

Revisión para la restauración óptima de la operación del sistema eléctrico basado en criterios de calidad de energía y estabilidad

Review optimal restoration of the operation in electric power systems based on stability and energy quality criteria

Diego Carrión Galarza¹, Jaime Francisco Quinteros Flores^{1*}, Paul Andres Masache Almeida¹

¹Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador

*Autor de correspondencia: jquinteros@ups.edu.ec

RESUMEN— Las fallas que ocurren en el sistema de energía eléctrica tienen un gran impacto en la sociedad generando grandes pérdidas económicas y pérdidas de energía eléctrica; por esta razón, es necesario tener un plan que permita restaurar el sistema eléctrico de una manera óptima y en el menor tiempo posible. Se realiza una revisión de las metodologías que permiten realizar una planificación de la restauración óptima de la SEP después de una falla debido a problemas que causan corte parcial de energía en ciertos puntos de la red. Con lo cual se puede implementar una heurística que permita elegir el camino óptimo para la restauración; es decir, proporcionará los pasos para ingresar los elementos que se ingresan, como son: las líneas de transmisión o centrales de generación, teniendo en cuenta la estabilidad del sistema y los índices de calidad que representan las restricciones del problema. Por lo tanto, los flujos óptimos de potencia se utilizan para conocer el estado del sistema posterior a la falla; de esta manera, los criterios de voltaje y potencia se utilizarán para ingresar a la heurística, además de utilizar programación lineal de entera mixta (MILP).

Palabras clave— *Flujo Óptimo, Estabilidad de voltaje, Conmutación de líneas, Sistema de Transmisión, Sistema de Generación.*

ABSTRACT— The failures that occur in the electric power system have a great impact on society, generating large economic losses and electrical power losses; For this reason, it is necessary to have a plan to restore the electrical system in an optimal way and in the shortest time. A review of the methodologies that allow planning the optimal restoration of the SEP after a failure is made due to problems that cause partial power outages at certain points in the network. Which can be implemented a heuristic that allows choosing the optimal path for restoration; that is to say, it will provide the steps to enter the elements that are entered, such as: transmission lines or generation plants, considering the stability of the system and the quality indices that represent the restrictions of the problem. Therefore, the optimal power flows are used to know the status of the post-fault system; in this way, the voltage and power criteria will be used to enter the heuristic, in addition to using linear mixed integer programming (MILP).

Keywords— *Optimum Flow, Voltage Stability, Switching Lines, Transmission System, Generation System.*

1. Introducción

Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) en la actualidad abastece de energía eléctrica a gran parte del mundo, una falla en el SEP produce grandes pérdidas económicas, técnicas y humanas, dado que el suministro eléctrico llega no solo a los usuarios comunes sino a establecimientos públicos como son; hospitales y centros de atención médica, además de servicios policiales, militares y bomberos; por esta razón, la restauración del SEP se debe realizarlo en el menor tiempo posible cumpliendo con índices de calidad y estabilidad [1–3].

Las principales causas por las que se pueden suscitar estos problemas son: fallas operativas en el SEP como; desconexión y conexión brusca de grandes consumidores y generación, provocando la desestabilización de la red y en varios casos severos causando cortes parciales en el sistema eléctrico; además, existen fenómenos meteorológicos como: descargas eléctricas, las cuales producen sobretensiones en las líneas de transmisión causando la desconexión de líneas, cargas eléctricas o generación [2–4].

Restaurar el SEP requiere de procesos y toma de decisiones complejas los cuales conllevan al seguimiento

Citación: D. Carrión, J. Quinteros y P. Masache, “Revisión para la restauración óptima de la operación del sistema eléctrico basado en criterios de calidad de energía y estabilidad”, *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 17, no. 1, pp. (no modificar), 2021.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 29 de febrero de 2020. **Recibido con correcciones:** 13 de marzo de 2020. **Aceptado:** 12 de enero de 2021.

DOI:

Copyright: 2021 D. Carrión, J. Quinteros y P. Masache. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

de varios pasos que se debe seguir, como: determinar el estado en el que se encuentra el SEP, definir las estrategias de restauración que se van a seguir, el camino a tomar para la energización de generación, el camino para la energización de transmisión, y la sincronización del sistema; el objetivo principal es restaurar el SEP en el menor tiempo posible además de disminuir los cortes de energía y así lograr que los grandes consumidores y la generación se encuentren operando bajo condiciones normales de operación de su capacidad eléctrica; todo esto, tomando en cuenta las criterios operativos y técnicos [1], [5], [6].

Para analizar el estado del SEP después de que ocurrió una falla, se pueden utilizar diferentes metodologías como: flujo de potencia AC o DC; además existen técnicas como: flujos óptimos de potencia AC o DC; cada uno de estos métodos va a depender de la complejidad del problema que se desea resolver; por ejemplo, si se habla de flujo óptimo DC se relaja al sistema linealizando las ecuaciones [7–11].

