
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA



DISEÑO DE UN ALGORITMO DE DETECCIÓN DE IMPULSOS Y MUESCAS DE VOLTAJE EN CORRIENTE ALTERNA PARA ANÁLISIS DE CALIDAD DE LA ENERGÍA

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA
OPCIÓN CONTROL AUTOMÁTICO

PRESENTA:

ING. ROBERTO MORENO SÁNCHEZ

ASESOR:

DR. CIRO ALBERTO NÚÑEZ GUTIÉRREZ

CO-ASESORA:

DRA. NANCY VISAIRO CRUZ

MÉXICO, SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P.

FEBRERO 2012

Diseño de un algoritmo de detección de impulsos y muescas de voltaje en corriente alterna
para análisis de calidad de la energía © 2012 by Roberto Moreno Sánchez is licensed

under [CC BY-NC-ND 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)  

Dedicatoria

Dedico este trabajo a...

Dios...

... a mi madre Ma. del Carmen y mi padre Roberto...

... a mi hermana Sandra Mónica...

... a mis hermanos Calixto, José Salvador y Eduardo...

...

y

**“A todo aquel esfuerzo que en verdad es realizado
en pro de la humanidad”**

... Mario Athie Morales

Agradecimientos

Una Tesis es rara vez el producto de una sola persona, y esta Tesis no es la excepción. Varias personas contribuyeron al producto final. Primero que nada me gustaría agradecer a todos aquellos que en su momento me apoyaron fehacientemente a continuar con este producto, a quienes ayudaron a llenar esa tasa de café cada vez que ésta necesitaba de los conocimientos, de la motivación y de todos esos elementos faltantes para concretar mi meta. A los que alguna vez me alentaron con un par de palabras, y que en ocasiones sin intención, me inspiraron y me ayudaron a ver cercano el futuro que frecuentemente yo no lograba ver, ¡gracias!.

A Dios por la dicha de la vida.

A mi madre María del Carmen y mi padre Roberto por haberme otorgado la alegría de crecer junto a ustedes, por tantos consejos que sigo recibiendo y por guiarme por el buen camino, ya que sin ésto, no sé dónde estaría en estos momentos.

A Sandra Mónica, Calixto, José Salvador y Eduardo, por la constante preocupación y apoyo hacia su hermano.

A mis asesores Dr. Ciro y la Dra. Nancy por tener siempre el dedo en el renglón siguiendo con gran entusiasmo este trabajo, además por los momentos de distracción que en ocasiones ambos patrocinaban.

A mis compañeros del CIEP, Alejandro, Christian, Eliazar, Gabriela, Heriberto, Isaac, José Ángel, Lina, Miguel Ángel y Ricardo por su inmenso apoyo académico ya que gracias eso, los trabajos y tareas no hubieran tenido un final tan reconfortante (o al menos siempre tomábamos los resultados de la mejor manera posible). No cabe duda

que en este agradecimiento se debe mencionar los gratos momentos que pasamos en actividades recreativas, espero se sigan repitiendo.

A los compañeros, que a pesar de no ser de mi generación siempre tuvimos una gran convivencia, Javier P., Víctor E., Luis, Janeth, Aarón, Martín, Oscar y Tonatiuh.

Sin duda, cada alumno que haya pasado por el *Laboratorio de Calidad de Energía Eléctrica y Control de Motores* debe agradecer a Ana C. por el inmenso apoyo que con gran alegría otorga a todos los alumnos que así lo requerimos.

A todos los profesores y secretarias del CIEP.

Por último al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y al proyecto SEP-CONACyT 84616 por otorgarme la ayuda económica para desarrollar mis estudios de Posgrado.

Índice general

| | |
|---|-------------|
| Dedicatoria | I |
| Agradecimientos | III |
| Índice General | V |
| Índice de Figuras | IX |
| Índice de Tablas | XIII |
| Resumen | XV |
| Introducción | 1 |
| Justificación | 2 |
| Hipótesis | 3 |
| Objetivos | 3 |
| Alcances del Trabajo | 4 |
| Organización de la Tesis | 4 |
| I. Estado del Arte en el Monitoreo de Señales de Corriente Alterna | 7 |
| I.1. Perturbaciones en la Red Eléctrica | 8 |
| I.1.1. Perturbaciones Transitorias | 8 |
| I.1.2. Distorsiones de Onda | 10 |
| I.1.3. Variaciones de Voltaje de Corta Duración | 13 |
| I.1.4. Variaciones de Voltaje de Larga Duración | 15 |
| I.1.5. Desbalances | 17 |
| I.1.6. Fluctuaciones de Voltaje | 17 |
| I.1.7. Variaciones de la Frecuencia Fundamental | 18 |

| | | |
|-------------|--|-----------|
| I.2. | Factores y Parámetros Descriptivos de la Red Eléctrica | 18 |
| I.2.1. | Voltaje Eficaz | 19 |
| I.2.2. | Corriente Eficaz | 19 |
| I.2.3. | Potencia Activa | 19 |
| I.2.4. | Potencia Aparente | 19 |
| I.2.5. | Potencia Reactiva | 20 |
| I.2.6. | Factor de Potencia | 20 |
| I.2.7. | Distorsión Armónica Total (DAT) | 20 |
| I.2.8. | Voltaje Promedio | 21 |
| I.2.9. | Factor de Forma | 21 |
| I.2.10. | Factor de Pico o Cresta | 21 |
| I.2.11. | Factor de Curva | 21 |
| I.2.12. | Factor de Distorsión Diferencial | 21 |
| I.3. | Monitoreo de la Energía Eléctrica | 22 |
| I.3.1. | Registro y Procesamiento de Datos de un Analizador de Calidad de la Energía Eléctrica Portátil (ACEEP) | 22 |
| I.3.2. | Otros Métodos de Procesamiento para Transitorios y otras Anomalías | 27 |
| I.4. | Discusión del Capítulo | 30 |
| II. | Diseño de un Algoritmo de Detección de Impulsos y Muestras Eléctricas | 31 |
| II.1. | Detección y Aislamiento de las Anomalías Transitorias | 31 |
| II.1.1. | Desarrollo del Algoritmo y Primer Factor Derivativo | 31 |
| II.1.2. | Consideraciones de la Primera Propuesta | 34 |
| II.2. | Detección de las Anomalías Transitorias: | 35 |
| II.2.1. | Desarrollo del Algoritmo y Segundo Factor Derivativo | 35 |
| II.2.2. | Consideraciones de la Segunda Propuesta | 36 |
| II.3. | Discusión del Capítulo | 37 |
| III. | Evaluación del Algoritmo | 39 |
| III.1. | Análisis de Potencias y Valores Eficaces | 40 |
| III.1.1. | Señales sin Perturbaciones Transitorias | 40 |
| III.1.2. | Señales con Perturbaciones Transitorias | 41 |
| III.1.3. | Discusión de esta Sección | 43 |
| III.2. | Evaluación de la Primera Propuesta fed_1 | 44 |
| III.2.1. | Evaluación ante Transitorios | 44 |

| | |
|--|-----------|
| III.2.2. Evaluación ante Transitorios y Distorsiones de Onda | 46 |
| III.2.3. Evaluación ante Transitorios y Variaciones de Voltaje | 49 |
| III.2.4. Alcances de la Primera Propuesta | 51 |
| III.3. Evaluación de la Segunda Propuesta fed_2 | 52 |
| III.3.1. Evaluación ante Transitorios | 52 |
| III.3.2. Evaluación ante Transitorios y Distorsiones de Onda | 53 |
| III.3.3. Evaluación ante Transitorios y Variaciones de Voltaje | 55 |
| III.3.4. Alcances de la Segunda Propuesta | 56 |
| IV. Resultados Experimentales | 57 |
| IV.1. Validación de Algoritmos | 58 |
| IV.2. Primera Propuesta | 60 |
| IV.2.1. Señal con Duración de 2 Segundos | 60 |
| IV.2.2. Señal con Duración de 0.4 Segundos | 60 |
| IV.3. Segunda Propuesta | 61 |
| IV.3.1. Señal con Duración de 2 Segundos | 62 |
| IV.3.2. Señal con Duración de 0.4 Segundos | 62 |
| IV.4. Discusión del Capítulo | 63 |
| Conclusiones y Trabajo Futuro | 65 |
| Conclusiones | 65 |
| Trabajo Futuro | 66 |
| Apéndice | 67 |
| A. Diagrama de Flujo de los Métodos Propuestos | 67 |
| B. Aplicaciones Desarrolladas para Apoyo Visual | 69 |
| B.1. Aplicación para el Primer Método de Detección y Aislamiento | 69 |
| B.2. Aplicación para el Cálculo de Valores Eficaces | 72 |
| Bibliografía | 75 |

Índice de figuras

| | | |
|--------|---|----|
| I.1. | Transitorios. | 9 |
| | (a). Impulso Eléctrico | 9 |
| | (b). Impulso Oscilatorio | 9 |
| I.2. | Distorsiones de Onda. | 11 |
| | (a). Muecas | 11 |
| | (b). Señal con Offset | 11 |
| | (c). Distorsión Armónica | 11 |
| | (d). Ruido | 11 |
| I.3. | Variaciones de Voltaje de Corta Duración. | 14 |
| | (a). Sag | 14 |
| | (b). Swell | 14 |
| | (c). Interrupción | 14 |
| II.1. | Curva ITIC (CBEMA). | 33 |
| III.1. | Señales de Voltaje y Corriente. | 40 |
| | (a). Sinusoidales Ideales | 40 |
| | (b). Sinusoidales con Acercamiento | 40 |
| III.2. | Señales con Impulso | 41 |
| | (a). Señales con Impulso | 41 |
| | (b). Señales con Acercamiento | 41 |
| III.3. | Señales con Muesca | 43 |
| | (a). Señales con Muesca | 43 |
| | (b). Señales con Acercamiento | 43 |
| III.4. | Detección de Impulso y Muesca | 45 |
| | (a). Señal de Voltaje | 45 |

| | |
|---|----|
| (b). Detección | 45 |
| (c). Aislamiento fed_1 | 45 |
| III.5. Impulso y Muesca Cercanos al Cruce por Cero. | 45 |
| (a). Señal de Voltaje | 45 |
| (b). Detección | 45 |
| (c). Aislamiento fed_1 | 45 |
| III.6. Transitorios y Distorsión Armónica. | 46 |
| (a). Señal de Voltaje | 46 |
| (b). Detección | 46 |
| (c). Aislamiento fed_1 | 46 |
| (d). Espectro Armónico | 46 |
| III.7. Transitorios y Ruido. | 48 |
| (a). Señal de Voltaje | 48 |
| (b). Detección | 48 |
| (c). Aislamiento fed_1 | 48 |
| III.8. Transitorios y OFFSET. | 49 |
| (a). Señal de Voltaje | 49 |
| (b). Detección | 49 |
| (c). Aislamiento fed_1 | 49 |
| III.9. Transitorios y Sag. | 50 |
| (a). Señal de Voltaje | 50 |
| (b). Detección | 50 |
| (c). Aislamiento fed_1 | 50 |
| III.10. Transitorios y Swell. | 51 |
| (a). Señal de Voltaje | 51 |
| (b). Detección | 51 |
| (c). Aislamiento fed_1 | 51 |
| III.11. Transitorios. | 53 |
| (a). Señal de Voltaje | 53 |
| (b). Detección fed_2 | 53 |
| III.12. Transitorios con Armónicos. | 53 |
| (a). Señal de Voltaje | 53 |
| (b). Detección fed_2 | 53 |
| III.13. Transitorios con Ruido. | 54 |
| (a). Señal de Voltaje | 54 |
| (b). Detección fed_2 | 54 |

| | |
|--|----|
| III.14. Transitorios con OFFSET. | 54 |
| (a). Señal de Voltaje | 54 |
| (b). Detección fed_2 | 54 |
| III.15. Transitorios con Sag. | 55 |
| (a). Señal de Voltaje | 55 |
| (b). Detección fed_2 | 55 |
| III.16. Transitorios con Swell. | 56 |
| (a). Señal de Voltaje | 56 |
| (b). Detección fed_2 | 56 |
| IV.1. Generación de Señal. | 58 |
| IV.2. Señal para Validación de Algoritmos. | 59 |
| IV.3. Señal de Voltaje Real con Duración de 2 Segundos. | 60 |
| IV.4. Señal de Voltaje Real con Duración de 0.4 Segundos. | 61 |
| (a). Señal de Voltaje Real | 61 |
| (b). Detección | 61 |
| (c). Aislamiento fed_1 | 61 |
| IV.5. Señal de Voltaje Real con Duración de 2 Segundos | 62 |
| (a). Señal de Voltaje Real | 62 |
| (b). Factor Derivativo 2 | 62 |
| IV.6. Señal de Voltaje Real con Duración de 0.4 Segundos | 62 |
| (a). Señal de Voltaje Real | 62 |
| (b). Factor Derivativo 2 | 62 |
| A.1. Diagrama de Flujo de la Primera Propuesta. | 68 |
| B.1. Aplicación del Primer Método | 70 |
| B.2. Detección y Aislamiento. | 71 |
| B.3. Detección. | 72 |
| B.4. Aislamiento. | 73 |
| B.5. Cálculo Ideal. | 74 |
| B.6. Cálculo con Impulsos. | 74 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| I.1. Perturbaciones Transitorias | 8 |
| I.2. Distorsiones de Onda | 10 |
| I.3. Variaciones de Voltaje de Corta Duración | 13 |
| I.4. Variaciones de Voltaje de Larga Duración | 16 |
| I.5. Desbalances | 17 |
| I.6. Fluctuaciones de Voltaje | 17 |
| I.7. Variaciones de la Frecuencia Fundamental | 18 |
| III.1. Parámetros Constantes de Simulación | 39 |
| III.2. Cálculo de Valores Eficaces, Caso Ideal | 41 |
| III.3. Cálculo de Valores Eficaces, Caso con Impulso | 42 |
| III.4. Cálculo de Valores Eficaces, Caso con Muecas | 43 |
| III.5. Contenido Armónico | 47 |
| IV.1. Comparación de Valores de MATLAB y Valores del ACEEP . | 59 |
| B.1. Características del Primer Ejemplo | 70 |

Resumen

El contexto en que se desarrolla este trabajo de tesis está relacionado con los métodos de medición de calidad de la energía eléctrica, los que se pueden dividir en métodos de cálculo en estado estable y transitorios. Los métodos de estimación de estado estable requieren más de 1 ciclo de red para proporcionar mediciones válidas. Los métodos de estimación para transitorios como las ondeletas, morfologías matemáticas, redes neuronales, etc. son generalmente métodos complicados que requieren sintonización de parámetros, cierta experiencia del usuario y un procesamiento digital complejo, lo que los hace poco viables para medidores portátiles.

En este trabajo de tesis se presentan dos métodos en el dominio del tiempo para la detección y aislamiento de anomalías transitorias con duración menor a medio ciclo de red, específicamente para impulsos y muescas de voltaje, en corriente alterna. Estas propuestas están diseñadas con operaciones básicas que no requieren sintonización de parámetros ni de conocimiento previo de la anomalía, lo que los hace atractivos para programarse en Analizadores de Calidad de la Energía Eléctrica Portátiles (ACEEP). La principal contribución de los métodos propuestos es que, por su simpleza inherente, pueden detectar anomalías transitorias con las mismas muestras que se requieren para mediciones en estado estable, lo que los hace útiles para estudios prolongados que requieran de 8 días o más, con lo que puede obtenerse de manera simultánea un panorama completo en estado estable y transitorio del monitoreo de la calidad de la energía eléctrica.

Los métodos propuestos sólo requieren dos muestras para obtener datos válidos y lograr el aislamiento con respecto a perturbaciones en estado estable tales como distorsión armónica, sags, swells e incluso ruido. Se realizó la validación con simulaciones y con señales reales de laboratorio.

Introducción

Hoy en día la electricidad es el recurso más utilizado, su aplicación es muy variada, va desde sistemas simples de iluminación hasta aplicaciones de gran capacidad y complejidad. Todas estas aplicaciones tienen como objetivo, obtener productos o servicios de acuerdo a especificaciones establecidas. Es por esto que el monitoreo de la Calidad de la Energía Eléctrica (CEE) ha llegado a ser un factor muy importante en los últimos años, tanto desde el punto de vista del consumidor como de la compañía suministradora.

Las mediciones de CEE tienen por objetivo poder obtener datos para su análisis y con ello tomar decisiones que permitan mejorar el suministro eléctrico en un bus de alimentación determinado, manteniendo los niveles de voltaje en sus valores nominales, con una forma sinusoidal con frecuencia y amplitud constantes. Los fenómenos relacionados con la CEE son múltiples y en muchas ocasiones estocásticos en el sentido de que aparecen y desaparecen de manera aparentemente arbitraria. Por lo tanto, al hacer mediciones de CEE, más que la simple medición de un parámetro eléctrico, es necesario almacenar datos durante periodos prolongados de tiempo para que sea posible realizar un buen análisis.

Por otra parte, en periodos prolongados de tiempo pueden generarse una cantidad muy grande de datos; debido a ello, es usual fijar límites a las variaciones permitidas de las variables bajo medición a fin de disminuir la cantidad de datos; no obstante, es importante analizar cuáles son los datos importantes y útiles dentro de cada medición que haya sido grabada.

Existen varias razones para realizar mediciones de la CEE. La más importante es el efecto económico que tiene el daño producido a equipos críticos. Sin embargo, es de destacar que una medición de la CEE por sí sola no es la solución a los problemas de

CEE, pero sí puede proporcionar los datos esenciales para tomar decisiones correctas a fin de mejorarla.

Los instrumentos encargados de realizar el análisis de CEE son denominados ACEEP y sus características son diversas, entre sus ventajas se encuentran la facilidad de ser transportados sin inconveniente a cualquier lugar donde se necesite hacer el análisis. Una característica principal de estos instrumentos es el registro de datos para su posterior análisis, su registro depende de la configuración que establece el usuario. De forma general los datos que registra son parámetros de la señal en estado estable, sobreten-siones transitorias, registro de la forma de onda, etc. Cada analizador utiliza diversos métodos para calcular un parámetro específico de interés, entre los principales se encuentra el Método RMS y la Transformada de Fourier.

Para la detección y registro de anomalías transitorias se han desarrollado diferentes métodos, entre los que presentan resultados más aceptables se encuentran las ondeletas (o wavelet), morfologías matemáticas, redes neuronales y combinaciones de las anteriores. Éstos tienen una gran aceptación y exactitud; sin embargo, requieren sintonización de parámetros, cierta experiencia del usuario y un procesamiento digital complejo, lo que los hace poco viables para medidores portátiles.

En este trabajo de tesis se presentan dos métodos en el dominio del tiempo para la detección y aislamiento de anomalías transitorias con duración menor a medio ciclo de red, específicamente para impulsos y muescas de voltaje, en corriente alterna. Estas propuestas están diseñadas con operaciones básicas que no requieren sintonización de parámetros ni de conocimiento previo de la anomalía, lo que los hace atractivos para programarse en Analizadores de Calidad de la Energía Eléctrica Portátiles (ACEEP). La principal contribución de los métodos propuestos es que, por su simpleza inherente, pueden detectar anomalías transitorias con las mismas muestras que se requieren para mediciones en estado estable, lo que los hace útiles para estudios prolongados, con lo que puede obtenerse de manera simultánea un panorama completo en estado estable y transitorio del monitoreo de la calidad de la energía eléctrica.

Justificación

La calidad de la energía eléctrica es, en la actualidad, uno de los tópicos que generan mayor interés en todos los niveles de consumo de energía. Usualmente se asocia

con ahorro de energía pero no siempre es así, ya que una señal con perturbaciones provoca funcionamientos defectuosos y posibles daños en el equipo eléctrico. Para abordar su análisis es necesario conocer el voltaje y la corriente en diferentes puntos de la red eléctrica y a partir de ello, generar datos descriptivos de las señales en corriente alterna.

Si dentro de los algoritmos de cálculo de parámetros de CEE se integran métodos simples, que no requieran sintonización dependiente de la red bajo análisis y que proporcionen detección y aislamiento de anomalías transitorias de duración menor a medio ciclo de red, operando en el dominio del tiempo sin transformaciones adicionales y usando las mismas muestras que en estado estable, entonces es posible obtener resultados que incluyan cálculos de estado estable y transitorio; incluso para mediciones prolongadas como sugiere la norma mexicana L0000-45.

Por lo tanto, en este trabajo de tesis se realizó un estudio de factores antiguos de caracterización de señales en corriente alterna, a partir de lo cual, se tomó el concepto del factor derivativo que es la base para los métodos propuestos con los que es posible detectar y aislar impulsos y muescas eléctricas de otras anomalías en la señal de voltaje.

Hipótesis

Cuando una señal varía como función sinusoidal del tiempo, el diferencial de esta señal es función del seno y por tanto tiene la forma de onda igual a la original. Sin embargo, en el caso de una onda irregular, su diferencial está distorsionado. La distorsión de cualquier onda diferencial, comparada con una onda sinusoidal como estándar, podría, por lo tanto, ser tomada como una medida de la distorsión de la onda original.

Objetivos

Para el desarrollo de esta tesis se plantean los siguientes objetivos, organizados en Objetivo General y Objetivos Particulares como se muestra a continuación.

Objetivo General

- Proponer y analizar métodos descriptivos de señales en corriente alterna que permitan detectar perturbaciones con duración menor a medio ciclo de red bajo

esquemas de medición prolongados.

Objetivos Particulares

- Analizar las características y procesamiento para transitorios usado por algunos analizadores de calidad de la energía eléctrica.
- Analizar las propiedades de factores antiguos para la detección de anomalías eléctricas con duración menor a medio ciclo de red.
- Con base en estos análisis, desarrollar métodos de detección y aislamiento de anomalías transitorias que sean simples en su formulación para aplicarlos a ACEEP.
- Generar análisis de perturbaciones transitorias sin perder los datos en estado estable, con la característica de que el periodo de muestreo no cambie.
- Validar los algoritmos desarrollados en MATLAB, así como la aplicación de los métodos propuestos con señales reales.

Alcances del Trabajo

En el presente trabajo se hace un análisis de factores antiguos que describen las propiedades de las señales en corriente alterna y se proponen dos métodos de detección y aislamiento. Con base en el trabajo realizado, los alcances de la investigación son los siguientes:

- Desarrollo de un método de detección y aislamiento de anomalías transitorias, validado fuera de línea con señales reales de laboratorio.
- El aislamiento se logra con respecto a perturbaciones en estado estable y ruido.
- El segundo método desarrollado incluye solamente la etapa de detección.
- Ambos métodos se validaron con simulaciones bajo distintos tipos de escenarios.
- Ambos métodos se validaron con señales reales de laboratorio.

Organización de la Tesis

El desarrollo de esta tesis se presenta de la siguiente manera, en el Capítulo I se presenta el estado de arte del monitoreo de las señales en corriente alterna, se explican

algunos factores útiles para caracterizar las señales en corriente alterna (CA), así como algunas de las perturbaciones más comunes, además, los métodos de registro de algunos ACEEP y el inconveniente en el registro de estos métodos. En el Capítulo II se desarrollan dos propuestas para la detección y el aislamiento de impulsos y muescas eléctricas, además se explica la problemática que se tiene con señales de alta frecuencia y cómo es que el primer método logra hacer la detección y el aislamiento. En el Capítulo III se realizan algunas simulaciones de la señal de corriente alterna, calculando valores como potencias, voltajes eficaces, corrientes eficaces, etc, se simula la señal en CA con diferentes perturbaciones y se muestra el proceso que llevan los métodos propuestos para la detección y aislamiento de las anomalías de interés. En el Capítulo IV se presenta la validación de los algoritmos para el cálculo de voltajes, además se presentan algunas pruebas con señales de voltaje obtenidas en el laboratorio aplicando los métodos propuestos.

