



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Compensación de voltaje y
potencia reactiva en redes
eléctricas para la planeación
de la demanda en períodos
de carga máxima**

TESINA

Que para obtener el título de
Ingeniera Eléctrica Electrónica

P R E S E N T A

Itai Nallely Barrera Santiago

DIRECTOR DE TESINA

Dr. Néstor González Cabrera



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado COMPENSACION DE VOLTAJE Y POTENCIA REACTIVA EN REDES ELECTRICAS PARA LA PLANEACION DE LA DEMANDA EN PERIODOS DE CARGA MAXIMA que presenté para obtener el título de INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

ITAI NALLELY BARRERA SANTIAGO
Número de cuenta: 314349509

Agradecimientos

Expreso mi agradecimiento a la UNAM por brindarme una formación de calidad, y a los académicos que me acompañaron con su orientación en cada paso de este retador trayecto, reflejo de su compromiso y calidad humana. Mi reconocimiento especial al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT), por la beca otorgada con folio: B241316, bajo el proyecto clase IA104623, y de título: “*Planeación de largo plazo en los sistemas eléctricos de potencia integrando nuevas tecnologías en sistemas de almacenamiento basado en baterías*”, cuyo respaldo fue fundamental para la realización de esta tesina

Resumen

Esta tesina aborda el tema de compensación de voltaje y potencia reactiva en sistemas de distribución eléctrica, considerando la inclusión del vehículo eléctrico en la red, las perturbaciones que genera y las posibles soluciones para rectificar esta situación. Mediante el análisis de flujos de potencia con el método de Newton-Raphson, se identifican los nodos en los que es necesario corregir la caída de voltaje y ajustar la potencia reactiva. El estudio se realizó bajo distintos escenarios que someten a un estrés operativo a las redes eléctricas de distribución, en este trabajo se consideran los sistemas de 12 y 33 nodos.

Los resultados obtenidos indican que el uso de un dispositivo shunt proporciona una respuesta de compensación favorable. No obstante, es importante señalar que esta solución no sustituye de forma íntegra a las herramientas robustas que ya se utilizan en la industria.

Finalmente, se concluye que la implementación del dispositivo shunt mitiga los efectos derivados de la inclusión del vehículo eléctrico en redes de distribución. Su desempeño es favorable, pero debe de considerarse como parte de una estrategia más amplia y complementaria a las soluciones industriales ya establecidas.

Abstract

This thesis examines the compensation of voltage and reactive power in electrical distribution systems, considering the integration of electric vehicles into the grid, the disturbances they cause, and potential solutions to mitigate these effects. Through power flow analysis using the Newton-Raphson method, the nodes requiring voltage correction and reactive power adjustment were identified. The study was carried out under different scenarios that subject distribution power grids to operational stress; in this work, 12 and 33-node systems are considered.

The results indicate that the implementation of a shunt device provides a favourable compensation response. However, it is essential to note that this solution does not entirely replace the robust tools currently used in the industry.

In conclusion, the integration of the shunt device helps mitigate the effects of electric vehicle inclusion in distribution networks. Its performance is positive, yet it should be considered as part of a broader and complementary strategy alongside established industrial solutions.

Índice general

Contenido	
Agradecimientos	i
Resumen	ii
Abstract	iii
Índice general	iv
Índice de figuras	vi
Índice de tablas	vii
Abreviaciones y simbología	viii
Capítulo 1 Introducción	1
1.1 La nueva industria eléctrica	1
1.2 Revisión bibliográfica	2
1.3 Objetivo de la tesina	4
1.4 Justificación de la tesina	4
1.5 Estructura de la Tesina	5
Capítulo 2 Modelado de los componentes eléctricos conectados la red	6
2.1 Contenido del capítulo	6
2.2 Componentes que interaccionan en la red eléctrica.	6
Capítulo 3 Análisis de Flujos de potencia	10
3.1 Introducción	10
3.2 Ecuaciones de los flujos de potencia	10
3.3 Métodos de solución: Gauss-Seidel y Newton-Raphson	12
3.4 Ejemplo de 3 nodos	15
3.5 Eventos en la red eléctrica	18
Capítulo 4 Metodología de compensación	21

4.1	Contenido del capítulo	21
4.2	Componente Shunt	21
4.3	Integración de vehículos eléctricos y método de análisis	24
Capítulo 5 Casos de estudio		32
5.1	Contenido del capítulo	32
5.2	Sistema de 12 nodos	32
5.3	Sistema de 12 nodos con escenarios propuestos	33
5.3.1	Escenario 1: Aumento en la potencia activa y reactiva de demanda	33
5.3.2	Escenario 2: Aumento en los valores de resistencia (R) y reactancia (X)	36
5.4	Discusión sobre la Compensación	38
5.5	Sistema de 33 nodos	39
5.6	Sistema de 33 nodos con escenarios propuestos	40
5.6.1	Escenario 1: Uso del vehículo eléctrico como una carga	40
5.6.2	Escenario 2: Uso del Vehículo eléctrico como un generador	43
5.7	Compensación	44
Capítulo 6 Conclusiones		46
6.1	Aportaciones	47
6.2	Trabajos futuros	47
Referencias		48
Anexo A.1 Datos de Sistema		51

Índice de figuras

Figura 3.1: Red eléctrica vista como una admitancia

Figura 3.2: Diagrama de flujo de solución por G-S y N-R

Figura 3.3: Flujos de potencia con Matpower

Figura 3.4: Sistema eléctrico de potencia de tres nodos

Figura 3.5: Solución del sistema de tres nodos

Figura 4.1: Modelo π de una línea de transmisión

Figura 4.2: Red eléctrica y dispositivo shunt

Figura 4.3: Circuito π con compensación shunt

Figura 4.4: Seudocódigo realizado en MATPOWER para sobre demanda

Figura 4.5: Seudocódigo realizado en MATPOWER para sobre dimensión de R y X

Figura 4.6: Integración del VE a la red

Figura 4.7: Esquema de revisión de la batería del VE

Figura 4.8: Descripción gráfica de la carga y descarga de la batería

Figura 4.9: Aplicación de compensación y esquemas de VE en Matpower

Figura 5.1: Red radial de distribución 12 nodos

Figura 5.2: Red radial de distribución 12 nodos con aumento de potencia y compensación shunt

Figura 5.3: Aumento de R y X en el sistema y compensación shunt

Figura 5.4: Red radial de distribución 33 nodos

Figura 5.5: Vehículo eléctrico como carga a la red

Figura 5.6: Red radial de distribución 33 nodos con compensación shunt

Figura 5.7: Red radial de distribución 33 nodos con VE como generador

Índice de tablas

Tabla 3.1: Datos del sistema de tres nodos

Tabla 3.2: Datos obtenidos del SEP de tres nodos

Tabla 3.3: Solución del sistema de tres nodos

Tabla 4.1: Datos iniciales del VE

Tabla 4.2: Energía almacenada en el VE

Tabla 5.1: Flujos de potencia del SEP de 12 nodos (caso base)

Tabla 5.2: Datos obtenidos de Matpower con aumento de P_d y Q_d en 80% de su valor

Tabla 5.3: Compensación con dispositivo shunt en aumento de la demanda

Tabla 5.4: Datos obtenidos de Matpower modificando la resistencia y reactancia

Tabla 5.5: Compensación con dispositivo shunt debido al aumento de resistencia y reactancia

Tabla 5.6: Compensación en la red eléctrica de 12 nodos

Tabla 5.7: Flujos de potencia del SEP de 33 nodos (caso base)

Tabla 5.8: Datos obtenidos de Matpower con VE como carga

Tabla 5.9: Compensación con dispositivo shunt cuando se conecta a la red 33 nodos

Tabla 5.10: Datos obtenidos de Matpower con el VE como generador

Tabla 5.11: Compensación en la red eléctrica de 33 nodos

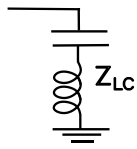
Abreviaciones y simbología

GEI	Gas de efecto invernadero
VE	Vehículo eléctrico
FP	Flujos de potencia
fp	Factor de potencia
p.u.	Por unidad
ONU	Organización de las naciones unidas
ODS	Objetivos de desarrollo sustentable
SENER	Secretaría de Energía
SEP	Sistema eléctrico de potencia
CFE	Comisión federal de electricidad
CENACE	Centro nacional de control de energía
CRE	Comisión reguladora de energía
V	Voltaje
V_B	Voltaje de base
I	Corriente
CA	Corriente alterna
CD	Corriente directa
L	Inductor
C	Capacitor
R	Resistencia
X	Reactancia
Y	Admitancia
Z	Impedancia
G	Conductancia
B	Susceptancia
P	Potencia activa
Q	Potencia reactiva
S	Potencia aparente
X_L	Reactancia inductiva
FACTS	Flexible AC transmisión systems / Sistemas flexibles de transmisión en CA
ω	Frecuencia angular
SoC	<i>State of Charge</i> /Estado de carga
V2G	<i>Vehicle-to-Grid – Vehículo a la red</i>
PQ	Nodo de carga
PV	Nodo controlado por voltaje
Slack	Codo compensador
θ	Ángulo de voltaje
$p_t^{I,C}$	Potencia de carga en el instante t
U_t^I	Variable binaria
$P^{-I,C}$	Potencia máxima de carga del VE

e_{t-1}^I Energía almacenada en el tiempo t-1
 E^{-I} Capacidad máxima de la batería
 η Eficiencia
 Δ_t Intervalo de tiempo para convertir potencia en energía
 E_t^C Energía consumida



Generador sinusoidal



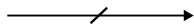
Modelo Shunt



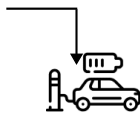
Vehículo eléctrico



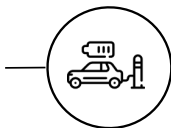
Flujo de Potencia activa (P)



Flujo de potencia reactiva (Q)



Vehículo eléctrico como carga



Vehículo eléctrico como generador

En la presente tesina, toda la información relacionada con el **vehículo eléctrico (VE)**, incluyendo su funcionamiento, integración a la red y análisis operativo, fue tomada de la obra de Baringo, Carrión y Domínguez (2023). Por otro lado, la simbología empleada para **representar elementos eléctricos** fue adoptada del libro *Power System Analysis* de Hadi Saadat (tercera edición), por ser una referencia ampliamente reconocida en el área de análisis de sistemas eléctricos de potencia. Finalmente, todos los aspectos relacionados con la **modelación del elemento shunt** fueron tomados de la obra de Arrillaga, Arnold y Harker, la cual proporciona fundamentos técnicos para el modelado computacional de sistemas eléctricos.

Capítulo 1 Introducción

1.1 La nueva industria eléctrica

El desarrollo de sistemas energéticos eficientes y sostenibles en el sector eléctrico está convirtiendo la forma en que se genera y consume la energía. Se busca suprimir las excesivas emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), contribuyendo a revertir el cambio climático. La aceptación de generación de energía mediante fuentes renovables y el uso del Vehículo Eléctrico (VE) sugiere que disminuya la dependencia de combustibles fósiles, buscando generar un mayor ahorro en costos de operación, satisfacer la demanda actual y la demanda futura de energía eléctrica.

La Organización de las Naciones Unidas (ONU) establece 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) como parte de su agenda global, destacando el objetivo 7 [1], que se centra en la energía asequible y no contaminante. Este objetivo comprende la transición a un sistema energético eficiente y sostenible priorizando la integración a la red eléctrica de fuentes de energía limpia, como generadores renovables, vehículos eléctricos u otras tecnologías de energía limpia. En este aspecto, el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional de la Secretaría de Energía del 2021 (*SENER*) [2], planea que para el año 2035 existan en circulación hasta 4 millones de vehículos eléctricos en circulación en la República Mexicana.

En este sentido, aún cuando se integren las fuentes renovables a la red eléctrica se van a presentar desafíos tales como: expansión de la red eléctrica, formas de suministro, aumento de la demanda de energía y transición energética. No obstante, se debe garantizar la estabilidad y confiabilidad

del sistema eléctrico. Por ello, los expertos en redes eléctricas y energía deben enfocar sus esfuerzos en identificar y resolver los principales desafíos asociados con la integración de estas nuevas tecnologías.

1.2 Revisión bibliográfica

Uno de los enfoques principales en el análisis en estado estacionario de las cargas (demanda) se encuentra en el contexto de la evaluación de largo plazo desde el punto de vista de la planeación, reconfiguración, despacho económico y flujos de potencia. Otro enfoque para el análisis en estado estacionario se centra en los sistemas eléctricos de potencia y en los sistemas de distribución.

