

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**UBICACIÓN ÓPTIMA DE CAPACITORES EN REDES PRIMARIAS
DE DISTRIBUCIÓN UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS
CONSIDERANDO DEMANDA VARIABLE**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO**

GALO ROBERTO ALBUJA JARAMILLO
galoalbuja@hotmail.com

DIRECTOR: ING. CARLOS RIOFRÍO
carlos.riofrio@epn.edu.ec

Quito, diciembre 2011

DECLARACIÓN

Yo, Galo Roberto Albuja Jaramillo, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Galo Roberto Albuja Jaramillo

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Galo Roberto Albuja Jaramillo, bajo mi supervisión.

Ing. Carlos Riofrío R.
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Carlos Riofrío por su guía para desarrollar este trabajo, recordando que una palabra de aliento es invaluable y es de gran ayuda para cumplir los objetivos trazados.

A los ingenieros de la EEQSA Merci Jácome y Ricardo Dávila, la amistad, la confianza y la generosidad nunca se pierden.

DEDICATORIA

A mis padres, por su esfuerzo y apoyo para sacar adelante a toda nuestra familia

CONTENIDO

DECLARACIÓN.....	I
CERTIFICACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
DEDICATORIA.....	IV
CONTENIDO.....	V
RESUMEN.....	VIII
PRESENTACIÓN.....	IX
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....	2
1.2 OBJETIVOS	3
1.2.1 Objetivo General.....	3
1.2.2 Objetivos Específicos	3
1.2.3 Alcance.....	3
2 CONCEPTOS TEÓRICOS BÁSICOS.....	4
2.1 DEFINICIONES BÁSICAS.....	4
2.1.1 CAPACITORES.....	4
2.1.2 CAPACITORES EN PARALELO.....	5
2.2 EFECTOS EN LA ADICIÓN DE CAPACITORES EN PARALELO.....	5
2.2.1 CONTROL DE VOLTAJE	6
2.2.2 INCREMENTO DE LA CAPACIDAD DEL SISTEMA.....	7
2.2.3 REDUCCIÓN DE PERDIDAS DEL SISTEMA.....	7
2.3 INSTALACIÓN DE CAPACITORES EN ALIMENTADORES PRIMARIOS DE DISTRIBUCIÓN.....	8
2.3.1 CAPACITORES FIJOS.....	8
2.3.2 CAPACITORES CONECTABLES	9
2.3.2.1 Control de capacitores conectables.....	10
2.3.2.1.1 Control de tiempo	10
2.3.2.1.2 Control por temperatura.....	11
2.3.2.1.3 Control por voltaje.....	11
2.3.2.1.4 Control por VArS	11
2.3.2.1.5 Control por factor de potencia.....	11
2.3.2.1.6 Control por corriente	11
2.3.3 CAPACIDADES ESTÁNDAR	12
2.3.4 TIPOS DE CONEXIÓN.....	12
2.3.5 PROTECCIÓN.....	13
2.3.5.1 Fusibles	13
2.3.5.2 Pararrayos	14
2.3.6 ARMÓNICAS.....	14
2.3.7 INSPECCIÓN Y MANTENIMIENTO.....	15
2.4 UBICACIÓN ÓPTIMA DE CAPACITORES EN ALIMENTADORES PRIMARIOS.....	15

2.4.1	CRITERIO DE LOS 2/3	15
2.4.2	CLASIFICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE UBICACIÓN DE CAPACITORES	16
2.4.2.1	Métodos analíticos.....	16
2.4.2.2	Métodos de programación numérica	17
2.4.2.3	Métodos heurísticos.....	17
2.4.2.4	Métodos que utilizan la inteligencia artificial	18
2.4.2.4.1	Algoritmos genéticos	18
2.4.2.4.2	Sistemas expertos	18
2.4.2.4.3	Redes Artificiales neuronales	18
2.4.2.4.4	Teoría del conjunto difuso.....	19
3	METODOLOGÍA	20
3.1	FORMULACIÓN TEÓRICA DEL PROBLEMA	20
3.1.1	MODELO DE VARIACIÓN DE DEMANDA	20
3.1.2	TAMAÑOS Y ESQUEMAS DE CONTROL.....	21
3.1.3	CAPACITORES FIJOS.....	22
3.1.4	CAPACITORES CONECTABLES	22
3.1.5	FUNCIÓN OBJETIVO	22
3.1.5.1	Beneficio en la reducción de pérdidas de energía	22
3.1.5.2	Beneficio en la reducción de la Demanda	23
3.1.5.3	Costo de instalación de capacitores	23
3.1.6	RESTRICCIONES	24
3.1.6.1	Restricciones de factor de potencia.....	24
3.1.6.2	Restricciones de voltaje.....	24
3.1.6.3	Restricciones adicionales	24
3.2	FLUJO DE POTENCIA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN.....	25
3.2.1	MODELO DE RED DE DISTRIBUCIÓN y ALGORITMO DE SOLUCIÓN DEL FLUJO DE POTENCIA	25
3.3	FACTORES TÉCNICOS Y ECONÓMICOS DEL ESQUEMA DE COMPENSACIÓN ADOPTADO	25
3.3.1	COSTO DE LOS CAPACITORES	26
3.3.1.1	Costos para bancos conectables.....	27
3.3.2	BENEFICIO ANUAL EN LA REDUCCIÓN DE PERDIDAS DE ENERGÍA	28
3.3.3	BENEFICIO ANUAL EN LA REDUCCIÓN DE LA DEMANDA.....	28
3.4	METODOLOGÍA DE OPTIMIZACIÓN UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS.....	28
3.4.1	COMPUTACIÓN EVOLUTIVA (CE) Y ALGORITMOS EVOLUTIVOS (AE).....	28
3.4.2	ALGORITMOS GENÉTICOS (AG)	30
3.4.2.1	Método de los nichos.....	31
3.4.2.1.1	Escenarios multimodales.....	31
3.4.2.1.2	Poblamiento determinístico.....	31
4	PROPUESTA DE LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE CAPACITORES VÍA ALGORITMOS GENÉTICOS	33
4.1	ALGORITMOS GENÉTICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS.....	33
4.2	UBICACIÓN DE CAPACITORES UTILIZANDO AG.....	33

4.3	ESQUEMA GENERAL.....	34
4.4	PARÁMETROS INICIALES	35
4.4.1	INFORMACIÓN DEL SISTEMA	35
4.4.2	INFORMACIÓN ALGORITMOS GENÉTICOS	35
4.5	CONDICIONES INICIALES DE LA RED	36
4.6	POBLACIÓN INICIAL	36
4.6.1	REPRESENTACIÓN DE LAS SOLUCIONES	36
4.6.2	POBLACIÓN	38
4.7	VALORACIÓN DEL ESQUEMA DE COMPENSACIÓN.....	38
4.7.1	PENALIZACIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO.....	39
4.8	POBLAMIENTO DETERMINÍSTICO	39
4.8.1	CRUCE.....	39
4.8.2	MUTACIÓN	40
4.9	RESULTADOS	40
5	SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	41
5.1	PROBLEMA 9 BARRAS	41
5.2	PROBLEMA 30 BARRAS	46
5.3	PROBLEMA 33 BARRAS	49
5.4	PROBLEMA ALIMENTADOR 16C EEQSA.....	53
5.5	ANÁLISIS DE MODELACIÓN SEMANAL.....	56
5.6	ANÁLISIS DE MODELACIÓN AG MATLAB.....	58
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	60
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62
	 ANEXO 1: DEMOSTRACIÓN DEL CRITERIO DE LOS 2/3 PARA UBICACIÓN DE CAPACITORES.....	 64
	ANEXO 2: REPRESENTACIÓN DE LA RED Y ALGORITMO DE SOLUCIÓN DEL FLUJO DE POTENCIA.....	66
	ANEXO 4: ALGORITMOS GÉTICOS.....	68
	ANEXO 5: DATOS DE LOS CASOS DE ESTUDIO.....	73
	ANEXO 6: GUÍA DE USO APLICACIÓN UBICAP_AG.....	81

UBICACIÓN ÓPTIMA DE CAPACITORES EN REDES PRIMARIAS DE DISTRIBUCIÓN UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS CONSIDERANDO DEMANDA VARIABLE

Galo Roberto Albuja Jaramillo

Bajo la supervisión del Ing. Carlos Riofrío Reyes

RESUMEN

Este proyecto de titulación presenta una revisión de la parte conceptual de la técnica de compensación reactiva en las redes primarias de distribución planteando el problema y la descripción de las diferentes técnicas que han sido desarrolladas para darle una solución al problema de ubicación óptima de capacitores.

Se describe el esquema técnico-económico que permitirá evaluar las soluciones propuestas, encontrando el beneficio, considerando para ello la reducción de pérdidas de energía, la reducción del pico de demanda y los costos de instalación de bancos de capacitores.

Se define la metodología de los algoritmos genéticos, la misma que es utilizada en el desarrollo de una aplicación digital en Matlab, que permitirá encontrar las soluciones al problema de ubicación de capacitores considerando niveles de demanda diferentes para un análisis diario y semanal.

La aplicación digital utiliza el método de los nichos utilizando el poblamiento determinístico técnica que fue aplicada por el Ing. Marco Galarza en su proyecto de titulación y forma la base de la aplicación digital desarrollada, además se complementa con una correcta valoración económica del esquema de compensación, se considera varios ejemplos y la modelación de un primario de la EEQSA.

PRESENTACIÓN

Las técnicas de compensación reactiva es ampliamente utilizada en alimentadores primarios de distribución, los beneficios tanto técnicos y económicos convierten a esta técnica en una herramienta importante para la reducción de pérdidas y mejoramiento de la calidad de servicio eléctrico.

El presente proyecto establece los principales fundamentos para la creación de una aplicación digital UBICAP_AG desarrollada en Matlab que permita brindar una solución al problema de ubicación óptima de puntos de compensación reactiva, considerando demanda variable.

En el capítulo 1 se presenta una introducción del trabajo desarrollado, incluye la justificación así como también los objetivos del proyecto.

En el capítulo 2 se desarrollan los conceptos teóricos básicos de la compensación reactiva, sus efectos y consideraciones operativas y de diseño, además de una revisión de las técnicas de ubicación de capacitores que han sido desarrolladas.

En el capítulo 3 se realiza el planteamiento del problema donde se consideran los elementos que intervienen en el mismo, se desarrolla la función objetivo con sus restricciones, se complementa la función objetivo al valorar económicamente tanto el esquema de compensación como los beneficios alcanzados, para finalizar este capítulo se realiza una introducción a los algoritmos genéticos que permite entender el proceso del cual se basa la construcción de la aplicación digital.

En el capítulo 4 se presenta el modelo para el desarrollo de la aplicación digital UBICAP_AG, donde se considera mayormente la parte de los algoritmos genéticos.

En el capítulo 5 se validan las soluciones obtenidas comparándolas con similares realizadas en otras publicaciones, se realizan los correspondientes análisis y recomendaciones para cada ejemplo desarrollado.

Las conclusiones y recomendaciones se encuentran en el capítulo 6 y para finalizar, las referencias consultadas.

Entre los anexos necesarios para complementar este proyecto se encuentra la guía de utilización de la aplicación, la información de los sistemas considerados entre otra información importante.

1 INTRODUCCIÓN

La instalación de bancos de capacitores en varios puntos de un alimentador primario de distribución es comúnmente utilizada, los beneficios que se alcanzan al utilizar esta técnica son:

- La reducción de pérdidas de energía.
- La liberación de capacidad del sistema
- El mejoramiento de los perfiles de voltaje

La utilización de un esquema de compensación de potencia reactiva requiere de una inversión y por esta razón la determinación de la ubicación óptima de estos puntos de compensación toma importancia. La complejidad de los sistemas de distribución, y la incertidumbre de la demanda vuelven a la búsqueda del óptimo, un problema complejo, de gran número de combinaciones de posibles soluciones y que está sujeto a restricciones operativas, motivo por el cual se han desarrollado varias técnicas que dan una solución cercana al óptimo.

Las técnicas más desarrolladas en los últimos tiempos son conocidas como técnicas heurísticas entre ellas y las más innovadoras son las de inteligencia artificial, las cuales optimizan los requerimientos computacionales y brindan soluciones cercanas al óptimo, entre estas técnicas se encuentran los algoritmos evolutivos, que han sido utilizados ampliamente en los sistemas eléctricos de potencia.

Entre los algoritmos evolutivos se encuentran los algoritmos genéticos, los cuales son modelados tomando las leyes de la naturaleza (supervivencia del más apto) para así encontrar la solución que mejor se adapte al problema y brinde el mayor beneficio, dentro de los algoritmos genéticos se encuentra la técnica conocida como poblamiento determinístico, la cual se la utiliza para la formación de nichos, y así conservar la diversidad genética para encontrar entre una población, soluciones locales e inclusive el óptimo global.

Esta técnica se la emplea en la solución del problema de ubicación de capacitores considerando demanda variable, razón por la cual se ha discretizado la curva de demanda, para así utilizarla en una aplicación digital desarrollada, la misma que evalúa las soluciones por cada segmento de demanda y como un conjunto completo.

Las soluciones obtenidas al utilizar la técnica de los algoritmos genéticos permitirá contar con el esquema de operación de bancos de capacitores, sean fijos y/o conectables, los costos de inversión y los beneficios económicos

El esquema propuesto garantiza la no violación de la restricción impuesta acerca del factor inductivo de la red y el correspondiente incremento del perfil de voltaje dentro de sus límites máximos y mínimos permitidos.

1.1 Justificación del proyecto

El desarrollo de las técnicas y estudios en la ubicación de bancos de capacitores en redes primarias de distribución se la justifica al cuantificar sus beneficios que son de carácter técnico y económico, las practicas de eficiencia en las empresas requieren de técnicas innovadoras que den una solución operativa de allí que los métodos heurísticos entre ellos los algoritmos genéticos brindan una solución tanto técnica como económicamente factible.

Para brindar una solución cercana a la realidad se complementará el trabajo realizado por el Ing. Marco Galarza a fin de que algoritmo tome en cuenta la variabilidad de la demanda y los esquemas de control adecuados para bancos de capacitores conectables.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Implementar el método de los algoritmos genéticos en una aplicación digital a fin de maximizar los beneficios que se obtienen en la ubicación de bancos de capacitores en las redes primarias de distribución considerando la variación de la demanda en valores discretos.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Describir en forma completa el problema de ubicación de capacitores y los beneficios tanto técnicos como económicos de su ubicación óptima.
- Encontrar la ubicación y los esquemas de control para bancos de capacitores fijos y conectables respetando las restricciones operativas de la red.
- Desarrollar y analizar varios ejemplos entre ellos el primario 16C de la EEQSA y evaluar los resultados obtenidos aplicando la técnica de algoritmos genéticos.

1.2.3 Alcance

Los resultados alcanzados por el presente proyecto se encuentran en determinar el número, capacidad y ubicación de los bancos de capacitores, sean fijos o conectables, a instalarse en los alimentadores primarios de distribución con el objetivo de maximizar los beneficios respetando las limitaciones operativas de la red, la solución considera condiciones de variación de demanda en niveles discretos y la valoración económica del esquema de compensación adoptado.

2 CONCEPTOS TEÓRICOS BÁSICOS

2.1 DEFINICIONES BÁSICAS

2.1.1 CAPACITORES

“A simple vista un capacitor da la impresión de ser un dispositivo simple y poco sofisticado, únicamente formando por dos placas metálicas separadas por un material aislante dieléctrico, sin partes movibles y que actúa solo bajo la acción de un esfuerzo eléctrico. Sin embargo un capacitor es un equipo altamente técnico, formado por materiales delgados sometidos a altos esfuerzos eléctricos.” [5]

La Fig.2.1 (a) muestra un corte de una unidad capacitor utilizado para la corrección del factor de potencia. La Fig. 2.1 (b) muestra la utilización de capacitores montados en postes.

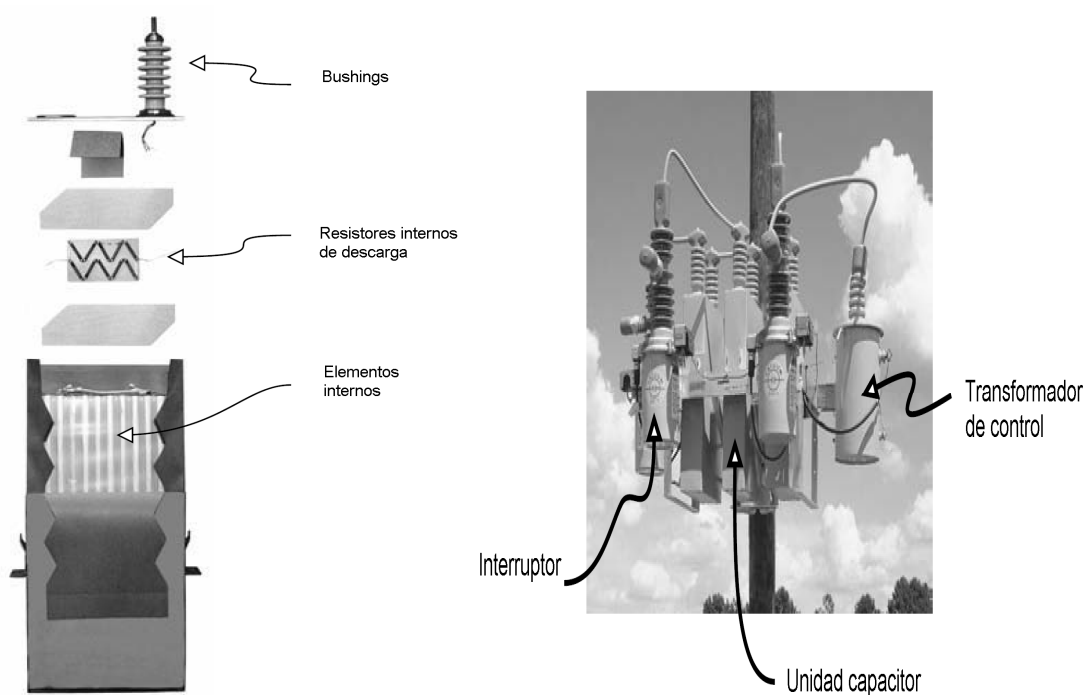


Fig. 2.1 (a) Componentes de un capacitor. (b) Banco de capacitores montaje en poste. [13]

La tecnología en la construcción de bancos de capacitores ha tenido un notable avance en los últimos 30 años, estos avances se reflejan en una mayor capacidad, menores costos por kVAr y una mayor eficiencia.

2.1.2 CAPACITORES EN PARALELO

Capacitores en paralelo son usados extensivamente en sistemas de distribución [5]. Un capacitor en paralelo suministra la corriente de tipo necesaria para contrarrestar la corriente en desfase debido a la carga inductiva, posee el mismo efecto que tenemos en un generador o motor sincrónico sobreexcitado.

Se demuestra en la Fig. 2.2 la aplicación de un capacitor en un alimentador de distribución, donde, la magnitud de la corriente se reduce, el factor de potencia mejora y consecuentemente la caída de voltaje entre los terminales de recepción y envío se reduce.

La Fig. 2.2 (c) (d) muestra los diagramas fasoriales que indican el efecto de un capacitor en derivación antes y después de su instalación.

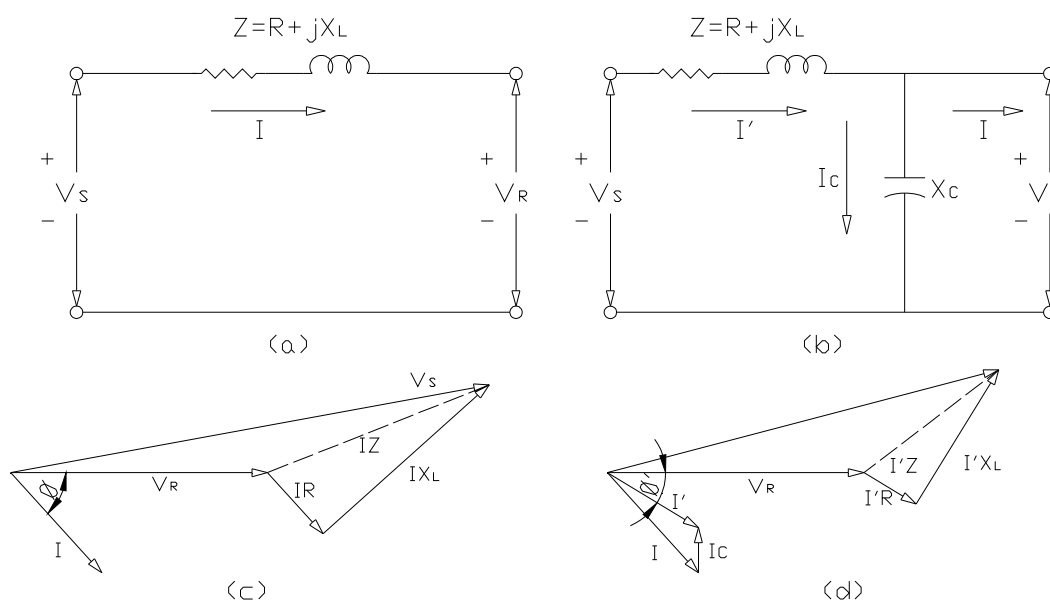


Fig. 2.2 Circuitos inductivos y diagrama fasorial (a) y (c) sin capacitor en paralelo; (b) y (d) con capacitor en paralelo. [5]

2.2 EFECTOS EN LA ADICIÓN DE CAPACITORES EN PARALELO

“La mayoría de cargas en sistemas eléctricos así como sus elementos constituyentes (transformadores y líneas) son de naturaleza inductiva y operan con un factor de potencia en atraso, en esta situación el sistema requiere de

soporte de VARs disminuyendo así su capacidad, incrementando las pérdidas del sistema y reduciendo su voltaje". [6]

En la Tabla 2.1 se resumen los beneficios al aplicar capacitores en paralelo en sistemas de transmisión y distribución.

Beneficios Sistemas	Transmisión	Distribución
Control de Voltaje	*	*
Incremento de la capacidad del sistema	+	*
Reducción de pérdidas de potencia	+	*

* Beneficio primario + Beneficio secundario

Tabla 2.1. Resumen de los beneficios de la aplicación de capacitores en paralelo. [6]

2.2.1 CONTROL DE VOLTAJE

Al aplicar capacitores en un sistema el resultado es un aumento del voltaje en el sistema desde el punto de instalación a la generación [6] y también a lo largo de su recorrido.

En el diagrama fasorial de la Fig. 2.2 se indica el efecto de la aplicación de capacitores en paralelo [5], la caída de voltaje sin compensación Fig. 2.2 (a y c) viene dada por

$$CV = I_R R + I_X X_L \quad V \quad (2.1)$$

donde R =resistencia total del circuito del alimentador, Ω

X_L =reactancia inductiva total del circuito alimentador, Ω

I_R =componente real de la corriente, A

I_X =componente reactiva de la corriente, retrasada al voltaje en 90° .

Con el capacitor instalado al final de la línea como en la Fig. 2.2 (b y d) el resultado de la caída de voltaje se la calcula

$$CV = I_R R + I_X X_L - I_C X_L \quad V \quad (2.2)$$

donde I_C =componente reactiva de la corriente, adelanta al voltaje en 90° .

La diferencia entre las caídas de voltaje calculas con las ecuaciones (2.1) y (2.2) es el incremento de voltaje debido a la instalación de un capacitor y se la expresa así

$$IV = I_C X_L \quad V \quad (2.3)$$

La instalación de bancos de capacitores en sistemas de distribución se la realiza dentro de los alimentadores o directamente en los puntos de entrega al consumidor, da como resultado un soporte de voltaje a lo largo de todo el recorrido del alimentador, generalmente se los conecta en periodos de demanda máxima y se los desconecta fuera de estos periodos.

2.2.2 INCREMENTO DE LA CAPACIDAD DEL SISTEMA

“El incrementar la capacidad del sistema es el más importante beneficio que justifica la adición de capacitores en sistemas de distribución. Es particularmente significativa cuando las cargas alimentadas del sistema están creciendo rápidamente.” [6]

La adición de de bancos de capacitores en paralelo reduce la demanda (kVA) del sistema, esta capacidad liberada puede ser utilizada para alimentar futuros incrementos de la demanda. La capacidad liberada en alimentadores primarios se traduce en beneficios a nivel de subestaciones de distribución, líneas de transmisión y generación.

2.2.3 REDUCCIÓN DE PERDIDAS DEL SISTEMA

La adición de capacitores reduce las perdidas en los alimentadores de distribución. La potencia reactiva capacitiva suministrada por el capacitor reduce su contraparte inductiva que es característica de la demanda, reduciendo así la magnitud de la corriente de línea, ya que las pérdidas resistivas son función del cuadrado de la corriente I^2R la instalación de capacitores reduce las perdidas del sistema.

Los beneficios de la instalación de un banco se reflejan aguas arriba del punto de instalación, razón por la cual se lo instala lo más cercano posible a la carga.

2.3 INSTALACIÓN DE CAPACITORES EN ALIMENTADORES PRIMARIOS DE DISTRIBUCIÓN

“Bancos de capacitores pueden ser instalados para la mayoría de niveles de voltaje, se los puede adicionar en paralelo para conseguir la capacidad en kVAr de diseño o en serie para conseguir el nivel de voltaje requerido.” [5]

Según [5] hace referencia a la recolección de datos de la industria indica que el 60% de capacitores son aplicados en alimentadores, 30% en las barras de subestaciones y el restante 10% en sistemas de transmisión.

