

Desarrollo de una Herramienta Computacional para el Procesamiento de Señales Almacenadas en archivos de formato COMTRADE para Análisis del Sistema de Potencia y de Sistemas de Protecciones

Hámliton Paucar Fernández, Christian Fonseca Amaya, Fabián Pérez Yauli

Resumen— En el presente trabajo se desarrolla una herramienta computacional con la interfaz gráfica de la herramienta GUIDE del software MATLAB, que permite cargar cualquier archivo en formato COMTRADE (Formato común estándar para el intercambio de datos transitorios) para realizar el análisis detallado de diferentes eventos transitorios que afectan al funcionamiento normal del sistema eléctrico. Los eventos transitorios se graban y almacenan en equipos para registro de perturbaciones, como los RAP (Registadores automáticos de perturbaciones) y relés digitales, instalados en las subestaciones del sistema de potencia. El análisis se obtiene mediante la visualización de las formas de onda de los canales analógicos (corrientes y voltajes), los canales digitales (actuación de los módulos de protección) y el tratamiento de las señales analógicas para obtener los fasores estimados de cada período, los armónicos generados en cada período, la trayectoria creada por las potencias monofásicas y trifásica, y la trayectoria formada por la impedancia vista por los relés de protecciones.

Palabras Clave— Análisis de fallas, formato COMTRADE, sistema de potencia, sistemas de protecciones, transitorios, registradores de perturbaciones.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, a nivel académico en la rama de la Ingeniería Eléctrica, particularmente en el área de protecciones eléctricas, no se cuenta con programas computacionales no comerciales que permitan el análisis detallado de eventos transitorios, los mismos que son obtenidos de los registradores de falla y de los relés digitales de protecciones instalados en las subestaciones de un sistema de potencia.

Los registros de eventos transitorios se encuentran normalmente almacenados en formato COMTRADE. Un archivo COMTRADE (Common Format for Transient Data) es un formato común para el intercambio de datos transitorios, estandarizado por la norma IEEE Std. C37.111. Esta norma tiene como finalidad generar archivos que puedan ser

reconocidos por diferentes programas computacionales, con esto se facilita el flujo de información para el análisis de un evento transitorio tales como: fallas, energizaciones, desconexiones, entre otros [1].

De acuerdo con la norma, cada registro COMTRADE contiene cuatro documentos con diferente información, estos son: el archivo HEADER (.hdr), CONFIGURATION (.cfg), DATA (.dat) e INFORMATION (.inf). Todos los archivos se generan con el mismo nombre y se diferencian por la extensión característica de cada uno.

Con respecto a los datos obtenidos de los sistemas de protecciones, los mismos que sirven para revisar el comportamiento del sistema protegido y verificar la actuación de los relés con el fin de detectar si existe algún defecto en su funcionamiento y que pueda ocasionar problemas en el futuro, como son: retardo en la actuación de la protección, salida de más de un elemento del sistema, la actuación errónea de algún módulo del sistema de protección, entre otros. Por lo tanto, un programa capaz de leer y procesar los datos de estos archivos será de mucha utilidad en el campo de la Ingeniería Eléctrica, especialmente en el área de sistemas de protecciones, ayudando a un análisis más exhaustivo de los efectos causados en un sistema de potencia y del funcionamiento de la primera línea de defensa del mismo.

Los programas existentes que permiten analizar los eventos registrados tienen la necesidad de adquirir una licencia de uso con un respectivo costo monetario, además cada programa funciona de manera óptima para sistemas de protecciones de una marca específica como lo son SIGRA de SIEMENS y ACCELERATOR de SEL, entre otros. Estos programas usan ecuaciones propias según la marca de relé lo que provoca pequeñas distorsiones en los resultados de análisis de otras protecciones[2]. Conociendo que los relés de protecciones son fabricados por diferentes empresas, la adquisición de un solo software no sería suficiente para el análisis de todas las contingencias registradas que pueden ocurrir en el sistema

H. Paucar Fernández y C. Fonseca Amaya son parte de la Carrera de Ingeniería Eléctrica, Escuela Politécnica Nacional, Quito 170525, Ecuador (e-mail: hamilton.paucar@epn.edu.ec; antonio.fonseca@ccelec.gob.ec).

eléctrico.

II. METODOLOGÍA Y DESARROLLO DE LAS FUNCIONES DEL PROGRAMA PARA ANÁLISIS DE EVENTOS TRANSITORIOS EN FORMATO COMTRADE

El desarrollo del programa se realiza en el lenguaje de programación de Matlab, utilizando la herramienta GUIDE para crear una interfaz gráfica que resulte intuitiva para el usuario.

