

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



"POR MI PATRIA Y POR MI BIEN"

**“UBICACIÓN ÓPTIMA DE FUENTES DE
GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN EL SISTEMA
ELÉCTRICO DE DISTRIBUCIÓN”**

OPCIÓN I

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

PRESENTA:

ING. AARÓN EDUARDO GÓMEZ ESQUIVEL

G09070117

DIRECTOR DE TESIS:

M.C. RAFAEL CASTILLO GUTIÉRREZ

"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

Cd. Madero, Tamps; a **03 de Diciembre de 2015.**

OFICIO No.: U2.228/15
AREA: DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS

C. ING. AARÓN EDUARDO GÓMEZ ESQUIVEL
NO. DE CONTROL G09070117
PRESENTE

Me es grato comunicarle que después de la revisión realizada por el Jurado designado para su examen de grado de Maestría en Ingeniería Eléctrica, el cual está integrado por los siguientes catedráticos:

PRESIDENTE :	M.C. RAFAEL CASTILLO GUTIÉRREZ
SECRETARIO :	M.C. HERMENEGILDO CISNEROS VILLEGAS
VOCAL :	DR. GASTÓN HERNÁNDEZ MARTÍNEZ
SUPLENTE:	M.C. AARÓN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ
DIRECTOR DE TESIS:	M.C. RAFAEL CASTILLO GUTIÉRREZ

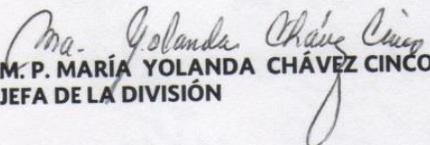
se acordó autorizar la impresión de su tesis titulada:

"UBICACIÓN ÓPTIMA DE FUENTES DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN EL SISTEMA ELÉCTRICO DE DISTRIBUCIÓN"

Es muy satisfactorio para esta División compartir con Usted el logro de esta meta, esperando que continúe con éxito su desarrollo profesional y dedique su experiencia e inteligencia en beneficio de México.

ATENTAMENTE

"POR MI PATRIA Y POR MI BIEN"®


M. P. MARÍA YOLANDA CHÁVEZ CINCO
JEFA DE LA DIVISIÓN



S.E.P.
DIVISION DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E
INVESTIGACION
I T C M

c.c.p.- Minuta
Archivo
MYCHC 'HCV' jar



Contenido

	Página
Contenido	iii
Lista de figuras.....	vi
Lista de tablas.....	viii
Agradecimientos.....	ix
Dedicatoria.....	x
Resumen	xi
Abstract.....	xii
Capítulo 1: Introducción	1
1.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA.....	2
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	4
1.4 OBJETIVOS.....	5
1.5 HIPÓTESIS.....	6
1.6 ALCANCES Y LIMITACIONES.....	6
Referencias Capítulo 1.....	8
Capítulo 2: Marco teórico	9
2.1 ESTRUCTURA DE LAS REDES ELECTRICAS.....	10
2.2.1 Sistema radial.....	11
2.2.2 Sistema en anillo.....	12
2.2.3 Sistema mallado.....	13
2.3 GENERACIÓN DISTRIBUIDA.....	13
2.3.1 Generación distribuida en sistemas de distribución.....	14
2.4 ESTUDIO DE FLUJOS DE CARGA.....	15

2.4.1 Diagrama unifilar de un circuito de distribución.....	15
2.4.2 Matriz nodo trayectoria.....	16
2.4.3 Cálculo de voltajes nodales.....	17
2.4.4 Cálculo de corrientes de carga.....	17
2.4.5 Cálculo de corrientes de línea.....	17
2.4.6 Cálculo de caídas de voltaje.....	18
2.4.7 Cálculo de pérdidas eléctricas.....	18
Referencias Capítulo 2.....	19
Capítulo 3: Estudios de flujos de carga ante demanda máxima y baja.....	20
3.1 ANÁLISIS DE FLUJOS DE CARGA PARA EL CIRCUITO SLO 4180.....	21
3.1.1 Flujo de carga ante demanda máxima para el circuito SLO 4180.....	21
3.1.2 Flujo de carga ante demanda baja para el circuito SLO 4180.....	22
3.1.3 Comparación de los perfiles de voltaje y pérdidas eléctricas ante demanda máxima y baja del circuito SLO 4180.....	24
3.2 ESTUDIO DE FLUJOS DE CARGA PARA EL CIRCUITO SLO 4160.....	26
3.2.1 Flujo de carga ante demanda máxima para el circuito SLO 4160.....	26
3.2.2 Flujo de carga ante demanda baja para el circuito SLO 4160.....	28
3.2.3 Comparación de los perfiles de voltaje y pérdidas eléctricas ante demanda máxima y baja del circuito SLO 4160.....	29
3.3 ESTUDIO DE FLUJOS DE CARGA PARA EL CIRCUITO SLO 4150.....	31
3.3.1 Flujo de carga ante demanda máxima para el circuito SLO 4150.....	31
3.3.2 Flujo de carga ante demanda baja para el circuito SLO 4150.....	32
3.3.3 Comparación de los perfiles de voltaje y pérdidas eléctricas ante demanda máxima y baja del circuito SLO 4150.....	33
Capítulo 4: Estudios de flujos de carga ante demanda máxima y baja con la introducción de potencia activa en dos nodos del circuito.....	35
4.1 ESTUDIO DE FLUJOS DE CARGA PARA EL CIRCUITO SLO 4180.....	36
4.1.1 Flujo de carga ante demanda máxima para el circuito SLO 4180 con la	

introducción de potencia activa.....	36
4.1.2 Flujo de carga ante demanda baja para el circuito SLO 4180 con la introducción de potencia activa.....	38
4.2 ESTUDIO DE FLUJOS DE CARGA PARA EL CIRCUITO SLO 4160.....	41
4.2.1 Flujo de carga ante demanda máxima para el circuito SLO 4160 con la introducción de potencia activa.....	41
4.2.2 Flujo de carga ante demanda baja para el circuito SLO 4160 con la introducción de potencia activa.....	44
4.3 ESTUDIO DE FLUJOS DE CARGA PARA EL CIRCUITO SLO 4150.....	47
4.3.1 Flujo de carga ante demanda máxima para el circuito SLO 4150 con la introducción de potencia activa.....	47
4.3.2 Flujo de carga ante demanda baja para el circuito SLO 4150 con la introducción de potencia activa.....	50
Capítulo 5: Conclusiones.....	54
5.1 ANÁLISIS DE LOS ESTUDIOS DE FLUJOS DE CARGA DE LOS CIRCUITOS SLO 4180, SLO 4160 Y SLO 4150 BAJO CONDICIONES NORMALES DE OPERACIÓN, Y CON APORTACIÓN DE POTENCIA ACTIVA EN DOS NODOS.....	55
5.1.1 Análisis de los resultados del circuito SLO 4180 ante demanda máxima.....	55
5.1.2 Análisis de los resultados del circuito SLO 4180 ante demanda baja.....	56
5.1.3 Análisis de los resultados del circuito SLO 4160 ante demanda máxima.....	56
5.1.4 Análisis de los resultados del circuito SLO 4160 ante demanda baja.....	57
5.1.5 Análisis de los resultados del circuito SLO 4150 ante demanda máxima.....	58
5.1.6 Análisis de los resultados del circuito SLO 4150 ante demanda baja.....	59
5.2 CONCLUSIONES.....	60
5.3 TRABAJOS FUTUROS.....	61

Lista de Figuras

	Página
Figura 2.1 Red eléctrica.....	10
Figura 2.2 Esquema de un sistema radial.....	11
Figura 2.3 Esquema de un sistema en anillo.....	12
Figura 2.4 Esquema de un sistema tipo mallado.....	13
Figura 2.5 Generación distribuida como parte de una red eléctrica inteligente.....	14
Figura 2.6 Diagrama unifilar de un circuito de distribución radial.....	16
Figura 3.1 Diagrama unifilar del circuito SLO 4180 demanda máxima.....	21
Figura 3.2 Diagrama unifilar del circuito SLO 4180 demanda baja.....	23
Figura 3.3 Perfiles de voltaje ante demanda máxima y baja del circuito SLO 4180.....	25
Figura 3.4 Pérdidas eléctricas ante demanda máxima y baja del circuito SLO 4180.....	26
Figura 3.5 Diagrama unifilar del circuito SLO 4160 demanda máxima.....	27
Figura 3.6 Diagrama unifilar del circuito SLO 4160 demanda baja.....	28
Figura 3.7 Perfiles de voltaje ante demanda máxima y baja del circuito SLO 4160.....	30
Figura 3.8 Pérdidas eléctricas ante demanda máxima y baja del circuito SLO 4160.....	30
Figura 3.9 Diagrama unifilar del circuito SLO 4150 demanda máxima.....	31
Figura 3.10 Diagrama unifilar del circuito SLO 4150 demanda baja.....	32
Figura 3.11 Perfiles de voltaje ante demanda máxima y baja del circuito SLO 4160.....	34
Figura 3.12 Pérdidas eléctricas ante demanda máxima y baja del circuito SLO 4160.....	34
Figura 4.1 Diagrama unifilar del circuito SLO 4180 demanda máxima.....	36
Figura 4.2 Pérdidas eléctricas bajo condiciones normales de operación y con aportación de potencia activa, en kW del circuito SLO 4180 demanda máxima.....	38
Figura 4.3 Perfiles de voltaje bajo condiciones normales de operación, y con aportación de potencia activa, en kW del circuito SLO 4180 demanda máxima.....	38
Figura 4.4 Diagrama unifilar del circuito SLO 4180 demanda baja.....	39
Figura 4.5 Pérdidas eléctricas bajo condiciones normales de operación y con aportación de potencia activa, en kW del circuito SLO 4180 demanda baja.....	41
Figura 4.6 Perfiles de voltaje bajo condiciones normales de operación, y con aportación	

de potencia activa, en kW del circuito SLO 4180 demanda baja.....	41
Figura 4.7 Diagrama unifilar del circuito SLO 4160 demanda máxima.....	42
Figura 4.8 Pérdidas eléctricas bajo condiciones normales de operación y con aportación de potencia activa, en kW del circuito SLO 4160 demanda máxima.....	43
Figura 4.9 Perfiles de voltaje bajo condiciones normales de operación, y con aportación de potencia activa, en kW del circuito SLO 4160 demanda máxima.....	44
Figura 4.10 Diagrama unifilar del circuito SLO 4160 demanda baja.....	45
Figura 4.11 Pérdidas eléctricas bajo condiciones normales de operación y con aportación de potencia activa, en kW del circuito SLO 4160 demanda baja.....	46
Figura 4.12 Perfiles de voltaje bajo condiciones normales de operación, y con aportación de potencia activa, en kW del circuito SLO 4160 demanda baja.....	48
Figura 4.13 Diagrama unifilar del circuito SLO 4150 demanda máxima.....	48
Figura 4.14 Pérdidas eléctricas bajo condiciones normales de operación y con aportación de potencia activa, en kW del circuito SLO 4150 demanda máxima.....	49
Figura 4.15 Perfiles de voltaje bajo condiciones normales de operación, y con aportación de potencia activa, en kW del circuito SLO 4150 demanda máxima.....	50
Figura 4.16 Diagrama unifilar del circuito SLO 4150 demanda baja.....	51
Figura 4.17 Pérdidas eléctricas bajo condiciones normales de operación y con aportación de potencia activa, en kW del circuito SLO 4150 demanda baja.....	52
Figura 4.18 Perfiles de voltaje bajo condiciones normales de operación, y con aportación de potencia activa, en kW del circuito SLO 4150 demanda baja.....	53
Figura 5.1 Pérdidas eléctricas bajo condiciones normales de operación y con aportación de potencia activa, en kW del circuito SLO 4180 demanda baja.....	55
Figura 5.2 Pérdidas eléctricas bajo condiciones normales de operación y con aportación de potencia activa, en kW del circuito SLO 4180 demanda baja.....	56
Figura 5.3 Pérdidas eléctricas bajo condiciones normales de operación y con aportación de potencia activa, en kW del circuito SLO 4160 demanda máxima.....	57
Figura 5.4 Pérdidas eléctricas bajo condiciones normales de operación y con aportación de potencia activa, en kW del circuito SLO 4160 demanda baja.....	58
Figura 5.5 Pérdidas eléctricas bajo condiciones normales de operación y con aportación de potencia activa, en kW del circuito SLO 4150 demanda máxima.....	59
Figura 5.6 Pérdidas eléctricas bajo condiciones normales de operación y con aportación de potencia activa, en kW del circuito SLO 4150 demanda baja.....	60

Lista de tablas

	Página
Tabla 3.1 Resultados del EFC ante demanda máxima del circuito SLO 4180.....	22
Tabla 3.2 Resultados del EFC ante demanda baja del circuito SLO 4180.....	23
Tabla 3.3 Tabla comparativa de voltajes y pérdidas eléctricas en el circuito SLO 4180.....	24
Tabla 3.4 Resultados del EFC ante demanda máxima del circuito SLO 4160.....	27
Tabla 3.5 Resultados del EFC ante demanda baja del circuito SLO 4160.....	29
Tabla 3.6 Tabla comparativa de voltajes y pérdidas eléctricas en el circuito SLO 4160.....	29
Tabla 3.7 Resultados del EFC ante demanda máxima del circuito SLO 4150.....	32
Tabla 3.8 Resultados del EFC ante demanda baja del circuito SLO 4150.....	33
Tabla 3.9 Tabla comparativa de voltajes y pérdidas eléctricas en el circuito SLO 4150.....	33
Tabla 4.1 Tabla comparativa de resultados del EFC ante demanda máxima, bajo condiciones normales de operación y con aportación de potencia activa del circuito SLO 4180.....	37
Tabla 4.2 Tabla comparativa de resultados del EFC ante demanda baja, bajo condiciones normales de operación y con aportación de potencia activa del circuito SLO 4180.....	40
Tabla 4.3 Tabla comparativa de resultados del EFC ante demanda máxima bajo condiciones normales de operación y con aportación de potencia activa del circuito SLO 4160.....	43
Tabla 4.4 Tabla comparativa de resultados del EFC ante demanda baja, bajo condiciones normales de operación y con aportación de potencia activa del circuito SLO 4160.....	46
Tabla 4.5 Tabla comparativa de resultados del EFC ante demanda máxima bajo condiciones normales de operación y con aportación de potencia activa del circuito SLO 4150.....	49
Tabla 4.6 Tabla comparativa de resultados del EFC ante demanda baja, bajo condiciones normales de operación y con aportación de potencia activa del circuito SLO 4150.....	52

Agradecimientos

Al Instituto Tecnológico de Ciudad Madero por haber sido mi hogar durante mi estancia al realizar los estudios de posgrado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACyT por brindarme un apoyo económico a través de la beca que recibí durante mi estancia en los estudios de posgrado.

A nuestros maestros por compartir su tiempo y conocimientos con la comunidad de alumnos de la Maestría en Ingeniería Eléctrica

A mi asesor M.C. Rafael Castillo Gutiérrez, que durante el desarrollo de mi proyecto de tesis me ayudo a corregirla y darle forma.

Al M.C. Hermenegildo Cisneros Villegas por su atenta participación en las actividades desarrolladas en la Maestría en Ingeniería Eléctrica, en beneficio de los alumnos de posgrado.

Al M.C. Rodolfo Castillo Ibarra por haberme motivado a estudiar esta maestría, y por compartir sus conocimientos y experiencias académicas.

Dedicatoria

A mis padres, Moisés Gómez Fuentes y Teresa Esquivel Cahero por su apoyo económico y emocional en cada etapa de mi educación, y por siempre motivarme a alcanzar mis metas.

UBICACIÓN ÓPTIMA DE FUENTES DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN EL SISTEMA ELÉCTRICO DE DISTRIBUCIÓN

Presenta: Ing. Aarón Eduardo Gómez Esquivel

Director de tesis: M.C. Rafael Castillo Gutiérrez

Resumen

En esta tesis se presentan los resultados obtenidos mediante una simulación en MATLAB, con la cual se realizaron estudios de flujos de carga de tres circuitos radiales de distribución. Estos estudios se realizaron bajo condiciones normales de operación con dos tipos de demanda en las cargas, demanda máxima y demanda baja. Además se realizaron otros tres estudios sobre los mismos circuitos con la introducción de potencia activa en dos nodos.

El objetivo de las simulaciones fue obtener la ubicación óptima de las potencias propuestas para cada caso. Para determinar esta ubicación se tomó como objetivo principal la reducción de pérdidas eléctricas en el circuito.

La metodología de las simulaciones fue hacer permutaciones de las potencias introducidas en cada uno de los nodos de los circuitos por separado. Se determinaron las pérdidas eléctricas en cada permutación de las potencias y se seleccionó la que tuvo las menores pérdidas eléctricas totales.

OPTIMAL LOCATION OF SOURCES OF DISTRIBUTED GENERATION IN THE ELECTRICAL DISTRIBUTION SYSTEM

Aaron Eduardo Gomez Esquivel

Abstract

This thesis presents the results obtained by means of a simulation in MATLAB, with which load flow studies of three radial distribution circuits were performed. These studies were made under normal operation with two types of load demand, maximum and low demand. Additionally other three studies were carried out on the same circuits with the introduction of active power in two nodes.

The aim of the simulations was to obtain the optimal placement of the powers proposed for each case. To determine this location, the primary goal was reducing power losses in the circuit.

The methodology of the simulations was to do permutations of the power introduced in each of the nodes of the circuits separately. Electrical losses in each permutation of the powers were determined and selected which had the lowest total power losses.

Capítulo

1

Introducción

En este capítulo se presenta un enfoque general del proyecto desarrollado, abarcando los antecedentes del problema, el planteamiento del problema, su justificación, los objetivos del proyecto, la hipótesis y los alcances y limitaciones del mismo.

1.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA [1].

La industria del suministro de energía eléctrica inició en 1882, con la puesta en marcha de la central generadora en 257 Pearl Street, en el área de Wall Street, New York, fue construida por Thomas Alva Edison.

El concepto con el cual empezó el desarrollo de esta industria fue el de suministro descentralizado de energía eléctrica a grupos de usuarios próximos, creciendo en cantidad más que en tamaño, y prevaleció en los comienzos de su desarrollo. El reconocimiento de las ventajas de la disponibilidad de energía eléctrica por parte de la sociedad, y el carácter monopólico del suministro de energía eléctrica impulsaron fuertemente al negocio, que se multiplicó rápidamente.

Factores tecnológicos como la introducción de la corriente alterna que permitía el transporte de mayores potencias con menores pérdidas, y las turbinas de vapor con rangos superiores de potencia y confiabilidad comparadas con las máquinas alternativas, desviaron la orientación inicial del desarrollo, se incrementó el tamaño de las unidades generadoras.

Pero en 1980 este desarrollo comenzó a perder impulso por una cantidad de factores antagonicos que en algunos casos derivaron en desechar las economías a escala: necesidad de controlar el impacto ambiental, restricciones de disponibilidad de combustibles adecuados a costos adecuados, incremento en el costo de la central y de los dispositivos para limitar la contaminación, incremento de los costos de transmisión y distribución, y las dificultades de su crecimiento, escasa posibilidad de aplicar cogeneración en unidades gigantescas.

La aparición de nuevas tecnologías de conversión en el mercado como la eólica, fotovoltaica, celdas solares, celdas de combustible, los combustibles derivados de la biomasa, las turbinas de gas modernas, el ciclo combinado, las micro-turbinas, etc. brindaron soluciones parciales a los problemas mencionados anteriormente.

En la actualidad se dispone de tecnologías que permiten generar utilizando tamaños de plantas relativamente pequeñas respecto a la generación convencional con menor costo por MW generado.

En la evolución tecnológica tenemos que la eficiencia es la que determina las economías de escala de los generadores. Ante esta nueva situación se tiende a perder uno de los factores básicos que justifican económicamente las grandes centrales.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA [2].

Hoy en día, disponemos de sistemas eléctricos cuya conformación son el resultado de una concepción que ha tenido vigencia por más de cincuenta años: grandes plantas de generación, generalmente ubicadas lejos de la demanda, y grandes redes de transmisión que llevan la energía generada a las cargas finales. En este panorama tradicional, la producción de electricidad dentro de la industria eléctrica consiste en un proceso que consta de cuatro etapas: generación, transmisión, distribución y consumo.