La aplicación de capacitores para redes secundarias es común a nivel industrial, donde, el ahorro económico justifica la inversión.

Los capacitores instalados en los alimentadores pueden estar montados en postes ‘pole-mounted’, instalados en compartimentos cerrados ‘pad-mounted’ o en instalaciones sumergibles. Los bancos comúnmente incluyen de 3 a 9 unidades conectadas en configuración Y, Y con puesta a tierra o en delta. [6]

Se puede instalar en los alimentadores dos tipos de bancos de capacitores:

- Capacitores fijos
- Capacitores conectables

2.3.1 CAPACITORES FIJOS

En la Fig. 2.3 se puede observar los efectos de un capacitor en los perfiles de voltaje de un alimentador que presenta una carga uniformemente distribuida tanto para demanda máxima como demanda mínima. Si solamente se instala capacitores fijos se puede observar en la Fig. 2.3 (c) que puede producirse un aumento considerable del factor de potencia capacitivo así como también del pico de voltaje, por esta razón se instala capacitores fijos para condiciones de mínima demanda, puede observarse en la Fig. 2.4 que capacitores fijos se conectan permanentemente en el sistema y para los picos de la demanda se instalan capacitores conectables.

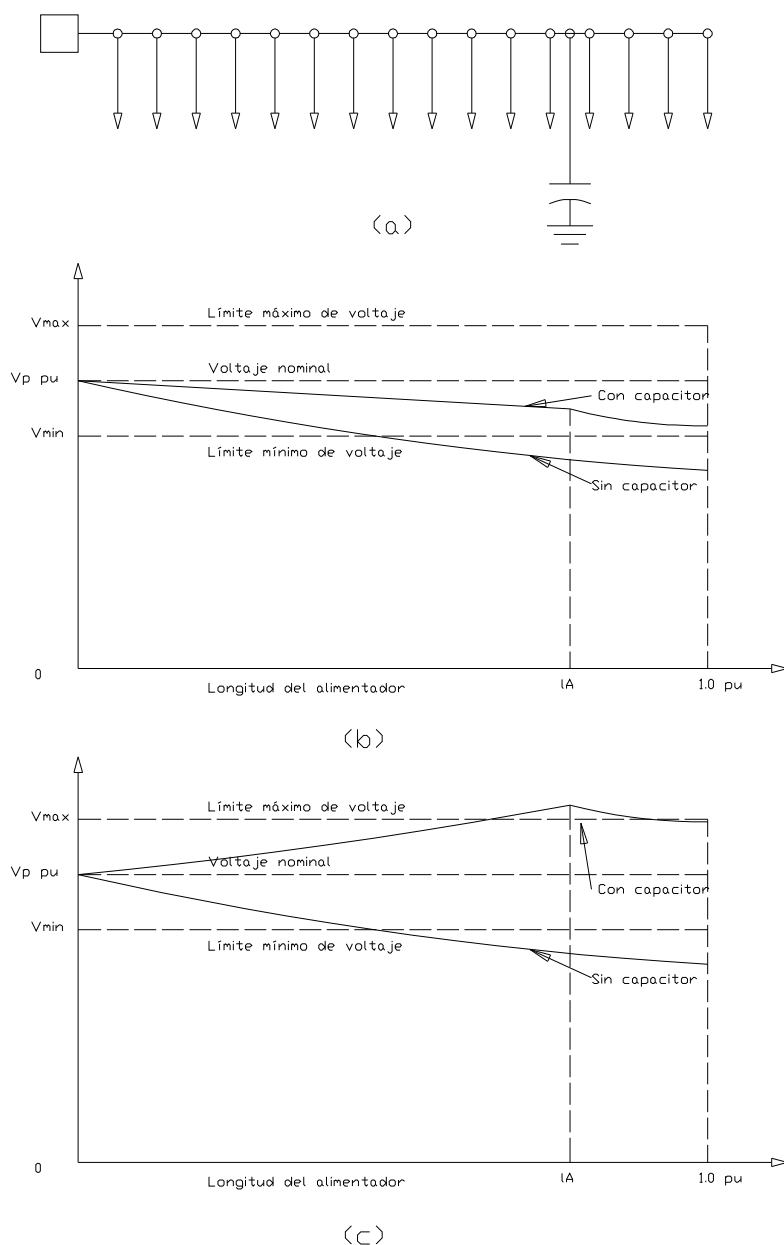


Fig. 2.3. Efecto de la ubicación de un capacitor en un alimentador con carga uniformemente distribuida (a); demanda máxima (b); demanda mínima (c) [5]

2.3.2 CAPACITORES CONECTABLES

Como puede verse en la Fig. 2.4 capacitores conectables se pueden conectar en bloque o en una serie de pasos consecutivos siguiendo la variación de la demanda a partir de su mínimo hasta alcanzar los picos. En la práctica, el número de pasos es menor ya que intervienen factores de operativos y de control de este tipo de bancos.

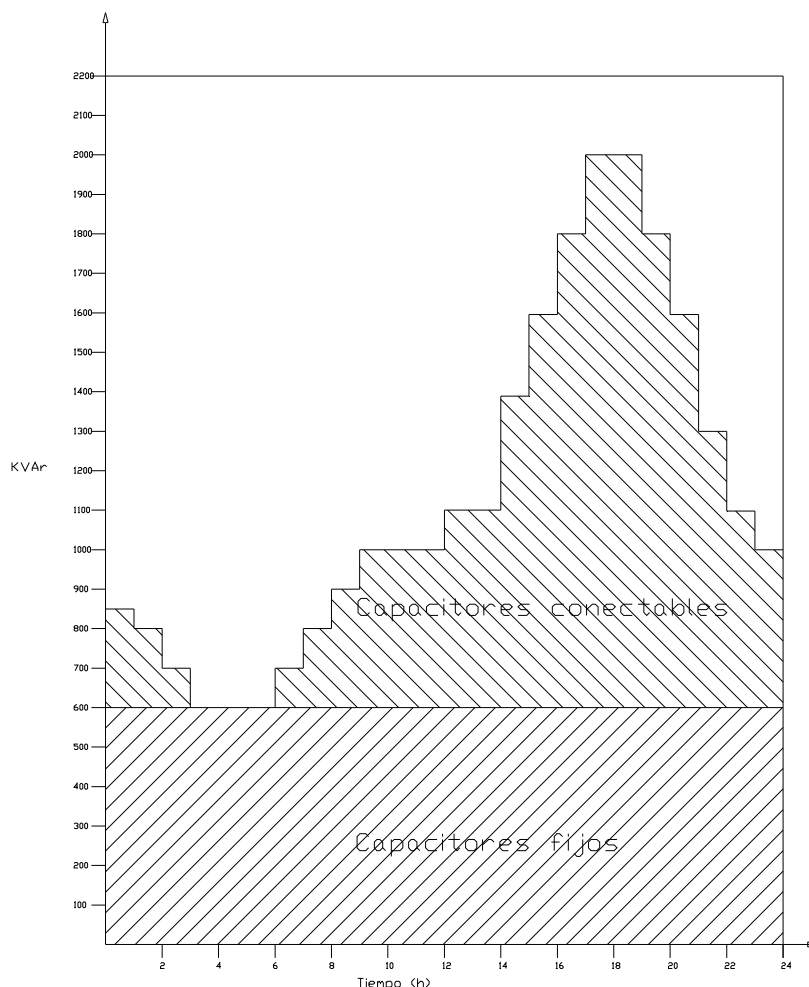


Fig. 2.4. Tipo de capacitor a ser considerado dentro de la curva de demanda. [5]

2.3.2.1 Control de capacitores conectables

Las últimas tecnologías aplicadas en la industria de elaboración de bancos de capacitores permiten obtener las siguientes formas de control de capacitores conectables:

2.3.2.1.1 Control de tiempo

Es un esquema de control muy sencillo, se conecta y desconecta dependiendo de una hora específica del día, tanto la conexión y desconexión son programables incluso con controles modernos, se puede programar los fines de semana y feriados. Es un control económico pero puede ser susceptible a operaciones erróneas debido a periodos inesperados de demanda mínima, este tipo de control es poco flexible en el número de operaciones por día.

2.3.2.1.2 Control por temperatura

Otro control sencillo, que opera entre un rango de temperaturas. Normalmente conecta el banco entre 30 y 32 °C y lo desconecta si la temperatura se encuentra entre 24 y 27 °C, dependiendo de un análisis de temperatura de los conductores.

2.3.2.1.3 Control por voltaje

El banco de capacitores es conectado y desconectado dependiendo del nivel de voltaje. Se programa su operación dentro de una banda de voltajes y con un retardo de tiempo para así disminuir el número excesivo de operaciones. Este tipo de control es apropiado en alimentadores donde los requerimientos de soporte y regulación de voltaje juegan un rol importante.

2.3.2.1.4 Control por VArS

Este tipo de control utiliza un medidor de VArS para determinar su operación. Este es un método eficaz para asegurar la operación apropiada para maximizar la reducción de pérdidas.

2.3.2.1.5 Control por factor de potencia

Es un control similar al control por VArS, este tipo de control opera el banco dependiendo del factor de potencia.

2.3.2.1.6 Control por corriente

Este control opera basado en la corriente de línea relacionándola con la demanda de VArS.

Los tipos de control que requieren señales de voltaje y de corriente, utilizan sensores solamente en una fase para así disminuir su costo, existen también equipos con sensores en las tres fases y su operación responde al requerimiento de VArS de cada fase, un alto grado de precisión no es requerido para el control de los capacitores. [13]

El desarrollo en control electrónico permite la operación de estos bancos ya sean por señales de radiofrecuencia y hasta con la utilización de señales vía celular, lo que permite un mejor control de los bancos de capacitores.

2.3.3 CAPACIDADES ESTÁNDAR

Las capacidades estándar se encuentran definidas en la Norma IEEE 18-2002 y se las muestra en la Tabla 2.2, los capacitores no deben ser aplicados si se violan cualquiera de las siguientes limitaciones:

- 110% del voltaje rms, y el pico no excede $1.2\sqrt{2}$ del voltaje rms, incluyendo armónicas pero excluyendo transitorios.
- 135% de los kVA nominales
- 135% de la corriente nominal basada en su potencia y voltaje nominales.

Volts, rms (Terminal-a-terminal)	kVAr	Numero de fases	BIL kV
216	5, 7 1/2, 13 1/3, 20, Y 25	1 y 3	30
240	2.5, 5, 7 1/2, 10, 15, 20, 25, y 50	1 y 3	30
480, 600	5, 10, 15, 20, 25, 35, 50, 60, y 100	1 y 3	30
2400	50, 100, 150, 200, 300, y 400	1 y 3	75, 95, 125, 150, y 200
2770	50, 100, 150, 200, 300, 400, y 500	1 y 3	75, 95, 125, 150, y 200
4160, 4800	50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, y 800	1 y 3	75, 95, 125, 150, y 200
6640, 7200, 7620, 7960, 8320, 9540, 9960, 11400, 12470, 13280, 13800, 14400	50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, y 800	1	95, 125, 150, y 200
15125	50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, y 800	1	125, 150, y 200
19920	100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, y 800	1	125, 150, y 200
20800, 21600, 22800, 23800, 24940	100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, y 800	1	150 y 200

Tabla 2.2. Tabla de capacidades estándar IEEE 18-2002

2.3.4 TIPOS DE CONEXIÓN

Un banco de capacitores trifásicos se lo puede conectar en un alimentador primario en configuración (1) delta, (2) Y puesto a tierra o (3) Y sin puesta a tierra. El tipo de conexión depende del tipo de sistema al que se conecte y de los

requerimientos de protección. Puede producirse un efecto de resonancia en configuraciones delta y Y sin puesta a tierra (neutro flotante) cuando ocurre una falla y se abren una o dos fases del lado de la generación, el banco de capacitores se comporta como fuente al tratar de mantener el voltaje y forma un capacitor en serie con los transformadores monofásicos conectados en el lado de la carga y pueden sufrir severos daños. [5]

Por esta razón la conexión de Y sin puesta a tierra no se la recomienda para las siguientes condiciones:

1. En alimentadores con demanda reducida donde la mínima carga por fase fuera del capacitor no excede en 150% la capacidad nominal por fase del banco.
2. Con bancos de capacitores fijos.
3. En alimentadores con interruptores monofásicos
4. En alimentadores con transferencia de carga de emergencia.
5. Instalación en secciones después de un seccionador fusible o reconector monofásico.

Sin embargo esta configuración se la recomienda en las situaciones siguientes:

1. Excesivas corrientes armónicas presentes en el neutro de la subestación
2. Interferencias telefónicas

2.3.5 PROTECCIÓN

Debido al tamaño relativamente pequeño de los bancos utilizados en alimentadores de distribución, los métodos de protección de los mismos son entonces más sencillos que los utilizados en subestaciones. La protección para bancos instalados en postes incluye fusibles y pararrayos. [6]

2.3.5.1 Fusibles

Para dimensionar la protección se debe seguir las siguientes recomendaciones [13]:

1. Considerar la componente de corriente debida a armónicos y la tolerancia del capacitor (máximo 15%) y sobrevoltajes (+10%), debido a estas condiciones que son relativamente normales se dimensiona para una corriente de 125% a 135% de la corriente nominal del capacitor

2. Se debe coordinar la curva mínima de fundición del fusible con la curva de corriente de energización de los bancos para evitar falsas operaciones.
3. Utilizar fusibles tipo T para corrientes nominales bajas sobre todo en áreas de alto nivel de descargas atmosféricas.
4. Utilizar protecciones trifásicas en lugar de monofásicas ya que si una unidad sufre averías se desconecta todo el banco para evitar el daño de las unidades restantes.

Para obtener un criterio para la selección de fusibles [13] recomienda considerar la Tabla 2.3. que es recomendada por la ANSI.

Banco 3Φ (kVAr)	Voltaje línea a línea (kV)							
	4.2	4.8	12.5	13.2	13.8	22.9	24.9	34.5
150	20T	20T	8T	6T	6T			
300	40K	40K	15T	12T	12T	8T	8T	5T
450	65K	50K	20T	20T	20T	10T	10T	8T
600	80K	65K	25T	25T	25T	15T	15T	10T
900		100K	40K	40K	40K	20T	20T	15T
1200			50K	50K	50K	30T	25T	20T
1800			80K	80K	80K	40K	40K	30K
2400			100K	100K	100K	65K	50K	40K

Tabla 2.3. Tabla para selección de fusibles recomendada por la ANSI

2.3.5.2 Pararrayos

La utilización de pararrayos es efectiva a la hora de disminuir la corriente que podría afectar al banco debido a sobrevoltajes, para su instalación se considera una ubicación lo más cercana posible al fusible de manera que reduzca así la afectación, es muy recomendada la instalación de pararrayos para bancos de pequeño tamaño.

2.3.6 ARMÓNICAS

La presencia de armónicas en la red puede causar fundiciones de fusibles, unidades averiadas y fallas en la operación del sistema de control. Tanto transformadores de distribución, hornos de arco y cargas electrónicas no lineales son una gran fuente de armónicas, se debe investigar como este fenómeno

presente en los alimentadores es causante de malfuncionamiento y fallas de estos equipos.

2.3.7 INSPECCIÓN Y MANTENIMIENTO

Los bancos de capacitores deben tener un régimen continuo de revisión, verificar sus características en el momento de su instalación y periódicamente durante su vida útil. Ya que son elementos cerrados se debe tener muy en cuenta realizar mediciones periódicas. Importante también la seguridad del personal que realiza estas actividades.

2.4 UBICACIÓN ÓPTIMA DE CAPACITORES EN ALIMENTADORES PRIMARIOS

2.4.1 CRITERIO DE LOS 2/3

Las recomendaciones practicas para la correcta ubicación de capacitores en alimentadores de distribución se fundamentan en el criterio de los 2/3, la misma que dice que se debe ubicar un capacitor de capacidad igual a 2/3 de la demanda en potencia reactiva total del alimentador, a una distancia de 2/3 de la longitud del alimentador. Si se desea visualizar la demostración analítica del criterio de los 2/3 se la puede encontrar en el ANEXO 1.

El criterio de los 2/3 se lo aplica en alimentadores con carga uniformemente distribuida, pero en la mayoría de los casos este criterio no es aplicable, para obtener una solución al problema de la ubicación se deben tener en cuenta ciertos factores que caracterizan a cada alimentador y vuelven única cada solución.

Entre estos factores tenemos:

- Impedancias de las líneas
- Carga discontinua y variable
- Costos de instalación y mantenimiento
- Flujo de potencia

Estos factores y además las restricciones de voltaje y de factor de potencia en adelante hacen que el método de los 2/3 no sea aplicable y justifica el esfuerzo que se ha realizado en la obtención de mejores soluciones y la utilización de técnicas innovadoras utilizando recursos computacionales.

2.4.2 CLASIFICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE UBICACIÓN DE CAPACITORES

Siguiendo la guía [12], se puede clasificar las técnicas y describirlas de manera que el ingeniero seleccione la más adecuada y aplicarla de manera que se ajuste al tamaño y topología de la red de distribución, el grado de efectividad, los datos disponibles y el recurso personal disponible.

Las técnicas se las puede clasificar en las siguientes categorías:

- Analíticas
- Programación numérica
- Heurística
- Técnicas basadas en inteligencia artificial

2.4.2.1 Métodos analíticos

Estos métodos son utilizados cuando los recursos computacionales no están disponibles o son muy caros. El método analítico usa el cálculo para maximizar la función de beneficios sobre los costos. Los pioneros para la ubicación óptima de capacitores, Neagle y Samson, Cook, Schmill, Chang y Bae utilizaron el método analítico para obtener una solución aproximada en la maximización de la función de beneficio.

El criterio de los 2/3 es el más conocido de los métodos analíticos, pero este método cae en el error al asumir una carga uniforme al igual que las características de la red. Utilizando estos métodos podemos obtener capacidades de bancos que no son nominales y ubicaciones que no representan un lugar o nodo en donde se pueda instalar en banco, con lo cual al redondear el valor y seleccionar una ubicación cercana se puede producir sobrevoltajes y valores menores en el ahorro calculado.

2.4.2.2 Métodos de programación numérica

Los métodos de programación numérica son técnicas iterativas usadas para maximizar (o minimizar) una función objetivo de variables de decisión. Los valores encontrados en estas variables también pueden cumplir con un grupo de restricciones. Para el problema de la ubicación óptima de capacitores, la función de costo es la función objetivo y la ubicación, tamaño, número de capacitores, voltaje de nodos y corrientes son las variables que deben satisfacer las restricciones operacionales. La programación numérica cumple con todas las restricciones operacionales, encuentra capacidades normalizadas y ubicación física de los nodos.

Duran fue el primero en utilizar programación dinámica como una aproximación a la ubicación de capacitores. Fawzi introduce la liberación de capacidad en la función de beneficio. Ponnaivaikko, Rao y Chamorro [2] utilizan el método numérico llamado de variaciones locales en el cual incluyen efectos de crecimiento de la demanda y capacitores conectables.

Haciendo una breve inspección de todos los métodos numéricos, se puede observar el nivel de sofisticación y la complejidad del método se incrementa ante el avance del tiempo y la capacidad computacional. Los métodos numéricos tienen la capacidad de resolver el problema de manera integral, pero a su vez necesita de una preparación de datos y el desarrollo de la técnica numérica requiere de mayor tiempo que una técnica analítica.

2.4.2.3 Métodos heurísticos

Las reglas de la heurística están desarrolladas a través de la intuición, experiencia y juicio. Las reglas heurísticas producen rápidas y prácticas estrategias las cuales reducen el espacio de búsqueda y pueden brindar una solución cercana a la óptima. Las técnicas heurísticas fueron introducidas al aplicarlas en reconfiguración de redes de distribución. Andel-Salam propone la identificación de la sección que presenta las mayores pérdidas debido a corrientes inductivas en la cual la instalación de capacitores produce un gran efecto. M. Chis propone el método donde evalúa la sensibilidad de un nodo que produce el mayor beneficio en la instalación del banco, considerando la reducción de pérdidas, beneficio económico y reducción del pico de demanda.

M. Galarza [1] utiliza esta técnica orientando su búsqueda hacia posiciones con mayor influencia en las pérdidas del sistema, obteniendo buenos resultados para un nivel de carga.

Este método no garantiza un resultado óptimo, pero es fácil de entender y de rápida aplicación.

2.4.2.4 Métodos que utilizan la inteligencia artificial

La popularidad reciente alcanzada por estos métodos los hacen atractivos para investigadores y son usados en la ingeniería de los sistemas de potencia. Tenemos varias alternativas como por ejemplo: Algoritmos genéticos, sistemas expertos, redes artificiales neuronales y la teoría del conjunto difuso, estos métodos han sido aplicados al problema de ubicación de capacitores.

2.4.2.4.1 Algoritmos genéticos

Utilizan el concepto de evolución biológica y desarrolla series de procesos para encontrar la solución óptima. Opera seleccionando una población de soluciones se la codifica y se obtiene un valor *fitness* y se aplican operadores de combinación, cruce y mutación obteniendo nuevos individuos o soluciones que llegan a alcanzar una mejor adaptación. Son simples de implementar y son capaces de alcanzar la solución óptima.

2.4.2.4.2 Sistemas expertos

Utiliza el conocimiento basado en sistemas que consiste en una colección de reglas, conocimientos y la introducción de una maquina que realice un razonamiento lógico. Este concepto es aplicado en problemas de sistemas de potencia que requieren de encontrar una respuesta, un juicio empírico o heurístico. Se lo aplica para diagnostico de fallas, planeamiento y cronograma de actividades.

2.4.2.4.3 Redes Artificiales neuronales

Una red artificial neuronal es la conexión de neuronas artificiales las cuales simulan el sistema nervioso cerebral humano. Son usadas para el mapeo de relaciones no lineales de entrada y de salida. Estas redes son entrenadas para

funciones específicas como puede ser la predicción del perfil de voltaje de la red o la maximización de la reducción de pérdidas.

2.4.2.4.4 Teoría del conjunto difuso

Una variable difusa es modelada por una función miembro la cual asigna un grado y la integra a un conjunto. Usualmente este grado varía de 0 a 1. Chin aplica este método utilizando tres funciones miembro para describir las pérdidas, las variaciones de voltaje y la distorsión armónica. La variable de decisión está calculada por la intersección de las tres funciones miembro en cada nodo del sistema y selecciona los nodos para la ubicación de capacitores que tienen mayores valores de decisión.

El método adecuado a utilizar para la ubicación de capacitores se lo selecciona basado en la problemática a ser resuelta, la complejidad del problema, la precisión requerida y la facilidad de implementación.

3 METODOLOGÍA

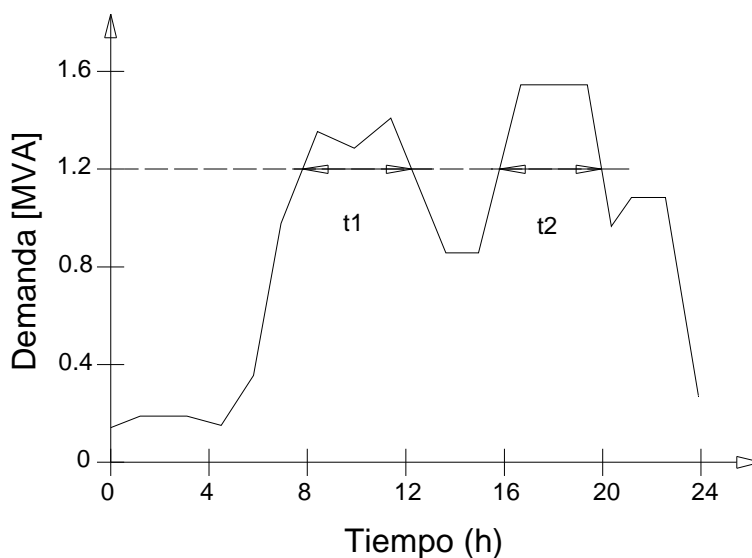
3.1 FORMULACIÓN TEÓRICA DEL PROBLEMA

3.1.1 MODELO DE VARIACIÓN DE DEMANDA

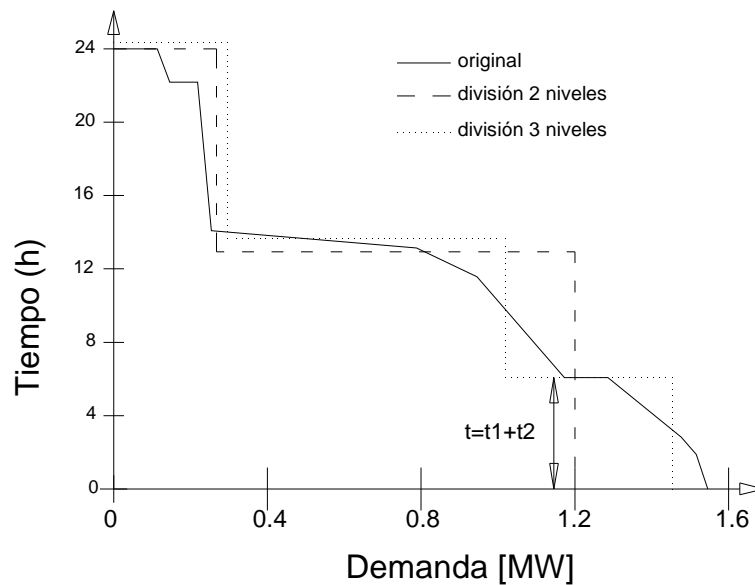
El continuo cambio y la incertidumbre de la demanda no puede ser utilizada para un modelo de optimización [9]. La demanda se la divide en segmentos, el intervalo más usual es de 15 minutos [17], dentro del mismo son hechas mediciones para su posterior análisis, para utilizarla en modelos computacionales donde el tiempo del procesamiento es una limitante se utilizan intervalos mayores, se dividirá la curva de demanda en n_t intervalos de tiempo, que pueden ser diferentes entre sí, donde para cada intervalo se tiene: ecuaciones de flujo de potencia y perfiles de voltaje.

