

# Ubicación Óptima de Unidades de Medición Sincrofasoriales PMU's para mejorar la Observabilidad de un Sistema Eléctrico de Potencia

D. Jiménez<sup>1</sup>

W. Vargas<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Escuela Politécnica Nacional, EPN

E-mail: davidjimenez.01@epn.edu.ec

<sup>2</sup>CELEC EP Transelectric

E-mail: walter.vargas@celec.gob.ec

## Resumen

En este artículo se analizará la ubicación óptima de las unidades de medición sincrofasoriales (PMU's) en los sistemas eléctricos de potencia considerando la existencia de medidas convencionales o solamente el uso de PMU's con el objetivo de hacerlos completamente observables. Las PMU's tienen aplicaciones en la estimación de estado en condiciones normales de operación, y detección de fallas, medición y control en condiciones anormales, en el trabajo se analizará específicamente para condiciones normales de operación. Los sistemas IEEE 14, 30, 57, 118 y el SNI (Sistema Nacional Interconectado Ecuatoriano) serán probados en la realización de este trabajo. Para plantear el problema de la ubicación óptima se procedió a analizar los datos disponibles de los sistemas, como son sus topologías, mediciones convencionales, así como el número y ubicación de las barras de inyección cero. Dos métodos de optimización serán utilizados para la solución del problema, en primera instancia la función propia del programador matemático MatLab llamada bintprog, y en segunda el algoritmo heurístico de optimización binaria por enjambre de partículas (BPSO) desarrollado por los autores.

**Palabras clave**— Medición sincrofasorial, observabilidad, sistemas eléctricos de potencia, métodos de optimización, BPSO.

## Abstract

In this paper the optimal location of sincrofasoriales measurement units (PMU's) will be analyzed in electric power systems considering the existence of conventional measures or the use of PMU's only in order to make them fully observable. The PMU's have applications in the estimation of state under normal operation and fault detection, measurement and control in abnormal conditions, work was specifically analyzed for normal operating conditions. The IEEE 14, 30, 57, 118 and the SNI (Ecuadorian National Interconnected System) systems will be tested in carrying out this work. To pose the problem of the optimal location we proceeded to analyze data systems available, as are their topologies, conventional measurements as well as the number and location of bus injection zero. Two optimization methods will be used for solving the problem in the first instance the proper function of MatLab programmer mathematician called bintprog, and second heuristic algorithm binary particle swarm optimization (BPSO) developed by the authors.

**Index terms**— Sincrofasorial measurement, observability, power systems, optimization methods BPSO.

Recibido: 13-10-2014, Aprobado tras revisión: 24-12-2015.

Forma sugerida de citación: Jiménez D. y Vargas W. (2015). "Ubicación Óptima de Unidades de Medición Sincrofasoriales PMU's para mejorar la Observabilidad de un Sistema Eléctrico de Potencia". Revista Técnica "energía". N° 12, Pp. 331-344.

ISSN 1390-5074.

## 1. INTRODUCCIÓN

La utilización de unidades de medición sincrofasorial tiene un costo de inversión, es por este motivo que debemos obtener el mínimo de PMU's a ser instalados para mejorar la observabilidad de los sistemas. Para determinar los puntos óptimos de ubicación es necesario mejorar la investigación de métodos matemáticos y computacionales, por ese motivo se recurre a los algoritmos heurísticos.

Las PMU's son consideradas como una de las herramientas de medición prometedora para sistemas eléctricos de potencia. Suministran voltajes de secuencia positiva y medidas de corriente sincronizadas con una precisión de microsegundos gracias a la disponibilidad del Sistema de Posicionamiento Global (GPS), y los algoritmos de procesamiento de datos de la muestra.

En este trabajo se plantea el problema de optimización en el cual se considera dónde y cuántas unidades de medición sincrofasoriales se necesitan, con el objetivo de minimizar costos de inversión aumentando la redundancia de la información, mejorando la observabilidad de los sistemas eléctricos de potencia. En el problema se considera que los costos de instalación de los PMU's en las barras de los sistemas eléctricos de potencia son los mismos.

Utilizando el paquete computacional MatLab y sus herramientas básicas, se resolverá el problema de minimización de instalación de PMU's, y posteriormente comparar los resultados obtenidos por el software desarrollado con otros trabajos publicados sobre este tema.

## 2. UNIDADES DE MEDICIÓN SINCROFASORIALES PMU's

Las unidades de medición sincrofasoriales son un recurso tecnológico que brinda con gran precisión la observación del estado dinámico de los sistemas eléctricos de potencia. Mediante los avances tecnológicos e investigaciones las PMU's permiten la obtención de magnitudes y ángulos de los voltajes y corrientes de forma sincronizada.

### 2.1. Estructura Básica de una PMU

Las unidades de medición sincrofasoriales son equipos electrónicos capaces de estimar

la representación fasorial de las componentes fundamentales de las ondas de voltaje y de corriente basándose en un punto de referencia absoluta proporcionada por el sistema de posicionamiento global (GPS). La unidad de medición sincrofasorial PMU está compuesta integralmente como se visualiza en la Fig. 1:

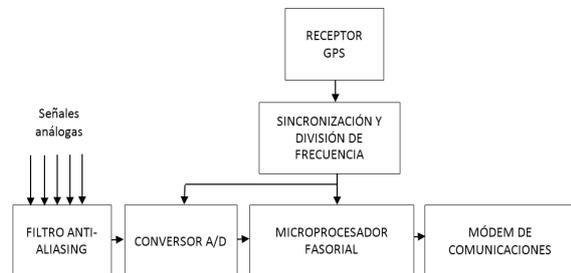


Figura 1: Estructura básica de una PMU

La unidad de medición sincrofasorial es el elemento en el cual está basado el sistema de medición fasorial. La PMU adquiere los datos de los bobinados secundarios de los transformadores de potencial y de corriente, los procesa y obtiene los fasores de voltajes y corrientes. Luego, estos fasores son enviados al concentrador de datos. Las PMU miden las tres fases de voltaje y corriente (y todas las armónicas) relativas a la señal en tiempo de un pulso por minuto, sincronizadas a un microsegundo por el *Universal Time Coordinated* (UTC) en cualquier parte del mundo [1].