En este último aspecto, en [3] se analiza el comportamiento de las cargas en estado estacionario, así como los sistemas de baterías (sin profundizar en este elemento), desde la perspectiva de los sistemas de potencia. En [4], los autores presentan un análisis en estado estacionario de la reconfiguración en las redes de distribución, identificando patrones de comportamiento de las cargas del sistema y de diversas fuentes de generación distribuida. En ambas publicaciones integran los sistemas basados en baterías, sin enfocarse en el problema del tipo o tecnología de la batería.

En el contexto de la integración de los VE, bajo el concepto de vehículo conectado a la red (*Vehicle-to-Grid, V2G, por sus siglas en inglés*), la batería se integra a la red. En [5], los autores presentan un control de Potencia activa (P) y Potencia reactiva (Q) basado en la disponibilidad de energía en los VE, evaluando los perfiles de voltaje en las redes de distribución. En [6], se integra un modelo de optimización basado en despacho económico de potencia reactiva, enfocado en

sistemas de distribución para compensar Q y mejorar el voltaje. Otros autores, en [7], proponen un control de Q a través de los inversores para mantener un punto común de acoplamiento del vehículo a la red de distribución. Los autores en [8], desarrollan un modelo de flujos de potencia óptimos que integran vehículos a la red, demostrando que su modelo puede mejorar la estabilidad del sistema, dentro de los trabajos revisados en el análisis en estado estacionario podemos apreciar que los diversos métodos y técnicas pueden mejorar los niveles de tensión en las redes eléctricas.

Los trabajos previamente mencionados se enfocan en la compensación de Q para mejorar V en las redes distribución. En [6], se propone un esquema de manejo de energía mediante medidores inteligentes y cargadores de vehículos. Los autores en [10], se presenta un control basado en cargadores con inyección carga bidireccional a la red. En [11], se desarrolla un modelo de control predictivo para integrar de manera masiva vehículos a la red. En [12], se realiza un análisis dinámico para revisar el impacto de integración masiva de vehículos a la red, mediante herramientas de simulación de MATLAB. Estos estudios abordan el análisis de los VE desde la perspectiva de control y el análisis dinámico, sin enfocarse al problema de la red eléctrica.

En la revisión del estado del arte, se analizaron diversos estudios tanto desde la perspectiva del estado estacionario como del análisis dinámico. En este trabajo, nos enfocaremos en el análisis en estado estacionario de los flujos de potencia, integrando tanto dispositivos *shunt* como vehículos conectados a la red de manera masiva para evaluar los niveles de tensión en las redes de distribución.

1.3 Objetivo de la tesina

La presente tesina busca modelar los vehículos eléctricos en las redes eléctricas de distribución para observar cómo influyen en los perfiles de voltaje y observar el comportamiento de compensar potencia reactiva y voltaje en periodos de demanda pico (máxima), mediante del análisis en estado estacionario utilizando flujos de potencia.

Los objetivos particulares son:

1.- Modelar e implementar un Vehículo Eléctrico que interactúe con la red eléctrica durante periodos de demanda máxima, mediante su codificación en MATLAB.

2.- Diseñar un dispositivo compensador (reactor en derivación) de voltaje y potencia reactiva para periodos de demanda máxima.

3.- Estudiar la carga y descarga de los vehículos eléctricos y sus efectos en las redes de distribución, además de analizar el efecto de la compensación de voltaje y potencia reactiva en periodos de máxima conexión.

1.4 Justificación de la tesina

De acuerdo con al Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) vigente [13], para 2035 se proyecta la integración de hasta 4 millones de vehículos eléctricos en la red eléctrica. El impacto principal de estos vehículos es en las redes de distribución de los sistemas eléctricos, debido a la conexión de los usuarios, quienes se encuentran principalmente en las redes de distribución (13.8 – 34.5 kV).

1.5 Estructura de la Tesina

La presenta tesina está compuesta por:

Capítulo 2: Estudio de las ecuaciones de los principales componentes de la red eléctrica.

Capítulo 3: Revisión de las ecuaciones de los flujos de potencia y sus métodos de solución.

Capítulo 4: Metodología de compensación.

Capítulo 5: Presentación de los casos de estudios

Capítulo 6: Conclusiones de la tesina.

Capítulo 2 Modelado de los componentes eléctricos conectados a la red

2.1 Contenido del capítulo

En este capítulo se busca identificar ecuaciones que modelan los principales componentes de la red eléctrica y que son utilizados en esta tesis para su análisis en estado estable, enfocándonos principalmente en: generadores eléctricos, transformadores, líneas de transmisión de media y baja tensión, cargas eléctricas, compensador (L y C), y vehículos eléctricos.

2.2 Componentes que interactúan en la red eléctrica.

Los componentes que se van a ejemplificar en un sistema para hacerlo más sencillo de analizar son:

Generadores: Los generadores se van a representar como una fuente de voltaje en serie con la impedancia

Líneas de distribución: Se modelan como un circuito π , incorporando su impedancia correspondiente.

Transformadores: Al igual que las líneas de distribución se representan por el valor de una impedancia correspondiente.

Generador eléctrico

El generador eléctrico es modelado como un nodo de inyección de potencia compleja. Esta inyección de potencia puede ser descrita como:

$$S_g^i = P_g^i + jQ_g^i \quad (2.1)$$

Donde el generador i inyecta la potencia requerida para satisfacer la demanda del periodo de tiempo especificado por t . y es compuesto a través de sus dispositivos de potencia activa (P) y potencia reactiva (Q).

Elementos de red

Los elementos de red modelados en esta tesina serán representados a través del modelo de red estándar π , con los respectivos parámetros de cada elemento $z = r + jx$, los cuales describen la resistencia y reactancia del elemento según sea el caso.

Cargas eléctricas

Las cargas eléctricas son modelados como elementos de potencia constante variantes en el tiempo. Este puede ser representado como:

$$S_a^i = P_a^i + jQ_a^i \quad (2.2)$$

Compensador de Voltaje

Los dispositivos *shunt* conectados en el sistema eléctrico. tales como capacitor o inductor, son modelados como una impedancia fija a tierra en el bus. La admitancia del dispositivo *shunt* puede ser escrita como:

$$y_{sh}^i = g_{sh}^i + jb_{sh}^i \quad 2.3$$

Donde:

g_{sh}^i : Representa la parte real que a su vez determina las pérdidas de potencia asociadas a la resistencia que se tiene en serie con la conductancia en derivación.

jb_{sh}^i : Representa la potencia reactiva que se debe asemejar al flujo de potencia considerando un condensador en derivación.

$$\frac{1}{R + jX} = g_{sh}^i + jb_{sh}^i \quad (2.4)$$

$$\frac{1}{R + jX} * \frac{R - jX}{R - jX} = \frac{R - jX}{R^2 + X^2} = g_{sh}^i + jb_{sh}^i \quad (2.5)$$

$$g_{sh}^i = \frac{R}{R^2 + X^2} \quad (2.6)$$

$$b_{sh}^i = -\frac{X}{R^2 + X^2} \quad (2.7)$$

Se utiliza la admitancia representada de manera compleja por medio de $g_{sh}^i + jb_{sh}^i$ para analizar como actúa la potencia en un SEP. Es decir:

Las ecuaciones 2.6 y 2.7 representan una conductancia cuando X es positiva y una susceptancia cuando X es negativa, esto quiere decir que el sistema absorbe potencia reactiva ($Q > 0$) o genera potencia reactiva ($Q < 0$).

Vehículo eléctrico

El comportamiento del vehículo eléctrico en la red eléctrica se representa mediante la potencia activa (P), la potencia reactiva (Q) y el estado de carga (SoC).

El estado de carga, mediante el parámetro U_t^l , indica si es posible que el vehículo eléctrico se considere como parte de la red de distribución y suministre energía eléctrica en momentos de alta demanda. A esta tecnología se le conoce como: V2G (*Vehicle to grid*).

Capítulo 3 Análisis de Flujos de potencia

3.1 Introducción

En este capítulo se revisarán las ecuaciones de flujos de potencia de manera analítica. El análisis de los sistemas eléctricos de potencia se resuelve comúnmente por el método de voltajes nodales, para ello es necesario tener especificados los nodos de generación y los nodos de carga. De acuerdo con lo propuesto [14] y [22], los nodos del sistema eléctrico pueden clasificarse según los datos que se conocen y los que deben calcularse durante el análisis de flujo de potencia:

- Nodo de carga (PQ): En esta barra los datos de entrada son las Potencias activas y reactivas, respectivamente P_k y Q_k son conocidas. Se desconoce Voltaje y Ángulo.
- Nodo controlado por voltaje (PV): Esta barra es de control de voltaje por lo que en voltaje V_k es fijo, se conoce la Potencia de entrada P_k . Se desconoce Q_k y δ .
- Nodo compensador (Slack): Se conoce como “barra infinita”, los datos de entrada fijados son V_k y su ángulo. Los datos que se desconocen son: P_k y Q_k .

3.2 Ecuaciones de los flujos de potencia

Los flujos de potencia en corriente alternan (CA) se refieren a la distribución de energía eléctrica, este flujo de energía comienza por los nodos de generación y llegan hasta las cargas pasando por las líneas de transmisión. El propósito de analizar los flujos de potencia es esencial para analizar, operar eficientemente e incluso sirve como base de diseño para poder identificar puntos de conexión donde se encuentren sobrecargas. Además, de ofrecer un panorama para poder optimizar los sistemas eléctricos de potencia.

Al dar una solución a los flujos de potencia es más común utilizar la admitancia, como se observa en la figura 3.1, que define al SEP.

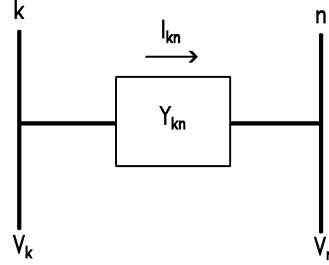


Figura 3.1: Red eléctrica vista como una admitancia.

Dónde:

$$I_{kn} = \frac{V_k - V_n}{Z_{kn}} = Y_{kn}(V_k - V_n) \quad (3.1)$$

La notación abreviada para esta matriz es:

$$I = Y_{bus} * V \quad (3.2)$$

$$I_k = \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \quad (3.3)$$

La potencia compleja suministrada al bus k es:

$$S_k = P_k + jQ_k = V_k I_k^* \quad (3.4)$$

Reescribiendo en términos de ecuaciones y variables reales:

$$P_k = P(V, \theta); P_k = V_k \sum_{n \in k}^N V_n (G_{kn} \cos \theta_{kn} + B_{kn} \sen \theta_{kn}) \quad (3.5)$$

$$Q_k = Q(V, \theta); Q_k = V_k \sum_{n \in k}^N V_n (G_{kn} \text{sen } \theta_{kn} - B_{kn} \text{cos } \theta_{kn}) \quad (3.6)$$

$$\theta_{kn} = \theta_k - \theta_n \quad (3.7)$$

En este estudio se adoptan las definiciones y notación propuestas por Saadat (2010) para representar las variables que describen el flujo de potencia, donde: P_k es potencia activa inyectada en el nodo k , Q_k es la potencia reactiva inyectada en el nodo k , V_k es la magnitud del voltaje en el nodo k , G_{kn} corresponde a la conductancia de la línea entre los nodos k y n , B_{kn} alude a la susceptancia de la línea entre los nodos k y n , θ_{kn} simboliza la diferencia de ángulos de voltaje entre nodos k y n .

La ecuación 3.5 y 3.6 son conocidas como la forma polar de las ecuaciones de flujo de potencia.

3.3 Métodos de solución: Gauss-Seidel y Newton-Raphson

Los métodos más usados para la solución de flujos de potencia son: Gauss-Seidel y Newton-Raphson [14]. Estas técnicas iterativas buscan una respuesta que se ajuste lo más que se pueda a soluciones reales, esto se logra cuando las iteraciones de estos métodos convergen es ahí cuando se ha encontrado una solución al sistema de ecuaciones generado. Estos métodos son resueltos de manera sencilla cuando se tienen un SEP de pocos nodos, pero cuando se tiene una red eléctrica mucho mayor es necesario recurrir a la utilización de software especializado que sea capaz de realizar las iteraciones necesarias de estos dos métodos. En este trabajo se utiliza el Toolbox Matpower [15] como parte de Matlab® [16] para resolver el modelado de los flujos de potencia.

Esta herramienta de simulación ofrece la posibilidad de solucionar problemas de flujo de potencia y de flujo de potencia óptimo en CA. Tiene la flexibilidad de integrar diversas redes eléctricas y sistema de ecuaciones que de este se generen utilizando el método de Newton o Gauss según sea la habilidad del usuario para implementarlo en código.