La demanda eléctrica puede ser representada por la curva de demanda o también por su correspondiente curva de duración de la demanda.

La facilidad que muestra la curva de duración de la demanda es que es periódicamente decreciente, lo cual facilita la segmentación de la misma, como se indica en la figura. La potencia puede ser representada con valores en porcentaje y así representar casos de estudio, que han sido abordados únicamente con valores en demanda máxima. [18]



(a)



(b)

Fig. 3.1. Demanda en función del tiempo: (a) Curva de demanda (b) Curvas de duración de demanda. [18]

El problema que se encuentra al segmentar la curva de demanda, en 6 segmentos es el esfuerzo computacional que se requiere para evaluar las posibles soluciones, ya que para cada segmento se encontrará el esquema más adecuado para que en conjunto produzca el mayor beneficio técnico y económico.

3.1.2 TAMAÑOS Y ESQUEMAS DE CONTROL

Se cuenta con una red de n barras donde tenemos n_c posibles ubicaciones de capacitores. Sea u_s el tamaño estándar de un banco y u^0 un vector de dimensión n_c . Se definen los siguientes vectores:

$u^0 = [u_1^0, u_2^0, \dots, u_{n_c}^0]^T$, con u_i^0 representando el tamaño del capacitor en la ubicación i . Note que en la práctica, u_i^0 es un múltiplo del tamaño estándar de un banco, en

términos matemáticos se tiene que $\frac{u_i^0}{u_s}$ es un entero no negativo. Y se tiene

$u^j = [u_1^j, u_2^j, \dots, u_{n_c}^j]^T$, con u_i^j representando el esquema de control en la ubicación i durante el nivel de carga j . [10]

Se consideran dos tipos de capacitores.

3.1.3 CAPACITORES FIJOS

Serán considerados como fuentes de potencia reactiva permanente, así para cada nivel de carga en la ubicación i se instalará un banco de tipo fijo

$$u_i^1 = u_i^2 = \dots = u_i^{n_t} \text{ . [10]}$$

3.1.4 CAPACITORES CONECTABLES

Se asume que un banco de capacitores conectado en la ubicación k y de tamaño u_k puede ser cambiado/controlado en cada nivel de carga considerada. Existen entonces n_t esquemas a ser determinados se define así: $u_k^i \ i = 0,1,\dots,n_t$. [10]

3.1.5 FUNCIÓN OBJETIVO

La función objetivo se la puede dividir en tres términos: Reducción de las pérdidas de energía, reducción de la demanda y costos de la instalación de los capacitores, se siguen los lineamientos presentados en [8] y [10].

3.1.5.1 Beneficio en la reducción de pérdidas de energía BPE

Si $P_{per}(j)$ son las pérdidas de potencia en el ramal j en la duración del intervalo T_i , las pérdidas de energía en la sección j vienen dadas por

$$PE_{ij} = T_i \cdot P_{per}(j) \quad (3.1)$$

las pérdidas de energía para en el intervalo T_i para n secciones es:

$$PE_i = \sum_{j=1}^n PE_{ij} \quad (3.2)$$

Y si se incluyen n_t intervalos de tiempo se llega a:

$$PE = \sum_{i=1}^{n_t} PE_i \quad (3.3)$$

Para encontrar el costo de pérdidas de energía (CPE) multiplicamos por el costo unitario de energía (Ce)

$$CPE = Ce \cdot PE \quad (3.4)$$

El beneficio en la reducción de pérdidas de energía es:

$$BPE = Ce(PE,0 - PE,1) \quad (3.5)$$

donde, $PE,0$, $PE,1$ son las pérdidas de energía antes y después de la instalación de bancos de capacitores respectivamente.

3.1.5.2 Beneficio en la reducción de la Demanda BRD

Otro de los importantes beneficios que se alcanza en la instalación de bancos de capacitores es la reducción del pico de la demanda la misma que puede ser calcula por:

$$RD = (Pper,0 - Pper,1) \quad (3.6)$$

Donde $Pper,0$ es el pico de pérdidas antes de la instalación de los capacitores y $Pper,1$ es el pico de perdidas después de la instalación de capacitores.

Para encontrar el beneficio en la reducción de la demanda:

$$BRD = Cd \cdot RD \quad (3.7)$$

Donde Cd es el costo de la demanda.

3.1.5.3 Costo de instalación de capacitores CIC

El costo de la instalación de un capacitor (CIC) de tamaño u_i^0 en la ubicación i será:

$$CIC = Ci(u_i^0) = kc + C_i^f(u_i^0) \quad (3.8)$$

Donde k_c es el costo de un banco de capacitores, $kc = kc1$ si se instala un banco de capacitores fijo y $kc = kc2$ si se instala un banco de capacitores conectable, $kc2 > kc1$. $C_i^f(u_i^0)$ representa el costo asociado con la instalación del capacitor en la ubicación i . En general $C_i^f(u_i^0)$ es una función correspondiente a la suma de los costos de operación, reposición y retiro.

Finalmente la función objetivo se la puede expresar ya sea, minimizando los costos:

- Costo de instalación de un capacitor (CIC)
- Costo de pérdidas de energía (CPE)
- Costo de la demanda (CD)

$$\sum_{i=1}^{n_c} Ci(u_i^0) + Ce \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^n T_i \cdot Pper(j) + Cd \cdot P_0$$

$$(CIC + CPE + CD) \quad (3.9)$$

donde Cd es el costo de la demanda y P_0 es la demanda máxima del alimentador.

O maximizando los beneficios sobre el costo de instalación:

- Beneficio en la reducción de pérdidas de energía (BPE)
- Beneficio en la reducción de la Demanda (BRD)
- Costo de instalación de un capacitor (CIC)

$$Ce(PE,0 - PE,1) + Cd(Pper,0 - Pper,1) - \sum_{i=1}^{n_c} Ci(u_i^0)$$

$$(BPE + BRD - CIC) \quad (3.10)$$

3.1.6 RESTRICCIONES

3.1.6.1 Restricciones de factor de potencia

Las restricciones de factor de potencia se refieren a mantener la característica inductiva de la red, facilitando así la operatividad de la misma (abrir y cerrar contactos) y evitando riesgo de sobrevoltajes debido al aumento de reactivos capacitivos en la red.

3.1.6.2 Restricciones de voltaje

Las restricciones acerca del máximo y mínimo voltaje en los nodos del alimentador:

$$Vn_{i\min} < Vn_i < Vn_{i\max} \quad (3.11)$$

3.1.6.3 Restricciones adicionales

También existen restricciones de capacidad nominal de las secciones, y la capacidad nominal de los equipos a instalarse que ya se encuentra normalizada, restricciones en cuanto al cumplimiento de la convergencia, es decir del balance de potencia activa y reactiva en la red y restricciones de tipo económico.

3.2 FLUJO DE POTENCIA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

El flujo de potencia es la herramienta fundamental, mediante la cual se puede evaluar los efectos de cualquier esquema de compensación adoptado, se requiere disponer de un algoritmo eficiente, que represente los sistemas de distribución sin utilizar técnicas especializadas y complejas de la cual su utilización no es justificada.

3.2.1 MODELO DE RED DE DISTRIBUCIÓN y ALGORITMO DE SOLUCIÓN DEL FLUJO DE POTENCIA

La red a ser modelada es de distribución radial trifásica balanceada. La sección j del alimentador se la representa mediante su resistencia $R(j)$ y reactancia inductiva $X(j)$, la reactancia capacitiva de los enlaces no será considerada. Las cargas al igual que los bancos se las representa con el modelo de potencia constante.

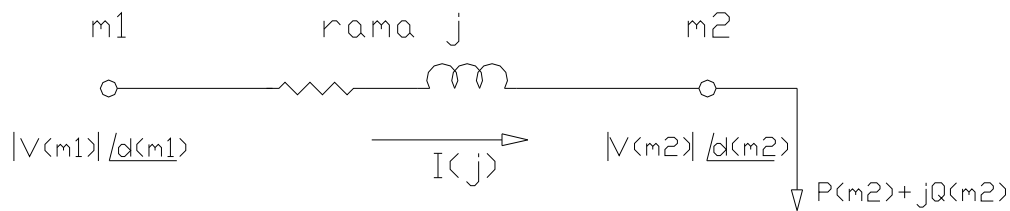


Fig. 3.2. Representación del ramal j de la red

El método utilizado en [1] para la solución del flujo y utilizado en el trabajo presente resuelve ecuaciones recursivas para los voltajes de envío y recepción y es detallado en el ANEXO 2.

Para el modelo de demanda variable este algoritmo se utilizará para cada segmento de demanda adoptado, obteniendo la solución del flujo para el problema de variación de demanda.

3.3 FACTORES TÉCNICOS Y ECONÓMICOS DEL ESQUEMA DE COMPENSACIÓN ADOPTADO

Los factores técnicos se complementan con el esquema económico adoptado tomando en cuenta las restricciones operacionales y la formulación teórica del problema, para de esta manera, tener las herramientas adecuadas para encontrar el óptimo tanto técnica y económicamente factible.

3.3.1 COSTO DE LOS CAPACITORES

Se define en (3.8) el costo de instalación de un banco de capacitores de tamaño u_i^0 en la ubicación i donde viene dado en una parte por la inversión (instalación) y por otra parte la asociada a la instalación (operación y mantenimiento, reposición y retiro).

Para ilustrar esta definición se considera el siguiente ejemplo general tomado de [1], una inversión inicial de $\$I$ que incluye costo de adquisición y gastos de instalación. La vida útil del equipo es n_c años y el valor de salvamento es despreciable. Los gastos de operación y mantenimiento anual son de $\$m$ (aprox. 2% del costo de inversión I), en los años n_1 y n_2 se requieren de desembolsos eventuales por daño y reposición de unidades de $\$r$ (aprox. 30% del costo de inversión I). El costo de retiro del equipo al final de su vida útil es de $\$d$ (aprox. 3% del costo de inversión). La tasa de descuento para esta inversión es de $i\%$ anual.

Para encontrar el costo total de la inversión se realiza un flujo de fondos, en la Fig. 3.3. se muestra el diagrama de flujo de fondos del ejemplo ilustrado.

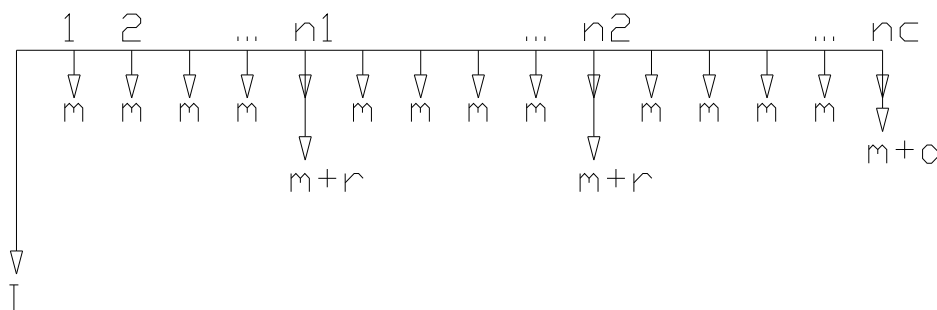


Fig. 3.3. Flujo de fondos en la inversión de un banco de capacitores

Llevando el flujo de fondos a valor presente se tiene:

$$CIC = VP_{inversión} (1) + VP_{operación} (2) + VP_{repar1} (3) + VP_{repar2} (4) + VP_{retiro} (5) \quad (3.12)$$

$$CIC = I + m \left(\frac{(1+i)^{n_c} - 1}{i(1+i)^{n_c}} \right) + r \left(\frac{1}{(1+i)^{n_1}} \right) + r \left(\frac{1}{(1+i)^{n_2}} \right) + d \left(\frac{1}{(1+i)^{n_c}} \right) \quad (3.13)$$

Para encontrar la anualidad utilizamos:

$$CICa = CIC \left(\frac{i(1+i)^{n_c}}{(1+i)^{n_c} - 1} \right) \quad (3.14)$$

Así el valor anual considera los costos de instalación y los asociados a su operación dentro de su vida útil. Para dar un ejemplo se asume: $n_c = 15$, $n_1 = 5$, $n_2 = 10$, $i = 12\%$

La siguiente tabla muestra el costo anual de los bancos de capacitores con los datos anteriormente propuestos.

Tensión kV	Capacidad kVAr	Costo de inversión	Gastos de operación	Costo de reposición	Gastos de retiro	Costo total CIC	Anualidad CCla
13.8	150	3850	77	1155	116	5423	796
	300	4000	80	1200	120	5634	827
	450	4150	83	1245	125	5845	858
	600	4300	86	1290	129	6057	889
	900	4600	92	1380	138	6479	951
	1200	4900	98	1470	147	6902	1013
22.8	300	4200	84	1260	126	5916	869
	450	4400	88	1320	132	6197	910
	600	4600	92	1380	138	6479	951
	900	5000	100	1500	150	7043	1034
	1200	5400	108	1620	162	7606	1117

Tabla 3.1. Costos de inversión capacitores

3.3.1.1 Costos para bancos conectables

Para hacer de un banco fijo uno conectable se requiere de la instalación de interruptores en aceite o en vacío, de un sistema de control de los interruptores, el mismo que en los equipos modernos es electrónico y el equipamiento necesario para enviar las señales necesarias para su control (voltaje, corriente, temperatura, etc.), en la fig. 2.1 se muestra un esquema utilizado, donde se utiliza un transformador para obtener las señales de voltaje.

Se considera también un costo por conexión y desconexión, el mismo que permite encontrar soluciones que reduzcan el número de operaciones diarias, evitando así el desgaste innecesario de sus contactos.

3.3.2 BENEFICIO ANUAL EN LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA

En (3.5) se encontró el beneficio en la reducción de pérdidas de energía ya que se considera el modelo de un día, para encontrar el beneficio anual se utiliza la siguiente relación:

$$BPEa = 365 \cdot Ce(PE,0 - PE,1) \quad (3.15)$$

donde, Ce está en $\$/kWh$ y está definido por la empresa eléctrica que suministra el servicio.

3.3.3 BENEFICIO ANUAL EN LA REDUCCIÓN DE LA DEMANDA

Se definió ya el beneficio alcanzado por la reducción del pico de la demanda en (3.7)

$$BRDa = Cda \cdot RD \quad (3.16)$$

donde, Cda viene dado en $\$/kWañ$ y es el consecuente ahorro operativo en el sistema debido a que se tomo determinado esquema de compensación.

Para tener concordancia con el esquema económico propuesta en la instalación de capacitores los beneficios anuales de reducción de pérdidas de energía y de la demanda son traídos a valor presente neto.

El beneficio total alcanzado:

$$BT = BPEa + BRDa \quad (3.17)$$

Así se tiene el valor en cuenta tomado en los n_c años de vida útil del equipo y la tasa de descuento de $i\%$ anual.

$$BTa = n_c \cdot BT \cdot \left(\frac{i(1+i)^{n_c}}{(1+i)^{n_c} - 1} \right) \quad (3.18)$$

3.4 METODOLOGÍA DE OPTIMIZACIÓN UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

3.4.1 COMPUTACIÓN EVOLUTIVA (CE) Y ALGORITMOS EVOLUTIVOS (AE)

La CE es aquella que modela los procesos evolutivos como elementos de diseño de sistemas computacionales especializados en resolver problemas, así se utiliza la naturaleza como una inmensa máquina para resolver problemas, la modelación de la naturaleza comúnmente se la conoce como AE.

Los AE son técnicas heurísticas, es decir, que permiten encontrar buenas soluciones a un problema, en un tiempo razonable, mediante la evaluación y búsqueda de un resultado final que cumpla una función objetivo y sus restricciones. Estos algoritmos se inspiran en la evolución de los seres vivos, la selección natural y la genética.

La CE surge a finales de los años 60 cuando John Holland se planteó la posibilidad de incorporar los mecanismos naturales de selección y supervivencia para resolver una gran cantidad de problemas de Inteligencia Artificial, que habían sido resueltos eficientemente por la naturaleza pero no era posible abordar estos problemas con una computadora. [14]

A mediados de los 80, la aparición de computadoras de mayor capacidad y bajo costo facilitan la utilización de estas técnicas que son encaminadas a resolver problemas de ingeniería y de ciencias sociales. [14]

Los AE se han convertido en técnicas importantes de optimización, se las puede aplicar en problemas altamente no lineales, de gran tamaño, multimodales, que permiten abordar problemas difíciles y hasta irresolubles.

Sin embargo los AE pueden presentar ciertos inconvenientes, como es la posibilidad de encontrar solo un máximo local o que se pierda diversidad en las soluciones.

Un AE no requiere muchos conocimientos matemáticos del problema para el que está siendo diseñado, debido a su naturaleza un AE busca soluciones sin considerar un conocimiento específico del problema, pero a su vez permite la combinación con el mismo mejorando así la eficiencia de la técnica en un problema concreto. Un AE puede implementarse a cualquier función objetivo y/o restricciones, así como representar cualquier conjunto de variables. [14]

Generalmente un AE debe tener los siguientes cinco componentes [15]:

- Una representación apropiada de las potenciales soluciones al problema.
- Una forma de crear una población inicial de soluciones potenciales.
- Una función de evaluación que evalúa la solución potencial "*fitness*".
- Un conjunto de operadores evolutivos que guían la búsqueda.

- El valor de parámetros de entrada que el algoritmo usa (tamaño de la población, número de generaciones, probabilidad de aplicación de operadores evolutivos).

Dentro de la CE se encuentran las siguientes técnicas: Las estrategias de evolución, la programación evolutiva, la programación genética y los algoritmos genéticos.

3.4.2 ALGORITMOS GENÉTICOS (AG)

Los AG forman parte de la CE y es una técnica desarrollada inicialmente por Holland en 1975 [14], estos algoritmos se han desarrollado utilizando técnicas computacionales, y hoy en día se la utiliza en aplicaciones científicas, económicas y de investigación y desarrollo [16].

Para tener una idea clara de los procesos que encierra un AG se puede observar la Fig. 3.4.

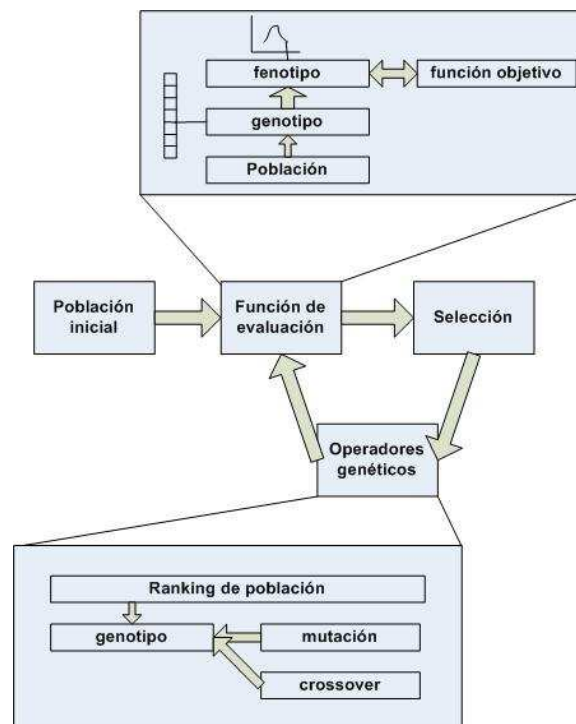


Fig. 3.4. El ciclo básico de los algoritmos genéticos [16]

Para profundizar en los conceptos que encierran los algoritmos genéticos se puede consultar el ANEXO 3.

3.4.2.1 Método de los nichos

La diversidad en AG's es entendida en términos biológicos como la variedad de especies existentes, los principios genéticos buscan el mantenimiento de la diversidad de especies, sin embargo un AG clásico el cual se ha descrito busca la convergencia, y por ende los individuos de la población comienzan a ser idénticos, esto lleva a que un AG tradicional encuentre solo una solución cuando existen otras diversas soluciones. [11]

El método de nichos se lo utiliza con la finalidad de formar y mantener múltiples soluciones finales, sin importar si estas soluciones poseen igual *fitness* o diferentes. [11]

El método de los nichos alteran el algoritmo de selección para generar una presión de selección dentro de las regiones y no entre las regiones del espacio de búsqueda, este método debe ser capaz de localizar los picos más altos ante la presencia de un gran número de picos inferiores, aunque se traten de problemas engañosos.

3.4.2.1.1 Escenarios multimodales

El escenario multimodal constituye el medio en donde el método de los nichos se ejecuta, cuyo objetivo está en encontrar varias soluciones, tanto globales como locales, si se llama c al número de máximos locales y z el número de máximos globales, el interés al resolver los problemas estaría en 1) Encontrar cualquier $b < c$ máximos, 2) Encontrar todos los c máximos, 3) Encontrar por lo menos los $b \leq c$ máximos mayores, 4) Encontrar cualquier $b < z$ máximo global, 5) encontrar los z máximos globales [11].

3.4.2.1.2 Poblamiento determinístico

El esquema de selección que inserta un nuevo elemento en la población al sobrescribir uno similar se lo conoce como poblamiento y fue desarrollado por De Jong, Cavicchio introdujo diversos esquemas en los que los hijos reemplazan directamente a sus padres, debido a que los hijos se parecen a sus padres este método se lo conoce como esquema de preselección, estos métodos no exhiben capacidades de formar nichos.

Mahfound indica que el fracaso en los métodos de poblamiento es el error estocástico en el reemplazo de miembros de la población, la alternativa que se presentó para combatir la pérdida de material genético se la conoce como *poblamiento determinístico* y funciona con el siguiente pseudo código:

Pseudo código de Poblamiento Determinístico [11]

(Repetir durante g generaciones)

DO n/2

1. *Seleccionar dos padres, p1 y p2, aleatoriamente sin remplazo*
2. *Cruzarlos, generando c1 y c2*
3. *Aplicar mutación y otros operadores posibles, generando c'1 y c'2*
- 4.

*IF [Distancia (p1 , c'1)+Distancia(p2 , c'2) ≤ Distancia
(p1 , c'2)+Distancia(p2 , c'1)]*

- *Si $f(c'1) > f(p1)$ reemplazar p1 con c'1*
- *Si $f(c'2) > f(p2)$ reemplazar p2 con c'2*

ELSE

- *Si $f(c'2) > f(p1)$ reemplazar p1 con c'2*
- *Si $f(c'1) > f(p2)$ reemplazar p2 con c'1*

END IF

Para encontrar las medidas de distancia se prefiere la fenotípica sobre la genotípica, aunque pueden utilizarse ambas.

4 PROPUESTA DE LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE CAPACITORES VÍA ALGORITMOS GENÉTICOS

4.1 ALGORITMOS GENÉTICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS

Los algoritmos genéticos son métodos de búsqueda y optimización basados en la optimización natural. El campo en donde se pueden utilizar los algoritmos genéticos se extiende desde simples problemas sociales hasta complicados problemas multiobjetivo que tengan características no lineales que existen en las ciencias e ingeniería.

Al aplicar esta técnica de optimización en problemas de ingeniería en sistemas de potencia, se encuentran varias publicaciones en función de resolver problemas de planificación y operación del mismo, se puede nombrar las aplicaciones directas en la búsqueda de ubicación óptima de bancos de capacitores y reactores, despacho económico, reconfiguración de la topología del sistema entre otros, y más cercano a la aplicación presente, en los sistemas de distribución, reconfiguración de redes, planificación de alimentadores para nuevas subestaciones, optimización de la ubicación de capacitores, etc.

4.2 UBICACIÓN DE CAPACITORES UTILIZANDO AG

El problema de la ubicación de capacitores dentro de una red de distribución adquiere gran importancia debido a los beneficios tanto técnicos y económicos alcanzados al adoptar un determinado esquema, de ahí, que el desarrollo y la aplicación de los algoritmos genéticos ayudan a brindar una solución óptima al problema.

Un alimentador primario que sirve a una ciudad o una zona rural de configuración radial, abarca una gran área y un sin número de variantes en su topología y cargas, estas mismas variables son las que forman parte de un problema complejo y el algoritmo dentro de su función objetivo evalúa la calidad de las soluciones que se encuentran optimizando las soluciones en cada generación.

4.3 ESQUEMA GENERAL

El esquema planteado a tomado como base la estructura desarrollada en [1] a la cual se le realizan los cambios necesarios para obtener la solución al problema de demanda variable, esto requiere de una reconfiguración de los operadores y una nueva secuencia de los mismos, además, de un mayor esfuerzo computacional, a pesar que se utiliza un algoritmo de flujo para sistemas radiales rápido y confiable, es necesario correrlo miles de veces lo cual aumenta el tiempo de ejecución.