Desde sus inicios, la industria eléctrica ha estado en continuo crecimiento, debido a que la demanda de electricidad ha estado creciendo en forma sostenida. Esto ha obligado a incrementar también la generación de energía eléctrica de manera permanente.

Dentro del esquema tradicional de la industria eléctrica, el crecimiento del sistema implica la instalación de nuevas plantas generadoras, en forma más o menos continua en el tiempo, y la ampliación de redes de transmisión y distribución también en forma continua pero con menor frecuencia.

En la actualidad, el desarrollo de los mercados capitales y el progreso tecnológico acelerado, han hecho que el tamaño óptimo de las nuevas inversiones en generación disminuya en relación al tamaño del mercado. En esta situación, surgen condiciones en el sector de la generación, para que su desarrollo pase a ser coordinado por el mercado.

Aunado al crecimiento, surge la necesidad de proveer energía de calidad y confiabilidad aceptables, creando un entorno variado y favorable para la entrada de recursos distribuidos y la innovación de las prácticas operativas de los sistemas actuales. De las diferentes partes de un sistema eléctrico de potencia, los usuarios se identifican estrechamente con el subsistema de distribución debido a su proximidad y visibilidad en el día a día.

Varios desarrollos recientes han impulsado la entrada de generación y almacenamiento de energía a nivel distribución. El término recursos distribuidos abarca tanto a la Generación Distribuida (GD) como el almacenamiento de energía distribuida. Un servicio de energía distribuida usa los recursos distribuidos junto a una óptima administración de las cargas para alcanzar su objetivo. Además, varias tecnologías compactas de GD están siendo rápidamente viables en cuanto a eficiencia-economía.

La incorporación de GD puede aportar varios beneficios. Estos beneficios incluyen la reducción de pérdidas en las líneas, reducción del impacto ambiental, incremento general de eficiencia energética, reducción en la congestión de las líneas de transmisión y de distribución, soporte de voltaje, y retraso en la inversión para la mejora de generación existente, líneas de transmisión, y sistemas de distribución. Los consumidores se benefician además de la generación distribuida en términos de una mejor calidad y suministro a menor costo.

El propósito de esta investigación es desarrollar una metodología para determinar la ubicación óptima en cuanto a la reducción de pérdidas en las líneas de distribución de la GD. Esto se pretende lograr mediante la implementación de dicha metodología, y su ejecución y simulación por medio de MATLAB.

1.3 JUSTIFICACIÓN.

La presente investigación se realiza para desarrollar un algoritmo en el software MATLAB, que permita la ubicación óptima de generadores dispersos por la red de distribución, para evitar en su mayor medida, pérdidas de energía en las líneas.

La razón por la que se justifica el uso de pequeñas unidades generadoras en el sistema de distribución no es porque sean más eficientes que las grandes centrales de generación; es porque GD solo tiene que ser más económica que una central generadora y el costo asociado a su sistema de transmisión [3].

Al evitar los costos de transmisión, reducir los de distribución y tener menores costos de monitoreo y control, la GD representa una opción viable al momento de suministrar energía directamente al consumidor, o al brindar soporte al existente sistema de generación, evitando nuevas inversiones en infraestructura de transmisión.

Se planteará un soporte máximo del 20% del suministro total de los alimentadores, por ejemplo, si se tiene un suministro por parte de la subestación de 4 MVA como demanda máxima, a un factor de potencia de 0.8 en atraso, la potencia real suministrada sería 3.2 MW. De acuerdo a las capacidades de los generadores para uso distribuido, el tipo de generador y el tipo de servicio (continuo o programado), algunos de los posibles valores de aporte serán 5% - 0.16 MW, 10% - 0.32 MW, 15% - 0.48 MW y 20% - 0.64 MW del total suministrado por la subestación, en los puntos donde se presenten mayores pérdidas en los alimentadores con el fin de reducirlas y dar soporte de voltaje en los alimentadores.

1.4 OBJETIVOS.

Objetivo general

El objetivo de esta investigación es el desarrollo de un algoritmo computacional para encontrar la ubicación óptima de fuentes de GD en el sistema eléctrico de distribución, para que de este modo se reduzcan en la mayor medida posible las pérdidas en las líneas de distribución. Dicha ubicación será basada en función de las capacidades de las mismas y el porcentaje de carga que se desee compensar.

Objetivos específicos

1. Encontrar la ubicación de las fuentes de generación distribuida para disminuir las pérdidas del sistema.
2. Formular diferentes alternativas en base a la información obtenida para indicar dónde y de qué tamaño deben ser las fuentes de generación distribuida.

1.5 HIPÓTESIS.

Mediante el uso del algoritmo que se desarrolló en MATLAB, se llevan a cabo estudios de flujos de carga en una red de distribución para determinar las pérdidas y los perfiles de voltaje en la red en condiciones normales de operación. También se realizan estudios de flujos de carga para determinar los parámetros antes mencionados ahora para el caso en el que se introduzca GD a la red. Se proponen valores de potencia activa suministrados a la red, con valores que no superen el 20% de la demanda máxima en watts del sistema, y se observa el comportamiento de las pérdidas y los perfiles de voltaje para determinar la ubicación más eficiente en cuanto a reducción de pérdidas.

Se proponen dos casos, en el primero se da la capacidad de un generador y mediante el algoritmo, este se va moviendo de posición en cada uno de los nodos a la vez que se obtienen los parámetros de interés mediante un flujo de cargas para al final comparar todos los resultados y determinar cuál es el que ofrece una mejor eficiencia en la red, en un nodo determinado. En el segundo, se propone la capacidad de dos generadores, que al igual que en el caso anterior van alternando posiciones, completando todas las permutaciones posibles en la red, para que al final se comparen todos los resultados y se dé la mejor ubicación para ambos generadores.

1.6 ALCANCES Y LIMITACIONES.

- El algoritmo computacional es capaz de calcular la ubicación de las nuevas fuentes de generación distribuida en el sistema eléctrico de distribución.
- Determina el punto óptimo de acuerdo a la capacidad de generación que se establezca.

- El algoritmo se realiza en un software que más se adecue a dichas necesidades.
- El algoritmo, en cuestión de flujos de potencia, sus variables y parámetros asociados, podrá ser aplicado a cualquier sistema eléctrico de distribución.

Referencias Capítulo 1

- [1] Fuentes de Generación distribuida
- [2] P. Chiradeja, *Benefit of Distributed Generation: A Line Loss Reduction Analysis*,
2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific Dalian, China
- [3] H. Lee Willis, Walter G. Scott, *Distributed power generation planning and evaluation*,
Ch 1, Marcel Dekker Inc. 2000.

Capítulo

2

Marco teórico

En este capítulo se presentan los conceptos y formulas necesarias para la elaboración de este proyecto. Se explican con brevedad su aplicación en el desarrollo de este trabajo con fin de explicar la metodología seguida durante su desarrollo.

2.1 ESTRUCTURA DE LAS REDES ELECTRICAS.

Una red eléctrica se compone de tres partes principales: las centrales generadoras, las líneas de transmisión y las redes de distribución. Las líneas de transmisión constituyen los eslabones de conexión entre las centrales generadoras y las redes de distribución, y conduce a otras redes de potencia por medio de interconexiones. Una red de distribución conecta las cargas aisladas de una zona determinada con las líneas de transmisión.

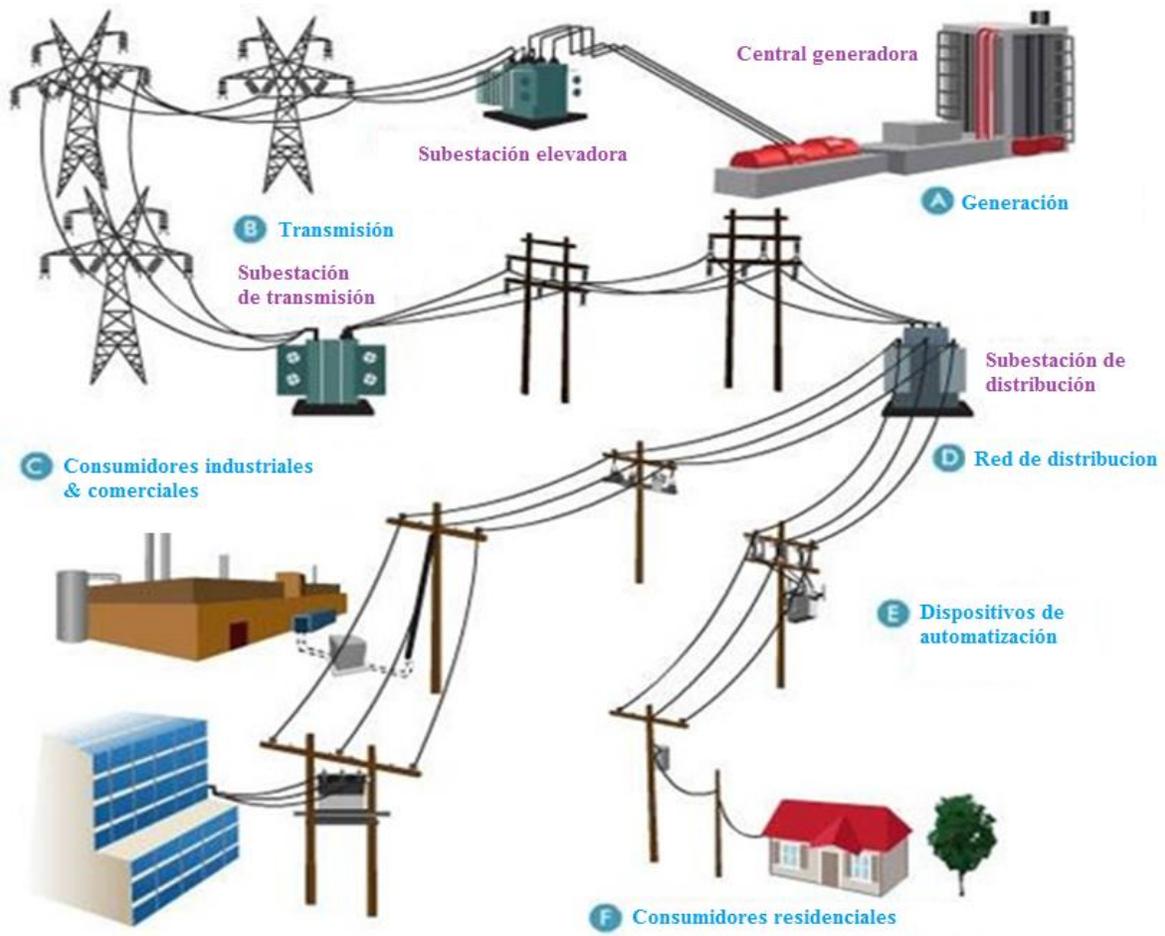


Figura 2.1 Red eléctrica.

2.2 EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN.

El sistema de distribución empieza generalmente con la subestación de distribución siendo alimentada por una o más líneas de subtransmisión. En algunos casos la subestación de distribución es alimentada directamente de una línea de transmisión de alto voltaje, en cuyo caso probablemente no hay sistema de subtransmisión. Cada subestación de distribución suministrará a uno o más alimentadores primarios. Con raras excepciones, los alimentadores son radiales, lo que significa que hay solo una trayectoria para que la potencia fluya desde la subestación de distribución hacia el usuario [1].

2.2.1 Sistema radial.

Es aquel que cuenta con una trayectoria entre la fuente y la carga, proporcionando el servicio de energía eléctrica. Un sistema radial tiene un solo camino sin regreso sobre el cual pasa la corriente, parte desde la subestación y se distribuye por forma de “rama”, como se ve en la Figura 2.2.

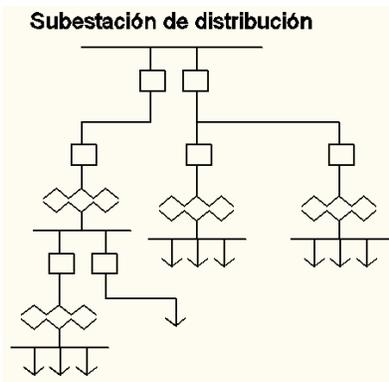


Figura 2.2 Esquema de un sistema radial.

Este tipo de sistema, es el más simple y el más económico debido a que es el arreglo que utiliza menor cantidad de equipo, sin embargo, tiene varias desventajas por su forma de operar, tales como: el mantenimiento de los interruptores se complica debido a que hay que dejar fuera parte de la red; y son los menos confiables ya que una falla sobre el alimentador primario afecta al resto de las cargas [1].

2.2.2 Sistema en anillo [1].

Es aquel que cuenta con más de una trayectoria entre la fuente y la carga para suministrar energía eléctrica. Este sistema comienza en la subestación y hace un ciclo completo por el área para abastecer y regresa al punto donde partió. Lo cual provoca que el área sea abastecida desde ambos extremos, permitiendo aislar ciertas secciones en caso de alguna falla. Este sistema es más utilizado para abastecer grandes masas de carga, desde pequeñas plantas industriales, medianas o grandes construcciones comerciales donde es de gran importancia la continuidad del servicio.

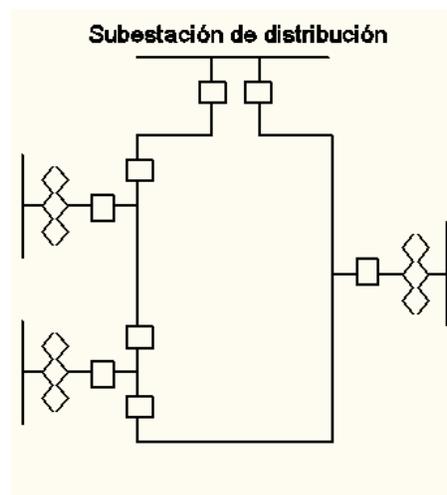


Figura 2.3 Esquema de un sistema en anillo.

Regularmente, el sistema en anillo tiene un costo inicial mayor y puede tener más problemas de crecimiento que el sistema radial, particularmente en las formas utilizadas para abastecer grandes cargas. Esto es principalmente porque dos circuitos deben ponerse en marcha por cada nueva subestación secundaria, para conectarla dentro del anillo. El añadir nuevas subestaciones en el alimentador del anillo obliga a instalar equipos que se puedan anidar en el mismo.

2.2.3 Sistema mallado [1].

Es un arreglo que provee mayor confiabilidad en el servicio que las formas de distribución radial o en anillo ya que se le da alimentación al sistema desde dos plantas y le

permite a la potencia alimentar de cualquier planta de poder a cualquier subestación de distribución. Este sistema es utilizado donde la energía eléctrica tiene que estar presente sin interrupciones, debido a que una falta de continuidad en un periodo de tiempo prolongado tendría grandes consecuencias en algunas aplicaciones industriales.

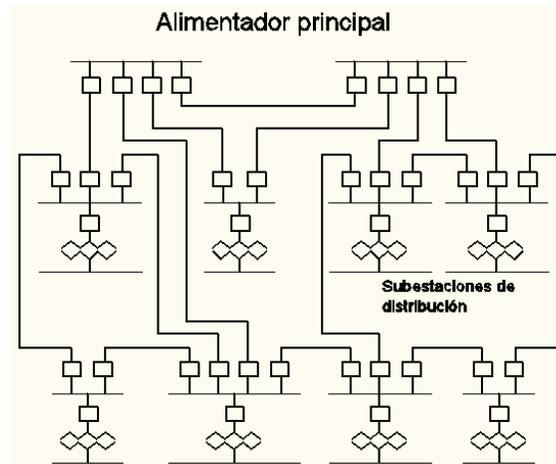


Figura 2.4 Esquema de un sistema tipo mallado.

2.3 GENERACIÓN DISTRIBUIDA.

La generación distribuida es por aquella que está limitada en tamaño y está interconectada a una subestación, alimentadores de distribución o al nivel de carga de usuarios. La GD incluye generadores fotovoltaicos, turbinas de viento, celdas de combustible, paquetes de turbinas de tamaño pequeño y micro, generadores basados motores Stirling, y motores-generadores de combustión interna [2].

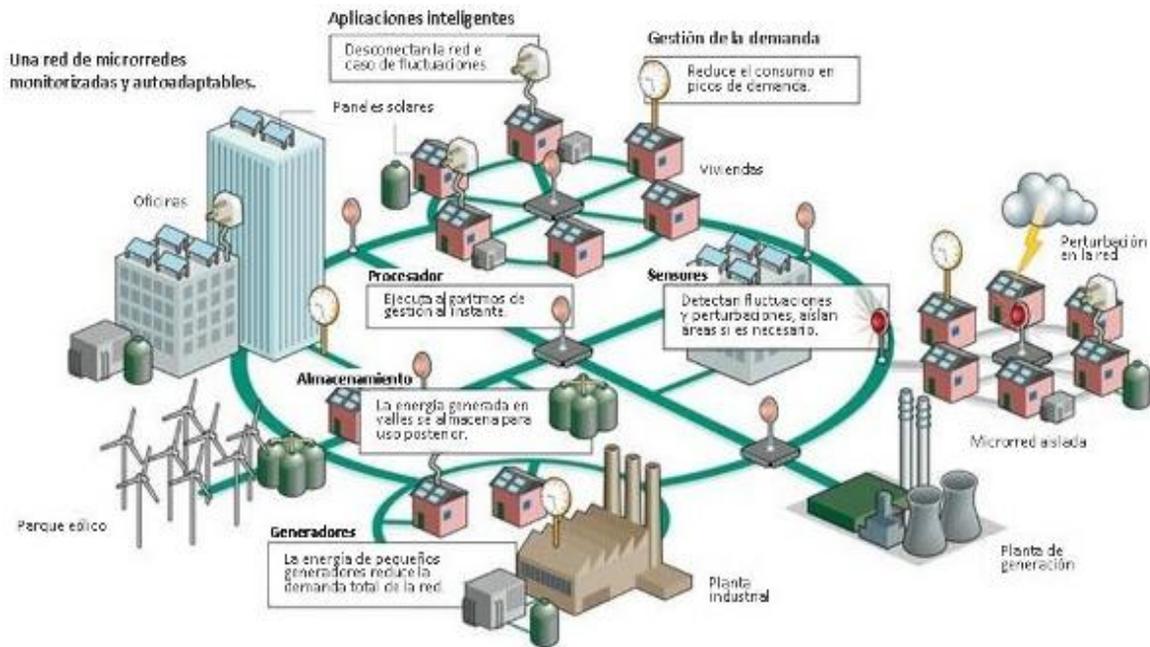


Figura 2.5 Generación distribuida como parte de una red eléctrica inteligente.

2.3.1 Generación distribuida en sistemas de distribución

Los sistemas de distribución, si son sistemas de tipo radial como los encontrados en áreas rurales o suburbanas, o sistemas tipo malla como los encontrados en áreas urbanas, son generalmente designados a operar sin ninguna generación en el sistema de distribución o en cargas de usuarios. La introducción de fuentes de generación en el sistema de distribución puede impactar significativamente el flujo de potencia y las condiciones de voltaje en los equipos de usuarios o de servicio. Estos impactos pueden manifestarse ellos mismos ya sea positiva o negativamente dependiendo de las características operativas del sistema de distribución y las características de la GD. Los impactos positivos son generalmente llamados “beneficios de soporte del sistema” e incluyen [2]:

- Soporte de voltaje y mejora en la calidad de la energía.
- Reducción de pérdidas.
- Liberación de capacidad en los sistemas distribución y transmisión.
- Aplazamiento de infraestructura nueva o actualizada.

- Mejora en la confiabilidad de servicio del sistema.

2.4 ESTUDIO DE FLUJOS DE CARGA.

El análisis de flujos de carga de un sistema de distribución es similar al de uno de un sistema de transmisión. Generalmente lo que se necesita saber antes de hacer los análisis son los voltajes trifásicos en la subestación y la potencia compleja de todas las cargas.

Un análisis de flujos de carga puede determinar los siguientes parámetros monofásicos y trifásicos [4]:

- Magnitudes y ángulos de fase de los voltajes en todos los nodos.
- El flujo de la línea especificado en kW y kVAR, amperes y grados, o amperes y flujo de potencia.
- Pérdidas en cada sección de la línea.
- Pérdidas totales de los alimentadores.

2.4.1 Diagrama unifilar de un circuito de distribución.

En la Figura 2.6 se presenta el diagrama unifilar del circuito SLO 4140 centro oriente. Este es un arreglo típico de un sistema radial de distribución, el cual parte de la subestación SLO 4140 con un voltaje de 13.8 kV. En el alimentador y los ramales se muestran los tamaños de los conductores y su longitud en km en negritas, además de la potencia en kVA en cada nodo.

