



# Plataforma de simulación multipropósito aplicada a sistemas eléctricos de potencia

<sup>1</sup>, Gerardo Moreno, John Morales, Eduardo A. Orduña

Universidad Nacional de San Juan, Argentina

## RESUMEN

La simulación en estado estacionario y dinámico de Redes Eléctricas Inteligentes, implementando modernas tecnologías en sistemas de medición de área amplia y relés de protección de Ultra Alta Velocidad del dominio del tiempo, juega un rol crucial para la investigación, docencia y transferencia tecnológica. Con respecto a los relés del dominio del tiempo, estos deben ser ajustados y coordinados usando cantidades incrementales de corrientes y voltajes correspondientes a cortocircuitos. Basado en lo anteriormente dicho, en este trabajo de investigación se presenta una plataforma computacional que permite desarrollar simulaciones tanto en estado estacionario, dinámico y también que permita obtener cantidades incrementales producidas por cortocircuitos monofásicos y de fase. La plataforma está desarrollada en el entorno del software *Alternative Transients Program*, ATP, combinado con el entorno de MATLAB/Simulink, misma que permite modificar el modelo del sistema eléctrico de potencia, como además permite realizar múltiples simulaciones.

© 2024 Universidad Autónoma de Nuevo León. Todos los derechos reservados

*Palabras clave:* Cantidades incrementales, plataforma de simulación, relés de ultra alta velocidad

## 1. Introducción

En la actualidad se reconoce que la modalidad de herramientas computacionales inteligentes representan un imprescindible camino para el desarrollo, implementación y prueba en lazo cerrado o abierto de herramientas para el análisis de eventos en los sistemas eléctricos de potencia (SEP), mismo que es un área reciente y no suficientemente investigada<sup>[1-3]</sup>.

En tal sentido, es imprescindible el desarrollo de modelos computacionales inteligentes de análisis e interfaces gráficas persona-máquina amigables con el usuario. Así mismo deben ser funcionales para que el personal técnico encargado del área de confiabilidad, protecciones eléctricas y áreas relacionadas de empresas públicas y privadas, locales, regionales o internacionales puedan analizar los diferentes eventos de una manera novedosa.

El concepto de sistemas de medición de área amplia (WAMS) y Unidades de medición de fasores (PMU), como partes importantes de las redes eléctricas inteligentes (REI), puede ser implementado para el desarrollo de estrategias de control y protección más flexibles y adaptativas<sup>[4,5]</sup>. La posibilidad de simular el funcionamiento de una WAMS brindaría las herramientas necesarias para analizar su

comportamiento en estado estacionario y transitorio, pudiendo así comprender el funcionamiento y las ventajas que presenta esta nueva tecnología frente a las redes convencionales. Además, realizar estudios sobre redes reales analizando su comportamiento ante eventos de falla.

Por otro lado, los modernos relés de ultra alta velocidad (UHS) del dominio del tiempo, surgen como etapa crucial para las REI, dada las características que pueden aportar al sistema. En tal sentido en<sup>[6]</sup>, lo autores definen que estos relés requieren solo unos pocos ajustes, pero estos suelen ser críticos. Los nuevos relés del dominio del tiempo están basados tanto en cantidades incrementales (CIs) como en el tiempo de propagación de ondas viajeras. Correspondiente a los elementos de CIs, estos operan usando las cantidades generadas por fallas, trabajando con voltajes incrementales de bucle ( $\Delta V$ ) en el dominio del tiempo y corrientes de réplica incrementales ( $\Delta I_z$ ) de bucle (ver [Apéndice A](#)).

En relación al estado del arte relativo al desarrollo de plataformas de simulación de WAMS, se ha determinado que han sido desarrolladas propuestas que implementan herramientas de software y hardware, resultando complejo su aplicación en ámbitos de investigación y por lo tanto su uso extensivo<sup>[7-9]</sup>. Por otro lado, diversos autores han desarrollado propuestas que hacen uso de múltiples programas para en su conjunto desarrollar la simulación de WAMS. Sin embargo debe destacarse que dichas plataformas no permiten la adaptación, modificación y mejora del sistema de medición<sup>[10-12]</sup>. Por último, se pueden resaltar los desarrollos detallados en<sup>[13,14]</sup>, donde los autores

Correos electrónicos: [j.g.moreno.bustos@gmail.com](mailto:j.g.moreno.bustos@gmail.com) (Gerardo Moreno), [jmorales@iee-unsjconicet.org](mailto:jmorales@iee-unsjconicet.org) (John Morales), [eorduna@iee-unsjconicet.org](mailto:eorduna@iee-unsjconicet.org) (Eduardo A. Orduña)

realizan la simulación del SEP, medición de sincrofasores y análisis de resultados haciendo uso exclusivamente de MATLAB/Simulink.

Por otra parte, surge que el programa SynchroWave Event de SEL, es el único software que permite determinar las CIs<sup>[15,16]</sup>, pudiendo solamente procesar señales de relés del dominio del tiempo SEL. En resumen, no se han desarrollado propuestas de plataformas computacionales libres que permitan determinar las CIs de las señales de cortocircuito, que puedan ser usadas para el ajuste y coordinación de los relés.