Existen varios tipos de método para realizar la restauración del SEP, en [4] proponen resolver este problema mediante el árbol de mínima expansión (MST por sus siglas en inglés); al utilizar el MST se propone disminuir el tiempo de restauración del SEP tomando en cuenta ciertos factores como: el tiempo que se demoran en arrancar los generadores y tiempos de restauración de los subsistemas; como transformadores y líneas de transmisión, están representados por pesos con sus respectivos tiempos de restauración, se toma en cuenta el efecto que causan las cargas que se despachan y son tomadas como restricciones.

Otro método usado en [12], [13] para la restauración del SEP es la programación lineal entera mixta (MILP por sus siglas en inglés), esta técnica es un parte del conjunto ya que solo es utilizado para contemplar la secuencia en la que deben ingresar los generadores a la red, además utilizan el algoritmo de Dijkstra mejorado, este lo utilizan para minimizar el tiempo de restauración en el arranque secuencial de los generadores, buscan una matriz de adyacencia considerando la corriente de las cargas para la reconexión de la red. Podemos observar que en [5] utilizan MILP para obtener la secuencia óptima en la que los generadores deben ingresar; además, utilizan la teoría de decisión sobre la brecha de información (IGDT), este método no requiere de las características que posee el sistema, el objetivo principal

de este método se basa en maximizar la potencia generada de cada una de las unidades de generación y las cargas abastecidas. Una vez que aplicaron el IGDT utilizan el algoritmo genético NSGA-II para complementar y dar solución a la restauración.

En [14] se puede apreciar la utilización del algoritmo de ciclo de agua (WCA) por sus siglas en inglés utilizando índices de calidad y confiabilidad para cada una de las islas que se genera después de una falla, cabe resaltar que en este documento solo se realiza la restauración del sistema de transmisión, definen una función multiobjetivo realizado con el conjunto óptimo Pareto, realizan la minimización de la energía no suministrada. Realiza una comparación con el algoritmo genético (GA) por sus siglas en inglés y la optimización por enjambre de partículas (PSO) por sus siglas en inglés, en la cual el WCA realiza el proceso en menor tiempo.

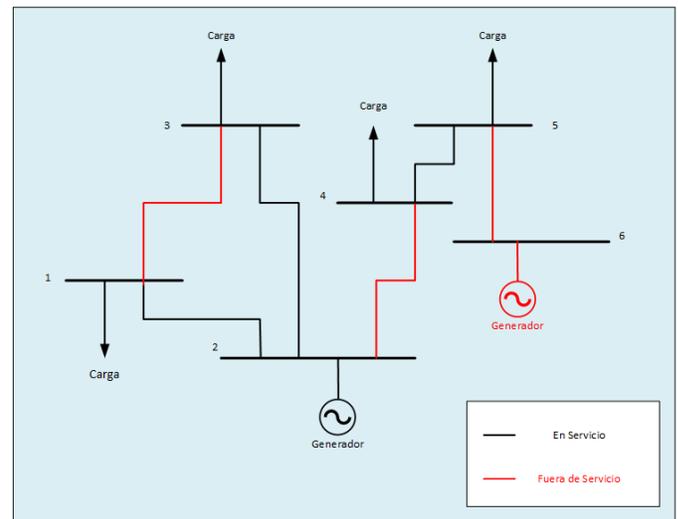


Figura 1. Esquema del sistema eléctrico de potencia después de despejar la falla eléctrica.

En la figura 1 se puede apreciar al sistema eléctrico de potencia después de que se ha efectuado un despeje de fallas eléctricas, cuando se genera un despeje de fallas, el sistema permanece operando, pero algunos elementos salen de operación para despejar la falla, dependiendo de la severidad de la falla, el número de equipos aislados varían; el peor escenario es cuando el sistema permanece en funcionamiento pero en islas; es decir, que el sistema eléctrico se dividirá en 2 subsistemas operando por separado; en este caso cuando se realice la restauración se deberá operar al sistema con normalidad; es decir, que vuelva a operar como un sistema único. En la Figura 2 se

aprecia de manera gráfica como se debería efectuar la restauración del sistema eléctrico, como se va incorporando cada uno de los equipos que fueron aislados o desconectados para mantener el servicio eléctrico; para ello se debe efectuar un análisis previo para verificar como se va a generar la restauración; estos son los que se detallaron con anterioridad; la restauración se lo debe efectuar dependiendo del nivel y del número de desconexiones que se realizaron y se debe verificar bajo los criterios de calidad y estabilidad del sistema eléctrico.