En el diagrama de la interfaz gráfica presentado en la Fig. 1 se puede apreciar los pasos a seguir para cargar el archivo COMTRADE y posteriormente utilizar las funciones principales del programa desarrollado.

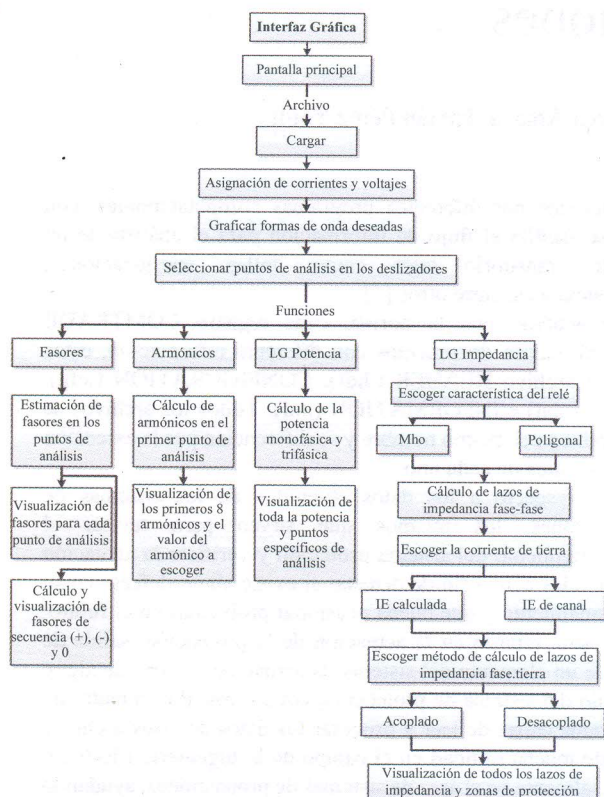


Fig. 1. Diagrama de la interfaz gráfica del programa desarrollado

A. Lectura, Clasificación y Escalamiento de los datos del formato COMTRADE

La primera función del programa es cargar el archivo COMTRADE. La ventana de búsqueda permite visualizar solamente carpetas y archivos con la extensión “.cfg”, es decir los archivos CONFIGURATION. Luego, usando el nombre almacenado, el programa busca el archivo DATA del mismo nombre con la extensión “.dat” y lo carga.

Los datos exportados del archivo CONFIGURATION se presentan en la Tabla I, todos estos datos se almacenan y se utilizan para calcular los datos reales de los canales analógicos del registro y transformarlos al lado de referencia de los

transformadores de medición que se prefiera. Otros datos se utilizan posteriormente para la estimación de fasores.

TABLA I
INFORMACIÓN OBTENIDA DEL ARCHIVO CONFIGURATION

Nombre de la Subestación
Versión del COMTRADE
Número total de canales
Número de canales analógicos y su respectivo nombre
Número de canales digitales y su respectivo nombre
Unidades utilizadas en los canales analógicos
Factores <i>a</i> y <i>b</i> de escalamiento para cada canal
Relación de transformación de corriente o voltaje del lado primario
Relación de transformación de corriente o voltaje del lado secundario
<i>PS</i> dato identificador de escalamiento del primario o secundario
Frecuencia del sistema eléctrico
Frecuencia de muestro
Número de muestras
Fecha y hora de inicio y final del registro

Del archivo DATA se exportan los valores tomados en cada muestra de los canales analógicos y digitales almacenados en el registro. Los datos de los canales analógicos no representan los valores reales del evento, necesitan ser tratados con los factores *a* y *b* obtenidos del archivo CONFIGURATION.

Los factores son:

- *a* que es el factor multiplicativo.
 - *b* valor de offset de la señal o valor que se suma a la señal.
- Siendo *x* un punto de la señal en el tiempo, El valor real de un punto de la señal viene dado por (1).

$$a \cdot x + b \quad (1)$$

Para el caso del tiempo, éste viene dado en microsegundos por lo que es necesario transformarlo a segundos y para los canales digitales no hace falta ningún tipo de conversión ya que se tiene valores entre 0 y 1.

Una vez realizada esta conversión de valores, se puede graficar cualquier canal en función del tiempo, y observar el comportamiento de las formas de onda de voltajes, corrientes y la actuación de los módulos de protección.

B. Estimación Fasorial

El análisis de sistemas eléctricos de potencia o cualquier otro sistema cuyo comportamiento se ve reflejado en señales sinusoidales, se facilita significativamente con el cálculo de fasores. El fasor es un vector cuya magnitud equivale al valor RMS de la amplitud de la señal sinusoidal mientras que el ángulo de fase es un valor arbitrario, dependiendo del origen que se haya fijado para el eje del tiempo [3].

