

Innovative Approach for the Analysis of Electromagnetic Transients Generated by the Integration of Distributed Energy Resources in Power Systems

Carlos Castro , *Student Member, IEEE*, Jacobo Ceballos , *Student Member, IEEE*, Julián Nieto , *Student Member, IEEE*, and Eduardo Gómez-Luna , *Member, IEEE*

Abstract—This article presents a set of methods for the extraction of features from transient events in power systems, using EMT (Electromagnetic Transients) simulations. The main approach is based on the application of the wavelet transform to transient signals, allowing for the analysis and characterization of various types of transient events. Based on the information obtained from the wavelet transform, specific methods such as impedance analysis, energy, peaks, and selectivity indices are developed and applied. These methods provide useful tools for the identification and classification of transient events, constituting a basis for the characterization of various types of disturbances in a power systems. The techniques developed enabled the extraction of unique and distinguishing features of photovoltaic resources, which can later be applied to non-intrusive monitoring of these systems.

Link to graphical and video abstracts, and to code:
<https://latam.ieceer9.org/index.php/transactions/article/view/9283>

Index Terms—Transient events, power systems, wavelet transform, impedance analysis, energy analysis.

I. INTRODUCCIÓN

DEBIDO a la transición energética evidenciada en los últimos años, los recursos energéticos distribuidos (DERs) se han integrado progresivamente en los sistemas eléctricos de potencia como una medida para abordar los desafíos ambientales. Esta tendencia responde a la necesidad de mitigar los impactos negativos de las fuentes de energía tradicionales y a la creciente demanda de soluciones sostenibles. La proyección de integración de estos recursos continúa en ascenso, impulsada por políticas energéticas favorables y avances tecnológicos. No obstante, la incorporación masiva de DERs ha generado nuevos desafíos en la operación y estabilidad de los sistemas de potencia. Entre los problemas más notables se encuentran las fluctuaciones en la calidad de la energía, la complejidad en la gestión del flujo de potencia, los armónicos inducidos por inversores de potencia, y la necesidad de adaptar las infraestructuras existentes para

garantizar un funcionamiento seguro y eficiente. Además, es importante realizar análisis tanto en estado estacionario como en transitorio para comprender mejor los impactos de los DERs en los sistemas eléctricos y desarrollar estrategias de mitigación efectivas.

Existen diversos métodos para el análisis de señales transitorias en transformadores, líneas de transmisión e interruptores, los cuales son importantes para el diagnóstico y monitoreo de las condiciones de los sistemas eléctricos de potencia. Las técnicas de análisis de Fourier, wavelets y transformadas de Park se han destacado en la caracterización de fenómenos como descargas parciales, sobretensiones y fallas de conmutación, proporcionando herramientas para el mantenimiento predictivo y la prevención de fallas en estos componentes. Se ha demostrado la efectividad de estos enfoques en la mejora de la detección temprana de anomalías, así como en la precisión del modelado de los transitorios eléctricos. Por ejemplo, en [1] se presenta un enfoque basado en funciones wavelet para el monitoreo de fallas transitorias en transformadores, mientras que en [2] se exploran aplicaciones de la transformada de Fourier en el análisis de sobretensiones en líneas de transmisión. En [3] se realiza un análisis de señales transitorias con transformada wavelet continua con cargas inductivas, resistivas y capacitivas. En [4] y [5] se realizan pruebas FRA para transformadores en servicio empleando transformada de Fourier y transformada Wavelet. Estos métodos continúan evolucionando a medida que se integran tecnologías de inteligencia artificial y machine learning, lo que permite una mayor capacidad de adaptación y optimización en la detección de eventos críticos en redes de potencia complejas.

Aún no existen metodologías consolidadas que permitan analizar de manera clara la integración de los DER y su comportamiento dinámico en diversas frecuencias, especialmente en eventos transitorios. Algunos trabajos han intentado abordar esta problemática; por ejemplo, en [6] se explora el uso de análisis de eventos transitorios en redes con alta penetración de DERs, pero sus metodologías se limitan a ciertos escenarios específicos y no ofrecen un enfoque generalizable para todas las configuraciones de red.

Este artículo tiene como objetivo proponer nuevos métodos de análisis para eventos transitorios en sistemas eléctricos de potencia ocasionados por la integración de DERs, brindando un primer paso hacia la resolución de los problemas previ-

The associate editor coordinating the review of this manuscript and approving it for publication was José Miguel Sosa (*Corresponding author: Jhonn Carlos Castro Giraldo*).