Las diferentes propuestas que han sido desarrolladas requieren de una compleja implementación, haciendo uso de diversos softwares de terceros y/o implementando hardware específico. En consecuencia, esto conlleva a un gran esfuerzo computacional y a una limitada flexibilidad, no pudiendo adaptarse a las diferentes necesidades y escenarios, relativos a la medición, protección y control de los SEP.

Al mismo tiempo debe destacarse que las propuestas existentes en el estado del arte son aplicadas principalmente al análisis en estado estacionario del SEP, no considerando el estado dinámico ante eventos de falla y peor aún el cálculo de CIs.

Por otro lado, en<sup>[17,18]</sup> los autores exponen que es factible la vinculación de los softwares MATLAB y ATP, permitiendo realizar pruebas de los modelos desarrollados y un vínculo eficiente y estable entre ambos programas. Por consiguiente, el vínculo podría implementarse para simular el funcionamiento de una WAMS. En consecuencia, las facilidades computacionales de MATLAB pueden complementarse en el simulador de redes de ATP.

En función de lo analizado, el trabajo presentado propone la implementación de los programas MATLAB/Simulink y ATP, para en su conjunto simular el funcionamiento de una WAMS haciendo foco en las PMU. La plataforma permite obtener datos sincrofasoriales tanto en estado estacionario como en estado dinámico, como así también determinar las CIs generadas durante cortocircuitos, siendo aplicable a diferentes niveles de voltaje y frecuencia. El modelo matemático y computacional permite de una manera rápida e intuitiva considerar todas las condiciones, variables y parámetros que posibiliten realizar de manera adecuada el análisis post-falla de los eventos.

## 2. Plataforma y proceso de simulación

La plataforma de simulación realiza la interacción automática entre ATP, MATLAB/Simulink y los datos ingresados por el usuario, según el proceso detallado en la Fig. 1.

Se describe a modo de ejemplo el proceso desarrollado para la simulación del estado dinámico del sistema y la determinación de los sincrofasores calculados por las PMU:

- 1) Debe cargarse el modelo de ATP del SEP y seguidamente definir los datos de la simulación (frecuencia y tiempo de muestreo). Relativo a la simulación de fallas debe asignarse el ángulo de inserción de falla ( $\alpha_i$ ), mismo que actúa como un  $\Delta\alpha$ , realizando variaciones desde  $\alpha_i = 0^\circ$  hasta  $\alpha_f = (360^\circ - \Delta\alpha)$ , como así también los valores de las resistencias de falla ( $R_f$ ), disponiendo de un máximo de cuatro valores a simular.
- 2) Se guardan los datos, generándose el archivo .mat con los valores asignados a cada variable.
- 3) Comienza la simulación por el bucle que designa el tipo de falla a ejecutar.
- 4) El bucle de  $R_f$ , toma el valor asignado a  $r1$
- 5) Se da inicio al bucle de  $\alpha_i$ .

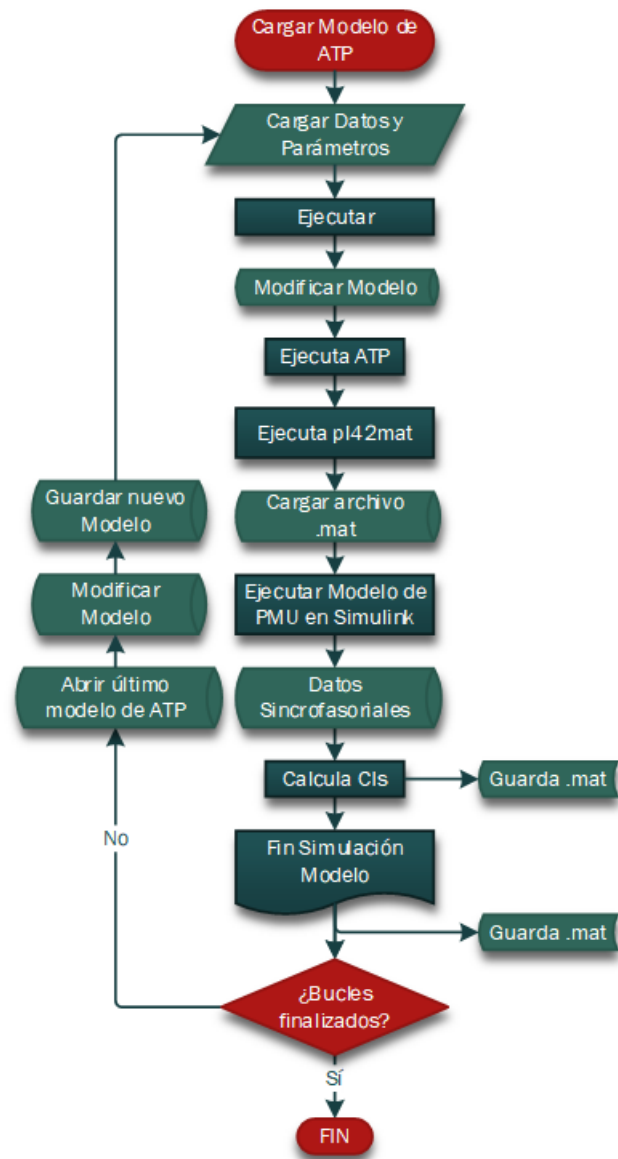


Fig. 1. Diagrama de proceso.