Una PMU consta de un receptor de GPS, el cual le proporciona una señal de un pulso por segundo y la etiqueta de tiempo, un filtro antialiasing, un conversor análogo-digital, un microprocesador y un sistema de adquisición de datos. Ya que constantemente se hace el muestreo, se pueden calcular los fasores de una forma recursiva. El sistema GPS proporciona el pulso para la sincronización, y además etiqueta los fasores obtenidos con el tiempo en que se hizo la adquisición del primer dato en la ventana de tiempo. [1]

El llamado filtro antialiasing es el encargado de filtrar las frecuencias superiores a la frecuencia de muestreo, con la finalidad de evitar que las mismas sean digitalizadas.

El sistema GPS transmite una señal de un pulso por segundo de forma continua, señal que sincroniza todas las unidades para que empiecen su proceso de adquisición de datos y procesamiento. En cada unidad de medición sincrofasorial, la señal de un pulso por segundo es dividida por el oscilador PLL

(Phase-Locked Loop) el cual realiza un muestreo de las señales analógicas de voltaje y corrientes que llegan de los TC's y TP's. Después de la etapa de conversión analógica/digital, el microprocesador calcula los fasores de frecuencia fundamental de cada una de las fases tanto en voltajes y corrientes con el proceso matemático de la transformada discreta de Fourier (DFT). Los valores obtenidos por el microprocesador están sincronizados, es decir tienen la misma referencia de tiempo y se pueden utilizar para conocer el estado real del sistema en un determinado instante. [1]

## 2.2. Concentrador de Datos PDC

El concentrador de datos o PDC (*Phasor Data Concentrator*) es el elemento encargado de recibir y concentrar los datos de fasores que emiten las PMU's para que puedan ser analizados en tiempo real o sean almacenados para el uso en muchas aplicaciones. Estos PDC están colocados en un área de control determinada, haciendo que pueda comunicarse con otros PDC's ubicados en otras áreas [1]. En la Figura 2 se presenta un gráfico que ilustra la función principal del concentrador de datos [1].

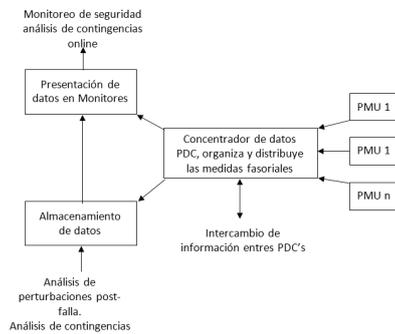


Figura 2: Función de un concentrador de datos PDC

## 3. OBSERVABILIDAD

La observabilidad de un Sistema Eléctrico de Potencia se refiere al hecho de que los conjuntos de medición y su distribución, son suficientes para resolver el estado actual de los Sistemas [2].

La colocación de PMU's en todas las barras obviamente hará a un sistema eléctrico de potencia completamente observable, entregando medidas en tiempo real, sin embargo esto resultaría muy redundante además de costoso, haciendo necesario utilizar conceptos de observabilidad para reducir el número de unidades de medición sincrofatorias.

Una PMU en una barra proporciona fasores de voltaje y de corrientes con todas las líneas conectadas a la barra.

Si se conoce el fasor voltaje en una barra se puede calcular el fasor voltaje en la barra vecina con las ecuaciones (1, 2, 3), simplemente aplicando el concepto de caída de voltaje en una línea. Esto configura la primera regla de observabilidad, que todas las barras conectadas a una barra directamente observada, son observables y viceversa, llamándose 'medidas directas' como se muestra en la Fig. 3:

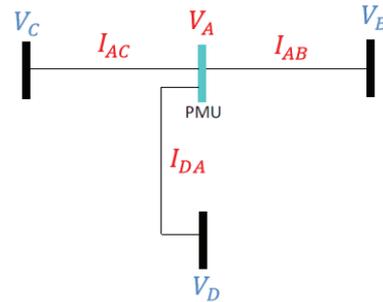


Figura 3: Primera regla de observabilidad: Los datos en rojo son conocidos

$$V_B = V_A - I_{AB} (R_{AB} + j X_{AB}) \quad (1)$$

$$V_C = V_A - I_{AC} (R_{AC} + j X_{AC}) \quad (2)$$

$$V_D = V_A - I_{DA} (R_{AD} + j X_{AD}) \quad (3)$$

Si se conocen los fasores de voltaje y corrientes en un extremo de una línea sin inyección, el fasor de voltaje en el otro extremo de la línea se puede calcular con las ecuaciones (4, 5, 6, 7), llamando a estas "pseudo medidas", como se indica en la Fig. 4:

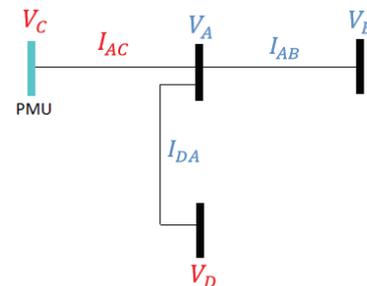


Figura 4: Segunda regla de observabilidad.

$$V_A = V_C - I_{AC} (R_{AC} + j X_{AC}) \quad (4)$$

$$I_{DA} = \frac{V_D - V_A}{R_{AC} - j X_{AC}} \quad (5)$$

$$I_{AB} = I_{DA} - I_{AC} \quad (6)$$

$$V_B = V_A - I_{AB} (R_{AB} + j X_{AB}) \quad (7)$$

Si los valores de fase de voltaje en ambos extremos de una línea son conocidos, el fasor de corriente en esta línea se puede calcular, llamándose a estas mediciones también como ‘pseudo medidas’. Teniendo en cuenta esto, si tenemos los fasores de voltajes en la barras B, C y D la corriente en las líneas, así como el fasor voltaje en A se pueden calcular con las ecuaciones (8, 9, 10, 11) como se indica en la Fig. 5:

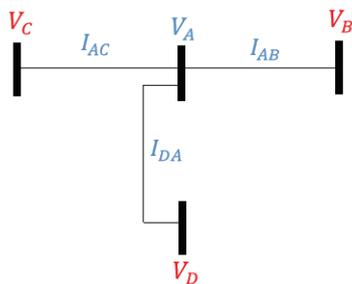


Figura 5: Tercera regla de observabilidad

$$V_A = V_B - I_{AB} (R_{AB} + j X_{AB}) \quad (8)$$

$$V_A = V_C - I_{AC} (R_{AC} + j X_{AC}) \quad (9)$$

$$V_A = V_D - I_{AD} (R_{AD} + j X_{AD}) \quad (10)$$

$$0 = I_{DA} - I_{AC} - I_{AB} \quad (11)$$

A partir de estas reglas obtenidas con las leyes de Kirchhoff se puede concluir que las barras vecinas a una barra que contenga una PMU son observables por ésta. Además una barra sin inyección es observable también cuando todas sus barras vecinas son observables.

