



# RESTABLECIMIENTO DEL SISTEMA DE POTENCIA DE EL SALVADOR UTILIZANDO EL ALGORITMO PSO

De León Acevedo, Saúl Eduardo., Henríquez Carlos, José Luis., Velásquez Cierra, Miguel Enrique., Martínez Medina, Jorge Antonio.

*Departamento de Ciencias Energéticas y Fluidicas, Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”, El Salvador*  
[jorge.martinez@ut.com.sv](mailto:jorge.martinez@ut.com.sv)

**Abstract – Restablecer un sistema de potencia es la situación más crítica que un ingeniero operador puede pasar. Los procesos de restablecimiento se dan debido a experiencias operativas pasadas o análisis de casos, es por lo que, ante estas situaciones poco frecuentes, pero de gran impacto, es necesaria la capacitación de dichos ingenieros, debido a que en tiempo real estas decisiones deben ser acertadas.**

Es aquí donde los algoritmos de optimización junto a las herramientas computacionales permiten adaptabilidad ante estos problemas. El algoritmo de optimización por enjambre de partículas (PSO) es capaz de encontrar soluciones factibles en un espacio de búsqueda, y a medida el problema se vaya desarrollando obtener la solución óptima en todo el espacio de búsqueda.

Este artículo presenta una herramienta computacional creada en Matlab® que, mediante el algoritmo PSO, soluciona un restablecimiento de potencia. El principal objetivo posterior a un cero voltaje total, es que el programa proporcione ayuda con los resultados, que en conjunto con la experiencia del ingeniero operador, se le permita al usuario obtener conocimientos para elegir la mejor forma para abordar el problema. Se presenta la aplicación del algoritmo PSO y el programa desarrollado, en el restablecimiento del sistema de potencia de El Salvador.

*Palabras claves – Algoritmos de Optimización, Herramienta computacional, Matlab®, Optimización por enjambre de partículas, Restablecimiento de Sistemas de Potencia.*

## I. INTRODUCCIÓN

La sociedad se ha vuelto cada vez más dependiente de la electricidad, no solo es importante prevenir las fallas del sistema eléctrico de potencia, sino que también la duración de las fallas sea el menor tiempo posible, además de restablecer el sistema de potencia a una condición óptima con la cual pueda trabajar de la misma manera que antes, es decir, en condición de prefalla. Normalmente para este tipo de casos se desarrollan planes de restablecimiento que permitan una recuperación rápida en el momento de un apagón total.

El restablecimiento de un sistema de potencia ante un colapso total del sistema, es un problema de control complejo en

tiempo real [1]. Normalmente, los centros de control no se enfrentan a esta situación muy a menudo, ya que los sistemas de potencia están diseñados para evitar un cero voltaje, por ejemplo, dispositivos de protección que aíslan una línea de transmisión con falla, descargan la carga o aíslan unidades térmicas [1]. Debido a la interconectividad del sistema de potencia, la probabilidad de propagación de la falla en todo sistema es alta.

El restablecimiento de sistemas de potencia consta de dos pasos principales. Primero, el objetivo de configuración óptimo del sistema se obtiene del conjunto de límites factibles. En segundo lugar, las operaciones de swicheo se realizan para lograr la configuración de destino óptima obtenida en el primer paso [2].

Algunos enfoques se han aplicado a este problema, el restablecimiento de sistemas de potencia, como los sistemas expertos, la programación matemática y la estrategia evolutiva. Por ejemplo, en sistemas de distribución es muy fácil mantener el equilibrio de la red en cada etapa del escenario de swicheo [1]. El enfoque propuesto en este artículo se centra en el sistema eléctrico de potencia de El Salvador, esto es, un sistema basado en interconexiones con unidades generadoras, líneas de transmisión y cargas.

Una de las condiciones en las que se concentra el artículo, es en obtener un escenario o etapa de swicheo o conmutación en la que solo una carga, un transformador, una línea de transmisión, un banco de capacitores o una unidad de generación se enciendan uno en uno. En cada etapa, todas las variables de control y estado deben de estar dentro de sus límites y deben de cumplirse las ecuaciones de balance de potencia [1].

El principal objetivo del problema del restablecimiento de sistemas de potencia, es minimizar el número de carga no servida. La mayoría de los métodos para solucionar este tipo de problemas se basan en técnicas de búsqueda heurística [3]. Algunos de los métodos se basan en la teoría de grafos [4]. Sin embargo, en [5] se discute una comparación de la resolución del problema entre los algoritmos genéticos y el PSO, otorgando prioridad al PSO debido a su capacidad evolutiva y al estar más cerca de la inteligencia artificial.

## II. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La función objetivo se enfatiza en minimizar la cantidad de carga no servida en cada etapa y se expresa como se muestra en la ecuación 1.

$$f_s = \min\{-\sum_{L=1}^N(S_L * M_L * X_L)\} \quad (\text{Ec. 1})$$



Dónde:

s = Indica la etapa del proceso.

S<sub>L</sub> = Carga en la subestación “L” del sistema de potencia [MW].

M<sub>L</sub> = Porcentaje de la carga conectado de la subestación “L” del sistema de potencia [MW].

X<sub>L</sub> = Componente binario de la rama (líneas o transformadores) a energizar, 1 si ha sido restablecida, de lo contrario 0.

El balance de potencia es lo más importante de mantener, es por eso que se detalla una restricción que garantice que la carga demandada será energizada, considerando las pérdidas en las líneas, y manteniendo los flujos de potencia en valores aceptables.

