

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA**

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA.

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
Ingeniero Eléctrico.**

ARTÍCULO ACADÉMICO.

**“DESARROLLO DE UN ALGORITMO PARA UN RELE
DIRECCIONAL APLICADO A UN ALIMENTADOR DE
DISTRIBUCIÓN CON GENERACIÓN DISTRIBUIDA”**

AUTORES:

**CRISTHIAN RICARDO SAN MARTÍN FEIJÓO,
FERNANDO JAVIER ZAMBRANO DOMINGUEZ.**

TUTOR:

ING. JOHN ARMANDO MORALES GARCÍA, PhD.

Cuenca - Ecuador

2018

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR.

Nosotros, **Cristhian Ricardo San Martín Feijóo** con cédula de ciudadanía 0704940949 y **Fernando Javier Zambrano Domínguez** con cédula de ciudadanía 0705385755, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: **“DESARROLLO DE UN ALGORITMO PARA UN RELÉ DIRECCIONAL APLICADO A UN ALIMENTADOR DE DISTRIBUCIÓN CON GENERACIÓN DISTRIBUIDA”**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniero Eléctrico en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

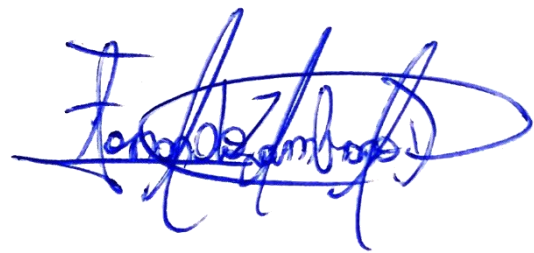
En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, julio de 2018.



Cristhian Ricardo San Martín Feijóo

C.C: 0704940949



Fernando Javier Domínguez Zambrano.

C.C: 0705385755

CERTIFICACIÓN.

Yo, John Armando Morales García, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **“DESARROLLO DE UN ALGORITMO PARA UN RELÉ DIRECCIONAL APLICADO A UN ALIMENTADOR DE DISTRIBUCIÓN CON GENERACIÓN DISTRIBUIDA”** realizado por Cristhian Ricardo San Martín Feijóo y Fernando Javier Zambrano Domínguez, obteniendo el Artículo Académico, que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, julio de 2018.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and strokes, positioned above the typed name.

Ing. John Armando Morales García.

C.C.: 0103705943

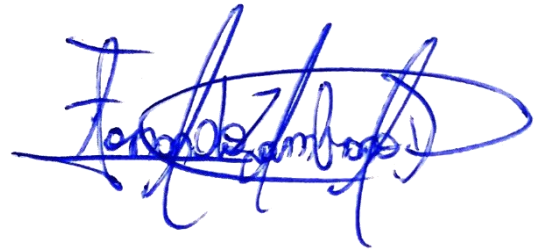
DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD.

Nosotros, **Cristhian Ricardo San Martín Feijóo** con cédula de ciudadanía 0704940949 y **Fernando Javier Zambrano Domínguez** con cédula de ciudadanía 0705385755, autores del trabajo de titulación intitulado: **“DESARROLLO DE UN ALGORITMO PARA UN RELÉ DIRECCIONAL APLICADO A UN ALIMENTADOR DE DISTRIBUCIÓN CON GENERACIÓN DISTRIBUIDA”**, certificamos que el total contenido del artículo académico es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría..

Cuenca, julio de 2018.



Cristhian Ricardo San Martín Feijóo
C.C: 0704940949



Fernando Javier Domínguez Zambrano.
C.C: 0705385755

AGRADECIMIENTO.

A Dios primordialmente por la vida, salud y amor que nos brinda cada día, y que, ha sido de gran ayuda para el trayecto del desarrollo de este trabajo. Así también las gracias a nuestro Director Ing. John Morales PhD por el apoyo invaluable durante la realización de cada actividad del proyecto de titulación, al Ing. Marco Carpio por ser soporte fundamental de nuestra formación como ingenieros eléctricos en la UPS Cuenca.

Además agradecemos por la paciencia y sacrificio de nuestra familia durante toda la etapa universitaria, y aún más, en todo el proceso de elaboración de este artículo.

Cristhian y Fernando

DEDICATORIA.

A, Dios por acompañarme en cada paso que doy, y por haber puesto a personas que han sido mi soporte durante mi carrera, a mis Padres Piedad y Ricardo pilar fundamental de mi éxito, además de Jorge, Andrea e Isaac que ahora son parte del corazón de la familia, y que han sido parte de esta genial etapa que es mi carrera universitaria.

Cristhian

A Dios y a mi madre Tanya que es lo más importante en mi vida y que ha sido pilar de apoyo y fortaleza para culminar una de mis metas planteadas. Me ha sabido formar como persona y ser humano. También a todas las personas que me brindaron su apoyo moral y que confiaron en mí.

Fernando

Desarrollo de un algoritmo para un relé direccional aplicado a un alimentador de distribución con Generación Distribuida.

Cristhian Ricardo San Martín Feijóo, Fernando Javier Zambrano Domínguez, John Armando Morales García
csan@ups.edu.ec, fzambrano@est.ups.edu.ec, jmoralesg@ups.edu.ec

Universidad Politécnica Salesiana.
 Carrera de Ingeniería Eléctrica.

Resumen—En este trabajo se propone un nuevo algoritmo de relé direccional, el cual sensa la dirección de la corriente de falla a lo largo del alimentador de distribución. Mediante un análisis matemático/estadístico, las señales de cortocircuito son analizadas de tal manera que el número de variables se reduce a la cantidad necesaria para el análisis de la direccionalidad, optimizando los datos mediante el Análisis de Componentes Principales (ACP). Posteriormente estas nuevas señales de la direccionalidad de la corriente, se analizan a través de patrones en un espacio de dos dimensiones. Mediante el valor promedio de la primera componente principal, es posible identificar la direccionalidad de la corriente de falla. Los resultados muestran un aceptable comportamiento del algoritmo de relé direccional, especialmente para distintos ángulos de inserción, distancias desde la falla hasta la ubicación del relé, variación de la resistencia de falla línea - tierra.

Palabras Claves—Fallas, relé de protección, adelante, atrás, Alimenta-dor de Distribución (AD), Generación Distribuida (GD).

Abstract—This paper presents a new algorithm directional relay which senses the direction of the fault current along the distribution feeder is proposed. By means of a mathematical / statistical analysis, the short-circuit signals are analyzed in such a way that the number of variables is reduced to the necessary quantity, optimizing the data through the Principal Component Analysis (PCA). Later these new signals of the directionality of the current, are analyzed through patterns in a space of two dimensions. By means of the average value of the first main component, it is possible to identify the directionality of the fault current. The results show an acceptable behavior of the directional relay algorithm, especially for different insertion angles, distances from the fault to the location of the relay, variation of the line-ground fault resistance.

