

Hundimientos de tensión: diseño y construcción de un prototipo virtual para su medición

Voltage sags: design and construction of a virtual prototype for his measurement

S. Arias-Guzman¹, A.J. Ustariz-Farfan², E.A. Cano-Plata³, C.D. Rojas-Montano⁴, J.D. Orozco-Clavijo⁵
A.F. Guerrero-Guerrero⁶, O.A. Ruiz-Guzman⁷

GICEP-GREDyP, Departamento de ingeniería eléctrica, Universidad Nacional de Colombia, Colombia.
Email: saariasgu@unal.edu.co¹, ajustarizf@unal.edu.co², eacanopl@unal.edu.co³, cdrojasm@unal.edu.co⁴,
judorozcocl@unal.edu.co⁵, afguerrerog@unal.edu.co⁶, oaruzig@unal.edu.co⁷.

RECIBIDO: abril 21, 2017 ACEPTADO: junio 2, 2017 VERSIÓN FINAL: noviembre 1, 2017

RESUMEN

En la actualidad, el uso de dispositivos electrónicos en los sectores residenciales, comerciales e industriales ha incrementado. Estos dispositivos son sensibles a perturbaciones en la red. Entre las perturbaciones que afectan a estos dispositivos, los hundimientos de tensión son registrados con mayor frecuencia. Debido a lo anterior, es necesario tener medidas confiables y precisas de esta perturbación. De acuerdo con esto, este artículo presenta el diseño y construcción de un prototipo de medidor virtual para hundimientos de tensión. El prototipo realiza el registro y segmentación de hundimientos utilizando el análisis tensorial y el filtro de Kalman. La implementación del prototipo se desarrolló en la tarjeta de adquisición y prototipado rápido DSpace DS1104. Las pruebas de funcionamiento fueron realizadas con registros de hundimientos de tensión suministrados por el operador de red local.

PALABRAS CLAVE: Hundimiento de tensión, Filtro de Kalman, segmentación, análisis tensorial.

ABSTRACT

At present, the use of electronic devices in the residential, commercial and industrial sectors has increased. These devices are sensitive to disturbances in the network. Among the disturbances that affect these devices, voltage sags are recorded most frequently. Due to the above, it is necessary to have reliable and accurate measurements of this disturbance. Accordingly, this paper presents the design and construction of a prototype virtual meter for voltage sags. The prototype performs the registration and segmentation of sags using the tensor analysis and the Kalman filter. The prototype implementation was developed on the DSpace DS1104 acquisition and rapid prototyping board. The operating tests were performed with voltage sags records supplied by the local network operator.

KEYWORDS: Voltage Sag, Kalman Filter, Segmentation, Tensor Assessment.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la incursión masiva de dispositivos electrónicos supone retos para el suministro de energía eléctrica. Entre ellos, la calidad del suministro se ve afectada por perturbaciones asociadas a la calidad de la potencia. Dentro de estas perturbaciones, los hundimientos de tensión generan más del 90% de las interrupciones del servicio [1].

Estas interrupciones, ocasionan pérdidas económicas en procesos industriales y mal funcionamiento o avería de dispositivos electrónicos [1], [2] y [3].

De acuerdo a esto, se hace necesario extraer información precisa de los hundimientos de tensión [4]. Sin embargo, los dispositivos de medida convencionales solo registran algunas características como la tensión remanente y la duración de la perturbación [5], [6].

Adicionalmente, cuando los hundimientos presentan múltiples segmentos (multiestado), la medición de las

características no se realiza para cada segmento [5]. Tal como se muestra en la Figura 1.

En [7] y [8], se identificó que para una correcta medición de perturbaciones se debe asegurar que los procesos de detección y segmentación se realicen de forma precisa y confiable.

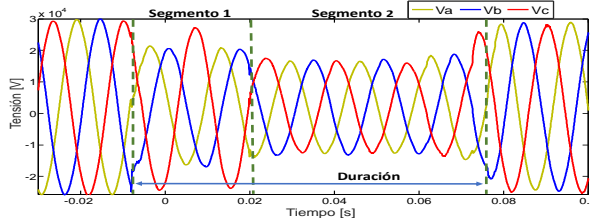


Figura 1. Hundimiento de tensión multiestado. Fuente. Elaboración propia.

De la necesidad identificada, este trabajo detalla el proceso metodológico empleado para el diseño y construcción de un prototipo virtual de medición de hundimientos de tensión. Este proceso metodológico utiliza el análisis tensorial de las tensiones medidas y la potencialidad de predicción del filtro de Kalman para la implementación de sus algoritmos. Adicionalmente, se han realizado pruebas de funcionamiento, usando registros de hundimientos de tensión suministrados por el operador de red local.