Carlos Castro, J. Ceballos, J. Nieto, and E. Gómez-Luna are with the Universidad del Valle, Cali, Colombia (e-mails: jhonn.castro@correounivalle.edu.co, jacoboc.cebillos@correounivalle.edu.co, nieto.julian@correounivalle.edu.co, and eduardo.gomez@correounivalle.edu.co).

amente mencionados. El documento abordará en su primera parte la postulación de los métodos, una aplicación basada en un caso de estudio en un sistema de potencia IEEE de 14 nodos y un análisis de los resultados obtenidos con cada método. La implementación de los métodos propuestos puede contribuir significativamente al monitoreo e identificación efectiva de los transitorios en sistemas de potencia, un desafío para el cual actualmente no existen métodos no intrusivos precisos y eficientes, especialmente por la conexión de DER. El monitoreo no intrusivo de estos recursos podría mejorar la toma de decisiones en los sistemas eléctricos, ayudando a los operadores de red a analizar mejor las condiciones transitorias.

II. MÉTODOS DE ANÁLISIS PROPUESTOS PARA EVENTOS EMT

Las simulaciones EMT son un conjunto de herramientas para el análisis y estudio de sistemas eléctricos. Estas simulaciones permiten modelar y evaluar el comportamiento transitorio de redes eléctricas ante diversas perturbaciones, como fallas, maniobras de conmutación y eventos atmosféricos. Mediante el uso de métodos numéricos, las simulaciones EMT proporcionan una representación de las dinámicas electromagnéticas, estas simulaciones facilitan el estudio de los fenómenos cuyas dinámicas sean de naturaleza rápida, mientras que se consideran sobredimensionadas para fenómenos de respuesta más lenta [7].

El tratamiento de señales mediante la transformada wavelet es una técnica de análisis y procesamiento de señales que descompone una señal en componentes de tiempo-frecuencia utilizando wavelets madre. A diferencia de la transformada de Fourier, que solo proporciona información en el dominio de la frecuencia, la transformada wavelet ofrece una representación conjunta en tiempo y frecuencia, permitiendo el análisis de señales no estacionarias y transitorias [8], [9].

Los métodos de análisis son procedimientos que permiten extraer características de las señales, lo que facilitará la caracterización de los recursos distribuidos para, en un futuro, clasificarlos individualmente. Estos métodos se agrupan en tres categorías principales: análisis temporal, análisis tiempo-frecuencia y análisis frecuencial.

A. Análisis Temporal

- 1) **Análisis transitorio de forma de onda (EMT):** Este método permite examinar la forma de onda generada durante un transitorio, observando la señal resultante de la simulación EMT en función del tiempo. Se recomienda aplicar un filtro de rechazo de banda a la señal transitoria para aislar únicamente la señal generada por el transitorio y eliminar la frecuencia de operación del sistema.
- 2) **Análisis transitorio de valor eficaz (RMS):** Este método se basa en calcular la magnitud del valor RMS para cada semi-ciclo de la señal transitoria en tensión o corriente, generando una gráfica que muestra la forma de onda en función del tiempo. Sin embargo, debido a la pérdida de información en las regiones contenidas en

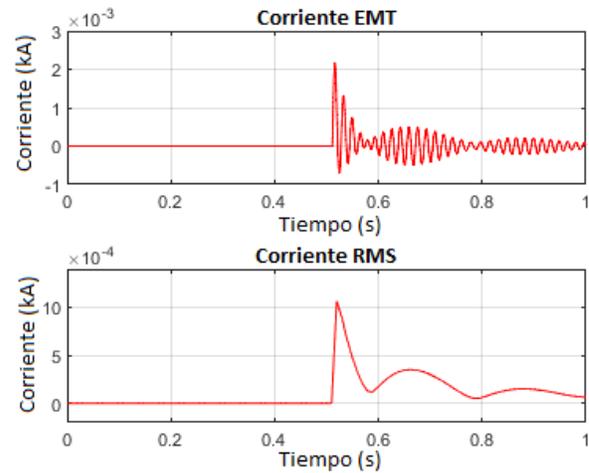


Fig. 1. Comparativa del mismo evento transitorio en análisis EMT y RMS

cada semi-ciclo, no se recomienda para el análisis de transitorios de naturaleza rápida.

La Fig. 1 presenta una comparación entre ambos métodos de análisis. La simulación EMT, mostrada en la parte superior de la figura, presenta el resultado del análisis transitorio de forma de onda sin aplicar un filtro de rechazo de banda. En la parte inferior, se presenta la simulación RMS, que muestra el resultado del análisis transitorio en términos del valor eficaz.

B. Análisis Tiempo-Frecuencia

- 1) **Matriz e imagen wavelet:** Este método construye una matriz de coeficientes de las señales de tensión y/o corriente, describiendo el comportamiento de la señal en función del tiempo y la frecuencia a partir de una wavelet madre. Esta matriz puede graficarse en un formato de colores, facilitando la visualización de los eventos en la señal.

Antes de analizar la señal transitoria en tensión y corriente, se delimitan tres rangos: el primero corresponde a la zona anterior a la región transitoria, el segundo acota el evento transitorio, y el tercero delimita la región no transitoria posterior. Se deben excluir los extremos de las señales debido a los problemas de frontera que presenta la transformada wavelet si no se utilizan convoluciones circulares, que eliminan dichos problemas. No obstante, en el presente trabajo no se emplearán debido a la complejidad adicional que introducen en el procesamiento de las señales. En su lugar, la delimitación manual de las zonas permite mitigar adecuadamente estos efectos para los propósitos de este análisis.

