

Identificación de Parámetros de Líneas de Transmisión usando una Metodología basada en Mediciones Sincrofasoriales

Ing. Diego Orquera¹ Dr. Jaime Cepeda² Dr. Paúl Vásquez³ Ing. Aharon De la Torre⁴

^{1,3} Escuela Politécnica Nacional, EPN

E-mail: diego.orquera@epn.edu.ec; paul.vasquez@epn.edu.ec

^{2,4} Operador Nacional de Electricidad - CENACE

E-mail: jcepeda@cenace.org.ec; adltorre@cenace.org.ec

Resumen— El presente trabajo muestra el desarrollo de un aplicativo apto para calcular los parámetros de las líneas de transmisión utilizando mediciones que proporcionan las Unidades de Medición Fasorial (PMUs). Luego de un tratamiento de estas mediciones, se pueden calcular los parámetros de las líneas de transmisión con mayor exactitud y precisión. El aplicativo consta elementalmente de dos partes: la primera, la adquisición y tratamiento de sincrofasores provenientes del Sistema de Monitoreo de Área Extendida (WAMS) del Operador Nacional de Electricidad CENACE, que en esencia es un sistema basado en el uso de PMUs; y la segunda, el cálculo de los parámetros de las líneas de transmisión, que utiliza un algoritmo de mínimos cuadrados sujeto a restricciones. Finalmente, el aplicativo en su interfaz desarrollada muestra los parámetros identificados de la línea de transmisión tanto de manera gráfica como estadística, con los resultados, en este artículo se realiza la comparación con los datos almacenados en el programa PowerFactory de CENACE, herramienta utilizada para el análisis de sistemas eléctricos de potencia; de igual manera se realiza la comparación con el trabajo de otro autor, relacionado con la identificación de parámetros de líneas de transmisión, que en resumen realiza la identificación de errores en parámetros y busca alternativas de cálculo para la corrección de los parámetros errados.

Palabras clave — Identificación de Parámetros, Unidad de Medición Fasorial (PMU), Mínimos Cuadrados.

I. INTRODUCCIÓN

LOS parámetros de los elementos que constituyen el sistema de potencia y que disponen las empresas, usualmente son inexactos debido a: datos aproximados mostrados por los fabricantes o calculados por las mismas empresas, circuitos alterados sin informes de modificación, materiales deteriorados, condiciones climáticas, entre otros. En el caso particular de las líneas de transmisión, los parámetros comúnmente son calculados mediante metodologías basadas en la geometría de las torres de transmisión y la ubicación espacial de los conductores. [1]

Dichos parámetros ignoran la dependencia que existe con otras variables como la variación de la temperatura, es decir, no se consideran los cambios que se presentan con la temperatura del ambiente, las condiciones de carga, ruido en los equipos,

entre otros. Una alternativa que permite superar las limitaciones mencionadas es el uso de mediciones provenientes, por ejemplo, de Unidades de Medición Fasorial (PMUs), que estiman los fasores de voltaje y corriente, en tiempo real, a través de las cuales se pueden calcular los parámetros de las líneas de transmisión con mayor exactitud. [1]

El disponer de los parámetros, más exactos, de líneas de transmisión permitirá: mejorar la exactitud en los ajustes de relés los cuales pueden conducir al aislamiento de fallas más rápido y disminuir la probabilidad de disparo no deseado del relé; mejorar la localización y restauración del sistema frente a fallas; optimizar la modelación de las líneas de transmisión con los cálculos de flujos de potencia; determinar cuándo se ha producido una extensión de una línea de transmisión sin el informe correspondiente; mejorar la cargabilidad de las líneas de transmisión, lo que maximizaría el uso de la línea mientras se asegura la confiabilidad y estabilidad del sistema.

En la literatura existente se ha propuesto muchos métodos para determinar los parámetros de impedancia usando mediciones sincrofasoriales. Los autores de [2] proponen cuatro métodos utilizando un número determinado de ecuaciones (lineal/no lineal) y se discute su precisión cuando hay error/ruido en las mediciones de las PMUs. La referencia [3] propone utilizar el modelo completo para la identificación de parámetros, si la línea no está totalmente transpuesta y el sistema está desequilibrado. La referencia [4] propone un método que consiste en tratar la línea de transmisión como una red de dos puertos y resolver primero sus parámetros ABCD utilizando dos conjuntos de medidas tomadas bajo diferentes condiciones de carga. En [5] los parámetros de impedancia distribuida de la línea de transmisión se resuelven directamente mediante la resolución de dos ecuaciones lineales. La referencia [6] introduce un método que se basa en el enfoque de errores en mínimos cuadrados (LSE). Un enfoque extendido del filtro de Kalman se propone en [7]. La combinación de medidas SCADA y mediciones de las PMUs en diferentes intervalos de tiempo se proponen para estimar los parámetros de la línea de transmisión en [8]. Este enfoque descuida el hecho de que la impedancia de las líneas de transmisión varía en diferentes condiciones de carga y en diferentes intervalos de tiempo.

Como se señala en [2], la identificación de parámetros de líneas de transmisión utilizando PMUs es muy exigente en términos de la calidad y precisión de las mediciones. En otras palabras, incluso pequeños errores en las mediciones del fasor pueden conducir a grandes errores en los parámetros estimados de impedancia. Recientemente, se ha prestado mucha atención a los problemas de calidad de los datos de las PMUs con varios estudios dedicados a desarrollar métodos para la calibración de PMUs [9] – [12].