Este artículo se organiza de la siguiente forma: La sección 2 explica los conceptos y definiciones que fueron necesarias para el desarrollo del prototipo. La sección 3, muestra la metodología seguida a lo largo del diseño y construcción del prototipo. Pruebas realizadas y resultados obtenidos del prototipo se exponen en la sección 4. Finalmente, la sección 5 contiene las conclusiones y recomendaciones resultado de esta investigación.

2. MARCO TEORICO

En esta sección se exponen los conceptos y herramientas base para llevar a cabo esta investigación. Adicionalmente, se realiza una síntesis de los métodos de segmentación.

2.1. Hundimientos de Tensión.

Los hundimientos de tensión son una perturbación de la calidad de la potencia, estos se reflejan como un decremento entre el 10% y el 90% del valor de la tensión nominal eficaz (rms) con una duración entre medio ciclo y 1 minuto [9]. Los hundimientos de tensión son el resultado de operaciones atípicas del sistema, tales como: fallos, arranque de grandes motores o conexión de cargas con una demanda de potencia elevada [10]. Los hundimientos de tensión pueden ser clasificados en dos categorías: monoestado y multiestado.

Los hundimientos de tensión monoestado son aquellos que presentan solo un segmento estacionario y dos segmentos transitorios (comienzo y final) durante la perturbación. Mientras que, los hundimientos de tensión multiestado presentan múltiples segmentos estacionarios y múltiples segmentos transitorios durante la perturbación.

2.2. Representación tensorial de la tensión.

La representación tensorial, es una herramienta usada para el estudio de sistemas polifásicos en régimen no sinusoidal [11]. Esta representación, inicia con los tensores instantáneos de tensión de primer orden. Estos tensores se observan en la ecuación (1), donde u_a , u_b y u_c son las tensiones instantáneas en cada una de las fases del sistema trifásico (a, b, c).

$$U_i = U_j = \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

Luego, por medio del producto diádico (\otimes) entre los tensores de primer orden U_i y U_j , se obtiene el tensor de tensiones de segundo orden Γ_{ij} expuesto en la ecuación (2). Γ_{ij} brinda una expresión de todas las posibles combinaciones de las tensiones de fase del sistema trifásico.

$$\Gamma_{ij} = U_i \otimes U_j = \begin{bmatrix} u_a^2 & u_a u_b & u_a u_c \\ u_a u_b & u_b^2 & u_b u_c \\ u_a u_c & u_b u_c & u_c^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Una forma de 'medir' la magnitud de las componentes presentes en Γ_{ij} , es por medio de un operador norma. Para realizar este proceso se utiliza la norma Frobenius, la cual se calcula como muestra la ecuación (3).

$$\lambda_{T_F} = \|\Gamma_{ij}\|_F = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 |\Gamma_{ij}|^2} \quad (3)$$

La norma λ_{T_F} sirve como un indicador general del estado de la tensión del sistema [3], [12]. Lo anterior, debido a que expone comportamientos característicos cuando el sistema experimenta condiciones de operación atípicas. En la Figura 2, se observa el comportamiento de λ_{T_F} calculado para el hundimiento de tensión multiestado de la Figura 1.

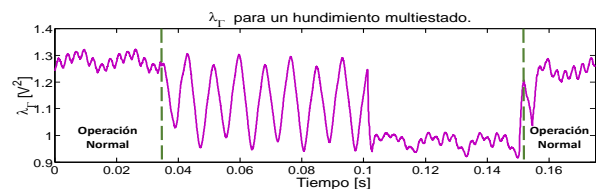


Figura 2. Norma λ_{T_F} para hundimientos multiestado. Fuente. Elaboración propia

2.3. Filtro de Kalman.

El filtro de Kalman (K.F), es un algoritmo que predice el estado de un sistema en un tiempo k a partir de una muestra tomada en un instante de tiempo $k-1$. El algoritmo se observa en la Figura 3, y consta de las siguientes etapas: muestreo, predicción y corrección. Las etapas de predicción y corrección corresponden a un proceso iterativo que busca la minimización del error de la estimación [3], [9], [12].

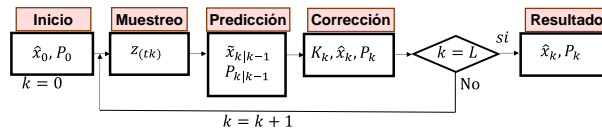


Figura 3. Algoritmo Filtro de Kalman. **Fuente.** Elaboración propia.

2.4. Métodos de segmentación.

Los métodos de segmentación, del estado del arte, pueden ser clasificados en tres categorías: (a) valores eficaces, (b) valores residuales y (c) seguimiento de parámetros espaciales.