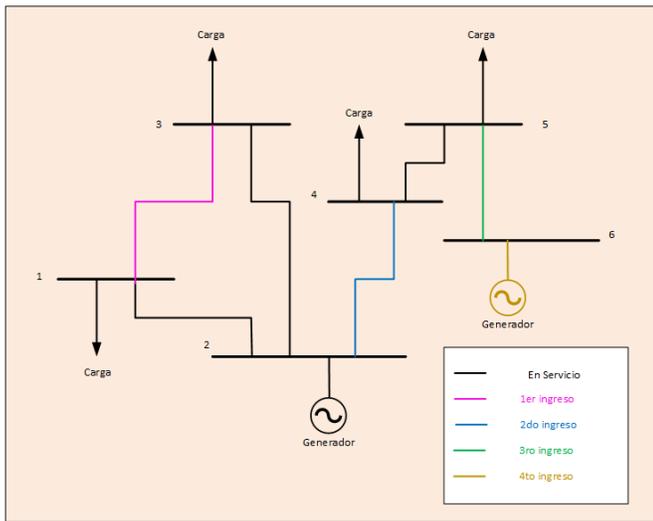


Figura 2. Esquema del sistema eléctrico de potencia después de la restauración óptima.

En el trabajo se propone realizar una reseña sobre los diferentes metodologías de planeación para la restauración óptima del SEP tomando en cuenta los índices de calidad y estabilidad, además, se utiliza flujos óptimos de potencia para conocer el estado del SEP después de que ocurrió la falla; esto permite conocer los puntos críticos del sistema y nos brindara los valores de las magnitudes de voltaje, frecuencia, corriente y potencia, con los valores obtenidos se utilizaran como escenario de partida y en conjunto con la programación lineal entera mixta, ayudara en la elección y orden en la que los generadores deben ingresar, además se realizara una heurística la cual me va a generar un árbol de decisiones que me permitirá elegir el camino óptimo para el ingreso de líneas de transmisión y generadores cumpliendo con los índices de calidad y estabilidad, es decir se realizaran pruebas no solo con la salida de líneas de transmisión sino también con salida de generación.

En el presente trabajo se presenta en la sección II la restauración del sistema eléctrico de potencia como se lo efectúa y que proceso de sede de realizar; la sección III, influencia de la calidad y confiabilidad de la energía en el SEP; en la sección IV los diferentes criterios de estabilidad que se debe tomar en cuenta para la verificación del sistema; en la sección V se realiza un detalle de la metodología planteada y la sección VI las conclusiones desarrolladas.

2. Restauración del sistema eléctrico de potencia

Un corte de energía eléctrica en el SEP, sin importar las condiciones de la falla; se debe conocer el estado en que termina el SEP después del despeje de la falla; es necesario restaurarlo, esto implica seguir distintos pasos, los mismos que se pretende detallarla más adelante. Cuando sucede fallas en el sistema que causan corte parciales o completas de energía, en general el sistema no presenta la disposición de restablecerse por sí solo, motivo por el cual es necesario que toda red posea generadores BS (Black Start por sus siglas en inglés); estos generadores son fuentes primarias de energía independientes que pueden ingresar a trabajar y proporcionar energía a la red eléctrica; es decir, que van a estar disponibles por sí se necesitan fuentes adicionales de alimentación de la red [12], [15], [16]. Los generadores BS pueden ser hidroeléctricos, a diésel y de turbinas de gas, los generadores más usados son los hidroeléctricos ya que no es necesario de una gran energía para iniciar el proceso de generación además se requiere que posea las siguientes características; rampa rápida, gran capacidad y los costos de reserva que sean bajos. Los generadores a diésel pueden aportar energía de manera rápida, sin embargo, posee una capacidad limitada de aporte de energía y finalmente las generadoras con turbinas de gas pueden ayudar a la red tomando energía de baterías locales y de esta manera iniciar el proceso de generación [6], [17].

2.1 Determinación, identificación y preparación del sistema para la restauración

El paso fundamental para iniciar la restauración del SEP es verificar el estado en que se encuentra después del corte parcial o total verificando la estabilidad del sistema y comprobando los límites de voltaje, desviación angular y frecuencia; además es indispensable verificar

la seguridad de la red, se debe comprobar que elementos de la red están disponibles después de la falla eléctrica y de los diferentes problemas que han ocurrido en la red; por lo tanto, la capacidad de evaluar al sistema va a depender básicamente de cómo está estructurada la red tanto en el sistema de generación, transmisión y distribución. Por lo general cuando existen estos cortes se desconectan todo tipo de generación renovable por su intermitencia [6], [18].

2.2 Estrategias para la restauración del SEP

Existen varios tipos de estrategias de restauración la principal es la de acumulación. La estrategia de reducción contempla primero realizar la energización del sistema de transmisión, después de ello se restaura la generación y por último las cargas. Si existen fuentes de energía como las generadoras hidroeléctricas, estas fuentes proporcionan una compensación extra, ya que la energía inicial que posee es suficiente para reestablecer el sistema de transmisión, además de lograr la estabilidad del sistema, algo que la estrategia de acumulación no puede lograr. Las tres etapas de la estrategia de acumulación son: primero la etapa de preparación que consiste en evaluar al sistema después de la falla, con lo cual se divide al sistema en varios subsistemas los cuales poseen fuentes de generación iniciales que permitan contribuir con la restauración, la segunda etapa de la restauración, consiste en que los pequeños subsistemas se reinician, se energizan las líneas de transmisión, y se conectan las principales cargas, la tercera y última etapa se conectan las cargas restantes del sistema [6], [19].