Estado del Arte en el Monitoreo de Señales de Corriente Alterna

El término de calidad de la energía eléctrica (“Power Quality” en inglés) ha llegado a ser un tópico cada vez más usado en la industria para definir un conjunto de ideas y conceptos relacionado con la interacción de la red eléctrica y sus cargas. También se le asocia con la eficiencia y el ahorro de la energía eléctrica aunque no es una consecuencia directa. Asimismo, se le relaciona con el efecto que tiene en el lado del consumidor. Existen diversos enfoques al término, pero una perspectiva general puede definir la calidad de la energía eléctrica por su capacidad de mantener las señales de voltaje y corriente con una amplitud constante, una forma de onda sinusoidal, a frecuencia fundamental constante y en fase.

Sin embargo, existen perturbaciones que afectan las características deseables de la energía eléctrica. La clasificación de las perturbaciones se hace principalmente en función de la amplitud, del tiempo y de la frecuencia con que sean afectadas las señales de voltaje y corriente. Es por eso que en este capítulo se definen algunas distorsiones de onda tanto en el voltaje como en la corriente según la división y clasificación mostradas en [1], [2] y [3].

En este sentido, para generar datos que proporcionen información de las anomalías presentes en una red eléctrica o de las características de las señales de voltaje y/o de corriente, es necesario el uso de métodos y análisis enfocados en la generación y evaluación de estos datos. Estos métodos y análisis se realizan para aplicarlos a ACEEP o para dispositivos que brindan mayor capacidad digital y de procesamiento. Los métodos y análisis dedicados a la detección de perturbaciones transitorias mencionados en

este capítulo abarcan ambas aplicaciones (ACEEP y dispositivos de mayor capacidad de procesamiento).

I.1. Perturbaciones en la Red Eléctrica

En esta sección se definen algunas de las perturbaciones más comunes en la red eléctrica. Generalizando, todas las perturbaciones en las señales de voltaje y corriente se les puede definir como los “fenómenos electromagnéticos” que distorsionan las formas de onda ideales [1].

Además, se indican las causas a las que se deben estos fenómenos y las repercusiones en la instalación eléctrica.

I.1.1. Perturbaciones Transitorias

Por los objetivos de esta tesis, se debe poner especial cuidado en esta definición. Los tipos de perturbaciones transitorias se muestran en la Tabla I.1 categoría 1.1 y 1.2. La Figura I.1 muestra los dos tipos de perturbaciones transitorias.

Tabla I.1: **Perturbaciones Transitorias**

| Categoría | Contenido espectral típico | Duración típica | Magnitud de voltaje típica |
|--------------------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| 1. Transitorio | | | |
| 1.1. Impulsos | | | |
| 1.1.1. Nanosegundos | | <50 ns | |
| 1.1.2. Microsegundos | | 50 ns - 1 ms | |
| 1.1.3. Milisegundos | | >1 ms | |
| 1.2. Oscilatorio de | | | |
| 1.2.1. Baja frecuencia | <5 kHz | 0.3 - 50 ms | 0 - 4 pu* |
| 1.2.2. Media frecuencia | 5 - 500 kHz | 20 μ s | 0 - 8 pu |
| 1.2.3. Alta frecuencia | 0.5 - 5 MHz | 5 μ s | 0 - 4 pu |

*La cantidad *pu* refiere a por unidad. La cantidad 1.0 *pu* corresponde al 100%

Las perturbaciones transitorias son mejor conocidas como transitorios, la duración de un transitorio por definición debe ser menor a la duración de medio ciclo de la

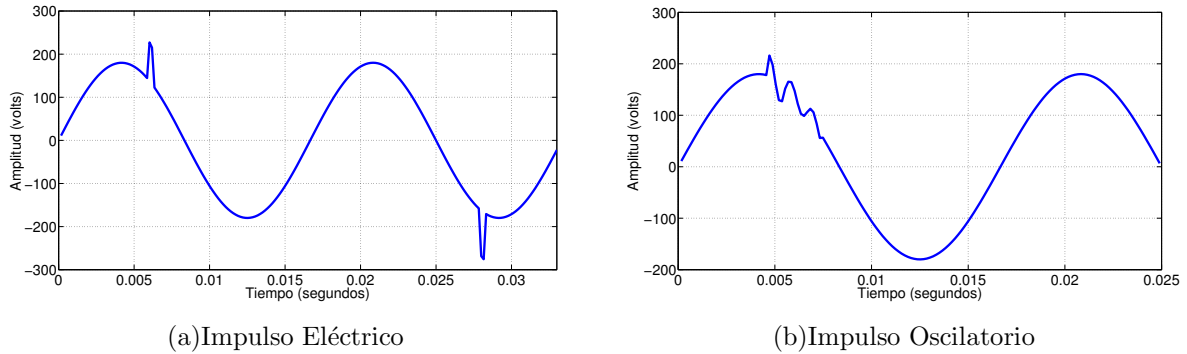


Figura I.1: Transitorios.

señal fundamental de la red eléctrica (50 o 60 Hz). Existen dos tipos de transitorios considerados en [1] y [3], los impulsivos (o impulsos eléctricos) y los oscilatorios. El impulso eléctrico es una perturbación en el voltaje, corriente o ambas que es evidente debido al cambio abrupto en la señal de CA, su polaridad es aditiva y unidireccional a la señal de voltaje o corriente y está descrito por su magnitud y duración. El impulso oscilatorio es una perturbación en el voltaje, corriente o ambos, es positivo y negativo a la polaridad de la señal fundamental, esto quiere decir que tiene cambios rápidos en la polaridad de la señal, es descrito por la magnitud, duración y espectro armónico.

Las perturbaciones transitorias son debidas a:

- Equipos rectificadores.
- Descargas atmosféricas cerca de instalaciones eléctricas.
- Funcionamiento de equipos que producen arcos eléctricos (interruptores, escobillas, etc)
- Conexión y desconexión de equipos capacitivos y/o inductivos.

Los principales daños que producen son:

- Degradación o falla inmediata de dieléctricos en toda clase de equipos.
- Desgaste de aislamientos en equipos eléctricos como máquinas rotatorias, transformadores, condensadores, cables y transformadores de potencia (corriente y voltaje).
- Los dispositivos semiconductores, tales como circuitos integrados pueden ser fácilmente dañados.

- Pueden también pasar a través de la capacitancia de devanados de los transformadores y el transitorio aparecerá en el lado de baja del transformador sin que haya reducción por el número de vueltas.
- En equipo electrónico, las fallas de componentes de fuentes de energía puede resultar de una sola perturbación transitoria de magnitud relativamente modesta.

I.1.2. Distorsiones de Onda

La Tabla I.2 muestra la clasificación de las distorsiones de onda. En esta sección se debe prestar especial cuidado a la definición contenida en la categoría 2.1 de la Tabla I.2 Muestras (del inglés “Notching”). La Figura I.2 muestra la forma de onda de cada distorsión.

Tabla I.2: **Distorsiones de Onda**

| Categoría | Contenido espectral típico | Duración típica | Magnitud de voltaje típica |
|--------------------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| 2. Distorsiones de onda | | | |
| 2.1. Muestras | | Estado estable | |
| 2.2. Armónicos | 0 - 9 kHz | Estado estable | 0 - 20 % |
| 2.3. Interarmónicos | 0 - 9 kHz | Estado estable | 0 - 2 % |
| 2.4. Offset de CD | | Estado estable | 0 - 0.1 % |
| 2.5. Ruido | Ancho de banda | Estado estable | 0 - 1 % |

Muestras (Notching)

Es una perturbación en el voltaje causada por la operación normal de dispositivos electrónicos de potencia cuando la corriente es conmutada de una fase a otra. Las muestras en el voltaje representan un caso especial debido a que son periódicas. Además, tiene un contenido de frecuencia que es bastante alto. Pero también tiene atributos que podría considerarse como un transitorio según lo indica [1]. Es por eso que en este trabajo de investigación las muestras en el voltaje son consideradas como un transitorio.

Ya que las muestras ocurren en estado estable, se pueden caracterizar a través del espectro armónico del voltaje afectado. Sin embargo, las componentes en frecuencia

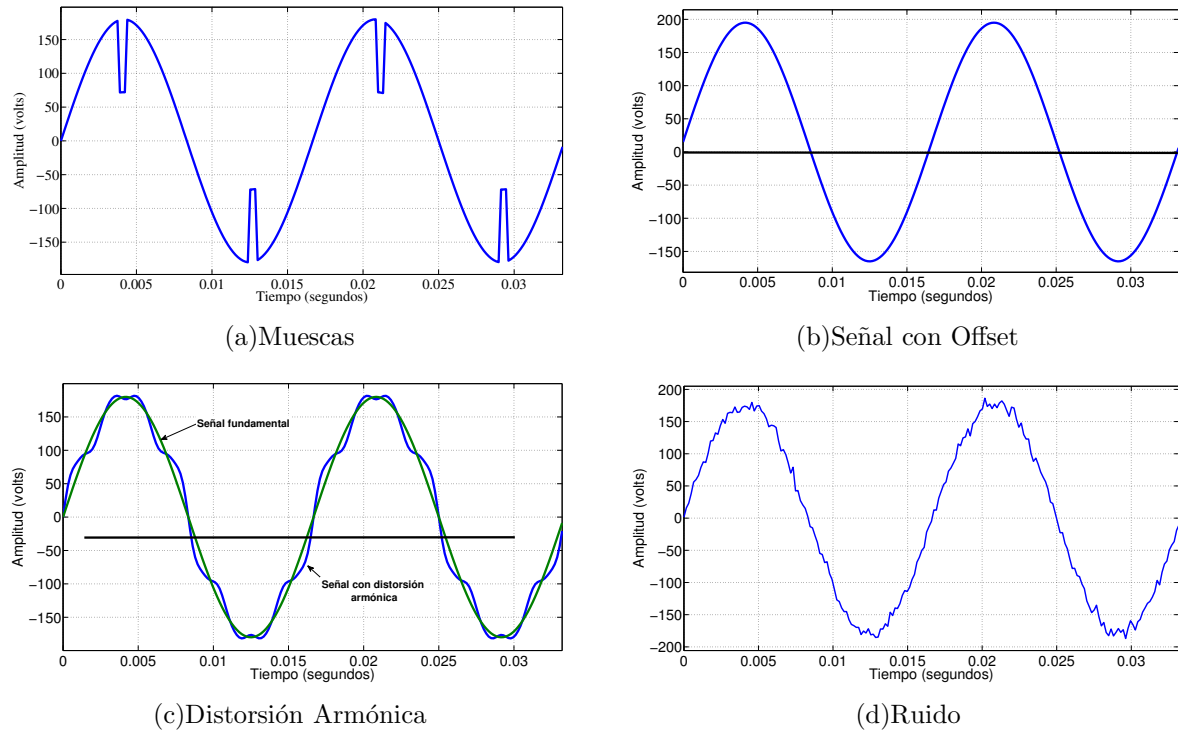


Figura I.2: Distorsiones de Onda.

asociadas con las muescas son bastante altas y pueden no ser fácilmente caracterizadas con equipo de medición normalmente usado para análisis armónico.

Las muescas en el voltaje pueden alterar equipo electrónico y dañar componentes inductivos por su alto nivel de pendiente y el adicional cruce por cero. Las muescas son descritas en [1] y [4].

Offset de Corriente Directa (CD)

El *offset* de CD es la presencia de una señal de CD de voltaje o corriente que se le suma a las señales del sistema de potencia. Este fenómeno puede ocurrir como resultado de perturbaciones geomagnéticas [2] o debido a efectos de rectificadores de media onda. Las señales de corriente directa en sistemas de CA pueden ser perjudiciales debido al incremento en la saturación de los transformadores, al esfuerzo adicional de los aislantes y otros efectos adversos.

Armónicos

Los armónicos son uno de los principales problemas en la red eléctrica. Se representan como voltajes o corrientes sinusoidales con frecuencias enteras y múltiplos de la frecuencia a la que opera la fuente del sistema de potencia (frecuencia fundamental que es usualmente 50 ó 60 Hz). Los armónicos combinados con la señal fundamental del sistema producen una distorsión armónica. Ésta existe debido a las características no lineales de dispositivos y cargas en la red eléctrica. Es causada por equipos basados en electrónica de potencia, por el funcionamiento de máquinas con núcleo magnético y ciertos convertidores estáticos, tales como rectificadores, fuentes conmutadas y otras cargas no lineales, etc.

Los niveles de distorsión armónica pueden ser caracterizados por el espectro armónico completo con magnitudes y ángulos de fase de cada componente individual. La referencia [4] define distorsión armónica total, distorsión de demanda total, etc. En México las especificaciones para los niveles máximos permisibles se encuentran en la especificación CFE L0000-45 [5].

Interarmónicos

Los interarmónicos se presentan cuando el voltaje o la corriente tienen componentes armónicas que no son múltiplos enteros de la frecuencia a la cual opera el sistema de potencia. Estas pueden aparecer como frecuencias discretas o como un espectro de ancho de banda. Las principales fuentes de distorsión de las formas de onda debido a interarmónicos son los convertidores estáticos de frecuencia, ciclo convertidores, hornos de inducción, dispositivos de formación de arco, etc. Los efectos de los interarmónicos no son bien conocidos, pero sus efectos se reflejan en la señal de potencia portadora de línea y se inducen parpadeos visuales en dispositivos tales como tubos de rayos catódicos.

Ruido

El ruido es una señal eléctrica no deseada con un contenido espectral de ancho de banda típicamente menor que 200 kHz, superpuesto al voltaje o corriente del sistema de potencia en los conductores. Básicamente, el ruido consiste en cualquier distorsión no deseada que aparece en las señales de potencia que no puede ser considerado como distorsión armónica o como transitorios. El ruido en sistemas de potencia puede ser causado por dispositivos eléctricos de potencia, circuitos de control, equipos que

producen arcos, cargas con rectificadores en estado sólido, fuentes de alimentación conmutadas. Los problemas de ruido son a menudo agravados por instalaciones de tierra inadecuadas.

I.1.3. Variaciones de Voltaje de Corta Duración

Las variaciones de corta duración se agrupan según se muestra en la Tabla I.3. Se dividen en interrupción, caídas de voltaje (sag o *dips*) e incrementos en el voltaje (swell o *increases*). Las gráficas en la figura I.3 muestran la apariencia de las variaciones de corta duración.

Tabla I.3: Variaciones de Voltaje de Corta Duración

| Categoría | Contenido espectral típico | Duración típica | Magnitud de voltaje típica |
|---|-------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| 3. Variaciones de corta duración | | | |
| 3.1. Instantáneos | | | |
| 3.1.1. Sag | | 0.5 - 30 ciclos | 0.1 - 0.9 pu* |
| 3.1.2. Swell | | 0.5 - 30 ciclos | 1.1 - 1.8 pu |
| 3.2. Momentáneo | | | |
| 3.2.1. Interrupción | | 0.5 - 3 s | <0.1 pu |
| 3.2.2. Sag | | 30 ciclos - 3 s | 0.1 - 0.9 pu |
| 3.2.3. Swell | | 30 ciclos - 3 s | 1.1 - 1.4 pu |
| 3.3. Temporales | | | |
| 3.3.1. Interrupción | | 3 s | <0.1 pu |
| 3.3.2. Sag | | 3 s - 1 min | 0.1 - 0.9 pu |
| 3.3.3. Swell | | 3 s - 1 min | 1.1 - 1.4 pu |

*La cantidad *pu* refiere a por unidad. La cantidad 1.0 *pu* corresponde al 100 %

Interrupciones

Una interrupción ocurre cuando la fuente de voltaje decrementa su valor menos del 0.1 *pu* para un periodo de tiempo menor que 1 minuto. Las interrupciones pueden ser el resultado de fallas en sistemas de potencia, fallas en los equipos o mal funcionamiento de control. Las interrupciones son medidas por su duración ya que la magnitud del voltaje es siempre menor al 10% de su valor nominal.

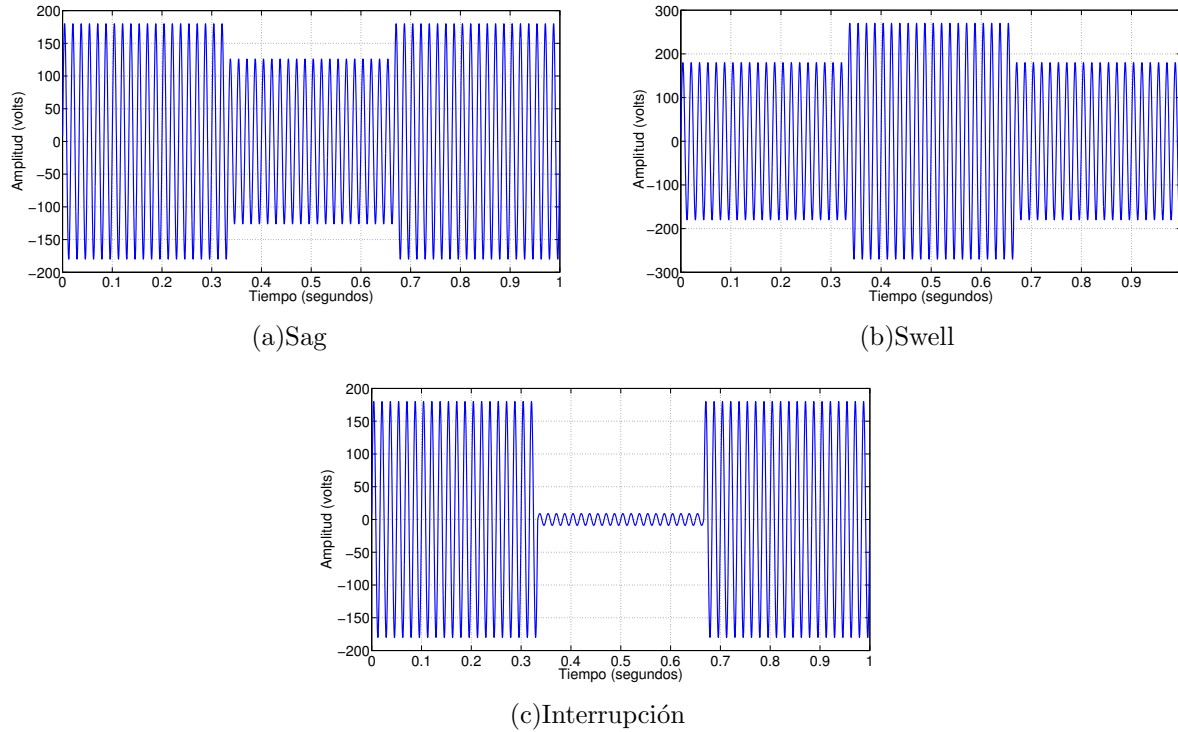


Figura I.3: Variaciones de Voltaje de Corta Duración.

Algunas interrupciones pueden estar precedidas por un sag cuando estas interrupciones se deben a fallas en la fuente de alimentación. El sag ocurre entre el tiempo que una falla inicia y el dispositivo protector opera. En fallas del alimentador, las cargas experimentarán un sag seguido inmediatamente de una interrupción.

Sags

Como se muestra en la Figura I.3, los sags son reducciones (entre el 10% y el 90%) rápidas del voltaje en algún punto del sistema eléctrico con duración mayor a medio ciclo hasta algunos segundos (típicamente 1 minuto). Las caídas de voltaje menores a medio ciclo se consideran como transitorios.

Los sags pueden ser causados por operaciones de conmutación asociada a una desconexión temporal de la fuente, es asociado a flujos de corrientes grandes, con el inicio de motores de gran carga o al flujo de corrientes de falla. La principal causa de los sags momentáneos son probablemente los rayos. En sistemas trifásicos existen 7 tipos de sags desde el Tipo A hasta el Tipo G, su clasificación depende del tipo de falla y de la conexión delta o estrella del transformador, una explicación más detallada puede encontrarse en [6].

Los posibles efectos de los sags son: la operación incorrecta de dispositivos de control, variación de la velocidad, paro de motores o disparo de contactores.

Las posibles soluciones son: el uso de fuentes de potencia ininterrumpibles (de sus siglas en inglés UPS) o acondicionadores de potencia.

Swell

Los swells son breves incrementos en el voltaje que algunas veces acompañan a los sags. Aparecen en la fase sin falla de un sistema trifásico donde se ha desarrollado una falla debida a un corto circuito de otra fase.

Los swells pueden perturbar controles eléctricos y controles para motores, particularmente controladores comunes de velocidad ajustable, los cuales pueden dispararse debido a su circuito de protección incorporados. Los swells también pueden desgastar componentes de computadora y acortar su vida útil.

Las posibles soluciones para limitar este problema son: el uso de UPS o acondicionadores de potencia.

I.1.4. Variaciones de Voltaje de Larga Duración

Las variaciones de larga duración abarcan desviaciones a frecuencia de la red con duración mayor a 1 minuto. Las variaciones de larga duración pueden ser definidas como sobrevoltaje o subvoltaje (“overvoltage” o “undervoltage” por la literatura en inglés), dependiendo de la causa de su variación. Las magnitudes y duraciones se expresan más claramente en la Tabla I.4. Los sobrevoltajes y subvoltajes no son generalmente el resultado de fallas en el sistema. Éstos son causados por variaciones en la carga en el sistema y operación de sistemas de conmutación. Estas variaciones están caracterizadas por gráficas de voltaje contra tiempo.

Interrupción Sostenida

El decremento del voltaje de alimentación menor a 1% del valor nominal por un tiempo mayor a 1 minuto, es considerado como una interrupción sostenida. Una interrupción de voltaje mayor a 1 minuto a menudo es de carácter permanente y requiere

Tabla I.4: **Variaciones de Voltaje de Larga Duración**

| Categoría | Contenido espectral típico | Duración típica | Magnitud de voltaje típica |
|---|-------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| 4. Variaciones de larga duración | | | |
| 4.1. Interrupción sostenida | | <1 min | 0.0 pu* |
| 4.2. Subvoltaje | | <1 min | 0.8 - 0.9 pu |
| 4.3. Sobrevoltaje | | <1 min | 1.1 - 1.2 pu |
| 4.4. Subrecarga de corriente | | <1 min | |

*La cantidad *pu* refiere a por unidad. La cantidad 1.0 *pu* corresponde al 100%

intervención manual para la restauración; es un fenómeno específico del sistema de potencia y no tiene relación con el término “corte” (del inglés *outage*). También el uso de *interrupción* en el contexto de monitoreo de calidad de energía eléctrica no tiene relación con la fiabilidad o continuidad en las estadísticas del servicio [1] y [3].

Subvoltajes

Es un decremento de voltaje menor al 0.9 *pu* con una duración mayor a 1 minuto, con valores típicos de 0.8 y 0.9 *pu*.

Los subvoltajes son el resultado del cambio de carga o de la desconexión de bancos de condensadores, también los equipos de regulación de voltaje en el sistema pueden traer de vuelta al voltaje dentro de las tolerancias mencionadas. Circuitos sobrecargados pueden también provocar subvoltajes.

Sobrevoltaje

Es un incremento de voltaje en CA mayor a 1.1 *pu* con una duración mayor a 1 minuto, con valores típicos de 1.1 y 1.2 *pu*.

Pueden ser el resultado de cambio de carga, como por ejemplo la desconexión de cargas de gran capacidad, de la variación en la compensación reactiva en el sistema. También por una incorrecta configuración en los *taps* en el transformador.

I.1.5. Desbalances

Los desbalances en un sistema trifásico son definidos como la razón de magnitud de la componente de secuencia negativa a la magnitud de la componente de secuencia positiva expresadas como porcentaje. Este concepto puede definirse tanto en voltaje como en corriente. Típicamente el desbalance en voltaje de un servicio trifásico es menor al 3%. El desbalance en corriente puede considerarse mayor, especialmente en la presencia de cargas trifásicas. La Tabla I.5 muestra más claramente las magnitudes de estos desbalances. En [1], [5] y [7] puede encontrarse con más detalle las definiciones y los métodos para calcular los desbalances.