Keywords—Faults, protection relay, forward, backward, Distribution Feeder (DF), Distributed Generation (DG).

I. INTRODUCCIÓN

Los relés de protección desempeñan un rol fundamental en los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) debido a que de ello depende la minimización de los efectos de las fallas, aislando esta del sistema protegido lo más rápido posible con el objetivo de disminuir el daño sobre el SEP y que la continuidad del suministro de energía eléctrica hacia los usuarios se mantenga. Diferentes tipos de fallas eléctricas pueden estar presentes en un SEP, y en el caso de líneas aéreas tanto de transmisión como de distribución, las fallas monofásicas tienen un porcentaje del 70 % de ocurrencia. Por otra parte, en la etapa de generación, usualmente han utilizado combustibles fósiles por mucho tiempo, representado en algunos casos costos altos tanto económicos como ambientales. Sin embargo, respecto a los AD, la GD es utilizada

al ser considerada energía limpia, obteniendo una reducción en los costos como en el impacto ambiental [1], [2]. Al evaluar el relé de protección en los sistemas de distribución con incorporación de generación distribuida, las protecciones tradicionales tienden a fallar debido a la existencia de flujos de potencia bidireccionales. Esto debido a los diferentes niveles de cortocircuito que se pueden presentar mientras el sistema se encuentra en operación, haciendo que las protecciones actúen de forma errónea o el disparo de las protecciones se retrasen mucho tiempo antes de actuar. La solución de protección más efectiva ha sido la utilización de relés direccionales debido a que responden de manera sensible y selectiva ante la ocurrencia de las fallas en el sistema de GD [17], [18].

Respecto a la incorporación de GD en los AD, esta produce una circulación del flujo de corriente en ambas direcciones, distinta a la que la red tiene en el instante que se produce la falla [3], siendo esto una causa posible de mal funcionamiento de relés de sobre corriente. En este sentido, los relés direccionales se deben utilizar con el fin de identificar la dirección de la corriente después de que una falla eléctrica se produce a lo largo del AD, considerando GD. Existen distintos estudios realizados con el fin de identificar la direccionalidad de la falla. Según Vásquez, Castruita, Chacón [5], para detectar la dirección del flujo de la corriente se estudia el efecto de la onda viajera inicial generada por el colapso de voltaje en el punto de ocurrencia de falla para determinar si se encuentra dentro o fuera de la línea protegida. En [6] se propone un algoritmo utilizando la transformada Wavelet, el cual hace un análisis de la onda viajera en el dominio de la frecuencia, obteniendo detalles en alta frecuencia y aproximaciones de baja frecuencia del voltaje y la corriente. Otro algoritmo propuesto en [7], [8] calcula el desfase entre dos magnitudes características del sistema tales como voltaje y corriente. En [9] se aplica una estimación fasorial con la transformada de Fourier. En [10] se utiliza un análisis con correlación cruzada con la transformada de Fourier. Otros de los métodos para encontrar la dirección del flujo de la corriente es el uso de redes neuronales que tienen la capacidad de aprender y convertir tareas complejas en sub tareas más sencillas. El análisis de componentes de secuencia negativa en [11] es utilizado para encontrar la dirección que posee la corriente en el instante de la falla. Para el análisis de la dirección del flujo de la corriente en [12] se emplea la transformada Wavelet, la misma que selecciona señales de frecuencia de 100 a 500 Hz, generando señales direccionales de alta frecuencia. Basado en lo anterior, es claro que proponer un nuevo algoritmo de relé direccional donde se considere la GD es importante para los AD, por lo cual en

este trabajo se propone un metodo capaz de definir la dirección de la corriente cuando se produce una falla en algún sector del AD. Mediante un análisis matemático/estadístico, el cual reduce el número de variables [16], optimizando los datos mediante el análisis del porcentaje de variabilidad que existe entre cada componente principal, además que, con la obtención del valor promedio se logra proponer un algoritmo con la capacidad de identificar la dirección de la corriente de falla de forma precisa y sencilla.

II. ALGORITMO PROPUESTO

II-A. Análisis de Componentes Principales (ACP).

El análisis de componentes principales es una herramienta matemática que permite sintetizar la información, haciendo posible el análisis de un conjunto de datos el cual puede contener p variables intercorrelacionadas. La aplicación de ACP es posible si existe una alta correlación entre las variables estudiadas ya que esto es un indicativo de que la información es redundante y que la variabilidad total se encuentra en ciertas componentes principales (CP), por lo tanto, la nueva representación es un conjunto de datos con nuevas variables, son elegidas según su porcentaje de variabilidad que resulte suficiente para el análisis [13].

C_{nm} representa la señal de falla captada por el relé, obtenida en un intervalo de tiempo de 80 ms, a lo largo de este tiempo se logra muestrear 200000 variables. Para que el nivel de procesamiento de la señal no resulte muy pesado y lento por tener un número alto de muestras se adquiere una muestra cada 0.02 ms, haciendo que el número de variables muestreadas sea de 4000. Por lo tanto la representación matemática con ACP de los datos obtenidos es:

$$\mathbf{C}_{nm} = [C_{n,1} \quad C_{n,2} \quad \cdots \quad C_{n,P}] \quad (1)$$

donde n representa el número de señales y p representa el número de variables. Con todos los datos obtenidos, se construye la matriz $\mathbf{X}_{n \times p}$:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \cdots & C_{1p} \\ C_{21} & C_{22} & \cdots & C_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{n1} & C_{n2} & \cdots & C_{np} \end{bmatrix} \quad (2)$$

La matriz \mathbf{X} contiene datos originales, de la cual el valor máximo de las señales de sobrecorriente \mathbf{X}_{max} es necesario para así poder generar la matriz de datos normalizada \mathbf{F} .

$$\mathbf{F} = \left[\frac{\mathbf{X}}{\mathbf{X}_{max}} \right] \quad (3)$$

Con \bar{F} que es la media de la matriz \mathbf{F} construimos la matriz de varianza-covarianza:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n (F_i - \bar{F})^2}{n - 1} \quad (4)$$

La representación matricial de la covarianza es:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} s v_{11} & s v_{12} & \cdots & s v_{1p} \\ s v_{21} & s v_{22} & \cdots & s v_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s v_{n1} & s v_{n2} & \cdots & s v_{np} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Los valores y vectores propios se obtienen de la matriz \mathbf{S} de covarianza:

$$\det(\mathbf{S} - \lambda \mathbf{I}) = 0 \Rightarrow \text{valor propio} \quad (6)$$

