

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

PROYECTO INTEGRADOR

**DESPACHO ÓPTIMO DE POTENCIA REACTIVA PARA
COMPENSADORES ESTÁTICOS DE POTENCIA REACTIVA
EN RED DE DISTRIBUCIÓN.**

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Electricidad

Presentado por:

Alex Emanuel Marca Cabanilla

José Francisco García Salinas

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2021

DEDICATORIA

A Dios, por su amor de permitirme llegar a esta meta con salud, paz y con la familia unida.

A mis queridos padres, Manuel y Esperanza, por su gran esfuerzo, paciencia y apoyo incondicional.

A mis hermanos, Lissbeth y Steven, por la alegría y apoyo emocional que supieron brindarme.

A mi querida Romina, por brindarme su afecto y motivación en los momentos de incertidumbre.

Alex Marca

Quiero dedicar este logro principalmente a mis amados padres Alexandra y Julio César, que con su amor y sacrificio han hecho posible que yo haya llegado hasta este nivel de formación. Además, quisiera dedicarlo también a mis hermanos Andrés y Verónica, a mis 3 hermosos sobrinos Emmy, Nicholas y Evaluna, a mis cuñados Manolo y Lisbeth. Dedicado también a la memoria de mi abuelo Mumo, a mi abuelo Ernesto, y a mis abuelas Delia y Teresa. Para terminar, quisiera dar gracias a todos los que me han apoyado en mi

formación académica.

José

F. García S.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos en primer lugar a Dios por habernos mantenido con salud plena hasta estas instancias de nuestras vidas.

Un profundo agradecimiento a los profesores MSc. Iván Endara y MSc. Manuel Álvarez, quienes, con su guía y gran apoyo, fue posible la realización de esta tesis.

Un agradecimiento a nuestra universidad, a los profesores y compañeros que contribuyeron a nuestra formación académica.

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Alex Emanuel Marca Cabanilla y José Francisco García Salinas damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Sr. Alex Emanuel Marca
Cabanilla



Sr. José Francisco
García Salinas

EVALUADORES

Dr. Renan Xavier Zambrano Aragundi

PROFESOR DE LA MATERIA

MSc.Iván David Endara Vélez

PROFESOR TUTOR

Ph.D. Manuel Sebastián Álvarez Alvarado

PROFESOR COTUTOR

RESUMEN

En la presente tesis se realiza un programa de gerenciamiento para la optimización de reactivos en un sistema de distribución teniendo en cuenta la compensación por parte de los dispositivos SVCs, los cuales ayudarán a reducir las pérdidas de energía, llevando al sistema a un ahorro considerable de dinero y a mantener la calidad de servicio energético.

El capítulo 1 comienza refiriéndose a las características de los sistemas de distribución, principalmente al comportamiento variado de las cargas, lo cual causa una degradación o elevación de voltaje, al aumentarse o disminuirse respectivamente; además se presenta las causas de las pérdidas de energía, lo cual es el objetivo principal por reducir.

La metodología es expuesta en el capítulo 2, se dan a conocer la función objetivo, las variables necesarias para el estudio y el método de optimización a utilizar, el PSO.

El estudio se lo realiza sobre el sistema IEEE 30 barras, el cual es brevemente descrito en el capítulo 3, los valores iniciales del sistema son obtenidos por el flujo de potencia de Gauss-Seidel, para luego realizar la búsqueda de la ubicación y despacho óptimo del SVC, y finalmente presentar los resultados obtenidos del estudio a corto y largo plazo, con los cuales se concluye en el capítulo 4 que la implementación del programa resulta factible, teniendo una considerable disminución de pérdidas y manteniendo el sistema dentro de los límites deseados.

Palabras Clave: Optimización de Reactivos, PSO, SVC, IEEE 30 barras, Sistemas de Distribución

ABSTRACT

This thesis carries out a management program for the optimization of reactive power in a distribution system considering compensation by SVCs devices, which will help reduce energy losses, leading the system to considerable savings of money and maintain the quality of energy service.

Chapter 1 begins by referring to the characteristics of distribution systems, mainly the varied behavior of loads, which causes voltage degradation or elevation, as they are increased or decreased respectively; there are also the causes of energy losses, which is the main objective to be reduced.

The methodology is shown in Chapter 2; the objective function, the variables necessary for the study and the optimization method to be used, the PSO, are disclosed.

The study is carried out on the IEEE 30 bus system, which is briefly described in Chapter 3, the initial values of the system are obtained by the Gauss-Seidel power flow, and then perform the search for the optimal location and dispatch of the SVC, and finally present the results obtained from the short- and long-term study, which concludes in Chapter 4 that the implementation of the program is feasible , having a considerable decrease in losses and keeping the system within the desired limits.

Keywords: *Reactive Power Optimization, PSO, SVC, IEEE 30 Bus, Distribution Systems*

ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES.....	6
RESUMEN.....	7
ABSTRACT	8
ÍNDICE GENERAL	9
ABREVIATURAS.....	11
SIMBOLOGÍA.....	12
ÍNDICE DE FIGURAS	13
ÍNDICE DE TABLAS.....	15
CAPÍTULO 1.....	16
1. Introducción	16
1.1 Descripción del problema	18
1.2 Justificación del problema	18
1.3 Objetivos	19
1.3.1 Objetivo General.....	19
1.3.2 Objetivos Específicos.....	19
1.4 Marco teórico.....	19
1.4.1 Estructura del sistema eléctrico de potencia.....	19
1.4.2 Operación de sistemas eléctricos	26
1.4.3 Problemas que existe en un sistema de distribución	28
1.4.4 Pérdidas de potencia en el sistema.	31
1.4.5 Regulación de voltaje.....	31
1.4.6 Compensador	32
1.4.7 SVC	33
1.4.8 Métodos de Optimización Metaheurísticos	35
CAPÍTULO 2.....	36

2.	Metodología	36
2.1	Almacenamiento de parámetros de sistema eléctrico	37
2.1.1	Archivo de parámetros de barra.....	37
2.1.2	Archivo de parámetros del ramal	39
2.2	Desarrollo del Flujo de Potencia.....	40
2.2.1	Construcción de Matriz Admitancia.....	40
2.2.2	Consideraciones para el desarrollo del flujo de potencia	42
2.2.3	Formulación para el desarrollo del Flujo de Potencia por el método de Gauss Seidel.....	44
2.3	Desarrollo del modelo metaheurístico de enjambre por partículas (PSO)....	47
CAPÍTULO 3.....		54
3.	Resultados y análisis	54
3.1	Programa de optimización	54
3.2	Reducción óptima de las pérdidas de energía	55
3.3	Calidad del voltaje suministrado	57
3.4	Ahorro en término monetarios	58
3.5	Otras posibles soluciones.....	60
3.6	Estudio del sistema a futuro	64
CAPÍTULO 4.....		68
4.	Conclusiones y recomendaciones	68
	Conclusiones.....	68
	Recomendaciones.....	69
BIBLIOGRAFÍA.....		70
5.	Bibliografía.....	70
ANEXOS.....		73

ABREVIATURAS

VAN	Valor Actual Neto
TIR	Tasa de Retorno Interno
PSO	Particle Swarm Optimization
SVC	Static Var Compensator
STATCOM	Static Compensator
FACTS	Flexible AC Transmission System
ARCONEL	Agencia de Regulación y Control de Electricidad

SIMBOLOGÍA

KWh	kilovatio hora
GWh	gigavatio hora
MWh	megavatio hora
\$	Dólares americanos
MVar	megavar
kW	kilovatio
Var	var

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Estructura de parámetros de barra.....	38
Figura 2.2 Estructura de parámetros de ramal	40
Figura 2.3 Ejemplo de topología del sistema en valor de admitancia.....	41
Figura 2.4 Metodología de búsqueda de ubicación y despacho óptimo de reactivos	48
Figura 2.5 Diagrama de flujo de valores de pérdidas eléctricas iniciales	49
Figura 2.6 Diagrama de Flujo del modelo de optimización PSO aplicado a la búsqueda de despacho óptimo de reactivos.	51
Figura 3.1 Menú principal del programa	54
Figura 3.2 Perfil de despacho de reactivos de lunes a viernes en barra 30.	55
Figura 3.3 Perfil de pérdidas eléctricas de lunes a viernes, sin y con compensador en barra 30.	56
Figura 3.4 Perfil de pérdidas eléctricas de sábado y domingo, sin y con compensador en barra 30.	56
Figura 3.5 Perfil de voltaje máximo suministrado por el sistema sin y con compensador en la barra 30.	57
Figura 3.6 Perfil de voltaje mínimo suministrado por el sistema sin y con compensador en la barra 30.	58
Figura 3.7 Flujo de potencia medio en las líneas del sistema sin y con compensador en la barra 30.	58
Figura 3.8 Curva de Valor Actual Neto por la aplicación del SVC en barra 30.....	59
Figura 3.9 Perfil de pérdidas eléctricas de lunes a viernes, sin y con compensador en barra 29.	60
Figura 3.10 Perfil de pérdidas eléctricas de sábado y domingo, sin y con compensador en barra 29.	61
Figura 3.11 Curva de Valor Actual Neto por la aplicación del SVC en barra 29.....	62
Figura 3.12 Perfil de pérdidas eléctricas de lunes a viernes, sin y con compensador en barra 21.	63
Figura 3.13 Perfil de pérdidas eléctricas de sábado y domingo, sin y con compensador en barra 21.	63
Figura 3.14 Curva de Valor Actual Neto por la aplicación del SVC en barra 21.....	64

Figura 3.15 Proyección de ahorro energético por compensador en barra 30.....	66
Figura 3.16 Proyección de ahorro económico por compensador en barra 30	66
Figura 3.17 Curva de Valor Actual Neto por la aplicación del SVC en barra 30 y escenario de crecimiento de carga.....	67
Figura 5.1 Sistema eléctrico IEEE 30 barras	73
Figura 5.2 Menú Principal del Programa	79
Figura 5.3 Menú de Análisis de Flujo de Potencia.....	80
Figura 5.4 Menú de Análisis de Ubicación y Despacho Óptimo de Reactivos.....	80
Figura 5.5 Menú de Análisis de Despacho Óptimo de Reactivos	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Despacho de reactivo máximo y mínimo de lunes a viernes.	56
Tabla 3.2 Pérdida de energía y ahorro energético semanal y anual por compensador en barra 30.	57
Tabla 3.3 Ahorro económico semanal y anual por compensador en barra 30	59
Tabla 3.4 Costo de inversión y mantenimiento anual del compensador SVC +/- 20 MVAR en barra 30.....	59
Tabla 3.5 Pérdida de energía y ahorro energético semanal y anual por compensador en barra 29	61
Tabla 3.6 Ahorro económico semanal y anual por compensador en barra 29	61
Tabla 3.7 Pérdida de energía y ahorro energético semanal y anual por compensador en barra 21	63
Tabla 3.8 Ahorro económico semanal y anual por compensador en barra 21	64
Tabla 3.9 Proyección de ahorro energético y económico por compensador en barra 30	65

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas eléctricos de potencia se encuentran conformados por los subsistemas de generación, transmisión y distribución. Se conoce que la mayor parte de las centrales generadoras se encuentran muy alejadas de los puntos de consumo, de manera que para lograr llegar a los usuarios se realiza el uso de los sistemas de transmisión y distribución, siendo este último de gran importancia debido a que es el camino final en la entrega de energía a la mayoría de los consumidores, los cuales se encuentran dispersos en grandes y vastas regiones [1].

El incremento en la demanda de energía eléctrica debido a la penetración de las nuevas industrias y la constante expansión de los sistemas eléctricos de distribución ha dado lugar a varios problemas en cuanto a la viabilidad y estabilidad de estos, afectando principalmente a la calidad, eficiencia y costo de la energía [2]. Entre los principales problemas que se puede evidenciar en las redes (o tendidos) de distribución se encuentran lo que son las pérdidas de energía, limitaciones en la cargabilidad de las líneas y un muy diverso (o variado) perfil de voltaje [3].

Se conoce que los problemas anteriormente expuestos pueden llegar a ser solucionados ya sea por la integración de la generación distribuida o la reconfiguración de la red con el montaje de nuevas líneas [4]. Sin embargo, con el avance de la tecnología utilizada en las redes, específicamente en el control y protección de las mismas se posee una alternativa distinta, conocida como los dispositivos FACTS (Flexible AC Transmission Systems), equipos basados en electrónica de potencia, los cuales que permiten realizar un despacho de potencia reactiva o activa en el sistema, y con ello buscar mejorar la capacidad y estabilidad del mismo [5].

La disminución de las pérdidas de energía en la red y el control de la estabilidad de voltaje son los objetivos principales de estos dispositivos. Cuando no se requiere

de una potencia activa extra en la red, estos objetivos pueden ser relacionados y dados con el control del perfil de voltaje en las barras del sistema; para realizar este control se puede basar simplemente al manejo de la potencia reactiva, en donde se encuentra a un dispositivo específico de la familia de los FACTS, el SVC [6].

Refiriéndose principalmente a la entrega de reactivos en la red, el SVC posee una compensación reactiva más sensible que los métodos convencionales como el del uso de banco de capacitores. El posicionado de los SVCs se lo realiza ya sea en las barras o líneas en donde más se lo requiera, debido a esto se dice que se realiza una compensación de forma local; el uso de estos dispositivos resulta muy beneficioso en vista de que sus costos de inversión y operación son muy reducidos en comparación a la implementación de nuevas generadoras o líneas paralelas [7].

Si bien el control se lo maneja de forma local esto influye en la estabilidad de todo un sistema debido a que podría darse un colapso de tensión de forma global, teniendo en sí una serie de eventos que crea un decrecimiento colosal del voltaje en una gran parte del sistema [8]. La estabilidad de voltaje es también conocida como estabilidad de carga, La carga al poseer un comportamiento variado durante distintas épocas del año produce que el voltaje fluctúe debido a la relación que existe entre la carga y la corriente; al ser la carga mayor existirá una corriente de mayor magnitud provocando caídas de tensión en la red, lo que se observa como bajones de tensión (subtensión), por el contrario, al existir menores cantidades de carga habrá menores caídas de tensión en ciertos casos puede que los equipos compensadores o los equipos que suministran energía a la red produzcan una sobretensión en el sistema, por eso además de la colocación de estos dispositivos compensadores de reactivos, se realiza también un manejo y control del correcto y óptimo despacho de potencia reactiva en estos compensadores (en los mismos), teniendo en consideración la máxima reducción de pérdidas de potencia y las limitantes presentes en el sistema.

En este estudio se plantea un algoritmo de optimización basado en el método enjambre de partículas para obtener un óptimo resultado en cuanto a la reducción de pérdidas de potencia y disminución de las fluctuaciones de voltaje en las barras del sistema.

1.1 Descripción del problema

El manejo de los niveles de voltaje se encuentra directamente relacionado con las variaciones de potencia reactiva. Actualmente con el desarrollo constante del comercio e industrias, y el incremento en la densidad poblacional han provocado el crecimiento en la carga instalada en los sistemas de potencia, esta carga posee un comportamiento variado durante distintas épocas del año, pudiendo tener elevaciones de consumo específicamente de potencia reactiva, causando una degradación en el perfil de voltaje del sistema, en cambio en demanda mínima es posible encontrarse con elevaciones de voltaje en el sistema, estos niveles de voltaje poseen límites que no deben ser superados, para mantener el nivel del voltaje nominal en las barras del sistema. Los dispositivos FACTS, especialmente los equipos SVC, utilizados en esta tesis, están diseñados para desaparecer de manera rápida las limitaciones de voltaje, en la actualidad con el desarrollo de la inteligencia artificial, el monitoreo y control de estas señales se ha vuelto más eficaz, por consiguiente las distribuidoras han optado por la aplicación de estas nuevas tecnologías para minimizar la mayor cantidad de pérdidas eléctricas, por ende pérdidas económicas, manteniendo también la calidad y eficiencia del sistema eléctrico dentro de los estándares adecuados.

1.2 Justificación del problema

La presencia de severas o pequeñas perturbaciones, además de la posibilidad de la incorrecta operación en el despacho de la potencia reactiva en los sistemas eléctricos de potencia producen que estos sean susceptibles a eventos de sobretensión o subtensión. Los sectores que proveen energía no desean perder o tener daño en sus equipos de generación debido a

variaciones de tensión causadas ya sea por perturbaciones intencionales o no intencionales, perdiendo así de facturar consumos debido a la posibilidad de energía no suministrada, o al desperdicio de potencia extra entregada a la red. Las cargas residenciales o industriales también se ven afectadas debido a la posible inestabilidad de tensión que puede ocurrir en el sistema, este tipo de problemas terminan provocando un grave daño a los equipos eléctricos y electrónicos que poseen y por ende una pérdida monetaria significativa. Debido a esto se observa la necesidad de la elaboración de adecuados programas que entreguen un correcto despacho de potencia reactiva, teniendo en consideración la máxima reducción de las pérdidas de potencia, considerando todas las limitantes presentes en el sistema.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Elaborar un programa de gerenciamiento para compensadores de potencia reactiva basado en el modelo metaheurístico enjambre de partículas orientado hacia la reducción de pérdidas eléctricas y mejora del perfil de voltaje en los sistemas de distribución.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Encontrar y realizar la comparación de varias soluciones para conocer cual obtendría la mayor cantidad de ahorro de dinero según el costo medio de energía en el Ecuador
2. Elaborar una guía para el correcto uso del programa de gerenciamiento

1.4 Marco teórico

1.4.1 Estructura del sistema eléctrico de potencia

Los sistemas eléctricos de potencia se encuentran conformados por una vasta cantidad de redes las cuales se encuentran interconectadas entre sí,

estos se encuentran conformados los subsistemas de generación, transmisión y distribución [1].

1.4.1.1 Sistemas de Generación y transmisión

El sistema de generación está compuesto por diferentes tipos de centrales proveniente de varias clases de energía, como la hídrica, eólica, mareomotriz, térmica y nuclear, cuya función final es la de transformar la energía mecánica proveniente de ellas en energía eléctrica; además en la actualidad se ha visto la inclusión de las centrales fotovoltaicas, las cuales aprovechan la energía solar para obtener energía eléctrica [9].

Durante la operación de un sistema de potencia es importante mantener la igualdad entre la generación y la carga, con el fin de que el sistema trabaje (o funcione) a un nivel aproximadamente constante de frecuencia, para que no existan problemas en la red; el despacho de potencia que realizan las generadoras tiene como objetivo principal lo antes mencionado procurando suplir a la demanda y que esta sea de forma óptima en el ámbito económico [8].

Debido a aquello se realiza lo que es una clasificación de las centrales de generación, como la clasificación de las centrales en Ecuador mostrada en la figura 1.1, por su tipo de operación, entre las cuales se tiene a:

- **Las Centrales Base**
La característica de este tipo de centrales como su nombre lo indica es de mantener la base en el suministro de potencia hacia la red, usualmente son centrales que poseen un menor costo operativo y una entrega continua de potencia; estas centrales solamente son desconectadas de la red en caso de emergencia o por mantenimientos programados.
- **Las Centrales Punta**
Este tipo de centrales presentan una rápida respuesta al desbalance entre la generación y demanda, usualmente se encargan de los picos de las

curvas de carga, además al tener un coste de operación intermedio es preferible que estas mantengan un rango bajo de entrega de potencia, entre estas se encuentran a las centrales termoeléctricas.