Los métodos que utilizan valores eficaces [9], [15] realizan la detección al comparar el valor eficaz de la tensión y un umbral constante. Sin embargo, no identifica la presencia de varios segmentos. Lo anterior, debido a que observan la perturbación como un único segmento estacionario y el cálculo del valor eficaz exige el uso de una ventana de un ciclo para su cálculo.

Los métodos residuales [12], [13], [16], [17] utilizan herramientas de predicción para estimar la tensión en un instante futuro. Esta predicción es comparada con la medición real de la tensión para obtener un residuo. La detección se produce cuando el valor del residuo supera un valor de umbral. La precisión de estos métodos radica en la estabilidad de la estimación.

Los métodos de seguimiento de parámetros espaciales [3], utilizan la transformada de *Clarke* para comparar una magnitud espacial contra un umbral. Estos métodos acarrear un retraso por el uso de la transformada de *Fourier* durante el cálculo de los parámetros espaciales. Como síntesis, se observa que los métodos de segmentación realizan el cálculo de un indicador que se compara contra un umbral para realizar la detección.

Recientes investigaciones [3], [6], [7], [12] y [16], realizadas al interior de nuestros grupos de investigación (GREdYp y GICEP), proponen un nuevo enfoque basado en el método de valores residuales; dicho enfoque es denominado Tensor-VSA y es descrito en la sección 3.1. En la Tabla I, se listan los diferentes métodos de segmentación con sus respectivos retrasos promedios y su respectiva capacidad de identificar varios segmentos.

Tabla 1. Retraso de los métodos de segmentación.

Método		Retraso promedio [ms]	Identifica varios segmentos
Valores eficaces		17.06	No
Parámetros espaciales		8.19	No
Valores Residuales	Tradicional	4.16	Si
	Propuesto (Tensor-VSA)	2.00	Si

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Tabla I, el método Tensor-VSA [12] cuenta con el menor retraso promedio y cuenta con la identificación de varios segmentos.

3. METODOLOGIA

La metodología propuesta para esta investigación se expone en la Figura 4. La primera fase comprende el desarrollo del algoritmo implementado en el prototipo. En la segunda fase, se simula el sistema completo mediante el software MATLAB/Simulink®. Por último, se realiza la implementación del algoritmo en la tarjeta de adquisición de datos y prototipado rápido de control dSPACE® DS1104.

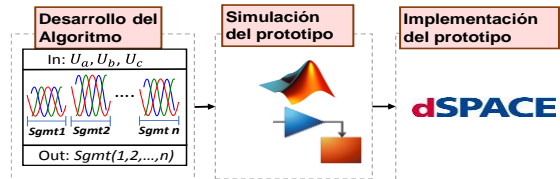


Figura 4. Metodología propuesta. **Fuente.** Elaboración propia.

3.1. Fase 1: Desarrollo del algoritmo (Tensor VSA).

Este algoritmo segmenta hundimientos de tensión a través del análisis tensorial y la potencialidad de predicción del filtro de Kalman [12] [13]. La metodología que sigue el algoritmo se compone de las cinco etapas que se muestran en la Figura 5 y son descritas a continuación.

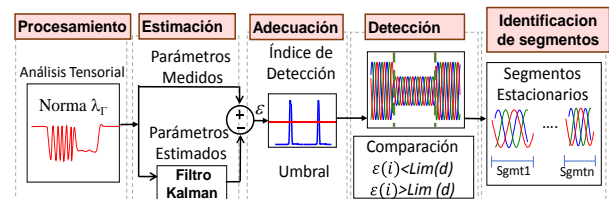


Figura 5. Metodología de segmentación. **Fuente.** Elaboración propia.

La segmentación, inicia con la etapa de procesamiento en la cual se calcula λ_T . Para esto, se muestrean las tensiones

instantáneas con las cuales se construyen los tensores U_i y U_j como muestra la ecuación (1). Posteriormente, se calcula el tensor Γ_{ij} y la norma λ_Γ usando las ecuaciones (2) y (3), respectivamente.

La estimación de la norma $\lambda_{\Gamma(Te)}$ es obtenida utilizando el algoritmo K.F. Para realizar la estimación, se adaptó el K.F como se describe en [12].