Ante la presencia de un evento transitorio en el sistema de potencia no se puede hablar de cálculo de fasores de las señales

almacenadas, sino de una estimación fasorial cuyo objetivo es lograr una aproximación lo más precisa posible del valor real del fasor.

Para la estimación de fasores durante eventos transitorios se puede recurrir a diferentes métodos:

- Cruce por cero
- Transformada Discreta de Fourier (No recursivo)
- Transformada Discreta de Fourier (Recursivo)
- Cuadrados de error mínimo
- Filtros Kalman, etc.

En este proyecto se utiliza el método de la Transformada Discreta de Fourier (Recursivo).

1) Algoritmo utilizado

Para condiciones transitorias se puede considerar que el fasor representa un estimado de la componente de la frecuencia fundamental de una señal vista a través de una ventana finita. Para un período de una señal $y(t)$ con N muestras y_k , la estimación del fasor viene dado por (2) de manera exponencial o por (3) de forma compleja [4].

$$Y = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N y_k e^{-j \frac{2\pi}{N} k} \quad (2)$$

$$Y = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{2}{N} \left\{ \sum_{k=1}^N y_k \cos\left(k \frac{2\pi}{N}\right) - j \sum_{k=1}^N y_k \sin\left(k \frac{2\pi}{N}\right) \right\} \quad (3)$$

El método recursivo de este algoritmo es más útil para la medición en tiempo real. Para obtener nueva información con cada nueva muestra puede considerarse una ventana móvil para estimar el fasor, de esta manera se utilizan operaciones de la ventana anterior a la que se desea obtener [4].

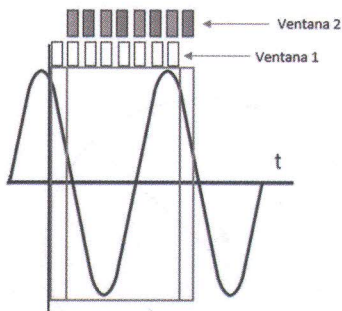


Fig. 2. Ventanas consecutivas para DFT con algoritmo recursivo

Se consideran dos muestras adyacentes como se observa en la Fig. 2: $y_k \{k=1, 2, \dots, N\}$ y $y_{k+1} \{k=2, 3, \dots, N+1\}$ y sus fasores Y^1 y Y^2 se obtienen aplicando (4) y (5). Se puede usar la letra griega θ para el ángulo de muestra $2\pi/N$.

$$Y^1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N y_k e^{-jk\theta} \quad (4)$$

$$(5)$$

$$Y^{2'} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N y_{k+1} e^{-jk\theta}$$

Modificando (5) para desarrollar un cálculo recursivo del fasor se llega a (6).

$$Y^2 = Y^{2'} \cdot e^{-j\theta} = Y^1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{2}{N} \cdot (y_{N+1} - y_1) \cdot e^{-j\theta} \quad (6)$$

Cuando la forma de onda es una senoidal constante, el fasor calculado de (6) será un número complejo constante.

El cálculo recursivo del fasor dado en (6) es muy eficiente. Este regenera el nuevo fasor del antiguo y utiliza mucho del cálculo realizado para el fasor de la ventana anterior [4].

C. Cálculo de Armónicos

Cuando una señal periódica no tiene la forma sinusoidal se dice que tiene contenido armónico. Los armónicos son señales de voltaje y corriente sinusoidales cuya frecuencia es múltiplo entero de la frecuencia fundamental a la que se encuentra operando el sistema [5]. Las señales periódicas distorsionadas pueden ser descompuestas en una suma de la señal de frecuencia fundamental y las armónicas (Fig. 3) [6].

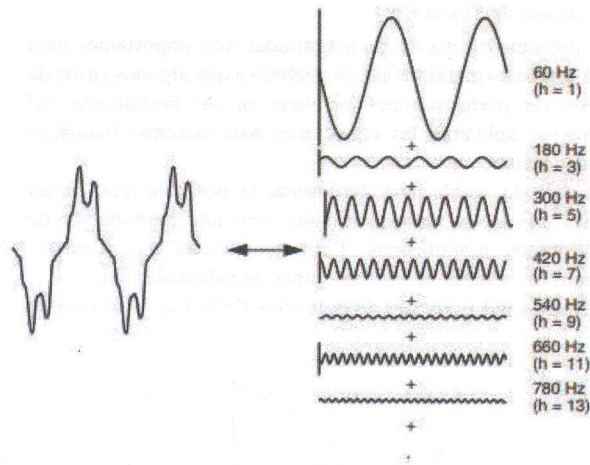


Fig. 3. Señales Armónicas de una señal distorsionada

El algoritmo más común para el cálculo de los armónicos de una señal es la Transformada Rápida de Fourier. Este algoritmo puede obtener con precisión la amplitud, frecuencia y fase armónica. Debido a que no se analizará señales constantes sino con variaciones debido a perturbaciones, se requiere analizar ventana a ventana el contenido armónico de la señal al igual que para la estimación de fasores [7].