En la figura 3.2 se muestran los diagramas de flujo que describen el proceso que conlleva el análisis de flujos de potencia mediante los métodos de Gauss-Seidel y Newton-Raphson. El método de Gauss-Seidel es un procedimiento iterativo sencillo, en el que los valores de voltaje se actualizan sucesivamente hasta alcanzar la convergencia. Aunque su implementación es fácil, presenta una tasa de convergencia lenta, especialmente en sistemas grandes. Por otro lado, el método de Newton-Raphson emplea una aproximación lineal mediante derivadas parciales (Jacobiano), lo que le permite alcanzar una mayor rapidez y precisión en la convergencia, siendo el método más utilizado para resolver los flujos de potencia en sistemas de mediana y gran escala (Saadat, 2010).

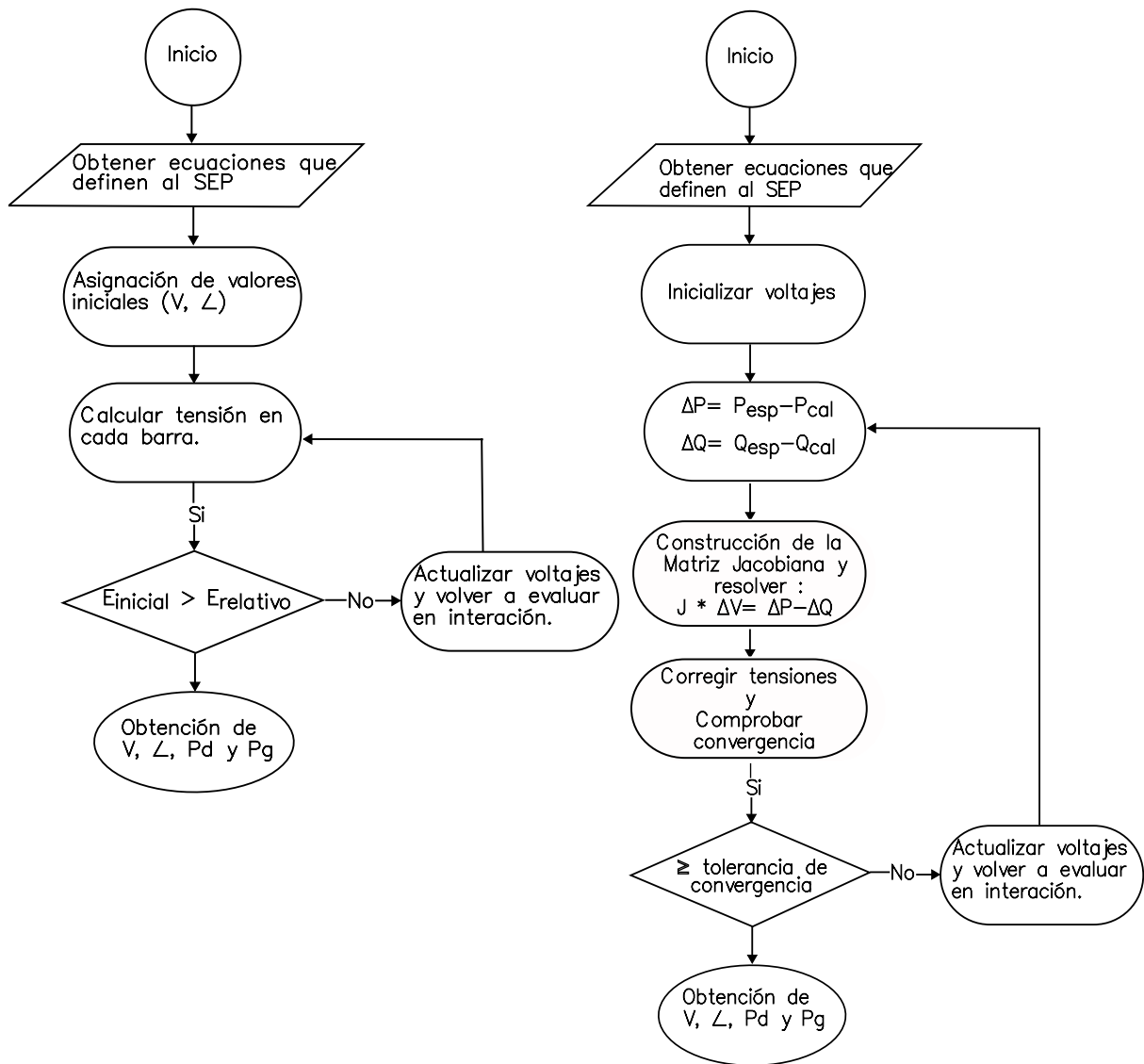


Figura 3.2: Diagrama de flujo de solución por Gauss-Seidel y Newton-Raphson.

La figura 3.3 presenta una descripción de la aplicación en Matlab. Primero hay que cargar los datos de la red, [15] trae una cantidad de sistemas (casos) precargados, los cuales son flexibles para modificar bajo código en Matlab. Posteriormente, se debe identificar el tipo de flujos de potencia ya sea en CA o CD. Newton Raphson es el método que toma por default [15], si no se

quiere este método se debe indicar la solución a través de Gauss Seidel. Finalmente, se ejecuta la instrucción y se obtiene la solución de los flujos de potencia del sistema que previamente se eligió ya sea por número de nodos o voltaje que tiene la red eléctrica.

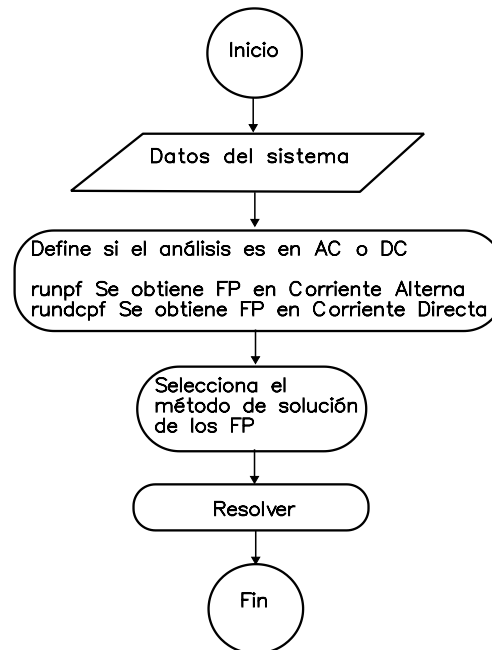


Figura 3.3: Flujos de potencia con Matpower.

La flexibilidad de utilizar [15] es debido a que se pueden implementar diversos dispositivos como FACTS, Baterías u otros elementos de red. Adicionalmente permite realizar análisis en diversos periodos de tiempo solo dando un par de instrucciones. Finalmente, el usuario puede modificar el código original para su conveniencia.

3.4 Ejemplo de 3 nodos

Para ejemplificar el uso de la herramienta, a continuación, se aplicará a un sistema de tres nodos (figura 3.4).

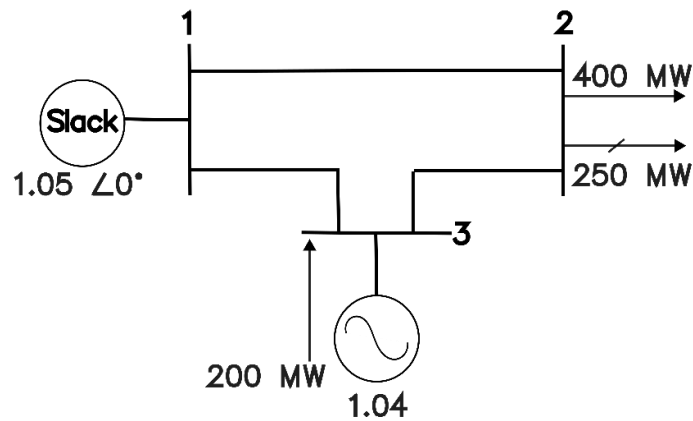


Figura 3.4: Sistema eléctrico de potencia de tres nodos.

La tabla 3.1 presenta los datos del sistema en la cual se toma como potencia base 100 MVA.

Tabla 3.1.- Datos del sistema de tres nodos

Bus	Tipo	Pg [MW]	Qg [MVA]	Pd [MW]	Qd [MVA]	V [p.u.]
1	Slack					1.05∠0°
2	PQ			400	250	
3	PV	200				1.04

La tabla 3.2 presenta los datos de las líneas de transmisión del sistema del sistema.

Tabla 3.2.- Datos obtenidos del SEP de tres nodos

De	A	Y	B [p.u.]
1	2	10	-j20
1	3	10	-j30
2	3	16	-j32

A continuación, se desarrollan las ecuaciones de flujos de potencia al sistema de tres nodos. Se

calcula Y_{bus} a partir de los datos de red del sistema como se presenta:

$$Y_{bus} = G + jB = \begin{bmatrix} 20 - j50 & -10 + j50 & -10 + j30 \\ -10 + j20 & 26 - j52 & -16 + j32 \\ -10 + j30 & -16 + j32 & 26 - j62 \end{bmatrix} \quad 3.8$$

En forma polar la matriz Y_{bus} se representa como:

$$Y\angle\theta = \begin{bmatrix} 53.85\angle -68.2^\circ & 22.36\angle 116.56^\circ & 31.62\angle 108.4^\circ \\ 22.36\angle 116.56^\circ & 58.13\angle -63.4^\circ & 35.77\angle 116.56^\circ \\ 31.62\angle 108.4^\circ & 35.77\angle 116.56^\circ & 67.23\angle -67.24^\circ \end{bmatrix} \quad 3.9$$

Desarrollo de las ecuaciones de Potencia activa y Potencia reactiva (3.5) y (3.6) y siguiendo el diagrama de flujo de la figura 3.2 utilizando Newton-Raphson se tiene:

$$P_k = P(V, \theta); P_k = V_k \sum_{n \in k}^N V_n (G_{kn} \cos \theta_{kn} + B_{kn} \sen \theta_{kn}) \quad 3.10$$

$$Q_k = Q(V, \theta); Q_k = V_k \sum_{n \in k}^N V_n (G_{kn} \sen \theta_{kn} - B_{kn} \cos \theta_{kn}) \quad 3.11$$

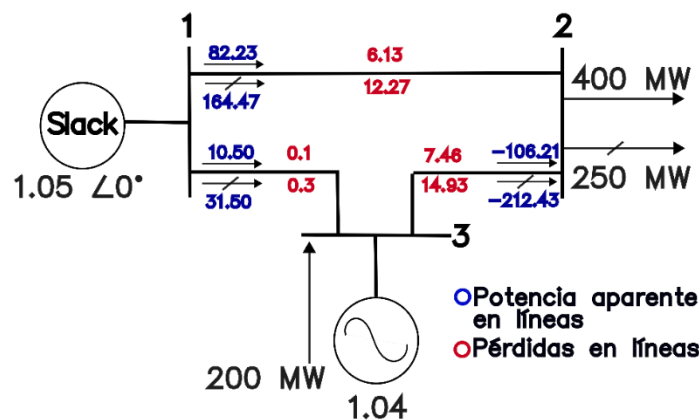


Figura 3.5: Solución del sistema de tres nodos.

En el sistema resuelto mediante Newton-Raphson se puede observar que el nodo 1 y 3 aportan potencia activa y reactiva para hacer que la distribución de energía no comprometa alguna línea, esto debido a que en el nodo 2 se tiene una carga considerable que puede afectar la distribución de energía eléctrica.

La tabla 3.3 muestra los datos obtenidos una vez que el método de Newton-Raphson termina de realizar las iteraciones hasta lograr una convergencia satisfactoria, en este caso fue de tres iteraciones.

Tabla 3.3.- Solución del sistema de tres nodos

Bus	Tipo	Pg [MW]	Qg [MVA]	Pd [MW]	Qd [MVA]	V [p.u.]
1	Slack	218.42	140.85	0	0	1.05 $\angle 0^\circ$
2	PQ	0	0	400	250	0.97 $\angle -2.70^\circ$
3	PV	200	146.18	0	0	1.04 $\angle -0.50^\circ$

A raíz de los resultados de un sistema de tres nodos que se muestra en la figura 3.5 se concluye que el estudio de flujos de potencia es fundamental para satisfacer la necesidad de contar con una red eléctrica confiable y segura.

Los resultados mostrados en rojo denotan que existen pérdidas en las líneas. Estas pérdidas están dentro del rango permisivo, dichas pérdidas están sujetas al calentamiento que se manifiesta entre conductores y una respuesta a este tipo de problemas es la conexión a la red de un componente shunt, banco de capacitores o un tipo de energía sustentable que sea capaz de compensar la red eléctrica.

3.5 Eventos en la red eléctrica

Como se ha mencionado con anterioridad a partir del análisis de flujos de potencia se puede determinar si el SEP cuenta con deficiencias en alguna parte de la red eléctrica, es muy importante poder identificar los nodos en los que existen estas deficiencias para proponer un plan de acciones correctivas.