La etapa de adecuación se encarga de generar los parámetros necesarios para realizar la detección del hundimiento. En este algoritmo, se calculó la desviación $\varepsilon(t_k)$ entre el valor medido $\lambda_{\Gamma(Tm)}$ y el valor estimado $\lambda_{\Gamma(Te)}$ como muestra la ecuación (4).

$$\varepsilon(t_k) = \left| \lambda_{\Gamma(Tm)} - \lambda_{\Gamma(Te)} \right| \quad (4)$$

A partir de la media móvil de $\varepsilon(t_k)$ en una ventana de tiempo W se obtuvo el índice $DI(k)$ como se muestra en la ecuación (5). $DI(k)$ detecta los cambios transitorios de $\varepsilon(t_k)$.

$$DI(k) = \left(\frac{1}{W} \sum_{i=k-W}^k \varepsilon(i) \right)^2 \quad (5)$$

Finalmente, el cálculo de un límite adaptativo evita la detección errónea provocada por ruido en la señal. Para esto, se determina el valor promedio de $DI(k)$ en una ventana de tiempo V de un cuarto de ciclo, como muestra la ecuación (6). La etapa de adecuación tiene como salida $\varepsilon(t_k)$ y $Lim(d)$.

$$Lim(d) = 3 \cdot \frac{1}{V} \sum_{i=n-V}^{n+V} DI(i) \quad (6)$$

Durante la etapa de detección, se encuentran los instantes de tiempo donde se da inicio al hundimiento o transición entre segmentos. Si el valor de $\lambda_{\Gamma(Tm)}$ difiere considerablemente de $\lambda_{\Gamma(Te)}$ en un instante de tiempo k , el valor de $\varepsilon(t_k)$ también aumentará para ese instante de tiempo. Lo anterior, ocasionara que el valor de $\varepsilon(t_k)$ supere a $Lim(d)$ y genere un (1) valor lógico en la detección. Como muestra la ecuación (7).

$$\begin{aligned} \varepsilon(i) < Lim(d) &= 0 \\ \varepsilon(i) > Lim(d) &= 1 \end{aligned} \quad (7)$$

Finalmente, la etapa de identificación organiza los segmentos teniendo en cuenta el orden de aparición de las detecciones.

3.2. Fase 2: Simulación del prototipo.

Esta sección describe la simulación del prototipo en el software MATLAB/Simulink®. La simulación se compone de cuatro etapas: Generación de hundimientos, estimación, detección y registro.

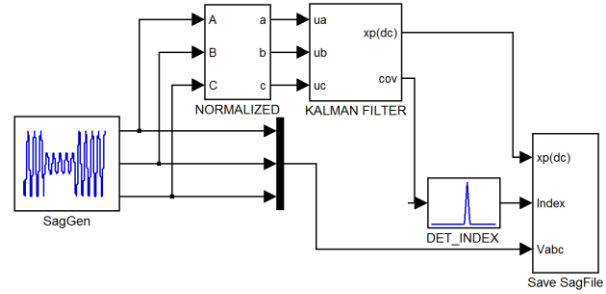


Figura 6. Simulación de la detección. **Fuente.** Elaboración propia.

Los bloques de simulación se implementaron tal como se observa en la Figura 6 y cada una de sus etapas se explica a continuación, tomando como ejemplo un registro de hundimiento monoestado con caída de tensión en las tres fases.

En la primera etapa se adquieren las señales de tensión. Para esto, se ha implementado el bloque *SagGen*, el cual carga registros de hundimientos suministrados por el operador de red local. La Figura 7 es un ejemplo de estos registros.

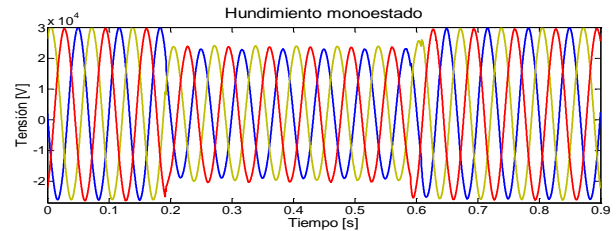


Figura 7. Simulación de la detección. **Fuente.** Elaboración propia.

En la segunda etapa, se calcula $\lambda_{\Gamma(Tm)}$ y se realiza la estimación $\lambda_{\Gamma(Te)}$. Para esto, es necesario normalizar las tensiones con respecto al valor de tensión nominal del sistema en el bloque *Normalized*. A partir de las ondas normalizadas, se realiza el cálculo y estimación de λ_Γ en el bloque *Kalman Filter*. Este proceso, aplicado el registro de la Figura 7, se observa en la Figura 8.

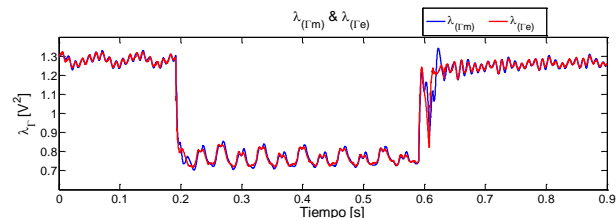


Figura 8. Cálculo y estimación de λ_Γ para un registro de hundimiento monoestado **Fuente.** Elaboración propia.