#### 4. APLICACIONES DE LAS PMU's

La tecnología de las unidades de medición sincrofásicas PMU's permiten realizar el monitoreo de los sistemas eléctricos de potencia, simplificando matemáticamente los procesos de cálculo al transformar los números complejos en fasores, logrando con esto el proceso de las señales de forma más ágil. Además del monitoreo nos permiten el análisis y control para explicar o prevenir algunos eventos en gran escala de los sistemas eléctricos de potencia [3].

Las principales aplicaciones de las unidades de medición sincrofásica PMU's son las siguientes:

- Estimación de estado lineal.
- Visualización del sistema eléctrico en “tiempo real”.
- Análisis de estabilidad.
- Control y protección.
- Mejora la confiabilidad de las acciones de control, disminuyendo incertidumbres en la toma de decisiones.
- Comportamiento del ángulo de potencia, frecuencia y voltaje.
- Protecciones de respaldo.
- Detección más precisa del punto de falla.
- Cálculo preciso de los parámetros de la red eléctrica.
- Detección de oscilaciones.

El estimador de estado de los sistemas eléctricos de potencia se calcula a partir de datos de medición, impedancias de línea, configuración de conductores, datos de transformadores, etc., conjuntamente con algoritmos matemáticos complejos. Debido a la variación de estos datos y las mediciones no sincronizadas, pueden existir datos sin mucha precisión e inclusive erróneos. La estimación de estado puede ser mejorada con la inclusión de PMU's, ya que se obtendrían mediciones sincronizadas de fasores voltajes y corrientes, y así no tener la necesidad de correr flujos de potencia en cada barra del sistema

Las aplicaciones se pueden agrupar en tres divisiones en forma general:

- Medición: supervisión de sistemas eléctricos de potencia.
- Protección: sistemas de protección avanzados de los sistemas eléctricos de potencia.
- Control: esquema de control avanzado

#### 5. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En el presente trabajo se realizará la formulación del problema en tres casos: sin medidas convencionales, es decir tomando en cuenta únicamente PMU's, con medidas convencionales de inyección y de flujo de potencia, y solamente con medidas de inyección o llamadas de inyección cero.

El problema propuesto para describir la ubicación óptima de PMU's en sistemas eléctricos de potencia es lineal del tipo binario, este modelo considera variables del tipo binario (ceros o unos)

las cuales están asociadas a la instalación de PMU's. Se debe tener en cuenta que el costo de instalación de los PMU's es igual, sea cual sea su ubicación.

El modelo matemático es el siguiente:

$$Z = \min \sum_{i=0}^n C_i * X_i \quad (12)$$

sujeto a  $f(x) \geq 1$  ,  $A \cdot X \geq 1$

Donde,

- Z *funcion objetivo*
- C<sub>i</sub> *costo de instalación de una PMU en el nodo i*
- X<sub>i</sub> *variable binaria de decisión del problema*
- $x_i = \begin{cases} 1 & \text{si una PMU es ubicada en el nodo } i \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases}$

Para las explicaciones pertinentes se hará uso del sistema de 14 barras de la IEEE como red de prueba, y posteriormente se programará y calculará para las demás redes de prueba y el SNI Ecuatoriano.

### 5.1. Formulación sin Medidas Convencionales

En esta sección se formulará el problema de ubicación óptima de unidades de medición sincrofasoriales considerando únicamente PMU's, para ello se calcula la matriz de conectividad A que representa la topología del sistema.

La matriz de conectividad A se obtiene de la siguiente manera:

$$A_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \text{ y la barra } i \text{ esta conectado con } j \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases}$$

Esta matriz se puede obtener fácilmente con la matriz de admitancias o conectividad de los sistemas eléctricos de potencia.

Con esto se puede formular el problema como lo indica en (12).

### 5.2. Formulación con Medidas Convencionales

Actualmente los sistemas eléctricos de potencia en realidad tienen medidas convencionales, es decir tanto medidas de inyección y medidas de flujo. Por lo tanto, el método propuesto se aplica a los sistemas de prueba que contienen mediciones convencionales aplicando el concepto de islas observables [4].

El objetivo de la metodología aplicada es tener más de una isla observable solamente con medidas convencionales, resolver el problema de la ubicación de PMU's, y hacer al sistema completamente observable en una sola isla para condiciones normales de funcionamiento.

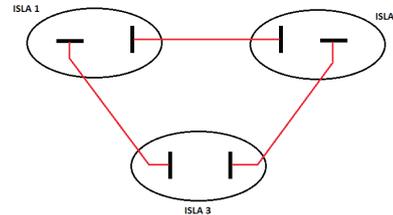


Figura 7: Ejemplo de islas y líneas frontera

Donde A es renombrada con D, siendo la matriz obtenida por las barras asociadas a las zonas de dimensión (ns x nb) (donde ns el número de zonas encontradas en el sistema), en esta matriz se tienen ya en cuenta las medidas de inyección y de flujo del sistema.

$$D = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ \vdots \\ \cdot \\ s_j \end{bmatrix}$$

Este concepto se lo realiza mediante el método algebraico que se basa en la factorización triangular de la matriz ganancia G, para determinar las islas observables de un sistema eléctrico de potencia. Esto se logra mediante el uso de filas seleccionadas de la factorización de la matriz ganancia.