Para poder familiarizarnos con los tipos de eventos que se pueden presentar en un sistema eléctrico de potencia se desarrollará la simulación mediante [15] simulando incremento en la carga y en un

segundo evento se observará el aumento en valores de resistencia (r) y reactancia (x) sugiriendo un aumento de temperatura del medio conductor debido al incremento de la carga a lo largo de los años.

El código de Red vigente define los requisitos técnicos que deben cumplir los participantes del sistema eléctrico [17], los cuales son elementales para que se cumpla con la normativa y se mantenga la estabilidad en el sistema:

“d.- Modos de control de potencia reactiva

i. La central eléctrica asíncrona debe proporcionar potencia reactiva automáticamente por cualquiera de los modos de control: Control de tensión, control de potencia reactiva o control de factor de potencia, la consigna será enviada por CENACE de forma remota;

ii. A efectos del modo de control de tensión, la central eléctrica asíncrona debe contribuir al control automático de la tensión mediante la entrega de potencia reactiva a la red con un rango de consigna de tensión de al menos 0.95 – 1.05 P.U., en pasos no superiores a 0.01 P.U., con una pendiente definida por el CENACE en pasos no mayores que 0.05%.

iii. La consigna poder ser operada con o sin banda muerta definida por el CENACE en un rango de 0 a $\pm 1\%$ de la tensión nominal de la red en pasos no mayores de 0.1 %.

Donde los rangos de tensión son de 0.95 a 1.05 por ello se dice que en el caso donde el VE esta como carga está dentro de su límite inferior y precisa compensación.”

Texto retomado de: Resolución Núm. RES/151/2016 de la CRE, publicada en el Diario Oficial de la Federación, Código de red: Comisión Reguladora de Energía, 2016

Incremento en la carga

Un sistema eléctrico de potencia es susceptible a tener este tipo de eventos debido a la demanda de la zona en que se localice nuestra red eléctrica. El aumento tanto en la potencia activa y reactiva P y Q , respectivamente, crea la necesidad de equilibrar la generación, compensación de potencia reactiva sin poner en riesgo la estabilidad de nuestro sistema.

Para ejemplificar en nuestros Sistemas eléctricos de potencias se va a aumentar en un 80% la potencia activa demandada (P_d) y la potencia reactiva demandada (Q_d). Logrando que el sistema muestre un cambio significativo en Voltajes de nodos ($V \angle \theta$), Corriente en líneas (I), Potencia activa y reactiva generada (P_g y Q_g).

Aumento en valores de resistencia y reactancia

Un evento en el sistema donde se observe aumento en valores de la resistencia y reactancia se puede asumir que existe calentamiento en los conductores por un aumento de carga en el sistema o podría ser debido al deterioro de los conductores. Estas posibilidades aluden a que la red es débil y/o se ha realizado una ampliación a la red debido al paso de los años para cubrir la demanda. Estos aspectos hacen que se tenga caída de tensión en el SEP en especial a los buses que se encuentran lejanos a los buses de generación. Una vez que se tenga una red deficiente se compensará mediante un dispositivo shunt diseñado específicamente para asegurar la estabilidad del SEP.

Capítulo 4 Metodología de compensación

4.1 Contenido del capítulo

En este capítulo se presenta la metodología de compensación del dispositivo shunt a ser aplicada en esta tesina, con la finalidad de verificar los diversos niveles de tensión en la red.

4.2 Componente Shunt

El modelo de la red eléctrica en un circuito π se observará como:

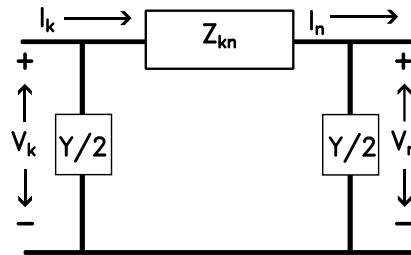


Figura 4.1: Modelo π de una línea de distribución.

Donde:

$$Z = R + jX ; X_L = L * \omega \quad \text{Parámetro longitudinal} \quad (4.1)$$

$$Y = G + jB ; B = C * \omega \quad \text{Parámetro transversal} \quad (4.2)$$

Según Grainger y Stevenson (1994) y Saadat, H. (2010), los parámetros eléctricos que caracterizan una línea de distribución entre dos nodos incluyen: Z como impedancia del elemento conectado, Y se refiere a la admitancia, R es la resistencia, X es la reactancia de la línea, G es la conductancia, B es la susceptancia, X_L es la reactancia inductiva, C es la capacitancia. Todos estos son parámetros conocidos de la línea de distribución que conecta dos nodos.

Esta representación muestra nuestro sistema eléctrico de potencia de manera condensada. Cuando existe un sistema esta desbalanceado es importante identificar qué tipo de problema se tiene para conservar estabilidad, y eficiencia. Para redimir el efecto del desbalanceo se opta por compensar el sistema mediante el dispositivo shunt.

El elemento shunt es un dispositivo encargado de volver a un estado estable el sistema manteniendo dentro de los límites deseados el voltaje y por consiguiente la potencia reactiva.

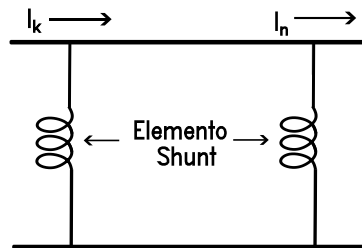


Figura 4.2: Red eléctrica y dispositivo shunt.

Para compensar un sistema eléctrico se suele utilizar la compensación tipo LC, es decir: Se tiene un inductor y un capacitor en serie, conectado en derivación, este tipo de compensación filtra armónicos específicos y modifica el factor de potencia con ello se encargan de absorber potencia reactiva, reducir sobre voltaje transitorios e incrementa voltaje de transmisión en condiciones de carga pesada, respectivamente.

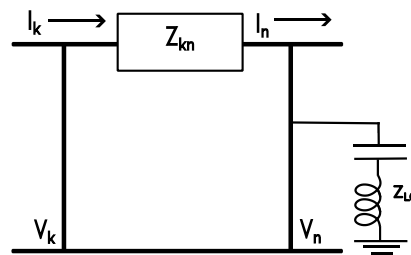


Figura 4.3: Circuito π con compensación shunt.

Para compensar un sistema eléctrico de potencia mediante el dispositivo shunt en [15] se llevó a cabo el siguiente procedimiento descrito por la figura 4.4 se trata de una serie de pasos en donde primero se coloca el caso de análisis dado por [15], posteriormente se realiza el aumento del 80% de la demanda, creando así una descompensación en el voltaje. Finalmente, se observa el valor del voltaje con mayor caída de voltaje y en ese nodo se va a colocar el dispositivo shunt que fue previamente calculado.

```

Procedimiento: Aplicación de elemento Shunt
runpf ('case12da');
cont = [ 1 ; 1.8 ];
for i = 1 : length (cont)
    Aumento 80% Pd
    Aumento 80% Qd
    runpf
        Seleccionar bus con mayor caída de voltaje
        De ese bus obtener Qd == Qd compensar
        Obtener valores de R, L y C
        Aplicar ecuaciones 2.2.6 y 2.2.7
    if cont (i) == 1.8
        mpc.bus (12,5) = gish
        mpc.bus (12,6) = bish
    runpf
    end
end
mostrar V, Pg, Qg, Pd y Qd iniciales
mostrar V, Pg, Qg, Pd y Qd con elemento shunt
fin del proceso

```

Figura 4.4: Pseudocódigo realizado en [15] para sobre demanda.

En este proceso se llevó a cabo la parametrización de los valores que se tienen en la resistencia y en la reactancia con el fin de simular una red eléctrica desgastada al paso de los años, es decir: se tiene una red eléctrica que tiene deficiencias en los conductores tales como calentamiento entre conductores lo que causa que los valores de resistencia y de la reactancia se vean afectados y a su vez causan un desbalance aumentado las pérdidas en la red.

Se realiza el sobredimensionamiento en un 300%, como se muestra en el pseudocódigo de la figura 4.5, siendo este un caso extremo a compensar. Posteriormente, se observa los nodos en

donde la caída de voltaje es más evidente y sobre ese nodo se debe de considerar la compensación mediante el dispositivo shunt, que previamente ha sido calculado para esta red eléctrica.

```
Procedimiento: Aplicación de elemento Shunt
runpf ('caso');
mpc.branch( [Buses], R:X) = mpc.branch( [Buses], R:X)(3)
mostrar V, Pg, Qg, Pd y Qd sobredimensionadas

Seleccionar bus con mayor caída de voltaje
De ese bus obtener Qd == Qd compensar
Obtener valores de R, L y C
Aplicar ecuaciones 2.2.6 y 2.2.7

Compensando con modelo shunt
mpc.bus (bus_comp,5) = gi,sh
mpc.bus (bus_comp,6) = bi,sh
runpf
mostrar V, Pg, Qg, Pd y Qd con elemento shunt
fin del proceso
```

Figura 4.5: Pseudocódigo realizado en [15] para sobre dimensión de R y X.

4.3 Integración de vehículos eléctricos y método de análisis

La integración de vehículos eléctricos a la red se considera un desafío debido a que pueden modelarse como una fuente de almacenamiento o inyección de energía. Particularmente está se presenta en los picos de alta demanda, lo cual se producen estrés a la red eléctrica. A su vez un elemento que puede aliviar estos problemas son los shunt para llevar el sistema a un estado estable.

Particularmente, un VE puede definirse como un automóvil que utiliza uno o más motores eléctricos para propulsarse, en lugar del motor de combustión interna. Por otro lado, los problemas que suelen presentar los VE son un desbalance en la red cuando se cargan simultáneamente y puede ser un punto crucial cuando se tiene un pico de demanda pues esto va a contribuir a generar más cargas.

El modelado de los VE es tomado de [18]. Así los VE se integran a la red como una carga o como una fuente de generación, además, se debe de entender el comportamiento de la batería.

El VE en una primera aproximación se puede definir como:

$$p_t^{I,C} = \begin{cases} 0 & \text{si } e_{t-1}^I = E^{-I} \\ U_t^I P^{-I,C} & \text{si } e_{t-1}^I < E^{-I} \end{cases} \quad \forall t \in T \quad (4.3)$$

$$e_t^I = \min\{e_{t-1}^I + P_t^{I,C} \eta^{I,C} \Delta_t - E_t^C, \bar{E}^I\}, \quad \forall t, \in T \quad (4.4)$$

En una manera más optimizada y utilizando tecnología V2G (Vehicle-to-grid), para que el VE tenga interacción con la red y en horas pico de alta demanda el VE actúe como generador. Para ello se considerando los siguiente:

$$e_t^I = e_{t-1}^I + p_t^{I,C} \eta^{I,C} \Delta_t - \frac{p_t^{I,D} \Delta_t}{\eta^{I,D}} - E_t^{I,C}, \quad \forall t \in T \quad (4.5)$$

$$0 \leq p_t^{I,C} \leq U_t^I P^{-I,C}, \quad \forall t \in T \quad (4.6)$$

$$0 \leq p_t^{I,D} \leq U_t^I P^{-I,D}, \quad \forall t \in T \quad (4.7)$$

$$\underline{E}^I \leq e_t^I \leq E^{-I}, \quad \forall t \in T \quad (4.8)$$

Retomado de [18] donde: e_{t-1}^I es el nivel de energía en la batería, E^{-I} es la capacidad máxima de la batería, P es la potencia nominal de la batería, p se refiere a la potencia en un instante t y U es un indicador binario que representa la carga descarga del VE.

La ecuación 4.3 nos representa la carga de la batería debido a que si $e = E$ no se va a cargar debido a que indica que la batería está completamente cargada, pero si $e < E$ va a acomenzar el proceso de carga.

Donde:

$p_t^{I,C}$: Potencia de carga en el instante t

U_t^I : Variable binaria indicadora de conexión a la red $\begin{cases} 1 & \text{conectada y cargando} \\ 0 & \text{desconectada} \end{cases}$

$P^{-I,C}$: Potencia máxima de carga del vehículo

e_t^I : Energía almacenada

E^{-I} : Capacidad máxima de la batería

$p_t^{I,C} \eta^{I,C} \Delta_t$: Variables que describen la carga en el VE

$\frac{p_t^{I,D} \Delta_t}{\eta^{I,D}}$: Variables que describen al VE como generador

$E_t^{I,C}$: Descripción del VE como consumidor

η : Eficiencia considerando pérdidas

Δ_t : Intervalo de tiempo en el que convierte potencia en energía

Para el presente trabajo se considera para el análisis en estado estacionario que la suma de todas las baterías a nivel nodal puede representarse como una inyección de energía al sistema mientras estén conectados (figura 4.6).