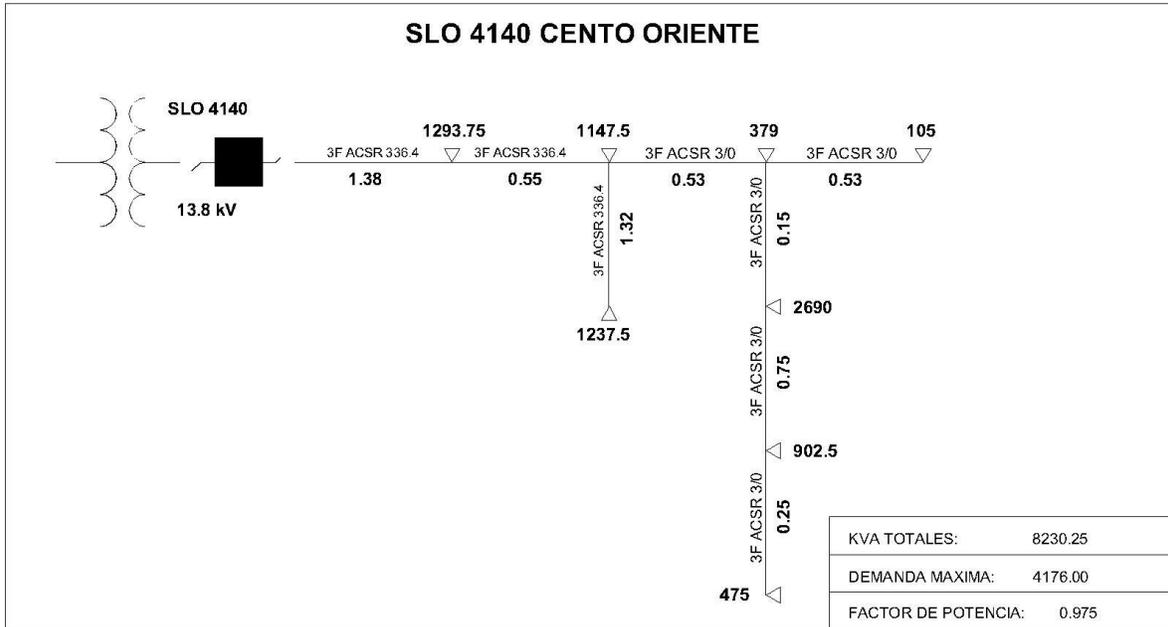


Figura 2.6 Diagrama unifilar de un circuito de distribución radial.

2.4.2 Matriz nodo trayectoria.

Esta matriz representa la topología del circuito mediante unos y ceros, es una matriz de “n x n” elementos, siendo “n” el número de nodos en el circuito, el uno indica la posición de un nodo con respecto a otro y su trayectoria si se encuentra en la diagonal principal, como se explicará a continuación [5].

$$K = \begin{matrix} T1 \\ T2 \\ \vdots \\ Tn \end{matrix} \begin{bmatrix} N1 & N2 & \dots & Nn \\ 1,1 & 1,2 & \dots & 1,n \\ 2,1 & 2,2 & \dots & 2,n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ n,1 & n,2 & \dots & n,n \end{bmatrix} \text{-----} (2.1)$$

Los nodos se enumeran del 1 al 15 empezando por el nodo más lejano a la subestación. En esta matriz se representa a los nodos con un 1. Cada elemento de la diagonal principal de la matriz representa una trayectoria desde un nodo hasta la subestación, por ejemplo, la primer trayectoria T1, empezaría con un 1 en el elemento (1,1), el siguiente elemento (1,2) sería el nodo 2 y se representaría también por un 1 en caso de que este estuviera en la trayectoria del nodo 1 hacia la subestación, o en caso contrario

serían un 0, y así sucesivamente se van revisando todos los nodos y si estos están o no en la trayectoria del nodo inicial a la subestación. Los nodos que se enumeraron del 1 al 15 van en la diagonal principal de la matriz representados por un 1, y los demás unos a la derecha de estos representan a los nodos que están en su trayectoria hacia la subestación, por lo que los elementos a la izquierda de los nodos de la diagonal principal son cero.

2.4.3 Cálculo de voltajes nodales [4].

Para determinar los voltajes en los nodos del sistema se realiza un proceso iterativo de “voltajes planos”, que consiste en suponer en la primera iteración que el voltaje de todos los nodos es el voltaje nominal del sistema, es decir, el de la subestación 13.8 kV. Se sigue el proceso hasta llegar a un margen de tolerancia. La ecuación utilizada es la 2.2:

$$\begin{bmatrix} V_{1_{k+1}} \\ V_{2_{k+1}} \\ \vdots \\ V_{n_{k+1}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{nominal} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} - Z_{red} \begin{bmatrix} \frac{S_k^*}{V_{1_k}} \\ \frac{S_k^*}{V_{2_k}} \\ \vdots \\ \frac{S_k^*}{V_{n_k}} \end{bmatrix} \text{-----}(2.2)$$

2.4.4 Cálculo de corrientes de carga [4].

Para determinar la corriente en cada nodo se toma como dato la potencia total en kVA y el voltaje calculado un paso antes. Se utiliza la ecuación 2.3:

$$I_C = \frac{S^*}{\sqrt{3} * V_{n+1}} \text{-----}(2.3)$$

2.4.5 Cálculo de corrientes de línea [5].

Las corrientes de líneas, que son las que fluyen en la sección de conductor que se encuentra entre nodos, se calculan al multiplicar la transpuesta de la matriz nodo trayectoria

K_{trans} por las corrientes de carga. En este caso la transpuesta de la matriz nodo-trayectoria tiene la particularidad de que como se multiplican columnas por filas, el resultado de esta operación es un vector fila, que en cada elemento tiene el valor de la corriente de cada segmento del circuito. Así, si son 15 segmentos en el circuito, este vector va a ser de 15x1. Para su cálculo se utiliza la ecuación 2.4:

	$I_L = K_{trans} I_C$	-----	(2.4)
--	-----------------------	-------	-------

2.4.6 Cálculo de caídas de voltaje [5].

Para determinar las caídas de voltaje de los segmentos del circuito se multiplica la corriente que circula por cada segmento por su impedancia. Teniendo como dato inicial la impedancia de cada segmento, se formó la matriz “Zprim” que es una matriz diagonal con elementos correspondientes de impedancia a cada segmento de línea del circuito. Multiplicando esta matriz por el vector I_L que se calculó en el paso anterior se obtiene un vector de 15x1 de caídas de voltaje como se muestra en la fórmula 2.5:

	$C_V = Z_{prim} I_L$	-----	(2.5)
--	----------------------	-------	-------

2.4.7 Cálculo de pérdidas eléctricas [5].

Las pérdidas eléctricas se calculan al multiplicar la matriz que contiene la impedancia de los segmentos del circuito “Zprim” por el vector de corrientes de línea “IL” al cuadrado, como se muestra en la ecuación 2.6:

	$P_E = Z_{prim} I_L^2$	-----	(2.6)
--	------------------------	-------	-------

Referencias Capítulo 2

- [1] <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/784/A4%20SISTEMAS%20DE%20DISTRIBUCION.pdf?sequence=4>
- [2] Philip P. Barker, Robert W. de Mello, *Determining the impact of Distributed Generation on Power Systems: Part 1 – Radial Distribution Systems*,
- [3] T. Griffin, K. Tomsovic, D. Secest A. Law, *Placement of Dispersed Generation System for Reduced Losses*, Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on Systems Sciences 2000.
- [4] William H. Kersting, *Distribution System Modeling and Analysis*, Chapter 10 Distribution Feeder Analysis, CRC Press LLC 2002.
- [5] Stagg and El-Abiad, *Computer Methods in Power System Analysis*, McGraw-Hill, 1968.

Estudios de flujos de carga ante demanda máxima y baja.

En este capítulo se presentan los resultados más relevantes de los estudios de flujos de carga EFC de los circuitos SLO 4180, SLO 4160 y SLO 4150 ante las condiciones de demanda máxima y demanda baja con el fin de establecerlos como referencia al momento de obtener los resultados del algoritmo en MATLAB, que tiene como objetivo encontrar la ubicación óptima de los generadores.

3.1 ANÁLISIS DE FLUJOS DE CARGA PARA EL CIRCUITO SLO 4180.

3.1.1 Flujo de carga ante demanda máxima para el circuito SLO 4180.

La figura 3.1 es el diagrama unifilar del circuito de distribución radial SLO 4180, en el están representados los datos necesarios para realizar un estudio de flujos de carga. En este caso el estudio se hará a demanda máxima, es decir, se tomara como demanda máxima la sumatoria de las cargas de potencia activa de cada nodo, que en este caso suman 7630 kW con un factor de potencia 0.863.

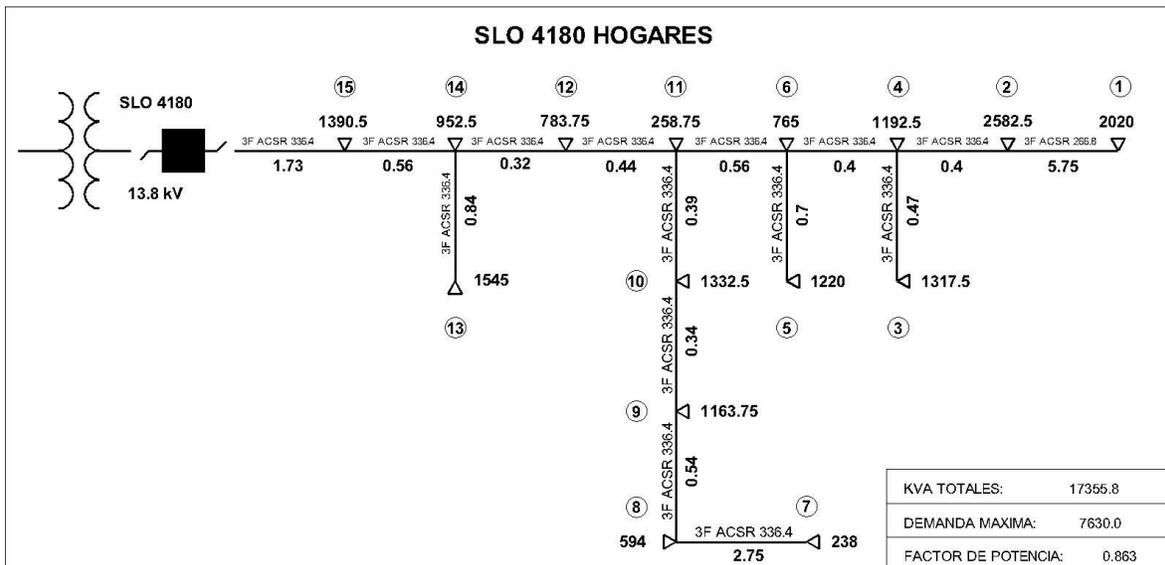


Figura 3.1 Diagrama unifilar del circuito SLO 4180 demanda máxima.

Los resultados más representativos se muestran en la tabla 3.1 y están dados en volts y watts. Se muestran los perfiles de voltaje en cada nodo, la corriente que demanda cada nodo, la corriente que circula por cada sección del circuito, que es la corriente de línea, y las pérdidas eléctricas de potencia activa correspondientes a cada sección del circuito. Los voltajes y corrientes se expresan en forma polar, mientras que las pérdidas eléctricas de potencia activa se expresan como la parte real de las pérdidas de potencia aparente.

Tabla 3.1 Resultados del EFC ante demanda máxima del circuito SLO 4180.

Nodo	Voltaje	Ángulo	I_{Carga}	Ángulo	I_{Línea}	Ángulo	Pérdidas
1	12791.62	-2.63	46.44	-32.98	46.44	-32.98	5579.71
2	12977.59	-2.20	58.53	-32.55	104.97	-32.74	1863.24
3	12994.86	-2.15	29.82	-32.50	29.82	-32.50	176.71
4	13003.47	-2.13	26.97	-32.47	161.76	-32.65	4425.15
5	13031.50	-2.05	27.53	-32.39	27.53	-32.39	224.43
6	13043.35	-2.02	17.25	-32.36	206.54	-32.59	10101.04
7	13072.14	-1.94	5.35	-32.28	5.35	-32.28	33.35
8	13081.19	-1.91	13.35	-32.25	18.71	-32.26	79.95
9	13087.41	-1.89	26.15	-32.24	44.86	-32.25	289.42
10	13096.79	-1.87	29.92	-32.21	74.78	-32.23	922.57
11	13114.73	-1.81	5.80	-32.16	287.12	-32.49	15339.62
12	13192.77	-1.60	17.47	-31.94	304.59	-32.46	12555.45
13	13235.36	-1.48	34.33	-31.83	34.33	-31.83	418.85
14	13253.10	-1.43	21.14	-31.78	360.06	-32.36	30705.41
15	13378.10	-1.09	30.57	-31.44	390.62	-32.29	111652.44

Las pérdidas eléctricas totales de potencia activa son 194,367.34 watts.

3.1.2 Flujo de carga ante demanda baja para el circuito SLO 4180.

El diagrama unifilar es el mismo que el anterior, aunque se diferencia en la cantidad de potencia demandada, que es la demanda baja y es considerada como el 30% de la demanda máxima por CFE; en este caso el 30% de la demanda máxima son 2289 kW. En los siguientes casos de los circuitos SLO 4160 y SLO 4150 los resultados se presentaran de forma semejante a los resultados de este estudio.

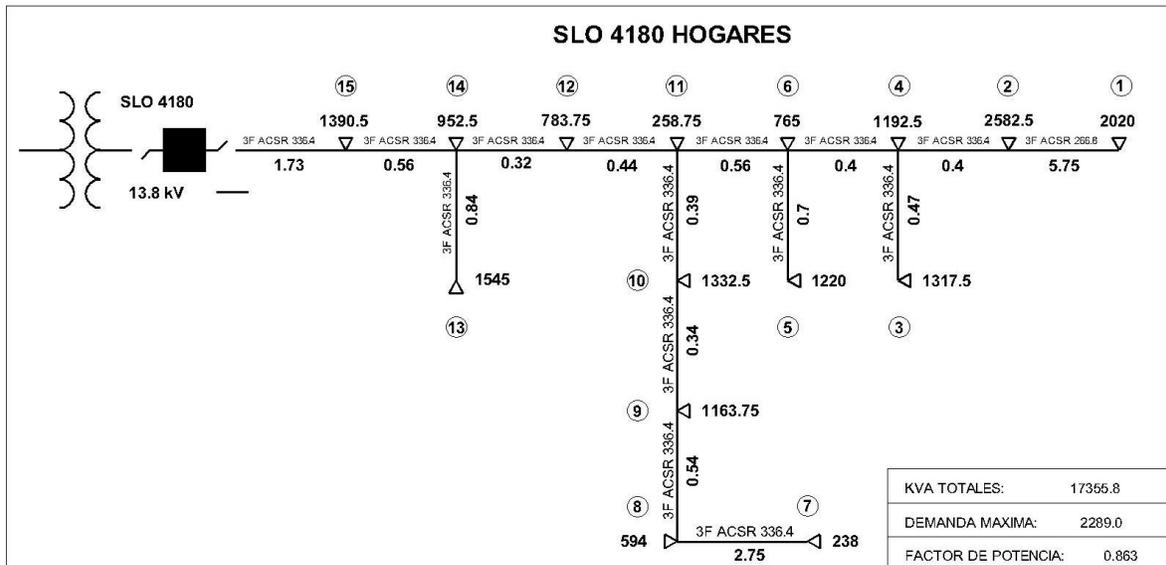


Figura 3.2 Diagrama unifilar del circuito SLO 4180 demanda baja.

Los resultados más representativos se muestran en la tabla 3.2. Se muestran los perfiles de voltaje en cada nodo, la corriente que demanda cada nodo, la corriente que circula por cada sección del circuito, que es la corriente de línea, y las pérdidas eléctricas correspondientes a cada sección del circuito.

Tabla 3.2 Resultados del EFC ante demanda baja del circuito SLO 4180.

Nodo	Voltaje	Ángulo	I_{Carga}	Ángulo	$I_{Línea}$	Ángulo	Pérdidas
1	13512.32	-0.75	13.19	-31.09	13.19	-31.09	453.10
2	13565.07	-0.63	16.80	-30.98	29.99	-31.03	152.14
3	13569.97	-0.62	8.57	-30.96	8.57	-30.96	14.59
4	13572.44	-0.61	7.75	-30.96	46.31	-31.00	362.78
5	13580.43	-0.59	7.93	-30.93	7.93	-30.93	18.60
6	13583.84	-0.58	4.97	-30.93	59.20	-30.99	830.13
7	13591.95	-0.56	1.54	-30.90	1.54	-30.90	2.78
8	13594.56	-0.55	3.86	-30.90	5.40	-30.90	6.66
9	13596.36	-0.55	7.55	-30.89	12.95	-30.89	24.12
10	13599.06	-0.54	8.65	-30.88	21.60	-30.89	76.94
11	13604.24	-0.52	1.68	-30.87	82.48	-30.96	1265.92
12	13626.58	-0.46	5.07	-30.81	87.55	-30.95	1037.44
13	13638.68	-0.43	10.00	-30.78	10.00	-30.78	35.49
14	13643.84	-0.42	6.16	-30.76	103.71	-30.92	2547.25
15	13679.63	-0.32	8.97	-30.67	112.68	-30.90	9288.91

Las pérdidas eléctricas totales de potencia activa son 16,116.84 watts.

3.1.3 Comparación de los perfiles de voltaje y pérdidas eléctricas ante demanda máxima y baja del circuito SLO 4180.

En la tabla 3.3 se hace una comparación de los perfiles de voltaje y las pérdidas eléctricas en el circuito bajo ambas demandas. Se utiliza el subíndice “max” para referirse al estudio de demanda máxima, y el subíndice “baja” para referirse al estudio de demanda baja.

Tabla 3.3 Tabla comparativa de voltajes y pérdidas eléctricas en el circuito SLO 4180.

Nodo	V _{max}	Ángulo	V _{baja}	Ángulo	P _{max}	P _{baja}
1	12791.62	-2.63	13512.32	-0.75	5579.71	453.10
2	12977.59	-2.20	13565.07	-0.63	1863.24	152.14
3	12994.86	-2.15	13569.97	-0.62	176.71	14.59
4	13003.47	-2.13	13572.44	-0.61	4425.15	362.78
5	13031.50	-2.05	13580.43	-0.59	224.43	18.60
6	13043.35	-2.02	13583.84	-0.58	10101.04	830.13
7	13072.14	-1.94	13591.95	-0.56	33.35	2.78
8	13081.19	-1.91	13594.56	-0.55	79.95	6.66
9	13087.41	-1.89	13596.36	-0.55	289.42	24.12
10	13096.79	-1.87	13599.06	-0.54	922.57	76.94
11	13114.73	-1.81	13604.24	-0.52	15339.62	1265.92
12	13192.77	-1.60	13626.58	-0.46	12555.45	1037.44
13	13235.36	-1.48	13638.68	-0.43	418.85	35.49
14	13253.10	-1.43	13643.84	-0.42	30705.41	2547.25
15	13378.10	-1.09	13679.63	-0.32	111652.44	9288.91

Se puede observar que los perfiles de voltaje ante demanda máxima son menores a los que se presentan ante la demanda baja, también se observa que las pérdidas eléctricas ante demanda máxima son mayores a las que se presentan ante demanda baja. Las pérdidas eléctricas totales de potencia activa ante demanda máxima son 194,367.34 watts y ante demanda baja son 16,116.84 watts. Esto se debe a que al bajar la demanda, se transporta menos corriente eléctrica a través del alimentador principal del circuito. En el caso del voltaje, mientras más corriente circule por un conductor, mayor será la caída de tensión en

esta sección. Para el caso de las pérdidas eléctricas, estas aumentan o disminuyen proporcionalmente al cuadrado de la corriente que circule por una sección dada de un conductor.

Si observamos en el diagrama unifilar del circuito las secciones de conductores que conforman al alimentador principal y las comparamos con su respectivo valor en pérdidas eléctricas en la tabla 3.3, podremos notar que la mayor cantidad de pérdidas se presentan en la sección del alimentador principal, ya que es por donde circula la mayor cantidad de corriente eléctrica para ser distribuida a los ramales del circuito.

