

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

ALGORITMO DE PROGRAMACIÓN DINÁMICA PARA CONEXIÓN/DESCONEXIÓN DIARIA DE COMPENSACIÓN CAPACITIVA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO

IÑIGUEZ FERNÁNDEZ DIEGO FELIPE

diego.iniguez@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. JUAN CARLOS PLAZARTE ACHIG, MSc.

juan.plazarte@celec.gob.ec

CODIRECTOR: DR. – ING. HUGO NEPTALÍ ARCOS MARTÍNEZ

hugoarcos@epn.edu.ec

Quito, enero 2019

AVAL

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Diego Felipe Iñiguez Fernández, bajo nuestra supervisión.

NOMBRE DIRECTOR

ING. JUAN CARLOS PLAZARTE ACHIG, MSc.

NOMBRE CODIRECTOR

DR. – ING. HUGO NEPTALÍ ARCOS MARTÍNEZ

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Diego Felipe Iñiguez Fernández, 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.

Diego Felipe Iñiguez Fernández

DEDICATORIA

Dedico este trabajo:

A mis padres, Bolívar y Patricia.

A mis hermanas Ligia y Paula.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres, por su apoyo incondicional, su motivación y enseñanzas brindadas a lo largo de este camino. Especialmente a mi madre Patricia Fernández por su confianza, sacrificio y dedicación en estos años de estudio, sin sus consejos y sus palabras de superación personal no hubiera logrado este gran peldaño en mi vida profesional.

Agradezco a mis hermanas, por su cariño y preocupación, han sido gran soporte en mi vida desde mi infancia.

Agradezco a mis tíos y abuelo, por su tiempo en todo este tiempo, por acogerme en su hogar y estar pendiente de mí.

Agradezco a mis amigos, por estos años de aventuras, de buena amistad, de locuras, por su paciencia y apoyo.

Agradezco a mi tutor, por su confianza y enseñanzas en el transcurso de la elaboración de este trabajo, facilitando el conocimiento necesario para su desarrollo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

AVAL	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	V
RESUMEN	VII
ABSTRACT	VIII
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos	2
1.2 Alcance.....	2
1.3 Marco teórico.....	3
1.3.1 Sistemas eléctricos de distribución	3
1.3.2 Pérdidas eléctricas en redes de distribución.....	5
1.3.2.1 Causas de las pérdidas eléctricas	6
1.3.3 Banco de Capacitores	6
1.3.3.1 Definición	6
1.3.3.2 Tipos de capacitores.....	7
1.3.3.3 Efectos de la conexión/desconexión de capacitores	8
1.3.4 Ubicación óptima de Capacitores.....	10
1.3.5 Métodos iterativos	10
1.3.6 Programación Dinámica	11
1.3.6.1 Método Recursivo	12
1.3.7 Flujos de Potencia	16
1.3.7.1 Método Forward-Backward para sistemas de distribución	17
2 METODOLOGÍA.....	23
2.1 Flujo de Potencia.....	23
2.1.1 Algoritmo del Flujo de Potencia	23
2.1.2 Diagrama de flujo del Flujo de Potencia	27
2.1.3 Desarrollo del algoritmo del flujo de potencia.....	28
2.2 Despacho óptimo de capacitores para conexión/desconexión diaria de compensación reactiva.....	36
2.2.1 Formulación del problema de Programación Dinámica.....	36
2.2.2 Solución recursiva	39

2.2.3	Algoritmo del despacho óptimo de capacitores	40
2.2.4	Diagrama de flujo del despacho óptimo de capacitores.....	42
2.2.5	Desarrollo del algoritmo del despacho óptimo de capacitores	43
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	53
3.1	Pruebas para el algoritmo de flujo de potencia	53
3.1.1	Sistema de prueba de 13 nodos.....	53
3.2	Pruebas para el algoritmo de flujo del despacho óptimo de capacitores	56
3.2.1	Sistema de prueba de 34 nodos.....	56
3.3	Aplicación del algoritmo del despacho óptimo de capacitores en el alimentador 01C de la EEQ.	59
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	63
5	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
6	ANEXOS	68
	ANEXO I	68
	ANEXO II	72
	ANEXO III	101

RESUMEN

El trabajo de titulación presenta el desarrollo de un algoritmo para el despacho óptimo de capacitores basado en programación dinámica para la reducción de pérdidas totales en sistemas de distribución. Para ello se incorpora un programa que resuelva el flujo de potencia en alimentadores de distribución (*FORWARD/BACKWARD*), introduciendo la proyección de demanda con 24 periodos del día. Se aplica el método de solución recursiva dentro de la programación dinámica donde se tiene la función objetivo: la reducción de pérdidas totales del sistema en análisis, y las restricciones de los límites de voltaje. El análisis efectuado sirve para determinar en qué periodo del día es recomendable tener conectados o desconectados los bancos de capacitores, con el fin que el operador realice esta maniobra.

En este proyecto se aborda conceptos básicos de la programación dinámica, flujos de potencia en sistemas de distribución y efectos que producen los bancos de capacitores en los alimentadores de distribución. La metodología abarca el modelo matemático del despacho óptimo de capacitores con su función objetivo y restricciones, además del método recursivo elaborado para su desarrollo. Se incorpora el programa a un sistema de prueba de la EEQ y se evalúa el impacto del método para la eficiencia del sistema en análisis. Los datos obtenidos se validan con el programa *CYMDIST*, verificando la reducción de la potencia de pérdidas totales del sistema.

PALABRAS CLAVE: programación dinámica, método recursivo, maniobra conexión/desconexión, periodos día, reducción de pérdidas.

ABSTRACT

This research presents a develop of an algorithm for the optimal dispatch of capacitors based on dynamic programming to reduce total loss in distribution systems. To reach that objective a program to solve power flow in distribution feeder (*FORWARD/BACKWARD*) is incorporated, which needs a demand projection of 24 periods per day. Recursive solution is the method of dynamic programming applied to solve an objective function: to reduce the system total loss using the voltage limits as restrictions. This research could be used to determine the period of the day where it is the best to keep capacitors connected or disconnected and give that instruction to the operator.

For this investigation basic concepts of dynamic programming, develop of power flow in distribution systems and capacitor effects over distribution feeders are considered. The methodology includes a mathematical model for capacitors optimal dispatch, an objective function and some restrictions additionally to the recursive method created. The program is applied at a proof system of EEQ to evaluate efficiency results thrown after the methodology application. The results are validated from *CYMDIST* software, verifying the reduction of total power loss in the system.

KEYWORDS: dynamic programming, recursive method, commutations on/off, periods of day reduction of total power loss.

1 INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica es un servicio primordial dentro del desarrollo de un país. Ecuador por medio de la Agencia de Regulación y Control (*ARCONEL*) garantiza la eficiencia, continuidad y calidad del servicio eléctrico, por ello se cuenta con la *REGULACION No CONELEC-004/01*, por lo que las empresas distribuidoras están en la obligación de cumplir con esta normativa [1]. El incremento de la demanda es cada vez mayor. Indicadores de empresas distribuidoras establecen que en el año 2000 la cobertura era del 89,10%, en el 2017 de 96,88% y el 2018 del 97,11% y proyectándose al 2021 con el 97,74%, todo se debe a que el gobierno tiene un Plan de Expansión del Sistema Eléctrico en el país.

En los Sistemas Eléctricos de Distribución cuando existe una elevada carga reactiva se presentan problemas de regulación de voltajes, limitaciones de la capacidad del sistema y aumento de pérdidas eléctricas [2]. Estas deficiencias operativas en Empresas Distribuidoras ocasionan mayores costos internos que repercute en la economía de las empresas.

Los capacitores al ser elementos compensadores son utilizados para minimizar pérdidas y aumentar los perfiles de voltaje [3]. Las empresas distribuidoras realizan el despacho de capacitores en horas de mayor demanda sin conocer si la operación efectuada es la óptima, además se ha determinado que la operación de bancos de capacitores, en la mayoría de los casos sobrepasan valores requeridos por el sistema en ese periodo del día, ocasionando gastos económicos innecesarios y problemas en la operación del sistema. Adicionalmente, al realizar las maniobras de conexión/desconexión del banco de capacitores se introducen perturbaciones a la red, teniendo inconvenientes en la operación del sistema.

La excesiva repetición de maniobras de conexión/desconexión de bancos de capacitores agudiza mucho más los problemas colaterales que ya se presentan en el sistema como son: aparición de armónicos, sobrevoltajes de tipo interno en el sistema, corriente inrush y efectos resonantes [4].

Los métodos convencionales para realizar el despacho de capacitores son efectuados de forma analítica utilizando consideraciones ideales de alimentadores y comportamiento aproximado de la carga [5]. La conexión/desconexión de capacitores se realiza en periodos fijos manteniendo altos/bajos voltajes en los alimentadores de los sistemas de distribución.

Los modelos matemáticos como la programación lineal entera y a través de ésta el algoritmo de branch and bound tiene una complejidad computacional del $O(n^2)$, es decir, mientras se incrementa el número de capacitores y número de periodos de análisis en el sistema eléctrico, las variables de decisión del programa aumentan ocasionando mayor tiempo de ejecución y mayor espacio de almacenamiento de variables. Por esta razón se utiliza los algoritmos de programación dinámica que tiene una complejidad computacional $O(\log(n))$ aproximadamente dependiendo el algoritmo particular utilizado, es decir, este método opera tomando decisiones en forma secuencial, disminuyendo tiempos de ejecución del programa y evitando que el almacenamiento se desborde [6].

La técnica de la Programación Dinámica tiene grandes ventajas, y una de ellas es la de ofrecer un diseño adecuado y eficiente a todos los problemas que puedan plantearse de forma recursiva y cumplan el principio del óptimo [7].

1.1 Objetivos

El objetivo general de este trabajo de titulación es:

- Implementar un algoritmo utilizando programación dinámica para el despacho óptimo de capacitores en alimentadores de sistemas de distribución en el marco de la planificación de corto plazo.

Los objetivos específicos son:

- Elaborar un modelo matemático de programación dinámica para el despacho óptimo de capacitores en alimentadores de distribución.
- Realizar en *MATLAB* un programa para resolver flujos de potencia en alimentadores de distribución.
- Realizar en *MATLAB* un programa que resuelva el despacho óptimo de capacitores
- Probar el algoritmo implementado mediante su aplicación en un alimentador perteneciente al sistema de distribución de la EEQ.

1.2 Alcance

El trabajo permitirá disponer de un modelo de optimización basado en programación dinámica para minimizar las pérdidas totales del sistema de distribución en análisis, sujeto

a restricciones de cumplimiento de límites de voltajes y a un número máximo de maniobras de conexión/desconexión.

Dentro del alcance del trabajo se considera el desarrollo de una herramienta de software en entorno *MATLAB* que permitirá resolver flujos de potencia al que se incorporará el algoritmo de optimización en base a programación dinámica. El modelo permitirá obtener el despacho de capacitores diario ya que considerará los 24 periodos del día basado en una curva de demanda del alimentador en el marco de la planificación de corto plazo o planificación diaria de los sistemas eléctricos de distribución.

Para la validación de la propuesta se tomará un ejemplo real correspondiente a un alimentador primario de la Empresa Eléctrica Quito (EEQ). Los resultados de la programación dinámica se validarán en el software *CYMDIST*, se verificará la reducción de pérdidas y se determinará y validará el perfil de voltaje. Adicionalmente, la aplicación incorporará un código de fácil entendimiento, corto en sus líneas de desarrollo y rápido en su ejecución.

1.3 Marco teórico

1.3.1 Sistemas eléctricos de distribución

Los sistemas de suministro de energía están diseñados para recolectar energía eléctrica producida en grandes centros de generación y transportarla a los puntos de carga final donde los clientes lo demanden [9].

Sistema de distribución primario

El primer componente del sistema de distribución primario es la subestación de distribución, donde se recibe la energía entregada por el sistema de transmisión y subtransmisión y se realiza una nueva reducción de voltaje. Desde la subestación de distribución, una o más líneas de distribución de voltaje medio (por ejemplo, 13.2 y 6.9 kV) llevan esta energía un paso más cerca de los clientes finales [12].

Subestaciones de distribución

La subestación de distribución recibe energía de una o más líneas de transmisión o subtransmisión al nivel de voltaje de transmisión o subtransmisión correspondiente y proporciona esa energía a uno o más alimentadores de distribución que se originan en la

subestación y comprenden la red primaria. La mayoría de los alimentadores salen radialmente de la subestación para suministrar la carga [13]. Subestaciones de distribución ubicadas en los centros de carga están para transformación del voltaje de transmisión y subtransmisión al voltaje primario, y a partir de las cuales se deriva las redes de distribución. Las redes de distribución en medio y bajo voltaje llegan al punto de alimentación de los diferentes tipos de consumidores como se ve en la Figura 1.1.

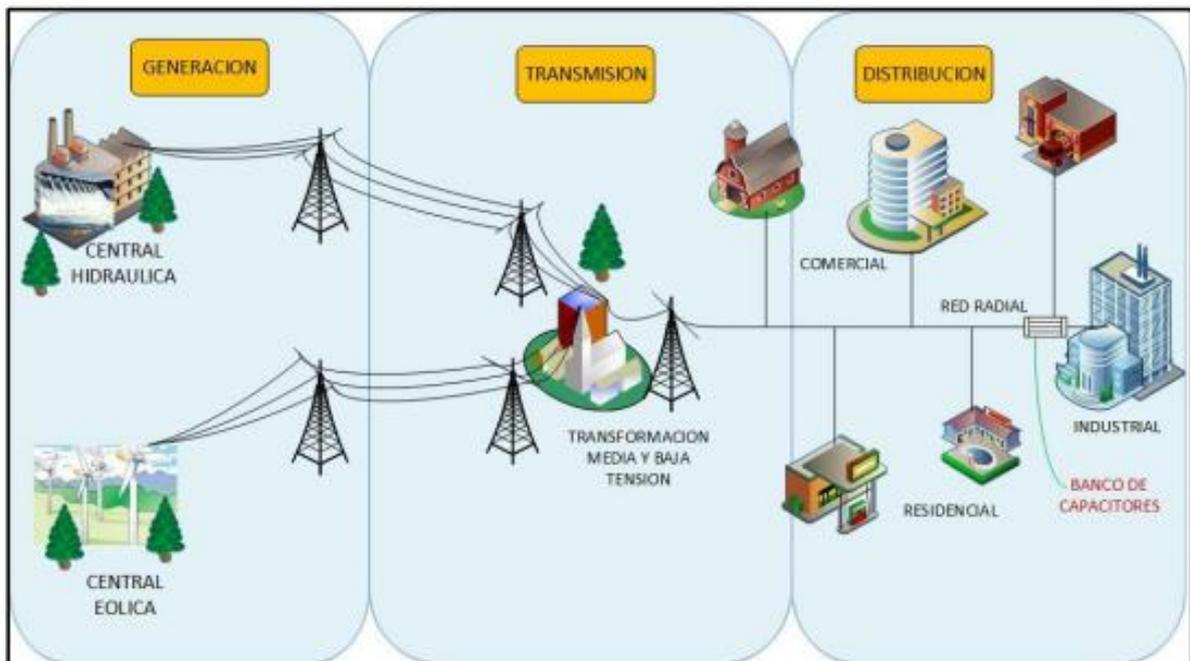


Figura 1.1. Diagrama del sistema de distribución de energía eléctrica

Fuente: [13]

En la ciudad de Quito, de forma particular, existen redes primarias a 6,3 kV entre fases a tres conductores y están, en general, asociadas con circuitos secundarios trifásicos; eventualmente, en áreas periféricas con cargas dispersas, se derivan ramales con dos conductores de fase a 6,3 kV, asociados con circuitos secundarios monofásicos. En este sentido, la normativa que propone la regularización de los procesos y los sistemas de diseño, por la Empresa Eléctrica Quito, vigente desde el año 92, plantea que:

Las redes primarias a 22,8 kV están conformadas con uno, dos o tres conductores de fase y un conductor de neutro continuo sólidamente puesto a tierra a partir del punto neutro de la Subestación de Distribución y común con los circuitos secundarios. Los circuitos secundarios asociados con la red primaria a este voltaje son predominantemente monofásicos a tres conductores y eventualmente trifásicos. Las redes primarias a 13,2 kV están conformadas con uno, dos o tres conductores de fase y un conductor de neutro continuo sólidamente puesto a tierra a partir del punto neutro de la Subestación de

Distribución y común con los circuitos secundarios. Los circuitos secundarios asociados con la red primaria a este voltaje son predominantemente monofásicos a tres conductores [14].

Distribución secundaria

Se denomina así a parte de la red Distribución que opera al voltaje secundario del sistema o voltaje de utilización [14]. Las ramificaciones de los alimentadores principales son laterales, también conocidos en la industria como ramales [17]. Los ramales pueden ser trifásicos, bifásicos (dos fases del alimentador trifásico con neutro) o monofásicos (una fase del alimentador monofásico y un neutro). Las redes secundarias pueden adoptar configuraciones monofásicas, bifásicas o trifásicas y se derivan a partir del secundario del transformador de distribución. A nivel nacional la longitud total de las redes secundarias alcanzan 87266 km distribuidas de la siguiente manera: 65360 km de red monofásica, 16907 km de red trifásica y 4997 km de red trifásica [16].

Regulación No. CONELEC 004/01

En la reglamentación 04/01 se establecen los índices de calidad y satisfacción de clientes, metodologías de medición y límites permitidos.

Límites

Las variaciones de voltajes permitidas con respecto al valor del voltaje nominal se señalan a continuación:

Tabla 1.1. Variaciones de voltaje por subetapa

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

Fuente: [14]

1.3.2 Pérdidas eléctricas en redes de distribución

Las pérdidas en los sistemas de distribución corresponden a la energía que no se entrega y factura a los clientes finales. Técnicamente, las pérdidas de energía pueden ser provocadas por el efecto Joule ($I^2 * R$) (presente en los conductores eléctricos), el

desequilibrio de cargas de cada alimentador y la presencia de corrientes armónicas que circulan por los conductores debido a la presencia de cargas no lineales dentro del sistema; así como también, la energía que se consume en los condensadores ubicados en puntos estratégicos del sistema para la compensación de reactivos (mejorar nivel de voltaje y factor de potencia) y la configuración particular que presenta cada uno de los sistemas de distribución por cada empresa eléctrica [16].

Por otra parte, el desaprovechamiento de energía causado por el consumo inadecuado e ilegal de energía eléctrica, presente en las conexiones directas sin medición o redes clandestinas, corresponde a las pérdidas consideradas como no técnicas.

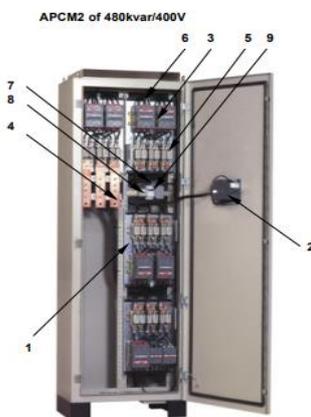
1.3.2.1 Causas de las pérdidas eléctricas

Las pérdidas de energía eléctrica son energía desperdiciada causada por factores externos o factores internos, y energía disipada en el sistema [18]. Incluyen las pérdidas debidas a la resistencia, las condiciones atmosféricas, el robo, errores de cálculo, etc., y las pérdidas incurridas entre las fuentes de suministro al centro de carga (o consumidores) [13]. La minimización y cuantificación de pérdidas es vital en todos los esfuerzos humanos y en el sistema de potencia, conduciendo a un funcionamiento más económico del sistema.

1.3.3 Banco de Capacitores

1.3.3.1 Definición

La definición de capacitor menciona a un sistema compuesto por dos conductores: materiales capaces de conducir la electricidad. En el caso de los capacitores, los conductores se encuentran separados entre sí por una lámina que se utiliza para el almacenamiento de las cargas eléctricas [20].



- Capacitor LVCP
- Controlador RVC
- Contacto tipo UA
- Cables de conexión de poder
- Fusibles HRC
- Ventilador
- Circuito de control de fusibles
- Actual conexión de transformador
- Suministro de ventilador

Figura 1.2. Capacitor para 480 kVAR/400V
Fuente: [11]

Los bancos de capacitores en derivación se implementan en redes de distribución para minimizar las pérdidas de potencia activa, mejorar los niveles de voltaje, compensar los reactivos y elevar el factor de potencia [21]. (Ver Figura 1.3).

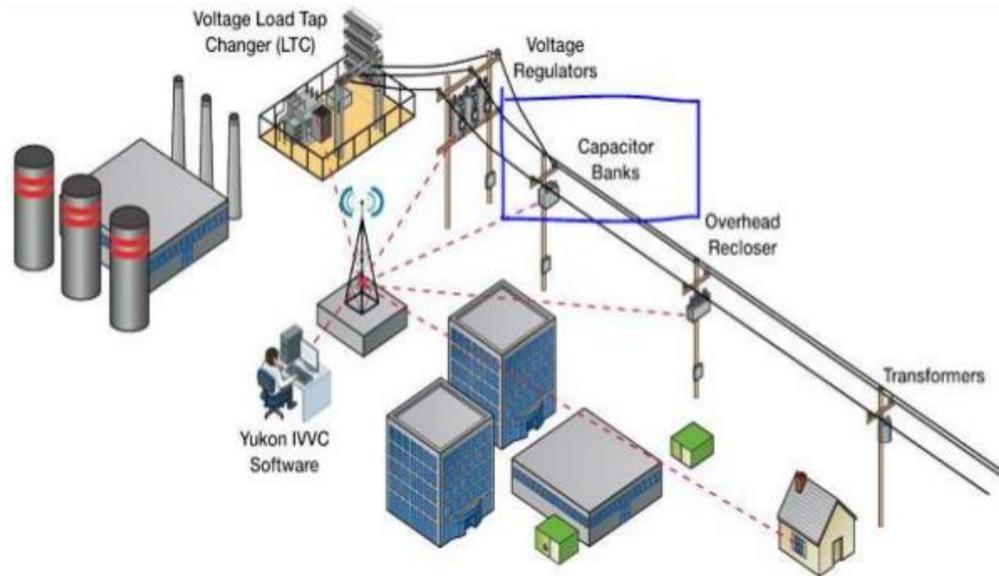


Figura 1.3. Ubicación de un banco de capacitores dentro del sistema de electricidad

Fuente: [8]

1.3.3.2 Tipos de capacitores

Hay dos tipos de condensadores: condensadores conmutables y condensadores de tipo fijo. Debido a consideraciones prácticas, los condensadores de tipo fijo se eligen en varios sistemas de distribución.

Un sistema eléctrico ideal debe proporcionar un voltaje con las siguientes características:

- Amplitud constante
- Forma de onda sinusoidal
- Frecuencia constante
- Simetría en el caso de red trifásica

Bajo estas condiciones, las máquinas y equipos eléctricos conectados a este sistema no debieran presentar un comportamiento anormal y deberían funcionar tal como se espera en su diseño.

Sin embargo, un sistema eléctrico real no cumple con las características ideales mencionadas anteriormente. En la práctica, las redes eléctricas presentan una serie de alteraciones o perturbaciones que afectan la calidad del servicio, dentro de las cuales destacan: i) Variaciones de frecuencia ii) Variaciones de la amplitud del voltaje (flicker) iii)

Sobretensiones iv) Asimetrías entre las fases v) Deformaciones en voltajes y corrientes armónicas.

El banco de capacitores cuenta con una protección general a base del interruptor termomagnético, como medio de protección, conexión y desconexión. La capacidad es de 135% de la corriente nominal del banco de capacitores. Para su durabilidad, el banco de capacitores deberá contar con un sistema de disipación de calor, para garantizar que la temperatura en el interior del gabinete no sobrepase más de 10 °C la del ambiente donde se encuentra instalado. Además, deberá de estar conectado al sistema de tierras.

Cuando se producen daños en el funcionamiento del capacitor, existen interrupciones que suelen reportarse por las empresas eléctricas. Para el caso de Quito, la Empresa Eléctrica reporta que en el periodo de enero a noviembre, según la media móvil anual, el Tiempo Total de Interrupción - TTIK varía de 5,63 a 4,61 horas, con mejor desempeño respecto a la meta establecida por el MEER para diciembre del 2014 de 5,50 horas [14].

1.3.3.3 Efectos de la conexión/desconexión de capacitores

Armónicos

Los armónicos son voltajes sinusoidales o corrientes que tienen una frecuencia que son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental a la cual el sistema de suministro está diseñado para funcionar. Cualquier forma de onda periódica de corriente o voltaje se puede obtener resumiendo la senoide de frecuencia fundamental y armónicos. Correspondientemente, un cambio en la amplitud, fase o frecuencia de los armónicos conduce a cambios en una curva de corriente o voltaje como resultado de la síntesis de armónicos. Las frecuencias por encima de las fundamentales se denominan armónicas, las frecuencias por debajo de las fundamentales se denominan subarmónicas [15].

Efectos resonantes

El efecto resonante se produce en un circuito eléctrico, la condición que existe cuando la reactancia inductiva y la reactancia capacitiva son de igual magnitud, causando que la energía eléctrica oscile entre el campo magnético del inductor y el campo eléctrico del capacitor [15].

La resonancia se produce porque el campo magnético colapsante del inductor genera una corriente eléctrica en sus devanados que carga el condensador y el condensador de descarga proporciona una corriente eléctrica que genera el campo magnético en el

inductor, y el proceso se repite. La resonancia se usa para sintonizar y filtrar, porque la resonancia se produce a una frecuencia particular para valores dados de inductancia y capacitancia. La resonancia puede ser perjudicial para la operación de los circuitos de comunicaciones al causar oscilaciones sostenidas y transitorias no deseadas que pueden causar ruido, distorsión de la señal y daños a los elementos del circuito [3].

Corriente Inrush

Esta corriente consume una fuente de alimentación o un equipo eléctrico en el encendido. Esto surge debido a las altas corrientes iniciales requeridas para cargar los condensadores e inductores o transformadores [3]. Esta corriente produce sobretensión de encendido o la corriente de sobretensión de entrada. En el encendido, los condensadores descargados en las fuentes de alimentación ofrecen una baja impedancia que permite que altas corrientes fluyan hacia el circuito a medida que se cargan desde cero hasta sus valores máximos. Estas corrientes pueden ser tan altas como 20 veces las corrientes de estado estable. A pesar de que solo dura unos 10 ms, se tarda entre 30 y 40 ciclos para que la corriente se estabilice al valor de funcionamiento normal. Si no se limita, las altas corrientes pueden dañar el equipo además de producir caídas de voltaje en la línea de suministro y causar un mal funcionamiento de otros equipos alimentados por el mismo suministro [22].

Sobrevoltajes tipo limitantes

Cuatro tipos de sobretensión pueden perturbar instalaciones eléctricas y cargas:

Sobretensiones de conmutación: sobretensiones de alta frecuencia o perturbaciones de ráfaga causadas por un cambio en el estado estable en una red eléctrica (durante la operación del interruptor) [22].

Sobretensiones de frecuencia industrial: sobretensiones de la misma frecuencia que la red (60 Hz para nuestro caso) causadas por un cambio permanente de estado en la red (después de una falla: falla de aislamiento, falla del conductor neutro, etc.).

Sobretensiones causadas por descargas electrostáticas: sobretensiones muy cortas (unos pocos nanosegundos) de muy alta frecuencia causadas por la descarga de cargas eléctricas acumuladas [15].

Sobretensiones de origen atmosférico. Las tormentas van acompañadas de rayos que representan un peligro grave para las personas y el equipo [22].

1.3.4 Ubicación óptima de Capacitores

Comúnmente, los condensadores en derivación se utilizan para suministrar una potencia reactiva capacitiva al sistema de alimentación de CA en el punto de conexión. Además de eso, los condensadores son ampliamente utilizados en los sistemas de distribución para reducir la energía, las pérdidas pico de demanda y mantener un perfil de voltaje dentro de los límites permisibles.

Independientemente del objetivo central de la compensación, es deseable colocar los capacitores en puntos estratégicos donde se maximicen los beneficios técnico-económicos al sistema, esto es, manteniendo los perfiles de voltaje adecuados y reduciendo su costo de operación, simultáneamente [4].

Método analítico

Dentro de los métodos analíticos, existe el procedimiento de Monte Carlo, el cual se puede ajustar para realizar la asignación óptima de bancos de condensadores. La principal diferencia es que la potencia nominal del condensador se determinará en función de la potencia reactiva máxima no coincidente. El procedimiento se usará para obtener la asignación óptima de bancos de capacitores con carga variable en el tiempo.

Desde hace muchos años se conoce una solución para la asignación óptima de n bancos de condensadores de igual tamaño en un alimentador de distribución con una carga uniformemente distribuida. Estas suposiciones son la base del método de Schmill para la localización de capacitores, mejor conocido como la regla de los "dos tercios" [4].

