



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA

COLEGIO DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

ANÁLISIS DE REDES DE TRANSMISIÓN EN ESTADO ESTABLE

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO Y ELÉCTRICO

P R E S E N T A

MIGUEL JESÚS GARCÍA ANTONIO

A S E S O R

DR. JUAN CARLOS ESCAMILLA SÁNCHEZ



BUAP

Oficio D-SA 0703/2020

**C. MIGUEL JESÚS GARCÍA ANTONIO
PASANTE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA
MECÁNICA Y ELÉCTRICA
Presente.**

En atención al Tema de Tesis que puso Usted a consideración de la Coordinación de Área y de esta Secretaría Académica en coordinación con la Dirección de ésta Facultad de Ingeniería, dentro del marco de Titulación por Examen Profesional, como medio de Titulación se dio revisión y se ha autorizado el tema denominado:

“ANÁLISIS DE REDES DE TRANSMISIÓN EN ESTADO ESTABLE”.

Por lo anterior hacemos de su conocimiento que se asigna como asesor al Dr. Juan Carlos Escamilla Sánchez.

Sin más por el momento, le envío la seguridad de mi consideración más distinguida.

Atentamente

“Pensar bien, para vivir mejor”

H. Puebla de Z. a 04 de marzo de 2020.


M. en I. Fernando Daniel Pazcano Hernández
Director



M'FDLH/M'JAJT/BARV
C.c.p. Interesado
C.c.p. Archivo

Facultad
de Ingeniería

Bldv. Valsequillo y Av. San Claudio
s/n, edif. ING 4, Col. San Manuel,
Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
01 (222) 229 55 00 Ext. 7610

M. en I. Fernando Daniel Lazcano Hernández
Director de la Facultad de Ingeniería
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
P r e s e n t e.

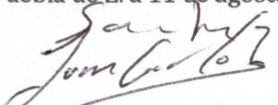
El que suscribe: Dr. Juan Carlos Escamilla Sánchez, Asesor del proyecto:

“ANÁLISIS DE REDES DE TRANSMISIÓN EN ESTADO ESTABLE”.

Presentada por el C. Miguel Jesús García Antonio, pasante del Colegio de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, y en atención al oficio No. D – SA 0703/2020 con fecha de emisión 04 de marzo de 2020, me permito informar a Usted que después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, metodología, redacción y ortografía de la tesis correspondiente, no tengo inconveniente en autorizar la impresión de la misma.

Sin otro particular, le reitero la seguridad de mi más atenta y distinguida consideración.

Atentamente
“Pensar bien, para vivir mejor”
H. Puebla de Z. a 11 de agosto de 2020


Dr. Juan Carlos Escamilla Sánchez
Asesor

D'JCES/BARV
C.c.p. Interesado
C.c.p. Archivo



BUAP

Oficio No. D-S.A. 0732/2020

Mtra. María Elena Ruíz Velasco
Directora del Departamento de Administración Escolar
Presente

Por medio de la presente le saludo y al tiempo tengo a bien informar a Usted que el **C. MIGUEL JESÚS GARCÍA ANTONIO**, pasante del Colegio de Ingeniería Mecánica y Eléctrica con número de matrícula 201424611, que dentro del marco de *Titulación por Examen Profesional en Línea*, sustentará el mismo el día viernes 23 de octubre del 2020 a las 18:00 horas, toda vez que la misma tesis queda en resguardo de nuestra Facultad, por lo que me permito sugerir a Usted que el JURADO esté integrado por los siguientes catedráticos:

PRESIDENTE: DR. JUAN CARLOS ESCAMILLA SÁNCHEZ

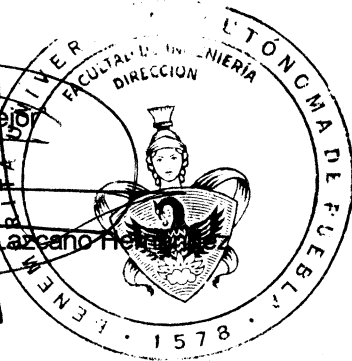
SECRETARIO: DR. ISMAEL ALBINO PADILLA

VOCAL: MTRO. FERNANDO OSVALDO GONZÁLEZ MANZANILLA

Sin otro particular por el momento, se extiende la presente a los treinta días del mes de septiembre de dos mil veinte.

Atentamente
"Pensar bien, para vivir mejor"

M. en I. Fernando Daniel Lázcano Hernández
Director



M'FDLH/M'JAJT/BARV
C.c.p. Archivo

Facultad
de Ingeniería

Bld. Valsequillo y Av. San Claudio
s/n, edif. ING 4, Col. San Manuel,
Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
01 (222) 229 55 00 Ext. 7610

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento especial al Dr. Juan Carlos Escamilla Sánchez por la disposición, interés, tiempo, apoyo, paciencia y conocimientos brindados para hacer posible la realización y presentación de la presente tesis.

A la comisión revisora por el tiempo invertido en la revisión, por sus comentarios y sugerencias para mejorar la tesis presentada.

Al M.C. Luis Juárez Perea por las contribuciones, consejos, revisiones y sugerencias pertinentes para el desarrollo de la tesis.

A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) y a la Facultad de Ingeniería (FI) que fueron mi segundo hogar durante mi carrera universitaria; las cuáles me permitieron y vieron formarme como ingeniero.

A mis profesores, que durante mi estadía y transcurso de mi carrera en la Facultad de Ingeniería me orientaron y brindaron su conocimiento, apoyo, amistad, consejos y experiencias.

DEDICATORIAS

La presente tesis la dedico con todo mi amor y cariño:

A *Dios* por brindarme la bendición de vivir y darme la oportunidad de culminar mi carrera universitaria. Por permitirme llegar hasta este punto de mi vida de realizar y presentar mi tesis.

A mis padres *Aucencio García Reyes e Irma Antonio Méndez*. Por brindarme su apoyo incondicional durante este proceso y creer en mí. Por brindarme todo lo que está en sus manos para salir adelante a pesar de momentos y circunstancias difíciles, por esto y más gracias.

A mis hermanos *Carlos Daniel e Irma Graciela* por estar conmigo y para mí en todo momento; han sido, son y serán parte fundamental en mi vida.

A mis *amigos*, que a lo largo de la carrera me brindaron su ayuda, compañía, amistad y que en el transcurso del desarrollo de mi tesis me comprendieron y animaron, de igual manera por las anécdotas y momentos que hemos compartido.

A los compañeros universitarios, amigos (*J.I.R.R.*) y conocidos que ya no están con nosotros (*f*) por distintas circunstancias y no pudieron lograr cumplir sus sueños, y aspiraciones de culminar su licenciatura.

RESUMEN

El estudio de flujos de potencia es la solución más idónea y conveniente para el análisis de redes de transmisión en sistemas eléctricos de potencia. Si en un sistema de potencia se especifican los valores de carga de los nodos, se conocen los parámetros de la red y además se conocen dos de las cuatro variables (V, θ, P, Q) del sistema, es posible determinar la estabilidad tanto de los nodos como del sistema en general, ya que los elementos de la red de transmisión son diseñados para operar en condiciones de operación estables.

Los estudios de Flujos de Potencia se aplican en: la planeación y diseño del Sistema Eléctrico como en la operación y control. Este estudio proporciona información de suma importancia acerca de la operación de las redes eléctricas como es: voltajes nodales, flujos de potencia por las líneas, pérdidas, etc.

En esta tesis se llevan a cabo estudios y simulaciones de flujos de potencia para obtener los resultados de los voltajes de nodos de carga del caso de estudio implementado, se utiliza el modelo matemático de Newton – Raphson desarrollado en el software MATLAB.

El objetivo del estudio de flujos de potencia en esta tesis es obtener los voltajes de nodos, analizar su comportamiento ante diversos niveles de demanda mediante el aumento de carga en nodos del sistema y aplicar la solución propuesta al sistema ante los diversos colapsos y descompensaciones en la tensión que se presentan.

ÍNDICE GENERAL

Resumen	i
Índice general	ii
Lista de figuras	v
Lista de tablas	ix
Simbología	x
Abreviaturas	xiv
1. Introducción	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Objetivo	2
1.3 Objetivos específicos	2
1.4 Justificación	3
1.5 Antecedentes	4
1.6 Alcances y limitaciones	6
1.7 Estructura de la tesis	7
2. Modelado de elementos de un sistema eléctrico de potencia.....	8
2.1 Introducción	8
2.2 Modelado de generador síncrono.....	8
2.2.1 Generador de polos lisos (rotor cilíndrico).....	12
2.2.2 Generador de polos salientes.....	13
2.3 Modelado de transformadores	14
2.3.1 Transformador de potencia	15
2.3.2 Transformador ideal (transformador monofásico de dos devanados)	15
2.3.3 Circuito equivalente del transformador monofásico	16

2.4 Modelado de líneas de transmisión	19
2.4.1 Resistencia de una línea de transmisión.....	20
2.4.2 Inductancia de una línea de transmisión.....	21
2.4.2.1 Inductancia de línea monofásica de dos conductores	22
2.4.3 Conductancia de una línea de transmisión.....	24
2.4.4 Capacitancia de una línea de transmisión.....	24
2.4.4.1 Capacitancia de línea de dos conductores	24
2.5 Modelado de cargas	26
2.6 Modelado de reactores y capacitores	28
3. Estudio de flujos de potencia.....	29
3.1 Introducción	29
3.2 Ecuaciones de flujos de potencia	30
3.2.1 Clasificación de distintos tipos de nodos.....	33
3.3 Solución de flujos de potencia mediante el método de Gauss – Seidel	34
3.4 Solución de flujos de potencia mediante el método de Newton – Raphson	35
3.5 Control de voltaje en sistemas eléctricos de potencia.....	41
3.5.1 Comportamiento del flujo de reactivos para el control de voltaje.....	42
3.6 Control de voltaje local	47
3.7 Balance de potencia reactiva	48
3.7.1 Inyecciones de potencia reactiva.....	52
3.8 Coordinación de cambios	53
3.9 Flujos de potencia reactiva – pérdidas activas	54
3.9.1 Margen de potencia reactiva.....	57
3.10 Elementos que intervienen en la compensación de potencia reactiva	58
3.11 Elementos de compensación y sus funciones	58
3.11.1 Reactores en derivación	60

3.11.2	Capacitores en derivación.....	63
3.11.3	Capacitores en serie (compensación serie).....	66
3.11.4	Compensador estático de var (cev's).....	72
3.11.4.1	Características de operación del compensador estático de var.....	72
4.	Análisis de flujos de potencia ante variación de carga	75
4.1	Introducción	75
4.2	Caso de estudio (sistema de 4 nodos).....	76
4.3	Solución al caso de estudio (sistema de 4 nodos).....	77
4.4	Análisis de voltaje ante variaciones de carga.....	80
4.4.1	Análisis de voltaje ante variación de carga (sin capacitores).....	81
4.4.2	Análisis de voltaje ante variación de carga (con capacitores).....	84
4.5	Análisis de los resultados del caso de estudio	88
5.	Conclusiones y trabajos futuros	89
5.1	Conclusiones	89
5.2	Trabajos futuros	90
	Referencias	91
A.	Algoritmos de solución para flujos de potencia	93
A.1.	Método de Gauss Seidel	93
A.2.	Método de Newton – Raphson.....	94
B.	Análisis de sistema de 4 nodos ante variaciones de carga (Matlab) ...	95
C.	Análisis de resultados de Matlab y PowerWorld	102

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 2.1 Máquina síncrona de dos polos [1]	9
Figura 2.2 Tipos de generadores [1]	10
Figura 2.3 Circuito equivalente para generador síncrono [1]	10
Figura 2.4.a Diagrama fasorial con factor de potencia resistivo [1]	11
Figura 2.4.b Diagrama fasorial con factor de potencia inductivo [1]	11
Figura 2.4.c Diagrama fasorial con factor de potencia capacitivo [1]	11
Figura 2.5 Circuito equivalente y diagrama fasorial del generador síncrono de polos lisos [1]	12
Figura 2.6 Diagrama fasorial del generador síncrono de polos salientes [1]	13
Figura 2.7 Representación esquemática de un transformador monofásico [1]	16
Figura 2.8 Diagrama eléctrico de un transformador con reducción al primario	17
Figura 2.9 Circuito equivalente completo con rama magnetizante en derivación	18
Figura 2.10 Circuito equivalente simplificado referido al primario	18
Figura 2.11 Modelo π (pi) equivalente para representación de línea de transmisión	20
Figura 2.12 Configuración geométrica de línea monofásica de dos conductores [13]	22
Figura 2.13 Inductancias [3]	23
Figura 2.14 Sección transversal de una línea con conductores paralelos [2]	25
Figura 2.15 Representación de la capacitancia línea a línea [2]	25
Figura 2.16 Representación de la capacitancia línea a neutro [2]	26
Figura 2.17 Representación de cargas: a) de impedancia constante, b) de potencia constante y c) de intensidad constante [4]	27

Figura 3.1 Notación para la potencia aparente en un nodo típico i , para estudios de flujos de potencia [12]	32
Figura 3.2 Circuito básico de ilustración, circulación de potencia reactiva [1].....	43
Figura 3.3 Diagrama fasorial del circuito anterior [1]	43
Figura 3.4 Diagrama fasorial para carga con FP atrasado [1].....	45
Figura 3.5 Diagrama fasorial para carga reactiva inductiva [1]	46
Figura 3.6 Control de voltaje local [1]	47
Figura 3.7 Soporte de voltaje mediante control de voltaje local	48
Figura 3.8 Cambios en la excitación del generador [1].....	49
Figura 3.9 Sistema de análisis de efecto de cambios en el voltaje de generación [1]	50
Figura 3.10 Diagrama fasorial para análisis de cambio en el voltaje de V_i [1].....	51
Figura 3.11 Sistema de potencia elemental [1]	51
Figura 3.12 Inyección de potencia reactiva en nodo de carga [1]	53
Figura 3.13 Circuito de análisis de pérdidas de transmisión [1]	54
Figura 3.14 Diagrama fasorial de caso muestra (Circuito Figura 3.13) [1].....	55
Figura 3.15 Diagrama fasorial con efecto del cambio de voltaje en V_i [1].....	55
Figura 3.16 Diagrama fasorial de efecto de la reducción de voltaje V_i [1].....	56
Figura 3.17 Sistema con reactor conectado en línea de transmisión [1].....	60
Figura 3.18 Comportamiento de la potencia reactiva de un reactor [1].....	62
Figura 3.19 Perfil de voltaje de sistema eléctrico [1]	62
Figura 3.20 Sistema eléctrico con banco de capacitores en derivación [1].....	63
Figura 3.21 Comportamiento de la potencia reactiva en un capacitor [1]	65
Figura 3.22 Perfil de voltaje [1]	65
Figura 3.23 Línea de transmisión con compensación serie (capacitores en serie) [1].....	67

Figura 3.24 Perfil de voltaje – compensación serie [1]	68
Figura 3.25 Sistema radial sin compensación serie [1].....	68
Figura 3.26 Sistema radial con compensación serie [1]	69
Figura 3.27 Curva P – Q referente al Ejemplo 1 [1].....	69
Figura 3.28 Incremento en el ME% al conectar un capacitor en serie [1]]	70
Figura 3.29 Curvas características de transferencia de potencia [1].....	71
Figura 3.30 Perfil de voltaje [1]	71
Figura 3.31 Curva característica en estado estable de un CEV [1]	73
Figura 3.32.a Capacitores conectados por tiristores [1].....	74
Figura 3.32.b Reactor controlado por tiristores [1]	74
Figura 4.1 Diagrama unifilar del caso de estudio [2].....	76
Figura 4.2 Matriz jacobiana correspondiente a la última iteración de la solución del sistema	78
Figura 4.3 Representación gráfica de los Nodos 2 y 3 ante variaciones de carga (sin capacitor)	81
Figura 4.4 Gráfica: Nodo 2 (carga de 170 MW a 1700 MW) Vs Voltajes de nodo 1, 3 y 4 (Sin capacitor)	82
Figura 4.5 Gráfica: Nodo 3 (carga de 200 MW a 2000 MW) Vs Voltajes de nodo 1, 2 y 4 (Sin capacitor)	82
Figura 4.6 Gráfica comparativa de variación de Carga en Nodos 2 y 3 (170 MW y 200 MW) Vs Voltajes de Nodos 1 – 4 (Sin capacitor).....	83
Figura 4.7 Gráfica de comportamiento de voltaje del nodo 2 con capacitor -j4 F conectado	85
Figura 4.8 Gráfica comparativa del comportamiento del voltaje del nodo 2 con capacitor -j4 F y sin capacitor -j4 F conectado	86
Figura 4.9 Gráfica de comportamiento del perfil de voltaje del nodo 3 con capacitor de -j10 F conectado.....	87

Figura 4.10 Gráfica comparativa del comportamiento del voltaje del nodo 3 con capacitor - j10 F y sin capacitor -j10 F conectado.....	87
Figura B.1. Sistema de 4 nodos en estado estable sin variación en nodos de carga	95
Figura B.2. Sistema de 4 nodos con variación de carga en Nodo 2.....	98
Figura B.3. Sistema de 4 nodos con variación de carga en Nodo 3.....	100
Figura C.1. Sistema de 4 nodos con variación de carga en Nodo 2 y compensado	103
Figura C.2. Sistema de 4 nodos con variación de carga en Nodo 3 y compensado	104

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 3.1 Características de los distintos tipos de nodos [2]	33
Tabla 3.2 Resumen de cantidades especificadas y por obtener en los distintos nodos [11]	34
Tabla 3.3 Diferentes elementos de compensación reactiva y sus funciones	59
Tabla 3.4 Funciones realizadas con compensación de potencia reactiva.....	60
Tabla 4.1 Datos de las líneas para el caso de estudio [2].....	77
Tabla 4.2 Datos de nodos para el caso de estudio [2].....	77
Tabla 4.3 Matriz de admitancias correspondiente al caso de estudio [2].....	78
Tabla 4.4 Solución de flujos de potencia por Newton – Raphson para sistema de prueba	79
Tabla 4.5 Solución final para voltajes V y ángulos δ del sistema	79
Tabla 4.6 Flujos de potencia en las líneas del sistema.....	79
Tabla C.1 Resultados de flujos de potencia en Matlab.....	102
Tabla C.2 Resultados de flujos de potencia en PowerWorld	102
Tabla C.3 Resultados de análisis de flujos de potencia a Nodo 2 en Matlab	103
Tabla C.4 Resultados de análisis de flujos de potencia a Nodo 2 en PowerWorld	103

SIMBOLOGÍA

N_s	Velocidad de rotación.
f	Frecuencia (60 Hz).
P	Polos de la máquina.
3_φ	Sistema trifásico.
R_a	Resistencia de armadura.
I_a	Corriente de armadura.
jX_s	Reactancia síncrona.
E_o	Voltaje interno.
V_φ	Voltaje de fase.
X_d, X_q	Reactancias de eje de directo y eje de cuadratura.
I_d, I_q	Corriente de eje directo y eje de cuadratura.
φ_m	Flujo mutuo.
I_1, I_2	Corriente de devanados 1 y 2 del transformador.
e_1, e_2	Voltajes de devanados 1 y 2 del transformador.
V_1, V_2	Voltajes en terminales 1 y 2 del transformador.
μ_c	Permeabilidad.
a_s	Relación de transformación simple
N_1, N_2	Número de vueltas de devanados 1 y 2 del transformador.
Z_{2c}	Impedancia de carga.
$\%n$	Eficiencia.
$P_{perdida}$	Pérdida de potencia.
R_o	Resistencia del conductor.

ρ	Resistividad del conductor.
ℓ	Longitud del conductor.
A	Área de la sección transversal.
D	Distancia entre conductores.
r	Radio del conductor real.
r'	Radio del conductor ficticio.
L_T	Inductancia total del conductor.
λ_T	Flujo enlazado en conductores.
r_x, r_y	Radio de conductores x y y .
L_x, L_y	Inductancia de conductores x y y .
λ_x, λ_y	Flujo enlazado de conductores x y y .
I_x, I_y	Corriente fasorial de conductores x y y .
q	Carga en Coulomb.
V_{ab}	Voltaje entre dos conductores (a, b) .
C_{ab}	Capacitancia entre dos conductores (a, b) .
C_n	Capacitancia al neutro.
K_r	Permitividad relativa.
π	Variable pi = 3.1416.
S_i	Potencia aparente en nodo típico i .
$P - Q$	Denominación a nodos de carga.
$P - V $	Denominación a nodos de voltaje.
i	Representación del número de buses o nodos del sistema.
I_i	Corriente inyectada en nodo i .
I_i^*	Elemento conjugado del valor de magnitud y ángulo de fase de la tensión en nodo típico i .

Y_{ij}, Y_{in}	Elementos de la admitancia fuera de la diagonal dominante de acuerdo con los nodos existentes.
P_i	Potencia activa en nodo típico i .
Q_i	Potencia reactiva en nodo típico i .
$P_i(V, \delta)$	Ecuación de flujos de potencia activa en nodo típico i .
$Q_i(V, \delta)$	Ecuación de flujos de potencia reactiva en nodo típico i .
δ_i	Ángulo de fase para determinado nodo típico i .
$ V_i $	Magnitud de tensión para determinado nodo típico i .
P_{gi}	Potencia real generada en determinado nodo típico i .
Q_{gi}	Potencia reactiva generada en determinado nodo típico i .
P_{di}	Potencia real demandada en determinado nodo típico i .
Q_{di}	Potencia reactiva demandada en determinado nodo típico i .
S_{gi}	Potencia aparente generada en determinado nodo típico i .
S_{di}	Potencia aparente demandada en determinado nodo típico i .
$S_{i,calc}$	Potencia aparente calculada de las ecuaciones de flujos de potencia en determinado nodo típico i .
$S_{i,prog}$	Potencia aparente programada de suministro en determinado nodo típico i .
$P_{i,prog}$	Potencia activa programada para nodo típico i .
$Q_{i,prog}$	Potencia reactiva programada para nodo típico i .
$\Delta P \Delta Q \Delta S$	Designación de ecuaciones de error.
$\Delta V \Delta \delta$	Designación de ecuaciones de corrección.
$P_{i,especificada}$	Potencia real de entrada en nodo típico i .
$Q_{i,especificada}$	Potencia reactiva de entrada en nodo típico i .
k	Número de iteración.
$p. u.$	Valor expresado en por unidad.