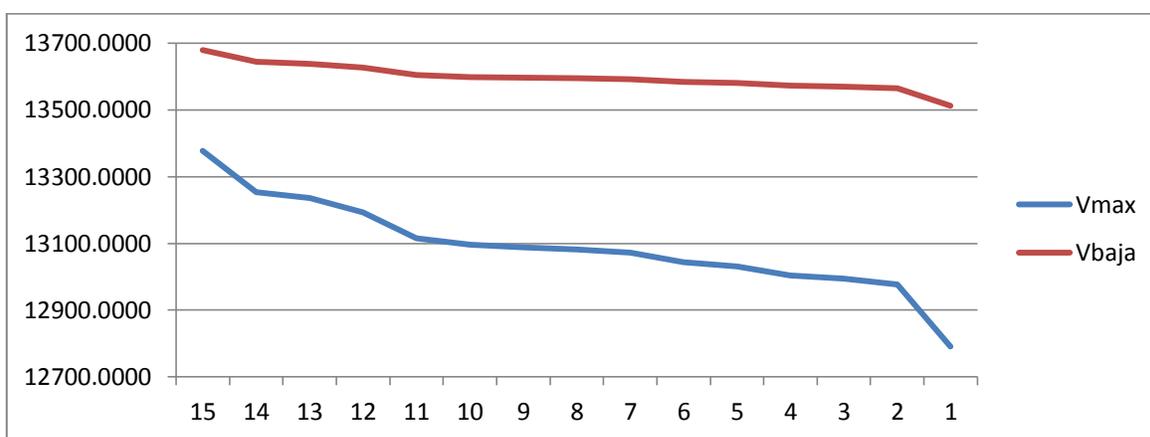


Figura 3.3 Perfiles de voltaje ante demanda máxima y baja del circuito SLO 4180.

En la figura 3.3 se observa que conforme se avanza en los nodos el voltaje cae, esto es debido a la impedancia que se presenta en las líneas de distribución y las cargas del circuito.

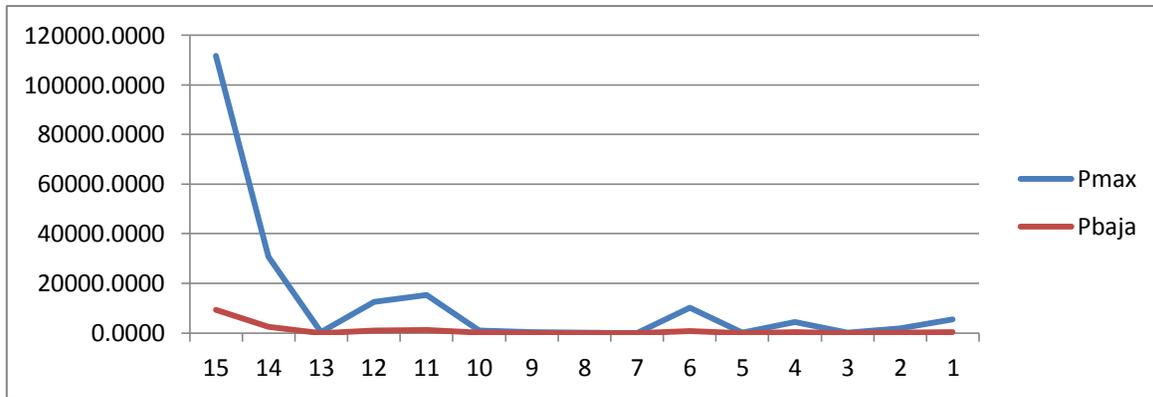


Figura 3.4 Pérdidas eléctricas ante demanda máxima y baja del circuito SLO 4180.

En la figura 3.4 de pérdidas eléctricas comparativas, al igual que las posteriores, los números del 1 al 15 no representan los nodos, sino las secciones de conductor anteriores a este nodo. Así, por ejemplo, el número 1 representa la sección de conductores entre el nodo 1 y el 2.

Los nodos que pertenecen al alimentador principal son los que presentan mayores pérdidas eléctricas como se puede observar en la figura 3.4. Esto resulta más evidente en la gráfica de pérdidas ante demanda máxima, aunque si se usara una sola tabla para la gráfica de las pérdidas ante demanda baja está sería similar a la de demanda máxima.

3.2 ESTUDIO DE FLUJOS DE CARGA PARA EL CIRCUITO SLO 4160.

3.2.1 Flujo de carga ante demanda máxima para el circuito SLO 4160.

La figura 3.5 es el diagrama unifilar del circuito de distribución radial SLO 4160, en el están representados los datos necesarios para realizar un análisis de flujos de carga. En este caso el análisis se hará a demanda máxima, es decir, se tomará como demanda máxima la sumatoria de las cargas de potencia activa de cada nodo, que en este caso suman 6048 kW con un factor de potencia de 0.932.

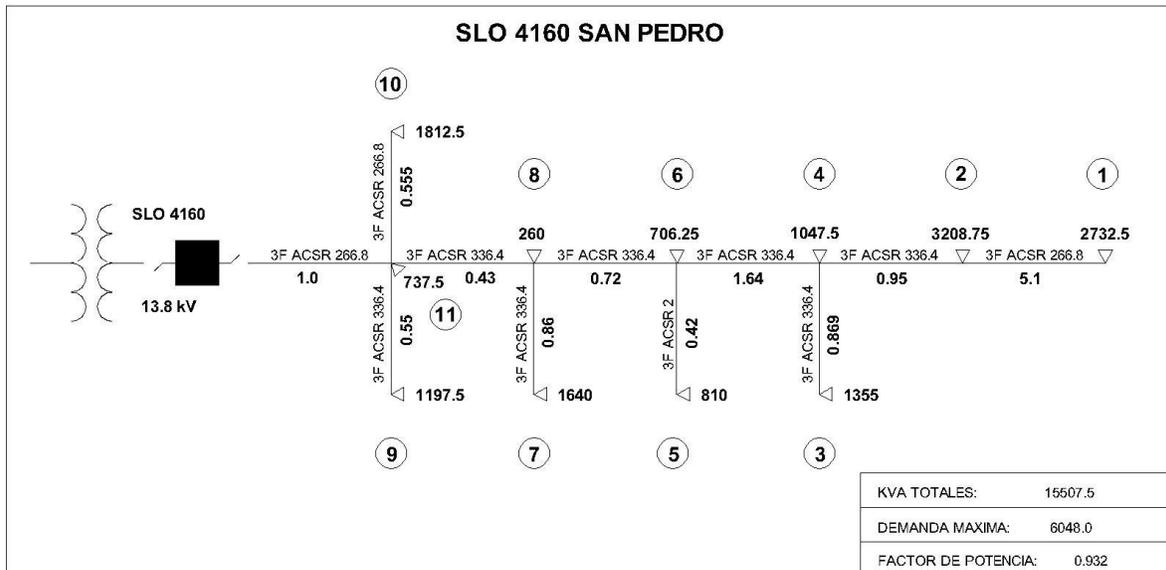


Figura 3.5 Diagrama unifilar del circuito SLO 4160 demanda máxima.

Los resultados más representativos se muestran en la tabla 3.4 y están dados en volts y watts. Se muestran los perfiles de voltaje en cada nodo, la corriente que demanda cada nodo, la corriente que circula por cada sección del circuito, que es la corriente de línea, y las pérdidas eléctricas de potencia activa correspondientes a cada sección del circuito.

Tabla 3.4 Resultados del EFC ante demanda máxima del circuito SLO 4160.

Nodo	Voltaje	Ángulo	I _{Carga}	Ángulo	I _{Línea}	Ángulo	Pérdidas
1	13145.88	-2.24	50.22	-23.49	50.22	-23.49	5727.13
2	13307.31	-1.72	58.25	-22.97	108.47	-23.21	4525.08
3	13352.08	-1.55	24.52	-22.80	24.52	-22.80	210.53
4	13363.67	-1.50	18.94	-22.76	151.93	-23.09	15303.97
5	13488.19	-0.99	14.51	-22.24	14.51	-22.24	97.94
6	13500.48	-0.99	12.64	-22.24	179.07	-22.96	9321.18
7	13557.88	-0.78	29.22	-22.03	29.22	-22.03	293.36
8	13571.56	-0.72	4.63	-21.98	212.92	-22.81	7857.30
9	13615.73	-0.56	21.25	-21.81	21.25	-21.81	98.92
10	13610.87	-0.57	32.17	-21.83	32.17	-21.83	252.40
11	13622.09	-0.54	13.08	-21.79	279.41	-22.57	34524.40

Las pérdidas eléctricas totales de potencia activa son 78,212.21 watts.

3.2.2 Flujo de carga ante demanda baja para el circuito SLO 4160.

En la figura 3.6 se muestra el diagrama unifilar del circuito SLO 4160 ante demanda baja con 1814.4 kW y a un factor de potencia de 0.932.

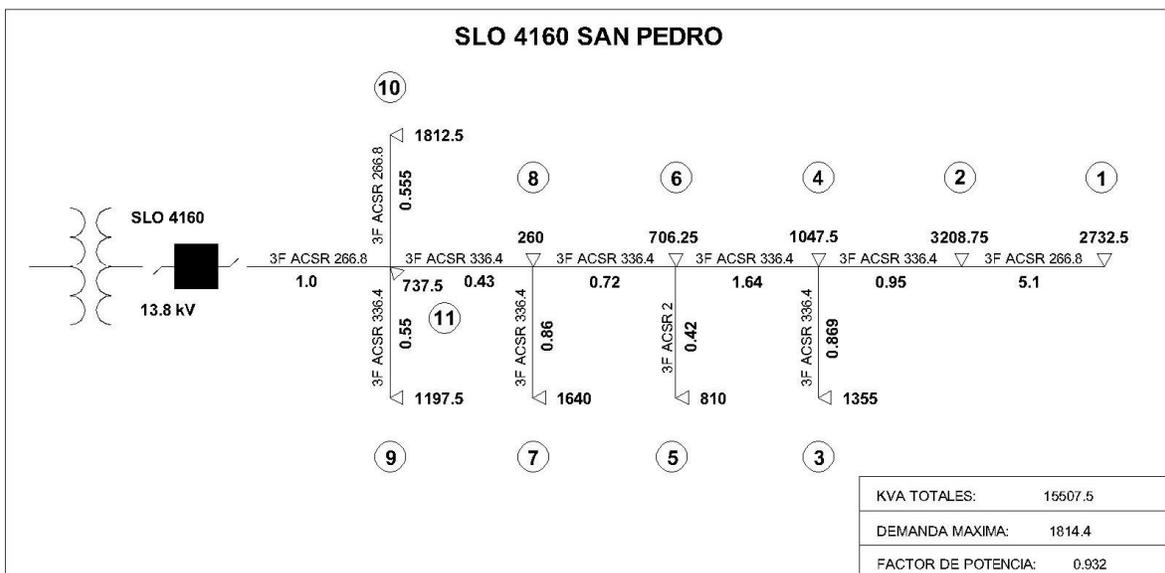


Figura 3.6 Diagrama unifilar del circuito SLO 4160 demanda baja.

Los resultados más representativos se muestran en la tabla 3.5. Se muestran los perfiles de voltaje en cada nodo, la corriente que demanda cada nodo, la corriente que circula por cada sección del circuito, que es la corriente de línea, y las pérdidas eléctricas correspondientes a cada sección del circuito.

Tabla 3.5 Resultados del EFC ante demanda baja del circuito SLO 4160.

Nodo	Voltaje	Ángulo	I _{Carga}	Ángulo	I _{Línea}	Ángulo	Pérdidas
1	13610.33	-0.65	14.55	-21.90	14.55	-21.90	474.82
2	13656.99	-0.50	17.03	-21.75	31.58	-21.82	377.46
3	13669.94	-0.45	7.18	-21.70	7.18	-21.70	17.84
4	13673.34	-0.44	5.55	-21.69	44.32	-21.79	1282.66
5	13709.36	-0.29	4.28	-21.54	4.28	-21.54	8.60
6	13712.98	-0.29	3.73	-21.54	52.33	-21.75	784.85
7	13729.51	-0.23	8.66	-21.48	8.66	-21.48	25.57
8	13733.56	-0.22	1.37	-21.47	62.36	-21.71	665.25
9	13746.32	-0.17	6.31	-21.42	6.31	-21.42	8.69
10	13744.88	-0.17	9.56	-21.42	9.56	-21.42	22.19
11	13748.21	-0.16	3.89	-21.41	82.12	-21.64	2958.05

Las pérdidas eléctricas totales de potencia activa son 6,625.98 watts.

3.2.3 Comparación de los perfiles de voltaje y pérdidas eléctricas ante demanda máxima y baja del circuito SLO 4160.

A continuación se hace una comparación de los perfiles de voltaje y las pérdidas eléctricas en el circuito. Se utiliza el subíndice “max” para referirse al estudio de demanda máxima, y el subíndice “baja” para referirse al estudio de demanda baja.

Tabla 3.6 Tabla comparativa de voltajes y pérdidas eléctricas en el circuito SLO 4160.

Nodo	V _{max}	Ángulo	V _{baja}	Ángulo	P _{max}	P _{baja}
1	13145.88	-2.24	13610.33	-0.65	5727.13	474.82
2	13307.31	-1.72	13656.99	-0.50	4525.08	377.46
3	13352.08	-1.55	13669.94	-0.45	210.53	17.84
4	13363.67	-1.50	13673.34	-0.44	15303.97	1282.66
5	13488.19	-0.99	13709.36	-0.29	97.94	8.60
6	13500.48	-0.99	13712.98	-0.29	9321.18	784.85
7	13557.88	-0.78	13729.51	-0.23	293.36	25.57
8	13571.56	-0.72	13733.56	-0.22	7857.30	665.25
9	13615.73	-0.56	13746.32	-0.17	98.92	8.69
10	13610.87	-0.57	13744.88	-0.17	252.40	22.19
11	13622.09	-0.54	13748.21	-0.16	34524.40	2958.05

Se puede observar que los perfiles de voltaje ante demanda máxima son menores a los que se presentan ante la demanda baja, también se observa que las pérdidas eléctricas ante demanda máxima son mayores a las que se presentan ante demanda baja. Las pérdidas eléctricas totales de potencia activa ante demanda máxima son 78,212.21 watts y ante demanda baja son 6,625.98 watts.

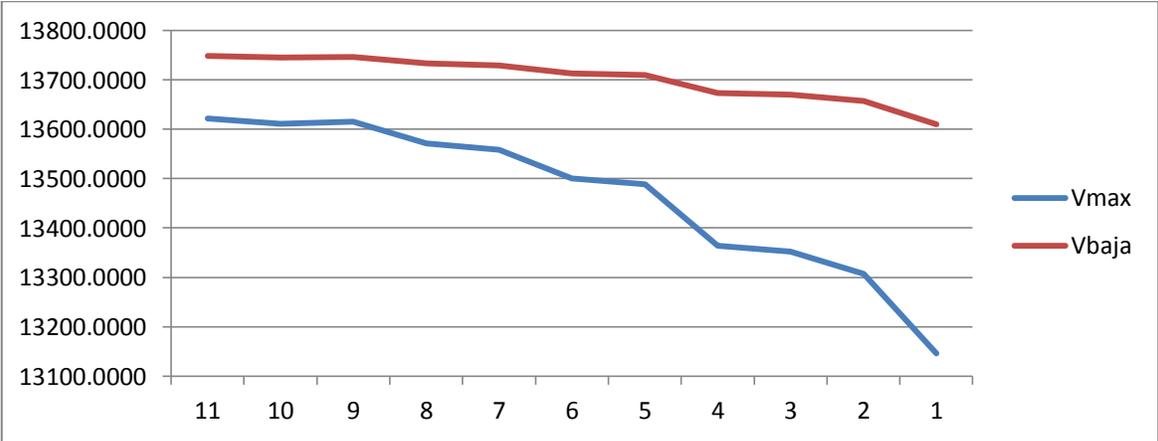


Figura 3.7 Perfiles de voltaje ante demanda máxima y baja del circuito SLO 4160.

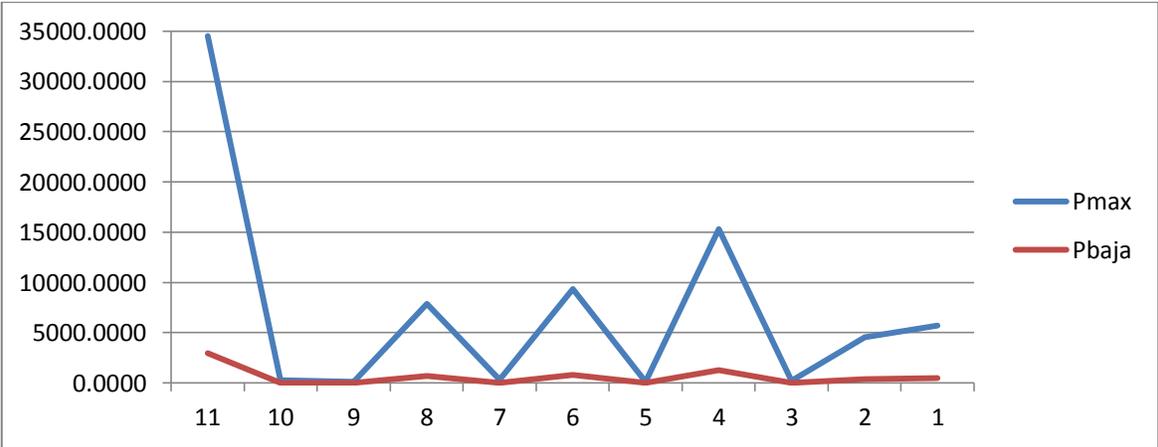


Figura 3.8 Pérdidas eléctricas ante demanda máxima y baja del circuito SLO 4160.

3.3 ESTUDIO DE FLUJOS DE CARGA PARA EL CIRCUITO SLO 4150.

3.3.1 Flujo de carga ante demanda máxima para el circuito SLO 4150.

La figura 3.9 es el diagrama unifilar del circuito de distribución radial SLO 4150, en el están representados los datos necesarios para realizar un estudio de flujos de carga. En este caso el análisis se hará a demanda máxima, es decir, se tomara como demanda máxima la sumatoria de las cargas de potencia activa de cada nodo, que en este caso suman 2880 kW con un factor de potencia de 0.863.

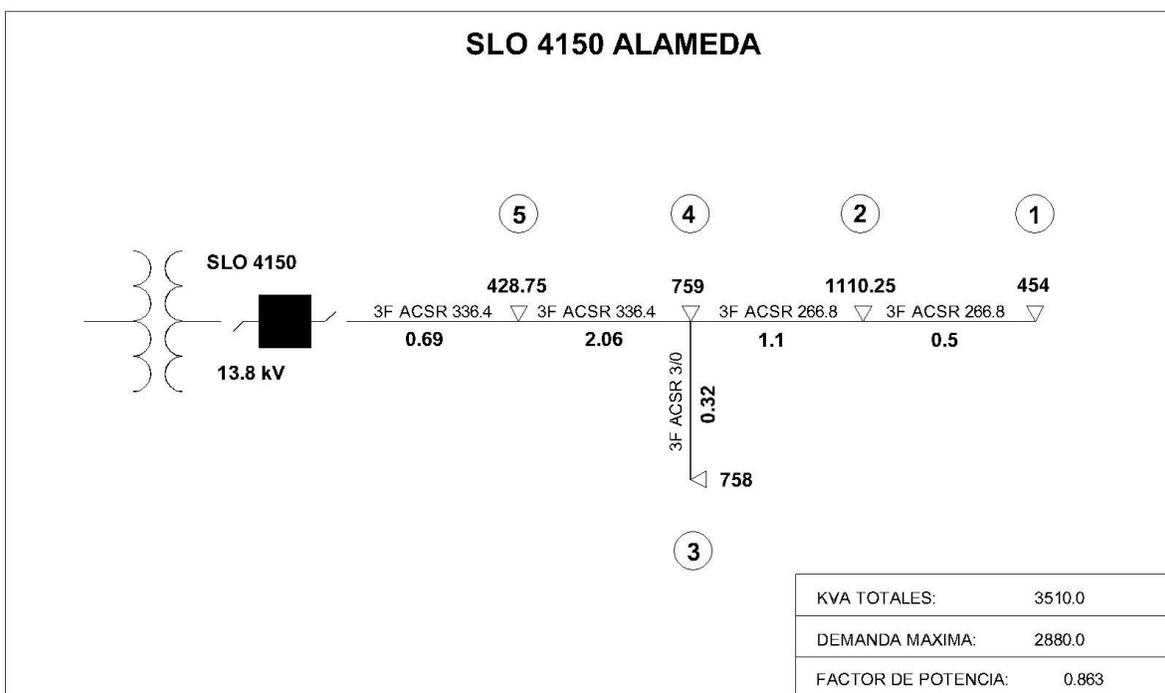


Figura 3.9 Diagrama unifilar del circuito SLO 4150 demanda máxima.