2.3 Caracterización de los subsistemas

La principal estrategia que se utiliza para la restauración de los SEP es la de acumulación, los operadores del SEP tienen el trabajo de dividir el sistema en subsistemas tomando en consideración las siguientes características: la carga de generación, la potencia reactiva del sistema. El equilibrio que debe darse entre la generación y la carga toma en consideración las características tanto de del tipo de carga como del generador; hay que tener presente que debe existir un balance en cada subsistema de la carga, debe existir una diferencia pequeña entre la capacidad de generación que se tiene en el sistema y las cargas. Hay que tener un interés especial por la potencia reactiva ya que es vital en el proceso de restauración, al ingresar las cargas estas pueden elevar el voltaje del SEP, por este motivo es

necesario que existan cargas reactivas que puedan estabilizar al sistema. Los subsistemas son la clave para interconectar a toda la red ya que, mientras más subsistemas existan habrá más puntos de conexión en el sistema, sin embargo, esto dificultaría la sincronización de la red [20–22].

2.4 Energización del sistema de transmisión

La energización del sistema de transmisión es el paso más complicado para la restauración del SEP ya que hay que tener cuidado con los límites de voltajes, para ello lo indicado es reconectar las líneas de transmisión que posean los voltajes más bajos y por consiguiente corrientes de cargas pequeñas. Para energizar el sistema de transmisión se requieren de rutas óptimas las mismas que se seleccionaran contemplando corrientes de carga o conmutación de líneas [23], [24].

2.5 Restauración de los generadores y abastecimiento de carga

La reconexión de la etapa de generación es la más complicada de todos los pasos para restaurar al SEP dado que se lo debe hacer en el menor tiempo posible, porque cuando existen cargas críticas como los hospitales, las plantas nucleares semáforos y estaciones de servicio a la ciudadanía como la policía, bomberos, son cargas eléctricas que tienen una alta prioridad y deben ser las primeras que deben ser restauradas y deben tener coordinación con el ingreso de las primeras generadoras. En este paso se verifica la estabilidad del sistema de manera coordinada verificando voltajes y frecuencia del sistema, el ingreso de la carga debe ser proporcional a la capacidad de generación que se va restaurando, pero el generador principal o la barra *slack* es la que delimita el abastecimiento de las cargas [24].

2.6 Sincronización del sistema

Cuando ya se tenga la gran parte del SEP restablecido es necesario que todos los subsistemas queden totalmente sincronizados para ello se debe verificar el ángulo de fase el voltaje y la frecuencia comprobando que en las últimas barras de cada subsistema tengan las mismas magnitudes. Se debe constatar que el sistema de transmisión cumpla con los índices de calidad de energía en el área de sincronización como el tamaño de los subsistemas y las capacidades que poseen las líneas de transmisión [25].

3. Influencia de la calidad y la confiabilidad de energía en el SEP

La calidad de energía en la restauración de un SEP es de suma importancia ya que permite determinar límites para un correcto funcionamiento, la calidad de energía se la ve desde dos puntos distintos: la calidad de potencia la cual determina las características como la magnitud, frecuencia, simetría del voltaje y corriente, además del factor de potencia; el segundo punto es la calidad del servicio de transmisión donde se evalúa la continuidad de la entrega de potencia [26].

En síntesis, las características que se utilizan para evaluar la calidad de energía en un SEP tanto en potencia como en transmisión son: [regulación gubernamental o regulaciones emitidas por estándares nacionales e internacionales] [27].

- Armónicos de voltaje y corriente
- Balance de voltaje y corriente
- Nivel de voltaje
- Factor de potencia
- Duración y frecuencia de interrupciones

Existen diversos fenómenos que inciden sobre la calidad de energía como: los transitorios electromagnéticos, variaciones de tensión de corta y larga duración, desbalances y fluctuaciones de voltaje, variaciones en la frecuencia y las distorsiones en las formas de ondas; todos estos fenómenos son llamados perturbaciones del sistema eléctrico ya que modifican las curvas de voltaje y de corriente provocando fallas en la red eléctrica [26].

El cálculo del contenido armónico se calcula con la ecuación 1 donde V_n es el voltaje fundamental, V_i es la componente de tensión que corresponde al armónico i además h es el máximo orden armónico [27].