Criterio de los 2/3

Para un solo banco de condensadores, las expresiones en proporcionan la bien conocida regla 2/3, es decir, el banco de condensadores se coloca en una posición 2/3 de la longitud total del ramal a compensar

1.3.5 Métodos iterativos

Métodos numéricos

Se aplican técnicas de programación iterativas para optimizar una función objetivo planteada en términos de un conjunto de variables de decisión, sujeta a un conjunto de

restricciones. Las variables de decisión son asociadas con la localización, capacidad, número de capacitores, voltajes, corrientes y están sujetas a restricciones operativas.

Métodos heurísticos

Estos métodos son desarrollados a través de la intuición, experiencia y criterios relacionados con la operación de sistemas de distribución. La aplicación de estos métodos ha sido relevante en la localización de capacitores para minimización de pérdidas cuando se realizan tareas de reconfiguración en el sistema.

Métodos basados en inteligencia artificial

Se basan en diferentes áreas de la inteligencia artificial (algoritmos evolucionarios, sistemas expertos, lógica difusa, redes neuronales). Por su formulación son eludidos por los métodos convencionales a través de sus simplificaciones y asunciones, pueden ser abordados por este tipo de técnicas que tienen la capacidad de tomar en cuenta incertidumbres.

1.3.6 Programación Dinámica

La complejidad y la cantidad de variables asociadas con problemas en los sistemas de potencia, incluso utilizando algoritmos adecuados para encontrar una solución óptima exacta, pueden no ser aceptables en un escenario de simulación debido a los tiempos de resolución necesarios. Sin embargo, muchos problemas se pueden resolver usando una solución aproximada o parcial, cuando la dimensión o la complejidad del problema no fomentan el uso de técnicas de resolución exacta.

La programación dinámica es una búsqueda exhaustiva que evita la recalculación al almacenar las soluciones de los subproblemas. El punto clave para usar esta técnica es formular el proceso de solución como una recursión. Un método popular para construir sucesivamente el espacio de solución es el método recursivo, que se basa en el principio de tomar la mejor opción en cada iteración del algoritmo para encontrar el óptimo global de alguna función objetivo [25].

La base del procedimiento de optimización recursiva es el llamado principio de optimalidad, que consiste en que una secuencia óptima de decisiones resuelve un problema debe cumplir la propiedad de cualquier subsecuencia de decisiones también es óptima, es decir, que si se sigue tomando decisiones óptimas de cada etapa el resultado final también es óptimo.

Ventajas:

- Simple, eficiente debido a que organiza y almacena de mejor manera los cálculos efectuados.
- Logra el óptimo global.
- Generalmente funciona bien con problemas de gran complejidad.

Desventajas:

- Si la red es muy grande se vuelve el problema laborioso.
- En ocasiones prioriza caminos que no son importantes.

1.3.6.1 Método Recursivo

Este método es una técnica útil dentro de la programación dinámica ya que se utiliza para la toma de decisiones interrelacionadas, proporciona un procedimiento sistemático que elimina posibles soluciones del problema (soluciones no óptimas del problema) [7].

Ejemplo de la Ruta Optima

Este ejemplo ilustra de mejor manera el entendimiento de la programación dinámica, resuelve un paradigma de un viajero que quiere llegar de un lugar A a un lugar J , pero para ello debe pasar a través de territorios peligrosos, el punto de partida como el de llegada son fijos, pero tiene muchas posibles rutas que puede tomar para llegar a su destino como se muestra en la Figura 1.4, el hombre al ser una persona precavida idea una manera de escoger la ruta más segura cuyo valor se pondera dependiendo de que accidentada sea la ruta, por lo tanto la ruta cuyo valor de peligrosidad sea el menor será la más segura para nuestro viajero [7].

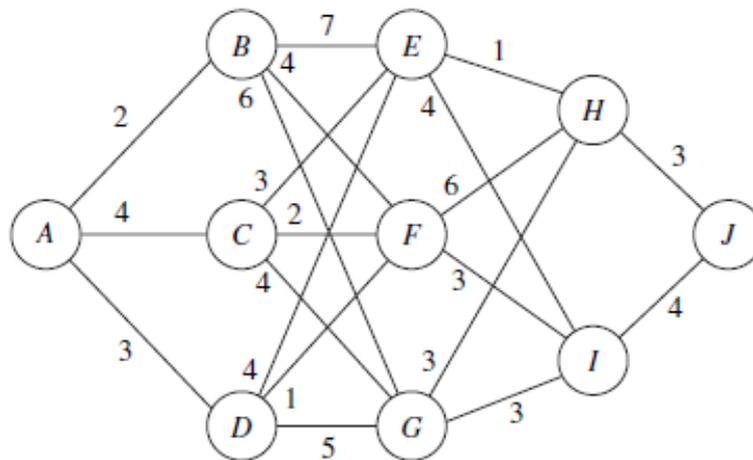


Figura 1.4. Diagrama de trayectorias posibles del ejemplo del viajero

Fuente: [7]

A simple vista y de manera rápida se podría optar en tomar los valores más pequeños de cada etapa, pero esa puede ser una alternativa no óptima. Este valor describe la siguiente ruta: $A - B - F - I - J$, obteniendo como resultado 13 que puede ser o no ser la opción más adecuada. Como existen varias rutas es difícil determinar qué opción sería la más adecuada pues existen muchas posibilidades, por ello se aplica el método recursivo de programación dinámica para determinar la ruta más segura.

Formulación del ejemplo:

Sean X_n las variables de decisión y $n = 1,2,3,4$ número de etapas, por lo tanto, la ruta será $A \rightarrow X_1 \rightarrow X_2 \rightarrow X_3 \rightarrow X_4$, donde $X_4=J$.

Sea $f_n(s, X_n)$ la función del costo total que implica estar en un estado s , en la etapa n y escogiendo la opción X_n como el destino inmediato. Dados s y n se tiene X_n^* del valor X_n no necesariamente único que minimiza la función $f_n(s, X_n)$ y sea $f_n^*(s)$ valor mínimo de $f_n(s, X_n)$ [7]. Se tiene:

$$f_n^*(s) = \min_{X_n} [f_n(s, X_n) + f_n(s, X_n^*)]$$

Ecuación 1.1. Formulación del método recursivo

Donde:

$$f_n(s, X_n) = \text{costo en la etapa } n + \text{costo futuro mínima en la etapa } n + 1 = C_{sX_n} + f_{n+1}^*(X_n)$$

C_{sX_n} es el costo que se tiene de ir del estado s (estado actual) al estado X_n (estado inmediato). Como se conoce el destino final J se tiene que $f_5^*(J)=0$.

Por lo tanto, para llegar a la solución se debe encontrar para cada etapa los valores óptimos $f_4^*(s)$, $f_3^*(s)$, $f_2^*(s)$; para cada uno de los estados posibles para finalmente con $f_2^*(s)$ encontrar $f_1^*(s)$.

Procedimiento de solución:

Como ya se conoce el último destino que en este caso es J entonces se tiene $f_5^*(X_4) = 0$, tomando este último dato se procede a resolver el problema por el método recursivo de la programación dinámica.

Tabla 1.2. Resolución del problema de la diligencia del viajero con programación dinámica

n = 4	s	$f_4(s, X_4) = C_{sX_4} + f_5^*(X_4)$				$f_4^*(s)$	X_4^*
		J				min(J)	min(J)
	H	3+0=3				3	J
	I	4+0=4			4	J	
n = 3	s	$f_3(s, X_3) = C_{sX_3} + f_4^*(X_3)$				$f_3^*(s)$	X_3^*
		H	I			min(H,I)	min(H,I)
	E	1+3=4	4+4=8			4	H
	F	6+3=9	3+4=7			7	I
	G	3+3=6	3+4=7			6	H
n = 2	s	$f_2(s, X_2) = C_{sX_2} + f_3^*(X_2)$				$f_2^*(s)$	X_2^*
		E	F	G		min(E,F,G)	min(E,F,G)
	B	7+4=11	4+7=11	6+6=12		11	E o F
	C	3+4=7	2+7=9	4+6=10		7	E
	D	4+4=8	1+7=8	5+6=11		8	E o F
n = 1	s	$f_1(s, X_1) = C_{sX_1} + f_2^*(X_1)$				$f_1^*(s)$	X_1^*
		B	C	D		min(B,C,D)	min(B,C,D)
	A	2+11=13	4+7=11	3+8=11		11	C o D

Fuente: [Elaboración propia]

Al aplicar el método recursivo se tiene que resolver de fin a inicio, por ello al tener el valor final podemos ir retrocediendo las etapas hasta llegar al inicio y así tener la ruta óptima del problema. El valor final es $f_5^*(J) = 0$, valor que nos servirá para ir retrocediendo etapas hasta llegar al punto inicial. Utilizando: $f_n(s, X_n) = C_{sX_n} + f_{n+1}^*(X_n)$ podemos tener los valores óptimos acumulados en cada etapa.

Etapas 4:

$$f_4(H, J) = C_{HJ} + f_5^*(J) = 3 + 0 = 3$$

$$f_4(I, J) = C_{IJ} + f_5^*(J) = 4 + 0 = 4$$

Se toma el valor mínimo de cada trayectoria $f_4^*(H) = 3$ y $f_4^*(I) = 4$.

Etapas 3:

$$f_4(E, H) = C_{EH} + f_4^*(H) = 1 + 3 = 4 \quad f_4(E, I) = C_{EI} + f_4^*(I) = 4 + 4 = 8$$

$$f_4(F, H) = C_{FH} + f_4^*(H) = 6 + 3 = 9 \quad f_4(F, I) = C_{FI} + f_4^*(I) = 3 + 4 = 7$$

$$f_4(G, H) = C_{GH} + f_4^*(H) = 3 + 3 = 6 \quad f_4(G, I) = C_{GI} + f_4^*(I) = 3 + 4 = 7$$

Se toma el valor mínimo de cada trayectoria $f_3^*(E) = 4, f_3^*(F) = 7$ y $f_4^*(G) = 6$.

Etapla 2:

$$f_4(B, E) = C_{BE} + f_3^*(E) = 7 + 4 = 11 \quad f_4(B, F) = C_{BF} + f_3^*(F) = 4 + 7 = 11 \quad f_4(B, G) = C_{BG} + f_3^*(G) = 6 + 6 = 12$$

$$f_4(C, E) = C_{CE} + f_3^*(E) = 3 + 4 = 7 \quad f_4(C, F) = C_{CF} + f_3^*(F) = 2 + 7 = 9 \quad f_4(C, G) = C_{CG} + f_3^*(G) = 4 + 6 = 10$$

$$f_4(D, E) = C_{DE} + f_3^*(E) = 4 + 4 = 8 \quad f_4(D, F) = C_{DF} + f_3^*(F) = 1 + 7 = 8 \quad f_4(D, G) = C_{DG} + f_3^*(G) = 5 + 6 = 11$$

Se toma el valor mínimo de cada trayectoria $f_2^*(B) = 11, f_2^*(C) = 7$ y $f_2^*(D) = 8$.

Etapla 1:

$$f_4(A, B) = C_{AB} + f_2^*(B) = 2 + 11 = 13 \quad f_4(A, C) = C_{AC} + f_2^*(C) = 4 + 7 = 11 \quad f_4(A, D) = C_{AD} + f_2^*(D) = 3 + 8 = 11$$

Por lo tanto, se toma el valor mínimo $f_1^*(A) = 11$.

Como se observa en la Tabla 1.2 existen dos valores posibles en la etapa 4, es decir tenemos dos posibles trayectorias de la ruta óptima. Además, se ve que en la etapa 2 existen también dos posibles trayectorias óptimas en este problema, por lo tanto, se tiene:

$$A \rightarrow C \rightarrow E \rightarrow H \rightarrow J = 11$$

$$A \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow H \rightarrow J = 11$$

$$A \rightarrow D \rightarrow F \rightarrow I \rightarrow J = 11$$

En este caso son tres las posibles trayectorias óptimas del problema pues todas suman 11 (mínimo valor), se puede ver que existen dos trayectorias en la etapa 1 y una de estas trayectorias tiene a su vez dos trayectorias posibles desde la etapa 2. En problema tiene tres rutas óptimas en este caso se puede tomar cualquiera de ellas.

1.3.7 Flujos de Potencia

El análisis del flujo de potencia consiste en encontrar el estado de funcionamiento estable de un sistema de energía eléctrica. El estado estacionario puede determinarse averiguando, para un conjunto dado de condiciones de carga, el flujo de las potencias activa y reactiva en toda la red y las magnitudes de voltaje y ángulos de fase en todas las barras del sistema [19].

Se requieren cinco propiedades principales de un método de solución de flujo de potencia:

- Alta velocidad computacional. Especialmente importante cuando se trata de sistemas grandes, aplicaciones en tiempo real, flujo de potencia de múltiples casos y también en aplicaciones interactivas.
- Bajo almacenamiento de la computadora. Importante para sistemas grandes y en el uso de computadoras con poca disponibilidad de almacenamiento central.
- Fiabilidad de la solución. Necesaria una solución obtenida para problemas mal condicionados, en estudios de interrupción y para aplicaciones en tiempo real.
- Versatilidad. Capacidad del flujo de potencia para manejar características convencionales y especiales (por ejemplo, el ajuste de las relaciones de toma en los transformadores, diferentes representaciones de los aparatos del sistema de potencia) y su idoneidad para la incorporación en procesos más complicados.
- Simplicidad. La facilidad de codificar un programa de computadora del algoritmo de flujo de carga.

Una solución de flujo de potencia, desde el punto de vista del modelado matemático, consiste en resolver el conjunto de ecuaciones algebraicas no lineales que describen la red de energía eléctrica en condiciones de estado estacionario. Para obtener una solución de las ecuaciones simultáneas, se requiere el uso de técnicas iterativas, incluso para los sistemas de energía más simples [23].

En Sistemas de Distribución es recomendable utilizar métodos con un algoritmo de selección de variables como:

- **Método Forward (selección hacia adelante):** Parte de un modelo sencillo y se va agregando términos tomando en cuenta algún criterio, hasta que no se pueda añadir ningún término más, es decir, se introduce el valor más significativo en cada etapa hasta un criterio de parada [24]. Consiste en un barrido hacia adelante partiendo de los nodos más lejanos a la fuente, durante este barrido se emplea las leyes de

Kirchhoff de nodos hasta llegar al nodo raíz en este proceso se debe considerar un perfil inicial de voltaje [28].

- **Método Backward (eliminación hacia atrás):** Parte de un modelo complejo donde contiene todos los efectos que influyen en la respuesta del problema y en cada etapa se va eliminando la variable menos significativa hasta que no haya otro término faltante que se pueda eliminar [24]. Consiste en un barrido hacia atrás en este caso se parte desde el nodo raíz o fuente aplicando las leyes de Kirchhoff de voltaje y así obtener los nuevos voltajes hasta cumplir una tolerancia [28].

Este método es mucho más práctico y eficiente que los métodos tradicionales como el *NR* (*Newton Raphson*) debido a que no utiliza el cálculo del Jacobiano de *NR*, en sistemas de distribución se tiene una *Ybarra* y por ende un *Jacobiano* muy extenso que provoca problemas de convergencia del algoritmo.

1.3.7.1 Método Forward-Backward para sistemas de distribución

Según [30], se considera una rama de un sistema de distribución como se muestra en la Figura 1.5.

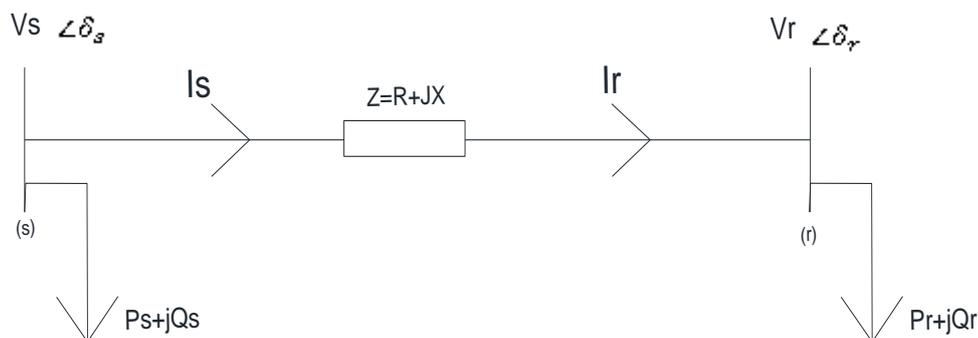


Figura 1.5. Rama de una red de distribución

Fuente: [Elaboracion propia]

De la Figura 1.5 se tiene las siguientes expresiones de potencia en la rama de distribución.

$$P_r = \frac{V_s * V_r}{Z} * \cos(\phi_Z - \delta_s + \delta_r) - \frac{V_r^2}{Z} * \cos(\phi_Z)$$

Ecuación 1.2. Potencia real de recepción en el nodo r

$$Q_r = \frac{V_s * V_r}{Z} * \sin(\phi_Z - \delta_s + \delta_r) - \frac{V_r^2}{Z} * \sin(\phi_Z)$$

Ecuación 1.3. Potencia imaginaria de recepción en el nodo r

Donde:

V_s = voltaje de envío

V_r = voltaje de recepción

ϕ_Z = ángulo de la impedancia de la línea

Z = impedancia de la línea

δ_s = ángulo del voltaje de envío

δ_r = ángulo del voltaje de recepción

Se usa la siguiente identidad trigonométrica:

$$\cos^2(\phi_Z - \delta_s + \delta_r) + \sin^2(\phi_Z - \delta_s + \delta_r) = 1$$

Ecuación 1.4. Identidad trigonométrica

Se despeja los términos $\cos(\phi_Z - \delta_s + \delta_r)$ y $\sin(\phi_Z - \delta_s + \delta_r)$ de las ecuaciones 1.2 y 1.3, y se sustituye en la ecuación 1.4 obteniendo la siguiente ecuación:

$$V_r^4 + 2V_r(P_r R + Q_r X) - V_s^2 V_r^2 + (P_r^2 + Q_r^2) Z^2 = 0$$

$$V_r = \sqrt{V_s^2 - 2(P_r R + Q_r X) + \frac{(P_r^2 + Q_r^2) Z^2}{V_s^2}}$$

Ecuación 1.5. Cálculo del voltaje de recepción

Con la expresión obtenida se aplica la ley de Kirchoff de voltajes (*KVL*) para encontrar los voltajes de cada nodo del sistema de distribución. Para ello nos enfocaremos en el método iterativo de *FORWARD/BACKWARD*, aplicando las ecuaciones del *DLF* (flujo directo de carga), basados en las leyes de Kirchoff.

$$V_s = V_r + I_s * Z$$

$$V_r = V_s - I_s * Z$$

Ecuación 1.6. Cálculo de voltajes nodales

El método cuenta con dos etapas bien definidas: El *BACKWARD* (proceso hacia atrás), en este paso se calcula las corrientes en cada una de las ramas del sistema usando las leyes de Kirchoff de corrientes (*KCL*), una vez conocidas las corrientes se calculan los voltajes en cada nodo con la Ecuación 1.6. El *FORWARD* (proceso hacia adelante) obtenida el

valor del voltaje en cada nodo se lo compara con la interacción anterior y el proceso continua hasta cumplir con cierto criterio de convergencia.

Para el desarrollo del método implementado se requiere la creación de dos matrices:

BIBC: matriz que relaciona las corrientes inyectadas en cada nodo con las corrientes en cada rama del sistema.

BCBV: matriz que relaciona los voltajes de cada nodo con las corrientes en cada rama del sistema.

Una vez obtenidas las dos matrices se calcula la matriz *DLF* (flujo de carga de distribución) con la siguiente expresión:

$$DLF = BIBC * BCBV$$

Ecuación 1.7. Cálculo la matriz del flujo de carga de distribución

Posteriormente se calcula las corrientes de inyección en cada nodo y voltajes con la expresión:

$$I^k = \left(\frac{S_i}{V^k} \right)^*$$

Ecuación 1.8. Matriz de inyección de corrientes en cada nodo

Donde:

i = número de nodo

k = número de iteraciones

I^k = corriente compleja en cada rama en la iteración *k*.

S_i = potencia compleja de inyección en cada nodo (cargas o compensación)

$$\Delta V^{k+1} = DLF * I^k$$

Ecuación 1.9. Variaciones de voltajes en cada iteración

Finalmente, se obtiene los valores de los voltajes nodales

$$V^{k+1} = V^0 - \Delta V^{k+1}$$

Ecuación 1.10. Cálculo de los voltajes de cada nodo

Las iteraciones continúan hasta que se cumpla un criterio de convergencia:

$$\|V^k - V^{k-1}\| \leq \varepsilon$$

Ecuación 1.11. Cálculo del error

Para el desarrollo del cálculo de las matrices según [29] se tiene un sistema de distribución como se muestra en la Figura 1.6.

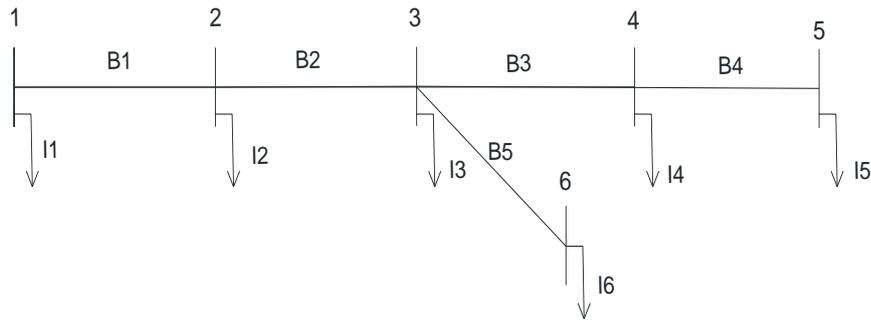


Figura 1.6. Sistema de distribución de 6 nodos

Fuente: [Elaboracion propia]

En la Figura 1.6 la potencia en cada nodo tiene un equivalente de corriente de inyección calculada con la Ecuación 1.8, para encontrar las corrientes de cada rama en función a las corrientes inyectadas en cada nodo se aplica las leyes de Kirchoff de corrientes (*KCL*) y se tiene que:

$$B_1 = I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6$$

$$B_2 = I_3 + I_4 + I_5 + I_6$$

$$B_3 = I_4 + I_5$$

$$B_4 = I_5$$

$$B_5 = I_6$$

Ecuación 1.12. Cálculo de las corrientes de cada rama en función de las corrientes inyectadas

Estas ecuaciones pueden ser escritas en forma matricial de la siguiente manera:

$$\begin{vmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{vmatrix}$$

Ecuación 1.13. Cálculo de la matriz de corrientes en cada rama

Fuente: [Elaboracion propia]

La expresión que relaciona la matriz de corrientes en cada rama (B) se escribe de manera general:

$$B = BIBC * I$$

Ecuación 1.14. Cálculo de la matriz B

Observando la Figura 1.6 y aplicando las KVL para obtener los voltajes nodales se tiene:

$$V_2 = V_1 - B_1 Z_{12}$$

Ecuación 1.15. Cálculo del voltaje 2

$$V_3 = V_2 - B_2 Z_{23}$$

Ecuación 1.16. Cálculo del voltaje 3

$$V_4 = V_3 - B_3 Z_{34}$$

Ecuación 1.17. Cálculo del voltaje 4

El V_4 se puede expresar reemplazando las ecuaciones 1.15 y 1.16 en 1.17 y se obtiene:

$$V_4 = V_1 - B_1 Z_{12} - B_2 Z_{23} - B_3 Z_{34}$$

Ecuación 1.18. Cálculo del voltaje 4 en términos de V_1

De la Ecuación 1.18 se deduce lo siguiente:

$$\begin{vmatrix} V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & Z_{46} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{vmatrix}$$

Ecuación 1.19. Matriz ΔV (variación de voltajes nodales)

Fuente: [Elaboracion propia]

Con la Ecuación 1.19 se deduce la expresión general:

$$\Delta V = BCBV * B$$

Ecuación 1.20. Cálculo de variaciones de voltajes nodales

En la Ecuación 1.20 se reemplaza el valor de B obteniendo:

$$\Delta V = BCBV * BIBC * I$$

$$\Delta V = DLF * I$$

Ecuación 1.21. Cálculo de variaciones de voltajes nodales en función de las corrientes de inyección nodales

2 METODOLOGÍA

En este capítulo se desarrolla el método recursivo de la programación dinámica para el despacho óptimo de capacitores con el fin de reducir las pérdidas eléctricas totales de un sistema de distribución, para ello se desarrolla un algoritmo en el software *MATLAB* que resuelva la función objetivo e introduciendo el programa de flujos de potencia elaborado con el método *FORWARD/BACKWARD* y con la demanda diaria del sistema obtener como resultado los periodos óptimos de conexión/desconexión del banco de capacitores que cumpla restricciones de voltaje.

2.1 Flujo de Potencia

2.1.1 Algoritmo del Flujo de Potencia

El algoritmo para la resolución del Flujo de Potencia describe los siguientes pasos:

1. Lectura de las variables de entrada del sistema de distribución: número de nodo, resistencia, inductancia, nodo de envío, nodo de recepción, Demanda de potencia activa, Demanda de potencia reactiva.
2. Cálculo de la matriz orden de profundidad de los nodos (*Orden*), la matriz que relaciona las corrientes de rama con las corrientes inyectadas (*BIBC*), la matriz que relaciona las corrientes de cada con los voltajes en cada nodo (*BCBV*) y la matriz total del flujo de distribución (*DLF*). Todas estas matrices ayudarán a determinar la corriente que fluye en cada rama (*IBr*).
3. Inicialización de variables de estado $V_i^0 = V_{slack}$
4. Cálculo de la corriente de inyección en cada nodo excepto el nodo raíz o fuente. Se calcula las corrientes de inyección producidas en los nodos donde existe carga o compensación. Cálculo de la corriente en cada rama del sistema.

$$I^k = \left(\frac{S_i}{V^{k-1}} \right)^*$$

Ecuación 2.1. Matriz de corrientes de inyección en cada nodo

Donde:

I^k = matriz de corrientes de inyección en cada nodo

S_i = matriz de potencias de inyección en cada nodo incluyendo el efecto shunt del banco de capacitores (estos valores se multiplican por un valor de 3, porque se va a correr el flujo de potencia de cada fase como un sistema balanceado independiente)

V^{k-1} = matriz de voltajes en cada nodo del sistema

k = número de iteraciones

$$Ibr^k = BIBC * I^k$$

Ecuación 2.2. Cálculo de la matriz de corrientes de rama

Donde:

Ibr^k = matriz de corrientes que fluye por cada rama del sistema

$BIBC$ = matriz de corrientes equivalentes del sistema que fluyen a cada nodo

I^k = matriz de corrientes de inyección en cada nodo

k = número de iteraciones

5. Cálculo de la matriz de las variaciones de voltaje en cada nodo.

$$DLF = BCBV * BIBC$$

Ecuación 2.3. Matriz del flujo de distribución de carga

$$delV^k = DLF * I^k$$

Ecuación 2.4. Matriz de variaciones de voltaje en cada nodo

Donde:

$delV^k$ = matriz de variaciones de voltaje en cada nodo

DLF = matriz de conexiones de cada nodo

I^k = matriz de voltajes en cada nodo del sistema

6. Actualización de los voltajes en cada nodo hasta que se cumple el criterio de convergencia ($Error < \epsilon$).

$$V^k = V^{k-1} - delV^k$$

Ecuación 2.5. Cálculo de voltajes en cada nodo

$$\|V^k - V^{k-1}\| \leq \epsilon$$

Ecuación 2.6. Cálculo del error o tolerancia

7. Cálculo de las pérdidas de cada rama y totales del sistema de distribución *Ppérdidas*.

$$Ploss_{ij} = I_{ij}^2 * R_{ij}$$

Ecuación 2.7. Cálculo de pérdidas de cada rama

Donde:

$Ploss_{ij}$ = pérdidas en cada rama del sistema

I_{ij}^2 = cuadrado de la corriente que circula por la rama ij

R_{ij} = resistencia de la rama ij

i = nodo de origen

j = nodo de llegada

Para obtener las pérdidas totales del sistema a la ecuación 2.7 se la divide para 3 debido que al correr cada fase como un sistema balanceado se tiene 3 veces las perdidas en cada fase y se suma todas las pérdidas de cada rama. Obteniendo:

$$PtLoss = \left(\sum_{n=1}^{n=m} Ploss_n \right) / 3$$

Ecuación 2.8. Cálculo de pérdidas totales en una fase

Donde:

$Ploss_n$ = pérdidas en cada rama del sistema

n = número de la rama

m = número de ramas totales

8. Repetir los pasos 4, 5, 6 y 7 para las fases a y b.
9. Resultados y obtención de los voltajes y ángulos para el sistema trifásico
10. Obtención de las pérdidas total del sistema

$$Ppérdidas_{total} = Ploss_a + Ploss_b + Ploss_c$$

Ecuación 2.9. Cálculo de pérdidas totales

Para el desarrollo del paso 2 del algoritmo del flujo de potencia se obtienen las matrices de la siguiente manera. ´

Obtención de la matriz *Orden*:

1. Se leen los datos f (listado de nodo de envío) y t (listado del nodo de recepción)
2. Obtenemos mediante el comando de MATLAB *sparse* la matriz de *CFT* (conexión de las ramas existentes en el sistema)
3. Con la matriz *CFT* aplicamos el comando *graphtraverse* para la obtención de la matriz *Orden*.