- Las Centrales Intermedias
La característica de este tipo de centrales es que su costo de operación se encuentra en un valor lo bastante alto para no permitir que su operación sea de forma continua como una central base, mas no tan alto como para que opere como una central punta.
- Las Centrales de Reserva y Emergencia
Estas centrales poseen un coste muy alto de operación, lo cual implica que sean empleadas solamente en casos de emergencia por fallas las centrales anteriormente mencionadas.

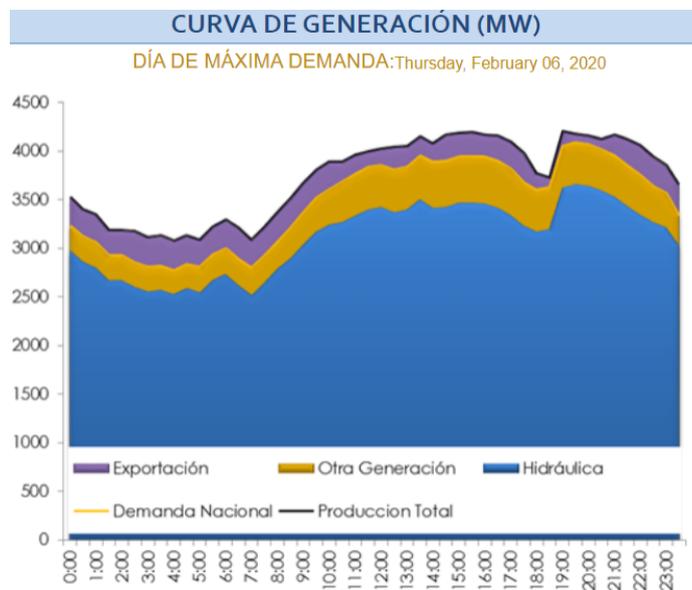


Figura 1.1 Curva de generación de energía eléctrica 2020 en Ecuador [10]

De manera habitual las centrales se encuentran ubicadas en lugares muy lejanos a los puntos de consumo, lo cual hace un poco difícil la entrega

directa de la energía, por lo tanto, se sirven del sistema de transmisión y distribución para manejo de la misma [11].

Los sistemas de transmisión se encargan de transportar grandes bloques de energía provenientes de las centrales antes expuestas, estos sistemas por lo usual tienen muchos kilómetros de tendido, y debido a eso sus niveles de tensión son muy elevados, los más altos dentro del sistema, estos niveles varían dependiendo del país y la región, comúnmente pueden ir desde los 230 kV para arriba. Los sistemas de transmisión son más sencillos de operar [1].

1.4.1.2 Sistema de Distribución

En los sistemas de potencia se puede llegar a confundir la supuesta presencia de otro subsistema, estos son los llamados sistemas de subtransmisión, los cuales en sí son considerados pertenecientes al sistema de distribución, debido a que los grandes consumidores suelen tener la alimentación para sus empresas a partir de estos, desde aquel momento ya se considera la existencia de una distribución de energía, los niveles de tensión presentes en estos continúan siendo elevados, usualmente se encuentran desde los 40 kV para arriba [12].

Considerando esto, se puede decir que el sistema de distribución empieza (o comienza) en la subestación principal de potencia, desde el transformador de potencia, el cual reduce los niveles del sistema de transmisión, usualmente estos tipos de transformadores manejan potencia de cientos de mega watios (MW); luego, las subestaciones de distribución, las cuales manejan potencias dentro de las decenas de MW, son las encargadas de recibir la alimentación proveniente de los sistemas de subtransmisión y las reducen a niveles considerados como media tensión, valores que van desde los 0,6 kV a los 40 kV en voltaje línea a línea, nivel al cual se encuentran los llamados alimentadores primarios, los cuales se encargan de conducir la energía a los transformadores de distribución de

los cuales se derivan los alimentadores secundarios a un nivel de tensión bajo, niveles menores a 600V fase a fase [12].

Todos los valores de voltaje de transmisión y distribución antes expuestos son referidos a redes aéreas y a los niveles comunes del sistema nacional interconectado del Ecuador.

Los sistemas de distribución son considerados los sistemas de mayor complejidad debido a la cantidad de ramales o tendidos que poseen estos en sus redes primarias y secundarias, además del desbalance de carga en las líneas que se puede presentar en el sistema.

1.4.1.3 Cargas

La carga es el punto final en la transferencia de la energía en los sistemas de potencia, esta juega un rol muy importante debido a que es un factor influyente en la planificación del sistema eléctrico; para ello se requiere de la realización de un pronóstico a largo y corto plazo que consideren factores como densidad de carga, crecimiento de la población, factores geográficos, ambientales, proyectos comunitarios e industriales y fuentes de energía alternativa [2].

Existen diferentes maneras de clasificar a las cargas eléctricas en un sistema de potencia común como el de la figura 1.2, estas pueden ser de acuerdo al tipo de usuario, sensibilidad, o por tarifas. Para referirse a todas las clases se puede decir que las cargas residenciales, son comúnmente alimentadas a niveles bajos de tensión debido a su baja potencia de consumo, estas son usualmente monofásicas; por otra parte, las cargas comerciales son comúnmente trifásicas con un consumo medio de potencia, y alimentadas por niveles bajos y medios de tensión; en cambio las cargas industriales son normalmente trifásicas y alimentadas a niveles medios o altos de tensión, debido a su gran consumo de potencia. Hay que tener en cuenta que para cada nivel de servicio puede poseer una tarifa distinta, siendo la tarifa más baja para los consumidores en alta tensión [1].

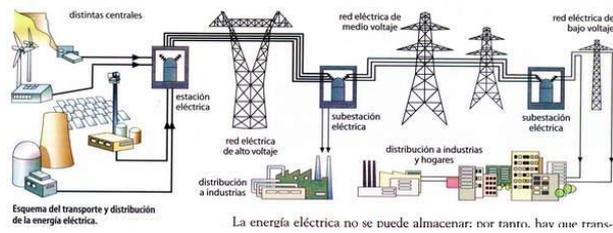


Figura 1.2 Transmisión de Energía [1].

Lo más importante de todo es que se debe tener en cuenta que la carga posee un comportamiento variado durante distintas épocas del año como lo muestra la figura 1.3, dependiendo del sector al que esta pertenezca ya sea este comercial, industrial o residencial, además de depender de la ubicación geográfica de los consumidores.



Figura 1.3 Ejemplo de curva de carga diaria [13].

Todo esto se convierte en un factor importante en el estudio del perfil de voltaje y el factor de potencia de la red, debido a que puede existir épocas del año, periodos de un mes, o durante un periodo del día en el cual exista una alta cantidad de consumo de potencia produciendo que exista una excesiva cantidad de corriente debido a la demanda presentada, lo que implicaría en mayores cantidades de pérdidas y la posibilidad de voltajes bajos del nivel adecuado, además puede existir una alta demanda de

potencia reactiva por parte de las industrias que poseen una gran cantidad de motores.

1.4.1.4 Introducción de la generación Fotovoltaica a las redes de Distribución

La inclusión de la generación fotovoltaica en las redes de distribución ha traído consigo varios beneficios en cuanto a reducciones de contaminantes al medio ambiente y un mayor grado de confiabilidad en la entrega de energía, siendo este tipo de generación la de mayor integración futura, si los problemas a su introducción lograsen ser resueltos. El principal problema que se puede evidenciar con la penetración de la generación fotovoltaica, figura 1.4, es el incremento en los niveles de voltaje, los cuales podrían sobrepasar los límites permitidos en la red; este incremento se da debido a que en ciertos casos y a ciertas horas del día existirá una excesiva producción de potencia por parte de los generadores fotovoltaicos, esta potencia extra será usualmente entregada a la red causando el alza de voltaje [14].



Figura 1.4 Generación distribuida en base a energía renovable (Solar) [15].

El constante crecimiento de la carga y la rápida y abundante introducción de la generación fotovoltaica traerá consigo la expansión de la red eléctrica, creación de nuevos ramales, subestaciones, y los problemas anteriormente expuestos relacionados a ellos; debido a eso se ve

necesario referirse a los servicios auxiliares utilizados en las redes de distribución [4].

1.4.1.5 Servicios Auxiliares

Los servicios auxiliares juegan un papel muy importante para mantener la operación de una forma confiable, y dentro de los estándares adecuados de un sistema de distribución. Son conocidos como la asistencia adicional a la generación de potencia activa entregada, ya sea esta asistencia entregada por el sector público o privado de electricidad [4].

Lo principal es mantener la calidad de producto (de la energía) dentro de los niveles debidos, los fenómenos que se pueden dar y se deben analizar son los de:

- Amplitud de la onda de voltaje, factor que limita la capacidad de generación que se puede entregar al sistema de distribución
- Límite transmisión de energía
- Desequilibrio de tensión
- Variaciones transitorias de tensión por inversores en los sistemas de potencia
- Variación de la frecuencia del sistema
- Factor de potencia
- Distorsión armónica
- Estabilidad del sistema de distribución
- Pérdida de potencia

1.4.2 Operación de sistemas eléctricos

Balance de Potencia:

El balance de potencia se da cuando potencia demandada, más las pérdidas posibles en el sistema es igual a la potencia generada por parte de los generadores o equipos compensadores.

Límites de los suministros de potencia activa y reactiva:

Cada una de las unidades de generación de potencia activa o reactiva poseen un límite máximo de entrega de a la red y un límite mínimo al cual al ser encendido pasa a entregar este nivel de potencia.

Rampa:

El cambio de potencia que puede existir de un momento a otro, ya sea en aumento o en descenso, estos generadores de potencias poseen límites de variación en un instante de tiempo a eso se lo conoce como rampa.

Reserva de fuente:

Valor de potencia que permanece disponible para ingresar a la red ante alguna contingencia posible, esta reserva puede ser fría o rodante, la reserva fría se trata de generadores que se encuentran apagados por lo que tardarían tiempo para poder ser encendidos y la reserva rodante son los generadores que se encuentran en movimiento y ya listos para ser ingresado en un tiempo muy pequeño a la red.

Restricciones de red:

Existen restricciones de transmisión, la potencia de transmisión a través de los ramales en la red debe ser menor al valor máximo de seguridad.

En la operación de un sistema de potencia existen dos términos muy importantes, los cuales son despacho económico y decisión de arranques, ambos tienen como objetivo entregar de forma óptima un resultado de entrega por parte de las unidades suministradoras de energía.

Decisiones de arranques (Unit Commitment, UC)

Las decisiones de arranques que se puede dar a largo plazo, un estudio realizado para varias horas, o días, se define como la repartición energética demandada por la carga variable, la cual es entregada por las unidades de generación y los servicios auxiliares [16].

Despacho económico (Economic Dispatch, ED)

El despacho económico realiza un estudio a corto plazo, prácticamente en el instante en el que la carga tiene una variación continua para encontrar el punto óptimo en el cual se entregue la potencia activa o reactiva [16].

1.4.3 Problemas que existe en un sistema de distribución

En los sistemas de distribución se puede evidenciar varias dificultades, son sistemas de una mayor complejidad que los de transmisión y generación, en este capítulo se presenta de una manera más detallada los problemas que ocurren en un sistema de distribución [1].

1.4.3.1 *Caída de tensión*

Perfil de voltaje

El perfil de voltaje de un sistema eléctrico, como se puede observar en la figura 1.5, entrega información sobre el nivel de voltaje en cada barra cuando se mantiene una carga dada, este facilita la visualización de las posibles caídas o elevaciones de voltaje, además de que ayuda a conocer los puntos de mayor riesgo, puntos más vulnerables en los que pueda ocurrir una inestabilidad. (referencia) Entregan una ubicación aproximada en donde quizás sea necesario equipos que regulen el voltaje de la red.

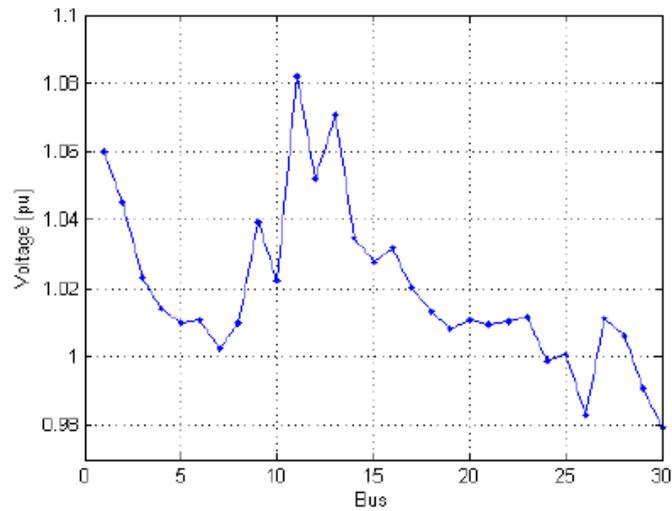


Figura 1.5 Perfil de Voltaje.

1.4.3.2 **Estabilidad**

El termino estabilidad indica mantener en equilibrio un sistema o volver a dicho estado de equilibrio tras sufrir una perturbación, entonces se define a la estabilidad de un sistema de potencia como la propiedad de mantener un estado de operación normal o recuperar un nivel permisible de equilibrio luego de haber sufrido una condición anormal debido a una perturbación del sistema, esta recuperación puede darse de forma autónoma o con ayuda de los sistemas de control [17] [18].

La estabilidad de los sistemas de potencia puede ser clasificada como la figura 1.6, teniendo en cuenta la variable del sistema perturbado (ángulo del rotor, frecuencia o voltaje), la dimensión de la perturbación (pequeña o grande), y además del intervalo de tiempo de la misma (a corto o largo plazo) [19].

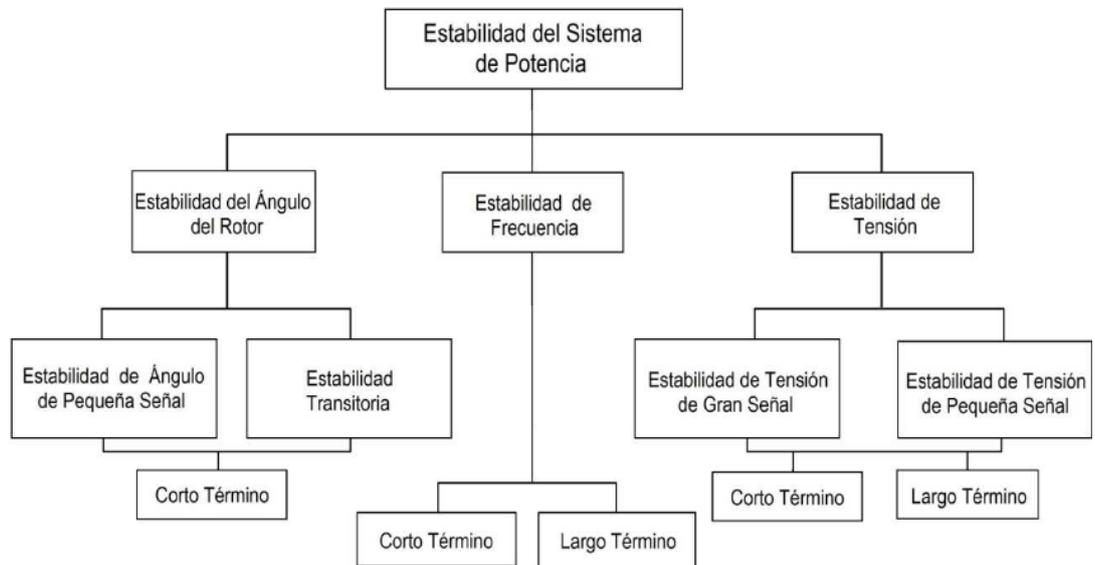


Figura 1.6 Clasificación de la Estabilidad del Sistema de Potencia [20].

Estabilidad de voltaje

Por lo tanto, se puede decir que la estabilidad de voltaje es la capacidad de mantener el voltaje dentro de un rango de operación aceptable luego de haber ocurrido una perturbación que forme un desajuste en el sistema, esta puede clasificarse en:

- a) **Estabilidad de voltaje por severas perturbaciones:** Es la capacidad de mantener el voltaje estable cuando el sistema se ve afectado por grandes y severas perturbaciones como fallas, cortocircuitos, pérdida de generación o cambios considerables en la carga.
- b) **Estabilidad de voltaje de pequeña perturbación:** Es la capacidad de mantener el voltaje estable cuando el sistema se ve afectado debido a cambios incrementales en la carga del sistema.

1.4.3.3 Caída de tensión e Inestabilidad de voltaje

Uno de los parámetros más importantes en la calidad de la entrega de energía es la señal de voltaje, esta se debe mantener próximos a los valores nominales [1]. Las caídas de voltaje ocasionan varias clases de problemas en las cargas como equipos domésticos, motores y otros

dispositivos consumidores de energía eléctrica; la caída de voltaje en las líneas de transmisión se debe a la cantidad de corriente que pasa fluye en ellas, esta corriente al pasar por la resistencia y reactancia del conductor se ve reducido el nivel de voltaje, debido a esto se presentan también lo que son las pérdidas de energía en los sistemas [1].

1.4.4 Pérdidas de potencia en el sistema.

Las pérdidas de potencia en los sistemas de distribución resultan ineludibles, más usualmente se trata de reducirlas en lo mínimo posible. Los sistemas de distribución no se encuentran solamente comprendidos por transformadores y líneas de distribución; y a pesar de que exista una pérdida de potencia en todos los equipos de la red, estos dos son los de mayor cuantía.

Se conoce que los transformadores son equipos de una elevada eficiencia, aun así, hay existencia de pérdidas de potencia activa y reactiva en el mismo. En cuanto a las pérdidas activas estas se dan en el acero debido a corrientes parásitas y en los devanados por efecto Joule, las cuales dependen de la carga a la que se encuentre sometido el transformador. Por otro lado, las pérdidas reactivas se dan en la magnetización del equipo y además por el flujo de dispersión presente en el transformador. En las líneas de distribución existirá pérdidas por efecto Joule en los conductores, en la cual se podrá tener una relación directa entre la caída de tensión y le pérdida de potencia activa al despreñar la componente reactiva de la caída de tensión debido a que esta suele ser mínima comparada a la componente activa; existe también pérdidas pequeñas en los aislamientos de los conductores, por pequeñas cantidades de corrientes presentes en los mismos [1].

1.4.5 Regulación de voltaje

Para mantener un orden en las señales de tensión en los sistemas de potencia y no exista inestabilidad en ellos, se realiza el control de las

mediciones de tensión en periodos de tiempo, este registro de señales es comparado con los valores nominales del sistema. Usualmente regulaciones en el mundo sugieren que los niveles de tensión deben encontrarse entre 0.95 y 1.05 en valores de por unidad, mas en el sistema eléctrico ecuatoriano las variaciones de voltaje admitidas en base al voltaje nominal van según la figura 1.7.

	Subetapa 1	Subetapa 2
Alto Voltaje	± 7,0 %	± 5,0 %
Medio Voltaje	± 10,0 %	± 8,0 %
Bajo Voltaje. Urbanas	± 10,0 %	± 8,0 %
Bajo Voltaje. Rurales	± 13,0 %	± 10,0 %

Figura 1.7 porcentajes de variación del voltaje nominal permitidos en Ecuador [21].

