UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD
MODALIDAD: INFORME DE INVESTIGACIÓN

Título:

Evaluación de pérdidas de potencia activa en el sistema eléctrico de la Empresa Eléctrica Quito (EEQ) aplicando un Algoritmo de optimización

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Magíster en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia

Autor:
Ing. Luis Andrés Pereira Herrera
Tutor:
Ing. Roberth Alcides Saraguro Ramírez MSc.

LATACUNGA - ECUADOR

2024

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación **"Evaluación de pérdidas de potencia activa en el sistema eléctrico de la Empresa Eléctrica Quito (EEQ) aplicando un Algoritmo de optimización"** presentado por **Ing. Luis Andrés Pereira Herrera,** para optar por el título magíster en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia.

CERTIFICO

Que dicho trabajo de investigación ha sido revisado en todas sus partes y se considera que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación para la valoración por parte del Tribunal de Lectores que se designe y su exposición y defensa pública.

Latacunga, julio, 23, 2024

Ing. Roberth Alcides Saraguro Ramírez MSc.
C.C. 171443224-0

APROBACIÓN TRIBUNAL

El trabajo de Titulación: **"Evaluación de pérdidas de potencia activa en el sistema eléctrico de la Empresa Eléctrica Quito (EEQ) aplicando un Algoritmo de optimización"**, ha sido revisado, aprobado y autorizada su impresión y empastado, previo a la obtención del título de Magíster en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia; el presente trabajo reúne los requisitos de fondo y forma para que el estudiante pueda presentarse a la exposición y defensa.

Latacunga, julio, 23, 2024

Ing. Jefferson Alberto Porras Reyes, Mg
C.C. 070440044-9
Presidente del tribunal

Ing. Fernando Rafael Arias Atiaja, Mg
C.C. 050255625-1
Lector 2

Ing. Carlos Iván Quinatoa Caiza, Mg
C.C. 050328786-4
Lector 3

DEDICATORIA

Dedico con todo mi corazón este trabajo de titulación a mi familia, pues sin ella no lo habría logrado.

A Elizabeth por su amor y apoyo incondicional, los cuales me han inspirado a ser mejor cada día.

Andrés Pereira

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios todopoderoso, porque ha estado conmigo en el trayecto de mi vida, por darme amor, salud, sabiduría y por su inmensa misericordia. A mi querida familia, pilar fundamental de mi vida, mi gran inspiración para ser mejor cada día, por su amor, por su entrega, por su lucha diaria, por ser mi apoyo incondicional.

A mi tutor de Tesis el MSc. Roberth Saraguro, por ser un excelente guía, profesor y gran amigo, que con sus sabios consejos y experiencia aporto con su valioso tiempo, así como su conocimiento y apoyo incondicional, para presentar un trabajo de calidad.

A la Universidad Técnica de Cotopaxi, por abrirme las puertas y desarrollar mi estudio de posgrado. También un agradecimiento a todos los docentes que, gracias a su esfuerzo y compromiso, contribuyeron de manera extraordinaria en mi formación profesional.

Andrés Pereira

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Quien suscribe, declara que asume la autoría de los contenidos y los resultados obtenidos en el presente Trabajo de Titulación.

Latacunga, julio, 23, 2024

Ing. Luis Andrés Pereira Herrera

C.C. 172348165-9

RENUNCIA DE DERECHOS

Quien suscribe, cede los derechos de autoría intelectual total y/o parcial del presente trabajo de titulación a la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Latacunga, julio, 23, 2024

Ing. Luis Andrés Pereira Herrera

C.C. 172348165-9

AVAL DEL PRESIDENTE

Quien suscribe, declara que el presente Trabajo de Titulación: **Evaluación de pérdidas de potencia activa en el sistema eléctrico de la Empresa Eléctrica Quito (EEQ) aplicando un Algoritmo de optimización,** contiene las correcciones a las observaciones realizadas por los miembros del tribunal en la predefensa.

Latacunga, julio, 23, 2024

Ing. Jefferson Alberto Porras Reyes, Mg

C.C. 070440044-9

DIRECCIÓN DE POSGRADO
MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Título: Evaluación de pérdidas de potencia activa en el sistema eléctrico de la Empresa Eléctrica Quito (EEQ) aplicando un Algoritmo de optimización.

Autor: Ing. Luis Andrés Pereira Herrera
Tutor: Ing. Roberth Alcides Saraguro Ramírez MSc.

RESUMEN

Esta investigación propone desarrollar una metodología basada en el algoritmo de optimización de mapeo media varianza (MVMO) para reducir las pérdidas de potencia activa del sistema de subtransmisión de la Empresa Eléctrica Quito (EEQ), determinando el mejor punto de operación del sistema, considerando el estado de tap's de los transformadores, los bancos de capacitores y del aporte de reactivos de las centrales de generación con las que cuenta actualmente la EEQ. Los mismos que al operar de una manera adecuada llevan a reducir el valor de las pérdidas de potencia activa en la red, mejorando así las condiciones operativas del Sistema Eléctrico de Potencia de la EEQ.

Palabras clave: Flujos de potencia, Pérdidas de Potencia Activa, Subtransmisión, Algoritmo de Optimización, Mapeo Media Varianza.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADO
MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Title: Evaluation of active power losses in the electrical system of the Empresa Eléctrica Quito (EEQ) applying an optimization algorithm

Author: Ing. Luis Andrés Pereira Herrera
Tutor: Ing. Roberth Alcides Saraguro Ramírez MSc.

ABSTRACT

This research proposes to develop a methodology based on the mean-variance mapping optimization (MVMO) algorithm to reduce the active power losses of the sub-transmission system of Empresa Electrica Quito (EEQ), determining the best operating point of the system, considering the state of tap's of the transformers, the capacitor banks and the contribution of reagents from the generation plants that EEQ currently has. The same ones when operating in a proper way lead to reduce the value of active power losses in the network, thus improving the operating conditions of the EEQ's Electrical Power System.

Keywords: Power Flows, Active Power Losses, Subtransmission, Optimization Algorithm, Mean Variance Mapping.

Yo, **Lcdo.** Portilla Jácome Jaime Augusto con cédula de identidad número 171629339-2, Licenciado en Ciencias de la Educación especialización Inglés con número de registro de la SENESCYT 1017-12-1149277; **CERTIFICO** haber revisado y aprobado la traducción al idioma inglés del resumen del trabajo de investigación con el título: **Evaluación de pérdidas de potencia activa en el sistema eléctrico de la Empresa Eléctrica Quito (EEQ) aplicando un Algoritmo de optimización** de **Ing. Luis Andrés Pereira Herrera** aspirante a magister en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia.

Latacunga, julio, 23, 2024

Lcdo. Portilla Jácome Jaime Augusto
C.C. 171629339-2

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INFORMACIÓN GENERAL 1

2. INTRODUCCIÓN 1

3. JUSTIFICACIÓN 5

4. MATERIALES Y MÉTODOS 6

4.1 Descripción General 6

4.2 Función objetivo del algoritmo de optimización mapeo media varianza (MVMO) 7

4.3 Restricciones de igualdad 8

4.4 Restricciones de desigualdad del algoritmo MVMO 9

5. METODOLOGÍA 12

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 25

7. CONCLUSIONES 28

8. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA 29

9. ANEXOS 32

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Valores de pérdidas de potencia activa en la red de la EEQ..... 25
Tabla 2: Voltajes en los Nodos de Interconexión con el SNI 28

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Sistema EEQ modelado en Power Factory DIgSilent [24] 10
Figura 2: Proceso de búsqueda del algoritmo Mapeo Media – Varianza (MVMO) [25] 11
Figura 3: Interfaz Python (códigos de programación) [26] 12
Figura 4: Inicio del algoritmo MVMO desde Power Factory [24] 13
Figura 5: Resultado al finalizar el algoritmo MVMO en Power Factory Demanda mínima..... 14
Figura 6: Cambio de tap's TR_Gualo durante la simulación 15
Figura 7: Verificación del tap del TR_Gualo en la ventana de variables de Python 15
Figura 8: Verificación del tap del TR_Gualo en Power Factory 16
Figura 9: Cambio de tap's en el lado de alto voltaje en el TR_VCNTNA-1 durante la simulación 16
Figura 10: Cambio de tap's en el lado de alto voltaje en el TR_VCNTNA-2 durante la simulación 17
Figura 11: Cambio de tap's en el lado de medio voltaje en el TR_VCNTNA-1 durante la simulación 17
Figura 12: Cambio de tap's en el lado de medio voltaje en el TR_VCNTNA-2 durante la simulación 17
Figura 13: Verificación del tap en HV del TR_Vicentina en la ventana de variables de Python..... 18
Figura 14: Verificación del tap en MV del TR_Vicentina en la ventana de variables de Python..... 18
Figura 15: Verificación del tap del TR_VCNTNA-1 en Power Factory..... 19
Figura 16: Verificación del tap del TR_VCNTNA-2 en Power Factory..... 19

Figura 17: Voltaje en la Barra de la S/E Gualo 20
Figura 18: Voltaje en la Barra de la S/E Vicentina..... 20
Figura 19: Cambio de tap's en el TR_BNCS durante la simulación..... 21
Figura 20: Voltaje en la Barra de la S/E Los Bancos 21
Figura 21: Cambio de tap's en el lado de medio voltaje en el TR_SRSA-1 durante la simulación 22
Figura 22: Flujograma Cambio de tap's en el lado de medio voltaje en el TR_SRSA-2 durante la simulación..... 22
Figura 23: Flujograma de Voltaje en la Barra de la S/E Santa Rosa 46 kV 22
Figura 24: Resultado al finalizar el algoritmo MVMO en Power Factory Demanda mínima..... 23
Figura 25: Resultado al finalizar el algoritmo MVMO en Power Factory Demanda media..... 24
Figura 26: Resultado al finalizar el algoritmo MVMO en Power Factory Demanda máxima con 2000 iteraciones..... 24
Figura 27: Perfil de voltaje en un menor rango de observación (ejemplo figura 17 Barra S/E Gualo)..... 27

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título del proyecto:	Evaluación de pérdidas de potencia activa en el sistema eléctrico de la Empresa Eléctrica Quito (EEQ) aplicando un Algoritmo de optimización
Línea de investigación:	Energías alternativas y renovables, eficiencia Energética y Protección ambiental
Proyecto de investigación asociado:	Desarrollo de sistemas eficientes para el abastecimiento y uso de energía eléctrica a nivel local, regional y nacional
Grupo de investigación:	Sistemas eléctricos de potencia
Red nacional o internacional:	Instituto de ingenieros Eléctricos y Electrónicos IEEE

2. INTRODUCCIÓN

El Sistema Eléctrico de Potencia (SEP), tiene como objetivo principal transportar la energía eléctrica desde las centrales de generación hacia los centros de consumo, de forma segura, confiable y continua. Para esto, es necesario garantizar la correcta operación y funcionamiento de cada elemento que conforma el SEP.