$f(x)$	Función de una variable (ecuación).
Δx	Diferencia entre valor más actual de la última iteración y valor anterior.
ε	Epsilon – Determina la tolerancia en las iteraciones.
$V_i^{(k)}$	Valor de voltaje inicial de nodo típico i en la iteración k .
∂f	Representación de derivada parcial de la función.
φ	Ángulo de voltaje de generación en diagramas fasoriales de flujos de potencia reactiva.
δ	Ángulo de corrientes en diagramas fasoriales de flujos de potencia reactiva.
V_g	Voltaje de generación.
V_c	Voltaje de carga.
$V_{ref.i}$	Voltaje de referencia a nodo típico i .
$P_{línea}$	Potencia de la línea.
P_p	Pérdidas activas.
Z_L	Impedancia de la línea.
$P_{máx}, P_{mín}$	Potencia máxima y potencia mínima.
ME	Margen de estabilidad.
MEE	Margen de estabilidad de estado estable.
P_{op}	Nivel de operación.
$V_{t_{máx}}, V_{t_{mín}}$	Límites de voltaje máximo y mínimo de operación.
V_{ref}	Voltaje de referencia.
$I_{c_{máx}}, I_{c_{mín}}$	Capacidades nominales máxima y mínima de inyección de corriente.
$G1 - G4$	Subconjunto de generadores.

ABREVIATURAS

<i>CD</i>	Corriente Directa.
<i>CA</i>	Corriente Alterna.
<i>SEP</i>	Sistema Eléctrico de Potencia.
<i>LCK</i>	Ley de Corrientes de Kirchoff.
<i>km</i>	Kilómetro.
<i>kV</i>	Kilovoltio.
<i>CEV</i>	Compensador Estático de Var.
<i>V</i>	Voltaje.
<i>I</i>	Corriente.
<i>sen</i>	Seno.
<i>cos</i>	Coseno.
<i>R</i>	Resistencia.
<i>L</i>	Inductancia.
<i>C</i>	Capacitancia.
<i>G</i>	Conductividad.
<i>B</i>	Susceptancia, parte imaginaria de la admitancia.
<i>W</i>	Watts (Unidad de potencia real o activa).
<i>H</i>	Henrios (Unidad para inductores o reactores).
<i>F</i>	Faradios (Unidad para capacitores).
Y_{BUS}	Representación de matriz de admitancias.
Z_{BUS}	Representación de matriz de impedancias.
<i>MW</i>	Mega Watts (Unidad de potencia real o activa).
<i>MVA</i>	Mega Volts-Ampere (Unidad de potencia aparente).

<i>MVAR</i>	Mega Volts-Ampere Reactivos (Unidad de potencia reactiva).
<i>SIL</i>	Potencia natural de la línea.
<i>NR</i>	Newton – Raphson.
<i>f.p.</i>	Factor de potencia.
<i>MATLAB</i>	Laboratorio de Matrices (siglas en inglés).

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

1.1 GENERALIDADES.

Una red de transmisión es el conjunto de dispositivos para transportar o guiar la energía eléctrica desde una fuente de generación a los centros de consumo (cargas). Estos son utilizados normalmente cuando no es costeable producir la energía eléctrica en los centros de consumo o cuando afecta el medio ambiente, buscando siempre maximizar la eficiencia, haciendo las pérdidas por calor o por radiaciones las más pequeñas posibles.

Parte de la red de transporte de energía eléctrica son las líneas de transmisión. Una línea de transmisión es el medio mediante el cual se realiza el flujo de la energía eléctrica a grandes distancias. Está constituida tanto por el conductor (cables de acero, aluminio o cobre), como por sus elementos de soporte (torres y postes).

Las líneas de transmisión ocupan un lugar importante en la operación de una red eléctrica. Tanto por el número, como por la extensión territorial que abarcan, constituyen los elementos del SEP que están sujetos a un mayor riesgo de falla. Por otro lado, aun cuando se conoce de manera práctica el comportamiento de líneas de transmisión típicas, ya sea por medio de curvas de cargabilidad o por experiencia operativa, la gran diversidad de condiciones de operación del SEP exige la obtención de modelos que la representen adecuadamente y que permita obtener resultados de simulación confiables [1].

Un sistema eléctrico de potencia consta de plantas generadoras que producen la energía eléctrica consumida por las cargas, una red de transmisión y de distribución para transportar esa energía de las plantas a los puntos de consumo, así como el equipo adicional necesario para lograr que el suministro de energía se realice con las características de continuidad de servicio, regulación de tensión y control de frecuencia requeridas.

Los sistemas eléctricos de potencia (SEP) permiten el suministro de energía eléctrica con la calidad adecuada para manejar motores, iluminar hogares y calles, hacer funcionar plantas de manufacturas, negocios, así como para proporcionar potencia a los sistemas de comunicaciones. El punto de inicio de los sistemas eléctricos son las plantas generadoras que convierten energía mecánica a energía eléctrica; esta energía es entonces transmitida a grandes distancias hacia los grandes centros de consumo mediante sistemas de transmisión; finalmente, es entregada a los usuarios mediante redes de distribución.

La operación en tiempo real de los sistemas eléctricos de potencia requiere estudios de flujos de potencia que permitan mantener la confiabilidad del sistema. Para ello utilizan herramientas y modelos matemáticos que obtienen como solución las variables eléctricas, las cuales son: potencia, voltaje y ángulos.

Esta tesis se enfocará en describir el modelo de Newton Raphson para el análisis y comportamiento de un sistema eléctrico ante diversas variaciones en la carga del sistema y analizar los perfiles de voltaje obtenidos ante diversas circunstancias.

1.2 OBJETIVO.

Analizar el comportamiento de redes de transmisión ante varianzas en la potencia de carga de un sistema eléctrico; mediante flujos de potencia por modelos matemáticos y métodos de solución iterativos para entender la problemática y dar solución.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Implementar un modelo matemático (método numérico) que nos permita realizar el análisis del comportamiento de una red eléctrica de transmisión.

- Formular el problema de variación de carga en sistemas de potencia como un problema de programación adecuado al método iterativo desarrollado (Newton – Raphson).
- Resolver el problema de flujos de potencia del caso de estudio (sistema de 4 nodos) y analizar el comportamiento del perfil de voltaje ante variaciones en la carga del sistema.
- Implementar el algoritmo de solución en MATLAB para resolver la problemática de flujos de potencia y variantes del mismo.

1.4 JUSTIFICACIÓN.

El estudio de flujos de potencia surge de la necesidad de analizar las redes de un sistema eléctrico de potencia (SEP), que permiten hacer estudios de toda una red eléctrica y así mismo verificar el correcto funcionamiento de un SEP, mantener en estado estable las variables de operación del sistema como lo son los voltajes y la frecuencia; para facilitar la planificación, diseño y operaciones futuras del sistema.

En la actualidad los sistemas de potencia son muy susceptibles a problemas como constantes caídas de tensión o pérdidas de voltaje en las líneas de transmisión largas, esto se debe generalmente a pérdidas en conductores, calentamientos dieléctricos, pérdidas por acoplamiento o simplemente a incrementos en la potencia de carga debido a la demanda que se le exija al sistema.

Debido a que la red eléctrica va creciendo y cambiando constantemente, el estudio de flujos de potencia es cada vez más complicado realizarlo, por lo que se requiere de herramientas computacionales que faciliten esta labor a los operadores del sistema y puedan dar solución a las problemáticas de forma efectiva.

Este trabajo presenta estudios a un sistema de prueba de cuatro nodos donde se analizan los flujos de potencia de todos los nodos del sistema, se obtienen potencias activas y reactivas del sistema, voltajes y ángulos. De igual manera como

forma de comprender los colapsos o caídas de tensión de un sistema de potencia, se hacen simulaciones provocando estos colapsos mediante aumentos en la demanda de carga del sistema y así mismo se propone la solución óptima para dar solución a la problemática presentada.

1.5 ANTECEDENTES.

La transmisión y distribución de energía eléctrica comenzó en el año de 1882, por medio de una línea de transmisión de 50 km de longitud, a una tensión de 2 kV en corriente directa (CD), esta línea conectaba a las ciudades de Miesbach y München en Alemania. Esta forma de transmisión de energía solo podía emplearse para alimentar máquinas rotatorias de corriente directa, debido que no era posible adaptar los niveles de tensión de transmisión a los de distribución. Posteriormente con inventos como transformadores, motores de inducción y la creación de sistemas de distribución de energía en corriente alterna (CA) fueron relevando a los sistemas de corriente de CD en la distribución de energía. Esto fue posible debido a que los transformadores permitieron modificar los niveles de tensión a los requeridos en los sistemas de consumo, lo cual generó menores pérdidas en el manejo de la energía. Posteriormente con la invención del generador síncrono trifásico, la necesidad de emplear corriente alterna en la distribución de energía fue más evidente, por lo que la transmisión de corriente directa quedó prácticamente obsoleta.

En la actualidad, con la evolución y crecimiento de la industria y el incremento demográfico, la energía eléctrica demandada es cada vez mayor. Esto trae consigo exigencias adicionales en la generación y transmisión de energía eléctrica. Para abastecer de energía eléctrica un país se requiere de grandes inversiones en el sector energético, siendo necesario evaluar los recursos disponibles para confrontar ese tipo de requerimientos, por otro lado, los centros de generación generalmente no están cerca de los centros de consumo, por lo que es necesario transmitir dicha energía a grandes distancias; lo cual ha propiciado una mayor complejidad y cierta problemática en los sistemas eléctricos.

Con el crecimiento de la demanda energética y la búsqueda para mejorar la confiabilidad y eficiencia de los sistemas eléctricos, fueron surgiendo problemáticas relacionadas con la transmisión de energía en CA, como es el caso de las grandes distancias entre centros de generación y centros de consumo. Ante estas circunstancias, las líneas de transmisión presentan grandes pérdidas de potencia debido a la impedancia de los conductores.

Una de las complicaciones comunes que se presenta en los sistemas eléctricos al transmitir energía a grandes distancias es el problema de estabilidad de tensión. Este análisis ha sido desde los años 60's un tema de gran importancia debido a los colapsos de voltaje que se presentan día a día debido a las sobrecargas por grandes demandas en los sistemas.

Estos eventos dieron origen a diversos estudios, investigaciones y propuestas de formas y métodos de estudio para detectar, predecir y corregir la inestabilidad de voltaje. Para realizar los estudios que brinden solución a lo anterior, es requerida una gran cantidad de datos de configuración, modelos y parámetros de las redes eléctricas a analizar. Con estos requerimientos se es posible desarrollar técnicas y modelos computacionales adecuados que permitan realizar los estudios pertinentes y necesarios con mayor facilidad.

Como parte de las nuevas tecnologías que fueron surgiendo y evolucionando con el fin de dar solución a n número de problemas en las redes, aparecen los métodos iterativos de solución para sistemas de potencia, por mencionar los más comunes: Gauss – Seidel, Newton – Raphson y una aproximación para mantener el Jacobiano constante, este último es conocido como Desacoplado Rápido.

El modelo matemático del problema de flujos está conformado por un sistema de ecuaciones algebraicas no lineales; para obtener la solución de este sistema de ecuaciones, se utilizan estos métodos iterativos. Los métodos de Newton – Raphson y el Desacoplado Rápido han sido las técnicas más utilizadas en los estudios de flujos de potencia para sistemas de transmisión de alta tensión a gran escala. En esta tesis los estudios y análisis de pruebas al sistema en estado estable a desarrollar, se efectúan con el método de Newton – Raphson.

1.6 ALCANCES Y LIMITACIONES.

Alcances.

- Al contar con la herramienta de optimización de MATLAB, se es posible realizar de forma más práctica el programa de solución por el método iterativo de Newton – Raphson. Al ser un software que permite manipular los datos con facilidad, se pudo analizar el colapso de tensión en nodos de carga del sistema.
- Se logró realizar un control de voltaje a través de elementos que aportan potencia reactiva fija (capacitores) al sistema ante diversas variaciones en la carga simulando la demanda de la misma para el sistema de prueba (sistema de 4 nodos).

Limitaciones.

- Como se hizo mención anteriormente, en el presente trabajo se da solución únicamente a un sistema eléctrico de 4 nodos mediante el método de (NR), este programa fue realizado de esta manera debido a la complejidad que se presenta al incorporar más variables de control, más nodos y así generar un sistema más robusto.
- Al hacer solamente uso de capacitores para la regulación del voltaje, no se pueden apreciar las pruebas o simulaciones dinámicas que se presentarían con más elementos de control como lo son reactores y CEV's de distintas configuraciones.
- Debido a que este es un trabajo de aplicación de metodologías, se hace énfasis en que no se realizarán pruebas experimentales y novedosas que aporten un plus al manejo del software y del programa realizado.

1.7 ESTRUCTURA DE LA TESIS.

- **CAPÍTULO 1:** *Introducción.* Este capítulo describe brevemente a la red de transmisión y al sistema eléctrico de potencia (SEP), se da a conocer la problemática del trabajo, los objetivos, justificación y los antecedentes de los sistemas de potencia.
- **CAPÍTULO 2:** *Modelado de elementos de un sistema eléctrico de potencia.* En este capítulo se abarca el modelado de elementos que constituyen un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP).
- **CAPÍTULO 3:** *Teoría de flujos de potencia.* En este capítulo se hace mención a las ecuaciones de flujos de potencia, se presentan los métodos más comunes de solución de flujos de potencia basados en métodos numéricos y la teoría de control de voltaje para SEP.
- **CAPÍTULO 4:** *Análisis de flujos de potencia ante variación de carga.* Se presenta el caso de estudio (sistema de 4 nodos) y se aplica el método de Newton – Raphson para flujos de potencia, se realiza el análisis del caso de estudio ante diversas variaciones en la carga del sistema y se observa el comportamiento obtenido mediante simulaciones.
- **CAPÍTULO 5:** *Conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.* Se exponen los resultados obtenidos de las simulaciones y análisis de la red eléctrica. Se presentan además los trabajos futuros que se puedan llegar a realizar partiendo de este estudio.

CAPÍTULO 2. MODELADO DE ELEMENTOS DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA.

2.1 INTRODUCCIÓN.

Un sistema eléctrico de potencia consta de elementos que son fundamentales para llevar a cabo un estudio de flujos de potencia, estos elementos se modelan con la finalidad de realizar simulaciones que nos permitan calcular y analizar flujos de potencia de un sistema eléctrico. Antes de analizar el estudio de flujos de potencia y sus distintos métodos iterativos de solución, es prudente estudiar el modelado de los principales elementos que conforman un SEP. Los elementos principales que conforman un SEP son el generador síncrono, las líneas de transmisión, las cargas y los elementos de control que están conformados por reactores, capacitores y CEV's.

2.2 MODELADO DE GENERADOR SÍNCRONO.

Los generadores de corriente alterna (CA), son también conocidos con el nombre de *generadores síncronos* o *alternadores*, son capaces de transformar energía mecánica en energía eléctrica. Una máquina síncrona, ya sea generador o motor, opera a velocidad síncrona, es decir, a la velocidad que gira el campo magnético creado por las bobinas del campo [6].

La máquina síncrona consiste en un cilindro giratorio, llamado rotor que va a transmitir la acción mecánica a través del eje, apoyado en cojinetes. El rotor gira en el hueco de otro cuerpo fijo, llamado estator. La separación casi intersticial dentro de los dos cuerpos se denomina entrehierro, debido a que el rotor y estator están hechos de hierro en razón a su alta permeabilidad magnética. La transformación de

energía mecánica en energía eléctrica se realiza en el entrehierro como energía electromagnética en forma de campo electromagnético [7].

La denominación de máquina síncrona [7] se debe al hecho de que la velocidad de rotación del rotor es igual a la velocidad del campo magnético giratorio existente en el entrehierro y está dado por la expresión siguiente:

$$N_s = \frac{120f}{P} \quad (2.1)$$

Donde:

f – Frecuencia en Hertz (Hz)

P – Número de polos en la máquina

La máquina síncrona trifásica (3ϕ) [1] está formada por una parte fija donde se encuentran tres devanados espaciados 120 grados eléctricos y los cuales son excitados con corriente alterna, esta parte se conoce como estator o armadura; y de una parte móvil conocida como rotor, donde se tiene un devanado excitado con corriente directa y en estado estable a velocidad constante. En la figura 2.1, se pueden apreciar las partes que conforman una máquina síncrona de dos polos.

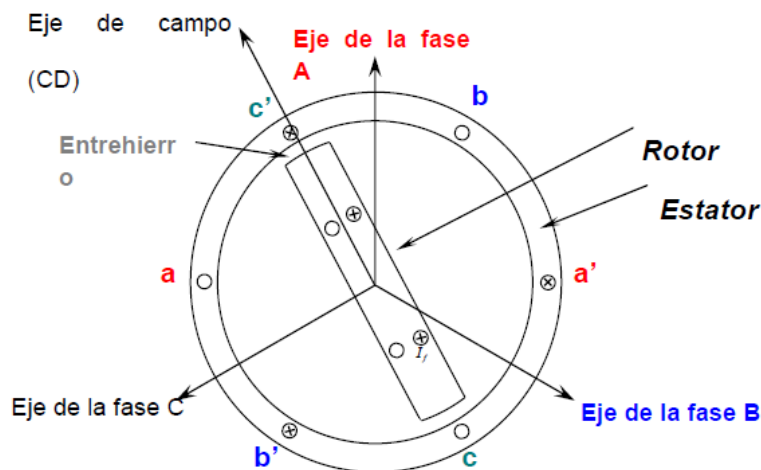


Figura 2.1 Máquina síncrona de dos polos [1].

Debido al rotor, el generador puede clasificarse en dos tipos: *generador de rotor cilíndrico* o de *polos lisos* y *generador de polos salientes*.

El generador de polos lisos se caracteriza principalmente por tener un entrehierro constante entre rotor y estator, por lo que la reluctancia del circuito magnético por el cual circula el flujo resultante de armadura es constante. En el generador de polos salientes la reluctancia no es uniforme, esta varía de acuerdo con la posición del rotor [1].

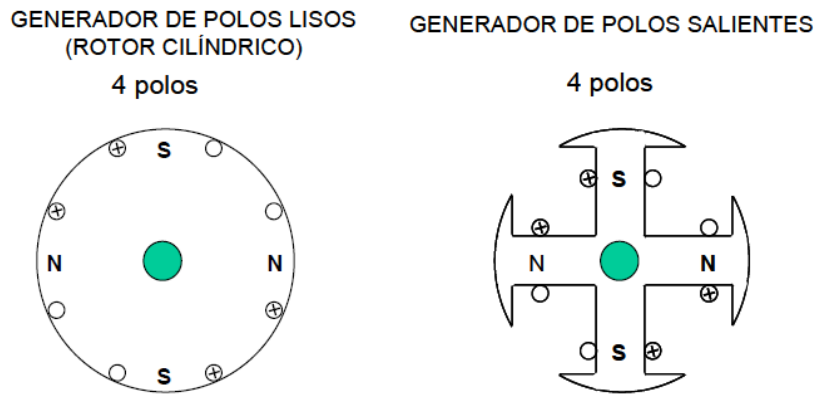


Figura 2.2 Tipos de generadores [1].

El alternador como parte de un sistema de potencia se le representa mediante un circuito equivalente, el cual es útil para estudios de estabilidad y análisis de sistemas eléctricos de potencia. Independientemente del número de fases con el que cuente, siempre se le representa como un diagrama equivalente monofásico, puesto que los estudios se realizan por fase [8].

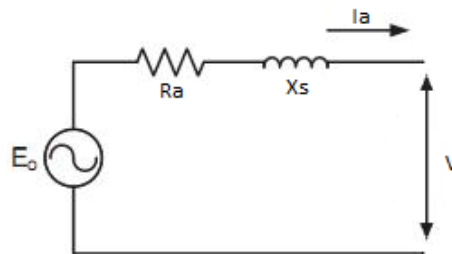


Figura 2.3 Circuito equivalente para generador síncrono [1].

Teniendo que:

$$E_o = V + I_a(R + jX) \quad (2.2)$$

$$E_o = V + I_a Z_s \quad (2.3)$$

Normalmente los voltajes de un generador síncrono son voltajes en ca, estos son representados generalmente como fasores (magnitud y ángulo) expresados mediante una gráfica bidimensional, también llamados *diagramas fasoriales*, los cuales resultan de la relación entre los voltajes de una fase (E_o , V_ϕ , $jX_s I_a$ y $R_a I_a$) y la corriente I_a en la fase [9].

En la figura 2.4 se pueden apreciar los diagramas fasoriales de un generador síncrono. Teniendo en cuenta que para cierto voltaje de fase y corriente del inducido se necesita un voltaje interno generado E_o más grande para las cargas en atraso que para las cargas en adelanto.