Para visualizar de mejor manera los procesos que sigue el algoritmo se lo muestra en las siguientes figuras:

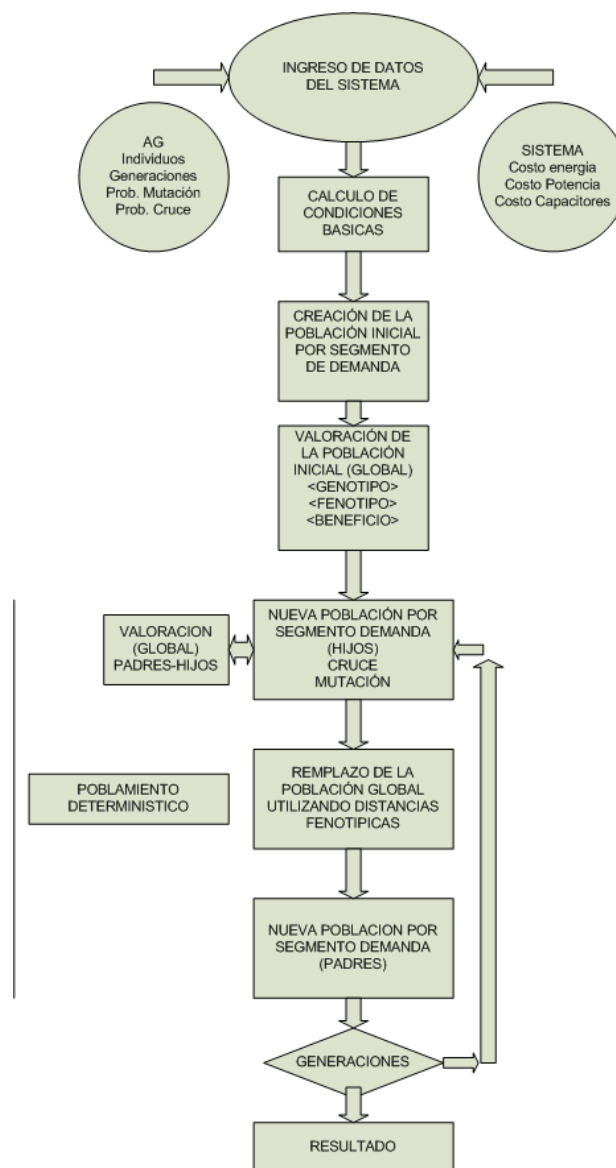


Fig. 4.1. Diagrama de flujo del algoritmo genético para la solución del problema de ubicación de capacitores con demanda variable



Fig. 4.2. Diagrama de flujo de la valoración de los *cromosomas*

4.4 PARÁMETROS INICIALES

4.4.1 INFORMACIÓN DEL SISTEMA

La información requerida del sistema, la misma que será utilizada en el algoritmo genético para valorar las propuestas de solución, corriendo flujos de potencia radiales (sección 3.2) y evaluándolas económicamente (sección 3.3), será la siguiente:

Voltaje base del sistema

Voltaje de operación del sistema

Potencia Base del Sistema

Voltaje máximo y mínimo de operación

Costo de energía y potencia

Tiempos de discretización de la curva de demanda

Topología del sistema (nodos envío y recepción)

Parámetros eléctricos de las secciones.

Potencia Activa y Reactiva por segmento de la curva de demanda

Parámetros técnicos-económicos para la valoración del esquema de compensación.

4.4.2 INFORMACIÓN ALGORITMOS GENÉTICOS

Para la resolución del problema el algoritmo implementado requiere de la siguiente información:

Probabilidad de cruce

Probabilidad de mutación

Número de individuos por generación

Número de generaciones

Penalización o no de la función objetivo.

4.5 CONDICIONES INICIALES DE LA RED

Son de gran importancia las condiciones antes de la compensación del sistema, ya que estas permiten evaluar los beneficios de adoptar determinado esquema de compensación, además permite observar el cambio en los perfiles de voltaje, y ver la variación de las pérdidas de potencia, estas se obtienen a partir de un flujo de potencia para cada segmento de la curva de demanda.

4.6 POBLACIÓN INICIAL

4.6.1 REPRESENTACIÓN DE LAS SOLUCIONES

Se ha adoptado la representación mediante un *cromosoma* en dos partes, la primera parte formada por un arreglo binario de número de genes igual al número de barras del sistema, donde su valor 1 o 0 indica si un banco está instalado o no en la barra indicada por su posición, la segunda parte, formada por un arreglo de números enteros, los mismos, que pueden tomar valores dependiendo de la representación que esta pueda tener en kVArS del banco que será o no instalado.

Esta representación es utilizada ya que en [1] indica que tuvo los mejores resultados. Para representar los distintos niveles de demanda se utiliza un arreglo de *cromosomas*, donde cada *cromosoma* descrito anteriormente, representa el esquema de compensación para su nivel correspondiente. Para visualizar gráficamente se indica la siguiente figura:

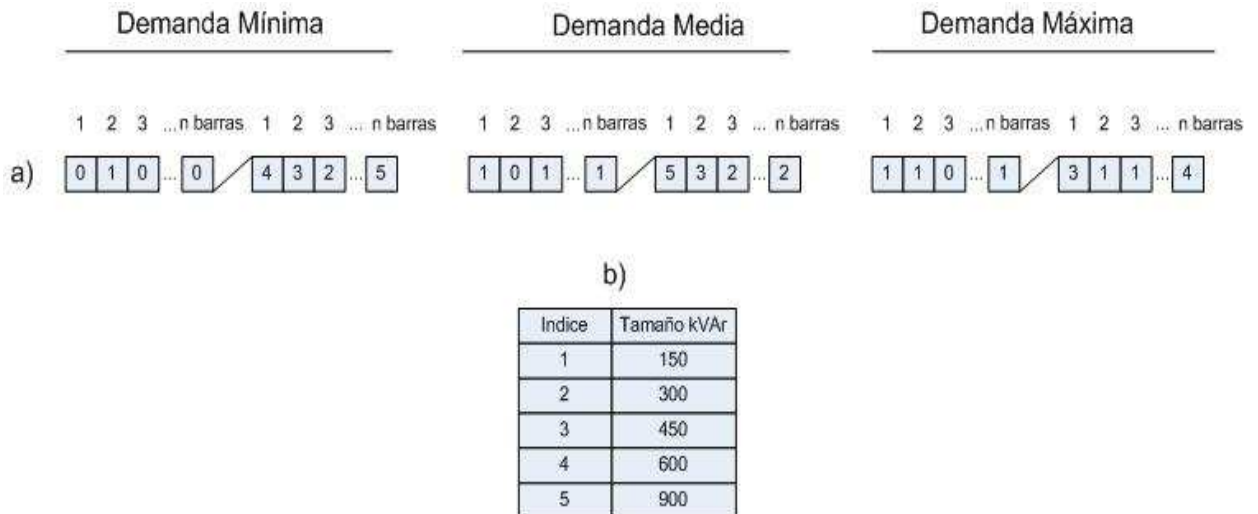


Fig. 4.3. a) Representación de un *cromosoma* mixto para 3 niveles de Demanda, parte 1 nodo, parte 2 tamaño b) Relación entre el valor de cada gen (alelo) y su correspondiente banco (kVAr).

Para realizar un análisis semanal se considera que la demanda en los días entre semana al igual que en los días fines de semana son uniformes, si se tiene que en cada día existen tres niveles de demanda se toman tres niveles representativos para los días entre semana y fines de semana, y el tiempo respectivo para completar las 168 horas semanales.

Para visualizar gráficamente la representación se presenta la siguiente figura:



Fig. 4.4. Representación de un *cromosoma* para un análisis semanal.

El objetivo de optar por un análisis semanal es el de obtener esquemas de control que muestren como la demanda es determinante para optimizar las soluciones, y

la variación de las misma en los fines de semana exige de un diferente número de reactivos en el sistema, es decir un diferente esquema de compensación.

En el caso donde se utilizan existencias, ya que el tamaño es único se utiliza una representación únicamente binaria donde el valor del alelo indica si se ha conectado o no un banco de tamaño en existencia.

4.6.2 POBLACIÓN

Existen dos factores a ser considerados para encontrar la población inicial, el primero es decidir el número de individuos, la misma cantidad que debe estar de acuerdo al tamaño del problema, se recomienda una población mayor a 3 veces el número de barras del sistema por cada nivel de demanda, el tamaño de la población es un factor que determina el tiempo requerido para encontrar el óptimo, una población de gran tamaño no garantiza que se generen individuos con mayor *fitness*, el segundo factor es la forma como se encuentra esta población, la misma que puede ser aleatoria o aleatoriamente controlada, si formamos una población aleatoria, se generan un gran número de esquemas no factibles disminuyendo así la efectividad del algoritmo, al utilizar una población aleatoriamente controlada, se obtendrá por una parte un número reducido de bancos y por otra parte bancos que no violen las restricciones del problema, con lo cual el algoritmo parte para ir optimizando las soluciones.

4.7 VALORACIÓN DEL ESQUEMA DE COMPENSACIÓN

Partimos de la obtención de las poblaciones por cada segmento de la curva de demanda, no se puede valorar un *cromosoma* individual por segmento de curva sino una valoración global de todos los *cromosomas* que completan el periodo de análisis. Utilizamos la valoración económica descrita en el capítulo 3, donde se requiere de los resultados de los flujos de potencia y la correcta aplicación de los costos de pérdida de energía, costos de potencia y costos del esquema de compensación.

Para encontrar los beneficios de reducción de pérdidas de energía, se considera la discretización de la curva de demanda, ver 3.1.1, así por ejemplo la duración del segmento de demanda máxima es apenas un par de horas. Los beneficios de

reducción de demanda, se las encuentra en la reducción del pico de demanda, con un valor de costo por potencia.

Para el costo del esquema de compensación, se ha considerado, si se ha instalado un banco fijo o conectable y los factores operativos descritos en la sección 3.3.1. , además de un costo por conexión y desconexión del banco, que es un costo que vuelve poco atractivas a las soluciones con alto número de bancos conectables.

4.7.1 PENALIZACIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO

Si se violan restricciones: a) factor de potencia inductivo en las secciones de la red b) voltajes fuera de rangos máximo y mínimo c) excede el número de unidades existentes, la función de valoración penaliza estas soluciones, con lo cual las soluciones de las nuevas poblaciones no violan estas restricciones, se ha considerado una penalización al factor de potencia otorgándole a estas soluciones beneficio (0USD), y reduciendo el beneficio en proporción al 10% del rango de voltaje fuera del mínimo.

Con estas penalizaciones se logra que progresivamente el algoritmo sustituya estos individuos, utilizando la técnica de selección y remplazo conocida como poblamiento determinístico.

4.8 POBLAMIENTO DETERMINÍSTICO

Este esquema de selección y remplazo que utiliza los algoritmos genéticos para resolver problemas multimodales ha sido utilizada para mantener la diversidad genética dentro de la población, la misma que ayuda a la exploración de campo de posibles soluciones, su codificación es descrita en la sección 3.4.2.1.2. el emparejamiento para el cruce se lo realiza aleatoriamente y el remplazo generacional dependiendo de las distancias fenotípicas.

4.8.1 CRUCE

El cruce adoptado es de doble punto, por cada *cromosoma* que representa la solución dentro de su nivel de demanda, la misma que en un emparejamiento aleatorio de la población (poblamiento determinístico) produce la nueva generación de soluciones candidatas.

4.8.2 MUTACIÓN

Una vez realizado el cruce, los nuevos *cromosomas* se someten a una mutación de sus genes, la probabilidad de mutación oscila entre el 0.1 % y 5 %, la mutación podría producir *cromosomas* no factibles, los mismos que serán sometidos a la penalización respectiva en la valoración de dichos *cromosomas*.

4.9 RESULTADOS

Los resultados están en la determinación del conjunto de *cromosomas* los cuales en un modelo diario o semanal, indican la capacidad en kVAr a ser instalada, el beneficio tanto técnico y económico del esquema por cada segmento de demanda y en conjunto.

Los perfiles de voltaje están diferenciados por cada nivel de demanda, al igual que las pérdidas y beneficio por reducción de pérdidas, el beneficio por liberación de capacidad del sistema se lo encuentra en la reducción del pico de pérdidas.

5 SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para objeto de comparación de resultados se utilizan casos de estudio publicados, las soluciones están valoradas en un mismo esquema económico para analizar así los resultados obtenidos.

5.1 PROBLEMA 9 BARRAS

Para el desarrollo de la aplicación digital se baso en el sistema de distribución radial 9 barras a 23kV, los datos del sistema se presentan en el ANEXO 4.

Los parámetros que se han tomado en cuenta, para el primer caso, se encuentran en el trabajo presentado por [19] y son los siguientes: $C_e = 0.06 \text{ US\$/kWh}$, $C_p = 168 \text{ US\$/kW-año}$, $T1(h) = 2.74$, $T2(h) = 18.52$ y $T3(h) = 2.74$ los niveles de carga correspondientes serán 0.3, 0.6 y 1.1 y además de un costo por kVAr de $4.9 \text{ US\$}$.

En [19] se presenta una solución por medio de la búsqueda exhaustiva en donde evalúa el espacio de soluciones, tomando como referencia el número de posibles combinaciones y los tiempos computacionales que se requieren, compara tanto soluciones para un solo nivel de carga y para distintos niveles, los resultados alcanzados para tres niveles de carga son los siguientes:

Nodo	4	5	6
Nivel de carga 0.3 [kVAr]	600	0	300
Nivel de carga 0.6 [kVAr]	600	300	300
Nivel de carga 1.1 [kVAr]	600	300	1500

Tabla 5.1. Caso estudio 9 barras esquema de compensación propuesto por [19].

Se ha utilizado la aplicación digital, para una población de 200 individuos a través de 200 generaciones, con probabilidades de cruce y mutación de 80% y 1 % respectivamente, las penalizaciones por violación de las restricciones no son consideradas para este caso.

Se puede visualizar en la siguiente gráfica la conversión del algoritmo a soluciones óptimas locales, la mejor solución es el óptimo global.

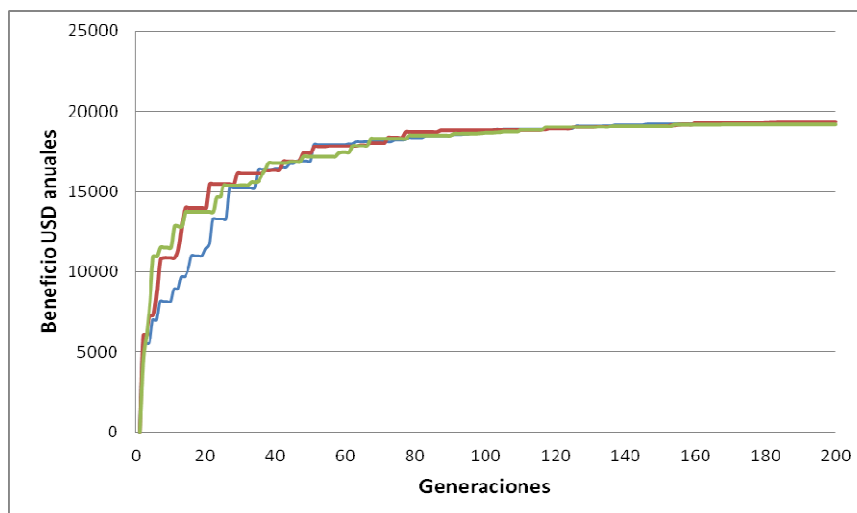


Fig. 5.1. Conversión del algoritmo genético para el caso 9 barras.

El mejor esquema de compensación se presenta a continuación Tabla 5.2 además de una comparación entre las soluciones propuestas Tabla 5.3 y 5.4.

Búsqueda AG poblamiento determinístico			
Nivel de carga	0.3	0.6	1.1
Nodo	[kVAr]	[kVAr]	[kVAr]
4	600	1200	1200
5	450	600	600
6	0	300	600
8	0	0	300
9	0	300	300

Tabla 5.2. Caso estudio 9 barras [19] esquema de compensación AG.

Reducción de pérdidas	Caso [19] [kW]	Caso AG [kW]
Nivel de carga 0.3 [kVAr]	4.11	4.21
Nivel de carga 0.6 [kVAr]	16.79	23.32
Nivel de carga 1.1 [kVAr]	88.39	106.72

	Beneficio \$USD	Total kVAr compensación	Tiempo
Caso estudio	15453	900 kVAr fijos, 1500 kVAr conectable	Búsqueda 2 días
AG	19342	1050 kVAr fijos, 1950 kVAr conectable	22 min

Tabla 5.3. y 5.4. Caso estudio 9 barras comparación de resultados

Se ve una marcada diferencia entre las soluciones propuestas, obteniéndose mejores resultados aplicando los algoritmos genéticos. Para visualizar los perfiles de voltaje se los compara en los segmentos de Demanda Máxima, Media y Mínima. En la condición de Demanda Máxima y Media el perfil de voltaje esta fuera de los límites $\pm 5\%$ razón por lo cual se debe considerar otro tipo de alternativa para mejorar la calidad del voltaje.

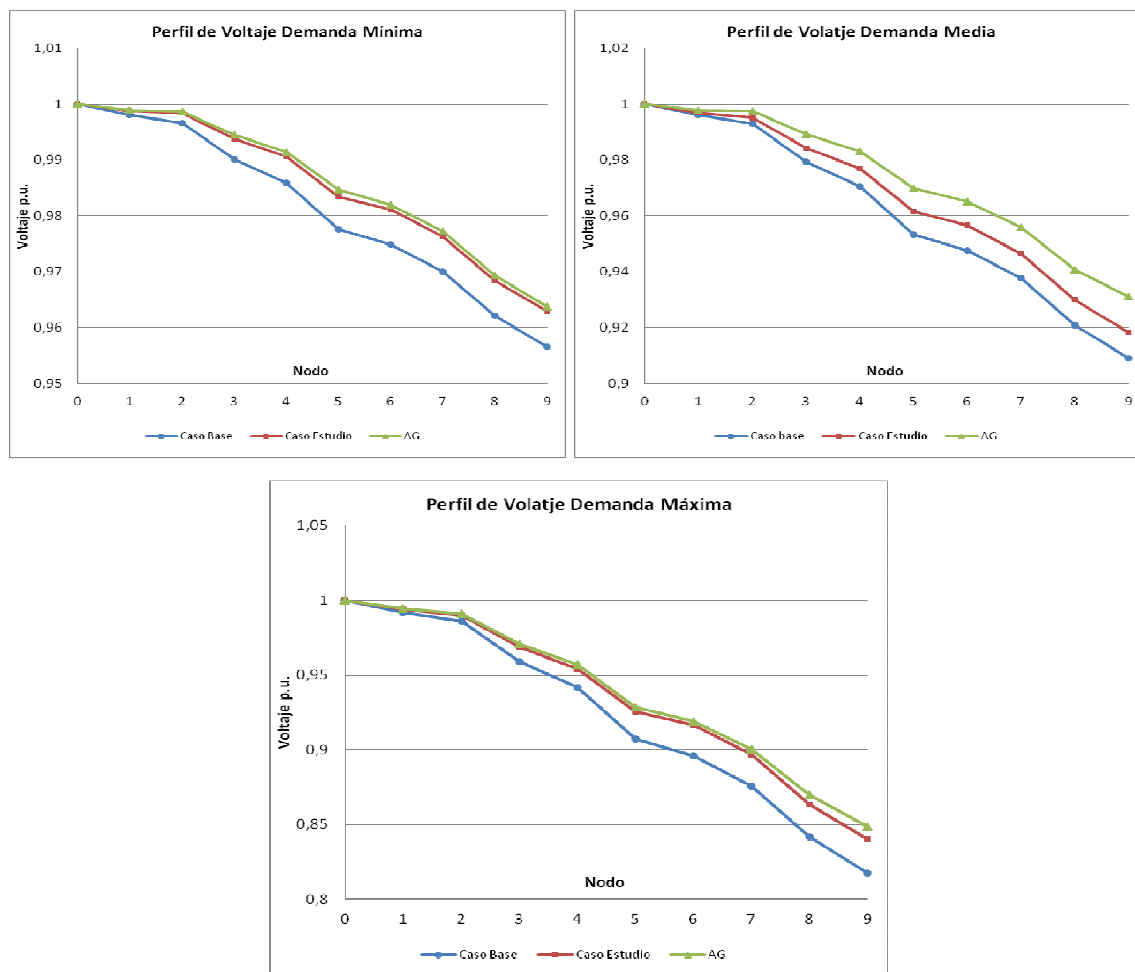


Fig. 5.2. Comparación de perfiles de voltaje Demandas Máxima, Media y Mínima caso 9 barras.

En los resultados presentados por [11] se presentan dos alternativas, uno con un costo por kVAr de $1.5\text{US\$}$ y otro con $5\text{US\$/kVAr}$, además de un $C_e = 0.03\text{US\$/kWh}$, $C_p = 200\text{US\$/kW-año}$ los niveles de carga son 0.6, 0.8 y 1.0 distribuidos uniformemente en tiempos de 8 horas diarias, con el objetivo de

realizar una comparación con los resultados propuestos no se considera la penalización por violación de las restricciones.

Los resultados para un costo de 1.5 $US\$/kVAr$ y 5 $US\$/kVAr$ son los siguientes:

Nodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Nivel de carga 0.6 [kVAr]	200	300	300	1000	300	200	0	200	200
Nivel de carga 0.8 [kVAr]	200	300	1000	1700	500	200	0	200	500
Nivel de carga 1.0 [kVAr]	200	300	1300	2000	500	700	300	500	300

Tabla 5.5. Caso estudio 9 barras esquema de compensación propuesto por [11]
1.5 $US\$/kVAr$.

Nodo	4	5	6	7	8	9
Nivel de carga 0.6 [kVAr]	800	700	200	0	300	200
Nivel de carga 0.8 [kVAr]	800	1000	0	500	300	200
Nivel de carga 1.0 [kVAr]	800	1000	700	800	300	200

Tabla 5.6. Caso estudio 9 barras esquema de compensación propuesto por [11]
5 $US\$/kVAr$.

Se puede observar en los resultados publicados en [11] que cuando se aplica un costo bajo por kVAr lo óptimo viene a ser compensar en todas las barras, lo cual es poco atractivo económicamente y desde el punto de vista operativo crea muchas dificultades en la red, cuando este costo es mayor ya no es una solución factible.

Para contrastar estos resultados se realiza un análisis de sensibilidad utilizando los siguientes costos por kVAr para bancos fijos y conectables: 1.5/2.25, 2.5/3.75, 3.5/5.25, 4.5/6.75, y 5/7.5 USD (costo bancos fijos/costo bancos conectables), los costos de los bancos conectables superan en 50% el valor del banco fijo, esto se realiza para visualizar como el algoritmo trabaja ante una diferencia de costos considerable.

Se ha utilizado la aplicación digital, para una población de 200 individuos a través de 200 generaciones, con probabilidades de cruce y mutación de 80% y 1 % respectivamente, los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Nivel de carga	1.5/2.25 USD/kVAr			2.5/3.75 USD/kVAr		
	0.6	0.8	1.0	0.6	0.8	1.0
Nodo	[kVAr]	[kVAr]	[kVAr]	[kVAr]	[kVAr]	[kVAr]
3	600	600	600	0	0	0
4	1200	1200	1200	1200	1200	1200
5	600	900	900	1200	1200	1200
6	600	600	600	0	0	0
7	0	0	0	300	600	600
8	0	0	300	0	0	0
9	300	300	300	300	300	300
Reducción de Pérdidas [kW]	21.93	51.47	94.68	19.97	48.56	88.64

Nivel de carga	3.5/5.25 USD/kVAr			4.5/6.75 USD/kVAr		
	0.6	0.8	1.0	0.6	0.8	1.0
Nodo	[kVAr]	[kVAr]	[kVAr]	[kVAr]	[kVAr]	[kVAr]
4	600	600	600	0	0	0
5	900	900	900	900	900	900
6	600	600	600	600	600	600
8	0	0	0	450	450	450
9	450	450	450	0	0	0
Reducción de Pérdidas [kW]	18.1	45.14	77.69	16.84	39.32	66.31

Nivel de carga	5/7.5 USD/kVAr		
	0.6	0.8	1.0
Nodo	[kVAr]	[kVAr]	[kVAr]
5	600	600	600
6	600	600	600
8	600	600	600
Reducción de Pérdidas [kW]	16.64	37.61	62.85

Tabla 5.7. Caso estudio 9 barras esquemas de compensación AG para diferentes costos.

	Costo Compensación \$USD/año	Beneficio \$USD/año	Total kVAr compensación
Caso [11] 1.5/2.25 USD/kVAr	12150	24052	2700 kVAr fijos, 3600 kVAr conectable
Caso [11] 5.0/7.50 USD/kVAr	23500	7529	2000 kVAr fijos, 1800 kVAr conectable
AG 1.5/2.25 USD/kVAr	6300	27361	3300 kVAr fijos, 600 kVAr conectable
AG 2.5/3.75 USD/kVAr	8625	22872	3000 kVAr fijos, 300 kVAr conectable
AG 3.5/5.25 USD/kVAr	8925	18960	2550 kVAr fijos
AG 4.5/6.75 USD/kVAr	8775	15217	1950 kVAr fijos
AG 5.0/7.50 USD/kVAr	9000	13828	1800 kVAr fijos

Tabla 5.8 Caso estudio 9 barras comparación de resultados.