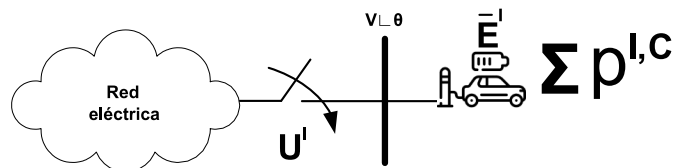


Figura 4.6: Integración del VE a la red.

La figura 4.7 indica el proceso de modelado en Matlab de carga y descarga de la batería. Se comienza definiendo el número de periodos de tiempo (T) que realizara la revisión para la condición de la batería. El siguiente paso es un ciclo que identifique si la batería está en carga/descarga. Si está en carga, revisa la condición e_{t-1}^I del periodo anterior y se dispone a cargarse hasta alcanzar E . Donde $E = \sum_{ii=1}^{NTV} e^I$ es la sumatoria de todas las cargas de baterías individuales. Una vez identificado la capacidad disponible de energía en el nodo debido a los VE, esta puede ser representada en los flujos de potencia como $PD_i = PD_i + \sum_{ii=1}^{NTV} e^I$ donde es la suma individual de las aportaciones de energía de la batería en el periodo de tiempo T y la PD del nodo i .

Para inyección se puede explicar hipotéticamente: si el operador de la red emita una emergencia antes uno de los escenarios descritos en la sección 3.5, los usuarios de VE podrán inyectar la e^I disponible a la red en ese momento con la finalidad de disminuir el estrés en la red. Esta puede ser simulada en los flujos de potencia de dos formas dependiendo del nivel de PD en el nodo 1.- $PD_i = PD_i - \sum_{ii=1}^{NTV} e^I$ es decir, que la energía sea absorbida de manera local, o si $PD_i < \sum_{ii=1}^{NTV} e^I$ esta puede ser simulada en los flujos de potencia como: $PG_i = \sum_{ii=1}^{NTV} e^I - PD_i$ como una fuente de generación que inyecta esa energía o excedente de energía a la red.

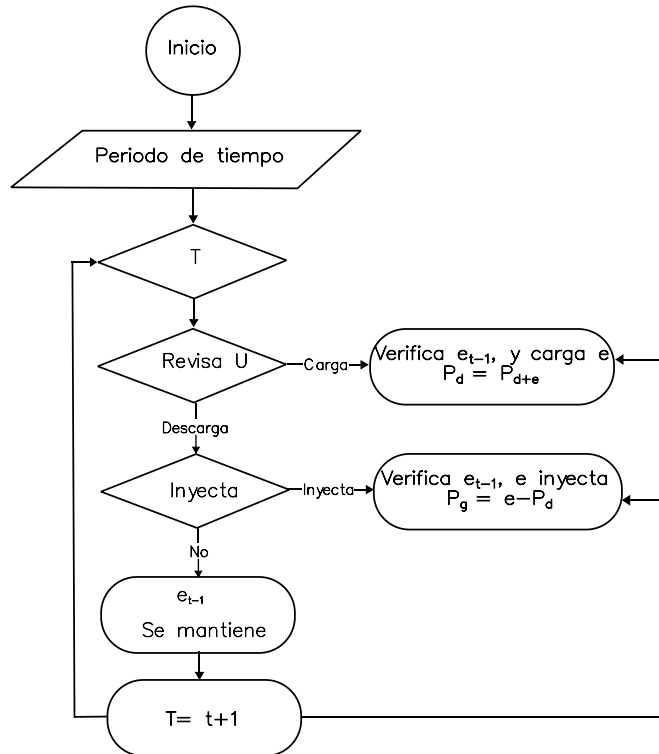


Figura 4.7: Esquema de revisión de la batería del VE.

Ejemplificando el diagrama de flujo de la figura 4.7 se considera lo siguiente:

Supóngase un vehículo eléctrico con las siguientes características mostradas en la tabla 4.1 las cuales describen los periodos en los que se encuentra.

Tabla 4.1: Datos iniciales del VE

Periodo de tiempo	VE	Consumo [kWh]
1	Estacionado	-
2	Estacionado	-
3	En movimiento	3
4	En movimiento	4
5	Estacionado	-
6	En movimiento	2.5

Nivel mínimo y máximo de la batería:

$$2 \leq e_{t-1}^l \leq 10 \quad [kWh]$$

Nivel de energía inicial: 5 kWh

Índice de eficiencia de carga: 90%

Inicialmente, en el periodo 1 se considera que la batería se descarga en 0.3 kWh, en el periodo 2 carga hasta 5 kWh y en el periodo 5 carga hasta 3 kWh.

En [16], retomando la ecuación 4.3 donde indica la carga y descarga de la batería obteniendo los siguientes datos:

En la figura 4.8 se observa el perfil de carga y descarga de la batería del VE representado por el consumo energético en función del tiempo. Los períodos de carga se observan cuando el VE esta estacionado (periodos 1,2 y 5) y los períodos de descarga cuando el VE está en movimiento (3,4 y 6). Este comportamiento refleja los ciclos típicos de operación de un VE: carga en reposo y descarga durante la conducción.

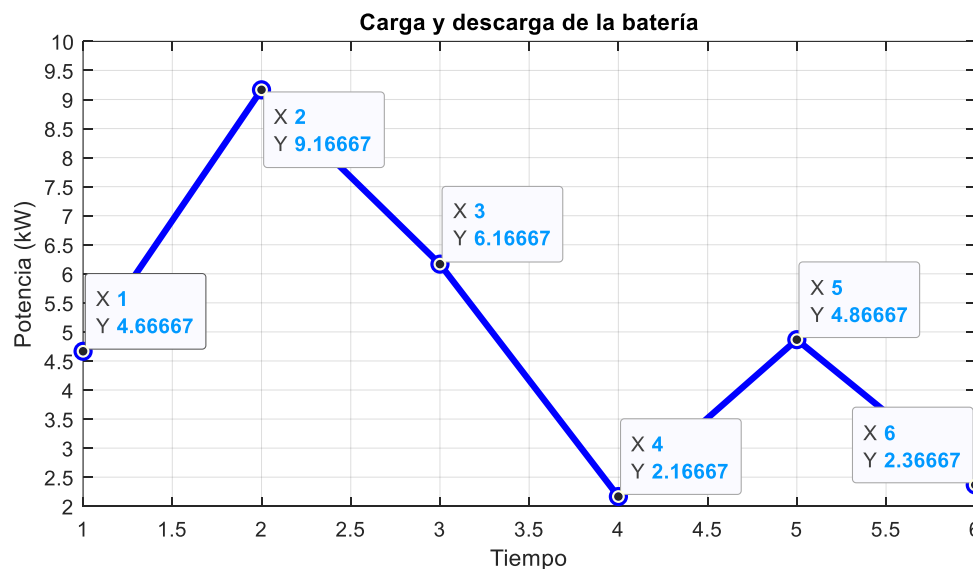


Figura 4.8: Descripción gráfica de la carga y descarga de la batería.

Se observa en la tabla 4.2 que los valores se encuentran dentro de los límites y representa el periodo de 6 horas en el que el vehículo eléctrico está siendo usado.

Tabla 4.2: Energía almacenada en el VE

Periodo de tiempo	Energía almacenada [kW]
1	4.66
2	9.16
3	6.16
4	2.16
5	4.86
6	2.36

Finalmente, en la figura 4.9 se presenta la simulación en flujos de potencia considerando compensación y revisión de baterías a partir de [15].

0.- Es altamente recomendable ejecutar [15] desde el set path de Matlab

1.- Integra los datos del sistema en los casos de estudio incluido en [15].

2.- Se presenta un evento repentino en el sistema

3.- Se realiza una acción correctiva

a) Diseño de un dispositivo shunt (sección 4.2) este se simula en [15] como parte del nodo a través de $G + jB$ de acuerdo con el tipo de compensación.

b) Se considera el esquema de VE

4.- Se simulan los flujos de potencia de acuerdo con los pasos previos y se revisa los niveles de voltaje.

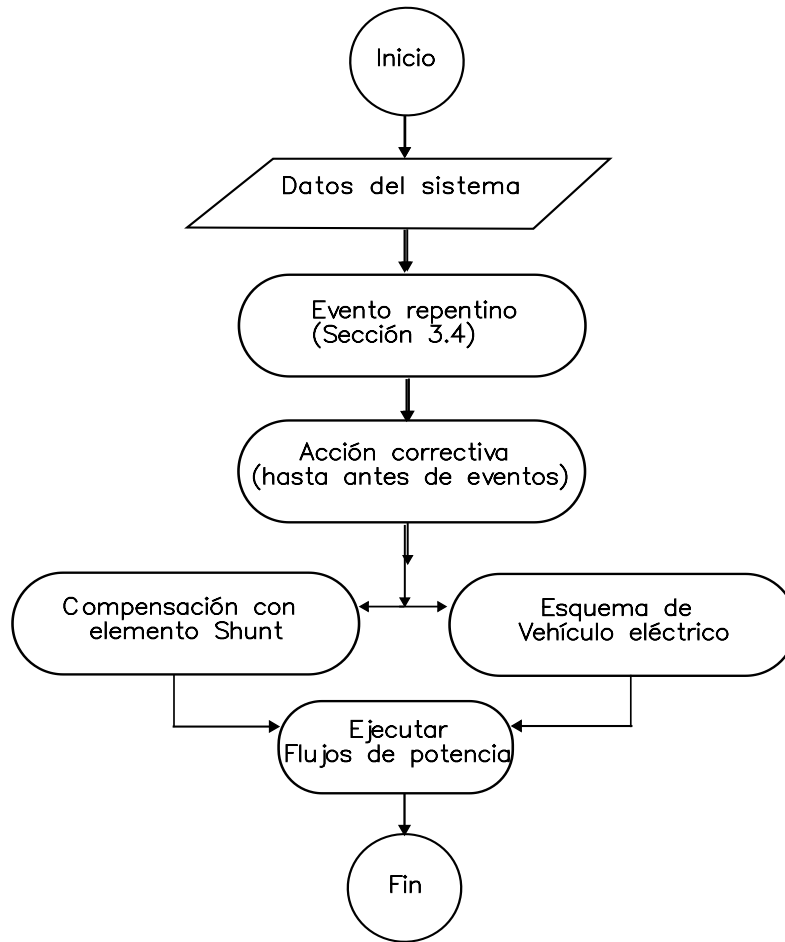


Figura 4.9: Aplicación de compensación y esquemas de VE en [15].

El VE puede ver como un sistema bidireccional debido a que consume o aporta potencia y es útil en momento de alta demanda.

Capítulo 5 Casos de estudio

5.1 Contenido del capítulo

En este capítulo se va a analizar el sistema de 12 nodos con diversos escenarios para implementar el desarrollo propuesto. Posteriormente, se implementa en el sistema de 33 nodos bajo el esquema de compensación y VE.

5.2 Sistema de 12 nodos

Se considera el sistema de distribución radial de 12 nodos [20] como sistema de prueba, el cual se presenta en la figura 5.1. Este sistema es típico de la red de distribución se observa en zonas urbanas, rurales, metropolitanas y busca ser un sistema de suministro a usuarios finales, con diversos problemas de operación. En el anexo A.1, se presentan los datos de las líneas de distribución.

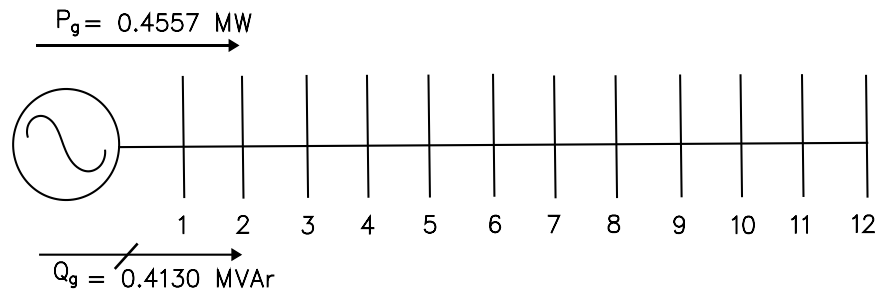


Figura 5.1: Red radial de distribución 12 nodos.

Las características que definen a este sistema radial son:

$$V_B = \text{Voltaje de base} = 11 \text{ kV} \quad (5.1)$$

$$S = \text{Potencia aparente} = 1 \text{ MVA} \quad (5.2)$$

En [15], se utiliza la palabra reservada `runpf` para obtener los flujos de potencia del SEP de 12 nodos.

Los flujos de potencia como se ha dicho anteriormente sirven para conocer el comportamiento del sistema en estado estacionario para un periodo de tiempo específico. En este caso de estudio es de suma importancia observar los valores que se tienen en la magnitud de voltaje.