En el algoritmo para la estimación de fasores se aplica la transformada de Fourier para obtener la magnitud a la frecuencia fundamental, además se aplica un cálculo para obtener el valor de manera recursiva con los datos de la ventana anterior. La diferencia con el algoritmo de esta sección es que se aplica esta transformada para las primeras frecuencias múltiplo enteras de la fundamental, de esta manera se obtiene

las componentes armónicas de la señal analizada incluyendo la componente cero.

Para un período de N muestras $y_k \{1, 2, 3, \dots, N\}$ y separando la parte real e imaginaria se tiene (7) y (8) respectivamente [4].

$$Re(a_n) = \frac{2}{N} \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{k=1}^N Y_k \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot k}{N}\right) \quad (7)$$

$$Im(a_n) = -\frac{2}{N} \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{k=1}^N Y_k \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot k}{N}\right) \quad (8)$$

Donde a_n representa el n -ésimo componente armónico, es decir, el orden del armónico. Los armónicos más relevantes son los de bajo orden, debido a esto, para el presente trabajo de titulación se calcula los ocho primeros más el componente DC que es el armónico de orden cero.

La magnitud de los armónicos viene dada por (9) y es el valor utilizado para su análisis, se puede representar en porcentaje referidos al valor de la fundamental.

$$|a_n| = \sqrt{Re(a_n)^2 + Im(a_n)^2} \quad (9)$$

D. Cálculo de Potencias

La potencia es una de las magnitudes más importantes para el análisis de sistemas trifásicos. Debido a que algunos casos de eventos de perturbaciones resultan en un desbalance del sistema, se aplicaran las ecuaciones para sistemas trifásicos desbalanceados.

Un método viable para determinar la potencia total de un circuito trifásico es tratar el circuito como una combinación de tres circuitos monofásicos. La potencia total se convierte entonces en la suma de las tres potencias calculadas [8].

Partiendo del triángulo de potencias de la Fig. 4 se conoce (10).

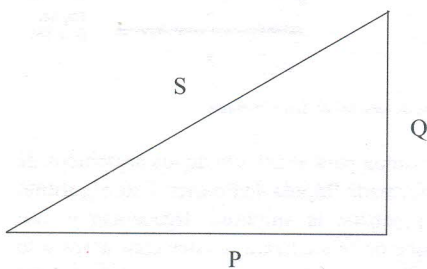


Fig. 4. Triángulo de Potencias

$$\bar{S} = P + jQ \quad (10)$$

Se conoce que la fórmula de la potencia aparente viene dada por (11).

$$\bar{S} = \bar{V} \cdot \bar{I}^* \quad (11)$$

Usando (11) se puede obtener la potencia monofásica aparente de cualquier fase y tomando en cuenta (10) se puede obtener la potencia activa y reactiva del resultado anterior. Por otro lado, la potencia trifásica del sistema se obtendrá de la suma de la potencia de las tres fases como se muestra en (12).

$$\bar{S}_{3\phi} = \bar{S}_A + \bar{S}_B + \bar{S}_C \quad (12)$$

E. Cálculo de Impedancias

Durante perturbaciones, la impedancia ($\bar{Z} = R + jX$) vista por los relés de protección dibuja una trayectoria al graficar la parte reactiva en función de la parte resistiva. Para realizar un análisis del comportamiento de la impedancia durante un evento, es necesario visualizar al mismo tiempo las zonas de protección definidas por los relés de distancia instalados en las subestaciones del sistema.

1) Tipo de relé, parámetros de la L/T y zonas de protección

Los parámetros de la línea de transmisión, la característica del relé y las zonas de protección son datos necesarios para realizar el análisis de la trayectoria de la impedancia durante eventos transitorios. Sin embargo el programa no puede obtener esta información de manera automática del formato COMTRADE, ya que estos datos se encuentran en los archivos HEADER o INFORMATION los cuales son opcionales y el programa no lee ni procesa estos archivos.

Debido a esto, el programa computacional permite en primer lugar escoger la característica del relé de protección entre Mho y Poligonal, una vez dentro de estas pantallas se debe ingresar los datos de impedancia de secuencia positiva y secuencia cero de la línea de transmisión y las zonas de protección del relé tanto para fase-fase como para fase-tierra.