A partir del determinante de la operación de matrices, donde \mathbf{S} es la matriz de covarianza, \mathbf{I} representa la matriz de identidad, y λ representa la matriz de valores propios calculado con (6), se determina la ecuación para obtener la matriz de vectores propios \mathbf{V} :

$$(\mathbf{S} - \lambda \mathbf{I})\mathbf{V} = 0 \Rightarrow \text{vector propio} \quad (7)$$

Finalmente las componentes principales se obtienen de la descomposición en valores y vectores propios de la matriz de covarianza. Cada una de las componentes está asociada a uno de los posibles valores propios y los coeficientes son uno de los correspondientes vectores propios. Por lo tanto, la matriz \mathbf{P} se calcula con (8).

$$\mathbf{P} = [\mathbf{X}][\mathbf{V}] \quad (8)$$

De modo que \mathbf{P} tiene las coordenadas de n señales sobre cada componente, y \mathbf{V} contiene los coeficientes de cada una de las posibles combinaciones lineales de las componentes principales, correspondiente a los vectores propios obtenidos, además de que \mathbf{P} representa la proyección de las señales de falla monofásicas sobre la nueva base correspondiente a las componentes principales [15], [19]. Para hacer la representación de los datos es necesario conocer la cantidad de información recopilada por cada una de las componentes.

$$\text{Vari \%} = \frac{\lambda_j}{\sum_{i=1}^p \lambda_i = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_p} \times 100 \quad (9)$$

En (9) se utiliza la diagonal de valores propios para conocer el porcentaje de variabilidad que posee cada componente principal (CP), λ corresponde al valor propio extraído por cada una de las componentes, y es dividido para la suma de todos los valores propios. Conocido el porcentaje de variabilidad que existe entre cada componente, las señales de falla monofásica son referidas en términos de las componentes principales que contienen la mayor cantidad de información.

En este estudio se consideró un umbral de porcentaje de variabilidad suficiente de $\text{Vari \%} \geq 90\%$ para el análisis [13].

II-B. Clasificación de las señales de entrada

Es necesario que el algoritmo tenga la capacidad de clasificar los valores obtenidos sobre la nueva base que corresponde a las componentes principales. Por lo tanto para el planteamiento de un clasificador se hace uso de (11).

$$k = \frac{\text{Val}_{min} + \text{Val}_{max}}{2} \quad (10)$$

donde (Val_{min}) es el valor mínimo de la primera componente principal que se encuentra hacia adelante y (Val_{max}) es el valor máximo de la primera componente principal que se encuentra hacia atrás. El criterio de clasificación se hace de la siguiente manera:

$$\begin{cases} \text{Si CP1 de P} > k \Rightarrow \text{Adelante} \\ \text{Si CP1 de P} \leq k \Rightarrow \text{Atrás} \end{cases} \quad (11)$$

III. MODELO DEL ALIMENTADOR CON GENERACIÓN DISTRIBUIDA

Para evaluar el algoritmo se utilizó un modelo de un alimentador trifásico con generación distribuida tal como se muestra en la Fig. (1), simulado mediante el software especializado de versión libre Alternative Transients Programs [14] (ATP Draw). Diferentes señales de cortocircuito monofásicas se captan en distintos puntos de la red con la simulación, variando resistencias, instantes de tiempo y distancias de ocurrencia de falla. Posteriormente aplicando la herramienta (ACP) se obtiene los valores de proyección de las señales de cortocircuito sobre una nueva base, de estos valores se extrae el porcentaje de variabilidad existente entre cada componente principal y simultáneamente con el cálculo del índice k se clasifica las señales de cortocircuito en las fallas monofásicas ocurridas en los tres tramos propuestos.

Las características del sistema modelado se muestran detalladamente en la Tabla IX: Los Generadores (G1, G4) generan un voltaje de 22kV, (G2, G3) son de generación distribuida y su voltaje es de 975 V. El sistema tiene una frecuencia de 60 Hz. Este alimentador está dividido en tres tramos, cada tramo contiene una longitud de: TR1=2000 m, TR2=200 m, TR3=2000 m. Para adquirir las muestras de corriente de la línea y reducir a niveles seguros y medibles se utiliza el transformador de corriente (TC). Se simularon diferentes escenarios de fallas monofásicas en la fase A para adquirir las señales de entrenamiento del algoritmo.

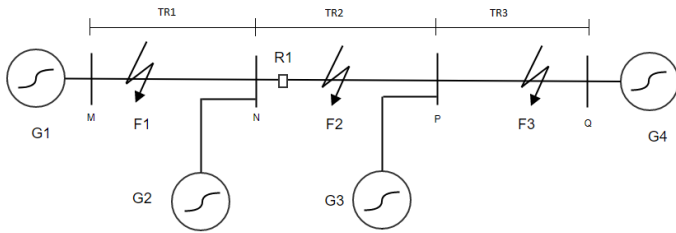


Figura 1. Alimentador de Generación Distribuida

En cuanto a la construcción de la matriz de señales de cortocircuito, se han simulado 63 escenarios de ocurrencia de falla monofásica en 3 puntos del alimentador. En la Tabla I se presentan los valores de sobrecorriente al instante de la falla en el tramo 1 del alimentador y en la Tabla II y Tabla III los valores correspondientes a los tramos 2 y 3, respectivamente.

La ubicación de la falla monofásica en el Tramo 1 (TR1) del alimentador de distribución esta a 1000 m medida desde R1 hasta G1. La segunda falla está ubicada en el Tramo 2 (TR2) a una distancia de 100 m desde R1 en dirección a G4. La tercera falla está localizada en el tercer tramo (TR3) a 1200 m de R1.

TABLA I
EFECTO DE RESISTENCIA DE FALLA E INSTANTE DE FALLA EN EL PRIMER TRAMO DEL ALIMENTADOR

Tipo de Falla	Instante de falla (ms)	Resistencia de falla (ohm)	Dirección	Distancia (m)
Monofásica a Tierra	(4, 12, 15, 28, 30, 35, 46)	4	Atrás	1000
		16	Atrás	1000
		28	Atrás	1000

TABLA II
EFECTO DE RESISTENCIA DE FALLA E INSTANTE DE FALLA EN EL SEGUNDO TRAMO DEL ALIMENTADOR

Tipo de Falla	Instante de falla (ms)	Resistencia de falla (ohm)	Dirección	Distancia (m)
Monofásica a Tierra	(4, 12, 15, 28, 30, 35, 46)	4	Adelante	100
		16	Adelante	100
		28	Adelante	100