- 6) Se lee el modelo de ATP para iniciar la modificación del archivo .atp, según las variables asignadas y el estado de los bucles definidos. Se realiza en forma automática la lectura del archivo .atp en formato de texto.
- 7) Mediante el  $\alpha_i$  se determina el tiempo de inicio de falla, mismo que asigna el tiempo total de simulación.
- 8) Se seleccionan automáticamente los datos en el archivo .atp, para su posterior modificación.
- 9) Se modifican los datos del SEP, en función de los datos seleccionados en el paso 8.
- 10) Se crea archivo de texto, mismo que es almacenado en formato .atp, reemplazando a los datos del SEP
- 11) Se ejecuta ATP y posteriormente pl42mat, para obtener los resultados en formato .mat.
- 12) Se cargan en MATLAB los resultados de la simulación.
- 13) Se ejecuta modelo de Simulink para la obtención de datos sincrofasoriales.
- 14) Finaliza la simulación.

- 15) Inicia nuevamente el proceso continuando los bucles para los distintos tipos de fallas, fases y valores de  $R_f$  y  $\alpha_i$ .

### 3. Sistema eléctrico simulado

El SEP consiste en dos áreas similares conectadas a través de una doble línea de transmisión (LT). Cada área cuenta con dos unidades generadoras acopladas, con una potencia de 900 MVA y un voltaje de 20 kV.

El SEP posee un voltaje nominal de  $V = 230$  kV. Las longitudes de las LTs se muestran en la Fig. 2. Es dable destacar que el modelo cumple con los requisitos para la implementación de relés UHS del dominio del tiempo, mismos que para su operación determinan las CIs producidas durante el evento de falla<sup>[19,20]</sup>.

### 4. Resultados de simulación

#### 4.1. Estado estacionario

Desde la plataforma computacional, se simuló el funcionamiento en estado estacionario del modelo. En la Fig. 3 se detallan los módulos y fases de los sincrofasores de voltaje y corriente calculados por PMU<sub>1</sub> y PMU<sub>2</sub>. Se aplicó un tiempo de simulación de 20 ms.

Como se describe en la Fig. 3, los módulos de voltaje y corriente se mantienen constantes dado que el sistema se encuentra en estado estacionario. Así mismo las fases de los fasores de voltaje y corriente se mantienen constantes dado que el algoritmo calcula los fasores de forma recursiva.

Por otra parte, en la Fig. 4 y Fig. 5 se observa el resultado de la simulación de los voltajes y corrientes de fases, vistas por PMU<sub>1</sub> y PMU<sub>2</sub>. Como se verifica, existe una correspondencia directa en estado estacionario entre el sincrofasor de secuencia positiva y los valores de fases del SEP, medidos en los mismos puntos.

#### 4.2. Estado dinámico

Se realizaron un total de 160 simulaciones para los diferentes tipos de fallas,  $R_f$  y  $\alpha_i$ . Las gráficas evolucionan desde el estado estacionario hasta  $t = t_{falla} + 20$  ms.

En la Fig. 6 se grafica el comportamiento del SEP ante una falla monofásica en fase A para  $R_f = 50 \Omega$  y  $\alpha_i = 45^\circ$ . Se observa que a partir del inicio del cortocircuito los módulos de voltaje y corriente son levemente oscilatorios.

Seguidamente en Fig. 7 se muestra el comportamiento del SEP ante una falla bifásica aislada en fases AB para  $R_f = 0 \Omega$  y  $\alpha_i = 135^\circ$ . Se verifica que esta falla describe una mayor oscilación en los módulos de voltaje y corriente, presentando sobre oscilaciones de corriente.

Por otro lado, en la Fig. 8 se muestra el comportamiento del SEP ante una falla bifásica a tierra en fases AB para  $R_f = 15 \Omega$  y  $\alpha_i = 315^\circ$ . Este tipo de falla, como se observa, presenta un tiempo de decaimiento menor, manteniendo las sobre oscilaciones en los módulos de corriente.

Continuando con el análisis, en la Fig. 9 se grafica el comportamiento del SEP ante una falla trifásica aislada para  $R_f = 5 \Omega$  y  $\alpha_i = 90^\circ$ . Se analiza que los módulos de voltaje presentan muy baja oscilación, manteniéndose las sobre oscilaciones en los módulos de corriente.

En la Fig. 10 se muestra el comportamiento del SEP ante una falla trifásica a tierra para  $R_f = 50 \Omega$  y  $\alpha_i = 270^\circ$ . Al igual que la falla trifásica aislada, se presenta baja o nula oscilación en los módulos de voltaje. Así mismo se mantienen las sobre oscilaciones en los módulos de los fasores de corriente.

Se resume que las gráficas anteriormente detalladas describen la evolución de los módulos de los sincrofasores de voltaje y corriente para ambas PMU, desde el estado estacionario hasta el estado transitorio, siendo claramente identificable el instante de inicio de falla.

Como se observa, para las diferentes fallas, los módulos de sincrofasores de voltaje poseen un comportamiento oscilatorio decreciente, destacándose que las fallas bifásicas presentan mayores oscilaciones en contraste con las fallas trifásicas que presentan baja o nula oscilación. Por otro lado, los módulos de corriente poseen un comportamiento oscilatorio creciente, describiendo sobre oscilaciones en fallas de fases (bifásicas y trifásicas).