Los resultados más representativos se muestran en la tabla 3.7 y están dados en volts y watts. Se muestran los perfiles de voltaje en cada nodo, la corriente que demanda cada nodo, la corriente que circula por cada sección del circuito, que es la corriente de línea, y las pérdidas eléctricas de potencia activa correspondientes a cada sección del circuito.

Tabla 3.7 Resultados del EFC ante demanda máxima del circuito SLO 4150.

Nodo	Voltaje	Ángulo	I _{carga}	Ángulo	I _{Línea}	Ángulo	Pérdidas
1	13525.96	-0.71	18.42	-31.05	18.42	-31.05	76.88
2	13532.37	-0.70	45.04	-31.04	63.46	-31.04	2006.67
3	13570.17	-0.60	30.66	-30.95	30.66	-30.95	192.08
4	13580.91	-0.59	30.68	-30.93	124.80	-30.99	13570.30
5	13739.45	-0.16	17.13	-30.51	141.93	-30.93	5878.43

Las pérdidas eléctricas totales de potencia activa son 21,724.36 watts.

3.3.2 Flujo de carga ante demanda baja para el circuito SLO 4150.

En la tabla 3.10 se muestra el diagrama unifilar del circuito SLO 4150 ante demanda baja con 864 kW y a un factor de potencia de 0.863.

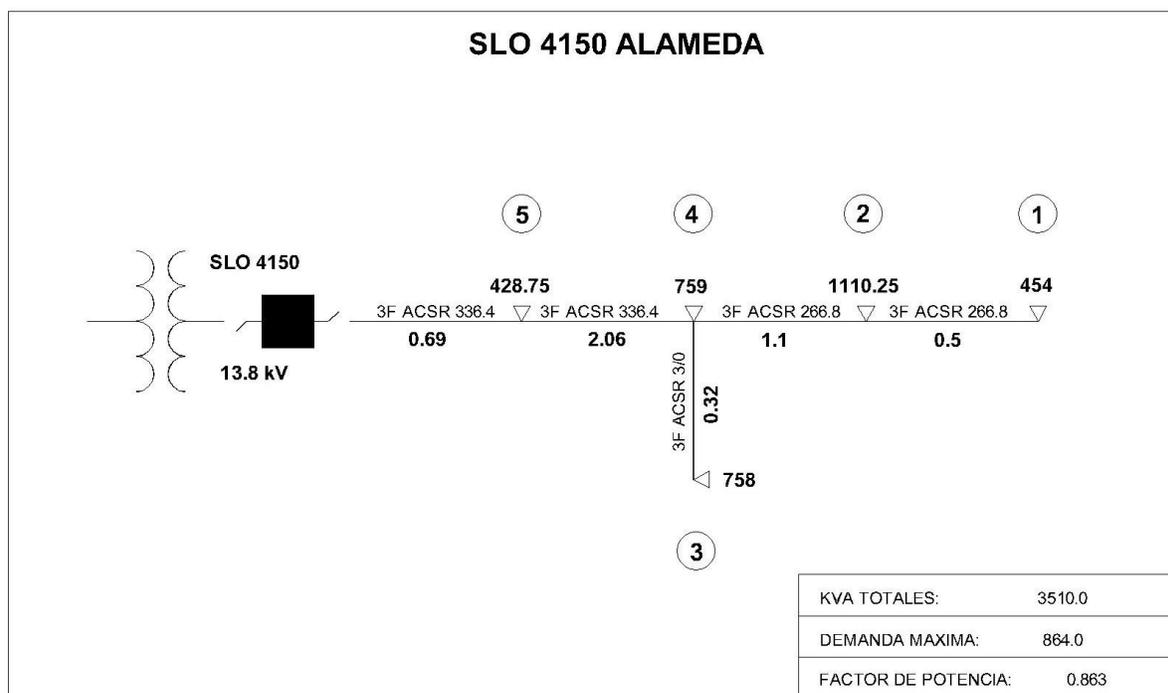


Figura 3.10 Diagrama unifilar del circuito SLO 4150 demanda baja.

Los resultados más representativos se muestran en la tabla 3.8. Se muestran los perfiles de voltaje en cada nodo, la corriente que demanda cada nodo, la corriente que

circula por cada sección del circuito, que es la corriente de línea, y las pérdidas eléctricas correspondientes a cada sección del circuito.

Tabla 3.8 Resultados del EFC ante demanda baja del circuito SLO 4150.

Nodo	Voltaje	Ángulo	I _{Carga}	Ángulo	I _{Línea}	Ángulo	Pérdidas
1	13719.01	-0.21	5.45	-30.56	5.45	-30.56	6.73
2	13720.90	-0.21	13.33	-30.55	18.77	-30.55	175.81
3	13732.08	-0.18	9.09	-30.52	9.09	-30.52	16.94
4	13735.26	-0.17	9.10	-30.52	36.96	-30.54	1189.91
5	13782.12	-0.05	5.12	-30.39	42.09	-30.52	516.68

Las pérdidas eléctricas totales de potencia activa son 1,906.08 watts.

3.3.3 Comparación de los perfiles de voltaje y pérdidas eléctricas ante demanda máxima y baja del circuito SLO 4150.

En la tabla 3.9 se hace una comparación de los perfiles de voltaje y las pérdidas eléctricas en el circuito. Se utiliza el subíndice “max” para referirse al estudio de demanda máxima, y el subíndice “baja” para referirse al estudio de demanda baja.

Tabla 3.9 Tabla comparativa de voltajes y pérdidas eléctricas en el circuito SLO 4150.

Nodo	V _{max}	Ángulo	V _{baja}	Ángulo	P _{max}	P _{baja}
1	13525.96	-0.71	13719.01	-0.21	76.88	6.73
2	13532.37	-0.70	13720.90	-0.21	2006.67	175.81
3	13570.17	-0.60	13732.08	-0.18	192.08	16.94
4	13580.91	-0.59	13735.26	-0.17	13570.30	1189.91
5	13739.45	-0.16	13782.12	-0.05	5878.43	516.68

Se puede observar que los perfiles de voltaje ante demanda máxima son menores a los que se presentan ante la demanda baja, también se observa que las pérdidas eléctricas ante demanda máxima son mayores a las que se presentan ante demanda baja. Las pérdidas eléctricas totales de potencia activa ante demanda máxima son 21,724.36 watts y ante demanda baja son 1,906.08 watts.

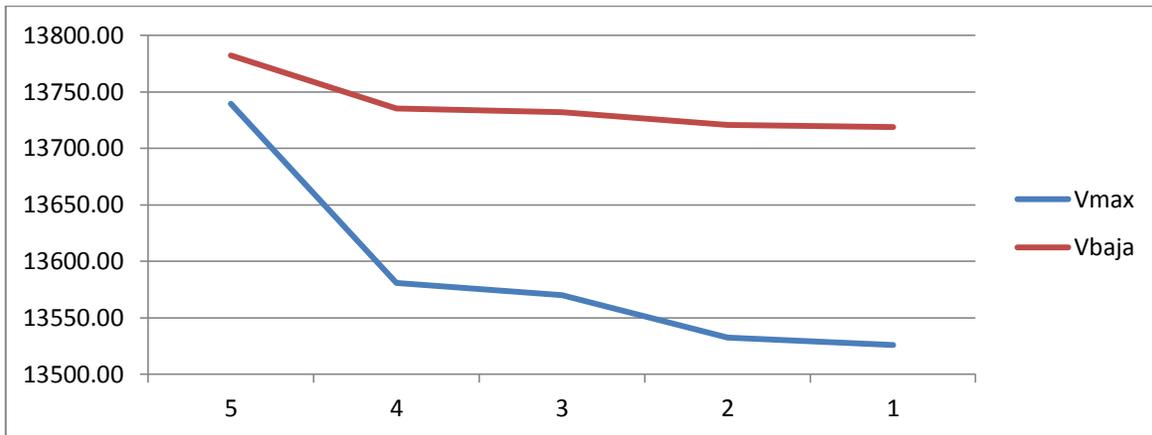


Figura 3.11 Perfiles de voltaje ante demanda máxima y baja del circuito SLO 4160.

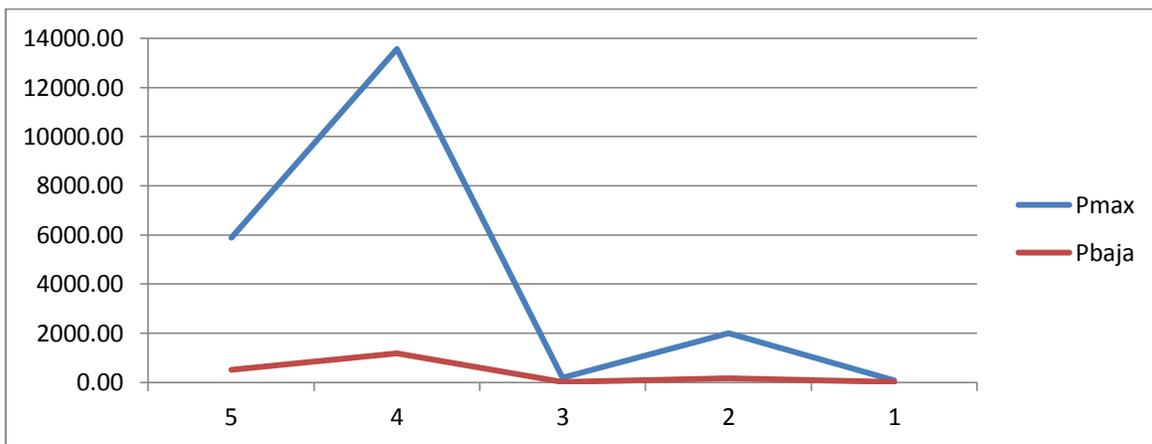


Figura 3.12 Pérdidas eléctricas ante demanda máxima y baja del circuito SLO 4160.

En la figura 3.12, a diferencia de las figuras 3.4 y 3.8, se observa la particularidad de presentar mayores pérdidas entre el nodo 4 y 5 en lugar de entre el nodo más próximo a la subestación y la subestación.

Estudios de flujos de carga ante demanda máxima y baja con la introducción de potencia activa en dos nodos del circuito.

En este capítulo se muestran los resultados de introducir potencia activa en los nodos de los circuitos estudiados en el capítulo anterior, con el fin de determinar la ubicación óptima de estas potencias en dichos circuitos, teniendo como objetivo principal reducir las pérdidas eléctricas.

4.1 ESTUDIO DE FLUJOS DE CARGA PARA EL CIRCUITO SLO 4180.

4.1.1 Flujo de carga ante demanda máxima para el circuito SLO 4180 con la introducción de potencia activa.

La figura 4.1 es el diagrama unifilar del circuito de distribución radial SLO 4180, en el están representados los datos necesarios para realizar un estudio de flujos de carga. En este caso el estudio se hará ante demanda máxima y con la introducción de potencia activa de 900 kW y 300 kW por separado, es decir, en dos nodos diferentes. Se realizarán todas las permutaciones de la aportación de éstas dos potencias en los nodos, y se determinara cual es la ubicación óptima de ambas potencias, es decir, aquella en la cual reducen al mínimo las pérdidas eléctricas para este caso de estudio.

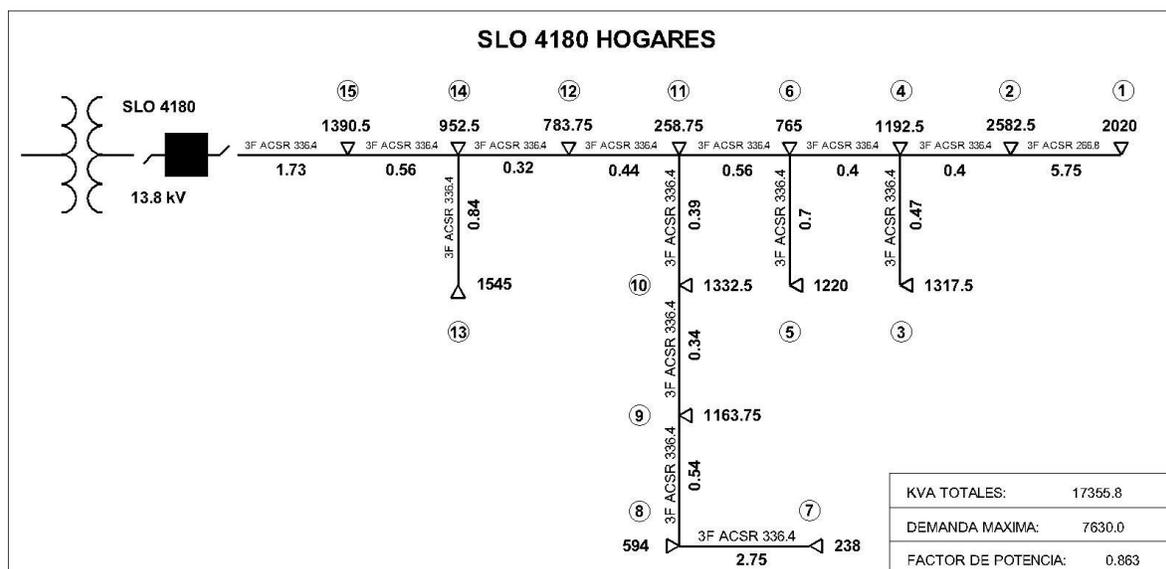


Figura 4.1 Diagrama unifilar del circuito SLO 4180 demanda máxima.

En la tabla 4.1 se muestran los valores de voltaje y pérdidas eléctricas bajo condiciones normales de operación ante demanda maxima, y los valores de voltaje y pérdidas eléctricas ante demanda maxima con la introducción de potencia activa en dos nodos del circuito. La ubicación de la introducción de potencia activa en los nodos es determinada por el programan desarrollado y se obtiene mediante una serie de

permutaciones de dichas potencias en todos los nodos del circuito, seleccionando las que reducen al mínimo las pérdidas eléctricas. Se utiliza el subíndice “nom” para referirse a condiciones normales de operación y “comp” para los resultados con aportación de potencia activa.

Tabla 4.1 Tabla comparativa de resultados del EFC ante demanda máxima, bajo condiciones normales de operación y con aportación de potencia activa del circuito SLO 4180.

Nodo	V _{nom}	Ángulo	V _{comp}	Ángulo	P _{nom}	P _{comp}
15	13378.10	-1.09	13414.06	-0.85	111652.44	85181.73
14	13253.10	-1.43	13300.25	-1.10	30705.41	22846.66
13	13235.36	-1.48	13282.58	-1.15	418.85	415.88
12	13192.77	-1.60	13246.20	-1.22	12555.45	8802.10
11	13114.73	-1.81	13176.66	-1.37	15339.62	10497.38
10	13096.79	-1.87	13158.81	-1.42	922.57	914.06
9	13087.41	-1.89	13149.47	-1.45	289.42	286.76
8	13081.19	-1.91	13143.29	-1.46	79.95	79.21
7	13072.14	-1.94	13134.28	-1.49	33.35	33.04
6	13043.35	-2.02	13115.88	-1.48	10101.04	5800.71
5	13031.50	-2.05	13104.09	-1.52	224.43	222.02
4	13003.47	-2.13	13083.44	-1.53	4425.15	2085.74
3	12994.86	-2.15	13074.88	-1.56	176.71	174.63
2	12977.59	-2.20	13064.89	-1.55	1863.24	442.83
1	12791.62	-2.63	12977.13	-1.29	5579.71	-840.71
Total					194367.34	136942.05

En la figura 4.2 se muestra una gráfica comparativa de las pérdidas eléctricas de potencia activa bajo condiciones normales de operación, y con la aportación de potencia activa en la ubicación en la que reduzcan al mínimo las pérdidas eléctricas. Además, en la figura 4.2 se presenta la gráfica comparativa de voltajes con las mismas características de la tabla anterior.

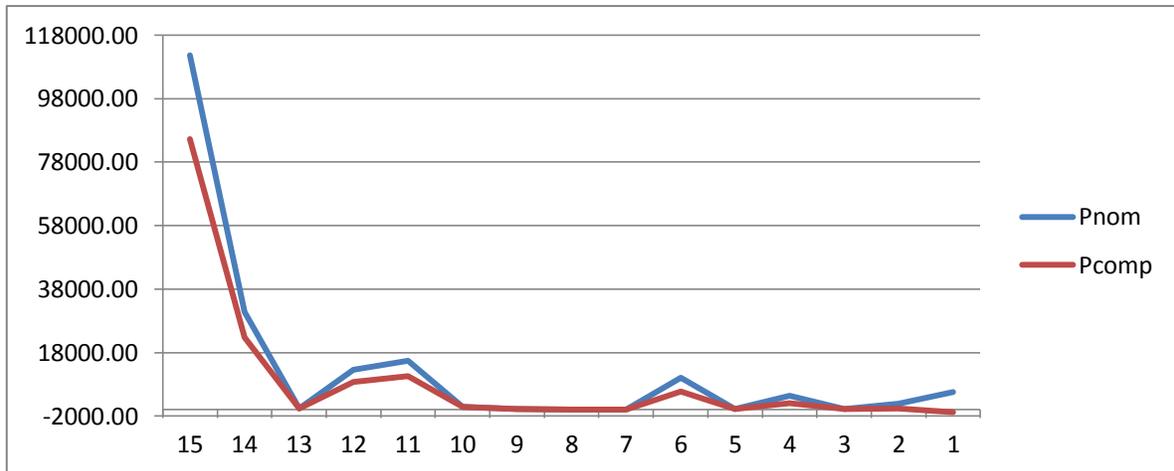


Figura 4.2 Pérdidas eléctricas bajo condiciones normales de operación y con aportación de potencia activa, en kW del circuito SLO 4180 demanda máxima.

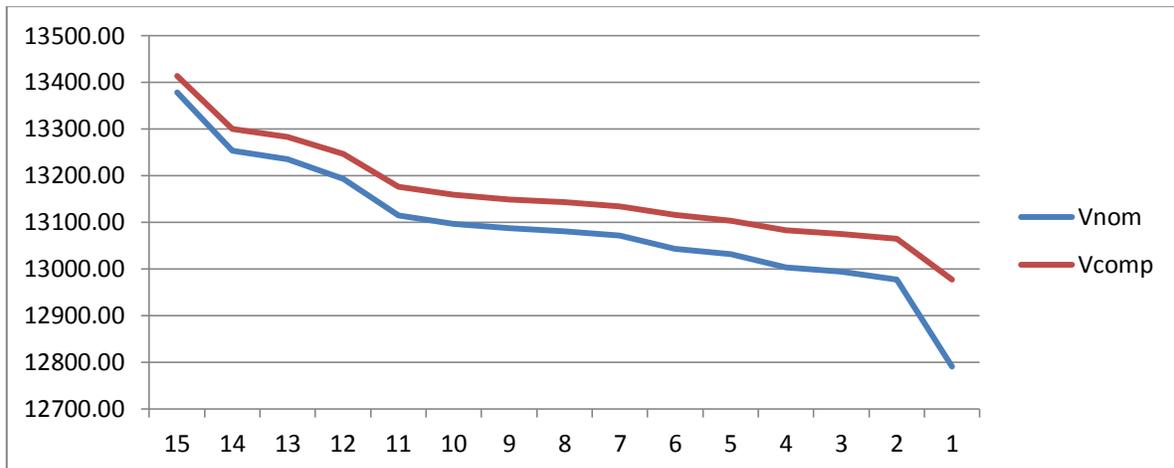


Figura 4.3 Perfiles de voltaje bajo condiciones normales de operación, y con aportación de potencia activa, en kW del circuito SLO 4180 demanda máxima.

4.1.2 Flujo de carga ante demanda baja para el circuito SLO 4180 con la introducción de potencia activa.

La figura 4.4 es el diagrama unifilar del circuito de distribución radial SLO 4180, en el están representados los datos necesarios para realizar un estudio de flujos de carga. En este caso el estudio se hará ante demanda baja y con la introducción de potencia activa de 900 kW y 300 kW por separado, es decir, en dos nodos diferentes. Se realizarán todas las permutaciones de la aportación de éstas dos potencias en los nodos, y se determina cual es

la ubicación óptima de ambas potencias, es decir, aquella en la cual reducen al mínimo las pérdidas eléctricas para este caso de estudio.