TABLA III
EFECTO DE RESISTENCIA DE FALLA E INSTANTE DE FALLA EN EL TERCER TRAMO DEL ALIMENTADOR

Tipo de Falla	Instante de falla (ms)	Resistencia de falla (ohm)	Dirección	Distancia (m)
Monofásica a Tierra	(4, 12, 15, 28, 30, 35, 46)	4	Adelante	1200
		16	Adelante	1200
		28	Adelante	1200

IV. EXTRACCIÓN DE PATRONES USANDO EL ALGORITMO PROPUESTO

Este trabajo utiliza 63 señales de fallas monofásicas captadas por el relé en la fase A. Por lo tanto, la matriz de datos originales tiene la dimensión de $\mathbf{X} = [63 \times 4000]$, donde cada señal muestreada tienen una cantidad de 4000 variables. Aplicando (3) se obtiene una nueva matriz normalizada denominada \mathbf{F} de donde se obtiene la matriz \mathbf{S} de dimensión $\mathbf{S} = [4000 \times 4000]$. Utilizando (6) y (7) se calculan los valores y vectores propios de la matriz de covarianza. Para hacer la representación de la información de manera óptima se utiliza (8), donde \mathbf{P} es la matriz que contiene los valores de las componentes principales, es decir las nuevas variables con la máxima correlación con respecto a las señales originales.

Se utiliza (9) para determinar el porcentaje de variabilidad que contiene cada componente de la matriz \mathbf{P} . Por lo tanto con el fin de cumplir con el umbral de variabilidad de $\%Vari \geq 90\%$, se analizaron las tres primeras componentes principales, obteniendo un porcentaje de variabilidad de:

$$Vari \% = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_{4000}} \times 100 = 98,69\% \quad (12)$$

La primera componente principal contiene la dirección de máxima variabilidad, y la segunda al encontrarse en dirección perpendicular a la primera recoge el resto de la variabilidad [13], [15], [18]. Por lo tanto, utilizando las dos primeras componentes principales se obtiene un porcentaje de variabilidad del 97.6%. Esto hace posible que la proyección de la información de las fallas monofásicas se pueda realizar con las dos primeras componentes principales, ya que el porcentaje obtenido se encuentra dentro del umbral planteado $\geq 90\%$.

Para realizar la clasificación de las señales de sobrecorriente durante la falla monofásica con las coordenadas de las componentes principales se utiliza (11), donde se obtiene $k = 4$. El índice k representa un valor numérico del umbral de clasificación.

La Fig. (2) muestra la representación de las señales de cortocircuito de la primera componente principal sobre el espacio de la

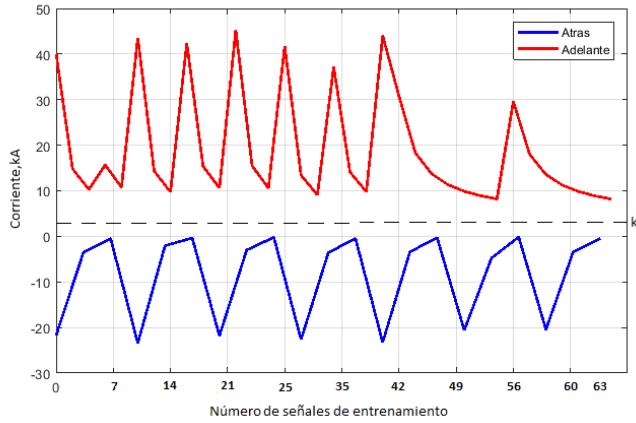


Figura 2. Componente Principal 1 en Tramo 1 y Tramo 2 - 3

primera componente principal. Además se hace la representación del valor k con un línea entre cortada, donde se representa el umbral de clasificación de las componentes principales que representan las señales de cortocircuito.

IV-A. Señales obtenidas a través del ACP.

Al proyectar las señales obtenidas por el relé (R1) en las coordenadas de las componentes principales, se observa que existen dos patrones definidos. En la Fig. (3) se hace la representación de las dos primeras componentes principales en un espacio bidimensional, siendo estas, las señales del flujo de la corriente en el instante que se produce la falla a lo largo de los diferentes tramos del alimentador de distribución.

Basado en el criterio de clasificación que se presenta en (12) y (13) los patrones con símbolo más (+) representan el flujo de la sobrecorriente que se dirige hacia atrás (backward) en el instante que ocurre la falla en el tramo 1, así mismo los patrones con símbolo circular (o) corresponden a fallas hacia adelante (forward) en el segundo y tercer tramo.

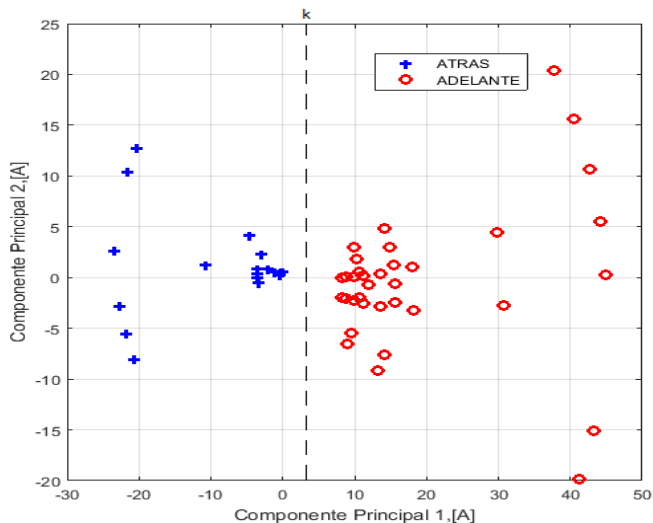


Figura 3. Representación de señales de cortocircuito usando las dos primeras componente principales

V. VERIFICACIÓN DEL ALGORITMO PROPUESTO USANDO LAS NUEVAS SEÑALES DE FALLA.

Con el fin de verificar la viabilidad del algoritmo propuesto se simularon 120 nuevas incidencias de fallas monofásica en el alimentador de distribución con valores de resistencia y tiempos distintos a los utilizados inicialmente para el entrenamiento del algoritmo. Estos nuevos valores se presentan en las Tablas IV, V y VI. El proceso de análisis de las nuevas señales de prueba son procesadas de una forma rápida, hace uso del valor máximo (\mathbf{X}_{max}) que se utilizó en el caso anterior del entrenamiento del algoritmo, donde la señal nueva de prueba ($\mathbf{R}_n = 1 \times 4000$), se divide por \mathbf{X}_{max} a fin de obtener \mathbf{X}_{prueba} , que posteriormente se resta de la media del vector \mathbf{F} . A continuación se muestra el proceso de cálculo:

$$\mathbf{X}_{prueba} = \frac{\mathbf{R}_n}{\mathbf{X}_{max}} \quad (13)$$

$$\mathbf{A}_{prueba} = \mathbf{X}_{prueba} - \bar{\mathbf{F}} \quad (14)$$

Luego las componentes principales se obtienen con (17) y (18), donde \mathbf{v}_1 y \mathbf{v}_2 son los vectores propios que se calculó en el proceso anterior (sección II) y \mathbf{A}_{prueba} representa la señal de prueba normalizada, representado matemáticamente de la siguiente manera:

$$\mathbf{P}e_1 = \mathbf{A}_{prueba} \mathbf{v}_1 \quad (15)$$

$$\mathbf{P}e_2 = \mathbf{A}_{prueba} \mathbf{v}_2 \quad (16)$$

Al evaluar el algoritmo con los nuevos valores de resistencia (5, 10, 26, 32, 38 Ω) e instantes de falla (11, 22, 43 ms) que se muestran en la Tabla IV se obtiene como resultado un nuevo grupo de patrones representados con símbolos cuadrados (\square) que se agrupan en la región de los patrones de símbolo más (+) como se muestra en la Fig. (4). Los nuevos patrones demuestran que las señales de corriente corresponden al primer tramo, comprobándose las señales probadas inicialmente en el primer tramo del alimentador de distribución.

TABLA IV
EFECTO DE NUEVAS RESISTENCIAS DE FALLA EN TRAMO 1

Tipo de Falla	Instante de falla (ms)	Resistencia de falla (ohm)	Dirección	Distancia (m)		
Monofásica a Tierra	(11,22 ,43)	5	Atrás	100	1200	1900
		10	Atrás	100	1000	1900
		26	Atrás	100	1000	1900
		32	Atrás	100	1000	1900
		38	Atrás	100	1000	1900

La Fig. (5) muestra los patrones de las pruebas realizadas con los nuevos valores de resistencias e instantes de falla para el segundo y tercer tramo del alimentador (los mencionados valores se presentan en la Tabla V y VI). Los patrones con símbolo asterisco (*) representan las señales de sobrecorriente que se captan al ocurrir la falla en el segundo tramo, mientras que los símbolos en forma de triángulo (\triangleright) representan las señales de sobrecorriente captadas en el tercer tramo del alimentador. Estos resultados demuestran que la dirección de flujo de corriente va hacia adelante (forward), verificando el entrenamiento inicial del algoritmo.

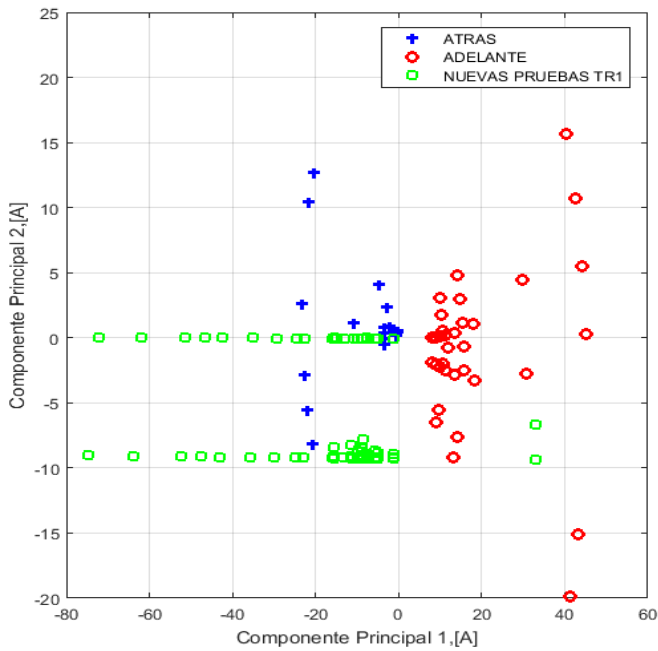


Figura 4. Representación de nuevas pruebas en el primer tramo del alimentador usando las dos primeras CP

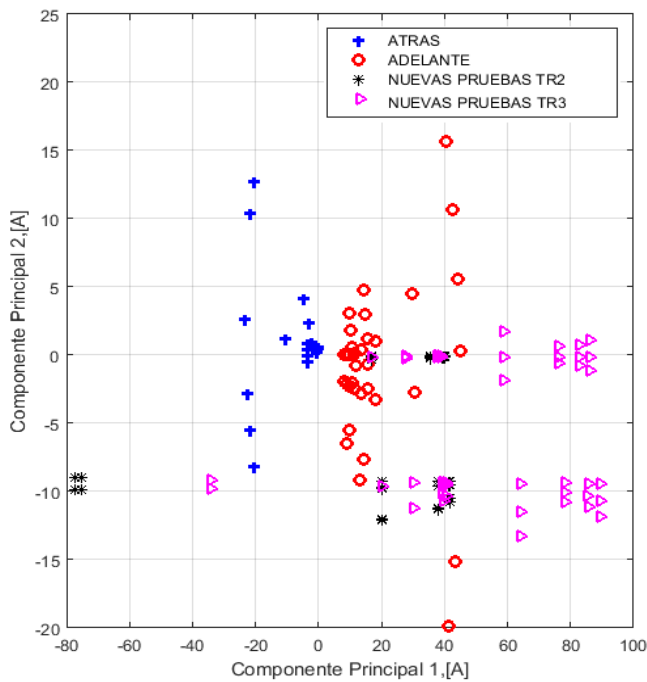


Figura 5. Representación de nuevas pruebas en el segundo y tercer tramo del alimentador usando las dos primeras CP

TABLA VI
EFECTO DE NUEVAS RESISTENCIAS DE FALLA EN TRAMO 3

Tipo de Falla	Instante de falla (ms)	Resistencia de falla (ohm)	Dirección	Distancia (m)		
Monofásica a Tierra	(11,22 ,43)	5	Adelante	300	1200	2100
		10	Adelante	300	1200	2100
		26	Adelante	300	1200	2100
		32	Adelante	300	1200	2100
		38	Adelante	300	1200	2100

En la Fig. (6) se representa todos los patrones obtenidos en el instante que se produce la falla a lo largo del alimentador en coordenadas de Componentes Principales, se encuentra dentro de esta representación tanto las señales de entrenamiento como las señales de prueba. El umbral de clasificación se representa con una línea punteada, donde se puede apreciar que existen patrones que no cumplen con la clasificación propuesta pero que se suscitan solo bajo ciertas condiciones de falla. Ignorando este punto se observa que el algoritmo presenta un alto grado de eficiencia con respecto a las otras señales clasificadas, demostrando que tiene la capacidad de clasificar los patrones de una forma aceptable y simple.