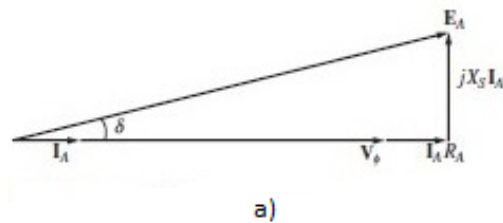


Figura 2.4.a Diagrama fasorial con factor de potencia resistivo [1].

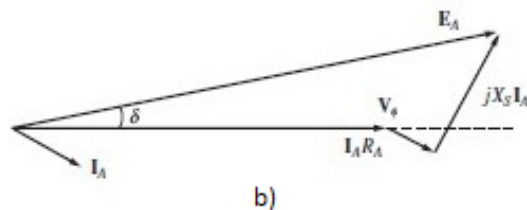


Figura 2.4.b Diagrama fasorial con factor de potencia inductivo [1].

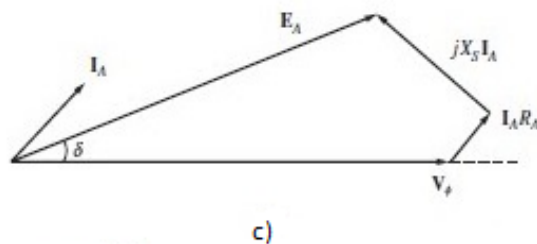


Figura 2.4.c Diagrama fasorial con factor de potencia capacitivo [1].

2.2.1 GENERADOR DE POLOS LISOS (ROTOR CILÍNDRICO).

Un generador de polos lisos o rotor cilíndrico presenta un entrehierro casi uniforme, y la variación en la reluctancia del entrehierro alrededor de su periferia, debida a las ranuras, es predecible [6].

En la figura 2.5 se puede apreciar el circuito equivalente de un modelo simplificado de un generador síncrono de polos lisos para el análisis de estado estable [1].

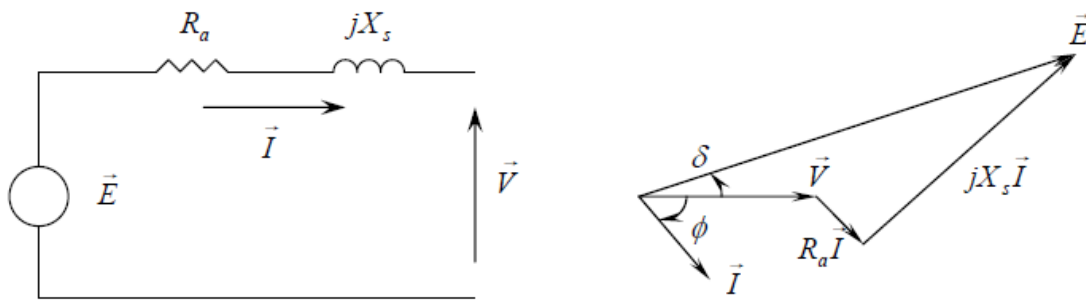


Figura 2.5 Circuito equivalente y diagrama fasorial del generador síncrono de polos lisos [1].

La ecuación de voltaje del circuito es:

$$\vec{E}_o = \vec{V} + (R_a + jX_s)\vec{I} \quad (2.4)$$

Donde:

\vec{E}_o – Voltaje interno

R_a – Resistencia de armadura

jX_s – Reactancia síncrona

\vec{V} – Voltaje de terminales

2.2.2 GENERADOR DE POLOS SALIENTES.

En el modelo del generador de polos salientes se distinguen dos trayectorias de flujo magnético; una que está alineada con el eje de los polos (eje directo) y otra a 90 grados eléctricos de la primera (eje en cuadratura). La reactancia síncrona se presenta ahora por las componentes X_d y X_q sobre estos ejes [1].

Este tipo de rotor se tiene en donde el número de polos es mayor a 6 y en su mayoría cuando se usa como motor síncrono; este tipo de motor produce altas pérdidas por fricción y ventilación [8].

En la figura 2.6 se muestra el diagrama fasorial de las variables del generador síncrono que ilustra la relación entre los voltajes y las corrientes proyectadas sobre los ejes d y q. Suponiendo que el valor de la resistencia de armadura se desprecia [1].

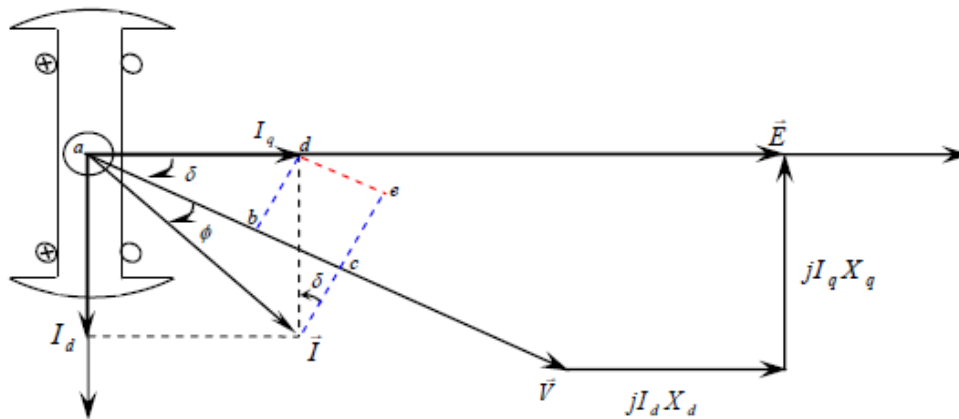


Figura 2.6 Diagrama fasorial del generador síncrono de polos salientes [1].

Las componentes de la corriente se pueden obtener mediante:

$$I_d = \frac{E - V \cos \delta}{X_d} \quad (2.5)$$

$$I_q = \frac{V \sin \delta}{X_q} \quad (2.6)$$

La componente real de la corriente de armadura puede expresarse en términos de las corrientes I_d e I_q de la Figura 2.6 como sigue:

$$ac = ab + de$$

$$I \cos \phi = I_q \cos \delta + I_d \sin \delta \quad (2.7)$$

Por definición de potencia activa y sustituyendo en (2.7)

$$P = VI \cos \phi$$

$$P = V(I_q \cos \delta + I_d \sin \delta) \quad (2.8)$$

Sustituyendo (ec. 2.5) en (ec. 2.8) y simplificando se obtiene:

$$P = \frac{VE}{X_d} \sin \delta + \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin(2\delta) \quad (2.9)$$

En forma similar se deriva la expresión para la potencia reactiva.

$$Q = \frac{VE}{X_d} \cos \delta + \frac{V^2}{2} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \right) \cos(2\delta) - \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} + \frac{1}{X_d} \right) \quad (2.10)$$

2.3 MODELADO DE TRANSFORMADORES.

Un transformador [8] es un dispositivo eléctrico sin partes en movimiento más que por inducción electromagnética, transforma de uno a más circuitos eléctricos en energía a la misma frecuencia y cambiando usualmente los valores de tensión y de corriente.

Los transformadores constituyen los elementos de unión entre redes eléctricas de diferente nivel de tensión. La función primordial que desempeñan consiste en elevar los voltajes de generación a los niveles de transmisión que son requeridos para disminuir pérdidas; y en los puntos de carga disminuir los voltajes de transmisión hasta los niveles adecuados para las redes de distribución [1].

Mediante estos equipos se logra principalmente el control sobre el voltaje y la distribución de potencia reactiva, aun cuando algunos diseños especiales permiten cierto control sobre la potencia reactiva.

De acuerdo con la ley de Faraday, si se enrolla un segundo conductor en el núcleo de material ferromagnético se obtendrá una fuerza electromotriz inducida en las terminales de dicho conductor [1].

2.3.1 TRANSFORMADOR DE POTENCIA.

El transformador de potencia es un importante componente de los sistemas de potencia que permite la transmisión económica de la potencia eléctrica con una alta eficiencia y bajas caídas de tensión en serie. Permite elevar los voltajes relativamente bajos de los generadores a un nivel muy alto para una transmisión de energía eficiente. En el extremo del usuario del sistema, los transformadores reducen el voltaje a los valores más adecuados para su utilización [4].

Los transformadores de potencia llevan la tensión y la corriente de CA hasta niveles óptimos para la generación, transmisión, distribución y utilización de la potencia eléctrica [3].

2.3.2 TRANSFORMADOR IDEAL (TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE DOS DEVANADOS).

El transformador consiste en dos o más bobinas colocadas de tal forma que están enlazadas por el mismo flujo magnético. En un transformador de potencia, las bobinas se colocan sobre un núcleo de acero con el propósito de confinar el flujo de manera que el que enlace una bobina también enlaza las demás. Se pueden conectar varias bobinas en serie o en paralelo para formar un devanado, cuyas bobinas se apilan en el núcleo de manera alternada con aquéllas de otros devanados [2].

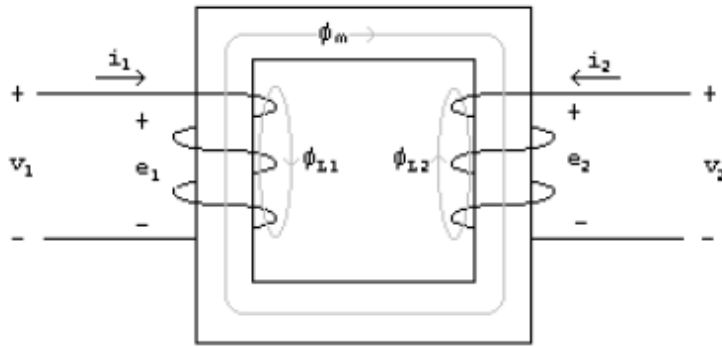


Figura 2.7 Representación esquemática de un transformador monofásico [1].

En la (Figura 2.7) se muestra un transformador monofásico de dos devanados, los cuales se encuentran enrollados alrededor de un núcleo magnético. Aquí se supone que el transformador está operando con excitación sinusoidal de estado estable [3].

Para un transformador ideal [3], se supone lo siguiente:

1. Los devanados tienen resistencia cero; por tanto, las pérdidas I^2R en el devanado son cero.
2. La permeabilidad del núcleo, μ_c es infinita, lo cual corresponde a una reluctancia cero del núcleo.
3. No hay flujo de dispersión; es decir, el flujo mutuo ϕ_m está confinado al núcleo y enlaza los dos devanados.
4. No hay pérdidas en el núcleo.

2.3.3 CIRCUITO EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR MONOFÁSICO.

En esta sección se presenta el desarrollo del circuito equivalente del transformador monofásico; partiendo de que se cuenta con un transformador ideal, con el fin de presentar un circuito equivalente simplificado se realizan reducciones del secundario al primario.

La relación de transformación simple de un transformador se define en función del número de vueltas de cada devanado o de los voltajes a circuito abierto, aplicando Ley de Faraday se tiene:

$$a_s = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (2.11)$$

De igual manera, aplicando Ley de Ampere para encontrar la relación de corrientes en los devanados se tiene:

$$a_s = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (2.12)$$

Los valores reducidos se obtienen a partir de los valores reales y de la relación de transformación ya que, para poder conectarse a la tensión del primario es preciso modificar los citados en términos convenientemente. Los valores reducidos de tensiones, corrientes, resistencias, etc. Se distinguirán de los valores reales por ('), lo que nos indicará que se encuentran referidos al primario [8].

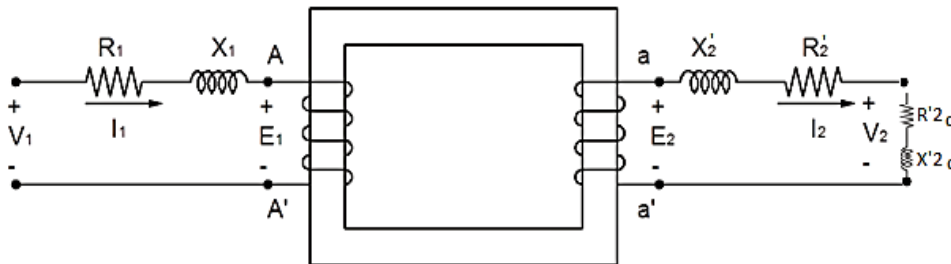


Figura 2.8 Diagrama eléctrico de un transformador con reducción al primario.

De la figura 2.8 se puede obtener un circuito equivalente reducido prescindiendo del núcleo, la cual se expresa como una bobina central con núcleo magnético, que pasa a ser expresada como una rama en derivación de una resistencia R_o en paralelo con la reactancia X_o .

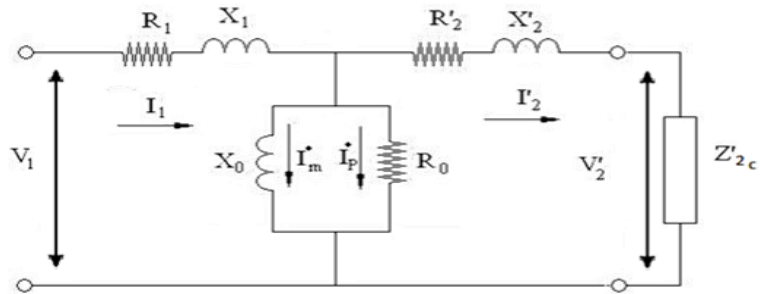


Figura 2.9 Circuito equivalente completo con rama magnetizante en derivación.

Como la corriente de vacío presenta escasa influencia en el cálculo de corrientes tanto primarias como secundarias [8], así como en las caídas de tensión del transformador, puede prescindirse de ella y así poder lograr un circuito equivalente elemental con la siguiente simplificación en cálculos y eliminando la rama en derivación del núcleo como se muestra en la figura 2.10.

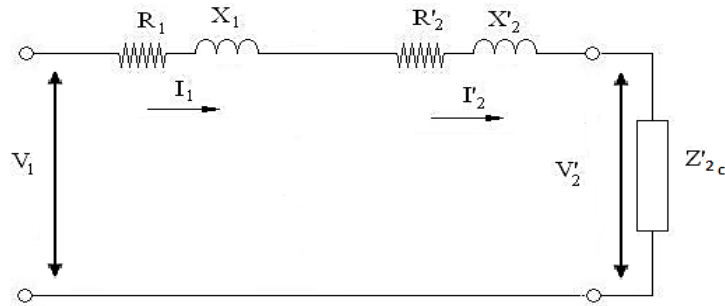


Figura 2.10 Circuito equivalente simplificado referido al primario.

En sistemas monofásicos [7], una vez contando con el circuito equivalente simplificado y con las relaciones de transformación de voltajes y corrientes, se obtiene Z_2 como sigue:

$$Z_2 = \frac{V_2}{I_2} \quad (2.13)$$

Usando las relaciones de voltajes y corrientes:

$$I_2 = \frac{N_1}{N_2} I_1 \quad (2.14)$$

$$V_2 = \frac{N_2}{N_1} V_1 \quad (2.15)$$

Podemos obtener Z'_{2c} , que es la impedancia de carga Z_2 , referida al primario del transformador:

$$Z'_{2c} = \frac{V_1}{I_1} = \frac{(N_1)^2}{(N_2)^2} Z_2 = Z_2 \quad (2.16)$$

Se define a la regulación de voltaje [7] [8], como la diferencia entre la magnitud del voltaje a plena carga y la magnitud de voltaje sin carga en por ciento del voltaje a plena carga.

$$\%Reg = \frac{E_2 - V_2}{E_2} \times 100 \quad (2.17)$$

Bajo condiciones *nominales*, las pérdidas totales [2], son aproximadamente iguales a la suma de las pérdidas de cortocircuito y de circuito abierto, y ya que la eficiencia o rendimiento de un transformador es igual a la relación de los kilowatts de salida a los de entrada, se tiene:

$$eficiencia = \%n = \frac{Potencia_{salida}}{Potencia_{salida} + Pérdidas} \times 100 \quad (2.18)$$

2.4 MODELADO DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.

Las líneas de transmisión [5] son los elementos más comunes que conforman las redes eléctricas. En conjunto, estos elementos constituyen las arterias a través de las cuales fluye la energía eléctrica desde los centros de generación hasta los centros de consumo. Ocupan un lugar importante dentro de la operación de la red eléctrica como de los SEP, este está expuesto a mayor riesgo de falla debido al número líneas y la extensión territorial que abarcan [1].

Una línea de transmisión tiene cuatro parámetros básicos que afectan su capacidad: la resistencia serie (R), la inductancia serie (L), la capacitancia en derivación (C) y la conductancia en derivación (G) [2] [3].

La resistencia serie está relacionada con las pérdidas ohmicas I^2R en la línea. La impedancia serie, incluyendo la resistencia y la reactancia inductiva, da lugar a las caídas de tensión en serie a lo largo de la línea. La capacitancia en derivación da lugar a las corrientes de carga de la línea. La conductancia en derivación está relacionada con las pérdidas V^2G de las líneas debidas a las corrientes de fuga entre los conductores y tierra [3].

Al momento de realizar estudios y modelados de líneas de transmisión para flujos de potencia, para estudios en estado estacionario, ésta se representa por su circuito equivalente π (π).

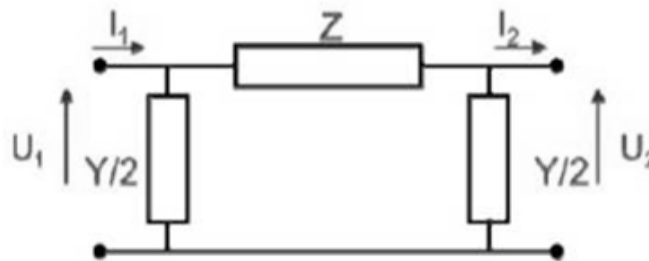


Figura 2.11 Modelo π (π) equivalente para representación de línea de transmisión.

2.4.1 RESISTENCIA DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN.

La resistencia de conductores de líneas de transmisión es la causa más importante de pérdida de potencia en ellas [2].

La resistencia de los conductores [3] depende de los siguientes factores:

1. La disposición en espiral.
2. Temperatura.
3. Frecuencia (“efecto piel”).
4. Magnitud de la corriente; conductores magnéticos.

La resistencia de CA o *resistencia efectiva* de un conductor es:

$$R = \frac{P_{p\acute{e}rdida}}{|I|^2} \Omega \quad (2.19)$$

Donde la $P_{p\acute{e}rdida}$ es la p\acute{e}rdida de potencia del conductor en W (watts) e I es la corriente del conductor en amperes [3].

La resistencia de CD de un conductor est\acute{a} dada por:

$$R_0 = \frac{\rho l}{A} \Omega \quad (2.20)$$

Donde:

ρ - es la resistividad del conductor

l - la longitud del conductor

A - \u00e1rea de la secci\u00f3n transversal del conductor

Para la Resistencia de CD la distribuci\u00f3n de corriente es uniforme en toda la secci\u00f3n transversal del conductor. Sin embargo, para la Resistencia de CA la distribuci\u00f3n de corriente no es uniforme [3]. Conforme la frecuencia de corriente alterna va aumentando, la no uniformidad de la distribuci\u00f3n se hace m\u00e1s pronunciada. La corriente en un conductor cil\u00edndrico s\u00f3lido tiende a agolparse hacia la superficie de este, con menor densidad de corriente en el centro de este. Este fen\u00f3meno se conoce como *efecto piel* [2] [3].

2.4.2 INDUCTANCIA DE UNA L\u00cdNEA DE TRANSMISI\u00d3N.

La inductancia de una l\u00ednea de transmisi\u00f3n se calcula como enlaces de flujo por ampere. Para obtener un valor aproximado de la inductancia de una l\u00ednea de transmisi\u00f3n, es necesario considerar el flujo dentro y fuera de cada conductor [2]. Se calcula mediante la relaci\u00f3n entre los enlaces de flujo resultantes λ y la corriente I .

$$L = \frac{\lambda}{I} \quad (2.21)$$

La inductancia total L_T [3] debida tanto al flujo enlazado interno como hasta el externo, hasta una distancia D , se representa como:

$$L_T = \frac{\lambda_T}{I} = 2 \times 10^7 \ln \left(\frac{D}{r'} \right) \frac{H}{m} \quad (2.22)$$

$$r' = e^{\frac{1}{4}} r = 0.7788r$$

Donde:

D – Distancia entre conductores

r – Radio del conductor real

r' – Radio del conductor ficticio

2.4.2.1 INDUCTANCIA DE LÍNEA MONOFÁSICA DE DOS CONDUCTORES.

Si se consideran dos conductores, cada uno con un radio r y con una separación de centros dada por D , conduciendo una corriente I y $-I$, se obtiene la expresión de los enlaces de flujo e inductancia [1].

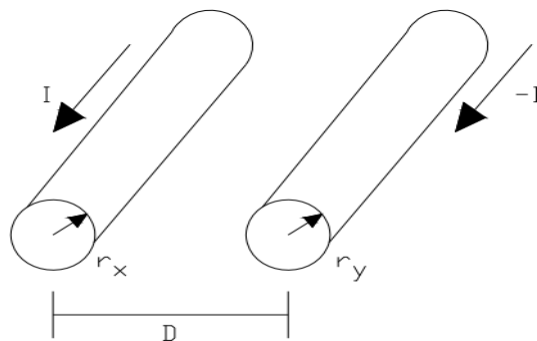


Figura 2.12 Configuración geométrica de línea monofásica de dos conductores [13].

Para determinar la inductancia de dos líneas de transmisión relativamente sencillas (línea monofásica de dos conductores), se utiliza la ecuación anterior (2.22).

En la figura 2.12 se presenta una línea monofásica de dos conductores cilíndricos sólidos x y y . El conductor x con radio r_x lleva la corriente fasorial $I_x = I$ de entrada, mientras que el conductor y con radio r_y lleva la corriente de retorno $I_x = -I$ [3].