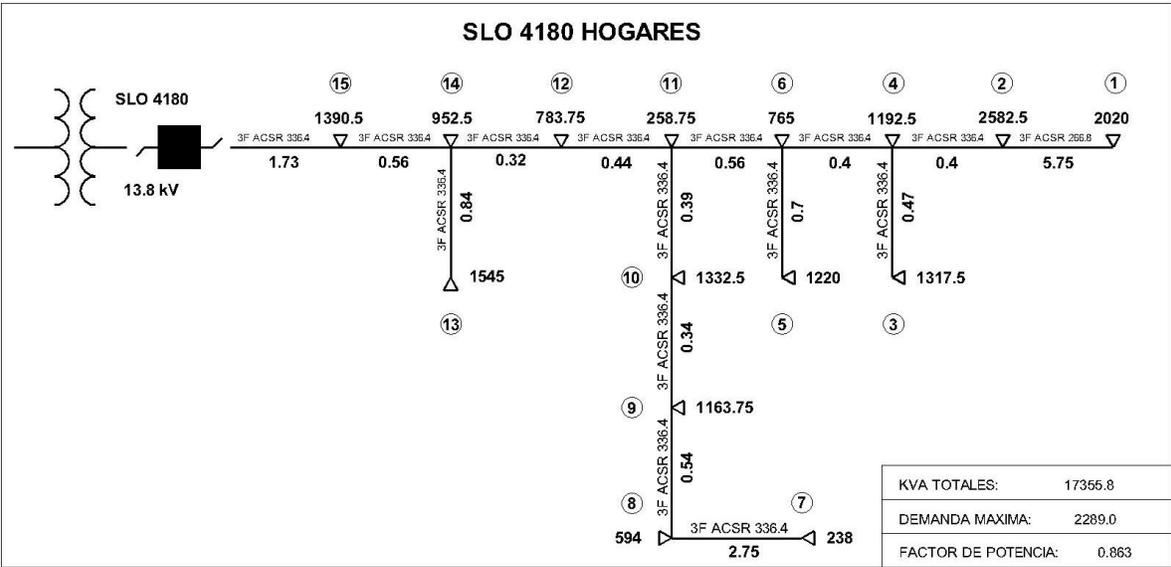


Figura 4.4 Diagrama unifilar del circuito SLO 4180 demanda baja.

En la tabla 4.2 se muestran los valores de voltaje y pérdidas eléctricas bajo condiciones normales de operación ante demanda maxima, y los valores de voltaje y pérdidas eléctricas ante demanda maxima con la introducción de potencia activa en dos nodos del circuito. La ubicación de la introducción de potencia activa en los nodos es determinada por el programan desarrollado y se obtiene mediante una serie de permutaciones de dichas potencias en todos los nodos del circuito, seleccionando las que reducen al minimo las pérdidas eléctricas. Se utiliza el subindice “nom” para referirse a condiciones normales de operación y “comp” para los resultados con aportación de potencia activa.

Tabla 4.2 Tabla comparativa de resultados del EFC ante demanda baja, bajo condiciones normales de operación y con aportación de potencia activa del circuito SLO 4180.

Nodo	V_{nom}	Ángulo	V_{comp}	Ángulo	P_{nom}	P_{comp}
15	13679.63	-0.32	13709.56	-0.08	9288.91	3043.96
14	13643.84	-0.42	13683.37	-0.10	2547.25	710.03
13	13638.68	-0.43	13678.22	-0.11	35.49	35.27
12	13626.58	-0.46	13671.57	-0.10	1037.44	177.20
11	13604.24	-0.52	13656.72	-0.10	1265.92	164.89
10	13599.06	-0.54	13651.56	-0.12	76.94	76.31
9	13596.36	-0.55	13648.86	-0.12	24.12	23.93
8	13594.56	-0.55	13647.08	-0.13	6.66	6.61
7	13591.95	-0.56	13644.47	-0.14	2.78	2.75
6	13583.84	-0.58	13645.80	-0.08	830.13	-94.55
5	13580.43	-0.59	13642.41	-0.09	18.60	18.42
4	13572.44	-0.61	13641.16	-0.05	362.78	-109.80
3	13569.97	-0.62	13638.70	-0.06	14.59	14.43
2	13565.07	-0.63	13640.52	-0.02	152.14	-83.52
1	13512.32	-0.75	13618.48	0.07	453.10	-98.92
				Total	16116.84	3887.01

La figura 4.5 es una gráfica comparativa de las pérdidas eléctricas de potencia activa bajo condiciones normales de operación, y con la aportación de potencia activa en la ubicación en la que reduzcan al mínimo las pérdidas eléctricas. Además, en la figura 4.6 se presenta una gráfica comparativa de voltajes con las mismas características de la tabla 4.2.

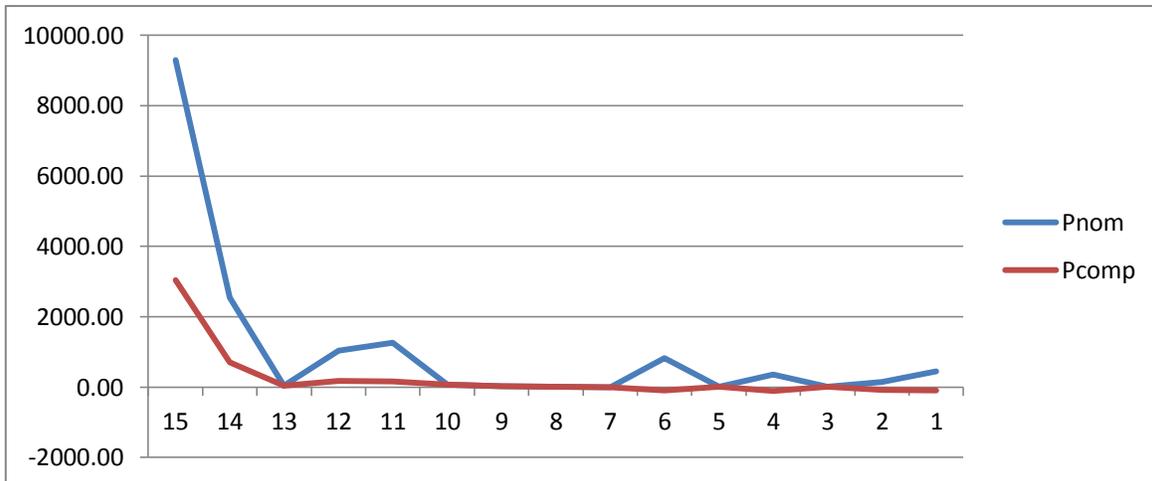


Figura 4.5 Pérdidas eléctricas bajo condiciones normales de operación y con aportación de potencia activa, en kW del circuito SLO 4180 demanda baja.

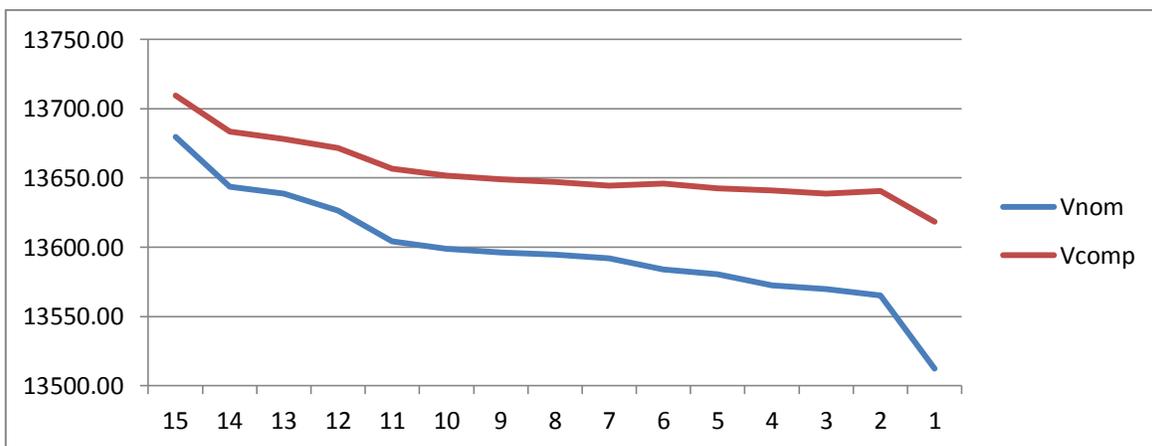


Figura 4.6 Perfiles de voltaje bajo condiciones normales de operación, y con aportación de potencia activa, en kW del circuito SLO 4180 demanda baja.

4.2 ESTUDIO DE FLUJOS DE CARGA PARA EL CIRCUITO SLO 4160.

4.2.1 Flujo de carga ante demanda máxima para el circuito SLO 4160 con la introducción de potencia activa.

La figura 4.7 es el diagrama unifilar del circuito de distribución radial SLO 4160, en el están representados los datos necesarios para realizar un estudio de flujos de carga. En

este caso el estudio se hace ante demanda máxima y con la introducción de potencia activa de 600 kW y 300 kW por separado, es decir, en dos nodos diferentes. Se realizan todas las permutaciones de la aportación de éstas dos potencias en los nodos, y se determina cual es la ubicación óptima de ambas potencias, es decir, aquella en la cual reducen al mínimo las pérdidas eléctricas para este caso de estudio.



Figura 4.7 Diagrama unifilar del circuito SLO 4160 demanda máxima.

En la tabla 4.3 se muestran los valores de voltaje y pérdidas eléctricas bajo condiciones normales de operación ante demanda máxima, y los valores de voltaje y pérdidas eléctricas ante demanda máxima con la introducción de potencia activa en dos nodos del circuito. La ubicación de la introducción de potencia activa en los nodos es determinada por el programa desarrollado y se obtiene mediante una serie de permutaciones de dichas potencias en todos los nodos del circuito, seleccionando las que reducen al mínimo las pérdidas eléctricas. Se utiliza el subíndice “nom” para referirse a condiciones normales de operación y “comp” para los resultados con aportación de potencia activa.

Tabla 4.3 Tabla comparativa de resultados del EFC ante demanda máxima bajo condiciones normales de operación y con aportación de potencia activa del circuito SLO 4160.

Nodo	V _{nom}	Ángulo	V _{comp}	Ángulo	P _{nom}	P _{comp}
11	13622.09	-0.54	13639.70	-0.43	34524.40	26542.82
10	13610.87	-0.57	13619.50	-0.50	252.40	453.88
9	13615.73	-0.56	13628.15	-0.48	98.92	179.33
8	13571.56	-0.72	13536.27	-0.76	7857.30	13004.90
7	13557.88	-0.78	13520.32	-0.82	293.36	343.19
6	13500.48	-0.99	13451.69	-1.02	9321.18	8551.71
5	13488.19	-0.99	13422.29	-1.03	97.94	235.39
4	13363.67	-1.50	13382.16	-1.23	15303.97	5639.92
3	13352.08	-1.55	13368.83	-1.28	210.53	240.92
2	13307.31	-1.72	13336.37	-1.34	4525.08	2232.17
1	13145.88	-2.24	13316.00	-1.37	5727.13	293.30
Total					78212.21	57717.53

En la figura 4.8 se muestra una gráfica comparativa de las pérdidas eléctricas de potencia activa bajo condiciones normales de operación, y con la aportación de potencia activa en la ubicación en la que reduzcan al mínimo las pérdidas eléctricas. Además se presenta la gráfica comparativa de voltajes con las mismas características de la tabla 4.3.

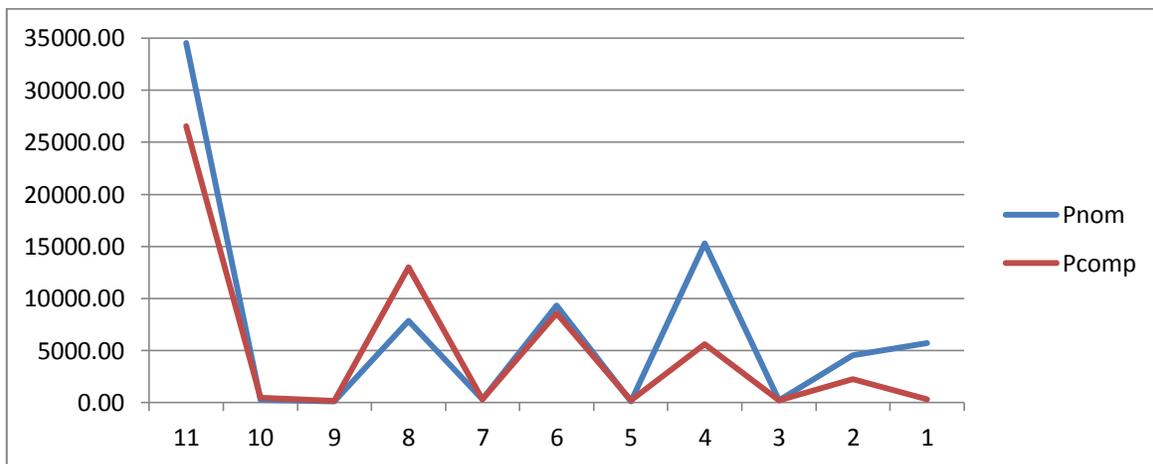


Figura 4.8 Pérdidas eléctricas bajo condiciones normales de operación y con aportación de potencia activa, en kW del circuito SLO 4160 demanda máxima.

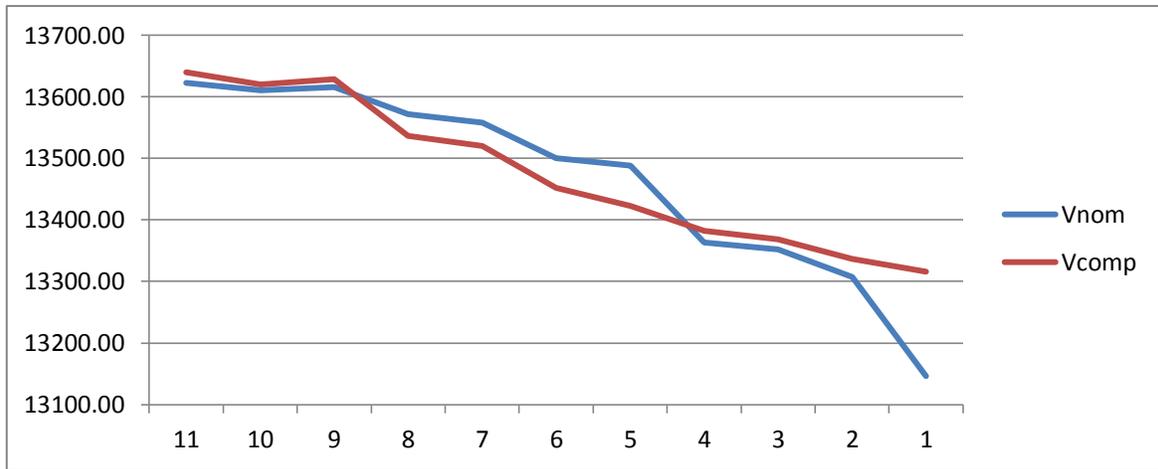


Figura 4.9 Perfiles de voltaje bajo condiciones normales de operación, y con aportación de potencia activa, en kW del circuito SLO 4160 demanda máxima.

4.2.2 Flujo de carga ante demanda baja para el circuito SLO 4160 con la introducción de potencia activa.

La figura 4.10 es el diagrama unifilar del circuito de distribución radial SLO 4180, en el están representados los datos necesarios para realizar un estudio de flujos de carga. En este caso el estudio se hará ante demanda baja y con la introducción de potencia activa de 600 kW y 300 kW por separado, es decir, en dos nodos diferentes. Se realizan todas las permutaciones de la aportación de éstas dos potencias en los nodos, y se determina cual es la ubicación óptima de ambas potencias, es decir, aquella en la cual reducen al mínimo las pérdidas eléctricas para este caso de estudio.

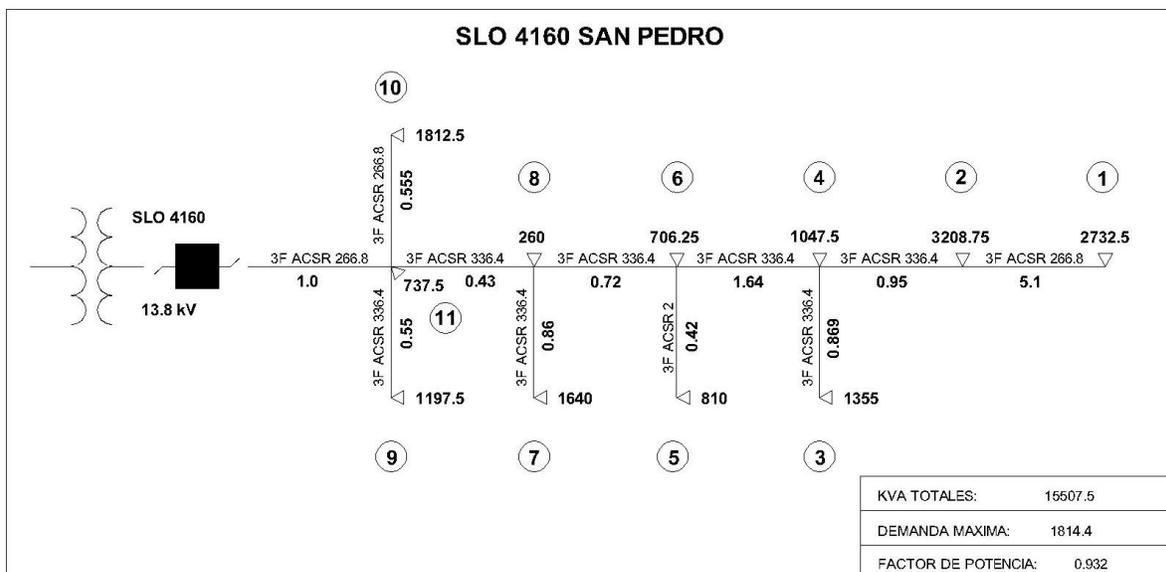


Figura 4.10 Diagrama unifilar del circuito SLO 4160 demanda baja.

En la tabla 4.4 se muestran los valores de voltaje y pérdidas eléctricas bajo condiciones normales de operación ante demanda máxima, y los valores de voltaje y pérdidas eléctricas ante demanda máxima con la introducción de potencia activa en dos nodos del circuito. La ubicación de la introducción de potencia activa en los nodos es determinada por el programan desarrollado y se obtiene mediante una serie de permutaciones de dichas potencias en todos los nodos del circuito, seleccionando las que reducen al mínimo las pérdidas eléctricas. Se utiliza el subíndice “nom” para referirse a condiciones normales de operación y “comp” para los resultados con aportación de potencia activa.

Tabla 4.4 Tabla comparativa de resultados del EFC ante demanda baja, bajo condiciones normales de operación y con aportación de potencia activa del circuito SLO 4160.

Nodo	V_{nom}	Ángulo	V_{comp}	Ángulo	P_{nom}	P_{comp}
11	13748.21	-0.16	13764.23	-0.06	2958.05	1022.14
10	13744.88	-0.17	13758.23	-0.07	22.19	39.87
9	13746.32	-0.17	13760.80	-0.07	8.69	15.75
8	13733.56	-0.22	13742.88	-0.08	665.25	320.38
7	13729.51	-0.23	13738.17	-0.10	25.57	29.64
6	13712.98	-0.29	13726.98	-0.08	784.85	106.07
5	13709.36	-0.29	13718.36	-0.09	8.60	20.49
4	13673.34	-0.44	13715.45	-0.07	1282.66	-8.00
3	13669.94	-0.45	13711.55	-0.08	17.84	20.31
2	13656.99	-0.50	13710.82	-0.03	377.46	-84.77
1	13610.33	-0.65	13712.20	0.01	474.82	-20.99
Total					6625.98	1460.89

La figura 4.11 muestra una gráfica comparativa de las pérdidas eléctricas de potencia activa bajo condiciones normales de operación, y con la aportación de potencia activa en la ubicación en la que reduzcan al mínimo las pérdidas eléctricas. Además, en la figura 4.12 se presenta la gráfica comparativa de voltajes con las mismas características de la tabla 4.4.