Tabla I.5: Desbalances

| Categoría | Contenido espectral típico | Duración típica | Magnitud típica |
|-----------------------|----------------------------|-----------------|-----------------|
| 5. Desbalances | | | |
| 5.1. Voltaje | | Estado estable | 0.5 - 2% |
| 5.2. Corriente | | Estado estable | 1.0 - 30% |

I.1.6. Fluctuaciones de Voltaje

Las fluctuaciones de voltaje son variaciones sistemáticas sobre el voltaje o una serie de cambios aleatorios en el voltaje, la magnitud de las variaciones no excede los límites especificados en [8] que es de 0.95 *pu* a 1.05 *pu*. Tales fluctuaciones de voltaje pueden ser percibidas por humanos, por ejemplo cambios en la intensidad de iluminación de lámparas. La Tabla I.6 indica las características de esta anomalía según [1].

Tabla I.6: Fluctuaciones de Voltaje

| Categoría | Contenido espectral típico | Duración típica | Magnitud de voltaje típica |
|------------------------------------|----------------------------|-----------------|----------------------------|
| 6. Fluctuaciones de voltaje | <25 Hz | Intermittente | 0.1 - 5% |

Cualquier carga que tiene una variación cíclica significativa, específicamente en los componentes reactivos, puede causar fluctuaciones de voltaje. Las cargas que presentan continuidad de variaciones rápidas de la magnitud de corriente de carga, pueden causar variaciones de voltaje erróneamente referida como *flicker*. El término *flicker* es derivado del impacto de la fluctuación de voltaje en la intensidad de iluminación. La fluctuación de voltaje es un fenómeno electromagnético y *flicker* es un resultado indeseable de ese fenómeno.

I.1.7. Variaciones de la Frecuencia Fundamental

Las variaciones de frecuencia son desviaciones de la frecuencia fundamental del sistema de potencia de su valor nominal especificado (por ejemplo 50 ó 60 Hz). La frecuencia del sistema de potencia en estado estable está directamente relacionada a la velocidad de rotación de los generadores en el sistema. Las variaciones de frecuencia que van más allá de los límites aceptados para la operación nominal en estado estable del sistema de potencia son normalmente causados por fallas en sistemas a gran escala de transmisión de energía, un gran bloque de cargas es desconectado o una gran fuente de generación sale de operación. Las muescas en el voltaje (*notching*), podría producir un adicional cruce por cero y puede causar errores en frecuencia o en la sincronización de sistema. Sin embargo estas no son variaciones en la frecuencia de red.

Tabla I.7: Variaciones de la Frecuencia Fundamental

| Categoría | Contenido espectral típico | Duración típica | Magnitud de frecuencia típica |
|------------------------------|-------------------------------|--------------------|----------------------------------|
| 7. Variaciones de frecuencia | | <10 s | ±10 Hz |

I.2. Factores y Parámetros Descriptivos de la Red Eléctrica

Los factores y parámetros descriptivos de la red eléctrica indican las propiedades con que cuenta una instalación eléctrica, como es el nivel de tensión, corriente y los valores de desviación que proporcionan la información para conocer el estado de la señal real. En general, ayudan a obtener datos para evaluar la calidad de la energía eléctrica en determinado punto de conexión. Los más utilizados se presentan a continuación.

I.2.1. Voltaje Eficaz

El voltaje eficaz es también conocido como voltaje rms (del inglés *root mean square*) que literalmente se traduce como la raíz media cuadrática y se expresa como:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} \quad (I.1)$$

donde, $v(t) = V_p \text{sen } \omega t$ es el voltaje instantáneo, V_p es el voltaje pico, $\omega = 2\pi f$, f es la frecuencia fundamental del sistema, T el periodo a evaluar y t el tiempo.

I.2.2. Corriente Eficaz

La corriente eficaz, al igual que el voltaje, es también conocido como corriente rms que literalmente se traduce como la raíz media cuadrática y se expresa como:

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad (I.2)$$

donde, $i(t) = I_p \text{sen } \omega t$ es la corriente instantánea, I_p es la corriente pico, $\omega = 2\pi f$, f es la frecuencia fundamental del sistema y t el tiempo.

I.2.3. Potencia Activa

De forma tangible, en instalaciones eléctricas se denomina potencia activa a la cantidad de potencia que, para efectos prácticos, está consumiendo el sistema de forma útil, es decir, que produce trabajo. Esta potencia determina la energía que es productiva y que se está aportando a los elementos de la instalación. Es el producto del voltaje y la corriente instantáneos:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) * i(t) dt \quad (I.3)$$

donde P está dada en watts.

I.2.4. Potencia Aparente

Es el resultado del producto del voltaje y la corriente eficaz.

$$S = V_{rms} * I_{rms} \quad (I.4)$$

donde S esta dada en VA (volts amperes).

I.2.5. Potencia Reactiva

En [2] se pueden encontrar diversas definiciones para potencia reactiva y una de ellas es, la potencia reactiva está presente cuando existen cargas inductivas, capacitivas o elementos no lineales en el sistema eléctrico. Esta potencia no representa energía útil que puede ser extraída del sistema, puede incrementar pérdidas y voltajes pico excesivos y su ecuación es:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (\text{I.5})$$

donde Q está dada en VAR (volts amperes reactivos).

I.2.6. Factor de Potencia

Es la relación de consumo en una instalación de CA que existe entre la potencia activa y la potencia aparente:

$$FP = \frac{P}{S} \quad (\text{I.6})$$

donde FP es un valor adimensional.

I.2.7. Distorsión Armónica Total (DAT)

Existen diversas formas de definir este término [2] entre ellas se encuentra, que es la relación de la suma cuadrática de los valores eficaces armónicos de una señal compleja entre el valor eficaz de la fundamental, también se define como la relación (expresada en porcentaje) de la suma de armónicos en valores eficaces de un señal en corriente alterna después de que su fundamental es removida y las componentes interarmónicas de valor eficaz de su fundamental son ignoradas. Las ecuaciones para voltaje y corriente se muestran a continuación.

Voltaje:

$$DAT_V = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \quad (\text{I.7})$$

donde $V_{1,2,\dots,n}$ son valores eficaces y n es el último armónico presente en la señal.

Corriente:

$$DAT_C = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} \quad (\text{I.8})$$

donde $I_{1,2,\dots,n}$ son valores eficaces y n es el enésimo armónico en la señal.

I.2.8. Voltaje Promedio

Es el valor promedio de una señal de voltaje:

$$V_{prom} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt \quad (\text{I.9})$$

I.2.9. Factor de Forma

Este factor representa la deformación de la onda sinusoidal relacionada con el valor eficaz entre el valor promedio de medio ciclo de la señal.

$$FF = \frac{V_{rms}}{V_{prom1/2ciclo}} \quad (\text{I.10})$$

I.2.10. Factor de Pico o Cresta

Este factor representa la deformación de la onda relacionada con el valor máximo entre el valor eficaz de la señal.

$$f_{cresta} = \frac{V_p}{V_{rms}} \quad (\text{I.11})$$

I.2.11. Factor de Curva

Es la relación del valor eficaz de una onda sinusoidal al valor eficaz de su fundamental y en términos de su distorsión armónica se define como:

$$f_{curva} = \sqrt{(1 + DAT^2)} \quad (\text{I.12})$$

I.2.12. Factor de Distorsión Diferencial

El factor de distorsión diferencial es una medida de la desviación de una señal real a una ideal, en la actualidad este factor está fuera de un uso práctico. Los métodos de detección de anomalías que se presentan en esta tesis están basados en la idea de este

factor, la cual es la siguiente: **Cuando una señal varía como función sinusoidal del tiempo, el diferencial de esta señal es función del seno y por tanto tiene la forma de onda igual a la original. Sin embargo, en el caso de una onda irregular, su diferencial está distorsionado. La distorsión de cualquier onda diferencial, comparada con una onda sinusoidal como estándar, podría, por lo tanto, ser tomada como una medida de la distorsión de la onda original.** Más detalles de este factor pueden ser encontrados en [9].

$$\delta = \frac{\left(\frac{dV_{rms}(t)}{dt}\right)}{\left(\frac{dV_{i_{rms}}(t)}{dt}\right)} \quad (\text{I.13})$$

donde V_r es la señal real de voltaje, V_i es la señal de voltaje ideal y t es tiempo.

I.3. Monitoreo de la Energía Eléctrica

Cuando un sitio específico de la red eléctrica de una industria está experimentando problemas con el sistema eléctrico y equipo electrónico por una “supuesta” perturbación en el sistema eléctrico, es necesario obtener evidencia del tipo de perturbación que está ocurriendo en ese sitio. Una parte de esta evidencia consiste en colocar algún instrumento de medición en el sitio de interés por un periodo de tiempo determinado, **al menos** de una semana [5]. Cuando estos problemas se presentan la tarea primordial es mitigar estas perturbaciones identificando las anomalías presentes y de esta manera las causas. Por esta razón es necesario el uso de ACEEP.

I.3.1. Registro y Procesamiento de Datos de un Analizador de Calidad de la Energía Eléctrica Portátil (ACEEP)

Los ACEEP que se tomaron como referencia son [11], [12] y [13]. Sin embargo, existen métodos de registro y procesamiento que se mencionan en esta sección y que no son usados por ACEEP, los cuales también serán abordados para tener un panorama más amplio de los métodos de detección existentes.

Las principales características de los ACEEP son las siguientes:

- Completo control en el registro y análisis en tiempo real de sistemas trifásicos.

- Gran rango de funciones que ayudan a la obtención y registro de datos tales como: tensión eficaz, corriente eficaz, potencia (watts, volt-ampere reactivos y volt-ampere), factor de potencia, energía, análisis armónico, análisis estadístico y detección de anomalías transitorias.
- Cuentan con modos de grabación donde los valores medidos se almacenan en la memoria para análisis posterior.
- Cuentan con modos especiales de registro para la captura de formas de onda con varias opciones de activación.
- Cuentan con modos de registros para el monitoreo de la calidad del sistema de suministro, almacenando datos periódicos, formas de onda, sobretensiones transitorias, grabación rápida, etc.
- Cálculo de los valores mínimos, promedio y máximos para las cantidades registradas, con varios informes con formatos preestablecidos.
- Modos de osciloscopio para la presentación de las formas de onda, tanto en tiempo real como para el análisis de la forma de onda almacenada.
- Análisis de la distorsión armónica, tanto en línea como de los datos registrados.

Los instrumentos que se tomaron como referencia superan el mínimo requerido para el análisis de CEE que pide las recomendaciones de CFE L0000-45 descritas en [5]. A continuación se describen algunas de las características más importantes de estos analizadores.

El procesamiento de los ACEEP se lleva a cabo con métodos de mediciones basado en el muestreo de las señales de voltaje y corriente. El periodo de muestreo depende del analizador de calidad de energía. El procesamiento de los datos está enfocado según el tipo de anomalía o parámetro que se desee registrar. Los procesamientos que se tratarán en esta tesis son:

- Procesamiento en estado estable.
- Procesamiento para transitorios.

Procesamiento en Estado Estable (o registro periódico)

La forma de procesamiento de los datos capturados está basada principalmente en el método RMS [3], [11], [12] y [13]. Que es básicamente el cálculo de valores eficaces los cuales son usados para el análisis posterior.

En este registro se almacenan datos en estado estable tales como voltajes y corrientes eficaces, potencias, energía, factor de potencia, distorsión armónica, etc. Para lograr lo anterior las señales son evaluadas en un procesador digital y de esta manera se hacen los cálculos necesarios para registrar los valores en estado estable. Para realizar los cálculos se definen los siguientes términos:

- Periodo de cálculo (PC), tiene una duración de 1 hasta 10 ciclos, de la onda (dependiendo del instrumento de medición) bajo estudio a frecuencia fundamental de la red (50 ó 60 Hz). En este periodo se toma un número determinado de muestras.
- Periodo de integración (PI), el tiempo de duración de este periodo se define por el usuario y puede ir desde 1 segundo hasta 15 minutos (dependiendo de la configuración de ACEEP).

En los cálculos realizados se consideran mediciones fase-neutro y en cada PC son los siguientes:

Para voltaje se realiza:

$$U = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i^2} \quad (\text{I.14})$$

donde, U es el voltaje en valor eficaz, N es el número de muestras tomadas en un PC, i es el número de muestra y u es la señal de voltaje muestreada.

Para la corriente:

$$I = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N i_i^2} \quad (\text{I.15})$$

donde, I es la corriente en valor eficaz y i_i es la señal muestreada de corriente.

Para la potencia activa:

$$P = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u_i * i_i) \quad (\text{I.16})$$

donde P está dada en watts.

Para la potencia aparente por fase se tiene:

$$S = U * I \quad (\text{I.17})$$

donde S está dada en volts amperes.

Para la potencia reactiva:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (\text{I.18})$$

donde Q está dada en volts amperes reactivos.

El factor de potencia:

$$FP = \frac{P}{S} \quad (\text{I.19})$$

donde FP es un valor adimensional.

Un PI contiene un conjunto de valores obtenidos de los cálculos de cada PC. Al final de un PI se registran los valores máximos, mínimos y promedio de los cálculos realizados.

Al analizar las ecuaciones anteriores, es evidente que no es posible detectar anomalías menores a un PC de duración. No obstante, el ACEEP comercial permite hacerlo modificando la configuración de cálculo a fin de realizar exclusivamente la detección de estas anomalías transitorias. Lo anterior implica que no es posible tener ambas configuraciones operando de forma simultánea para identificar las anomalías de interés. En el Capítulo 3 se presentan algunos ejemplos.

También, se realizan procesos adicionales para obtener los armónicos de tensión y de corriente utilizando la transformada rápida de Fourier (TRF) [3], además la caracterización de sags y swells son en estado estable por lo tanto el método RMS también es utilizado [6].

Procesamiento para Transitorios

Los manuales de funcionamiento de analizadores de CEE que se tomaron como referencia utilizan el procesamiento de datos para transitorios que a continuación se explican:

- La referencia [11] indica que este tipo de perturbaciones se pueden detectar a la frecuencia de muestreo más alta con la que cuenta el instrumento, que es de hasta 25 kHz. En este modo de funcionamiento se almacenan hasta 1000 valores muestreados en un ciclo de red a una frecuencia fundamental de 50 Hz. Lo que indica una gran capacidad de detección de transitorios, pero, para lograr lo anterior es necesario que las otras entradas de voltaje y corriente (en un sistema trifásico) no sean tomadas en consideración para el análisis, es decir, para alcanzar la frecuencia más alta de muestreo únicamente se considera una señal de entrada.

Para la activación del método de detección de transitorios se necesitan conocer ciertas características de la señal objeto de estudio, es decir, se pueden establecer los límites de detección mediante el nivel momentáneo que alcance la señal, su pendiente o de forma manual, además se debe elegir el canal de entrada a analizar. Lo anterior indica que se debe tener un conocimiento previo aproximado de las características de las anomalías para poder establecer el nivel o bien la pendiente. Es común indicar los umbrales de detección mediante valores eficaces de la señal, lo cual es lo más fácil y conveniente, pero la desventaja es que el registro también es en valor eficaz y no se conoce la amplitud mayor del transitorio.

- El método de detección utilizado por [12] expresa lo siguiente: “durante cada ciclo, son detectadas señales entre 10 y 100 kHz mediante la comparación de cualquiera de sus tres canales de voltaje, si su amplitud excede $\pm 70.7\%$ del voltaje pico”. Dicho de otra forma, el método de detección está basado en la comparación de la señal objeto estudio y si excede el límite establecido (que se considera fijo) el registro en el instrumento serán los siguientes datos:

- ▷ Número de evento,
- ▷ Fecha de ocurrencia,
- ▷ Tiempo de ocurrencia, y
- ▷ Tipo de evento.

Y el registro que se obtiene, si así se desea, es la forma de onda de la señal. Pero en un sistema muy perturbado con transitorios, el registro y análisis de todas las formas de onda es muy extenso y con gran requerimiento de memoria. El parámetro de comparación puede estar también perturbado ya que es también un canal de entrada del sistema.

- Los métodos utilizados por [13] son:
 - ▷ Diferencia de valor eficaz. El límite es constante y debe ser superior al valor pico de la señal de voltaje.
 - ▷ Factor cresta. Utiliza el absoluto del factor cresta obtenida para cada ciclo.
 - ▷ Captura de formas de onda. La forma de detección, es comparar una muestra tomada con la muestra correspondiente del ciclo anterior, si la diferencia en amplitud y tiempo sobrepasa los límites establecidos, se guarda el ciclo de onda correspondiente.
 - ▷ Impulsos de alta frecuencia. Puede detectar impulsos menores a $1 \mu\text{s}$ pero para esto, es necesario un circuito especial para realizar esta tarea en específico.

Este analizador muestra gran posibilidad para la detección de transitorios, aunque al igual que los otros dos el inconveniente se encuentra en que registran el ciclo completo, además, la detección es muy dependiente del usuario ya que se debe encontrar el factor de cresta o valor eficaz adecuados para realizar una mejor detección.

La detección de transitorios es muy similar en los tres casos, pero más que una buena detección, es importante simplificar el trabajo a los usuarios y para ello se presentan nuevos métodos en el siguiente capítulo.

I.3.2. Otros Métodos de Procesamiento para Transitorios y otras Anomalías

Además de los métodos utilizados en los ACEEP antes mencionados, en la literatura técnica también se han presentado diferentes clases de algoritmos que permiten detectar casi cualquier clase de distorsión de la forma de onda sinusoidal. Estos algoritmos son usados para extraer y describir las características de una anomalía, y de esta forma lograr clasificarlas como perturbaciones de CEE. Los algoritmos más usuales son lógica

difusa basado en la transformada S [1] y [14], redes neuronales [15], sistemas expertos difusos [16] y sistemas expertos basados en ondeletas [14] y [17].

En [18] se presenta un software como una herramienta llamada “Análisis Inteligente de Perturbaciones de Calidad de la Energía Eléctrica” (IPQDA por sus siglas en inglés). La principal característica de este software es que incluye análisis de perturbaciones de forma de onda, clasificación de varios tipos de perturbaciones de CEE y notificaciones de una perturbación vía e-mail, mensaje de texto o da alguna alerta en el momento de identificar la anomalía. Este trabajo utiliza técnicas tales como código predictivo lineal y técnicas de la transformada de Fourier para la detección y para la tarea de clasificación se desarrollaron reglas basadas en sistemas expertos. Los resultados son generados en ventanas de tiempo frecuencia y frecuencia amplitud. Los resultados presentados en este trabajo, muestran gran confiabilidad.

Al igual que en [18], [19] presenta detección de transitorios utilizando transformada ondeleta apoyado con filtros digitales, con resultados en ventana tiempo frecuencia; por lo tanto el análisis posterior a la detección debe ser en espacios tiempo frecuencia.

Las ondeletas detectan muy bien transitorios; sin embargo, suelen fallar en el caso de variaciones cortas y largas (tales como sags y swells, especialmente si no tienen forma rectangular). También, para detectar toda clase de transitorios se requiere de descomposiciones de gran escala hasta el 4° o incluso el 6° nivel de la ondeleta [20] y [21], lo que incrementa sustancialmente el esfuerzo computacional; y por lo tanto, el costo asociado a su programación.

El análisis basado en la transformada ondeleta y redes neuronales [22], genera buenos resultados en el dominio tiempo frecuencia debido a la complejidad del análisis proporcionada por las ondeletas. Para completar la extracción de los transitorios se utilizan parámetros de redes neuronales y así tener una buena convergencia. Se generan diferentes métodos de procesamiento para diferentes casos, estos procesamientos son complejos y se tiene que calcular factores y estimar algunos valores para la convergencia de las ecuaciones. Los resultados presentados por [22] son excelentes, siempre y cuando el método utilizado (y que es generado con las ondeletas y redes neuronales) sea el adecuado. Es decir, cada método se aplica en un caso específico. Este algoritmo presenta dificultades en la presencia de ruido; por lo tanto, se recomienda mitigarlo antes de procesar la señal.

El trabajo desarrollado en [23] muestra una gran variedad de perturbaciones que se pueden detectar, el inconveniente es que se necesita un procesamiento múltiple de las señales de entrada ya que se utilizan 6 algoritmos diferentes entre los cuales están la transformada rápida de Fourier, transformada discreta de Fourier, ondeletas, métodos estadísticos, periodo-gramas y redes neuronales artificiales. Para el caso de identificación de transitorios eléctricos, se utilizan las ondeletas; y las redes neuronales artificiales para determinar su amplitud. Los inconvenientes presentados en esta referencia son similares a los presentados en [22] y a que la complejidad de este algoritmo lo hace computacionalmente costoso y el programador debe contar con una amplia experiencia.

Las morfologías matemáticas (MM) es otro método utilizado para el análisis de CEE, su desventaja según [24], es que utiliza elementos y estructuras predefinidas; por lo tanto, puede tratar sólo algunas señales. En otras palabras las MM debe usar una estructura definida para cada señal de interés, también requieren de ajustes en coeficientes y ganancias haciéndose dependiente de la selección de estos parámetros y tiene dificultades con el procesamiento del ruido. Es por eso que se desarrolló mejoras a las morfologías matemáticas (IMM, del inglés *Improved Mathematical Morphology*) [25] que incorporan el método de valores RMS; sin embargo, éste tiene limitaciones en clasificar distorsiones específicas en las formas de onda ya que es necesaria la sintonización de un filtro digital incluido en el algoritmo. Además, el método IMM también utiliza algunos elementos y estructuras predefinidas y utiliza una combinación ponderada auto adaptativa lo que lo hace aún más complejo. Este método tiene inconvenientes en los cruces por cero.

A pesar de que los métodos y algoritmos mencionados generan, excelentes resultados para la detección de transitorios en algunos casos, no se indica el enfoque de estos algoritmos. Ya que la cantidad de requerimiento computacional que necesitan es elevada para el procesamiento, es poco viable aplicar alguno de estos métodos y/o algoritmos a los ACEEP. De los métodos de más aceptación se encuentra la transformada ondeleta, pero falla en la presencia de sags y swell y la carga computacional es significativa [25] ya que el algoritmo utilizado es muy complicado [24]. Por otro lado los métodos basados en la medición de voltajes eficaces no pueden detectar transitorios debido a que durante un transitorio el valor eficaz puede no cambiar significativamente [25].

I.4. Discusión del Capítulo

Los métodos de detección de transitorios, como se mencionó, para ACEEP son diversos, entre los que se encuentran el valor momentáneo de la señal, pero en algunos casos el impulso no supera el valor pico del voltaje (siempre y cuando se presente en un ángulo eléctrico cercano a cero). Otra forma es la derivada, pero la detección usando la derivada puede ser difícil de precisar. También es complicado detectar los impulsos con la opción manual debido a la frecuencia del sistema. Además de los inconvenientes anteriores, se debe elegir el canal por el cual se desea detectar la anomalía.

Para otros ACEEP, la detección de transitorios es dependiente de la comparación de los tres canales de entrada, el inconveniente que se encuentra en este método, es, que en un sistema con distorsión armónica o cualquier otra perturbación puede afectar la comparación de dichas señales, además, para sistemas monofásicos la comparación no se lograría.

En este sentido, un método que puede tener buenos resultados es el factor cresta, pero su desventaja es que se necesita tener un valor eficaz calculado (lo que se lleva tiempo de procesamiento) para así hacer la división respectiva y el valor en el numerador del factor cresta puede ser siempre el valor pico del voltaje ya que el impulso puede no superar este valor. Con mejor resultado, se encuentran instrumentos dedicados especialmente a la detección de transitorios, pero todos los datos como valores eficaces, DAT, análisis de energía, etc. no serían registrados para un análisis posterior.

Ya que las muescas en el voltaje pueden presentarse como transitorios o como perturbaciones en estado estable ([1] y [3]), los analizadores de calidad de energía eléctrica portátiles no contemplan de manera significativa la detección de estas anomalías, por su compleja detección.

Los métodos presentados en la sección I.3.2 generan, según lo indica la literatura, excelentes resultados, pero el costo es procesamiento y cálculos muy complejos lo que incrementa sustancialmente los requerimientos digitales del instrumento. Además, la literatura no precisa el enfoque de estos métodos para ACEEP.