La inductancia del conductor x es:

$$L_x = \frac{\lambda_x}{I_x} = \frac{\lambda_x}{I} = 2 \times 10^7 \ln \left(\frac{D}{r'} \right) \frac{H}{m} \quad \text{por conductor} \quad (2.23)$$

De igual modo, la inductancia del conductor y es:

$$L_y = \frac{\lambda_y}{I_y} = \frac{\lambda_y}{-I} = 2 \times 10^7 \ln \left(\frac{D}{r'} \right) \frac{H}{m} \quad \text{por conductor} \quad (2.24)$$

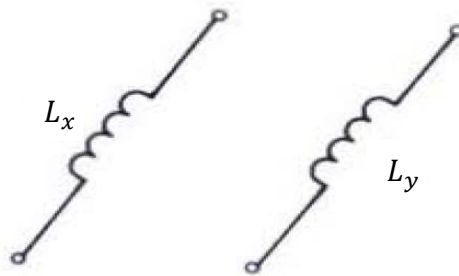


Figura 2.13 Inductancias [3].

En la figura 2.13 se puede apreciar las inductancias de una línea de transmisión de dos conductores.

Entonces, la inductancia total del circuito monofásico, también conocida como *inductancia de lazo*, con la finalidad de distinguirla de la componente de inductancia del circuito que se atribuye a la corriente en un solo conductor, dicha inductancia está dada por [2] [3]:

$$L = 4 \times 10^7 \ln \left(\frac{D}{r'} \right) \frac{H}{m} \quad \text{por circuito} \quad (2.25)$$

2.4.3 CONDUCTANCIA DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN.

La conductancia es el parámetro que denota la pérdida de potencia real entre conductores o entre los conductores y la tierra. En el caso de líneas aéreas, dicha pérdida de potencia se debe a las corrientes de fuga en los aisladores y el efecto corona.

Estas pérdidas son muy pequeñas, por lo que la conductancia se llega a despreciar en estudios de sistemas de potencia debido a que es un componente muy pequeño de la admitancia en derivación [3].

2.4.4 CAPACITANCIA DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN.

La capacitancia de una línea de transmisión es el parámetro que resulta de la diferencia de potencial entre los conductores que origina que se carguen de la misma manera que lo hacen las placas de un capacitor. El efecto de la capacitancia puede ser pequeño y muchas veces es despreciado en líneas de potencia que tienen menos de 80 km (50 millas) de longitud, teniendo como consecuencia afecciones en la caída de voltaje a lo largo de la línea, la eficiencia, el factor de potencia de la línea y la estabilidad del sistema del cual forma parte. Como la capacitancia es una derivación entre conductores, la corriente de carga fluye en la línea de transmisión aun cuando esté en circuito abierto [2].

2.4.4.1 CAPACITANCIA DE LÍNEA DE DOS CONDUCTORES.

La capacitancia de una línea de dos conductores [2] es definida como la carga sobre los conductores por unidad de la diferencia de potencial entre ellos. La capacitancia por unidad de longitud de la línea está dada por:

$$C = \frac{q}{v} \quad \text{F / m} \quad (2.26)$$

Donde:

q – Carga sobre la línea en coulomb por metro

v – Diferencia de potencial entre conductores en volts

Para calcular la capacitancia entre dos conductores, se puede obtener el voltaje v_{ab} entre los conductores de dos hilos (figura 2.14), si se calcula la caída de voltaje debida a la carga q_a en el conductor a y después la caída de voltaje debida a la carga q_b sobre el conductor b [2].

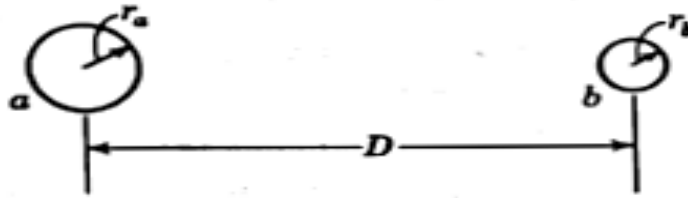


Figura 2.14 Sección transversal de una línea con conductores paralelos [2].

La capacitancia entre los conductores es:

$$C_{ab} = \frac{\pi k}{\ln\left(\frac{D}{r}\right)} \quad \text{F / m} \quad (2.27)$$

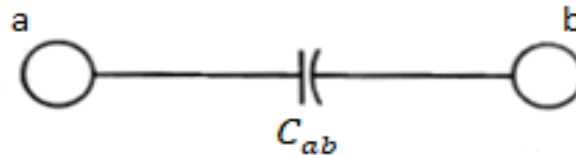


Figura 2.15 Representación de la capacitancia línea a línea [2].

Si la línea se alimenta desde un transformador que cuenta con derivación central a tierra [2], la diferencia de potencial entre cada conductor y la tierra equivale a la mitad de la diferencia de potencial entre los conductores, y la *capacitancia a tierra* o *capacitancia al neutro* es:

$$C_n = C_{an} = C_{bn} = \frac{q_a}{\frac{v_{ab}}{2}} = \frac{2\pi k}{\ln\left(\frac{D}{r}\right)} \quad \text{F / m al neutro} \quad (2.28)$$

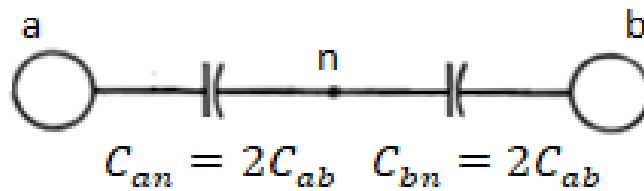


Figura 2.16 Representación de la capacitancia línea a neutro [2].

Después de haber obtenido la capacitancia al neutro [2], es posible encontrar la reactancia capacitiva existente entre un conductor y el neutro para una permitividad relativa $k_r = 1$, mediante la expresión anterior para C , y así obtener:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{2.862}{f} \times 10^9 \ln\left(\frac{D}{r}\right) \quad \Omega / \text{m al neutro} \quad (2.29)$$

$$X_c = \frac{1.779}{f} \times 10^6 \ln\left(\frac{D}{r}\right) \quad \Omega / \text{milla al neutro} \quad (2.30)$$

2.5 MODELADO DE CARGAS.

En un sistema eléctrico de potencia, se cuenta con una gran cantidad de cargas eléctricas, las cuales se conectan y se desconectan de forma continua, el modelado de estas cargas permite ayudar a mejorar las respuestas de los diferentes estudios a realizar del SEP, como estudios de flujos, de comportamiento estable, estabilidad transitoria y dinámica, entre otros [4].

Las cargas son aquellas que consumen la potencia generada por los generadores. Estas cargas se encuentran en los nodos de la red y pueden ser grandes consumidores (grandes industrias), o en la mayoría de los casos, se presentan de menor tensión, que van llevando esa energía eléctrica al resto de consumidores más pequeños.

Normalmente las cargas evolucionan con el tiempo; para estudios de sistemas eléctricos de potencia por simplicidad, las cargas no varían en el tiempo. Dentro del sistema en cuanto a su representación, se distinguen tres tipos de cargas:

- a) Cargas de impedancia constante: cargas estáticas cuya impedancia se mantiene constante y, por lo tanto, la potencia que consumen depende de la tensión que haya en cada instante en el nodo que se encuentre conectada. Se representan mediante los valores de R y X en paralelo, tal como se muestra en la figura 2.19.a.
- b) Cargas de potencia constante: este tipo de cargas son las más comunes en los SEP, son cargas cuyos valores especificados de P y Q consumidos son constantes, independientemente de la tensión que exista en el nodo de conexión; por este motivo o pueden ser representadas mediante una fuente o impedancia, por lo que se representa mediante una flecha indicando los valores de P y Q correspondientes (figura 2.19.b); estas cargas representan grandes consumidores como motores eléctricos y ciertas redes de transmisión menores.
- c) Cargas de intensidad de corriente: son cargas no muy comunes y se caracterizan por presentar una intensidad 'I' consumida constante e independiente de la tensión que exista en cada momento en el nodo de conexión. Es representada como una fuente de intensidad (figura 2.19.c)..

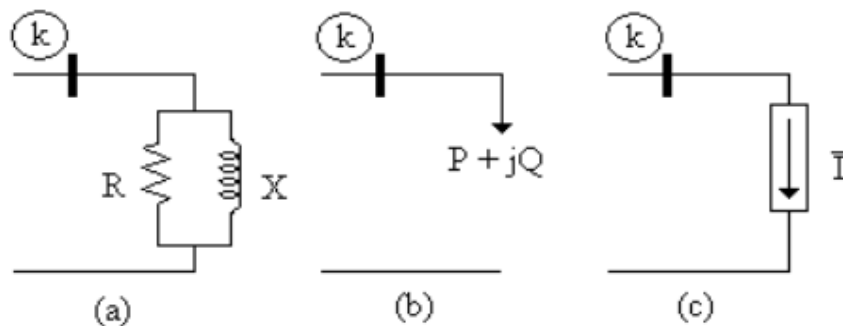


Figura 2.17 Representación de cargas: a) de impedancia constante, b) de potencia constante y c) de intensidad constante [4].

2.6 MODELADO DE REACTORES Y CAPACITORES.

La transmisión de potencia en corriente alterna presenta principalmente problemas de regulación de voltaje y de estabilidad. Esto obliga a buscar modos de operación de la red para resolver el problema de altos y bajos voltajes y de operación cerca del límite de estabilidad de estado estable, situaciones que se presentan cuando no se cuenta con los medios de compensación adecuados [1].

En un esquema de compensación reactiva conectado a la línea de transmisión, como primer objetivo se tiene que lograr una operación que este dentro de los márgenes de regulación de voltaje y de estabilidad. Como segundo objetivo, aumentar la capacidad de transmisión de líneas ya existentes [1].

Un modelo típico de reactores y capacitores que se utiliza para simular su efecto es el de un elemento pasivo con un valor de impedancia fijo. Para un reactor, el cual se utiliza cuando las líneas de transmisión presentan elevación de voltaje creciente desde el extremo de envío, hasta el extremo receptor cuando operan con flujos bajos, la expresión que representa un reactor está dada por:

$$Q = \frac{|V|^2}{X_L} = \frac{|V|^2}{2\pi fL} \quad (2.31)$$

De la expresión anterior se observa que la potencia reactiva que consume un reactor varía proporcionalmente con el cuadrado del voltaje de operación, e inversamente con la frecuencia.

De igual forma, para un capacitor la potencia reactiva está dada por:

$$Q = -|V|^2 X_c = -|V|^2 2\pi fC \quad (2.32)$$

En donde la dependencia de la potencia reactiva es proporcional al cuadrado del voltaje y la frecuencia de operación del sistema [1].

En este apartado se limita el desarrollo del modelado de los elementos de control (reactores, capacitores y CEV's), debido a que más adelante se estudiarán a más detalle sus características y aplicaciones.

CAPÍTULO 3. ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA.

3.1 INTRODUCCIÓN.

Los estudios de flujos de potencia son de gran importancia en la planeación y en el diseño de la expansión futura de los sistemas eléctricos, así como también en la determinación de mejores condiciones de operación de los sistemas existentes. La principal información que se obtiene de un estudio de flujos de potencia es la magnitud y el ángulo de fase del voltaje en cada nodo, así como la potencia real y la potencia reactiva que fluye en cada línea del sistema [3].

Un sistema de potencia en estado estable; se encuentra en estado normal de operación en el momento en que todos sus componentes están funcionando dentro de sus parámetros normales y la distribución de energía eléctrica se lleva a cabo de manera más eficiente, sin interrupciones y con calidad estándar [13].

El estudio de un sistema eléctrico de potencia comprende tanto la simulación como el análisis del mismo, estas son llevadas a cabo tanto en condiciones normales de operación, como en estados de emergencia. La modelación incluye la descripción del comportamiento tanto de los componentes por separado, como el sistema en su totalidad, integrado por todos los componentes conectados funcionando como una unidad. Los resultados de dicho proceso son utilizados para tomas de decisiones importantes, como el agrandamiento del sistema a medida que se agranda la demanda eléctrica [10] [11].

La complejidad que presenta la obtención de una solución formal del problema de flujos de potencia [1], radica en la diferencia de tipos de datos presentados para las distintas barras del sistema. Para realizar el estudio y el análisis de flujos de potencia se requieren técnicas de solución que incluyan modelos matemáticos integrados por sistemas de ecuaciones algebraicas

simultáneas no lineales y métodos numéricos (iterativos) que nos lleven a la óptima solución de este.

El problema de flujo de potencia es calcular la magnitud del voltaje y el ángulo de fase en cada bus de un sistema de potencia en condiciones de estado estable trifásico; como subproducto de realizar estos cálculos se derivan de igual manera cálculos de flujos de potencia activa y reactiva en equipos de potencia [3].

Para resolver el problema de flujos de potencia [2], se pueden usar las admitancias propias y mutuas que comparten la matriz de admitancias de barra Y_{barra} o las impedancias de punto de operación y de transferencia que constituyen Z_{barra} ; el estudio se limitará a los métodos que usen las admitancias.

3.2 ECUACIONES DE FLUJOS DE POTENCIA.

Para establecer un modelo matemático del problema de flujos de potencia [1], es primordial entender el mecanismo de los flujos de potencia sobre una red. La potencia nodal S_i inyectada en el nodo i , está dada por:

$$S_i = V_i I_i^* \quad (3.1)$$

Donde I_i^* es la corriente compleja conjugada neta en el nodo i . La ecuación (3.1) puede ser expresada en función de los voltajes y admitancias nodales:

$$I_i = \sum_{n=1}^N Y_{in} V_n ; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.2)$$

Al sustituir en la ecuación (3.1) la corriente expresada de acuerdo a la ecuación (3.2) se obtiene:

$$S_i^* = P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{n=1}^N Y_{in} V_n ; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.3)$$

Esta ecuación representa el modelo matemático del problema de flujos de potencia; un sistema algebraico, complejo y no lineal. La solución del sistema (3.3),

se efectúa por medio de métodos numéricos. Tanto los voltajes, como las admitancias son cantidades complejas y pueden expresarse mediante magnitud y su respectivo ángulo.

$$V_i = |V_i| \angle \delta_i = |V_i| (\cos \delta_i - j \sen \delta_i) \quad (3.4)$$

$$Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \theta_{ij} = |Y_{ij}| \cos \theta_{ij} + j |Y_{ij}| \sen \theta_{ij} = G_{ij} + j B_{ij} \quad (3.5)$$

Escribiendo en forma polar la ecuación (3.3), se tiene:

$$P_i - jQ_i = \sum_{n=1}^N |Y_{in}| |V_i| |V_n| \angle \delta_n - \delta_i + \theta_{in} ; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.6)$$

Separando las partes real e imaginaria de la ecuación anterior, tenemos:

$$P_i = \sum_{n=1}^N |Y_{in}| |V_i| |V_n| \cos(\delta_n - \delta_i + \theta_{in}) ; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.7)$$

$$Q_i = - \sum_{n=1}^N |Y_{in}| |V_i| |V_n| \sen(\delta_n - \delta_i + \theta_{in}) ; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.8)$$

Las ecuaciones (3.7) y (3.8) constituyen la forma polar de las ecuaciones de flujos de potencia y deben ser planteadas para cada nodo del sistema. Se tendrán 2 ecuaciones con 4 incógnitas para cada nodo, de las cuales, dos de ellas son siempre conocidas para cada nodo, las tablas 3.1 y 3.2 muestran dichas reducciones que hacen que las ecuaciones del sistema sean consistentes.

Las dos últimas ecuaciones enunciadas otorgan los valores calculados de la potencia real P_i y la potencia reactiva Q_i totales para la potencia aparente total ($S_{i,calc}$) que ingresa a un determinado nodo i .

En la figura (3.1) aplicando LCK en el punto 'a' [2] [13], la potencia programada total que se está inyectando al nodo i , se representa mediante la diferencia de la potencia programada que se está generando (S_{gi}) y la potencia demandada de la carga (S_{di}). Lo anterior se representa de la siguiente manera:

$$S_{i,prog} = S_{gi} - S_{di} \quad (3.9)$$

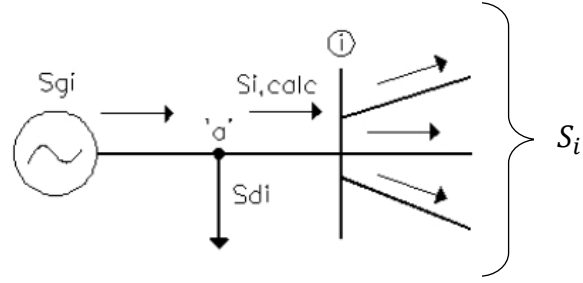


Figura 3.1 Notación para la potencia aparente en un nodo típico i , para estudios de flujos de potencia [12].

Como resultado, se asigna al valor calculado de S_i como $S_{i,calc}$ y se llega a la definición de error ΔS_i como el valor programado $S_{i,prog}$ menos el valor calculado $S_{i,calc}$.

$$(3.10)$$

$$\Delta S_i = S_{i,prog} - S_{i,calc} = (S_{gi} - S_{di}) - S_{i,calc}$$

De la ecuación anterior (3.10), la potencia aparente puede ser descompuesta en su forma real y su forma compleja, ya que en el desarrollo de la solución de flujos de potencia ocurren errores cuando los valores de P_i y Q_i no coinciden con los valores programados [2].

$$\Delta P_i = P_{i,prog} - P_{i,calc} = (P_{gi} - P_{di}) - P_{i,calc} \quad (3.11)$$

$$\Delta Q_i = Q_{i,prog} - Q_{i,calc} = (Q_{gi} - Q_{di}) - Q_{i,calc} \quad (3.12)$$

Si los valores calculados $P_{i,calc}$ y $Q_{i,calc}$ igualan perfectamente a los valores programados $P_{i,prog}$ y $Q_{i,prog}$ se dice que los errores ΔP_i y ΔQ_i son cero en el nodo i , y se obtienen las siguientes *ecuaciones de balance de potencia*.

$$\Delta P_i = P_i - P_{i,prog} = P_i - (P_{gi} - P_{di}) = 0 \quad (3.13)$$

$$\Delta Q_i = Q_i - Q_{i,prog} = Q_i - (Q_{gi} - Q_{di}) = 0 \quad (3.14)$$

3.2.1 CLASIFICACIÓN DE DISTINTOS TIPOS DE NODOS.

A cada uno de los nodos i se les asocian cuatro cantidades [2]; estas cantidades son: magnitud de voltaje $|V_i|$, ángulo de fase δ_i , potencia real P_i y potencia reactiva Q_i . En la práctica del estudio de flujos de potencia en cada nodo se especifican dos de los cuatro valores y se calculan las dos restantes a través de la solución de las ecuaciones (3.7) y (3.8).

Tipo de Nodo	Descripción
Nodo de carga	Conocido como nodo de carga o nodo P – Q; en este nodo no se tiene generación, es decir, P_{gi} y Q_{gi} son cero y la potencia real P_{di} y la potencia reactiva Q_{di} son tomadas del sistema por la carga (entradas negativas al sistema).
Nodo de voltaje controlado	Nodos con la característica de mantener constante la magnitud del voltaje. En los nodos (P – V) que cuentan con un generador conectado, se puede controlar la generación de MW. Por lo tanto, en cada nodo con generador i , se pueden especificar apropiadamente P_{gi} y $ V_i $. Ciertas barras o nodos sin generadores pueden tener la capacidad de controlar el voltaje; a tales nodos también se les llama nodos de voltaje controlado y la potencia real que generan es cero.
Nodo de compensación	El generador conectado a este nodo se encarga de suministrar las pérdidas de la red. En este nodo, el ángulo del voltaje sirve como referencia para los ángulos de todos los demás voltajes de nodo. Generalmente se le es asignado un ángulo de cero grados ($\delta_i = 0^\circ$) [2] [11].

Tabla 3.1 Características de los distintos tipos de nodos [2].

Tipo de Nodo	Cantidades conocidas	Cantidades desconocidas
Nodo de carga	P_i , Q_i	$ V_i , \delta_i$
Nodo de voltaje controlado	$P_i , V_i $	Q_i , δ_i
Nodo de compensación	$ V_i , \delta_i$	P_i , Q_i

Tabla 3.2 Resumen de cantidades especificadas y por obtener en los distintos nodos [11].

3.3 SOLUCIÓN DE FLUJOS DE POTENCIA MEDIANTE EL MÉTODO DE GAUSS – SEIDEL.

El método de Gauss Seidel resuelve las ecuaciones de flujos de potencia en coordenadas rectangulares (variable compleja) hasta que las diferencias en los voltajes de barra de una iteración a otra son lo suficientemente pequeñas [2].

La complejidad de obtener una solución formal para el flujo de potencia en un sistema eléctrico [2], se debe a las diferencias en el tipo de datos especificados para las diferentes clases de nodos. La metodología para flujos de potencia consiste en un proceso iterativo asignando valores estimados a los voltajes de nodo desconocidos y calcular nuevos valores para cada voltaje de nodo, a partir de los estimados en los otros nodos y de las potencias real y reactiva especificadas. Obteniendo así nuevos valores de voltaje de cada nodo, que serán utilizados para llevar a cabo otro nuevo conjunto de cálculos de voltajes de nodo actualizando el vector solución en cada iteración.

El método de Gauss – Seidel es un algoritmo recursivo que permite resolver sistemas de ecuaciones no lineales. Las ecuaciones de flujos de potencia son de carácter no lineal por lo que es posible aplicar este método para obtener solución de la ecuación (3.3).