En [6] se explica que las ecuaciones a plantear para flujos de potencia dependen de la generación, carga y pérdida entre líneas de transmisión, así como se muestra en las ecuaciones 2 y 3.

$$P_{Gi} - P_{Di} - P_{Li} = 0 \quad (\text{Ec. 2})$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} - Q_{Li} = 0 \quad (\text{Ec. 3})$$

Dónde:

P<sub>Gi</sub> = Potencia real generada en el bus i en cada etapa.

P<sub>Di</sub> = Potencia real demandada en el bus i en cada etapa.

P<sub>Li</sub> = Pérdida de potencia real en el bus i en cada etapa.

Q<sub>Gi</sub> = Potencia reactiva generada en el bus i en cada etapa.

Q<sub>Di</sub> = Potencia reactiva demandada en el bus i en cada etapa.

Q<sub>Li</sub> = Pérdida de potencia reactiva en el bus i en cada etapa.

La pérdida de potencia en las líneas se puede definir por las ecuaciones 4 y 5.

$$P_{Li} = \sum_{j=1}^N |Y_{ij}| * |V_i| * |V_j| * \cos(\varphi_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (\text{Ec. 4})$$

$$Q_{Li} = \sum_{j=1}^N |Y_{ij}| * |V_i| * |V_j| * \sin(\varphi_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (\text{Ec. 5})$$

Dónde:

N = Número de buses en cada etapa.

|V<sub>i</sub>| = Magnitud de voltaje en el bus i de cada etapa.

|V<sub>j</sub>| = Magnitud de voltaje en el bus j de cada etapa.

|Y<sub>ij</sub>| = Admitancia entre los buses i y j en cada etapa.

Φ<sub>ij</sub> = ángulo de admitancia entre los buses i y j en cada etapa.

δ<sub>i</sub> = Ángulo de voltaje en el bus i en cada etapa.

δ<sub>j</sub> = Ángulo de voltaje en el bus j en cada etapa.

También es importante considerar los límites, de potencia real y reactiva, que posee cada máquina. Estos son llamados restricciones de operación, y son expresadas en las inequaciones 4, 5 y 6.

$$P_{Gg}^{min} \leq P_{Gg} \leq P_{Gg}^{max} \quad (\text{Ec. 4})$$

$$Q_{Gg}^{min} \leq Q_{Gg} \leq Q_{Gg}^{max} \quad (\text{Ec. 5})$$

$$V_i^{min} \leq |V_i| \leq V_i^{max} \quad (\text{Ec. 6})$$

Dónde:

P<sub>Gg</sub> = Potencia real generada por la unidad g en cada etapa.

P<sub>Gg</sub><sup>min</sup> = Límite inferior de potencia real generada por la unidad g.

P<sub>Gg</sub><sup>max</sup> = Límite superior de potencia real generada por la unidad g.

Q<sub>Gg</sub> = Potencia reactiva generada por la unidad g en cada etapa.

Q<sub>Gg</sub><sup>min</sup> = Límite inferior de potencia reactiva generada por la unidad g.

Q<sub>Gg</sub><sup>max</sup> = Límite superior de potencia reactiva generada por la unidad g.

|V<sub>i</sub>| = Magnitud de voltaje en el bus i por cada etapa.

V<sub>i</sub><sup>min</sup> = Límite inferior de magnitud de voltaje en el bus i.

V<sub>i</sub><sup>max</sup> = Límite superior de magnitud de voltaje en el bus i.

### III. PSO EN UN RESTABLECIMIENTO DE POTENCIA

La resolución del problema de restablecer un SEP se enfoca en crear una función que minimice la carga no servida o bien, maximice la carga servida, sujeta al balance de potencia, el resultado de flujos de potencia, y las demás restricciones que se aplican al problema según antes indicado. Para completar el modelo matemático es necesario plantear las variables de control, que determinan los elementos que se mantienen constantes en el sistema a través del proceso, y las variables de estado, que explican y calculan matemáticamente el valor de las variables en cada etapa de solución.

En la formulación del problema, se consideran variables de control [1]:

- Las líneas de transmisión, transformadores y unidades generadores, en estado binario, es decir, si está conectado (1) o si está desconectado (0).
- La conexión de carga como variables binarias, es decir, si está conectado (1) o si está desconectado (0).
- El porcentaje de carga conectada, como variables discretas representadas en porcentajes, 0%, 25%, 75% o 100%.



- Magnitud de voltaje en los buses PV, incluyendo el oscilante, representadas como variables continuas.
- Y la potencia real de los buses PV.

Las variables de estado se representan como [1]:

- Balance de potencia real obtenida de los flujos de potencia.
- Balance de potencia reactiva obtenida de los flujos de potencia.
- La magnitud de voltaje en los buses PQ.
- Flujos de potencia a través de las líneas de transmisión y los transformadores.
- Potencia reactiva generada de los buses PV, incluyendo el bus oscilante.
- Potencia real generada en el bus oscilante.