Diseño de un Algoritmo de Detección de Impulsos y Muestras Eléctricas

En este capítulo se presentan dos métodos para la detección y aislamiento de anomalías transitorias de tensión, los cuales están basados en un factor derivativo instantáneo auxiliado con operaciones simples como es la división y la resta. La propuesta de estos factores proviene de las técnicas de caracterización de señales de corriente alterna propuestas por el físico Frederick Bedell en [9].

II.1. Detección y Aislamiento de las Anomalías Transitorias

La primera propuesta para la detección y aislamiento de anomalías transitorias a través del factor derivativo tiene como operaciones base una resta y una derivada. Además, tiene como cualidades discriminar las perturbaciones en estado estable tales como ruido, distorsión armónica, sags y swell de las perturbaciones transitorias como es un impulso y una muesca en el voltaje.

II.1.1. Desarrollo del Algoritmo y Primer Factor Derivativo

Sea $f_i(t)$ una función ideal continua dependiente del tiempo y que representa una señal de tensión definida como:

$$f_i(t) = V_p \text{sen}(\omega t) \quad (\text{II.1})$$

donde V_p es el voltaje pico, $\omega = 2\pi f$, f es la frecuencia y t es el tiempo.

Considérese una señal de voltaje no ideal definida como:

$$f_r(t) = f_i(t) + f_h(t) \quad (\text{II.2})$$

donde $f_h(t)$ se considera como una perturbación desconocida. Por el enfoque de este trabajo, la función $f_h(t)$ puede ser considerada como cualquier perturbación en el voltaje tales como distorsión armónica, sags, swells, impulsos, muescas, etc. o una combinación de las mismas.

La forma discreta de las ecuaciones (II.1) y (II.2) es de la siguiente manera:

$$f_i[n] = f_i(nT) \quad (\text{II.3})$$

$$f_r[n] = f_r(nT) \quad (\text{II.4})$$

donde nT es la discretización de t , T es el periodo de muestreo y n es la muestra actual.

La idea principal es conocer la desviación de la señal real con respecto a la ideal, específicamente su duración y su amplitud. Partiendo de la definición de la derivada, ésta proporciona información de la relación de cambio de una variable con respecto a otra en un instante particular, esto se denomina información local. De forma general, para obtener la derivada de una función $f[n]$ se utilizan límites [26], entonces:

$$\frac{df[n]}{dn} = \lim_{t_0 \rightarrow T} \frac{f[n] - f[n-1]}{t_0} \quad (\text{II.5})$$

donde t_0 es el tiempo entre una muestra y otra.

Se propone el siguiente procedimiento para la primera propuesta:

$$V_f[n] = f_r[n] - f_i[n] \quad (\text{II.6})$$

entonces:

$$V_f[n] = f_h[n] \quad (\text{II.7})$$

$V_f[n]$ en (II.7) indica el voltaje excedente o faltante que perturba a la señal ideal.

Para determinar si el voltaje es excedente o faltante se evalúan cuatro condiciones, siendo la primer condición (C1):

si $|f_i[n]| > |f_r[n]|$ entonces $V_f[n]$
 es negativo, esto es,
 $V_f[n] = -|f_h[n]|$
 Indica voltaje faltante.

En caso contrario se evalúa la segunda condición (C2):

si $|f_i[n]| < |f_r[n]|$ entonces $V_f[n]$
 es positivo, esto es,
 $V_f[n] = |f_h[n]|$
 Indica voltaje excedente.

El margen de sensibilidad de este método de detección se puede ajustar (como ejemplo) a los umbrales establecidos en magnitud y duración por la curva ITIC (CBEMA) [3] mostrada en la figura II.1, esta está en función de porcentajes de valores nominales, para los métodos propuestos se considera los valores pico y así determinar el evento ocurrido.

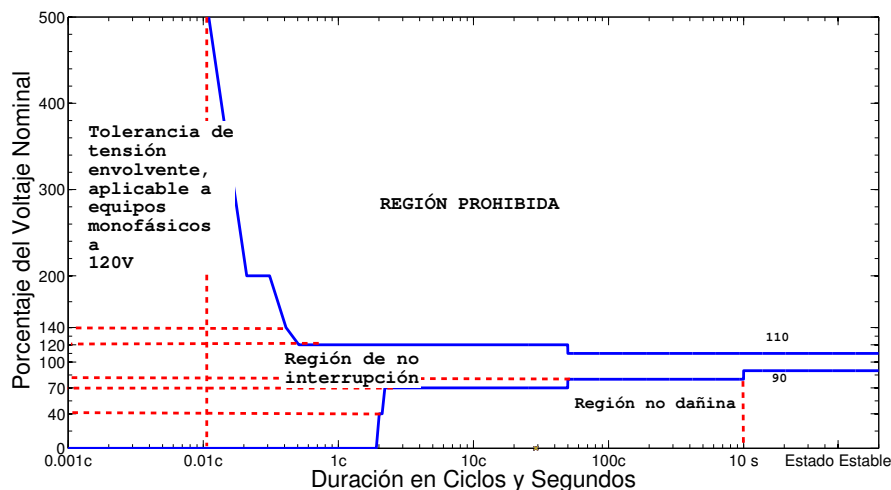


Figura II.1: Curva ITIC (CBEMA).

Con el umbral superior definido como “*limit_sup*” y el inferior como “*limit_inf*” se realiza la tercera condición (C3):

si $V_f[n] > limit_sup$
 entonces la detección de datos
 inicia, registrándose como excedente.
 si $V_f[n] < limit_inf$
 entonces la detección de datos
 inicia, registrándose como faltante.

Con base en lo anterior, si $V_f[n]$ excede los umbrales de operación permitidos (o establecidos por el usuario), entonces inicia el procesamiento de datos y así del evento. Además, debe considerarse que los umbrales establecidos son iguales en amplitud pero de signo contrario, es decir:

$$limit_sup = -limit_inf$$

El proceso anterior no discrimina perturbaciones de estado estable de las transitorias. Es decir, pueden existir falsas alarmas debidas a armónicos que activen el registro de datos y que no sean anomalías transitorias. Lo anterior significa que esta parte del método identifica anomalías pero no las aísla.

Para abordar este problema y tener un proceso de aislamiento de las anomalías transitorias de las de estado estable, se propone el factor derivativo dado en (II.8). Este factor derivativo está normalizado con respecto a la frecuencia fundamental de la red eléctrica, ya que una derivada respecto al tiempo implica una multiplicación de la amplitud por la frecuencia, lo que provoca obtener valores de gran magnitud, lo que tendría como resultado una posible saturación del procesador digital, una segunda causa de la normalización es, que, al tener una señal libre de perturbaciones, el factor derivativo sería muy similar en amplitud a la señal original.

$$fed_1[n] = \frac{1}{\omega} \frac{dV_f[n]}{dn} \quad (II.8)$$

Es importante considerar que para obtener la derivada de la señal se utilizan límites, como se mostró en la ec (II.5)

$$fed_1[n] = \frac{1}{\omega} \lim_{t_0 \rightarrow T} \frac{V_f[n] - V_f[n-1]}{t_0} \quad (II.9)$$

II.1.2. Consideraciones de la Primera Propuesta

Los umbrales denominados “*limit_inf*” y “*limit_sup*” son utilizados para la identificación de eventos anómalos en las señales de voltaje, pero para la discriminación y

aislamiento obtenida con (II.8) es necesario generar nuevos umbrales, los cuales deben estar relacionados con el proceso que lleva este aislamiento y para esto se proponen las siguientes ecuaciones considerando la definición de límites para la derivada y la normalización:

$$\text{limit_sup_fed}_1 = \frac{1}{\omega} \frac{\text{limit_sup}}{t_0} \quad (\text{II.10})$$

$$\text{limit_inf_fed}_1 = \frac{1}{\omega} \frac{\text{limit_inf}}{t_0} \quad (\text{II.11})$$

Por último, es necesario proponer la cuarta condición (C4), ésta es para el registro del impulso o de la muesca eléctrica:

si $\text{fed}_1[n] > \text{limit_sup_fed}_1$
 entonces el registro de datos
 inicia, registrándose como impulso.
 si $\text{fed}_1[n] < \text{limit_inf_fed}_1$
 entonces el registro de datos
 inicia, registrándose como muesca.

El proceso mostrado hasta el momento está dedicado al análisis de la amplitud ya que es ahí donde se genera el principal problema de detección y aislamiento. Para la consideración del duración, se toma en cuenta el tiempo que la anomalía supera los umbrales establecidos para acotar las anomalías transitorias en duración y así tener completo el aislamiento.

II.2. Detección de las Anomalías Transitorias:

La segunda propuesta está enfocada sólo a la detección de anomalías transitorias y tiene como operación básica una división y el desarrollo es el siguiente.

II.2.1. Desarrollo del Algoritmo y Segundo Factor Derivativo

De la misma manera que la primera propuesta, la idea principal es conocer la desviación de la señal real con respecto a la ideal, específicamente su duración y su amplitud.

Además, para este desarrollo es necesario considerar las ecuaciones (II.1) a (II.5). Partiendo de éstas, se define la siguiente ecuación:

$$fed_2[n] = \frac{\frac{df_r[n]}{dn}}{\frac{df_i[n]}{dn}} \quad (II.12)$$

Tomando en consideración (II.5), el segundo factor derivativo se define como:

$$fed_2[n] = \frac{f_r[n] - f_r[n - 1]}{f_i[n] - f_i[n - 1]} \quad (II.13)$$

Para evitar las divisiones por valores cercanos a cero o cero, se agrega un OFFSET a las derivadas, es decir:

$$fed_2[n] = \frac{f_r[n] - f_r[n - 1] + OFFSET}{f_i[n] - f_i[n - 1] + OFFSET} \quad (II.14)$$

para asegurar que el OFFSET evite los cruces por cero en las simulaciones, se considera un OFFSET lo suficientemente grande para que la señal completa incluyendo los transitorios estén por encima de cero, como se muestra a continuación:

$$OFFSET \geq \eta * V_p \quad (II.15)$$

donde η es un número real positivo tal que se asegure que los valores obtenidos en fed_2 sean siempre positivos.

II.2.2. Consideraciones de la Segunda Propuesta

Ya que la derivada proporciona información local en un punto de interés de una determinada señal, al derivar la señal real con perturbaciones como impulsos o muestras eléctricas la señal resultante en $\frac{df_r(t)}{dt}$ (en su forma continua) se verá en gran parte afectada debido a que estas anomalías tienen un cambio abrupto en la señal y la derivada de un cambio abrupto genera un valor muy grande (este resultado se mostrará en las simulaciones del capítulo siguiente). La división con respecto a la derivada de la señal ideal sirve entonces para tener una comparativa instantánea de las variaciones de una señal ideal y una real. La amplitud de esta división diferente a la unidad mostrará la intensidad de la perturbación.

El estado ideal que se puede considerar, es cuando las señales cumplen $f_r(t) = f_i(t)$ (en su forma continua) lo que indicaría una señal libre de perturbaciones y el valor

obtenido sería:

$$fed_1(t) = 1 \quad (\text{II.16})$$

en otras palabras, el estado ideal de la señal será indicado por 1, entre más lejano esté $fed_1(t)$ de 1 mayor será el grado de severidad del transitorio.

Por otro lado, el valor obtenido por la ecuación (II.14) puede ser asociado a la magnitud real del impulso, para esto, es posible utilizar la herramienta computacional (si así se desea) “fit” de MATLAB la cual genera una ecuación basada en aproximaciones, dicha ecuación es dependiente del ángulo eléctrico en el cual suceda el impulso; por lo tanto, existe un número de ecuaciones igual al número de muestras por ciclo de la señal.

Este factor presenta una buena opción para detección de anomalías transitorias, en especial para un impulso eléctrico. Su principal ventaja y aportación es que en la presencia de cualquier perturbación en la señal de voltaje el factor cambiará de su valor ideal (que es 1) indicando la existencia de un comportamiento anómalo en la red eléctrica y principalmente si se trata de un impulso eléctrico su cambio será muy evidente, debido a la derivada del cambio abrupto producida por un impulso eléctrico.

II.3. **Discusión del Capítulo**

Estos algoritmos están pensado para programarse en un ACEEP para la medición de señales de voltaje; por lo tanto, una ventaja importante es que su programación en un procesador digital es relativamente simple, además de que no requiere recursos digitales grandes comparado con los mencionados en la Sección I.3.2.

Otra ventaja de los métodos propuestos es que el tiempo de muestreo requerido para el procesamiento en estado estable utilizado es el mismo; por lo tanto, no se tendrá que modificar la configuración en un ACEEP.

Los factores propuestos básicamente son derivadas en función del tiempo y en teoría la derivada de funciones con altas frecuencias generan valores muy grandes. Pero las propuestas varían con respecto a $\frac{dv}{dt}$ en donde dt es dependiente del tiempo de muestreo; es decir, para que exista una derivada de gran valor (que supere los umbrales

establecidos) es necesario un cambio dv de gran valor y no propiamente una DAT o un armónico de valor significativo.

Por otro lado, las perturbaciones como lo son las variaciones de voltaje de corta y larga duración (sag y swell) tienen como principal característica la variación de su amplitud, lo cual generaría activación en las alarmas en C3, para la primer propuesta es por eso que es necesaria la etapa de aislamiento. Debido a esto, es necesario conocer más detalles de las propuestas realizadas y así tener conocimiento de las limitaciones que éstas tienen al presentarse en diferentes situaciones, es por ello que en el Capítulo III se presentan simulaciones descriptivas de ambas propuestas.

Capítulo III

Evaluación del Algoritmo

Para conocer de manera clara el proceso que es llevado a cabo con los métodos de detección y aislamiento de anomalías transitorias propuestas, es necesario mostrar paso a paso la manipulación que se le aplica a la señal de interés. Del mismo modo, en este capítulo se indica cuál es el límite de detección, los problemas y limitaciones que presentan.

Las características de las señales que permanecen constantes en las simulaciones de este capítulo son:

Tabla III.1: **Parámetros Constantes de Simulación**

| | |
|----------|---------------|
| PC | 1 ciclo@60Hz |
| PI | 1 segundo |
| T | $130.21\mu s$ |
| I_p | 30 amperes |
| V_p | 180 volts |
| FP | 0.9 |
| f | 60 Hz |
| t_0 | $130.21\mu s$ |
| ω | $2\pi f$ |

el voltaje y la corriente de forma sinusoidal con las anomalías que se indica en cada sección.

Todas las simulaciones son hechas en la plataforma computacional MATLAB 2010b.

III.1. Análisis de Potencias y Valores Eficaces

La potencia consumida por sistemas eléctricos varía dependiendo de muchos factores y para el enfoque de esta tesis, se analiza el consumo de potencia en presencia de transitorios. Para este análisis se consideran dos situaciones, el caso con señales *sin* perturbaciones transitorias y el caso *con* perturbaciones transitorias. De esta manera se genera un panorama del alcance que pueden llegar a tener dichos transitorios en términos de potencias y valores eficaces y la importancia de detectarlos adecuadamente.

Las ecuaciones y el procesamiento que se utilizaron en las simulaciones para los cálculos son los indicados en [11] y en las Secciones I.2 y I.3. En otras palabras, los resultados mostrados son los que un ACEEP registra, como son valores máximos, promedios y mínimos de voltajes, corrientes y potencias.

III.1.1. Señales sin Perturbaciones Transitorias

En la figura III.1 se muestra la simulación de las señales de voltaje y corriente en su forma de onda ideal, con las características antes mencionadas.

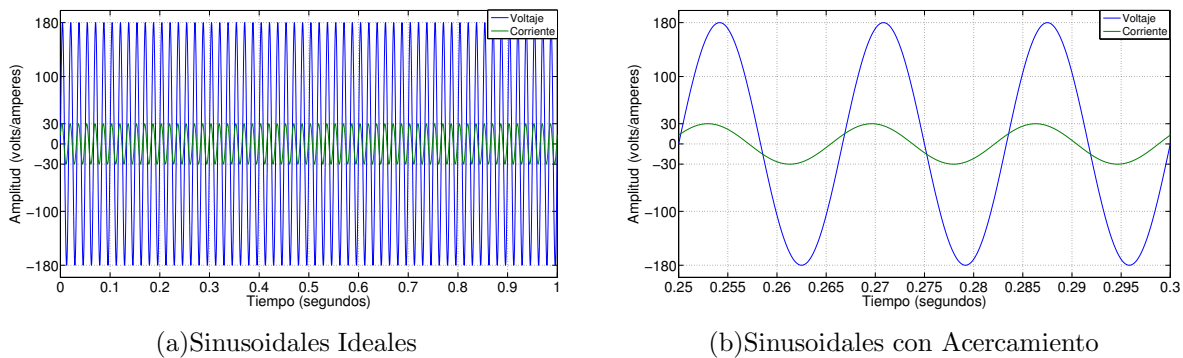


Figura III.1: Señales de Voltaje y Corriente.

Los valores calculados y procesados son los que se muestran en la tabla III.2. Como se observa, los valores eficaces obtenidos corresponden a los valores pico supuestos inicialmente. Los valores en las columnas de máximo, promedio y mínimo son iguales debido a que las señales simuladas tienen la forma sinusoidal ideal; y por lo tanto, los PC son iguales y debido a esto el registro de estos valores será el mismo.

Tabla III.2: Cálculo de Valores Eficaces, Caso Ideal

| | Máximo | Promedio | Mínimo |
|---------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Voltaje eficaz | 127.2792 | 127.2792 | 127.2792 |
| Corriente eficaz | 21.2132 | 21.2132 | 21.2132 |
| Potencia Activa | 2430.0316 | 2430.0316 | 2430.0316 |
| Potencia Aparente | 2700.0000 | 2700.0000 | 2700.0000 |
| Factor de potencia | 0.9000 | 0.9000 | 0.9000 |
| DAT de voltaje (%) | 0.0000 | 0.0000 | _____ |

III.1.2. Señales con Perturbaciones Transitorias

Las perturbaciones transitorias que se consideran para esta sección son, transitorio impulsivo y muesca eléctrica. Las señales de voltaje son afectadas por los transitorios, como consecuencia, la corriente es afectada al momento que la señal de voltaje cambia sus características, pero los cambios en la señal de corriente están relacionadas con la carga, debido a que la respuesta puede ser muy dependiente a la carga y es laborioso generar una respuesta para cada posible situación de carga en simulaciones, se suponen el mismo cambio en la señal de corriente.

Transitorio Impulsivo

Las características que se consideraron para el impulso son: amplitud máxima de 57.83 volts y con una duración de 2.1ms. La figura III.2 muestra ambas señales con el impulso eléctrico. Y la tabla III.3 muestra el cálculo de potencias y valores eficaces.

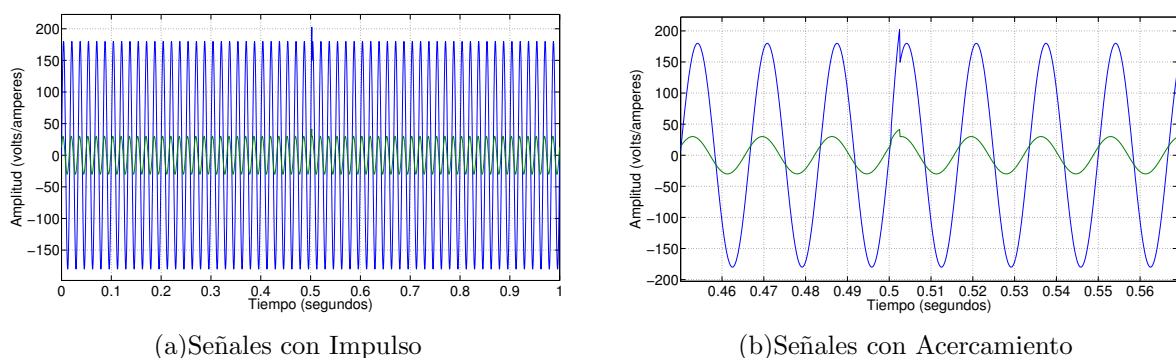


Figura III.2: Señales con Impulso

Tabla III.3: Cálculo de Valores Eficaces, Caso con Impulso

| | Máximo | Promedio | Mínimo |
|---------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Voltaje eficaz | 127.7479 | 127.3573 | 127.2792 |
| Corriente eficaz | 21.3907 | 21.2428 | 21.2132 |
| Potencia Activa | 2459.4608 | 2434.9364 | 2430.0316 |
| Potencia Aparente | 2732.6124 | 2705.4354 | 2700.0000 |
| Factor de potencia | 0.9000 | 0.9000 | 0.9000 |
| DAT de voltaje (%) | 0.0000 | 0.0000 | ———— |

Al observar la figura III.2 (a), se puede observar que el impulso es poco notorio y como se explicó en el capítulo anterior, algunos ACEEP tienen la opción de detección manual de eventos en tensión utilizando el modo osciloscopio como apoyo. Si se configura una ventana de tiempo más pequeña como la mostrada en III.2 (b) que es donde se logra observar el impulso con más detalle, sería poco viable, esto debido a la frecuencia natural del sistema y a la muy alta “velocidad” de los impulsos. Y por lo tanto sería nula la visualización de estos transitorios y por consecuencia su detección.

Al comparar las tablas III.2 y III.3 se observa que los cambios en valores eficaces máximos no son muy significativos, si se considera su efecto en la facturación, pero para equipos electrónicos que son sensibles a cambios en el voltaje, el impulso mostrado podría ser muy dañino. Por otro lado, la detección de transitorios y/o eventos en la tensión se logra a través de la configuración de los umbrales en valor eficaz, lo cual no es muy conveniente, esto debido a que el voltaje eficaz máximo mostrado en la tabla III.2 difiere muy poco en relación al valor mínimo, por lo que se asumiría que el registro es adecuado. Sin embargo, al observar el valor del impulso en la figura III.2 (b) el valor pico alcanzado es de 202.4083 volts comparado con el voltaje pico ideal que es de 180 volts se obtiene un 12.449 % del voltaje pico ideal siendo este un valor considerablemente alto.

Muestras Eléctricas en el Voltaje

Las características que se consideraron para la muesca son: amplitud máxima de 57.84 volts, con una duración de 2.1ms y en los mismos ángulos eléctricos del voltaje y la corriente en donde se aplicó el impulso. La figura III.3 muestra ambas señales con las muescas eléctricas. Y la tabla III.4 muestra el cálculo de potencias y valores eficaces.

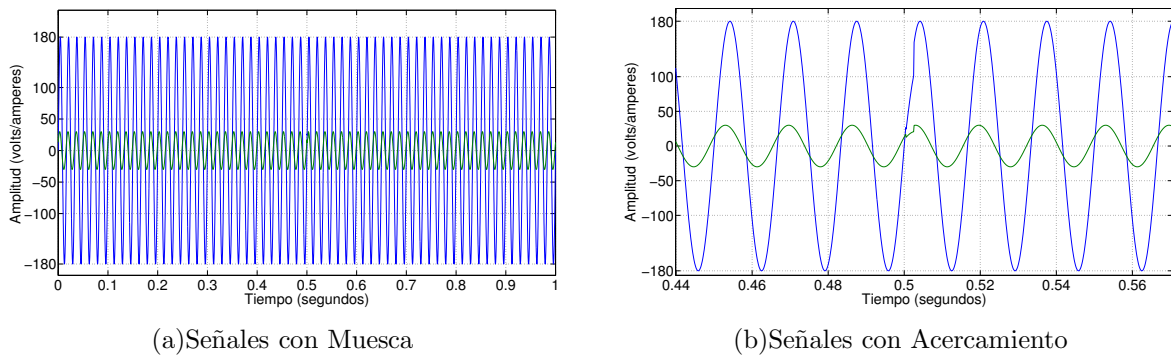


Figura III.3: Señales con Muesca

Tabla III.4: Cálculo de Valores Eficaces, Caso con Muecas

| | Máximo | Promedio | Mínimo |
|---------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Voltaje eficaz | 127.2792 | 127.2376 | 127.0295 |
| Corriente eficaz | 21.2132 | 21.1974 | 21.1183 |
| Potencia Activa | 2430.0316 | 2427.4258 | 2414.3973 |
| Potencia Aparente | 2700.0000 | 2697.1084 | 2682.6504 |
| Factor de potencia | 0.9000 | 0.9000 | 0.9000 |
| DAT de voltaje (%) | 0.0000 | 0.0000 | ———— |

Respecto al análisis de valores eficaces, puede observarse que los resultados obtenidos muestran características similares que el caso con transitorio. Esto es, los valores eficaces calculados no muestran cambios significativos o que puedan dar información de la existencia de una muesca. Por otro lado, los valores promedio son los que generan la pauta para identificar algún problema y no muestran cambios significativos. Para efectos de facturación el factor de potencia no presentó cambios, pero a pesar de eso la muesca pudo ocasionar daños a equipos electrónicos sensibles a pequeñas variaciones de voltaje.