Soluciones para regular el voltaje y reducir las pérdidas de energía

Existen diferentes alternativas que pueden solucionar los problemas de tensión y desperdicio de energía, entre estas están:

- Los reguladores de tensión
- Transformadores con cambio de derivaciones bajo carga
- Compensadores de potencia reactiva

1.4.6 Compensador

El compensador es un dispositivo eléctrico - electrónico empleado para mejorar la estabilidad y calidad de potencia, control de voltaje, compensación reactiva de potencia, incremento de capacidad de transmisión [1]. Los compensadores se clasifican de acuerdo con su tipo de conexión en compensadores en serie y en paralelo.

Compensador en Serie

El compensador en serie es empleado para reducir la reactancia inductiva de la línea mejorando la estabilidad de voltaje, el amortiguamiento de la resonancia subsíncrona, la estabilidad transitoria y el incremento de capacidad de transmisión.

Los compensadores en serie se clasifican en:

- Compensador en serie controlado por tiristor (TCSC)
- Reactor en serie conmutado por tiristores (TSSR)
- Reactor en serie controlado por tiristores (TCSR)
- Capacitor en serie conmutado por tiristores (TSSC)
- Compensador estático síncrono en serie (SSSC)

Compensador en paralelo

El compensador en paralelo es empleado para mejorar la estabilidad y calidad de voltaje reduciendo flickers y desbalanceo, la amortiguación de oscilaciones de potencia, el factor de potencia.

Los compensadores en serie se clasifican en:

- Compensador estático de VAR (SVC)
- Compensador estático síncrono (STATCOM)

1.4.7 SVC

El SVC realiza en el sistema de distribución una compensación de reactivos de una manera más sensible en comparación a los capacitores o reguladores convencionales de voltaje; en los recientes años estos equipos han ayudado a realizar el control del perfil de voltaje y estabilidad de la misma.

Para explicar lo que es la compensación reactiva por parte de los SVCs se puede referirse a la siguiente analogía, imagine un sube y baja, con pesos a los extremos, estos representan los reactivos de la fuente y de la carga, como la figura 1.8. Para mantener un equilibrio ambos pesos deben ser iguales, no es necesario ningún tipo de compensación reactiva.

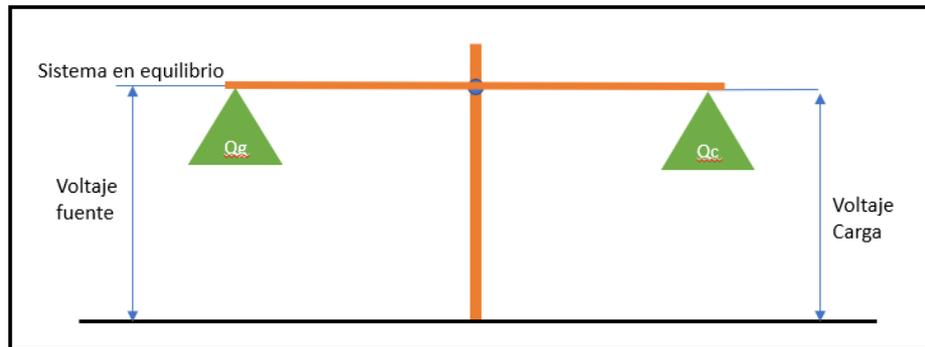


Figura 1. 8 Sistema generación carga reactiva en equilibrio

Ahora suponga que el peso de la fuente de reactivos se mantiene fijo y que varía el peso de la carga, distorsionando el funcionamiento nominal del sistema, mostrado en las figuras 1.9 y 1.10.

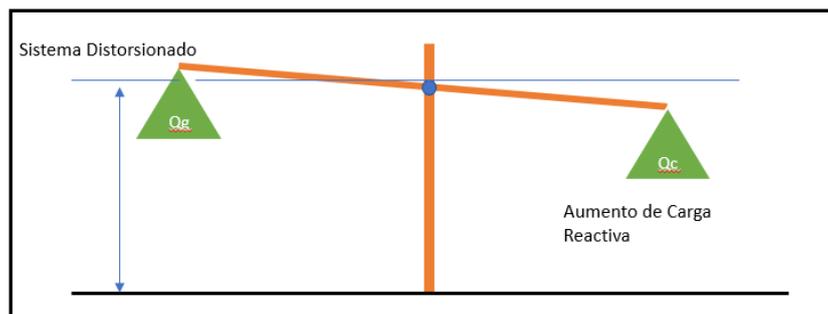


Figura 1. 9 Aumento de demanda reactiva

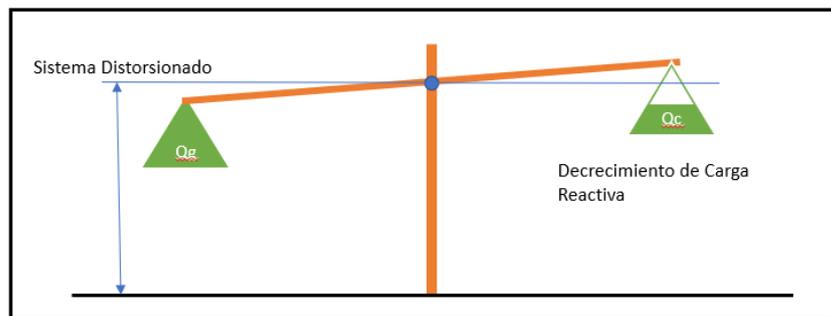


Figura 1. 10 Disminución de demanda reactiva

La entrega de reactivos por parte de compensadores vendría a ser como un resorte colocado en la parte cercana a la carga que trata de regresar al sistema a su funcionamiento dentro de los valores nominal, ya sea que ejerza fuerza hacia arriba o hacia abajo simulando la entrega o absorción de reactivos, como se lo muestra en las figuras 1.11 y 1.12; haciendo regresar al sistema a una operación normal.

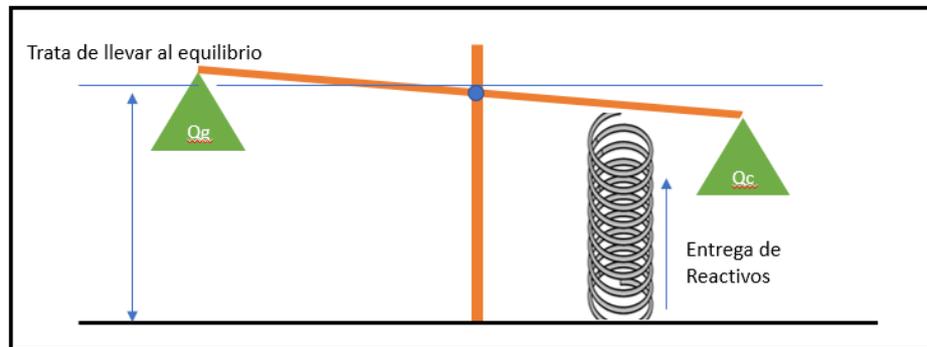


Figura 1. 11 Compensación reactiva entrega de reactivos

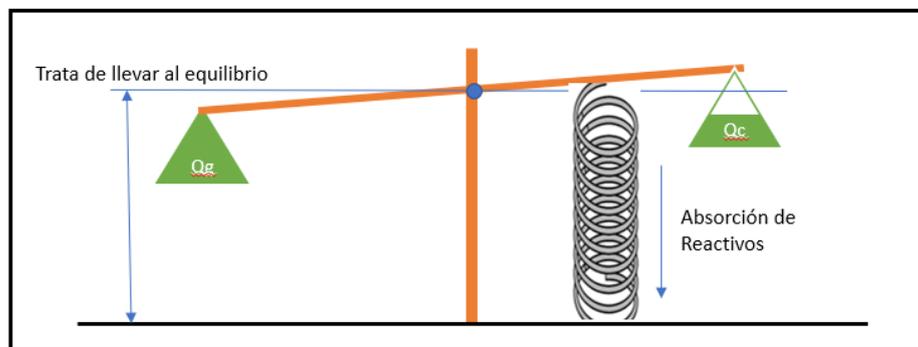


Figura 1. 12 Compensación reactiva absorción de reactivos

1.4.8 Métodos de Optimización Metaheurísticos

El gerenciamiento de la potencia reactiva en los sistemas eléctricos de potencia se ha vuelto una de las estrategias mayormente utilizadas para el control de la estabilidad, calidad y reducción de pérdidas en el mismo [22] [23].

En las etapas de planificación y operación de los sistemas eléctricos, conocer la mejor ubicación y despacho de las fuentes de potencia reactiva es un desafío en el cual se ve necesario el uso de métodos de optimización. En los últimos años, el uso de los métodos convencionales ha tenido una reducción significativa, debido al desarrollo de métodos de programación avanzada, mejor conocidos como métodos de búsqueda inteligente, entre los métodos más utilizados para el control de sistemas eléctricos se encuentran los metaheurísticos [24].

Se conoce que para la toma de decisiones debe existir una o múltiples funciones objetivos, las cuales se requieran ya sea minimizar o maximizar; lo más idóneo es decir que se deba encontrar el punto óptimo en el cual exista la menor cantidad de pérdida monetaria, pero al hablar de las redes eléctricas se debe tener en cuenta lo que son las pérdidas de energía; es muy importante también considerar las restricciones que involucran la operación de los mismos, restricciones como niveles de tensión, límites de estabilidad, y calidad de producto, por ende, se requiere tener menor costo posible de generación y transporte de potencia (reactiva), lo cual es comúnmente conocido como despacho óptimo de potencia reactiva [25].

Clasificación de modelos metaheurísticos

- Búsqueda basada en trayectorias
- Swarm Intelligence (PSO)
- Algoritmos Evolutivos
- Diferencia entre PSO y Algoritmos Genéticos

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

La operación actual de un sistema eléctrico brinda la información necesaria para implementar soluciones preventivas, correctivas y de mejora. De acuerdo con los

objetivos, se busca mejorar la eficiencia del transporte de energía y la estabilidad de tensión del sistema mediante la aplicación de un compensador.

Para el desarrollo del programa se implementa un método iterativo de flujo de potencia para determinar los valores de operación el sistema en estado estable. El flujo de potencia a su vez requiere de los parámetros eléctricos que conforman la red; por ello, es necesario contar con un documento en la cual se detalle el valor de los parámetros bajo una estructura dada. De igual forma, se implementa un modelo metaheurístico de búsqueda para determinar el valor y la ubicación de los compensadores.

2.1 Almacenamiento de parámetros de sistema eléctrico

Los parámetros del sistema eléctrico se almacenan en dos (2) documentos de texto con formato txt; el primer archivo contiene los parámetros de barra y el segundo contiene los parámetros de los ramales.

2.1.1 Archivo de parámetros de barra

En este documento se almacena y ordena los parámetros eléctricos de la barra bajo una estructura dada. De forma general en este documento se almacena el número, nombre y tipo de barra, voltaje de referencia, valor de potencia generada y de demanda, límites máximo y mínimo de voltaje, límites máximo y mínimo de generación de potencia reactiva y finalmente el valor de la admitancia de los equipos conectados en las barras. La estructura de este documento de texto esta formada por 16 columnas como se muestra en la Figura 2.1 y su contenido se detalla a continuación:

- Columna 1: Se define el número de la barra
- Columna 2: Se define el nombre de la barra
- Columna 3: Se define el tipo de la barra:
 - 0: Barra de carga (PQ)
 - 2: Barra de voltaje controlado (PV)
 - 3: Barra de compensación (SLACK)
- Columna 4: Se define la magnitud de tensión inicial de la barra en por unidad.
- Columna 5: Se define el ángulo de fase de tensión inicial de la barra en grados.

- Columna 6: Se define la demanda de potencia activa conectada a la barra en megavatios.
- Columna 7: Se define la demanda de potencia reactiva conectada a la barra en megavar.
- Columna 8: Se define la generación de potencia activa conectada a la barra en megavatios.
- Columna 9: Se define la generación de potencia reactiva conectada a la barra en megavar.
- Columna 10: Se define la magnitud de tensión de referencia de la barra de compensación y de voltaje controlado en por unidad,
- Columna 11: Se define el limite máximo de generación de potencia reactiva conectada a la barra en megavar.
- Columna 12: Se define el limite mínimo de generación de potencia reactiva conectada a la barra en megavar.
- Columna 13: Se define la conductancia shunt conectada a la barra en valor por unidad.
- Columna 14: Se define la susceptancia shunt conectada a la barra en valor por unidad.
- Columna 15: Se define el limite máximo de magnitud de tensión de la barra en por unidad
- Columna 16: Se define el limite mínimo de magnitud de tensión de la barra en por unidad

```

# lectura de barra
param: OB:
#

```

#	Nome	Tb	v0 [pu]	th0 [grau]	Pd [MW]	Qd [MVAR]	Pg0 [MW]	Qg0 [MVAR]	Vg [pu]	Qgmax [MVAR]	Qgmin [MVAR]	gsh [pu]	bsh [pu]	Vmax [pu]	Vmin := [pu]
1	"Glen Lyn 132"	3	1.060	0.00	0.0	0.0	260.2	-16.1	1.060	0.0	0.0	0.000	0.000	1.050	0.950
2	"Claytor 132"	2	1.045	-5.48	21.7	12.7	40.0	50.0	1.045	50.0	-40.0	0.000	0.000	1.050	0.950
3	"Kumis 132"	0	1.021	-7.96	2.4	1.2	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.000	0.000	1.050	0.950
4	"Hancock 132"	0	1.012	-9.62	7.6	1.6	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.000	0.000	1.050	0.950
5	"Fieldale 132"	2	1.010	-14.37	94.2	19.0	0.0	37.0	1.010	40.0	-40.0	0.000	0.000	1.050	0.950
6	"Roanoke 132"	0	1.010	-11.34	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.000	0.000	1.050	0.950
7	"Blaine 132"	0	1.002	-13.12	22.8	10.9	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.000	0.000	1.050	0.950
8	"Reusens 132"	2	1.010	-12.10	30.0	30.0	0.0	37.3	1.010	40.0	-10.0	0.000	0.000	1.050	0.950
9	"Roanoke 1.0"	0	1.051	-14.38	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.000	0.000	1.050	0.950
10	"Roanoke 33"	0	1.045	-15.97	5.8	2.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.000	0.190	1.050	0.950

Figura 2.1 Estructura de parámetros de barra

2.1.2 Archivo de parámetros del ramal

De igual forma este documento sigue una estructura dada en la cual se almacena y se ordena los parámetros eléctricos de los ramales. Los parámetros que se almacena son el número y tipo del ramal, barra de salida y barra de llegada del ramal, la impedancia en serie y la susceptancia en paralelo del ramal, el tap y ángulo de desfase del transformador, el tap máximo y mínimo del transformador, y la capacidad máxima de flujo de potencia en el ramal. La estructura de este documento de texto esta formada por 12 columnas como se muestra en la Figura 2.2 y su estructura es la siguiente:

- Columna 1: Se define el número del ramal
- Columna 2: Se define el número de la barra de inicio del ramal
- Columna 3: Se define el número de la barra final del ramal
- Columna 4: Se define el tipo de ramal:
 - 0: Línea
 - 1: Transformador
- Columna 5: Se define la resistencia del ramal en por unidad
- Columna 6: Se define la reactancia del ramal en por unidad
- Columna 7: Se define la susceptancia del ramal en por unidad
- Columna 8: Se define el tap del transformador
- Columna 9: Se define el tap máximo del transformador
- Columna 10: Se define el tap mínimo del transformador
- Columna 11: Se define el ángulo de desfase del transformador en grados
- Columna 12: Se define la capacidad máxima de flujo de potencia del ramal en MVA

```

# lectura de ramal
param: OL:      Tr      r      x      bshl      a      amax      amin      fi      Smax :=
# k i j [pu] [pu] [pu] [grau] [MVA]
1 1 2 0 0.0192 0.0575 0.0528 0.0000 0.0000 0.0000 0.0 220
2 1 3 0 0.0452 0.1652 0.0408 0.0000 0.0000 0.0000 0.0 100
3 2 4 0 0.0570 0.1737 0.0368 0.0000 0.0000 0.0000 0.0 55
4 3 4 0 0.0132 0.0379 0.0084 0.0000 0.0000 0.0000 0.0 95
5 2 5 0 0.0472 0.1983 0.0418 0.0000 0.0000 0.0000 0.0 100
6 2 6 0 0.0581 0.1763 0.0374 0.0000 0.0000 0.0000 0.0 75
7 4 6 0 0.0119 0.0414 0.0090 0.0000 0.0000 0.0000 0.0 90

```

Figura 2.2 Estructura de parámetros de ramal

2.2 Desarrollo del Flujo de Potencia

En el desarrollo del flujo de potencia o de carga se emplea el método de Gauss Seidel como método iterativo para obtener los valores de operación en estado estable del sistema eléctrico. A su vez, se requiere la construcción de la matriz admitancia para el desarrollo del flujo.

2.2.1 Construcción de Matriz Admitancia

En la construcción de la matriz de admitancia se requiere que los parámetros de impedancia de la línea o equipos conectados en la barra, estén dados en valores de por unidad; estos se pasa a su valor de admitancia y así aplicar la ley de corriente de Kirchhoff para luego despejar las variables de voltaje de barra y obtener una representación matricial que relaciona el voltaje y corriente en cada barra. A continuación, se muestra el procedimiento de la construcción de matriz admitancia:

- Se define la topología de la red con valores de impedancia de por unidad, luego se calcula la admitancia de cada elemento a partir del valor de su impedancia, teniendo así la topología del sistema como se muestra en la Figura 2.3.

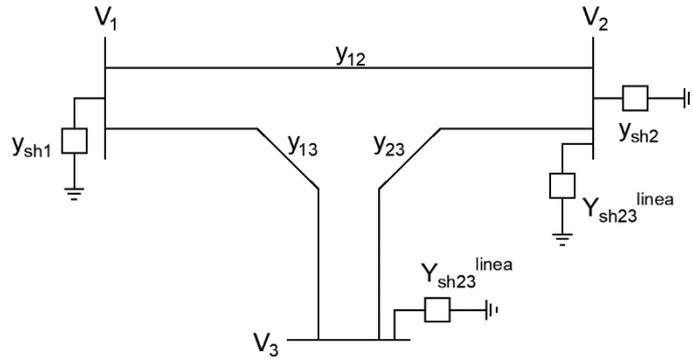


Figura 2.3 Ejemplo de topología del sistema en valor de admitancia

- Aplicar la ley de corriente de Kirchhoff en cada una de las barras.

$$\begin{aligned}
 I_1 &= y_{12}(V_1 - V_2) + y_{13}(V_1 - V_3) + y_{sh1}(V_1 - 0) \\
 I_2 &= y_{12}(V_2 - V_1) + y_{23}(V_2 - V_3) + y_{sh23}^{linea}(V_2 - 0) \\
 I_3 &= y_{13}(V_3 - V_1) + y_{23}(V_3 - V_2) + y_{sh23}^{linea}(V_3 - 0)
 \end{aligned}$$

- Agrupando valores

$$\begin{aligned}
 I_1 &= (y_{12} + y_{13} + y_{sh1})V_1 + (-y_{12})V_2 + (-y_{13})V_3 \\
 I_2 &= (-y_{12})V_1 + (y_{12} + y_{23} + y_{sh23}^{linea})V_2 + (-y_{23})V_3 \\
 I_3 &= (-y_{13})V_1 + (-y_{23})V_2 + (y_{13} + y_{23} + y_{sh23}^{linea})V_3
 \end{aligned}$$

$$\begin{array}{lll}
 Y_{11} = y_{12} + y_{13} + y_{sh1} & Y_{21} = -y_{12} & Y_{31} = -y_{13} \\
 Y_{12} = -y_{12} & Y_{22} = y_{12} + y_{23} + y_{sh23}^{linea} & Y_{32} = -y_{23} \\
 Y_{13} = -y_{13} & Y_{23} = -y_{23} & Y_{33} = y_{13} + y_{23} + y_{sh23}^{linea}
 \end{array}$$

- Representado de forma matricial

$$\begin{aligned}
 I_1 &= Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2 + Y_{13}V_3 \\
 I_2 &= Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2 + Y_{23}V_3 \\
 I_3 &= Y_{31}V_1 + Y_{32}V_2 + Y_{33}V_3
 \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}$$

$$[I] = Y_{barra}[V]$$

De acuerdo con lo planteado anteriormente, el orden de los subíndices Y_{ij} es el de causa efecto, donde el subíndice i es el del nodo del que se expresa la corriente y el subíndice j es el del voltaje que causa esta componente de corriente [26].