La ecuación 7. muestra la función de habilidad a utilizar, es decir, aquella función que cuantifica el rendimiento o la calidad de la partícula en encontrar la solución óptima. Esta es expresada en términos de penalidades, para cada etapa de resolución, y así guiar al PSO hacia los valores óptimos de la función.

$$f_s = \min \left\{ -A_L \sum_{L=1}^{N_L} (S_L \times M_L \times X_L) + A_S * \Delta s^2 + \sum_{g=1}^{N_g} (A_{PGg} \times \Delta P_{Gg}^2) + \sum_{g=1}^{N_g} (A_{QGg} \times \Delta Q_{Gg}^2) + \sum_{i=1}^{N_i} (A_{V1} \times \Delta V_i^2) \right\} \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde las ecuaciones 8, 9, 10 y 11 describen los diferenciales de conexión de equipos, potencia y voltaje de generadores que se enuncian en la Ec. 7:

$$\Delta s = \left( \sum_{L=1}^{N_L} (X_L) + \sum_{K=1}^{N_K} (X_K) + \sum_{G=1}^{N_G} (X_G) \right) - s \quad (\text{Ec. 8})$$

$$\Delta P_g = P_{Gg} - P_{Gg}^{lim} \quad (\text{Ec. 9})$$

$$\Delta Q_g = Q_{Gg} - Q_{Gg}^{lim} \quad (\text{Ec. 10})$$

$$\Delta V_i = |V_i| - V_i^{lim} \quad (\text{Ec. 11})$$

Dónde:

$A_L$  = El factor de penalidad de la carga.

$A_s$  = Factor de penalidad asociado con la violación de cantidad de equipos conectados por etapa.

$A_{QGg}$  = Factor de penalidad asociado con el incumplimiento de los límites de potencia reactiva del generador g.

$A_{PGg}$  = Factor de penalidad asociado con el incumplimiento de los límites de potencia activa del generador g.

$A_{V1}$  = Factor de penalidad asociado con el incumplimiento de los límites de voltaje.

Las penalidades implican que, si la variable no cumple con los límites establecidos se aplica un factor de penalización, el cual no es un valor en específico, pero si lo suficiente para alejar la partícula de los resultados no óptimos. Este factor es multiplicado por el diferencial de la restricción que se está incumpliendo, en cualquiera de las ecuaciones 8 a la 11. Este valor es agregado a la función de habilidad (fitness) representada en la ecuación 7 según antes indicado. Como la función objetivo se define para la minimización de la carga no servida, valores muy grandes de dicha función hacen que la partícula se aleje de ese escenario, buscando así el valor óptimo de solución.

Una vez que el algoritmo converge en una solución óptima para la etapa s, los dispositivos encendidos hasta ahora se fijan para el resto del proceso de restablecimiento. Eso significa que cada unidad de generación, transformador, línea de transmisión o carga que se haya encendido en la etapa anterior permanecerá conectada para la etapa s + 1. El enfoque permitió que el porcentaje de carga se mantuviera en cualquier etapa. Con el fin de demostrar la solidez del problema, se realizó en una situación de apagón que puede considerarse como el escenario más valioso para el restablecimiento del sistema de potencia. En un escenario de colapso total del sistema, todos los componentes están desconectados. El enfoque también se puede adaptar a la situación en la que solo una parte del sistema está colapsada. En este caso, la etapa inicial es la configuración actual del sistema después de la falla o perturbación.

#### IV. DESARROLLO DE SOFTWARE EN MATLAB®

Dentro de la plataforma de MATLAB® se utilizaron 2 módulos para el desarrollo de la herramienta informática, el primero es PSAT, el cual permite representar cualquier SEP y realizar un análisis de flujos de potencia. El segundo módulo utilizado es Simulink®, el cual es una herramienta que permite plasmar los componentes de la librería de PSAT, y de la cual se extraen sus parámetros para el análisis de flujos

Una de las grandes ventajas de usar PSAT es que la realización de operaciones se puede efectuar mediante una amigable interfaz de usuario, como se muestra en la figura 1. la cual posee su propia librería de Simulink® para un diseño fácil de la red a analizar.

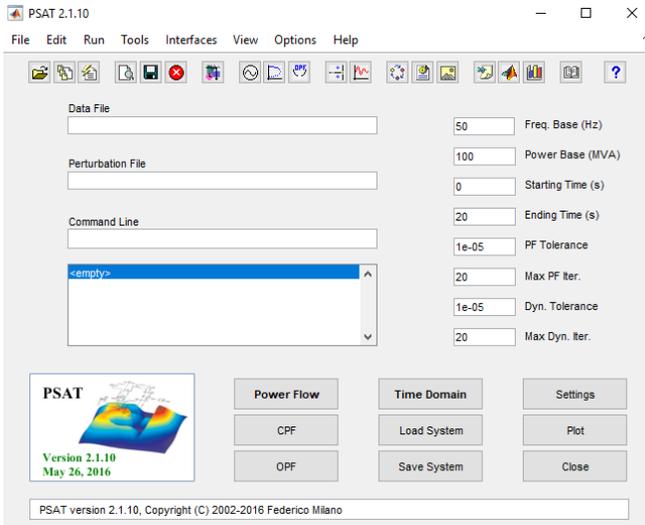


Figura 1. Interfaz gráfica de PSAT

Los análisis más importantes establecidos por este programa son:

- Flujos de potencia
- Flujos óptimos de potencia (OPF)
- Flujos de potencia continuos (CPF)
- Análisis de estabilidad de pequeñas señales
- Simulaciones en el dominio del tiempo

El código principal del software se encarga de estructurar el proceso óptimo de restablecimiento de un SEP. Primero se inicializa el módulo PSAT que debe estar activo durante todo el tiempo que el software se encuentre trabajando. Seguido de esto se configuran los parámetros de PSAT y PSO con los que se trabajará el SEP, como frecuencia, potencia base, número de partículas, número de iteraciones y tolerancia.

Cabe recalcar que PSAT posee una interfaz gráfica en la cual se configuran los parámetros para el análisis de flujos de potencia. Sin embargo, debido a que no se hace uso de la interfaz Simulink® para la elaboración y funcionamiento del programa, cada parámetro del sistema puede configurarse desde la interfaz del software creado, tales como se muestran en la lista a continuación:

- Frecuencia (Hz)
- Potencia base (MVA)
- Número de iteraciones
- Número de partículas

Una vez configurados los parámetros, el programa se apoya en el algoritmo del BPSO para determinar la mejor ruta en base a los intereses del ingeniero en operación. Si en una etapa los resultados no se encuentran dentro del rango permitido, se penaliza la decisión de conectar ese elemento. La figura 2 muestra el flujograma implementado en el programa informático, el cual describe el proceso mencionado previamente.