Tabla 5.1: Flujos de potencia del SEP de 12 nodos (caso base).

Bus	Tipo	Voltaje [p.u.]	Pg [MW]	Qg [MVar]	Pd [MW]	Qd [MVar]
1	3	1.0000	0.4557	0.4130	-	-
2	1	0.9943	-	-	0.06	0.06
3	1	0.9891	-	-	0.04	0.03
4	1	0.9806	-	-	0.06	0.06
5	1	0.9698	-	-	0.03	0.03
6	1	0.9665	-	-	0.02	0.01
7	1	0.9637	-	-	0.06	0.06
8	1	0.9553	-	-	0.04	0.04
9	1	0.9473	-	-	0.04	0.04
10	1	0.9445	-	-	0.04	0.03
11	1	0.9436	-	-	0.04	0.03
12	1	0.9434	-	-	0.01	0.01

De la tabla 5.1 podemos observar que en el nodo 12 presenta el nivel de tensión más bajo, esto debido a que, al ser una red radial, el último nodo del sistema presenta problemas de bajo voltaje, comparado con los nodos iniciales de la red radial.

5.3 Sistema de 12 nodos con escenarios propuestos

5.3.1 Escenario 1: Aumento en la potencia activa y reactiva de demanda

Al momento de colapsar la red eléctrica en el SEP de 12 nodos mediante la sobrecarga de demanda, es decir: con el transcurso de los años la red eléctrica diseñada y construida hace 5 o 10 años tienden a perder eficacia y confiabilidad. Con el desarrollo y crecimiento de la población

aumenta la demanda eléctrica genera condiciones para las que no se puede soportar apropiadamente. Por esta razón se considera un aumento del 80% en la demanda.

La tabla 5.2 presenta el resultado de los flujos de potencia, podemos observar que, ante este aumento repentino, los niveles de tensión en los últimos 3 nodos están por debajo de los 0.9 p.u.

Tabla 5.2: Datos obtenidos de Matpower con aumento de Pd y Qd en 80% de su valor.

Bus	Voltaje [p.u.]	Pg [MW]	Qg [MVar]	Pd [MW]	Qd [MVar]
1	1.0000	0.8559	0.7573	0.0000	0.0000
2	0.9894	-	-	0.0600	0.1080
3	0.9795	-	-	0.0400	0.0720
4	0.9636	-	-	0.0550	0.0990
5	0.9433	-	-	0.0300	0.0540
6	0.9371	-	-	0.0200	0.0360
7	0.9319	-	-	0.0550	0.0990
8	0.9159	-	-	0.0450	0.0810
9	0.9006	-	-	0.0400	0.0720
10	0.8952	-	-	0.0350	0.0630
11	0.8935	-	-	0.0400	0.0720
12	0.8931	-	-	0.0150	0.0270

De esta manera se considera realizar el análisis diseñado en la figura 4.4. Es necesario mencionar que la variable de atención es la magnitud de voltaje más baja obtenida y partiendo de ello se obtendrá los valores de las ecuaciones 2.6 y 2.7 para compensar la red eléctrica.

$$g_{sh}^i = 7.3364 \times 10^{-4} [p.u.]$$

$$b_{sh}^i = 0.0705 [p.u.]$$

Se observa en la tabla 5.3 que los valores de los voltajes compensaron un escenario sumamente catastrófico. Aumentando el sistema en casi al doble de lo que soporta por lo que los valores cercanos a 0.90 [p.u.], lo cual se considera aceptable bajo condiciones críticas de operación (IEEE Std 141-1993).

Tabla 5.3: Compensación con dispositivo shunt en aumento de la demanda

Bus	Voltaje [p.u.]	P _g [MW]	Q _g [MVA _r]	P _d [MW]	Q _d [MVA _r]
1	1.0000	0.8477	0.6971	0.0000	0.0000
2	0.9897	-	-	0.1080	0.1080
3	0.9801	-	-	0.0720	0.0540
4	0.9648	-	-	0.0990	0.0990
5	0.9453	-	-	0.0540	0.0540
6	0.9394	-	-	0.0360	0.0270
7	0.9344	-	-	0.0990	0.0990
8	0.9191	-	-	0.0810	0.0810
9	0.9048	-	-	0.0720	0.0720
10	0.8999	-	-	0.0630	0.0540
11	0.8984	-	-	0.0720	0.0540
12	0.8982	-	-	0.0270	0.0270

Los valores en la potencia activa y reactiva se ven afectados de igual manera, pero al momento de colocar el dispositivo shunt como se muestra en la figura 5.2, los valores de la potencia activa y reactiva vuelven a los valores que están dentro de rangos aceptables.

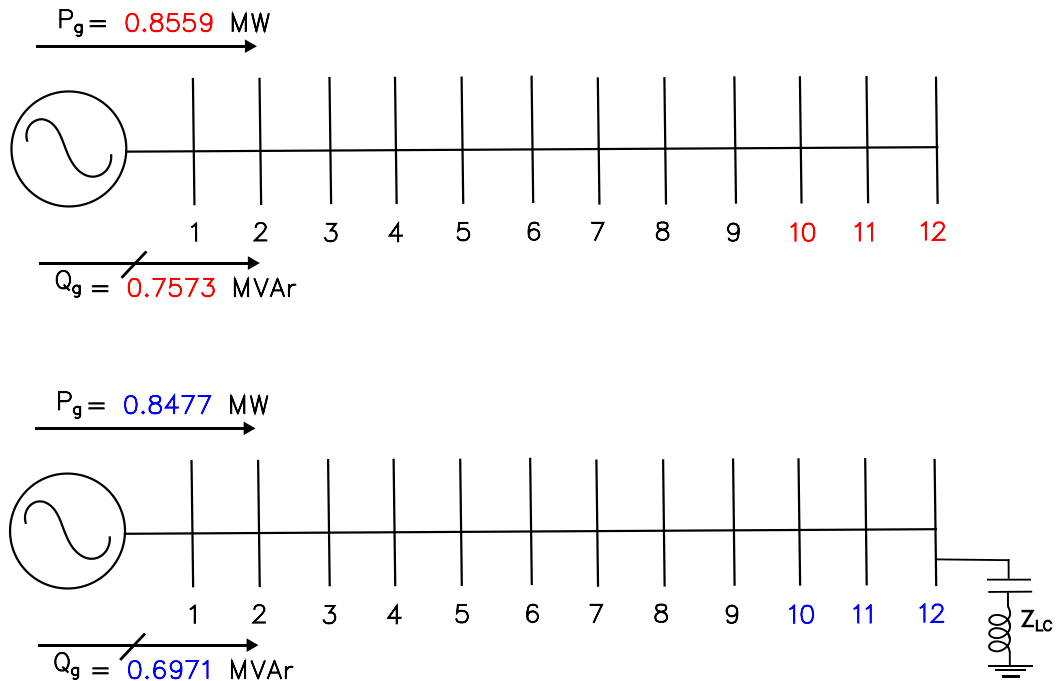


Figura 5.2: Red radial de distribución 12 nodos con aumento de potencia y compensación shunt.

5.3.2 Escenario 2: Aumento en los valores de resistencia (R) y reactancia (X)

Al considerar el aumento en la resistencia y reactancia que existe en la red del sistema considerando que físicamente se sufre de calentamiento en las líneas eléctricas

Al variar los valores de la resistencia y reactancia en la red eléctrica se obtiene una caída de voltaje en los últimos buses de la red, como se muestra en la tabla 5.4.

Tabla 5.4: Datos obtenidos de Matpower modificando la resistencia y reactancia

Bus	Voltaje [p.u.]	Pg [MW]	Qg [MVar]	Pd [MW]	Qd [MVar]
1	1.0000	0.4684	0.4170	0	0
2	0.9942	-	-	0.0600	0.0600
3	0.9888	-	-	0.0400	0.0300
4	0.9801	-	-	0.0550	0.0550
5	0.9689	-	-	0.0300	0.0300
6	0.9655	-	-	0.0200	0.0150
7	0.9568	-	-	0.0550	0.0550
8	0.9301	-	-	0.0450	0.0450
9	0.9047	-	-	0.0400	0.0400
10	0.8958	-	-	0.0350	0.0300
11	0.8929	-	-	0.0400	0.0300
12	0.8922	-	-	0.0150	0.0150

Se deberá de compensar con el método shunt como se describe en la figura 4.5. Finalmente, se debe de colocar los valores de conductancia y susceptancia, ecuaciones 2.6 y 2.7. De esta manera se debe de observar en la figura 5.3, la compensación en voltaje y potencia reactiva en el sistema.

$$g_{sh}^i = 4.2447 \times 10^{-4} [pu]$$

$$b_{sh}^i = 0.04075 [pu]$$

Tabla 5.5: Compensación con dispositivo shunt debido al aumento de resistencia y reactancia

Bus	Voltaje [p.u.]	P _g [MW]	Q _g [MVar]	P _d [MW]	Q _d [MVar]
1	1.0000	0.4637	0.3824	0	0
2	0.9944	-	-	0.0600	0.0600
3	0.9891	-	-	0.0400	0.0300
4	0.9807	-	-	0.0550	0.0550
5	0.9701	-	-	0.0300	0.0300
6	0.9668	-	-	0.0200	0.0150
7	0.9586	-	-	0.0550	0.0550
8	0.9333	-	-	0.0450	0.0450
9	0.9095	-	-	0.0400	0.0400
10	0.9013	-	-	0.0350	0.0300
11	0.8989	-	-	0.0400	0.0300
12	0.8982	-	-	0.0150	0.0150

Como se observa en la tabla 5.5, el sistema presenta deficiencias en el voltaje que son corregidas mediante la estrategia implementada, lo cual permite alcanzar condiciones de estabilidad, tal como se muestra en la figura 5.3.

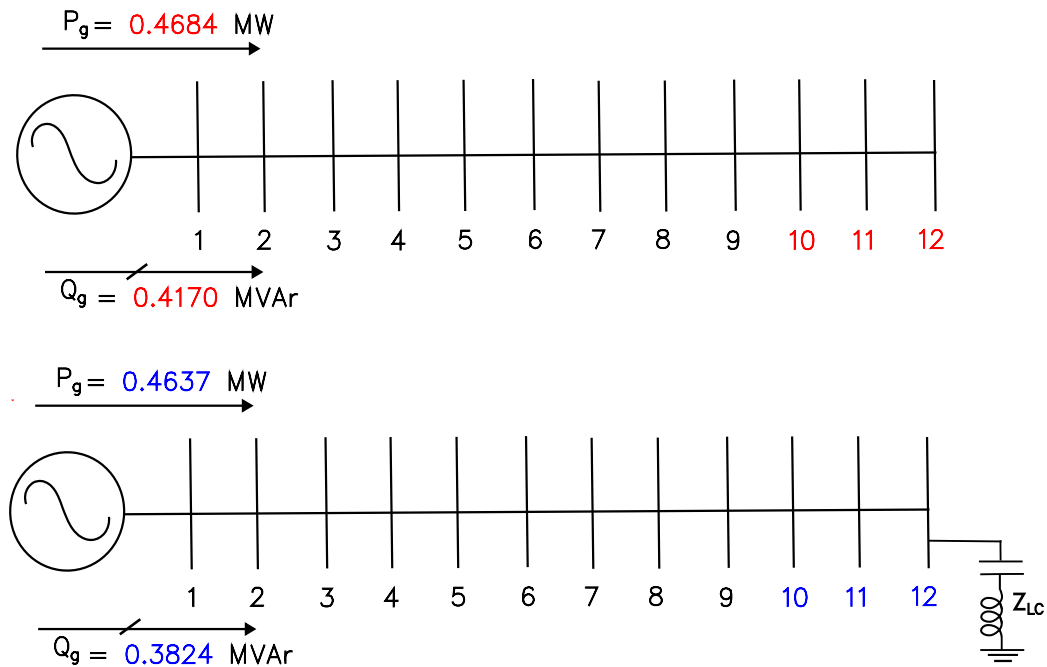


Figura 5.3: Aumento de R y X en el sistema y compensación shunt.

5.4 Discusión sobre la Compensación

Aunque se dice que los valores están dentro de lo permisible debido a que están cercanos a 0.9 [p.u.] se evalúa la especificación [19]. Esta especificación consiste en las características que deben de tener los bancos de capacitores en los voltajes a nivel de distribución y dado que el sistema radial de 12 nodos entra dentro de estos parámetros se opta por compensar con Potencia reactiva equivalente a 0.9 MVAR.