Se puede observar que si el costo por kVAr se va incrementando la aplicación ubica menor número de bancos de capacitores para encontrar así el mayor beneficio posible. Cuando los costos superan los 2.5 USD/kVAr fijo se generan soluciones que consideran bancos únicamente fijos. Con este análisis se observa que las soluciones son lógicas y son aún mejores que las soluciones propuestas en [11].

5.2 PROBLEMA 30 BARRAS

El sistema radial de 30 barras a 23 kV (ver ANEXO 4) utilizado como caso de estudio en [20] utiliza técnicas evolutivas para encontrar la solución para distintos niveles de carga. La información utilizada para su realización fue la siguiente: $C_e = 0.093 \text{ US\$/kWh}$, $6.16 \text{ US\$/kVAr}$. Los costos son anualizados al 15% anual y el periodo de análisis son 15 años. El tamaño de la población es de 50 individuos con 400 generaciones. Las probabilidades de cruce y mutación son de 70% y 2% respectivamente. La curva se ha discretizado en tres niveles 0.6, 0.8 y 1.0 con la duración de 11, 9 y 4 horas respectivamente.

El esquema de compensación propuesto por [20] es el siguiente:

Nivel de carga	Nodo	2	6	7	10	14	18	20	23	24	25	26	27
0.6	[kVAr]	0	0	200	300	200	0	0	240	600	200	0	120
0.8	[kVAr]	240	240	0	900	720	0	200	0	480	0	60	240
1.0	[kVAr]	600	120	200	480	660	600	120	120	360	200	120	200

Tabla 5.9. Caso estudio 30 barras esquema de compensación propuesto por [20].

Se corrió el AG con los valores descritos anteriormente tomando tamaños múltiples de 120 kVAr para asemejarse a la solución propuesta, se realiza un análisis de convergencia con los siguientes resultados:

	Individuos	Generaciones	Prob. cruce	Prob. mutación	Beneficio USD
Caso 1	100 Individuos	200 generaciones	90%	1%	209980
Caso 2	50 Individuos	400 generaciones	70%	2%	212619
Caso 3	100 Individuos	600 generaciones	90%	1%	215102

Tabla 5.10. Caso estudio 30 barras convergencia AG.

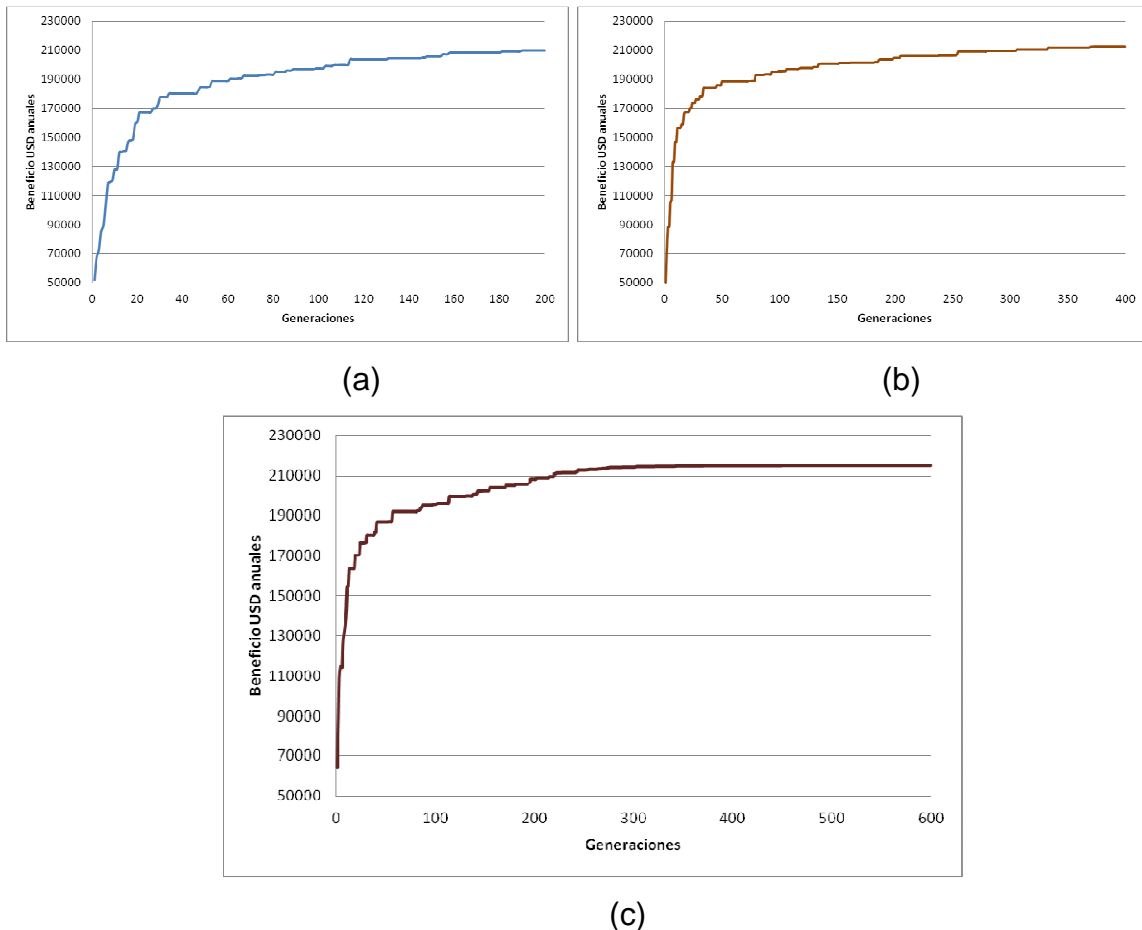


Fig. 5.3. Convergencia del Algoritmo Genético a) Caso 1 b) Caso 2 c) Caso 3

Observando los resultados de convergencia se observa que una mayor probabilidad de cruce garantiza la formación de una gran cantidad de hijos y

utilizando el poblamiento determinístico se llega a resultados considerablemente buenos en un número de generaciones más pequeña. La probabilidad de mutación es una probabilidad baja, ya que es un fenómeno poco común, pero que tiene su importancia al generar nuevos individuos, y explorar así de mejor manera el espacio de posibles soluciones. La solución encontrada en el caso 3 es la siguiente:

Nivel de carga	Nodo	4	7	10	11	12	14	16	20	22	25	26	29	30
0.6	[kVAr]	480	0	0	0	600	0	480	480	600	600	120	120	480
0.8	[kVAr]	720	480	0	0	480	480	480	480	600	600	480	120	480
1.0	[kVAr]	720	480	120	120	600	480	480	480	600	600	480	120	480

Tabla 5.11. Caso estudio 30 barras esquema de compensación AG.

Nivel de carga	Perdidas Potencia (kW)		
	Sin Compensar [Caso Base]	Compensado [20]	Compensado [AG]
0.6	431.46	388.12	370.72
0.8	821.27	709.98	687.55
1.0	1390.07	1190.09	1138.54
Beneficio		168453	215102

Tabla 5.12. Caso estudio 30 barras comparación de resultados.

Observando el esquema de compensación propuesto, en el nodo 12 se tiene un fenómeno particular, aquí se ubica un banco fijo de 480kVAr con un banco que se conectable de 120kVAr que es conectado en el periodo de demanda máxima y mínima, lo cual demuestra la versatilidad de esquemas de control que se pueden encontrar optimizando así los beneficios.

A continuación se muestra el perfil de voltaje antes y después del esquema de compensación comparándolo con el obtenido en el caso de estudio [20].

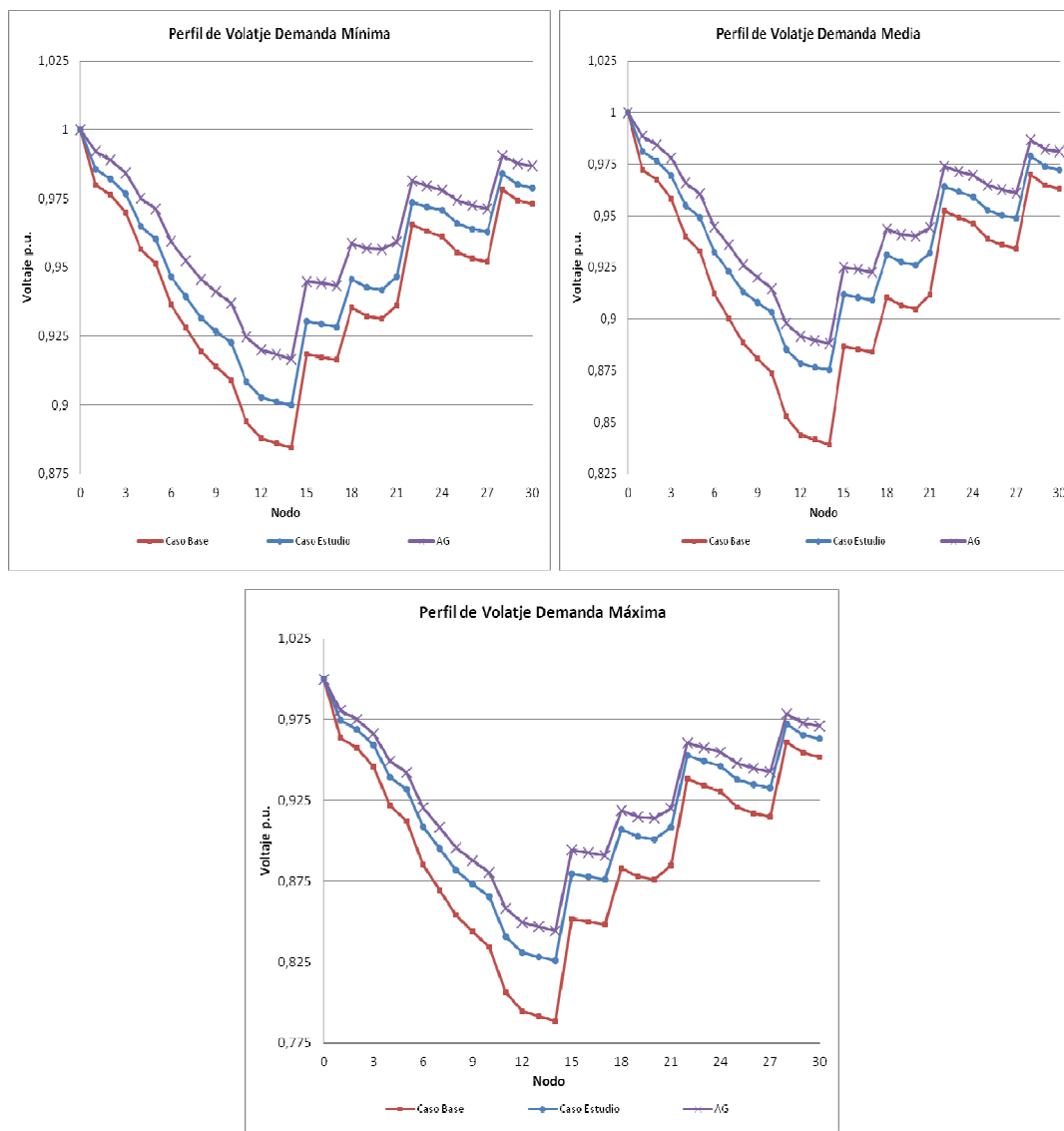


Fig. 5.4. Perfiles de voltaje caso base, caso de estudio [20] y AG para los diferentes niveles de Demanda caso 30 barras.

5.3 PROBLEMA 33 BARRAS

El sistema de 33 barras es un sistema radial, con voltaje de operación de 11 kV, los datos del sistema se encuentran en el ANEXO 4.

La solución presentada por [18] utiliza una combinación de un algoritmo micro genético con lógica difusa, presenta la solución considerando el beneficio en la reducción de pérdidas de energía, los costos de capacitores fijos y conectables y restricciones de voltaje.

La curva se ha dividido en tres niveles de carga, con igual duración de tiempo, $T1(h) = T2(h) = T3(h) = 8$ los niveles de carga correspondientes serán 0.6, 0.8 y

1.0, han sido considerados capacitores en módulos de 100 kVAr, el costo por energía es $C_e = 0.3 \text{ US\$/kWh}$, que es el mínimo costo ya que ha utilizado en [18] costos diferenciados para cada nivel de carga, la instalación de capacitores tiene un costo por kVAr de 1.0US\$ para capacitores fijos y 1.3US\$ para capacitores conectables, las soluciones para el sistema de 33 barras utilizando el algoritmo híbrido son las siguientes:

Nivel de carga	Nodo	4	5	8	9	11	14	17	18	19	20
0.6	[kVAr]	100	100	100	0	100	100	100	100	100	100
0.8	[kVAr]	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1.0	[kVAr]	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Nivel de carga	Nodo	21	23	24	25	26	27	29	32
0.6	[kVAr]	100	100	100	100	0	100	100	100
0.8	[kVAr]	200	100	100	100	0	100	100	100
1.0	[kVAr]	200	100	100	100	100	100	100	100

Tabla 5.13. Caso estudio 33 barras esquema de compensación propuesto por [18].

Se puede observar el gran número de barras que presentan compensación, debido al bajo costo de los bancos y al costo de energía muy elevado.

Utilizando la misma información se presenta la siguiente solución y se comparan las soluciones, se han utilizado 100 individuos y 500 generaciones y probabilidades de 80% y 1% para el cruce y mutación respectivamente.

Nivel de carga	Nodo	3	4	6	7	8	9	16	17
0.6	[kVAr]	0	200	0	100	300	0	200	0
0.8	[kVAr]	0	200	100	100	200	200	100	100
1.0	[kVAr]	200	200	100	100	300	200	200	100

Nivel de carga	Nodo	18	19	20	21	22	23	24	27
0.6	[kVAr]	100	100	100	0	200	0	200	0
0.8	[kVAr]	100	300	0	100	300	0	200	0
1.0	[kVAr]	200	200	100	200	100	200	300	100

Tabla 5.14. Caso estudio 33 barras esquema de compensación AG

Reducción de pérdidas	Caso [18] [kW]	Caso AG [kW]
Nivel de carga 0.6 [kVAr]	21.42	21.2
Nivel de carga 0.8 [kVAr]	37.32	38.78
Nivel de carga 1.0 [kVAr]	55.64	63.18

	Beneficio \$USD	Total kVAr compensación
Caso estudio	98258	1600 kVAr fijos, 300 kVAr conectable
AG	104194	1100 kVAr fijos, 2000 kVAr conectable

Tabla 5.15. y 5.16. Caso estudio 33 barras comparación de resultados

Para continuar se utilizan los costos del análisis realizado en [1] para contrastar los resultados anteriores, ya que por una parte el costo de energía es muy elevado y por otra se utiliza módulos de 100 kVAr trifásicos los mismos que no concuerdan con las capacidades estándar señaladas en el Capítulo 2.

Se utiliza un $C_e = 0.025 \text{ US\$/kWh}$, y un costo de $0.15 \text{ US\$/kVAr}$ para bancos fijos y $0.25 \text{ US\$/kVAr}$ para bancos conectables más un costo fijo de $70 \text{ US\$/año}$, la distribución de tiempo se realiza en 8 horas por segmento de Demanda, y se consideran bancos en módulos de 300kVAr. Se toma en cuenta para obtener un nivel de voltaje dentro de $\pm 5\%$, una regulación de $+2.5\%$ en el voltaje de la S/E. Los resultados para el sistema de 33 barras con las condiciones ya indicadas son los siguientes:

	Nivel de carga	Nodo	2	3	6	8	16	18	19	20	21	23
Voltaje S/E 1.00 pu	0.6	[kVAr]	0	300	0	300	300	0	300	0	0	300
	0.8	[kVAr]	0	300	300	300	300	0	300	0	300	300
	1.0	[kVAr]	0	300	300	300	300	300	300	0	300	300
Voltaje S/E 1.025 pu	0.6	[kVAr]	300	0	0	300	300	300	0	0	0	300
	0.8	[kVAr]	300	0	300	300	300	300	0	0	300	300
	1.0	[kVAr]	300	0	300	300	300	300	0	300	300	300

Tabla 5.17. Caso estudio 33 barras esquema de compensación AG.

Nivel de carga	Perdidas Potencia (kW) V S/E 1.00pu		Perdidas Potencia (kW) V S/E 1.025pu	
	Sin Compensar [Caso Base]	Compensado [AG]	Sin Compensar [Caso Base]	Compensado [AG]
0.6	76.83	56.27	72.93	53.54
0.8	139.18	100.92	131.99	95.66
1.0	221.75	162.34	210.07	153.08
Beneficio USD		7621		7217

Tabla 5.18. Caso estudio 33 barras resultados AG.

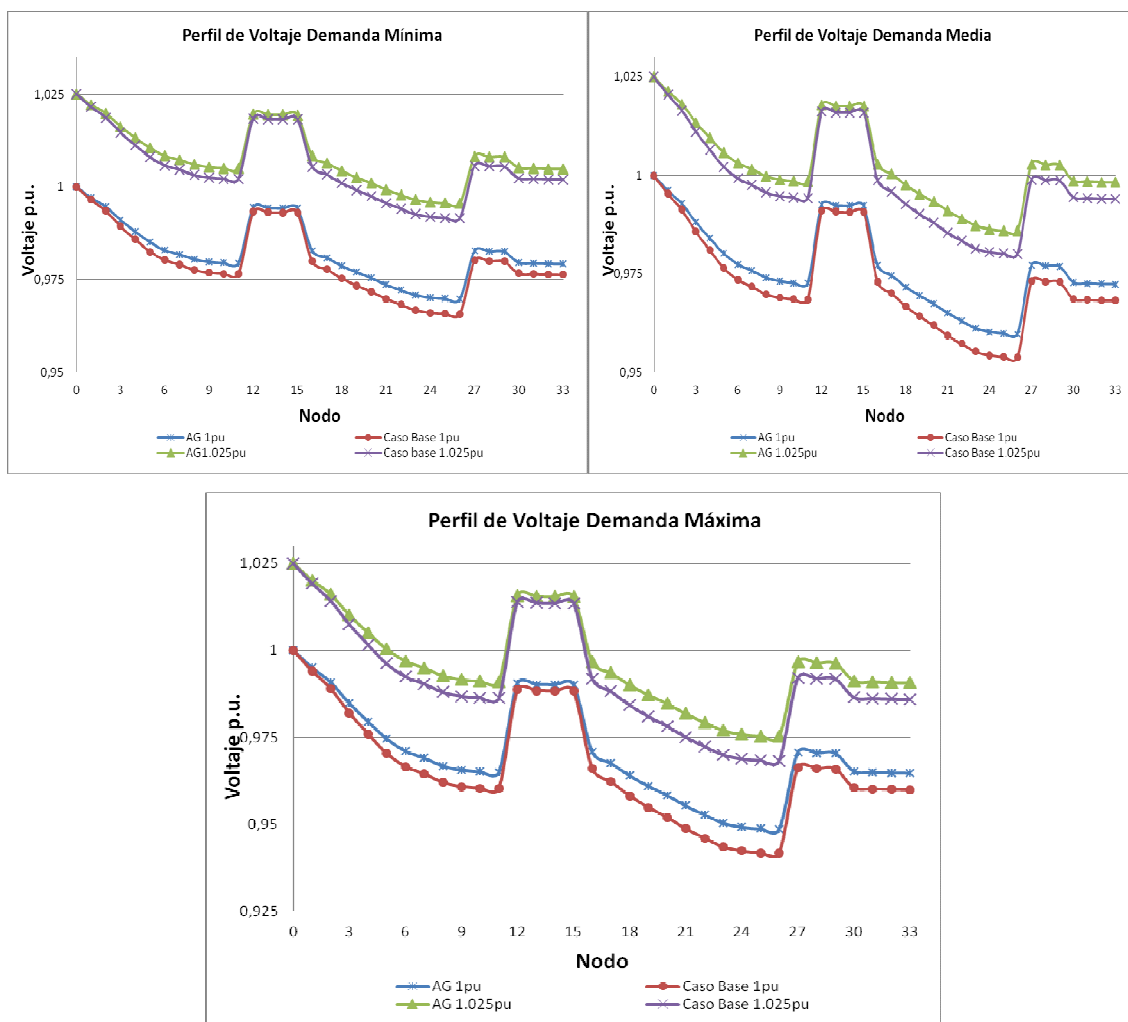


Fig. 5.5. Perfiles de voltaje sin regulación (1pu) y con regulación (1.025pu) para los diferentes niveles de Demanda caso 33 barras.

5.4 PROBLEMA ALIMENTADOR 16C EEQSA

Con la ayuda de la información suministrada por la EEQSA se precede a modelar el primario 16C, el cual trabaja a 6.3kV, parte de la S/E 16 de la calle Río Coca y llega hasta la el sector del Aeropuerto, este primario presenta bajo factor de potencia, lo cual lo hace recomendable para un estudio de este tipo, la información disponible es la topología de la red (calibres, distancias, etc.), el listado de transformadores y un listado completo de la mediciones realizadas en la subestación del mes de diciembre del 2010 con un intervalo de 15 min.

Discretización de la curva de demanda primario 16C EEQSA

Para modelar la curva de demanda del primario 16C se siguen los lineamientos descritos en 3.1.1.

A continuación se presenta la curva de demanda en función del tiempo y su respectiva curva de duración de demanda.

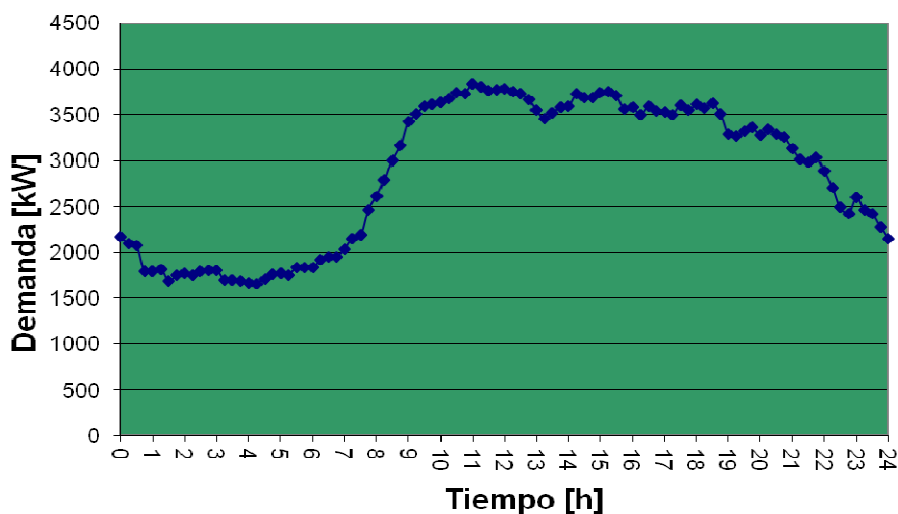


Fig. 5.6. Demanda en función del tiempo primario 16C EEQSA

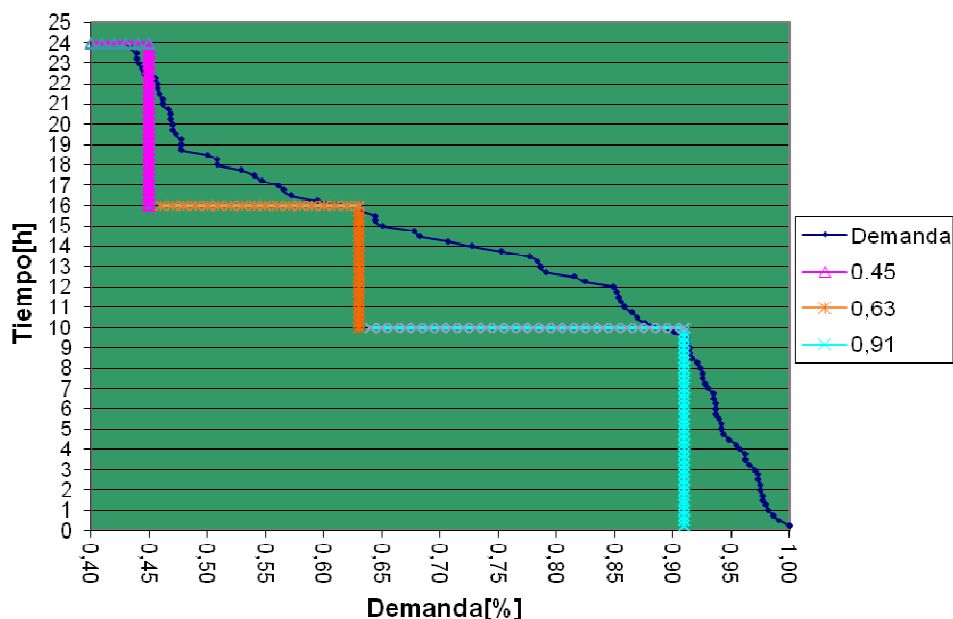


Fig.5.7. Curva de duración de la demanda primario 16C EEQSA

Con los datos entregados por la EEQSA, se puede discretizar la curva demanda, para eso se ha considerado el día 15 de diciembre de 2010, que es uno de los días de mayor demanda del mes de diciembre, se ha discretizado la curva en valores que abarquen la mayor área, 0.45, 0.63, 0.91, valores con los cuales obtenemos los tiempos de duración de los periodos de demanda mínima, media y máxima que son 8, 6 y 10 horas diarias respectivamente, es conveniente señalar que este primario presenta un comportamiento tipo comercial, por el pico de larga duración.