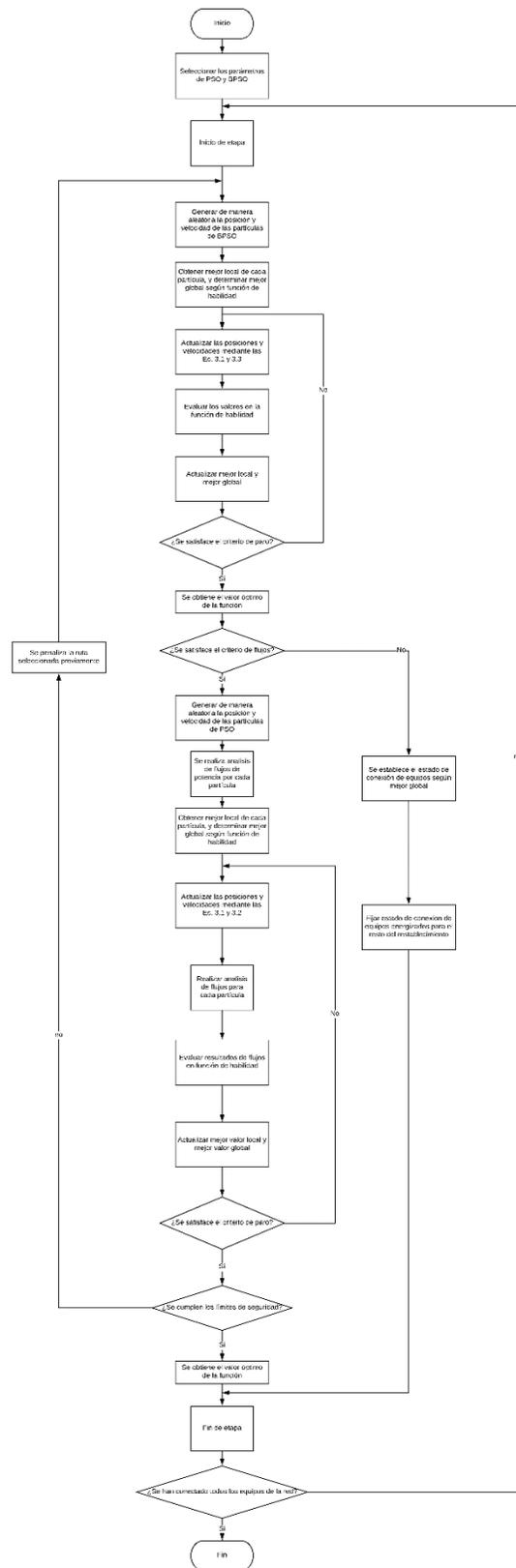


Figura 2. Flujograma de software creado



La interfaz del usuario creada permite controlar y ejecutar las funciones necesarias del programa para restablecer un SEP.

El objetivo primordial de la interfaz gráfica es facilitar la interacción del usuario con el programa, tal que le permita configurarlo de la mejor manera posible y también para monitorear los resultados a medida avanza la solución del proceso de restablecimiento el SEP.



Figura 3. Interfaz gráfica del software creado.

En la figura 3 se observa la primera casilla en donde se ingresa SEP con el que se desea trabajar. Al presionar el botón derecho del ratón, en la casilla de “Ingresar red (mdl)”, se abre una ventana en la cual se busca y selecciona el archivo que contiene el SEP en formato “mdl” (formato propietario de MATLAB®). En ese momento el programa extrae todos los datos del SEP y se abre el espacio de trabajo de Simulink® para que se visualice el proceso de restablecimiento con la ayuda del coloreo de las zonas normalizadas. Al mismo tiempo se crea un archivo Excel® con el formato “xlsx” el cual posee en las filas los nombres de los generadores del SEP que está en proceso de solución, y en las columnas los límites tanto superior como inferior de su potencia activa.

Luego se selecciona el botón de “Establecer los límites de generación”, que permite buscar el archivo Excel® llamado “LímitesPV.xlsx”, para ingresar los datos solicitados. Este se guarda y se carga dentro del software. Además, las últimas 2 casillas en blanco muestran al usuario la etapa que está siendo restablecida y la duración en segundos de dicha etapa.

En la figura 4.11 las casillas de la derecha representan diferentes parámetros que se deben configurar antes de iniciar el software.

En primer lugar, está la frecuencia con la que trabaja el SEP. Debido a que todo el sistema eléctrico del país trabaja a 60 Hz, ese es el valor predeterminado del software. En la siguiente casilla es posible modificar la potencia base con la que el SEP trabaja, como valor predeterminado se tiene 100 MVA. Seguido del número de iteraciones, el cual, debido a las diferentes pruebas realizadas con el programa, se concluyó durante la fase de pruebas, 25 iteraciones como

mínimo permiten encontrar un resultado óptimo. Por último, dentro de los parámetros configurables se tiene la tolerancia de iteración, que controla el criterio de paro de las iteraciones realizadas por software siendo  $1e-5$ .

Luego, en la parte inferior se puede observar el código de colores que sigue software a la hora de colorear los segmentos del SEP a restablecer. Los colores utilizados son los establecidos por PSAT según se indica en la interfaz.