La Empresa Eléctrica Quito (EEQ) dese 1894 está encargada de suministrar el servicio de energía eléctrica a todos los usuarios dentro de la provincia de Pichincha, parte de las provincias de Imbabura, Napo, Santo Domingo de los Tsáchilas y Cotopaxi, tiene un área de concesión de 15,155 km2, cuenta con equipos y líneas conectados a diferentes niveles de voltaje (subtransmisión, distribución) 138 kV, 46 kV, 23 kV, 13,8 kV y 6,3 kV, los cuales son de gran importancia dentro de la distribución de energía eléctrica [1].

Las líneas de subtransmisión, transformadores, bancos de capacitores y centrales de generación, y demás equipos con que cuenta la EEQ, son capaces de abastecer la demanda para garantizar la continuidad del servicio de electricidad, la mayor parte de subestaciones están conectas en una configuración denominada en anillo, la cual

proporciona un alto nivel de confiabilidad y garantiza la continuidad del servicio [2]. Aun así, se debe tomar en cuenta que las condiciones de operación del sistema cambian según la demanda (mínima, media, máxima), sean estas por aumento o disminución de la carga conectada, o por algún tipo de contingencia (eventos externos o internos) que pueda suscitarse en el SEP.

Tomando en cuenta que, con el paso del tiempo y desarrollo de la tecnología se han implementado equipos que regulan automáticamente el nivel de voltaje en los transformadores, uno de los problemas de operación ha sido la reconfiguración del resto de equipos que conforman el SEP para que trabaje en las mejores condiciones operativas, es decir, con la menor cantidad de pérdidas de potencia durante su operación, considerando un estado de flujo de potencia óptimo.[3] El aporte de potencia reactiva por parte de los generadores, así como la conexión o desconexión de los bancos de capacitores y la posición de tap's en los transformadores de potencia, influyen de gran manera en las pérdidas de potencia activa en las líneas de subtransmisión puesto que, aunque el nivel de voltaje este dentro de los rangos establecidos en los nodos de la red, no está garantizado que el sistema se mantenga trabajando de manera eficiente [4][5][6].

Considerando que, en el sistema de subtransmisión las condiciones operativas cambian, esta investigación se realiza con el propósito de evaluar una técnica de optimización que ayude con la disminución de pérdidas de potencia, reduciendo las sobrecargas en la red y el estrés al que son sometidos los equipos, debido a que el mejorar los niveles de voltaje se garantiza una excelente calidad de servicio técnico, con el fin de reducir las pérdidas de potencia activa en el SEP.

Los problemas de optimización han sido resueltos en el transcurso del tiempo mediante métodos alternativos, los cuales han dado como resultado aproximaciones, pero no han sido capaces de determinar soluciones exactas. Los métodos heurísticos, están fundamentados en "el conocimiento y la experiencia, dirigidos para explorar el espacio de búsqueda en un camino particularmente conveniente" [7].

Existen varios algoritmos de optimización, que permiten encontrar soluciones óptimas válidas para el funcionamiento de un sistema eléctrico, realizando ciertas configuraciones a las redes eléctricas y a los elementos que la conforman, con el objetivo de determinar una solución óptima al problema por la complejidad de las ecuaciones (no lineales) del flujo de carga y por las restricciones operativas, considerando un espacio no lineal, no convexo, con varios nodos, que bajo ciertas restricciones establecidas en el sistema de potencia se puedan minimizar sus pérdidas, mejorar la eficiencia de operación y la calidad del servicio [8][9].

En base a lo descrito anteriormente y en cuanto a referencias bibliográficas revisadas durante esta investigación, se plantea implementar el algoritmo de optimización de Mapeo Media - Varianza (MVMO), el cual, en el estudio [8] fue puesto a prueba con una sola partícula, la cual, alcanzaba valores de pérdidas iguales a un algoritmo basado en una extensión del MVMO, considerando preceptos de inteligencia de enjambre denominado MVMOS (MVMO mejorado), el cual simula el comportamiento del algoritmo usando varias partículas, lo que se ve reflejado en el tiempo de procesamiento mucho mayor al MVMO (normal), por la cantidad de cálculos adicionales que debe realizar el algoritmo modificado para determinar bajo qué condiciones el SEP puede trabajar con un mínimo valor de pérdidas de potencia activa, mejorando el nivel de voltaje y el control de reactivos [8].

En [8], se encuentra un resumen completo de los métodos heurísticos de optimización, los cuales inicialmente están fundamentados en “el conocimiento y la experiencia, y dirigidos para explorar el espacio de búsqueda en un camino particularmente conveniente” [7]. Mientras que el término metaheurístico fue propuesto por F. Glover (1986) en su investigación “Caminos futuros para programación entera y vínculos a la inteligencia artificial”. Métodos que se caracterizan por explorar el espacio de búsqueda y encontrar soluciones óptimas, son algoritmos aproximados y no determinísticos. En estos métodos se encuentran los algoritmos genéticos, algoritmo de recocido simulado (SA), algoritmo de colonia de hormigas (ACO) [10]. También se mencionan otros algoritmos como: búsqueda tabú (TS), procedimiento de búsqueda adaptado aleatoriamente

(GRASP), enjambre de partículas (PSO), búsqueda de armonía (HSA) [11], y los Algoritmos Evolutivos (EA), los cuales explotan ideas de evolución biológica, como la reproducción, mutación y recombinación para obtener una solución óptima [12].

Considerando que, con el pasar de los años la demanda de energía será abastecida de todos los recursos renovables posibles y que el crecimiento de la demanda de energía en relación a la sobrepoblación mundial también va en aumento, las redes eléctricas serán más extensas, por lo que, se debe garantizar que todos los usuarios tengan acceso al suministro de energía con niveles aceptables de calidad y eficiencia. Esto hace necesario desarrollar métodos inteligentes para la optimización de flujos de potencia y la reducción de pérdidas durante la operación del SEP [13].

Este tipo de estudios donde se analiza la reducción de pérdidas de potencia en sistemas eléctricos ha aumentado en los últimos años, los cuales han sido realizados en sistemas de distribución y subtransmisión con diferentes métodos heurísticos de optimización, llegando a tener excelentes resultados debido al alto costo de la energía eléctrica y por el desarrollo e implementación de sistemas de automatización en los sistemas eléctricos de potencia. Varias publicaciones, hoy en día, analizan algoritmos meta-heurísticos, heurísticos y distintos métodos de inteligencia artificial para la resolución de problemas; cada vez, con resultados más eficientes [8].

El método MVMO se ha utilizado en estudios como la reconfiguración de redes de distribución “Reconfiguración de redes de Distribución de Energía Eléctrica basada en Optimización de Mapeo Media-Varianza” para determinar la combinación óptima de apertura y cierre de los seccionadores en las diferentes derivaciones de la red para reducir las pérdidas de potencia activa, manteniendo un adecuado perfil de voltaje [8], también en el “Desarrollo de una Metodología Multimáquina para la Ubicación y Sintonización de Estabilizadores de Sistemas de Potencia de forma Automática” la cual permita ubicar y sintonizar Estabilizadores de Sistemas de Potencia (PSS´s) con un modelo matemático de optimización MVMO con el

objetivo de solucionar los problemas de estabilidad oscilatoria para ser aplicado en cualquier sistema eléctrico [13], y en "El Control Óptimo de Potencia Reactiva en un parque Eólico Mar adentro con Enlace HVDC" con la implementación de una técnica de optimización de potencia reactiva con el objetivo de reducir las pérdidas de potencia activa [14].

3. JUSTIFICACIÓN

La potencia reactiva es considerada como un fenómeno específico que ocurre en sistemas eléctricos de corriente alterna, la cual no realiza ninguna función específica para los consumidores, pero juega un rol importante dentro del operación del SEP. En líneas de subtransmisión, dependiendo de la corriente de carga, éstas pueden entregar o recibir potencia reactiva. Para valores de potencia transmitida por debajo de su carga natural (impedancia característica), la línea entrega potencia reactiva, mientras que, sobre su carga natural la línea recibe potencia reactiva. Independientemente de la carga natural de los equipos, los transformadores siempre absorben potencia reactiva y los elementos de compensación, que son elementos activos, se añaden a la red para entregar o recibir potencia reactiva, los cuales, a su vez, permiten controlar el nivel de voltaje [14].

Los problemas de optimización en un SEP varían dependiendo la operación y de las condiciones bajo las que esté trabajando, considerando la modelación matemática y su no linealidad, varios autores han considerado aplicar algoritmos evolutivos, los cuales realizan una búsqueda global estocástica que permiten llegar a una solución más cercana al problema planteado.

Como caso práctico para la red de la Empresa Eléctrica Quito (EEQ) a nivel de subtransmisión no se ha realizado una evaluación de pérdidas de potencia. Considerando que la EEQ tiene integrado en su sistema de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA) dispositivos electrónicos inteligentes (IED's), es posible obtener información que puede ser utilizada para mejorar las condiciones operativas del sistema y reducir las pérdidas de potencia.

Actualmente no se aprovechan todos los datos obtenidos por los IED's como información relevante en el control y operación del sistema de la EEQ. Dichos equipos, pueden mejorar las condiciones operativas del sistema, tomando en cuenta que las condiciones de un SEP, varían dependiendo de los eventos que se susciten en el transcurso del tiempo, por cambios de demanda, por la estación del año, por eventos transitorios o permanentes dentro o fuera de un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP), entre otros. En el presente trabajo, se propone desarrollar un algoritmo de optimización, que se asemeje más a un sistema ideal (sin pérdidas), y que, mediante la información disponible de los equipos en tiempo real, cítense bancos de capacitores, posición de tap's en los transformadores de la red eléctrica (LTC's) y la generación con la que cuenta el sistema eléctrico, permita minimizar las pérdidas de potencia activa en la red eléctrica.

Además, se debe cumplir con la regulación de la Agencia de Regulación y Control de ENERGÍA Y Recursos Naturales No Renovables (ARCERNNR) número 002/20 [15], dentro de la cual se encuentra la calidad de servicio técnico y los niveles de voltaje aceptables para los diferentes usuarios (considerado un ±5% en alto voltaje), es decir de 0.95 a 1.05 por unidad (p.u), lo cual, se dificulta al considerar fenómenos transitorios o permanentes que ocurren dentro de la operación de un SEP, como variaciones de voltajes o cortes de suministro de energía, los cuales, alteran los voltajes del sistema, por lo tanto, los valores de voltaje en las barras deben permanecer dentro de los límites establecidos ante los diferentes escenarios operativos del sistema y según la regulación vigente, así como, las obligaciones que deben cumplir cada una de las empresas eléctricas distribuidoras en el país y sus usuarios (comerciales, industriales) que se conectan a la red eléctrica.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Descripción General

Los problemas de optimización en sistemas eléctricos de potencia generalmente están basados en una función objetivo y un conjunto de restricciones que se deben cumplir. Las restricciones asociadas a la optimización de potencia reactiva están

relacionas con las ecuaciones de flujos de carga y los límites de operación del sistema [16].