La Fig. 5 presenta la imagen guía para ingresar los parámetros de las zonas de protección del relé de distancia tipo Mho.

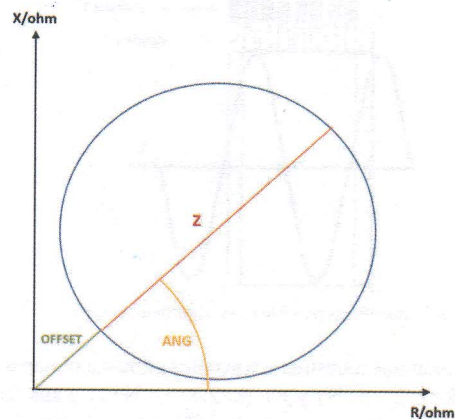


Fig. 5. Parámetros para dibujar el relé de distancia tipo Mho

La Fig. 6 presenta la imagen guía para ingresar los parámetros de las zonas de protección del relé de distancia tipo Poligonal.

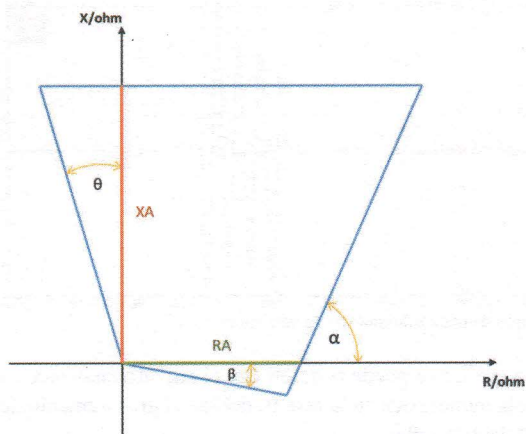


Fig. 6. Parámetros para dibujar el relé de distancia tipo Poligonal

2) Lazos de Impedancia

Un lazo de impedancia es la relación entre el voltaje y la corriente de falla, mediante la cual el relé determina la impedancia desde su ubicación hasta el punto en que ocurre la falla [9].

En los sistemas trifásicos típicos hay una serie de posibilidades de cortocircuitos, dependiendo de las fases involucradas y de si la conexión a tierra está presente. Se deben evaluar los lazos de impedancia aplicables al tipo de falla especificados en la Tabla II [9].

TABLA II
TIPOS DE FALLAS Y LAZOS DE IMPEDANCIA CORRESPONDIENTES

Tipo de falla	Fases involucradas	Lazos de Impedancia
Trifásico	L1-L2-L3	L1-L2 o L2-L3 o L3-L1
Bifásico	L1-L2	L1-L2
	L2-L3	L2-L3
	L3-L1	L3-L1
Monofásico a tierra	L1-E	L1-E
	L2-E	L2-E
	L3-E	L3-E
Bifásico a tierra	L1-L2-E	L1-E o L2-E o L1-L2
	L2-L3-E	L2-E o L3-E o L2-L3
	L3-L1-E	L3-E o L1-E o L3-L1
Trifásico a tierra	L1-L2-L3-E	L1-L2 o L2-L3 o L3-L1
		L1-E o L2-E o L3-E

Lazos fase-fase

Para el caso de fallas entre dos fases, los relés de distancia determinan la impedancia mediante la relación entre el voltaje de línea y la corriente de línea. Por lo tanto el lazo de impedancia fase-fase viene dado por (13) [9].

$$\bar{Z}_{Ph-Ph} = \frac{\bar{U}_{Ph-Ph}}{\bar{I}_{Ph-Ph}} = \frac{\bar{U}_{Ph1E} - \bar{U}_{Ph2E}}{\bar{I}_{Ph1} - \bar{I}_{Ph2}}$$

A partir de esta ecuación se obtienen los tres lazos de impedancia fase-fase posibles.

Lazos fase-tierra

Para fallas que incluyen contacto con tierra se tiene los lazos fase-tierra para los cuales se necesita factores de compensación por corriente residual de tierra, según el método de cálculo que se desee aplicar. Estos factores se obtienen de los parámetros de secuencia positiva y secuencia cero de la línea de transmisión.

Otro dato necesario es la corriente de tierra, que se puede obtener de uno de los canales analógicos del archivo COMTRADE o se puede aplicar (14) para calcular su valor. Estas dos opciones se encuentran disponibles en el programa desarrollado.

$$\bar{I}_E = -(\bar{I}_{L1} + \bar{I}_{L2} + \bar{I}_{L3}) \quad (14)$$

Se tiene dos métodos para el cálculo de los lazos fase-tierra que son acoplado y desacoplado.