Una vez realizada esta selección, se procede a:

- 1) Selección de la wavelet madre.
- 2) Selección de un conjunto de frecuencias para realizar el estudio.
- 3) Conversión del dominio de frecuencia a escala según la wavelet madre empleada.
- 4) Aplicación de la transformada wavelet continua a la señal mediante cada una de las escalas.

- 5) Apilamiento de las señales resultantes en forma de filas, componiendo una matriz.

La matriz resultante permite explorar las características de la señal en tiempo y frecuencia, donde las filas corresponden a diferentes frecuencias y las columnas a distintos instantes de tiempo.

A partir de la matriz, se separan las regiones transitorias y no transitorias delimitadas previamente. Esta separación se realiza en las columnas de la matriz, como se muestra en (1), donde la región transitoria está representada por los vectores de color negro, las regiones no transitorias se muestran con vectores azules y las regiones de frontera corresponden a los vectores indicados con color rojo.

$$W = \begin{bmatrix} \vec{a}_1 & | & \vec{w}_{f1} & | & \vec{w}_{t1} & | & \vec{w}_{s1} & | & \vec{b}_1 \\ \vec{a}_2 & | & \vec{w}_{f2} & | & \vec{w}_{t2} & | & \vec{w}_{s2} & | & \vec{b}_2 \\ \vec{a}_3 & | & \vec{w}_{f3} & | & \vec{w}_{t3} & | & \vec{w}_{s3} & | & \vec{b}_3 \\ \vdots & | & \vdots & | & \vdots & | & \vdots & | & \vdots \\ \vec{a}_n & | & \vec{w}_{fn} & | & \vec{w}_{tn} & | & \vec{w}_{sn} & | & \vec{b}_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

En la matriz wavelet (1), cada columna contiene vectores que, al descomponerse en sus componentes fundamentales, conforman una matriz cuyo número de filas coincide con el de la columna original, y el número de columnas es igual al número de componentes de cada vector. Estas se pueden representar matricialmente como se muestra en (2). Esta estructura se emplea para las componentes denotadas por \vec{w}_t , \vec{a} , \vec{b} , \vec{w}_f , \vec{w}_s , donde \vec{a} representa las componentes de la primera frontera de las señales, \vec{b} las componentes de la segunda frontera de las señales, \vec{w}_f las componentes de la primera región no transitoria y \vec{w}_s las componentes de la segunda región no transitoria.

$$\begin{bmatrix} \vec{w}_{t1} \\ \vec{w}_{t2} \\ \vec{w}_{t3} \\ \vdots \\ \vec{w}_{tn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{t11} & W_{t12} & W_{t13} & \cdots & W_{t1\delta} \\ W_{t21} & W_{t22} & W_{t23} & \cdots & W_{t2\delta} \\ W_{t31} & W_{t32} & W_{t33} & \cdots & W_{t3\delta} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{tn1} & W_{tn2} & W_{tn3} & \cdots & W_{tn\delta} \end{bmatrix} = Wt \quad (2)$$

No es posible extraer información visual rápidamente de la matriz wavelet, por lo que se propone una matriz alternativa denominada imagen wavelet. Esta se obtiene a partir del valor absoluto de la matriz wavelet, extrayendo los valores máximo y mínimo para construir una escala de colores (preferiblemente de azul a amarillo). A cada valor de la matriz se le asigna un color según la escala, y finalmente se grafica esta matriz de píxeles.

Para los eventos transitorios de naturaleza rápida, como las conexiones, desconexiones y otros eventos de switcheo, la imagen wavelet presenta una línea vertical en el instante transitorio para las frecuencias más altas, lo que resulta especialmente útil para identificar el instante del evento.

C. Análisis Frecuencial

- 1) **Análisis de impedancia:** Utilizando solamente los datos de la región transitoria \vec{w}_t , se calcula el valor RMS de cada fila de las matrices wavelet de tensión y corriente. Los valores RMS obtenidos se organizan en vectores, donde cada componente corresponde a una frecuencia. Siendo los vectores resultantes: $\vec{V} = (V_1, V_2, \dots, V_n)$ e $\vec{I} = (I_1, I_2, \dots, I_n)$, se define un nuevo vector \vec{Z} : $\vec{Z} = (Z_1, Z_2, \dots, Z_n)$, donde:

$$Z_i = \frac{V_i}{I_i} \quad (3)$$

Este nuevo vector \vec{Z} contiene la información de la magnitud de la impedancia de la región transitoria en función de las frecuencias asociadas a cada componente de los vectores \vec{V} e \vec{I} .