De acuerdo a [2] y comparado con todas las referencias mencionadas en el párrafo precedente, se determina que entre los 4 métodos presentes en [2], el método de medición múltiple utilizando regresión lineal es el ideal para la identificación de parámetros en líneas de transmisión utilizando mediciones sincrofásoriales, teoría que se sustenta en [13].

Los 4 métodos de [2] y de los cuales se desprende [13] serán detallados en la segunda sección del presente documento; en la tercera sección se presenta y se explica en detalle la metodología seleccionada para obtener los parámetros de las líneas de transmisión basados en mediciones sincrofásoriales; los resultados obtenidos con el aplicativo desarrollado en Matlab, serán mostrados en la cuarta sección, y serán comparados con los valores utilizados en las bases de datos existentes en PowerFactory de CENACE y además con los resultados obtenidos en proyectos afines al tema propuesto; por último se expondrá las principales conclusiones y recomendaciones.

II. MÉTODOS PARA IDENTIFICAR LOS PARÁMETROS DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN

Existe la posibilidad de que los parámetros de impedancia de la línea de transmisión sean más precisos mediante la identificación o cálculo directo de los parámetros a través de las mediciones de los fasores sincronizados.

En realidad, el ruido está presente en todas las mediciones. Sin embargo, las mediciones de las PMUs tienen mayor precisión que otras mediciones. Los datos de las PMUs se etiquetan en el tiempo con una precisión superior a 1 microsegundo y la precisión de magnitud es mejor que el 0.1%. A pesar de que se espera que las PMUs sean altamente precisas, no lo son en la práctica, debido a varios factores como: errores de los canales de instrumentación, desequilibrios del sistema, configuración de la red, entre otros. [14]

Debido a que se pueden encontrar datos erróneos en los conjuntos de datos de medición, algunos datos erróneos en las mediciones de sincrofases pueden eliminarse de varias formas, por ejemplo: escaneando los datos en busca de valores fuera de rango, escaneando datos inválidos o inexistentes en ciertos instantes o intervalos de tiempo, entre otras.

A. Método de Única Medición

Para líneas de transmisión, el circuito equivalente pi, mostrado en la Fig. 1, es el modelo aceptado. Los valores de fasor V_S ; I_S ; V_R e I_R representan los voltajes de envío y recepción del nodo; y corrientes de envío y recepción de los vínculos monitoreados (líneas de transmisión).

Los valores de R , jX y Y son la resistencia y reactancia en serie y la admitancia de derivación.

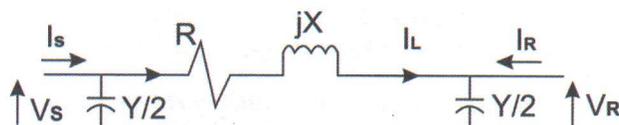


Fig. 1. Circuito Equivalente pi para una línea de transmisión

Para este circuito, a través del análisis nodal, se puede obtener las siguientes ecuaciones:

$$Z = \frac{V_S^2 - V_R^2}{I_S V_R - I_R V_S} \quad (1)$$

$$Y = 2 * \frac{I_S + I_R}{V_S + V_R} \quad (2)$$

Aplicando este método a las mediciones generadas por simulaciones (sin ruido adicional) descritas en [2], se obtienen resultados de error menores a 0.009%. Posteriormente, tanto los errores sistemáticos y el ruido aleatorio, se añadieron a las mediciones de sincrofases libres de ruido para probar la precisión de este método en condiciones ruidosas. En lugar de dar números absolutos, a los resultados se les asigna una "A" para aceptable y "F" para inaceptable. Ver la Tabla I para los resultados.

Como muestran los resultados en la Tabla I, algunas

TABLA I
DESEMPEÑO DEL MÉTODO DE ÚNICA MEDICIÓN CON ERRORES SISTEMÁTICOS Y RUIDO ALEATORIO EN LAS MEDIDAS.

		R Calculada	X Calculada	Bc Calculada
Errores Sistemáticos en	V_S	F	F	A
	V_R	F	F	A
	I_S	A	A	F
	I_R	A	A	F
Ruido Aleatorio en	V_S	F	F	A
	V_R	F	F	A
	I_S	A	A	F
	I_R	A	A	F

estimaciones de parámetros son aceptables para ciertos tipos de ruido e inaceptables para otros tipos de ruido. Por ejemplo, en la primera fila de la Tabla I, con ruido aleatorio añadido a las mediciones del voltaje de envío, la resistencia en serie y la reactancia en serie calculada serán inaceptables mientras que la susceptancia de derivación será aceptable. Esto indica que la resistencia en serie y la reactancia son muy sensibles al ruido y a los errores sistemáticos en el voltaje de envío mientras que la susceptancia de derivación no es sensible a V_S . Se pueden hacer observaciones similares para las otras filas de la Tabla I.

B. Método de Doble Medición

Los parámetros ABCD de dos puertos pueden utilizarse para representar la línea de transmisión en la forma más general. Si las PMUs en los dos terminales de la línea generan dos conjuntos diferentes (independientes) de mediciones para diferentes condiciones de carga, los parámetros ABCD pueden determinarse mediante las siguientes cuatro ecuaciones:

$$V_{S1} = A * V_{R1} + B * I_{R1} \tag{3}$$

$$I_{S1} = C * V_{R1} + D * I_{R1} \tag{4}$$

$$V_{S2} = A * V_{R2} + B * I_{R2} \tag{5}$$

$$I_{S2} = C * V_{R2} + D * I_{R2} \tag{6}$$

Una vez calculados los parámetros ABCD y eliminando las ecuaciones redundantes, los parámetros de impedancia se pueden calcular directamente usando las siguientes relaciones:

$$B = Z \tag{7}$$

$$Y = \frac{2*(A-1)}{B} \tag{8}$$

Aplicando este método a las mediciones generadas por simulaciones (sin ruido adicional) descritas en [2], se obtienen resultados de error menores a 0.003%. A continuación, se añade ruido y errores sistemáticos a las mediciones sincrofásoriales para probar la sensibilidad de este método al ruido. Se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla II:

En comparación con el método de única medición, este método funciona mucho mejor para los errores sistemáticos,

TABLA II
DESEMPEÑO DEL MÉTODO DE DOBLE MEDICIÓN CON ERRORES SISTEMÁTICOS Y RUIDO ALEATORIO EN LAS MEDIDAS.