Con los datos obtenidos de la discretización de la curva de demanda se la puede ingresar a la aplicación digital, utilizando para ello los datos de topología de la red, y las capacidades nominales de los transformadores, utilizando para ello el factor de potencia y un factor de carga característico de cada segmento de Demanda.

Totología y parámetros de la red

Con los datos suministrados por la EEQSA, con la ayuda de [21] que es una hoja de cálculo donde utiliza series de Carson para encontrar los parámetros de la red, y reduciendo la red al troncal trifásico se obtienen los datos a ser utilizados con la aplicación digital. Ver ANEXO 4.

Ubicación método Algoritmos Genéticos

Se considera para este sistema bancos de capacidad fija, las capacidades consideradas son: 150kVAr, 300kVAr y 450 kVAr, para esto se considera los siguientes costos $C_e = 0.085 \text{ US\$/kWh}$, $C_p = 200 \text{ US\$/kW - año}$, los tiempos de duración de los intervalos como ya antes fueron mencionados serán $T1(h) = 8$, $T2(h) = 6$ y $T3(h) = 10$ los niveles de carga correspondientes serán 0.45, 0.63 y 0.91 y además de un costo de las unidades definidos en sus costos de inversión correspondiente para cada banco considerado.

El proceso de búsqueda tomo alrededor de 44 min utilizando para ello una población de 100 individuos durante 400 generaciones, con probabilidades de 80% y 1% para el cruce y la mutación.

Los resultados se muestran a continuación:

	Bancos	150 kVAr						300 kVAr			450 kVAr	
Nivel de carga	Nodo	29	37	47	55	60	63	43	48	58	29	48
0.45	[kVAr]	0	150	150	150	0	0	0	300	0	450	0
0.63	[kVAr]	150	150	150	150	0	0	300	300	0	450	0
0.91	[kVAr]	150	150	150	150	150	150	300	300	300	450	450

Tabla 5.19. Caso estudio 16C resultados obtenidos utilizando diferente tamaño de bancos.

Reducción de pérdidas [kW]	Caso módulos 150 kVAr	Caso módulos 300 kVAr	Caso módulos 450 kVAr
Nivel de carga 0.45	3.84	3.05	2.89
Nivel de carga 0.63	5.58	5.40	3.74
Nivel de carga 0.91	13.45	13.25	12.68
Beneficio USD/año	13167	15171	15042

Tabla 5.20. Comparación de resultados utilizando diferentes módulos caso 16C.



Fig. 5.8. Perfiles de voltaje alimentador 16C para los diferentes niveles de Demanda.

5.5 ANÁLISIS DE MODELACIÓN SEMANAL

Para la representación semanal se ha modificado la opción para 3 niveles de demanda, aumentando tres segmentos más, de manera que los 3 primeros niveles representen las demandas mínima, media y máxima para los días fines de semana y los siguientes tres niveles represente los tres niveles de demanda para los días entre semana, el ingreso de datos en la aplicación digital debe ajustarse para que las demandas concuerden con la distribución de tiempos y así evaluar las alternativas en forma correcta.

Para la distribución de tiempo se consideran las 168 horas semanales, las cuales dependiendo de la curva de duración de demanda se distribuyen en seis intervalos que concuerden con la distribución de valores de demanda realizada para días fines de semana y entre semana.

Se ha realizado la extensión del algoritmo para que trabaje con *cromosomas* divididos en 6 segmentos, todo el ciclo de búsqueda basada en algoritmos genéticos es el mismo, al igual que la evaluación del esquema económico y las penalizaciones consideradas en este proyecto.

Se utilizara el sistema de 9 barras con la siguiente distribución de tiempo: $T1(h) = 5.48$, $T2(h) = 37.04$, $T3(h) = 5.48$ (fin de semana) $T4(h) = 13.7$, $T5(h) = 92.6$, $T6(h) = 13.7$ (entre semana), los niveles de carga correspondientes serán 0.3, 0.4, 0.6 y 0.6, 0.8, 1.0.

Se utiliza un $C_e = 0.085$ US\$/kWh, además el costo de las unidades están definidos en sus costos de inversión correspondiente para cada banco considerado.

Utilizando la aplicación, con una población de 150 individuos durante 400 generaciones, utilizando una probabilidad de cruce y mutación de 90% y 1% respectivamente, durante de 60 min, se consiguieron los siguientes resultados:

	Nivel de carga	Nodo	3	4	5	8
Sábado y Domingo	0.3	[kVAr]	0	0	300	0
	0.4	[kVAr]	0	0	450	0
	0.6	[kVAr]	0	1200	600	0
Lunes a Viernes	0.6	[kVAr]	0	1200	600	0
	0.8	[kVAr]	900	1200	600	300
	1.0	[kVAr]	900	1200	600	450

Tabla 5.21. Esquema de compensación semanal AG

Evaluando económicamente esta solución se obtiene un beneficio de 53403 US\$. anual.

Se puede visualizar en los resultados obtenidos la importancia de considerar la variación de la demanda semanalmente, por una parte se observa la necesidad de que la mayoría de bancos sean de tipo conectable, la correcta aplicación de los métodos de control facilitaría el ingreso y salida de estos bancos con lo cual este esquema sería aplicable, caso contrario ante un nivel de demanda mínimo como el ejemplo mostrado (nivel de carga 0.3) tendríamos una red de tipo capacitiva, con aumento considerable de voltajes en los nodos.

5.6 ANÁLISIS DE MODELACIÓN AG MATLAB

Utilizando las herramientas de Matlab en donde se han desarrollado varias opciones para utilizar los algoritmos genéticos en problemas de optimización, se ha adaptado una función *fitness* para encontrar utilizando los comandos y opciones de Matlab, una solución que se aplique al problema de ubicación de capacitores.

Al utilizar esta aplicación se evalúa una matriz de tamaño $n_{barras} \times n_{seg}$ (numero de barras x n segmentos de la curva de demanda), esta matriz está formada por variables de una misma función, esta función es el beneficio respectivo de cada arreglo, los conceptos básicos que se encuentran en el ANEXO 3 son aplicables al seleccionar las opciones que utiliza el algoritmo genético de esta aplicación, existe un gran número de opciones, tanto en creación de poblaciones, selección, cruce, mutación, en donde evaluando el desempeño del algoritmo al aplicarlo a nuestro problema, se escogen las mejores opciones.

La evaluación técnica y económica (función beneficio) es la misma utilizado en la aplicación principal, se mantiene el mismo esquema de penalización de los individuos que violan las restricciones propuestas de nivel de voltaje y factor de potencia inductivo de la red.

Se presenta una dificultad al utilizar este recurso debido a que el algoritmos trabaja en el dominio de los reales, razón por la cual estos valores se los discretiza en rangos proporcionales para así utilizar valores estándar de bancos de capacitores en la valoración económica, estos valores estándar se los encuentra en valores múltiplo a un tamaño mínimo, por ejemplo si se selecciona un tamaño mínimo de 300kVAr, y un número de tamaños de 2, se trabajara con tamaños de 0, 300 y 600 kVAr.

Dentro de la aplicación desarrollada se encuentra esta opción aplicable para un análisis diario o semanal de la demanda.

Para evaluar el desempeño de esta aplicación utilizaremos el problema IEEE de 33 barras, utilizando los costos descritos (5.3) que son los siguientes: $C_e = 0.025 \text{ US\$/kWh}$, un costo de $0.15 \text{ US\$/kVAr}$ para bancos fijos y $0.25 \text{ US\$/kVAr}$ para bancos conectables más un costo fijo de $70 \text{ US\$/año}$, las duración de los intervalos de demanda son de 8 horas para demanda mínima, media y máxima.

A continuación se presenta el esquema de compensación encontrado y la comparación de los resultados utilizando la aplicación digital.

Nivel de carga	Nodo	3	6	8	16	18	19	21	23
0.6	[kVAr]	300	0	300	300	0	300	0	300
0.8	[kVAr]	300	300	300	300	0	300	300	300
1.0	[kVAr]	300	300	300	300	300	300	300	300

Tabla 5.22. Caso estudio 30 barras esquema compensación AG principal.

Nivel de carga	Nodo	4	5	6	16	18	19	20	21	22
0.6	[kVAr]	300	0	300	300	0	300	0	300	0
0.8	[kVAr]	300	300	300	0	300	0	0	300	300
1.0	[kVAr]	300	300	300	300	300	300	300	0	300

Tabla 5.23. Caso estudio 30 barras esquema compensación AG gatool.

Pérdidas de Potencia [kW]	Sin Compensar [Caso Base]	Compensado [AG principal]	Compensado [AG gatool]
0.6	76.83	376.97	57.26
0.8	139.18	704.86	103.88
1.0	221.75	1175.72	164.96
Beneficio		7621	6906

Tabla 5.24. Caso estudio 30 barras resultados comparación de resultados

Al observar los resultados se puede confirmar que un algoritmo especializado en el problema, que utiliza el poblamiento determinístico, brinda mejores resultados que el algoritmo clásico en el cual se fundamenta la herramienta de Matlab gatool. Aún así el tiempo requerido en la aplicación principal es mucho mayor al que utiliza gatool, es interesante utilizarla para ver los resultados cambiando sus opciones y evaluando los resultados obtenidos.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La implementación de determinado esquema de compensación en donde se consideran bancos de capacitores tanto fijos como conectables está regida a factores operativos en donde para su correcta aplicación se debe escoger un sistema de control adecuado, este esquema debe garantizar por una parte la mayor reducción de pérdidas y un costo de inversión adecuado para maximizar los beneficios económicos, tomando en cuenta que los voltajes deben estar dentro de un nivel aceptado por la normativa de calidad de voltaje.

La metodología de los algoritmos genéticos implementada en una aplicación digital muestra su validez en los resultados alcanzados, por una parte se ha mejorado las soluciones propuestas obteniendo un mayor beneficio y por otra el esquema de compensación utiliza tamaños de bancos normalizados aplicable a un alimentador de distribución como es el caso del primario 16C analizado.

La utilización de costos referenciales para encontrar una solución a la ubicación de capacitores en redes de distribución, no garantiza un esquema óptimo como resultado, estos valores deben ser reales, considerando todos los factores operativos que intervienen en su instalación, sea control, mantenimiento, reposición de unidades, retiro y otros gastos que llevan la instalación de este equipamiento en una red.

Al implementar la técnica de algoritmos genéticos para un análisis de demanda diario con tres segmentos o semanal con seis segmentos requiere de un gran esfuerzo computacional, aun así es una herramienta aplicable ya que brinda criterios validos para realizar una inversión en un esquema de compensación de reactivos para una red de distribución primaria.

La utilización del algoritmo especializado en el problema de ubicación de capacitores que implementa la técnica de nichos con su técnica de poblamiento determinístico donde se garantiza la diversidad genética, ha demostrado ser

capaz de encontrar soluciones óptimas o cercanas al óptimo que difícilmente son encontradas por un algoritmo clásico.

La implementación de un flujo de potencia radial es de gran importancia en el desempeño del algoritmo ya que reduce el tiempo de evaluación de la población en cada generación y garantiza una evaluación económica correcta de la reducción de pérdidas de energía y del pico de demanda.

Las soluciones entregadas consideran una red trifásica y equilibrada los cambios para acercar estas soluciones a la realidad están en la adaptación del algoritmo para la búsqueda de bancos monofásicos, utilizando para ello un flujo asimétrico.

La utilización de técnicas de inteligencia artificial tienen un gran desarrollo ya que son innovadoras y permiten resolver problemas de optimización sobre todo en el campo de la ingeniería. Esta técnica puede ser implementada en todo el sector eléctrico donde se presente un problema de optimización de inversiones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GALARZA, Marco; Localización Óptima de Capacitores en Redes Primarias de Distribución vía Algoritmos Genéticos. Escuela Politécnica Nacional. 2006.
- [2] CHAMORRO, Vinicio; Minimización de Pérdidas de Energía en Alimentadores Primarios de Distribución Mediante la Instalación de Capacitores Paralelo. Método de Variaciones Locales. Escuela Politécnica Nacional. 1985.
- [3] RIOFRÍO, Carlos; Distribución de Energía Eléctrica. Apuntes de clase Escuela Politécnica Nacional. 2009.
- [4] BARAN, Mesut; WU, Felix; Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution Systems. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 4. No. 1. 1989.
- [5] GÖNEN, Turan; Electric Power Distribution System Engineering. McGraw-Hill. 1986.
- [6] IEEE Std 1036-1992, IEEE Guide for Application of Shunt Power Capacitors. 1992.
- [7] IEEE Std 18-2002, IEEE Standard for Shunt Power Capacitors. 2002.
- [8] HAGHIFAM, M.-R.; MALIK, O.P.; Genetic algorithm-based approach for fixed and switchable capacitors placement in distribution systems with uncertainty and time varying loads. IEEE IET Gener. Transm. Distrib..Vol. 1. No 2. 2007.
- [9] DENG, Youman; REN, Xiaojuan; ZHAO, Changcheng; ZHAO Dapu; A Heuristic and Algorithmic Combined Approach for Reactive Power Optimization With Time-Varying Load Demand in Distribution Systems. IEEE Transactions on Power Systems. Vol 17. No 4. 2002.
- [10] CHIANG, Hsiao-Dong; WANG, Jin-Cheng; COCKINGS, O.; SHIN, H.; Optimal Capacitor Placement in Distribution Systems: Part 1-2: Solution Algorithms and Numerical Results. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 5. No 2. 1990.
- [11] LEIVA, Miguel; Localización Óptima de Condensadores en un Sistema de distribución Eléctrico vía Algoritmos Genéticos. Departamento de Ingeniería Eléctrica. Pontificia Universidad Católica de Chile. 2001.

- [12] NG, H; SALAMA, M; Classification of Capacitor Allocation Techniques. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 15. No 1. 2000.
- [13] SHORT, T; Electric Power Distribution Handbook. CRC Press LLC. 2004.
- [14] PALMA MÉNDEZ ; MARÍN MORALES; Inteligencia Artificial, Técnicas, Métodos y Aplicación. McGraw-Hill. 2008
- [15] MICHALEWICZ, Zbigniew; Genetic Algorithms + Data Structures=Evolution Programs. University of North Carolina Charlotte. USA. 1992.
- [16] WEISE,Thomas; Global Optimization Algorithms –Theory and Application-. Newest Version. 2009
- [17] POVEDA, Mentor; Planificación de Sistemas de Distribución. Apuntes de clase Escuela Politécnica Nacional. 2009.
- [18] ALENCAR DE SOUZA, Benemar; ALVES, Heldon; ALVES, Helvio; Microgenetic Algorithms and Fuzzy Logic Applied to the Optimal Placement of Capacitor Banks in Distribution Networks. IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 19. No 2. 2004.
- [19] SERGIO, Rivera; Estado del Arte en la ubicación óptima de capacitores y estudio de optimalidad de la solución mediante búsqueda exhaustiva. Ingeniería e Investigación. Vol. 24. No 3. Universidad de Colombia. 2004.
- [20] GALETTO, Marcos; AROMATARIS, Luís, RINAUDO, Fabián, COSTANTINO Luciano; Compensación reactiva en Redes Radiales de Distribución utilizando técnicas de computación evolutiva. GASEP. Universidad de Río Cuarto. 2006.
- [21] RIOFRÍO, Carlos; Cálculo de los parámetros de redes de distribución trifásicas sin neutro en estructuras de la EEQSA. a 6.3kV. Escuela Politécnica Nacional. Departamento de Energía Eléctrica. 2003.

ANEXOS

ANEXO 1

DEMOSTRACIÓN DEL CRITERIO DE LOS 2/3 PARA UBICACIÓN DE CAPACITORES*

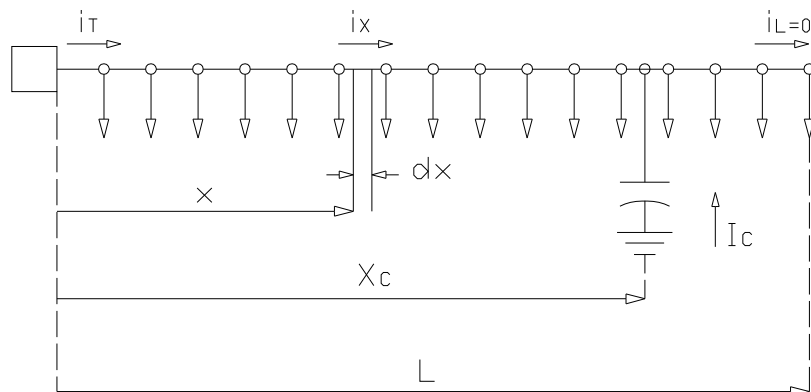


Fig. A.1.1. Alimentador con carga uniformemente distribuida

Para fundamentar analíticamente este criterio se realiza el siguiente análisis de un alimentador con carga uniformemente distribuida Fig A.1.1. donde, i_T es la corriente total del alimentador, i_x es la corriente en el punto dx a una distancia x , I_C es la corriente inyectada por el capacitor instalado en x_c e i_L es la corriente al final de la longitud L . Tenemos entonces dos casos, sin considerar y considerando el capacitor.

1. Sin capacitor

$$i_T = I_T \cdot \cos \phi + jI_T \cdot \sin \phi = I_A + I_R \quad (\text{a.1})$$

$$|i_T| = \sqrt{I_A^2 + I_R^2} \quad (\text{a.2})$$

$$i_x = i_T \left(\frac{L-x}{L} \right) \quad (\text{a.3})$$

P_{sc} = Pérdidas sin capacitor

$$dP_{sc} = 3 \cdot |i_x|^2 dR = 3 \cdot |i_x|^2 r dx = 3(I_A^2 + I_R^2) \frac{(L-x)^2}{L^2} r dx \quad (\text{a.4})$$

$$P_{sc} = 3(I_A^2 + I_R^2) \frac{r}{L^2} \int_0^L (L-x)^2 dx \quad (\text{a.5})$$

$$P_{sc} = (I_A^2 + I_R^2) r L \quad (\text{a.6})$$

2. Con capacitor

$$i_x = I_A \left(\frac{L-x}{L} \right) + j \left[I_R \left(\frac{L-x}{L} \right) - I_C \right] \quad \text{para } 0 \leq x \leq x_c \quad (\text{a.7})$$

$$i_x = (I_A + jI_R) \frac{L-x}{L} \quad \text{para } x_c \leq x \leq L \quad (\text{a.8})$$

P_{CC} = Pérdidas con capacitor

$$P_{CC} = 3 \int_0^{x_c} \left\{ I_A^2 \left(\frac{L-x}{L} \right)^2 + \left[I_R \left(\frac{L-x}{L} \right) - I_C \right]^2 \right\} r dx + 3 \int_{x_c}^L (I_A^2 + I_R^2) \frac{(L-x)^2}{L^2} r dx \quad (\text{a.9})$$

$$P_{CC} = (I_A^2 + I_R^2) r L + 6r I_C I_R x_c - 3r I_C I_R \frac{x_c^2}{L} - 3r I_C^2 x_c \quad (\text{a.10})$$

Si se considera la disminución de pérdidas debido a la instalación de un banco de capacitores ΔP

$$\Delta P = P_{SC} - P_{CC} = 6r I_C I_R x_c - 3r I_C I_R \frac{x_c^2}{L} - 3r I_C^2 x_c \quad (\text{a.11})$$

La disminución de pérdidas se maximiza en la ubicación x_c y con la capacidad

I_C cuando:

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial x_c} = \frac{\partial \Delta P}{\partial I_C} = 0 \quad (\text{a.12})$$

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial x_c} = 0 \Rightarrow 2I_R - 2I_R \frac{x_c}{L} - I_C = 0 \quad (\text{a.13})$$

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial I_C} = 0 \Rightarrow 2I_R - I_R \frac{x_c}{L} - 2I_C = 0 \quad (\text{a.14})$$

A partir de este sistema de ecuaciones formado por a.13 y a.14 se obtiene los valores de x_c e I_C :

$$x_c = \frac{2L}{3} \text{ Localización} \quad (\text{a.15})$$

$$I_C = \frac{2I_R}{3}$$

$$(\sqrt{3} V_{nom} I_C) = \frac{2}{3} (\sqrt{3} V_{nom} I_R)$$

$$kVAr(\text{capacitor}) = \frac{2}{3} kVAr(\text{totales}) \text{ Tamaño (capacidad)} \quad (\text{a.16})$$

ANEXO 2

REPRESENTACIÓN DE LA RED Y ALGORITMO DE SOLUCIÓN DEL FLUJO DE POTENCIA

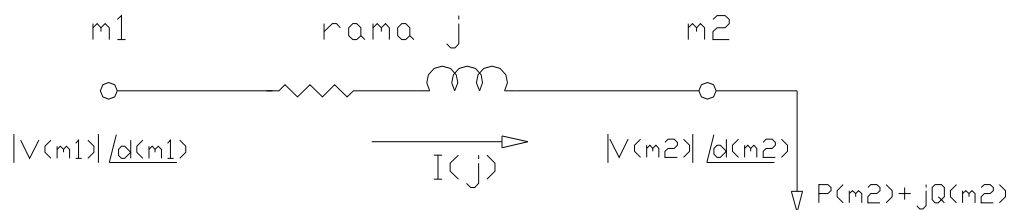


Fig. A.2.1. Representación del ramal j de una red de distribución. A partir del esquema adoptado en la Fig. A.2.1. se obtiene:

$$I(j) = \frac{V(m1)\angle\delta(m1) - V(m2)\angle\delta(m2)}{Z(j)} \quad (\text{a.17})$$

$$P(m2) + jQ(m2) = V(m2) \cdot I^*(j) \quad (\text{a.18})$$

donde, $Z(j)$ impedancia de la sección j ($R(j) + jX(j)$)

$m1$ nodo de envío.

$m2$ nodo de recepción.

$P(m2)$ suma de la carga de potencia activa en todos los nodos detrás del nodo $m2$ incluyendo $m2$ y las pérdidas de potencia activa en todas las secciones detrás del nodo $m2$.

$Q(m2)$ igual a $P(m2)$ en potencia reactiva.

De las ecuaciones a.17 y a.18 se obtiene:

$$|V(m2)| = \sqrt{B(j) - A(j)} \quad (\text{a.19})$$

$$A(j) = P(m2) \cdot R(j) + Q(m2) \cdot X(j) - 0.5|V(m1)|^2 \quad (\text{a.20})$$

$$B(j) = \sqrt{A^2(j) - \{Z^2(j) \cdot [P^2(m2) + Q^2(m2)]\}} \quad (\text{a.21})$$

$$\delta(m2) = \delta(m1) - \cos^{-1} \left(\frac{R(j)P(m2) + X(j)Q(m2)}{|V(m1)||V(m2)|} + \frac{|V(m2)|}{|V(m1)|} \right) \quad (\text{a.22})$$

Para la determinación de pérdidas y partiendo de las ecuaciones anteriores se escogen las siguientes relaciones:

$$P_{per}(j) = R(j) \cdot \frac{P^2(m2) + Q^2(m2)}{|V(m2)|^2} \quad (\text{a.23})$$

$$Q_{per}(j) = X(j) \cdot \frac{P^2(m2) + Q^2(m2)}{|V(m2)|^2} \quad (a.24)$$

El método utilizado en [1] para la solución del flujo y utilizado en el trabajo presente es resumido a continuación:

- Leer los datos de la red (potencia activa y reactiva, parámetros de la red, voltaje a la salida de subestación, etc.)
- Asumir voltajes iniciales (1.0 pu) para todos los nodos y pérdidas despreciables.
*El ítem anterior se sometió a un cambio asumiendo los voltajes iniciales y las pérdidas iguales al flujo del individuo anterior, obteniendo una reducción del número de iteraciones y reduciendo el tiempo de búsqueda.
- Calcular el equivalente $P(m2)$ y $Q(m2)$ para cada nodo. Esta iteración se la realiza hacia arriba, desde los nodos terminales a la subestación.
- Comenzando desde el nodo de salida (subestación) y usando (a.19), determinar los voltajes de recepción. Esta iteración es hacia abajo.
- Con los nuevos voltajes se calcula las pérdidas.
- Se comprueba si el criterio de convergencia es satisfecho si no se cumple se repite el algoritmo a partir del equivalente.

ANEXO 3

ALGORITMOS GENÉTICOS

A continuación se presenta un resumen donde se describen los conceptos y procesos principales de un algoritmo genético simple.

Representación

Para representar las posibles soluciones de un problema se lo realiza mediante una o varias cadenas binarias de bits, esta cadena se la denomina *string* o *estructura* o también *cromosoma*, la representación no necesariamente se la puede realizar en binario, pero es la representación más tradicional.

El *cromosoma* que es una cadena de bits, dentro de la cual cada unidad de bit es denominada como *gen*, la posición de este *gen* dentro del *cromosoma* toma el nombre de *loci*, y a su valor se lo llama *alelo*.

Para definir la estructura del *cromosoma* se utiliza el término *genotipo*, y su correspondiente reflejo externo o decodificación se la llama *fenotipo*.

Población inicial

Para generar una población inicial es simple, ya que a partir de la estructura de un *cromosoma* se crea un número de individuos determinado donde a cada *gen* se le asigna un valor aleatorio 0 o 1, o a su vez un número entero.