Obtención de la matriz *BIBC*:

1. La matriz es de dimensión $(l \times m)$ donde l y m tienen el tamaño de la matriz *Orden*.
2. Se toma la matriz orden se coloca 1 donde exista conexión y 0 si no existe.

Obtención de la matriz *BCBV*:

1. La matriz es de dimensión $(l \times m)$ donde l y m tienen el tamaño de la matriz *BIBC*.
2. Se toma la matriz *BIBC*, se coloca en lugar de 1 su respectivo valor de la impedancia de la línea del tramo.

2.1.2 Diagrama de flujo del Flujo de Potencia

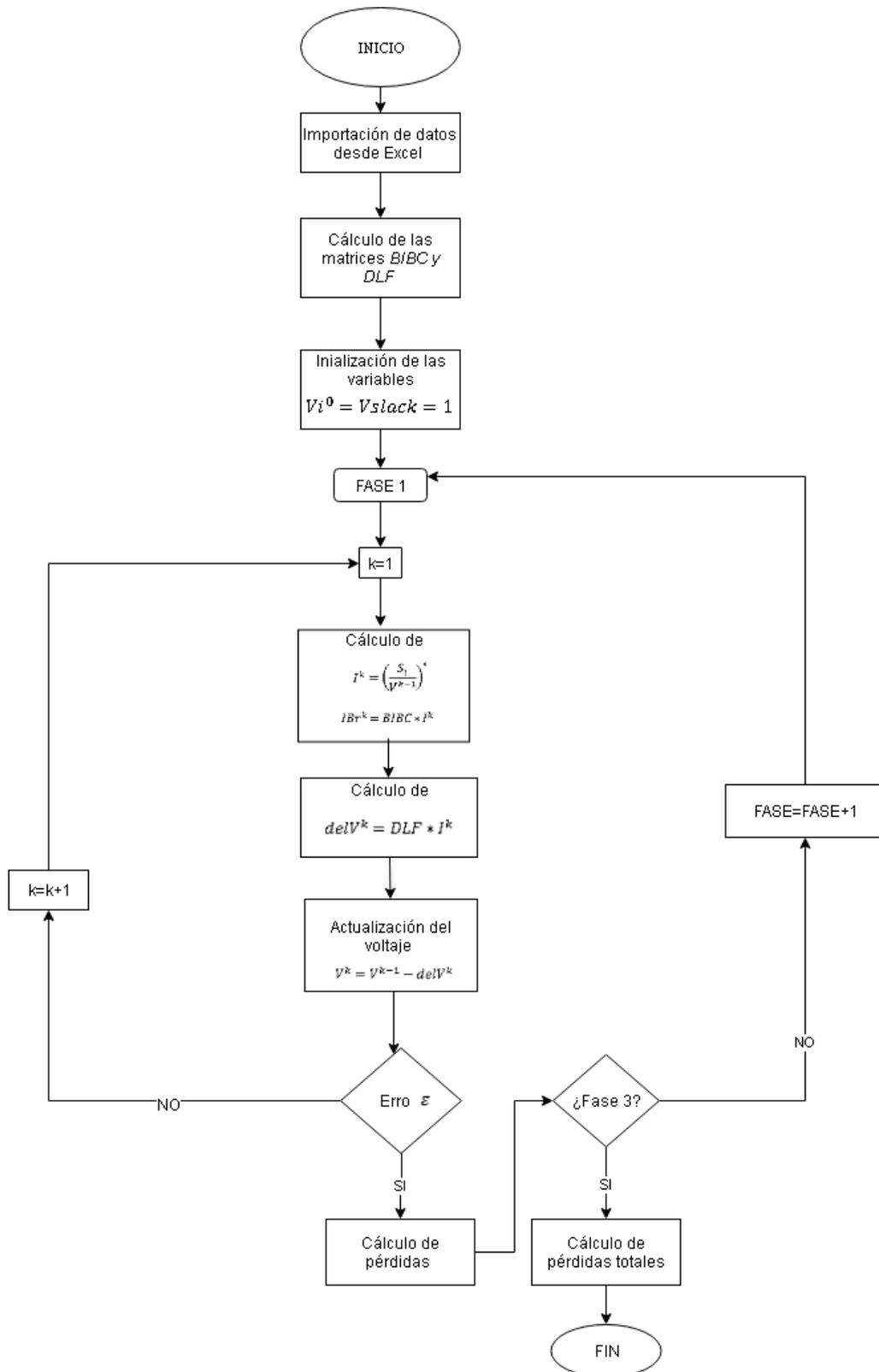


Figura 2.1. Diagrama de flujo del Flujo de Potencia empleado en el despacho
Fuente: [Elaboración Propia]

2.1.3 Desarrollo del algoritmo del flujo de potencia

Tomaremos la Figura 2.2 para el desarrollo del flujo de potencia y la obtención de las pérdidas totales del sistema de distribución.

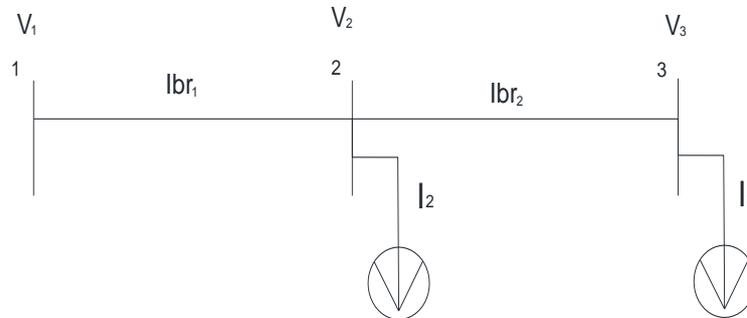


Figura 2.2. Sistema de distribución de 3 nodos

Fuente: [Elaboración Propia]

 : equivalente de corriente de inyección

Los datos de entrada del flujo de potencia son: Barra (número de nodo, Potencias activa y reactiva en cada nodo por cada fase), Línea (nodo de envío, nodo de recepción, resistencia de la línea y reactancia de la línea), todos los valores se encuentran en pu.

Tabla 2.1. Datos de entrada de línea

Nodo_envío	Nodo_recep	Ra pu.	Rb pu.	Rc pu.	Xa pu.	Xb pu.	Xc pu.
1	2	0,0136257	0,0136257	0,0136257	0,0406689	0,0406689	0,0406689
2	3	0,0211955	0,0211955	0,0211955	0,0632628	0,0632628	0,0632628

Fuente: [Elaboración propia]

Tabla 2.2. Datos de entrada de potencias

Nodo	Pa. Dem.	Pb. Dem.	Pc. Dem.	Qa. Dem	Qb. Dem	Qc. Dem
1	0	0	0	0	0	0
2	0,07	0,064	0,067	0,02982	0,027264	0,0285419
3	0,065	0,059	0,063	0,02769	0,025134	0,026838

Fuente: [Elaboración propia]

El flujo de potencia se lo hace fase a fase de manera independiente, los valores de potencia de demanda y compensación se toma de cada fase respectivamente y este valor se lo multiplica por 3.

Las impedancias de la Figura 2.2 son las siguientes:

$$Z_{12} = R_{12} + jX_{12} = 0.0136257 + j0.0406689$$

$$Z_{23} = R_{23} + jX_{23} = 0.0211955 + j0.0632628$$

El procedimiento de resolución del flujo de potencia para la *fase a* es el siguiente:

$$S_2 = 3 * (0.07 + j0.0298) = 0.21 + j0.0895$$

$$S_3 = 3 * (0.065 + j0.0277) = 0.195 + j0.0831$$

k = número de iteraciones

1ra Iteración para $k = 1$

Proceso BACKWARD:

Se tiene que el valor de todos los voltajes toma el valor del nodo raíz o fuente, por tanto:

$$V_1^{(0)} = V_2^{(0)} = V_3^{(0)} = 1 + j0 = 1 \angle 0^\circ$$

Se obtienen las corrientes de inyección debido a la potencia de demanda y compensación shunt en cada nodo del sistema excepto del nodo fuente, esto se lo hace con la Ecuación 2.1, de la siguiente manera:

$$I_2^{(1)} = \left(\frac{S_2}{V_2^{(0)}} \right)^* = \left(\frac{0.21 + j0.0895}{1} \right)^* = 0.21 - j0.0895$$

$$I_3^{(1)} = \left(\frac{S_3}{V_3^{(0)}} \right)^* = \left(\frac{0.195 + j0.0831}{1} \right)^* = 0.195 - j0.0831$$

En forma matricial se tiene:

$$\begin{bmatrix} I_2^{(1)} \\ I_3^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.21 - j0.0895 \\ 0.195 - j0.0831 \end{bmatrix}$$

Una vez encontradas las corrientes de inyección se calculan las corrientes de cada rama para ello se aplica *KCL* en cada nodo del sistema teniendo:

$$I_{br_1}^{(1)} = I_2^{(1)} + I_{br_2}^{(1)}$$

$$I_{br_2}^{(1)} = I_3^{(1)}$$

En términos de las corrientes de inyección nodales:

$$I_{br_1}^{(1)} = I_2^{(1)} + I_3^{(1)} = (0.21 - j0.0895) + (0.195 - j0.0831) = 0.405 - j0.1725$$

$$I_{br_2}^{(1)} = I_3^{(1)} = 0,195 - j0,0831$$

De forma matricial se deduce y se tiene:

$$\begin{bmatrix} I_{br_1}^{(1)} \\ I_{br_2}^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2^{(1)} \\ I_3^{(1)} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_{br_1}^{(1)} \\ I_{br_2}^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_2^{(1)} + I_3^{(1)} \\ I_3^{(1)} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_{br_1}^{(1)} \\ I_{br_2}^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,405 - j0,1725 \\ 0,195 - j0,0831 \end{bmatrix}$$

Con esto tenemos que la matriz *BIBC* para este ejemplo es:

$$BIBC = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Esta matriz relaciona las corrientes de inyección con las corrientes de cada rama del sistema, es un valor constante por lo que aplicaremos en todas las interacciones. De forma general se cumple entonces la Ecuación 2.2.

Proceso FORWARD:

Ahora se procede al cálculo de los voltajes nodales, de la Figura 2.2 aplicando *KVL* se tiene:

$$V_2^{(1)} = V_1^{(1)} - I_{br_1}^{(1)} * Z_{12}$$

$$V_3^{(1)} = V_2^{(1)} - I_{br_2}^{(1)} * Z_{23}$$

En términos de V_1 , dato que ya conocemos pues es el nodo slack:

$$V_2^{(1)} = V_1^{(1)} - I_{br_1}^{(1)} * Z_{12}$$

$$V_2^{(1)} = 1 - (0,405 + j0,1725) * (0,0136257 + j0,0406689)$$

$$V_2^{(1)} = 0,9875 - j0,0141 = 0,9876 \angle -0,8192^\circ$$

$$V_3^{(1)} = V_1^{(1)} - I_{br_1}^{(1)} * Z_{12} - I_{br_2}^{(1)} * Z_{23}$$

$$V_3^{(1)} = 1 - (0,405 + j0,1725) * (0,0136257 + j0,040668) - (0,195 - j0,0831) * (0,0211955 + j0,0632628)$$

$$V_3^{(1)} = 0,9781 - j0,0247 = 0,9784 \angle -1,4464^\circ$$

Otra forma de obtener los resultados es despejando los voltajes obteniendo:

$$V_1^{(1)} - V_2^{(1)} = Ibr_1^{(1)} * Z_{12}$$

$$V_1^{(1)} - V_3^{(1)} = Ibr_1^{(1)} * Z_{12} + Ibr_2^{(1)} * Z_{23}$$

De forma matricial se tiene:

$$\begin{bmatrix} V_1^{(1)} - V_2^{(1)} \\ V_1^{(1)} - V_3^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ibr_1^{(1)} \\ Ibr_2^{(1)} \end{bmatrix}$$

En términos de las corrientes de inyección tenemos:

$$\begin{bmatrix} V_1^{(1)} - V_2^{(1)} \\ V_1^{(1)} - V_3^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2^{(1)} \\ I_3^{(1)} \end{bmatrix}$$

Donde la matriz *BCBV* para este ejemplo es:

$$BCBV = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} \end{bmatrix}$$

Aplicando la Ecuación 2.3 se obtiene *DLF*:

$$DLF = \begin{bmatrix} 0,0136 + j0,0407 & 0,0136 + j0,0407 \\ 0,0136 + j0,0407 & 0,0348 + j0,1039 \end{bmatrix}$$

Teniendo *DLF* podemos calcular la diferencia de los voltajes nodales:

$$\begin{bmatrix} V_1^{(1)} - V_2^{(1)} \\ V_1^{(1)} - V_3^{(1)} \end{bmatrix} = DFL * \begin{bmatrix} I_2^{(1)} \\ I_3^{(1)} \end{bmatrix}$$

Cumpliendo la Ecuación 2.3.

$$\begin{bmatrix} V_1^{(1)} - V_2^{(1)} \\ V_1^{(1)} - V_3^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0136 + j0,0407 & 0,0136 + j0,0407 \\ 0,0136 + j0,0407 & 0,0348 + j0,1039 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_2^{(1)} \\ I_3^{(1)} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_1^{(1)} - V_2^{(1)} \\ V_1^{(1)} - V_3^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0136 + j0,0407 & 0,0136 + j0,0407 \\ 0,0136 + j0,0407 & 0,0348 + j0,1039 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0,21 - j0,0895 \\ 0,195 - j0,0831 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_1^{(1)} - V_2^{(1)} \\ V_1^{(1)} - V_3^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0125 - j0,0141 \\ 0,0219 - j0,0247 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} delV_2^{(1)} \\ delV_3^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0125 - j0,0141 \\ 0,0219 - j0,0247 \end{bmatrix}$$

De esta manera se observa la utilidad de la matriz de flujo de distribución de carga (*DFL*), que al ser una matriz constante sirve para calcular los voltajes en todas las iteraciones.

Encontrada las diferencias despejamos los voltajes aplicando la Ecuación 2.5 y se obtiene:

$$V_2^{(1)} = V_2^{(0)} - delV_2^{(1)} = 1 - (0,0125 - j0,0141)$$

$$V_2^{(1)} = 0,9875 - j0,0141 = 0,9876 \angle -0,8192^\circ$$

$$V_3^{(1)} = V_3^{(0)} - delV_3^{(1)} = 1 - (0,0219 - j0,0247)$$

$$V_3^{(1)} = 0,9781 - j0,0247 = 0,9784 \angle -1,4464^\circ$$

Observamos que los resultados son los mismos aplicando las matrices *BIBC*, *BCBV* y *DFL* que aplicando *KCL* Y *KVL*, teniendo matrices constantes para cada iteración.

Verificamos el error o tolerancia con la Ecuación 2.6. hasta cumplir el criterio de parada en este caso $\varepsilon = 0.001$

$$\left| |V_2^{(1)}| - |V_2^{(0)}| \right| \leq \varepsilon$$

$$\left| |0,9875 - j0,0141| - |1| \right| \leq 0.001$$

$$0,0124 \leq 0,001$$

$$\left| |V_3^{(1)}| - |V_3^{(0)}| \right| \leq \varepsilon$$

$$\left| |0,9781 - j0,0247| - |1| \right| \leq 0,001$$

$$0,0219 \leq 0.001$$

Se toma el mayor valor de los errores de todos los nodos, en este ejemplo es 0,0219 y al no cumplir con la tolerancia se continúa con la siguiente iteración.

Con los nuevos valores de los voltajes se realiza la siguiente iteración.

2da Iteración para $k = 2$

Proceso BACKWARD:

Volvemos a efectuar los mismos pasos descritos en la iteración 1, pero en esta iteración los voltajes toman los valores que se obtienen en la iteración anterior así que:

$$V_1^{(1)} = 1 + j0 = 1 \angle 0^\circ$$

$$V_2^{(1)} = 0,9875 - j0,0141 = 0,9876 \angle -0,8192^\circ$$

$$V_3^{(1)} = 0,9781 - j0,0247 = 0,9784 \angle -1,4464^\circ$$

Con la Ecuación 2.1, se calcula las nuevas corrientes de inyección:

$$I_2^{(2)} = \left(\frac{S_2}{V_2^{(1)}} \right)^* = \left(\frac{0,21 + j0,0895}{0,9875 - j0,0141} \right)^* = 0,2113 - j0,0936$$

$$I_3^{(2)} = \left(\frac{S_3}{V_3^{(1)}} \right)^* = \left(\frac{0,195 + j0,0831}{0,9781 - j0,0247} \right)^* = 0,1971 - j0,0899$$

Obtenemos las corrientes de cada rama:

$$\begin{bmatrix} I_{br_1}^{(2)} \\ I_{br_2}^{(2)} \end{bmatrix} = [BIBC] \begin{bmatrix} I_2^{(2)} \\ I_3^{(2)} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_{br_1}^{(2)} \\ I_{br_2}^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2^{(2)} \\ I_3^{(2)} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_{br_1}^{(2)} \\ I_{br_2}^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,2113 - j0,0936 \\ 0,1971 - j0,0899 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_{br_1}^{(2)} \\ I_{br_2}^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,4084 - j0,1835 \\ 0,1971 - j0,0899 \end{bmatrix}$$

Proceso FORWARD:

Se obtienen los nuevos voltajes nodales:

$$\begin{bmatrix} delV_2^{(2)} \\ delV_3^{(2)} \end{bmatrix} = [DLF] * \begin{bmatrix} I_2^{(2)} \\ I_3^{(2)} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} delV_2^{(2)} \\ delV_3^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0136 + j0,0407 & 0,0136 + j0,0407 \\ 0,0136 + j0,0407 & 0,0348 + j0,1039 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0,2113 - j0,0936 \\ 0,1971 - j0,0899 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} delV_2^{(2)} \\ delV_3^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0130 + j0,0141 \\ 0,0229 + j0,0247 \end{bmatrix}$$

Aplicando la Ecuación 2.5 se tiene que:

$$V_2^{(2)} = V_2^{(1)} - delV_2^{(2)} = (0,9875 - j0,0141) - (0,0130 + j0,0141)$$

$$V_2^{(2)} = 0,9870 - j0,0141 = 0,9871 \angle -0,819^\circ$$

$$V_3^{(2)} = V_3^{(1)} - delV_3^{(2)} = (0,9781 - j0,0247) - (0,0229 + j0,0247)$$

$$V_3^{(2)} = 0,9771 - j0,0247 = 0,9774 \angle -1,4465^\circ$$

Se verifica el error o tolerancia con la Ecuación 2.6. hasta cumplir el criterio de parada en este caso $\varepsilon = 0,001$

$$\left| |V_2^{(2)}| - |V_2^{(1)}| \right| \leq \varepsilon$$

$$||0,9870 - j0,0141| - |0,9875 - j0,0141|| \leq 0,001$$

$$0,0005 \leq 0,001$$

$$\left| |V_3^{(2)}| - |V_3^{(1)}| \right| \leq \varepsilon$$

$$||0,9771 - j0,0247| - |0,9781 - j0,0247|| \leq 0,001$$

$$0,0007 \leq 0,001$$

Se toma el mayor valor en este caso 0,0007 y al cumplir con la tolerancia, el barrido iterativo se detiene y los valores obtenidos en la última iteración son los resultados del flujo de potencia.

$$V_{1a} = 1 \angle 0^\circ$$

$$V_{2a} = 0,9871 \angle -0,8197^\circ$$

$$V_{3a} = 0,9774 \angle -1,4477^\circ$$

Los valores obtenidos corresponden a los voltajes de la *fase a*.

Se repite el procedimiento tanto para la *fase b* como la *fase c*.

Para la *fase b* se tiene:

$$V_1 = 1 \angle 0^\circ$$

$$V_2 = 0,9882 \angle -0,7459^\circ$$

$$V_3 = 0,9795 \angle -0,7889^\circ$$

Como se observa, los voltajes son los correctos pero los ángulos necesitan desfasarse -120° para obtener los correspondientes a la *fase b*.

$$V_{1b} = 1\angle(0 - 120)^\circ = 1\angle-120^\circ$$

$$V_{2b} = 0,9882\angle(-0,7459 - 120)^\circ = 0,9882\angle-120,7459^\circ$$

$$V_{3b} = 0,9795\angle(-1,3141 - 120)^\circ = 0,9876\angle-121,3141^\circ$$

Para la *fase c* se tiene:

$$V_1 = 1\angle 0^\circ$$

$$V_2 = 0,9876\angle-0,7889^\circ$$

$$V_3 = 0,9782\angle-1,3969^\circ$$

Se observa que los voltajes son los correctos pero los ángulos necesitan desfasarse 120° para obtener los correspondientes a la *fase c*.

$$V_{1c} = 1\angle(0 + 120)^\circ = 1\angle 120^\circ$$

$$V_{2c} = 0,9876\angle(-0,7889 + 120)^\circ = 0,9882\angle-119,2111^\circ$$

$$V_{3c} = 0,9782\angle(-1,3969 + 120)^\circ = 0,9876\angle-118,6031^\circ$$

Una vez obtenido el flujo de potencia se calculan las pérdidas en cada fase, para la fase a primero se obtiene las pérdidas de cada rama del sistema con la Ecuación 2.7:

$$P_{loss_{12a}} = \left(\frac{|V_{1a} - V_{2a}|}{|Z_{12a}|} \right)^2 * R_{12a}$$

$$P_{loss_{12a}} = \left(\frac{|1 - (0,9870 - j0,0141)|}{|0,0136257 + j0,0406689|} \right)^2 * 0,0136257 = 0,0027$$

$$P_{loss_{23a}} = \left(\frac{|V_{2a} - V_{3a}|}{|Z_{23a}|} \right)^2 * R_{23a}$$

$$P_{loss_{23a}} = \left(\frac{|(0,9870 - j0,0141) - 0,9771 - j0,0247|}{|0,0211955 + j0,0632628|} \right)^2 * 0,0211955 = 0,001$$

Obtenidas las pérdidas en cada rama se calcula las pérdidas totales con la Ecuación 2.8:

$$P_{tloss_a} = \frac{P_{loss_{12a}} + P_{loss_{23a}}}{3} = \frac{0,0027 + 0,001}{3} = 0,0012$$

El mismo procedimiento se resuelve para las *fases b y c* obteniendo:

$$P_{tloss_b} = 0,001$$

$$P_{tloss_c} = 0,0012$$

Finalmente, con la Ecuación 2.9 se obtienen las pérdidas totales del sistema de distribución:

$$P_{pérdidas_{total}} = 0,0012 + 0,001 + 0,0012 = 0,0034$$

2.2 Despacho óptimo de capacitores para conexión/desconexión diaria de compensación reactiva

En esta aborda el desarrollo y planteamiento de la formulación matemática del problema del despacho óptimo de compensación reactiva basado en una demanda diaria teniendo como restricción los límites en los perfiles de voltaje, además introduciremos el algoritmo de flujo de potencia desarrollado en la sección anterior, con la finalidad de minimizar las pérdidas eléctricas totales del alimentador en análisis [26].

2.2.1 Formulación del problema de Programación Dinámica

Para el desarrollo del despacho óptimo de capacitores se tiene un alimentador de cinco secciones y un banco de capacitores con tres capacitores de diferente capacidad Q_c como indica la Figura 2.16, se considera $n = 24$ periodos del día y se asume un modelo de carga PQ , además se tiene una curva de demanda conocida de un día.

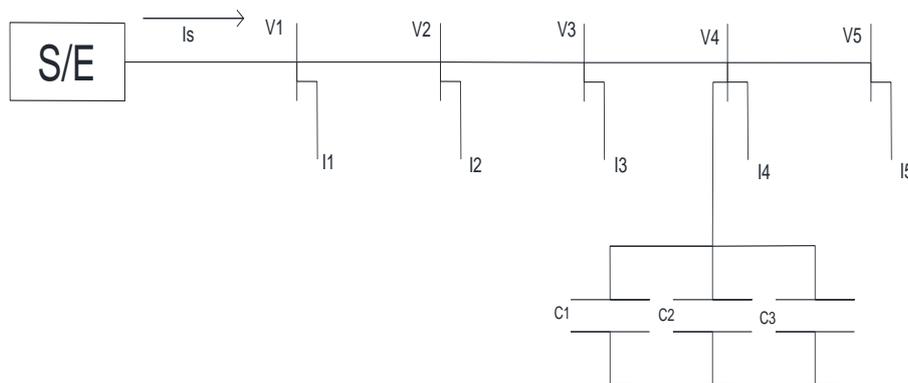


Figura 2.3. Alimentador de distribución

Fuente: [27]

El alimentador de la figura contiene tres capacitores conectados C_i ($i = 1,2,3$) con capacidades Q_i ($i = 1,2,3$), se asume que los capacitores tienen una capacidad fija y son conectables, para que el operador pueda conectar o desconectar en el tiempo que se

requiera hacer la maniobra. El problema es determinar el periodo de tiempo cada capacitor debe estar conectado dependiendo de la variación de la demanda existente en el alimentador y cumpliendo las restricciones de límite de voltaje y la menor cantidad de número de la maniobra conexión/desconexión para un periodo de $n = 24$ del día.

Se tiene estados de conexión del banco de capacitores en cada periodo n del día, sea $S_i(n)$ $i = 1,2,3 \dots$, entonces:

$S_i(n) = 1$, el capacitor está conectado

$S_i(n) = 0$, el capacitor esta desconectado

El problema es saber el estado de cada capacitor $S_{C_i}(n)$ en cada uno de los $n= 24$ periodos con el fin de reducir las pérdidas eléctricas total del alimentador ($P_{perdidas}$).

La formulación matemática del problema es la siguiente:

$$\text{minimizar } P_{perdidas} = \sum_n^{24} P_n [S_{1(n)}, S_{2(n)}, \dots \dots S_{ct(n)}]$$

Ecuación 2.10. Función objetivo, minimización de pérdidas totales del sistema

sujeto a:

$$K = \sum_n^{24} S_{i(n)} \oplus S_{i(n+1)}$$

Ecuación 2.11. Número totales de switcheos

$$V^{min} \leq V_j \leq V^{max} \quad j = 1,2,3, \dots, m$$

Ecuación 2.12. Límites de voltaje permitidos

Donde:

n = número de escenarios o periodos de tiempo

ct = número total de capacitores instalados

m = número de nodos del sistema.

K = número de switcheos de los capacitores.

$P_n[S_{1(n)}, S_{2(n)}, \dots, S_{ct(n)}]$ = Pérdidas totales en la hora n donde el capacitor C_i (1,2 ... ct) en esa hora es $S_{i(n)}$.

V_i = voltaje en el nodo envío.

V_j = voltaje en el nodo recepción.

V^{min} = voltaje límite mínimo

V^{max} = voltaje límite máximo

\oplus = OR exclusivo un operador lógico que $S_{i(n)} \oplus S_{i(n+1)} = 1$ cuando $S_{i(n)} \neq S_{i(n+1)}$;

$S_{i(n)} \oplus S_{i(n+1)} = 0$ cuando $S_{i(n)} = S_{i(n+1)}$.

El objetivo de la programación dinámica es de minimizar las posibles trayectorias que se tiene en el desarrollo del problema al tener $n = 24$ periodos del día y $S_i(n)$ estados posibles del banco de capacitores.

Las posibles trayectorias tendrán mucho que ver con el número de los posibles estados de los capacitores así se tiene que para los tres capacitores los posibles estados son:

Tabla 2.3. Estados posibles en un periodo del día para tres capacitores

Escenarios	$S_{1(n)}$	$S_{2(n)}$	$S_{3(n)}$
$X_{n,1}$	0	0	0
$X_{n,2}$	0	0	1
$X_{n,3}$	0	1	0
$X_{n,4}$	0	1	1
$X_{n,5}$	1	0	0
$X_{n,6}$	1	0	1
$X_{n,7}$	1	1	0
$X_{n,8}$	1	1	1

Fuente: [Elaboración propia]

En la Tabla 2.3 se tiene los posibles escenarios en un periodo del día n , sin embargo $n = 1,2 \dots 24$. Por tanto, el problema describe la siguiente expresión:

$$X_{n.m} = [S_{1(n)}, \dots, S_{ct(n)}]$$

Ecuación 2.13. Escenario posible de los capacitores

Donde:

$X_{n,m}$ = escenario posible del capacitor.