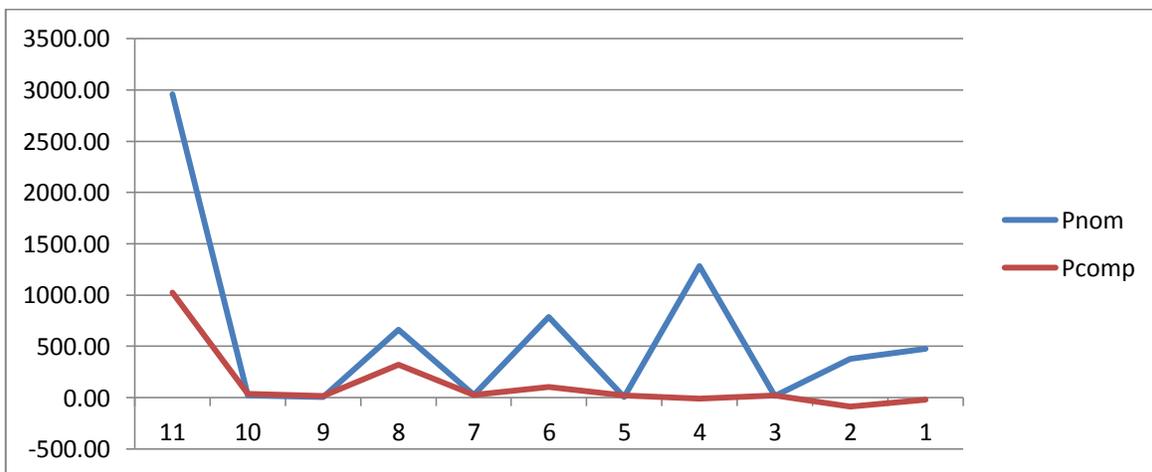


Figura 4.11 Pérdidas eléctricas bajo condiciones normales de operación y con aportación de potencia activa, en kW del circuito SLO 4160 demanda baja.

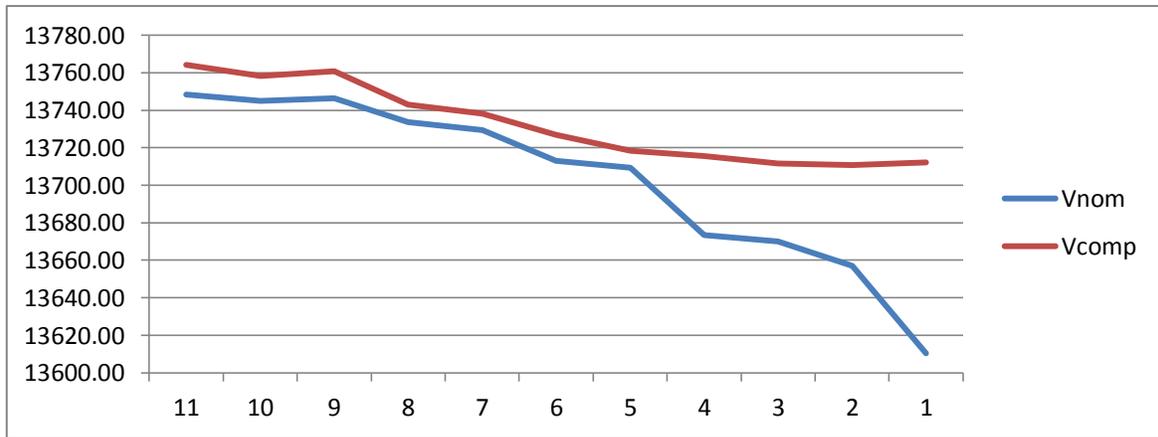


Figura 4.12 Perfiles de voltaje bajo condiciones normales de operación, y con aportación de potencia activa, en kW del circuito SLO 4160 demanda baja.

4.3 ESTUDIO DE FLUJOS DE CARGA PARA EL CIRCUITO SLO 4150.

4.3.1 Flujo de carga ante demanda máxima para el circuito SLO 4150 con la introducción de potencia activa.

La figura 4.13 es el diagrama unifilar del circuito de distribución radial SLO 4150, en el están representados los datos necesarios para realizar un estudio de flujos de carga. En este caso el estudio se hará ante demanda máxima y con la introducción de potencia activa de 200 kW y 100 kW por separado, es decir, en dos nodos diferentes. Se realizan todas las permutaciones de la aportación de éstas dos potencias en los nodos, y se determinara cual es la ubicación óptima de ambas potencias, es decir, aquella en la cual reducen al mínimo las pérdidas eléctricas para este caso de estudio.

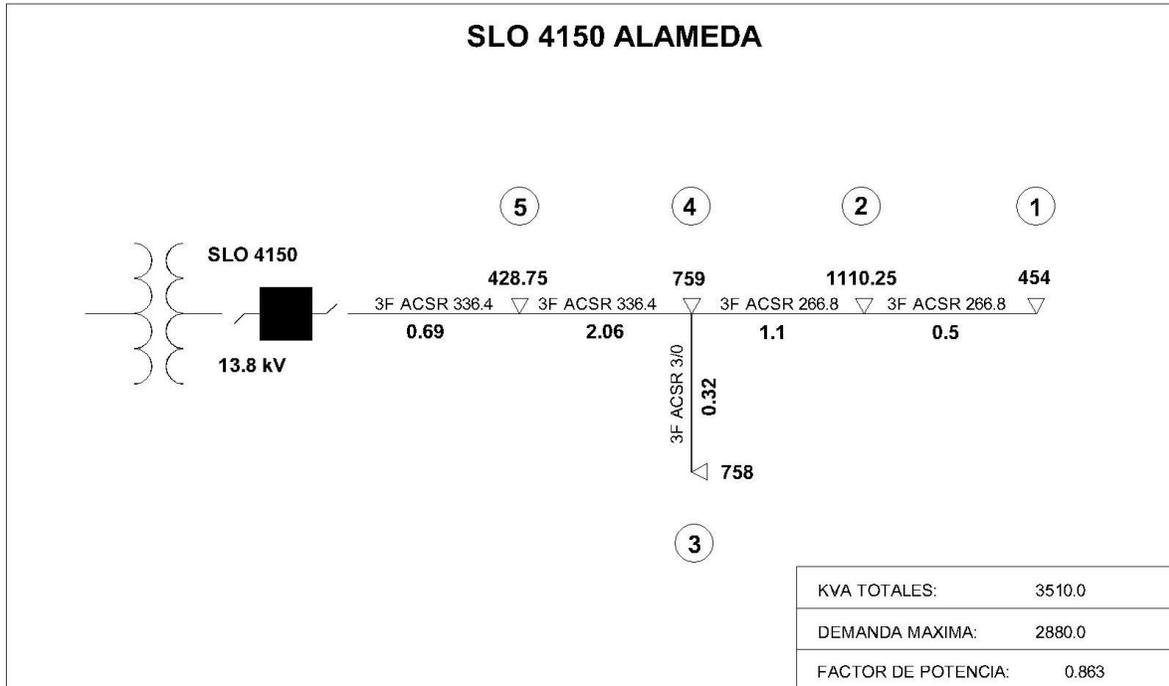


Figura 4.13 Diagrama unifilar del circuito SLO 4150 demanda máxima.

En la tabla 4.3 se muestran los valores de voltaje y pérdidas eléctricas bajo condiciones normales de operación ante demanda máxima, y los valores de voltaje y pérdidas eléctricas ante demanda máxima con la introducción de potencia activa en dos nodos del circuito. La ubicación de la introducción de potencia activa en los nodos es determinada por el programan desarrollado y se obtiene mediante una serie de permutaciones de dichas potencias en todos los nodos del circuito, seleccionando las que reducen al mínimo las pérdidas eléctricas. Se utiliza el subíndice “nom” para referirse a condiciones normales de operación y “comp” para los resultados con aportación de potencia activa.

Tabla 4.5 Tabla comparativa de resultados del EFC ante demanda máxima bajo condiciones normales de operación y con aportación de potencia activa del circuito SLO 4150.

Nodo	V_{nom}	Ángulo	V_{comp}	Ángulo	P_{nom}	P_{comp}
5	13739.45	-0.16	13717.04	-0.20	5878.43	7193.86
4	13580.91	-0.59	13644.77	-0.37	13570.30	5423.34
3	13570.17	-0.60	13611.31	-0.41	192.08	597.64
2	13532.37	-0.70	13606.17	-0.43	2006.67	1195.25
1	13525.96	-0.71	13596.95	-0.44	76.88	44.01
Total					21724.36	14454.10

La figura 4.14 muestra una gráfica comparativa de las pérdidas eléctricas de potencia activa bajo condiciones normales de operación, y con la aportación de potencia activa en la ubicación en la que reduzcan al mínimo las pérdidas eléctricas. Además se presentara la gráfica comparativa de voltajes con las mismas características de la tabla 4.5.

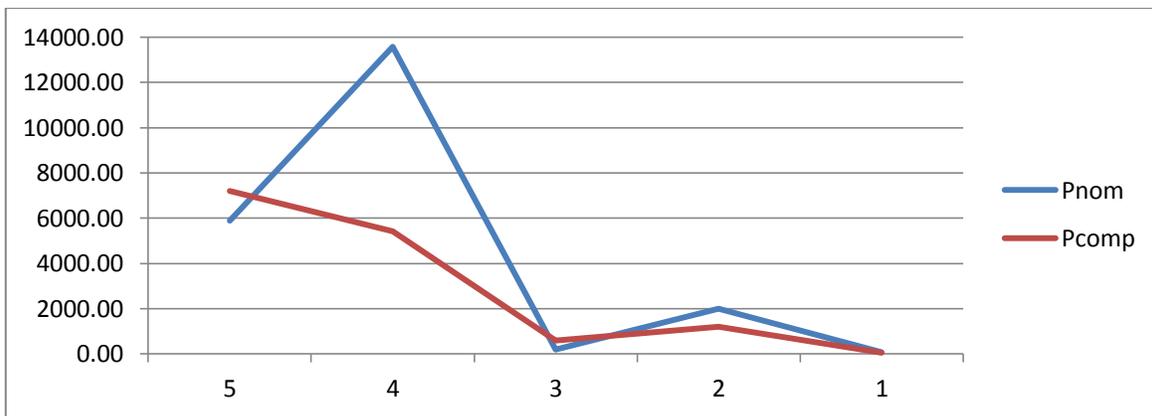


Figura 4.14 Pérdidas eléctricas bajo condiciones normales de operación y con aportación de potencia activa, en kW del circuito SLO 4150 demanda máxima.

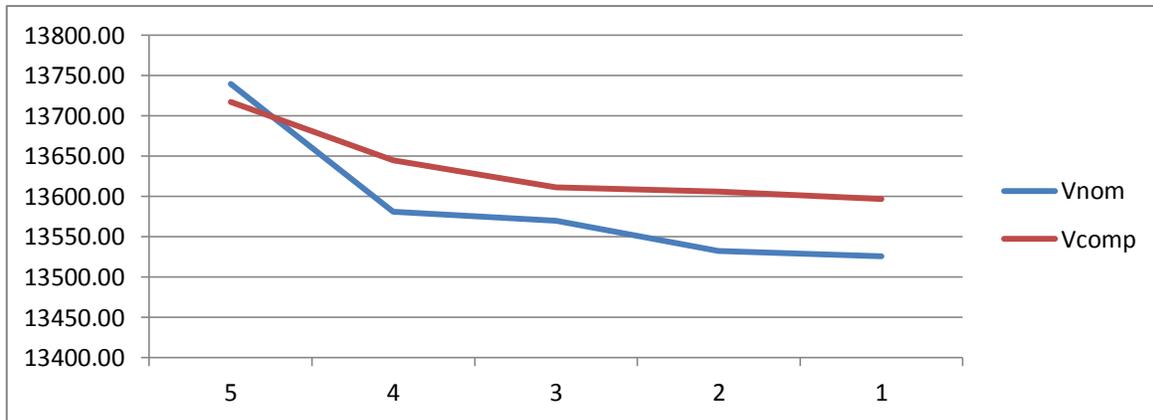


Figura 4.15 Perfiles de voltaje bajo condiciones normales de operación, y con aportación de potencia activa, en kW del circuito SLO 4150 demanda máxima.

4.3.2 Flujo de carga ante demanda baja para el circuito SLO 4150 con la introducción de potencia activa.

La figura 4.16 es el diagrama unifilar del circuito de distribución radial SLO 4150, en el están representados los datos necesarios para realizar un estudio de flujos de carga. En este caso el estudio se hará ante demanda baja y con la introducción de potencia activa de 200 kW y 100 kW por separado, es decir, en dos nodos diferentes. Se realizan todas las permutaciones de la aportación de éstas dos potencias en los nodos, y se determinara cual es la ubicación óptima de ambas potencias, es decir, aquella en la cual reducen al mínimo las pérdidas eléctricas para este caso de estudio.

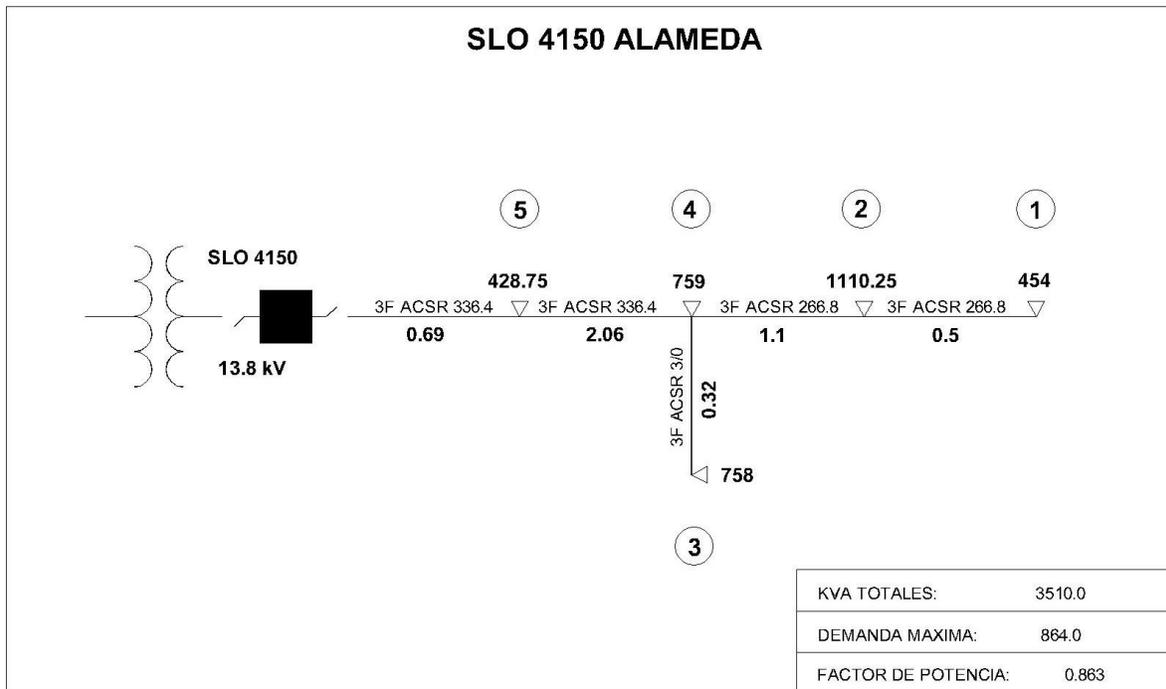


Figura 4.16 Diagrama unifilar del circuito SLO 4150 demanda baja.

En la tabla 4.6 se muestran los valores de voltaje y pérdidas eléctricas bajo condiciones normales de operación ante demanda máxima, y los valores de voltaje y pérdidas eléctricas ante demanda máxima con la introducción de potencia activa en dos nodos del circuito. La ubicación de la introducción de potencia activa en los nodos es determinada por el programan desarrollado y se obtiene mediante una serie de permutaciones de dichas potencias en todos los nodos del circuito, seleccionando las que reducen al mínimo las pérdidas eléctricas. Se utiliza el subíndice “nom” para referirse a condiciones normales de operación y “comp” para los resultados con aportación de potencia activa.

Tabla 4.6 Tabla comparativa de resultados del EFC ante demanda baja, bajo condiciones normales de operación y con aportación de potencia activa del circuito SLO 4150.

Nodo	V_{nom}	Ángulo	V_{comp}	Ángulo	P_{nom}	P_{comp}
5	13782.12	-0.05	13778.31	-0.04	516.68	400.33
4	13735.26	-0.17	13759.77	-0.06	1189.91	275.28
3	13732.08	-0.18	13749.83	-0.07	16.94	52.86
2	13720.90	-0.21	13751.96	-0.06	175.81	7.64
1	13719.01	-0.21	13751.66	-0.04	6.73	-6.37
Total					1906.08	729.74

En la figura 4.17 se muestra una gráfica comparativa de las pérdidas eléctricas de potencia activa bajo condiciones normales de operación, y con la aportación de potencia activa en la ubicación en la que reduzcan al mínimo las pérdidas eléctricas. Además se presentara la gráfica comparativa de voltajes con las mismas características de la tabla 4.6.

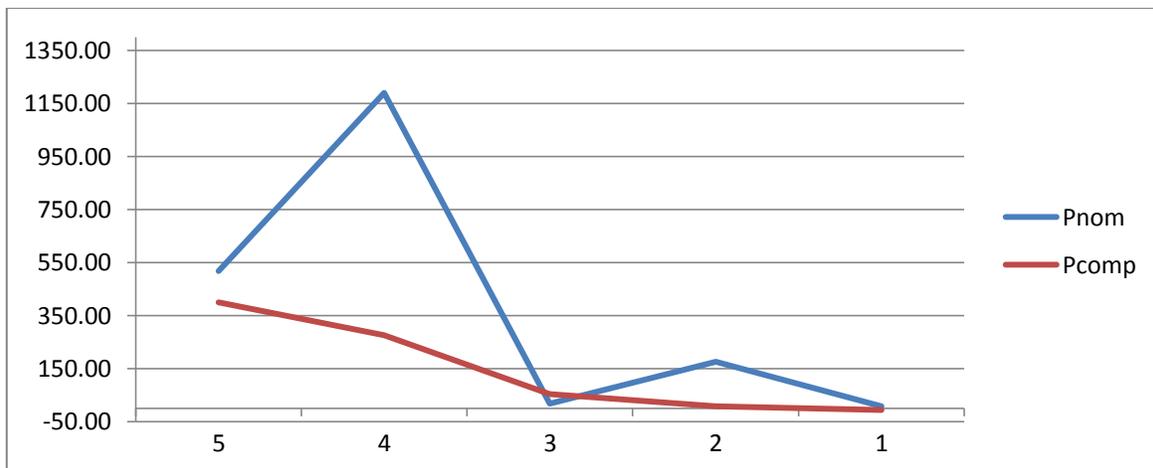


Figura 4.17 Pérdidas eléctricas bajo condiciones normales de operación y con aportación de potencia activa, en kW del circuito SLO 4150 demanda baja.

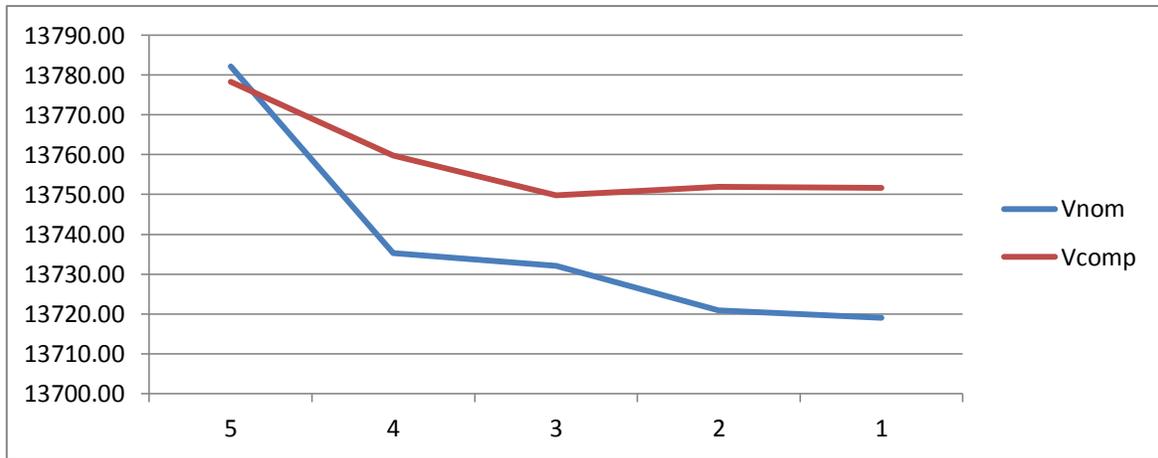


Figura 4.18 Perfiles de voltaje bajo condiciones normales de operación, y con aportación de potencia activa, en kW del circuito SLO 4150 demanda baja.