#### 5.2.1. Matriz Ganancia (G) y su Descomposición

La matriz ganancia es formulada a partir de la matriz de Jacobiano desacoplado H de las mediciones de potencia reales (mediciones de flujo e inyección) versus a todos los ángulos de fase de las barras, y la podemos formar como lo indica en (13):

$$G = H^T \cdot H \quad (13)$$

En la formulación de la matriz Jacobiana H se considera también la barra slack, cuyo rango máximo debe ser (nb-1) (donde nb es el número de barras del sistema eléctrico) haciendo a la matriz singular gain de rango (nb x nb), incluso para un sistema completamente observable.



La Fig. 10 nos muestra el diagrama del sistema actualizado después de la fusión de las barras 7 y 8 formando una nueva barra a la que llamaremos 8'. La línea encontrada después de la transformación topológica 8'-9, refleja la conexión original entre las barras 7 y 9.

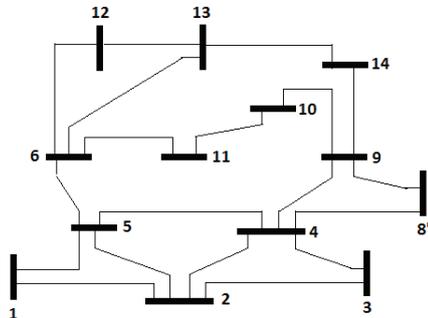


Figura 10: Sistema después de la fusión de la barra 7 con la 8

Con esta nueva topología se pueden armas las nuevas restricciones ocasionadas por la medida de inyección en la barra 7.

## 6. ALGORITMO HEURÍSTICO DE OPTIMIZACIÓN

El algoritmo heurístico elegido para la solución del problema de la ubicación óptima de unidades de medición sincrofásorial PMU's en este trabajo es el BPSO, el cual trabaja con variables binarias que son necesarias para la resolución del problema de ubicación óptima de PMU's. El algoritmo heurístico BPSO presentado en este trabajo busca cumplir dos aspectos: 1) minimizar el número de PMU's necesarios para hacer un sistema completamente observable y 2) maximizar el nivel de redundancia de las barras observables.

Vector  $x_i = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_n]$  que almacena la localización de la partícula en un espacio de búsqueda seleccionado.

Vector  $pbest_i = [p_1 \ p_2 \ p_3 \ \dots \ p_n]$  que almacena la posición de la mejor solución encontrada por la partícula hasta el momento.

Vector velocidad  $v_i = [v_1 \ v_2 \ v_3 \ \dots \ v_n]$  almacena la dirección según la cual se moverá la partícula.

El valor de la función fitness  $fitness \ x_i$  que almacena el valor de la solución actual del vector  $x_i$ .

El valor de  $fitness \ pbest_i$  que almacena el valor de adecuación de la mejor solución local encontrada hasta el momento del vector  $pbest_i$  [5]

Las posiciones y velocidades de las partículas generalmente se forman de manera aleatoria. Una vez inicializado el cúmulo de partículas, se deben mover dentro del espacio iterativo. Como se muestra en (17), la posición de una partícula en cualquier instante se determina por su velocidad en ese instante y la posición en el instante anterior [7]:

$$x_i(t) = x_i(t - 1) + v_i(t) \quad (15)$$

Donde  $x_i(t)$  y  $x_i(t - 1)$  son los vectores de posición de la partícula, y  $v_i(t)$  es el vector de velocidad de la partícula el cual se actualiza mediante el uso de la experiencia de las partículas individuales, así como el conocimiento del desempeño de las otras partículas en su vecindad. La actualización de velocidad para un PSO es:

$$v_i(t) = v_i(t - 1) + c1 * r1 * (pbest_i - x_i(t - 1)) + c2 * r2 * (16) * (gbest - x_i(t - 1))$$

Dónde  $c1$  y  $c2$  son parámetros ajustables llamados constante de aceleración individual y social, respectivamente, que son usualmente definidos como  $c1+c2=4$ , con  $c1=2$  y  $c2=2$ ;  $r1$  y  $r2$  son números aleatorios en el intervalo  $[0,1]$ ,  $pbest_i$  es el mejor vector individual encontrado en las partículas;  $gbest$  es el mejor entre todos los vectores individuales que se encuentran por todas las partículas. Los vectores  $pbest_i$  y  $gbest$  se evalúan mediante el uso de una función fitness o función objetivo.

Los valores máximos y mínimos de los valores de la velocidad están limitados para evitar grandes oscilaciones alrededor de la solución:

$$v_{ij} = \begin{cases} v_{max}, & \text{si } v_{ij} > v_{max} \\ v_{min}, & \text{si } v_{ij} < v_{min} \end{cases} \quad (17)$$

Los valores de  $v_{max}$  y  $v_{min}$  son iguales a 4 y -4 respectivamente, valores tomados en [7].

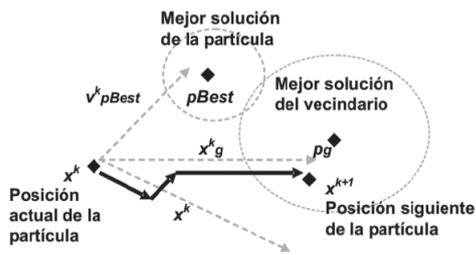


Figura 11: Movimiento de la partícula en el espacio

Para el caso de BPSO, cada elemento del vector de posición puede tomar sólo valores binarios, es decir, 1 ó 0. En cada etapa de iteración, los elementos del vector de posición se actualizan de acuerdo con la siguiente regla [7]:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si } \rho_{ij} < s(v_{ij}) \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (18)$$