Para concluir el análisis, en la Fig. 11 se comparan los sincrofasores obtenidos por PMU<sub>1</sub>, para los distintos tipos de cortocircuitos simulados, con  $R_f = 10 \Omega$  y  $\alpha_i = 315^\circ$ .

Se concluye que a medida que aumenta el número de fases involucradas en el cortocircuito, el tiempo de decaimiento del módulo de voltaje es inferior. Así mismo, para las mismas condiciones de falla, las fallas aisladas presentan módulos en estado transitorio levemente superiores, en contraste con las fallas a tierra.

#### 4.3. Cantidades incrementales

Se simuló el funcionamiento del estado dinámico del modelo y se calcularon  $\Delta V$  y  $\Delta I_z$ . Se realizaron un total de 192 simulaciones. Se describen los valores desde  $t = t_{falla}$  hasta  $t = t_{falla} + 20$  ms, dado que, antes de la falla, las CIs son nulas.

En primer lugar, en la Fig. 12 se muestra  $\Delta V$  para fallas monofásicas con  $R_f = 50 \Omega$  y  $\alpha_i = 180^\circ$ . Como se observa, las gráficas evolucionan desde cero, donde antes de la falla las CI son nulas. Se analiza que fallas de las mismas características, pero en distintas fases, presentan comportamientos oscilatorios crecientes diferentes.

Posteriormente, en la Fig. 13 se grafica  $\Delta V$  ante una falla monofásica en fase B con  $\alpha_i = 0^\circ$ , considerando distintos valores de  $R_f$ . Se observa como se atenúa  $\Delta V$  a medida que aumenta  $R_f$ , manteniendo el comportamiento oscilatorio creciente.

Seguidamente, en la Fig. 14 se detalla la evolución de  $\Delta I_z$  para una falla bifásica aislada en fases BC con  $R_f = 0 \Omega$  para los distintos  $\alpha_i$ . Las gráficas se desplazan en el tiempo a medida que avanza el tiempo de inicio de la falla, dado que a mayor  $\alpha_i$ , el tiempo de inicio de falla es superior. Se observa que  $\Delta I_z$  también presenta características oscilatorias crecientes.

Finalmente, en la Fig. 15 se muestran las fases de  $\Delta V$  y  $\Delta I_z$  para fallas monofásicas con  $R_f = 15 \Omega$  y  $\alpha_i = 45^\circ$ , observando que las oscilaciones en el estado de falla, se manifiestan en las fases de las CIs.

### 5. Conclusiones

El presente artículo presenta el desarrollo de una novedosa plataforma de simulación de SEP, aplicable a distintos niveles de voltaje para su implementación en WAMS, tanto en estado estacionario como en estado dinámico ante eventos de cortocircuitos. La misma hace uso del ATP para el diseño de sistemas eléctricos y desarrollo de procesos transitorios, en conjunto con la gran capacidad de cálculo de MATLAB y Simulink para la simulación de las PMU.

Se destaca que la plataforma realiza el cálculo de las CIs de voltaje y corriente generadas durante los eventos de falla, mismas que son imprescindibles para el ajuste y coordinación de los modernos relés UHS del dominio del tiempo.

La interfaz gráfica realizada, mediante la GUI de MATLAB, permite al usuario de una manera intuitiva y sencilla, configurar el software y desarrollar en forma automática múltiples simulaciones del SEP.

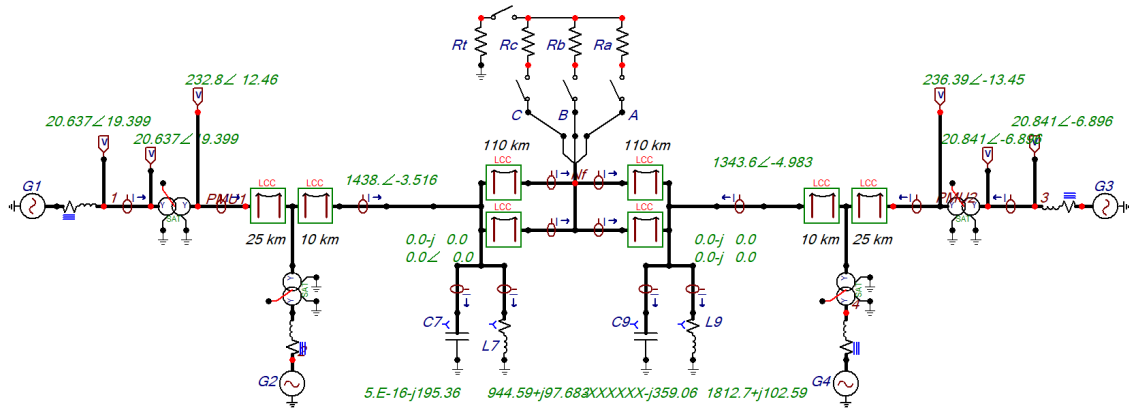


Fig. 2. Modelo de SEP en formato .acp de ATPDraw.