		R Calculada	X Calculada	Bc Calculada
Errores Sistemáticos en	V _S	A	A	F
	V _R	A	A	F
	I _S	A	A	A
	I _R	A	A	A
Ruido Aleatorio en	V _S	F	F	F
	V _R	F	F	F
	I _S	A	A	A
	I _R	F	F	F

aunque todavía es muy sensible al ruido aleatorio.

La precisión del método de doble medición sobre el método de única medición sugiere que la redundancia en las mediciones puede mejorar la estimación de parámetros. En consecuencia, se han desarrollado dos métodos los cuales se describen a continuación.

C. Método de Medición Múltiple Usando Regresión Lineal

Las ecuaciones (9) y (10) son dos ecuaciones complejas con 6 variables complejas.

$$V_S = A * V_R + B * I_R \tag{9}$$

$$I_S = C * V_R + D * I_R \tag{10}$$

Desarrollando en cuatro ecuaciones reales y suponiendo que se han recogido N mediciones de las unidades de medición fasorial. Donde Re[.] e Im[.] son la parte real e imaginaria del fasor correspondiente, se define:

$$E = \begin{bmatrix} Re[V_{S1}] \\ Im[V_{S1}] \\ Re[V_{S2}] \\ Im[V_{S2}] \\ \vdots \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$H = \begin{bmatrix} Re[V_{R1}] & -Im[V_{R1}] & Re[I_{S1}] & -Im[I_{S1}] \\ Im[V_{R1}] & Re[V_{R1}] & Im[I_{S1}] & Re[I_{S1}] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Re[V_{RN}] & -Im[V_{RN}] & Re[I_{SN}] & -Im[I_{SN}] \\ Im[V_{RN}] & Re[V_{RN}] & Im[I_{SN}] & Re[I_{SN}] \end{bmatrix} \tag{12}$$

$$F = \begin{bmatrix} Re[A] \\ Im[A] \\ Re[B] \\ Im[B] \end{bmatrix} \tag{13}$$

Usando el estimador de mínimos cuadrados, donde H y E son la matriz y vector de mediciones y F el vector de resultados de los parámetros A, B, C y D, se define:

$$F = (H^T H)^{-1} H^T E \tag{14}$$

Aplicando este método a las mediciones generadas por simulaciones (sin ruido adicional) se obtienen resultados de impedancia con errores menores a 0.009%. Para probar la precisión de este método cuando existe ruido y errores sistemáticos en las mediciones, dichos errores se añadieron a las mediciones y el desempeño de los resultados se reporta en la Tabla III.

TABLA III
DESEMPEÑO DEL MÉTODO DE MEDICIÓN MÚLTIPLE USANDO REGRESIÓN LINEAL

		R Calculada	X Calculada	Bc Calculada
Errores Sistemáticos en	V _S	A	A	A
	V _R	A	A	A
	I _S	A	A	A
	I _R	A	A	A
Ruido Aleatorio en	V _S	F	A	A
	V _R	F	A	A
	I _S	A	A	A
	I _R	A	A	A

Como se indica en la Tabla III, este método funciona mejor que los dos primeros métodos descritos para errores sistemáticos, lo que significa que pueden obtenerse parámetros de impedancia precisos incluso cuando hay errores sistemáticos pequeños en las mediciones sincrofásoriales.

D. Método de Medición Múltiple usando Regresión no Lineal

* Se define F(x, θ) como una función vectorial que se compone de f₁ - f₄. Asumiendo que N muestras están disponibles, F(x, θ) se define por:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1^1(x, \theta) \\ f_2^1(x, \theta) \\ f_3^1(x, \theta) \\ f_4^1(x, \theta) \\ \vdots \\ f_1^N(x, \theta) \\ f_2^N(x, \theta) \\ f_3^N(x, \theta) \\ f_4^N(x, \theta) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1^1 \\ \varepsilon_2^1 \\ \varepsilon_3^1 \\ \varepsilon_4^1 \\ \vdots \\ \varepsilon_1^N \\ \varepsilon_2^N \\ \varepsilon_3^N \\ \varepsilon_4^N \end{bmatrix} = F(x, \theta) + \varepsilon \quad (15)$$

Donde:

$x = [x_1, x_2, \dots, x_7, x_8]$ el vector de las mediciones
 $\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]$, representa el vector de los parámetros desconocidos: R, X y Bc, respectivamente.

ε es un componente de error aleatorio que se supone que tiene una varianza media cero y desconocida. Para resolver (15) en un sentido de mínimos cuadrados, se utiliza la técnica de regresión no lineal. Las soluciones se pueden obtener siguiendo un proceso iterativo. Los resultados tienen errores menores a 0.009%.