En la tercera etapa, se realiza la detección de segmentos del hundimiento. Para esto se calculan los parámetros $\varepsilon(t_k)$, $DI(k)$ y $Lim(d)$ en el bloque *DET_INDEX*.

En la Figura 9 se observan los parámetros $\varepsilon(t_k)$ y $Lim(d)$ para el registro de la Figura 7.

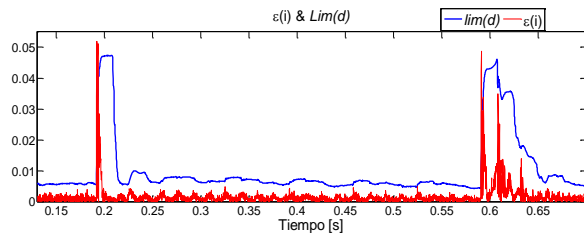


Figura 9. Parámetros $\varepsilon(t_k)$ y $Lim(d)$ para un registro de hundimiento monoestado. **Fuente.** Elaboración propia.

Finalmente, en la cuarta etapa a través del bloque *Save_SagFile* se realiza: (a) el conteo de segmentos presentes en el hundimiento, (b) el cálculo de la duración total del hundimiento y (c) el registro de la forma de onda del hundimiento y su detección. En la Figura 10, se observan los registros obtenidos del bloque *Save_SagFile* para el registro de la Figura 7.

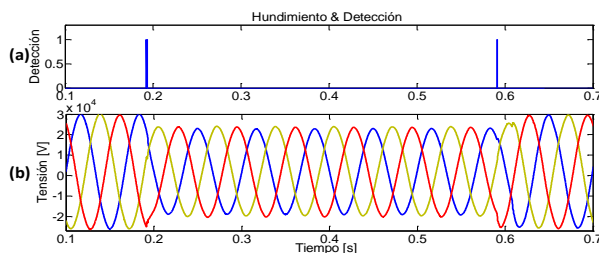


Figura 10. Registro de hundimiento y detección para hundimiento monoestado. **Fuente.** Elaboración propia.

3.3. Fase 3: Implementación del prototipo.

Para la implementación del prototipo, se utiliza la tarjeta de adquisición de datos DS1104. Esta tarjeta, permite el prototipado de control rápido (RCP) e implementación de aplicaciones en tiempo real (RTI) a través de MATLAB/Simulink®. En la Figura 11 se observa la estación de investigación del Laboratorio de Calidad de la Energía y Electrónica de Potencia, donde se realizó la implementación. En esta figura se detalla el panel de adquisición de la tarjeta y el monitor del ordenador donde se visualizó el modelo del prototipo.

En la realización de la implementación, se llevaron a cabo los siguientes pasos:

1. Compilación en la tarjeta DS1104 del modelo del prototipo desarrollado en la fase 2.
2. Desarrollo de una interfaz gráfica mediante la herramienta *ControlDesk/dSPACE*.
3. Conexión de las variables del modelo del prototipo a la interfaz gráfica.
4. Ajuste de la señal de disparo (*Trigger*) para la captura de datos.

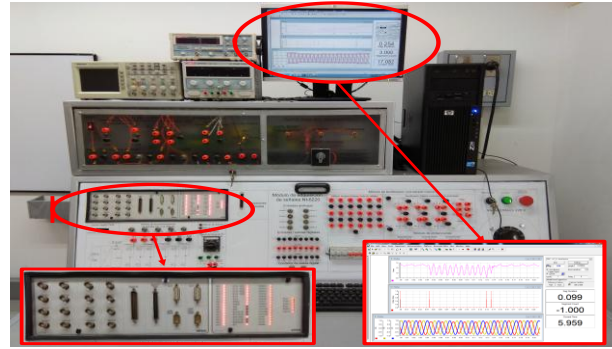


Figura 11. Fotografía de la estación de trabajo donde se realizó la implementación. **Fuente.** Elaboración propia.

La interfaz gráfica y un ejemplo de captura de hundimiento realizado por el prototipo se observa en la Figura 12.

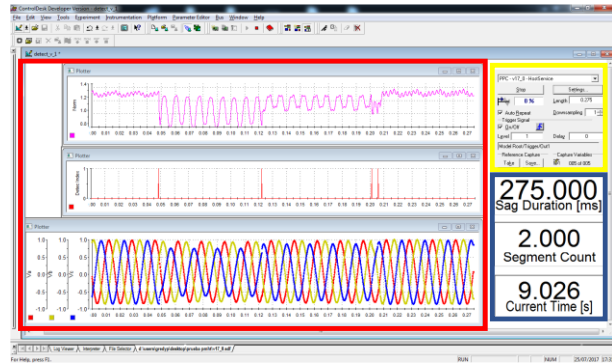


Figura 12. Interfaz gráfica y ejemplo de captura para un hundimiento multiestado. **Fuente.** Elaboración propia.