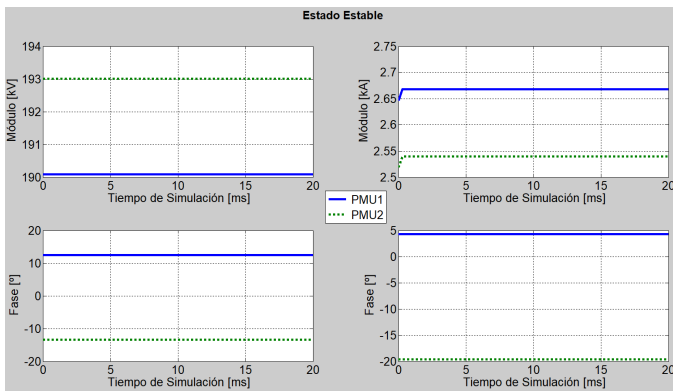


Fig. 3. Fasores de voltaje y corriente calculados por PMU<sub>1</sub> y PMU<sub>2</sub>.

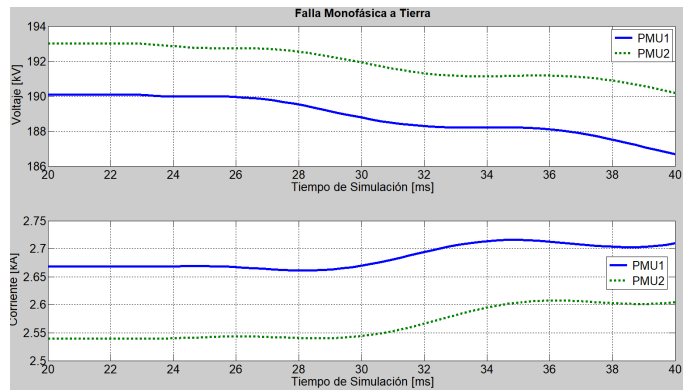


Fig. 6. Falla monofásica.

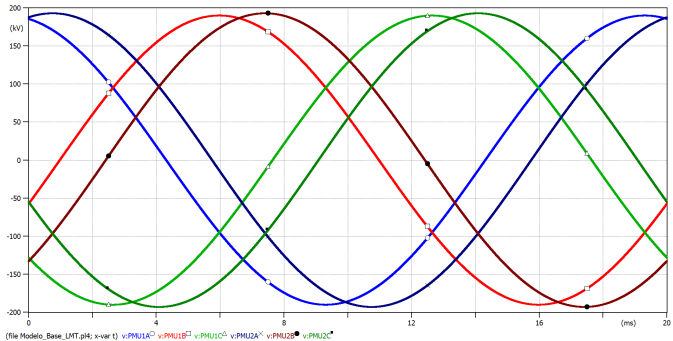


Fig. 4. Voltajes en estado estacionario mediante ATPDraw.

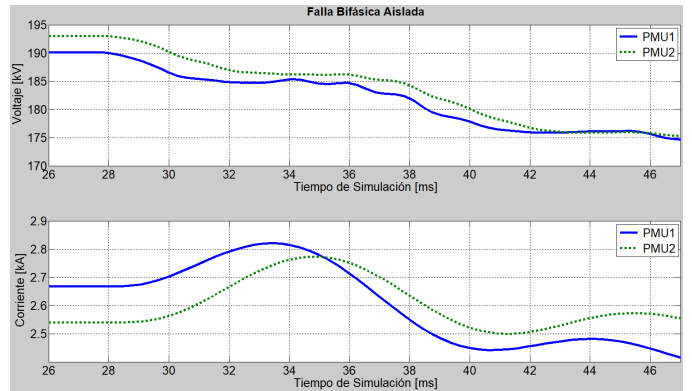


Fig. 7. Falla bifásica aislada.

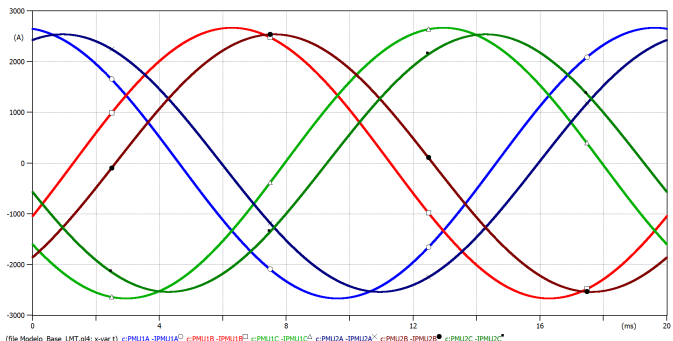


Fig. 5. Corrientes en estado estacionario mediante ATPDraw.

El algoritmo implementado realiza el procesamiento del modelo de ATP reconociendo las variables a modificar y realizando los cambios sobre el mismo, según los parámetros de simulación ajustados por el usuario. En tal sentido, con una única configuración de la plataforma, la misma realiza en forma automática la totalidad de las simulaciones previstas, guardando todos los resultados, fácilmente reconocibles por el usuario según los valores de cada simulación.