En el caso ideal con mediciones perfectas, este método genera parámetros de impedancia precisos. Cuando se presentan errores sistemáticos y ruido aleatorio en las mediciones, como se muestra en la Tabla IV, las estimaciones de reactancia en serie son satisfactorias. Las estimaciones de resistencia en serie y de susceptancia de derivación son inaceptables cuando hay ruido aleatorio, es decir, estos parámetros son sensibles al ruido aleatorio en las mediciones.

TABLA IV

DESEMPEÑO DEL MÉTODO DE MÉTODO DE MEDICIÓN MÚLTIPLE USANDO REGRESIÓN NO LINEAL

		R Calculada	X Calculada	Bc Calculada
Errores Sistemáticos en	V_s	A	A	A
	V_r	A	A	A
	I_s	A	A	A
	I_r	A	A	A
Ruido Aleatorio en	V_s	F	A	F
	V_r	F	A	F
	I_s	A	A	F
	I_r	A	A	F

Al igual que con el método de regresión lineal, la precisión de este método es una función del nivel de redundancia en las mediciones. A medida que aumenta el número de muestras, se obtiene una reactancia en serie calculada precisa cuando hay ruido aleatorio en las mediciones del voltaje en el nodo de envío.

III. SELECCIÓN DEL MÉTODO MÁS ADECUADO PARA EL CÁLCULO DE PARÁMETROS

Entre los cuatro métodos presentados en la sección 2 de este documento, el método de medición múltiple usando la regresión lineal es superior y se selecciona por los siguientes motivos:

Utiliza ecuaciones complejas para los fasores de voltaje y corriente, de tal manera que el proceso de identificación de parámetros de líneas de transmisión utiliza mayor información como argumentos de entrada.

Este método tiene una precisión aceptable al calcular la reactancia en serie y la susceptancia de derivación a partir de mediciones de fasores que tienen ruido aleatorio y errores sistemáticos presentes. Sin embargo, la resistencia en serie calculada sigue siendo muy sensible al ruido aleatorio, lo que significa que cuando exista ruido aleatorio en los fasores de voltaje hará que la resistencia en serie esté fuera del rango aceptable.

Por último, gracias a la Tabla III de desempeño mostrada en el método de medición múltiple usando regresión lineal se determina que existe menor cantidad de valores inaceptables, comparados con los demás métodos y tablas. A continuación se detalla el método empleado.

A. Ecuaciones de Medición

Para obtener una relación lineal entre las mediciones del fasor y las incógnitas, se utilizan los parámetros ABCD de dos puertos. Los parámetros ABCD se identifican puesto que la línea es tratada como dos puntos de red y se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} V^S \\ I^S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V^R \\ -I^R \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} V^S \\ I^S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A * V^R - B * I^R \\ C * V^R - D * I^R \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$V^S = AV^R - BI^R \quad (18)$$

$$I^S = CV^R - DI^R \quad (19)$$

El circuito equivalente pi de una línea de transmisión se muestra en la Fig. 1, donde V^S ; I^S ; V^R e I^R representan las mediciones del fasor de voltaje y corriente en ambos extremos de la línea mientras que $R+jX$ y Y son la impedancia en serie y la admitancia en derivación respectivamente.

A continuación se desprenden las siguientes ecuaciones considerando que $(\cdot)_r$ y $(\cdot)_i$ son la parte real e imaginaria de la correspondiente variable.

$$V_r^S + V_i^S = (A_r + A_i)(V_r^R + V_i^R) + (-B_r - B_i)(I_r^R + I_i^R) \quad (20)$$

$$I_r^S + I_i^S = (C_r + C_i)(V_r^R + V_i^R) + (-D_r - D_i)(I_r^R + I_i^R) \quad (21)$$

Resolviendo y separando las ecuaciones (20) y (21), en la parte real e imaginaria se tiene:

$$V_r^S = A_r V_r^R - A_i V_i^R - B_r I_r^R + B_i I_i^R \quad (22)$$

$$V_i^S = A_r V_i^R + A_i V_r^R - B_r I_i^R - B_i I_r^R \quad (23)$$

$$I_r^S = C_r V_r^R - C_i V_i^R - D_r I_r^R + D_i I_i^R \quad (24)$$

$$I_i^S = C_r V_i^R + C_i V_r^R - D_r I_i^R - D_i I_r^R \quad (25)$$

Asumiendo que se han obtenido N conjuntos de mediciones, en conjunto las $4 \cdot N$ ecuaciones pueden escribirse como la siguiente matriz:

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ (V_r^S)^n \\ (V_i^S)^n \\ (I_r^S)^n \\ (I_i^S)^n \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots \\ (V_r^R)^n & -(V_i^R)^n & -(I_r^R)^n & (I_i^R)^n \\ (V_i^R)^n & (V_r^R)^n & -(I_i^R)^n & -(I_r^R)^n \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \vdots & & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ (V_r^R)^n & -(V_i^R)^n & -(I_r^R) & (I_i^R)^n \\ (V_i^R)^n & (V_r^R)^n & -(I_i^R)^n & -(I_r^R)^n \\ \vdots & & & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_r \\ A_i \\ B_r \\ B_i \\ C_r \\ C_i \\ D_r \\ D_i \end{bmatrix} \quad (26)$$

Donde $(\cdot)^n$ se refiere a la cantidad correspondiente en el n -ésimo conjunto de mediciones. Considerando el ruido en la medición, la ecuación (26) se puede escribir simplemente como:

$$z = H\beta \quad (27)$$

Donde: z y H son el vector y la matriz de medición, respectivamente; β el vector desconocido compuesto de los parámetros ABCD. Los parámetros de impedancia de las líneas de transmisión y los parámetros ABCD están relacionados por las siguientes ecuaciones:

De la Fig. 1 aplicando leyes de voltaje y corriente se obtiene:

$$V^S = V^R + Z I_L \quad (28)$$

$$I_L = -I^R + \frac{Y}{2} V^R \quad (29)$$

$$I^S = I_L + \frac{Y}{2} V^S \quad (30)$$

Reemplazando la ecuación (29) en la ecuación (28) se tiene:

$$V^S = \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) V^R - Z I^R \quad (31)$$

A continuación reemplazando las ecuaciones (29) y (31) en la ecuación (30) se tiene:

$$I^S = Y \left(1 + \frac{ZY}{4}\right) V^R - \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) I^R \quad (32)$$

Colocando en forma matricial las Ecuaciones (31) y (32) se obtiene los parámetros ABCD así:

$$\begin{bmatrix} V^S \\ I^S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) & Z \\ Y \left(1 + \frac{ZY}{4}\right) & \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V^R \\ -I^R \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$A = D = 1 + \frac{ZY}{2} = 1 + \frac{j}{2} B_c (R + jX) \quad (34)$$

$$B = Z = R + jX \quad (35)$$

$$C = Y \left(1 + \frac{ZY}{4}\right) = jB_c \left[1 + \frac{j}{4} B_c (R + jX)\right] \quad (36)$$

Un punto que se debe tomar en cuenta es que si se pueden considerar las restricciones físicas en el proceso de identificación de parámetros, la precisión de la estimación de parámetros puede mejorarse mucho.

En primer lugar, a partir de la ecuación (34), se puede identificar una restricción de igualdad:

$$A_r = D_r \quad (37)$$

$$A_i = D_i \quad (38)$$

O expresando en forma matricial se tiene:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \beta = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (39)$$

Escribiendo la ecuación anterior simplemente como:

$$A_{eq} \cdot \beta = 0 \quad (40)$$

Los verdaderos parámetros de la línea se mantienen dentro de una cierta banda de error comparados con los calculados bajo diferentes condiciones de operación del sistema. Para el presente trabajo se utilizaron como valores referentes los parámetros almacenados en las bases de datos del programa PowerFactory del Operador Nacional de Electricidad CENACE.

Los parámetros de línea almacenados en la base de datos pueden utilizarse como restricciones de desigualdad adicionales para los parámetros de impedancia. Suponiendo que R^{EMS} , X^{EMS} y B_c^{EMS} son los parámetros de la línea de transmisión almacenados en la base de datos, se pueden configurar las siguientes restricciones:

$$0 \leq (1 - \alpha_R) R^{EMS} \leq R \leq (1 + \alpha_R) R^{EMS} \quad (41)$$

$$0 \leq (1 - \alpha_X) X^{EMS} \leq X \leq (1 + \alpha_X) X^{EMS} \quad (42)$$

$$0 \leq (1 - \alpha_{B_c}) B_c^{EMS} \leq B_c \leq (1 + \alpha_{B_c}) B_c^{EMS} \quad (43)$$

$$R < X \quad (44)$$

Donde: α_R , α_X , α_{B_c} , son constantes que definen las bandas de error de los parámetros de las líneas de transmisión. Las Ecuaciones (34) a (36) pueden ser expresadas como ecuaciones reales e imaginarias como se muestra a continuación:

$$A_r = D_r = 1 - \frac{B_c}{2} X \quad (45)$$

$$A_i = D_i = \frac{B_c}{2} R \quad (46)$$

$$B_r = R \quad (47)$$

$$B_i = X \quad (48)$$

$$C_r = Y \left(1 + \frac{ZY}{4}\right) = jB_c \left[1 + \frac{j}{4} B_c (R + jX)\right] \quad (49)$$

$$C_i = Y \left(1 + \frac{ZY}{4}\right) = jB_c \left[1 + \frac{j}{4} B_c (R + jX)\right] \quad (50)$$

Combinando las ecuaciones (41) a (50), es fácil obtener los límites inferior y superior, de los parámetros ABCD de tal manera que:

$$lb \leq \beta \leq ub \quad (51)$$

Adicionalmente, se puede obtener otra restricción de desigualdad basada en la ecuación (47) y (48):

$$A\beta < 0 \Leftrightarrow [0 \ 0 \ 1 \ -1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \cdot \beta < 0 \quad (52)$$

Finalmente, el problema de identificación de parámetros de líneas de transmisión se expresa como un problema de mínimos cuadrados sujeto a restricciones, como se muestra a continuación:

$$\min_{\beta} \frac{1}{2} \|H\beta - z\|_2^2 \quad \text{s.t.} \quad \begin{cases} A\beta < 0 \\ A_{eq}\beta = 0 \\ lb \leq \beta \leq ub \end{cases} \quad (53)$$

IV. IMPLEMENTACIÓN

La gran cantidad de información satura rápidamente la capacidad de almacenamiento, razón por la cual posee una base de datos circular de aproximadamente 30 días, luego de lo cual se sobrescribe el último dato obtenido en el primer dato guardado.

Para la identificación de parámetros de líneas de transmisión utilizando mediciones sincrofásicas, el proceso de identificación de parámetros consta de dos etapas como se muestra en la Fig. 2.



Fig. 2. Proceso de identificación de Parámetros

El marco de implementación del aplicativo o el diagrama de flujo, específicamente el algoritmo de MATLAB se muestra en la Fig. 3.