Generalmente se escoge un número de individuos que cubra el espacio de búsqueda, pero sin exceder su número porque incrementa el tiempo del ciclo del algoritmo.

Función de evaluación

La función de evaluación consiste en evaluar el fenotipo dentro de la función objetivo del problema que se esté resolviendo, así estas dos funciones están relacionadas y hacen que la función objetivo juegue un papel muy importante dentro del ciclo de búsqueda de los AG.

El valor de la función de evaluación la podemos representar de la siguiente manera:

$$f_i = f(x_i)$$

donde, $f(x_i)$ evalúa el fenotipo x_i del *cromosoma* ci

La función objetivo debe reflejar el valor de cada fenotipo, lo cual puede conducir a que ciertos individuos produzcan soluciones fuera de los parámetros o restricciones establecidas, esto se puede solventar ya sea eliminando al individuo, dándole un valor nulo a la función objetivo o penalizando la misma.

Selección

La selección determina el número de veces que un individuo en particular de la población es escogido para la reproducción, este mecanismo se lo puede explicar en dos fases [1]:

2. La asignación de la probabilidad a cada individuo de reproducirse
3. La selección de los individuos de acuerdo a sus probabilidades.

Función de adaptabilidad

La función de adaptabilidad asigna un valor a cada individuo de manera que represente su desempeño y oportunidades de selección. La forma más común de obtener el valor de adaptabilidad es asignando a cada *cromosoma* la siguiente probabilidad.

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^{N_{ind}} f_i} \quad (3.22)$$

donde, N_{ind} es el número de individuos de la población [14]

Utilizando el método conocido como ranking lineal la probabilidad de selección de un individuo se la obtiene así [14]:

$$p_i = (A_{max} - (A_{max} - A_{min}) \cdot \frac{rank(ci) - 1}{N_{ind} - 1}) \cdot \frac{1}{N_{ind}} \quad (3.23)$$

donde, $rank(ci)$ es la posición en la lista ordenada (del mejor al peor individuo)

del *cromosoma* ci

A_{max}, A_{min} coeficientes que representan el valor esperado de descendientes del peor y mejor *cromosoma* de la población respectivamente ($1 \leq A_{max} \leq 2$, $A_{min} = A_{max} - 1$, $A_{max} = 1,2$ recomendado).

El método de ranking lineal es utilizado cuando las funciones objetivo lanzan valores negativos, la característica de este método es que toman en cuenta únicamente la posición en el ranking de los individuos.

Selección de individuos

La selección de individuos se las puede realizar a través de tres técnicas, el muestreo estocástico con remplazamiento, el muestreo estocástico universal o la selección por torneo.

Para el muestreo estocástico con reemplazo (Monte Carlo roulette Wheel selection por De Jong [16]) se siguen los siguientes pasos según [14]:

- Ordenar los individuos dependiendo de su valor de adaptabilidad.
- Calcular la probabilidad acumulada de cada *cromosoma*

$$qi = \sum_{i=1}^{Nind} pi$$

- Repetir dependiendo del número de individuos a seleccionarse:
 - Generar un numero aleatorio r de 0 a 1
 - Si $r \leq q1$ entonces se escoge el primer *cromosoma* caso contrario ($q_{i-1} < r \leq qi$) se escoge el i -ésimo *cromosoma*

Este proceso se lo puede representar en forma de una ruleta donde a cada individuo se le asigna su valor de probabilidad de selección en donde se escogen el número requerido de individuos para producir la siguiente generación.

Para el muestreo estocástico universal se siguen los siguientes pasos, en donde la formulación se la realiza para semejar el esquema de [14]:

- Ordenar los individuos dependiendo de su valor de adaptabilidad.
- Calcular la probabilidad acumulada de cada *cromosoma*

$$qi = \sum_{i=1}^{Nind} pi$$

- Generar un numero aleatorio r de 0 a 1
- Obtener la distancia entre marcas dependiendo del número requerido de individuos a ser seleccionados ($Nireq$) $1/Nireq$
- Si $r \leq q1$ entonces se escoge el primer *cromosoma* caso contrario

($q_{i-1} < r + k \cdot \frac{1}{Nireq} \leq qi$, donde $k = 0,1,2,\dots,Nireq-1$) se escoge el i -ésimo

cromosoma.

El modelo de selección por torneo propuesto por Wetzel, se seleccionan un numero de individuos (tamaño del torneo) y se compara entre si, en donde el

ganador es seleccionado, así hasta llenar el numero requerido, aunque es un estrategia simple, es muy poderosa y por esta razón se la usa en muchas aplicaciones prácticas. [16]

Operadores Genéticos

Cruce-crossover

El paso previo al cruce o crossover es el emparejamiento aleatorio de los individuos seleccionados y con una probabilidad fija el cruce ocurre o no, en caso de ocurrir se producen dos descendientes y se continua a la etapa de mutación, si no ocurre ambos *cromosomas* pasan a la etapa de mutación. [11]

Para el crossover simple, se selecciona una pareja de *cromosomas* y se los divide en un punto de cruce seleccionado aleatoriamente, consecuentemente un par de nuevos genotipos es creado intercambiando sus genes como se ilustra en la Fig. A.3.1.

Generalizando la técnica descrita anteriormente, para n puntos de corte, es llamada técnica crossover de multipunto, donde se generan individuos de la misma longitud pero con un intercambio genético [16].

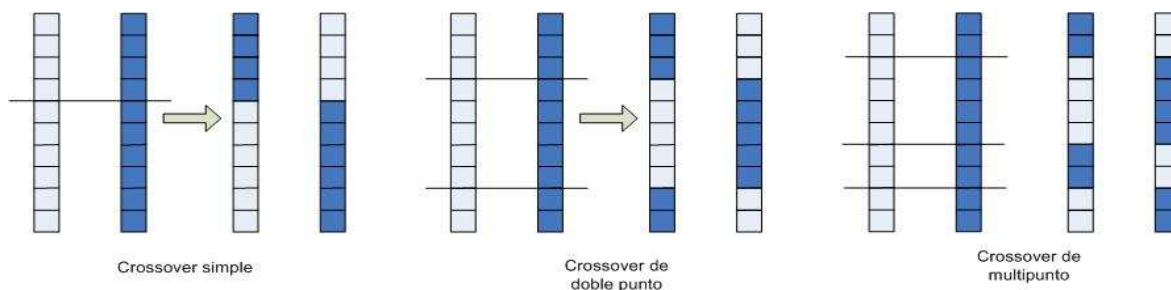


Fig A.3.1. Operadores de cruce o crossover

Mutación

La mutación es un método importante para preservar la diversidad dentro de la población de posibles soluciones, introduciendo pequeños cambios aleatorios dentro de la misma. La mutación consiste en cambiar el valor (alelo) de un gen con una probabilidad de cambio muy pequeña (0.001 a 0.05 según [1])

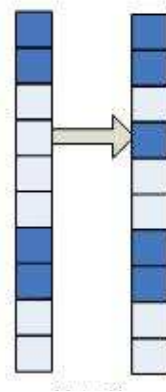


Fig. A.3.2 Mutación

Sustitución generacional

Después que se ha producido la siguiente generación, se ha propuesto las siguientes estrategias para remplazar a la generación anterior [1]:

Remplazamiento generacional, donde la población actual es totalmente sustituida por sus hijos, este mecanismo podría provocar que los mejores *cromosomas* se pierdan.

Tendencia elitista, donde los mejores *cromosomas* son copiados en la siguiente generación.

Remplazamiento con limitación de descendientes, donde se generan menor número de descendientes y estos remplazan a los peores individuos.

ANEXO 4
DATOS DE LOS CASOS DE ESTUDIOS
Problema 9 barras

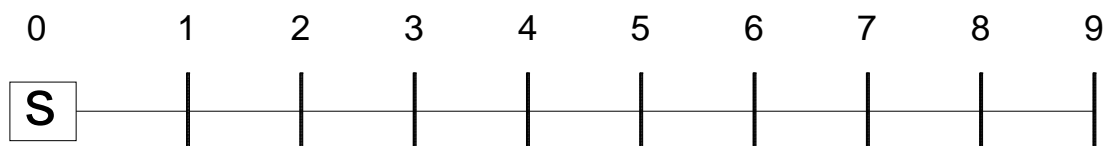


Fig. A.4.1. Sistema 9 barras

Nodo e	Nodo r	R (Ohm)	X (Ohm)
0	1	0,1233	0,4127
1	2	0,0140	0,6051
2	3	0,7463	1,2050
3	4	0,6984	0,6084
4	5	1,9831	1,7276
5	6	0,9053	0,7886
6	7	2,0552	1,1640
7	8	4,7953	2,7160
8	9	5,3434	3,0264

Tabla A.4.1. Topología sistema 9 barras, parámetros para cada sección del alimentador.

P (kW)			Q (kVAr)			P (kW)			Q (kVAr)		
Nivel de carga						Nivel de carga					
0.6	0.8	1.0	0.6	0.8	1.0	0.3	0.6	1.1	0.3	0.6	1.1
1104	1472	1840	276	368	460	552	1104	2024	138	276	506
588	784	980	204	272	340	294	588	1078	102	204	374
1074	1432	1790	264	352	440	537	1074	1969	135	270	495
958,8	1278,4	1598	1104	1472	1840	477	954	1749	552	1104	2024
966	1288	1610	360	480	600	483	966	1771	180	360	660
468	624	780	66	88	110	234	468	858	33	66	121
690	920	1150	36	48	60	345	690	1265	18	36	66
588	784	980	78	104	130	294	588	1078	39	78	143
984	1312	1640	120	160	200	492	984	1804	60	120	220

Tabla A.4.2. Distribución de cargas para niveles de Demanda 0.6, 0.8, 1.0 y 0.3, 0.6, 1.1

Días de la Semana Sábado y Domingo						Días de la Semana Lunes a Viernes					
P (kW)			Q (kVAr)			P (kW)			Q (kVAr)		
Nivel de carga						Nivel de carga					
0.3	0.4	0.6	0.3	0.4	0.6	0.6	0.8	1.0	0.6	0.8	1.0
552	736	1104	138	184	276	1104	1472	1840	276	368	460
294	392	588	102	136	204	588	784	980	204	272	340
537	716	1074	132	176	264	1074	1432	1790	264	352	440
479,4	639,2	958,8	552	736	1104	958,8	1278,4	1598	1104	1472	1840
483	644	966	180	240	360	966	1288	1610	360	480	600
234	312	468	33	44	66	468	624	780	66	88	110
345	460	690	18	24	36	690	920	1150	36	48	60
294	392	588	39	52	78	588	784	980	78	104	130
492	656	984	60	80	120	984	1312	1640	120	160	200

Tabla A.4.3. Distribución de cargas para niveles de Demanda 0.3, 0.4 ,0.6, 0.6, 0.8 y 1.0,

Problema 30 barras

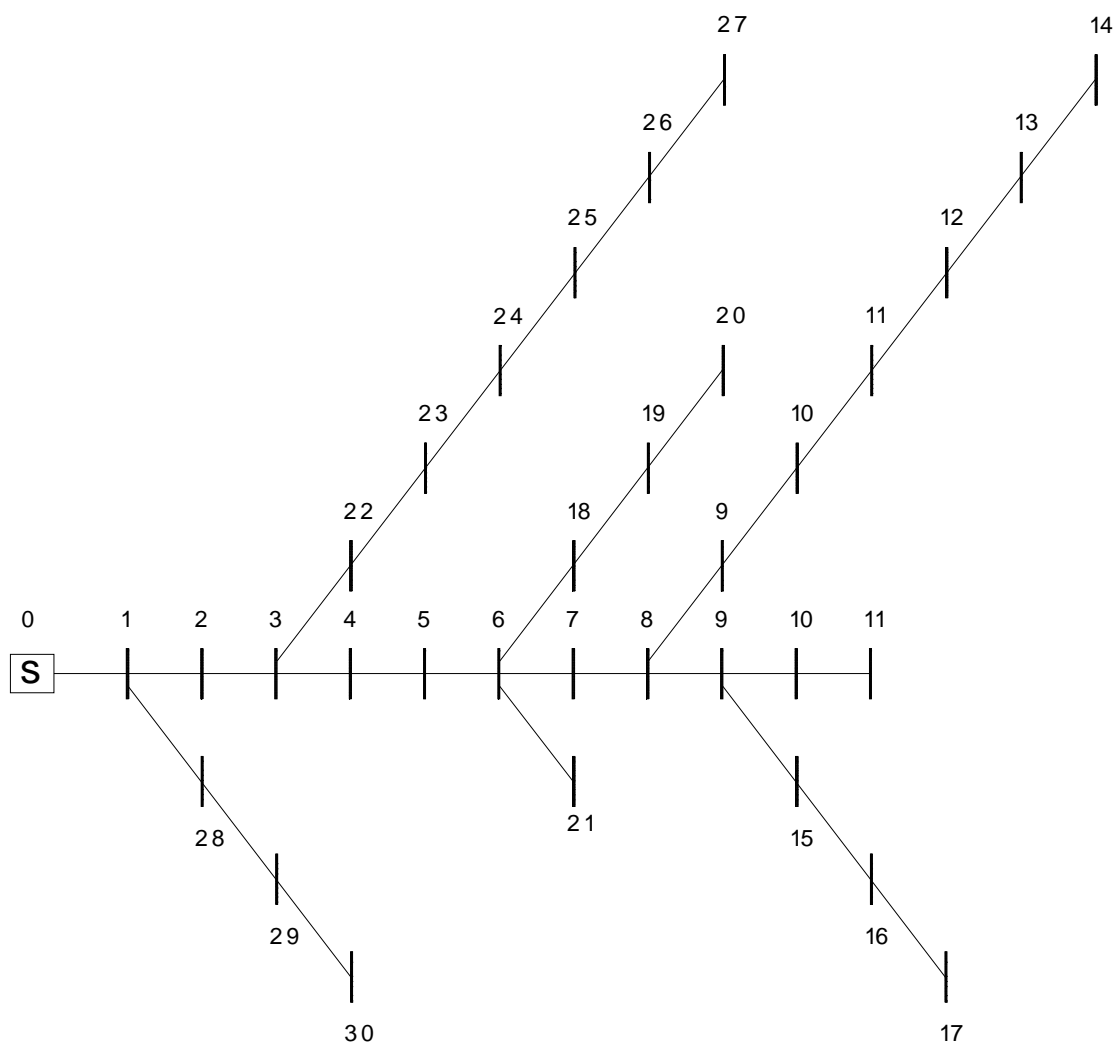


Fig. A.4.2. Sistema 30 barras

Nodo e	Nodo r	R (Ohm)	X (Ohm)	P (kW)			Q (kVAr)		
				Nivel de carga					
				0.6	0.8	1.0	0.6	0.8	1.0
0	1	0,5096	1,703	0	0	0	0	0	0
1	2	0,2191	0,0118	313,2	417,6	522	104,4	139,2	174
2	3	0,3485	0,3446	0	0	0	0	0	0
3	4	1,175	1,0214	561,6	748,8	936	187,2	249,6	312
4	5	0,553	0,4806	0	0	0	0	0	0
5	6	1,6625	0,9365	0	0	0	0	0	0
6	7	1,3505	0,7608	0	0	0	0	0	0
7	8	1,3506	0,7608	0	0	0	0	0	0
8	9	1,3259	0,7469	113,4	151,2	189	37,8	50,4	63
9	10	1,3259	0,7469	0	0	0	0	0	0
10	11	3,9709	2,2369	201,6	268,8	336	67,2	89,6	112
11	12	1,8549	1,0449	394,2	525,6	657	131,4	175,2	219
12	13	0,7557	0,4257	469,8	626,4	783	156,6	208,8	261
13	14	1,5389	0,8669	437,4	583,2	729	145,8	194,4	243
8	15	0,4752	0,4131	286,2	381,6	477	95,4	127,2	159
15	16	0,7282	0,4102	329,4	439,2	549	109,8	146,4	183
16	17	1,3053	0,7353	286,2	381,6	477	95,4	127,2	159
6	18	0,4838	0,4206	259,2	345,6	432	86,4	115,2	144
18	19	1,5898	1,3818	403,2	537,6	672	134,4	179,2	224
19	20	1,5389	0,8669	297	396	495	99	132	165
6	21	0,6048	0,5257	124,2	165,6	207	41,4	55,2	69
3	22	0,5639	0,5575	313,2	417,6	522	104,4	139,2	174
22	23	0,3432	0,3393	1150,2	1533,6	1917	383,4	511,2	639
23	24	0,5728	0,4979	0	0	0	0	0	0
24	25	1,4602	1,2692	669,6	892,8	1116	223,2	297,6	372
25	26	1,0627	0,9237	329,4	439,2	549	109,8	146,4	183
26	27	1,1514	0,8514	475,2	633,6	792	158,4	211,2	264
1	28	0,4659	0,0251	529,2	705,6	882	176,4	235,2	294
28	29	1,6351	0,9211	529,2	705,6	882	176,4	235,2	294
29	30	1,1143	0,6277	529,2	705,6	882	176,4	235,2	294

Tabla A.4.4. Distribución de cargas para niveles de Demanda 0.6, 0.8 y 1.0

Problema 33 barras

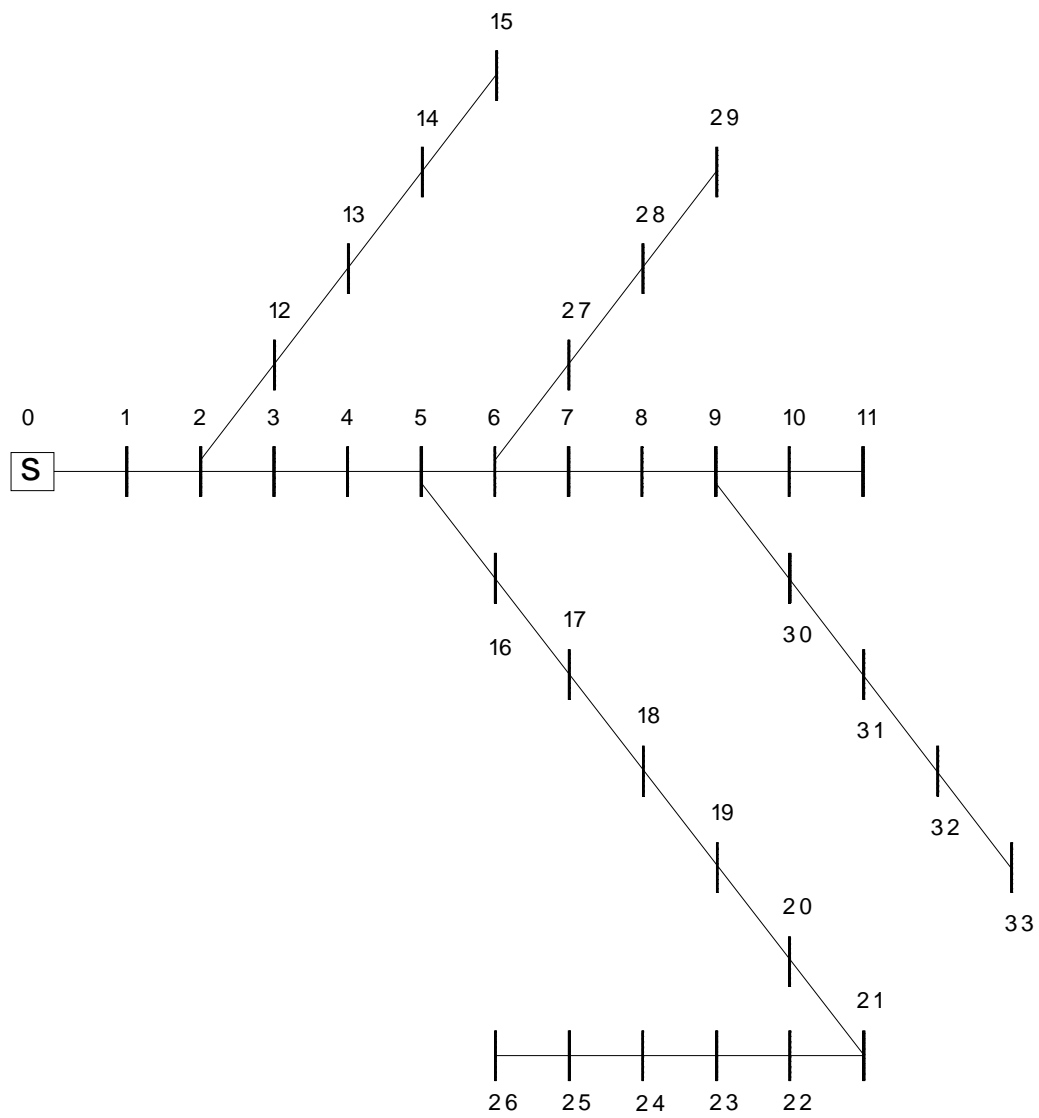


Fig. A.4.3. Sistema 33 barras

Nodo e	Nodo r	R (Ohm)	X (Ohm)	P (kW)			Q (kVAr)		
				Nivel de carga					
				0.6	0.8	1.0	0.6	0.8	1.0
0	1	0,117	0,048	138	184	230	85,5	114	142,5
1	2	0,1073	0,044	0	0	0	0	0	0
2	3	0,1645	0,0457	138	184	230	85,5	114	142,5
3	4	0,1495	0,0415	138	184	230	85,5	114	142,5
4	5	0,1495	0,0415	0	0	0	0	0	0
5	6	0,3144	0,054	0	0	0	0	0	0
6	7	0,2096	0,036	138	184	230	85,5	114	142,5
7	8	0,3144	0,054	138	184	230	85,5	114	142,5
8	9	0,2096	0,036	0	0	0	0	0	0
9	10	0,131	0,0225	138	184	230	85,5	114	142,5
10	11	0,1048	0,018	82,2	109,6	137	50,4	67,2	84
2	12	0,1572	0,027	43,2	57,6	72	27	36	45
12	13	0,2096	0,036	43,2	57,6	72	27	36	45
13	14	0,1048	0,018	43,2	57,6	72	27	36	45
14	15	0,0524	0,009	8,1	10,8	13,5	4,5	6	7,5
5	16	0,1794	0,0498	138	184	230	85,5	114	142,5
16	17	0,1645	0,0457	138	184	230	85,5	114	142,5
17	18	0,2079	0,0473	138	184	230	85,5	114	142,5
18	19	0,189	0,043	138	184	230	85,5	114	142,5
19	20	0,189	0,043	138	184	230	85,5	114	142,5
20	21	0,262	0,045	138	184	230	85,5	114	142,5
21	22	0,262	0,045	138	184	230	85,5	114	142,5
22	23	0,3144	0,054	138	184	230	85,5	114	142,5
23	24	0,2096	0,036	138	184	230	85,5	114	142,5
24	25	0,131	0,0225	138	184	230	85,5	114	142,5
25	26	0,1048	0,018	82,2	109,6	137	51	68	85
6	27	0,1572	0,027	45	60	75	28,8	38,4	48
27	28	0,1572	0,027	45	60	75	28,8	38,4	48
28	29	0,1572	0,027	45	60	75	28,8	38,4	48
9	30	0,1572	0,027	34,2	45,6	57	20,7	27,6	34,5
30	31	0,2096	0,036	34,2	45,6	57	20,7	27,6	34,5
31	32	0,1572	0,027	34,2	45,6	57	20,7	27,6	34,5
32	33	0,1048	0,018	34,2	45,6	57	20,7	27,6	34,5