- 2) **Análisis de energía:** El objetivo es la construcción de un vector \vec{E} cuyas componentes correspondan a la energía contenida en la señal para cada frecuencia a analizar. La energía de cada componente se calcula usando la ecuación presentada en (4), donde Wt_{ij} representa las componentes de la región transitoria de la matriz wavelet de tensión o corriente, y δ la cantidad de columnas de dicha matriz resultante.

$$E_i = \frac{\sum_{j=1}^{\delta} Wt_{ij}^2}{\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^{\delta} Wt_{kj}^2} \quad (4)$$

- 3) **Análisis de picos:** Este análisis se realiza utilizando las componentes de la región transitoria de la matriz wavelet de tensión o corriente. Este análisis mide la correlación de la señal con una frecuencia específica, definida por los factores de escalamiento de la wavelet madre utilizada [10]. Para calcularlo se obtiene el valor absoluto de cada dato y se determina el valor máximo en cada fila, como se plantea en (5). Los datos obtenidos se organizan formando un vector de n dimensiones, siendo n el número de filas de la matriz wavelet.

$$P_i = \max(|Wt_{ij}|) \quad (5)$$

$$\forall j \in \{1, 2, \dots, \delta\}$$

- 4) **Índices de selectividad:** Los índices de selectividad son métodos de análisis que buscan comparar las características de la región transitoria con los valores de estado estacionario. Para esto se propone en (6), donde $\text{function}(Wt_{ij})$ es la aplicación del análisis de energía o picos a la fila i de la matriz Wt , $MSE(Wf_{ij} \oplus Ws_{ij})$ se refiere a la aplicación del error cuadrático medio de cada fila de la concatenación horizontal de las matrices Wf y Ws , y β es un valor escalar que evita la división entre cero y normaliza el conjunto de salida. Este valor se asigna como el máximo obtenido en el numerador, por lo que es conveniente ejecutar estos métodos después del análisis de picos y/o energía.

$$SI_i = \frac{\text{function}(Wt_{ij})}{MSE(Wf_{ij} \oplus Ws_{ij}) + \beta} \quad (6)$$

$$\forall j \in \{1, 2, \dots, \delta\}$$

Los índices de selectividad pueden funcionar con una matriz wavelet construida a partir de una señal filtrada, sin filtrar o una mezcla de ambas matrices. Debido a esto, surgen tres escenarios distintos:

- **Índice de selectividad directo:** Se basa en la aplicación de la ecuación (6), empleando las matrices W_t , W_f y W_s extraídas de la matriz wavelet construida a partir de la señal de tensión o corriente sin filtrar.
- **Índice de selectividad mixto:** Se basa en la aplicación de la ecuación (6), empleando las matrices W_f y W_s extraídas de la matriz wavelet construida a partir de la señal de tensión o corriente sin filtrar y la matriz W_t de la matriz filtrada.
- **Índice de selectividad cruzado:** Se basa en la aplicación de la ecuación (6), empleando las matrices W_f y W_s extraídas de la matriz wavelet construida a partir de la señal de tensión o corriente filtrada y la matriz W_t de la matriz sin filtrar.

Sintetizando, se presentan los siguientes métodos de análisis:

1) Análisis temporal

- Análisis transitorio de forma de onda
- Análisis transitorio de valor eficaz

2) Análisis tiempo-frecuencia

- Matriz e imagen wavelet

3) Análisis frecuencial

- Análisis de impedancia
- Análisis de energía
- Análisis de picos
- Análisis por índices de selectividad

III. CASO DE ESTUDIO

Con el objetivo de ejemplificar los métodos de análisis expuestos, se emplea un sistema de potencia simulado en el software *PowerFactory*. Para este caso, se utilizó el IEEE 14 Test System, donde se incluyen barras con tensiones desde 1 kV hasta 132 kV. En un principio el sistema contiene generadores sincrónicos, cargas, transformadores y filtros, no se contempla generación distribuida por lo cual se conectó un recurso solar fotovoltaico de 10 MW a la barra número 2 que tiene un nivel de tensión de 132 kV. La razón por la cual se uso este benchmark es por su gran uso en el ámbito académico y por su facilidad a la hora de comenzar con la integración de recursos distribuidos. La simulación se realizó con una frecuencia de muestreo uniforme de 10 kHz, con un tiempo total de simulación de un segundo, conectando el recurso en el cruce por cero de la fase R. Esto implica que la fase S se conecte a (-120) deg y la fase T a (120) deg. En este análisis, nos enfocaremos en la tensión de la fase S de la barra de conexión, que puede observarse en la Fig 2. El momento de conexión del recurso ocurre en 0.5111 segundos.