Tabla 5.6: Compensación en la red eléctrica de 12 nodos

Bus	Voltaje [p.u.] (caso base)	Voltaje [p.u.] (Aumento de demanda)	Voltaje [p.u.] (Compensador Shunt)	Voltaje [p.u.] (Compensador de banco de capacitores)	Voltaje [p.u.] (Aumento en R y X)	Voltaje [p.u.] (Compensador Shunt)	Voltaje [p.u.] (Compensador de banco de capacitores)
1	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
2	0.994	0.9894	0.9897	0.9921	0.9942	0.9944	0.9950
3	0.989	0.9795	0.9801	0.9851	0.9888	0.9891	0.9905
4	0.981	0.9636	0.9648	0.9744	0.9801	0.9807	0.9835
5	0.970	0.9433	0.9453	0.9621	0.9689	0.9701	0.9752
6	0.967	0.9371	0.9394	0.9587	0.9655	0.9668	0.9728
7	0.964	0.9319	0.9344	0.9559	0.9568	0.9586	0.9672
8	0.955	0.9159	0.9191	0.9470	0.9301	0.9333	0.9460
9	0.947	0.9006	0.9048	0.9418	0.9047	0.9095	0.9387
10	0.944	0.8952	0.8999	0.9419	0.8958	0.9013	0.9439
11	0.944	0.8935	0.8984	0.9431	0.8929	0.8989	0.9498
12	0.943	0.8931	0.8982	0.9452	0.8922	0.8982	0.9491

Los valores obtenidos de acuerdo con la especificación técnica de CFE demuestran tener un alcance aún mayor cuando se coloca un banco de capacitores, pero para atender el tema de la presente tesis se opta por el favorable desempeño del modelo *shunt*. Al estar cerca de los valores que entran dentro del intervalo de voltaje se provee de una opción viable y de bajo costo.

5.5 Sistema de 33 nodos

El sistema eléctrico mostrado en la figura 5.4 se trata de una red eléctrica de distribución con las siguientes características:

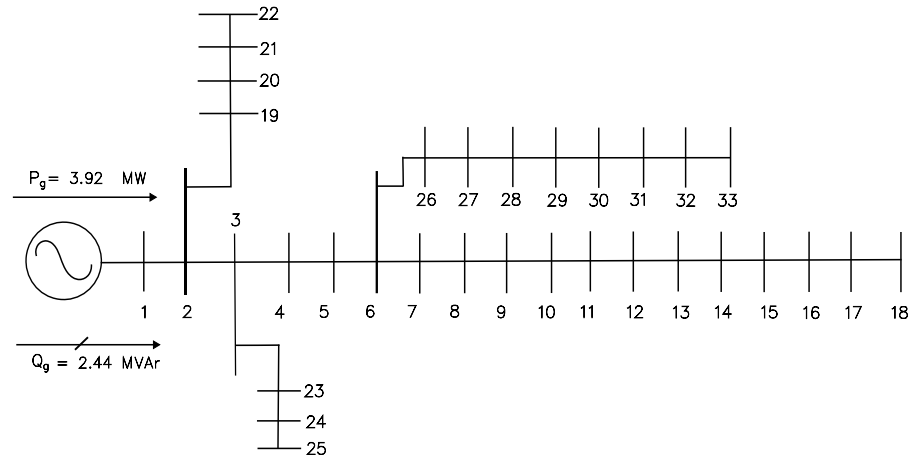


Figura 5.4: Red radial de distribución 33 nodos.

$$V_B = \text{Voltaje de base} = 12.66 \text{ kV}$$

$$S = \text{Potencia aparente} = 10 \text{ MVA}$$

Se establece el diseño precargado del sistema inicial de 33 nodos obteniendo los valores iniciales mostrados en la tabla 5.7

Tabla 5.7: Flujos de potencia del SEP de 33 nodos (caso base)

Bus	Voltaje [p.u.]	Pg [MW]	Qg [MVar]	Pd [MW]	Qd [MVar]
1	1.0000	3.92	2.44	0.0000	0.0000
2	0.9972	-	-	0.1004	0.0634
3	0.9831	-	-	0.0902	0.0453
4	0.9754	-	-	0.1256	0.0821
5	0.9687	-	-	0.0652	0.0356
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
29	0.9265	-	-	0.1243	0.0708

30	0.9223	-	-	0.2000	0.6028
31	0.9187	-	-	0.1589	0.0712
32	0.9176	-	-	0.2132	0.1089
33	0.9178	-	-	0.6547	0.0401

5.6 Sistema de 33 nodos con escenarios propuestos

5.6.1 Escenario 1: Uso del vehículo eléctrico como una carga

Se prevé que el uso de vehículos eléctricos aumente en poco tiempo por lo que la red eléctrica de distribución no está preparada para soportar una carga excesiva como la que se espera. Por lo que se busca representar un escenario y ver qué es lo que sucede si en el bus 33 se conectan 15 vehículos eléctricos, como se muestra en la figura 5.5, que su característica principal recae en que son de carga rápida. Es decir:

De acuerdo a la IEC 61851 la carga rápida corresponde a 45kW

$$P = \text{Potencia activa} = 12 * 45kW = 0.5400MW$$

$$S = \frac{P}{Fp = 0.95}$$

$$Q = \text{Potencia reactiva} = \sqrt{S^2 - P^2} = 0.1775MVA_r$$

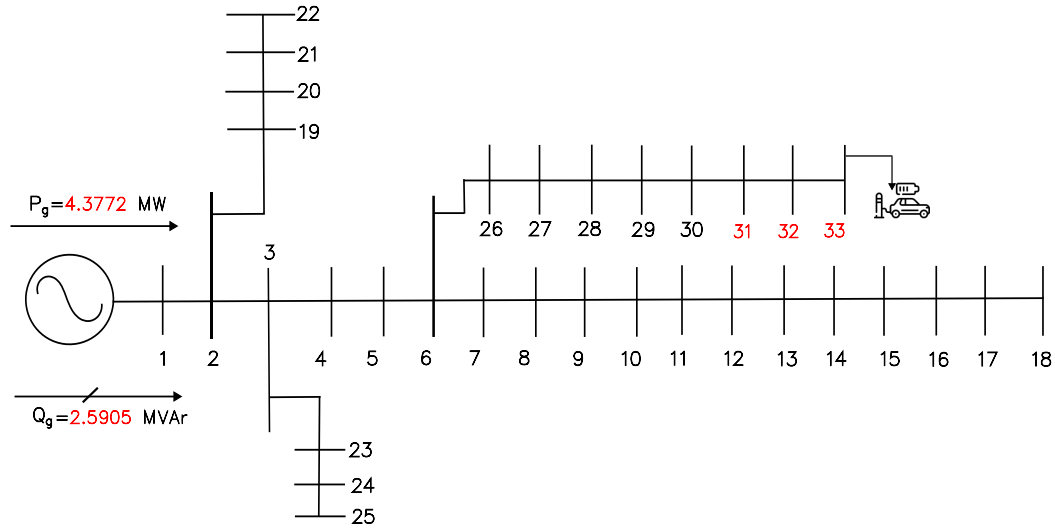


Figura 5.5: Vehículo eléctrico como carga a la red.

Se colocan los valores en MW y MVar en MATPOWER y al ejecutar flujos de potencia se obtienen los datos mostrados en la tabla 5.8.

Tabla 5.8: Datos obtenidos de Matpower con el VE como carga

Bus	Voltaje [p.u.]	Pg [MW]	Qg [MVar]	Pd [MW]	Qd [MVar]
1	1.0000	4.3772	2.5905	0.0000	0.0000
2	0.9967	-	-	0.1000	0.0600
3	0.9810	-	-	0.0900	0.0400
4	0.9723	-	-	0.1200	0.0800
5	0.9636	-	-	0.0600	0.0300
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
29	0.9098	-	-	0.1200	0.0700
30	0.9046	-	-	0.2000	0.6000
31	0.8969	-	-	0.5400	0.1775
32	0.8960	-	-	0.2100	0.1000
33	0.8957	-	-	0.0600	0.0400

De esta manera se considera realizar en [15] el análisis diseñado en la figura 4.5. Es necesario mencionar que la variable de atención es la magnitud de voltaje más baja obtenida, mostrado en la

tabla 5.9, y partiendo de ello se obtendrá los valores de las ecuaciones 2.6 y 2.7 para compensar la red eléctrica.

$$g_{sh}^i = 5.4087 \times 10^{-5} [p. u.]$$

$$b_{sh}^i = 5.1929 \times 10^{-3} [p. u.]$$

Tabla 5.9: Compensación con dispositivo shunt cuando se conecta a la red 33 nodos

Bus	Voltaje [p.u.]	Pg [MW]	Qg [MVAr]	Pd [MW]	Qd [MVAr]
1	1.0000	4.3728	2.5453	0.0000	0.0000
2	0.9967	-	-	0.1000	0.0600
3	0.9811	-	-	0.0900	0.0400
4	0.9724	-	-	0.1200	0.0800
5	0.9638	-	-	0.0600	0.0300
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
29	0.9108	-	-	0.1200	0.0700
30	0.9057	-	-	0.2000	0.6000
31	0.8983	-	-	0.5400	0.1775
32	0.8975	-	-	0.2100	0.1000
33	0.8974	-	-	0.0600	0.0400

En la figura 5.6 se observa que los valores de los voltajes compensaron un escenario con una conexión de pocos vehículos eléctricos.

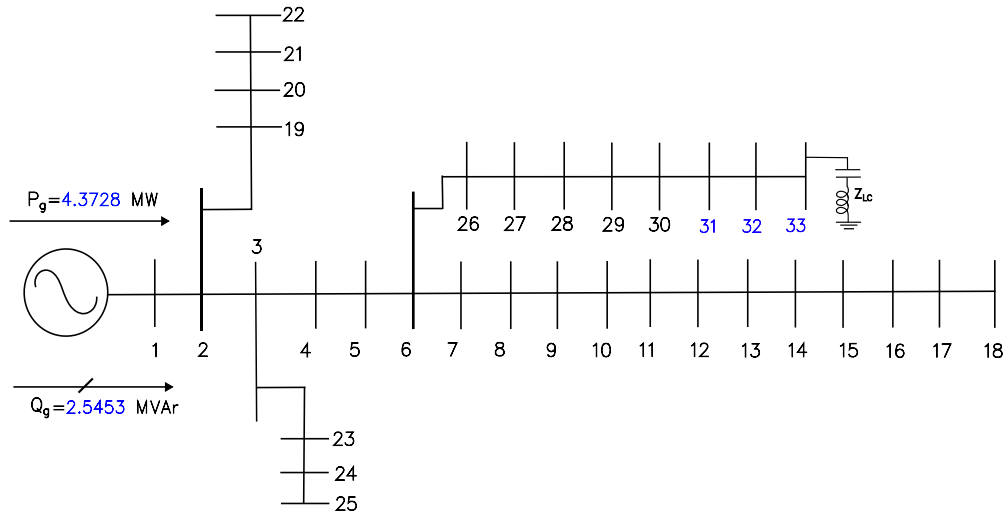


Figura 5.6: Red radial de distribución 33 nodos con compensación shunt.

5.6.2 Escenario 2: Uso del Vehículo eléctrico como un generador

Debido a que el VE cuenta con la tecnología V2G por lo que es posible que el VE pueda actuar como generador e inyectar potencia activa y reactiva a la red eléctrica de distribución.

Dicha inyección se coloca en el nodo 31 para poder compensar ambos extremos de la red radial y poder obtener compensación en el sistema de manera adecuada y eficaz, como se muestra en la tabla 5.10, disminuyendo que las alteraciones sean mayores o desbalanceadas si se coloca en una ubicación alejada de los nodos con caída de voltaje abrupta.

Tabla 5.10: Datos obtenidos de Matpower con el VE como generador

Bus	Voltaje [p.u.]	Pg [MW]	Qg [MVar]	Pd [MW]	Qd [MVar]
1	1.0000	2.5448	1.2461	0.0000	0.0000
2	0.9982	-	-	0.1000	0.0600
3	0.9902	-	-	0.0900	0.0400
4	0.9872	-	-	0.1200	0.0800

5	0.9844	-	-	0.0600	0.0300
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
29	0.9871	-	-	0.1200	0.0700
30	0.9896	-	-	0.2000	0.6000
31	1.0000	1.2456	1.1094	0.1500	0.1775
32	0.9992	-	-	0.2100	0.1000
33	0.9989	-	-	0.0600	0.0400

En la figura 5.7 se observa el sistema radial donde el VE se expresa como generador en el extremo de la red radial para poder tener un sistema que se compense por ambos lados y así evitar que la potencia reactiva y el voltaje decaiga.