La interfaz gráfica desarrollada se divide en tres zonas. En la primera zona (recuadro rojo), se encuentran tres ventanas donde se muestra $\lambda_{\Gamma(Te)}$, la detección y el registro del hundimiento. En la segunda zona (recuadro azul) se encuentran tres displays, donde se muestran los valores numéricos de la duración del hundimiento (en milisegundos), la cantidad de segmentos y el instante en el cual se produjo el hundimiento (en segundos). En la tercera zona (recuadro amarillo) se encuentra el panel de configuración de la señal de disparo (*Trigger*) para la captura de datos. Como señal de disparo se utiliza la señal de detección.

4. RESULTADOS

Para comprobar el funcionamiento del prototipo se realiza una prueba experimental, en la cual se analizan un total de 199 registros tomados a 128 muestras por ciclo. El conjunto de registros se compone de 148 registros monoestado y 51 registros multiestado. Mediante comparación con los registros de formas de onda, se estableció la fiabilidad en la detección.

En la prueba, se mide el retraso en la detección a partir de la diferencia entre el instante de inicio del hundimiento y la detección del prototipo.

Un ejemplo de la prueba experimental se desarrolla para el hundimiento multiestado de la Figura 13. Este se compone de 3 segmentos. Durante la prueba se detectó el tiempo de inicio de los tres segmentos y el tiempo del final del hundimiento.

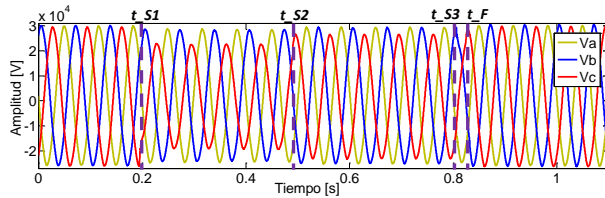


Figura 13. a) Retraso máximo b) Retraso mínimo hundimientos multiestado. **Fuente.** Elaboración propia.

A partir de la diferencia entre los tiempos reales y la detección del medidor se obtuvo el retraso en la detección. Los tiempos de detección del medidor, reales y el retraso se observan en la tabla 2.

Tabla 2. Resumen de medidas de retraso.

Valor	Tiempos de detección [ms]			
	t_{S1}	t_{S2}	t_{S3}	t_F
Real	193.7	471.5	818.2	846.6
Medidor	193.85	471.7	818.4	846.7
Retraso	0.15	0.2	0.2	0.1

Fuente. Elaboración propia.

En las Figuras 13 y 14 se observan los valores de retraso de detección máximo y mínimo para hundimientos multiestado y monoestado. En cada una de las gráficas se muestra también un valor de referencia que indica el valor promedio del conjunto de mediciones. Se observa en ambas gráficas la ausencia de valores atípicos de retraso a lo largo de la prueba realizada al conjunto de registros.

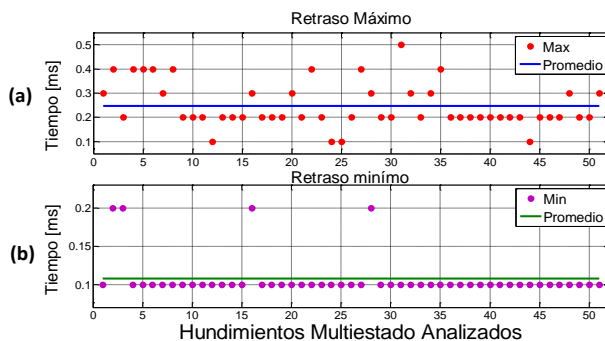


Figura 13. a) Retraso máximo b) Retraso mínimo hundimientos multiestado. **Fuente.** Elaboración propia.

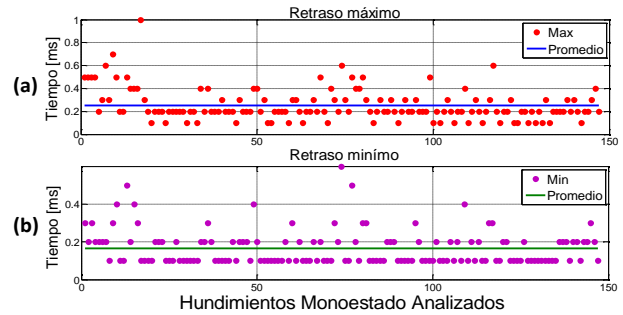


Figura 14. a) Retraso máximo b) Retraso mínimo hundimientos monoestado. **Fuente.** Elaboración propia.