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_i^h V_i^2}}{V_n} \quad (1)$$

La manera de analizar el balance de voltaje y de corriente viene definida por la ecuación 2 donde V_1 es la componente simétrica positiva y V_2 es la componente simétrica negativa. La misma ecuación nos sirve para calcular el balance de corriente, el cambio se da en colocar las componentes simétricas tanto positivas como negativas de la corriente [27].

$$BV = \frac{V_2}{V_1} \quad (2)$$

La duración y frecuencia de interrupciones viene dada por la ecuación 3 y 4 respectivamente, estas ecuaciones son conocidas como SAIDI o SAIIFI [10], [28], [29].

$$SAIDI = \frac{\text{minutos sin servicio por cliente}}{\text{total de clientes}} \quad (3)$$

$$SAIFI = \frac{\text{total clientes sin servicio}}{\text{total clietes}} \quad (4)$$

Existen varios índices que determinan la confiabilidad que posee el SEP, donde se determina la probabilidad de que el sistema siga operando de forma normal si suceden perturbaciones o fallas, para el caso de generación y transmisión los índices que se utilizan son los siguientes:

El primer indicador que se utiliza para evaluar la confiabilidad es el LOLE, Loss Of Load Expectation por sus siglas en inglés, este indicador permite apreciar el número de horas que no se podrá suministrar la demanda total, además toma en cuenta los mantenimientos que se tienen planificados para el cálculo.

La ecuación 5 presenta la forma de cálculo del LOLE donde P_k es la probabilidad que posee el sistema para suministrar el servicio, mientras que T_k representa la cantidad de energía eléctrica no suministrada [30][31].

$$LOLE = \sum T_k * P_k \quad (5)$$

El siguiente índice representa la cantidad de horas en el año donde no se suministró la demanda total que requería el sistema, sin embargo, se suministró una cantidad determinada de energía a la demanda, se la conoce como LOLP, Loos Of Load Probability por sus siglas en inglés, la ecuación 6 representa la forma como se calcula este indicador.

$$LOLP = \frac{LOLE}{\text{horas no suministradas}} \quad (6)$$

El EENS, Expected Energy Not Server, permite evaluar la confiabilidad del sistema, este indicador determina el valor de energía no suministrada que se presenta durante un año. La ecuación 7 representa el cálculo de este índice donde P_k es la probabilidad que

posee el sistema para suministrar el servicio y E_k representa la energía no suministrada [32].

$$EENS = \sum E_k * P_k \quad (7)$$

El índice EUE, Expected Unserved Energy por sus siglas en inglés, permite determinar la energía que no va a ser suministrada en un lapso determinado. Donde L representa carga y la U determina el promedio anual en la que no se tendrá disponibilidad de servicio [32].

$$EUE = \sum L * U \quad (8)$$

El índice que señala la energía que no se suministra al sistema por falta de capacidad en generación se lo denomina LOEE, determinando si existe o no una reserva de energía para cubrir con el suministro de la demanda total. Donde P_k es la probabilidad que posee el sistema para suministrar el servicio y E_k representa la energía no suministrada [31], [32].

$$LOEE = \sum E_k * p_k \quad (9)$$

El índice EIU, Energy Index Unreability, representa la energía no suministrada cuando exista alguna falla en el sistema, representa energía no disponible [32].

$$EIU = \frac{LOEE}{E} \quad (10)$$

4. Criterios de estabilidad

El concepto de estabilidad se define como la capacidad que posee el sistema eléctrico de potencia para recuperar su condición inicial de operación al sufrir perturbaciones que desestabilicen sistema, cada una de las variables que intervienen en este, deben regresar aproximadamente a su valor en condiciones de operación normal [33].

Los SEPs deben tener la propiedad de recuperarse frente la gran variedad de perturbaciones que pueden ocurrir; por ejemplo, los cortocircuitos afectan de manera casi imperceptible al sistema, así como salida de varias líneas de transmisión, o de generadores de gran capacidad; la respuesta que debe tener el sistema debe ser

instantánea. Si al sufrir una perturbación el sistema continúa operando de manera estable, se puede considerar que el sistema es robusto, ya que no fue necesario que elementos de generación o transmisión salgan de operación para mantener su estabilidad; pero, dependiendo de la severidad de la perturbación es necesario que, generadores y líneas de transmisión se tengan que desconectar en varios tramos, y así se divide al sistema en islas permitiendo preservar cargas y generación. Con la finalidad de mantener la estabilidad del sistema existen varios parámetros que se requieren monitorear y controlar; como es la desviación angular, la variación de frecuencia y la variación de voltaje [33].

4.1 Estabilidad de ángulo

La estabilidad de ángulo está directamente relacionada con las máquinas sincrónicas, ya que depende de la capacidad que poseen las máquinas para seguir en operación y en equilibrio ante perturbaciones, es decir, que se mantenga sincronizado. La condición para que exista estabilidad de ángulo en las máquinas sincrónicas es que exista una simetría, equilibrio, entre el par mecánico y el electromagnético; si esto no sucede se puede generar oscilaciones angulares que ocasionan salida de sincronismo propio, así como pérdida de sincronismo con otras máquinas. Los generadores poseen componentes de par sincrónico relacionado con la desviación del ángulo del rotor y el par de amortiguación que hace referencia a la desviación de la velocidad [33], [34].

Existen perturbaciones pequeñas o de pequeña señal, afectan de dos maneras aumentando el ángulo del rotor o produciendo oscilaciones en el rotor; sin embargo, los generadores al estar en presencia de estas perturbaciones tienen la capacidad de seguir en operación. Si existe perturbaciones de gran tamaño producen oscilaciones severas lo que implica la salida de sincronización o la salida de uno o varios generadores del sistema [33].