Minimizar *f (u, x)*

Sujeto a:

$$h\ (u, x) = 0 \qquad (1)$$

$$g\ (u, x) < 0 \qquad (2)$$

Donde:

u	Variables de control
x	Variables de estado
f (u, x)	Función objetivo
h (u, x)	Restricciones de igualdad
g (u, x)	Restricciones de desigualdad

Los objetivos de este tipo de algoritmo de optimización son: reducir las pérdidas de potencia activa y mejorar el perfil de voltaje mediante las variables de control del ajuste de tap's en los transformadores, el ajuste de la excitación de los generadores y considerando la conexión o desconexión de los bancos de capacitores que forman parte del sistema. Mientras que las variables de estado son la magnitud y fase del voltaje en las barras del SEP y el flujo de potencia en las líneas de subtransmisión.

4.2 Función objetivo del algoritmo de optimización mapeo media varianza (MVMO)

La principal función objetivo de la optimización de potencia reactiva consiste en minimizar las pérdidas de potencia que se pueden expresar como se establecen en las referencias [17] [18] [19].

$$f(x) = \sum_{i=1}^{Nl} P_{loss,i} \qquad (3)$$

$$Pl_{(i,j)} = \sum_{i=1}^{Nl} \sum_{j=1}^{Nl} G_{ij}\left[V_i^2 + V_j^2 - 2ViVjcos\left(\delta_i - \delta_j\right)\right] \qquad (4)$$

Donde:

$f(x)$	Función objetivo a minimizar
P_{loss}	Pérdidas totales del sistema
Pl_k	Pérdidas reales de potencia de la k-ésima línea del sistema
Vi, δ_i	Magnitud de voltaje y ángulo de la i-ésima barra
Gij	Conductancia de la línea k = (i, j) del sistema
Nl	Número de líneas del sistema

4.3 Restricciones de igualdad

Las restricciones de igualdad corresponden a las ecuaciones de balance de potencia activa y reactiva en las barras del SEP.

$$P_i - |V_i| \sum_{j=1}^{N} \left|V_j Y_{ij}\right| cos\left(\delta_{ij} - \theta_{ij}\right) = 0 \;\; \forall i \in N_B \qquad (5)$$

$$Q_i - |V_i| \sum_{j=1}^{N} \left|V_j Y_{ij}\right| cos\left(\delta_{ij} - \theta_{ij}\right) = 0 \;\; \forall i \in N_B \qquad (6)$$

Donde:

P_i	Potencia activa entregada en la barra i
Q_i	Potencia reactiva entregada en la barra i
Vi, δ_i	Magnitud de voltaje y ángulo de la i-ésima barra
Y_{ij}	Elemento de la matriz de admitancia correspondiente a la i-ésima fila y j-ésima columna
θ_{ij}	Diferencia de ángulo del voltaje entre las barras i-ésima y j-ésima

N Número de barras

4.4 Restricciones de desigualdad del algoritmo MVMO

Las restricciones de desigualdad se definen tanto a las variables de estado y a las variables de control, las cuales están definidas por los límites de operación del sistema. En este caso se tienen: los límites de flujos máximos a través de las líneas, y los rangos de magnitud de voltaje en las barras del sistema.

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \; i \in N_B \qquad (7)$$

$$S_k \leq S_k^{max} \quad k \in Nl \qquad (8)$$

Donde:

V_i Magnitud del voltaje en la i-ésima barra

N_B Número de barras

S_k Flujo de potencia por la k-ésima línea

Nl Número de líneas

Un sistema de potencia es considerado estable, cuando todas las variables eléctricas se encuentran dentro de los parámetros establecidos, y que al presentarse una contingencia éste puede volver a un punto de equilibrio, garantizando la continuidad y calidad de servicio técnico suministrado a los usuarios [20] [21].

Durante estos eventos o contingencias, el sistema de potencia debe adaptarse a las nuevas condiciones operativas, las cuales van a depender de los elementos que son parte de la red. Un problema de operación de una red es su configuración o reconfiguración con el fin de reducir las pérdidas de potencia del sistema y evitar las sobrecargas en los elementos que lo conforman. La reconfiguración de la red puede ser utilizada para mejorar la eficiencia en cuanto a la operación y a la calidad del servicio [22].

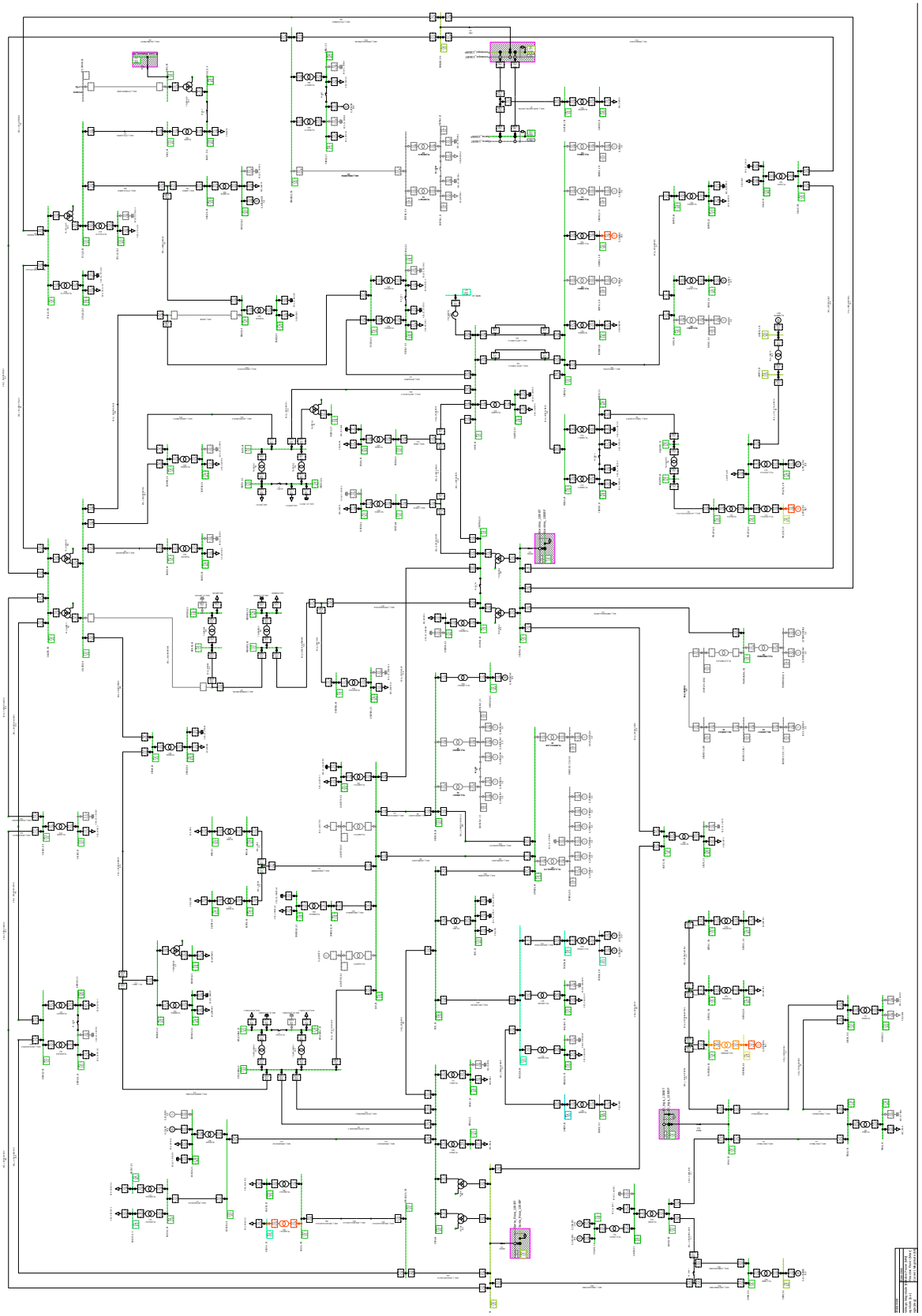


Figura 1: Sistema EEQ modelado en Power Factory DIgSilent [24]

Con lo mencionado anteriormente, se considera como red de prueba el sistema de la EEQ (ver figura 1) modelado en el software de simulación DIgSilent Power Factory, en el cual se ejecutan scripts desarrollados en el lenguaje de programación Python [25], donde ha sido programado el algoritmo MVMO.

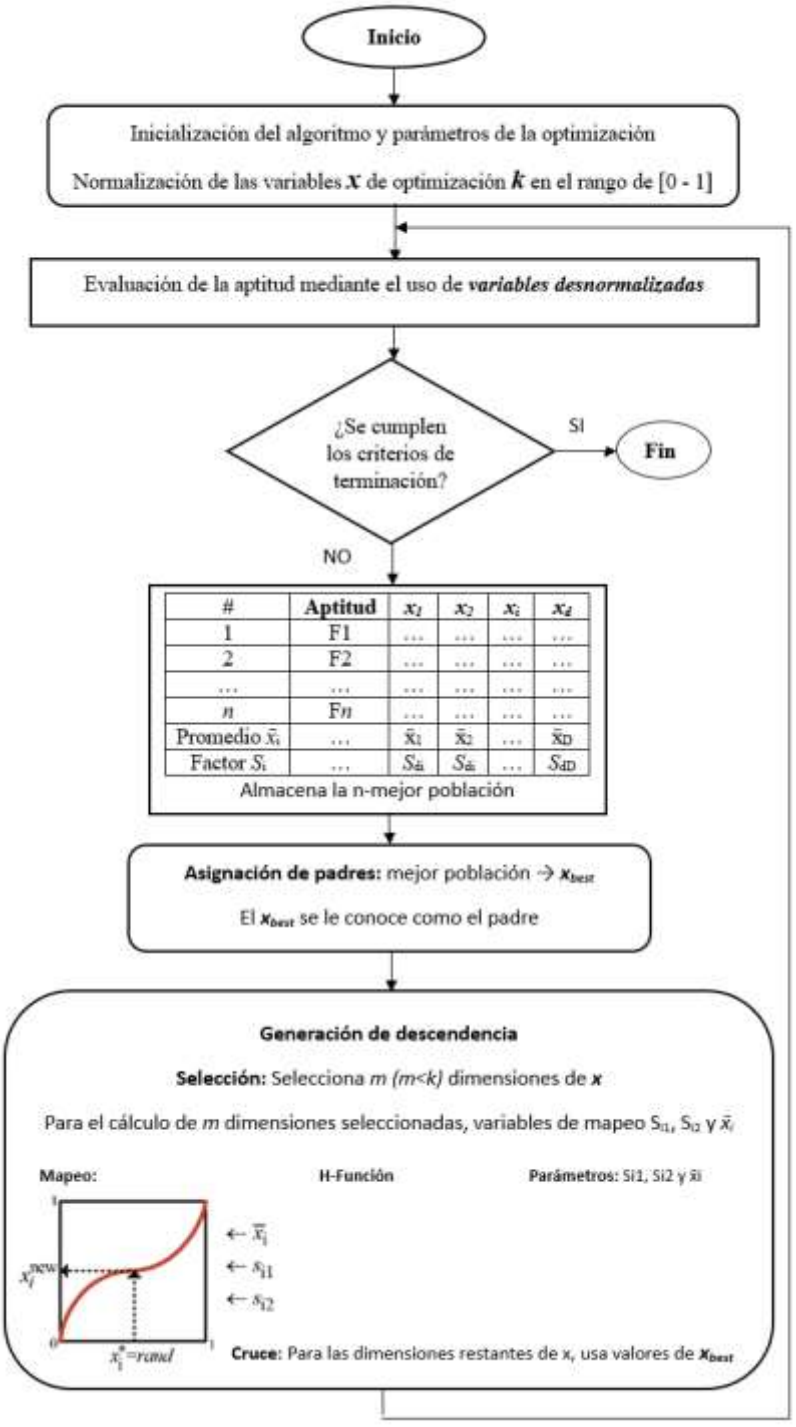


Figura 2: Proceso de búsqueda del algoritmo Mapeo Media – Varianza (MVMO) [25]

Este algoritmo realiza múltiples cálculos de flujos de potencia, para diferentes posiciones de los tap's en los transformadores, la potencia reactiva en los generadores y el estado (conectado/desconectado) de los bancos de capacitores, hasta encontrar el punto de operación del sistema, en el cual las pérdidas de potencia activa sean menores. Esto en base al diagrama de flujo del algoritmo de optimización MVMO (ver figura 2).