Consecuentemente, es necesario medir la corriente para evaluar el análisis de impedancia (solo en este caso). Para ello, se tomará la corriente de la fase S del generador original

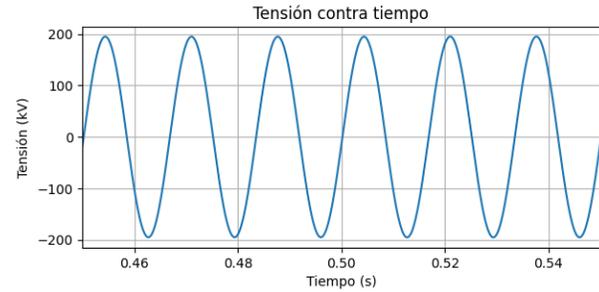


Fig. 2. Señal de tensión de la fase S de la barra 2 obtenida mediante simulación EMT

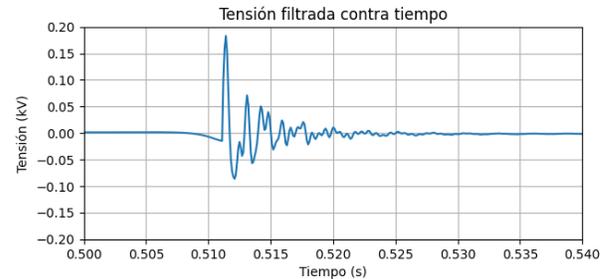


Fig. 3. Señal de tensión de la fase S de la barra 2 tras aplicar un filtro de rechazo de banda

conectado a la misma barra. De esta manera, se podrá observar el comportamiento de la impedancia equivalente del transitorio en ese punto en función de la frecuencia.

A. Análisis Temporal

El análisis temporal incluye tanto el análisis transitorio de forma de onda como el análisis transitorio de valor eficaz. La aplicación del análisis transitorio de forma de onda se puede ver en la Fig 3, donde se aplicó un filtro Notch para eliminar la señal de 60 Hz presente en la Fig 2, enfocándose en la región transitoria. Es notable que este método solo permite extraer información cuando la perturbación es lo suficientemente grande en comparación con las magnitudes de operación normal.

Aunque se puede apreciar y distinguir el transitorio generado por la conexión del recurso fotovoltaico, resulta difícil diferenciarlo de otros eventos transitorios, ya que no se expresan características claras de la señal en función del tiempo.

B. Análisis Tiempo-Frecuencia

A partir del análisis transitorio de la forma de onda, se procede a la creación de la matriz wavelet, cuya topología se muestra en la Fig 1. Para este caso de estudio, se decidió construir dicha matriz a partir de la wavelet madre *Morlet*, evaluando 1000 frecuencias distribuidas uniformemente desde $1e-10$ Hz hasta 2 kHz. La elección de la wavelet Morlet se debe a su naturaleza adecuada para el análisis de señales eléctricas, dado que ofrece un balance ideal entre la resolución en tiempo y frecuencia, lo que resulta especialmente útil para identificar transitorios en señales de este tipo. Además, su amplia implementación en estudios relacionados con señales

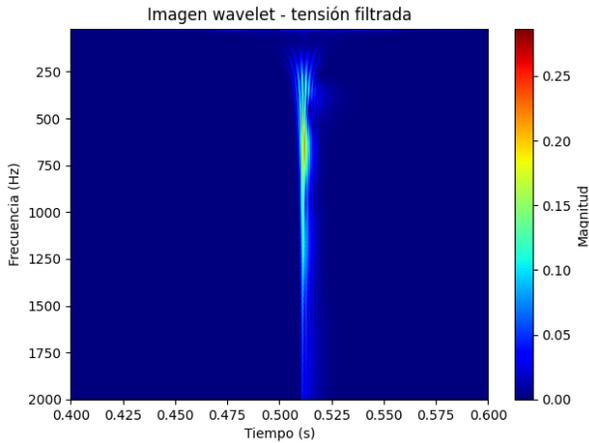


Fig. 4. Imagen wavelet de señal de tensión de la fase S en la barra 2

eléctricas garantiza su fiabilidad en este tipo de aplicaciones como puede verse en [4]. El intervalo de frecuencias se selecciona considerando que las señales de tensión se obtienen a partir de transformadores de medida; debido a la saturación, no es útil analizar frecuencias más altas que las establecidas.

De esta manera, se construye la matriz wavelet, que consta de 10001 columnas correspondientes a los momentos de muestreo y 1000 filas que representan las frecuencias analizadas. Por motivos prácticos, esta matriz no será visualizada en este artículo.

Alternativamente, es posible graficar un mapa de calor con el valor absoluto de cada componente de la matriz wavelet para generar la imagen wavelet, como se muestra en la Fig 4. Se puede observar que la mayor parte de la imagen tiene un tono frío (azul). Sin embargo, en la zona transitoria, las frecuencias medias-altas muestran una clara línea, evidenciando el momento de conexión del recurso fotovoltaico.

C. Análisis Frecuencial

Como se expuso en secciones anteriores, los métodos de análisis se dividen en análisis de impedancia, energía, picos e índices de selectividad.