La plataforma presenta un alto nivel de flexibilidad y bajo esfuerzo computacional, logrando realizar múltiples simulaciones del SEP en condiciones de fallas a tierra y de fases, modificando automáticamente las fases involucradas,  $R_f$ ,  $\alpha_i$ , entre otros. Así mismo, brinda la

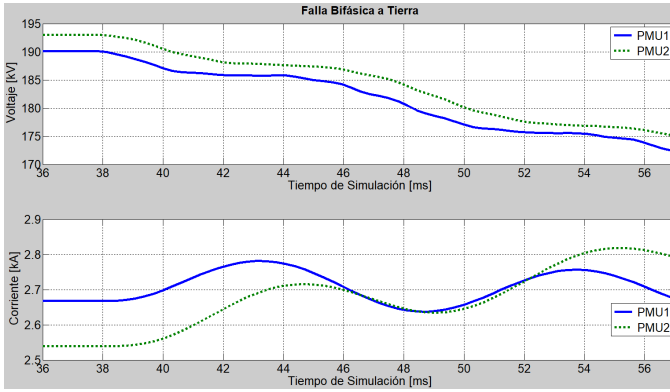


Fig. 8. Falla bifásica a tierra.

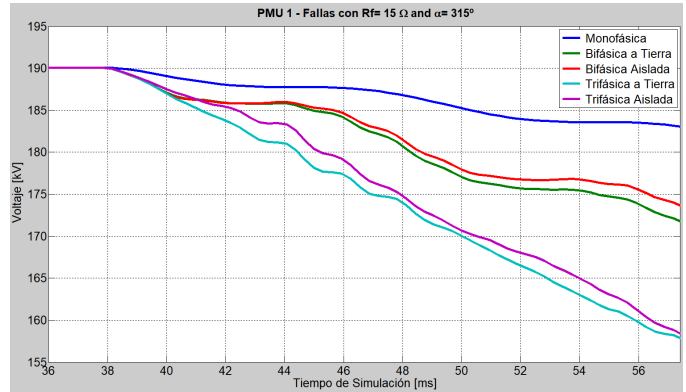


Fig. 11. Fallas analizadas desde PMU<sub>1</sub>.

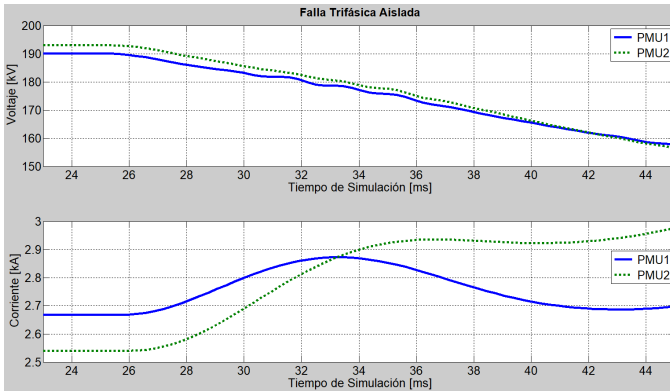


Fig. 9. Falla trifásica aislada.

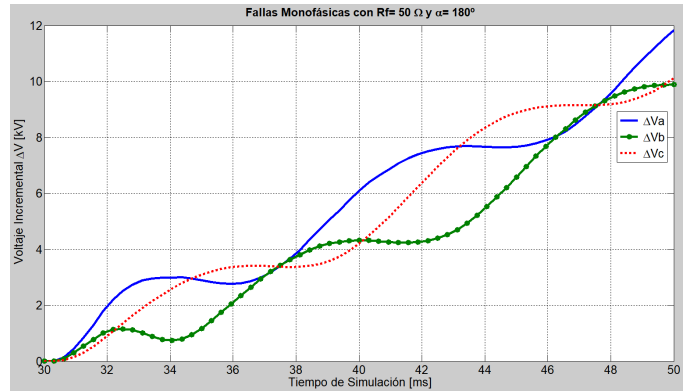


Fig. 12. Módulo de voltajes incrementales para fallas monofásicas.

posibilidad de determinar las CIs durante el estado dinámico del SEP ante los eventos de cortocircuitos.

Por último, se destaca que este trabajo puede ser el punto de partida para estudios más avanzados como el ajuste automático de funciones de protecciones basado en CIs, donde a partir de las CIs determinadas, los criterios de ajustes de los relés UHS podrían ser implementados en la plataforma propuesta.

### Agradecimientos

Este trabajo fue soportado por el Instituto de Energía Eléctrica de la Universidad Nacional de San Juan-CONICET, Argentina.

### Apéndice A.

El teorema de Thévenin y el principio de superposición permiten representar cualquier red en estado de falla como dos redes separadas, una red pre-falla que contiene los voltajes y corrientes previas a la falla y una red de falla que contiene los voltajes y corrientes generadas por la falla. Debido a que las cantidades de falla son la superposición de las cantidades previas a la falla y las cantidades generadas por la falla, el relé puede calcular las cantidades generadas por la falla (incrementales) como la diferencia entre las cantidades antes de la falla (obtenidas a través de un búfer de retardo) y las cantidades de

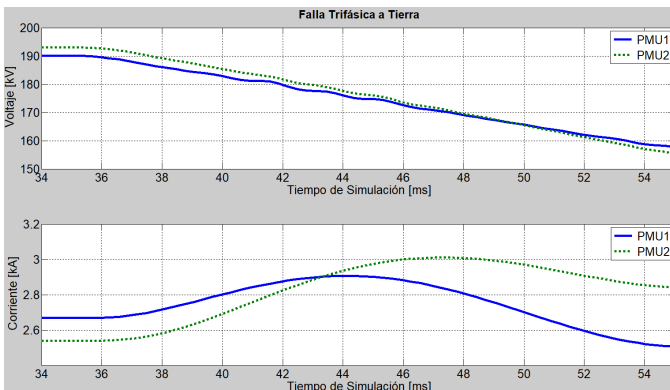


Fig. 10. Falla trifásica a tierra.