Todos estos cálculos están enfocados en un ámbito cuantitativo, es decir, evaluando la potencia activa del sistema de subtransmisión, para posteriormente realizar un análisis de reducción porcentual de estas pérdidas. Este análisis se aplica para cualquier estado de operación del sistema, consideración de demanda, etc.

5. METODOLOGÍA

El algoritmo implementado en Python (ver figura 3) contiene dos scripts, en el primer script se encuentra el código de programación donde se desarrolla el algoritmo de mapeo, media - varianza, el cual se lo ejecuta desde el "Data Manager" en Power Factory, se encuentra dentro de la carpeta "Scripts" en la librería, como se muestra en la figura 4. Mientras que el segundo script, permite verificar como han cambiado los tap's en los transformadores de potencia, y el perfil de voltaje en cada una de las barras del sistema de subtransmisión mientras se ejecuta el algoritmo de optimización MVMO.

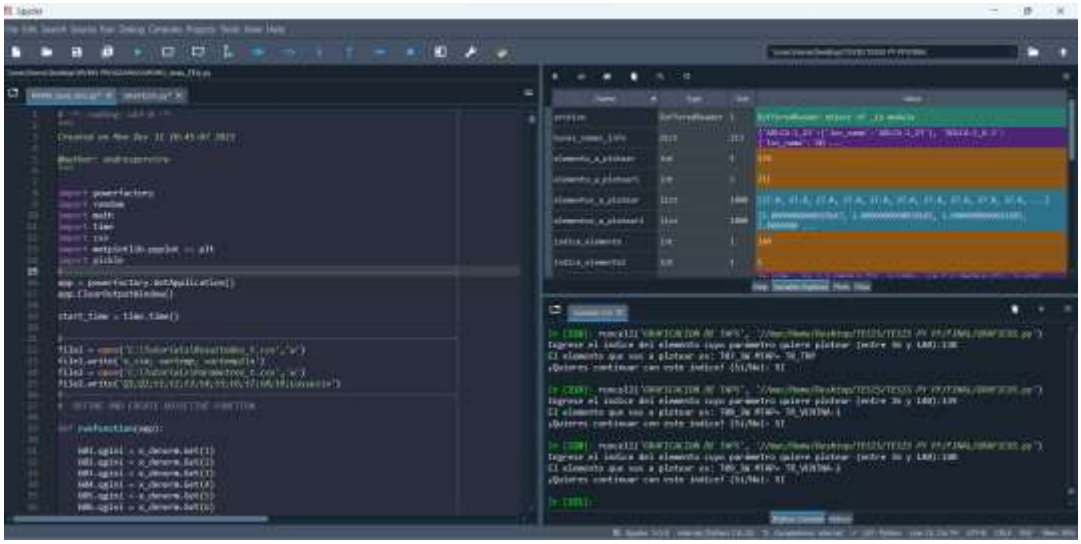


Figura 3: Interfaz Python (códigos de programación) [26]

En este caso en general, se realizará el análisis para demanda máxima, en donde se mostrarán los resultados de los transformadores de potencia más relevantes en el sistema de 138 kV, 69 kV y 46 kV, así como los perfiles de voltaje en estos nodos.

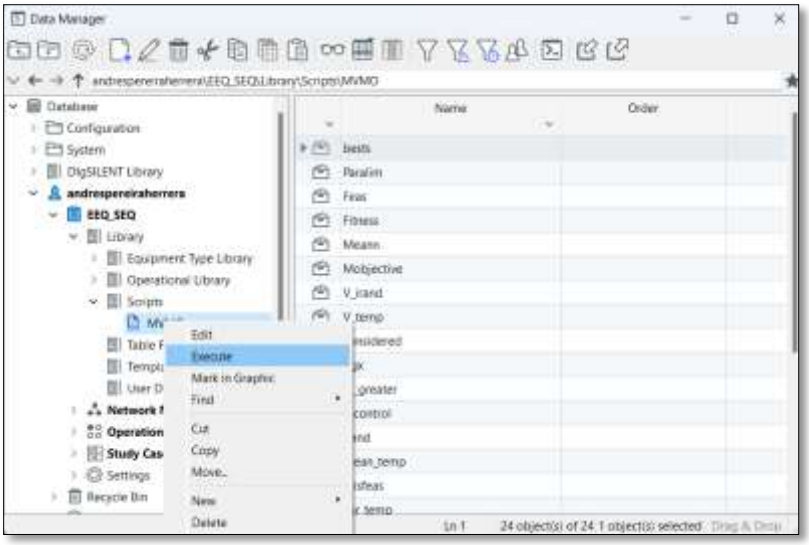


Figura 4: Inicio del algoritmo MVMO desde Power Factory [24]

En la figura 5, se observa la simulación del algoritmo ejecutada en demanda máxima, estableciendo un número de 1000 iteraciones que la pérdida de potencia activa en la primera iteración se encuentra sobre los 14,58 MW, mientras que luego de ejecutarse el script y analizar todas las posibles opciones de operación del sistema se llega a tener una pérdida de potencia de 10,32 MW. La pérdida de potencia activa en porcentaje es del 6.5% con respecto al valor inicial de 11,042 MW calculado en Power Factory.

Además, podemos observar que la reducción del valor de pérdidas de potencia activa es 6.5% con respecto al valor inicial.

Para obtener la posición del tap en cada uno de los transformadores y los voltajes en cada una de las barras del sistema de subtransmisión, se ha tomado como referencia el anexo 1 (documento en Excel), en donde se encuentran listados los elementos del SEP, que se desean graficar.

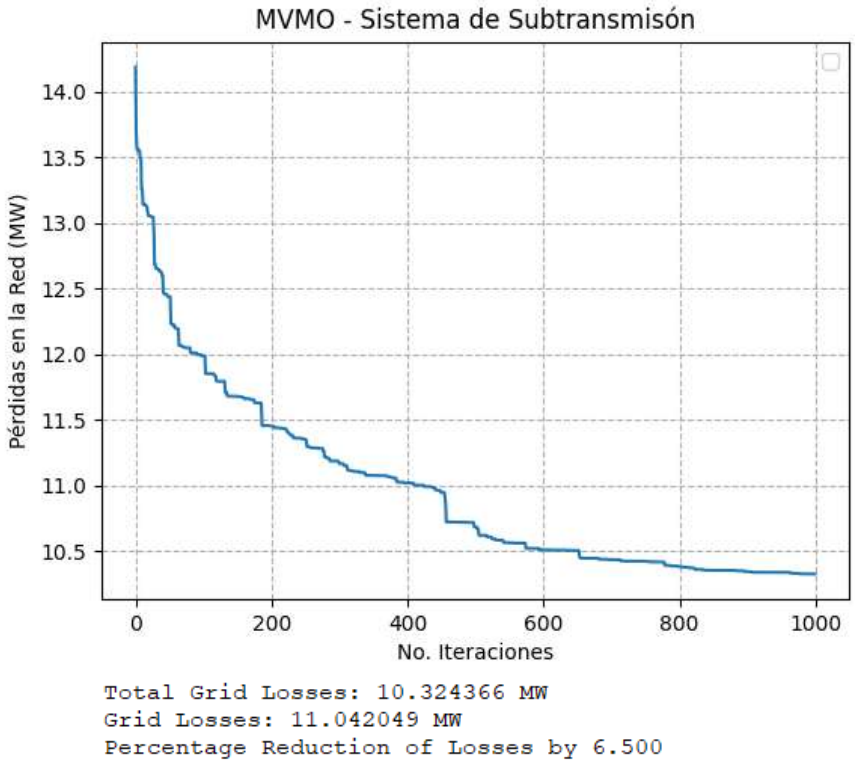


Figura 5: Resultado al finalizar el algoritmo MVMO en Power Factory Demanda máxima

A continuación, se muestra en las figuras dos de los transformadores de potencia donde se puede ver el cambio de sus tap's, y el valor del voltaje en por unidad (p.u) conforme el algoritmo se ejecuta en Power Factory. Mientras que, los resultados obtenidos en los otros transformadores de potencia y sus voltajes, se muestran en el anexo del presente documento.

En este caso se ha tomado en cuenta la Subestación (S/E) Gualo (elemento 70 dentro anexo 1) con un nivel de voltaje de 138 kV, la cual cuenta con un transformador de dos devanados, en la que los tap's se encuentran en el lado de alto voltaje y estos pueden variar en un rango de -8 a 8.

Durante la simulación en la figura 6, se observa el cambio de tap's que ocurren en el transformador de la subestación Gualo durante la búsqueda de la mejor condición operativa para reducir las pérdidas de potencia activa, obtenida en la figura 5, dejando el tap del transformador de potencia en la posición -7.

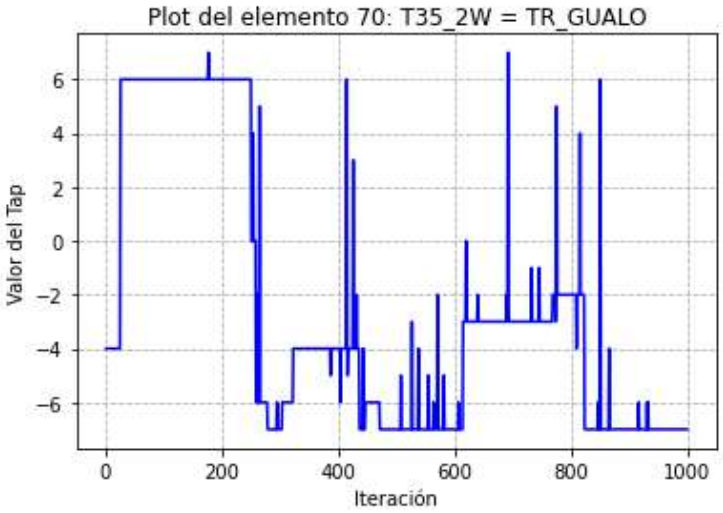


Figura 6: Cambio de tap's TR_Gualo durante la simulación

En la figura 7, en la interfaz de Python se puede confirmar el estado del tap (-7) del transformador de la subestación Gualo en la última iteración de la simulación, considerada en este caso la número 999 debido a que dentro del software la numeración comienza en 0, y de igual forma considerando que el elemento a analizar es el 70, al iniciar el listado en el programa desde 0, la Subestación Gualo se encuentra en el listado en el número 69. Mientras que en la figura 8, verificamos el último estado de la posición del tap al finalizar la simulación en Power Factory.