Finalmente, la interfaz permite una lista de instrucciones que muestra al operador el orden bajo el cual son energizados los elementos del SEP y la gran etapa a la que pertenecen. Además, posee una barra de progreso que indica la finalización del proceso de restablecimiento en medidas porcentuales (0%, 25%, ..., 100%).

## V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la herramienta computacional se realiza el restablecimiento de los SEP por etapas. En donde la etapa se refiere a la energización de un elemento del sistema de potencia, incluyendo líneas de transmisión, generadores, cargas y transformadores. Por lo tanto, el número de etapas depende directamente del número de elementos disponibles que posea el SEP.

El perfil de demanda para el ejemplo es característico de ser mínima en época seca.

No se toma en consideración la causa que llevó al SEP a un colapso total, no es el propósito de este trabajo, sino a partir del colapso del sistema restablecerlo. El usuario puede antes de iniciar el programa, modificar el SEP y designar que elementos se encuentran disponibles, o bien modificar para un escenario de generación demanda completamente distinto.

El restablecimiento del SEP de El Salvador se realiza a partir de un arranque en negro de la planta 15 de Septiembre, y con base en el tipo de restablecimiento con estrategia de alto voltaje. En la primer gran etapa los órdenes de los elementos conectados son:

1. Slack (o bus oscilante) en el nodo de referencia 15SEPT-U1.
2. Transf29 que une nodo 15SEPT-U1 con el nodo 15SEPT 115.
3. Line117 que une el bus 15SEPT-115 con el nodo BusFicticio1.
4. Transf9 que une el BusFicticio1 con el nodo 15SE 46.
5. Carga PQ-24181 en el bus 15SEP 46.
6. Line30 que une el bus 15SEPT 115 con el bus SMAR 115.
7. Line24 que une el bus 15SEPT 115 con el bus SMAR 115.
8. Line32 que une el bus 15SEPT 115 con el bus SMAR 115.
9. Line28 que une el bus 15SEPT 115 con el bus SMIG 115.
10. Line33 que une el bus SMAR 115 con el bus NEJA 115.
11. Line39 que une el bus NEJA 115 con el bus NEPO 115.
12. Line20 que une el bus NEJA115 con el bus CGRA 115.
13. Line38 que une el bus NEJA115 con el bus CGRA 115.



14. Transf3 que une el bus CGRA 115 con el bus CGRA 46.
15. Carga PQ-24171 en el bus CGRA 46.
16. Transf2 que une el bus CGRA 115 con el bus CGRA 13.8.
17. Generador PV-CGRA en el bus CGRA 13.8

Para la segunda etapa se conectan los siguientes elementos respectivamente:

1. Line11 que une el bus SEPT 115 con el bus BERL 115.
2. Transf19 que une el bus BERL 115 con el bus BERL-U1 13.8.
3. Generador PV-BERL U1 en el bus BERL-U1 13.8.
4. Transf20 que une el bus BERL 115 con el bus BERL-U2 13.8.
5. Generador PV-BERL U2 en el bus BERL-U2 13.8.
6. Transf21 que une el bus BERL 115 con el bus BERL-U3 13.8.
7. Generador PV-BERL U3 en el bus BERL-U3 13.8.
8. Transf22 que une el bus BERL 115 con el bus BERL-U4 13.8.
9. Generador PV-BERL U4 en el bus BERL-U4 13.8.
10. Line29 que une el bus BERL 115 con el bus SMIG 115.
11. Transf26 que une el bus SMIG 115 con el bus SMIG 46.
12. Carga PQ-24321 en el bus SMIG 46.
13. Line44 que une el bus 15SEPT 115 con el bus SRAF 115.
14. Transf11 que une el bus SRAF 115 con el bus SRAF 46.
15. Carga PQ-24321 en el bus SRAF 46.
16. Line43 que une el bus SRA 115 con el bus 5NOV 115.
17. Transf18 que une el bus 5NOV 115 con el bus 5NOV U1 13.8.
18. Generador PV-5NOV U1 en el bus 5NOV U1 13.8.
19. Transf12 que une el bus 5NOV 115 con el bus 5NOV U1 13.8.
20. Generador PV-5NOV U2 en el bus 5NOV U2 13.8.
21. Transf31 que une el bus NEJA 115 con el bus NEJA 23.
22. Carga PQ-22371 en el bus NEJA 23.
23. Line 18 que une el bus NEJA 115 con el bus SMAT 115.
24. Line5 que une el bus SMAT115 con el bus OPIC 115.
25. Transf76 que une al bus OPIC 115 con el bus OPIC 46.
26. Transf77 que une al bus OPIC 115 con el bus OPIC 46.
27. Carga PQ-24381 en el bus OPIC 46.

En la tercera gran etapa se conecta lo siguiente:

1. Line6 que une el bus OPIC 115 con el bus SANA 115.
2. Transf55 que une el bus SANA 115 con el bus SANA 46.
3. Transf56 que une el bus SANA 115 con el bus SANA 46.
4. Carga PQ-24351 en el bus SANA 46.
5. Line16 que une el bus SANA 115 con el bus AHUA 115.
6. Transf61 que une el bus AHUA115 con el bus AHUA U3 13.8.
7. Generador PV-AHUA U3 en el bus AHUA U3 13.8.
8. Transf62 que une el bus AHUA115 con el bus AHUA U2 13.8.
9. Generador PV-AHUA U2 en el bus AHUA U2 13.8.