III.1.3. Discusión de esta Sección

Como se observa en las tablas de este capítulo, existe una variación de potencia debida a los transitorios, lo que para efectos de facturación podría afectar al consumidor (además de los posibles daños a equipos e instalaciones eléctricas), es ésta una razón más de la importancia en la detección de impulsos.

Los análisis de CEE basados en valores eficaces, se suelen considerar los valores promedio para generar un criterio del estado de la red eléctrica, es decir, se debe verificar

que estos valores se mantengan dentro de los umbrales establecidos por normativa. En este sentido, como se observa en la tabla III.4 y III.3 los valores registrados de voltaje en máximo y mínimo varían menos de 0.5 volts del valor promedio, en general la variación de valores eficaces tanto en el caso de la presencia de un impulso como de una muesca es relativamente pequeña por lo tanto se concluye que el método RMS no es conveniente para detección de transitorios.

III.2. Evaluación de la Primera Propuesta fed_1

Para evaluar la primera propuesta de detección, es necesaria la simulación en diferentes situaciones para conocer paso a paso los resultados que genera. La amplitud de la señal de voltaje es de 180 volts pico, asimismo, las características de las anomalías transitorias varían de la Sección III.1.2, ésto, para evaluar en diferentes situaciones al factor derivativo. El umbral establecido es $limit_sup = 0.1V_p$ o el 10% del voltaje pico.

III.2.1. Evaluación ante Transitorios

En esta sección se evalúan dos anomalías transitorias, el impulso y la muesca eléctrica en el voltaje. La amplitud máxima del impulso es de 72 volts en el ángulo $\alpha = 90^\circ$ con una duración de 260.42 μs (equivalente a dos muestras). La amplitud máxima de la muesca es de 72 volts en el ángulo $\alpha = 90^\circ$ con una duración de 260.42 μs . En la figura III.4 (a) se observa la señal de voltaje con ambas anomalías, la duración de la señal es de 2 ciclos de red a 60 Hz.

Como primer paso se lleva a cabo la detección mostrada en la figura III.4 (b), donde se ve que se superan los umbrales establecidos (líneas en rojo) en el voltaje y representa la condición (C3) en la primer propuesta. En la figura III.4 (c) se muestra el factor derivativo considerado como la etapa de aislamiento y se observa que los transitorios también superaron los umbrales establecidos.

La siguiente evaluación (figura III.5) considera la amplitud máxima del impulso de 27.56 volts en el ángulo $\alpha = 25.31^\circ$ y la amplitud máxima de la muesca de 24.26 volts en el ángulo $\alpha = 22.5^\circ$ ambos con una duración de 260.42 μs .

Lo importante de notar en la figura III.5 es que, a pesar de que los transitorios son pequeños en amplitud, el algoritmo es capaz de detectarlos, en donde una vez sobre-

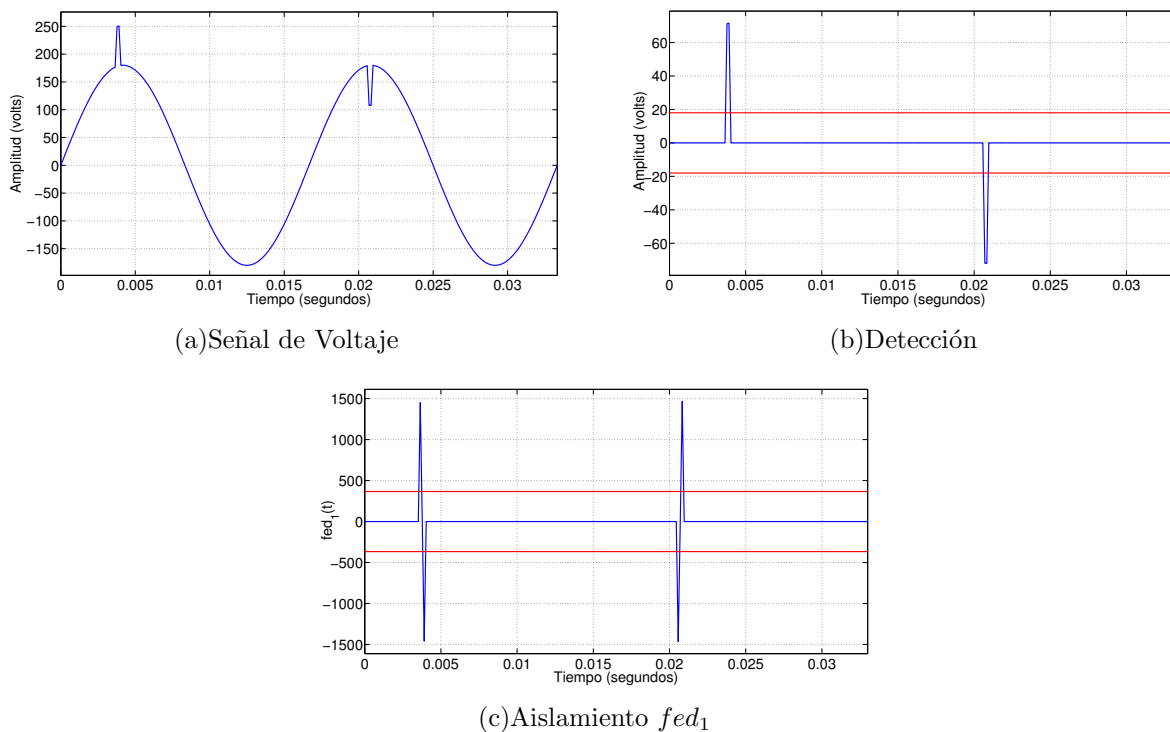


Figura III.4: Detección de Impulso y Muesca

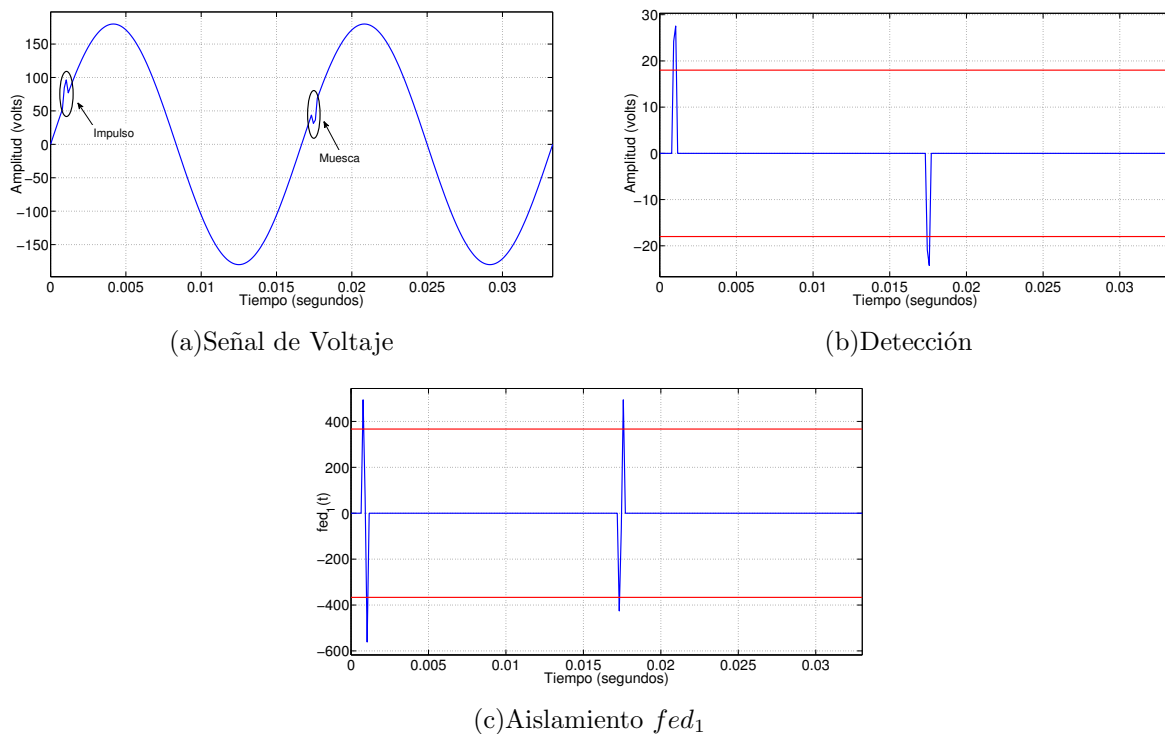


Figura III.5: Impulso y Muesca Cercanos al Cruce por Cero.

pasados los umbrales en la etapa de detección (figura III.5 (b)) se inicia el proceso de aislamiento obteniendo así el fed_1 (figura III.5 (c)).

Evidentemente, en caso de que cualquiera de las dos anomalías no superen los umbrales en voltaje el proceso de detección no se realizará a menos que los umbrales sean considerados menores al 10%.

III.2.2. Evaluación ante Transitorios y Distorsiones de Onda

Las distorsiones de onda que se consideraron son, armónicos, ruido y OFFSET.

Armónicos

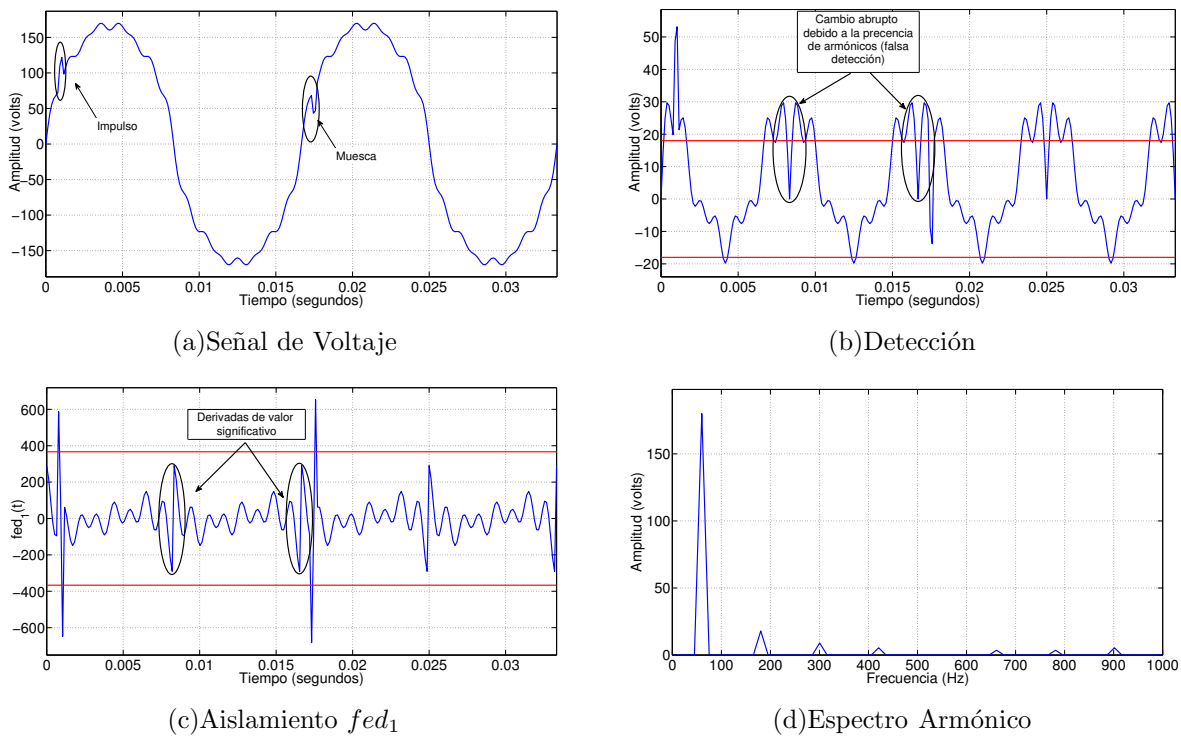


Figura III.6: Transitorios y Distorsión Armónica.

Para esta simulación se considera un $DAT=12.2882\%$ (que para el nivel de voltaje considerado, el DAT supera los límites indicados en las recomendaciones de CFE L000-45 [5]) y las características para esta señal son voltaje pico 180 volts, la amplitud

Tabla III.5: Contenido Armónico

| Armónico | Magnitud |
|----------|-----------|
| 3 | $0.1V_p$ |
| 5 | $0.05V_p$ |
| 7 | $0.03V_p$ |
| 11 | $0.02V_p$ |
| 13 | $0.02V_p$ |
| 15 | $0.03V_p$ |

máxima del impulso es de 27.56 volts en el ángulo $\alpha = 25.31^\circ$ y la amplitud máxima de la muesca de 24.26 volts en el ángulo $\alpha = 22.5^\circ$ ambos con una duración de 260.42 μs , mostrados en la figura III.6 (a). En este sentido, la figura III.6 (b) representa la resta después de la condición (C3) de la etapa de detección y la figura III.6 (c) representa el factor derivativo de la etapa de aislamiento. En la figura III.6 (d) se encuentra graficado el espectro armónico de la señal de voltaje.

Como se observa en la figura III.6 (b) existen valores que sobrepasaron los umbrales debido a la presencia de armónicos, lo que generaría una detección errónea de las anomalías transitorias; sin embargo, el aislamiento con respecto a los armónicos se logra aplicando (II.9) en la figura III.6 (c). Se aprecia que únicamente los transitorios superaron los umbrales establecidos.

En este ejemplo se logran resaltar lo siguiente, si se observa la figura III.6 (b) existen cambios abruptos de magnitud considerable provocados por la distorsión armónica; sin embargo, al obtener el factor derivativo se aprecia que estos valores también son grandes, pero no lo suficiente como para superar los umbrales (figura III.6 (c)). A pesar de que la distorsión armónica es considerable y de que los armónicos presentes son elevados, como lo muestra la figura III.6 (d), en donde el mayor está en el orden de los 900 Hz, los valores obtenidos en la figura III.6 (c) debidos a esos armónico no superan los umbrales.

Ruido

La siguiente evaluación considera una señal de ruido (generada con la función “randn” de MATLAB, ruido blanco) con una amplitud máxima del 3% en lugar de la distorsión armónica, las características de la señal y de los transitorios son las mismas que el caso anterior (figura III.7).

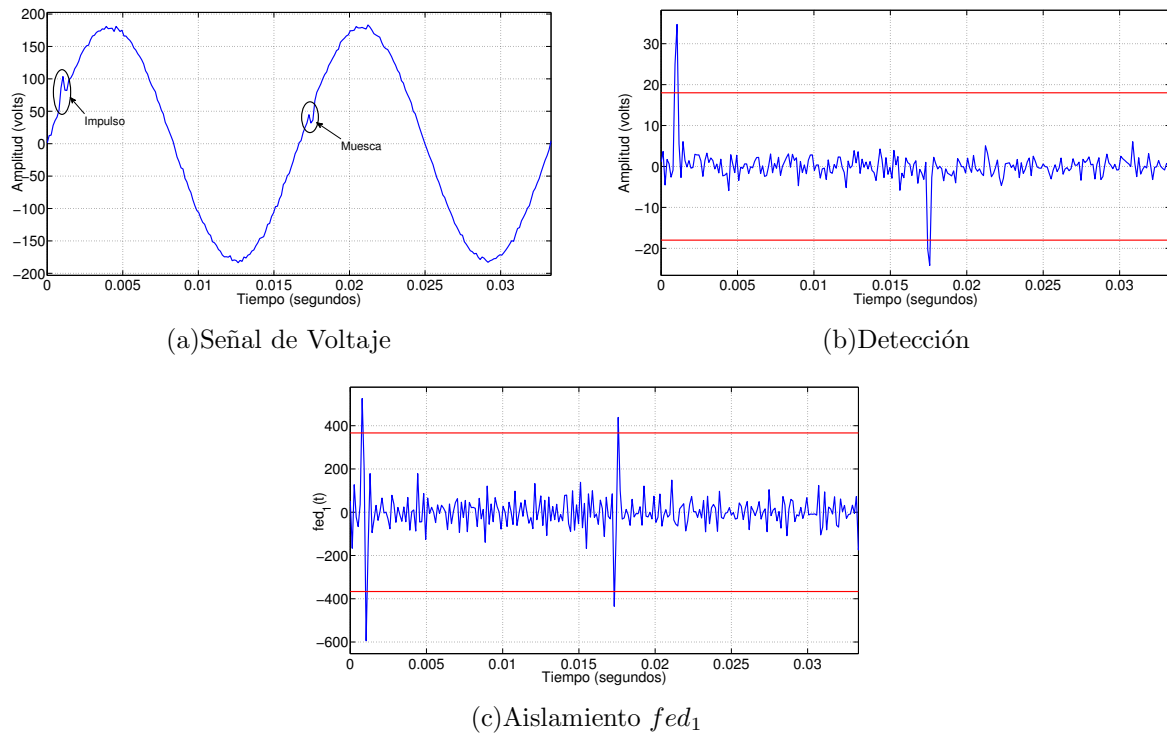


Figura III.7: Transitorios y Ruido.

En este ejemplo se logra la detección y el aislamiento de las anomalías transitorias del ruido ya que éste no supera los umbrales, debido a que la magnitud del ruido no es lo suficientemente alta.

OFFSET

El OFFSET que se considera es de 8 volts, provocando el cambio en la señal como se muestra en la figura III.8 (a). La figura III.8 (b) indica la resta de la señal, la diferencia mostrada de 8 a -8 volts es debido a las condiciones (C1) y (C2), la diferencia en valor absoluto que se considera en (II.9) resulta igual a 16 volts, por otro lado el umbral establecido es de 18 volts (10% del voltaje pico) y la ecuación (II.10) genera el umbral para la activación del factor derivativo. Entonces, si el OFFSET es de valor mayor que la mitad del umbral establecido en volts, se procederá al registro de un transitorio. En otras palabras y para este caso en específico se tiene:

$$fed_1(t) = \frac{1}{\omega} \frac{8 - (-8)}{t_0} = 325.9 \quad (\text{III.1})$$

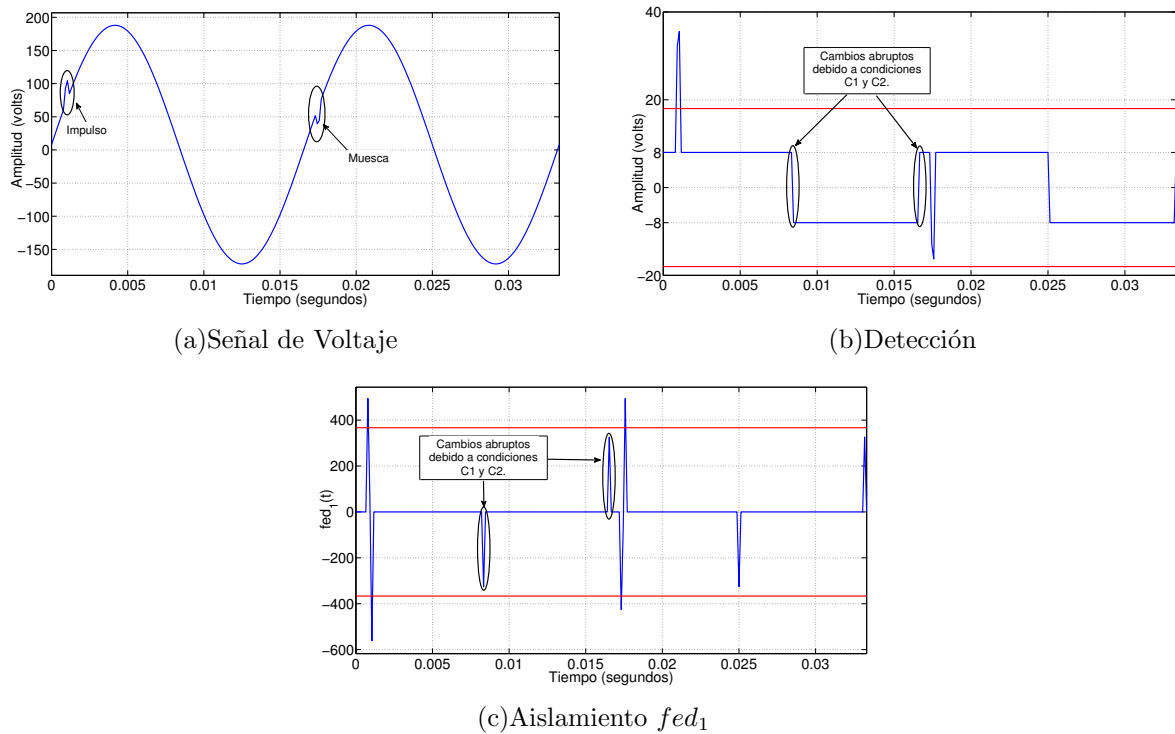


Figura III.8: Transitorios y OFFSET.

y para el umbral se considera

$$limit_sup_fed_1 = \frac{1}{\omega} \frac{18}{t_0} = 494.1 \quad (III.2)$$

Por lo tanto, si en la ecuación (III.1) se considera un OFFSET de 9 volts o superior el umbral en la ecuación (III.2) sería superado fácilmente. En este sentido, para que la primer propuesta realice la detección y el aislamiento adecuadamente en presencia de OFFSET se considera la siguiente restricción:

$$OFFSET < \frac{limit_sup}{2} \quad (III.3)$$

III.2.3. Evaluación ante Transitorios y Variaciones de Voltaje

Las variaciones de voltaje que se consideran son un sag y un swell.

Sag

El sag de voltaje se presenta durante 4 ciclos de red con una amplitud de $0.5 pu$, la duración total de la señal es de 8 ciclos. Los transitorios en la señal son 2 impulsos y 2 muescas, un impulso y una muesca durante el sag. La amplitud máxima de los impulsos es de 27.56 volts en el ángulo $\alpha = 25.31^\circ$ y la amplitud máxima de las muescas es de 24.26 volts en el ángulo $\alpha = 22.5^\circ$ ambos con una duración de $260.42 \mu s$, como se muestra la figura III.9 (a).