Donde  $\rho_{ij}$  es un número aleatorio para cada elemento de los vectores de velocidad, y cuyo intervalo está entre [0,1], y  $s(v_{ij})$  es llamada la función sigmoide definida en [7] como:

$$s(v_{ij}) = \frac{1}{1 + e^{-v_{ij}}} \quad (19)$$

El primer paso para la localización de PMU's en un sistema eléctrico de potencia es la identificación de las ubicaciones candidatas, pueden existir muchas soluciones a este problema, pero la mejor será la que mayor grado de redundancia tenga. La posición de los vectores de las partículas representa la solución potencial para el problema de ubicación de PMU's, y para esto se necesita definir la función fitness o función objetivo que calcula la mejor posición individual  $pbest$ , y la mejor posición global  $gbest$  de las partículas, dada en [8]:

$$f(x) = w_1 * \sum_{i=1}^{Nb} f_i + w_2 * J_1 + C * J_2 \quad (20)$$

Donde  $w_1$ ,  $w_2$  y  $C$  son datos dados en [8],  $\sum_{i=1}^{Nb} f_i$  representa el número de barras observables por cada partícula encontrada,  $J_1$  representa el número total de PMU's por cada partícula y  $J_2$  grado de redundancia

$$J_1 = X * X^T \quad (21)$$

$$J_2 = (M - A * X)^T * (M - A * X) \quad (22)$$

Como se mencionó anteriormente el objetivo en este trabajo es minimizar el número de PMU's haciendo a un sistema totalmente observable y con alto grado de observabilidad. La matriz  $M$  para este caso toma valores de 2.

La población de partículas iniciales  $X_i^0$  se construye de forma aleatoria para el problema de optimización por enjambre de partículas con dimensión de  $P \times Nb$ , donde  $P$  es el número de partículas asignadas por el usuario, y  $Nb$  es el número de barras del sistema, así mismo las velocidades de las partículas iniciales se generan aleatoriamente.

Para las mejores partículas iniciales  $PB_i^0$ , es necesario realizar que  $PB_i^0 = X_i^0$ . El conjunto de las mejores partículas posteriores forman la matriz  $PB_i^k$ , la cual es calculada por la función fitness (20) para las mejores partículas individuales.

La mejor partícula global inicial  $GB^0$  es igual a la mejor partícula individual inicial con el menor valor de la función fitness y los argumentos de  $GB^0$  son iguales a los argumentos de  $PB_i^0$  con el menor valor de la función global (20):

$$f^{gbest}(GB^0) = \min ( f_i^{pbest}(PB_i^0) )$$

$$GB^0 = [gb_1 \ gb_2 \ gb_3 \ \dots \ gb_{nb}]$$

Se inicia un lazo con el contador de las iteraciones  $k$  para iniciar la búsqueda de la mejor partícula, en este caso la ubicación óptima de PMU's, encontrando en primer lugar las nuevas velocidades de las partículas con (16) y posteriormente las nuevas posiciones de las partículas con (18).

Cada partícula se evalúa de nuevo con respecto a su posición actualizada  $f_i^k(X_i^k)$ , para saber si las mejores partículas individuales cambian, con el criterio de:

Teniendo así una nueva población de mejores partículas individuales y encontrando una nueva mejor partícula global con  $f^{gbest}(GB^k) = \min ( f_i^{pbest}(PB_i^k) )$ , se aplica otro criterio para observar si la mejor partícula global cambia:

$$\text{Si } f_i^k(X_i^k) < f_i^{pbest}(PB_i^{k-1})$$

Entonces  $f_i^{pbest}(PB_i^k) = f_i^k(X_i^k)$ ,  $PB_i^k = X_i^k$   
 Caso contrario  $f_i^{pbest}(PB_i^k) = f_i^{pbest}(PB_i^{k-1})$ ,  $PB_i^k = PB_i^{k-1}$

Si  $f^{gbest}(GB^k) < f^{gbest}(GB^{k-1})$

Entonces  $f^{gbest}(GB^k) = f^{gbest}(GB^k), GB^k = GB^k$

Caso contrario  $f^{gbest}(GB^k) = f^{gbest}(GB^{k-1}), GB^k = GB^{k-1}$

Este lazo se lo realiza hasta el número máximo de iteraciones dado por el usuario, obteniendo el número mínimo de PMU's a instalar para que un sistema eléctrico de potencia sea observable y con un buen grado de redundancia.

### 7. Simulación y Casos de Estudios

Se aplicará el algoritmo propuesto para los diferentes sistemas de prueba de la IEEE así como para el SNI ecuatoriano, caso analizado únicamente con PMU's.

#### 7.1. Sistema de 14 barras

Se muestran los resultados de las simulaciones en la Tabla 2, Tabla 3 y Tabla 4.

Tabla 1: Información del sistema de 14 barras [5], [7]

Medidas de Inyección	Medidas de Flujo	Medidas de Inyección Zero
1, 2, 3, 4, 6, 9, 10, 12, 13	1-2, 7-4, 7-8, 7-9, 9-4	7

Resultados tomando en cuenta únicamente la colocación de PMU's:

Tabla 2: Información de resultados del sistema de 14 barras

	# de PMU's	Localización de PMU's
Resultados de [11]	4	2 6 7 9
bintprog	4	2 6 7 9
BPSO	4	2 6 7 9
	4	2 7 10 13
	4	2 6 8 9
	4	2 7 11 13

Resultados tomando en cuenta las medidas convencionales:

Tabla 3: Información de resultados del sistema de 14 barras

	# de PMU's	Localización de PMU's
Resultados de [24]	2	6 9
bintprog	2	10 13
BPSO	2	6 9
	2	10 13

Resultados tomando en cuenta las barras de inyección zero:

Tabla 4: Información de resultados del sistema de 14 barras

	# de PMU's	Localización de PMU's
Resultados de [11]	3	2 6 9
bintprog	3	2 6 9
BPSO	3	2 6 9

#### 7.2. Sistema de 30 barras

Se muestran los resultados de las simulaciones en la Tabla 6 y Tabla 7.