$S_1(n)$ = estado posible del capacitor 1.

$S_{ct}(n)$ = estado posible del capacitor ct .

n = número de periodos o escenarios (24 periodos).

m = número de posibles estados de los capacitores

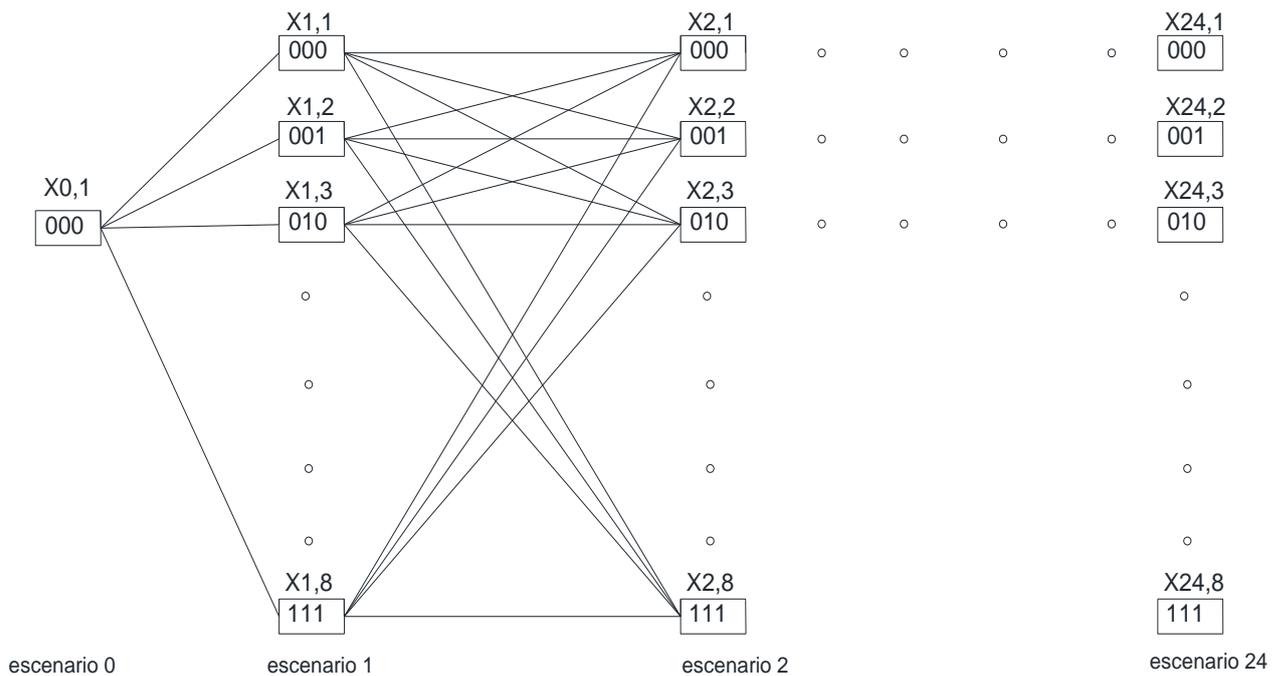


Figura 2.4. Diagrama de estado de los 24 escenarios para tres capacitores

Fuente: [Elaboración propia]

Como se observa en la Figura 2.4, la trayectoria empieza en un escenario 0 y se tiene que $X_{0,1} = 000$, los valores a almacenar son $(2^n)^{24}$ en este caso $(2^3)^{24} \approx 4.72 \times 10^{21}$, trayectorias posibles a través de los 24 escenarios. El objetivo es encontrar una trayectoria factible que cumpla con las restricciones y minimice las *Pperdidas* del alimentador en análisis. Como se observa existe demasiadas trayectorias de ahí que se utiliza la programación dinámica y dentro de ésta el método recursivo.

2.2.2 Solución recursiva

Este método se abordó en la solución del ejemplo de la diligencia del viajero. Lo descrito a continuación plantea el mismo problema llevado a términos de la solución del despacho

óptimo de capacitores con el fin de obtener los estados óptimos de los capacitores y así logras reducir las pérdidas totales del sistema (función objetivo).

Se define la fórmula de la siguiente manera [27]:

$$fX_{n,m} = \min_{X_{n,m}} \langle f(X_{n-1,m}) + R(X_{n-1,m}, X_{n,m}) \rangle$$

Ecuación 2.14. Cálculo de pérdidas totales para n escenarios

Donde:

$fX_{n,m}$ = pérdidas mínimas acumuladas hasta el estado X_n

X_{n-1} = estados posibles que llevan a X_n

$f(X_{n-1})$ = pérdidas mínimas acumuladas hasta el estado $X_{n-1,m}$

$R(X_{n-1}, X_{n,m})$ = pérdidas en el alimentador en el estado $X_{n,m}$ que tienen como estado predecesor X_{n-1}

n = número de periodos o escenarios (24 periodos)

m = número de estados posibles

2.2.3 Algoritmo del despacho óptimo de capacitores

El algoritmo esta descrito por los siguientes pasos:

1. Lectura de las variables de entrada del sistema de distribución: número de nodo, resistencia, inductancia, nodo de envío, nodo de recepción, Demanda de potencia activa, Demanda de potencia reactiva. A esto se le añade la lectura de la curva de demanda, capacidad del banco de capacitores instalados y lugar de instalación del banco de capacitores.
2. Creación de la matriz de estados y la matriz de escenarios para las $n= 24$ periodos.
3. Incorporación del algoritmo del flujo de potencia para obtención de los voltajes y ángulos de cada nodo, así como las pérdidas totales del sistema tomando en cuenta el estado conexión/desconexión de los capacitores.
4. Cálculo de las pérdidas del alimentador para el escenario n .
5. Cálculo de las pérdidas del alimentador para el escenario $n + 1$, si en este estado se incumple los valores de límite de voltaje permitido $Ppérdidas$ de ese estado toma

un valor de *inf*. determinar la diferencia de las pérdidas del escenario $n + 1$ y su predecesor n .

$$\Delta P = P_{(n+1)} - P_{(n)}$$

Ecuación 2.15. Variación de pérdidas del periodo n al periodo $n + 1$ (pesos)

Donde:

ΔP = son los pesos o valores de pasar de un estado a otro del escenario $n - 1$ al escenario n .

$P_{(n+1)}$ = pérdidas totales del escenario $n + 1$

$P_{(n)}$ = pérdidas totales del escenario n

6. Determinación del mínimo valor de ΔP de los estados factibles en el escenario n .
7. Obtención de la matriz de ubicaciones (Ub) donde se irán guardado los estados escogidas en cada n (escenario) y la matriz de almacenamiento de potencia de pérdidas (Sp) donde se van guardando las pérdidas acumuladas de las diferentes trayectorias en cada escenario.
8. Desarrollo de la solución recursiva de la programación dinámica Cálculo de $fX_{24,op}$ con la Ecuación 2.14. Para el primer valor se tiene $fX_{0,0}=0$ con su estado inicial $X_{0,0}=0,0,0$. $fX_{24,op}$ será es mínimo valor de las pérdidas acumuladas en Sp durante el proceso iterativo.
9. Obtención de los estados de los capacitores, es decir, el camino en donde $fX_{24,op}$ es el menor valor. Estos valores se obtienen de la matriz de ubicaciones donde se fueron almacenado los estados de la trayectoria escogida.
10. Se obtiene el número de operaciones de cada capacitor de la trayectoria optima, se verifica que cumpla con la Ecuación 2.11 del número de operaciones conexión/desconexión. Para ello hemos colocado un factor de switcheos que evita el excesivo número de la maniobra conexión/desconexión.
11. Obtención del despacho óptimo de los capacitores y de las pérdidas totales del alimentador en cada n periodo.

2.2.4 Diagrama de flujo del despacho óptimo de capacitores

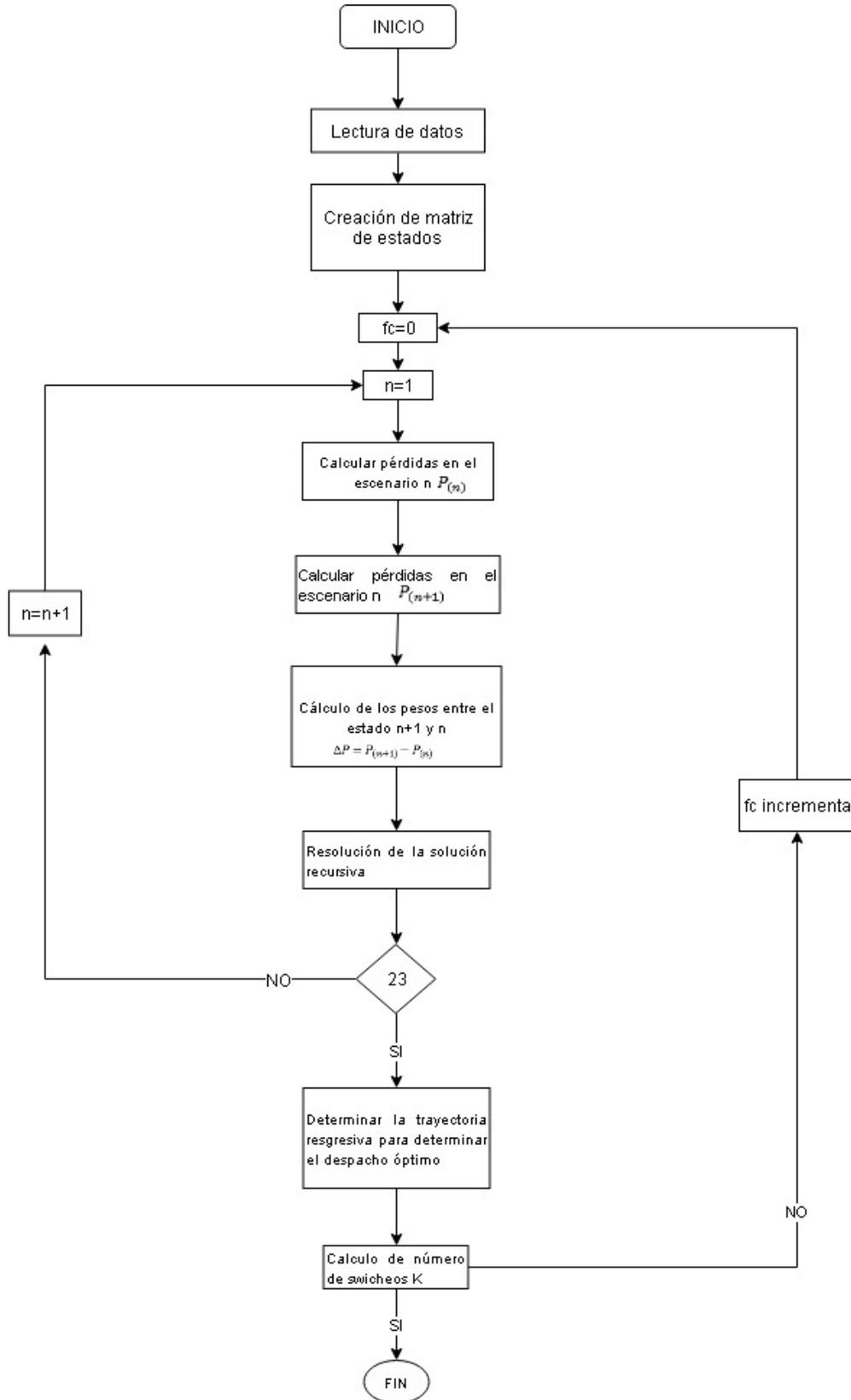


Figura 2.5. Diagrama de flujo del despacho óptimo de capacitores para $n = 24$ periodos
Fuente: [Elaboración propia]

2.2.5 Desarrollo del algoritmo del despacho óptimo de capacitores

Resolveremos el problema del despacho óptimo de capacitores con el ejemplo del algoritmo del flujo de potencia, para ello se resuelve el sistema de la Figura 2.6. consideraremos para este ejemplo 2 capacitores y $n = 4$ escenarios en el día.

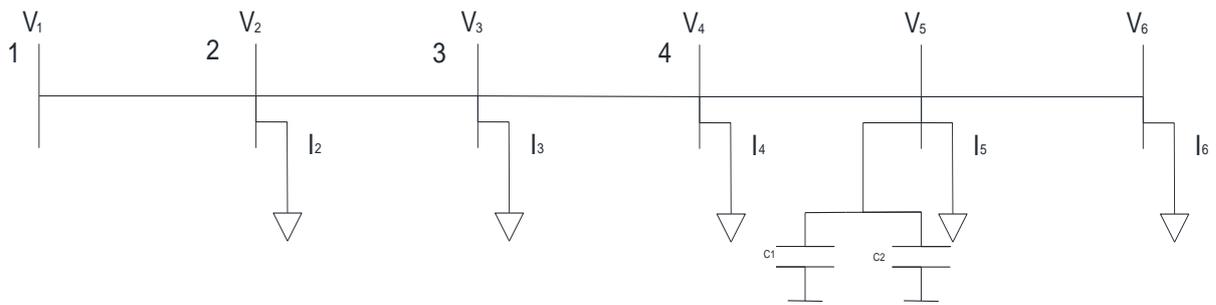


Figura 2.6. Sistema de distribución de 6 nodos con conexión de 2 capacitores

Fuente: [Elaboración propia]

A los datos del flujo de potencia se le añade los datos de la proyección de la carga de los 4 periodos del día y la ubicación, capacidad del banco de capacitores instalado.



Figura 2.7. Datos de proyección diaria de carga

Fuente: [Elaboración propia]

Tabla 2.4. Datos de la capacidad y ubicación de los capacitores instalados

Nodo	VAR pu
5	0,55
5	0,35

Fuente: [Elaboración propia]

Se crea la matriz de estados de los i (número de capacitores instalados). El tamaño de matriz de estados viene dado por: 2^i .

Tabla 2.5. Matriz de estados para los n escenarios

Escenarios	$S_{1(n)}$	$S_{2(n)}$
$X_{n,1}$	0	0
$X_{n,2}$	0	1
$X_{n,3}$	1	0
$X_{n,4}$	1	1

Fuente: [Elaboración propia]

El algoritmo crea una matriz de ubicaciones donde se irá almacenando la trayectoria que cumpla con la función objetivo Ecuación 2.12, además de una matriz llamada sumatorio de pesos en donde se irán almacenando las pérdidas acumuladas en cada escenario, la trayectoria con la menor cantidad de pérdidas acumuladas será la óptima y los estados que describieron esa trayectoria durante los n escenarios será del despacho óptimo de los capacitores. Se desarrolla el método recursivo de la programación dinámica y la trayectoria óptima (estados óptimos de los capacitores en los 4 periodos).

Para ello, se resuelve el método recursivo de programación dinámica de la siguiente manera:

Los $n = 4$ corresponden a los diferentes escenarios en donde la carga varía durante el día, la variación se efectúa de acuerdo con su curva de demanda, en cada escenario la potencia inyectada en cada nodo se describe en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Valor de las potencias de inyección en cada escenario

Escenario	Potencia
1	$0,2 * S$
2	$0,6 * S$
3	$1 * S$
4	$0,4 * S$

Fuente: [Elaboración propia]

En la Tabla 2.6, S significa la potencia máxima de inyección en los nodos, esta potencia se la toma de los datos de entrada del alimentador por ejemplo en el escenario 1 la potencia con la que trabajaremos es el 20% de la potencia máxima.

El método recursivo se lo resuelve con la Ecuación 2.14. y tenemos:

Escenario 1-2:

Se calcula las potencias de pérdidas del escenario 2 y su predecesor las pérdidas del escenario 1.

Potencias del escenario 1:

$$P_{1,1} = 0,003$$

$$P_{1,2} = 0,0069$$

$$P_{1,3} = inf$$

$$P_{1,4} = inf$$

Potencias del escenario 2:

$$P_{2,1} = inf$$

$$P_{2,2} = 0,0242$$

$$P_{2,3} = 0,0283$$

$$P_{2,4} = inf$$

Se encuentran los pesos o variaciones de pérdidas de los estados de pasar del escenario 1 al escenario 2, aplicando la Ecuación 2.15.

$$\Delta P_{1,2} = P_{2,2} - P_{1,1} = 0,0242 - 0,003 = 0,0212$$

$$\Delta P_{1,3} = P_{2,3} - P_{1,1} = 0,0283 - 0,003 = 0,0253$$

$$\Delta P_{2,2} = P_{2,2} - P_{1,2} = 0,0242 - 0,0069 = 0,0173$$

$$\Delta P_{2,3} = P_{2,3} - P_{1,2} = 0,0283 - 0,0069 = 0,0214$$

Las demás trayectorias tienen un valor de infinito por ello no se toman en cuenta para el cálculo ya que incumple una de las restricciones, por esta razón se las descarte como lo muestra la Figura 2.8.

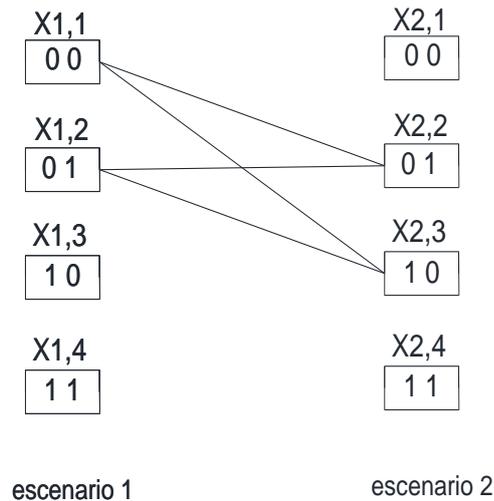


Figura 2.8. Trayectorias factibles desde el escenario 1 al escenario 2

Fuente: [Elaboración propia]

Se tiene que $f(X_{1,m}) = 0$

Se aplica la Ecuación 2.14 del método recursivo para encontrar $fX_{2,m}$ que son las pérdidas acumuladas hasta el escenario 2.

$$fX_{2,m} = \min_{X_{2,m}} \langle f(X_{1,m}) + R(X_{2,m}, X_{2m}) \rangle$$

$$fX_{2,2} = f(X_{1,1}) + R(X_{1,1}, X_{2,2}) = 0 + 0,0212 = 0,0212.$$

$$fX_{2,2} = f(X_{1,2}) + R(X_{1,2}, X_{2,2}) = 0 + 0,0173 = 0,0173$$

Se escoge el mínimo valor y tenemos:

$$fX_{2,2} = 0,0212$$

$$fX_{2,3} = f(X_{1,1}) + R(X_{1,1}, X_{2,3}) = 0 + 0,0253 = 0,0253$$

$$fX_{2,3} = f(X_{1,2}) + R(X_{1,2}, X_{2,3}) = 0 + 0,0214 = 0,0214$$

Se escoge el mínimo valor y se tiene:

$$fX_{2,2} = 0,0214$$

Estos valores se los va almacenado en la matriz de sumatoria de pesos (Sp) y su respectivo estado en la matriz de almacenamiento de trayectoria (Ub).

Escenario 2-3:

Se calcula las potencias de pérdidas del escenario 3 y su predecesor las pérdidas del escenario 2.

Potencias del escenario 2:

$$P_{2,1} = inf$$

$$P_{2,2} = 0,0242$$

$$P_{2,3} = 0,0283$$

$$P_{2,4} = inf$$

Potencias del escenario 3:

$$P_{3,1} = inf$$

$$P_{3,2} = inf$$

$$P_{3,3} = inf$$

$$P_{3,4} = 0,0785$$

Se encuentran los pesos o variaciones de pérdidas de los estados de pasar del escenario 2 al escenario 3, aplicando la Ecuación 2.15.

$$\Delta P_{2,4} = P_{3,4} - P_{2,2} = 0,0785 - 0,0242 = 0,0543$$

$$\Delta P_{3,4} = P_{3,4} - P_{2,3} = 0,0785 - 0,0283 = 0,0502$$

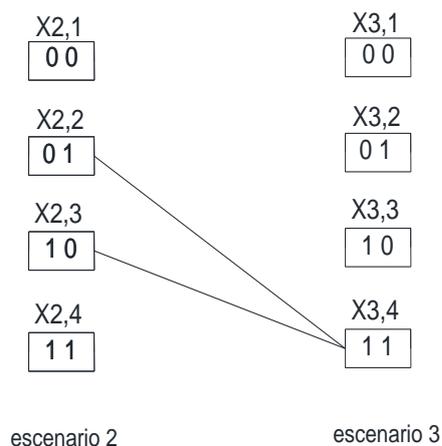


Figura 2.9. Trayectorias factibles desde el escenario 2 al escenario 3

Fuente: [Elaboración propia]

Se aplica la Ecuación 2.14 del método recursivo para encontrar $f_{X_{3,m}}$ que son las pérdidas acumuladas hasta el escenario 3.

$$f_{X_{3,m}} = \min_{X_{2,m}} (f(X_{2,m}) + R(X_{2,m}, X_{3,m}))$$

$$f_{X_{3,4}} = f(X_{2,2}) + R(X_{2,2}, X_{3,4}) = 0,0212 + 0,0543 = 0,0755$$

$$f_{X_{3,4}} = f(X_{2,3}) + R(X_{2,3}, X_{3,4}) = 0,0214 + 0,0502 = 0,0716$$

Se escoge el mínimo valor y tenemos:

$$f_{X_{3,4}} = 0,0716$$

Se guarda los resultados en memoria en las matrices creadas.

Escenario 3-4:

Se calcula las potencias de pérdidas del escenario 4 y su predecesor las pérdidas del escenario 3.

Potencias del escenario 3:

$$P_{3,1} = inf$$

$$P_{3,2} = inf$$

$$P_{3,3} = inf$$

$$P_{3,4} = 0,0785$$

Potencias del escenario 4:

$$P_{4,1} = inf$$

$$P_{4,2} = 0,0122$$

$$P_{4,3} = 0,0187$$

$$P_{4,4} = inf$$

Se encuentran los pesos o variaciones de pérdidas de los estados de pasar del escenario 3 al escenario 4, aplicando la Ecuación 2.15.

$$\Delta P_{4,2} = P_{4,2} - P_{3,4} = 0,0785 - 0,0242 = 0,0543$$

$$\Delta P_{4,3} = P_{4,3} - P_{3,4} = 0,0785 - 0,0283 = 0,0502$$

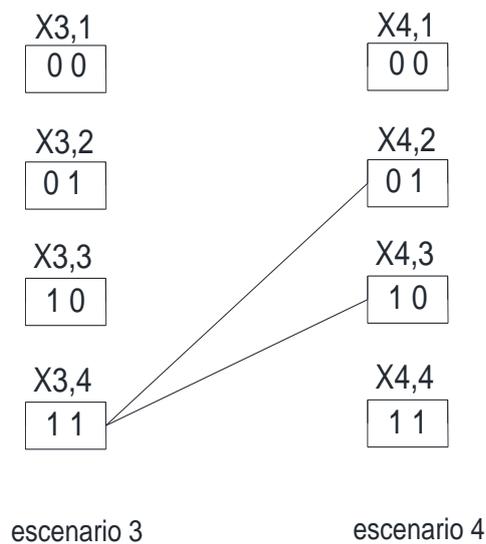


Figura 2.10. Trayectorias factibles desde el escenario 3 al escenario 4

Fuente: [Elaboración propia]

Se aplica la Ecuación 2.14 del método recursivo para encontrar $fX_{4,m}$ que son las pérdidas acumuladas hasta el escenario 3.

$$fX_{4,m} = \min_{X_{2,m}} (f(X_{2,m}) + R(X_{2,m}, X_{3,m}))$$

$$fX_{4,2} = f(X_{3,4}) + R(X_{3,4}, X_{3,4}) = 0,0716 + 0,0122 = 0,0838$$

$$fX_{4,3} = f(X_{3,4}) + R(X_{3,4}, X_{3,4}) = 0,0716 + 0,0187 = 0,0903$$

Se obtiene el valor de $fX_{n,op}$ que en nuestro ejercicio sería:

$f_{X_{4,2}} = 0,0716$, mínimas pérdidas aculadas desde el escenario 1 al escenario 4.

Con el mínimo valor se devuelve a la matriz de ubicaciones y se verifica el trayecto que tuvo este valor obteniendo los estados óptimos de los capacitores en todos los escenarios como muestra la Figura 2.11.

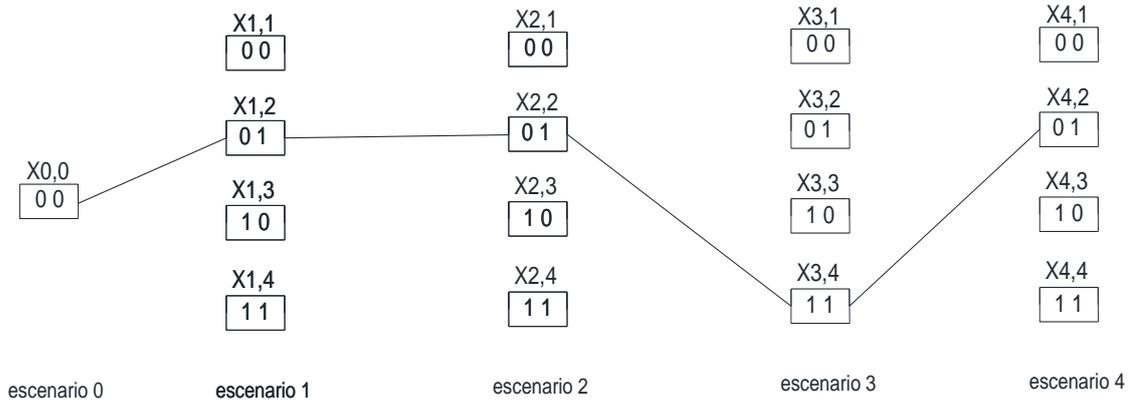


Figura 2.11. Trayectoria óptima del despacho

Fuente: [Elaboración propia]

Finalmente, con la Ecuación 2.11 se verifica el número de operaciones conexión/desconexión sean igual a K , si cumple la restricción lo obtenido es el despacho optimo sino se resuelve todo de nuevo cambiando el f_c (factor de switcheos), este factor evita el cambio de switcheos de un escenario n a uno $n + 1$, teniendo el mismo estado en n y $n + 1$ tal que cumple con la restricción de la Ecuación 2.12.

```

Command Window

OPERACIÓN ÓPTIMA DE CAPACITORES
=====

Operacion_cap =

     1     0     1
     2     0     1
     3     1     1
     4     0     1

num_Oper =

     1     1

fx >>

```

Figura 2.12. Operación óptima de capacitores del alimentador de 6 nodos - Número de operaciones conexión/desconexión de los capacitores

Fuente: [Elaboración propia]

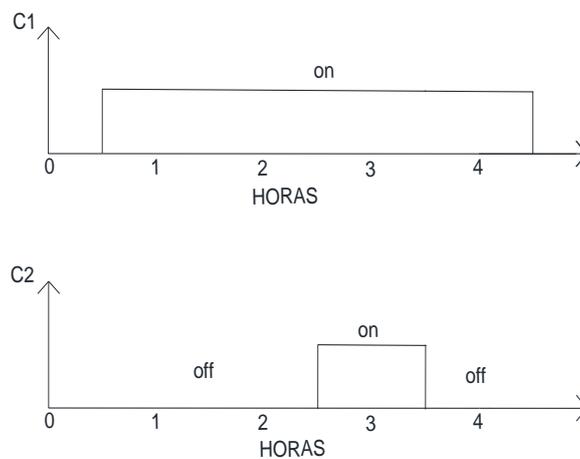


Figura 2.13. Operación óptima conexión/desconexión de los capacitores para n=4 escenarios

Fuente: [Elaboración propia]

Como se observa en la Figura 2.13 los capacitores operan $K = 1$, una operación conexión/desconexión.

Tabla 2.7. Resultados que muestran la reducción de pérdidas al realizar un despacho óptimo

Hora	P_on (kW)		P_óptimo (kW)	
1	(1,1)	37,3	(0,1)	6,9
2	(1,1)	45,3	(0,1)	24,2
3	(1,1)	78,5	(1,1)	78,5
4	(1,1)	38,6	(0,1)	12,2
Suma (kW)	199,7		121,7	
ΔP%	39			

Fuente: [Elaboración propia]

Como se observa en la Tabla 2.7 se reducen las pérdidas totales del sistema en un 39% optimizando la conexión/desconexión de los capacitores con relación a tener conectados todos los capacitores en los n escenarios.