De la formulación de flujos de potencia ecuación (3.3):

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{n=1}^N Y_{in} V_n$$

Se elige el nodo de compensación en nodo i [2], comenzando los cálculos a partir del nodo $i + 1$. Al despejar V_i , de la ecuación anterior, se obtiene la ecuación general para el voltaje calculado en cualquier nodo de un sistema de n nodos, donde P_i y Q_i son las potencias real y reactiva programadas. Por lo que, durante el proceso de cualquier iteración, el nuevo voltaje en el i –ésimo nodo es:

$$V_i^{(k)} = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{V_i^{(k)*}} - \sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} V_j^{(k)} - \sum_{j=i+1}^N Y_{ij} V_j^{(k-1)} \right] \quad (3.15)$$

Donde:

k – número de iteración

$(k - 1)$ – número de iteración que le precede

i – número de nodo

N – número de nodos del sistema

El proceso iterativo se repite hasta que el vector solución converja dentro de la tolerancia establecida representada por la letra griega Épsilon (ϵ) y puede tomar valores según la exactitud con que se desea trabajar.

3.4 SOLUCIÓN DE FLUJOS DE POTENCIA MEDIANTE EL MÉTODO DE NEWTON - RAPHSON.

El método de Newton – Raphson resuelve la forma polar de las ecuaciones de flujos de potencia hasta que los errores ΔP y ΔQ en todas las barras estén dentro de los límites especificados [2].

Este método resulta más conveniente que el anterior, pero presenta ciertas dificultades; requiere que se exprese una relación entre los cambios de potencia activa y reactiva, y los cambios en magnitud y ángulo de las tensiones del bus [11].

El método de Newton – Raphson [12] presenta una metodología muy práctica para llevar a cabo la solución del problema de flujos de potencia; muestra una convergencia más rápida y notable desde la primera iteración al obtener valores más cercanos a la raíz, lo cual no se presenta en el método anterior.

Antes de abordar la solución de flujos de potencia utilizando el método de Newton – Raphson, se presenta el desarrollo matemático de este método como se presenta a continuación.

Dado un conjunto de ecuaciones no lineales [14] :

$$\left. \begin{aligned} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_1 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_2 \\ &\vdots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_n \end{aligned} \right\} \quad (3.16)$$

Definiendo a si mismo las estimaciones iniciales $x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0$, y suponiendo que $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ son las correcciones requeridas para $x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0$ respectivamente, de manera que las ecuaciones (3.16) sean representadas para su solución de la siguiente manera:

$$\left. \begin{aligned} f_1(x_1^0 + \Delta x_1, x_2^0 + \Delta x_2, \dots, x_n^0 + \Delta x_n) &= y_1 \\ f_2(x_1^0 + \Delta x_1, x_2^0 + \Delta x_2, \dots, x_n^0 + \Delta x_n) &= y_2 \\ &\vdots \\ f_n(x_1^0 + \Delta x_1, x_2^0 + \Delta x_2, \dots, x_n^0 + \Delta x_n) &= y_n \end{aligned} \right\} \quad (3.17)$$

Cada ecuación de (3.17) puede ser expandida por el teorema de Taylor para una función de dos o más variables, como se muestra (ej. primera ecuación):

$$\begin{aligned} & f_1(x_1^0 + \Delta x_1, x_2^0 + \Delta x_2, \dots, x_n^0 + \Delta x_n) \\ &= f_1(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) + \Delta x_1 \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 + \Delta x_2 \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 + \dots + \Delta x_n \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 + \Phi_1 \end{aligned} \quad (3.18)$$

Donde Φ_1 representa una función de potencias superiores de $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$; y segundas, terceras, etc. derivadas de la función f_1 . Si las estimaciones iniciales para las " x_1 " son cercanas a los valores de solución, las Δx_1 serán relativamente pequeñas y todos los términos de potencias superiores se pueden despreciar. El sistema de ecuaciones resultante es:

$$\left. \begin{aligned} f_1(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) + \Delta x_1 \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 + \Delta x_2 \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 + \dots + \Delta x_n \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 &= y_1 \\ f_2(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) + \Delta x_1 \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \right|_0 + \Delta x_2 \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \right|_0 + \dots + \Delta x_n \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \right|_0 &= y_2 \\ &\vdots \\ f_n(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) + \Delta x_1 \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \right|_0 + \Delta x_2 \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \right|_0 + \dots + \Delta x_n \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \right|_0 &= y_n \end{aligned} \right\} \quad (3.19)$$

Expresando las ecuaciones (3.19) en su forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \\ \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \right|_0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \right|_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 - f_1(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) \\ y_2 - f_2(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) \\ \vdots \\ y_n - f_n(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$\text{O bien, } [J] [C] = [D];$$

Donde:

[J] – jacobiano para las funciones f_i .

[C] – vector de incógnitas Δx_1 .

[D] – vector resultante de la diferencia de valores estimados y evaluados.

Los elementos de las matrices [J] y [D] se evalúan sustituyendo los valores corrientes (actuales) de ' x_i '. Así una solución para ' Δx_i ' se puede obtener mediante la aplicación de cualquier método de solución para ecuaciones lineales.

Los nuevos valores para las ' x_i ' se calculan de la siguiente manera:

$$x'_i = x_i^0 + \Delta x_i \quad (3.21)$$

El proceso se repite hasta que dos valores sucesivos de cada ' x_i ' difieran de acuerdo con una tolerancia (ε) especificada.

Una vez comprendidos los conceptos sobre los que se basa el método de Newton – Raphson se procede a incorporar esta metodología a la solución de flujos de potencia.

Cuando en las ecuaciones (3.7) y (3.8) ' n ' se hace igual a ' i ' y los términos correspondientes se separan de las sumatorias, obteniendo el conjunto siguiente de ecuaciones no lineales, expresando los voltajes de nodo y las admitancias de línea en forma polar [2].

$$P_i = |V_i|^2 G_{ii} + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^N |Y_{in}| |V_i| |V_n| \cos(\delta_n - \delta_i + \theta_{in}) \quad (3.22)$$

$$Q_i = -|V_i|^2 B_{ii} - \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^N |Y_{in}| |V_i| |V_n| \sen(\delta_n - \delta_i + \theta_{in}) \quad (3.23)$$

Por consiguiente, estas ecuaciones se derivan con respecto a los ángulos y las magnitudes de voltaje. Los términos que incluyen G_{ii} y B_{ii} surgen de la definición de Y_{ij} en la ecuación (3.5) en las que el ángulo $(\delta_n - \delta_i) = 0$ cuando $n = i$ [2].

Las ecuaciones de flujos de potencia (3.7) y (3.8) se pueden representar en forma matricial como se muestra a continuación:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} & |V_2| \frac{\partial P_2}{\partial V_2} & \dots & |V_N| \frac{\partial P_2}{\partial V_n} \\ \vdots & J11 & \vdots & \vdots & J12 & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} & |V_2| \frac{\partial P_n}{\partial V_2} & \dots & |V_N| \frac{\partial P_n}{\partial V_n} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} & |V_2| \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} & \dots & |V_N| \frac{\partial Q_2}{\partial V_n} \\ \vdots & J21 & \vdots & \vdots & J22 & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} & |V_2| \frac{\partial Q_n}{\partial V_2} & \dots & |V_N| \frac{\partial Q_n}{\partial V_n} \end{bmatrix}}_{\text{Matriz Jacobiana}} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix}}_{\text{Correcciones}} = \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix}}_{\text{Errores}}$$

En forma simplificada la representación matricial anterior se representa como sigue:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J11 & J12 \\ J21 & J22 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

De la matriz Jacobiana (J) compuesta por las derivadas parciales, se observa que se desprecian los errores y correcciones del nodo de compensación (nodo 1), por lo que se inician los vectores a partir del nodo 2. Para la construcción de la matriz Jacobiana [2], se usa la siguiente formulación:

- Elementos fuera de la diagonal principal $J11$:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i V_j Y_{ij}| \text{sen}(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (3.25)$$

- Elementos de la diagonal principal $J11$:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = - \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^N \frac{\partial P_i}{\partial \delta_n} = -Q_i - |V_i|^2 B_{ii} \quad (3.26)$$

- Elementos fuera de la diagonal principal $J12$:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i V_j Y_{ij}| \text{cos}(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (3.27)$$

- Elementos de la diagonal principal $J12$:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = - \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^N \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_n} = P_i - |V_i|^2 G_{ii} \quad (3.28)$$

- Elementos fuera de la diagonal principal $J21$:

$$|V_j| \frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = - \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} \quad (3.29)$$

- Elementos de la diagonal principal $J21$:

$$|V_i| \frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = + \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} + 2|V_i|^2 G_{ii} \quad (3.30)$$

- Elementos fuera de la diagonal principal $J22$:

$$|V_j| \frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = + \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} \quad (3.31)$$

- Elementos de la diagonal principal $J22$:

$$|V_i| \frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = - \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} - 2|V_i|^2 B_{ii} \quad (3.32)$$

Considerando que todos los nodos son nodos de carga ($P - Q$) [2], es necesario satisfacer las *ecuaciones de error*, mediante la diferencia entre el valor especificado y el valor calculado como:

$$\Delta P_i = P_{i,prog} - P_{i,calc} = (P_{i,g} - P_{i,d}) - P_{i,calc} = 0 \quad (3.33)$$

$$\Delta Q_i = Q_{i,prog} - Q_{i,calc} = (Q_{i,g} - Q_{i,d}) - Q_{i,calc} = 0 \quad (3.34)$$

Para obtener los valores de entrada ($P_{i,calc}$ y $Q_{i,calc}$), se emplean las siguientes ecuaciones (3.22) y (3.23).

Una vez resuelta y obtenidos los valores calculados de la matriz Jacobiana (J) y del vector de errores ($\Delta P, \Delta Q$), se pueden calcular las correcciones ($\Delta \delta, \Delta V$) mediante el producto de la matriz Jacobiana inversa y el vector de errores obteniendo así los nuevos valores de ' x_i ' [2].

$$(3.35)$$

$$\begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix}^{-1} (\text{Vector de Errores}) = (\text{Vector de Correcciones})$$

$$\begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{pmatrix}$$

Finalmente [13], para actualizar los valores de variables de estado, se suman las correcciones encontradas por la iteración $\Delta\delta$ y $\Delta|V_i|$ a los valores iniciales, es decir, durante cada proceso iterativo se actualizan los valores iniciales de las variables de estado. Esto se puede expresar en términos generales mediante la forma:

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta\delta_i^{(k)} \quad (3.36)$$

$$|V_i|^{(k+1)} = |V_i|^{(k)} + \Delta|V_i|^{(k)} = |V_i|^{(k)} \left(1 + \frac{\Delta|V_i|^{(k)}}{|V_i|^{(k)}}\right) \quad (3.37)$$

3.5 CONTROL DE VOLTAJE EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA.

En la operación de sistemas eléctricos de potencia el control de voltaje es una función primordial. El objetivo del control de voltaje es ajustar los voltajes nodales dentro de una banda operativa. Esto hace que la solución del problema sea más compleja, en comparación del control de frecuencia, ya que se presenta un problema multivariable [1].

El análisis de control de voltaje está relacionado con el flujo de potencia reactiva (Q) con el perfil de voltaje del sistema, siendo de gran importancia la localización de fuentes de potencia reactiva y la estructura del sistema de transmisión.

El problema de regulación se presenta en redes eléctricas de alta tensión y casi siempre es relacionada con el control de los flujos de potencia reactiva con el fin de mantener dentro de margen varias de las situaciones que se presenten, como mantener las tensiones de todos los nodos dentro de los valores de límites

establecidos. La solución más conveniente parecería ser aquella de mantener los voltajes constantes e iguales a los valores nominales para cualquier condición de carga. De acuerdo con las políticas de operación, la tensión de los nodos receptores puede admitir variaciones de tensión de hasta $\pm 10\%$ o bien $\pm 5\%$ con respecto a sus valores nominales de tensión [11].

Una vez fijadas las tensiones que permanecerán constantes en los nodos de carga, el problema por resolver es determinar las tensiones existentes en los nodos de generación. Para la solución de dicho problema se admiten diversas soluciones, pero la más acertada y recomendada desde el punto de vista técnico y económico es la solución de sistemas de ecuaciones mediante métodos iterativos de programación, debido a que los cálculos pueden resultar largos, complejos y laboriosos, en especial cuando la red bajo estudio es bastante mallada [11].

En este apartado se presentan los conceptos básicos de control de voltaje que permitirán comprender el comportamiento del voltaje en sistemas eléctricos de potencia. Primeramente, se presenta el efecto de flujo de potencia reactiva en la red de transmisión sobre el perfil de voltaje del sistema, posteriormente se describen las características de los diferentes elementos de control de voltaje.

3.5.1 COMPORTAMIENTO DEL FLUJO DE REACTIVOS PARA EL CONTROL DE VOLTAJE.

Como se mencionó anteriormente, el problema de caídas de tensión es asociado con la circulación de potencia reactiva en líneas de transmisión, la figura 3.2 ilustra dicho flujo de potencia a través del sistema. Hay varios factores dentro de los sistemas de potencia que contribuyen al colapso de tensión, entre ellos el incremento en la carga, la acción de cambio de taps en transformadores, la recuperación de la carga, las caídas de líneas o salidas del generador, entre otras.

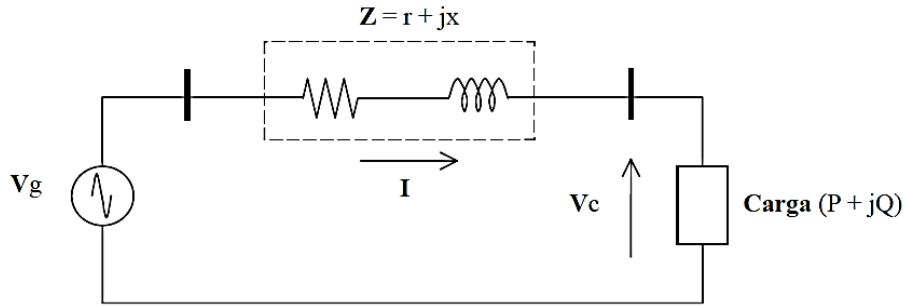


Figura 3.2 Circuito básico de ilustración, circulación de potencia reactiva [1].

El circuito de la Figura 3.2, muestra un generador conectado a una impedancia Z , con una tensión interna constante (V_g) que alimenta una carga de potencia variable $(P + jQ) = S$. Suponiendo dicha carga conectada; solamente consume potencia activa, entonces el diagrama fasorial que relaciona el voltaje de generación (V_g) con el voltaje de carga (V_c) es como se muestra a continuación.

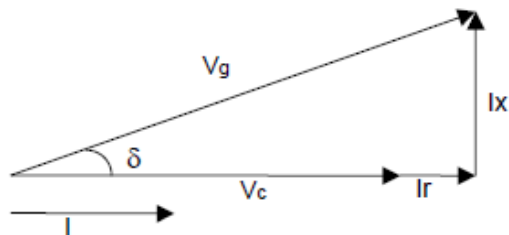


Figura 3.3 Diagrama fasorial del circuito anterior [1].

La ecuación general que describe el voltaje en la carga (V_c), se muestra como sigue:

$$V_c = V_g - ZI \quad (3.38)$$

Por otro lado, la corriente I en la carga se determina en función de la demanda P . La relación entre la corriente y la potencia de carga se expresa en la ecuación (3.39).

$$I = \frac{P}{V_c} \quad (3.39)$$

La relación entre voltajes se obtiene del diagrama fasorial de la Figura 3.3.

$$V_g^2 = (V_c + Ir)^2 + (Ix)^2 \quad (3.40)$$

Sustituyendo I en la ecuación (3.44), se obtiene:

$$V_g^2 = \left(V_c + \frac{P}{V_c} r \right)^2 + \left(\frac{P}{V_c} x \right)^2 \quad (3.41)$$

La ecuación (3.41) muestra que las caídas de tensión en fase y en cuadratura con V_c dependen de los valores de resistencia y reactancia del elemento de transmisión. Como generalmente la relación $\frac{r}{x}$ es pequeña en redes de transmisión, la componente en fase será pequeña $\left(\frac{P}{V_c} r \right)$. Por otro lado, la componente de cuadratura $\left(\frac{P}{V_c} x \right)$ no presenta un cambio significativo en la magnitud de V_c , sólo causa el desfase entre voltajes. De esta forma:

$$P = \frac{V_c V_g}{x} \sin \delta \quad ; \quad \text{'para ángulos pequeños': } \delta = \frac{P}{V_c V_g} x \quad (3.42)$$

Por lo tanto, la caída de voltaje para ángulos pequeños se representa como:

$$V_c - V_g = \Delta V = rI = \frac{P}{V_c} r \quad (3.43)$$

El análisis de las ecuaciones (3.42) y (3.43) muestra que:

- La carga activa afecta en mayor grado el desfase entre voltajes.
- El cambio en la magnitud del voltaje depende del valor de la carga, pero su efecto se reduce debido al valor de la resistencia.

Otro aspecto importante que se debe de tomar en cuenta es que aun cuando la carga no consume potencia reactiva, el generador está aportando reactivos al sistema. La potencia reactiva que se inyecta en el extremo de envío se consume en la reactancia del sistema de transmisión, causando una caída de voltaje (I_x) en cuadratura con el voltaje de carga.

Un caso que ilustra el flujo de reactivos se tiene cuando la carga demanda potencia reactiva inductiva (F.P. atrasado). Lo anterior se puede apreciar en el diagrama fasorial de la Figura 3.4. Analizando el diagrama de la Figura 3.4 se observa que el ángulo entre el voltaje de generación y la corriente es $(\phi + \delta)$, lo que indica que el generador opera con un factor de potencia más atrasado que el de la carga.

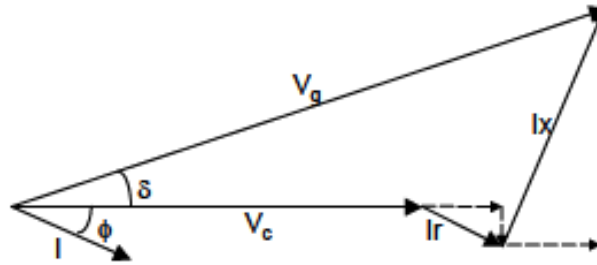


Figura 3.4 Diagrama fasorial para carga con FP atrasado [1].

La relación de voltaje y corriente en la carga es la siguiente:

$$\frac{P}{V_c} = I \cos \phi \quad (3.44)$$

$$\frac{Q}{V_c} = I \sin \phi \quad (3.45)$$

Utilizando las ecuaciones anteriores y el diagrama fasorial de la Figura 3.4, se obtiene la relación entre voltajes como sigue:

$$V_g^2 = [V_c + (I \cos \phi)r + (I \sin \phi)x]^2 + [(I \cos \phi)x - (I \sin \phi)r]^2 \quad (3.46)$$

$$V_g^2 = \left(V_c + \frac{P}{V_c} r + \frac{Q}{V_c} x \right)^2 + \left(\frac{P}{V_c} x - \frac{Q}{V_c} r \right)^2 \quad (3.47)$$

Analizando la ecuación (3.47) y el diagrama fasorial de la Figura 3.4 se observa que la componente en fase con el voltaje de carga es la que tiene mayor efecto en la caída de tensión del punto de generación de la carga.

La ecuación (3.48) muestra que la demanda de potencia reactiva tiene mayor efecto en el cálculo de ΔV debido a que está multiplicada por la reactancia del elemento de transmisión.

$$\Delta V \cong \frac{P}{V_c} r + \frac{Q}{V_c} x \quad (3.48)$$

Comparando los términos de (3.48) se obtiene:

$$\Delta V = \frac{\frac{Q}{V_c} x}{\frac{P}{V_c} r} = \frac{Q}{P} \left(\frac{x}{r} \right) \quad (3.49)$$

De aquí, a medida que la relación $\left(\frac{x}{r} \right)$ (sistemas de transmisión de alta tensión) aumenta y que el factor de potencia difiere más de la unidad, el efecto de la corriente reactiva es mayor en el cambio de voltaje.

Otra condición operativa importante se presenta cuando la carga de la Figura 3.5 sólo consume potencia reactiva inductiva. La relación fasorial para este caso se muestra en la siguiente figura.

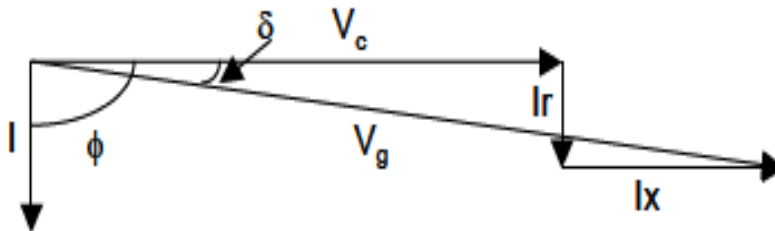


Figura 3.5 Diagrama fasorial para carga reactiva inductiva [1].

Del análisis de las condiciones mostradas en la Figura 3.5, se obtiene:

$$\Delta V = \frac{Q}{V_c} x \quad (3.50)$$

Donde se puede apreciar el impacto que presenta la corriente reactiva en la caída de voltaje, en este caso prácticamente en fase con el voltaje V_c .

3.6 CONTROL DE VOLTAJE LOCAL.

De acuerdo con los conceptos presentados se puede decir que para evitar la degradación del perfil de voltaje es necesario eliminar o reducir el flujo de potencia reactiva en el sistema. Sin embargo, en sistemas reales, las fuentes de reactivos no necesariamente están cerca de la carga, de ahí que se requiere cierto transporte de potencia reactiva.

La primera fase del control de voltaje es tener nodos de voltaje controlado que definan en forma general el perfil de voltaje del sistema. Este control de voltaje es de tipo local y trata de mantener el voltaje de un nodo en un valor especificado. Esto se logra a través de cambios en la excitación de generadores o la conexión continua de reactores o capacitores, en el caso de compensadores estáticos de var (CEV's).