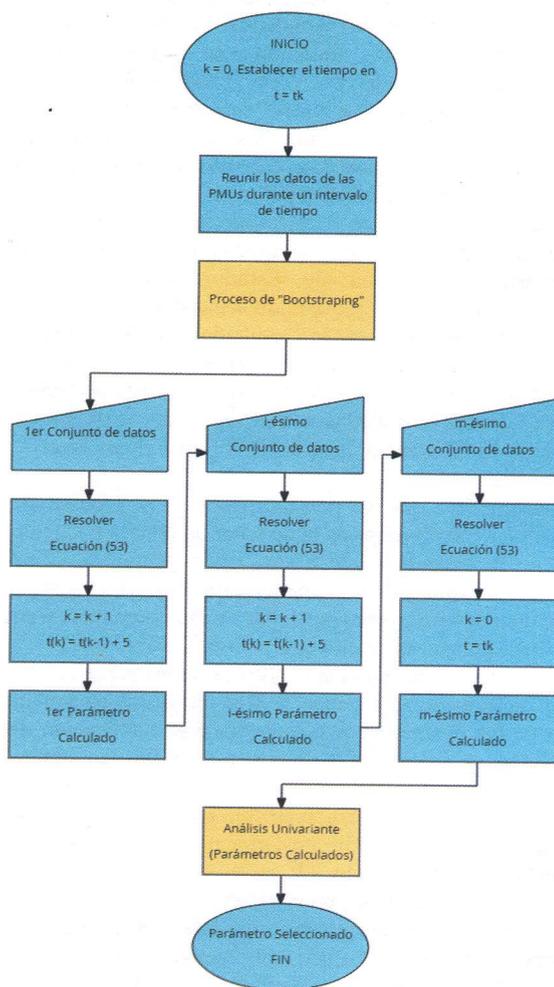


Fig. 3. Diagrama de Flujo Aplicativo MATLAB

Para el tratamiento de datos se desarrolló una macro denominada “Filtro_PLIT”. Esta macro sirve para cargar información referente a fasores de voltaje y corriente de líneas de transmisión de las que se requiera calcular los parámetros.

Es decir, para cada PMU debe existir el siguiente conjunto de datos en el orden mostrado:

- Amplitud de Voltaje
- Ángulo del Voltaje
- Amplitud de Corriente
- Ángulo de la Corriente

V. RESULTADOS

Para la comparación de los resultados obtenidos con los datos almacenados, es decir, los valores de la Tabla I, se tomó un proceso de cálculo durante el período de 1 hora tanto para la línea MOLINO – PASCUALES como para la línea SANTA ROSA – TOTORAS.

A. Comparación Línea Molino Pascuales

A continuación en las Tablas V – VII, se detalla los valores calculados, los almacenados, el error relativo y la desviación estándar.

TABLA V
COMPARACIÓN ENTRE LOS DATOS ALMACENADOS Y CALCULADOS MOLINO – PASCUALES (MAÑANA)

06:00 AM – 07:00 AM				
Parámetro	Base de Datos PF	Calculado	% Error Relativo	Desv. Est.
Resistencia (Ohms)	11.133	11.352	1.964	0.376
Reactancia (Ohms)	89.648	87.802	2.058	0.371
Susceptancia (Siemens)	6.65E-4	6.32E-04	4.914	3.54E-4

TABLA VI
COMPARACIÓN ENTRE LOS DATOS ALMACENADOS Y CALCULADOS MOLINO – PASCUALES (MEDIO DÍA)

10:00 AM – 11:00 AM				
Parámetro	Base de Datos PF	Calculado	% Error Relativo	Desv. Est.
Resistencia (Ohms)	11.133	11.394	2.341	0.344
Reactancia (Ohms)	89.648	87.847	2.009	0.363
Susceptancia (Siemens)	6.65E-4	6.28 E-4	5.508	2.85E-4

TABLA VII
COMPARACIÓN ENTRE LOS DATOS ALMACENADOS Y CALCULADOS MOLINO – PASCUALES (TARDE - NOCHE)

06:00 PM – 07:00 PM				
Parámetro	Base de Datos PF	Calculado	% Error Relativo	Desv. Est.
Resistencia (Ohms)	11.1333	11.3824	2.2368	0.3666
Reactancia (Ohms)	89.6483	87.8275	2.0310	0.2495
Susceptancia (Siemens)	6.65E-04	6.28E-04	5.4676	2.96E-4

Como se puede observar en las Tablas V – VII, la resistencia y reactancia serie calculada difiere de la base de datos en un rango de 1.9-2.3%, mientras que la susceptancia en derivación difiere de la base de datos en un rango de 4.9-5.4%. Estas diferencias podrían deberse a las condiciones de carga

específicas en el momento en que se llevó a cabo este estudio. Por último, los valores esperados son aceptables, puesto que en las tablas completas, es decir durante las 24 horas, se sigue una variación de los tres parámetros identificados de la misma forma que con una curva de carga típica.

B. Comparación Línea Santa Rosa Totoras

De igual manera que con la línea Molino Pascuales se realizó el estudio para la Línea Santa Rosa Totoras como se puede notar en las Tablas VIII – X, y se determinó que los parámetros de impedancia no varían considerablemente durante el período determinado. Además, la impedancia serie calculada difiere de la base de datos en un rango de 3-4%, mientras que la susceptancia en derivación difiere de la base de datos en un rango de 9-10%. Estas diferencias podrían deberse a las condiciones de carga específicas en el momento en que se llevó a cabo este estudio y también a los valores relativamente pequeños, sobre todo en la susceptancia en derivación.