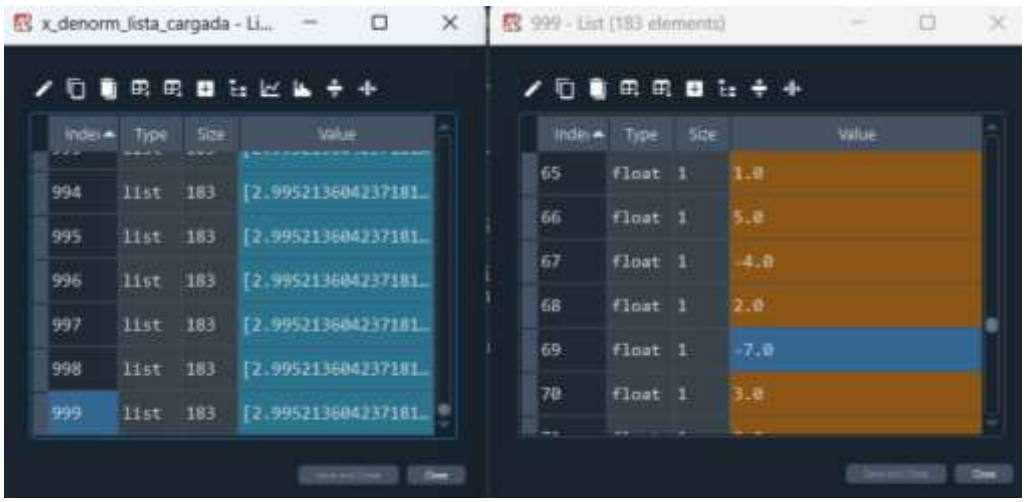


Figura 7: Verificación del tap del TR_Gualo en la ventana de variables de Python

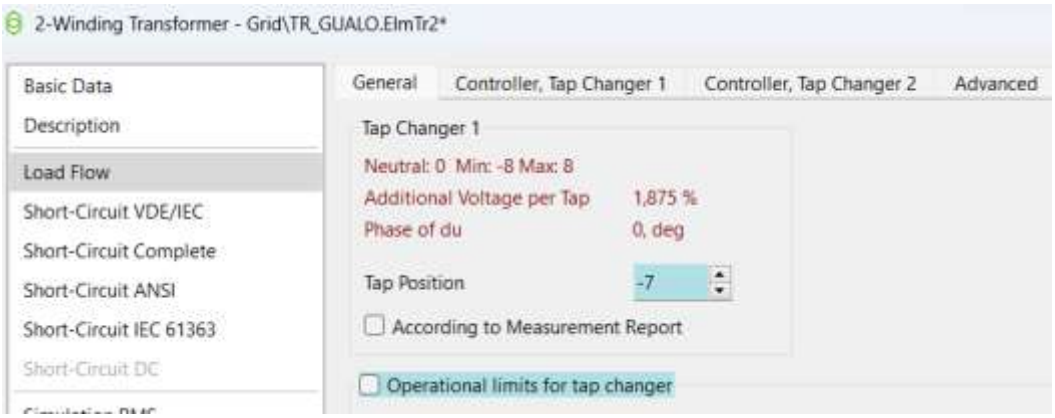


Figura 8: Verificación del tap del TR_Gualo en Power Factory

Los transformadores con tres devanados, tienen el cambiador de tap's en dos de los tres devanados, para este caso puntual en las figuras 9, 10, 11 y 12 se consideran los transformadores de potencia T08 y T09 de la Subestación Vicentina, con los tap's en el primer devanado con un rango de 1 a 5 denominado de alto voltaje "HTAP" y el segundo devanado denominado de medio voltaje con un rango de tap's que va de 1 a 33 "MTAP", (elemento 130 para el T08 y elemento 131 para el T09 de acuerdo al anexo 1) y el segundo devanado denominado de medio voltaje con un rango de tap's que va de 1 a 33 "MTAP" (elemento 139 para el T08 y elemento 140 para el T09 del anexo 1).

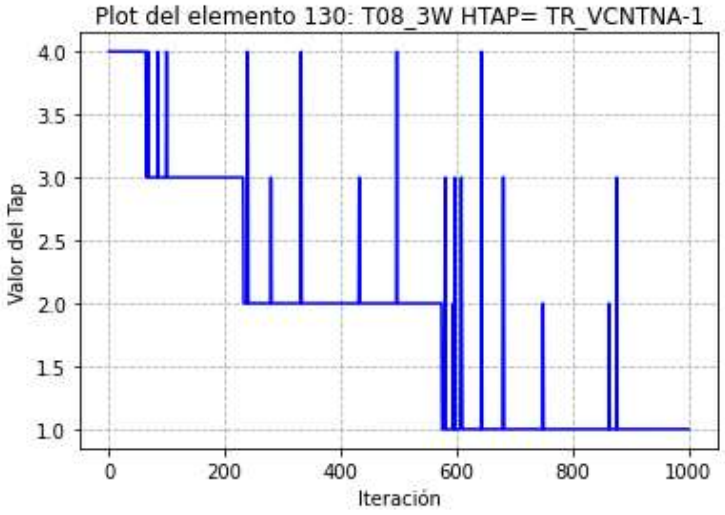


Figura 9: Cambio de tap's en el lado de alto voltaje en el TR_VCNTNA-1 durante la simulación

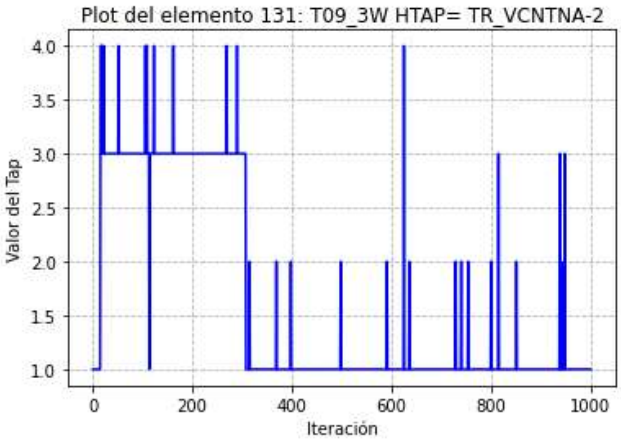


Figura 10: Cambio de tap's en el lado de alto voltaje en el TR_VCNTNA-2 durante la simulación

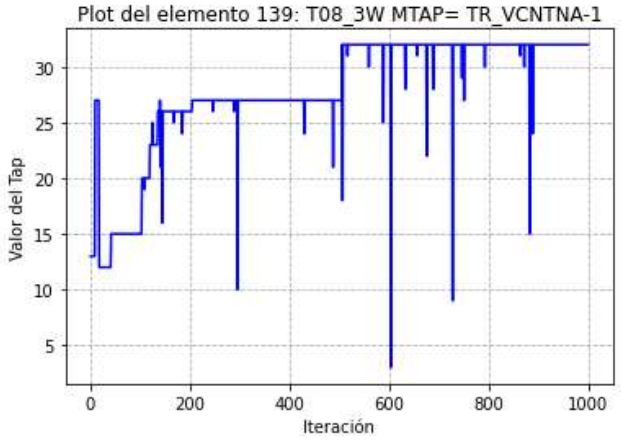


Figura 11: Cambio de tap's en el lado de medio voltaje en el TR_VCNTNA-1 durante la simulación

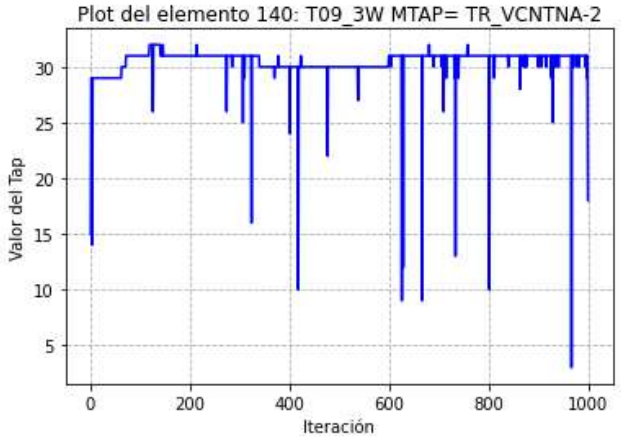


Figura 12: Cambio de tap's en el lado de medio voltaje en el TR_VCNTNA-2 durante la simulación

En las figuras 13 y 14, en la interfaz de Python se puede evidenciar el estado de los tap's, tomando en cuenta lo indicado anteriormente, en los datos obtenidos de la S/E Gualo, y de acuerdo con la lista de variables en Python, los elementos 129 y 130 corresponden a los tap's en el lado de alto voltaje (elementos 130 y 131 según anexo 1), mientras que los elementos 138 y 139 corresponden a los tap's en el lado de medio voltaje (elementos 139 y 140 según anexo 1) en los transformadores T08 y T09 de la subestación Vicentina.