Conclusiones.

En este capítulo se muestran los resultados de introducir potencia activa en los nodos de los circuitos estudiados en el capítulo anterior, con el fin de determinar la ubicación óptima de estas potencias en dichos circuitos, teniendo como objetivo principal reducir las pérdidas eléctricas.

5.1 ANÁLISIS DE LOS EFC DE LOS CIRCUITOS SLO 4180, SLO 4160 Y SLO 4150 BAJO CONDICIONES NORMALES DE OPERACIÓN, Y CON APORTACIÓN DE POTENCIA ACTIVA EN DOS NODOS.

5.1.1 Análisis de los resultados del circuito SLO 4180 ante demanda máxima.

En la figura 5.1 se muestran las pérdidas eléctricas del circuito SLO 4180 ante demanda máxima, con y sin aportación de potencia activa en dos de sus nodos. Para este caso se propusieron potencias activas de 900 kW y 300kW, para las cuales se determinaron sus posiciones, para la de 900 kW su mejor ubicación es en el nodo 1 y para la de 300 kW en el nodo 2, es decir al final del alimentador. Esto se debe a que al estar más lejos de la subestación y al reducir la corriente que circula por el alimentador se reducen las pérdidas eléctricas. También se observó el resultado en el que ambas potencias esta lo más cercano posible a la subestación, pero el desempeño fue menor, al igual que al ubicarlas en cualquier otro nodo se reduce la corriente que circula por el alimentador, pero en este caso al estar cerca de la subestación la corriente aún debe circular una distancia bastante considerable teniendo una magnitud mayor que en el caso en el que la ubicación de estas potencias esta al final del alimentador.

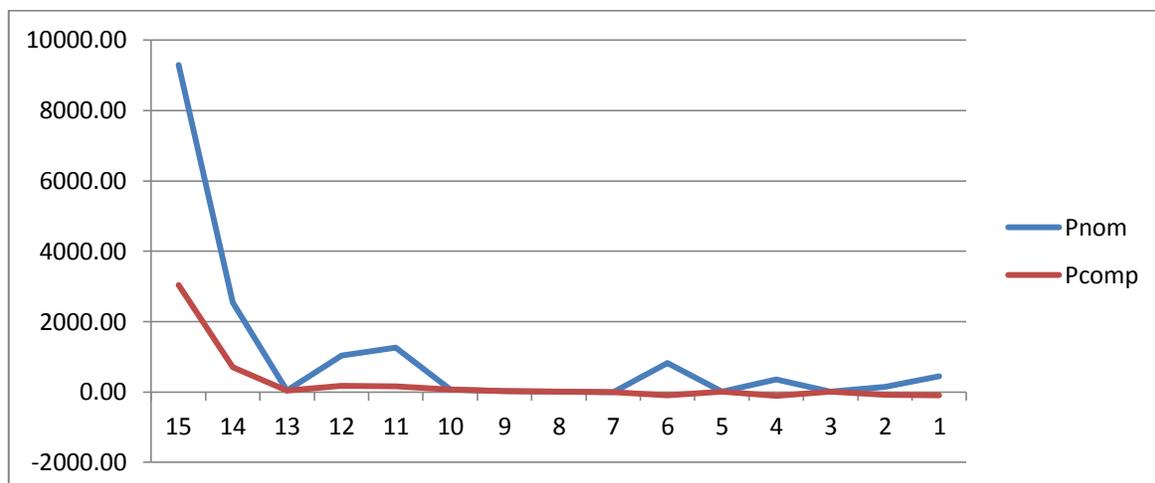


Figura 5.1 Pérdidas eléctricas bajo condiciones normales de operación y con aportación de potencia activa, en kW del circuito SLO 4180 demanda baja.

5.1.2 Análisis de los resultados del circuito SLO 4180 ante demanda baja.

Para el caso de la demanda baja, las pérdidas eléctricas y los perfiles de voltaje tienen una mejora por sí mismos. En este caso, con la aportación de potencia activa en dos nodos, se tiene una reducción aun mayor de las pérdidas eléctricas y mejoramiento en los perfiles de voltaje. En este caso se acentúa aún más el hecho de que en los nodos compensados se tienen cargas negativas, es decir, se tiene una aportación similar a la de un generador, lo que trae como consecuencia un flujo inverso de corriente, en vez de que en dicho nodo se presente un consumo de corriente eléctrica, se tiene una aportación.

Bajo demanda mínima la ubicación óptima para la reducción de pérdidas eléctricas de las dos potencias son en los siguientes nodos, para los 900 kW en el nodo 2 y para los 300 kW en el nodo 1.

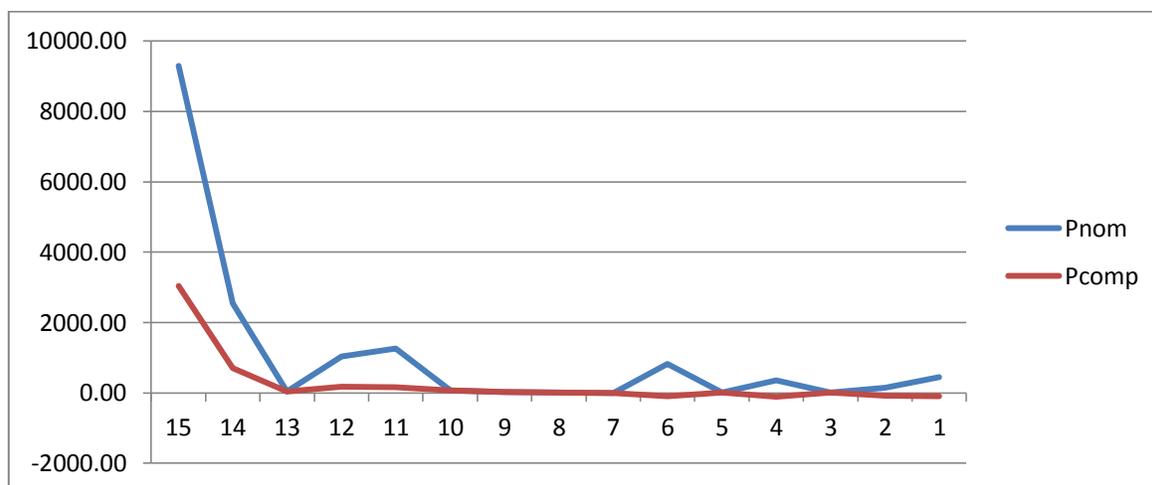


Figura 5.2 Pérdidas eléctricas bajo condiciones normales de operación y con aportación de potencia activa, en kW del circuito SLO 4180 demanda baja.

5.1.3 Análisis de los resultados del circuito SLO 4160 ante demanda máxima.

En la figura 5.3 se muestran las pérdidas eléctricas del circuito SLO 4160 ante demanda máxima, con y sin aportación de potencia activa en dos de sus nodos. Para este caso se propusieron potencias activas de 600 kW y 300kW, para las cuales se determinaron sus posiciones, para la de 600 kW su mejor ubicación es en el nodo 1 y para la de 300 kW

en el nodo 2, es decir al final del alimentador. Esto se debe a que al estar más lejos de la subestación y al reducir la corriente que circula por el alimentador se reducen las pérdidas eléctricas. También se observó el resultado en el que ambas potencias esta lo más cercano posible a la subestación, pero el desempeño fue menor, al igual que al ubicarlas en cualquier otro nodo se reduce la corriente que circula por el alimentador, pero en este caso al estar cerca de la subestación la corriente aun debe circular una distancia bastante considerable teniendo una magnitud mayor que en el caso en el que la ubicacion de estas potencias esta al final del alimentador.

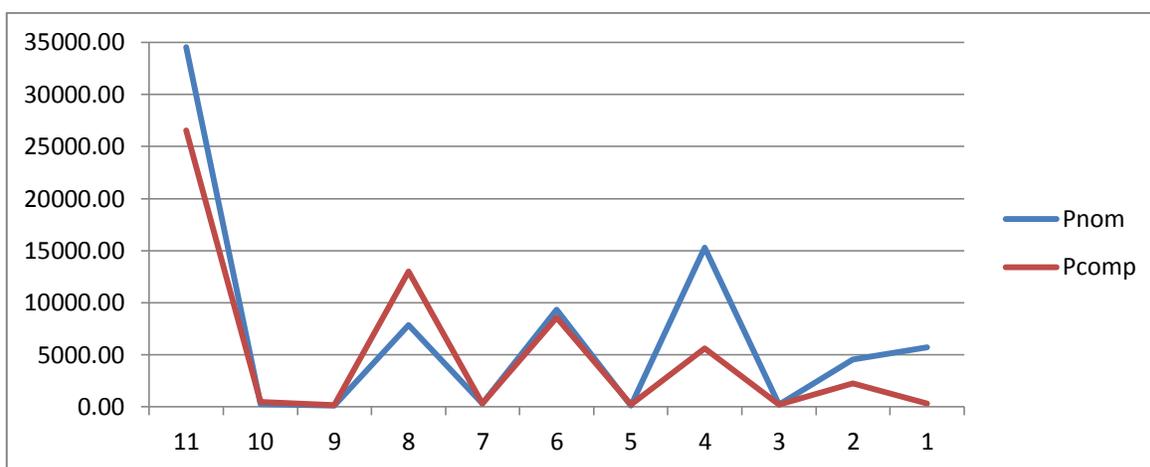


Figura 5.3 Pérdidas eléctricas bajo condiciones normales de operación y con aportación de potencia activa, en kW del circuito SLO 4160 demanda máxima.

5.1.4 Análisis de los resultados del circuito SLO 4160 ante demanda baja.

Para el caso de la demanda baja, las pérdidas eléctricas y los perfiles de voltaje tienen una mejora por sí mismos. En este caso, con la aportación de potencia activa en dos nodos, se tiene un reducción aun mayor de las pérdidas eléctricas y mejoramiento en los perfiles de voltaje. En este caso se acentúa aún más el hecho de que en los nodos compensados se tienen cargas negativas, es decir, se tiene una aportación similar a la de un generador, lo que trae como consecuencia un flujo inverso de corriente, en vez de que en dicho nodo se presente un consumo de corriente eléctrica, se tiene una aportación.

Bajo demanda mínima la ubicación óptima para la reducción de pérdidas eléctricas de las dos potencias son en los siguientes nodos, para los 600 kW en el nodo 1 y para los 300 kW en el nodo 2.

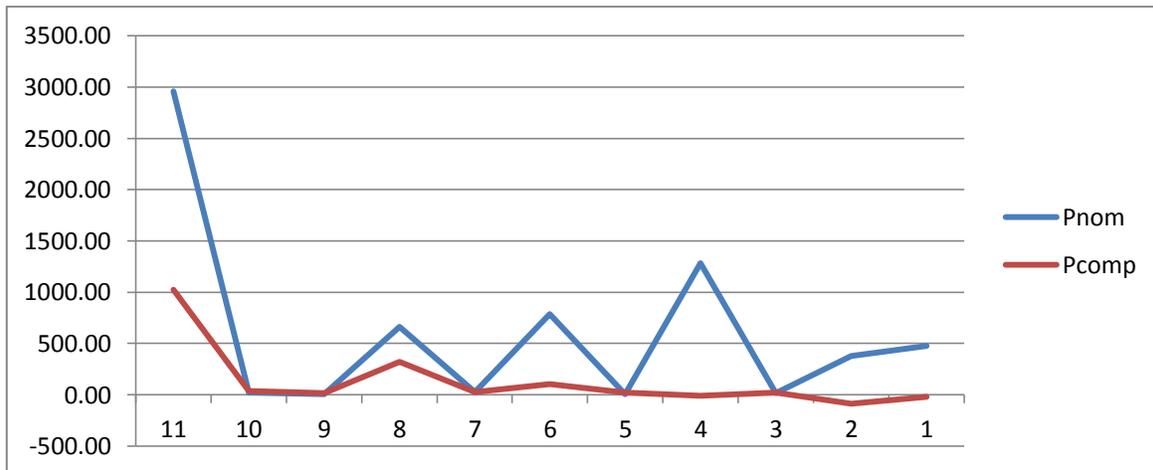


Figura 5.4 Pérdidas eléctricas bajo condiciones normales de operación y con aportación de potencia activa, en kW del circuito SLO 4160 demanda baja.

5.1.5 Análisis de los resultados del circuito SLO 4150 ante demanda máxima.

En la figura 5.5 se muestran las pérdidas eléctricas del circuito SLO 4160 ante demanda máxima, con y sin aportación de potencia activa en dos de sus nodos. Para este caso se propusieron potencias activas de 200 kW y 100kW, para las cuales se determinaron sus posiciones, para la de 200 kW su mejor ubicación es en el nodo 1 y para la de 100 kW en el nodo 2, es decir al final del alimentador. Esto se debe a que al estar más lejos de la subestación y al reducir la corriente que circula por el alimentador se reducen las pérdidas eléctricas. También se observó el resultado en el que ambas potencias esta lo más cercano posible a la subestación, pero el desempeño fue menor, al igual que al ubicarlas en cualquier otro nodo se reduce la corriente que circula por el alimentador, pero en este caso al estar cerca de la subestación la corriente aun debe circular una distancia bastante considerable teniendo una magnitud mayor que en el caso en el que la ubicación de estas potencias esta al final del alimentador.

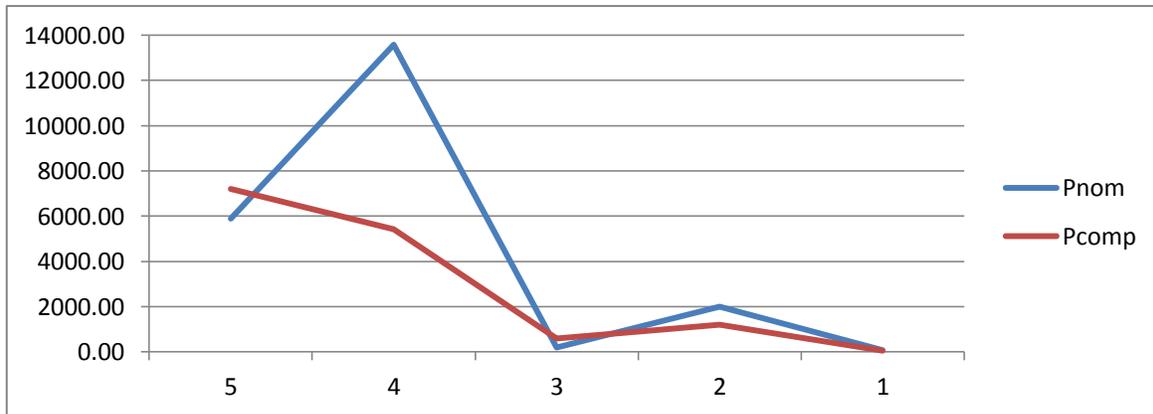


Figura 5.5 Pérdidas eléctricas bajo condiciones normales de operación y con aportación de potencia activa, en kW del circuito SLO 4150 demanda máxima.

5.1.6 Análisis de los resultados del circuito SLO 4150 ante demanda baja.

Para el caso de la demanda baja, las pérdidas eléctricas y los perfiles de voltaje tienen una mejora por sí mismos. En este caso, con la aportación de potencia activa en dos nodos, se tiene una reducción aun mayor de las pérdidas eléctricas y mejoramiento en los perfiles de voltaje. En este caso se acentúa aún más el hecho de que en los nodos compensados se tienen cargas negativas, es decir, se tiene una aportación similar a la de un generador, lo que trae como consecuencia un flujo inverso de corriente, en vez de que en dicho nodo se presente un consumo de corriente eléctrica, se tiene una aportación.

Bajo demanda mínima la ubicación óptima para la reducción de pérdidas eléctricas de las dos potencias son en los siguientes nodos, para los 200 kW en el nodo 1 y para los 100 kW en el nodo 1.

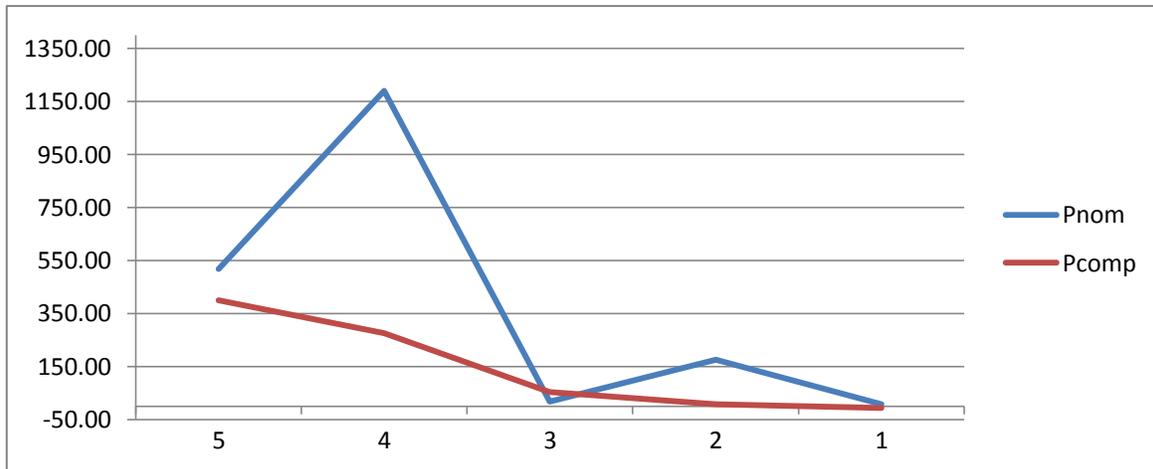


Figura 5.6 Pérdidas eléctricas bajo condiciones normales de operación y con aportación de potencia activa, en kW del circuito SLO 4150 demanda baja.

5.2 CONCLUSIONES.

En esta tesis se mostraron los conceptos y fórmulas matemáticas, los parámetros y la metodología necesarios para realizar un estudio de flujo de carga, como base para el desarrollo de este proyecto.

En el capítulo tres se presentan los resultados de los estudios de flujos de carga bajo condiciones normales de operación. En el capítulo cuatro se muestran los resultados obtenidos al introducir la parte activa de dos generadores dispersos. En ellos se puede observar que en la mayoría de los casos la mejor ubicación, con el fin de reducir las pérdidas eléctricas de los generadores, es en los últimos dos nodos. Para entender el porqué de esto se debe mencionar algunas características de los sistemas radiales, en primer lugar, la energía es suministrada desde la subestación hacia las cargas, para que esta energía llegue a ellas, es necesario que circule una distancia determinada mediante conductores eléctricos, los cuales inherentemente tienen una impedancia eléctrica, que generan pérdidas eléctricas en el sistema. Dicho esto es también importante mencionar que la sección de conductor que transporta la mayor cantidad de corriente eléctrica es la que sale de la subestación al primer nodo, ya que lleva la corriente total del sistema, es decir, la necesaria para suplir la demanda en los nodos y además las pérdidas eléctricas. Por lo tanto, si se compensa en nodos próximos a la subestación, aunque se tenga una reducción en el total de la corriente, esta debe circular todavía por una sección considerable de conductor hasta

llegar a su destino. Si se compensa en nodos cercanos al final del alimentador se tiene una reducción en la corriente eléctrica como se mencionó anteriormente, pero en este caso, la corriente que circula a lo largo del alimentador es menor y por lo tanto se tiene menores pérdidas en cada sección del conductor.

5.3 TRABAJOS FUTUROS.

Este estudio fue realizado para obtener la ubicación óptima de potencia activa en el sistema de distribución. Desde el punto de vista práctico, sería de provecho hacer el mismo análisis con potencia aparente, así se tendría una visión más apegada a la realidad al momento de determinar cualquier parámetro deseado en el sistema de distribución. Así mismo, una buena opción sería combinar el aporte de un generador tomando tanto la parte activa como la reactiva más la ubicación de capacitores, esto sería una herramienta bastante práctica al momento de tomar decisiones con respecto a compensación reactiva y a la introducción de nuevos generadores dispersos en el sistema.