Los retrasos máximos, mínimos y promedio para los registros monoestado y multiestado se observan en la Tabla 3.

Tabla 3. Resumen de medidas de retraso.

Registros	Retraso máximo	Retraso mínimo	Retraso Promedio
Multiestado	0.5 ms	0.1 ms	0.1750 ms
Monoestado	1 ms	0.1ms	0.2055 ms
Total	1 ms	0.1 ms	0.1944 ms

Fuente. Elaboración propia.

A partir de los valores de la tabla 3, se obtuvo un valor de precisión de la medición realizada por el prototipo igual a $0.95 \pm 6.95 \cdot 10^{-16}$ [ms]. $6.95 \cdot 10^{-16}$ es la desviación estándar de la medida realizada. El retraso máximo en la detección de hundimientos es muy bajo cuando es comparado con los métodos convencionales de detección de hundimientos [14]. Se resalta que para hundimientos monoestado y multiestado se presentó un retraso promedio cercano al que se describe en las investigaciones [12], [13], tal como se lista en la Tabla 1.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como resultado de esta investigación se ha desarrollado un prototipo de medidor virtual que realiza la segmentación de hundimientos de tensión.

El prototipo desarrollado funciona como alternativa en la detección precisa de hundimientos con respecto a los dispositivos de medición convencionales y a los métodos del estado del arte.

Un punto de comparación, es la cantidad de muestras por ciclo. El prototipo ha obtenido bajos retrasos en la detección con una cantidad de muestras por ciclo inferior a las que manejan los instrumentos actuales de medición. Adicionalmente, el prototipo permite realizar la identificación de varios segmentos en los hundimientos de tensión, a diferencia de los instrumentos actuales.

La segmentación entregada por el prototipo, es un punto de partida para la correcta clasificación y cálculo de indicadores de los hundimientos de tensión.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC) por proporcionar los registros de calidad de la potencia que ayudaron a la realización de esta investigación. También agradecen a la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales por apoyar esta investigación por medio del proyecto con código HERMES 35552 y a los grupos de investigación Redes de Distribución y Potencia- GREDyP y Grupo de Investigación de Calidad de la Potencia y Electrónica de Potencia-GICEP. La implementación y las pruebas del prototipo fueron desarrolladas con el apoyo del Laboratorio de Calidad de la Energía y Electrónica de Potencia-LACEP.

7. REFERENCIAS

- [1] A. Bendre *et al* "Are voltage Sags destroying equipment?" IEEE Industry Applications Magazine, vol. 12, no. 4, pp. 12-21, Jul-Ago, 2006.
- [2] S. R. Naidu, Gilvan V. de Andrade y Edson G. da Costa "Voltage Sag Performance of a Distribution System and its Improvement" IEEE Trans on Industry Applications, vol. 48, no. 1, pp. 218-224, Nov, 2011.
- [3] S. Arias "Hundimientos de Tensión. Un enfoque de analisis a partir del algebra tensorial" Tesis de maestría, Departamento de ingeniería eléctrica y electrónica y computación, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia , 2015.
- [4] A. dos Santos, M.T. Correia de Barros "Predicting Equipment Outages Due to Voltage Sags" IEEE Trans on Power Delivery , vol. 31, no. 4, pp. 1683-1691, Dic, 2015.
- [5] M. Bollen y Y. Wang "Voltage sag indices-future directions," IEEE Power & Energy Society General Meeting, Denver, USA, 2015, pp. 1-13
- [6] D. Gallo, C. Landi y M.Luiso "Accuracy Analysis of Algorithms Adopted in Voltage Dip Measurement" IEEE Trans on Instrumentation and Measurement , vol. 59, no. 10, pp. 2652-2659, Dic, 2010
- [7] M. Caujolle *et al* "Impact of Waveform Segmentation Accuracy on Disturbance Recognition Reliability" Proc of IPST, Delf, Holanda, 2011.
- [8] M. Caujolle *et al* "Reliable Power Disturbance Detection Using Wavelet or Harmonic Model based Kalman Filtering" Proc of 14th ICHQP, Bergamo, Italia, 2010, pp 1-6.
- [9] IEEE Guide for Voltage Sags Indices, IEEE Standard 1564, 2014.
- [10] T. C. de Oliveira *et al* "Analysis of the relation between voltage sags severity and fault characteristics" Proc of 14th ICHQP, Bergamo, Italia, 2010, pp 1-8.
- [11] A.J.Ustariz-Farfán "Formulación de una teoría tensorial de la potencia eléctrica. Aplicaciones al estudio de la calidad de la energia " Tesis de doctorado, Departamento de ingeniería eléctrica y electrónica y computación, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia, 2011.
- [12] S. Arias, A.J. Ustariz y E. Cano-Plata "Segmentation and characterization of voltage sags in the analysis of industrial circuits" IEEE IAS Annual Meeting, Portland, USA, 2016, pp 1-8.
- [13] S. Arias, A.J. Ustariz-Farfán y E. Cano-Plata "Voltage sag segmentation under deformation tensor parameters" IEEE 16th ICHQP, Bucarest, Rumania, 2014, pp 541-545.
- [14] D. Gallo *et al* "Survey on Voltage Dip Measurement in Standard Framework" IEEE Trans on Instrumentation and Measurement , vol. 63, no. 2, pp.374-387, Sep, 2014.
- [15] Electromagnetic compatibility (EMC), IEC Standard 61000-4-30, 2008.
- [16] S. Arias, A.J. Ustariz-Farfán y E. Cano-Plata "Detection of Power Quality Disturbances Using Deformation Tensor Parameters" IEEE Latin America Transactions , vol. 13, no. 7, pp. 1548-0992, Sep, 2015.
- [17] E. Styvaktakis, M. H. J. Bollen and I. Y. H. Gu, "Expert system for classification and analysis of power system events," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 17, no. 2, pp. 423-428, Apr 2002