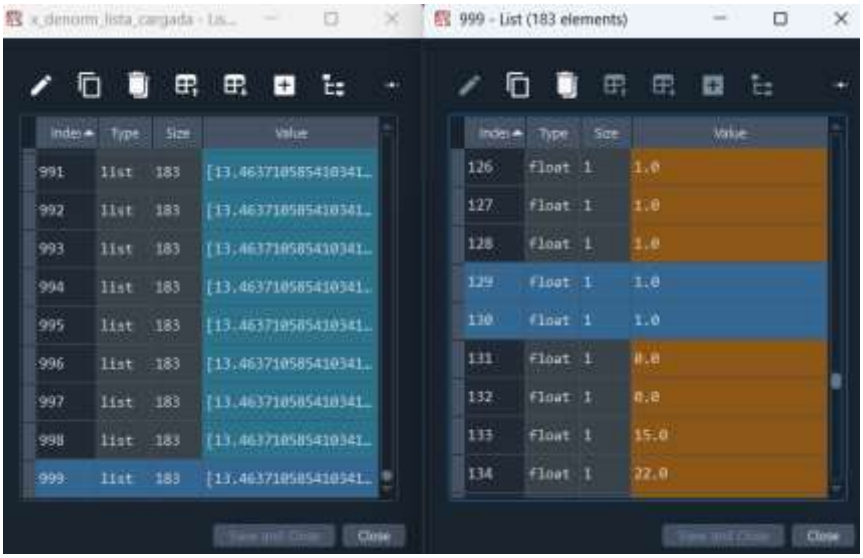


Figura 13: Verificación del tap en HV del TR_Vicentina en la ventana de variables de Python

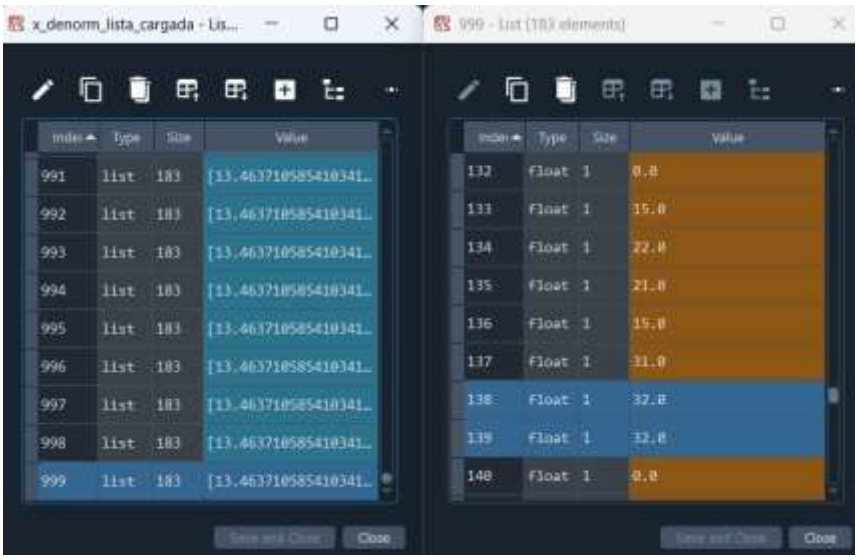


Figura 14: Verificación del tap en MV del TR_Vicentina en la ventana de variables de Python

De la misma forma que el caso anterior, en las figuras 15 y 16, se muestra el valor de los tap's de cada uno de los transformadores (en alto y medio voltaje) al terminar las iteraciones de la simulación.

Figura 15: Verificación del tap del TR_VCNTNA-1 en Power Factory

Figura 16: Verificación del tap del TR_VCNTNA-2 en Power Factory

Con los resultados obtenidos en los gráficos, en el almacenamiento de las variables en Python y en la simulación de Power Factory, se tiene que los tap's en los dos transformadores de la subestación Vicentina para reducir las pérdidas de potencia activa deberán encontrarse en alto y medio voltaje en la posición 1 y 32 respectivamente.

Con respecto a los voltajes en estos puntos, en las figuras 17 y 18 a continuación podemos observar que los niveles de voltaje a 138 kV no varían notablemente, manteniéndose en estas barras (Gualo y Vicentina) en 1 p.u. Tomando en cuenta que el valor final del voltaje, se encuentra dentro de los rangos establecidos por la regulación vigente (±5%).

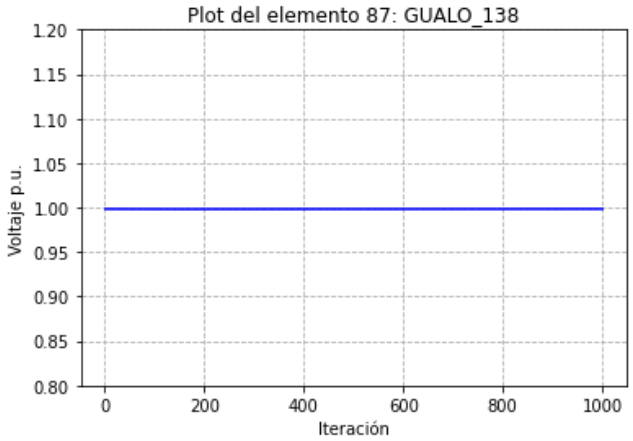


Figura 17: Voltaje en la Barra de la S/E Gualo

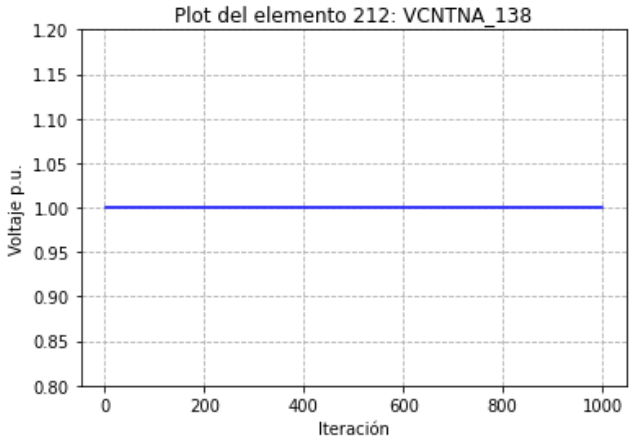


Figura 18: Voltaje en la Barra de la S/E Vicentina

Ahora se realizará una revisión del comportamiento del sistema en los niveles de subtransmisión restantes que tiene al momento la Empresa Eléctrica Quito, (69 kV y 46 kV), mostrando las gráficas del comportamiento de los tap's de los transformadores y de los voltajes en las barras.

A nivel de 69 kV, la EEQ cuenta con una subestación denominada Los Bancos (43 en la lista del anexo 1), a continuación, en la figura 19 se puede ver el cambio de los tap's del transformador de potencia de dos devanados el cual tiene rango de -8 a 8, mientras que la figura 20 muestra el voltaje en la barra de la subestación mientras se ejecuta el algoritmo.

En este caso la posición final del tap en el transformador de la S/E Los Bancos para obtener el menor número de pérdidas de potencia activa debe estar en posición 7.

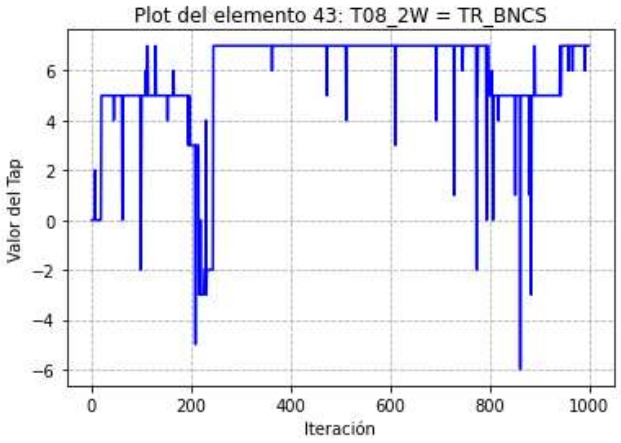


Figura 19: Cambio de tap's en el TR_BNCS durante la simulación

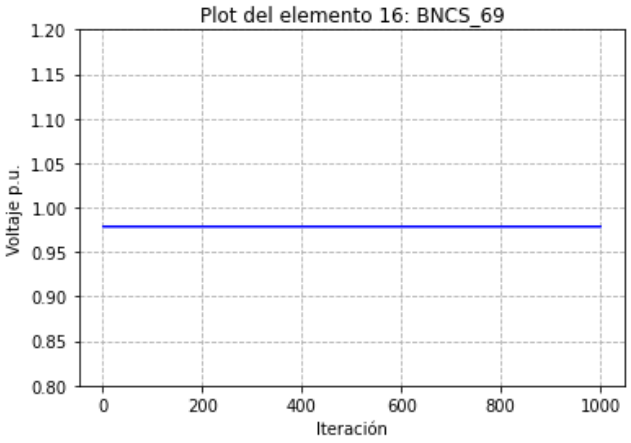


Figura 20: Voltaje en la Barra de la S/E Los Bancos

En este caso al igual que para los casos de 138 kV, en la figura 20 se tiene que el voltaje en la S/E Los Bancos permanece constante con un valor, cercano al 1 p.u y dentro del rango establecido por la agencia de regulación (entre 0.95 y 1.05 p.u).

A nivel de 46 kV de la EEQ, tomaremos como ejemplo la S/E Santa Rosa la cual cuenta con dos transformadores de 2 devanados de 46/23 kV (elementos 117 y 118 dentro del anexo 1) con un rango de cambio de tap's de -8 a 8. En las figuras 21 y 22 se observa el cambio de tap's de los dos transformadores de la S/E Santa Rosa, quedando el T82 en posición -4 y el T83 en posición -5. El perfil de voltaje en esta barra esta dado por la figura 23, donde también se puede observar que éste se encuentra dentro de los valores admisibles dado por la regulación 002/20 del ARCERNNR.

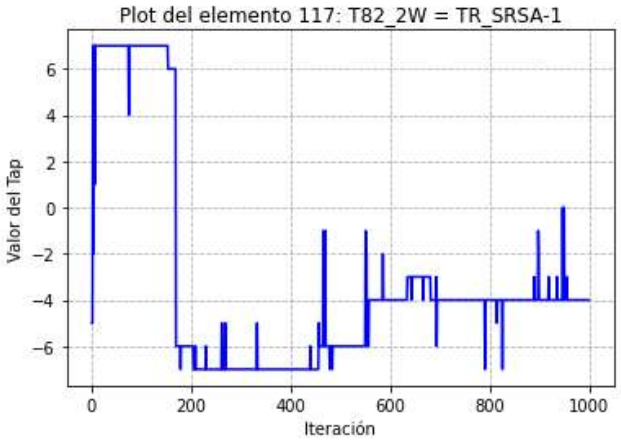


Figura 21: Cambio de tap's en el lado de medio voltaje en el TR_SRSA-1 durante la simulación

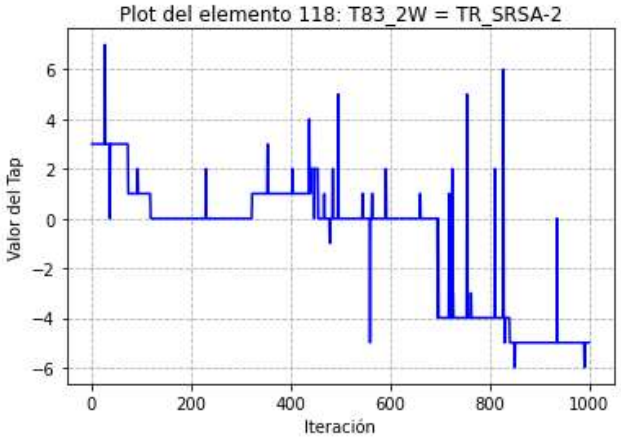


Figura 22: Cambio de tap's en el lado de medio voltaje en el TR_SRSA-2 durante la simulación

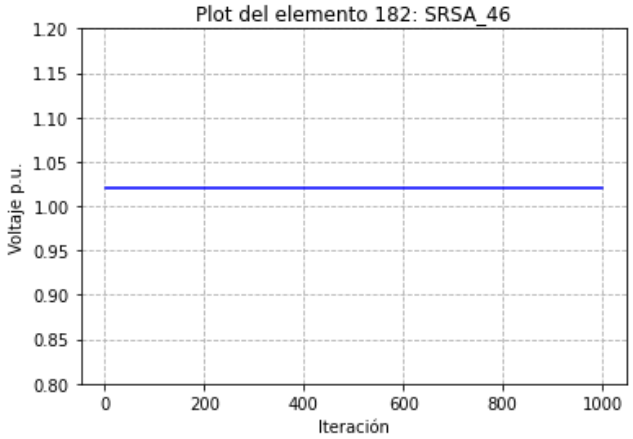


Figura 23: Flujograma de Voltaje en la Barra de la S/E Santa Rosa 46 kV

El algoritmo de optimización de mapeo, media -varianza MVMO, se lo ejecuta de la misma manera para las demandas mínima y media, el resultado va a cambiar dependiendo de las condiciones operativas bajo las que se encuentre el sistema eléctrico de potencia en ese momento, así como de los generadores que se encuentren funcionando en los diferentes horarios.