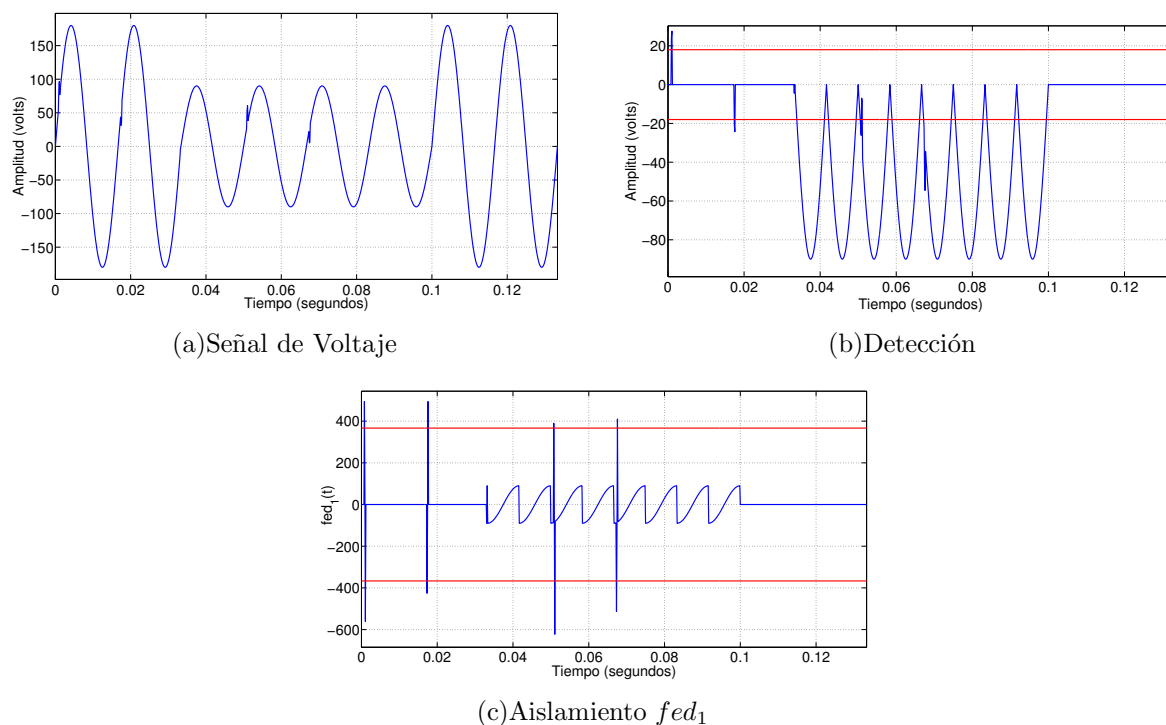


Figura III.9: Transitorios y Sag.

En este caso la etapa de detección también considera el efecto del sag, como se muestra en la figura III.9 (b). Pero en la etapa de aislamiento es donde se identifican sólo las perturbaciones de interés, es decir, las anomalías transitorias (figura III.9 (c)). A pesar de que la magnitud del sag es considerable (al 50% del voltaje pico), la etapa de aislamiento es capaz de identificar sólo los transitorios, esto debido a que el sag conserva las propiedades de tener una derivada suave, a diferencia de los transitorios.

Swell

El swell de voltaje se presenta durante 4 ciclos de red con una amplitud de $1.5 pu$, la duración total de la señal es de 8 ciclos. Los transitorios en la señal son 2 impulsos y 2 muescas durante el swell. La amplitud máxima de los impulsos es de 27.56 volts en el ángulo $\alpha = 25.31^\circ$ y la amplitud máxima de las muescas es de 24.26 volts en el ángulo $\alpha = 22.5^\circ$ ambos con una duración de $260.42 \mu s$, como se muestra la figura III.10 (a).

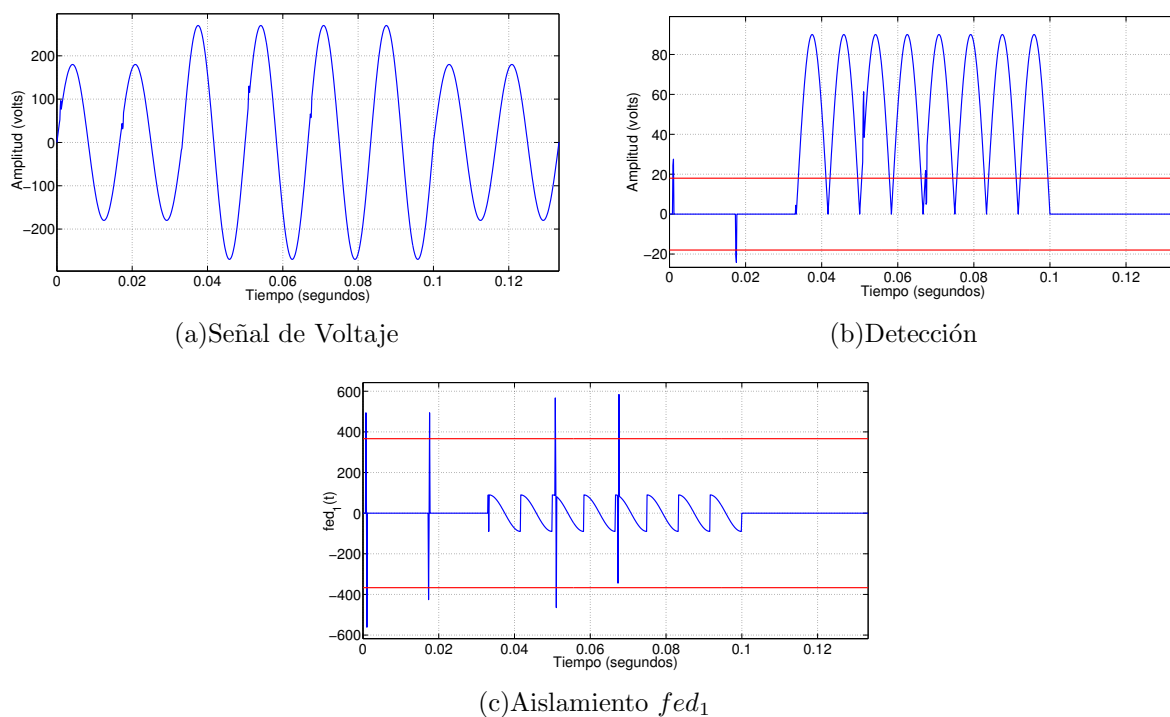


Figura III.10: Transitorios y Swell.

Al igual que el caso del sag, en esta evaluación del método, la detección y el aislamiento se logra satisfactoriamente, la diferencia es que el impulso y la muesca simuladas sobre el swell incrementan su valor en el factor derivativo. A pesar de que el valor del swell es 150% del valor pico del voltaje, la derivada es suave ya que la resta mostrada en la figura III.10 (b) conserva las propiedades de una sinusoidal en valor absoluto.

III.2.4. Alcances de la Primera Propuesta

En la primera propuesta para la detección y el aislamiento de anomalías transitorias se consideraron las perturbaciones de onda más comunes, con la finalidad de conocer

las capacidades del algoritmo ante diferentes situaciones.

Como se muestra en esta sección los resultados son satisfactorios ya que en cada caso evaluado se logró el aislamiento de las anomalías transitorias del resto de las perturbaciones consideradas. Por otro lado, las limitaciones de la primer propuestas radican en perturbaciones que tengan semejanzas a transitorios, es decir, como distorsión armónica o ruido que contengan un cambio abrupto con una amplitud entre muestra y muestra más grande que los umbrales propuestos y la segunda limitación considerable es en la presencia de un OFFSET mayor a la mitad del umbral establecido.

En general, para la etapa de detección es necesario que el voltaje máximo en el transitorio sea superior al umbral establecido (por ejemplo, para los casos presentados $V_f[n] > 18$ volts) y para la etapa de aislamiento (de la ecuación (III)) es necesario que se cumpla una de las siguientes condiciones:

$$(V_f[n] - V_f[n - 1]) > \text{limit_sup}$$

$$(V_f[n] - V_f[n - 1]) < \text{limit_inf}$$

Las ecuaciones anteriores se cumplen para cualquier ángulo eléctrico α .

III.3. Evaluación de la Segunda Propuesta fed_2

Al igual que en la primera propuesta, es necesario evaluar la segunda en diferentes situaciones para mostrar un panorama de sus capacidades de detección.

III.3.1. Evaluación ante Transitorios

La amplitud máxima del impulso es de 27.56 volts en el ángulo $\alpha = 25.31^\circ$ y la amplitud máxima de la muesca es de 24.26 volts en el ángulo $\alpha = 22.5^\circ$ cada uno con una duración de 260.42 μs y la señal de voltaje tiene una duración de dos ciclos de red a 60 Hz y está libre de cualquier otra perturbación, la figura III.11 (a) muestra esta señal.

Como se observa en la figura III.11(b), los transitorios generan un cambio en la segunda propuesta de factor derivativo provocando así la detección.

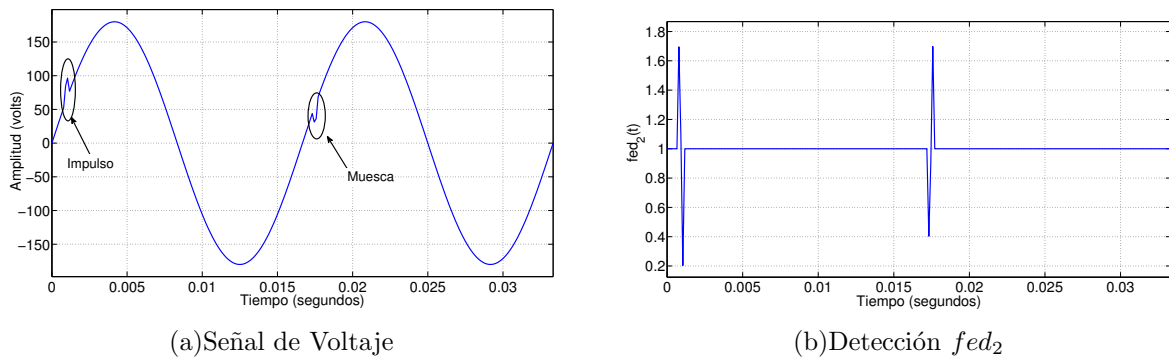


Figura III.11: Transitorios.

III.3.2. Evaluación ante Transitorios y Distorsiones de Onda

Las distorsiones de onda que se consideraron son distorsión armónica, ruido y OFF-SET en el voltaje.

Distorsión Armónica

Para esta simulación se consideró un $DAT=12.2882\%$ (el mismo contenido armónico indicado en la Sección III.2.2) y los transitorios son los mismos que en la sección anterior. La figura III.12 (a) muestra la señal de voltaje.

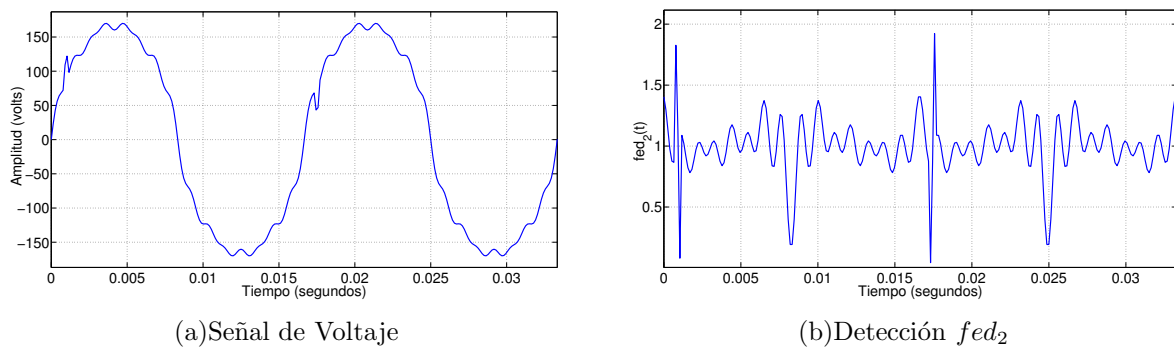


Figura III.12: Transitorios con Armónicos.

La distorsión armónica para este caso es elevada, a pesar de eso, el factor derivativo de los transitorios supera al valor de los armónicos. Al igual que en la primera propuesta, los cambios abruptos del voltaje provocados por la distorsión armónica incrementan el valor del factor derivativo ayudando a la detección de dichas anomalías así como a la discriminación.

Ruido

La siguiente evaluación considera una señal de ruido (generada de la misma forma que el caso anterior) con una amplitud máxima del 3% en lugar de la distorsión armónica, las características de la señal y de los transitorios son las mismas (ver figura III.13).

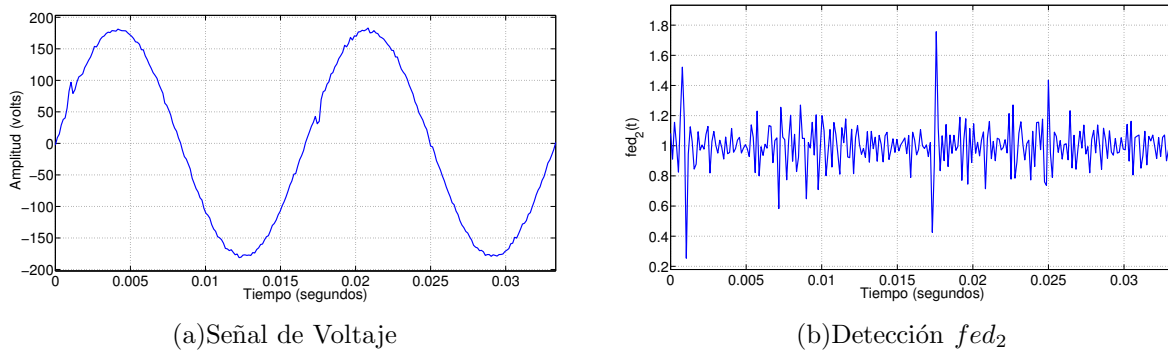


Figura III.13: Transitorios con Ruido.

En este caso el valor obtenido por los transitorios también superó al valor obtenido por el ruido como se ve en la figura III.13 (b), a pesar que el ruido considerado fue de gran magnitud.

OFFSET

El OFFSET considerado en la señal es de 50 volts, las perturbaciones transitorias mantienen sus características igual que los casos anteriores. La figura III.14 muestra la señal de voltaje.

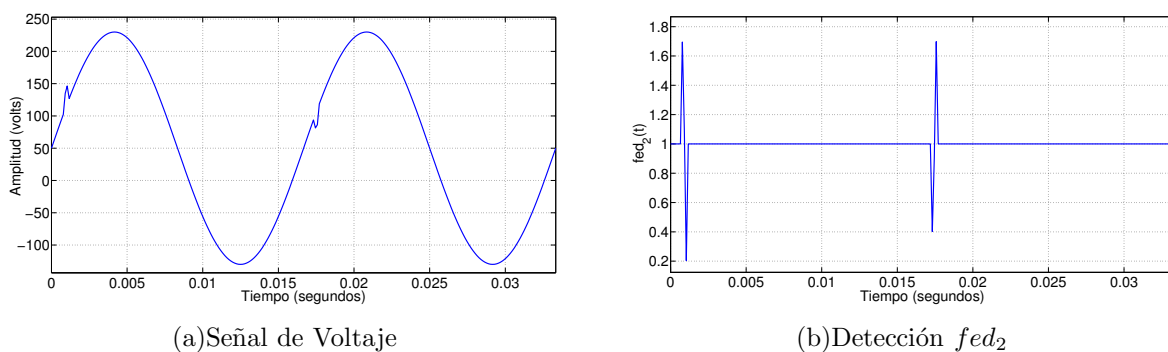


Figura III.14: Transitorios con OFFSET.

A pesar de que el OFFSET considerado es el 27.78% del voltaje pico (un valor

considerablemente alto) el factor derivativo logró discriminarlo sin complicaciones, esto debido a las propiedades que este factor proporciona obteniendo así una discriminación muy exitosa del OFFSET.

III.3.3. Evaluación ante Transitorios y Variaciones de Voltaje

Las variaciones de voltaje que se consideraron son, un sag y un swell con duración de 4 ciclos, la duración total de la señal es de 8 ciclos de red a 60 Hz.

Sag

La amplitud considerada para el sag es de 0.5 pu con duración de 4 ciclos. Los transitorios en la señal son 2 impulsos y 2 muescas, un impulso y una muesca durante el sag. La amplitud máxima de los impulsos es de 27.56 volts en el ángulo $\alpha = 25.31^\circ$ y la amplitud máxima de las muescas es de 24.26 volts en el ángulo $\alpha = 22.5^\circ$ ambos con una duración de $260.42 \mu s$, como se muestra en la figura III.15 (a).

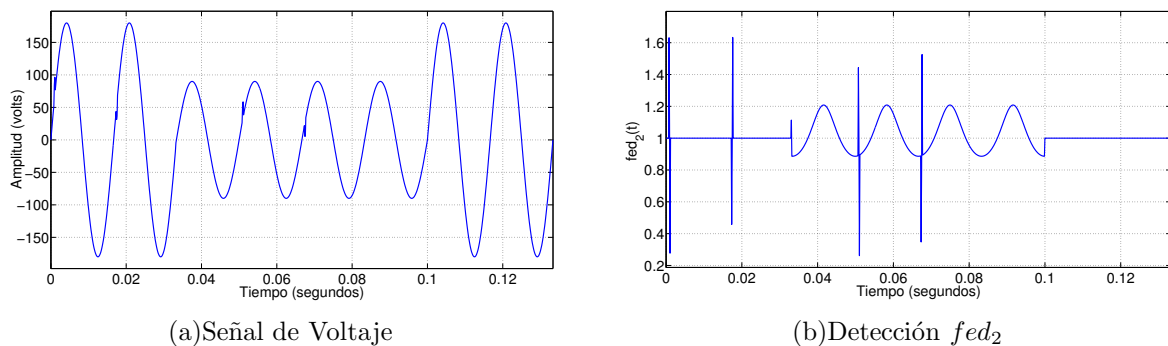


Figura III.15: Transitorios con Sag.

En la figura III.15 (b) se observa que el impulso y la muesca ubicados en el sag sobrepasaron ligeramente el valor obtenido por fed_2 , pero los que se encuentran fuera del sag son fácilmente detectados.

Swell

Como último caso se muestra un swell en lugar de la presencia del sag, las características de los transitorios que se observan en la figura III.16 (a) son las mismas que el caso anterior, con el swell de amplitud igual a 1.5 pu.

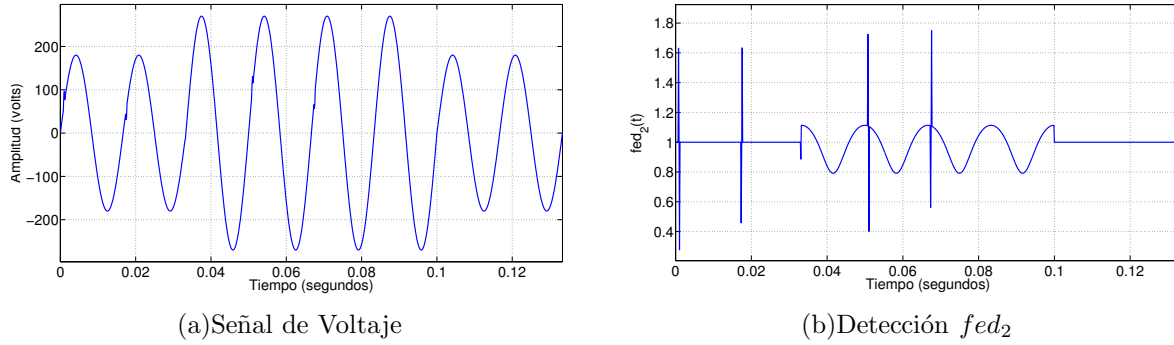


Figura III.16: Transitorios con Swell.

Ya que el swell también aumenta la amplitud del impulso y de la muesca, los valores obtenidos al derivar también incrementan su valor; por lo tanto, la detección de los transitorios se realiza con éxito.

III.3.4. Alcances de la Segunda Propuesta

La primera propuesta presentada tiene dificultades en la discriminación de una señal con OFFSET, el caso contrario se presenta en la segunda propuesta donde el caso con más éxito que se obtuvo es en la presencia de OFFSET, esto se debe a la resta que se realiza al obtener la derivada mediante límites (como lo muestra la ecuación (II.13)), el resultado mostrado en el factor derivativo no generó cambio con la presencia de transitorios y éstos, fueron fácilmente detectados.

La detección de los transitorios está muy ligada a su amplitud, ya que si se presentan distorsiones de onda o cualquier otra perturbación con valores mayores (en la diferencia entre una muestra y otra) a las anomalías transitorias, éstas serán difícilmente detectadas o bien las anomalías en estado permanente podrían ser confundidas con un transitorio.

En general, para la detección de un transitorio es necesario que en la ecuación (II.14) la resta $f_r[n] - f_r[n - 1]$ sea mayor en caso de un transitorio que en el caso de una perturbación en estado estable, es decir:

$$(f_r[n] - f_r[n - 1])_{transitorio} > (f_r[n] - f_r[n - 1])_{estable}$$

Capítulo IV

Resultados Experimentales

La finalidad de los algoritmos desarrollados es reproducir algunas funciones de analizadores de calidad de energía eléctrica y de esta manera poder trabajar con una plataforma de simulación que ayude a generar información del procesamiento del ACEEP y así obtener resultados más rápidos y de una manera más sencilla.

En este capítulo se presenta la validación de las simulaciones generadas en el Capítulo III, para lograr ésto, se realizó una comparación de valores obtenidos por un ACEEP y por valores calculados en MATLAB generando así el error, para esto, se obtuvieron archivos de datos en hojas de cálculo EXCEL mediante un osciloscopio que registró los valores de la señal de voltaje real.

En este sentido, este capítulo se divide en cuatro secciones. La primera es la validación de los algoritmos utilizando los cálculos para estado estable. En la segunda sección se analizan los datos obtenidos mediante el osciloscopio con diferente periodo de integración aplicando la primera propuesta. Asimismo, en la tercera sección se analiza la segunda propuesta con los datos obtenidos del osciloscopio. Y finalmente en la cuarta sección se presenta una discusión de este capítulo.

Para explicar el método de adquisición de datos que se llevó a cabo, se muestra la figura IV.1.

Se tiene una fuente de CA conectada en serie con un generador de señales. La finalidad del generador de señales es agregar un impulso a la señal de voltaje. En esa misma línea, se conectó un ACEEP para obtener los datos en estado estable del voltaje y un osciloscopio para obtener los datos necesarios para después procesarlos en MATLAB

y así hacer el cálculo de valores en estado estable para finalmente obtener el error de la medición generada con los instrumentos.

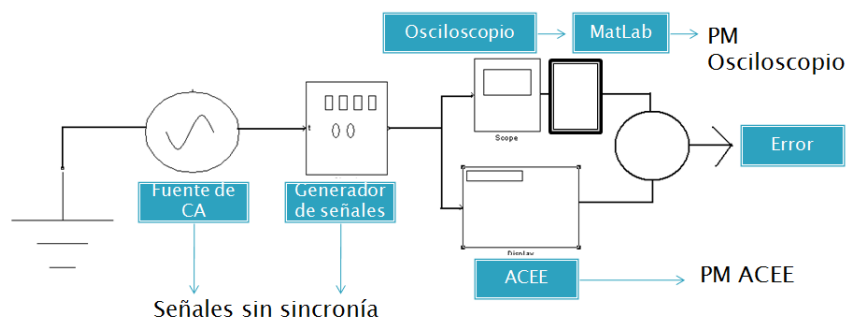


Figura IV.1: Generación de Señal.

IV.1. Validación de Algoritmos

Para la validación de los algoritmos se generó una señal con voltaje pico de 85 volts, una duración de dos segundos y un impulso cada 4 ciclos con duración de medio ciclo de red, las características de registro del osciloscopio son las siguientes:

- ▷ Se obtuvieron 10,000 valores en 120 ciclos de red (dos segundos).
- ▷ Periodo de muestreo de $200 \mu s$ lo que indica que se obtuvieron 833.33 muestras en promedio por cada 10 ciclos de red.

Las condiciones que se consideraron para los algoritmos en MATLAB son las siguientes:

- ▷ En el algoritmo de MATLAB se utilizaron 9960 valores de los 10,000 disponibles para el muestreo (lo que implica un error de cálculo en MATLAB por redondeo).
- ▷ El muestreo usado para MATLAB fue de 833 muestras por cada 10 ciclos para así procesar un PC de 10 ciclos.

Las características configuradas en el ACEEP son las siguientes:

- ▷ En el análisis periódico se consideró un PC=10 ciclos de red y un PI=1 segundo.
- ▷ El muestreo utilizado por el ACEEP es de 1024 muestras cada 10 ciclos de red lo que equivale a $162.76 \mu s$ (muestreo diferente que el osciloscopio).