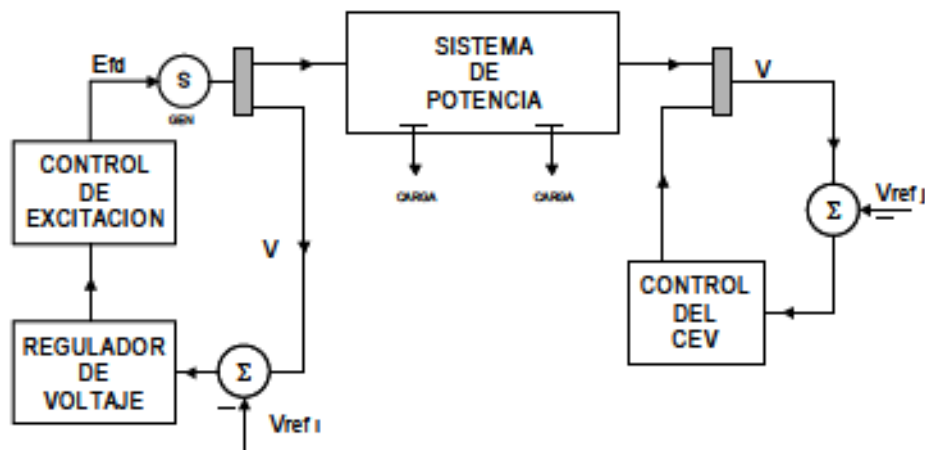


Figura 3.6 Control de voltaje local [1].

Si el esquema de control de la figura anterior es aplicado a diversos puntos del sistema se tendrá la estructura básica que definirá el flujo de los reactivos en la red. Es importante señalar que en estado estable los controles mantendrán el voltaje del nodo controlado en el valor especificado. En cambio, ante perturbaciones, se tendrán cambios en los voltajes y el regreso a los valores especificados dependerá de la respuesta dinámica del sistema de excitación, de la respuesta de control de CEV's y de la inercia electromagnética de generadores.

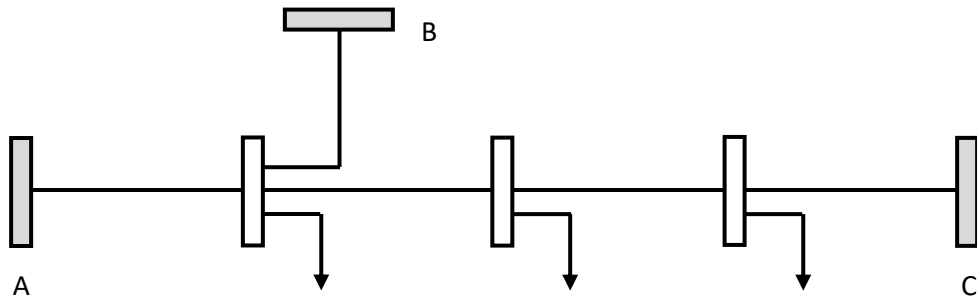


Figura 3.7 Soporte de voltaje mediante control de voltaje local.

La Figura 3.7 muestra de manera esquemática como los nodos de voltaje controlado sirven de referencia (soporte) al perfil del voltaje del sistema. Los nodos A, B y C son nodos de voltaje controlado y se encargan de mantener el nivel de voltaje aportando la potencia reactiva requerida por las cargas del sistema de transmisión.

En los sistemas eléctricos de potencia es muy importante la localización de las fuentes de reactivos, el objetivo en la localización es tratar de lograr un soporte de voltaje adecuado y reducir la transmisión de potencia reactiva a los puntos de carga.

De otro modo, si se cuentan con pocas fuentes de potencia reactiva y estas se encuentran alejadas eléctricamente de la carga, entonces se presentará la degradación del perfil de voltaje debido a la transmisión de reactivos en grandes distancias. Se debe considerar que este problema es acumulativo, ya que al tener mayores diferencias de voltajes a la par se incrementa el consumo de reactivos en los elementos de transmisión; lo que a su vez causa una caída de voltaje mayor.

3.7 BALANCE DE POTENCIA REACTIVA.

En un sistema de potencia los nodos de voltaje controlado actúan como compensadores de potencia reactiva, suministrando los reactivos necesarios de acuerdo a las variaciones de la demanda, para mantener el voltaje especificado.

La aportación de reactivos al sistema dependerá de las fuentes del voltaje de referencia especificado que se está controlando. De esta manera, si se incrementa el voltaje interno del generador como resultado de un cambio en la corriente de campo, se presentará un caso como el que se muestra en el diagrama fasorial de la Figura 3.8.

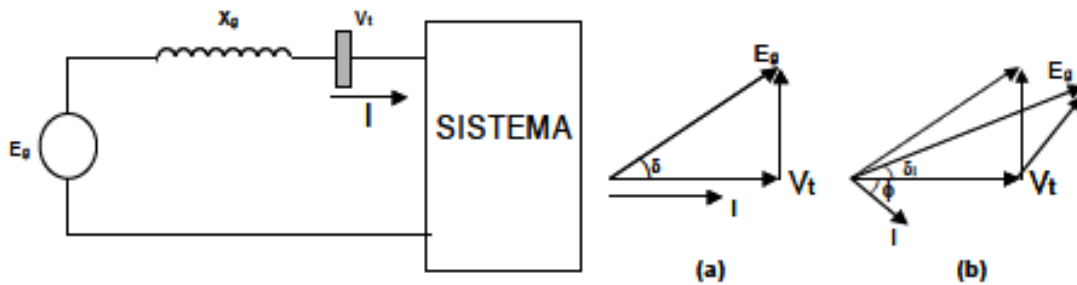


Figura 3.8 Cambios en la excitación del generador [1].

Como se puede observar en la Figura 3.8 a); se presenta la condición antes del cambio; se tiene un factor de potencia unitario en terminales, sin embargo, internamente se presenta una inyección de potencia reactiva (corriente I atrasada con respecto a E_g) que es consumida en la reactancia del generador. Esta es la condición que define el límite entre la sobre y sub excitación de un generador.

En la Figura 3.8 b) se presenta el diagrama fasorial después de un cambio en la demanda de reactivos en el sistema, se mantiene la potencia activa sin cambio alguno y el voltaje terminal constante. A través del sistema de excitación se incrementa la corriente de campo y el voltaje interno de la máquina, y para mantener la potencia activa constante se ajusta el ángulo δ a δ' . Esta relación entre la corriente (I) y el voltaje interno (E_g) es el mecanismo compensador para la potencia reactiva. La inyección de potencia reactiva de la máquina; parte se consume en la reactancia del generador y otra parte se inyecta al sistema. En este caso la máquina está sobreexcitada, ya que suministra los requerimientos internos del generador y los del sistema.

Un análisis similar se puede realizar modificando el voltaje de referencia de un generador, manteniendo el resto de los generadores del sistema sin cambio.

Para ilustrar este comportamiento se utiliza el sistema y el diagrama fasorial de la Figura 3.9.

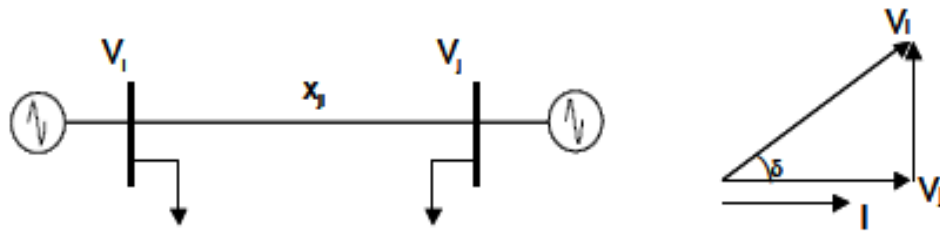


Figura 3.9 Sistema de análisis de efecto de cambios en el voltaje de generación [1].

En el diagrama fasorial de la figura anterior se observa que la máquina i entrega potencia activa y potencia reactiva al sistema, en cambio en el nodo j solamente se recibe potencia activa a través de la línea de transmisión.

Si se incrementa el voltaje V_i y la potencia activa se mantiene sin cambio, entonces se debe ajustar el ángulo δ para mantener la potencia activa (P). Como el denominador en la ecuación (3.52) tiende a crecer, el ángulo δ' debe ser menor que δ . De esta manera, la corriente se debe ajustar en magnitud y fase para cumplir con la potencia activa transmitida y con la relación de voltajes. En este caso la componente de la corriente en fase con el voltaje V_j debe ser la misma que antes del cambio.

$$P = \frac{V_i V_j}{X_{ij}} \sin \delta' \quad (3.51)$$

$$\sin \delta' = \frac{P X_{ij}}{V_i V_j} \quad (3.52)$$

La figura 4.10 muestra que la inyección de potencia reactiva en el nodo i aumenta, ya que crece la magnitud de V_i , la corriente I y el ángulo entre estos fasores. Por otro lado, en el nodo j se recibe potencia reactiva del sistema de transmisión, la cual se consume en la carga o la debe absorber el generador en ese nodo.

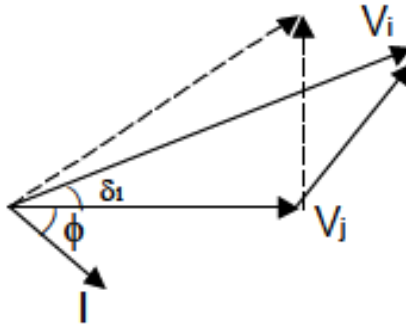


Figura 3.10 Diagrama fasorial para análisis de cambio en el voltaje de V_i [1].

El resultado de modificar el voltaje de generación es un cambio en el flujo de reactivos. Se tendrá un intercambio de potencia reactiva entre generadores y como consecuencia se altera el perfil de voltaje del sistema. La efectividad del cambio dependerá de que se reduzca el flujo de reactivos en las trayectorias de mayor impedancia.

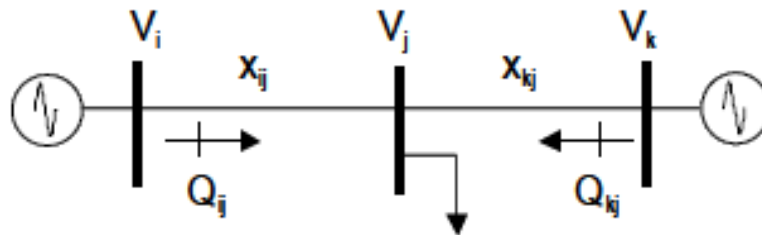


Figura 3.11 Sistema de potencia elemental [1].

En forma natural se tiene la tendencia a suministrar la potencia reactiva requerida por la carga a través de las líneas con menor impedancia. Esto se puede mostrar utilizando las ecuaciones del flujo de potencia reactiva del sistema de la Figura 3.11.

$$Q_{ij} = \frac{V_i}{X_{ij}} (V_i - V_j \cos \delta_{ij}) \quad (3.53)$$

$$Q_{kj} = \frac{V_k}{X_{kj}} (V_k - V_j \cos \delta_{kj}) \quad (3.54)$$

Considerando que los voltajes de generación ($V_i = V_k$) y las diferencias angulares ($\delta_{ij} = \delta_{kj}$) son iguales, entonces:

$$\frac{Q_{ij}}{Q_{kj}} = \frac{X_{kj}}{X_{ij}} \quad (3.55)$$

La ecuación (3.55) muestra que la relación de flujos de reactivos dependerá de las reactancias de las ramas. A medida que la reactancia del elemento de transmisión es mayor, el flujo de reactivos disminuye. La distribución del flujo de reactivos trata de lograr el equilibrio de voltaje en el nodo j , la ecuación (3.55) también se puede escribir en forma aproximada como una caída de voltaje.

$$\Delta V = \frac{Q_{ij}X_{ij}}{V_i} = \frac{Q_{kj}X_{kj}}{V_k} \quad (3.56)$$

Alternativamente se puede decir que, al aumentar la demanda de potencia reactiva en el nodo j , esta se obtendrá en mayor proporción de la fuente de reactivos más cercana eléctricamente a la carga, de tal manera que se tenga la menor desviación de voltaje en el nodo j .

Un análisis interesante es la evaluación del efecto de incrementar el voltaje en la fuente de reactivos más alejada de la carga. En este caso, el control opuesto a la tendencia natural, ya que se estaría forzando un flujo de reactivos a través de una trayectoria de alta impedancia. La conclusión es que esta acción no es efectiva, ya que el incremento en la aportación de reactivos en la fuente se consumirá en la reactancia de la línea de transmisión.

La acción de control recomendada sería modificar el voltaje de la fuente de reactivos más cercana a la carga, de tal manera que se aumente el flujo por la trayectoria con menor impedancia y al mismo tiempo descargar las trayectorias de alta impedancia.

3.7.1 INYECCIONES DE POTENCIA REACTIVA.

Hasta el momento sólo se han considerado fuentes de reactivos como nodos de voltaje controlado. Se suelen presentar casos en los que se pueden tener elementos pasivos que consumen o generan potencia reactiva en función del voltaje del punto

donde se conectan. En cualquier situación, la idea primordial es la misma, la fuente variable de reactivos suministrará las necesidades de potencia reactiva en nodos cercanos, tratando así de evitar el viaje de potencia reactiva desde puntos alejados.

Este es el caso de reactores y capacitores, que alteran el balance nodal de potencia reactiva y causan cambios en la distribución de flujos reactivos, en la generación de potencia reactiva en nodos de voltaje controlado y como consecuencia en el perfil de voltaje del sistema.

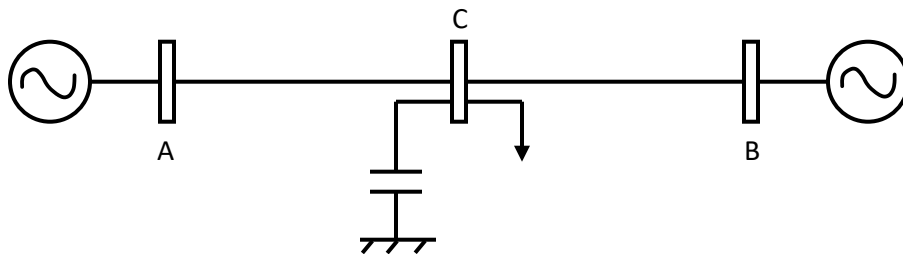


Figura 3.12 Inyección de potencia reactiva en nodo de carga [1].

En la figura 3.12 se ilustra que la demanda de reactivos de la carga será suministrada parcialmente por el capacitor en el punto de carga, y sólo la diferencia en su caso, deberá obtenerse de los generadores. De la ecuación (3.56), se concluye que al reducir el flujo de reactivos; se mejorará el voltaje del nodo de carga.

Si en cada punto del sistema se logra el balance de potencia reactiva (se genera o se consume lo necesario), se tendrá un perfil plano de voltaje, con pequeñas variaciones debidas a la caída por efecto de resistencia de la línea de transmisión.

3.8 COORDINACIÓN DE CAMBIOS.

En el problema del control de voltaje es muy importante seleccionar los voltajes de referencia en los nodos de voltaje controlado, de tal manera que se mantenga un perfil de voltaje lo más uniforme posible.

Esta acción de coordinación se realiza para tratar de mantener cierto nivel de reserva de potencia reactiva, o bien para minimizar el flujo de reactivos en el

sistema. En sí, este es un proceso de optimización, el cual trata de lograr un perfil de voltaje dentro de un rango operativo y al mismo tiempo obtener la mejor reserva de reactivos posibles.

Por otro lado, siendo el control de voltaje un problema de naturaleza local, es posible formular varios problemas de control de acuerdo a la estructura del sistema. Esto se basa en que la acción de controles sólo será efectiva si se realiza en puntos cercanos a los nodos con problemas de voltaje.

Para simplificar el problema, en cada subsistema se puede seleccionar un nodo que servirá como nodo indicador de nivel de voltaje en el subsistema. El objetivo en este caso es determinar la acción de control más acertada para mantener el voltaje en este nodo dentro de los márgenes operativos seleccionados.

3.9 FLUJOS DE POTENCIA REACTIVA – PÉRDIDAS ACTIVAS.

Previamente se presentó la relación entre el flujo de potencia reactiva y la caída de voltaje. Ahora se tratará de asociar el flujo de reactivos con las pérdidas de potencia activa. El análisis de lo anterior se considera en la Figura 3.13.

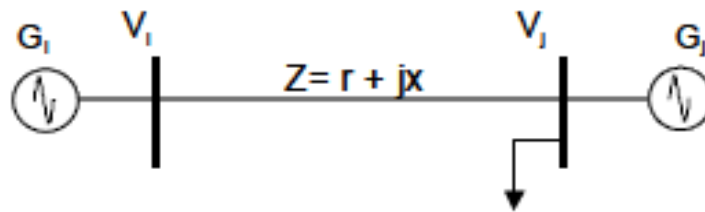


Figura 3.13 Circuito de análisis de pérdidas de transmisión [1].

Se considera que por la línea de transmisión (nodo j) se recibe la potencia activa P y cero potencia reactiva Q . Los nodos i y j son nodos de voltaje controlado. El diagrama fasorial correspondiente al circuito anterior se muestra a continuación en la Figura 3.14.

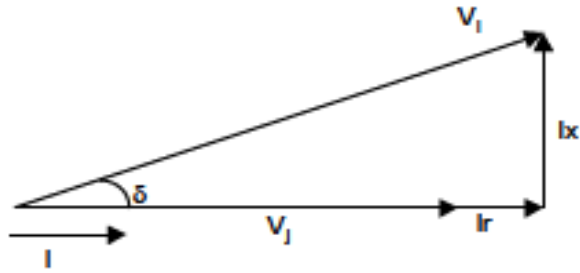


Figura 3.14 Diagrama fasorial de caso muestra (Circuito Figura 3.13) [1].

Si se incrementa el voltaje en V_i y la potencia activa de la carga y el voltaje V_j se mantienen constantes, se alterarán la distribución de reactivos en el sistema y por consiguiente la corriente. La Figura 3.15 ilustra el diagrama fasorial si se presenta cambio en el voltaje.

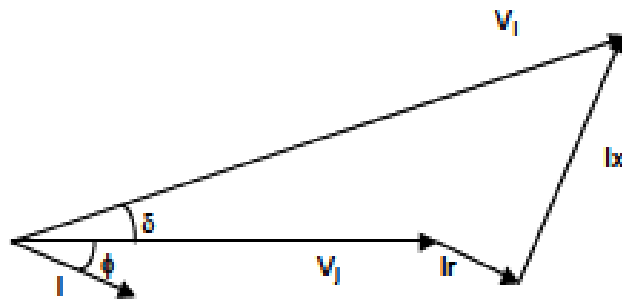


Figura 3.15 Diagrama fasorial con efecto del cambio de voltaje en V_i [1].

El análisis de la figura 3.15 indica que la magnitud de la corriente debe crecer para mantener la misma componente de corriente en fase con V_j , esto para cumplir con la restricción de potencia activa. Al tener una corriente mayor se incrementan las pérdidas de la potencia (I^2r).

En este caso, las pérdidas activas las proporcionará el generador G_i , ya que el generador G_j tiene una aportación fija de potencia activa a la carga. El balance nodal en este caso es el siguiente:

$$P_{carga} = P_{Gj} + P_{línea} \quad (3.57)$$

En cuanto a la potencia reactiva, ahora en el nodo j se recibe potencia reactiva, la cual se consumirá en la carga o se tendrá que absorber en el generador

G_j . Por otra parte, si el voltaje V_i se reduce, se tendrá la situación que muestra el diagrama fasorial de la Figura 3.16.

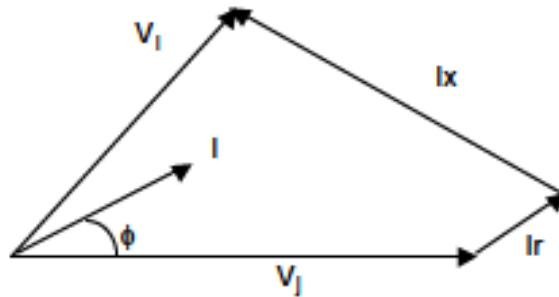


Figura 3.16 Diagrama fasorial de efecto de la reducción de voltaje V_i [1].

En este caso, nuevamente la magnitud de la corriente aumenta para mantener la restricción de potencia activa y las relaciones de voltaje, produciendo así un incremento en las pérdidas de potencia activa.

La expresión analítica de las pérdidas activas (P_p) se pueden obtener sumando el flujo de potencia activa de 'i' a 'j' y de 'j' a 'i', teniendo como resultado la siguiente ecuación:

$$P_p = \frac{r}{r^2 + x^2} (V_i^2 + V_j^2 - V_i V_j \cos \delta_{ij}) \quad (3.58)$$

Si sólo se considera a V_i como variable, la condición de pérdidas mínimas se obtiene derivando (3.59) con respecto a V_i e igualando a cero.

$$\frac{dP_p}{dV_i} = \frac{r}{r^2 + x^2} (2V_i - 2V_j \cos \delta_{ij}) = 0 \quad (3.59)$$

Simplificando se obtiene:

$$V_i = V_j \cos \delta_{ij} \quad (3.60)$$

De (3.60) se concluye que, para diferencias angulares pequeñas, las pérdidas se minimizan cuando las magnitudes de voltajes son iguales.

En un caso general, se puede decir que con un perfil uniforme de voltaje se reduce el flujo de reactivos y como consecuencia se minimizan las pérdidas de potencia activa en la transmisión. Esto es una justificación adicional para tratar de mantener los voltajes del sistema dentro de una banda operativa. En este caso, la implicación es económica, ya que se debe generar más potencia activa para suministrar la misma carga activa.