A partir del ejemplo desarrollado se puede deducir que las reglas para formar los elementos típicos de la matriz admitancia son:

- Los elementos de la diagonal Y_{ij} son iguales a la suma de las admitancias que están directamente conectadas a la barra j [26].
- Los elementos fuera de la diagonal Y_{ij} son iguales al negativo de la admitancia total conectada entre las barras i y j [26].

2.2.2 Consideraciones para el desarrollo del flujo de potencia

Antes de iniciar el método iterativo de gauss seidel para el problema del flujo de potencia es necesario identificar los tipos de barras de la red debido a que a las barras se asigna dos de las cuatro variables desconocidas siguientes: la potencia activa y reactiva, la magnitud y ángulo de voltaje. Los tipos de barras se identifican de acuerdo con el siguiente análisis:

- Barra de carga. Son las barras que no tienen conectado un generador, a esta barra únicamente se le asigna el valor de demanda de potencia activa y reactiva. Por lo tanto, las variables desconocidas que van a ser determinadas para la barra son la magnitud y ángulo de voltaje [26].
- Barra de voltaje controlado. Son las barras que tienen conectado un generador o barras que tienen la capacidad de controlar el voltaje; para las barras que tienen conectado el generador la generación de potencia activa puede ser controlada mediante el ajuste de la fuente de energía mecánica y la magnitud de tensión es controlada por medio del ajuste de la excitación del generador; y, las barras con capacidad de controlar voltaje la potencia activa que generan es simplemente cero. Por lo tanto, se define la potencia activa y la magnitud de tensión; las variables desconocidas que van a ser determinadas para la barra son la potencia reactiva y ángulo de voltaje [26].

- Barra de compensación. En esta barra se define la magnitud y ángulo de voltaje, el ángulo sirve como referencia para los ángulos de todos los demás voltajes de barra y usualmente se le asigna un valor de 0°. Las variables desconocidas son la potencia activa y reactiva inyectada a la barra [26].

Identificado los tipos de barras en la red y conociendo que las variables desconocidas son la potencia activa y reactiva, la magnitud y ángulo de voltaje; se plantea las ecuaciones de flujo de potencia que relacione estas cuatro variables junto con los valores de la matriz admitancia determinados anteriormente [26]. Su desarrollo se muestra a continuación:

- Aplicando la ley de corriente de Kirchhoff, la corriente inyectada en la barra i esta dada por la siguiente ecuación:

$$I_i = Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + \dots + Y_{ij}V_j + \dots + Y_{im}V_m = \sum_{j=1}^m Y_{ij}V_j \quad (2.1)$$

- Ahora, la potencia inyectada en la barra i esta dada por la siguiente ecuación:

$$S_i = V_i I_i^* \quad (2.2)$$

La potencia inyectada S_i , es la diferencia entre la generación de potencia S_g y la demanda de potencia S_d :

$$S_i = S_g - S_d = [(P_g + j Q_g) - (P_d + j Q_d)] \quad (2.3)$$

- Al reemplazar la ecuación (2.1) en la ecuación (2.2) y despejando la variable V_i se obtiene la siguiente ecuación que relaciona las cuatro variables desconocidas:

$$V_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left(\frac{S_i^*}{V_i^*} - \sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij}V_j - \sum_{j=i+1}^m Y_{ij}V_j \right) \quad (2.4)$$

El flujo de potencia de gauss-seidel es un proceso iterativo que consiste en calcular nuevos valores de voltaje para cada barra a partir de valores estimados de las otras barras desconocidas, el proceso iterativo continúa hasta tener un cambio de voltaje en cada barra menor a un valor establecido. Finalmente se muestra la ecuación general que calcula el voltaje en barra considerando el valor calculado y valor estimado de voltaje en cada barra:

$$V_i^k = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{S_i^{(k-1)*}}{V_i^{(k-1)*}} + \sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} V_j^k + \sum_{j=i+1}^m Y_{ij} V_j^{(k-1)} \right] \quad (2.5)$$

$$i = 1, 2, \dots, m \quad k = 1, 2, \dots, \text{iter}$$

donde:

- m: es el número total de barras
- iter: es el número total de iteraciones
- V_{ik} : es el voltaje de la barra i en la iteración k.
- V_{ik}^* : es el conjugado del voltaje de la barra i en la iteración k.
- S_{ik}^* : es el conjugado de la potencia inyectada en la barra i en la iteración k.
- Y_{ii} : es la admitancia propia de la barra i, valor de admitancia en la posición (i,i) de la matriz de admitancia Ybarra.
- Y_{ij} : es la admitancia mutua de la barra i a barra j, valor de admitancia en la posición (i,j) de la matriz de admitancia Ybarra.

2.2.3 Formulación para el desarrollo del Flujo de Potencia por el método de Gauss Seidel

El método iterativo empieza con el cálculo de voltaje para cada barra:

- Si la barra i es una barra de compensación, la magnitud y ángulo de voltaje se mantiene constante y su calculo es el siguiente:

$$V_i^k = V_i^{(k-1)} \quad (2.6)$$

$$V_i^k = |V_i^k| \angle \theta_i^k \quad (2.7)$$

$$i = 1, 2, \dots, m \quad k = 1, 2, \dots, \text{iter}$$

- Si la barra i es una barra de carga, la magnitud y ángulo de voltaje se calcula de la siguiente forma:

$$V_i^k = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{S_i^{(k-1)*}}{V_i^{(k-1)*}} + \sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} V_j^k + \sum_{j=i+1}^m Y_{ij} V_j^{(k-1)} \right] \quad (2.8)$$

Al voltaje calculado en esta barra se le aplica un factor de aceleración (α), que ayuda a reducir el numero de iteraciones requeridas. Si $0 < \alpha < 1$, el valor para ser almacenado es un promedio ponderado del valor de Gauss-Seidel y

del valor almacenado en la iteración previa. Si $\alpha=1$, el valor almacenado es el valor de Gauss-Seidel. Si $1<\alpha<2$, el valor almacenado es uno extrapolado [1]. Generalmente, α tiene un valor de 1.6 en un flujo de potencia. La ecuación que modifica el valor calculado aplicando el factor de aceleración es la siguiente:

$$V_{i,ac}^k = V_i^{k-1} + \alpha [V_i^k - V_i^{(k-1)}] \quad (2.9)$$

$$V_{i,ac}^k = |V_{i,ac}^k| \angle \theta_{i,ac}^k \quad (2.10)$$

$$i = 1, 2, \dots, m \quad k = 1, 2, \dots, \text{iter}$$

- Si la barra i es una barra de voltaje controlado, la magnitud permanece igual y solo cambia el ángulo de voltaje, esto se obtiene calculando primeramente el valor de potencia reactiva:

$$Q_i^k = -Im \left\{ V_i^{(k-1)*} \left[\sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} V_j^k + \sum_{j=i}^m Y_{ij} V_j^{(k-1)} \right] \right\} \quad (2.11)$$

Ahora, se calcula un voltaje modificando la potencia reactiva inyectada a la barra teniendo así las siguientes ecuaciones:

$$S_i^{(k-1)} = Real(S_i^{(k-1)}) + Q_i^k \quad (2.12)$$

$$V_i^k = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{S_i^{(k-1)*}}{V_i^{(k-1)*}} + \sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} V_j^k + \sum_{j=i+1}^m Y_{ij} V_j^{(k-1)} \right] \quad (2.13)$$

Dado que en este tipo de barra solo se modifica el ángulo del voltaje, esto se lo realiza a través de la siguiente ecuación:

$$V_{i,corr}^k = |V_i^{(k-1)}| \frac{V_i^k}{|V_i^k|} \quad (2.14)$$

$$V_{i,corr}^k = |V_{i,corr}^k| \angle \theta_{i,corr}^k \quad (2.15)$$

$$i = 1, 2, \dots, m \quad k = 1, 2, \dots, \text{iter}$$

- Durante el proceso iterativo se debe considerar las limitantes de voltaje en la red, si en el caso de que se encuentre fuera del rango, toma el valor del límite que se violó.

$$V_{i\ min}^k < V_i^k < V_{i\ max}^k \quad (2.16)$$

$$i = 1, 2, \dots, m \quad k = 1, 2, \dots, \text{iter}$$

El siguiente paso es calcular la potencia inyectada en cada barra, dado que su valor se utilizará para la siguiente iteración.

- Si la barra i es una barra de compensación, la potencia inyectada a la barra esta determinada por la siguiente ecuación:

$$S_i^k = V_i^k I_i^k = V_i^k \left(\sum_{j=1}^m Y_{ij} V_j^k \right)^* \quad (2.17)$$

$$i = 1, 2, \dots, m \quad k = 1, 2, \dots, \text{iter}$$

Y la generación de potencia en la barra, $S_{g,i}^k$ esta dada por:

$$S_i^k = S_{g,i}^k - S_{d,i}^k \quad (2.18)$$

$$S_{g,i}^k = S_i^k + S_{d,i}^k = P_{g,i}^k + j Q_{g,i}^k \quad (2.19)$$

- Si la barra i es una barra de carga, la potencia inyectada a la barra esta determinada únicamente por la potencia de la carga y esta dada por la siguiente ecuación:

$$S_i^k = S_{g,i}^k - S_{d,i}^k \quad (2.20)$$

$$S_{g,i}^k = 0 \quad (2.21)$$

$$S_i^k = -S_{d,i}^k \quad (2.22)$$

$$i = 1, 2, \dots, m \quad k = 1, 2, \dots, \text{iter}$$

- Si la barra i es una barra de voltaje controlado, la potencia inyectada a la barra esta determinada por la siguiente ecuación:

$$S_i^k = V_i^k I_i^k = V_i^k \left(\sum_{j=1}^m Y_{ij} V_j^k \right)^* \quad (2.23)$$

$$i = 1, 2, \dots, m \quad k = 1, 2, \dots, \text{iter}$$

Y la generación de potencia en la barra, $S_{g,i}^k$ esta dada por:

$$S_i^k = S_{g,i}^k - S_{d,i}^k \quad (2.24)$$

$$S_{g,i}^k = S_i^k + S_{d,i}^k = P_{g,i}^k + j Q_{g,i}^k \quad (2.25)$$

$$i = 1, 2, \dots, m \quad k = 1, 2, \dots, \text{iter}$$

El valor de la potencia reactiva generada debe estar dentro de un limite mínimo y máximo, si durante el proceso el valor calculado de potencia reactiva generada este fuera del rango establecido, su valor toma el valor de limite que se violo. En este

caso, el tipo de barra se empieza a tratar como una barra de carga y en las nuevas iteraciones la magnitud de voltaje originalmente se expande a otros valores.

$$Q_{g \min,i}^k < Q_{g,i}^k < Q_{g \max,i}^k \quad (2.26)$$

$$i = 1,2,\dots,m \quad k = 1,2,\dots, \text{iter}$$

2.3 Desarrollo del modelo metaheurístico de enjambre por partículas (PSO)

De forma general, la ubicación óptima del compensador se lo obtiene determinando las pérdidas eléctricas que causa el despacho óptimo de reactivo en cada una de las barras; es decir, la ubicación óptima del compensador es la barra donde el despacho de reactivo genere la mínima pérdida eléctrica.

Descrito anteriormente la manera generalizada de obtener la ubicación del compensador, ahora es necesario conocer la metodología para determinar el despacho óptimo de reactivos. Se empieza definiendo un grupo de valores de potencia reactiva, estos valores deben ser generados bajo una distribución uniforme dentro de los límites de despacho de reactivos, el número total del grupo de valores es el número de partículas de búsqueda; estos valores generados se lo conocen como la posición inicial de la partícula, de forma análoga cada partícula representa un valor de potencia reactiva. Por lo tanto, el valor de potencia reactiva inicial en cada uno de las barras son las siguientes:

$$Q_1^0 = [Q_{1.1}^0 \quad Q_{1.2}^0 \quad \dots \quad Q_{1.j}^0 \quad Q_{1.(j+1)}^0 \quad \dots \quad Q_{1.(n-1)}^0 \quad Q_{1.n}^0]$$

$$Q_2^0 = [Q_{2.1}^0 \quad Q_{2.2}^0 \quad \dots \quad Q_{2.j}^0 \quad Q_{2.(j+1)}^0 \quad \dots \quad Q_{2.(n-1)}^0 \quad Q_{2.n}^0]$$

$$Q_i^0 = [Q_{i.1}^0 \quad Q_{i.2}^0 \quad \dots \quad Q_{i.j}^0 \quad Q_{i.(j+1)}^0 \quad \dots \quad Q_{i.(n-1)}^0 \quad Q_{i.n}^0]$$

$$Q_m^0 = [Q_{m.1}^0 \quad Q_{m.2}^0 \quad \dots \quad Q_{m.j}^0 \quad Q_{m.(j+1)}^0 \quad \dots \quad Q_{m.(n-1)}^0 \quad Q_{m.n}^0]$$

Donde:

- $Q_{i,j}^t$: Valor de potencia reactiva de la partícula j, en la barra i en el tiempo t.
- n: numero de partículas.
 - $Q_{i,j}^t = \text{DistribuciónUniforme}(Q_{\min}, Q_{\max})$

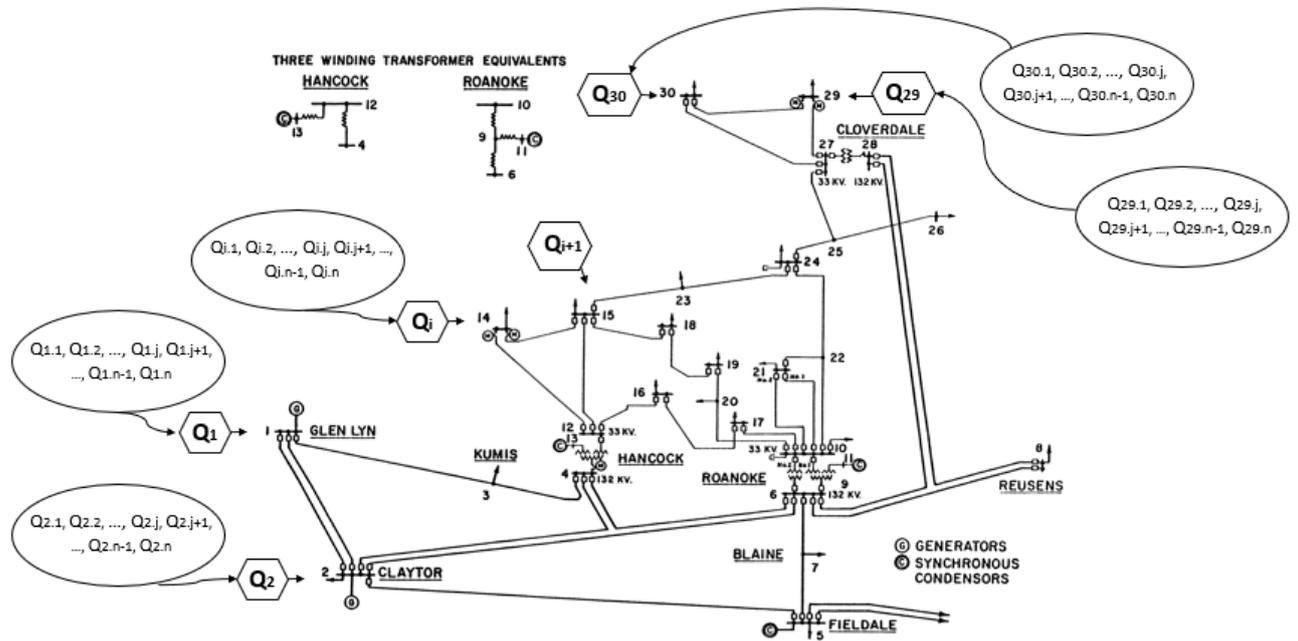


Figura 2.4 Metodología de búsqueda de ubicación y despacho óptimo de reactivos

Como el análisis de despacho óptimo de reactivos se lo realiza en cada una de las barras, la metodología se lo describirá tomando en consideración la barra i . Entonces, se debe realizar el flujo de potencia considerando el valor asignado de potencia reactiva a cada una de las partículas obteniendo así las pérdidas eléctricas provocadas en el sistema. Durante el flujo de potencia se considera restricciones delimitado de suministro de voltaje, límites de generación de potencia reactiva y límites de flujo máximo de potencia en las líneas. Por lo tanto, los valores pérdidas eléctricas iniciales provocada por la compensación de reactivo de cada partícula j en la barra i , es la siguiente:

$$Pp_i^0 = [Pp_{i.1}^0 \ Pp_{i.2}^0 \ \dots \ Pp_{i.j}^0 \ Pp_{i.(j+1)}^0 \ \dots \ Pp_{i.(n-1)}^0 \ Pp_{i.n}^0]$$

Donde:

- $Pp_{i,j}^t$: pérdidas eléctricas provocada por la potencia reactiva de la partícula j , en la barra i , en el tiempo t .

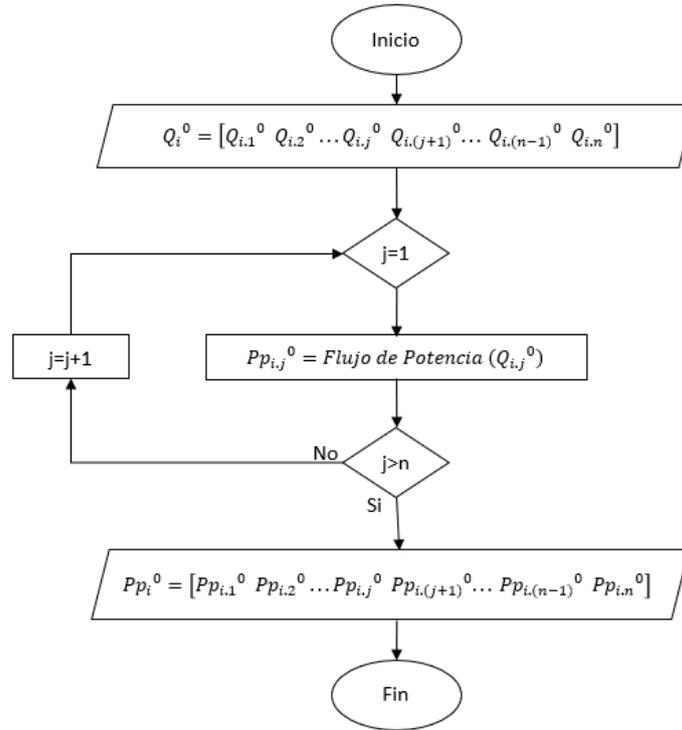


Figura 2.5 Diagrama de flujo de valores de pérdidas eléctricas iniciales

En la iteración inicial, el valor de potencia reactiva asignado a cada partícula y el valor de pérdida eléctrica que provoca son asignados como valores locales; mientras que, el valor de potencia reactiva que genera la mínima pérdida eléctrica se asigna como el valor global de potencia reactiva y su pérdida eléctrica como valor global del mismo.