Para el análisis de impedancia, es necesario determinar los valores eficaces de las matrices wavelet de tensión y corriente. En este estudio, se utilizará la corriente de la fase S del generador original de la misma barra. Así, se puede realizar el análisis de impedancia como se muestra en la Fig 5. En esta figura, se presenta la impedancia en función de la frecuencia (Hz), con una barra vertical que indica la frecuencia de trabajo de la red, que en este caso es de 60 Hz. Es posible apreciar la magnitud de la impedancia equivalente que representa el transitorio para el generador de la barra 2, es notable un incremento de la impedancia equivalente a medida que se incrementa la frecuencia, lo que sugiere una red mayormente inductiva.

Para el análisis de energía, se utiliza la ecuación (4), que genera un arreglo de 1000 componentes correspondientes a las frecuencias empleadas para la construcción de la matriz wavelet. En la Fig 6, se muestra la gráfica del arreglo \vec{E} frente a las frecuencias asociadas a cada valor de energía. En este

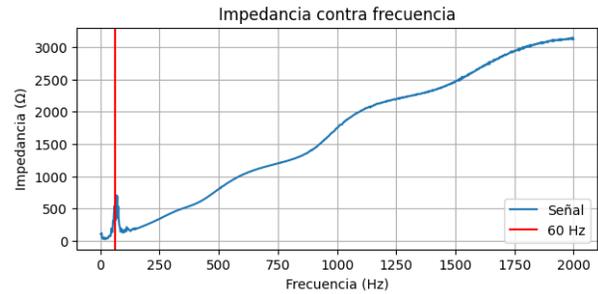


Fig. 5. Análisis de impedancia de la fase S del generador sincrónico en la barra 2

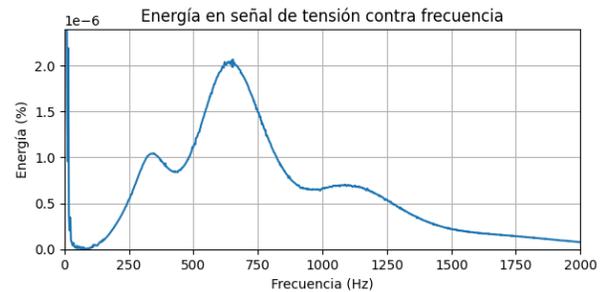


Fig. 6. Análisis de energía en tensión de la fase S en la barra 2

caso, no se presenta la línea vertical de la frecuencia de trabajo. Las señales por debajo de esta frecuencia corresponden a los tiempos de estabilización, mientras que las frecuencias más altas presentan características propias del transitorio. Es notable un gran concentración energética en las frecuencias cercanas a 0 Hz, debido a que la señal filtrada solo resalta el transitorio, mientras las demás regiones permanecen constantes.

Para realizar el análisis de picos, se utiliza la ecuación (5), generando un arreglo que se puede representar mediante la gráfica mostrada en la Fig 7. Esta gráfica tiene una tendencia similar a la gráfica presentada en análisis de energía, más sin embargo muestra características diferenciadoras con respecto a ella, como un aplanamiento en las frecuencias cercanas a 1 kHz.

Los índices de selectividad (directo, mixto y cruzado) pueden calcularse a partir del análisis de energía o de picos, ya sea para la señal sin filtrar o para una combinación de la señal filtrada y sin filtrar, resultando en seis posibles casos. Por motivos prácticos, se presenta el análisis por índice de

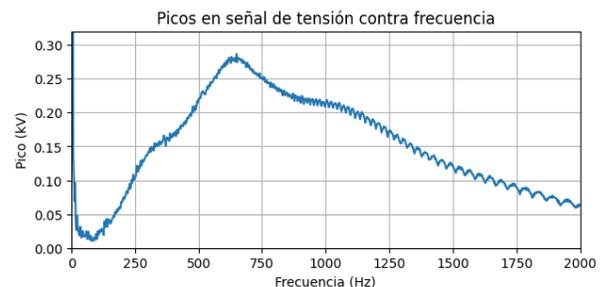


Fig. 7. Análisis de picos en tensión de la fase S en la barra 2

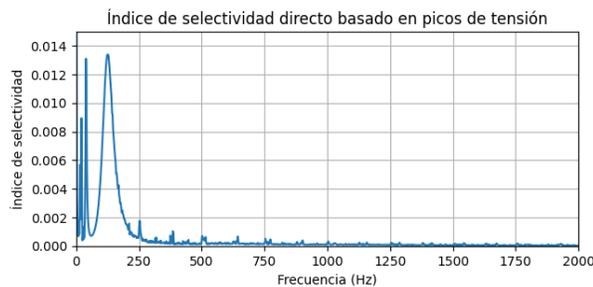


Fig. 8. Análisis de índice de selectividad directo a partir de análisis de picos de tensión de la fase S en la barra 2

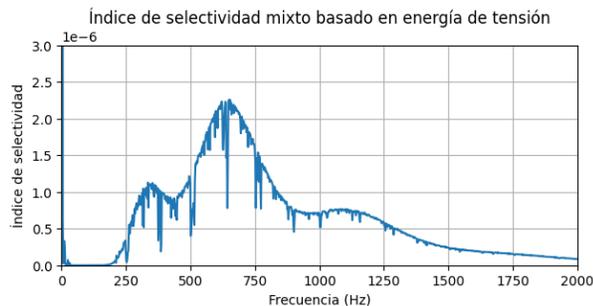


Fig. 9. Análisis de índice de selectividad mixto a partir de análisis de energía de tensión de la fase S en la barra 2

selectividad directo a partir del análisis de picos en la Fig 8 y el análisis por índice de selectividad mixto a partir del análisis de energía en la Fig 9.