Tabla 5: Información del sistema de 14 barras [5]

Medidas de Inyección Zero
6, 9, 11, 25, 28

Resultados tomando en cuenta únicamente la colocación de PMU's:

Tabla 6: Información de resultados del sistema de 30 barras

	# de PMU's	Localización de PMU's
Resultados de [11]	10	2 4 6 9 10 12 15 18 25 27
Resultados de [24]	10	2 4 6 9 10 12 15 19 25 27
Bintprog	10	1 7 9 10 12 18 24 25 27 28
BPSO	10	1 5 6 10 11 12 15 19 25 27
	10	1 6 7 10 11 12 15 19 25 27
	10	3 5 6 10 11 12 15 19 25 27
	10	1 5 6 10 11 12 18 24 25 29
	10	3 5 6 10 11 12 18 24 25 30
	10	3 5 6 10 11 12 15 19 25 27

Resultados tomando en cuenta las barras de inyección zero:

**Tabla 7: Información de resultados del sistema de 30 barras**

	# de PMU's	Localización de PMU's
Resultados de [11]	7	3 5 10 12 18 23 27
bintprog	7	3 7 10 12 18 24 27
BPSO	7	1 7 10 12 19 24 27
	7	1 7 10 12 18 24 27

### 7.3. Sistema de 57 barras

Se muestran los resultados de las simulaciones en la Tabla 9 y Tabla 10.

**Tabla 8: Información del sistema de 57 barras [5]**

Medidas de Inyección Zero
4, 7, 11, 21, 22, 24, 26, 34, 36, 37, 39, 40, 45, 46, 48

Resultados tomando en cuenta únicamente la colocación de PMU's:

**Tabla 9: Información de resultados del sistema de 57 barras**

	# de PMU's	Localización de PMU's
Resultados de [11]	17	1 4 7 9 15 20 24 25 27 32 36 38 39 41 46 50 53
Resultados de [24]	17	1 4 6 9 15 20 24 25 28 32 36 38 41 47 50 53 57
bintprog	17	1 4 8 9 15 20 24 28 30 32 36 38 39 41 47 51 53
BPSO	17	2 6 12 14 19 22 26 29 30 32 36 39 41 45 48 50 54
	17	1 6 9 15 19 22 25 27 29 32 36 38 41 47 51 54 57
	17	1 6 9 15 19 22 24 28 31 32 36 38 41 46 51 53 57
	17	1 4 9 15 20 23 27 29 30 32 36 38 41 46 50 53 57
	17	1 6 9 15 19 22 25 27 29 32 36 38 41 47 50 54 57

Resultados tomando en cuenta las barras de inyección zero:

**Tabla 10: Información de resultados del sistema de 57 barras**

	# de PMU's	Localización de PMU's
Resultados de [11]	12	1 5 9 14 15 20 25 28 32 50 53 56
Bintprog	12	1 5 9 20 25 29 32 38 41 47 51 54
BPSO	12	1 5 10 15 19 25 29 32 38 41 49 54

	12	1 5 13 14 19 25 29 32 38 51 54 56
	12	1 5 12 19 25 29 32 38 41 47 51 54
	12	1 5 12 14 19 25 29 32 38 41 50 54
	12	1 5 9 19 25 29 32 38 41 47 51 53

### 7.4. Sistema de 118 barras

Se muestran los resultados de las simulaciones en la Tabla 12, Tabla 13 y Tabla 14.

**Tabla 11: Información del sistema de 118 barras [5]**

Medidas de Inyección	Medidas de Flujo	Medidas de Inyección Zero
5, 9, 12, 19, 21, 27, 28, 30, 32, 37, 38, 41, 44, 47, 50, 53, 59, 62, 63, 64, 68, 71, 81, 83, 86, 94, 96, 108, 110	6-7, 5-6, 1-3, 3-12, 3-5, 8-30, 8-5, 8-9, 26-25, 25-27, 29-31, 28-29, 23-32, 32-114, 27-32, 70-74, 74-75, 47-69, 46-47, 82-83, 83-84, 93-94, 92-94, 94-100, 99-100, 98-100, 106-107, 105-107, 51-52, 51-58, 55-59, 54-59, 59-60, 15-19, 19-20, 19-34, 12-16, 12-117, 35-37, 34-37, 35-36, 38-37, 43-44, 49-50, 65-68, 68-116, 68-69, 110-111, 110-112	5, 9, 30, 37, 38, 63, 64, 68, 71, 81

Resultados tomando en cuenta únicamente la colocación de PMU's:

**Tabla 12: Información de resultados del sistema de 118 barras**

	# de PMU's	Localización de PMU's
Resultados de [11]	32	2 5 9 11 12 17 21 24 25 28 34 37 40 45 49 52 56 62 63 68 73 75 77 80 85 86 90 94 101 105 110 114
Resultados de [24]	32	3 5 9 12 15 17 21 23 28 30 34 37 40 45 49 52 56 62 64 68 71 75 77 80 85 86 91 94 101 105 110 114
bintprog	32	3 6 9 11 12 17 21 25 28 34 37 40 45 49 52 56 62 64 68 70 71 76 79 83 86 89 92 96 100 105 110 114
BPSO	32	2 6 10 11 12 19 22 27 29 30 32 35 37 40 43 46 49 52 56 62 63 68 70 76 77 80 85 91 92 95 105 110
	32	2 5 9 12 15 17 21 24 25 28 34 37 41 45 49 52 56 62 64 73 75 77 80 85 86 90 94 102 105 110 114 116

	32	2 5 9 12 15 17 21 23 25 29 34 37 40 45 49 52 56 62 64 71 75 77 80 85 86 90 94 102 105 110 114 116
	32	2 5 9 12 15 17 21 25 29 34 37 41 45 49 52 56 62 64 68 70 71 76 79 85 86 91 92 96 100 105 110 114

	29	1 10 11 12 17 21 27 29 32 34 39 41 45 49 52 56 62 72 75 77 80 85 86 90 94 102 105 110 116
	29	1 10 11 12 17 21 25 29 34 39 41 45 49 52 56 62 72 75 77 80 85 86 91 94 101 105 110 114 116

Resultados tomando en cuenta las medidas convencionales:

Tabla 13: Información de resultados del sistema de 118 barras

	# de PMU's	Localización de PMU's
Resultados de [11]	19	2, 11, 17, 21, 24, 40, 49, 56, 62, 71, 77, 80, 86, 89, 91, 100, 102, 108, 118
bintprog	19	11 12 15 22 40 49 54 64 67 71 72 76 79 86 89 92 96 100 109
BPSO	19	11 12 15 22 24 40 49 54 64 67 73 78 87 89 92 96 100 109 118
	19	11 12 15 22 23 40 49 54 64 67 71 78 87 89 92 96 100 109 118
	19	11 12 15 22 24 40 49 54 62 64 73 78 87 89 92 96 100 109 118