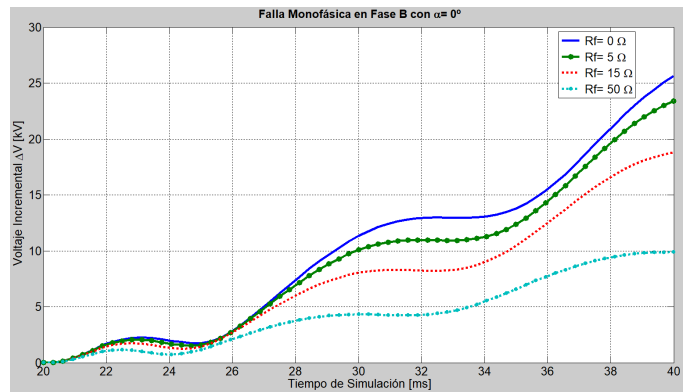


Fig. 13. Módulos de voltajes incrementales para distintas resistencias de falla.

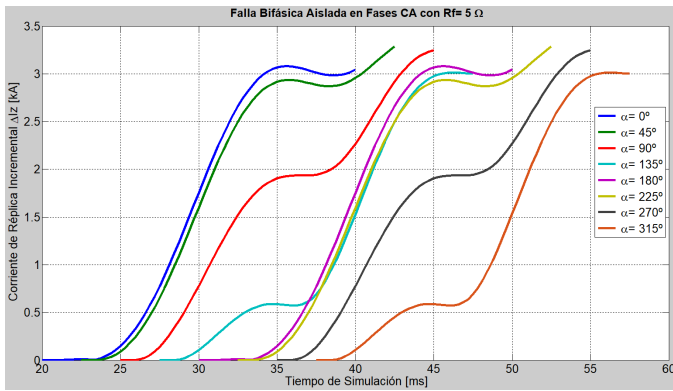


Fig. 14. Módulo de corrientes de réplica para fallas bifásicas aisladas.

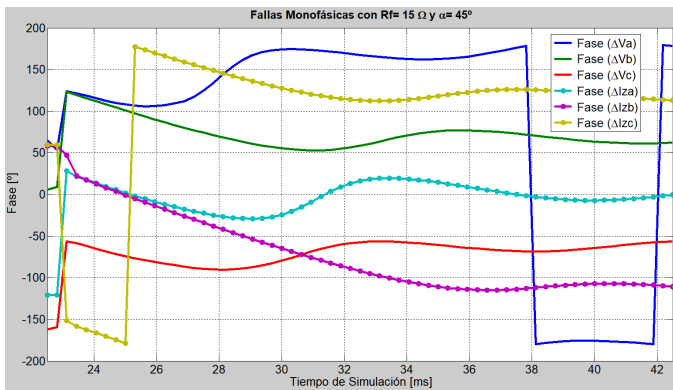


Fig. 15. Fase de voltajes incrementales y de corrientes de réplica para fallas monofásicas.

generadas por la falla. En la **Tabla A.1** se resumen las ecuaciones de voltajes y corrientes en el dominio de la frecuencia para fallas a tierra y de fases.

## Referencias

- [1] S. P. C. Rao y G. M. Babu, "Power systems protection coordination and associated reliability with smart grid security," *2017 International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)*, Erode, India, 2017, pp. 1124-1129.
- [2] Mladen K., et al, "New Trends for Automated Fault and Disturbance Analysis", Working Group B5.20, Cigre, August 2010.
- [3] J. R. McDonald, G. M. Burt y D. J. Young, "Alarm processing and fault diagnosis using knowledge based systems for transmission and distribution network control," en *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 7, no. 3, pp. 1292-1298, ago. 1992.
- [4] V. Terzija et al., "Flexible Wide Area Monitoring, Protection and Control applications in future power networks," *10th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2010)*. Managing the Change, Manchester, 2010, pp. 1-5.
- [5] M. Shahraeini y M. Hossein, "Wide Area Measurement Systems", *Advanced Topics in Measurements*, Zahurul Haq (Ed.), InTech, mar. 2012.
- [6] Bogdan Kasztenny, Armando Guzmán, Normann Fischer, Mangapathirao V. Mynam, and Douglas Taylor, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., Practical Setting Considerations for Protective Relays That Use Incremental Quantities and Traveling Waves.
- [7] D. Celeita, D. Clavijo y G. Ramos, "PMU and PDC server implementation integrated to real-time simulation tools," *2019 IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA)*, Manizales, Colombia, 2019, pp. 1-7.
- [8] P. Brijesh, A. G. Lal, A. S. Manju y A. Joseph, "Synchrophasors evaluation and applications," *2018 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC)*, College Station, TX, EE. UU., 2018, pp. 1-6.