10. Transf63 que une el bus AHUA115 con el bus AHUA U1 13.8.
11. Generador PV-AHUA U1 en el bus AHUA U1 13.8.
12. Line12 que une el bus AHUA 115 con el bus Ficticio6.
13. Transf53 que une el bus Ficticio6 con el bus AHUA 46.
14. Carga PQ-24161 en el bus AHUA 46.
15. Line34 que une el bus SMAR 115 con el bus SBAR 115.
16. Line35 que une el bus SMAR 115 con el bus SBAR 115.
17. Transf8 que une el bus SBAR 115 con el bus SBAR 46.
18. Transf38 que une el bus SBAR 115 con el bus SBAR 46.
19. Carga PQ-22451 en el bus SBAR 46.

Con respecto a la cuarta gran etapa se conectaron los siguientes equipos:

1. Line40 que une el bus NEJA 115 con el bus SANT 115.
2. Transf93 que une el bus SANT 115 con el bus SANT 23.
3. Transf94 que une el bus SANT 115 con el bus SANT 23.
4. Carga PQ-22361 en el bus SANT 23.
5. Line109 que une el bus SANT 115 con el bus TALN 115.
6. Transf90 que une el bus TALN 115 con el bus TALN 46.
7. Carga PQ-24481 en el bus TALN46.
8. Line110 que une el bus TALN 115 con el bus ATEO 115.
9. Transf78 que une el bus ATEO 115 con el bus ATEO 46.
10. Carga PQ-24441 en el bus ATEO 46.
11. Transf79 que une el bus ATEO 115 con el bus ATEO 34.5.
12. Carga PQ-23441 en el bus ATEO 34.5.
13. Line que une el bus SANA 115 con el bus GUAJ 115.
14. Transf58 que une el bus GUAJ 115 con el bus GUAJ 46.
15. Carga PQ-24111 en el bus GUAJ 46.

En la quinta etapa de restablecimiento del SEP, el programa de simulación obtuvo los siguientes resultados:

1. Line2 que une el bus AHUA 115 con el bus SONS 115.
2. Transf64 que une el bus SONS 115 con el bus SONS 46.
3. Carga PQ-24411 en el bus SONS 46.
4. Line9 que une el bus SONS115 con el bus ATEO 115.
5. Line3 que une el bus SONS 115 con el bus ACAJ 115-1.
6. Line4 que une el bus SONS 115 con el bus ACAJ 115-1.
7. Line26 que une el bus ACAJ 115-1 con el bus ACAJ 115-2.
8. Line8 que une el bus ACAJ 115-2 con el bus ATEO 115.
9. Transf73 que une el bus ACAJ 115-2 con el bus ACAJ 46-2.
10. Carga PQ-24131 en el bus ACAJ 46.
11. Transf76 se une el bus ACAJ 115-1 con el bus ACAJ 46-1.
12. Carga PQ-23131 en el bus ACAJ 46-1.
13. Transf65 que une el bus ACAJ 115-1 con el bus ACAJ U1 13.8.
14. Generador PV-ACAJ U1 en el bus ACAJ U1 13.8.
15. Transf67 que une el bus ACAJ 115-1 con el bus ACAJ U2 13.8.
16. Generador PV-ACAJ U2 en el bus ACAJ U2 13.8.



17. Line36 que une el bus NEJA 115 con el bus SOYA 115.
18. Line37 que une el bus SOYA 115 con el bus SMAR 115.
19. Transf44 que une el bus SOYA 115 con el bus SOYA 46.
20. Carga PQ-24301 en el bus SOYA 46.
21. Transf41 que une el bus SOYA 115 con el bus SOYA 23.
22. Transf42 que une el bus SOYA 115 con el bus SOYA 23.
23. Transf43 que une el bus SOYA 115 con el bus SOYA 23.
24. Carga PQ-22301 en el bus SOYA 23.

Última gran etapa del SEP nacional:

1. Line1 que une el bus ATEO 115 con el bus NCUS 115.
2. Transf80 que une el bus NCUS 115 con el bus NCUS 23.
3. Transf81 que une el bus NCUS 115 con el bus NCUS 23.
4. Transf85 que une el bus NCUS 115 con el bus NCUS 23.
5. Carga PQ-22421 en el bus NCUS-23.
6. Line12 que une el bus NCUS 115 con el bus STOM 115.
7. Transf82 que une el bus STOM 115 con el bus STOM 46.
8. Transf83 que une el bus STOM 115 con el bus STOM 46.
9. Carga PQ-24461 en el bus STOM 46.
10. Line27 que une el bus SMIG 115 con el bus HAVIL 115.
11. Line25 que une el bus HAVIL 115 con el bus LUNI 115.
12. Transf27 que une el bus LUNI 115 con el bus LUNI 46.
13. Carga PQ-24491 en el bus LUNI 46.
14. Line23 que une el bus SMIG 115 con el bus OZAT 115.
15. Transf24 que une el bus OZAT 115 con el bus OZAT 46.
16. Carga PQ-24401 en el bus OZAT 46.
17. Line22 que une el bus OZAT 115 con el bus TECO 115.
18. Transf23 que une el bus TECO 115 con el bus TECO 46.
19. Carga PQ-24391 en el bus TECO 46.

Debido a la gran cantidad de información como resultado de restablecer el SEP de El Salvador, se decidió simplificar en la tabla 1, representando las conexiones realizadas en el proceso y la carga total conectada en cada etapa.

Tabla 1. Restablecimiento del SEP de El Salvador con nodo oscilante en la planta 15 de Septiembre.