4.2 Estabilidad de voltaje

La capacidad del SEP para preservar los voltajes en cada una de las barras del sistema luego de sufrir perturbaciones que afectan las condiciones iniciales de operación se denomina estabilidad de voltaje, en este fenómeno se aprecia el equilibrio que existe entre la demanda de la carga y el suministro que se debe ofrecer; si esto falla existe la posibilidad de aumento de voltaje en diferentes barras del sistema provocando la activación de

protecciones generando una aperturas en el sistema en cascada. Si el voltaje disminuye se relaciona con la inestabilidad que sufre el ángulo del rotor, así como con las cargas del sistema [35].

La principal causa de que exista inestabilidad de voltaje en el SEP son las cargas, al ingresar cargas al sistema el voltaje disminuye y aumenta el consumo de potencia reactiva; cuando esto ocurre la transferencia de potencia se ve limitada, ya que los generadores sobrepasan la capacidad que poseen [33], [35].

La estabilidad de voltaje se la puede ver desde dos puntos diferentes como: estabilidad ante grandes y pequeñas perturbaciones; al aumentar o disminuir carga se producen pequeñas perturbaciones mismas que el sistema puede mitigar sin ningún problema, mientras que, si se producen fallas como salida del sistema de generación se va a producir perturbaciones de gran tamaño afectando al sistema de tal manera que, los elementos de protección y control que posee el SEP actúan generando pérdidas parciales o totales del suministro energético [33].

4.3 Estabilidad de frecuencia

La capacidad que posee el SEP para conservar la frecuencia de operación inicial ante una contingencia o falla, resultando una variación entre la carga y generación se denomina estabilidad de frecuencia. Al ingreso o salida de carga de manera no programada produce inestabilidad de frecuencia ya que lo generado resulta ser un valor mayor o menor de lo que necesita la carga, por tanto, existe oscilaciones de frecuencia provocando pérdidas de generación, de carga o ambas [33][36].

Al existir variaciones de frecuencia el voltaje del sistema puede aumentar de manera brusca causando la salida de generación debido a la activación de relés de impedancia mal coordinados. La forma de mitigar la inestabilidad de frecuencia es generar islas o separar el sistema eléctrico en subsistemas; además, del accionamiento de dispositivos reguladores que pueden actuar en fracciones de segundos hasta varios minutos dependiendo de la gravedad de la perturbación [33][37].

5. Formulación del problema

El artículo presenta una revisión bibliográfica acerca de trabajos realizados acerca de la Restauración Óptima del Sistema Eléctrico y una recopilación de los criterios de calidad y criterios de estabilidad, donde se aprecian

las distintas metodologías utilizadas para realizar la restauración óptima bajo contingencias n-1 como flujos óptimos de potencia, Dijkstra mejorado, Programación lineal entera mixta, optimización por enjambre de partículas, además se presenta de manera detallada los pasos a seguir para restaurar el sistema en cada una de los artículos citados. Existen criterios de estabilidad y calidad exclusivos del sistema de generación y transmisión que se toman en cuenta para resolver este problema mismos que se mencionan en la sección tres y cuatro.

Realizada la revisión bibliográfica se propone realizar una restauración óptima basado en contingencias N-2; es decir, restablecer el servicio de generación o líneas transmisión, para lo cual se realizará flujos óptimos de potencia AC en varios modelos de la IEEE, se generarán contingencias N-2 aleatorias con el fin de verificar todos los posibles escenarios que se pueden presentar en el SEP y se volverá a realizar flujos óptimos AC, utilizando la heurística Árbol de decisiones se determinara el ingreso óptimo de generación y transmisión verificando los índices de calidad confiabilidad y estabilidad determinados por la normativas internacionales, el objetivo es minimizar costos de operación tanto en generación como en transmisión. En la Figura 3 se puede reflejar lo expuesto de manera resumida lo que se pretende analizar y como varios autores han realizado la metodología para resolver los problemas expuestos.

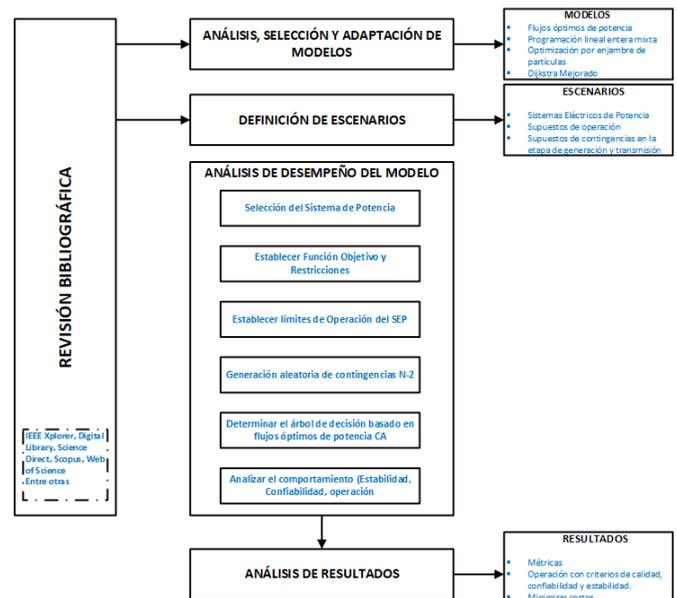


Figura 3. Metodología para la restauración del SEP.