A continuación, se muestran en las figuras 24 y 25 las curvas con las pérdidas de potencia en las demandas mínima y media respectivamente, mientras que en la figura 26 se puede observar el algoritmo aplicado para demanda máxima con un número establecido de 2000 iteraciones como caso particular, para observar la convergencia del algoritmo con mayor número de iteraciones.

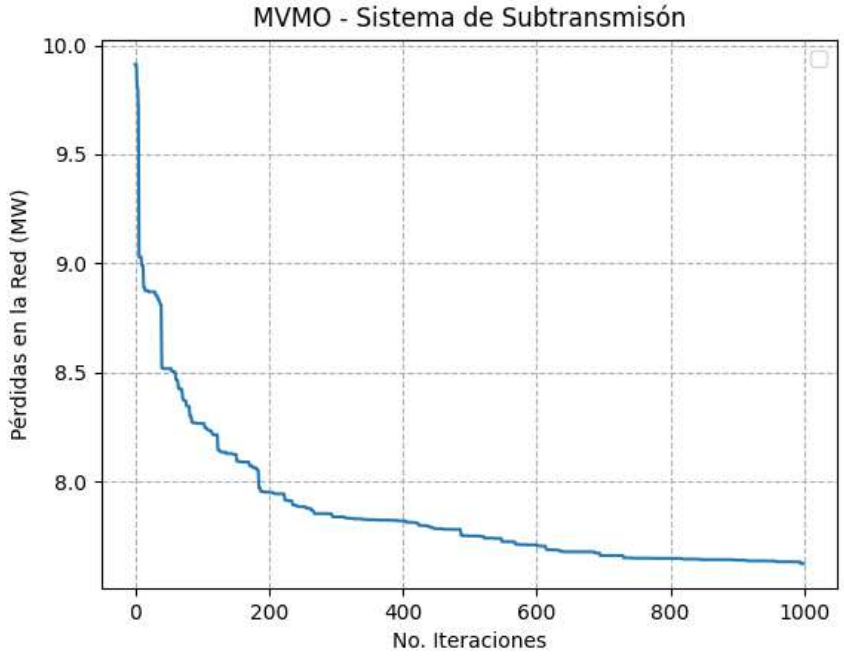
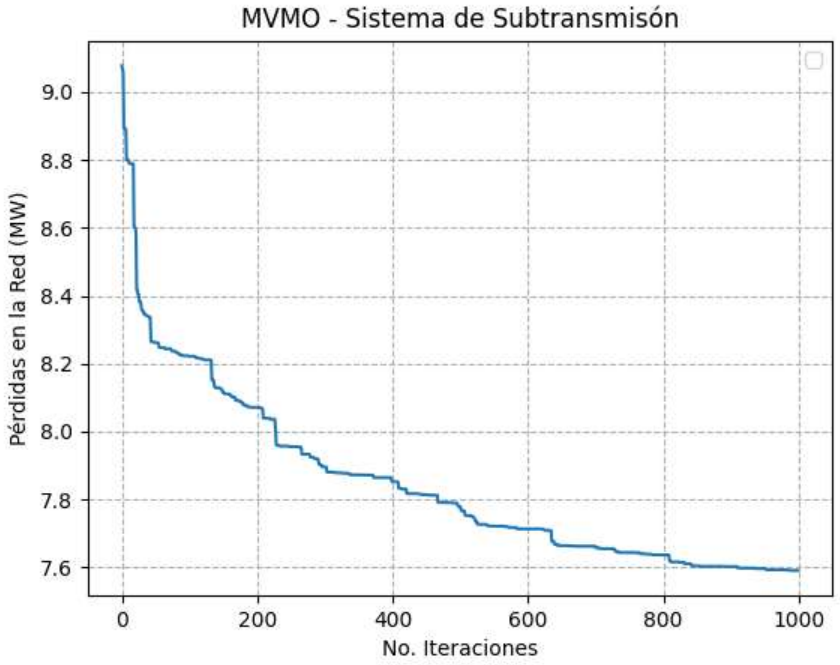


Figura 24: Resultado al finalizar el algoritmo MVMO en Power Factory Demanda mínima




```
Total Grid Losses: 7.591298 MW
Grid Losses: 7.960931 MW
Percentage Reduction of Losses by 4.643
```

Figura 25: Resultado al finalizar el algoritmo MVMO en Power Factory Demanda media

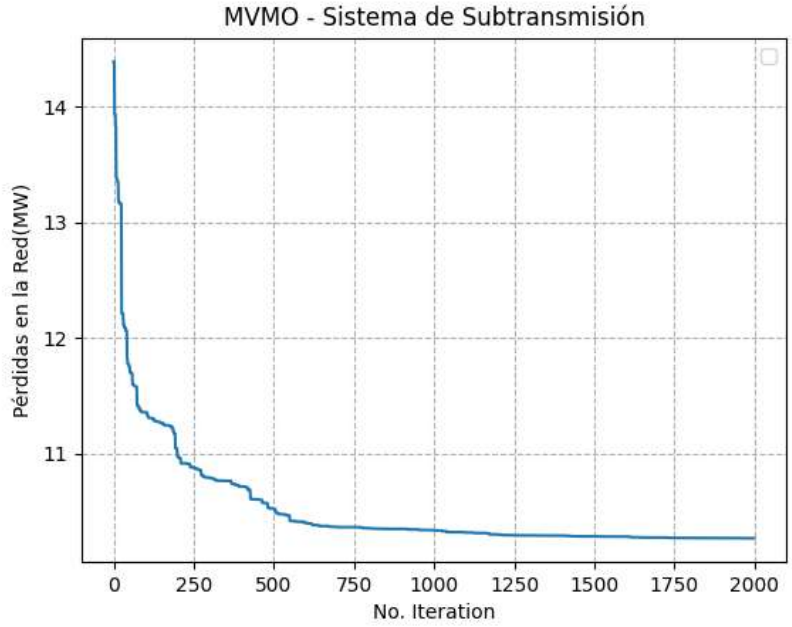


Figura 26: Resultado al finalizar el algoritmo MVMO en Power Factory Demanda máxima con 2000 iteraciones

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al aplicar el algoritmo de optimización MVMO en cada una de las demandas (mínima, media y máxima) desarrolladas en este estudio, se puede determinar el valor de las pérdidas de potencia activa en el sistema de subtransmisión de la EEQ para cada caso, los cuales se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1: Valores de pérdidas de potencia activa en la red de la EEQ

Demanda	Mínima	Media	Máxima
Pérdidas de potencia Activa Inicial en [MW]	7,90	7,96	11,042
Pérdida de potencia en [MW] con el método MVMO	7,62	7,59	10,32
Pérdidas en [%]	3,5	4,6	6,5

Estos porcentajes de pérdidas varían por la hora y la disponibilidad de los equipos (generadores, bancos de capacitores) que se encuentran funcionando en el SEP. Si bien la reducción de las pérdidas de potencia es calculada en un instante de tiempo, es importante considerar que, al sumar estas pérdidas en el transcurso del tiempo, representan un valor considerable al final del día, debido a que el sistema posiblemente no trabaja bajo condiciones adecuadas de operación, y, como se mencionó en el desarrollo de este estudio, el hecho de que el sistema opere dentro de los rangos permitidos de voltaje ,establecidos por el agente regulador de cada región, en este caso la ARCERNNR, no garantiza que el sistema trabaje con pérdidas mínimas de potencia.

Durante la simulación se pueden observar en DIgSILENT Power-Factory el aporte de potencia reactiva y el estado de los bancos de capacitores en cada iteración del método MVMO. Pero si se desea ver el cambio en cada iteración se lo puede realizar de mejor manera en la interfaz de variables en Python una vez que finaliza el algoritmo.

Una vez finalizado el estudio, y al analizar las curvas de las figuras obtenidas durante la simulación, se puede observar que, al comienzo las pérdidas de potencia son considerables, pero, conforme el algoritmo va avanzando, se van encontrando mejores soluciones dentro de los elementos, cuyos estados operativos pueden cambiar (bancos de capacitores, tap's en transformadores y potencia reactiva en generadores), para que las pérdidas vayan disminuyendo. Tomando en cuenta que, las pérdidas de potencia activa no alcanzan valores muy elevados, lo que se logra al aplicar la técnica MVMO es que, conforme transcurre el tiempo, el sistema va encontrando un nuevo punto de operación de estado estable, donde las pérdidas disminuyen, al tiempo que los valores de voltaje en las barras se mantienen constantes, es decir, que el sistema no pierde convergencia durante la búsqueda de la mejor condición operativa.

En el anexo 2, al final de este documento, se muestran los gráficos de los cambios de los tap's de los transformadores de potencia, tanto de dos como tres devanados existentes en el sistema eléctrico de la EEQ, así como los perfiles de voltaje en cada una de las barras que forman parte de la red a nivel de 138 kV, 69 kV y 46 kV, donde se puede observar cómo cambian las posiciones en los transformadores y cómo se mantiene el perfil de voltaje en cada una de las barras mientras se ejecuta la simulación.

La implementación de un algoritmo de optimización permite analizar y evaluar la mejor condición operativa en la que puede operar un sistema eléctrico de potencia, estimando variables o factores que muchas veces no se consideran dentro del funcionamiento del SEP, es por esto que, la reducción de pérdidas de potencia se relaciona directamente con la disminución de costos operativos en el sistema eléctrico.

Un SEP bajo condiciones normales de operación no sufre daños (eléctricos o mecánicos) cuando las condiciones operativas cambian de forma normal, pero se ven afectados al no trabajar en condiciones óptimas, o al ser forzados por cambios bruscos que ocurren inesperadamente en la red (fallas transitorias o permanentes). En este caso, el sistema de la EEQ, al operar con la menor cantidad de pérdidas de

potencia activa, aumenta la disponibilidad de capacidad instalada de la red y a su vez, el sistema podría operar con un menor consumo de electricidad, por lo que, se tienen menores gastos de operación, se reduce la corriente que circula por los elementos de la red y se evita su sobrecalentamiento; alargando la vida útil de los elementos que forman parte de la red.

Tomando en cuenta, que las pérdidas de potencia no son muy elevadas, lo que se logra al aplicar el MVMO es reducir las pérdidas de potencia activa en el SEP, manteniendo los valores de voltaje dentro de los rangos establecidos, como se mencionó anteriormente, esta es una condición (restricción) dentro del algoritmo de optimización, que el valor del voltaje permanezca dentro de los rangos establecidos por la normativa vigente, esto se puede observar en la figura 27 del perfil de voltaje en la barra de la S/E Gualo, donde se establece un rango menor en la escala del voltaje en p.u para verificar que no existen cambios bruscos durante la ejecución del algoritmo.