Asignación de valores locales de potencia reactiva y pérdidas eléctricas en la iteración inicial (0).

$$Q_{i,local}^0 = Q_i^0$$

$$Q_{i,loc}^0 = [Q_{i,1,loc}^0 \ Q_{i,2,loc}^0 \ \dots \ Q_{i,j,loc}^0 \ Q_{i,(j+1),loc}^0 \ \dots \ Q_{i,(n-1),loc}^0 \ Q_{i,n,loc}^0]$$

$$Pp_{i,loc}^0 = Pp_i^0$$

$$Pp_{i,loc}^0 = [Pp_{i,1,loc}^0 \ Pp_{i,2,loc}^0 \ \dots \ Pp_{i,j,loc}^0 \ Pp_{i,(j+1),loc}^0 \ \dots \ Pp_{i,(n-1),loc}^0 \ Pp_{i,n,loc}^0]$$

Asignación de valor global de potencia reactiva y pérdidas eléctricas en la iteración inicial (0).

$$Q_{i,global}^0 = \min(Q_{i,loc}^0) = Q_{i,j,loc}^0$$

$$Pp_{i,local}^0 = \text{Flujo de Potencia } (Q_{i,global}^0)$$

$$Pp_{i,local}^0 = \text{Flujo de Potencia } (Q_{i,j\ loc}^0) = Pp_{i,j\ loc}^0$$

El valor global y local de potencia reactiva en la interacción actual se usan para calcular la variación de potencia reactiva y así determinar el valor de potencia reactiva asignado a cada partícula en la iteración siguiente.

$$Qv_{i,j}^1 = wQ_{i,j}^0 + c_1r_1(Q_{i,j\ loc}^0 - Q_{i,j}^0) + c_2r_2(Q_{i,global}^0 - Q_{i,j}^0)$$

Donde:

- c_1 : Coeficiente cognitivo
- c_2 : Coeficiente social
- r_1 y r_2 : Valor entre 0 y 1 bajo una distribución uniforme
- w : factor de inercia de la partícula
- $Q_{i,j\ loc}^0$: Valor de potencia reactiva local de la partícula j en la barra i en la iteración 0.
- $Q_{i,global}^0$: Valor de potencia reactiva global de la barra i en la iteración 0.

$$Q_{i,j}^1 = Q_{i,j}^0 + Qv_{i,j}^1$$

$$Q_i^1 = [Q_{i,1}^1\ Q_{i,2}^1\ \dots\ Q_{i,j}^1\ Q_{i,(j+1)}^1\ \dots\ Q_{i,(n-1)}^1\ Q_{i,n}^1]$$

Con los nuevos valores de potencia reactiva en la iteración 1 se calcula las pérdidas eléctricas provocadas por estas.

$$Pp_i^1 = [Pp_{i,1}^1\ Pp_{i,2}^1\ \dots\ Pp_{i,j}^1\ Pp_{i,(j+1)}^1\ \dots\ Pp_{i,(n-1)}^1\ Pp_{i,n}^1]$$

Estos valores de pérdidas son utilizadas para comparar con las pérdidas calculadas en la iteración anterior y así determinar los nuevos valores local y global de potencia reactiva y pérdida eléctrica. El criterio para determinar si el valor de potencia reactiva y pérdida eléctrica es local o óptimo es el siguiente:

$$Q_{i,j\ loc}^1 = \begin{cases} Q_{i,j\ loc}^0 & \text{Si } Pp_i^1 > Pp_i^0 \\ Q_{i,j}^1 & \text{Si } Pp_i^1 \leq Pp_i^0 \end{cases}$$

$$P_{i,j\ loc}^1 = \begin{cases} P_{i,j\ loc}^0 & \text{Si } Pp_i^1 > Pp_i^0 \\ P_{i,j}^1 & \text{Si } Pp_i^1 \leq Pp_i^0 \end{cases}$$

$$Q_{i,global}^1 = \min(Q_{i,loc}^1) = Q_{i,j\ loc}^1$$

En la siguiente parte se detalla la metodología para la búsqueda óptima de despacho de reactivos [27]:

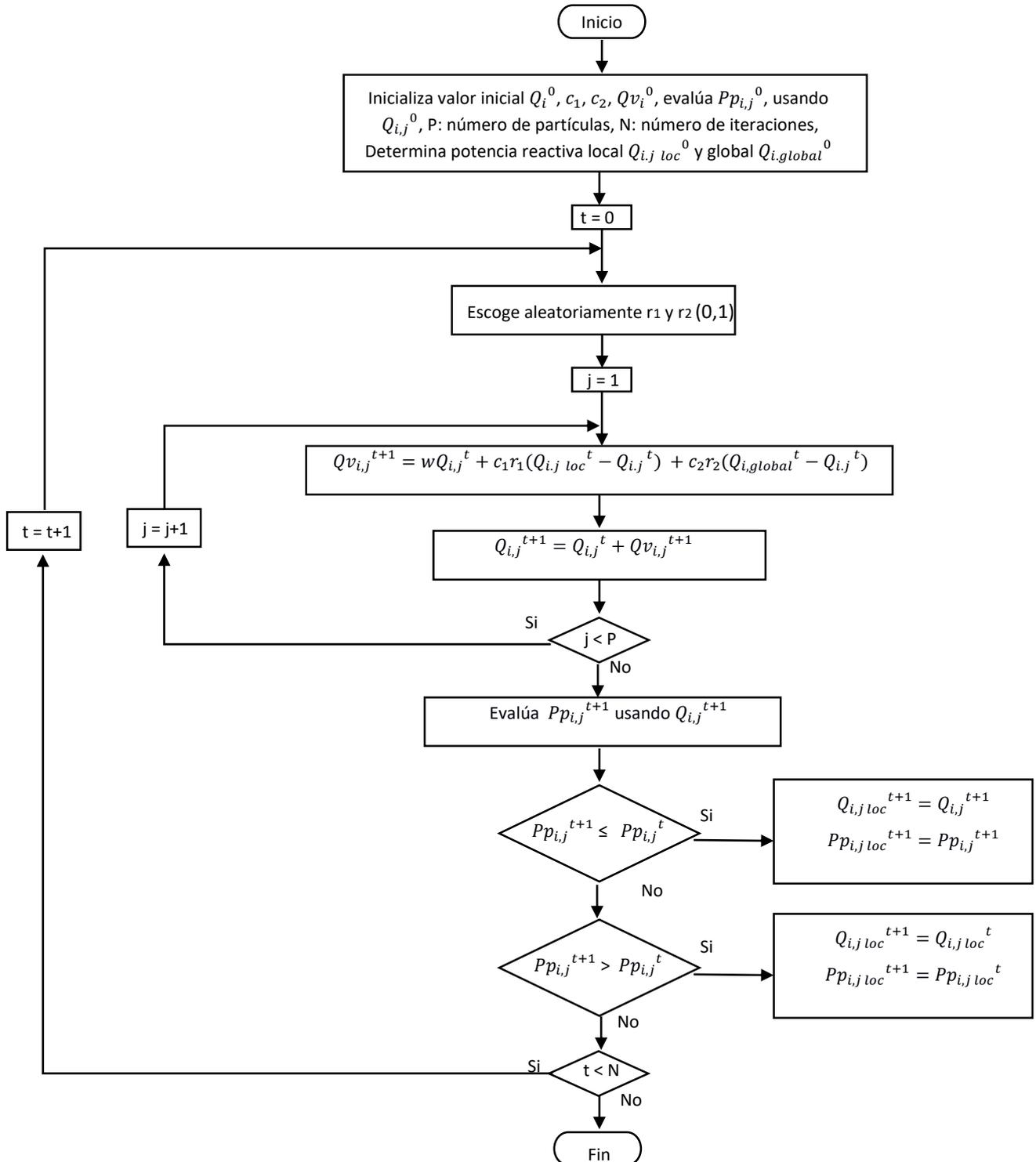


Figura 2.6 Diagrama de Flujo del modelo de optimización PSO aplicado a la búsqueda de despacho óptimo de reactivos.

VARIABLES DE DECISIÓN:

- $Q_{comp\ i}$: Despacho de reactivos del compensador en la barra i .
- V_i : Voltaje de suministro en la barra i

FUNCIÓN OBJETIVO:

- Minimizar las pérdidas eléctricas del sistema.

$$P_p = \text{real} \left(\sum_{i=1}^m S_i \right) = \text{Real} \left(\sum_{i=1}^m S_{g\ i} - \sum_{i=1}^m S_{d\ i} \right) = \sum_{i=1}^m (P_{g\ i} - P_{d\ i})$$

$i = 1, 2, \dots, m$

SUJETO A:

- Restricción de balance de potencia activa:

$$P_{g\ i} = P_{g\ i} + P_{d\ i} = \text{Real} \left\{ V_i^* \left[\sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} V_j + \sum_{j=i}^m Y_{ij} V_j \right] \right\} + P_{d\ i}$$

$i = 1, 2, \dots, m \quad j = 1, 2, \dots, m$

- Restricción de balance de potencia reactiva:

$$Q_{g\ i} = Q_i + Q_{d\ i} = -\text{Im} \left\{ V_i^* \left[\sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} V_j + \sum_{j=i}^m Y_{ij} V_j \right] \right\} + Q_{d\ i}$$

$i = 1, 2, \dots, m \quad j = 1, 2, \dots, m$

- Restricción de límite de voltaje:

$$V_{i\ min} < V_i < V_{i\ max}$$

$i = 1, 2, \dots, m$

- Restricción de magnitud de voltaje y generación de potencia en barra de voltaje controlado:

$$\begin{aligned} |V_i| &= |V_{i\ g}| & |T_{b\ i}| &= 2 \\ P_{g\ i} &= P_{g\ i\ gen} & |T_{b\ i}| &= 2 \end{aligned}$$

$i = 1, 2, \dots, m$

- Restricción de generación de potencia en barra de carga:

$$S_{g\ i} = 0 \quad |T_{b\ i}| = 0$$

$i = 1, 2, \dots, m$

- Restricción de magnitud y ángulo de voltaje en barra de compensación:

$$\begin{aligned} |V_i| &= |V_{i\ g}| & |T_{b\ i}| &= 3 \\ \theta_i &= \theta_{i\ g} & |T_{b\ i}| &= 3 \end{aligned}$$

$i = 1, 2, \dots, m$

- Restricción de límite de generación de potencia reactiva en barra de voltaje controlado:

$$Q_{gi \min} < Q_{gi} < Q_{gi \max} \quad |Tb_i = 2$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

- Restricción de límite de compensación de potencia reactiva:

$$Q_{comp \ i \ min} < Q_{comp \ i} < Q_{comp \ i \ max}$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

- Restricción de límite de capacidad de flujo de potencia:

$$S_{ij} \leq S_{ij \ max}$$

Tb: Tipo de barra, 3: barra de compensación, 2: barra de voltaje controlado, 0: barra de carga.

m: número total de barras

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Se realizó el estudio sobre el sistema IEEE 30 barras, como su nombre lo indica se posee 30 barras las cuales están interconectadas por 41 ramales, entre líneas y transformadores. Para simplificar el estudio se realizaron las siguientes asunciones: la carga se encontraba totalmente balanceada, se asumió un perfil de carga constante durante todo un año para los días entre semana y otro para los fines de semana, los voltajes de las barras debían cumplir con el estándar IEEE 1860-2014, se hizo uso de los equipos SVC para la compensación, se asumió que el precio de inversión y mantenimiento del equipo son los que se encuentran en la Tabla 3.4.

3.1 Programa de optimización

El programa presentaba 3 opciones que se podía realizar al sistema de potencia escogido, las cuales son mostradas en la Figura 3.1, la primera opción era realizar un flujo de potencia en donde se podría encontrar el estado del sistema, la segunda era poder obtener la ubicación y el despacho óptimo de la compensación reactiva necesaria para obtener la menor cantidad de pérdidas de potencia activa y la última era obtener el despacho óptimo de la compensación reactiva para obtener la menor cantidad de pérdidas de potencia activa conociendo previamente el lugar donde se deseaba colocar el dispositivo compensador de reactivos.

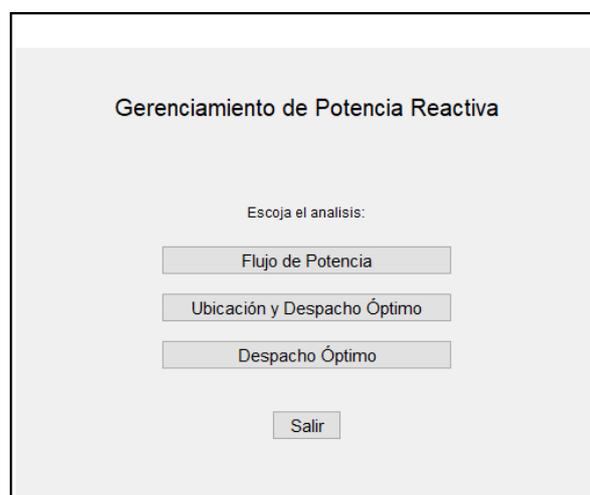


Figura 3.1 Menú principal del programa

3.2 Reducción óptima de las pérdidas de energía

Al haber tenido un sistema en el cual no se había realizado un respectivo análisis sobre la ubicación óptima de la compensación, se optó por realizar la opción de la ubicación y despacho óptimo de la potencia reactiva del compensador, el programa realizó su búsqueda teniendo como resultado que la reducción de pérdidas mayor se encontraba al colocar el SVC en la barra 30, como lo indica en la Tabla 3.1 con una capacidad de entre 1.9 MVar y 18.93 MVar, por lo que se requiere uno con capacidad de +/- 20 MVar. En las Figura 3.3 y 3.4 podemos observar las pérdidas iniciales y finales en por unidad de los días entre semana y el fin de semana, teniendo en consideración todas las asunciones antes descritas, el periodo de tiempo anual y la potencia base, se obtuvo como resultado un ahorro aproximado de 35,60 GWh al año, lo que se deduce como una reducción del 30,31% de las pérdidas de potencia activa.

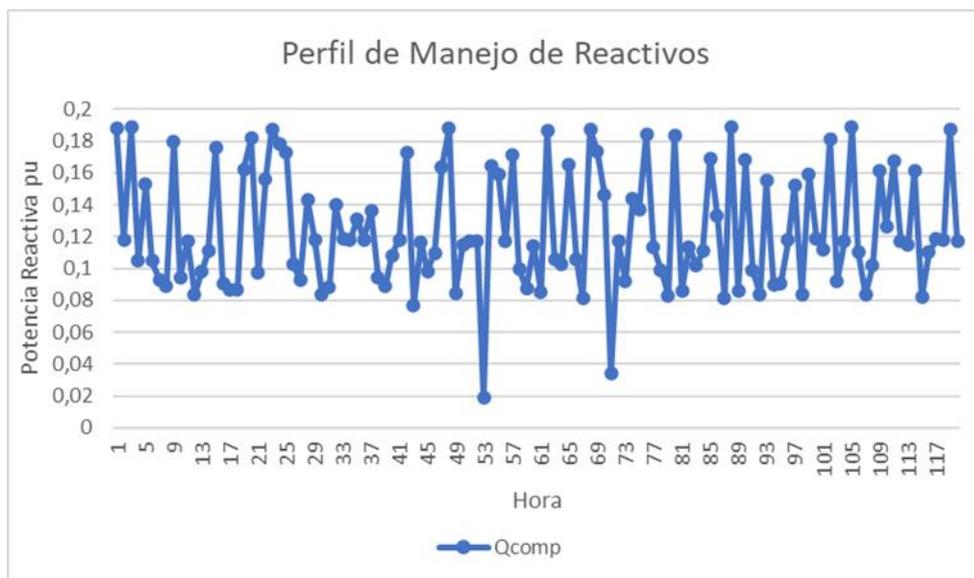


Figura 3.2 Perfil de despacho de reactivos de lunes a viernes en barra 30.

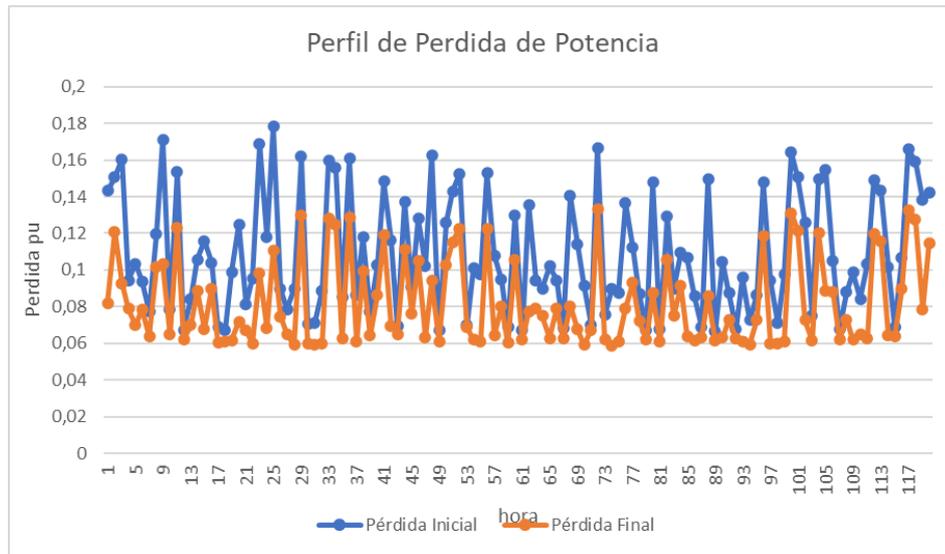


Figura 3.3 Perfil de pérdidas eléctricas de lunes a viernes, sin y con compensador en barra 30.

Tabla 3.1 Despacho de reactivo máximo y mínimo de lunes a viernes.