3.9.1 MARGEN DE POTENCIA REACTIVA.

Uno de los aspectos importantes a considerar cuando se realizan cambios en los voltajes de las fuentes de reactivos, es la reserva de potencia reactiva disponible en cada nodo controlado.

Aquí, lo importante es tener siempre disponible potencia reactiva para contrarrestar los cambios normales de carga o cambios en el sistema de transmisión ocasionados por contingencias. Si como resultado de las acciones de control, tratando de mejorar el perfil de voltaje, se reduce la reserva de reactivos en una zona, el riesgo que se corre es la pérdida de control de voltaje en esa parte del sistema al no disponer de soporte de reactivos necesarios ante posibles cambios.

Por lo antes mencionado, se debe tener potencia reactiva disponible lo más cerca eléctricamente disponible de la demanda, de esta forma, el concepto de reserva sólo tiene significado en forma local. En el caso de una reserva de reactivos remota, se tendrá la circulación de potencia reactiva en grandes distancias, y como consecuencia, la degradación del perfil de voltaje.

La coordinación de voltajes en un sistema eléctrico debe involucrar criterios preventivos de seguridad, siempre será necesario estar delante del sistema, con la finalidad de anticipar cambios posibles en la distribución de reactivos.

3.10 ELEMENTOS QUE INTERVIENEN EN LA COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA.

A medida que crecieron los sistemas eléctricos, fue necesaria la compensación de la carga, primero con capacitores en derivación. Con el empleo de niveles de tensión más elevados, fue necesario para balancear el uso de potencia reactiva, introducir reactores en derivación en las líneas de transmisión e instalación de condensadores.

Mientras que la potencia activa debe transmitirse desde los generadores a las cargas, la potencia reactiva no debería circular a través de largas distancias, ya que esto implica mayores caídas de voltaje en el sistema; esto provoca que se complique el control de este, mayores pérdidas; debido a corrientes altas, esto implica mayores costos y utilización innecesaria de la capacidad térmica de los equipos. Para evitar la circulación de potencia reactiva a través de las líneas de transmisión y controlar de mejor manera el voltaje, se hace uso de equipos de compensación reactiva.

En esta sección se abordarán aspectos de los siguientes elementos que intervienen en la compensación de potencia reactiva en los sistemas eléctricos; reactores en derivación, capacitores en derivación compensación en serie y compensadores estáticos de VAR (CEV's).

3.11 ELEMENTOS DE COMPENSACIÓN Y SUS FUNCIONES.

La compensación de reactivos se requiere para:

- a) Controlar el flujo de potencia reactiva
- b) Controlar el voltaje
- c) Mejorar la estabilidad del sistema eléctrico.

Los elementos de compensación se pueden clasificar como pasivos y dinámicos. La tabla 3.3 resume los diferentes elementos de compensación reactiva y sus funciones. Los primeros tres elementos son elementos compensadores pasivos;

consisten en susceptancias fijas. Los condensadores síncronos y los compensadores estáticos de VAR (CEV's) son de tipo dinámico, ya que ajustan de manera continua su salida de reactivos.

ELEMENTO DE COMPENSACIÓN	FUNCIONES
Capacitores en derivación.	<ul style="list-style-type: none"> - Control de voltaje en régimen permanente. - Control de flujo de potencia reactiva.
Reactores en derivación.	<ul style="list-style-type: none"> - Control de voltaje en estado estable. - Control de flujo de potencia reactiva. - Reducción de sobrevoltajes transitorios por maniobra.
Capacitores en serie.	<ul style="list-style-type: none"> - Transferencia y estabilización de potencia. - Control del flujo de potencia reactiva.
Condensadores síncronos.	<ul style="list-style-type: none"> - Control de voltaje en régimen permanente y dinámico. - Control del flujo de potencia reactiva.
Compensador estático de VAR (CEV's).	<ul style="list-style-type: none"> - Control de voltaje en estado estable y dinámico. - Control del flujo de potencia reactiva. - Transferencia y estabilización de potencia.

Tabla 3.3 Diferentes elementos de compensación reactiva y sus funciones.

Las necesidades específicas de compensación de las redes de transmisión se resumen en la tabla 3.4. Para cualquier función dada, se debe realizar un estudio costo – beneficio para recoger el esquema que satisfaga las necesidades del sistema al menor costo.

Control de flujo de potencia reactiva en régimen permanente para:
<ul style="list-style-type: none"> - Minimizar pérdidas excesivas del sistema. - Mantener el perfil de voltaje deseado en la red de transmisión.
Control de variaciones de voltaje causadas por:
<ul style="list-style-type: none"> - Ciclo diario de demanda. - Cargas de impacto repetitivo tales como hornos de arco. - Oscilaciones de flujos de potencia. - Variaciones dinámicas de P y Q en convertidor HVDC. - Rechazo de carga.

Tabla 3.4 Funciones realizadas con compensación de potencia reactiva.

3.11.1 REACTORES EN DERIVACIÓN.

Los reactores en derivación representan el medio más económico y atractivo para compensar los excedentes de reactivos de líneas de transmisión cuando estas presentan cargas bajas [1].

Son utilizados principalmente como un medio de control en estado estable para los voltajes nodales del sistema durante condiciones de demanda baja, cuando los efectos capacitivos de las líneas de transmisión son excesivos como para requerir ser compensados por el mismo sistema [15].

Los reactores en derivación se pueden conectar directamente a las líneas de transmisión, en barras de subestaciones o en las terminales del devanado terciario de un transformador; como se muestra en la Figura 3.17.

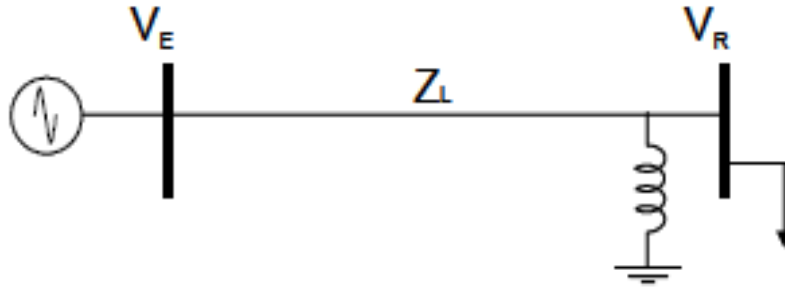


Figura 3.17 Sistema con reactor conectado en línea de transmisión [1].

La conexión de los reactores puede ser permanente (mediante cuchillas) o desconectable (mediante interruptores). Los reactores conectados en terminales terciarias de transformadores son generalmente desconectables. Los reactores conectados directamente a las líneas de transmisión por lo regular permanecen fijos; formando parte de las características de la misma línea, el inconveniente que se presenta es que, en cargas altas los reactores degradan la cargabilidad de las líneas de transmisión provocando voltajes transitorios de recuperación de graves características, los cuales requieren de un estudio detallado de transitorios por maniobra [15].

Para un reactor, el cual se utiliza cuando las líneas presentan una elevación de voltaje creciente desde el extremo de envío; hacia el extremo opuesto (de recepción) cuando operan flujos bajos, se representa mediante la siguiente expresión:

$$Q = \frac{|V|^2}{X_L} = \frac{|V|^2}{2\pi f L} \quad (3.61)$$

La potencia reactiva que consume un reactor varía proporcionalmente con el cuadrado del voltaje de operación e inversamente con la frecuencia. La figura 3.18 muestra el comportamiento de la potencia reactiva de un reactor, considerando una frecuencia constante, se observa que a medida que el voltaje va aumentando, el consumo de potencia reactiva va creciendo.

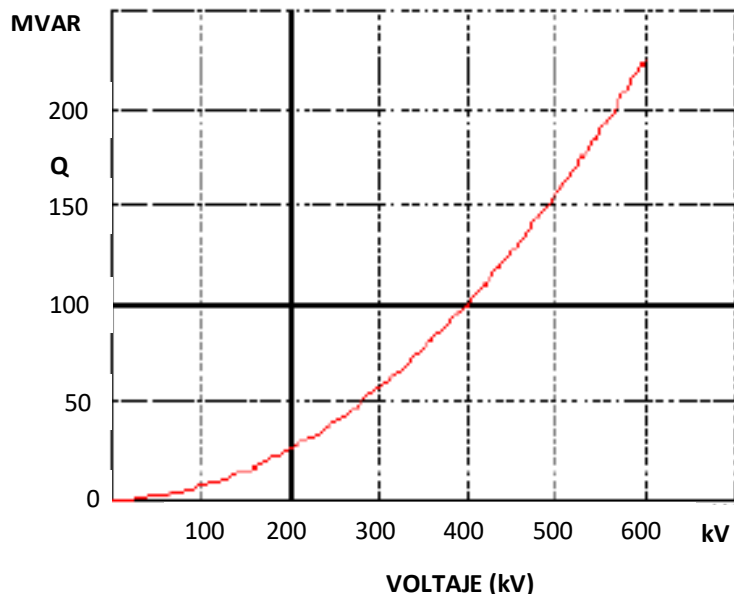


Figura 3.18 Comportamiento de la potencia reactiva de un reactor [1].

El comportamiento del perfil de voltaje del nodo de recepción al pasar de una condición de operación con carga mínima hasta una condición con carga máxima del sistema de la Figura 3.17 puede ser observada en la imagen 3.19.

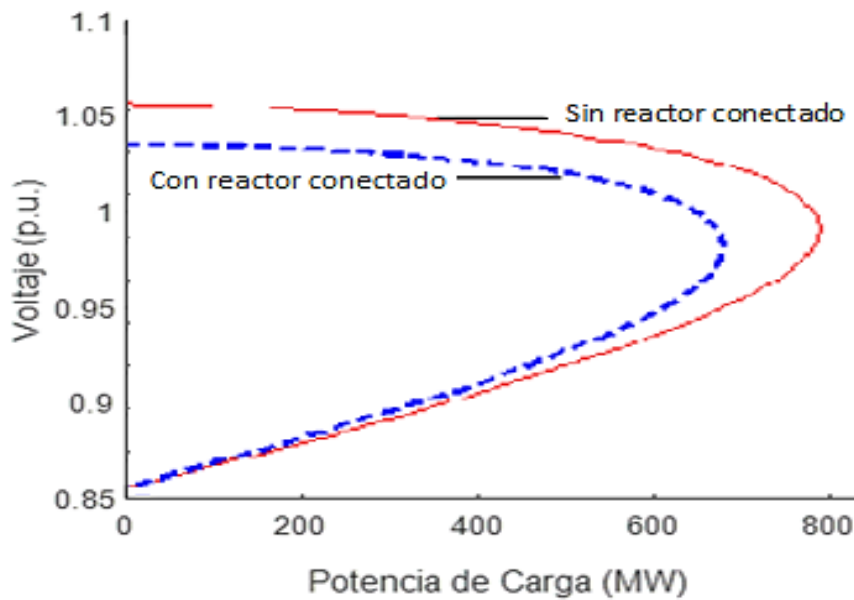


Figura 3.19 Perfil de voltaje de sistema eléctrico [1].

En la figura anterior se puede observar que, para condiciones de operación de demanda mínima, el voltaje en el extremo de recepción está por encima de 1 p.u. lo que nos indica que se tiene un exceso de potencia reactiva en la red, la cual tendrá que ser absorbida por un elemento. Si se instala un reactor en el extremo de recepción, se puede observar que en condiciones de demanda mínima el sobrevoltaje sería menor, pero en caso contrario (demanda máxima), se tendría una magnitud de voltaje crítica.

3.11.2 CAPACITORES EN DERIVACIÓN.

En sistemas eléctricos de potencia con configuración longitudinal o radial, los capacitores en derivación representan el elemento de compensación más utilizado para incrementar la cargabilidad de redes de transmisión y subtransmisión que alimentan cargas alejadas de los centros de generación. Este tipo de dispositivos constituyen el medio más idóneo, tanto desde un punto de vista técnico como económico y flexible de soporte de voltaje, en especial durante periodos de demanda alta [1] [15].

Su conexión / desconexión se lleva a cabo a través de interruptores que pueden ser controlados de forma manual o automáticamente. El control automático debe actuar en respuesta a los cambios en el voltaje de la barra a la cual se conecta, por sobrecarga en transformadores que provoquen caídas de voltaje o simplemente en respuesta a los cambios horarios durante el día. La Figura 3.20 muestra la conexión de banco de capacitores en derivación en la línea de transmisión [15].

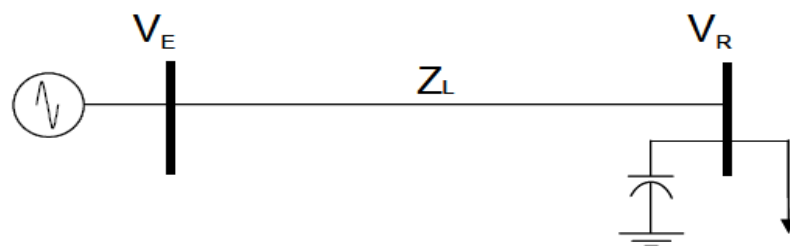


Figura 3.20 Sistema eléctrico con banco de capacitores en derivación [1].

Dependiendo de los niveles de demanda y de la red de transmisión, es posible que el voltaje en la zona de carga se abata tanto que sea necesario utilizar generación local para liberar capacidad de transmisión en las líneas de transmisión. Este fenómeno está asociado a la demanda cambiante en el sistema a lo largo del día, y al crecer ésta, la magnitud del voltaje en el extremo de recepción se reduce, lo que ocasiona un incremento en la corriente [1].

Para tratar de mantener un perfil de voltaje adecuado, antes de la compensación, es necesario que el extremo generador envíe potencia reactiva a través de la línea de transmisión, lo cual requiere de una mayor corriente y esto a su vez provoca una mayor caída de tensión. Esta compensación de potencia reactiva capacitiva en derivación se refiere esencialmente a la inyección de potencia reactiva en el nodo de recepción de una línea de transmisión, por medio de un banco de capacitores [1].

De esta manera, la potencia reactiva que aporta la fuente no será necesaria y evita el envío de esta a través de la línea de transmisión. Además, es importante observar que normalmente la inyección de potencia reactiva en el nodo de recepción es necesaria solamente en condiciones de alta demanda, ya que en el caso de existir una condición de baja demanda puede presentarse un excedente de potencia reactiva.

Un modelo típico de simulación de un capacitor es el modelo pasivo con un valor de impedancia fijo. Para un capacitor la potencia reactiva está dada por:

$$Q = -|V|^2 X_c = -|V|^2 2 \pi f C \quad (3.62)$$

En donde la dependencia de la potencia reactiva es proporcional al cuadrado del voltaje y a la frecuencia de operación del sistema.

La Figura 3.21 muestra el comportamiento de la potencia reactiva de un banco de capacitores en derivación en función del voltaje considerando la frecuencia constante.

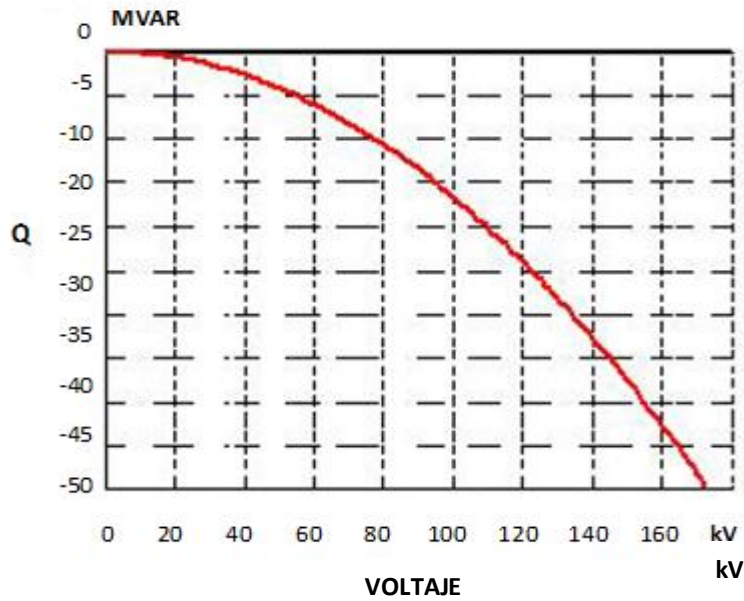


Figura 3.21 Comportamiento de la potencia reactiva en un capacitor [1].

Una característica poco deseable del capacitor, es que a medida que el voltaje se va disminuyendo, la inyección de potencia reactiva de igual manera disminuye, esto se puede apreciar gráficamente en la Figura 3.21, al reducirse el voltaje, nuevamente reduce su magnitud, generándose así un bucle que puede acelerar un problema de colapso de voltaje [1].

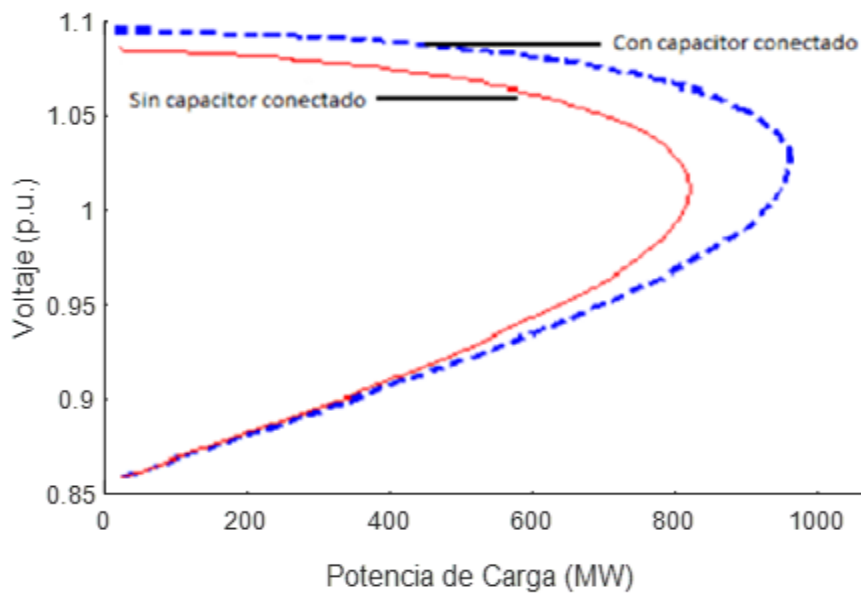


Figura 3.22 Perfil de voltaje [1].

En la figura 3.22; para la condición de operación de demanda máxima sin capacitor, se observa cómo la falta de potencia reactiva degrada el voltaje en el nodo de recepción y cómo se incrementan las pérdidas, debido al incremento en la corriente para satisfacer la demanda con un voltaje bajo. Al instalar un banco de capacitores en el extremo de recepción, se puede observar que en condiciones de demanda mínima el voltaje sería mayor, pero en condiciones de demanda máxima se mejoraría la magnitud del voltaje [1].

3.11.3 CAPACITORES EN SERIE (COMPENSACIÓN SERIE).

La transmisión de potencia eléctrica a través de líneas de transmisión en un sistema eléctrico presenta ciertos factores que limitan la transmisión de energía (caídas de voltaje, problemas de estabilidad y los efectos térmicos de los conductores) [1].

La compensación serie consta de capacitores conectados en serie con la línea de transmisión, tienen como objetivo incrementar la capacidad de transmisión de potencia reduciendo la impedancia serie equivalente de la línea, actuando como un medio de compensación de la reactancia serie de tipo inductivo en las líneas de transmisión, esto ayuda a mejorar el margen de estabilidad ante fenómenos transitorios [1] [15].

Su aplicación en sistemas de alta y extra alta tensión se limita a líneas largas que necesitan compensar su reactancia para lograr un incremento en su capacidad de transmisión, y cuando sea necesario incrementar los límites de estabilidad transitoria y de estado estable [15].

Un alto grado de compensación con capacitores en serie, acentúa ciertos tipos de problemas inherentes a su operación, por ejemplo, problemas en relevadores de protección y en los perfiles de voltaje durante las fallas. En algunas configuraciones de líneas largas la compensación serie capacitiva puede causar resonancia subsíncrona, lo cual a su vez puede provocar severas fallas en las flechas de turbinas y generadores [1] [15].

A diferencia de la compensación en derivación de bancos de capacitores o reactores [1] que utilizan el valor de la potencia, en la compensación serie se requiere como parámetro importante el porcentaje de la reactancia inductiva que se desean compensar. La reactancia serie es la principal limitante de la máxima transferencia de potencia que puede tenerse en una línea de transmisión, dicha transferencia de potencia está dada por:

$$P_{12} = \frac{V_1 V_2}{X_L} \sin \delta_{12} \quad (3.63)$$

La potencia máxima transmitida puede ser incrementada, aumentando los valores de V_1 , V_2 o bien, disminuyendo el valor neto de X_L con un capacitor en serie sobre la línea. Lo anterior se ilustra en la Figura 3.23.

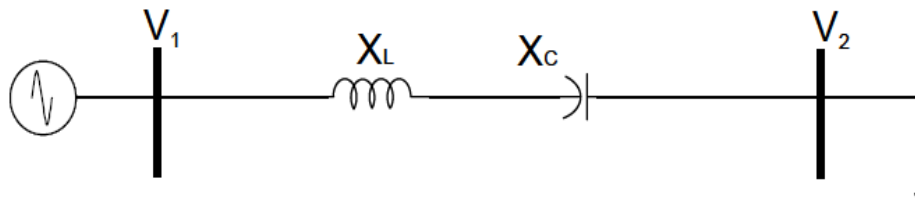


Figura 3.23 Línea de transmisión con compensación serie (capacitores en serie) [1].