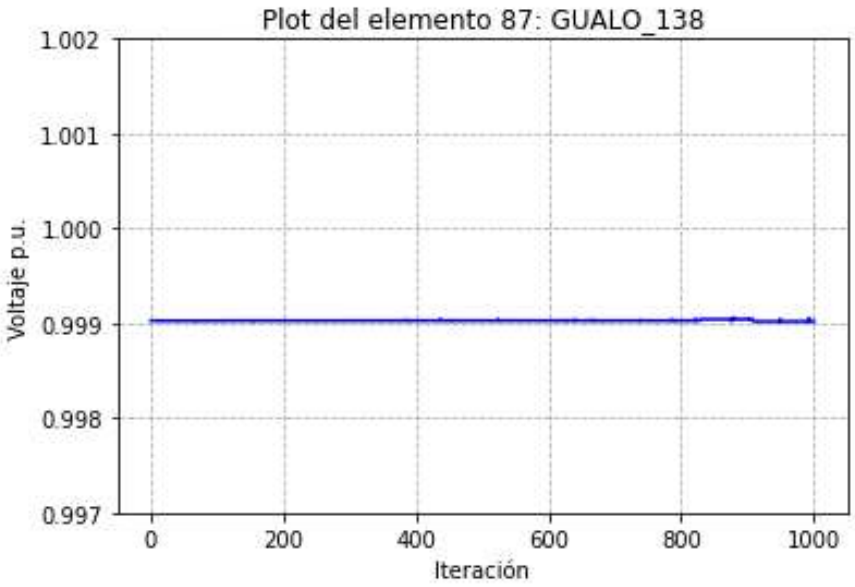


Figura 27: Perfil de voltaje en un menor rango de observación (ejemplo figura 17 Barra S/E Gualo)

Mientras que la tabla 2, muestra los valores de los voltajes en las barras de 138 kV interconexión del Sistema Eléctrico Quito con el Sistema nacional Interconectado (SNI) en condiciones iniciales y el valor final al finalizar el algoritmo de

optimización. Los valores de la potencia reactiva de los generadores, así como de los bancos de capacitores se muestran en los anexos al final de este estudio.

Tabla 2: Voltajes en los Nodos de Interconexión con el SNI

	Demanda Mínima		**Demanda Media**		**Demanda Máxima**	
Nodo de Interconexión al SNI	**Voltaje Inicial [p.u]**	**Voltaje Final [p.u]**	**Voltaje Inicial [p.u]**	**Voltaje Final [p.u]**	**Voltaje Inicial [p.u]**	**Voltaje Final [p.u]**
S/E Santa Rosa	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.02
S/E Pomasqui	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
S/E El Inga Transelectric	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.02
S/E Vicentina	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Donde se puede observar que, al finalizar el algoritmo de optimización los valores de voltajes en cada uno de los puntos de interconexión del sistema eléctrico de la EEQ con el Sistema Nacional Interconectado (SNI) permanecen en su mayoría en el 1.00 p.u.

7. CONCLUSIONES

Elegir el mejor método de optimización para resolver un problema es muy importante en el desarrollo de cualquier investigación, se debe considerar cada uno de los aspectos y elementos que lo conforman. Además, se debe tomar en cuenta la correcta integración y funcionalidad del método que se va a trabajar, para que este no afecte a los parámetros de la simulación durante su ejecución, ya que esto se verá reflejado en los resultados.

El correcto modelamiento de la red, así como cada una de las características de los elementos que forman el sistema eléctrico de la Empresa Eléctrica Quito es fundamental dentro del desarrollo del estudio de optimización de las pérdidas de potencia activa, lo cual, garantiza que la aplicación del algoritmo no tenga problemas en la convergencia de los flujos de potencia.

La programación del algoritmo desarrollado en este trabajo se puede aplicar a cualquier sistema eléctrico de potencia y bajo cualquier condición operativa. En este caso en particular, se tiene que las mayores pérdidas de potencia activa en demanda máxima, alcanzando un valor de pérdidas de 10.32 [MW] y el porcentaje de reducción es del 6.5 % en relación a los 11,042 [MW] en condiciones iniciales de operación del sistema.

La reconfiguración de los tap's de los transformadores de potencia, al aplicarse el algoritmo de optimización MVMO, puede ser utilizada para mejorar la calidad de servicio, técnico y para aumentar la eficiencia de los equipos dado que trabajarán bajo mejores condiciones operativas.

Con la aplicación del algoritmo MVMO se confirma que este método muestra convergencia para buscar una solución óptima y se acerca lo suficiente al óptimo global para resolver el problema planteado de la reconfiguración de los elementos de la red en el sistema de subtransmisión de la EEQ, el mismo que puede ser aplicado en cualquier otro sistema eléctrico.

Se ha demostrado que, el aplicar el algoritmo de optimización, para los diferentes estados del sistema, no afecta el estado operativo del SEP.

Al ampliar el análisis del estudio, incrementando el número de iteraciones a 2000, se puede observar en la figura 24, que el comportamiento de la curva no representa una disminución considerable de las pérdidas ya calculadas, debido a que la curva converge cerca de las 1000 iteraciones, por lo que no influye en el resultado aumentar el número de iteraciones, pero si en el tiempo de procesamiento del algoritmo.

8. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA

[1] Empresa Eléctrica Quito, 2023, Sitio web: https://www.eeq.com.ec/historia

[2] Gustavo Adolfo Segura Bovea, Confiabilidad de Subestaciones, "Propuesta de mejora de confiabilidad en subestación 20 de Julio Asociada al SDL de la ciudad de Barranquilla", Universidad de la Costa, 2018.

[3] J. A. Caicedo Rivadeneira, “Flujo Òptimo de Potencia en Sistemas Eléctricos basado en Criterios de Mínimas Pérdidas de Potencia Activa usando el Método del Gradiente”, Universidad Politécnica Salesana Sede Quito, Marzo 2022.

[4] Sarfaraz, A. Bansal, and S. Singh, “Optimal allocation and sizing of distributed generation for power loss reduction,” IET Conf. Publ., Vol. 2016, no. CP700, pp. 15–20, 2016.

[5] J. Carpentier and G. Grundmeier, “Chemical structure and morphology of thin bilayer and composite organosilicon and fluorocarbon microwave plasma polymer films,” Surf. Coatings Technol., vol. 192, pp. 189–198, Mar. 200.

[6] M. F. Hossain, S. Chowdhury, and M. O. Khan, Optimization of Colorimetric β-Hematin Formation Assay Method for Antimalarial Drug Leads Screening. 2017.

[7] M. Gavrilas, «Heuristic and Metaheuristic Optimization Techniques with Application to Power Systems,» Power System Department-“Gheorghe Asachi” Technical University of Iasi Romania, 2010.

[8] R.X Loor Toro, “Reconfiguración de redes de Distribución de Eléctrica basada en optmimización de Mapeo Media - Varianza”, Escuela Politécnica Nacional, 2014.

[9] F. F. Mesut E.Baran, “Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, Nº 2, pp. 1401-1407, April 1989.

[10] M. B. C. d. Oliveira, Reconfiguração de alimentadores em sistemas de distribuição usando a metaheurística Grasp, Dissertação de Mestrado - UNESP, Maio 2011.

[11] S. V. L. N. M. R. R. A. S. R. Rayapudi Srinivasa Rao, “Optimal Network Reconfiguration of Large – Scale Distribution System Using Harmony Search Algorithm”, IEEE Transactions on Power System, vol. 26, Nº 3, pp. 1080-1088, Agosto 2011.

[12] O. G.-B. A. S.-A. Paola Pezzinia, “Optimization techniques to improve energy efficiency in power systems”, ELSEVIER-Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011.

[13] H. B. Flores Terán, “Desarrollo de una Metodología Multimáquina para la Ubicación y Sintonización de Estabilizadores de Sistemas de Potencia de forma Automática”, Escuela Politécnica Nacional, 2016.

[14] R. M. Tapia López, “Control Óptimo de Potencia Reactiva en un parque Eólico Mar adentro con enlace HVDC”, Escuela Politécnica Nacional, 2016.

[15] ARCERNNR. Resolución Nro. 003/2023, Regulación 002/20, Calidad del Servicio de Distribución y comercialización de energía eléctrica, Ecuador 2023.

[16] H. Amaris, M. Alonso, C. Álvarez Ortega, “Reactive Power Managment of Power Networks with Wind Generation”, Springer, 2013.

[17] J. Rimez, "Optimal Power Flow Modeling of Hybrid AC/DC Systems" en "HVDC Grids For Offshore and Supergrid of the Future", IEEE Press & Wiley, 2016.

[18] I. Erlich, W. Nakawiro y M. Martínez, “Optimal Dispatch of Reactive Sources in Wind Farms”, 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting.

[19] G. Migliavacca, "Advanced Technologies for Future Transmission Grids", Springer 2013.

[20] Kundur, P. “Power System Stability and Control”. Mc-Graw-Hill, 1994.

[21] Flores, H. “Estudio de Estabilidad de Pequeña Señal en el Sistema Nacional Interconectado Aplicando el Método de Análisis Modal” Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Ecuador, Septiembre 2004.

[22] F. F. Mesut E.Baran, «Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing,» IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, nº 2, pp. 1401-1407, April 1989.

[23] L. A. Pereira Herrera, “Análisis y Determinación de tiempos de Recierres Tripolares en Líneas de 138 kV y 46 kV de la Empresa Eléctrica Quito”, Escuela Politécnica Nacional, 2017.

[24] DIgSILENT PowerFactory.(2012). User Manual. Gomaringen, Germany.

[25] Cepeda, J.; Rueda, J. L.; Erlich, I.; Korai, A.; F. Gonzalez-Longatt,“MeanVariance Mapping Optimization Algorithm for Power System Applications in DIgSILENT PowerFactory” PowerFactory Applications for

Power System Analysis Book, Chapter 12, Springer International Publishing, 2014.

[26] Spyder IDE, The scientific Python Development Environment (3.8.10), 2021.

9. ANEXOS

9.1. Tabla de Contenido Elementos considerados para el algoritmo MVMO en Excel

9.2. Valores de potencia reactiva en los Generadores y Banco de Capacitores en Excel

9.3. Scripts de Programación MVMO y figuras en Python (archivos en CD)

9.4. Archivo en DIgSilent Power Factory de la EEQ (archivo en CD)

9.5. Cambio de tap's al aplicar el Algoritmo MVMO en demanda máxima

9.6. Perfil de voltaje en las Barras del SEP de la EEQ al aplicar el Algoritmo MVMO en demanda máxima

9.7. Cambio de tap's al aplicar el Algoritmo MVMO en demanda media

9.8. Perfil de voltaje en las Barras del SEP de la EEQ al aplicar el Algoritmo MVMO en demanda media

9.9. Cambio de tap's al aplicar el Algoritmo MVMO en demanda mínima

9.10. Perfil de voltaje en las Barras del SEP de la EEQ al aplicar el Algoritmo MVMO en demanda máxima