Nº de sub-etapa	Conexión	Carga restablecida
1	Inicio del arranque en negro en bus 15SEPT-U1	0.000%
2	Se conectó desde el bus 15SEP-U1 hacia 15SEP 115	0.000%
3	Se conectó desde 15SEP-115 hacia BusFicticio1	0.000%

4	Se conectó desde Bus hacia 15SE-46	0.000%
5	Se conectó la carga PQ-24181 en el bus 15SEP-46	1.323%
6	Se conectó desde 15SEP-115 hacia SMAR-115	1.323%
7	Se conectó desde SMAR-115 hacia NEJA-115	1.323%
8	Se conectó desde NEJA-115 hacia NEPO-115	1.323%
9	Se conectó desde 15SEP-115 hacia CGRA-115	1.323%
10	Se conectó desde CGRA-115 hacia CGRA-46	1.323%
11	Se conectó la carga PQ-24171 en el bus CGRA-46	3.082%
12	Se conectó desde CGRA-115 hacia CGRA-13.8	3.082%
13	Se conectó el generador PV-CGRA en el bus CGRA-13.8	3.082%
14	Se conectó desde 15SEP-115 hacia BERL-115	3.082%
15	Se conectó los generadores de BERL21 en BERL-115	3.082%
16	Se conectó desde BERL-115 hacia SMIG-115	3.082%
17	Se conectó desde SMIG-115 hacia SMIG-46	3.082%
18	Se conectó la carga PQ24341 en el bus SMIG-46	9.751%
19	Se conectó desde 15SEP-115 hacia SRAF-115	9.751%
20	Se conectó SRAF-115 hacia SRAF-46	9.751%
21	Se conectó la carga PQ-24321 en el bus SRAF-46	12.431%
22	Se conectó desde SRAF-115 hacia 5NOV-115	12.431%
23	Se conectó los generadores de 5NOV en el bus 5NOV-115	12.431%



24	Se conectó desde NEJA-115 hacia NEJA-23	12.431%
25	Se conectó la carga PQ22371 en el bus NEJA-23	25.734%
26	Se conectó desde NEJA-115 hacia SMAT-115	25.734%
27	Se conectó desde SMAT-115 hacia OPIC-115	25.734%
28	Se conectó desde OPIC-115 hacia OPIC-46	25.734%
29	Se conectó la carga PQ-24381 en el bus OPIC-46	29.129%
30	Se conectó desde OPIC-115 hacia SANA-115	29.129%
31	Se conectó desde SANA-115 hacia SANA-46	29.129%
32	Se conectó la carga PQ-24351 en el bus SANA-46	34.857%
33	Se conectó desde SANA-115 hacia AHUA-115	34.857%
34	Se conectó los generadores de AHUA16 en AHUA-115	34.857%
35	Se conectó desde AHUA-115 hacia AHUA-46	34.857%
36	Se conectó la carga PQ-24161 en el bus AHUA-46	36.162%
37	Se conectó desde SMAR-115 hacia SBA 115R-115	36.162%
38	Se conectó desde SBAR-115 hacia SBAR-46	36.162%
39	Se conectó la carga PQ-22451 en el bus SBAR-46	45.529%
40	Se conectó desde NEJA-115 hacia SANT-115	45.529%
41	Se conectó desde SANT-115 hacia SANT-23	45.529%
42	Se conectó la carga PQ-22361 en el bus SANT-23	52.494%
43	Se conectó desde SANT-115 hacia TALN-115	52.494%

44	Se conectó desde TALN-115 hacia TALN-46	52.494%
45	Se conectó la carga PQ-24481 en el bus TALN-46	53.957%
46	Se conectó desde TALN-115 hacia ATEO-115	53.957%
47	Se conectó desde ATEO-115 hacia ATEO-46	53.957%
48	Se conectó la carga PQ-24441 en el bus ATEO-46	59.878%
49	Se conectó desde ATEO-115 hacia ATEO-34.5	59.878%
50	Se conectó la carga PQ-23441 en el bus ATEO-34.5	60.504%
51	Se conectó desde SANA-115 hacia GUAJ-115	60.504%
52	Se conectó desde GUAJ-115 hacia GUAJ-46	60.504%
53	Se conectó la carga PQ-24111 en el bus GUAJ-46	61.532%
54	Se conectó desde AHUA-115 hacia SONS-115	61.532%
55	Se conectó desde SONS-115 hacia SONS-46	61.532%
56	Se conectó la carga PQ-24411 en el bus SONS-46	63.429%
57	Se conectó desde SONS-115 hacia ACAJ-115-1	63.429%
58	Se conectó desde ACAJ-115-1 hacia ACAJ-115-2	63.429%
59	Se conectó desde ACAJ-115-2 hacia ACAJ-46-2	63.429%
60	Se conectó la carga PQ-24131 en el 2bus ACAJ-46-2	64.734%
61	Se conectó desde ACAJ-115-1 hacia ACAJ-46-1	64.734%
62	Se conectó la carga PQ-23131 en el bus ACAJ-46-1	65.579%
63	Se conectó los generadores de ACAJ13 en el ACAJ-115-1	65.579%