El método acoplado es el método convencional que se emplea para el cálculo de lazos fase-tierra, se ocupa el valor complejo k_E que es el factor de compensación por corriente residual, el cual se obtiene de (15) [9].

$$\bar{k}_E = \frac{\bar{Z}_E}{\bar{Z}_L} = \frac{\bar{Z}_0 - \bar{Z}_1}{3 \cdot \bar{Z}_1} \quad (15)$$

Una vez obtenido este factor, se aplica (16) para obtener el lazo de impedancia fase-tierra.

$$\bar{Z}_{Ph-E} = \frac{\bar{U}_{Ph-E}}{\bar{I}_{Ph-E} - \bar{k}_E \cdot \bar{I}_E} \quad (16)$$

Este método solo entrega la reactancia real al punto de falla para casos cuando no se tiene resistencia de falla, de lo contrario se tendrá un error en el cálculo de la reactancia [9].

Por otro lado el método desacoplado se aplica en algunos relés numéricos, donde se utilizan dos factores escalares de compensación por corriente residual el k_{RE} dado por (17) y el k_{XE} dado por (18), los cuales son relaciones de resistencia y de reactancia respectivamente [9].

$$k_{RE} = \frac{R_E}{R_L} = \frac{R_0 - R_1}{3 \cdot R_1} \quad (17)$$

$$k_{XE} = \frac{X_E}{X_L} = \frac{X_0 - X_1}{3 \cdot X_1} \quad (18)$$

Con estos dos factores, se aplica las (19) y (20) para obtener las componentes real e imaginarias de los lazos de impedancia fase-tierra respectivamente.

$$R_{Ph-E} = \frac{U_{Ph-E}}{I_L} \cdot \frac{\cos(\varphi_U - \varphi_L) - \frac{I_E X_E}{I_L X_L} \cos(\varphi_U - \varphi_E)}{1 - \left(\frac{X_E + R_E}{X_L + R_L}\right) \frac{I_E}{I_L} \cos(\varphi_E - \varphi_L) + \frac{R_E X_E}{R_L X_L} \left(\frac{I_E}{I_L}\right)^2} \quad (19)$$

$$X_{Ph-E} = \frac{U_{Ph-E}}{I_L} \cdot \frac{\sin(\varphi_U - \varphi_L) - \frac{I_E R_E}{I_L R_L} \sin(\varphi_U - \varphi_E)}{1 - \left(\frac{X_E + R_E}{X_L + R_L}\right) \frac{I_E}{I_L} \cos(\varphi_E - \varphi_L) + \frac{R_E X_E}{R_L X_L} \left(\frac{I_E}{I_L}\right)^2} \quad (20)$$

Este método tiene la ventaja de obtener el valor real del lazo de impedancia a pesar de la presencia de una resistencia de falla [9].

III. APLICACIÓN Y RESULTADOS

Se utiliza la herramienta computacional desarrollada para realizar el análisis a un registro en formato COMTRADE.

En la Fig. 7 se presenta los datos informativos obtenidos del registro y que se presentan en la pantalla principal del programa desarrollado.

Subestación	Pascuales / S/E Pascuales / 138 kV	Saltrañá
Versión	1997	
C. Analógicos	8	
C. Digitales	59	
Frecuencia	60	
Fre. muestreo	1200	
Fecha inicio	30/07/2018	
Hora inicio	04:37:20.567000	
Fecha final	30/07/2018	
Hora final	04:37:20.816900	

Fig. 7. Información del registro

Después de asignar correctamente los canales analógicos, se puede graficar las formas de onda del registro presentadas en la Fig. 8.

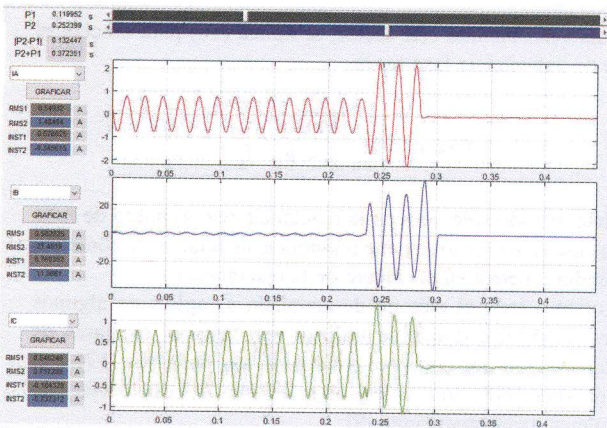


Fig. 8. Formas de onda de corrientes

Se tiene la opción de sobreponer las tres formas de onda en un solo gráficos como se presenta en la Fig. 9.