Resultados tomando en cuenta las barras de inyección zero:

Tabla 14: Información de resultados del sistema de 118 barras

	# de PMU's	Localización de PMU's
Resultados de [11]	29	2 8 11 12 15 19 21 27 31 32 34 40 45 49 52 56 62 65 72 75 77 80 85 86 90 94 101 105 110
bintprog	29	3 8 11 12 17 21 25 28 34 39 42 45 49 53 56 62 69 72 75 77 80 85 86 90 94 101 105 110 114
BPSO	29	1 10 11 12 17 21 27 29 32 34 39 41 45 49 52 56 62 72 75 77 80 85 86 90 94 102 105 110 116
	29	1 10 11 12 17 21 27 28 32 34 39 41 45 49 52 56 62 72 75 77 80 85 86 90 94 101 105 110 116
	29	1 10 11 12 17 21 23 29 34 39 41 45 49 52 56 62 72 75 77 80 85 86 90 94 101 105 110 115 116
	29	1 8 11 12 17 21 23 29 34 39 41 45 49 52 56 62 72 75 77 80 85 86 90 94 102 105 110 115 116

### 7.5. Sistema Nacional Interconectado SNI

Se muestran los resultados de las simulaciones en la tabla 16.

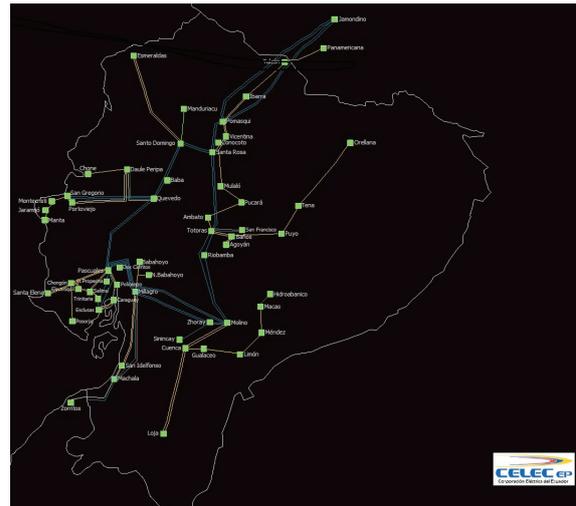


Figura 12: Sistema Nacional Interconectado Ecuatoriano, CELEC EP TRANSELECTRIC

Se decodificaron los datos del SNI ecuatoriano como se muestra en la Tabla 15:

Tabla 15: Información del SNI ecuatoriano

1 JAMONDINO	31 MANTA
2 PANAMERICANA	32 MOLINO
3 TULCAN	33 ZHORAY
4 IBARRA	34 SININCAY
5 POMASQUI	35 CUENCA
6 VICENTINA	36 GUALACEO
7 CONOCOTO	37 LIMON
8 SANTA_ROSA	38 MENDEZ
9 SANTO_DOMINGO	39 MACAS
10 MANDURIACU	40 HIDROABANICO
11ESMERALDAS	41 LOJA
12 BABA	42 BABAHOYO
13 QUEVEDO	43 NUEVA_BABAHOYO
14 DAULE_PERIPA	44 MILAGRO
15 MULALO	45 DOS_CERRITOS
16 PUCARA	46 PASCUALES
17 AMBATO	47 NUEVA_PROSPERINA
18 TOTORAS	48 POLICENTRO
19 SAN_FRANCISCO	49 CHONGON
20 BAÑOS	50 ELECTROQUIL
21 AGOYAN	51 SALITRAL

22 PUYO	52 CARAGUAY
23 TENA	53 TRINITARIA
24 ORELLANA	54 ESCLUSAS
25 RIOBAMBA	55 SANTA_ELENA
26 CHONE	56 POSORJA
27 SAN_GREGORIO	57 SAN_IDELFONSO
28 PORTOVIEJO	58 MACHALA
29 MONTECRISTI	59 ZORRITO
30 JARAMIJO	

Resultados tomando en cuenta únicamente la colocación de PMU's:

Tabla 16: Información de resultados del SNI

	# de PMU's	Localización de PMU's
bintprog	20	3 5 6 9 14 17 18 20 23 29 30 33 35 38 39 44 46 49 54 58
BPSO	20	3 5 6 9 14 16 18 20 23 28 30 34 37 39 41 44 46 49 54 58
	20	3 5 6 9 14 16 18 20 23 29 30 34 35 36 39 44 46 49 54 58
	20	3 5 6 9 14 16 18 20 23 28 30 34 37 39 41 44 46 49 54 59
	20	1 3 6 9 13 14 15 18 20 23 30 34 36 39 41 44 46 49 54 58

En la Figura 13 se muestra la colocación de las PMU's en el SNI ecuatoriano

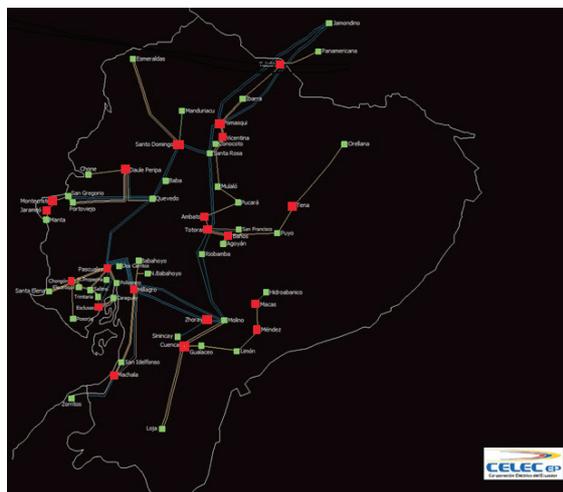


Figura 13: Ubicación de PMU's en el SNI considerando la función propia de MatLab, CENTRO DE OPERACIONES, CELEC EP TRANSELECTRIC

## 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La ubicación de PMU's conjuntamente con medidas convencionales existentes hacen a los sistemas eléctricos de potencia más redundantes,

teniendo una mayor cantidad de datos para entregar al estimador de estado, facilitando el monitoreo y control, reduciendo la utilización de algoritmos complejos y cálculos de variables eléctricas.