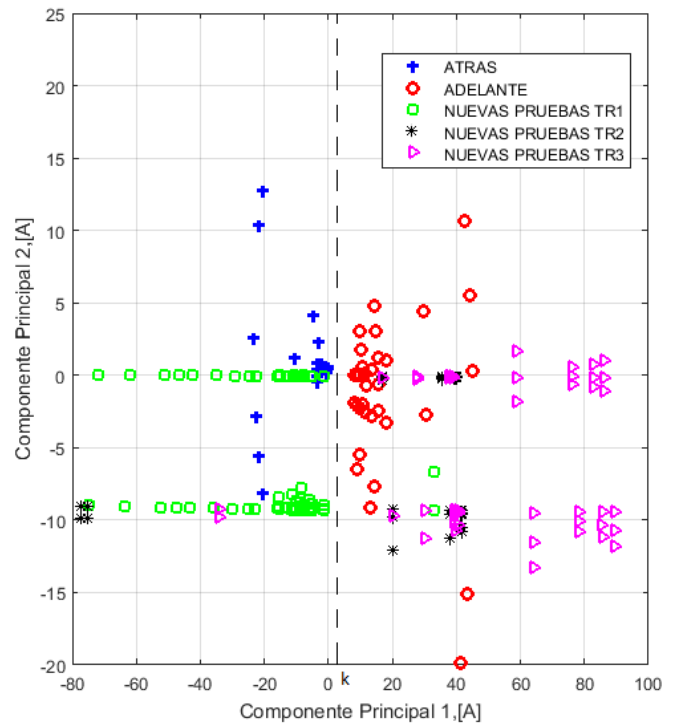


Figura 6. Patrones Clasificados

TABLA V
EFECTO DE NUEVAS RESISTENCIAS DE FALLA EN TRAMO 2

Tipo de Falla	Instante de falla (ms)	Resistencia de falla (ohm)	Dirección	Distancia (m)		
Monofásica a Tierra	(11,22 ,43)	5	Adelante	50	150	200
		10	Adelante	50	150	200
		26	Adelante	50	150	200
		32	Adelante	50	150	200
		38	Adelante	50	150	200

La tabla VII presenta los resultados obtenidos de las primeras componentes principales del estudio de los tramos del alimentador, de igual manera se muestra la dirección del flujo de la corriente, valores de resistencia de falla y ángulo de inserción con los que el algoritmo no funciona correctamente, esto se deduce a partir del criterio de clasificación aplicando el cálculo del coeficiente k . La clasificación no se hace de manera correcta en el primer, segundo y tercer tramo, bajo las condiciones de falla en donde la incidencia de la falla es cercana al relé y la resistencia de falla posee un valor bajo. Por lo tanto el clasificador propuesto posee un porcentaje de

error para el primer tramo 6.67% y para el segundo y tercer tramo un error de clasificación del 10%.

En tabla VIII se presenta un resumen de la clasificación de las señales que fueron parte de la verificación del funcionamiento del algoritmo.

TABLA VIII
PORCENTAJE DE CLASIFICACIÓN

Tipo de Falla	Dirección de Corriente	Número de Señales	Clasificación Correcta	Error de Clasificación(%)
Monofásica a Tierra	Atrás	40	38	5%
	Adelante	80	74	7.5%

VI. CONCLUSIONES

El algoritmo propuesto con ACP clasifica con errores menores a 7.5% las señales de falla, demostrando que es capaz de distinguir la dirección de la corriente no solo con las señales con las que se entrenó el algoritmo si no también con las nuevas señales de falla, haciendo la clasificación de una manera rápida y efectiva. Por lo tanto dentro de los resultados presentados es posible indicar que el algoritmo tiene 92% de efectividad de clasificación. Este porcentaje de clasificación se logra adquirir con el análisis de la clasificación que se hace en la Tabla VIII, demostrando esta efectividad tanto para las fallas ocurridas cerca al relé como para las que se encuentran distantes.

Como consecuencia de lo expuesto en este trabajo, el algoritmo tiene la capacidad de extraer los parámetros más relevantes, donde el análisis del número de variables se reduce en gran medida. Es decir que de tener inicialmente para el entrenamiento del algoritmo una matriz de 63×4000 se logra condensar la información de las variables a una matriz de 63×2 , logrando que la representación de las señales en coordenadas de componentes principales se pueda evaluar de una manera simple y precisa.

Se puede indicar que las distancias del tramo con resistencia de falla mayor a 8 ohm no presentan error de clasificación de dirección del flujo de la corriente de falla (por lo tanto la impedancia de falla debe estar hasta 20 ohms como máximo y un umbral más amplio con menos de 10 ohms), coincidiendo con las señales de entrenamiento, obtenidas del relé que pasa con el sistema que toma la medida del TC, analizadas con el algoritmo en los tres tramos estudiados.

REFERENCIAS

- [1] Sandra Ximena Carvajal Quintero, Juan David Marín Jiménez "Impacto de la generación distribuida en el sistema eléctrico de potencia colombiano: un enfoque dinámico" vol. 17, No.35, pp. 77-89, enero-marzo de 2013
- [2] José Coto Aladro "Análisis de Sistemas de Energía Eléctrica" Edita e imprime: Servivio de Publicacione. Universidad de Oviedo. D.L.:AS/3081-2002. I.S.B.N:84-8317-334-4
- [3] Gerald B. Sheblé and M. Shahidepour "power-market design From economic theory to market architecture" ISSN 1540-7977/03, january/february 2003
- [4] José Dolores Juárez Cervantes "Sistemas de Distribución de energía eléctrica", Primera Edición 1995 ISBN: 970-620-734-1
- [5] Ernesto Vásquez Martínez, Jorge Castruita Ávila, Óscar Leonel Chacón Mondragón "Protección de sistemas eléctricos mediante reconocimiento de patrones de onda viajera" Enero-Marzo 2006, Vol. IX, No. 30
- [6] Nan Zhang and Mladen Kezunovic "Transmission Line Boundary Protection Using Wavelet Transform and Neural Network, Vol.22, No.2, April 2007.