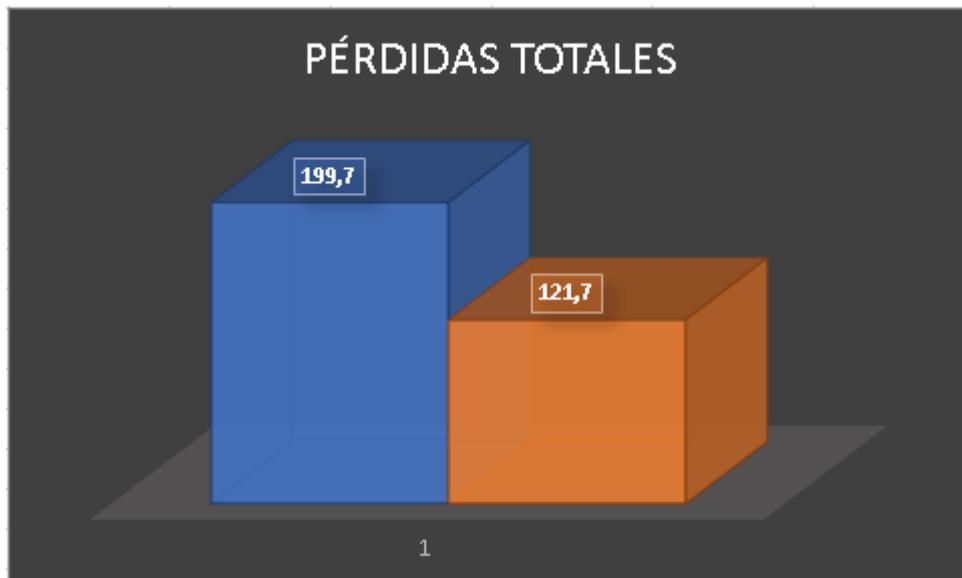


Figura 2.14. Potencia de pérdidas total

Fuente: [Elaboración propia]

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección probaremos los algoritmos de flujo de potencia para un sistema de distribución, así como el algoritmo del despacho óptimo de capacitores. Los resultados del flujo de potencia se verifican con el software *CYMDIST* y se determina el error en los valores obtenidos. Con el algoritmo del despacho óptimo de capacitores se verifica la reducción de pérdidas totales en el alimentador, se la realiza una comparación con todos los capacitores conectados y se observa el efecto en pérdidas y voltaje que produce.

3.1 Pruebas para el algoritmo de flujo de potencia

3.1.1 Sistema de prueba de 13 nodos

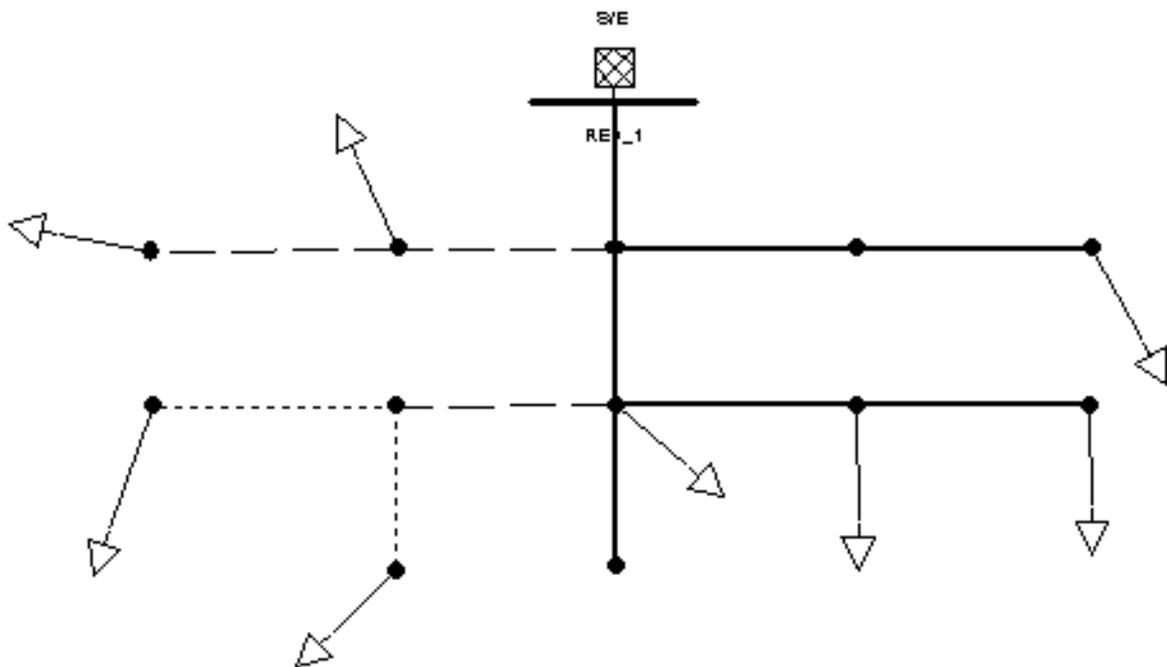


Figura 3.1. Sistema de prueba de 13 nodos

Fuente: [Elaboración propia]

Los datos de entrada para el sistema de 13 nodos se detallan en las Tablas 6.1 y 6.2 del ANEXO I.

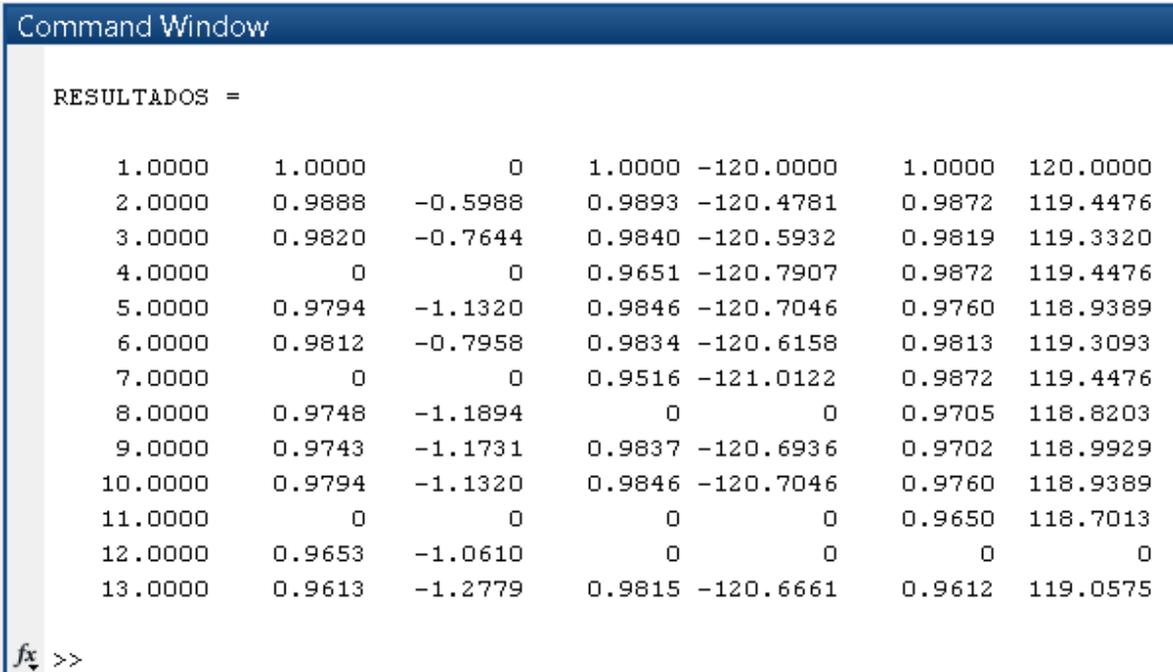


Figura 3.2. Resultados de la corrida del flujo de potencia (MATLAB)

Fuente: [Elaboración propia]

Los valores de cero en los voltajes obtenidos en la Figura 3.2 significan que esa fase no existe en el sistema.

Nombre nodo	VA (pu)	Angulo VA (°)	VB (pu)	Angulo VB (°)	VC (pu)	Angulo VC (°)
1	1,000	0,00	1,000	-120,00	1,000	120,00
2	0,989	-0,60	0,989	-120,48	0,987	119,45
3	0,982	-0,76	0,984	-120,59	0,982	119,33
6	0,981	-0,78	0,984	-120,61	0,981	119,32
4			0,965	-120,79	0,987	119,45
7			0,957	-120,92	0,987	119,45
5	0,979	-1,13	0,985	-120,70	0,976	118,94
8	0,975	-1,19			0,971	118,82
11					0,965	118,70
12	0,965	-1,06				
9	0,974	-1,17	0,984	-120,69	0,970	118,99
13	0,961	-1,28	0,982	-120,67	0,961	119,06
10	0,979	-1,13	0,985	-120,70	0,976	118,94

Flujo de carga - Barras

Figura 3.3. Resultados de la corrida del flujo de potencia (CYMDIST)

Fuente: [Elaboración propia]

En la Tabla 3.1 se observa la comparación de los resultados obtenidos en MATLAB con los del programa CYMDIST. Cálculo del error relativo.

Tabla 3.1. Cálculo del error de voltajes y ángulos en el sistema de 13 nodos.

Nodo	Error Relativo (%)					
	Error (Va)	Error(δa)	Error (Vb)	Error(δb)	Error (Vc)	Error(δc)
1	0	0	0	0	0	0
2	0,02	0,20	0,03	0	0,02	0
3	0	0,58	0	0,25	0,01	0
4	0	0	0,01	0	0,02	0
5	0,04	0,18	0,04	0	0	0
6	0,02	2,03	0,06	0	0,03	0
7	0	0	0,56	0,08	0,02	0
8	0,02	0,05	0	0	0,05	0
9	0,03	0,27	0,03	0	0,02	0,04
10	0,04	0,18	0,04	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0

Fuente: [Elaboración propia]

En la Tabla 3.1 se observa que los errores de voltaje y ángulos son casi despreciables. Se utiliza el algoritmo de flujos de potencia basado en la metodología *FORWARD/BACKWARD* que no tienen problemas de convergencia como el método de *Newton-Raphson*, esto se logra porque no se tiene una matriz grande como la *Ybarra*. Estas nuevas metodologías son las que aplica el software *CYMDIST*.

Tabla 3.2. Cálculo del error de pérdidas en el sistema de 13 nodos.

Rama	MATLAB			CYMDIST		
	P loss_a (kW)	P loss_b(kW)	P loss_c(kW)	P loss_a(kW)	P loss_b(kW)	P loss_c(kW)
1_2	6,6	5,2	7,2	6,6	5,2	7,2
2_3	0,8	0,5	0,5	0,7	0,5	0,5
2_4	0	8,7	0	0	8,6	0
2_5	4,8	1,1	5,7	4,9	1,1	5,7
3_6	0,1	0	0	0,1	0	0
4_7	0	2,7	0	0	1,6	0
5_8	0,5	0	0,8	0,5	0	0,8
5_9	2,5	0,1	3,1	2,5	0,1	3,1
5_10	0	0	0	0	0	0
8_11	0	0	0,8	0	0	0
8_12	1,4	0	0	1,5	0	0
8_13	6,2	0,2	2,9	6,2	0,2	4
SUMA	22,9	18,5	21	23	17,2	20,3
TOTAL	62,4			60,5		
Error (%)				3,2		

Fuente: [Elaboración propia]

En la Tabla 3.2 los valores de las pérdidas obtenidos en cada rama tienen un pequeño error. Al realizar la suma de todos los valores la diferencia en el error aumenta como se puede apreciar en la comparación de los resultados, obteniendo un error relativo del 3,2%. La variación en las pérdidas totales puede ser debido a que en *CYMDIST* modela de manera mucho más exacta cada elemento que compone el sistema de distribución.

El resultado de pérdidas totales es muy importante para la resolución del algoritmo del despacho óptimo de capacitores, por esta razón el error que se obtiene está en el rango permitido para continuar con el desarrollo del proyecto.

3.2 Pruebas para el algoritmo de flujo del despacho óptimo de capacitores

3.2.1 Sistema de prueba de 34 nodos

Los datos de entrada necesarios para el desarrollo del algoritmo del despacho óptimo de capacitores se detallan en las Tablas 6.3, 6.4, 6.5 y en la Figura 6.1.

Tabla 3.3. Comparación y cálculo de la variación de las pérdidas totales cuando los capacitores están conectados y con el despacho óptimo

HORA	P_on (kW)		P_óptimo (kW)	
1	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	30,5	(0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0)	3,7
2	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	30	(1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0)	4,6
3	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	29,5	(0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0)	6,2
4	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	29,4	(0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0)	7,3
5	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	29,3	(0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0)	8
6	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	29,4	(0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0)	8,6
7	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	30	(1, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0)	12,4
8	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	30,5	(0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0)	14
9	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	31,6	(0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0)	16,8
10	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	33,5	(0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1)	20,9
11	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	35,4	(1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1)	24,2
12	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	37,6	(1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1)	27,7
13	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	40,1	(0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1)	31,5
14	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	48,6	(1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1)	43
15	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	52,5	(1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1)	47,9
16	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	52,2	(0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1)	51,3
17	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	62,8	(1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1)	60,2
18	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	85,2	(1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1)	84,5
19	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	103,4	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	103,4
20	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	113,5	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	113,5
21	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	141,9	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	141,9
22	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	98,6	(1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1)	98,6
23	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	73,2	(1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1)	72
24	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	58,1	(1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1)	54,8
	Pérdidas totales (kW)	1306,8	Pérdidas totales (kW)	1057
	Variación de pérdidas (%)		19,1	

Fuente: [Elaboración propia]



Figura 3.5. Comparación de pérdidas totales del sistema con todos los capacitores conectados y utilizando el despacho óptimo
Fuente: [Elaboración propia]

La variación es del 19,1% un valor a tomar en cuenta en cuando a mejora en la calidad del servicio y menores pérdidas técnicas producidas lo que repercute en costos para la empresa distribuidora.

3.3 Aplicación del algoritmo del despacho óptimo de capacitores en el alimentador 01C de la EEQ.

Subestación N° 01 Olímpico:

Dispone de un transformador 15/20 MVA, 46/6.3 kV, cinco primarios ABCDE y un banco de condensadores de 4.5 MVAR. A diciembre, la demanda máxima de la subestación alcanzó 16.4 MVA, lo que implica el 82.1% de su capacidad instalada [31].

Se toma para la resolución del algoritmo del despacho óptimo de capacitores el alimentador C de la S/E 01 de la EEQ. Los datos se obtuvieron del programa *CYMDIST* como se detallan en las Tablas 6.6,6.7, 6.8 y la Figura 6.2 del ANEXO II.

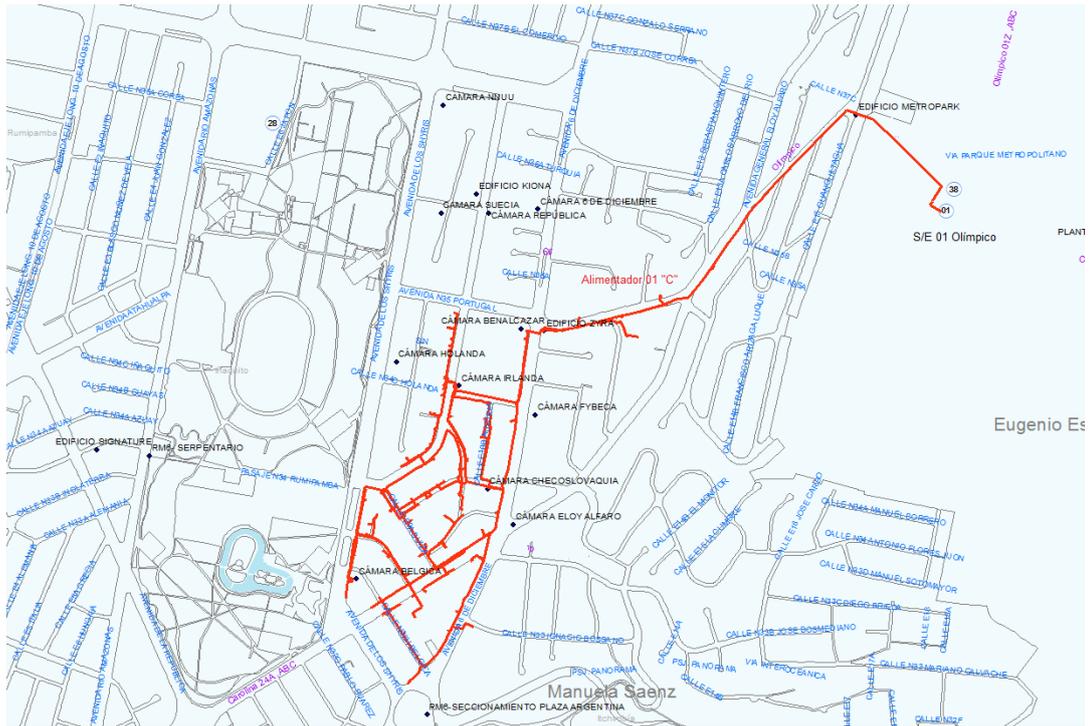


Figura 3.6. Alimentador 01C de la EEQ

Fuente: [Elaboración propia]

Tabla 3.4. Comparación y cálculo de la variación de las pérdidas totales cuando los capacitores están conectados y con el despacho óptimo

HORA	P_on (kW)		P_óptimo (kW)	
1	(1, 1, 1)	25,2	(0, 1, 1)	21,5
2	(1, 1, 1)	23,5	(0, 1, 1)	19,9
3	(1, 1, 1)	20,6	(0, 1, 1)	17,2
4	(1, 1, 1)	19,7	(0, 1, 1)	15,4
5	(1, 1, 1)	20,1	(0, 1, 1)	16,7
6	(1, 1, 1)	21,3	(0, 1, 1)	16,9
7	(1, 1, 1)	23,7	(0, 1, 1)	20,1
8	(1, 1, 1)	32,1	(1, 1, 1)	32,1
9	(1, 1, 1)	35,9	(1, 1, 1)	35,9
10	(1, 1, 1)	42,5	(1, 1, 1)	42,5
11	(1, 1, 1)	41	(1, 1, 1)	41
12	(1, 1, 1)	49,2	(1, 1, 1)	49,2
13	(1, 1, 1)	43,3	(1, 1, 1)	43,3
14	(1, 1, 1)	38,2	(1, 1, 1)	38,2
15	(1, 1, 1)	41	(1, 1, 1)	41
16	(1, 1, 1)	33,2	(1, 1, 1)	33,2
17	(1, 1, 1)	27,8	(1, 1, 1)	27,8

18	(1, 1, 1)	28,8	(1, 1, 1)	28,8
19	(1, 1, 1)	31,5	(1, 1, 1)	31,5
20	(1, 1, 1)	32,5	(1, 1, 1)	32,5
21	(1, 1, 1)	31,2	(1, 1, 1)	31,2
22	(1, 1, 1)	27,9	(1, 1, 1)	27,9
23	(1, 1, 1)	26,6	(0, 1, 1)	22,8
24	(1, 1, 1)	23,7	(0, 1, 1)	18,1
		740,5		704,7
Variación de pérdidas (%)			4,8	

Fuente: [Elaboración propia]

En la Tabla 3.4 se muestra que se redujo 4,8% las pérdidas totales del alimentador, la reducción de pérdidas es pequeña debido a que el alimentador bordea continuamente demandas altas y por lo tanto necesita continuamente la conexión del banco de capacitores para que sus voltajes no salgan de límite permitido. Además, el alimentador escogido posee muy pocas pérdidas en las ramas de todo el sistema siendo un sistema confiable y robusto.

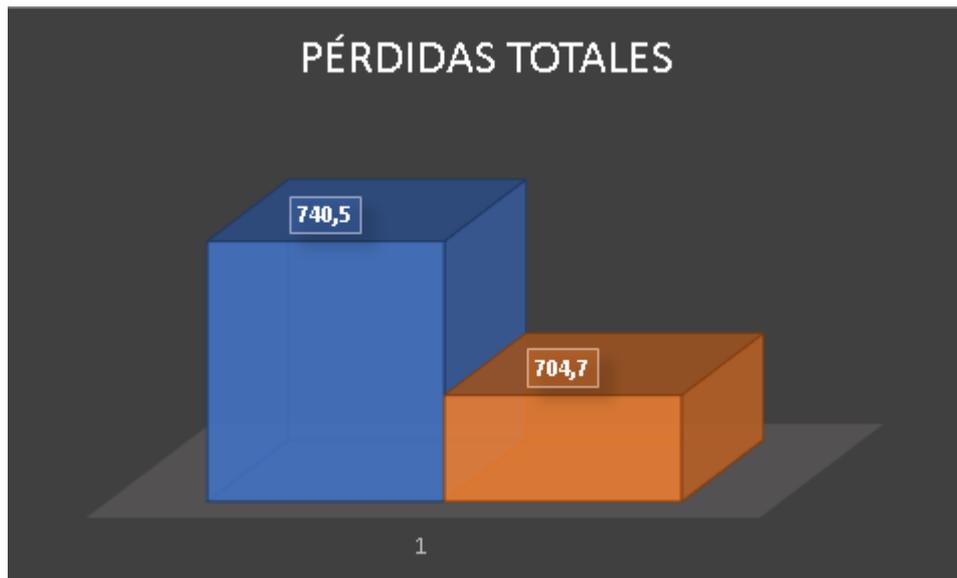


Figura 3.7. Comparación de pérdidas totales del sistema con todos los capacitores conectados y utilizando el despacho óptimo
Fuente: [Elaboración propia]

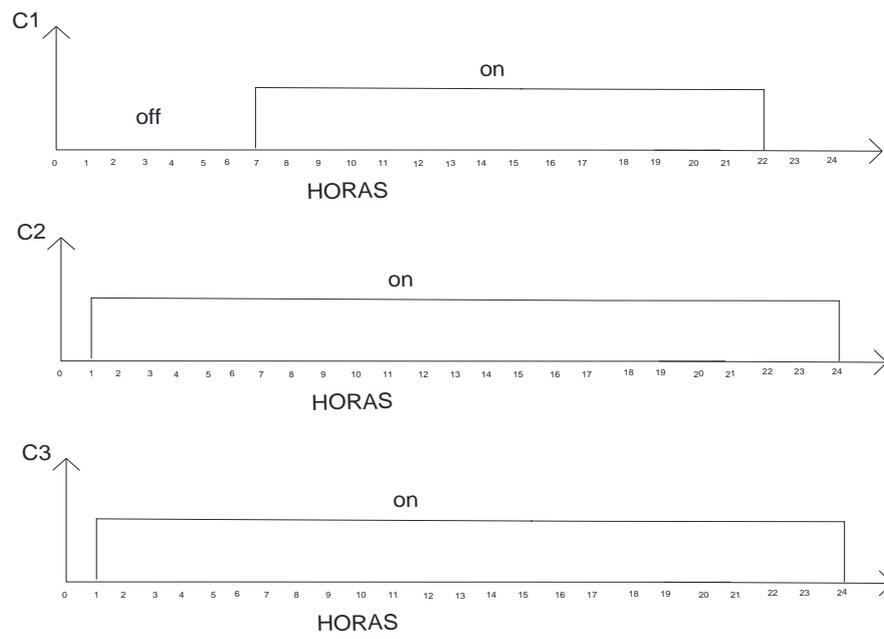


Figura 3.8. Operación óptima conexión/desconexión de los capacitores para n=24 escenarios

Fuente: [Elaboración propia]

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El flujo de potencia implementado para sistemas de distribución tiene tiempos de convergencia menores en comparación a métodos tradicionales como *Newton Raphson* debido a que no se aplica el uso de la matriz *Ybarra*, que al ser un sistema de distribución cuenta con muchos ceros en su estructura y complica la convergencia del flujo de potencia.
- El método *FORWARD/BACKWARD* facilita la convergencia en sistemas grandes de distribución ya que utiliza un método de selección de variables rápido y robusto, el método implementado se basa en la sumatoria de corrientes.
- El algoritmo de flujo de potencia presentado permite hacer un análisis de voltajes, ángulos, corrientes, pérdidas en cada rama, pérdidas totales del sistema, con requerimientos reducidos de memoria computacional.
- Con el despacho óptimo de capacitores se produce una reducción en las pérdidas totales del sistema, ya que los capacitores operan únicamente en los periodos donde el sistema necesita compensación.
- Con el despacho óptimo de capacitores se logra una mejora en los niveles de voltaje en cada nodo del sistema teniendo como resultado una mejora en el servicio y calidad de la energía eléctrica.
- Las pérdidas en el despacho óptimo de los capacitores en el alimentador 01C de la EEQ reducen en poco porcentaje, esto se debe a que el sistema escogido posee pequeñas pérdidas, además debido a su curva de demanda los capacitores deben estar conectados casi en todos los periodos del día.
- El algoritmo propuesto puede ser utilizado para análisis de sistemas de distribución con carga balanceada o desbalanceada, se debe tener cuidado con las potencias de entrada ya que para la ejecución del flujo resuelve cada fase como un sistema balanceado independiente de las demás fases.
- Con este algoritmo el operador podrá programar el despacho óptimo del banco de capacitores por cada día según la curva de demanda que se tenga proyectada para el día en análisis.

- Se recomienda para próximos trabajos de titulación incorporar al algoritmo los diferentes modelos de carga, en este proyecto se toma solo el modelo *PQ* para la carga.
- Se recomienda variar el algoritmo para que lee los datos de entrada de manera similar a los datos del *CYMDIST*, con esto evitaremos la demora en la toma de datos de entrada del programa.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CONELEC, “Estadística del sector eléctrico ecuatoriano,” Quito, 2011.
- [2] G. Estrada, “Metodología Técnico-económica de Localización de capacitores en Sistemas de Distribución para la Reducción de Pérdidas Eléctricas,” instituto Tecnológico de Morelia, 2003.
- [3] V. Chamorro, “Minimización de pérdidas de energía en alimentadores primarios de distribución mediante la instalación de capacitores paralelo. Método de variaciones locales,” Escuela Politécnica Nacional, 1986.
- [4] M. Galarza, “Localización óptima de capacitores en redes primarias de distribución vía algoritmos genéticos,” Escuela Politécnica Nacional, 2009.
- [5] G. Hidalgo and G. Paguay, “Reducción de pérdidas de energía eléctrica en los alimentadores mediante compensación reactiva considerando clienmtes finales industriales,” Escuela Politécnica Nacional, 2009.
- [6] I. Flores, “Programación Dinámica,” in 2010.
- [7] F. Hillier and G. Lieberman, *Introducción a la investigación de operaciones*, Novena., vol. 39, no. 5. Mexico: McGrawHill, 2010.
- [8] W. Warwick, T. Hardy, M. Hoffman, and J. Homer, “Electricity Distribution System Baseline Report,” Washington, 2016.
- [9] ABB, “Distribution Automation,” *Smart Grid*, pp. 301–331, 2014.
- [10] J. F. Franco, M. J. Rider, M. Lavorato, and R. Romero, “Electrical Power and Energy Systems A mixed-integer LP model for the optimal allocation of voltage regulators and capacitors in radial distribution systems,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 48, pp. 123–130, 2013.
- [11] I. J. Pérez-arriaga and H. Rudnick, “Electric Energy Systems—An Overview,” *Analysis and Operation*, 2009.
- [12] T. Ackermann, G. Andersson, and L. Söder, “Distributed Generation: A Definition,” *Electric Power Systems Research*, vol. 7796, no. August 2016, pp. 195–204, 2001.
- [13] M. E. Baran and F. F. Wu, “Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing,” *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 4, no. 2, pp. 1401–1407, 1989.
- [14] EEQ, *Normas para Sistemas de Distribución - Parte A. Guía para diseño de redes de distribución*. Quito: Empresa Eléctrica Quito S.A., 1997.
- [15] A. Chiguano, “Reducción de pérdidas y de la duración de las interrupciones en alimentadores primarios mediante su reconfiguración óptima. Estudio de Caso de la

- empresa Eléctrica Riobamba,” Escuela Politécnica Nacional, 2017.
- [16] ARCOTEL, “Estadística anual y multianual del Sector Eléctrico Ecuatoriano,” Quito, 2015.
- [17] SIEMENS, “Planning of Electric Power Distribution,” Erlangen, 2016.
- [18] C. Liu, S. J. Lee, S. Member, and S. S. Venkata, “An expert system operacional aid for restoration and loss reduction of ditribution systems,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 3, no. 2, 1988.
- [19] M. C. Anumaka, “ANALYSIS OF TECHNICAL LOSSES IN ELECTRICAL POWER SYSTEM (NIGERIAN 330KV NETWORK AS A CASE STUDY),” vol. 12, no. August, pp. 320–327, 2012.
- [20] RAE, “Capacitor,” *Diccionario*, 2015. [Online]. Available: <https://definicion.de/capacitor/>. [Accessed: 10-May-2018].
- [21] J. Rojas and A. Águila, “Óptima Compensación De La Potencia Reactiva En Redes De Distribución Eléctrica Basado En Simulated Annealing,” 2017.
- [22] L. A. Gallego, “Three phase unbalanced power flow in distribution systems with distributed generation,” no. 43, pp. 43–48, 2009.
- [23] J. Martínez and V. H. Quintana, “Optimas and Secure Operation of Transmission Systems,” *Analysis and Operation*, 2009.
- [24] A. González, “Selección de variables: Una revisión de métodos existentes,” Universidad da Coruña, 2015.
- [25] M. Resener, S. Haffner, L. A. Pereira, and P. M. Pardalos, “Optimization techniques applied to planning of electric power distribution systems : a bibliographic survey,” *Energy Systems*, 2018.
- [26] I. D. Oscar Miranda Urióstegui México, “Minimización De Pérdidas En Redes De Distribución Empleando Programación Dinámica,” 2009.
- [27] Y. Hsu and H. Kuo, “Dispatch of capacitors on distribution system using dinamic programming,” *IEEE International Conference on Computer, Communication, and Signal Processing*, vol. 14, no. S3, pp. 9–12, 1993.
- [28] R. M. de Castro, "Análisis de Flujos de Carga para el análisis de Redes de Distribución. Implementación del algoritmo Forward and Backward", Universidad Politécnica de Madrid, 2017.
- [29] Teng, J. H., "A Network-Topology Based Three-Phase Load Flow for Distribution Systems ," Proc. Natl. Sci. Counc. ROC(A), Vol. 24, No. 4, pp. 259-264, 200.