De forma general, se observan distinciones en las características extraídas con cada método de análisis, lo que establece una base para una clasificación posterior o un metaanálisis. No obstante, se aprecia la presencia de ruido numérico, lo que sugiere la necesidad de aplicar procesos de suavizado en etapas posteriores o filtros adicionales.

IV. CONCLUSIONES

Cada método de análisis propuesto puede aplicarse a señales de tensión o corriente, con la excepción del análisis de impedancia. Es preferible utilizar datos de tensión, ya que su monitoreo es más sencillo y requiere menos puntos de medición por barra, aunque esto conlleva una pérdida de selectividad. Los análisis temporales son particularmente simples y pueden obtenerse directamente de las simulaciones de sistemas de potencia; sin embargo, estos métodos son recomendables solo para transitorios que generen grandes perturbaciones en la red.

La imagen wavelet permite observar el espectro del transitorio estudiado y visualizar su evolución en el tiempo de manera simultánea. Aunque su valor gráfico es considerable, su mayor utilidad radica en servir como insumo para otros métodos de análisis [11]. El análisis de energía representa la distribución de energía a lo largo del espectro de la señal, y sus magnitudes están fuertemente correlacionadas con el intervalo de frecuencias seleccionado y la cantidad de muestras dentro de este intervalo. Por otro lado, el análisis de picos comparte las características del análisis de energía, excepto

por la ecuación empleada. En la Fig 7 se evidencia un mayor nivel de ruido en comparación con el análisis de energía, lo que sugiere la posibilidad de suavizar la curva para mejorar su visualización. El análisis de impedancia, por su parte, proporciona una herramienta útil para calcular la resistencia equivalente de Thévenin en el punto de interés en función de las distintas frecuencias presentes [12].

Aunque se requiere una etapa de filtrado para realizar los análisis de energía, picos e impedancia, el índice de selectividad directo permite extraer características de las simulaciones EMT sin necesidad de aplicar filtros de rechazo de banda. No obstante, los demás índices de selectividad ofrecen formas alternativas de analizar las señales, permitiendo la extracción de características que no pueden identificarse con otros métodos.

En el caso de estudio presentado, se observó la presencia de ruido numérico en algunos métodos de análisis. Por lo tanto, las señales resultantes no deben estudiarse de manera aislada para una frecuencia específica, sino que deben considerarse las frecuencias adyacentes a la de interés para obtener un análisis más completo [13].

En la actualidad, no existen sistemas que monitoreen DER mediante métodos matemáticos, aunque existen soluciones basadas en inteligencia artificial para paneles solares y baterías [14]. A futuro, sería posible adaptar lo desarrollado a través de herramientas computacionales para realizar un monitoreo de transitorios a partir de las señales de tensión y corriente medidas en la red, con el fin de identificar patrones y caracterizar los recursos conectados. Este trabajo sienta una base importante para la implementación de un hardware que permita el análisis de este tipo de señales obtenidas.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al grupo de investigación en alta tensión GRALTA, a la rama estudiantil IEEE Univalle y al capítulo de PES Univalle por su apoyo durante todo el transcurso de la investigación.

REFERENCIAS

- [1] L. Cruz, D. Carrión, and J. Riofrio, "Localización de fallas mediante la transformada wavelet en líneas de transmisión," *Revista Técnica Energía*, vol. 13, Jan. 2017. DOI: 10.37116/revistaenergia.v13.n1.2017.10.
- [2] S. Agarwal, A. Swetapadma, C. Panigrahi, and A. Dasgupta, "Fault detection in direct current transmission lines using discrete fourier transform from single terminal current signals," in *2017 1st International Conference on Electronics, Materials Engineering and Nano-Technology (IEMENTech)*, 2017, pp. 1–5. DOI: 10.1109/IEMENTECH.2017.8076975.
- [3] E. Gómez-Luna, D. E. Cuadros-Orta, J. E. Candelobecerra, and J. C. Vasquez, "The development of a novel transient signal analysis: A wavelet transform approach," *Computation*, vol. 12, no. 9, 2024, ISSN: 2079-3197. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2079-3197/12/9/178>.