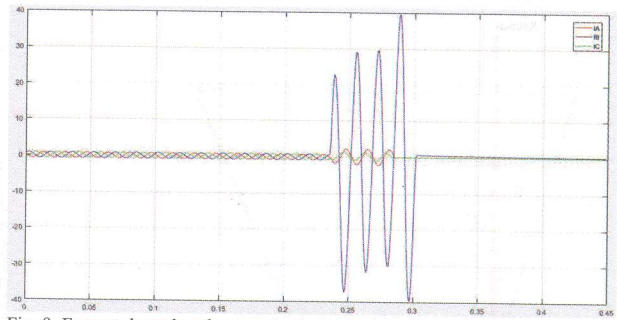


Fig. 9. Formas de onda sobrepuestas de corrientes

De esta gráfica se puede concluir que el registro analizado es de una falla monofásica en la fase B, debido al gran aumento de magnitud de esta señal.

En la Fig. 10 se puede observar la actuación de algunos canales digitales, es decir las funciones del relé disponibles. Al ser una falla en una línea de transmisión se analiza la función de distancia y se tiene que actúa la protección 21 en la fase B y la protección 21 de tierra, debido a que es una falla monofásica a tierra.

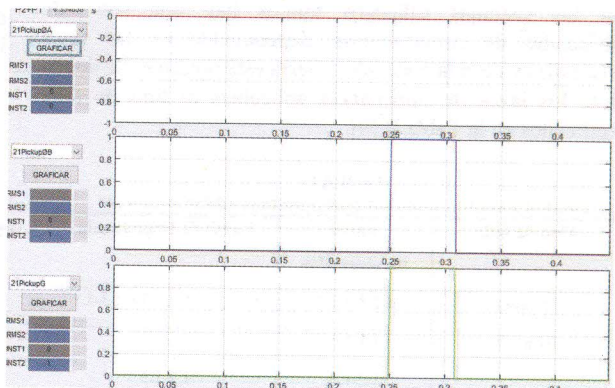


Fig. 10. Actuación de canales digitales

Los resultados del análisis fasorial permiten corroborar la conclusión anteriormente mencionada. Observando que al momento de la falla el valor RMS de la corriente B supera por mucho a las otras corrientes (Fig. 11).

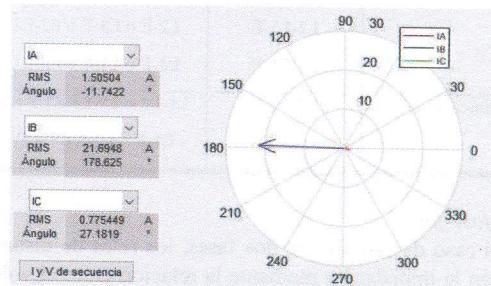


Fig. 11. Fasores de corrientes durante la falla

Los datos de la línea de transmisión presentados en la Tabla III se ingresan en el programa así como las zonas de protección correspondientes para cubrir el alcance correspondiente para

cada zona.

TABLA III
DATOS DE LA L/T

Nombre	Pascuales-Salitril
Longitud	17,4 km
Nivel de Voltaje	138 kV
Tipo	ACSR Flicker
Calibre	477
R ₁ en primario	2,066 Ω
X ₁ en primario	8,204 Ω
R ₀ en primario	5,223 Ω
X ₀ en primario	22,924 Ω

Se selecciona un relé con característica poligonal y se tiene una vista previa de las zonas de protección presentada en la Fig. 12.

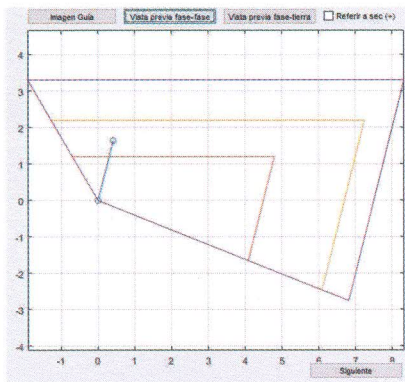


Fig. 12. Vista previa de zonas de protección definidas

En base a la Tabla II, para una falla monofásica solo es necesario obtener el lazo de impedancia fase-tierra de la fase fallada. En la Fig. 13 se puede observar la trayectoria del lazo de tierra correspondiente a la fase B y como ingresa a las zonas de protección para que el relé actúe y desconecte la línea de transmisión involucrada con el fin de aislar la falla.