- [7] 'Instruction manual for GRE140 directional overcurrent protection relay', Toshiba, Japan, 2012, Version 2.1
- [8] 'Complete technical manual for 7SG11 Argus 1-6 overcurrent protection relay', Siemens, Erlangen, Germany, April. 2013
- [9] Bin Gu, Jiancheng Tan, Hua Wei "High speed directional relaying algorithm based on the fundamental frequency positive sequence superimposed components" IET Gener. Transm. Distrib., 2014, Vol. 8, Iss.7, pp. 1211-1220
- [10] Ghasem Saleki, Haidar Samet, Teymoor Ghanbari "High-speed directional protection based on cross correlation of Fourier transform components of voltage and current" IET Sci. Meas. Technol., 2016, Vol. 10, Iss. 4, pp. 275-287 IEEE 2016.
- [11] Premalata Jena, Ashok Kumar Pradhan "Directional Relaying During Single-Pole Tripping Using Phase Change in Negative-Sequence Current" IEEE Transactions on Power Delivery. Vol.28, No.3, July 2013
- [12] Simi P. Valsan, K.S. Swarup "Computationally Efficient Wavelet-Transform-Based Digital Directional Protection for Busbars" IEEE Transactions on Power Delivery. Vol.22, No.3, July 2007.
- [13] Carlos Lozares Colina, Pedro López Roldán "El Análisis de Componentes Principales: Aplicación al Análisis de Datos Secundarios" Departament de Sociologia Universitat AutGnoma de Barcelona. Revista de Sociologia Vol.37, 199.
- [14] "ATP DRAW Version 3.5 for Windows 9x/NT/2000/XP Users' Manual," SINTEF Energy Research-Norwegian Univ. Sci.Technol., Trondheim, Norway, 1999.
- [15] J. Morales, Orduña, Rehtanz "Identification of Lightning Stroke due to Shielding Failure and back Flashover for Ultra-High-Speed Transmission Line Protection" IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 29, no. 4, august 2014.
- [16] J. A. Morales and E. A. Orduña, "Patterns extraction for lightning transmission lines protection based on principal component analysis," IEEE Trans. Latin Amer., vol. 11, no. 1, pp. 518-524, Feb. 2013.
- [17] Jaime Ignacio Gallegos Espinoza "Evaluación de esquemas de protección en redes de baja tensión con penetración de Generación Distribuida", Universidad de Chile Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas departamento de ingeniería eléctrica, Santiago de Chile septiembre 2014.
- [18] Ahmed S. Salem, Emtethal N. Abdallah, Nabil H. Abbasy "Protection Relays Coordination in Networks Equipped with Distribution Generation During Different Modes of Operation " 2017 Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Menoufia University, Egypt, 19-21 December 2017
- [19] I. Jolliffe, Principal Component Analysis. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1986.
- [20] Hamid Jafarabadi Ashtiani, Haidar Samet, Teymoor Ghanbari "Simple current-based algorithm for directional relays" Accepted on 20th July 2017

TABLA VII
CLASIFICACIÓN DE LAS SEÑALES DE FALLA UTILIZANDO EL INDICE K

Si $CPI > k \rightarrow$ Adelante; Si $CPI \leq k \rightarrow$ Atrás; $k=4$

N.- de señales	Instante defalla (ms)	Distancia(m)	Resistencia de falla (L)	Valor obtenido de CPI en TR1	Dirección Esperada	Dirección Obtenida	Valor obtenido de CPI en TR2	Distancia(m)	Dirección Esperada	Dirección Obtenida	Valor obtenido de CPI en TR3	Distancia(m)	Dirección Esperada	Dirección Obtenida
1	11	100	5	32.8449	Atrás	Adelante	-77.1754	50	Adelante	Atrás	-34.1291	300	Adelante	Atrás
2	11	100	10	-8.6161	Atrás	Atrás	20.0069	50	Adelante	Adelante	30.0783	300	Adelante	Adelante
3	11	100	26	-11.3160	Atrás	Atrás	38.0687	50	Adelante	Adelante	39.6734	300	Adelante	Adelante
4	11	100	32	-8.8331	Atrás	Atrás	41.6807	50	Adelante	Adelante	40.4404	300	Adelante	Adelante
5	11	100	38	-5.8228	Atrás	Atrás	41.6272	50	Adelante	Adelante	39.3087	300	Adelante	Adelante
6	22	100	5	32.8452	Atrás	Adelante	-77.1773	50	Adelante	Atrás	-34.1294	300	Adelante	Atrás
7	22	100	10	-8.6160	Atrás	Atrás	20.0063	50	Adelante	Adelante	30.0782	300	Adelante	Adelante
8	22	100	26	-10.7218	Atrás	Atrás	38.0684	50	Adelante	Adelante	39.6734	300	Adelante	Adelante
9	22	100	32	-8.4988	Atrás	Atrás	41.6805	50	Adelante	Adelante	40.4405	300	Adelante	Adelante
10	22	100	38	-5.6515	Atrás	Atrás	41.6271	50	Adelante	Adelante	39.3087	300	Adelante	Adelante
11	43	100	10	-8.5957	Atrás	Atrás	20.0166	50	Adelante	Adelante	30.0642	300	Adelante	Adelante
12	43	100	26	-11.3022	Atrás	Atrás	38.0744	50	Adelante	Adelante	39.6637	300	Adelante	Adelante
13	43	100	32	-8.8227	Atrás	Atrás	41.6846	50	Adelante	Adelante	40.4331	300	Adelante	Adelante
14	43	100	38	-5.8145	Atrás	Atrás	41.6302	50	Adelante	Adelante	39.3028	300	Adelante	Adelante
15	11	1000	10	-74.6838	Atrás	Atrás	20.0857	100	Adelante	Adelante	38.8509	1200	Adelante	Adelante
16	11	1000	26	-63.7227	Atrás	Atrás	37.9853	100	Adelante	Adelante	37.7611	1200	Adelante	Adelante
17	11	1000	32	-52.4752	Atrás	Atrás	41.5568	100	Adelante	Adelante	27.5786	1200	Adelante	Adelante
18	11	1000	38	-47.5938	Atrás	Atrás	41.4959	100	Adelante	Adelante	37.9275	1200	Adelante	Adelante
19	22	1000	10	-35.8120	Atrás	Atrás	20.0851	100	Adelante	Adelante	64.0189	1200	Adelante	Adelante
20	22	1000	26	-29.8414	Atrás	Atrás	37.9850	100	Adelante	Adelante	58.6642	1200	Adelante	Adelante
21	22	100	32	-24.9625	Atrás	Atrás	41.5567	100	Adelante	Adelante	64.0055	1200	Adelante	Adelante
22	22	1000	38	-22.8484	Atrás	Atrás	41.4958	100	Adelante	Adelante	58.6507	1200	Adelante	Adelante
23	43	1000	10	-13.3236	Atrás	Atrás	20.0939	100	Adelante	Adelante	58.6728	1200	Adelante	Adelante
24	43	1000	26	-10.9998	Atrás	Atrás	37.9900	100	Adelante	Adelante	89.5745	1200	Adelante	Adelante
25	43	1000	32	-13.1839	Atrás	Atrás	41.5601	100	Adelante	Adelante	85.9659	1200	Adelante	Adelante
26	43	1000	38	-10.9114	Atrás	Atrás	41.4983	100	Adelante	Adelante	89.5665	1200	Adelante	Adelante
27	11	1900	10	-15.5905	Atrás	Atrás	20.1728	150	Adelante	Adelante	89.5798	2100	Adelante	Adelante
28	11	1900	26	-9.9682	Atrás	Atrás	37.9066	150	Adelante	Adelante	85.9711	2100	Adelante	Adelante
29	11	1900	32	-4.9897	Atrás	Atrás	41.4360	150	Adelante	Adelante	85.4864	2100	Adelante	Adelante
30	11	1900	38	-1.2274	Atrás	Atrás	41.3666	150	Adelante	Adelante	82.7119	2100	Adelante	Adelante
31	22	1900	10	-15.5906	Atrás	Atrás	20.1723	150	Adelante	Adelante	82.7061	2100	Adelante	Adelante
32	22	1900	26	-9.9683	Atrás	Atrás	37.9064	150	Adelante	Adelante	85.4902	2100	Adelante	Adelante
33	22	1900	32	-4.9898	Atrás	Atrás	41.4359	150	Adelante	Adelante	82.7157	2100	Adelante	Adelante
34	22	1900	38	-1.2275	Atrás	Atrás	41.256	150	Adelante	Adelante	78.3190	2100	Adelante	Adelante
35	43	1900	10	-15.5596	Atrás	Atrás	20.1796	150	Adelante	Adelante	78.3145	2100	Adelante	Adelante
36	43	1900	26	-9.9478	Atrás	Atrás	37.9104	150	Adelante	Adelante	76.0223	2100	Adelante	Adelante
37	43	1900	32	-4.9744	Atrás	Atrás	41.4385	150	Adelante	Adelante	78.3219	2100	Adelante	Adelante
38	43	1900	38	-1.2152	Atrás	Atrás	41.3685	150	Adelante	Adelante	76.0298	2100	Adelante	Adelante
39	11	1000	5	-8.9348	Atrás	Atrás	-75.3953	150	Adelante	Atrás	85.4806	2100	Adelante	Adelante
40	43	1000	5	-16.0087	Atrás	Atrás	41.3685	150	Adelante	Atrás	76.0268	2100	Adelante	Adelante