Despacho de Reactivos	[pu]	MVar
Máximo	0,1892923	18,9292299
Mínimo	0,01895606	1,89560615

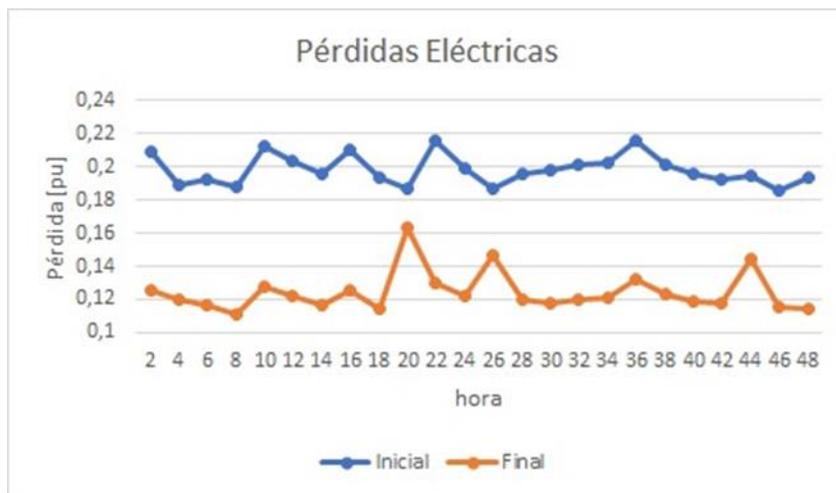


Figura 3.4 Perfil de pérdidas eléctricas de sábado y domingo, sin y con compensador en barra 30.

Tabla 3.2 Pérdida de energía y ahorro energético semanal y anual por compensador en barra 30.

Período	Pérdida de energía inicial	Pérdida de energía final	Ahorro energético	% Ahorro Energético
Semanal	2258,49 MWh	1573,88 MWh	684,61 MWh	30.31 %
Anual	117,44 GWh	81,84 GWh	35,60 GWh	

3.3 Calidad del voltaje suministrado

Los niveles de voltaje en todas las barras se mantienen dentro de los valores deseados según la norma IEEE 1860-2014, teniendo en consideración que los voltajes iniciales son los del sistema sin compensación, y los voltajes finales son los del sistema con compensación, y observando las Figura 3.5 y 3.6, siendo los voltajes máximos y mínimos de cada barra respectivamente, esto permite decir que el sistema estudiado no presentaba problemas de calidad de voltaje, y que al implementar el equipo compensador lo que se logró fue mantener la calidad del mismo; si el estudio se lo realiza a un sistema con unos cuantos problemas en la calidad de tensión podríamos tener una mejora enorme en ellos.

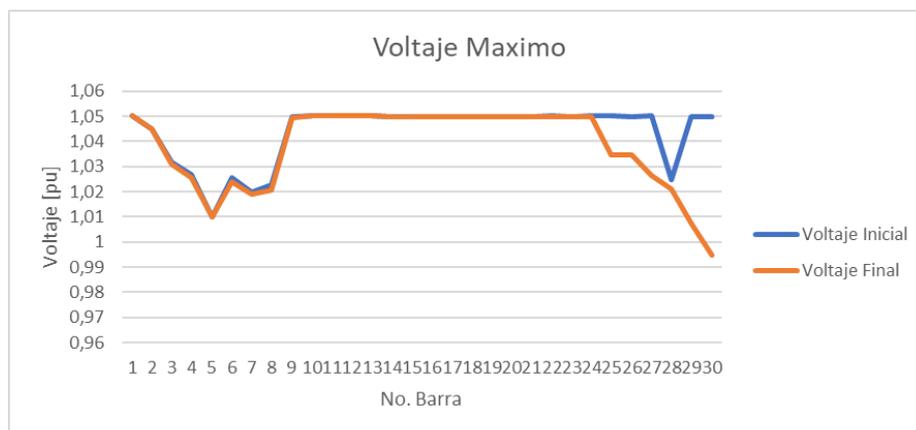


Figura 3.5 Perfil de voltaje máximo suministrado por el sistema sin y con compensador en la barra 30.

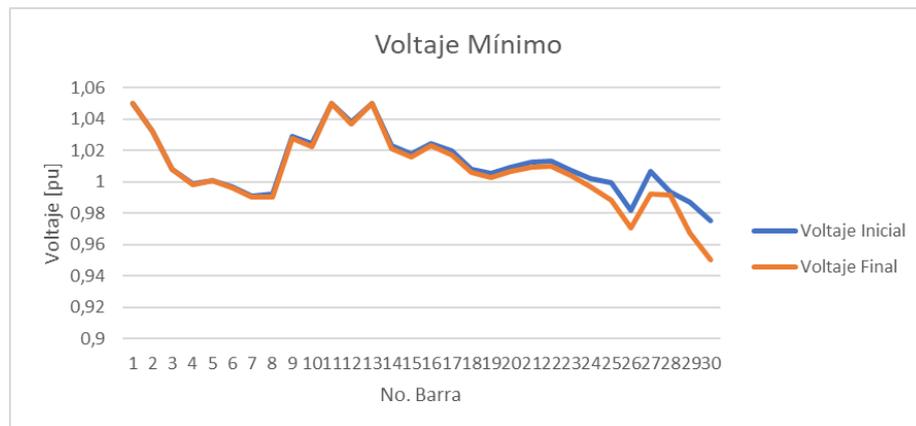


Figura 3.6 Perfil de voltaje mínimo suministrado por el sistema sin y con compensador en la barra 30.

Otro parámetro importante que se incluyó en el estudio es el de la cantidad de potencia que los ramales transmiten, se cuidó que estas no sobrepasen el nivel máximo de potencia que pueden transmitir, como podemos visualizar en la Figura 3.7, encontramos que las líneas 33 y 39 poseen una elevación del flujo a través de ellas, pero se mantienen dentro del rango de operación normal.

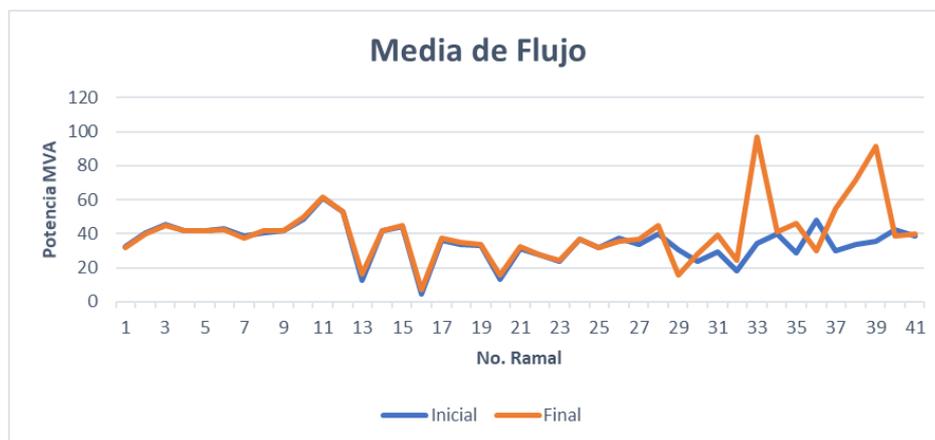


Figura 3.7 Flujo de potencia medio en las líneas del sistema sin y con compensador en la barra 30.

3.4 Ahorro en término monetarios

Asumiendo que el costo medio de compra de la energía al sector de la generación por parte de las distribuidoras para ser transportada es de 3,2 centavos de dólares estadounidenses por kWh en el Ecuador, se realizó el cálculo de la reducción que

se obtendría en términos monetarios, los cuales se pueden observar en la Tabla 3.2, obteniendo una reducción de 21.907,52 dólares semanales, teniendo un ahorro de 1.139.200,00 dólares por un año en la compra de energía.

Tabla 3.3 Ahorro económico semanal y anual por compensador en barra 30

Período	Ahorro energético	Costo medio de compra energía	Ahorro Económico
Semanal	684,61 MWh	3.2 ctvs / kWh	\$ 21.907,52
Anual	35,60 GWh		\$1.139.200,00

Considerando constante el ahorro económico de energía, el costo de inversión de un SVC de 3.007.744,06 dólares y el mantenimiento por año del mismo de 114672,70 dólares y un tasa de retorno interno de 15%, se recuperaría la inversión en el 5 año teniendo un valor actual neto de 426.630,35 dólares.

Tabla 3.4 Costo de inversión y mantenimiento anual del compensador SVC +/- 20 MVAR en barra 30

	Costos [\$]
Inversión	3.007.744,06
Mantenimiento	114672,70

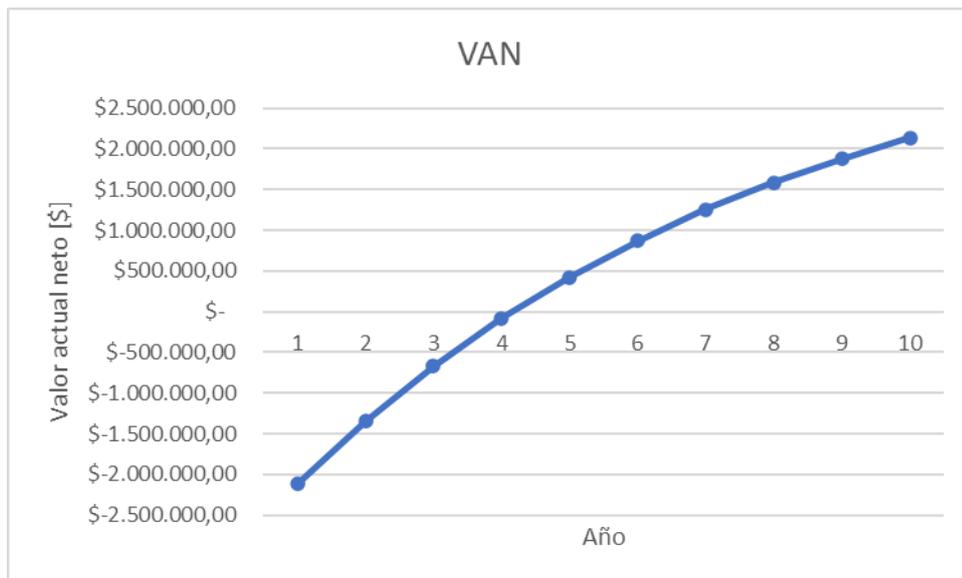


Figura 3.8 Curva de Valor Actual Neto por la aplicación del SVC en barra 30

3.5 Otras posibles soluciones

Hay que tener en cuenta que el método planteado busca distintas opciones para tener reducción de pérdidas de potencia, entre éstas ya observamos que se obtuvo un resultado óptimo de reducción del 30% de pérdidas del sistema en general, más debemos tener en cuenta que si no es posible la instalación del equipo compensador en el punto deseado, se debe buscar la siguiente mejor opción, por lo cual se realiza el análisis de las siguientes 2 mejores respuestas.

En las Figura 3.9 y 3.10, podemos observar las pérdidas iniciales y finales en por unidad de los días entre semana y el fin de semana si el compensador estuviese ubicado en la barra 29, realizando el estudio por igual periodo de tiempo, en la tabla se muestra que se obtuvo un resultado de ahorro aproximado de 23,80 GWh al año, lo que se deduce como una reducción del 21% de las pérdidas de potencia activa, lo cual es prácticamente una gran diferencia a la mejor solución antes planteada, al igual existirá una considerable diferencia en términos económicos, se tiene una disminución de más del 33% del ahorro en dinero esperado en la mejor opción, como se puede observar en la Tabla 3.5.

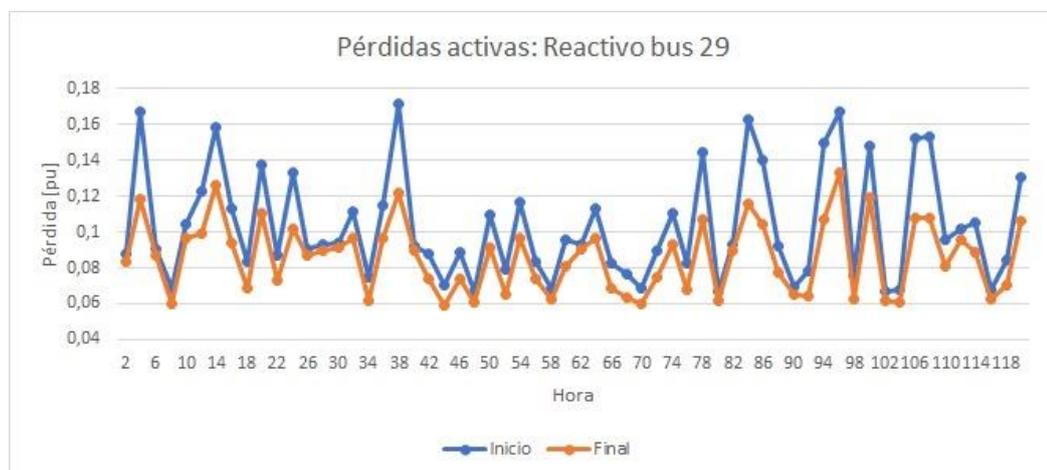


Figura 3.9 Perfil de pérdidas eléctricas de lunes a viernes, sin y con compensador en barra 29.

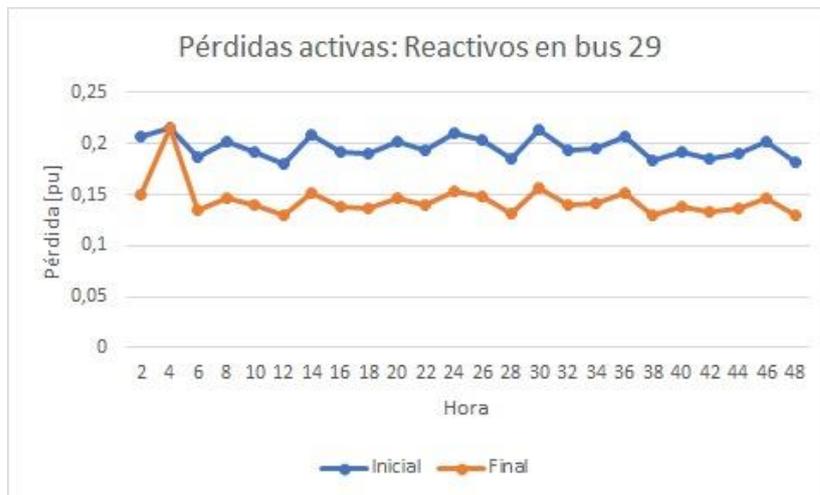


Figura 3.10 Perfil de pérdidas eléctricas de sábado y domingo, sin y con compensador en barra 29.

Tabla 3.5 Pérdida de energía y ahorro energético semanal y anual por compensador en barra 29

Período	Pérdida de energía inicial	Pérdida de energía final	Ahorro energético	% Ahorro Energético
Semanal	2181,51 MWh	1723,82 MWh	457,69 MWh	20.98 %
Anual	113,44 GWh	89,64 GWh	23,80 GWh	

Tabla 3.6 Ahorro económico semanal y anual por compensador en barra 29

Período	Ahorro energético	Costo medio de compra energía	Ahorro Económico
Semanal	457,69 MWh	3.2 ctvs / kWh	\$ 14.646,38
Anual	23,80 GWh		\$761.611,56

Considerando constante el ahorro económico de energía, los costos de inversión y mantenimiento anual del SVC, mostrado en la Tabla 3.4, la inversión total se recuperaría en el año 9 con un TIR de 15% teniendo un VAN de \$79.179,00.

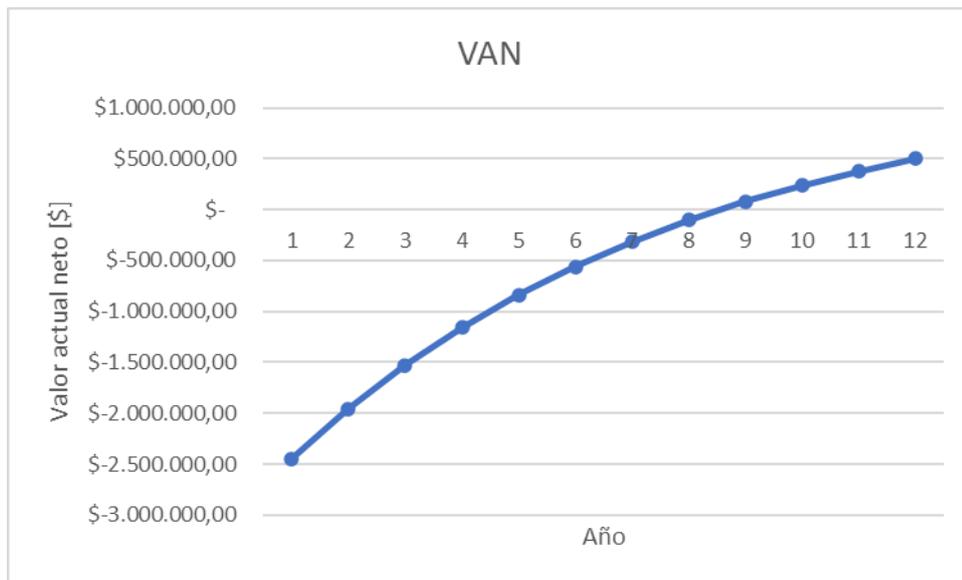


Figura 3.11 Curva de Valor Actual Neto por la aplicación del SVC en barra 29

En las Figuras 3.12 y 3.13, podemos observar las pérdidas iniciales y finales en por unidad de los días entre semana y el fin de semana, de la tercera mejor opción del estudio, esta se daría si el compensador estuviese ubicado en la barra 21, realizando el estudio por el mismo lapso de tiempo, en la tabla se muestra que se obtuvo un resultado de ahorro aproximado de 11,93 GWh al año, lo que se deduce como una reducción del 10,3% de las pérdidas de potencia activa, existiendo una diferencia mucho más abismal, este caso no resultaría tan beneficioso en términos económicos, resultando en una disminución de más del 66% del ahorro de dinero esperado con la mejor opción, como se puede visualizar en la Tabla 3.7.

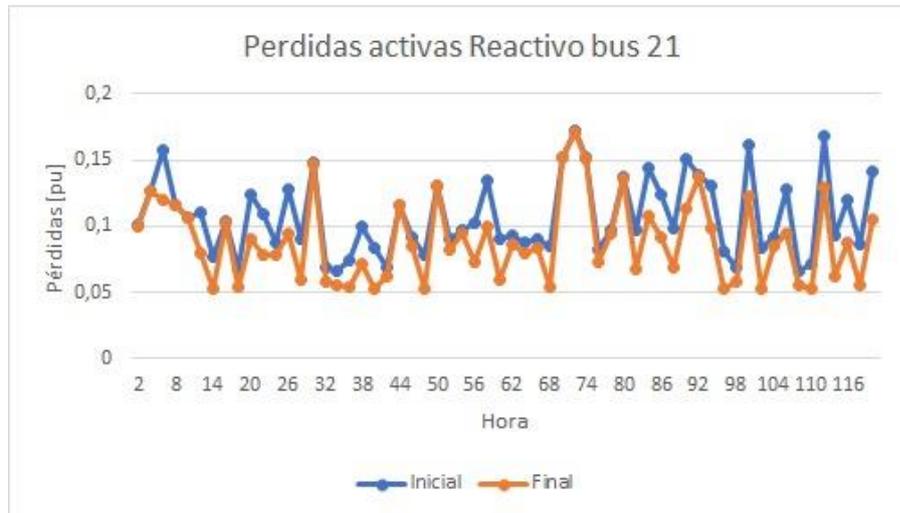


Figura 3.12 Perfil de pérdidas eléctricas de lunes a viernes, sin y con compensador en barra 21.