- [30] Eminoglu, U., Hocaoglu, M. H., "Distribution Systems Forward/Backward Sweep-based Flow Algorithms: A. Review and Comparison Study," *Electric Power Components and Systems*, Vol. 37, No. 1, 2009, pp. 91-110.
- [31] EEQ, *Plan de Expansión 2018-2023 del sistema de la EEQ Subtransmisión y Distribución mediano plazo*, Quito: Empresa Eléctrica Quito S.A., 2017.

6 ANEXOS

ANEXO I

Tabla 6.1. Datos de la línea del alimentador de 13 nodos

Nodo_envio	Nodo_recep	Ra pu.	Rb pu.	Rc pu.	Xa pu.	Xb pu.	Xc pu.
1	2	0,0012206	0,0012206	0,0012206	0,0035856	0,0035856	0,0035856
2	3	0,0066277	0,0066277	0,0066277	0,0104039	0,0104039	0,0104039
2	4	0	0,0117072	0,0117072	0	0,0118631	0,0118631
2	5	0,0012206	0,0012206	0,0012206	0,0035856	0,0035856	0,0035856
3	6	0,0006628	0,0006628	0,0006628	0,001557	0,001557	0,001557
4	7	0	0,0117072	0,0117072	0	0,0118631	0,0118631
5	8	0,0069948	0	0,0069948	0,0071379	0	0,0071379
5	9	0,0028117	0,0028117	0,0028117	0,0015721	0,0015721	0,0015721
5	10	0,0006995	0,0006995	0,0006995	0,0007138	0,0007138	0,0007138
8	11	0	0	0,0070254	0	0	0,00712
8	12	0,0189161	0	0	0,00722	0	0
9	13	0,0070293	0,0070293	0,0070293	0,0039303	0,0039303	0,0039303

Fuente: [Elaboración propia]

Tabla 6.2. Datos de carga del alimentador de 13 nodos

Nodo	Pa pu.	Pb pu.	Pc pu.	Qa pu.	Qb pu.	Qc pu.	V pu.	δa	δb	δc
1	0	0	0	0	0	0	1	0	-120	120
2	0	0	0	0	0	0	1	0	-120	120
3	0	0	0	0	0	0	1	0	-120	120
4	0	0,17	0	0	0,125	0	1	0	-120	120
5	0,385	0,385	0,385	0,22	0,22	0,22	1	0	-120	120
6	0,16	0,12	0,12	0,11	0,09	0,09	1	0	-120	120
7	0	0,23	0	0	0,132	0	1	0	-120	120
8	0	0	0	0	0	0	1	0	-120	120
9	0	0	0,17	0	0	0,151	1	0	-120	120
10	0	0	0	0	0	0	1	0	-120	120
11	0	0	0,17	0	0	0,08	1	0	-120	120
12	0,128	0	0	0,086	0	0	1	0	-120	120
13	0,485	0,068	0,29	0,19	0,06	0,212	1	0	-120	120

Fuente: [Elaboración propia]

Tabla 6.3. Datos de la línea del alimentador de 34 nodos

Nodo_envio	Nodo_recep	Ra_Linea	Rb_Linea	Rc_Linea	Xa_Linea	Xb_Linea	Xc_Linea
1	2	0.00096694	0.00096694	0.00096694	0.00039669	0.00039669	0.00039669
2	3	0.00088678	0.00088678	0.00088678	0.00036364	0.00036364	0.00036364
3	4	0.0013595	0.0013595	0.0013595	0.00037769	0.00037769	0.00037769
3	13	0.00129917	0.00129917	0.00129917	0.00022314	0.00022314	0.00022314
4	5	0.00123554	0.00123554	0.00123554	0.00034298	0.00034298	0.00034298
5	6	0.00123554	0.00123554	0.00123554	0.00034298	0.00034298	0.00034298
6	7	0.00259835	0.00259835	0.00259835	0.00044628	0.00044628	0.00044628
6	17	0.00148264	0.00148264	0.00148264	0.00041157	0.00041157	0.00041157
7	8	0.00173223	0.00173223	0.00173223	0.00029752	0.00029752	0.00029752
7	28	0.00129917	0.00129917	0.00129917	0.00022314	0.00022314	0.00022314
8	9	0.00259835	0.00259835	0.00259835	0.00044628	0.00044628	0.00044628
9	10	0.00173223	0.00173223	0.00173223	0.00029752	0.00029752	0.00029752
10	11	0.00108264	0.00108264	0.00108264	0.00018595	0.00018595	0.00018595
11	12	0.00086612	0.00086612	0.00086612	0.00014876	0.00014876	0.00014876
13	14	0.00173223	0.00173223	0.00173223	0.00029752	0.00029752	0.00029752
14	15	0.00086612	0.00086612	0.00086612	0.00014876	0.00014876	0.00014876
15	16	0.00043306	0.00043306	0.00043306	0.00007438	0.00007438	0.00007438
17	18	0.0013595	0.0013595	0.0013595	0.00037769	0.00037769	0.00037769
18	19	0.00171818	0.00171818	0.00171818	0.00039091	0.00039091	0.00039091
19	20	0.00156198	0.00156198	0.00156198	0.00035537	0.00035537	0.00035537
20	21	0.00156198	0.00156198	0.00156198	0.00035537	0.00035537	0.00035537
21	22	0.00216529	0.00216529	0.00216529	0.0003719	0.0003719	0.0003719
22	23	0.00216529	0.00216529	0.00216529	0.0003719	0.0003719	0.0003719
23	24	0.00259835	0.00259835	0.00259835	0.00044628	0.00044628	0.00044628
24	25	0.00173223	0.00173223	0.00173223	0.00029752	0.00029752	0.00029752
25	26	0.00108264	0.00108264	0.00108264	0.00018595	0.00018595	0.00018595
26	27	0.00086612	0.00086612	0.00086612	0.00014876	0.00014876	0.00014876
28	29	0.00129917	0.00129917	0.00129917	0.00022314	0.00022314	0.00022314
29	30	0.00129917	0.00129917	0.00129917	0.00129917	0.00129917	0.00129917
10	31	0.00129917	0.00129917	0.00129917	0.00022314	0.00022314	0.00022314
31	32	0.00173223	0.00173223	0.00173223	0.00029752	0.00029752	0.00029752
32	33	0.00129917	0.00129917	0.00129917	0.00022314	0.00022314	0.00022314
33	34	0.00086612	0.00086612	0.00086612	0.00014876	0.00014876	0.00014876

Fuente: [Elaboración propia]

Tabla 6.4. Datos de carga del alimentador de 34 nodos

Nodo	Pa. Dem	Pb. Dem	Pc. Dem	Qa. Dem	Qb. Dem	Qc. Dem	Voltaje	δa	δb	δc
1	0	0	0	0	0	0	1	0	-120	120
2	0,0766667	0,0766667	0,0766667	0,0475	0,0475	0,0475	1	0	-120	120
3	0	0	0	0	0	0	1	0	-120	120
4	0,0766667	0,0766667	0,0766667	0,0475	0,0475	0,0475	1	0	-120	120
5	0,0766667	0,0766667	0,0766667	0,0475	0,0475	0,0475	1	0	-120	120
6	0	0	0	0	0	0	1	0	-120	120
7	0	0	0	0	0	0	1	0	-120	120
8	0,0766667	0,0766667	0,0766667	0,0475	0,0475	0,0475	1	0	-120	120
9	0,0766667	0,0766667	0,0766667	0,0475	0,0475	0,0475	1	0	-120	120
10	0	0	0	0	0	0	1	0	-120	120
11	0,0766667	0,0766667	0,0766667	0,0475	0,0475	0,0475	1	0	-120	120
12	0,0456667	0,0456667	0,0456667	0,028	0,028	0,028	1	0	-120	120
13	0,024	0,024	0,024	0,015	0,015	0,015	1	0	-120	120
14	0,024	0,024	0,024	0,015	0,015	0,015	1	0	-120	120
15	0,024	0,024	0,024	0,015	0,015	0,015	1	0	-120	120
16	0,0045	0,0045	0,0045	0,0025	0,0025	0,0025	1	0	-120	120
17	0,0766667	0,0766667	0,0766667	0,0475	0,0475	0,0475	1	0	-120	120
18	0,0766667	0,0766667	0,0766667	0,0475	0,0475	0,0475	1	0	-120	120
19	0,0766667	0,0766667	0,0766667	0,0475	0,0475	0,0475	1	0	-120	120
20	0,0766667	0,0766667	0,0766667	0,0475	0,0475	0,0475	1	0	-120	120
21	0,0766667	0,0766667	0,0766667	0,0475	0,0475	0,0475	1	0	-120	120
22	0,0766667	0,0766667	0,0766667	0,0475	0,0475	0,0475	1	0	-120	120
23	0,0766667	0,0766667	0,0766667	0,0475	0,0475	0,0475	1	0	-120	120
24	0,0766667	0,0766667	0,0766667	0,0475	0,0475	0,0475	1	0	-120	120
25	0,0766667	0,0766667	0,0766667	0,0475	0,0475	0,0475	1	0	-120	120
26	0,0766667	0,0766667	0,0766667	0,0475	0,0475	0,0475	1	0	-120	120
27	0,0456667	0,0456667	0,0456667	0,0283333	0,0283333	0,0283333	1	0	-120	120
28	0,025	0,025	0,025	0,016	0,016	0,016	1	0	-120	120
29	0,025	0,025	0,025	0,016	0,016	0,016	1	0	-120	120
30	0,025	0,025	0,025	0,016	0,016	0,016	1	0	-120	120
31	0,019	0,019	0,019	0,0115	0,0115	0,0115	1	0	-120	120
32	0,019	0,019	0,019	0,0115	0,0115	0,0115	1	0	-120	120
33	0,019	0,019	0,019	0,0115	0,0115	0,0115	1	0	-120	120
34	0,019	0,019	0,019	0,0115	0,0115	0,0115	1	0	-120	120

Fuente: [Elaboración propia]

Tabla 6.5. Datos de la ubicación y capacidad de los capacitores conectados en el sistema de 34 nodos

Nodo	VaR pu.
5	0,3
8	0,3
10	0,3
17	0,3
18	0,3
21	0,3
23	0,3
25	0,3

Fuente: [Elaboración propia]

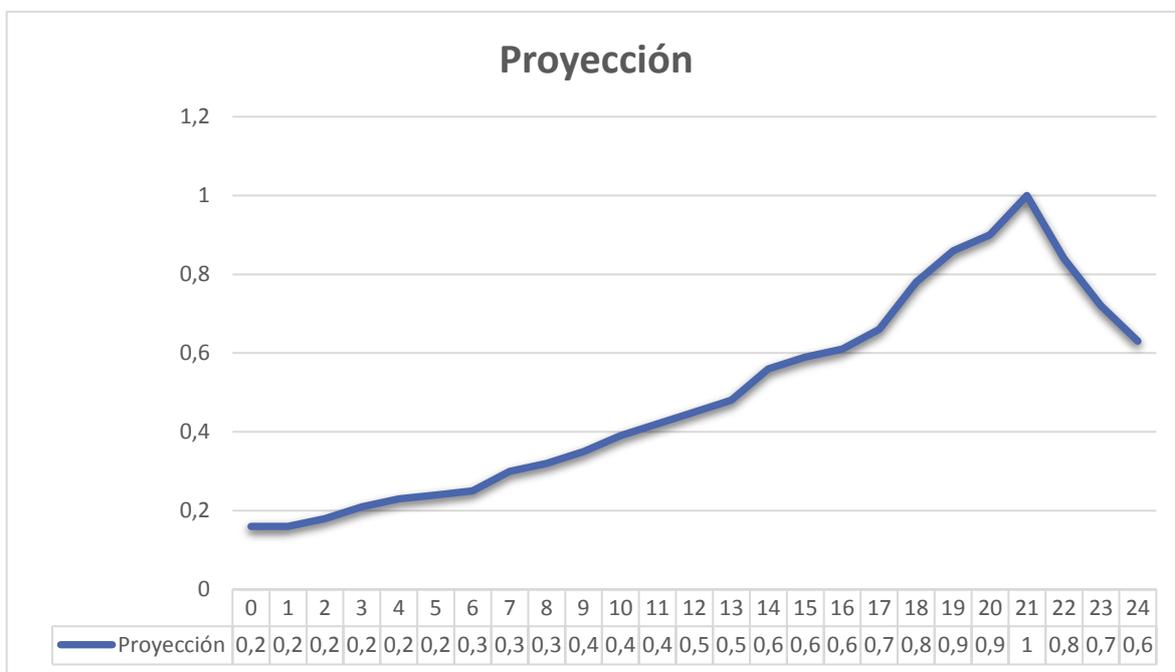


Figura 6.1. Curva de carga diario del sistema de 34 nodos

Fuente: [Elaboración propia]

ANEXO II

Tabla 6.6. Datos de la línea del alimentador 01C

Nodo envío	Nodo recep	Ra pu.	Rb pu.	Rc pu.	Xa pu.	Xb pu.	Xc pu.
1	2	0,010078105	0,010078105	0,010078105	0,068027211	0,068027211	0,068027211
2	3	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,007558579	0,007558579	0,007558579
3	4	0,005039053	0,005039053	0,005039053	0,020156211	0,020156211	0,020156211
4	5	0	0	0	0,002519526	0,002519526	0,002519526
5	6	0,085663895	0,085663895	0,085663895	0,362811791	0,360292265	0,355253212
6	7	0,113378685	0,115898211	0,115898211	0,486268582	0,481229529	0,478710003
7	8	0,115898211	0,115898211	0,115898211	0,498866213	0,496346687	0,491307634
8	607	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,002519526
8	9	0,065507685	0,065507685	0,068027211	0,287226002	0,284706475	0,282186949
9	10	0	0	0	0,002519526	0,002519526	0,002519526
10	11	0,070546737	0,070546737	0,070546737	0,304862686	0,302343159	0,299823633
11	12	0	0	0	0,002519526	0,002519526	0,002519526
12	13	0,035273369	0,037792895	0,037792895	0,156210632	0,156210632	0,153691106
13	14	0,030234316	0,030234316	0,030234316	0,128495843	0,128495843	0,128495843
14	15	0,040312421	0,040312421	0,040312421	0,176366843	0,176366843	0,173847317
15	16	0,022675737	0,022675737	0,022675737	0,100781053	0,100781053	0,098261527
16	17	0,017636684	0,017636684	0,017636684	0,073066264	0,070546737	0,070546737
17	18	0,042831948	0,042831948	0,042831948	0,188964475	0,186444948	0,183925422
18	19	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,010078105	0,010078105	0,010078105
19	20	0	0	0	0	0	0
19	23	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,005039053	0,005039053	0,005039053
23	24	0,02771479	0,02771479	0,02771479	0,120937264	0,120937264	0,118417737
24	25	0,017636684	0,017636684	0,017636684	0,080624843	0,080624843	0,080624843
25	26	0,020156211	0,020156211	0,020156211	0,085663895	0,083144369	0,083144369
26	27	0,025195263	0,025195263	0,025195263	0,113378685	0,113378685	0,110859158
27	28	0	0	0	0,002519526	0,002519526	0,002519526
28	29	0,030234316	0,030234316	0,030234316	0,194003527	0,194003527	0,194003527
29	30	0	0	0	0	0	0
29	33	0	0	0	0	0	0
29	34	0	0	0	0	0	0
34	35	0,115898211	0,115898211	0,115898211	0,760896951	0,760896951	0,760896951
35	36	0	0	0	0	0	0
36	309	0,02771479	0,02771479	0,02771479	0,078105316	0,078105316	0,078105316
309	310	0	0	0	0,002519526	0,002519526	0,002519526
310	311	0	0	0	0	0	0
310	314	0	0	0	0,002519526	0,002519526	0,002519526
314	315	0,040312421	0,040312421	0,040312421	0,118417737	0,118417737	0,118417737
315	316	0	0	0	0,002519526	0,002519526	0,002519526
316	317	0	0	0	0	0	0

316	320	0	0	0	0,002519526	0,002519526	0,002519526
321	320	0	0	0	0	0	0
322	321	0,068027211	0,068027211	0,068027211	0,191484001	0,191484001	0,191484001
322	323	0	0	0	0	0	0
326	322	0	0	0	0	0	0
327	326	0,012597632	0,012597632	0,012597632	0,020156211	0,020156211	0,020156211
328	327	0	0	0	0	0	0
328	329	0	0	0	0	0	0
332	328	0,256991686	0,256991686	0,256991686	0,418241371	0,418241371	0,418241371
39	332	0	0	0	0,002519526	0,002519526	0,002519526
39	302	0	0	0	0,002519526	0,002519526	0,002519526
302	172	0,251952633	0,251952633	0,251952633	1,645250693	1,645250693	1,645250693
172	173	0	0	0	0	0	0
172	176	0	0	0	0	0	0
176	177	0,022675737	0,022675737	0,022675737	0,068027211	0,068027211	0,068027211
177	178	0	0	0	0	0	0
172	181	0	0	0	0	0	0
172	182	0	0	0	0	0	0
182	183	0,040312421	0,040312421	0,040312421	0,118417737	0,118417737	0,118417737
183	184	0	0	0	0	0	0
39	304	0	0	0	0	0	0
307	39	0,148652053	0,148652053	0,148652053	0,970017637	0,970017637	0,970017637
29	307	0	0	0	0	0	0
39	40	0	0	0	0,002519526	0,002519526	0,002519526
40	41	0,083144369	0,083144369	0,083144369	0,337616528	0,337616528	0,337616528
41	277	0	0	0	0	0	0
277	278	0,055429579	0,055429579	0,055429579	0,224237843	0,224237843	0,224237843
278	279	0	0	0	0	0	0
278	282	0	0	0	0	0	0
282	283	0,07558579	0,07558579	0,07558579	0,307382212	0,307382212	0,307382212
283	284	0	0	0	0	0	0
283	287	0	0	0	0	0	0
287	288	0,022675737	0,022675737	0,022675737	0,093222474	0,093222474	0,093222474
288	289	0	0	0	0	0	0
288	292	0	0	0	0	0	0
292	293	0,035273369	0,035273369	0,035273369	0,141093474	0,141093474	0,141093474
293	294	0,103300579	0,103300579	0,103300579	0,420760897	0,420760897	0,420760897
294	295	0	0	0	0	0	0
293	298	0	0	0	0	0	0
283	301	0	0	0	0	0	0
41	42	0	0	0	0	0	0
41	45	0	0	0	0	0	0
45	46	0,015117158	0,015117158	0,015117158	0,025195263	0,025195263	0,025195263
46	47	0	0	0	0	0	0

41	50	0	0	0	0	0	0
50	51	0,035273369	0,035273369	0,035273369	0,146132527	0,146132527	0,146132527
51	52	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,005039053	0,005039053	0,005039053
52	53	0,022675737	0,022675737	0,022675737	0,062988158	0,062988158	0,062988158
53	54	0,015117158	0,015117158	0,015117158	0,045351474	0,042831948	0,042831948
54	55	0	0	0	0,002519526	0,002519526	0,002519526
55	56	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,005039053	0,005039053	0,005039053
56	57	0	0	0	0,002519526	0,002519526	0,002519526
57	58	0,010078105	0,010078105	0,010078105	0,030234316	0,030234316	0,030234316
58	120	0,060468632	0,060468632	0,060468632	0,095742001	0,095742001	0,095742001
120	121	0	0	0	0	0	0
120	124	0	0	0	0,002519526	0,002519526	0,002519526
124	125	0,025195263	0,025195263	0,025195263	0,062988158	0,062988158	0,062988158
125	126	0	0	0	0	0	0
58	129	0,015117158	0,015117158	0,015117158	0,045351474	0,045351474	0,045351474
129	130	0,030234316	0,030234316	0,030234316	0,088183422	0,085663895	0,085663895
130	131	0	0	0	0	0	0
134	130	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,007558579	0,007558579	0,007558579
134	135	0,020156211	0,020156211	0,020156211	0,055429579	0,055429579	0,055429579
135	136	0,017636684	0,017636684	0,017636684	0,055429579	0,055429579	0,052910053
136	137	0,095742001	0,095742001	0,095742001	0,103300579	0,103300579	0,103300579
137	138	0	0	0	0	0	0
135	141	0,022675737	0,022675737	0,022675737	0,025195263	0,025195263	0,025195263
141	142	0	0	0	0	0	0
134	145	0,005039053	0,005039053	0,005039053	0,017636684	0,017636684	0,017636684
146	145	0	0	0	0,002519526	0,002519526	0,002519526
147	146	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,005039053	0,005039053	0,005039053
148	147	0,015117158	0,015117158	0,015117158	0,045351474	0,045351474	0,045351474
149	148	0,017636684	0,017636684	0,017636684	0,050390527	0,047871	0,047871
149	150	0,010078105	0,010078105	0,010078105	0,02771479	0,02771479	0,02771479
150	151	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,005039053	0,005039053	0,005039053
151	152	0	0	0	0	0	0
151	155	0,032753842	0,032753842	0,032753842	0,095742001	0,095742001	0,093222474
155	156	0,015117158	0,015117158	0,015117158	0,045351474	0,045351474	0,045351474
156	157	0	0	0	0	0	0
155	160	0,025195263	0,025195263	0,025195263	0,073066264	0,073066264	0,070546737
161	149	0,055429579	0,055429579	0,055429579	0,088183422	0,088183422	0,088183422
162	161	0	0	0	0	0	0
162	163	0	0	0	0	0	0
166	162	0,047871	0,047871	0,047871	0,138573948	0,138573948	0,138573948
167	166	0	0	0	0	0	0
167	168	0	0	0	0	0	0
171	167	0,131015369	0,131015369	0,131015369	0,372889897	0,372889897	0,372889897
172	171	0	0	0	0	0	0

167	187	0	0	0	0	0	0
187	188	0,02771479	0,02771479	0,02771479	0,078105316	0,078105316	0,078105316
188	189	0	0	0	0	0	0
188	192	0	0	0	0	0	0
192	193	0,037792895	0,037792895	0,037792895	0,105820106	0,105820106	0,105820106
193	194	0	0	0	0	0	0
188	197	0	0	0	0,002519526	0,002519526	0,002519526
197	198	0,085663895	0,085663895	0,085663895	0,24691358	0,24691358	0,24691358
198	199	0	0	0	0	0	0
198	202	0	0	0	0	0	0
202	203	0,037792895	0,037792895	0,037792895	0,062988158	0,062988158	0,062988158
203	204	0	0	0	0	0	0
207	188	0	0	0	0,002519526	0,002519526	0,002519526
208	207	0,105820106	0,105820106	0,105820106	0,304862686	0,304862686	0,304862686
172	208	0	0	0	0	0	0
167	210	0	0	0	0	0	0
210	211	0,060468632	0,060468632	0,060468632	0,176366843	0,176366843	0,176366843
211	212	0,042831948	0,042831948	0,042831948	0,12345679	0,12345679	0,12345679
212	213	0	0	0	0	0	0
211	216	0	0	0	0	0	0
162	219	0	0	0	0	0	0
219	220	0,02771479	0,02771479	0,02771479	0,078105316	0,078105316	0,078105316
220	221	0	0	0	0	0	0
221	222	0,125976316	0,125976316	0,125976316	0,206601159	0,206601159	0,206601159
222	223	0	0	0	0	0	0
220	226	0	0	0	0	0	0
226	227	0,017636684	0,017636684	0,017636684	0,050390527	0,050390527	0,050390527
227	228	0	0	0	0	0	0
220	231	0	0	0	0	0	0
234	134	0,020156211	0,020156211	0,022675737	0,062988158	0,062988158	0,060468632
234	235	0	0	0	0	0	0
238	234	0,025195263	0,025195263	0,025195263	0,070546737	0,070546737	0,068027211
239	238	0,017636684	0,017636684	0,017636684	0,052910053	0,050390527	0,050390527
240	239	0	0	0	0,002519526	0,002519526	0,002519526
241	240	0,007558579	0,007558579	0,007558579	0,052910053	0,052910053	0,052910053
242	241	0	0	0	0	0	0
242	243	0	0	0	0	0	0
246	242	0	0	0	0	0	0
181	246	0,045351474	0,045351474	0,045351474	0,289745528	0,289745528	0,289745528
238	248	0,022675737	0,022675737	0,022675737	0,068027211	0,068027211	0,068027211
248	249	0,020156211	0,020156211	0,020156211	0,062988158	0,062988158	0,062988158
249	250	0,015117158	0,015117158	0,015117158	0,052910053	0,052910053	0,052910053
250	251	0,005039053	0,005039053	0,005039053	0,015117158	0,015117158	0,012597632
251	252	0	0	0	0	0	0

251	255	0,047871	0,047871	0,047871	0,143613001	0,143613001	0,141093474
255	256	0	0	0	0	0	0
250	259	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,002519526
259	260	0,012597632	0,012597632	0,012597632	0,015117158	0,015117158	0,015117158
260	261	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,005039053	0,005039053	0,005039053
248	264	0	0	0	0,002519526	0,002519526	0,002519526
264	265	0,015117158	0,015117158	0,015117158	0,045351474	0,045351474	0,045351474
265	266	0	0	0	0	0	0
265	269	0,125976316	0,125976316	0,125976316	0,136054422	0,136054422	0,136054422
269	270	0	0	0	0	0	0
238	273	0,005039053	0,005039053	0,005039053	0,017636684	0,017636684	0,017636684
273	274	0	0	0	0	0	0
58	59	0,005039053	0,005039053	0,005039053	0,017636684	0,017636684	0,017636684
59	110	0	0	0	0,002519526	0,002519526	0,002519526
110	111	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,007558579	0,007558579	0,007558579
111	112	0	0	0	0	0	0
111	115	0	0	0	0	0	0
115	116	0,158730159	0,158730159	0,158730159	0,256991686	0,256991686	0,256991686
116	117	0	0	0	0	0	0
59	60	0	0	0	0,002519526	0,002519526	0,002519526
60	61	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,005039053	0,005039053	0,005039053
61	62	0,012597632	0,012597632	0,012597632	0,040312421	0,040312421	0,040312421
62	63	0,02771479	0,02771479	0,02771479	0,090702948	0,090702948	0,088183422
63	64	0,035273369	0,035273369	0,035273369	0,108339632	0,108339632	0,105820106
64	65	0,017636684	0,017636684	0,017636684	0,057949106	0,057949106	0,055429579
65	66	0	0	0	0	0	0
64	69	0,012597632	0,012597632	0,012597632	0,040312421	0,040312421	0,037792895
69	70	0,025195263	0,025195263	0,025195263	0,02771479	0,02771479	0,02771479
70	71	0	0	0	0	0	0
63	74	0,032753842	0,032753842	0,032753842	0,052910053	0,052910053	0,052910053
74	75	0	0	0	0	0	0
74	78	0	0	0	0	0	0
78	79	0,037792895	0,037792895	0,037792895	0,062988158	0,062988158	0,062988158
79	80	0	0	0	0	0	0
62	83	0,012597632	0,012597632	0,012597632	0,040312421	0,037792895	0,037792895
83	105	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,002519526
105	106	0,025195263	0,025195263	0,025195263	0,040312421	0,040312421	0,040312421
106	107	0	0	0	0	0	0
83	84	0,032753842	0,032753842	0,032753842	0,108339632	0,108339632	0,105820106
84	85	0,022675737	0,022675737	0,022675737	0,070546737	0,070546737	0,070546737
85	86	0	0	0	0	0	0
85	89	0,042831948	0,042831948	0,042831948	0,138573948	0,136054422	0,136054422
84	90	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,002519526
90	91	0,035273369	0,035273369	0,035273369	0,055429579	0,055429579	0,055429579