6. Conclusiones

El sistema eléctrico proporciona, transmite y distribuye la energía eléctrica, pero cuando se produce una falla eléctrica, el sistema pierde su estado normal de operación y dependiendo de la gravedad de la falla, varios equipos como líneas de transmisión y equipos de generación pueden salir de operación al ser aislados para mantener el servicio eléctrico; cabe mencionar, que mientras más grave es la falla, existe una mayor probabilidad de que el servicio eléctrico pueda operar o mantener su operación; por tal razón, es indispensable verificar y elaborar metodologías que permitan brindar mayor robustez al sistema en caso de fallas, y de la misma forma es indispensable optar por metodologías y tecnologías que sean capaces de restablecer el servicio eléctrico en el menor tiempo y que vuelva el sistema a operar en condiciones normales.

Es fundamental que cuando se efectúa una restauración del sistema, este sistema vuelva a operar bajo parámetros normales; es decir, que vuelva a proporcionar el servicio habitual y toda la demanda sea abastecida; para ello es indispensable proporcionar metodologías que colaboren con la restauración del sistema y es de suma importancia verificar que la restauración o reconexión del sistema se encuentra funcionando bajo diferentes criterios que son importantes para brindar un servicio óptimo; estos criterios son: criterios de estabilidad, criterios de calidad y criterios de confiabilidad; cada uno de estos criterios son regularizados bajo instituciones internacionales que brindan los parámetros adecuados de funcionamiento.

6.1 Futuros trabajos

Como trabajos futuros se analizará la restauración óptima del sistema eléctrico de potencia que es afectado por contingencia N-3, con pérdidas en generación, transmisión y carga, con el cumplimiento de criterios de calidad, confiabilidad y de estabilidad, que determinan las normativas internacionales.

REFERENCIAS

- [1] M. M. Adib-i, "Power System Restoration Planning M.," vol. 9, no. 1, pp. 22–28, 1994.
- [2] H. Zhang, G. Li, and H. Yuan, "Collaborative optimization of post-disaster damage repair and power system operation," *Energies*, vol. 11, no. 10, 2018.
- [3] P. M. Pesoti, E. V. De Lorenci, A. C. Z. De Souza, K. L. Lo, and B. I. L. Lopes, "Robustness area technique developing guidelines for power system restoration," *Energies*, vol. 10, no. 1, pp. 1–16, 2017.
- [4] C. Li, J. He, P. Zhang, and Y. Xu, "A novel sectionalizing method for power system parallel restoration based on minimum spanning tree," *Energies*, vol. 10, no. 7, 2017.
- [5] P. Jiang and Q. Chen, "An optimal source-load coordinated restoration method considering double uncertainty," *Energies*, vol. 11, no. 3, 2018.
- [6] F. Qiu and P. Li, "An Integrated Approach for Power System Restoration Planning," *Proc. IEEE*, vol. 105, no. 7, pp. 1234–1252, 2017.
- [7] P. Escudero Delgado and D. Carrión Galarza, "Expansión de un sistema de transmisión mediante LOPF-AC," *Inge Cuc*, vol. 14, no. 2, pp. 116–125, 2018.
- [8] Y. Li and Y. Li, "Two-step many-objective optimal power flow based on knee point-driven evolutionary algorithm," *Processes*, vol. 6, no. 12, 2018.
- [9] Z. Li, Y. Cao, L. Van Dai, X. Yang, and T. T. Nguyen, "Optimal Power Flow for Transmission Power Networks Using a Novel Metaheuristic Algorithm," *Energies*, 2019.
- [10] P. A. Masache and D. F. Carrión, "Estado del Arte de conmutación de líneas de transmisión con análisis de contingencias," *I+D Tecnológico*, vol. 15, no. 2, pp. 98–106, 2019.
- [11] G. Poyrazoglu and H. Oh, "Optimal Topology Control with Physical Power Flow Constraints and N-1 Contingency Criterion," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 6, pp. 3063–3071, 2015.
- [12] B. Goo, S. Jung, and J. Hur, "Development of a sequential restoration strategy based on the enhanced Dijkstra algorithm for Korean power systems," *Appl. Sci.*, vol. 6, no. 12, 2016.
- [13] R. Sun, Y. Liu, H. Zhu, R. Azizipah-Abarghooee, and V. Terzija, "A network reconfiguration approach for power system restoration based on preference-based multiobjective optimization," *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 83, p. 105656, 2019.
- [14] M. R. Esmaili, A. Khodabakhshian, R. Allah Hooshmand, and P. Siano, "A new coordinated design of sectionalizing scheme and load restoration process considering reliability of transmission system," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 102, no. January, pp. 23–37, 2018.
- [15] Y. Liu, R. Fan, and V. Terzija, "Power system restoration: a literature review from 2006 to 2016," *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, vol. 4, no. 3, pp. 332–341, 2016.
- [16] G. Patsakis, D. Rajan, I. Aravena, J. Rios, and S. Oren, "Optimal black start allocation for power system restoration," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 6, pp. 6766–6776, 2018.
- [17] D. Lindenmeyer, H. W. Dommel, and M. M. Adibi, "Power system restoration - a bibliographical survey," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 23, no. 3, pp. 219–227, 2001.
- [18] A. Ketabi, A. Karimizadeh, and M. Shahidehpour, "Optimal generation units start-up sequence during restoration of power system considering network reliability using bi-level