AUTORES



Santiago Arias-Guzman (S'14) Nació en Manizales. Caldas, Colombia en 1990. Recibió su título en ingeniería eléctrica en 2013 y su título de maestría en ingeniería eléctrica en 2016 de la universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. Actualmente estudia su doctorado en ingeniería eléctrica en la universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. Sus intereses en investigación incluyen hundimientos de tensión, segmentación y filtro de Kalman.



Armando J. Ustariz-Farfan (S'08, M'12) Nació en Urumita (Colombia) en 1973. Recibió su título en Ingeniería Eléctrica en 1997, y en la Maestría en Potencia Eléctrica en el año 2000 de la Universidad Industrial de Santander. El obtuvo su título de Doctor en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Nacional de Colombia, en 2011. Es investigador y profesor asociado al departamento de Ingeniería Eléctrica,

Electrónica y Computación en la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. Sus intereses en investigación incluyen Definiciones de Potencia bajo condiciones no sinusoidales, redes inteligentes, Calidad de la Potencia, y Electrónica de Potencia. Es el director del grupo de investigación en Calidad de la potencia y Electrónica de potencia – GICEP.



Eduardo A. Cano-Plata (S'96, M'98, SM'15) Nació en Neiva, Colombia, en 1967. Recibió su título en ingeniería y especialista en 1990 y 1994 en la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, ambos en Ingeniería Eléctrica. Recibió su título como Doctor en Ingeniería en 2006 de la Universidad de Buenos Aires. Desde 1994, se desempeña como profesor en la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. Sus

intereses de investigación incluyen Calidad de la Potencia, Electrónica de Potencia, Sistemas de Puesta a Tierra y Redes Inteligentes. Es el actual director del Grupo de Investigación en Redes de Distribución y Potencia – GREdyp.



Carlos D. Rojas-Montaño Nació en Bogotá, Colombia, en 1994. Actualmente estudia ingeniería eléctrica en la Universidad Nacional de Colombia. Sus intereses de investigación incluyen Hundimientos de Tensión, Segmentación y Filtro de Kalman.



Juan D. Orozco-Clavijo Nació en Manizales, Colombia, en 1992. Actualmente estudia ingeniería electrónica en la Universidad Nacional de Colombia. Sus intereses de investigación incluyen Electrónica de Potencia, Hundimientos de tensión y Calidad de la Potencia.



Andrés Felipe Guerrero-Guerrero (S'15) Nació en Linares, Nariño, Colombia en 1984. Obtuvo su título de ingeniería electrónica y maestría en automatización industrial de la universidad Nacional de Colombia sede Manizales en 2010 y 2014. Actualmente, es candidato a doctor en la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. Sus intereses investigativos incluyen electrónica de potencia y dispositivos semiconductores de potencia

S. Arias-Guzman, A.J. Ustariz-Farfan, E.A. Cano-Plata, et.al.



Oscar A. Ruiz-Guzman (S'14) Nació en Manizales, Caldas, Colombia, en 1991. Recibió su título en ingeniería eléctrica en 2014 en la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. Actualmente estudia su maestría en ingeniería eléctrica en la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. Sus intereses de investigación incluyen Calidad de la Potencia, Vehículos Eléctricos y Redes Inteligentes.