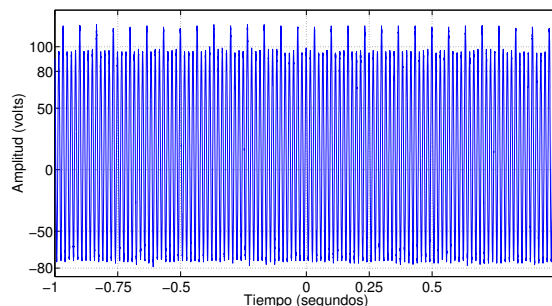


Figura IV.2: Señal para Validación de Algoritmos.

Tabla IV.1: Comparación de Valores de MATLAB y Valores del ACEEP

| Valores Eficaces | Máximo | Promedio | Mínimo |
|------------------|---------|----------|---------|
| ACEEP (volts) | 63.26 | 62.69 | 62.13 |
| MATLAB (volts) | 64.1563 | 63.4873 | 62.9832 |
| Error (%) | 1.39 | 1.26 | 1.35 |

La señal obtenida por el osciloscopio y procesada con MATLAB es la mostrada en la figura IV.2 y los datos registrados por el ACEEP y los calculados con los algoritmos de MATLAB así como el error se muestran en la tabla IV.1.

El error mostrado en la tabla es el resultado de la diferencia de los valores muestreados entre el ACEEP y el osciloscopio, ya que el ACEEP muestrea 6144 valores cada PI y el osciloscopio en un PI obtiene 5,000. Lo anterior causa que cada valor almacenado no correspondan entre sí y por lo tanto, el PC (periodo de cálculo) entre estos dos sea también diferente. La segunda razón es la difícil tarea de procesar el mismo PI (periodo de integración) en el ACEEP y en el MATLAB ya que al momento de almacenar los valores en el osciloscopio no se sabe si correspondió al PI que esta procesando el analizador. El PI debe ser el mismo debido a que la señal de la fuente de CA y la señal del generador de señales no están sincronizadas provocando un movimiento del impulso en el ángulo eléctrico del voltaje.

Por el bajo porcentaje de error obtenido y por lo que se explicó en el párrafo anterior, puede concluirse que los algoritmos programados en MATLAB son válidos para representar ciertas funciones del ACEEP.

IV.2. Primera Propuesta

Para esta sección se consideran dos señales con duraciones diferentes, tanto para el voltaje como para el impulso.

IV.2.1. Señal con Duración de 2 Segundos

Se generó una señal de voltaje como se explica al inicio de este capítulo, sólo se muestra una parte de la señal con voltaje pico de 85 volts, el impulso tiene una duración menor a medio ciclo de red, la señal con las características antes mencionadas se muestra en la figura IV.3. El umbral establecido es del 10% del voltaje pico de la señal.

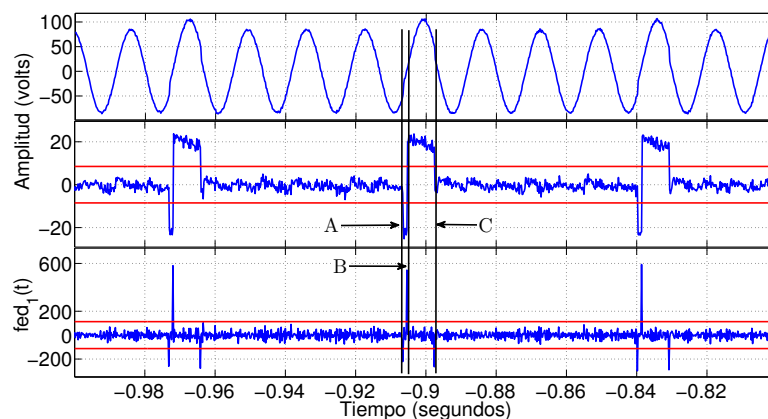


Figura IV.3: Señal de Voltaje Real con Duración de 2 Segundos.

La suma de la señal cuadrada (del generador) con la señal sinusoidal (de la fuente) en la parte negativa de la sinusoidal generan un incremento del voltaje, que se ve reflejado como una pequeña muesca, indicados en la línea marcada con A en la figura IV.3, al ser positivos los valores de la sinusoidal la suma con la señal cuadrada se ve reflejada como un impulso de duración de medio ciclo de red, lo que genera la derivada positiva y los valores positivos mostrados en la línea marcada como B en la figura IV.3. De las líneas marcadas de B a C se observa un incremento de valor constante lo que provoca una derivada pequeña (dentro de los umbrales) y al momento de regresar al valor original de la sinusoidal se genera la derivada mostrada en la línea C la cual supera los umbrales. Este proceso se repite tres veces a lo largo de la señal mostrada en figura IV.3.

IV.2.2. Señal con Duración de 0.4 Segundos

La duración de la señal de voltaje real es de 400 ms con un voltaje pico de 78 volts, el impulso tiene una duración de un cuarto de ciclo de red a 60 Hz. La figura IV.4 (a)

muestra esta señal de voltaje real. El umbral establecido es del 10 % del voltaje pico de la señal.

La señal de voltaje ideal se consideró con un voltaje pico de 70 volts, con la finalidad de suponer un swell con impulsos.

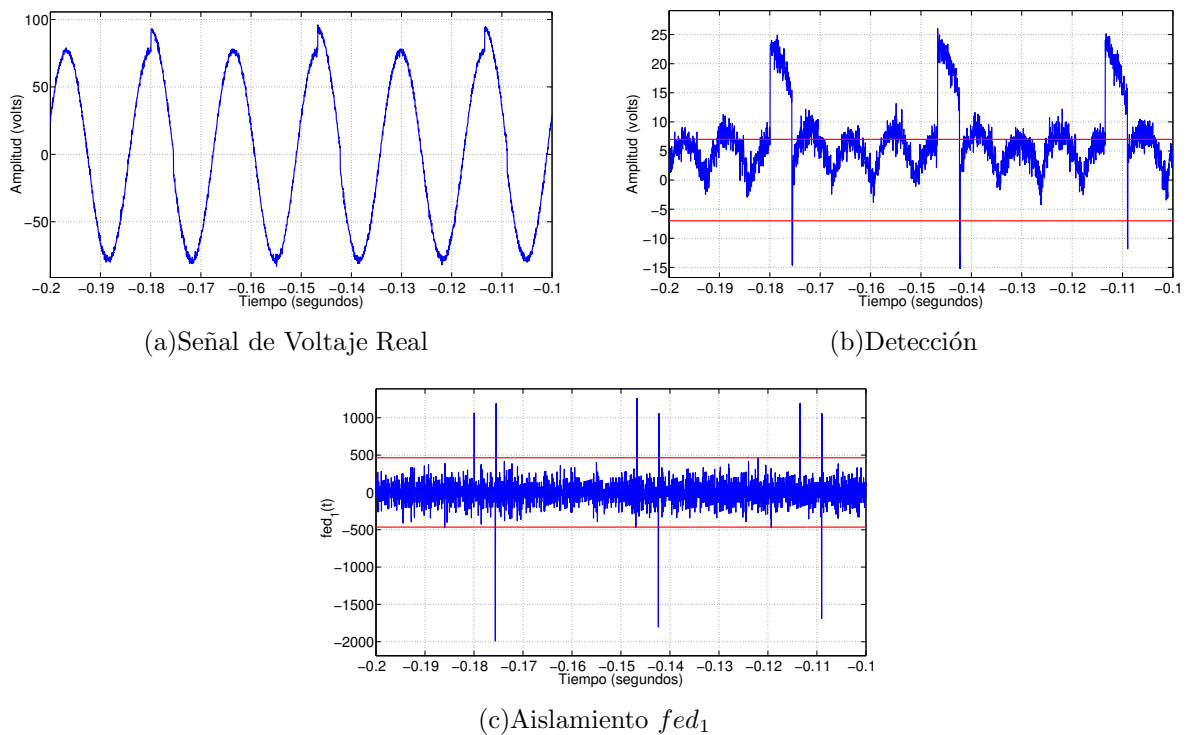


Figura IV.4: Señal de Voltaje Real con Duración de 0.4 Segundos.

Como se muestra en la figura IV.4 (b) el algoritmo detectó falsas alarmas, pero al obtener el factor derivativo en la figura IV.4 (c), los valores que sobrepasaron el umbral únicamente fueron los impulsos. A pesar de que las señales registradas por el osciloscopio contienen dos perturbaciones, principalmente ruido, la detección y aislamiento de los cambios rápidos en el voltaje se lograron con éxito.

IV.3. Segunda Propuesta

Las señales de voltaje real que se consideraron para esta sección tienen una duración de 2 segundos y 400 ms. Además de las perturbaciones transitorias, ambas señales reales contienen perturbación en estado estable como el ruido.

IV.3.1. Señal con Duración de 2 Segundos

La figura IV.5 muestra sólo una parte de la señal real con voltaje pico igual a 85 volts. Las anomalías presentes son un impulso eléctrico con duración de medio ciclo de red, el OFFSET de 11 volts y además ruido con un valor considerablemente alto.

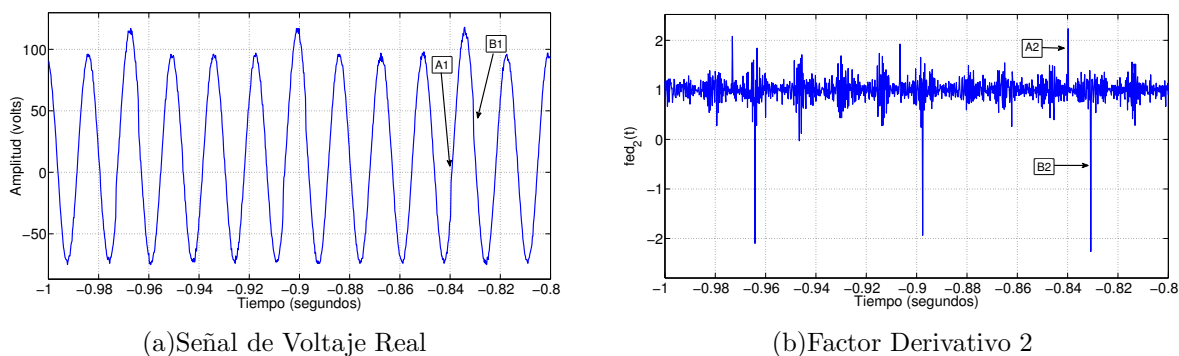


Figura IV.5: Señal de Voltaje Real con Duración de 2 Segundos

Al observar la figura IV.5 (b) se puede notar que los valores mayores de esa gráfica representan los impulsos mostrados en la figura IV.5 (a). Sin embargo, la información que se obtiene con estos resultados únicamente es útil para la detección de dichas anomalías. En la figura IV.5 (a) el punto marcado con A1 es donde comienza el impulso, provocando el incremento en el punto A2 que se muestra en la figura IV.5 (b), ya que el incremento desde A1 hasta B1 es prácticamente constante, los valores obtenidos desde A2 hasta B2 regresan a un valor cercano a 1 y al término del impulso en B1 se genera una derivada negativa provocando la línea en B2.

IV.3.2. Señal con Duración de 0.4 Segundos

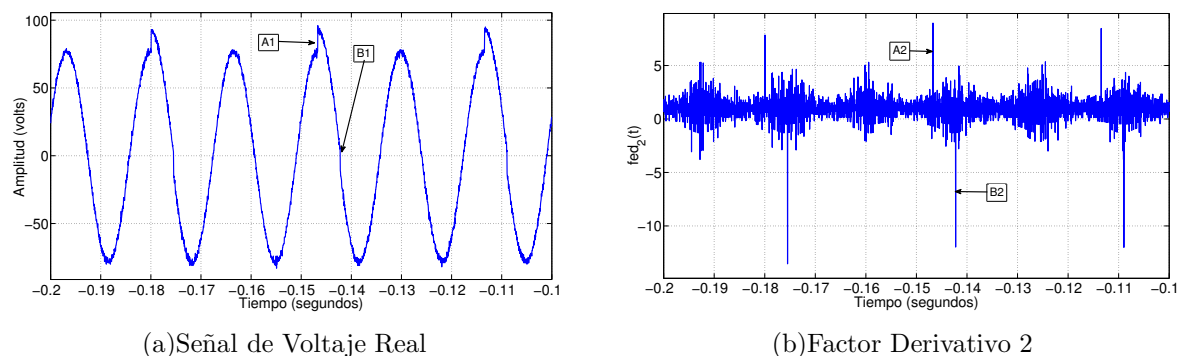


Figura IV.6: Señal de Voltaje Real con Duración de 0.4 Segundos

Las características del voltaje real son 78 volts pico con una duración de 0.4 segundos y para tener más apreciación de la señal sólo se muestra una parte. El impulso considerado tiene una duración de un cuarto de ciclo de red.

La figura IV.6 (b) muestra que la detección se logró satisfactoriamente ya que los valores mayores en fed_2 precisamente corresponden al inicio y fin del impulso por lo tanto se alcanzan a distinguir las anomalías de interés.

IV.4. Discusión del Capítulo

En este capítulo se presentó la aplicación de ambas propuestas para detección de anomalías transitorias, con señales reales obtenidas mediante un osciloscopio y producidas con una fuente en CA conectadas en serie con un generador de señales para obtener el impulso. A pesar que los valores registrados por el osciloscopio contenían anomalías no consideradas (como OFFSET y ruido), los resultados que se obtuvieron con ambos métodos y factores tiene una gran posibilidad en la aplicación de ACEEP.

Una tarea difícil al trabajar con una señal real, es general una señal ideal sincronizada con la real, es decir, la generación de una señal ideal para comparación que tuviera las características aptas para la aplicación de los algoritmos propuestos. El método estocástico fue necesario para adaptar la señal ideal, donde el principal trabajo fue adelantar (o atrasar) el voltaje ideal para así hacerlo coincidir con el ángulo eléctrico de la señal real. Debido a esto, los resultados mostrados deben tener un error inherente a los algoritmos propuestos y a pesar de ésto los resultados obtenidos son muy satisfactorios.

Como se mencionó, la primer propuesta de detección tiene una amplia capacidad para, detectar y aislar las perturbaciones de interés sin perder los datos en estado estable que también son de vital importancia y de ésta manera tener un conocimiento integral de los datos de calidad de energía eléctrica. El principal inconveniente de esta propuesta es un OFFSET en el voltaje, pero, a pesar de esto, este factor también es útil en este caso aunque con su limitante mencionada la sección III.2.2.

La segunda propuesta también generó valores para detección de transitorio. La característica principal de este método es que en la detección no se logra conocer si se registró un impulso o una muesca. Por otro lado, para completar una detección satisfactoria es necesario ubicar umbrales para el factor derivativo. La aplicación con más éxito

que se le encontró a este factor, esta en la presencia de señales con OFFSET, ya que en las simulaciones y en la aplicación en una señal real, el OFFSET es prácticamente imperceptible a fed_2 .

Conclusiones y Trabajo Futuro

Conclusiones

En este trabajo de investigación se estudiaron las características de procesamiento de Analizadores de Calidad de la Energía Eléctrica Portátiles así como métodos de procesamiento para perturbaciones transitorias.

El desarrollo de los factores mostrados en esta tesis son derivados de los estudios realizados por el Físico Frederick Bedell. Sus propuestas son el factor integral y factor derivativo, las cuales fueron hechas en función de valores eficaces, los dos factores están basados en la integral y la derivada, lo que sin duda proporciona información acerca de la deformación de la señal de voltaje, pero con valores eficaces es difícil caracterizar anomalías con duración menor a medio ciclo de red. Lo anterior, dio la pauta para generar nuevos enfoques del factor derivativo. Los nuevos enfoques que se generaron en esta tesis tienen como particularidad que son derivadas de valores instantáneos de una señal de voltaje, lo que proporciona como beneficio, si no una caracterización completa, sí se tiene una detección y un aislamiento de las anomalías transitorias y así un registro de éstas para su posterior análisis.

Las simulaciones muestran una detección y aislamiento con éxito, ya que se logran discriminar satisfactoriamente las perturbaciones de la señal sinusoidal que no son de interés, aunado a los beneficios computacionales que éstos presentan, se tiene una gran posibilidad de aplicación en línea.

La validación de los algoritmos se realizó con resultados satisfactorios, ya que el error mostrado para cálculos de voltaje en estado estable está entre el 1.2 y 1.4% por lo que se considera que los métodos propuestos pueden tener una gran aceptación en

aplicaciones para ACEEP. Además, estos métodos están pensados para una configuración mínima o nula por el usuario.

Los métodos propuestos tienen una gran ventaja, ya que permiten el procesamiento de transitorios y de estado estable al mismo tiempo, esto debido a que el periodo de muestreo se mantiene constante para ambos análisis, además el procesamiento se puede mantener para todos los canales de entrada de un ACEEP.

Trabajo Futuro

Como trabajo futuro se contempla la implementación de los métodos propuestos en una plataforma digital, donde se puedan obtener datos en estado estable así como los transitorios como se propone en esta tesis y de esta forma, tener una comparativa integral de los datos registrados con los métodos actuales y con los propuestos, es decir, la aplicación de los métodos propuestos en un ACEEP para obtener datos en “línea” sería un paso de gran importancia en el monitoreo de calidad de energía eléctrica para corroborar la validación de éstos. Para llevar esta implementación a cabo, es necesario contemplar diversos factores, entre estos se encuentra: bits de resolución de los métodos propuestos, el convertidor analógico digital, características digitales del procesador, etc.

En este sentido, también se debe contemplar para un mejor análisis lo que sucede con el factor derivativo al procesar valores cercanos a la frecuencia de Nyquist, hasta dónde es capaz de aislar sin que una señal cercana a esa frecuencia sea confundida con un transitorio. Otro aspecto importante a considerar es el tipo de ruido que puede ser discriminado por los métodos.

La tendencia a que los sistemas de supervisión sean cada vez más autónomos da la pauta para generar métodos cada vez más independientes del usuario. En este sentido, los métodos presentados no necesitan que sean configurados por expertos en el área de calidad de la energía para detectar transitorios, lo único que se debe configurar es el voltaje pico de la señal o en su defecto los umbrales.

Diagrama de Flujo de los Métodos Propuestos

Para la primera propuesta se considera el proceso en donde se aplica los siguientes pasos a la señal de voltaje real:

- Se realiza la condición C1 para conocer si se trata de una muesca.
- Se realiza la condición C2 para conocer si se trata de un impulso.
- Después se procede a evaluar la condición C3 para saber si se superan los umbrales establecidos, y si es así.
- Se aplica el factor derivativo para discriminar las perturbaciones en estado estable de las transitorias.

La figura A.1 muestra el diagrama de flujo que indica con más detalle el proceso que se le aplica a la señal de voltaje.

El procesamiento para el segundo método y el segundo factor derivativo ($fed_2(t)$) es más simple, se realiza la derivada continuamente a toda la señal y la división para después aplicarle el $fed_2(t)$.

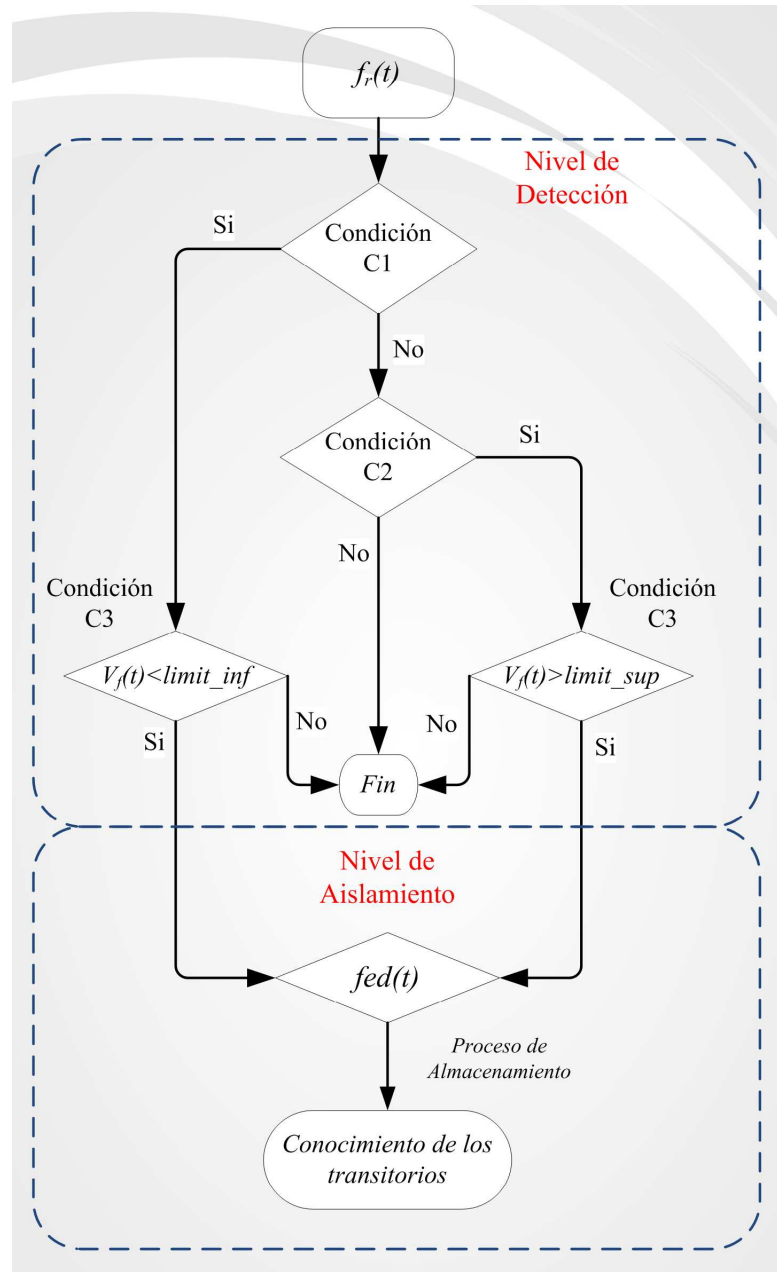


Figura A.1: Diagrama de Flujo de la Primera Propuesta.

Apéndice **B**

Aplicaciones Desarrolladas para Apoyo Visual

En este trabajo de investigación se desarrollaron dos aplicaciones que ayudan a tener una comprensión más clara de cómo se verían los métodos desarrollados una vez programados en algún ACEEP. Del mismo modo, ayudan a comprender el cómo afecta un impulso o una muesca en los cálculos de valores eficaces. En este sentido, este apéndice está dividido en dos secciones, la primera sección muestra la aplicación del primer método propuesto en esta tesis y la segunda aplicación muestra los cálculos para valores eficaces en la presencia de impulsos y muescas.

B.1. Aplicación para el Primer Método de Detección y Aislamiento

La figura B.1 muestra cual es la apariencia de la aplicación antes de procesar datos. Las casillas en blanco indican los valores de entrada que se deben introducir. Para el aislamiento sólo se consideró distorsión armónica con la posibilidad de activar y desactivar esta anomalía. Las características, tanto de la señal de voltaje y corriente así como del impulso y de la muesca pueden ser seleccionados según el usuario. Para estas aplicaciones se consideró una frecuencia de 60 Hz, un PC con duración de 1 ciclo de red, un PI del tiempo seleccionado por el usuario y un periodo de muestreo igual a 128 muestras por ciclo de red (equivale a un muestreo de $130.21\mu s$).