- optimization,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 104, no. May 2018, pp. 772–783, 2019.
- [19] L. H. Fink, K. L. Liou, and C. C. Liu, “From generic restoration actions to specific restoration strategies,” *Power Syst. Restor. Methodol. Implement. Strateg.*, vol. 10, no. 2, pp. 237–244, 2000.
- [20] J. Quiros-Tortos and V. Terzija, “A graph theory based new approach for power system restoration,” 2013 IEEE Grenoble Conf. PowerTech, POWERTECH 2013, 2013.
- [21] J. Quirós-Tortós, P. Wall, L. Ding, and V. Terzija, “Determination of sectionalising strategies for parallel power system restoration: A spectral clustering-based methodology,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 116, pp. 381–390, 2014.
- [22] C. Wang and V. Vittal, “Closure to Discussion of “OBDD-Based Sectionalizing Strategies for Parallel Power System Restoration”,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 3, p. 1714, 2012.
- [23] W. Sun, C. C. Liu, and L. Zhang, “Optimal generator start-up strategy for bulk power system restoration,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 3, pp. 1357–1366, 2011.
- [24] D. N. A. Talib, H. Mokhlis, M. S. A. Talip, K. Naidu, and H. Suyono, “Power system restoration planning strategy based on optimal energizing time of sectionalizing Islands,” *Energies*, vol. 11, no. 5, pp. 1–17, 2018.
- [25] N. H. Jenkins-johnston, “United States of America,” *Free. Peac. Assem. Eur.*, vol. 30326, no. 404, 2018.
- [26] R. Dugan, M. McGranaghan, S. Santoso, and H. Wayne, *Electrical Power Systems Quality*, Second. 2017.
- [27] CONELEC, CALIDAD DEL TRANSPORTE DE ELECTRICIDAD Y DEL SERVICIO DE TRANSMISIÓN Y CONEXIÓN EN EL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO, no. 15. Ecuador, 2008, pp. 1–22.
- [28] Ieee, *IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices IEEE*, vol. Std 1366-2. New York: IEEE, 2012.
- [29] D. L. Johnston and B. K. Johnson, “Comparison of reliability indices with the effect of protection failure for an electrical to hydrogen distribution system,” 41st North Am. Power Symp. NAPS 2009, pp. 1–5, 2009.
- [30] H. Lotfi, M. B. Elmi, and M. Zarif, “Reliability assessment for power grid by adding wind farm,” 2nd Int. Congr. Technol. Commun. Knowledge, ICTCK 2015, no. Ictck, pp. 170–176, 2016.
- [31] A. K. Rajeevan, P. V. Shouri, and U. Nair, “ARIMA modeling of wind speed for wind farm reliability analysis,” 2014 Annu. Int. Conf. Emerg. Res. Areas Magn. Mach. Drives, pp. 3–7, 2014.
- [32] L. Xie, L. Cheng, and Y. Gu, “Reliability assessment at day-ahead operating stage in power systems with wind generation,” *Proc. Annu. Hawaii Int. Conf. Syst. Sci.*, pp. 2245–2251, 2013.
- [33] P. Kundur et al., “Definition and Classification of Power System Stability,” *IEEE Trans. POWER Syst.*, vol. 19, no. 2, pp. 1387–1401, 2004.
- [34] Z. Shuai, C. Shen, X. Liu, Z. Li, and Z. John Shen, “Transient angle stability of virtual synchronous generators using lyapunov’s direct method,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 10, no. 4, pp. 4648–4661, 2019.
- [35] A. Wiszniewski, “New criteria of voltage stability margin for the purpose of load shedding,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 22, no. 3, pp. 1367–1371, 2007.
- [36] M. Sun, X. Nian, L. Dai, and H. Guo, “The design of delay-dependent wide-area DOFC with prescribed degree of stability α for damping inter-area low-frequency oscillations in power system,” *ISA Trans.*, vol. 68, pp. 82–89, 2017.
- [37] N. Amjady and F. Fallahi, “Determination of frequency stability border of power system to set the thresholds of under frequency load shedding relays,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 51, no. 10, pp. 1864–1872, 2010.