TABLA VIII
COMPARACIÓN ENTRE LOS DATOS ALMACENADOS Y CALCULADOS SANTA ROSA – TOTORAS (MAÑANA)

06:00 AM – 07:00 AM				
Parámetro	Base de Datos PF	Calculado	% Error Relativo	Desv. Est.
Resistencia (Ohms)	6.537	6.805	4.101	0.471
Reactancia (Ohms)	54.022	51.709	4.281	0.347
Susceptancia (Siemens)	3.75E-4	3.39E-4	9.600	3.94E-5

TABLA IX
COMPARACIÓN ENTRE LOS DATOS ALMACENADOS Y CALCULADOS SANTA ROSA – TOTORAS (MEDIO DÍA)

10:00 AM – 11:00 AM				
Parámetro	Base de Datos PF	Calculado	% Error Relativo	Desv. Est.
Resistencia (Ohms)	6.537	6.755	3.332	0.454
Reactancia (Ohms)	54.022	51.903	3.922	0.285
Susceptancia (Siemens)	3.75E-4	3.41E-4	9.067	4.26E-5

TABLA X
COMPARACIÓN ENTRE LOS DATOS ALMACENADOS Y CALCULADOS SANTA ROSA – TOTORAS (TARDE - NOCHE)

06:00 PM – 07:00 PM				
Parámetro	Base de Datos PF	Calculado	% Error Relativo	Desv. Est.
Resistencia (Ohms)	6.537	6.846	4.731	0.427
Reactancia (Ohms)	54.022	52.309	3.171	0.290
Susceptancia (Siemens)	3.75E-4	3.37E-4	10.08	3.44E-5

C. Comparación Línea Molino Pascuales con los valores identificados en [15]

Para la resistencia, se pudo observar que el error obtenido no superó el 6% para las 24 horas analizadas, para la reactancia, se pudo ver que el error obtenido no superó el 1% para las 24 horas analizadas y para la susceptancia, se pudo notar que el error obtenido supera el 10% para las 24 horas analizadas, las

variaciones que existen elevan el error considerablemente, además el error podría disminuir si se ampliara los puntos decimales de los datos obtenidos en [15].

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De los métodos existentes para el cálculo de parámetros de líneas de transmisión empleando mediciones sincrofásiales, se determina que el método de medición múltiple usando la regresión lineal es el más acertado para la identificación de parámetros de líneas de transmisión, este método tiene un desempeño tolerable cuando se calcula la reactancia serie y la susceptancia en derivación utilizando las mediciones sincrofásiales cuando existe ruido aleatorio y errores sistemáticos.

Se registró que si las restricciones, propias del algoritmo de mínimos cuadrados sujeto a restricciones, se asocian en el proceso de identificación de parámetros, la exactitud de los parámetros puede ser mejorada en gran manera. Posteriormente, el criterio de credibilidad a la hora de seleccionar los parámetros se puede determinar mediante el análisis univariante que muestra las variaciones de los parámetros identificados alrededor del valor calculado o a su vez a través de los datos almacenados.

Los resultados que entrega el aplicativo, sirven para mejorar los estudios de planeamiento en aplicaciones como e-PSR (Sistema para la Gestión de Estudios Energéticos) y PowerFactory, además de estudios de seguridad y expansión. También, se puede considerar los resultados para los estudios mencionados porque gracias al proceso de identificación de parámetros realizado y a las comparaciones entre métodos, existen variaciones vinculadas a una curva de carga típica, sobre todo en la resistencia durante el día, con rangos de error menores al 5%.

El principal reto que se presenta durante el proceso de identificación de parámetros es el de tener un continuo cálculo de mediciones sincrofásiales, pero en la práctica esto no siempre resulta cierto, ya que siempre existen variaciones en los datos debido a desconexiones por fallas, mantenimientos en las líneas de transmisión, condiciones climáticas, entre otras.

Se recomienda actualizar el aplicativo continuamente con las líneas de transmisión que tienen PMUs instaladas en ambos extremos de las mismas ya que posterior a la finalización de este proyecto se instalaron y habilitaron PMUs en ambos extremos de varias líneas del Sistema Nacional Interconectado.

Finalmente, gracias al trabajo realizado en este documento se recomienda realizar un estudio posterior para la identificación de parámetros considerando el resto de impedancias de secuencia, es decir, negativa y cero, de las líneas de transmisión, a fin de extender y tener un aplicativo aún más robusto. De igual forma se puede considerar realizar un tratamiento más profundo a las mediciones calculadas por las PMUs antes de ingresarlas al aplicativo desarrollado.

REFERENCIAS

- [1] C. Borda, (2009), Desarrollo de un algoritmo de identificación de parámetros de líneas de transmisión y de la posición del cambiador de tomas (taps), usando técnicas de estimación de estado y mediciones fasoriales sincronizadas. Bogotá, Colombia.

