abril 2003.
- [9] Surya Santoso, Edward J. Power, and W. Mack Grady, "Electric Power Quality Disturbance Detection Using Wavelet Transform Analysis".
- [10] Juan Camilo Cabrera y Juan David Taboada, Generación de Patrones de Fenómenos Asociados a Calidad de la Potencia Utilizando la Transformada de Wavelet y Redes Neuronales, 2003.
- [11] Pang Peilin and Ding Guangbin, "Power Quality Detection and Discrimination ind Distributed Power System Based on Wavelet Transform," *IEEEExplore*, Julio 2008.
- [12] IEEE, "IEEE 1159, IEEE Reccommended Practice for Monitoring Electric Power Quality," Norma, Marzo 18, 2009.
- [13] Gustavo Andrés Ramos López, Analisis de la Seguridad de los Sistemas Electricos Industriales, 2008.
- [14] M.A.S. Masoum, S. Jamali, and N. Ghaffarzadeh, "Detection and Classification of Power Quality," *IET Science, Measurement and Technology*, January 2009.