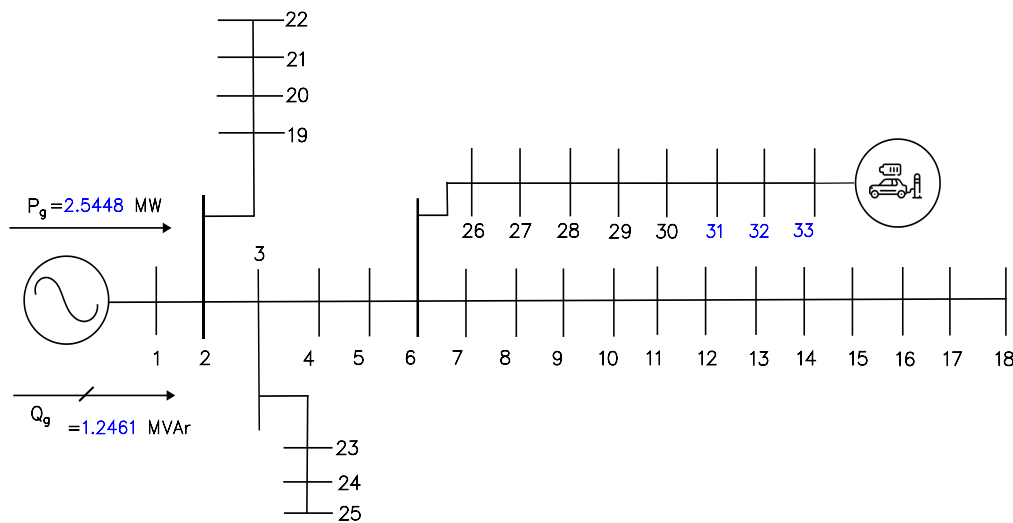


Figura 5.7: Red radial de distribución 33 nodos con VE como generador.

5.7 Compensación

En la red eléctrica se busca analizar el efecto del VE cuando esta estacionado y cuando se encuentra en el proceso de carga. En estas condiciones se puede provocar desbalances en la red eléctrica comprometiendo su capacidad, eficacia y confiabilidad. Sin embargo,

cuando se compensa el voltaje mediante el dispositivo shunt se observa que el voltaje mejora.

Los datos mostrados en la tabla 5.11 muestran una red eléctrica de 33 nodos que pasa por un proceso de sobrecarga y compensación.

Se tienen dos casos en donde el voltaje está dentro de los rangos requeridos y aceptables.

Mediante el uso del banco de capacitores el voltaje se regula, pero cuando el VE actúa como generador también regula el voltaje de manera adecuada.

Este último caso donde el VE actúa como generador tiene una visión de al menos 10 años para que pueda ser factible o incluso más años para que la tecnología y la red de distribución sean un medio confiable para su implementación masiva.

Tabla 5.11: Compensación en la red eléctrica de 33 nodos

Bus	Voltaje [p.u.] (caso base)	Voltaje [p.u.] (VE carga)	Voltaje [p.u.] (Compensador Shunt)	Voltaje [p.u.] (Compensador de banco de capacitores)	Voltaje [p.u.] (VE generador)
1	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
2	0.9972	0.9967	0.9967	0.9973	0.9982
3	0.9831	0.9810	0.9811	0.9848	0.9902
4	0.9754	0.9723	0.9724	0.9784	0.9872
5	0.9687	0.9636	0.9638	0.9722	0.9844
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
29	0.9265	0.9098	0.9108	0.9448	0.9871
30	0.9223	0.9046	0.9057	0.9428	0.9896
31	0.9187	0.8969	0.8983	0.9441	1.0000
32	0.9176	0.8960	0.8975	0.9451	0.9992
33	0.9178	0.8957	0.8974	0.9477	0.9989

Capítulo 6 Conclusiones

En los escenarios propuestos se observa que la compensación con el dispositivo shunt permite tener valores aproximados a los voltajes permisibles, debido a que se afectó el sistema de manera exorbitante. Se debe destacar que su implementación se debe considerar como una solución adjunta o de apoyo. Es por ello que se considera que el uso de banco de capacitores y el dispositivo shunt deben ser fundamentales en la red eléctrica de distribución.

En las redes de distribución, al ser radiales, la caída de voltaje arriesga los últimos nodos del sistema, es por ello que la implementación del dispositivo shunt, el banco de capacitores y el vehículo eléctrico como generador se colocan en los últimos nodos para poder actuar de ambos extremos del sistema eléctrico y evitar que el cambio se aún más perjudicial.

Se enfatiza que el estudio de flujos de potencia es esencial para el diseño e implementación de compensadores para redes eléctricas de cualquier índole. El método de Newton-Raphson permitió identificar con precisión los puntos donde se requiere sistemas de apoyo y solución a desbalances.

Aunque el dispositivo shunt y el banco de capacitores prevén de una solución optimas, el uso del VE como generador plantea una opción estratégica a largo plazo con potencial para su integración en redes de distribución inteligentes, con la limitante que por el momento cuando se considera como una carga a la red eléctrica trae consigo más afecciones y en mayor cantidad si la planeación para el 2035 se basa en la utilización de 4 millones de vehículos eléctricos aunado a que la red eléctrica en México no está preparada para tal magnitud de demanda.

6.1 Aportaciones

Las aportaciones vistas en la presente tesina se centran en la implementación de métodos clásicos en escenarios modernos, es decir: El uso del método de Newton-Raphson para analizar el comportamiento de la inclusión del vehículo eléctrico a la red de distribución eléctrica.

Se evaluó la eficacia de dispositivos comúnmente utilizados como son el dispositivo shunt y el banco de capacitores en condiciones de alta demanda llegando a la conclusión de una solución híbrida para eficiente el sistema eléctrico.

Se da pie a que se detalle la forma en que el vehículo eléctrico garantice el acceso a energía asequible, segura y sostenible, es decir se debe de considerar las condiciones técnicas necesarias para la implementación de tecnologías emergentes de energía eléctrica, tal es el caso de la tecnología bidireccional.

6.2 Trabajos futuros

En la tesina se aborda el problema de compensación de voltaje y potencia reactiva mediante el dispositivo shunt y la implementación del vehículo eléctrico con tecnología V2G, es decir: como carga y como generador a la red eléctrica. La finalidad es satisfacer y mitigar el problema principal que es el desbalance en la red eléctrica, pero las variables que no se contempló fue tener un estudio de flujos de potencia considerando costos de implementación, tiempos de operación de las baterías del vehículo eléctrico, dinámicas aún mayores en la demanda y variaciones estacionales. Además, se debe de considerar rediseñar o fortalecer topología de la red eléctrica existente para tener la

capacidad de mantener como carga a cierto número de vehículos eléctricos en un mismo tiempo que incluya el patrón de comportamiento de los usuarios.

Referencias

- [1] Objetivos de Desarrollo Sostenible, Organización de las Naciones Unidas. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- [2] Secretaría de Energía (SENER). (2021). Balance Nacional de Energía 2021. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/sener>
- [3] E. G. Munoz, G. G. Alcaraz, N. G. Cabrera, “Two-phase short-term scheduling approach with intermittent renewable energy resources and demand response,” IEEE Latin America Transactions, vol 13, No.1 pp. 181-187. 2015
- [4] G. Gutiérrez-Alcaraz, E. Galván, N. G. Cabrera, Mohammad S Javadi, “Renewable energy resources short-term scheduling and dynamic network reconfiguration for sustainable energy consumption,” Renewable and sustainable energy reviews, Vol. 52 pp. 256-264. 2015
- [5] E.R. Joy, K. Thrugnanam, M. Singh, P. Kumar, “Distributed Active and Reactive Power Transfer for Voltage Regulation using V2G System,” 2015 4th International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS). DOI: 10.1109/EPECS.2015.7368522
- [6] W. Zhang, P. Das, “A Vehicle-to-Grid Based Reactive Power Dispatch Approach Using Particle Swarm Optimization,” 2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC). DOI: 10.1109/CEC.2016.7744351

- [7] W. Choi, W. Lee, B. Sarlioglu, “Reactive Power Control of Grid-Connected Inverter in Vehicle-to-Grid Application for Voltage Regulation,” 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), DOI: 10.1109/ITEC.2016.7520216
- [8] S. U. Khan, K. K. Mehmood, Z. M. Haider, “Energy Management Scheme for an EV Smart Charger V2G/G2V Application with an EV Power Allocation Technique and Voltage Regulation,” *Appl. Sci.* 2018, 8, 648; doi:10.3390/app8040648
- [9] K. M. Tan, S. Padmanaban, J. Y. Yong, V. K. Ramachandaramurthy, “A multi-control vehicle-to-grid charger with bi-directional active and reactive power capabilities for power grid support,” *Energy Journal* 171 (2019) 1150e1163. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.053>
- [10] J. Hu, C. Ye, Y. Ding, “A Distributed MPC to Exploit Reactive Power V2G for Real-Time Voltage Regulation in Distribution Networks,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 13, No. 1, pp. 576 – 588. 2022 DOI: 10.1109/TSG.2021.3109453
- [11] M. Amir, A. Haque, “Integration of EVs Aggregator with Microgrid and Impact of V2G Power on Peak Regulation,” *IEEE 4th International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)*, 2021. DOI: 10.1109/GUCON50781.2021.9573619
- [12] Joint Optimal Power Flow Routing and Vehicle-to-Grid Scheduling: Theory and Algorithms
- [13] Secretaría de Energía (SENER). (2024). Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) 2024–2038. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/sener>

- [14] Grainger, J. J., & Stevenson, W. D. (1996). Capítulos 9.2 y 9.3. En *Análisis de sistemas de potencia* (pp. 309–322). McGraw-Hill.
- [15] R. D. Zimmerman, MATPOWER Reference Manual, Release 8.0 2024
- [16] Software Matlab 2024 <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>
- [17] Resolución Núm. RES/151/2016 de la CRE, publicada en el Diario Oficial de la Federación, Código de red: Comisión Reguladora de Energía, 2016
- [18] L. Baringo, M. Carrión, R. Domínguez, *Electric Vehicles and Renewable Generation: Power System Operation and Planning Under Uncertainty*, Springer 2023
- [19] CFE V8000-06 *Bancos de capacitores para redes de distribución*
- [20] D. Das, H.S. Nagi, D.P. Kothari, "Novel method for solving radial distribution networks", *IEE Proc. C*, Vol. 141, No. 4, pp. 291-298, 1994.
- [21] M. E. Baran and F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no. 2, pp. 1401-1407, Apr 1989. doi: 10.1109/61.25627, URL: <https://doi.org/10.1109/61.25627>
- [22] Saadat, H. (2010). *Power System Analysis* (3rd ed.). PSA Publishing.
- [23] Arrillaga, J., Arnold, C. P., & Harker, B. J. (1990). *Computer Modelling of Electrical Power Systems* (2nd ed.). Wiley.

[24] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (1993). *IEEE recommended practice for electric power distribution for industrial plants (IEEE Std 141-1993)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers.

Anexo A.1 Datos de Sistema

Parámetros de las líneas de distribución para el sistema de 12 nodos

Tabla A.1. 1 Red de distribución sistema de 12 nodos

De	A	R [p.u.]	X [p.u.]
1	2	1.093	0.455
2	3	1.184	0.494
3	4	2.095	0.873
4	5	3.188	1.329
5	6	1.093	0.455
6	7	1.002	0.417
7	8	4.403	1.215
8	9	5.642	1.597
9	10	2.89	0.818
10	11	1.514	0.428
11	12	1.238	0.351

Parámetros de las líneas de distribución para el sistema de 33 nodos

Tabla A.1. 2 Red de distribución sistema de 33 nodos

De	A	R [p.u.]	X [p.u.]
1	2	0.0922	0.047
2	3	0.493	0.2511
3	4	0.366	0.1864

4	5	0.3811	0.1941
5	6	0.819	0.707
6	7	0.1872	0.6188
7	8	0.7114	0.2351
8	9	1.03	0.74
9	10	1.044	0.74
10	11	0.1966	0.065
11	12	0.3744	0.1238
12	13	1.468	1.155
13	14	0.5416	0.7129
14	15	0.591	0.526
15	16	0.7463	0.545
16	17	1.289	1.721
17	18	0.732	0.574
2	19	0.164	0.1565
19	20	1.5042	1.3554
20	21	0.4095	0.4784
21	22	0.7089	0.9373
3	23	0.4512	0.3083
23	24	0.898	0.7091
24	25	0.896	0.7011
6	26	0.203	0.1034
26	27	0.2842	0.1447
27	28	1.059	0.9337
28	29	0.8042	0.7006
29	30	0.5075	0.2585
30	31	0.9744	0.963
31	32	0.3105	0.3619
32	33	0.341	0.5302
21	8	2	2
9	15	2	2
12	22	2	2
18	33	0.5	0.5
25	29	0.5	0.5