64	Se conectó desde NEJA-115 hacia SOYA-115	65.579%
65	Se conectó desde SOYA-115 hacia SOYA-46	65.579%
66	Se conectó la carga PQ-24301 en el bus SOYA-46	66.693%
67	Se conectó desde SOYA-115 hacia SOYA-23	66.693%
68	Se conectó la carga PQ-22301 en el bus SOYA-23	76.331%
69	Se conectó desde ATEO-115 hacia NCUS-115	76.331%
70	Se conectó desde NCUS-115 hacia NCUS-23	76.331%
71	Se conectó la carga PQ-22421 en el bus NCUS-23	84.741%
72	Se conectó desde NCUS-115 hacia STOM-115	84.741%
73	Se conectó desde STOM-115 hacia STOM-46	84.741%
74	Se conectó la carga PQ-24461 en el bus STOM-46	89.582%
75	Se conectó desde SMIG-115 hacia HAVIL-115	89.582%
76	Se conectó desde HAVIL-115 hacia CHAP-115	89.582%
77	Se conectó HAVIL-115 hacia LUNI-115	89.582%
78	Se conectó LUNI-115 hacia LUNI-46	89.582%
79	Se conectó la carga PQ-24491 en el bus LUNI-46	92.907%
80	Se conectó desde SMIG-115 hacia OZAT-115	92.907%
81	Se conectó desde OZAT-115 hacia OZAT-46	92.907%
82	Se conectó la carga PQ-24401 en el bus OZAT-46	95.274%
83	Se conectó desde OZAT-115 hacia TECO-115	95.274%

84	Se conectó desde TECO-115 hacia TECO-46	95.274%
85	Se conectó la carga PQ-24391 en el bus TECO-46	97.259%
86	Se conectó desde STOM-115 hacia PEDR-115	97.259%
87	Se conectó desde PDR-115 hacia PEDR-46	97.259%
88	Se conectó la carga PQ-24471 en el bus PEDR-46	100.000%

En la tabla 1 podemos observar las etapas en las cuales se realizó una conexión hacia un bus de carga o en el momento que se conecta una carga, y a su derecha el porcentaje de carga restablecido con respecto a la carga total conectada en el estado de pre-falla. Se trabajó la demanda mínima en época seca, la potencia en estado de pre-falla es de 498 MW.

Se mencionan del bus que parte y hacia a que bus se energizó en el proceso de restablecimiento, en donde el número que los acompaña es el nivel de voltaje, por ejemplo, en "SMIG-115", donde SMIG significa San Miguel y el 115, que se trata de un nodo a un nivel de voltaje de 115 kV.

En la figura 4 se muestra el SEP de El Salvador totalmente restablecido, en 7 grandes etapas. Además, se observa el comportamiento del programa de simulación ante el problema, energizando cargas aledañas a su arranque en negro y luego buscando llegar a zonas importantes como, Nejapa o Ahuachapán.

Luego, a medida avanza en las grandes etapas el programa informático, se conectan cargas y nodos de generación.





## VI. CONCLUSIONES

- En el presente trabajo se desarrolló un programa informático que logró realizar el restablecimiento de potencia, por medio de los algoritmos PSO y BPSO, a diferentes sistemas de potencia. Para el SEP de El Salvador se restableció el 100% de la carga, partiendo de un arranque en negro desde la planta 15 de Septiembre. Siendo posible conocer el estado del SEP en cada gran etapa y corroborando que la sugerencia dada por el programa informático en efecto es factible.
- Se logró implementar de manera satisfactoria el método de optimización PSO con el restablecimiento de sistemas de potencia, siendo este uno de los métodos de optimización que se encuentra en desarrollo en la actualidad. Este método permite que las variables de control, a través de las partículas, sean optimizadas tal que en la función objetivo modele perfectamente el comportamiento que observan los voltajes y las potencias en los nodos de generación. Y a su vez, las variables de estado representan de manera adecuada el avance del sistema en cada etapa de su restablecimiento.
- Realizar un análisis en estado estacionario permite a los ingenieros en operación de tiempo real, conocer el impacto que tienen los cambios en las variables de control en el estado del SEP, ayudando a la creación de casos para el entrenamiento de los ingenieros en operación ante las diferentes situaciones que puedan llegar a presentarse en un restablecimiento en tiempo real. Además de corroborar la factibilidad de las sugerencias que realiza del software.
- El criterio de pesos dentro de la función objetivo permitió que el proceso de restablecimiento que realiza la herramienta computacional procure adaptarse a la realidad e importancia de los elementos del sistema de potencia de El Salvador, permitiendo reconocer que zonas del SEP son prioridad en el proceso de restablecimiento con base en el tipo de generador, las cargas críticas y el mayor número de interconexiones, logrando reducir la brecha que existe entre los modelos matemáticos y la realidad. Obteniendo un resultado de mayor utilidad para el entrenamiento de los ingenieros operadores que se enfrentan ante este problema en tiempo real.
- El algoritmo de optimización BPSO se adapta en el programa informático de manera apropiada con PSAT, ya que trabaja las conexiones de los equipos del SEP como variables binarias. Logrando que el programa informático evalúe las rutas factibles del restablecimiento y pueda priorizar los equipos que no estén definidos por una variable de control dentro de PSO.

## REFERENCIAS

- [1] K. S. Alka Singh, «Power System Restoration using Particle Swarm Optimization,» *International Journal of Computer Applications*, vol. 30, n° 2, pp. 25-28, 2011.
- [2] M. A. Q. Socha, «Metodología técnico-pedagógica para el entrenamiento de operadores en la tarea de restablecimiento de la operación del sistema de potencia,» Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, 2010, pp. 35-55.
- [3] D. S. Kirschen y T. L. Volkman, «Guiding a Power System Restoration with an Expert System,» de *Power System Restoration Methodologies & Implementation Strategies*, New York, IEEE Press, 2001, p. 474.
- [4] R. Hariharan y P. U. Rani, «Graph Theory Based Power System Restoration Using LabView,» *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, pp. 10078-10080, 2016.
- [5] h. G. M. M. P. C. C. P. S. F. M. M. R. A. C. Germano Lambert-Torres, «Comparison between PSO and GA in System Restoration Solution,» 2009.
- [6] J. J. Grainger y W. D. Stevenson, *Power System Analysis*, New York: McGraw-Hill, 1994.