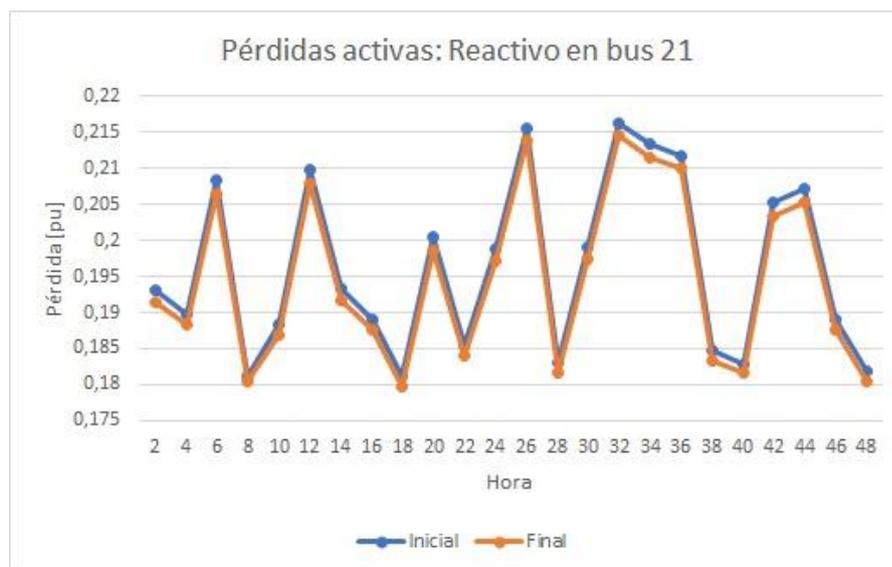


Figura 3.13 Perfil de pérdidas eléctricas de sábado y domingo, sin y con compensador en barra 21.

Tabla 3.7 Pérdida de energía y ahorro energético semanal y anual por compensador en barra 21

Período	Pérdida de energía inicial	Pérdida de energía final	Ahorro energético	% Ahorro Energético
Semanal	2230,82 MWh	2001,49 MWh	229,33 MWh	10.28 %
Anual	116,00 GWh	104,08 GWh	11,92 GWh	

Tabla 3.8 Ahorro económico semanal y anual por compensador en barra 21

Período	Ahorro energético	Costo medio de compra energía	Ahorro Económico
Semanal	229,33 MWh	3.2 ctvs / kWh	\$ 7.338,69
Anual	11,92 GWh		\$ 381.612,02

Considerando constante el ahorro económico de energía, los costos de inversión y mantenimiento anual del SVC, mostrado en la Tabla 3.4, la inversión total se recuperaría en el año 28 con un TIR de 12% teniendo un VAN de \$ 5.334,67, haciendo ésta posible solución un proyecto no viable por el gran período de espera y debido a que la vida útil del equipo es de 20 años.

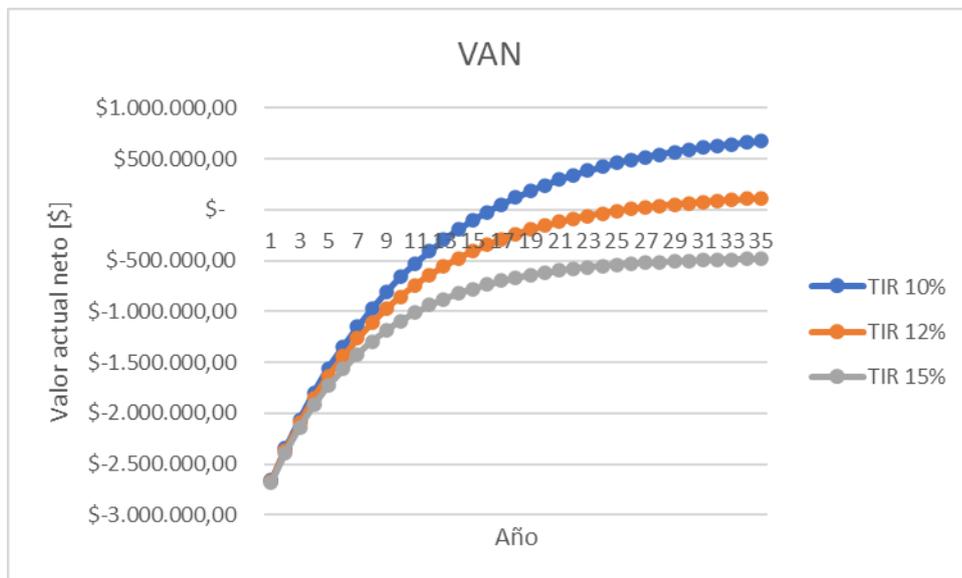


Figura 3.14 Curva de Valor Actual Neto por la aplicación del SVC en barra 21

3.6 Estudio del sistema a futuro

Para tener un análisis mas profundo del sistema, se conoce que el dispositivo SVC que se eligió a ser instalado como resultado óptimo del estudio en la barra 30 con un periodo de utilidad de aproximadamente 20 años, por lo cual deseáramos conocer su funcionamiento y cuanto sería el periodo de tiempo en el cual el sistema trabajaría perfectamente dentro de los límites manteniendo este equipo compensador, se realizó también el cálculo de beneficio durante un periodo de tiempo, teniendo en consideración el incremento de la carga de manera lineal, en

este estudio se fue observando los parámetros del sistema como: Voltajes de las barras, y sobrecargas posibles en los ramales.

Se tomó en consideración un incremento de potencia activa de 2.1% por año y un incremento de 0.7% de potencia reactiva por año, se analizó el sistema y se obtuvo que hasta el año 7 no se tendría problemas con la calidad de entrega de la energía, ni problemas en los conductores del sistema de potencia, pero en este año se evidenció que la existencia de sobrecarga en líneas del sistema, debido a aquello se optó por hacer el análisis hasta aquel año, debido a que necesariamente se requería un aumento en de la capacidad del ramal sobrecargado, o la implementación de cambio de tap de transformadores para aumentar en algo la capacidad de transmisión del sistema y a partir de ahí se necesitaría realizar un nuevo estudio para una nueva distribución de compensación reactiva.

Tabla 3.9 Proyección de ahorro energético y económico por compensador en barra 30

Año	Ahorro energético semanal (MWh)	Ahorro energético anual (GWh)	Costo medio de compra energía	Ahorro económico anual
1	639,3084066	33,2440371	0,032	\$1.063.809,19
2	656,2995969	34,127579		\$1.092.082,53
3	667,5695698	34,7136176		\$1.110.835,76
4	675,7658797	35,1398257		\$1.124.474,42
5	687,5306518	35,7515939		\$1.144.051,00
6	704,3751158	36,627506		\$1.172.080,19
7	625,7734394	32,5402188		\$1.041.287,00

Teniendo como resultado un ahorro energético promedio por año de 34.6 GWh, en términos monetarios se tuvo un ahorro de \$7.748.620,11 por la reducción de pérdidas durante el periodo antes mencionado. A eso hay que decir que se tomó en cuenta un crecimiento lineal de la carga y que el crecimiento fue distribuido, se sabe que no todo sistema crece de aquella manera, debido a la ubicación geográfica, los sitios en donde existe un aumento en la densidad poblacional, donde aparecen las nuevas industrias y el comercio.

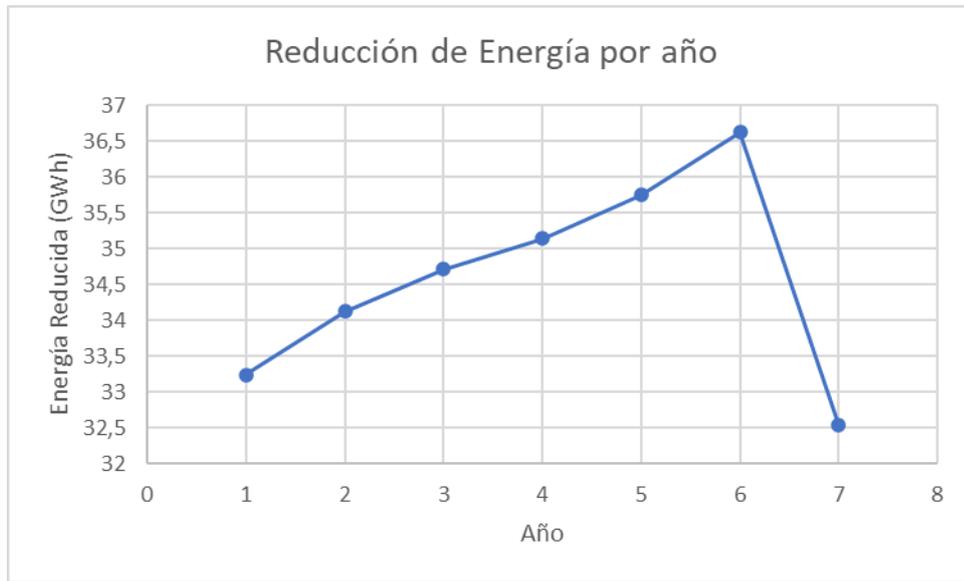


Figura 3.15 Proyección de ahorro energético por compensador en barra 30

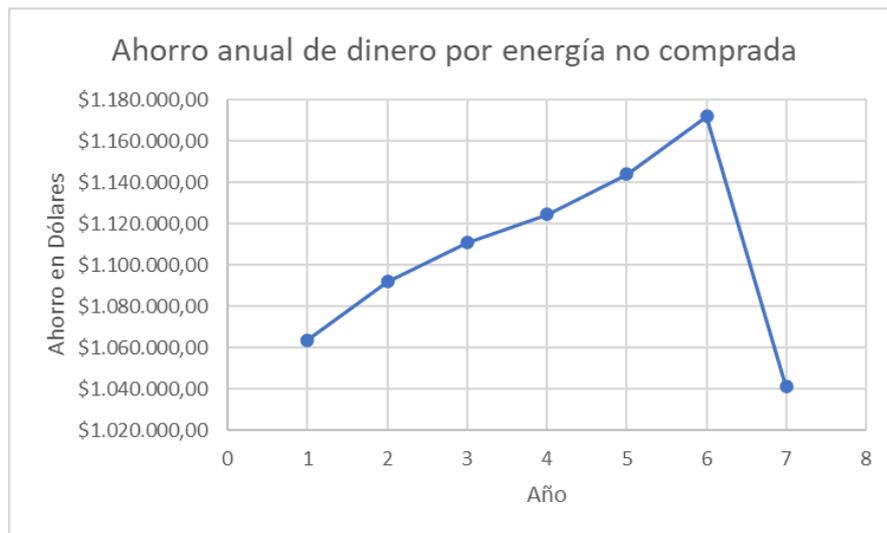


Figura 3.16 Proyección de ahorro económico por compensador en barra 30

Considerando la proyección de ahorro económico de energía debido al crecimiento lineal de carga, los costos de inversión y mantenimiento anual del SVC, mostrado en la Tabla 3.4, la inversión total se recuperaría en el año 5 con un TIR de 15% teniendo un VAN de \$300.788,01.

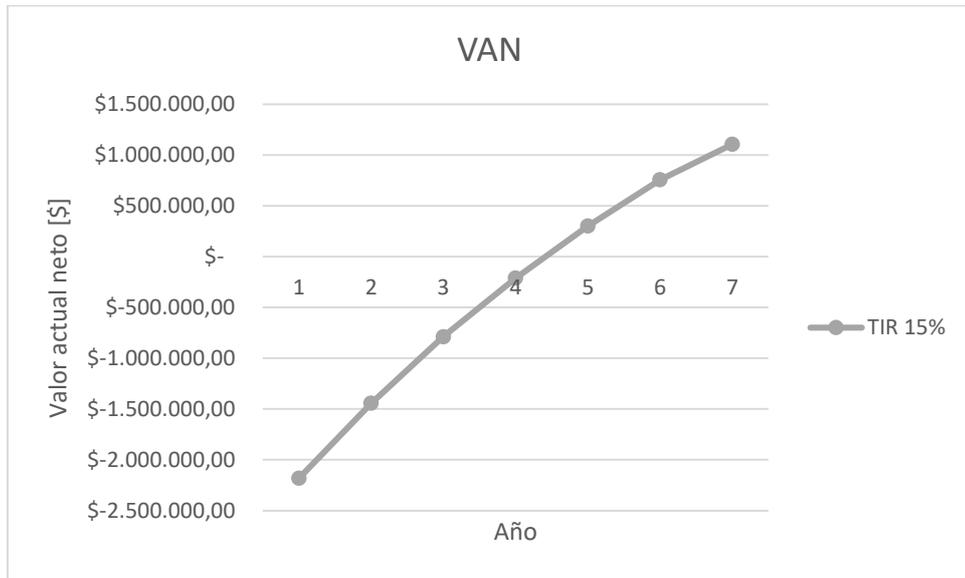


Figura 3.17 Curva de Valor Actual Neto por la aplicación del SVC en barra 30 y escenario de crecimiento de carga.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

La compensación reactiva sobre un sistema eléctrico radial mejora el voltaje suministrado reduciendo las pérdidas eléctricas y cargabilidad de la línea pero en un sistema eléctrico en anillo se requiere el buen manejo de reactivos debido a que se puede mejorar el voltaje suministrado pero no garantizar una reducción de las pérdidas eléctricas; por ello se, requiere un gerenciamiento óptimo de reactivos que garantice una reducción de las pérdidas eléctricas y que el voltaje suministrado se encuentre dentro de los límites establecidos de calidad.

El estudio realizado sobre el sistema eléctrico IEEE 30 barras, presentó soluciones locales de ubicación del compensador que garantizan una reducción de las pérdidas eléctricas; así mismo, la solución óptima de ubicación del compensador que permite la mayor reducción de pérdidas eléctricas. Las soluciones locales y óptima de ubicación del compensador consideran el valor óptimo de despacho de reactivos. Las soluciones locales y óptima garantiza que el sistema eléctrico suministra un voltaje dentro de los rangos establecidos.

El estudio realizado sobre el sistema eléctrico IEEE 30 barras permitió demostrar que el programa obtuvo un correcto despacho de potencia reactiva horaria con el fin de obtener la menor cantidad de pérdidas eléctricas en el sistema, manteniendo los perfiles de voltaje dentro de los valores requeridos por el estándar IEEE1860-2014, en un tiempo pequeño de simulación, de , considerando que el programa fue ejecutado en un computador.

El método utilizado entregó las distintas opciones de ubicaciones y despacho de potencia reactiva para los compensadores, en el cual se obtuvo como mejor resultado el ubicar un SVC en la barra 30 del sistema con un valor máximo de 20 KVar, debido a que en esta se presentaba la mayor reducción de pérdidas con un rango de compensación necesaria menor 19 KVar. Esta fue la mejor opción

también en cuenta a lo económico debido a se obtuvo la mayor cantidad de ahorro de dinero por periodo de tiempo estudiado.

Se elaboró un programa innovador, didáctico, fácil de manejar, este programa permite realizar el estudio de cualquier tipo de sistema eléctrico de potencia, solamente ingresando los parámetros del sistema, la cantidad de partículas e iteraciones y la precisión de la respuesta deseada.

Recomendaciones

En base a la investigación realizada se podría implementar como variables a las variaciones del tap de los transformadores de tal manera que se realice la búsqueda óptima de la correcta selección de estos para disminuir las posibles sobrecargas de las líneas.

Para trabajos futuros se recomienda implementar otra función objetivo orientado a reducir la variación del voltaje de suministro respecto a su voltaje nominal.

Si se desea realizar un estudio a largo plazo, se podría colocar la función de costo de los dispositivos compensadores de reactivos para poder facilitar el análisis económico y llegar a tener resultados más aproximados sobre el ahorro total de dinero.

Tener en cuenta la introducción de la generación distribuida en los sistemas de distribución, debido a que estos podrían alterar los parámetros del sistema, así como también el flujo o los niveles de tensión.

Al analizar un sistema real se debe considerar el correcto crecimiento de la carga, debido a que la carga no crece de manera distribuida, al contrario, estas dependen de la ubicación geográfica de los nuevos consumidores de energía como industrias o centros comerciales, además del crecimiento de la población, para tener un correcto estudio del sistema.

BIBLIOGRAFÍA

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. C. J. Dolores, Sistema de Distribución de Energía Eléctrica, Sans Serif Editore, 1995.
- [2] S. B. Derian, «Estudio de la Proyección de la Demanda Eléctrica y su Impacto en el Sistema de CNEL EP - Unidad de Negocio Los Ríos en el periodo comprendido del 2019 al 2024,» Guayaquil, 2019.
- [3] C. C. Manuel, «Ubicación Óptima de Reguladores de Voltaje en el sistema de medio voltaje correspondiente a la subestación Portoelo, aplicando segregación de flujo de carga al más crítico,» 2018.
- [4] A. R. José, «LOS SERVICIOS AUXILIARES EN REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA EN PRESENCIA DE GRAN CANTIDAD DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA DE BAJA POTENCIA,» *Pistas Educativas*, vol. 40, nº 130, p. 18, 2018.
- [5] L. L. José, «DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL CONTROL DE UN COMPENSADOR ESTÁTICO DE REACTIVOS (SVC),» Guayaquil, 2012.
- [6] B. C. Diego, «Análisis de estabilidad dinámica en tiempo real para compensadore estáticos para la red eléctrica ecuatoriana en 500kV,» Guayaquil, 2016.
- [7] F. G. CLAVIJO, «ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD PARA LA COMPENSACIÓN DE REACTIVO EN FUNCIÓN DEL MÍNIMO DE PÉRDIDAS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN.,» Quito, Ecuador, 2015.
- [8] K. P., Power System Stability and Control.
- [9] J. Rosero, «Fuentes de Generación de Energía Eléctrica Convencional y Renovable a Nivel Mundial,» *Revista Politécnica*, vol. 32, nº 2, p. 13, 2013.
- [10] CENACE, «PROCEDIMIENTOS DE DESPACHO Y OPERACION».
- [11] J. Macancela, «ANÁLISIS DE PRE-FACTIBILIDAD PARA EL USO DE PICO-CENTRALES EN EL ORIENTE ECUATORIANO,» Cuenca, Ecuador, 2010.

- [12] ARCONEL, «REGULACIÓN Nro. 001/2020,» 2020.
- [13] C. Guevara, «El efecto de variación de la demanda en la eficiencia energética,» 2012.
- [14] T. Kojima, «Distribution Static Var Compensators and Static Synchronous Compensators for Suppressing Voltage Fluctuation,» 2017.
- [15] J. Ríos, «Generación distribuida con energías renovables (caso energía solar fotovoltaica),» 2019.
- [16] J. Fraile, «MODELO DE DESPACHO ECONÓMICO INCLUYENDO RESTRICCIONES DE RED,» Madrid.
- [17] Z. D., «Power System Inertia Estimation and Frequency Response Assessment».
- [18] Z. M., «TRANSIENT STABILITY OF POWER GENERATING STATIONS SYNCHRONOUSLY CONNECTED TO LOW INERTIA ELECTRICAL POWER SYSTEMS».
- [19] D. C. Christine, «Analysis on Voltage Stability Indices».
- [20] I. Calle, «Flujo de potencia óptimo con restricciones de estabilidad transitoria,» 2011.
- [21] CONELEC, «Regulación 004/01,» 2001.
- [22] A. M. Mónica, «GESTIÓN ÓPTIMA DE POTENCIA REACTIVA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS CON GENERACIÓN EÓLICA,» Leganés, 2010.
- [23] M. S. Alvarez-Alvarado, «A Multi-Stage Accelerated Quantum Particle Swarm Optimization for Planning and Operation of Static Var Compensators,» Cuenca, Ecuador, 2018.
- [24] T. T. D. Kaur, «An Optimal Reactive Power Dispatch (ORPD) for Voltage Security Using Particle Swarm Optimization (PSO) in Graph Theory,» de *IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET)*, 2016.
- [25] M. S. Alvarez-Alvarado, «Smart Maintenance Model for Operational Planning of Static Synchronous Compensators,» *IEEE Milan PowerTech*, 2019.
- [26] J. S. W. J. Grainger, Análisis de Sistemas de Potencia, Cenace, Uanl ed., 1996, p. 743.
- [27] S. Talukder, *Communications in Computer and Information Science*, pp. 1-541,

February 2014.