Tabla A.1. Voltajes y corrientes de réplica en el dominio de la frecuencia. [6]

Bucle	Voltaje incremental ( $\Delta V$ )	Corriente de réplica ( $\Delta I_z$ )
$\Delta AG$	$\Delta V_A$	$\Delta I_A \angle Z_{1L} - \Delta I_0 \left( 1 \angle Z_{1L} - d \frac{ Z_{0L} }{ Z_{1L} } \angle Z_{0L} \right)$
$\Delta BG$	$\Delta V_B$	$\Delta I_B \angle Z_{1L} - \Delta I_0 \left( 1 \angle Z_{1L} - d \frac{ Z_{0L} }{ Z_{1L} } \angle Z_{0L} \right)$
$\Delta CG$	$\Delta V_C$	$\Delta I_C \angle Z_{1L} - \Delta I_0 \left( 1 \angle Z_{1L} - \frac{ Z_{0L} }{ Z_{1L} } \angle Z_{0L} \right)$
$\Delta AB$	$\Delta V_A - \Delta V_B$	$\Delta I_A \angle Z_{1L} - \Delta I_B \angle Z_{1L}$
$\Delta BC$	$\Delta V_B - \Delta V_C$	$\Delta I_B \angle Z_{1L} - \Delta I_C \angle Z_{1L}$
$\Delta CA$	$\Delta V_C - \Delta V_A$	$\Delta I_C \angle Z_{1L} - \Delta I_A \angle Z_{1L}$

donde:

$\Delta I$  representa la cantidad incremental de corriente.

$\Delta V$  representa la cantidad incremental de voltaje.

$Z_{1L}$  representa la impedancia de secuencia positiva de la LT.

$Z_{0L}$  representa la impedancia de secuencia cero de la LT.

A, B, C representan las fases A, B y C, respectivamente.

- [9] N. Gurung et al., "Use of PMU-Based Software Platform to Provide Real-Time Situational Awareness for Bronzeville Community Microgrid," *2020 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, Chicago, IL, EE. UU., 2020, pp. 1-5.
- [10] A. Ahlawat, A. Goyal, S. K. Mishra and S. T. Nagarajan, "A Laboratory Setup for Synchrophasor Applications," *2020 IEEE 17th India Council International Conference (INDICON)*, Nueva Delhi, India, 2020, pp. 1-6.
- [11] R. Cardenas-Javier, V. Gonzalez-Sanchez, M.R.A. Paternina, F.A. Zelaya A., A. Zamora, V. Torres and D. Dotta, "A MATLAB and PowerFactory-based WAMS Simulator", IEEE, June 2020. R. Cardenas-Javier et al., "A Matlab and PowerFactory-based WAMS Simulator," *2019 North American Power Symposium (NAPS)*, Wichita, KS, EE. UU., 2019, pp. 1-6.
- [12] C. Toledo-Santos, G. Mejía-Ruiz, M.R.A. Paternina, A. Zamora and D. Dotta, "Building up a Wide-Area Protection System Simulator", *2020 52nd North American Power Symposium (NAPS)*, IEEE, August 2021.
- [13] M. Tsebja y H. Betarzi, "Improve monitoring system of interconnected oscillation power system based on PMU technology," *2020 International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, Estambul, Turkey, 2020, pp. 1-6.
- [14] F. Ye y A. Bose, "Multiple Communication Topologies for PMU-Based Applications: Introduction, Analysis and Simulation," en *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 6, pp. 5051-5061, nov. 2020.
- [15] <https://selinc.com/products/5601-2/>
- [16] SEL SYNCHROWAVE Event Software Instruction Manual, Date Code 20230510.
- [17] J. Mahseredjian, G. Benmouyal, X. Lombard, M. Zouiti, B. Bressac y L. Gerin-Lajoie, "A link between EMTF and MATLAB for user-defined modeling," en *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, no. 2, pp. 667-674, abr. 1998.
- [18] Orlando P. Hevia, "Compilación del ATP al alcance del usuario", Comité Argentino de Usuarios del EMTF, Facultad Regional Santa Fe - UTN, Santa Fe, Argentina.
- [19] Schweitzer Engineering Laboratories, SEL-T400L, Ultra-High-Speed Transmission Line Relay Traveling-Wave Fault Locator High-Resolution Event Recorder, Instruction Manual, 2023.
- [20] Schweitzer Engineering Laboratories, SEL-T401L, Ultra-High-Speed Line Relay, Instruction Manual, 2023.

## Biografías

**Gerardo Moreno** was born in San Juan, Argentina, in May 1987. He received the degree in Electrical Engineering from the Universidad Nacional de San Juan (UNSJ), Argentina, in 2011. He is currently Ph.D. candidate from Instituto de Energía Eléctrica (IEE), UNSJ-CONICET.

**John Morales** was born in Cuenca, Ecuador, on January 05, 1985. He graduated as Electrical Engineer (B.E.) at the Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador in 2007. He obtained Ph.D. degree in 2013 at the Universidad Nacional de San Juan, Argentina. His field is protection and signal processing.

**Eduardo Orduña** was born in San Juan, Argentina, in 1958. He obtained Electrical Eng. degree in 1986 and Ph.D. degree in 1996 from Universidad Nacional de San Juan, Argentina. From 1986 to 1990 he worked as researcher for CONICET at the Instituto de Energía Eléctrica of the Universidad Nacional de San Juan (IEE-UNSJ). From 1990 to 1993 he performed research at the Lehrstuhl Fuer El. Energieversorgung (LS-EV) of the Dortmund University, Germany. Nowadays, Dr. Orduña is Professor at IEE-UNSJ.