91	92	0	0	0	0	0	0
83	95	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,002519526
95	96	0,010078105	0,010078105	0,010078105	0,015117158	0,015117158	0,015117158
96	100	0	0	0	0	0	0
100	101	0,007558579	0,007558579	0,007558579	0,012597632	0,012597632	0,012597632
101	102	0	0	0	0	0	0
96	97	0	0	0	0	0	0
328	334	0	0	0	0	0	0
334	335	0,07558579	0,07558579	0,07558579	0,12345679	0,12345679	0,12345679
335	336	0	0	0	0	0	0
335	339	0	0	0	0,002519526	0,002519526	0,002519526
339	340	0,005039053	0,005039053	0,005039053	0,012597632	0,012597632	0,012597632
340	341	0,078105316	0,078105316	0,078105316	0,188964475	0,188964475	0,188964475
341	342	0	0	0	0	0	0
328	345	0	0	0	0	0	0
345	346	0,040312421	0,040312421	0,040312421	0,062988158	0,062988158	0,062988158
346	347	0	0	0	0	0	0
310	350	0	0	0	0,002519526	0,002519526	0,002519526
350	351	0,052910053	0,052910053	0,052910053	0,15117158	0,15117158	0,15117158
351	352	0	0	0	0	0	0
351	355	0	0	0	0	0	0
355	356	0,105820106	0,105820106	0,105820106	0,302343159	0,302343159	0,302343159
356	357	0	0	0	0	0	0
357	358	0,012597632	0,012597632	0,012597632	0,035273369	0,035273369	0,035273369
359	358	0	0	0	0	0	0
359	360	0	0	0	0	0	0
363	359	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,002519526
364	363	0,068027211	0,068027211	0,068027211	0,108339632	0,108339632	0,108339632
364	365	0	0	0	0	0	0
368	364	0	0	0	0	0	0
369	368	0,100781053	0,100781053	0,100781053	0,166288738	0,166288738	0,166288738
370	369	0	0	0	0,002519526	0,002519526	0,002519526
371	370	0,055429579	0,055429579	0,055429579	0,224237843	0,224237843	0,224237843
372	371	0	0	0	0	0	0
39	372	0	0	0	0,002519526	0,002519526	0,002519526
369	374	0	0	0	0,002519526	0,002519526	0,002519526
374	375	0,148652053	0,148652053	0,148652053	0,244394054	0,244394054	0,244394054
375	376	0	0	0	0	0	0
375	379	0	0	0	0,002519526	0,002519526	0,002519526
379	380	0,020156211	0,020156211	0,020156211	0,060468632	0,060468632	0,060468632
380	381	0	0	0	0	0	0
375	384	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,002519526
384	385	0,357772739	0,357772739	0,357772739	0,388007055	0,388007055	0,388007055
385	386	0	0	0	0	0	0

375	389	0	0	0	0,002519526	0,002519526	0,002519526
389	390	0,040312421	0,040312421	0,040312421	0,115898211	0,115898211	0,115898211
390	391	0	0	0	0	0	0
390	394	0	0	0	0	0	0
394	395	0,030234316	0,030234316	0,030234316	0,085663895	0,085663895	0,085663895
395	396	0	0	0	0	0	0
395	399	0	0	0	0	0	0
399	400	0,042831948	0,042831948	0,042831948	0,070546737	0,070546737	0,070546737
400	401	0	0	0	0	0	0
400	404	0	0	0	0	0	0
404	405	0,010078105	0,010078105	0,010078105	0,032753842	0,032753842	0,032753842
405	406	0	0	0	0	0	0
390	409	0	0	0	0	0	0
409	410	0,030234316	0,030234316	0,030234316	0,083144369	0,083144369	0,083144369
410	411	0	0	0	0	0	0
410	414	0	0	0	0	0	0
414	415	0,055429579	0,055429579	0,055429579	0,158730159	0,158730159	0,158730159
415	416	0	0	0	0	0	0
415	419	0	0	0	0	0	0
415	422	0,045351474	0,045351474	0,045351474	0,125976316	0,125976316	0,125976316
422	423	0	0	0	0	0	0
415	426	0	0	0	0	0	0
426	427	0,047871	0,047871	0,047871	0,136054422	0,136054422	0,136054422
427	428	0	0	0	0	0	0
427	431	0	0	0	0	0	0
431	432	0,022675737	0,022675737	0,022675737	0,065507685	0,065507685	0,065507685
432	433	0	0	0	0	0	0
427	436	0	0	0	0	0	0
436	437	0,052910053	0,052910053	0,052910053	0,153691106	0,153691106	0,153691106
437	438	0	0	0	0	0	0
369	441	0	0	0	0,002519526	0,002519526	0,002519526
441	442	0,07558579	0,07558579	0,07558579	0,12345679	0,12345679	0,12345679
442	443	0	0	0	0	0	0
369	446	0	0	0	0	0	0
357	449	0	0	0	0	0	0
36	37	0	0	0	0	0	0
38	37	0,100781053	0,100781053	0,100781053	0,662635425	0,662635425	0,662635425
39	38	0	0	0	0,002519526	0,002519526	0,002519526
36	452	0	0	0	0	0	0
452	453	0,118417737	0,118417737	0,118417737	0,340136054	0,340136054	0,340136054
453	454	0,022675737	0,022675737	0,022675737	0,035273369	0,035273369	0,035273369
454	455	0	0	0	0	0	0
453	458	0	0	0	0,002519526	0,002519526	0,002519526
458	459	0,042831948	0,042831948	0,042831948	0,12345679	0,12345679	0,12345679

459	460	0	0	0	0	0	0
459	463	0	0	0	0	0	0
463	464	0,098261527	0,098261527	0,098261527	0,105820106	0,105820106	0,105820106
464	465	0	0	0	0	0	0
464	468	0	0	0	0	0	0
464	471	0	0	0	0	0	0
471	472	0,020156211	0,020156211	0,020156211	0,055429579	0,055429579	0,055429579
472	473	0	0	0	0	0	0
472	476	0	0	0	0	0	0
476	477	0,083144369	0,083144369	0,083144369	0,196523054	0,196523054	0,196523054
477	478	0	0	0	0	0	0
477	481	0	0	0	0	0	0
481	482	0,055429579	0,055429579	0,055429579	0,090702948	0,090702948	0,090702948
482	483	0	0	0	0	0	0
482	486	0	0	0	0	0	0
486	487	0,062988158	0,062988158	0,062988158	0,103300579	0,103300579	0,103300579
487	488	0	0	0	0	0	0
487	491	0	0	0	0	0	0
491	492	0,025195263	0,025195263	0,025195263	0,073066264	0,073066264	0,073066264
492	493	0	0	0	0	0	0
492	496	0	0	0	0	0	0
496	497	0,042831948	0,042831948	0,042831948	0,070546737	0,070546737	0,070546737
497	498	0	0	0	0	0	0
497	501	0	0	0	0	0	0
501	502	0,007558579	0,007558579	0,007558579	0,020156211	0,020156211	0,020156211
502	503	0	0	0	0	0	0
492	506	0	0	0	0	0	0
506	507	0,025195263	0,025195263	0,025195263	0,040312421	0,040312421	0,040312421
507	508	0	0	0	0	0	0
36	511	0	0	0	0	0	0
511	512	0,042831948	0,042831948	0,042831948	0,125976316	0,125976316	0,125976316
512	513	0	0	0	0	0	0
512	516	0	0	0	0	0	0
516	517	0,055429579	0,055429579	0,055429579	0,057949106	0,057949106	0,057949106
517	518	0	0	0	0	0	0
518	519	0	0	0	0	0	0
517	522	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,002519526
522	523	0,025195263	0,025195263	0,025195263	0,040312421	0,040312421	0,040312421
523	524	0	0	0	0	0	0
523	527	0	0	0	0	0	0
527	528	0,030234316	0,030234316	0,030234316	0,047871	0,047871	0,047871
528	529	0	0	0	0,002519526	0,002519526	0,002519526
529	530	0	0	0	0,002519526	0,002519526	0,002519526
528	533	0	0	0	0	0	0

533	534	0,209120685	0,209120685	0,209120685	0,22675737	0,22675737	0,22675737
534	535	0	0	0	0	0	0
512	538	0	0	0	0	0	0
538	539	0,070546737	0,070546737	0,070546737	0,166288738	0,166288738	0,166288738
539	540	0	0	0	0	0	0
539	543	0	0	0	0,002519526	0,002519526	0,002519526
543	544	0,047871	0,047871	0,047871	0,07558579	0,07558579	0,07558579
544	545	0	0	0	0	0	0
544	548	0	0	0	0,002519526	0,002519526	0,002519526
548	549	0,103300579	0,103300579	0,103300579	0,168808264	0,168808264	0,168808264
549	550	0	0	0	0	0	0
549	553	0	0	0	0,002519526	0,002519526	0,002519526
29	554	0	0	0	0	0	0
554	555	0,138573948	0,138573948	0,138573948	0,559334845	0,559334845	0,559334845
555	556	0	0	0	0	0	0
29	559	0	0	0	0	0	0
559	560	0,010078105	0,010078105	0,010078105	0,068027211	0,068027211	0,068027211
560	561	0	0	0	0	0	0
26	564	0	0	0	0,002519526	0,002519526	0,002519526
564	565	0,037792895	0,037792895	0,037792895	0,062988158	0,062988158	0,062988158
565	566	0	0	0	0	0	0
26	569	0	0	0	0,002519526	0,002519526	0,002519526
569	570	0,068027211	0,068027211	0,068027211	0,19904258	0,19904258	0,19904258
570	571	0	0	0	0,002519526	0,002519526	0,002519526
571	572	0	0	0	0,002519526	0,002519526	0,002519526
572	573	0	0	0	0	0	0
573	574	0	0	0	0	0	0
24	577	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,002519526
577	578	0,02771479	0,02771479	0,02771479	0,030234316	0,030234316	0,030234316
578	579	0	0	0	0	0	0
578	582	0,103300579	0,103300579	0,103300579	0,299823633	0,299823633	0,299823633
582	583	0	0	0	0	0	0
23	586	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,002519526
586	587	0,012597632	0,012597632	0,012597632	0,012597632	0,012597632	0,012597632
587	588	0	0	0	0	0	0
17	591	0,065507685	0,065507685	0,065507685	0,103300579	0,103300579	0,103300579
591	592	0,02771479	0,02771479	0,02771479	0,080624843	0,080624843	0,080624843
592	593	0	0	0	0	0	0
591	596	0	0	0	0	0	0
14	599	0	0	0	0	0	0
13	602	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,002519526	0,002519526
602	603	0,020156211	0,020156211	0,020156211	0,035273369	0,035273369	0,035273369
21	22	0	0	0	0	0	0
31	32	0	0	0	0	0	0

43	44	0	0	0	0	0	0
48	49	0	0	0	0	0	0
67	68	0	0	0	0	0	0
72	73	0	0	0	0	0	0
76	77	0	0	0	0	0	0
81	82	0	0	0	0	0	0
87	88	0	0	0	0	0	0
93	94	0	0	0	0	0	0
98	99	0	0	0	0	0	0
103	104	0	0	0	0	0	0
108	109	0	0	0	0	0	0
113	114	0	0	0	0	0	0
118	119	0	0	0	0	0	0
122	123	0	0	0	0	0	0
127	128	0	0	0	0	0	0
132	133	0	0	0	0	0	0
139	140	0	0	0	0	0	0
143	144	0	0	0	0	0	0
153	154	0	0	0	0	0	0
158	159	0	0	0	0	0	0
164	165	0	0	0	0	0	0
169	170	0	0	0	0	0	0
174	175	0	0	0	0	0	0
179	180	0	0	0	0	0	0
185	186	0	0	0	0	0	0
190	191	0	0	0	0	0	0
195	196	0	0	0	0	0	0
200	201	0	0	0	0	0	0
205	206	0	0	0	0	0	0
214	215	0	0	0	0	0	0
217	218	0	0	0	0	0	0
224	225	0	0	0	0	0	0
229	230	0	0	0	0	0	0
232	233	0	0	0	0	0	0
236	237	0	0	0	0	0	0
244	245	0	0	0	0	0	0
253	254	0	0	0	0	0	0
257	258	0	0	0	0	0	0
262	263	0	0	0	0	0	0
267	268	0	0	0	0	0	0
271	272	0	0	0	0	0	0
275	276	0	0	0	0	0	0
280	281	0	0	0	0	0	0
285	286	0	0	0	0	0	0

290	291	0	0	0	0	0	0
296	297	0	0	0	0	0	0
299	300	0	0	0	0	0	0
305	306	0	0	0	0	0	0
312	313	0	0	0	0	0	0
318	319	0	0	0	0	0	0
324	325	0	0	0	0	0	0
330	331	0	0	0	0	0	0
337	338	0	0	0	0	0	0
343	344	0	0	0	0	0	0
348	349	0	0	0	0	0	0
353	354	0	0	0	0	0	0
361	362	0	0	0	0	0	0
366	367	0	0	0	0	0	0
377	378	0	0	0	0	0	0
382	383	0	0	0	0	0	0
387	388	0	0	0	0	0	0
392	393	0	0	0	0	0	0
397	398	0	0	0	0	0	0
402	403	0	0	0	0	0	0
407	408	0	0	0	0	0	0
412	413	0	0	0	0	0	0
417	418	0	0	0	0	0	0
420	421	0	0	0	0	0	0
424	425	0	0	0	0	0	0
429	430	0	0	0	0	0	0
434	435	0	0	0	0	0	0
439	440	0	0	0	0	0	0
444	445	0	0	0	0	0	0
447	448	0	0	0	0	0	0
450	451	0	0	0	0	0	0
456	457	0	0	0	0	0	0
461	462	0	0	0	0	0	0
466	467	0	0	0	0	0	0
469	470	0	0	0	0	0	0
474	475	0	0	0	0	0	0
479	480	0	0	0	0	0	0
484	485	0	0	0	0	0	0
489	490	0	0	0	0	0	0
494	495	0	0	0	0	0	0
499	500	0	0	0	0	0	0
509	510	0	0	0	0	0	0
514	515	0	0	0	0	0	0
520	521	0	0	0	0	0	0

525	526	0	0	0	0	0	0
531	532	0	0	0	0	0	0
536	537	0	0	0	0	0	0
541	542	0	0	0	0	0	0
546	547	0	0	0	0	0	0
551	552	0	0	0	0	0	0
557	558	0	0	0	0	0	0
562	563	0	0	0	0	0	0
567	568	0	0	0	0	0	0
575	576	0	0	0	0	0	0
580	581	0	0	0	0	0	0
584	585	0	0	0	0	0	0
589	590	0	0	0	0	0	0
594	595	0	0	0	0	0	0
597	598	0	0	0	0	0	0
600	601	0	0	0	0	0	0
504	505	0	0	0	0	0	0
603	604	0	0	0	0	0	0
605	606	0	0	0	0	0	0
20	21	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
30	31	0,035136806	0,035136806	0,035136806	0,140547225	0,140547225	0,140547225
311	312	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
317	318	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
323	324	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
329	330	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
173	174	0,035136806	0,035136806	0,035136806	0,140547225	0,140547225	0,140547225
178	179	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
184	185	0,035136806	0,035136806	0,035136806	0,140547225	0,140547225	0,140547225
304	305	0,035136806	0,035136806	0,035136806	0,140547225	0,140547225	0,140547225
279	280	0,035136806	0,035136806	0,035136806	0,140547225	0,140547225	0,140547225
284	285	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
289	290	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
295	296	0,030553745	0,030553745	0,030553745	0,122214979	0,122214979	0,122214979
298	299	0,035136806	0,035136806	0,035136806	0,140547225	0,140547225	0,140547225
42	43	0,030553745	0,030553745	0,030553745	0,122214979	0,122214979	0,122214979
47	48	0,035136806	0,035136806	0,035136806	0,140547225	0,140547225	0,140547225
121	122	0,030553745	0,030553745	0,030553745	0,122214979	0,122214979	0,122214979
126	127	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
131	132	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
138	139	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
142	143	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
152	153	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
157	158	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
163	164	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481

168	169	0,030553745	0,030553745	0,030553745	0,122214979	0,122214979	0,122214979
189	190	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
194	195	0,030553745	0,030553745	0,030553745	0,122214979	0,122214979	0,122214979
199	200	0,030553745	0,030553745	0,030553745	0,122214979	0,122214979	0,122214979
204	205	0,030553745	0,030553745	0,030553745	0,122214979	0,122214979	0,122214979
213	214	0,030553745	0,030553745	0,030553745	0,122214979	0,122214979	0,122214979
216	217	0,035136806	0,035136806	0,035136806	0,140547225	0,140547225	0,140547225
223	224	0,035136806	0,035136806	0,035136806	0,140547225	0,140547225	0,140547225
228	229	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
231	232	0,030553745	0,030553745	0,030553745	0,122214979	0,122214979	0,122214979
235	236	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
243	244	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
252	253	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
256	257	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
261	262	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
266	267	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
270	271	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
274	275	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
112	113	0,035136806	0,035136806	0,035136806	0,140547225	0,140547225	0,140547225
117	118	0,030553745	0,030553745	0,030553745	0,122214979	0,122214979	0,122214979
66	67	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
71	72	0,030553745	0,030553745	0,030553745	0,122214979	0,122214979	0,122214979
75	76	0,035136806	0,035136806	0,035136806	0,140547225	0,140547225	0,140547225
80	81	0,030553745	0,030553745	0,030553745	0,122214979	0,122214979	0,122214979
107	108	0,035136806	0,035136806	0,035136806	0,140547225	0,140547225	0,140547225
86	87	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
92	93	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
102	103	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
97	98	0,030553745	0,030553745	0,030553745	0,122214979	0,122214979	0,122214979
336	337	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
342	343	0,030553745	0,030553745	0,030553745	0,122214979	0,122214979	0,122214979
347	348	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
352	353	0,035136806	0,035136806	0,035136806	0,140547225	0,140547225	0,140547225
360	361	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
365	366	0,030553745	0,030553745	0,030553745	0,122214979	0,122214979	0,122214979
376	377	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
381	382	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
386	387	0,030553745	0,030553745	0,030553745	0,122214979	0,122214979	0,122214979
391	392	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
396	397	0,035136806	0,035136806	0,035136806	0,140547225	0,140547225	0,140547225
401	402	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
406	407	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
411	412	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
416	417	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481

419	420	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
423	424	0,030553745	0,030553745	0,030553745	0,122214979	0,122214979	0,122214979
428	429	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
433	434	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
438	439	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
443	444	0,035136806	0,035136806	0,035136806	0,140547225	0,140547225	0,140547225
446	447	0,035136806	0,035136806	0,035136806	0,140547225	0,140547225	0,140547225
449	450	0,030553745	0,030553745	0,030553745	0,122214979	0,122214979	0,122214979
455	456	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
460	461	0,035136806	0,035136806	0,035136806	0,140547225	0,140547225	0,140547225
465	466	0,030553745	0,030553745	0,030553745	0,122214979	0,122214979	0,122214979
468	469	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
473	474	0,035136806	0,035136806	0,035136806	0,140547225	0,140547225	0,140547225
478	479	0,030553745	0,030553745	0,030553745	0,122214979	0,122214979	0,122214979
483	484	0,030553745	0,030553745	0,030553745	0,122214979	0,122214979	0,122214979
488	489	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
493	494	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
498	499	0,030553745	0,030553745	0,030553745	0,122214979	0,122214979	0,122214979
503	504	0,030553745	0,030553745	0,030553745	0,122214979	0,122214979	0,122214979
508	509	0,035136806	0,035136806	0,035136806	0,140547225	0,140547225	0,140547225
513	514	0,035136806	0,035136806	0,035136806	0,140547225	0,140547225	0,140547225
519	520	0,028411887	0,028411887	0,028411887	0,142059433	0,142059433	0,142059433
524	525	0,035136806	0,035136806	0,035136806	0,140547225	0,140547225	0,140547225
530	531	0,035136806	0,035136806	0,035136806	0,140547225	0,140547225	0,140547225
535	536	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
540	541	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
545	546	0,030553745	0,030553745	0,030553745	0,122214979	0,122214979	0,122214979
550	551	0,030553745	0,030553745	0,030553745	0,122214979	0,122214979	0,122214979
556	557	0,030553745	0,030553745	0,030553745	0,122214979	0,122214979	0,122214979
561	562	0,030553745	0,030553745	0,030553745	0,122214979	0,122214979	0,122214979
566	567	0,030553745	0,030553745	0,030553745	0,122214979	0,122214979	0,122214979
574	575	0,035136806	0,035136806	0,035136806	0,140547225	0,140547225	0,140547225
579	580	0,030553745	0,030553745	0,030553745	0,122214979	0,122214979	0,122214979
583	584	0,023816936	0,023816936	0,023816936	0,142901614	0,142901614	0,142901614
588	589	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
593	594	0,035136806	0,035136806	0,035136806	0,140547225	0,140547225	0,140547225
596	597	0,035136806	0,035136806	0,035136806	0,140547225	0,140547225	0,140547225
599	600	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481
604	605	0,02749837	0,02749837	0,02749837	0,109993481	0,109993481	0,109993481

Fuente: [Elaboración propia]

Tabla 6.7. Datos de carga del alimentador de 13 nodos

Nodo	Pa. Dem.	Pb. Dem.	Pc. Dem.	Qa. Dem	Qb. Dem	Qc. Dem
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0
21	0,000038	0,000037	0,00004	0,000008	0,000008	0,000009
22	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0
31	0,000215	0,000234	0,000151	0,000047	0,000049	0,000032
32	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0
39	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0
41	0	0	0	0	0	0

42	0	0	0	0	0	0
43	0,00011	0,00012	0,000116	0,000024	0,000025	0,000025
44	0	0	0	0	0	0
45	0	0	0	0	0	0
46	0	0	0	0	0	0
47	0	0	0	0	0	0
48	0,000176	0,000192	0,000185	0,000038	0,00004	0,00004
49	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0
51	0	0	0	0	0	0
52	0	0	0	0	0	0
53	0	0	0	0	0	0
54	0	0	0	0	0	0
55	0	0	0	0	0	0
56	0	0	0	0	0	0
57	0	0	0	0	0	0
58	0	0	0	0	0	0
59	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0
61	0	0	0	0	0	0
62	0	0	0	0	0	0
63	0	0	0	0	0	0
64	0	0	0	0	0	0
65	0	0	0	0	0	0
66	0	0	0	0	0	0
67	0,000069	0,000076	0,000073	0,000015	0,000016	0,000016
68	0	0	0	0	0	0
69	0	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0	0
71	0	0	0	0	0	0
72	0,000078	0,000085	0,000082	0,000017	0,000018	0,000018
73	0	0	0	0	0	0
74	0	0	0	0	0	0
75	0	0	0	0	0	0
76	0,000173	0,000189	0,000183	0,000038	0,000039	0,000039
77	0	0	0	0	0	0
78	0	0	0	0	0	0
79	0	0	0	0	0	0
80	0	0	0	0	0	0
81	0,000087	0,000094	0,000091	0,000019	0,00002	0,00002
82	0	0	0	0	0	0
83	0	0	0	0	0	0
84	0	0	0	0	0	0
85	0	0	0	0	0	0

86	0	0	0	0	0	0
87	0,000104	0	0,00011	0,000023	0	0,000023
88	0	0	0	0	0	0
89	0	0	0	0	0	0
90	0	0	0	0	0	0
91	0	0	0	0	0	0
92	0	0	0	0	0	0
93	0,000052	0,000057	0,000055	0,000011	0,000012	0,000012
94	0	0	0	0	0	0
95	0	0	0	0	0	0
96	0	0	0	0	0	0
97	0	0	0	0	0	0
98	0,000087	0,000094	0,000091	0,000019	0,00002	0,00002
99	0	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0
101	0	0	0	0	0	0
102	0	0	0	0	0	0
103	0,000035	0,000038	0,000037	0,000008	0,000008	0,000008
104	0	0	0	0	0	0
105	0	0	0	0	0	0
106	0	0	0	0	0	0
107	0	0	0	0	0	0
108	0,000173	0,000189	0,000183	0,000038	0,000039	0,000039
109	0	0	0	0	0	0
110	0	0	0	0	0	0
111	0	0	0	0	0	0
112	0	0	0	0	0	0
113	0,000173	0,000189	0,000183	0,000038	0,000039	0,000039
114	0	0	0	0	0	0
115	0	0	0	0	0	0
116	0	0	0	0	0	0
117	0	0	0	0	0	0
118	0,000104	0,000113	0,00011	0,000023	0,000024	0,000024
119	0	0	0	0	0	0
120	0	0	0	0	0	0
121	0	0	0	0	0	0
122	0,000195	0,000212	0,000205	0,000042	0,000044	0,000044
123	0	0	0	0	0	0
124	0	0	0	0	0	0
125	0	0	0	0	0	0
126	0	0	0	0	0	0
127	0,000117	0,000127	0,000123	0,000025	0,000026	0,000026
128	0	0	0	0	0	0
129	0	0	0	0	0	0

130	0	0	0	0	0	0
131	0	0	0	0	0	0
132	0,000023	0,000025	0	0,000005	0,000005	0
133	0	0	0	0	0	0
134	0	0	0	0	0	0
135	0	0	0	0	0	0
136	0	0	0	0	0	0
137	0	0	0	0	0	0
138	0	0	0	0	0	0
139	0,000078	0,000085	0,000082	0,000017	0,000018	0,000018
140	0	0	0	0	0	0
141	0	0	0	0	0	0
142	0	0	0	0	0	0
143	0,000117	0,000127	0,000123	0,000025	0,000026	0,000026
144	0	0	0	0	0	0
145	0	0	0	0	0	0
146	0	0	0	0	0	0
147	0	0	0	0	0	0
148	0	0	0	0	0	0
149	0	0	0	0	0	0
150	0	0	0	0	0	0
151	0	0	0	0	0	0
152	0	0	0	0	0	0
153	0,000078	0	0,000082	0,000017	0	0,000018
154	0	0	0	0	0	0
155	0	0	0	0	0	0
156	0	0	0	0	0	0
157	0	0	0	0	0	0
158	0,000022	0,000021	0,000022	0,000005	0,000004	0,000005
159	0	0	0	0	0	0
160	0	0	0	0	0	0
161	0	0	0	0	0	0
162	0	0	0	0	0	0
163	0	0	0	0	0	0
164	0,000052	0,000057	0,000055	0,000011	0,000012	0,000012
165	0	0	0	0	0	0
166	0	0	0	0	0	0
167	0	0	0	0	0	0
168	0	0	0	0	0	0
169	0,000118	0,000128	0,000124	0,000026	0,000027	0,000027
170	0	0	0	0	0	0
171	0	0	0	0	0	0
172	0	0	0	0	0	0
173	0	0	0	0	0	0

174	0,000331	0,00036	0,000348	0,000072	0,000075	0,000075
175	0	0	0	0	0	0
176	0	0	0	0	0	0
177	0	0	0	0	0	0
178	0	0	0	0	0	0
179	0,000066	0,000072	0,00007	0,000014	0,000015	0,000015
180	0	0	0	0	0	0
181	0	0	0	0	0	0
182	0	0	0	0	0	0
183	0	0	0	0	0	0
184	0	0	0	0	0	0
185	0,000265	0,000288	0,000279	0,000058	0,00006	0,00006
186	0	0	0	0	0	0
187	0	0	0	0	0	0
188	0	0	0	0	0	0
189	0	0	0	0	0	0
190	0,000039	0,000043	0,000041	0,000009	0,000009	0,000009
191	0	0	0	0	0	0
192	0	0	0	0	0	0
193	0	0	0	0	0	0
194	0	0	0	0	0	0
195	0,000118	0,000128	0,000124	0,000026	0,000027	0,000027
196	0	0	0	0	0	0
197	0	0	0	0	0	0
198	0	0	0	0	0	0
199	0	0	0	0	0	0
200	0,000098	0,000107	0,000103	0,000021	0,000022	0,000022
201	0	0	0	0	0	0
202	0	0	0	0	0	0
203	0	0	0	0	0	0
204	0	0	0	0	0	0
205	0,000098	0,000107	0,000103	0,000021	0,000022	0,000022
206	0	0	0	0	0	0
207	0	0	0	0	0	0
208	0	0	0	0	0	0
209	0	0	0	0	0	0
210	0	0	0	0	0	0
211	0	0	0	0	0	0
212	0	0	0	0	0	0
213	0	0	0	0	0	0
214	0,000118	0,000128	0,000124	0,000026	0,000027	0,000027
215	0	0	0	0	0	0
216	0	0	0	0	0	0
217	0,000173	0,000189	0,000183	0,000038	0,000039	0,000039