Tabla A.4.5. Distribución de cargas para niveles de Demanda 0.6, 0.8 y 1.0

Problema 16C EEQSA

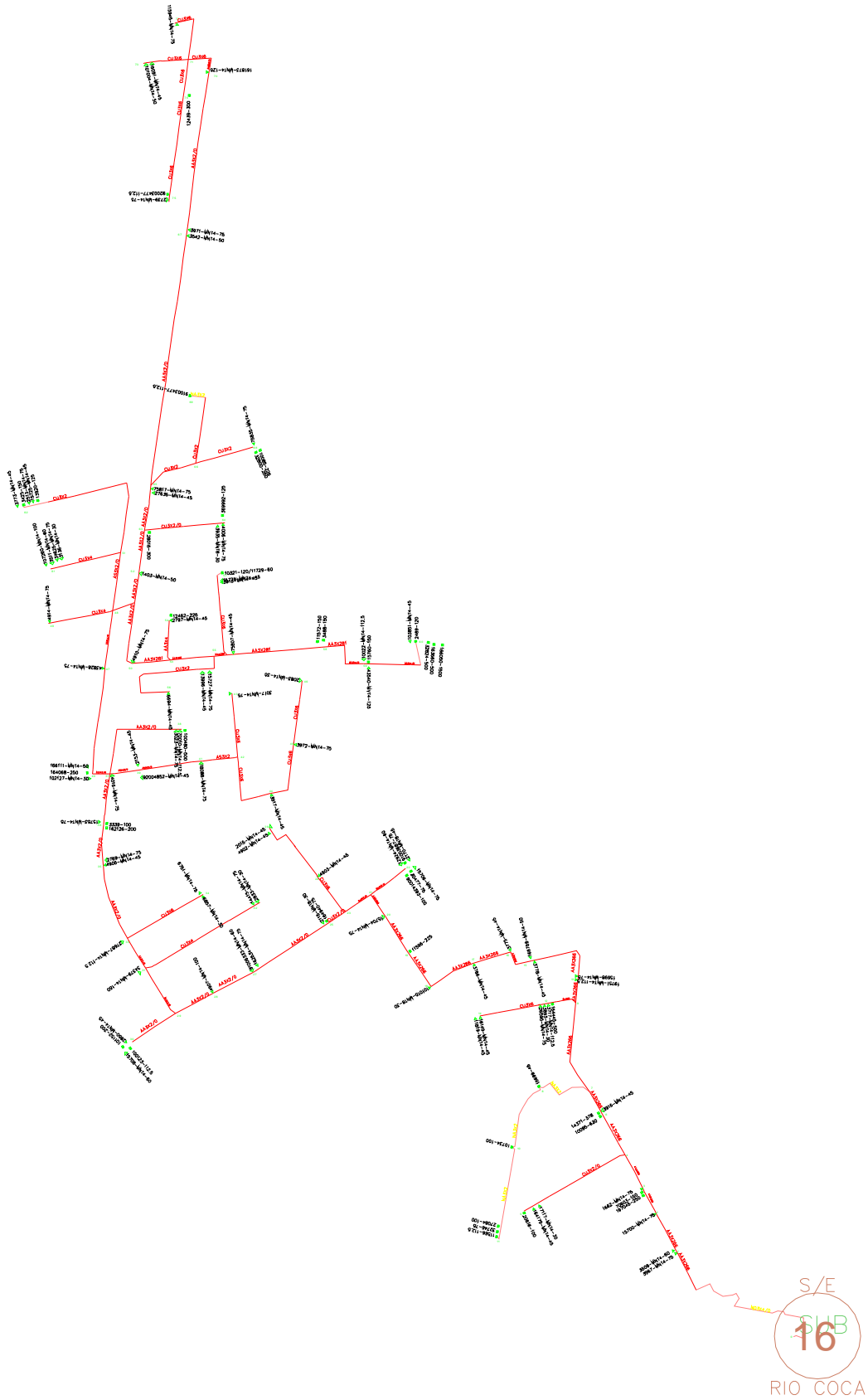


Fig. A.4.4. Sistema 16C EEQSA

Nodo e	Nodo r	R (Ohm)	X (Ohm)	P (kW)			Q (kVAr)		
				Nivel de carga					
				0.45	0.63	0.91	0.45	0.63	0.91
0	1	0,0509	0,1328	15,80	22,12	31,95	6,96	7,81	11,20
1	2	0,0105	0,0275	8,78	12,29	17,75	3,87	4,34	6,22
2	3	0,0063	0,0163	55,60	77,84	112,42	24,49	27,49	39,42
3	4	0,0095	0,0249	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	6	0,0115	0,0301	123,25	172,57	249,21	54,30	60,94	87,39
4	5	0,0353	0,0828	20,48	28,68	41,42	9,02	10,13	14,52
6	7	0,0055	0,0145	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	8	0,0373	0,0453	5,27	7,37	10,65	2,32	2,60	3,73
7	9	0,0236	0,0616	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	10	0,0433	0,0525	11,70	16,39	23,67	5,16	5,79	8,30
9	13	0,0058	0,0152	21,95	30,73	44,38	9,67	10,85	15,56
9	12	0,0581	0,0302	80,47	112,67	162,71	35,45	39,79	57,06
10	11	0,0586	0,0711	33,65	47,12	68,04	14,82	16,64	23,86
12	14	0,0942	0,0490	10,53	14,75	21,30	4,64	5,21	7,47
13	15	0,0179	0,0467	11,12	15,57	22,48	4,90	5,50	7,88
15	16	0,0075	0,0197	5,27	7,37	10,65	2,32	2,60	3,73
16	17	0,0097	0,0252	5,27	7,37	10,65	2,32	2,60	3,73
17	18	0,0121	0,0315	3,51	4,92	7,10	1,55	1,74	2,49
18	19	0,0111	0,0289	26,34	36,87	53,25	11,60	13,02	18,67
19	20	0,0098	0,0256	8,78	12,29	17,75	3,87	4,34	6,22
20	21	0,0064	0,0167	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21	23	0,0089	0,0208	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21	22	0,0129	0,0302	50,33	70,47	101,77	22,17	24,89	35,69
23	25	0,0063	0,0147	12,29	17,21	24,85	5,41	6,08	8,71
23	24	0,0695	0,0362	5,27	7,37	10,65	2,32	2,60	3,73
24	26	0,1188	0,0618	10,53	14,75	21,30	4,64	5,21	7,47
25	27	0,0270	0,0632	15,80	22,12	31,95	6,96	7,81	11,20
27	28	0,0136	0,0318	11,70	16,39	23,67	5,16	5,79	8,30
28	29	0,0129	0,0302	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
29	30	0,0157	0,0367	48,87	68,42	98,81	21,53	24,16	34,65
29	31	0,0167	0,0392	17,56	24,58	35,50	7,73	8,68	12,45
31	33	0,0101	0,0237	13,17	18,44	26,63	5,80	6,51	9,34
31	32	0,1310	0,1038	12,29	17,21	24,85	5,41	6,08	8,71
33	35	0,0235	0,0551	14,05	19,67	28,40	6,19	6,95	9,96
33	34	0,1320	0,0687	8,78	12,29	17,75	3,87	4,34	6,22
35	36	0,0200	0,0278	43,89	61,45	88,75	19,34	21,70	31,12
36	37	0,0264	0,0357	8,78	12,29	17,75	3,87	4,34	6,22
37	40	0,0091	0,0123	38,63	54,08	78,10	17,02	19,10	27,39
37	39	0,0144	0,0195	10,53	14,75	21,30	4,64	5,21	7,47
37	38	0,0516	0,0699	80,47	112,67	162,71	35,45	39,79	57,06
39	41	0,0322	0,0437	8,78	12,29	17,75	3,87	4,34	6,22

40	47	0,0533	0,0723	8,78	12,29	17,75	3,87	4,34	6,22
41	42	0,0175	0,0212	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
42	43	0,0977	0,0508	8,78	12,29	17,75	3,87	4,34	6,22
42	44	0,1144	0,0595	5,27	7,37	10,65	2,32	2,60	3,73
44	45	0,0968	0,0504	8,78	12,29	17,75	3,87	4,34	6,22
45	46	0,0942	0,0490	3,51	4,92	7,10	1,55	1,74	2,49
47	48	0,0290	0,0393	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
48	52	0,0272	0,0369	5,85	8,19	11,83	2,58	2,89	4,15
48	51	0,0302	0,0409	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
48	49	0,0594	0,0471	8,78	12,29	17,75	3,87	4,34	6,22
48	50	0,0454	0,0615	8,78	12,29	17,75	3,87	4,34	6,22
50	53	0,0076	0,0242	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
51	61	0,0699	0,0554	31,02	43,43	62,72	13,66	15,34	21,99
51	62	0,1075	0,1303	51,50	72,11	104,14	22,69	25,47	36,52
52	63	0,0132	0,0310	35,11	49,16	71,00	15,47	17,36	24,90
53	54	0,0355	0,0282	31,60	44,25	63,90	13,92	15,63	22,41
53	55	0,0086	0,0274	19,31	27,04	39,05	8,51	9,55	13,69
55	57	0,1179	0,0614	17,56	24,58	35,50	7,73	8,68	12,45
55	58	0,0185	0,0592	35,11	49,16	71,00	15,47	17,36	24,90
55	56	0,0785	0,0952	5,27	7,37	10,65	2,32	2,60	3,73
58	59	0,0190	0,0402	45,36	63,50	91,71	19,98	22,43	32,16
59	60	0,0240	0,0508	311,93	436,74	630,73	137,42	154,24	221,17
63	65	0,0139	0,0326	14,05	19,67	28,40	6,19	6,95	9,96
63	64	0,0237	0,0555	26,92	37,69	54,43	11,86	13,31	19,09
65	66	0,0318	0,0385	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
65	67	0,0769	0,1803	14,63	20,48	29,58	6,45	7,23	10,37
66	68	0,0363	0,0440	64,38	90,13	130,17	28,36	31,83	45,65
66	69	0,0419	0,0508	13,17	18,44	26,63	5,80	6,51	9,34
67	70	0,0491	0,1151	14,63	20,48	29,58	6,45	7,23	10,37
70	71	0,0572	0,0298	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
71	74	0,0581	0,0302	35,11	49,16	71,00	15,47	17,36	24,90
71	73	0,0660	0,0344	11,12	15,57	22,48	4,90	5,50	7,88
71	72	0,0898	0,0467	8,78	12,29	17,75	3,87	4,34	6,22
74	75	0,1602	0,0834	21,95	30,73	44,38	9,67	10,85	15,56

Tabla A.4.6. Distribución de cargas para niveles de Demanda 0.45, 0.63 y 0.91

ANEXO 5 GUÍA DE USO APLICACIÓN UBICAP_AG

Para utilizar la aplicación se deben seguir los siguientes pasos:

1. Ejecutar Matlab.
2. Cargar la carpeta del programa UBICAP en el directorio de Matlab (*Current Directory*).
3. En la ventana de comandos escribir UBICAP_AG

DESCRIPCIÓN: MENÚ PRINCIPAL



Cargar Sistema: Despliega la ventana que permite el ingreso de la información general, la topología y valores de demanda del sistema a ser analizado a partir de un archivo Excel.

Crear Sistema: Despliega la ventana que permite el ingreso de datos de la topología, la información general y demanda del sistema.

Algoritmos Genéticos: Despliega la ventana de la aplicación para la ubicación de capacitores utilizando el modelo del presente proyecto.

GA tool MATLAB: Despliega la ventana de la aplicación para la ubicación de capacitores utilizando los algoritmos genéticos propios de Matlab.

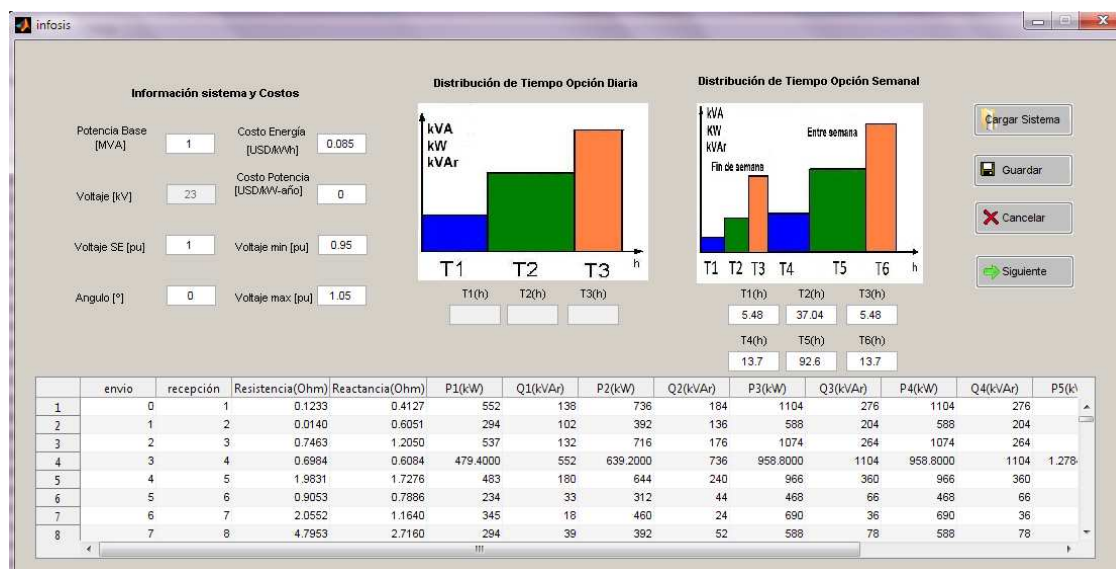
Personal: Despliega la ventana de la aplicación para la ubicación de capacitores utilizando un criterio personal.

Guía:

Se debe partir desde el ingreso de información del sistema ya sea cargando el sistema desde un archivo Excel o creando uno nuevo, las aplicaciones solo podrán ser utilizadas una vez que se ha cargado o creado un sistema. Se

recomienda que los datos sean coherentes, y que se tome en cuenta que la distribución de tiempos para cada nivel de demanda concuerde con los respectivos datos de la red.

DESCRIPCIÓN: CARGAR SISTEMA



Guía:

En esta ventana se permite visualizar los datos del sistema a ser analizado, el mismo que se lo carga desde un archivo de Excel. Los valores de información del sistema y costos al igual que la distribución de tiempo pueden ser modificados.

Distribución de tiempo opción Diaria: Se puede ingresar el tiempo de duración en horas para el análisis Diario (distribución 24 horas).

Distribución de tiempo opción Semanal: Se puede ingresar el tiempo de duración en horas para el análisis Semanal (distribución 168 horas).

* Se recomienda que los tiempos tengan concordancia con los datos de demanda de la red.

Los valores deben ser coherentes, cualquier error aquí se verá reflejado en los resultados de la aplicación, una vez cargada toda la información y modificada si es del caso se la puede Guardar o presionando el botón Siguiente se continua utilizando la aplicación.

DESCRIPCIÓN: CREAR SISTEMA

The screenshot shows the 'crearsis' window with the following fields and controls:

- Nodo de envío: 1
- Resistencia (Ohm): 0.23
- Nodo de recepción: 2
- Reactancia (Ohm): 0.35
- Table with columns: Nervio, Nrecep, Resistencia, Reactancia. Row 0: 0, 1, 0.356, 0.456. Row 1: 1, 2, 0.23, 0.35.
- Buttons: Agregar, Modificar, Selección (Análisis Diario selected, Análisis Semanal), Valores Demanda (Ingreso), Valores Niveles de Demanda (Ingreso), Principal, Cancelar.

Agregar: Sube la información, nodo de envío, nodo de recepción, resistencia y reactancia en Ohm.

Modificar: Modifica el tramo seleccionado y permite corregirlo.

Selección: Se selecciona el tipo de análisis, para determinar si se consideran 3 o 6 niveles de Demanda.

Valores de Demanda: Ingreso de la información de demanda de acuerdo a valores por segmento.

Se despliega la siguiente pantalla que permite ingresar la información general del sistema y los valores de P y Q por segmento de curva y por tramo, si se desea modificar cualquier error únicamente con las flechas se corrige la información, es importante que se agreguen los valores en secuencia y agregar con valores de 0 (cero) en la rama que no tenga carga.

The screenshot shows the 'pvariables3div' window with the following sections and controls:

- Información sistema y Costos:**
 - Potencia Base [MVA]: 1
 - Costo Energía [USD/MWh]: 0.085
 - Voltaje [kV]: 23
 - Costo Potencia [USD/MWh-año]: 180
 - Voltaje SE [pu]: 1
 - Voltaje min [pu]: 0.95
 - Angulo [°]: 0
 - Voltaje max [pu]: 1.05
- Distribución de Tiempo Análisis Diario:**
 - T1(h): 11
 - T2(h): 9
 - T3(h): 4
- rama:**
 - nodo envio: 0
 - nodo recep: 1
 - Resistencia(Ohm): 0.356
 - Reactancia(Ohm): 0.456
 - Segmento Curva Demanda: 2
 - n div: n div
- Table for Demand by Segment:**
 - P1 Q1: 100 200
 - P2 Q2: 100 200
 - P3 Q3: (empty)
- Buttons:** Siguiete, Seguiete, Agregar, Cancelar, Plegresar, Guardar.

Valores de niveles de Demanda: Ingreso de la información de la demanda discretizada de acuerdo a niveles.

Se despliega la siguiente pantalla que permite ingresar la información general del sistema y los valores de P y Q los mismos que se discretizan de acuerdo a los niveles seleccionados.

The screenshot shows the 'pvariablesndiv' window with the following data:

Información sistema y Costos		Rama	nodo envio	nodo recep	P [kW]
Potencia Base [MVA]	1	0	0	1	100
Costo Energía [USD/kWh]	0.085	1	0.678	0.678	200
Voltaje [kV]	23	200			
Voltaje SE [pu]	1				
Angulo [°]	0				
Distribución de Tiempo Opción Semanal					
T1(h)	40				
T2(h)	40				
T3(h)	40				
T4(h)	16				
T5(h)	16				
T6(h)	16				

Additional parameters shown in the interface:

- Costo Potencia [USD/kWh-año]: 200
- Voltaje min [pu]: 0.95
- Voltaje max [pu]: 1.05
- Niveles Demanda: 6
- Resistencia(Ohm): 0.678
- Reactancia(Ohm): 0.678
- G [kVAR]: 200
- Ingreso de Valores Discretos de Demanda:

nivel 1	1	nivel 4	0.4
nivel 2	0.8	nivel 5	0.3
nivel 3	0.6	nivel 6	0.2

Guía:

Una vez ingresado los valores de P y Q para cada segmento se procede a Guardar esta información en un archivo Excel, es importante que se ingresen todos los valores y agregar valores de 0 (cero) en la rama que no tenga carga.

DESCRIPCIÓN: APLICACIÓN GA tool MATLAB

Una vez ingresada la información del sistema, la ventana gráfica que utiliza los algoritmos genéticos de Matlab para es la siguiente:

The screenshot shows the 'gamatlab' window with the following configuration:

Opciones de Algoritmos Genéticos	Tamaño Bancos de Capacitores	Costo Capacitores	Anualización de costos
Tamaño de la Población: 100	Tamaño Mínimo: 150, Número de tamaños: 10	Costo Unitario Capacitor Fijo: 0.5 USD/kVar-año	Tasa descuento %: 12, Numero años: 15
Generaciones: 100		Costo Unitario Capacitor Conectable: 0.75 USD/kVar-año	
Probabilidad de cruce %: 80		Costo Base: 600 USD/año	
Probabilidad de mutación %: 1			
<input type="checkbox"/> Penalización de la función Objetivo			

Additional features: 'Ubicar' and 'Reporte' buttons, a 3D model of a power transformer, and 'Regresar' and 'Salir' buttons.

En esta aplicación se deben ingresar la siguiente información:

Tamaño de la población, generaciones, probabilidad de cruce y mutación y la penalización o no de la función objetivo. La información de costos de los

capacitores, considera un costo anual unitario por kVAr para bancos fijos y conectables y además de un costo base por banco.

Para la valoración económica se ingresa los datos del número de años y la tasa de descuento.

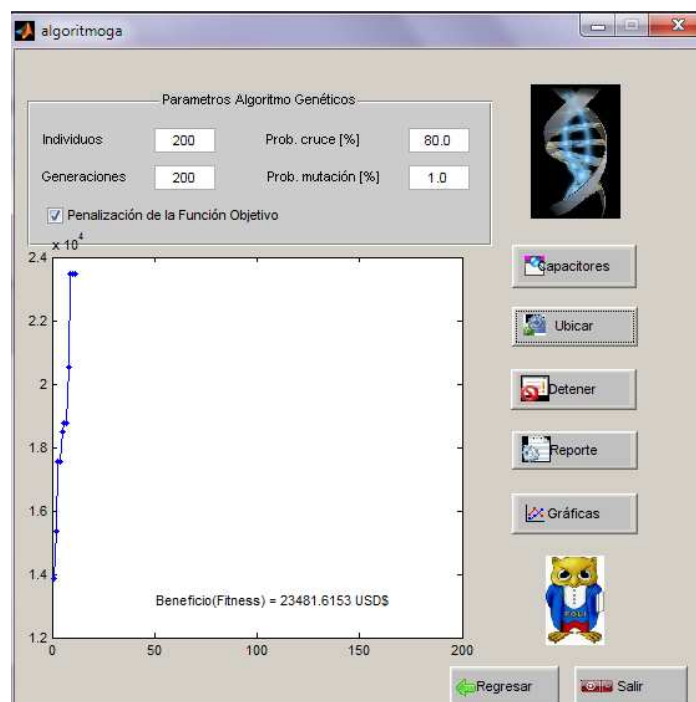
Los tamaños serán múltiplos de la unidad mínima en el número que se especifique.

Guía:

Esta aplicación trabaja con las opciones de algoritmos genéticos propios de Matlab y permite generar un reporte de los resultados, se despliega la grafica *fitness value* en función del número de generaciones, si se desea modificar las opciones se puede realizar los cambios respectivos en los ficheros agmatlab3div y agmatlab6div.

DESCRIPCIÓN: APLICACIÓN DE ALGORITMOS GENÉTICOS

Una vez ingresada la información del sistema, la ventana grafica que utiliza los algoritmos genéticos es la siguiente:



En esta aplicación se deben ingresar la siguiente información:

Tamaño de la población, generaciones, probabilidad de cruce y mutación y la opción de penalización o no de la función objetivo.

Capacitores: Esta opción despliega la siguiente ventana:

The screenshot shows the 'costocapacitores' software interface. It is divided into several sections for data entry:

- Tamaños Tipo:** Radio buttons for 'Definidos' and 'Existencias'.
- Costos Tipo:** Radio buttons for 'Costos de Inversión' and 'Aproximación lineal'.
- Capacidades Bancos:** A table with columns for size and capacity.

Tamaño	[kVAr]
Tamaño 1	300
Tamaño 2	450
Tamaño 3	600
Tamaño 4	900
Tamaño 5	1200
Existencias	
Tamaño	450
Número	2
- Costos de Inversión USD:** A table with columns for 'Fijo' and 'Conectable'.

	Fijo	Conectable
Tamaño 1	4200	6600
Tamaño 2	4400	6800
Tamaño 3	4600	7000
Tamaño 4	5000	7400
Tamaño 5	5400	7800
Costo Existencias	4400	6800
- Esquema Costos:** Fields for 'Costos en % de la Inversión' including '% Ope. y mant' (2), '% retiro' (3), '% reposición' (30), and 'Periodo Reposición años' (5).
- Aproximación de Costos:** Fields for 'Años Análisis' (15) and 'Tasa descuento %' (12).
- Costo Adicional:** Field for 'Costo switcheo' (0.00).
- Aproximación Lineal:** Fields for 'Fijo Costo Unitario USD/kVAr anual' (10), 'Conectable Costo Unitario USD/kVAr anual' (15), and 'Costo Fijo USD/año' (400).

A 'Siguiente' button is located at the bottom left, and a small image of capacitor banks is shown in the middle left.

En esta ventana se ingresa la información de tamaños de bancos a ser considerados y el costo de la inversión en bancos fijos y conectables, se consideran también los parámetros descritos en el análisis económico de costos de capacitores: % de Inversión en costos en operación y mantenimiento anual, % de inversión en costos para la reposición la misma que serán realizadas en cada período anual que se ha seleccionado, % de Inversión en costos de retiro.

Se puede además considerar un costo por switcheo el mismo que representa un costo adicional por el número de operaciones que registraría cada banco en un periodo anual, se encuentra en ventana de costo adicional.

Se puede trabajar también con bancos existentes, los mismos que serán de una capacidad determinada y costo determinado.

Guía:

Existen las siguientes opciones para trabajar:

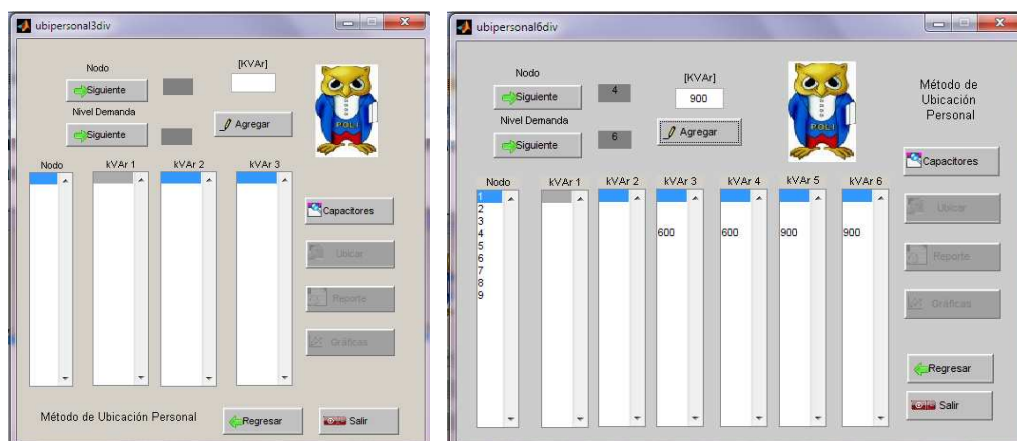
- Con tamaños y costos de inversión determinados, tanto fijos como conectables.
- Con tamaños determinados y una aproximación lineal por kVAr adicionando un costo base por banco.
- Con un número de existencias de tamaño fijo y costos ya sean determinados o utilizando la aproximación lineal.

Ubicar, detener y reporte: realizan las operaciones de trabajo normal de la aplicación.

Gráficas: presentan los resultados en gráficas del perfil de voltaje por segmento de Demanda y el historial del Beneficio a través de las generaciones.

DESCRIPCIÓN: APLICACIÓN PERSONAL

Una vez ingresada la información del sistema, y de acuerdo al análisis diario o semanal se despliega las siguientes ventanas:



En esta aplicación se ingresan los valores de compensación reactiva en cada nodo, dependiendo de un criterio personal.

Guía:

Se ingresan los valores en kVAr a ser instalado en cada nodo, no es necesario ingresar valor de 0 en donde no se considera una compensación, los costos de los bancos se los ingresa utilizando la aplicación **capacitores** que fue descrita anteriormente, una vez ingresada la información de los costos, se evalúa la solución, se obtiene los resultados los mismos que se los puede desplegar en un reporte y también se permite visualizar las gráficas del perfil de voltaje.