Para la primera aplicación se considera el ejemplo con las características mostradas en la tabla B.1, donde se selecciona la señal con distorsión armónica, se activa la casilla

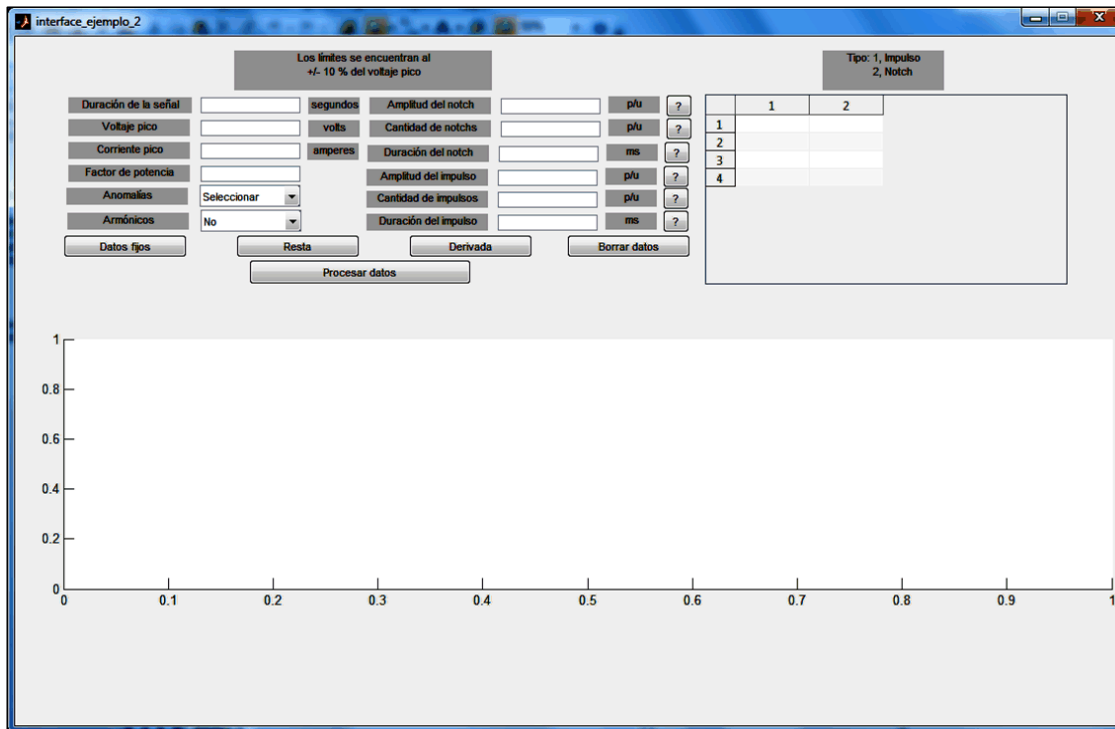


Figura B.1: Aplicación del Primer Método

de “anomalías” con impulsos, además de que se agregan 7 impulsos a lo largo de la señal de voltaje. Los umbrales considerados son del 10% del voltaje pico.

Tabla B.1: Características del Primer Ejemplo

| | | | |
|----------------------------|--------------|-----------------|--------|
| Señal de Voltaje: | | Impulso: | |
| Voltaje pico | 180 volts | Amplitud | 1.4 pu |
| Señal de Corriente: | | Duración | 3 ms |
| Corriente pico | 20 amperes | Muesca: | |
| Tiempo: | 0.5 segundos | Amplitud | 0.6 pu |
| Factor de Potencia | 0.9 | Duración | 3 ms |

La figura B.2 muestra más claramente los impulsos colocados en diferentes ángulos eléctricos de la señal de voltaje. El cuadro superior derecho de la misma figura muestra la cantidad de impulsos detectados, la duración el voltaje con que excedió los umbrales y el tipo de anomalía.

Existen dos puntos importantes a resaltar en la figura B.2. El primer punto es que a pesar de que se supusieron únicamente 7 impulsos la detección muestra 8, esto sucede debido a que el incremento de la señal de voltaje pasa del plano negativo al plano positivo generando valores muy pequeños para ser superados por los umbrales (este impulso es el detectado como 7 y 8, y se puede ver como el último en la señal de voltaje). El segundo punto es, que los tiempos mostrados no corresponden a los 3 ms supuestos inicialmente, esto es debido a que la muestra en donde inicia el impulso no coincide exactamente con el umbral establecido, provocando el inicio de la detección en la muestra siguiente o anterior y de esta manera incrementa o disminuye la duración del impulso mostrada en el cuadro superior derecho. Un caso similar sucede con la detección y aislamiento de la muesca.

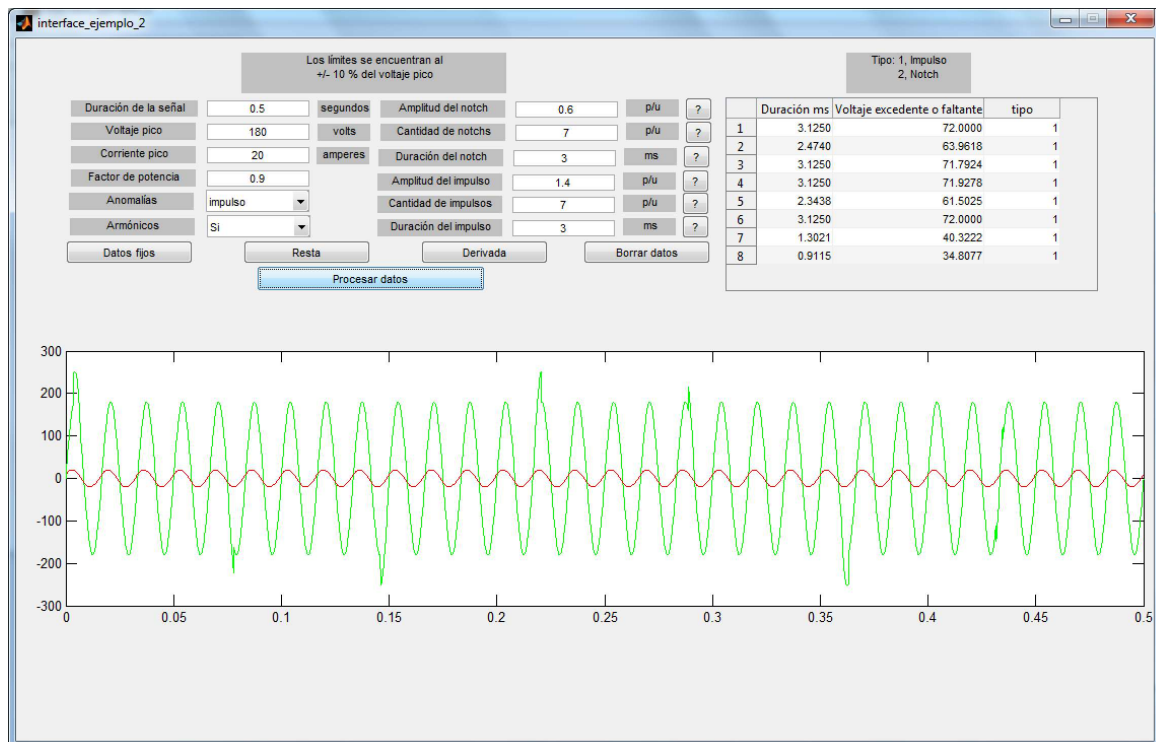


Figura B.2: Detección y Aislamiento.

La etapa denominada como detección se presenta en la figura B.3 donde los impulsos superaron el umbral de 18 volts establecido. En esta figura también se puede apreciar la presencia de la distorsión armónica. Además, si se observa el voltaje pico excedente en la señal mostrada, los valores corresponden a los valores obtenidos en el cuadro superior derecho. Un caso similar sucede en la presencia de muescas.

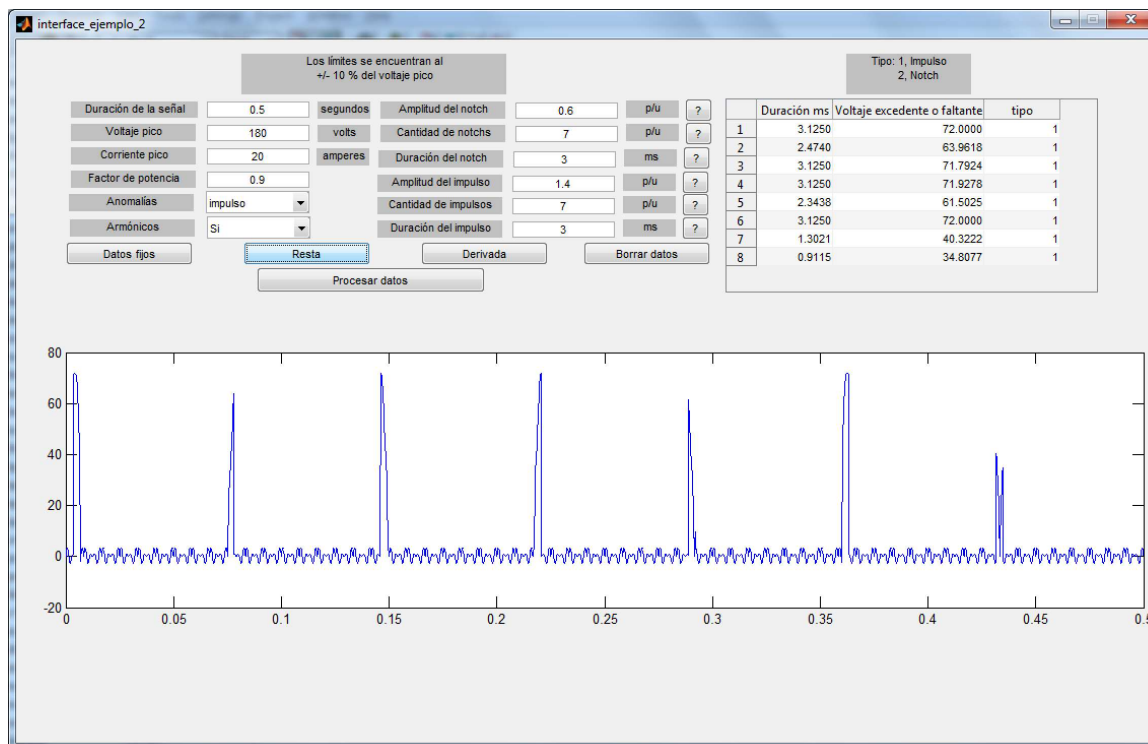


Figura B.3: Detección.

Por último el factor derivativo obtenido de la señal mostrada en la figura B.3 muestra el aislamiento, éste se obtiene ya que los impulsos tienen un valor muy superior a la distorsión armónica (como se muestra en la figura B.4). Un caso similar sucede con el aislamiento de la muesca.

B.2. Aplicación para el Cálculo de Valores Eficaces

Para esta aplicación se consideraron las características de las señales mostradas en la tabla B.1, pero no se activó la casilla de anomalías para mostrar los valores que idealmente se deben de tener, al rellenar todas las casillas en blanco y presionar el botón “Procesar datos” se genera lo mostrado en la figura B.5.

Entonces, al aplicar los impulsos en la señal es natural que los valores eficaces aumenten (figura B.6), pero estos valores no cambian significativamente de los mostrados en el caso ideal, a pesar de que los impulsos si son de una magnitud considerable (magnitudes mostradas en la figura B.3), por lo tanto, se concluye que es necesario detectar los impulsos ya que una leve variación en valores eficaces puede implicar un impulso

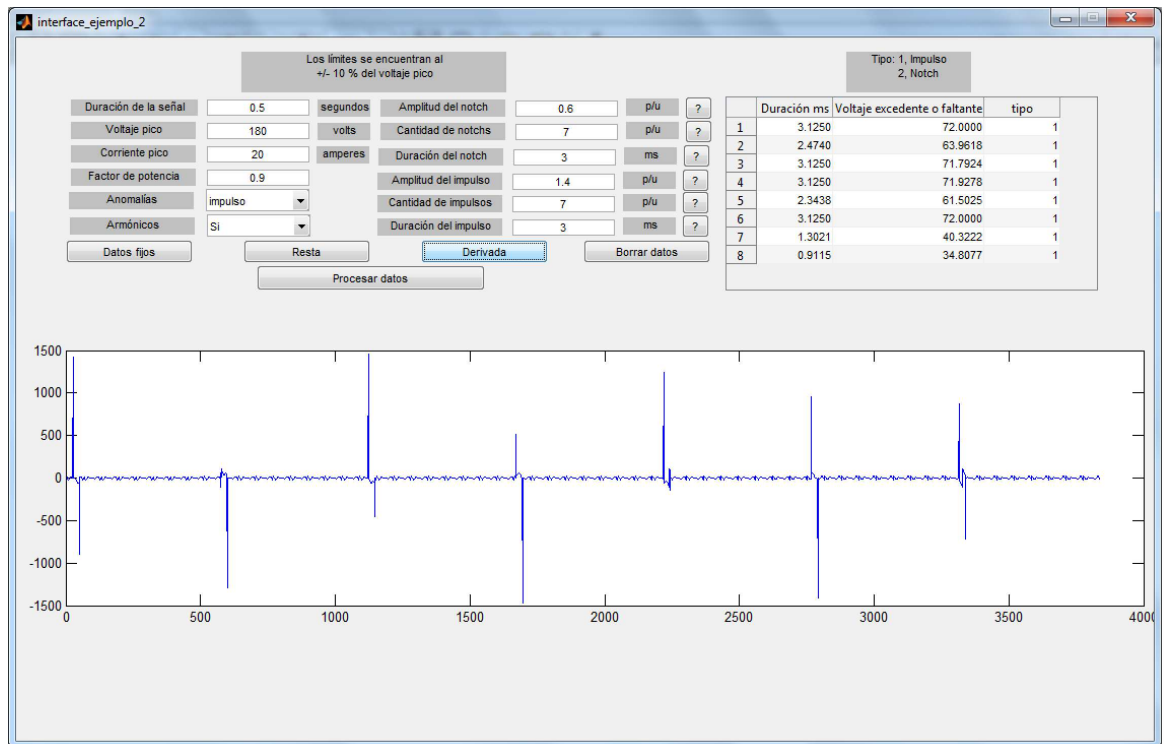


Figura B.4: Aislamiento.

de una magnitud considerable. Un caso similar sucede en la presencia de muescas en el voltaje.

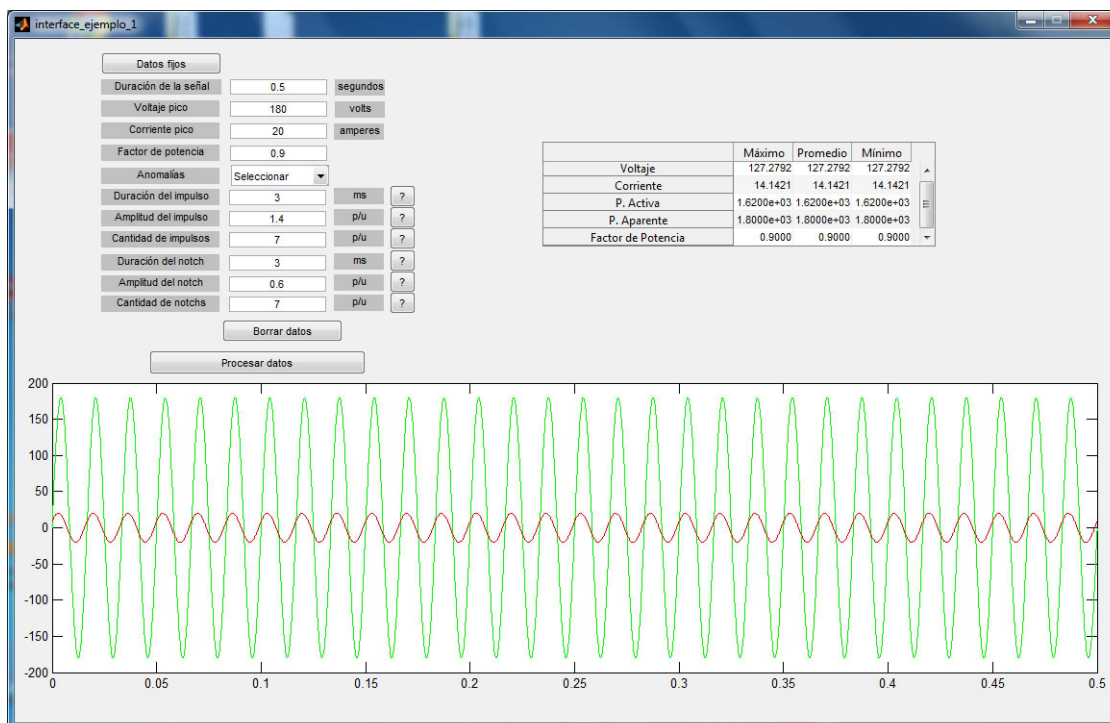


Figura B.5: Cálculo Ideal.

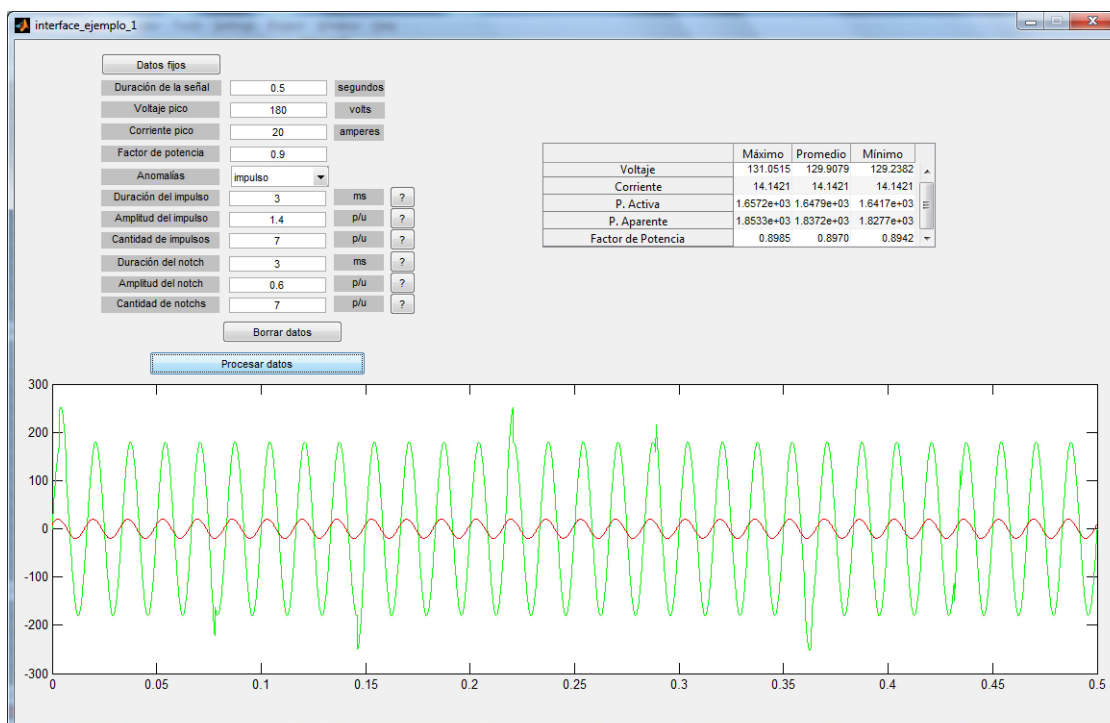


Figura B.6: Cálculo con Impulsos.

Bibliografía

- [1] IEEE Power & Energy Society. Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. IEEE Std 1159. New York, United States of America. IEEE-SA Standards Board, 2009. ISBN 978 0 7381 5939 3.
- [2] IEEE. The Authoritative Dictionary of IEEE Standards Terms. 7^a edición. United States of America. Standards Information Networks. Diciembre, 2000. ISBN:0 7381 2601 2.
- [3] Arrillaga J., Watson N. R. y Chen S. Power System Quality Assessment. Tottenham Court Road, London. Wiley. Enero 2001. ISBN: 0 471 98865.
- [4] IEEE Std 519-1992, IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System.
- [5] CFE. Desviaciones Permisibles en las Formas de Onda de Tensión y Corriente en el Suministro del Consumo de Energía Eléctrica. Especificación L0000-45. Enero 2005.
- [6] Math H. J. Bollen, Understanding Power Quality Problems Voltage Sags and Interruptions. Chalmers University of Technology Gothenburg, Sweden. IEEE Press Series On Power Engineering.
- [7] IEEE Std 141 - 1993 (R 1999), IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants.
- [8] ANSI C84.1-2006, American National Standard for Electric Power Systems and Equipment Voltage Ratings (at 60 Hz).
- [9] Bedell F. "Distortion Factors". Assisted by Bown R. and Swisher C. L. En Proceedings on 39th Annual Convention of the American Institute of Electrical Engineers, (1915), Vol. XXXIV, Núm. 1, pp. 1143-1157.

-
- [10] ANSI/IEEE Std. 446-1987: IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications.
- [11] METREL. Manual de Funcionamiento. PowerQ4 MI2592. Versión 1.0. Horjul Eslovenia: Metrel, 2009.
- [12] HIOKI. Power Quality Analyzer. Versión 3197. Nagano Japon, Hioki E. E. Corporation. Enero del 2009.
- [13] DRANETZ. PowerXplorer. Modelo PX5. New Durham Road Edison, New Jersey, United States of America. Dranetz BMI. 2005.
- [14] 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". En: IEEE Transaction on Power Delivery. Vol. 18. No. 2. April 2003. pp 595-600.
- [15] P. K. Dash, D. P. Swain, B. R. Mishra, and S. Rahman. "Power Quality Assessment Using an Adaptive Neural Network". Power Electronics, Drivers, Energy System. Industrial Growth, Vol. 2, 1996. pp. 770-775.
- [16] P. K. Dash, R. K. Jena, and M. M. A. Salama. "Power Quality Monitoring Using an Integrated Fourier Linear Combiner and Fuzzy Expert System", Int. J. Power Electronic Energy System., Vol. 21. no. 7. 1999 pp. 497-506.
- [17] M. P. Collins, W. G. Hurley, and E. Jones, "The Application of Wavelet Theory in an Expert System for Power Quality Diagnostics", En: Proceedings on 30th Univ. Power Engineering Conference, 1995, pp. 274-277.
- [18] Hasniaty, Azah M. y Aini H. "Automating Power Quality Disturbance Analysis Using the IPQDA Software Tool". En Proceedings on 4th Student Conference on Research and Development, (SCORED2006). (Selangor Malaysia, 2006), pp. 211-214.
- [19] Zhenghua Z., Yongqiang L., Fuqiang Z. y Mingzhi P. "Design and Data Processing of a Real-Time Power Quality Monitoring Instrument". En Proceedings on 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments. (Guangdong Providence, China, 2009), pp. 353-357.
- [20] Santoso S., Powers S., Grady W. y Hofmann P. "Power Quality Assessment Via Wavelet Transform Analysis". IEEE Transactions on Power Delivery. 1996, Vol. 11, Núm. 2, pp. 924-930.

-
- [21] He H. y Starzyk J. “A Self-Organizing Learning Array System for Power Quality Classification Based on Wavelet Transform”. IEEE Transactions on Power Delivery. 2006, Vol. 21, Núm. 1, pp. 286-295.
- [22] Weili H., Zixiang H. y Wei D. “Neural Network Model-Based Training Algorithm for Transient Signal Analysis”. En Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. (Changchun China, 2009), p. 4007-4011.
- [23] Barrios Godoy R., Onefre Pereira J. y Galotto Junior L. “Multiple Signal Processing Techniques Based Power Quality Disturbances Detection, Classification, and Diagnostic Software”. En Proceedings on 9th International Conference Electrical Power Quality and Utilization. (Barcelona, España 2007), pp. 1-6.
- [24] Sen O. y Zhen R. “Application of Improved Mathematical Morphology Method in the Power Quality Monitoring”. En Proceedings on International Conference on Power System Technology. (Guangdong Providence, China, 2006), p. 1-6.
- [25] Matz V., Radil T., Ramos P. y Cruz-Serra A. “Automated Power Quality Monitoring System for On-Line Detection and Classification of Disturbances”. En Proceedings on Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC 2007). (Warsaw, Polonia, 2007), pp. 1-6.
- [26] Sherman K. Stein, Anthony Barcellos “Cálculo y Geometría Analítica”, Volumen 1.