- [4] E. Gómez-Luna, J. S. Cuartas-Bermúdez, and E. Marlés-Sáenz, “Obtención de la fase de la impedancia eléctrica usando transformada wavelet y transformada de fourier de señales transitorias. parte 1: Análisis teórico,” *Dyna (Medellin)*, vol. 84, no. 201, p. 138, May 2017. DOI: <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n201.58694>.
- [5] E. Gómez-Luna, J. S. Cuartas-Bermúdez, and E. Marlés-Sáenz, “Obtaining the electrical impedance phase using wavelet transform and fourier transform from transient signals. part 2: Practical assessment and validation,” *Dyna (Medellin)*, vol. 85, no. 205, pp. 105–110, Apr. 2018. DOI: <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n205.68458>.
- [6] D. Wang, J. Rueda Torres, A. Perilla, E. Rakhshani, P. Palensky, and M. van der Meijden, “Enhancement of transient stability in power systems with high penetration level of wind power plants,” in *2019 IEEE Milan PowerTech*, 2019, pp. 1–6. DOI: 10.1109/PTC.2019.8810696.
- [7] A. Pfendler, P. Riess, S. Choudhury, R. Steppan, A. Hebing, and J. Hanson, “Comparison of rms and emt models of an inverter-based generator with fast-frequency response,” in *27th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2023)*, vol. 2023, 2023, pp. 1025–1029. DOI: 10.1049/icp.2023.0620.
- [8] M. S. Rahman and M. A. Haque, “Introduction to a novel wavelet,” in *2012 International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV)*, 2012, pp. 628–631. DOI: 10.1109/ICIEV.2012.6317528.
- [9] D. B. Percival and A. T. Walden, *Cambridge Series in Statistical and Probabilistic Mathematics: Wavelet Methods for Time Series Analysis, Series Number 4*. Cambridge, England: Cambridge University Press, Dec. 2013, ISBN: “9780511841040”.
- [10] A. S. Altaie, A. A. Majeed, M. Abderrahim, and A. Alkhazraji, “Fault detection on power transmission line based on wavelet transform and scalogram image analysis,” *Energies*, vol. 16, no. 23, 2023, ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en16237914. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/23/7914>.
- [11] E. Guillén-García, L. Morales-Velazquez, A. L. Zorita-Lamadrid, O. Duque-Perez, R. A. Osornio-Rios, and R. D. J. Romero-Troncoso, “Accurate identification and characterisation of transient phenomena using wavelet transform and mathematical morphology,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 13, pp. 4021–4028, 18 Sep. 2019, ISSN: 17518687. DOI: 10.1049/iet-gtd.2019.0101.
- [12] D. K. Kamat and P. M. Patil, “Multi-frequency and multi-segment bio-impedance measurement using tetrapolar electrode setup,” in *2016 2nd International Conference on Control Science and Systems Engineering (ICCSSE)*, 2016, pp. 190–194. DOI: 10.1109/CCSSE.2016.7784380.
- [13] L. Niu, Y. Wei, Y. Lv, M. Liu, and X. Zhang, “Cwt analysis of transient stability voltage in power system emt modeling,” in *2022 7th International Conference on*

Power and Renewable Energy (ICPRE), 2022, pp. 58–62. DOI: 10.1109/ICPRE55555.2022.9960414.

- [14] A. F. Moreno Jaramillo, J. Lopez-Lorente, D. Laverty, J. Martinez-del-Rincon, and A. M. Foley, “Identification of distributed energy resources in low voltage distribution networks,” in *2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)*, 2021, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ISGTEurope52324.2021.9639971.



Carlos Castro Was born in Cali, Valle, Colombia, in 1999. Currently pursuing an undergraduate degree in Electrical Engineering at Universidad del Valle, Cali, Colombia. Served as the vice-president of the PES IEEE Univalle chapter from 2021 to 2023 and is currently a member of the Research Group on High Voltage (GRALTA) at Universidad del Valle.



Jacobo Ceballos Was born in Pasto, Nariño, Colombia, in 2002. Currently pursuing an undergraduate degree in Electrical Engineering at Universidad del Valle, Cali, Colombia. He is currently the president of the PES IEEE Univalle chapter and a member of the Research Group on High Voltage (GRALTA) at Universidad del Valle.



Julián Nieto Was born in Cali, Valle, Colombia, in 2003. Currently pursuing an undergraduate degree in Electrical Engineering at Universidad del Valle, Cali, Colombia. He is currently the treasurer of the PES IEEE Univalle chapter and a member of the Research Group on High Voltage (GRALTA) at Universidad del Valle.



Eduardo Luna Was born in Pradera Valle, Colombia, in 1982. He received the Ph.D. degree in electrical engineering from Universidad del Valle, Cali, Colombia, in 2014. He is part of the Research Group on High Voltage (GRALTA). He has a patent registered in Colombia and Spain on the supervision and monitoring of transformers using the frequency response technique (FRA). He is currently an assistant professor at the School of Electrical and Electronic Engineering of Universidad del Valle. His research areas focus on smart grid, MGs, DER, digital substations, real-time simulation, frequency response analysis, transformers, applied mathematics, protections, power electronics, signal processing and power systems.