218	0	0	0	0	0	0
219	0	0	0	0	0	0
220	0	0	0	0	0	0
221	0	0	0	0	0	0
222	0	0	0	0	0	0
223	0	0	0	0	0	0
224	0,000311	0,000339	0,000328	0,000068	0,000071	0,00007
225	0	0	0	0	0	0
226	0	0	0	0	0	0
227	0	0	0	0	0	0
228	0	0	0	0	0	0
229	0,000069	0,000076	0,000073	0,000015	0,000016	0,000016
230	0	0	0	0	0	0
231	0	0	0	0	0	0
232	0,000078	0,000085	0,000082	0,000017	0,000018	0,000018
233	0	0	0	0	0	0
234	0	0	0	0	0	0
235	0	0	0	0	0	0
236	0,00007	0,000076	0,000074	0,000015	0,000016	0,000016
237	0	0	0	0	0	0
238	0	0	0	0	0	0
239	0	0	0	0	0	0
240	0	0	0	0	0	0
241	0	0	0	0	0	0
242	0	0	0	0	0	0
243	0	0	0	0	0	0
244	0,000132	0,000144	0,000139	0,000029	0,00003	0,00003
245	0	0	0	0	0	0
246	0	0	0	0	0	0
247	0	0	0	0	0	0
248	0	0	0	0	0	0
249	0	0	0	0	0	0
250	0	0	0	0	0	0
251	0	0	0	0	0	0
252	0	0	0	0	0	0
253	0,000117	0,000127	0,000123	0,000025	0,000026	0,000026
254	0	0	0	0	0	0
255	0	0	0	0	0	0
256	0	0	0	0	0	0
257	0,000078	0,000085	0,000082	0,000017	0,000018	0,000018
258	0	0	0	0	0	0
259	0	0	0	0	0	0
260	0	0	0	0	0	0
261	0	0	0	0	0	0

262	0,000078	0,000085	0,000082	0,000017	0,000018	0,000018
263	0	0	0	0	0	0
264	0	0	0	0	0	0
265	0	0	0	0	0	0
266	0	0	0	0	0	0
267	0,000156	0,00017	0,000164	0,000034	0,000035	0,000035
268	0	0	0	0	0	0
269	0	0	0	0	0	0
270	0	0	0	0	0	0
271	0,00007	0,000076	0,000074	0,000015	0,000016	0,000016
272	0	0	0	0	0	0
273	0	0	0	0	0	0
274	0	0	0	0	0	0
275	0,000122	0,000133	0,000112	0,000027	0,000028	0,000024
276	0	0	0	0	0	0
277	0	0	0	0	0	0
278	0	0	0	0	0	0
279	0	0	0	0	0	0
280	0,000264	0,000287	0,000278	0,000057	0,00006	0,00006
281	0	0	0	0	0	0
282	0	0	0	0	0	0
283	0	0	0	0	0	0
284	0	0	0	0	0	0
285	0,000117	0,000127	0,000123	0,000025	0,000026	0,000026
286	0	0	0	0	0	0
287	0	0	0	0	0	0
288	0	0	0	0	0	0
289	0	0	0	0	0	0
290	0,000078	0,000085	0,000082	0,000017	0,000018	0,000018
291	0	0	0	0	0	0
292	0	0	0	0	0	0
293	0	0	0	0	0	0
294	0	0	0	0	0	0
295	0	0	0	0	0	0
296	0,000142	0,000154	0,000149	0,000031	0,000032	0,000032
297	0	0	0	0	0	0
298	0	0	0	0	0	0
299	0,000467	0,000509	0,000492	0,000102	0,000106	0,000105
300	0	0	0	0	0	0
301	0	0	0	0	0	0
302	0	0	0	0	0	0
303	0	0	0	0	0	0
304	0	0	0	0	0	0
305	0,00022	0,000239	0,000231	0,000048	0,00005	0,00005

306	0	0	0	0	0	0
307	0	0	0	0	0	0
308	0	0	0	0	0	0
309	0	0	0	0	0	0
310	0	0	0	0	0	0
311	0	0	0	0	0	0
312	0,000102	0,000111	0,000102	0,000022	0,000023	0,000022
313	0	0	0	0	0	0
314	0	0	0	0	0	0
315	0	0	0	0	0	0
316	0	0	0	0	0	0
317	0	0	0	0	0	0
318	0,000075	0,000082	0,000079	0,000016	0,000017	0,000017
319	0	0	0	0	0	0
320	0	0	0	0	0	0
321	0	0	0	0	0	0
322	0	0	0	0	0	0
323	0	0	0	0	0	0
324	0,000059	0,000065	0,000062	0,000013	0,000013	0,000013
325	0	0	0	0	0	0
326	0	0	0	0	0	0
327	0	0	0	0	0	0
328	0	0	0	0	0	0
329	0	0	0	0	0	0
330	0,000059	0,000065	0,000062	0,000013	0,000013	0,000013
331	0	0	0	0	0	0
332	0	0	0	0	0	0
333	0	0	0	0	0	0
334	0	0	0	0	0	0
335	0	0	0	0	0	0
336	0	0	0	0	0	0
337	0,000079	0,000086	0,000083	0,000017	0,000018	0,000018
338	0	0	0	0	0	0
339	0	0	0	0	0	0
340	0	0	0	0	0	0
341	0	0	0	0	0	0
342	0	0	0	0	0	0
343	0,000165	0,00018	0	0,000036	0,000037	0
344	0	0	0	0	0	0
345	0	0	0	0	0	0
346	0	0	0	0	0	0
347	0	0	0	0	0	0
348	0,00004	0,000043	0,000042	0,000009	0,000009	0,000009
349	0	0	0	0	0	0

350	0	0	0	0	0	0
351	0	0	0	0	0	0
352	0	0	0	0	0	0
353	0,000251	0,000273	0,000263	0,000055	0,000057	0,000056
354	0	0	0	0	0	0
355	0	0	0	0	0	0
356	0	0	0	0	0	0
357	0	0	0	0	0	0
358	0	0	0	0	0	0
359	0	0	0	0	0	0
360	0	0	0	0	0	0
361	0,00006	0,000065	0,000063	0,000013	0,000014	0,000014
362	0	0	0	0	0	0
363	0	0	0	0	0	0
364	0	0	0	0	0	0
365	0	0	0	0	0	0
366	0,000078	0,000085	0,000082	0,000017	0,000018	0,000018
367	0	0	0	0	0	0
368	0	0	0	0	0	0
369	0	0	0	0	0	0
370	0	0	0	0	0	0
371	0	0	0	0	0	0
372	0	0	0	0	0	0
373	0	0	0	0	0	0
374	0	0	0	0	0	0
375	0	0	0	0	0	0
376	0	0	0	0	0	0
377	0,000069	0,000076	0,000073	0,000015	0,000016	0,000016
378	0	0	0	0	0	0
379	0	0	0	0	0	0
380	0	0	0	0	0	0
381	0	0	0	0	0	0
382	0,000069	0,000076	0,000073	0,000015	0,000016	0,000016
383	0	0	0	0	0	0
384	0	0	0	0	0	0
385	0	0	0	0	0	0
386	0	0	0	0	0	0
387	0,000078	0,000084	0,000082	0,000017	0,000018	0,000018
388	0	0	0	0	0	0
389	0	0	0	0	0	0
390	0	0	0	0	0	0
391	0	0	0	0	0	0
392	0,000069	0,000076	0,000073	0,000015	0,000016	0,000016
393	0	0	0	0	0	0

394	0	0	0	0	0	0
395	0	0	0	0	0	0
396	0	0	0	0	0	0
397	0,000139	0,000151	0,000146	0,00003	0,000031	0,000031
398	0	0	0	0	0	0
399	0	0	0	0	0	0
400	0	0	0	0	0	0
401	0	0	0	0	0	0
402	0,000052	0,000057	0,000055	0,000011	0,000012	0,000012
403	0	0	0	0	0	0
404	0	0	0	0	0	0
405	0	0	0	0	0	0
406	0	0	0	0	0	0
407	0,000078	0,000085	0	0,000017	0,000018	0
408	0	0	0	0	0	0
409	0	0	0	0	0	0
410	0	0	0	0	0	0
411	0	0	0	0	0	0
412	0,000069	0,000076	0,000073	0,000015	0,000016	0,000016
413	0	0	0	0	0	0
414	0	0	0	0	0	0
415	0	0	0	0	0	0
416	0	0	0	0	0	0
417	0,000031	0,000034	0,000033	0,000007	0,000007	0,000007
418	0	0	0	0	0	0
419	0	0	0	0	0	0
420	0,000052	0,000057	0,000055	0,000011	0,000012	0,000012
421	0	0	0	0	0	0
422	0	0	0	0	0	0
423	0	0	0	0	0	0
424	0,000104	0,000113	0,00011	0,000023	0,000024	0,000023
425	0	0	0	0	0	0
426	0	0	0	0	0	0
427	0	0	0	0	0	0
428	0	0	0	0	0	0
429	0,000035	0,000038	0,000037	0,000008	0,000008	0,000008
430	0	0	0	0	0	0
431	0	0	0	0	0	0
432	0	0	0	0	0	0
433	0	0	0	0	0	0
434	0,000069	0,000076	0,000073	0,000015	0,000016	0,000016
435	0	0	0	0	0	0
436	0	0	0	0	0	0
437	0	0	0	0	0	0

438	0	0	0	0	0	0
439	0,000069	0,000076	0,000073	0,000015	0,000016	0,000016
440	0	0	0	0	0	0
441	0	0	0	0	0	0
442	0	0	0	0	0	0
443	0	0	0	0	0	0
444	0,000139	0,000151	0,000146	0,000003	0,000031	0,000031
445	0	0	0	0	0	0
446	0	0	0	0	0	0
447	0,000208	0,000227	0,000219	0,000045	0,000047	0,000047
448	0	0	0	0	0	0
449	0	0	0	0	0	0
450	0,000125	0,000136	0,000132	0,000027	0,000028	0,000028
451	0	0	0	0	0	0
452	0	0	0	0	0	0
453	0	0	0	0	0	0
454	0	0	0	0	0	0
455	0	0	0	0	0	0
456	0,0001	0,000109	0,000105	0,000022	0,000023	0,000023
457	0	0	0	0	0	0
458	0	0	0	0	0	0
459	0	0	0	0	0	0
460	0	0	0	0	0	0
461	0,0002	0,000218	0,000211	0,000044	0,000045	0,000045
462	0	0	0	0	0	0
463	0	0	0	0	0	0
464	0	0	0	0	0	0
465	0	0	0	0	0	0
466	0,000125	0,000136	0,000132	0,000027	0,000028	0,000028
467	0	0	0	0	0	0
468	0	0	0	0	0	0
469	0,0001	0,000109	0,000105	0,000022	0,000023	0,000023
470	0	0	0	0	0	0
471	0	0	0	0	0	0
472	0	0	0	0	0	0
473	0	0	0	0	0	0
474	0,0003	0,000327	0,000316	0,000065	0,000068	0,000068
475	0	0	0	0	0	0
476	0	0	0	0	0	0
477	0	0	0	0	0	0
478	0	0	0	0	0	0
479	0,000111	0,000121	0,000117	0,000024	0,000025	0,000025
480	0	0	0	0	0	0
481	0	0	0	0	0	0

482	0	0	0	0	0	0
483	0	0	0	0	0	0
484	0,000125	0,000136	0,000132	0,000027	0,000028	0,000028
485	0	0	0	0	0	0
486	0	0	0	0	0	0
487	0	0	0	0	0	0
488	0	0	0	0	0	0
489	0,00009	0,000098	0,000095	0,00002	0,00002	0,00002
490	0	0	0	0	0	0
491	0	0	0	0	0	0
492	0	0	0	0	0	0
493	0	0	0	0	0	0
494	0,000052	0,000057	0,000055	0,000011	0,000012	0,000012
495	0	0	0	0	0	0
496	0	0	0	0	0	0
497	0	0	0	0	0	0
498	0	0	0	0	0	0
499	0,000125	0,000136	0,000132	0,000027	0,000028	0,000028
500	0	0	0	0	0	0
501	0	0	0	0	0	0
502	0	0	0	0	0	0
503	0	0	0	0	0	0
504	0,000125	0,000136	0,000132	0,000027	0,000028	0,000028
505	0	0	0	0	0	0
506	0	0	0	0	0	0
507	0	0	0	0	0	0
508	0	0	0	0	0	0
509	0,000139	0,000151	0,000146	0,00003	0,000031	0,000031
510	0	0	0	0	0	0
511	0	0	0	0	0	0
512	0	0	0	0	0	0
513	0	0	0	0	0	0
514	0,0003	0,000327	0,000316	0,000065	0,000068	0,000068
515	0	0	0	0	0	0
516	0	0	0	0	0	0
517	0	0	0	0	0	0
518	0	0	0	0	0	0
519	0	0	0	0	0	0
520	0,000501	0,000545	0,000527	0,000109	0,000114	0,000113
521	0	0	0	0	0	0
522	0	0	0	0	0	0
523	0	0	0	0	0	0
524	0	0	0	0	0	0
525	0,0003	0,000327	0,000316	0,000065	0,000068	0,000068

526	0	0	0	0	0	0
527	0	0	0	0	0	0
528	0	0	0	0	0	0
529	0	0	0	0	0	0
530	0	0	0	0	0	0
531	0,00025	0,000272	0,000263	0,000055	0,000057	0,000057
532	0	0	0	0	0	0
533	0	0	0	0	0	0
534	0	0	0	0	0	0
535	0	0	0	0	0	0
536	0,000075	0,000082	0,000079	0,000016	0,000017	0,000017
537	0	0	0	0	0	0
538	0	0	0	0	0	0
539	0	0	0	0	0	0
540	0	0	0	0	0	0
541	0,000088	0,000096	0,000093	0,000019	0,00002	0,00002
542	0	0	0	0	0	0
543	0	0	0	0	0	0
544	0	0	0	0	0	0
545	0	0	0	0	0	0
546	0,000111	0,00012	0,000116	0,000024	0,000025	0,000025
547	0	0	0	0	0	0
548	0	0	0	0	0	0
549	0	0	0	0	0	0
550	0	0	0	0	0	0
551	0,000111	0,00012	0,000116	0,000024	0,000025	0,000025
552	0	0	0	0	0	0
553	0	0	0	0	0	0
554	0	0	0	0	0	0
555	0	0	0	0	0	0
556	0	0	0	0	0	0
557	0,00015	0,000087	0,000158	0,000033	0,000018	0,000034
558	0	0	0	0	0	0
559	0	0	0	0	0	0
560	0	0	0	0	0	0
561	0	0	0	0	0	0
562	0,000172	0,000187	0	0,000037	0,000039	0
563	0	0	0	0	0	0
564	0	0	0	0	0	0
565	0	0	0	0	0	0
566	0	0	0	0	0	0
567	0,000096	0,000102	0,000101	0,000021	0,000021	0,000022
568	0	0	0	0	0	0
569	0	0	0	0	0	0

570	0	0	0	0	0	0
571	0	0	0	0	0	0
572	0	0	0	0	0	0
573	0	0	0	0	0	0
574	0	0	0	0	0	0
575	0,000191	0,000208	0,000201	0,000042	0,000043	0,000043
576	0	0	0	0	0	0
577	0	0	0	0	0	0
578	0	0	0	0	0	0
579	0	0	0	0	0	0
580	0,000131	0,000142	0,000138	0,000029	0,00003	0,00003
581	0	0	0	0	0	0
582	0	0	0	0	0	0
583	0	0	0	0	0	0
584	0,000614	0,000668	0,000646	0,000134	0,000139	0,000139
585	0	0	0	0	0	0
586	0	0	0	0	0	0
587	0	0	0	0	0	0
588	0	0	0	0	0	0
589	0,000082	0,000089	0,000086	0,000018	0,000019	0,000018
590	0	0	0	0	0	0
591	0	0	0	0	0	0
592	0	0	0	0	0	0
593	0	0	0	0	0	0
594	0,000205	0,000223	0,000215	0,000045	0,000046	0,000046
595	0	0	0	0	0	0
596	0	0	0	0	0	0
597	0,000164	0,000178	0,000172	0,000036	0,000037	0,000037
598	0	0	0	0	0	0
599	0	0	0	0	0	0
600	0,000029	0,000031	0,00003	0,000006	0,000007	0,000006
601	0	0	0	0	0	0
602	0	0	0	0	0	0
603	0	0	0	0	0	0
604	0	0	0	0	0	0
605	0,000057	0,000062	0,00006	0,000013	0,000013	0,000013
606	0	0	0	0	0	0
607	0	0	0	0	0	0

Fuente: [Elaboración propia]

Tabla 6.8. Datos de la ubicación y capacidad de los capacitores conectados en el alimentador 01C

Nodo	VAR pu
306	0,04
306	0,02
306	0,01

Fuente: [Elaboración propia]



Figura 6.2. Curva de carga diario del alimentador 01C

Fuente: [Elaboración propia]

ANEXO III

PROGRAMA (MATLAB)

PROGRAMA PRINCIPAL

DESPACHO:

%DESPACHO

```
clear; clc;
close all
disp(' OPERACIÓN ÓPTIMA DE CAPACITORES')
disp(' =====')
Vmin=0.95;
Vmax=1.05;
fc=0.01; % factor que evita cambios de switcheos
```

%LECTURA DE DATOS

```
linea=xlsread('6NODOS',2);
barra=xlsread('6NODOS',3);
Capacitores=xlsread('34NODOS','Capacitores');
Proyeccion=xlsread('34NODOS','Proyeccion');
Cargas=barra(:,2:4)+1i*barra(:,5:7);
Per=zeros(size(Proyeccion,1),2);
Per(:,1)=Proyeccion(:,1);
Poton=zeros(size(Proyeccion,1),3);
Potoff=Poton;
Potopt=Poton;
Poton(:,1)=Proyeccion(:,1);
Potoff(:,1)=Proyeccion(:,1);
Potopt(:,1)=Proyeccion(:,1);
```

%Calculo de potencias sin conexión de capacitores

```
for t=1:1:size(Proyeccion,1)
aux=FLUJO_CAP(linea,barra,Cargas,Capacitores,zeros(1,size(Capacitores,1)),Proyeccion(t,2));
Potoff(t,2)=aux(1);
Potoff(t,3)=aux(2);
end
Potoff=Potoff(2:end,:);
for t=1:1:size(Proyeccion,1)
aux=FLUJO_CAP(linea,barra,Cargas,Capacitores,ones(1,size(Capacitores,1)),Proyeccion(t,2));
Poton(t,2)=aux(1);
Poton(t,3)=aux(2);
end
Poton=Poton(2:end,:);
```

%Calculo de potencias con conexión de capacitores (todos los capacitores conectados)

```
for i=1:1:size(Proyeccion,1)
```

```

aux=FLUJO_CAP(linea,barra,Cargas,Capacitores,zeros(1,size(Capacitores,1)),Proyeccion(i,2));
    Per(i,2)=aux(1);
    Per(i,3)=aux(2);
end
Per;

```

% CREACION DE LA MATRIZ DE ESTADOS DE LOS CAPACITORES

```

E=ones(2^size(Capacitores,1),size(Capacitores,1));
aux=2^size(Capacitores,1);
for i=1:1:size(Capacitores,1)
    aux=aux/2;
    E(1:aux,i)=E(1:aux,i)*0;
end
if size(Capacitores,1)>1
    for i=size(Capacitores,1)-1:-1:1
        aux=aux*2;
        E(aux+1:2*aux,i+1:end)=E(1:aux,i+1:end);
    end
end
E;
Matriz_de_estados=E;

```

% CALCULO DE LOS PESOS ENTRE PERIODOS T

```

sp=zeros(1,2^size(Capacitores,1)); %sumario de pesos
ub=zeros(2^size(Capacitores,1)*(size(Proyeccion,1)-1),2^size(Capacitores,1)+1);
for n=1:size(Proyeccion,1)-1

```

% Calculo de perdidas y voltajes para cada estado en el instante t

```

Pn=zeros(2^size(Capacitores,1),3);
for i=1:1:2^size(Capacitores,1)
    aux=FLUJO_CAP(linea,barra,Cargas,Capacitores,E(i,:),Proyeccion(n,2));
    if aux(2,1)<Vmin ||aux(3,1)>Vmax
        aux(1,1)=inf;
    end
    Pn(i,:)=aux';
end
Pn;

```

% Calculo de perdidas y voltajes para cada estado en el instante t+1

```

Pn1=zeros(2^size(Capacitores,1),3);
for i=1:1:2^size(Capacitores,1)
    aux=FLUJO_CAP(linea,barra,Cargas,Capacitores,E(i,:),Proyeccion(n+1,2));
    Pn1(i,:)=aux';
end
Pn1;
DP=diag(Pn1(:,1))*ones(2^size(Capacitores,1))-
ones(2^size(Capacitores,1))*diag(Pn(:,1));
aux=fc*abs(min(DP));
DP=DP-diag(aux);
DP=DP+(ones(2^size(Capacitores,1))*diag(sp));
DP=abs(DP);
ub1=zeros(2^size(Capacitores,1),2^size(Capacitores,1)+1);

```

```

ub1(:,1)=[1:2^size(Capacitores,1)]';
sp1=(min(DP'));
for a=1:1:2^size(Capacitores,1)
    aux=find(DP(a,:)==sp1(a));
    ub1(a,aux+ones(size(aux)))=1;
end
sp=sp+abs(min(DP'));
aux=((n-1)*2^size(Capacitores,1))+1;
ub(aux:aux+2^size(Capacitores,1)-1,:)=ub1;
end
ub;
inic=find(sp==min(sp),size(aux,2));
R=zeros(size(Proyeccion,1),size(E,2)+1); %matriz de la respuesta
R(:,1)=Proyeccion(:,1);
R(size(Proyeccion,1),2)=inic;
for i=1:1:size(Proyeccion,1)-1
    aux=((i-1)*2^size(Capacitores,1));
    aux1=find(sp==min(sp));
    aux1=round(rand(1,1)*size(aux1,2));
    if aux1==0
        aux1=1;
    end
    inic=find(ub(aux+inic,2:end)==1,aux1);
    R(i,2)=inic;
end
inic=find(Pn(:,1)==min(Pn(:,1)),1);
R(1,2)=inic;
for i=1:1:size(Proyeccion,1)
    R(i,2:end)=E(R(i,2,:));
end
Operacion_cap=R;
vux=R(1:size(Proyeccion,1)-1,2:size(Capacitores,1)+1);
for t=1:1:size(Proyeccion,1)-1
    aux=FLUJO_CAP(linea,barra,Cargas,Capacitores,vux(t,:),Proyeccion(t,2));
    Potopt(t,2)=aux(1);
    Potopt(t,3)=aux(2);
    Potopt(t,4)=aux(3);
end
Potopt=Potopt(1:end-1,:);
oper=zeros(1,size(E,2));
E_o=zeros(1,size(Capacitores,1)+1);
Operci=[E_o;R];
for i=1:1:size(Proyeccion,1)-1
    oper=oper+xor(Operci(i,2:end),Operci(i+1,2:end));
end
oper;
num_Oper=floor(oper/2)+mod(oper,2);
subplot(3,1,3);
for i=1:1:size(E,2)
    plot(R(:,1),R(:,i+1));
    hold all;
end
title('Operaciones de los capacitores');
subplot(3,1,1);

```

```

plot(Poton(:,1),Poton(:,2),Potopt(:,1),Potopt(:,2));
hold all;
title('Pérdidas del sistema');
subplot(3,1,2);
plot(Potoff(:,1),Potoff(:,3),Potopt(:,1),Potopt(:,3));
hold all;
title('Voltajes mínimos');

```

SUBROUTINAS:

Matriz_conexion:

```

%clear; clc;
%linea=xlsread('6NODOS',2);
%barra=xlsread('6NODOS',3);
%nl=length(linea(:,1));
%nb=length(barra(:,1));
f=linea(:,1); % lista de numero de nodo de envio de la rama
t=linea(:,2); % lista de numero de nodo de recepcion de la rama

% Conexiones de la matriz
Cf = sparse(1:nl, f, ones(nl, 1), nl, nb);
Ct = sparse(1:nl, t, ones(nl, 1), nl, nb);
Cft=Cf+Ct;
Cft1=Cft*Cft;
Coe=ones(nb)-eye(nb);
Cft2=Cft1.*Coe;
CFT=triu(Cft2);

%Codigo para encontrar el orden en la profundidad de los nodos
Ze=zeros(nb);
ZeV=Ze(:,1);
for i=1:nb
    ord(:,i)=sort([ZeV(1:(nb-length(graphtraverse(CFT,i))))];graphtraverse(CFT,i)']);
end
Orden=ord; %Orden de los nodos en los que fluirá la corriente

%Matriz BIBC (matriz de profundidad de las conexiones de los nodos)
for l=1:length(Orden(1,:))
    for m=1:length(Orden(l,:))
        a=Orden(l,m);
        if a>0
            bibc(a,m)=1;
            Nbibc(a,m)=a;
        if a==0
            bibc(l,m)=0;
            Nbibc(l,m)=0;
        end
    end
end
end
end
Nbibc=Nbibc;
BIBC=bibc(2:nb,2:nb)';

```

```

%z=linea(:,3)+(linea(:,6))*j
BCBV=BIBC*diag(z); % Matriz total de conexiones
DLF=BCBV*BIBC;% Matriz para el flujo de distribución

```

FLUJO_CAP:

```

Function[Perdi]=FLUJO_CAP(linea,barra,Cargas,Capacitores,Conexion,Proyeccion)
%clear; clc;
%linea=xlsread('6NODOS',2);
%barra=xlsread('6NODOS',3);
%Capacitores=xlsread('6NODOS','Capacitores')
%Cargas=barra(:,2:4)+1i*barra(:,5:7)
Cargas=Cargas*Proyeccion;
Capacitores(:,2)=Capacitores(:,2)/3.*Conexion';
for a=1:1:size(Capacitores,1)
    Cargas(Capacitores(a,1),:)=Cargas(Capacitores(a,1),:)-
1i*Capacitores(a,2);
end
Cargas;
FLUJO_3F;
Perdi=P;

```

FLUJO_3F:

```

% FLUJO DE CARGA TRIFÁSICO
%clear; clc;
%linea=xlsread('6NODOS',2);
%barra=xlsread('6NODOS',3);
%Cargas=barra(:,2:4)+1i*barra(:,5:7);
linea(find(linea(:,:)==0))=1*10^-10;
nl=length(linea(:,1));
nb=length(barra(:,1));
b=barra(:,1);
RESULTADOS=zeros(nb,6);
Pperdidas=zeros(3,1);
Pperd=zeros(nl,3);
ang=zeros(nb,6);
for i=1:3
    ang(:,2*i)=barra(:,8+i);
end
barra(1,:)=[];
barra(:,1)=1:(nb-1);
for n=1:3
    z=linea(:,2+n)+(linea(:,5+n))*j;
    Matriz_conexion;
    Cargas1=Cargas(2:end,n);
    FLUJO;
    RESULTADOS(:,2*n-1:2*n)=Voltajes;
    Pperd(:,n)=Ploss;
    Pperdidas(n,:)=PtLoss;
end
RESULTADOS=RESULTADOS+ang;
RESULTADOS=[b,RESULTADOS];
Pperd_rama=Pperd/3;
Pperdidas=sum(Pperdidas)/3;

```

```
P=[Pperdidas;min(Vm);max(Vm)];
```

FLUJO:

```
%FLUJO
%clear; clc;
%linea=xlsread('6NODOS',2);
%barra=xlsread('6NODOS',3);
%linea(find(linea(:,:)==0))=1*10^-10;
%nl=length(linea(:,1));
%nb=length(barra(:,1));
%z=linea(:,3)+(linea(:,6))*j
%Matriz_conexion;
P=real(Cargas1);
Q=imag(Cargas1);
S=P+j*Q;
I=zeros((nb-1),1);
PQL=[barra(:,1) P(:,1) Q(:,1)];
PQL(find(PQL(:,3)==0),:)=[];
PQb=PQL(:,1);
Sload=(S(PQb));
PQb;
Sload=Sload*3;

% METODO FORWARD AND BACKWARD
w=ones(nb-1);
V=(w(:,1));
VB=V;
iter=1000;
for i=1:iter
    IPQ=conj(Sload./VB(PQb));
    I(PQb)=IPQ;
    IBr=BIBC*I;
    delV=DLF*I;
    VB=V-delV;
end
Vn=[1.00;VB];
Vm=abs(Vn);
Va=angle(Vn)*180/pi;
VOLTAJES_A=[b(:,1),Vm,Va];
Voltajes=[Vm,Va];
for l=1:nl
    VFT(l,:)=Vn(f(l))-Vn(t(l));
end
Vft=abs(VFT);
Ploss=((Vft.^2).*linea(:,2+n))./(abs(z).*abs(z));
PtLoss=sum(Ploss); % Pérdidas Totales
```