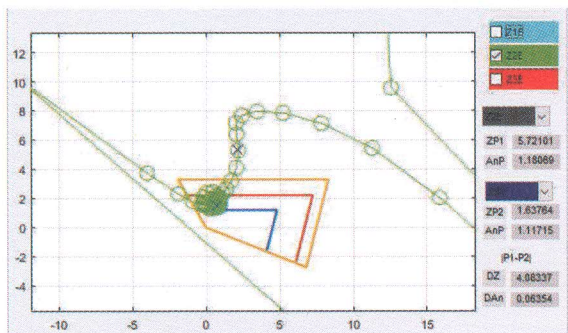


Fig. 13. Lazo de impedancia fase-tierra B

IV. CONCLUSIONES

La herramienta computacional desarrollada permite realizar un análisis detallado de eventos reales registrados en formato COMTRADE. Mediante el uso de la herramienta desarrollada es posible conocer de manera práctica el comportamiento del sistema de potencia y el sistema de protecciones frente a diferentes tipos de perturbaciones.

La estimación fasorial a partir de la aplicación de la Transformada Discreta de Fourier es fundamental para el desarrollo de las otras funciones del programa ya que con estos valores se puede realizar los cálculos respectivos para obtener las potencias monofásicas y trifásicas, y los lazos de impedancia.

Para realizar el análisis de la impedancia vista por los relés de protección, es necesario definir la característica del relé de distancia, sus zonas de protección y considerar los lazos de impedancia que intervienen para los diferentes tipos de fallas. El programa desarrollado presenta la versatilidad suficiente para mostrar principalmente el lugar geométrico de la impedancia cercana a las zonas de protección y solamente los lazos escogidos por el usuario.

Para el cálculo de los lazos de impedancia de tierra es necesario ingresar los parámetros de la línea de transmisión para obtener los factores de compensación por corriente residual, y escoger la forma de obtener la corriente de tierra que puede ser directamente del canal respectivo o calculada a partir de las corrientes de fase.

La función que permite el análisis de armónicos es útil, por ejemplo, en casos de energización de transformadores donde la corriente inrush provocada por la magnetización del núcleo del material no lineal, genera un amplio espectro de armónicos.

REFERENCIAS

- [1] Unidad de Integración del Sistema, "Configuración y Definición de Parámetros para Registros Oscilográficos de fallas en formato COMTRADE," CDEC-SING, Santiago de Chile, Guía Técnica, Jun. 2013.
- [2] Max Antonio Missene Montecinos, "Analizador de registros de falla en formato COMTRADE IEEE," Universidad de Santiago de Chile, 2017.
- [3] P. Nanda, C. K. Panigrahi, and A. Dasgupta, "Phasor Estimation and Modelling Techniques of PMU- A Review," *Energy Procedia*, vol. 109, pp. 64-77, Mar. 2017.
- [4] L. L. Grigsby, *The electric power engineering handbook*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2012.
- [5] J. D. Arcila, "ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS," p. 26.
- [6] Dugan, Roger C., McGranaghan, Mark F., Santoso, Surya, and Beaty, H. Wayne, *Electrical Power Systems Quality*, Segunda. McGraw-Hill, 2004.
- [7] Electronics Tutorials, "Harmonics and Harmonic Frequency in AC Circuits," *Harmonics*, 25-Jun-2013. .
- [8] J. E. Fleckenstein, *Three-phase electrical power*. New York, NY: Taylor & Francis Group, 2016.
- [9] G. Ziegler, *Numerical distance protection: principles and applications*, Second Edition. Erlangen: Publicis Publ, 2011.



Hámilton Paucar Fernández, nació en Quito – Ecuador, el 22 de abril de 1993. Obtuvo el título de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional en 2019. Actualmente, es operador de la Central Hidroeléctrica Pusuno ubicada en la provincia de Napo-Ecuador.



Christian Antonio Fonseca Amaya, nació en Quito, Ecuador en 1979. En marzo de 2003, recibió el título en Ingeniería Eléctrica y en julio de 2009 obtuvo el título de MSc. en Ingeniería Eléctrica, otorgados por la “Escuela Politécnica Nacional” (EPN) Quito – Ecuador. En la EPN ha sido profesor invitado, para cursos regulares de pregrado y posgrado en la Facultad de Ingeniería Eléctrica. Actualmente, trabaja en el Departamento de Mantenimiento de Subestaciones en CELEC EP – Transelectric. Sus principales áreas de investigación son las protecciones eléctricas, el modelamiento y el análisis de fallas en sistemas eléctricos.



Fabián Pérez Yauli, nació en Ambato-Ecuador. Obtuvo el título de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional, Quito-Ecuador en 2004. En 2012 obtuvo el grado de Doctor en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Nacional de San Juan, San Juan-Argentina, con una beca otorgada por el Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD). Actualmente es profesor titular a tiempo completo en la Escuela Politécnica Nacional. Su rama de investigación incluye protecciones de sistemas de potencia y procesamiento de señales.