- [2] D. Shi, D. J. Tylavsky, N. Logic, y K. Koellner. (2008). "Identification of short transmission-line parameters from synchrophasor measurements". 40th North American Power Symposium. IEEE, pp. 1-8.
- [3] D. Shi, D. J. Tylavsky, K. M. Koellner, N. Logic, y D. E. Wheeler. (2011). "Transmission line parameter identification using PMU measurements". European Transactions on Electrical Power, vol. 21, no. 4, pp. 1574-1588.
- [4] A. Murphy, D. Mah, R. Wilson, y G. Zevenbergen. (1999). "Calculation of transmission line parameters from synchronized measurements". Electric Machines & Power Systems, vol. 27, no. 12, pp. 1269-1278.
- [5] M. Wang, J. Bao, X. Qi, y Z. Zhang. (2010) "Online estimation of transmission line parameters based on PMU measurements". Automation of Electric Power Systems, vol. 34, no. 1, pp. 25-31.
- [6] J. Lu y L. Zhang. (2012). "Line parameter identification algorithm based on PMU measurements," Power System and Clean Energy, vol. 28, no. 11, pp. 25-31.
- [7] E. Janecek, P. Hering, P. Janecek, y A. Popelka. (2011). "Transmission line identification using PMUs". 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering, pp. 1-4.
- [8] Q. Li, F. Xiang, W. Yan, J. Lu, J. Yu, J. Chen, y S. Li. (2011). "An approach to estimate parameters of single transmission line based on multi interval information measured by SCADA and Phasor measurement units". Power System Technology, vol. 35, no. 2, pp. 105-109.
- [9] D. Shi, D. J. Tylavsky, y N. Logic. (2012) "An adaptive method for detection and correction of errors in PMU measurements," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 3, no. 4, pp. 1575-1583.
- [10] Q. Zhang, V. Vittal, G. T. Heydt, N. Logic, y S. Sturgill. (2011) "The integrated calibration of synchronized phasor measurement data in power transmission systems," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 26, no. 4, pp. 2573-2581.
- [11] T. Bi, H. Liu, J. Wu, y Q. Yang. (2010) "On-line assessment on voltage consistency and frequency consistency of PMU measurement under steady state," Automation of Electric Power Systems, vol. 34, no. 21, pp. 21-26.
- [12] M. Zhou, V. Centeno, J. S. Thorp, y A. G. Phadke. (2012) "Calibrating instrument transformers with phasor measurements," Electric Power Components and Systems, vol. 40, no. 14, pp. 1605-1620.
- [13] C. Jing, C. Jones, D. Shi, H. Zhao, X. Zhao, y H. Zhou. (2015) "On-Line PMU-Based Transmission Line Parameter Identification," CSEE JOURNAL OF POWER AND ENERGY SYSTEMS, VOL. 1, NO. 2.
- [14] H. Huang. (2007). "Synchrophasor Measurement Accuracy Characterization," North American Synchrophasor Initiative Performance & Standards Task Team.
- [15] M. Farinango. (2015). "Estimación paramétrica de sistemas eléctricos de potencia para modelos de tiempo real y fuera de línea," Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Septiembre de 2015.



Diego Orquera, nació en la ciudad de Quito, Ecuador. Egresado de la carrera de Ingeniería Eléctrica en la Escuela Politécnica Nacional en Quito en 2014. Finalizó su proyecto de titulación en 2017 para obtener el título de Ingeniero Eléctrico. Sus áreas de interés son: análisis, operación y control de Sistemas Eléctricos de Potencia y planeamiento de generación y transmisión de energía eléctrica.



Jaime Cepeda, nació en 1981 en Toacazo, Latacunga, Ecuador. Obtuvo su título de ingeniero eléctrico, con los más altos honores (Summa Cum Laude), en 2005 de la Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. Entre 2009 y 2013 estudió su Ph.D. en el Instituto de Energía Eléctrica de la Universidad Nacional de San Juan,

San Juan, Argentina, consiguiendo el grado de Doctor en Ingeniería Eléctrica, con los más altos honores (Sobresaliente), en diciembre de 2013. Su tesis de doctorado fue galardonada con el Primer Lugar del Premio Domingo Faustino Sarmiento 2014 por ser el mejor trabajo de investigación de la Provincia de San Juan, Argentina. En 2015 recibió el Premio Ecuatorianos Innovadores menores de 35 del Massachusetts Institute of Technology. Actualmente se desempeña como Subgerente Nacional de Investigación y Desarrollo del Operador Nacional de Electricidad CENACE y colabora como Profesor del Doctorado en Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional. Es miembro voluntario de IEEE-PES, siendo actualmente el Chair del Capítulo Ecuador. Sus áreas de investigación se enfocan en el desarrollo de smart grids, la tecnología de medición sincrofasorial, la evaluación de la seguridad del sistema eléctrico de potencia en tiempo real, el control del sistema y la aplicación de técnicas de inteligencia computacional en los sistemas de potencia.



Paúl Vásquez, Ingeniero Eléctrico "Escuela Politécnica Nacional," Quito, 2001. Trabajó para Movistar encargado del área de planificación 2003-2004. Se graduó de doctor en ingeniería eléctrica en la Universidad Nacional de San Juan, Argentina-2009. Colaboró como investigador invitado durante un año, 2008-2009, en el Instituto de Energía

Eléctrica (LENA) de la Universidad Otto-von-Guericke en Magdeburg, Alemania. Actualmente, es profesor de pregrado y posgrado en la Escuela Politécnica Nacional, EPN. Sus áreas de interés son: diseño y planificación de sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica, técnicas de optimización, modelación de demanda e incertidumbres y técnicas de manejo de riesgos.



Aharon De La Torre, Recibió el título de Ingeniero Eléctrico en 2013, entre 2012 y 2013 trabajó en el Área de Sistemas de Tiempo Real del CENACE, en la implementación del Sistema de Monitoreo de Área Extendida - WAMS del S.N.I., entre 2013 y 2015 trabajó en el Área de Análisis de la Operación en la Dirección de Operaciones del CENACE, encargado del desarrollo y actualización de los procedimientos para la inclusión de la información del sistema WAMS en los procesos del área. Actualmente colabora en la Subgerencia de Investigación y Desarrollo del CENACE y sus áreas de interés incluyen los sistemas WAMS y el desarrollo de Smart Grids.