TABLA IX
DESTALLES DE LOS DATOS DEL SISTEMA

DATOS DEL SISTEMA								
GENERADORES Y COMPONENTES RL								
	Voltaje [V]	R1[ohm]	L1[ohm]	R2[ohm]	L2[ohm]	R3[ohm]	L3[ohm]	f [Hz]
G1	22000	0.0706	0.577	0.0706	0.577	0.0706	0.577	60
G2	975	0.0352	0.1547	0.0352	0.1547	0.0352	0.1547	
G3	975	0.0352	0.1547	0.0352	0.1547	0.0352	0.1547	
G4	22000	0.1	0.577	0.1	0.577	0.1	0.577	
DATOS DE LINEAS								
Tramo 1			Tramo 2			Tramo 3		
N.- Fase	Resistencia [ohm/km Ac]	Longitud [m]	Resistencia [ohm/km Ac]	Longitud [m]	Resistencia [ohm/km Ac]	Longitud [m]	f [Hz]	
1	0.592	2000	0.592	200	0.592	2000	60	
2	0.592		0.592		0.592			
3	0.592		0.592		0.592			
0	1.12		1.12		1.12			
DATOS DE TRANSFORMADORES								
Transformador 1					Transformador 2			
		Primario		Secundario		Primario	Secundario	
Voltaje [V]		690		22000		690	22000	
Resistencia [ohm]		0.2303		0.00188		0.2303	0.00188	
Inductancia [mH,ohm]		1.7271		0.01416		1.7271	0.01416	
Conexión		Delta		Estrella		Delta	Estrella	
COMPONENTES RL DE TRANSFORMADORES								
	R1[ohm]	L1[ohm]	R2[ohm]	L2[ohm]	R3[ohm]	L3[ohm]		
TRAFO 1	0.0352	0.1547	0.0352	0.1547	0.0352	0.1547		
TRAFO 2	0.0352	0.1547	0.0352	0.1547	0.0352	0.1547		
COMPONENTES RL DE TRAMO 2								
	R1[ohm]	L1[ohm]	R2[ohm]	L2[ohm]	R3[ohm]	L3[ohm]		
	100	0.1	40	0.1	60	0.1		

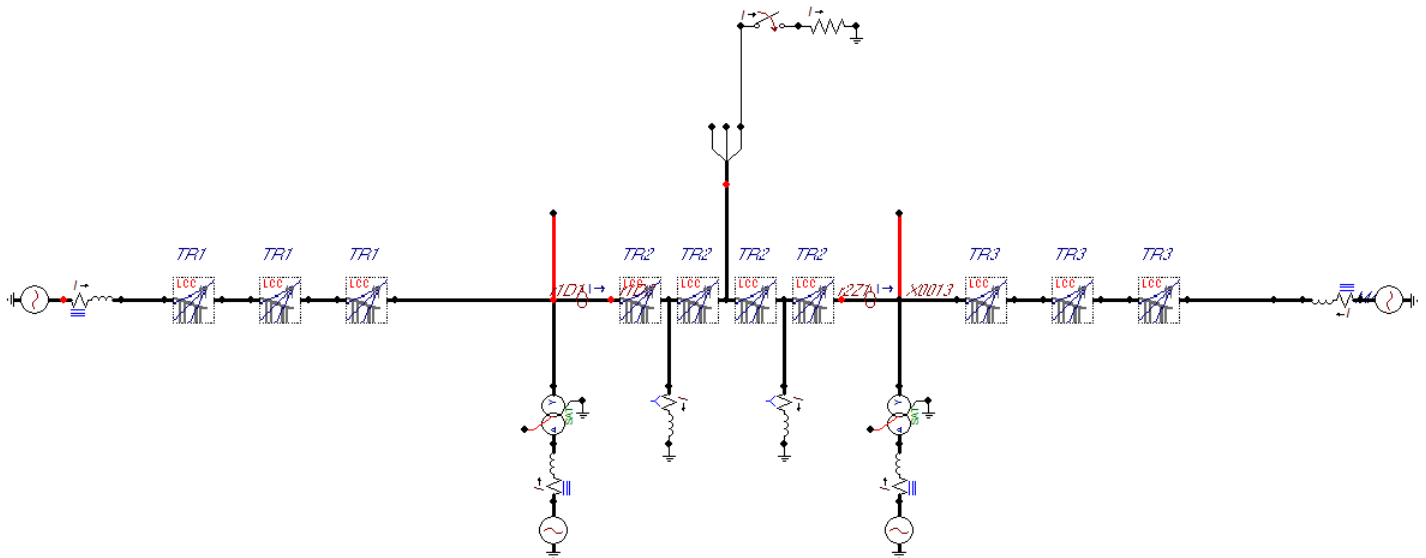


Figura 7. Representación del sistema en el programa ATP Draw