- [28] M. S. Alvarez-Alvarado, «A New Approach for Reliability Assessment of a Static Var Compensator Integrated Smart Grid,» de *PMAPS*, 2018.
- [29] D. O. Santillán, «Estudio de la Proyección de la Demanda Eléctrica y su Impacto en el Sistema de CNEL EP - Unidad de Negocio Los Ríos en el periodo comprendido del 2019 al 2024,» Guayaquil, 2019.

Parámetros de barra del sistema eléctrico IEEE 30 barras.

#	No	Nombre	Tb	V0	th0	Pd	Qd	Pg0	Qg0	Vg	Qgmax	Qgmin	gsh	bsh	Vmax	Vmin
#				[pu]	[grau]	[MW]	[MVA]	[MW]	[MVA]	[pu]	[MVA]	[MVA]	[pu]	[pu]	[pu]	[pu]
	1	"Glen Lyn 132"	3	1.060	0.00	00.0	0.0	260.2	-16.1	1.060	0.0	0.0	0.000	0.000	1.050	0.950
	2	"Claytor 132"	2	1.045	-5.48	21.7	12.7	40.0	50.0	1.045	50.0	-40.0	0.000	0.000	1.050	0.950
	3	"Kumis 132"	0	1.021	-7.96	2.4	1.2	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.000	0.000	1.050	0.950
	4	"Hancock 132"	0	1.012	-9.62	7.6	1.6	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.000	0.000	1.050	0.950
	5	"Fieldale 132"	2	1.010	-14.37	94.2	19.0	0.0	37.0	1.010	40.0	-40.0	0.000	0.000	1.050	0.950
	6	"Roanoke 132"	0	1.010	-11.34	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.000	0.000	1.050	0.950
	7	"Blaine 132"	0	1.002	-13.12	22.8	10.9	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.000	0.000	1.050	0.950
	8	"Reusens 132"	2	1.010	-12.10	30.0	30.0	0.0	37.3	1.010	40.0	-10.0	0.000	0.000	1.050	0.950
	9	"Roanoke 1.0"	0	1.051	-14.38	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.000	0.000	1.050	0.950
	10	"Roanoke 33"	0	1.045	-15.97	5.8	2.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.000	0.190	1.050	0.950
	11	"Roanoke 11"	2	1.082	-14.39	0.0	0.0	0.0	16.2	1.082	24.0	-6.0	0.000	0.000	1.050	0.950
	12	"Hancock 33"	0	1.057	-15.24	11.2	7.5	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.000	0.000	1.050	0.950
	13	"Hancock 11"	2	1.071	-15.24	0.0	0.0	0.0	10.6	1.071	24.0	-6.0	0.000	0.000	1.050	0.950
	14	"Bus 14 33"	0	1.042	-16.13	6.2	1.6	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.000	0.000	1.050	0.950
	15	"Bus 15 33"	0	1.038	-16.22	8.2	2.5	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.000	0.000	1.050	0.950
	16	"Bus 16 33"	0	1.045	-15.83	3.5	1.8	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.000	0.000	1.050	0.950
	17	"Bus 17 33"	0	1.040	-16.14	9.0	5.8	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.000	0.000	1.050	0.950
	18	"Bus 18 33"	0	1.028	-16.82	3.2	0.9	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.000	0.000	1.050	0.950

19 "Bus 19 33"	0	1.026	-17.00	9.5	3.4	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.000	0.000	1.050	0.950
20 "Bus 20 33"	0	1.030	-16.80	2.2	0.7	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.000	0.000	1.050	0.950
21 "Bus 21 33"	0	1.033	-16.42	17.5	11.2	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.000	0.000	1.050	0.950
22 "Bus 22 33"	0	1.033	-16.41	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.000	0.000	1.050	0.950
23 "Bus 23 33"	0	1.027	-16.61	3.2	1.6	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.000	0.000	1.050	0.950
24 "Bus 24 33"	0	1.021	-16.78	8.7	6.7	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.000	0.043	1.050	0.950
25 "Bus 25 33"	0	1.017	-16.35	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.000	0.000	1.050	0.950
26 "Bus 26 33"	0	1.000	-16.77	3.5	2.3	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.000	0.000	1.050	0.950
27 "Cloverdle 33"	0	1.023	-15.82	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.000	0.000	1.050	0.950
28 "Cloverdle132"	0	1.007	-11.97	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.000	0.000	1.050	0.950
29 "Bus 29 33"	0	1.003	-17.06	2.4	0.9	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.000	0.000	1.050	0.950
30 "Bus 30 33"	0	0.992	-17.94	10.6	1.9	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.000	0.000	1.050	0.950;

Parámetros de ramal del sistema eléctrico IEEE 30 barras.

```
# No ini fin Tr r x bshl a amax amin fi Smax :=
# k i j [pu] [pu] [pu] [grau] [MVA]
1 1 2 0 0.0192 0.0575 0.0528 0.0000 0.0000 0.0000 0.0 220
```

2	1	3	0	0.0452	0.1652	0.0408	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	100
3	2	4	0	0.0570	0.1737	0.0368	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	55
4	3	4	0	0.0132	0.0379	0.0084	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	95
5	2	5	0	0.0472	0.1983	0.0418	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	100
6	2	6	0	0.0581	0.1763	0.0374	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	75
7	4	6	0	0.0119	0.0414	0.0090	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	90
8	5	7	0	0.0460	0.1160	0.0204	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	25
9	6	7	0	0.0267	0.0820	0.0170	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	45
10	6	8	0	0.0120	0.0420	0.0090	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	40
11	6	9	1	0.0000	0.2080	0.0000	0.9780	1.1000	0.9000	0.0	35
12	6	10	1	0.0000	0.5560	0.0000	0.9690	1.1000	0.9000	0.0	20
13	9	11	0	0.0000	0.2080	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	20
14	9	10	0	0.0000	0.1100	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	35
15	4	12	1	0.0000	0.2560	0.0000	0.9320	1.1000	0.9000	0.0	60
16	12	13	0	0.0000	0.1400	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	15
17	12	14	0	0.1231	0.2559	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	10
18	12	15	0	0.0662	0.1304	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	25
19	12	16	0	0.0945	0.1987	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	10
20	14	15	0	0.2210	0.1997	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	5
21	16	17	0	0.0524	0.1923	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	5

22	15	18	0	0.1073	0.2185	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	10		
23	18	19	0	0.0639	0.1292	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	5		
24	19	20	0	0.0340	0.0680	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	10		
25	10	20	0	0.0936	0.2090	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	15		
26	10	17	0	0.0324	0.0845	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	10		
27	10	21	0	0.0348	0.0749	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	25		
28	10	22	0	0.0727	0.1499	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	10		
29	21	22	0	0.0116	0.0236	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	5		
30	15	23	0	0.1000	0.2020	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	10		
31	22	24	0	0.1150	0.1790	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	10		
32	23	24	0	0.1320	0.2700	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	5		
33	24	25	0	0.1885	0.3292	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	5		
34	25	26	0	0.2544	0.3800	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	5		
35	25	27	0	0.1093	0.2087	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	10		
36	28	27	1	0.0000	0.3960	0.0000	0.9680	1.1000	0.9000	0.0	25		
37	27	29	0	0.2198	0.4153	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	10		
38	27	30	0	0.3202	0.6027	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	10		
39	29	30	0	0.2399	0.4533	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	5		
40	8	28	0	0.0636	0.2000	0.0428	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	5		
41		6	28	0	0.0169		0.0599	0.0130	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	2

ANEXO B – Código Menú Principal

```
function varargout = App(varargin)
% APP MATLAB code for App.fig
%     APP, by itself, creates a new APP or raises the existing
%     singleton*.
%
%     H = APP returns the handle to a new APP or the handle to
%     the existing singleton*.
%
%     APP('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%     function named CALLBACK in APP.M with the given input arguments.
%
%     APP('Property','Value',...) creates a new APP or raises the
%     existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%     applied to the GUI before App_OpeningFcn gets called. An
%     unrecognized property name or invalid value makes property application
%     stop. All inputs are passed to App_OpeningFcn via varargin.
%
%     *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%     instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help App

% Last Modified by GUIDE v2.5 14-Jan-2021 03:01:34

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @App_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @App_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',   [], ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
function App_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to App (see VARARGIN)

% Choose default command line output for App
handles.output = hObject;

% Update handles structure
```

```

guidata(hObject, handles);
function varargout = App_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;
%Análisis Flujo de Potencia
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
    AnalisisFlujoPotencia;
%Análisis de Ubicación y despacho óptimo de reactivos
function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)
    AnalisisUbicacionDespacho;
%Análisis de Despacho óptimo de reactivos
function pushbutton6_Callback(hObject, eventdata, handles)
    AnalisisDespacho;
%Salir
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

ANEXO C – Cuadro de ventana de aplicación

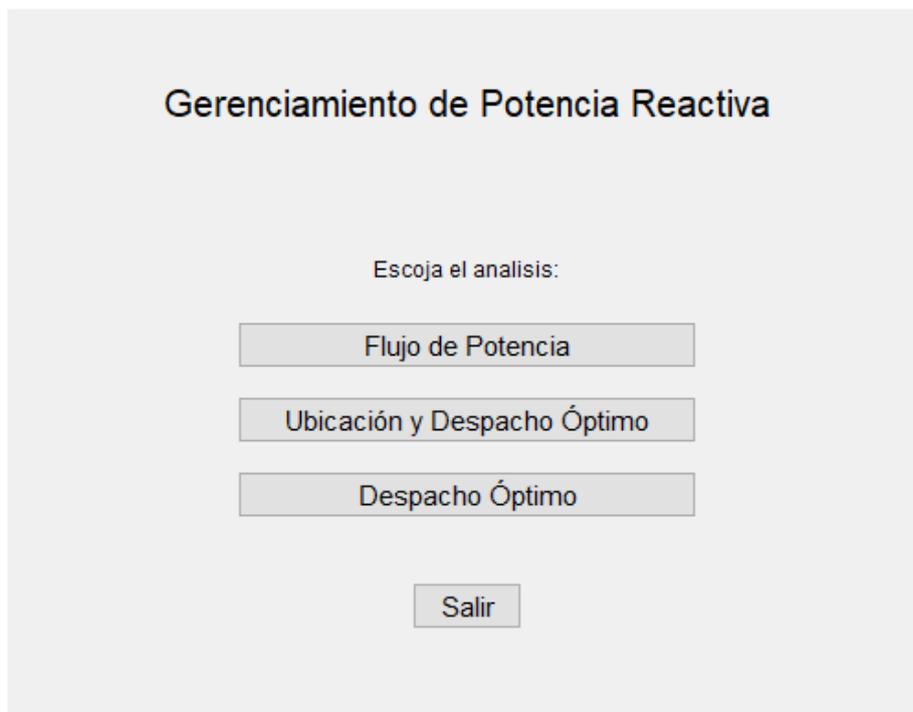


Figura 5.2 Menú Principal del Programa

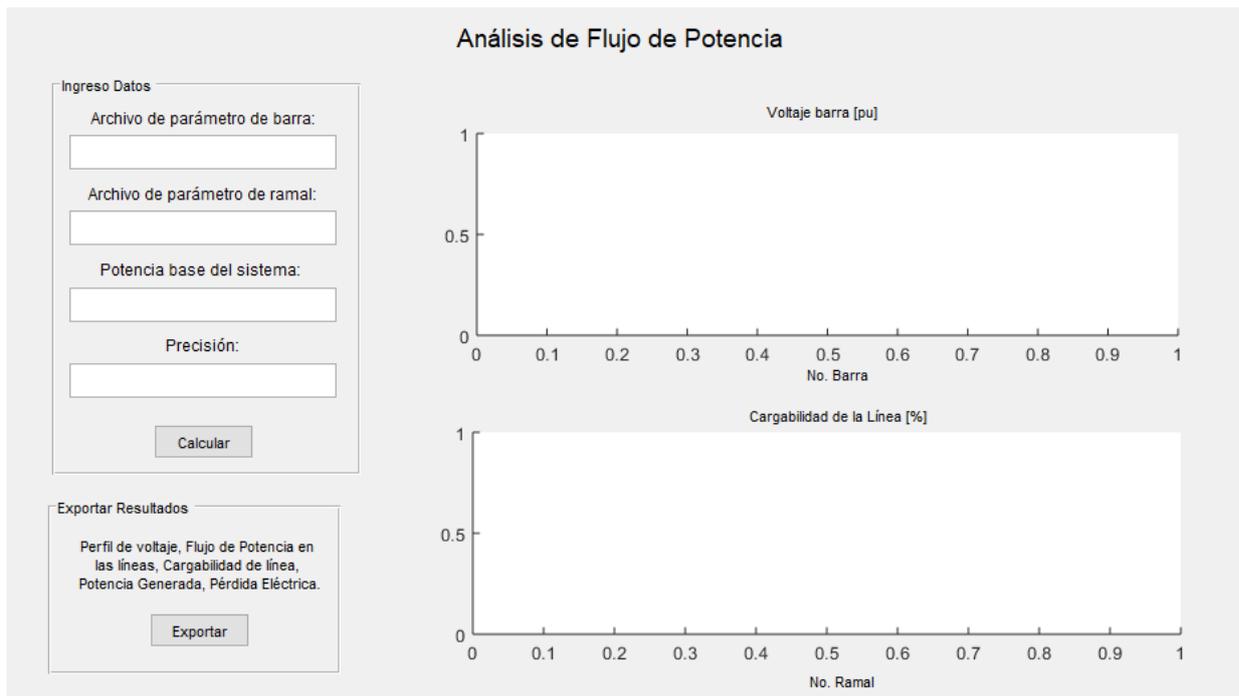


Figura 5.3 Menú de Análisis de Flujo de Potencia

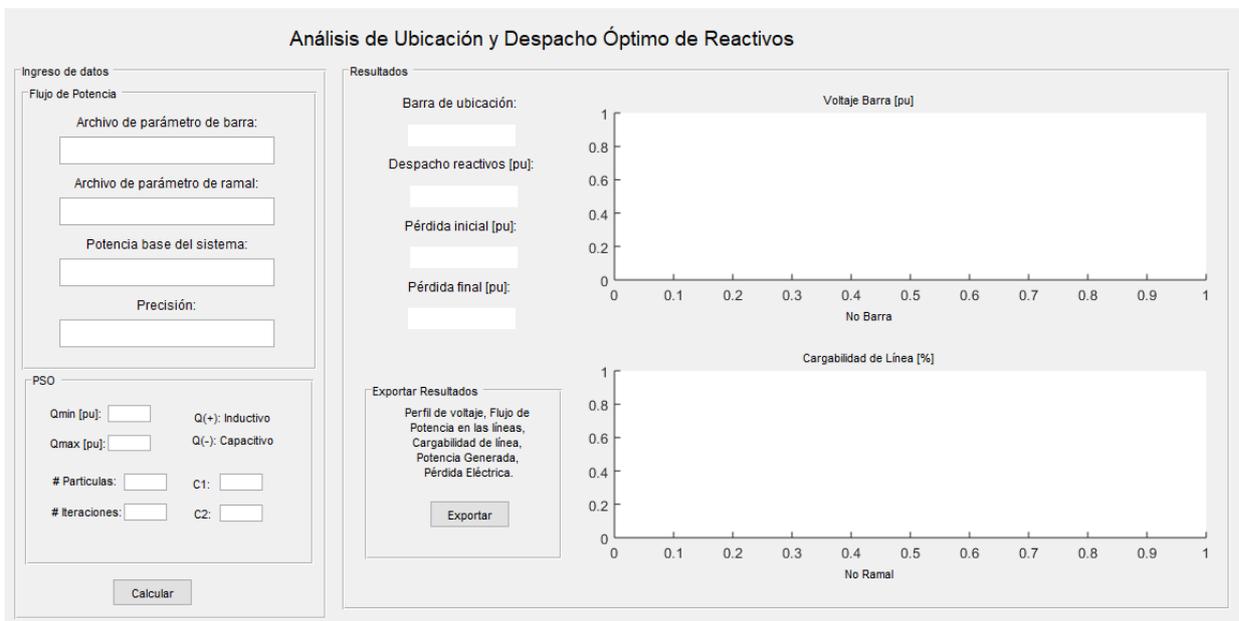


Figura 5.4 Menú de Análisis de Ubicación y Despacho Óptimo de Reactivos

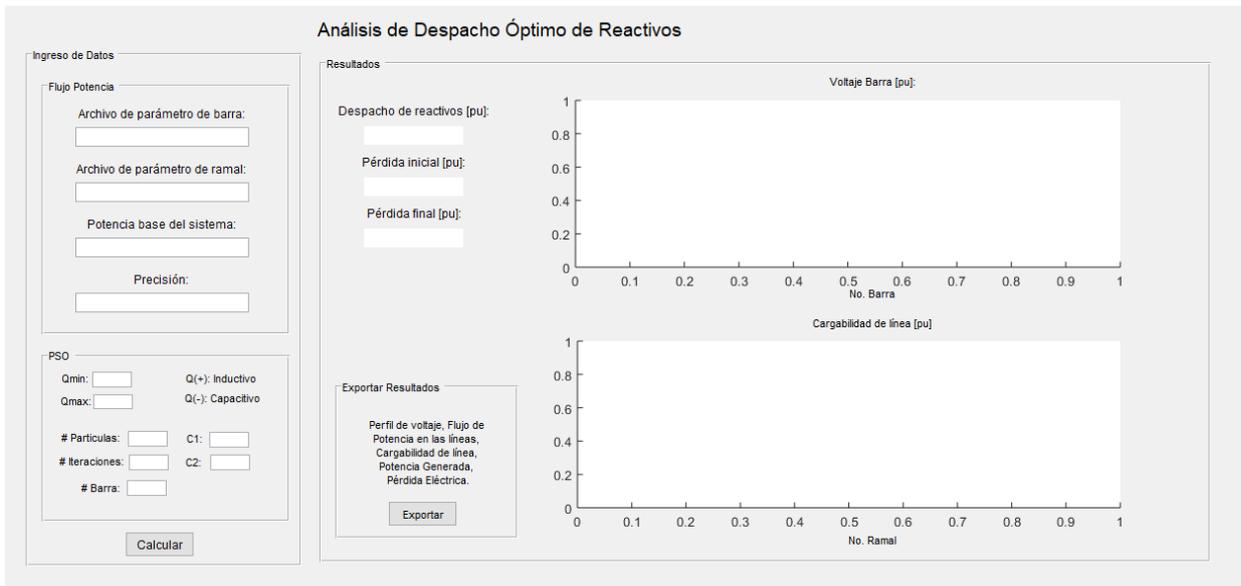


Figura 5.5 Menú de Análisis de Despacho Óptimo de Reactivos