El algoritmo por enjambre de partículas PSO es fácil de implementar y encuentra la solución de varios problemas, para que fuese aplicable en el problema binario de la ubicación de PMU's se utilizó la función sigmoïdal que es habitualmente utilizada en redes neuronales, la cual nos entrega las posiciones de las partículas en una cadena de bits (ceros y unos), siendo las localizaciones de las PMU's obteniendo el algoritmo llamado BPSO, necesario para la solución del problema propuesto.

Los resultados son muy aceptables comparados con la literatura expuesta, encontrando la misma cantidad mínima de PMU's haciendo a los sistemas completamente observables, lo cual nos comprueba la validez del algoritmo desarrollado.

En el problema de la ubicación óptima de unidades de medición sincrofasoriales con el método heurístico BPSO, no necesariamente nos entrega una única solución, pueden encontrarse un conjunto de soluciones con el mismo mínimo número de PMU's para hacer completamente observable a un sistema eléctrico de potencia en diferentes localizaciones.

El conjunto de soluciones encontradas nos da versatilidad de escoger la opción que se desee, aplicando los criterios que mejor convengan en un sistema eléctrico de potencia.

La ubicación óptima de PMU's encuentra un mínimo de unidades, lo que nos refleja en un costo de instalación total también mínimo.

El caso de minimización utilizando únicamente PMU's, puede considerarse como impracticable, pero es una referencia que se puede tomar en cuenta en muchos sistemas eléctricos de potencia.

Las diferentes soluciones del problema de ubicación óptima de PMU's encontradas por el algoritmo heurístico tienen un grado de redundancia, es decir un número de veces que cada barra es observable por el conjunto de unidades de medición sincrofasoriales, considerándose como la óptima la que mayor redundancia tenga.

En un sistema eléctrico de potencia es necesario ubicar alrededor del 20% a 30% de unidades de medición sincrofasorial con respecto al número total de barras existentes, si se considera únicamente ubicación de PMU's.

Si se consideran las barras de inyección cero en la formulación del problema de optimización se reduce el porcentaje de PMU's en un 3% a 10% adicional con respecto a no considerar las inyecciones cero.

El uso de las PMU's está siendo cada vez más necesario ya que los datos fasoriales en tiempo real nos permiten mejorar la supervisión y el control de los sistemas eléctricos de potencia, mejorando también el suministro de la energía eléctrica al usuario final.

Los datos que nos entregan los PMU's de los fasores de voltaje y corrientes pueden observarse en tiempo real en pantallas gráficas o pueden ser almacenados para posteriormente realizar estudios sea de contingencias, oscilaciones de baja frecuencia, etc.

Una desventaja que se tiene de las PMU's son la cantidad de mediciones que nos entregan, aproximadamente 60 mediciones/s. Se tienen que ubicar PDC's de gran capacidad para poder trabajar con estos datos sea en tiempo real o para almacenarlos.

Existen pocos resultados entregados por el algoritmo BPSO que no reflejan el mínimo número de PMU's, aunque de igual manera hacen completamente observables a los sistemas eléctricos de potencia, debido a que el algoritmo no es exacto y generalmente no determinista.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Lozano Carlos, Castro Ferley, Ramirez Sindy, "Unidades de medición fasorial (PMU)" *El Hombre y la Máquina*, núm. 38, Pp. 66-74, Universidad Autónoma de Occidente, Cali-Colombia, enero-abril, 2012.
- [2] A. Villarreal Camilo, D. Restrepo José, J. Lopez Gabriel, W. González Jorge, "Potencialidades de Aplicación de Phasor Measurement Units PMU's en Subestaciones integrando las Normas IEC 61850 e IEEE

C37.118" Universidad Pontificia Bolivariana, Cir. 1 #70-01, of. 11-308. Medellín Colombia.

- [3] Villa Moya Jaime Eloy, "Ubicación Óptima de los PMU en un Sistema Eléctrico de Potencia" Universidad Politécnica Salesiana, Febrero 2015.
- [4] Bei Gou, Abur, A., "A Direct Numerical Method for Observability Analysis" Dept. of Electr. Eng., Texas A&M Univ., College Station, TX, USA, p.p 625 – 630, May 2000.
- [5] Xu Bei, Abur Ali, "Optimal Placement of Phasor Measurement Units for State Estimation", Final Project Report, PSERC Publication 05-58, Texas A&M University, October 2005.
- [6] GARCÍA NIETO José Manuel, "Algoritmos Basados en Cúmulos de Partículas Para la Resolución de Problemas Complejos", Directores: Enrique Alba Torres y Gabriel Jesús Luque Polo, septiembre de 2006.
- [7] CHAKRABARTIS., KYRIAKIDES E., "PMU Placement for Power System Observability using Binary Particle Swarm Optimization" Members IEEE, Australia.
- [8] AHMADI A., ALINEJAD-BEROMI, MORADI M., "Optimal PMU Placement for Power System Observability using Binary Particle Swarm Optimization and considering measurement redundancy", Faculty of electrical and Computer Engineering, pp. 7263-7269, Semnan University, Semnan, Iran, 2011.



**David Jiménez Analuiza.** Nació en la ciudad de Quito en 1988. Realizó sus estudios secundarios en el Instituto Tecnológico Superior "Sucre". Realizó sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador.

Actualmente es egresado de la carrera de Ingeniería Eléctrica realizando su proyecto de titulación en CELEC EP TRANSELECTRIC.



**Walter Vargas Contreras.-**

Nació en la ciudad de Milagro en 1984. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico en Potencia en 2007. Obtuvo su título de Máster en Sistemas de Energía Eléctrica en 2013 en la Universidad de Sevilla, España. Actualmente es ingeniero de estudios en el Centro de Operación de CELEC EP TRANSELECTRIC.