Para este caso, la potencia activa transmitida será:

$$P_{12} = \frac{V_1 V_2}{X_L - X_C} \sin \delta_{12} \quad (3.64)$$

Si se aplica una compensación serie al sistema, el perfil de voltaje presentará una característica más plana. En la Figura 3.24, se pueden observar dichas características; mostrando los casos con compensación serie y sin compensación serie. También se observa que aumenta el límite de transferencia de potencia.

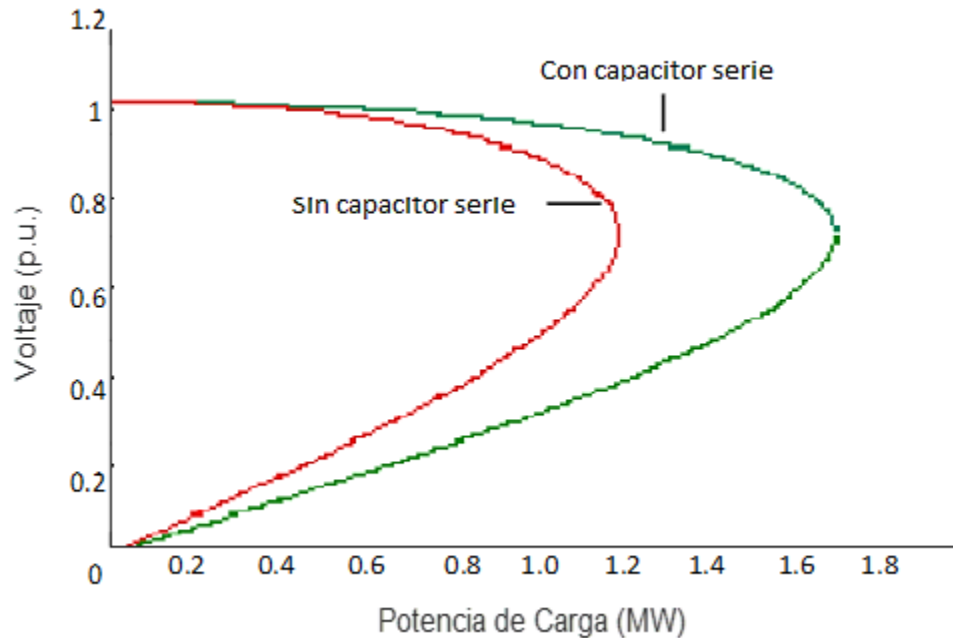


Figura 3.24 Perfil de voltaje – compensación serie [1].

Para mostrar la forma en que se incrementa la potencia transmitida mediante la inserción de un banco de capacitores en serie con la línea de transmisión, se presenta a continuación un ejemplo.

EJEMPLO 1.

Se considera un sistema radial sin compensación serie, que presenta las siguientes condiciones como se muestra en la Figura 3.25 [1]. Se solicita realizar la compensación de la línea de transmisión a un 60% con la misma diferencia angular.

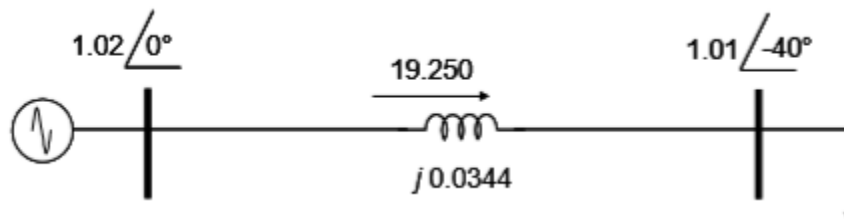


Figura 3.25 Sistema radial sin compensación serie [1].

La figura 3.25 muestra un sistema de dos nodos con una línea de transmisión conectada ellos, con una reactancia inductiva de $j0.0344\Omega$ y una potencia activa de 19.25 W, la cual puede ser calculada mediante métodos de solución de flujos de

potencia. Se pide realizar una compensación del 60% añadiendo un banco de capacitores en serie con la línea de transmisión.

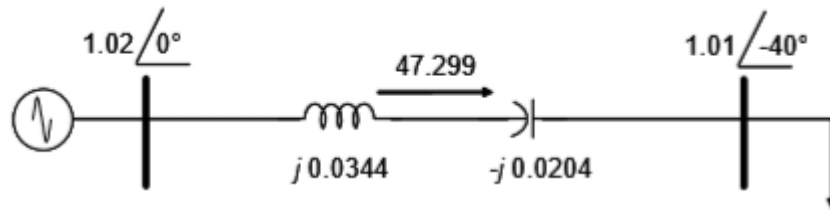


Figura 3.26 Sistema radial con compensación serie [1].

La Figura 3.26 muestra el mismo sistema de la Figura 3.25, pero ahora con la compensación en un 60% mediante banco de capacitores en la línea de transmisión. Para saber el valor del banco de capacitores a utilizar, se obtiene el 60% de la reactancia de la línea de transmisión que nos da un valor de $-j0.0204\Omega$, ahora con este nuevo sistema que se tiene, es posible calcular la potencia que circula a través del sistema, del cual se obtiene un valor de 47.299 W.

En la Figura 3.27 se muestra el comportamiento P – Q para la línea de transmisión presentada en el sistema anterior. Se puede apreciar que se presenta el comportamiento de la línea sin compensación y con compensación al 60%.

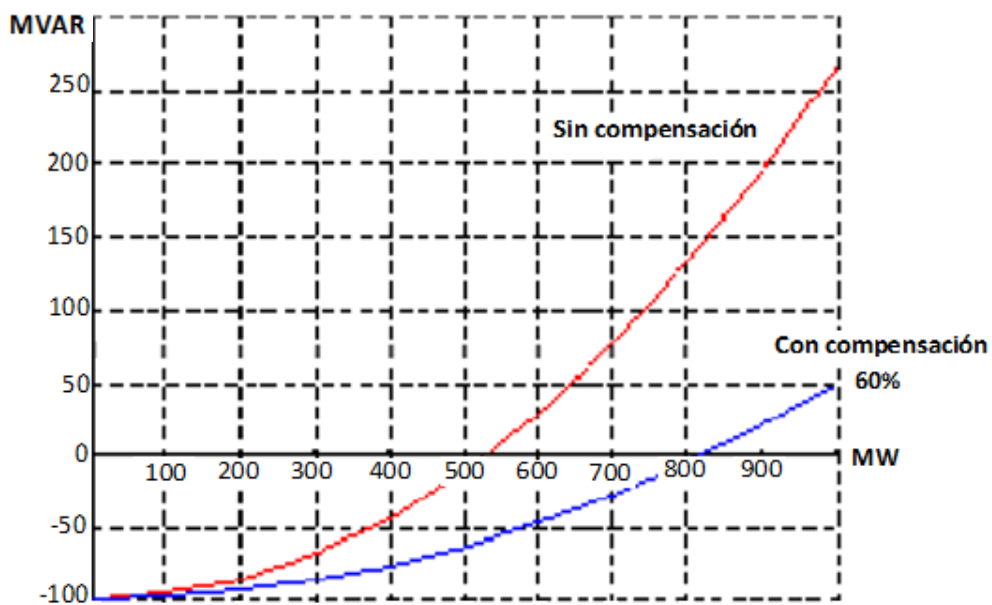


Figura 3.27 Curva P – Q referente al Ejemplo 1 [1].

La potencia natural (SIL) de la línea de transmisión muestra un incremento al realizar la compensación serie, lo que implica un incremento en la capacidad de transmisión esta. Un beneficio más que otorga la compensación serie es el aumento en el margen y el límite de estabilidad en estado estable.

El margen de estabilidad en estado estable (ME) se define como la diferencia entre la potencia máxima ($P_{m\acute{a}x}$) que teóricamente se puede transmitir y el nivel de operación (P_{op}).

$$ME\% = \frac{(P_{m\acute{a}x} - P_{op})}{P_{m\acute{a}x}} * 100 \quad (3.65)$$

La Figura 3.28 muestra gráficamente el concepto de margen de estabilidad de estado estable.

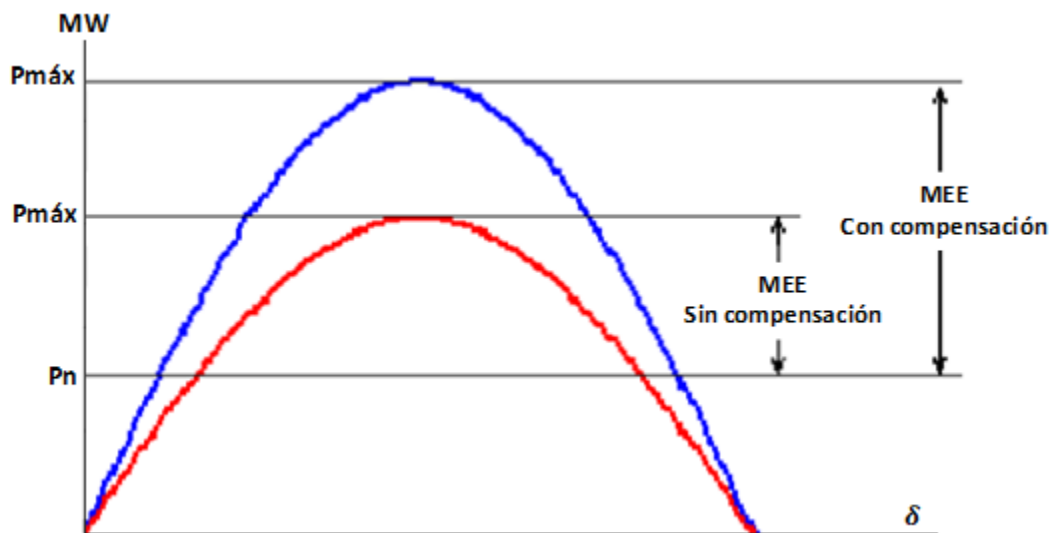


Figura 3.28 Incremento en el ME% al conectar un capacitor en serie [1].

En la Figura 3.29 se pueden observar los diferentes tipos de compensación, capacitiva en derivación y compensación serie mediante sus curvas características.

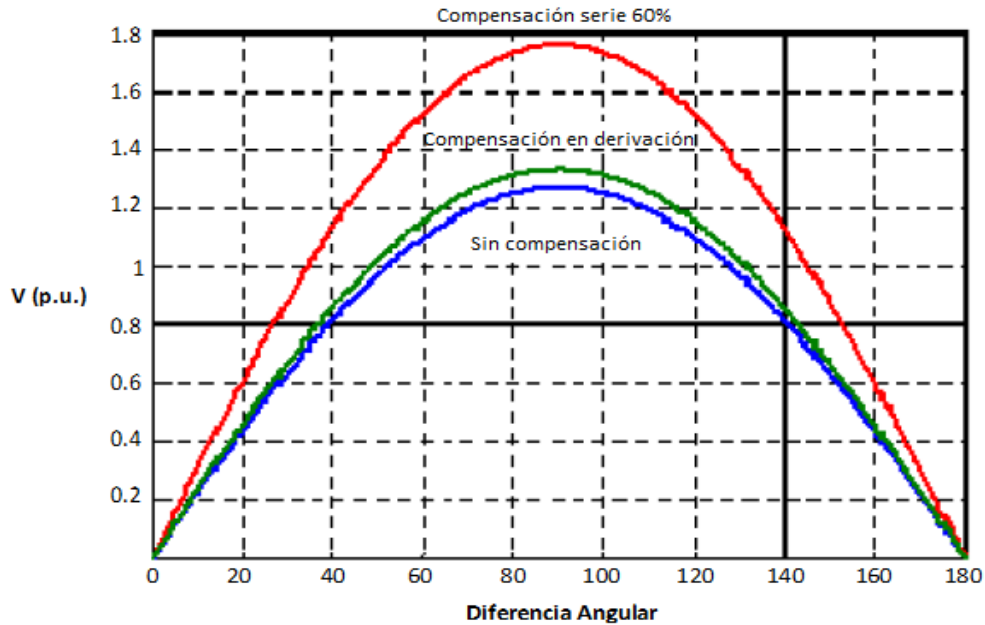


Figura 3.29 Curvas características de transferencia de potencia [1].

De igual manera como con el comportamiento de la máxima transferencia de potencia en el sistema a analizar, se puede obtener el comportamiento del perfil de voltaje para las distintas formas de compensación a analizar. La figura 3.30 muestra a continuación los perfiles de voltaje para dichos análisis.

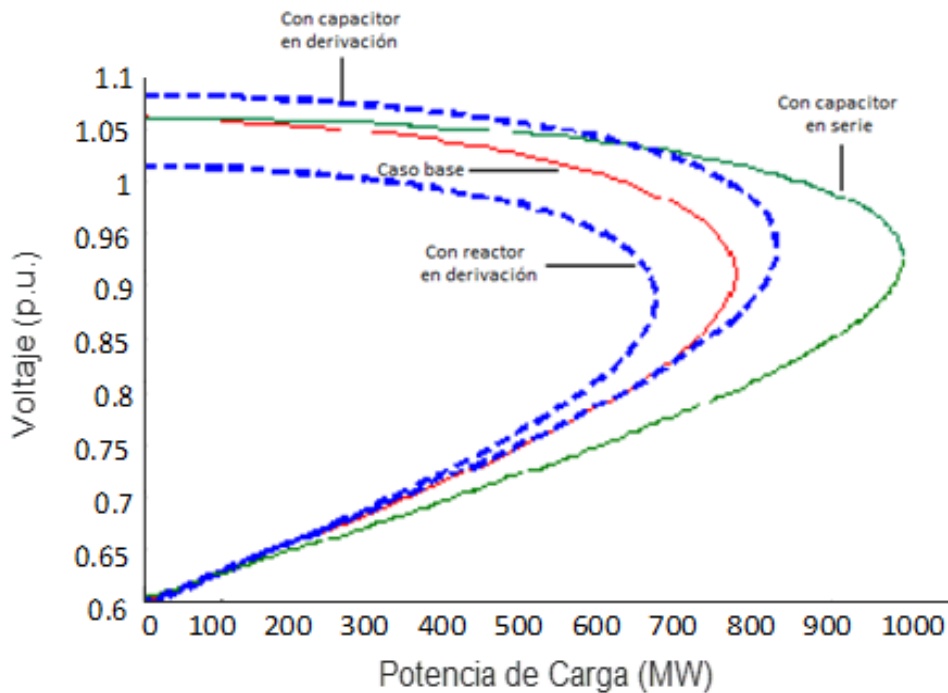


Figura 3.30 Perfil de voltaje [1].

3.11.4 COMPENSADOR ESTÁTICO DE VAR (CEV'S).

Los compensadores estáticos de var (CEV's) son dispositivos muy rápidos en su operación y muy adecuados para manejar la estabilidad del sistema con la capacidad de regular su absorción o generación de potencia reactiva, modificando su susceptancia, para controlar el perfil de voltaje de un nodo en específico, el cual es ajustable y se logra gracias a la conexión y desconexión de reactores y capacitores en paralelo por medio del encendido y apagado de tiristores de potencia.

Las funciones más relevantes de la aplicación de CEV's en sistemas eléctricos son:

- Mejoran y/o incrementan
Cargabilidad de líneas de transmisión.
Perfil de voltaje, manteniéndolo constante.
La estabilidad transitoria y dinámica.
- Reducen y eliminan
Oscilaciones propias del sistema eléctrico de potencia.
Flujos de potencia reactiva, inductiva y capacitiva.
Flujos en bucle (anillo, mallado, que puede ser alimentado por dos puntos) en redes de transmisión y/o distribución muy mallados.
Amortiguamiento de oscilaciones.

3.11.4.1 CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN DEL COMPENSADOR ESTÁTICO DE VAR.

La característica de control de voltaje en estado estable de un compensador estático puede ser definida en forma total mediante su curva de operación, dicha curva característica consta de 3 zonas o rangos de control:

- a) Zona lineal de operación, definida por el esquema de control del compensador. El voltaje en terminales del CEV es regulado entre el límite mínimo ($V_{t_{min}}$) y el límite máximo de operación ($V_{t_{max}}$).
- b) Zona de operación de bajo voltaje, en esta zona el compensador opera en su límite mínimo, perdiendo su capacidad como elemento de regulación de voltaje. Visto desde el SEP, la operación del CEV estará determinada por la capacidad nominal de su rama capacitiva, con voltaje variante entre las terminales cero y ($V_{t_{min}}$).
- c) Zona de operación de sobrevoltaje, en esta zona el compensador opera en su límite máximo, surgiendo una característica de variación de voltaje en las terminales del CEV, correspondiente al de un reactor fijo con capacidad nominal igual a la rama inductiva del CEV.

Cabe resaltar, que dentro del rango nominal de operación, la característica de regulación de voltaje del CEV corresponde a la de una curva lineal definida por sus dos principales parámetros de control en estado estable, esto es, una pendiente ajustable en base al valor de una ganancia y un voltaje variable de referencia (V_{ref}).

En la figura 3.31 se muestran gráficamente las características de operación del controlador estático de var.

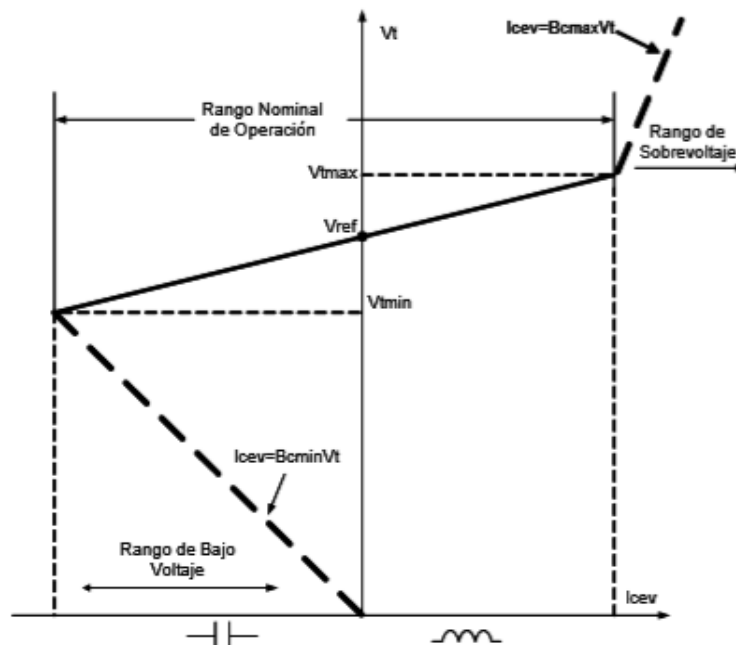


Figura 3.31 Curva característica en estado estable de un CEV [1].

La característica de regulación de voltaje del compensador en su rango nominal de operación, en forma analítica se expresa mediante la relación:

$$V_t = V_{ref} + mI_{cev} \quad (3.66)$$

Donde:

m – Representa la pendiente de la curva característica.

I_{cev} – satisface las restricciones $IC_{min} < I_{cev} < IC_{max}$

IC_{min} e IC_{max} – Representan las capacidades nominales de inyección de corriente en las ramas capacitiva e inductiva del compensador.

La operación del compensador dentro de su rango nominal de control solamente representa una característica deseable de regulación de voltaje. El CEV desde un punto de vista de control, es un elemento pasivo cuya susceptancia se modifica de acuerdo con el voltaje del nodo controlado.

Las técnicas mostradas a continuación son utilizadas para la obtención de la susceptancia variable:

- Capacitores conectados por tiristores (Figura 3.32.a)
- Reactor controlado por tiristores (Figura 3.32.b)

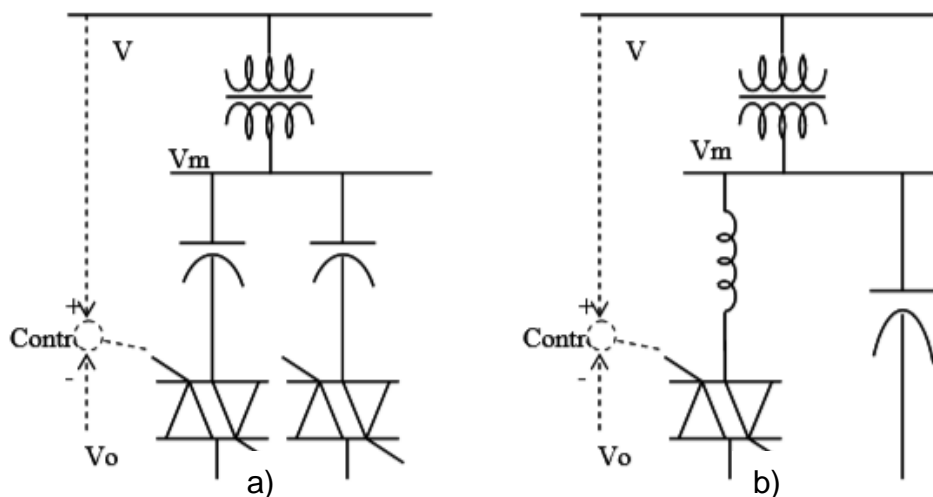


Figura 3.32.a Capacitores conectados por tiristores [1].

Figura 3.32.b Reactor controlado por tiristores [1].

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE FLUJOS DE POTENCIA ANTE VARIACIÓN DE CARGA.

4.1 INTRODUCCIÓN.

En el presente capítulo se abordará un caso de estudio el cual representará una red eléctrica de un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) operando en estado estacionario. Cabe mencionar que la presente tesis se enfoca en la solución de flujos de potencia mediante métodos iterativos. El algoritmo desarrollado en este trabajo permite dar solución al caso base y así poder analizar la solución de flujos de potencia ante pequeñas contingencias.

Para poder dar solución a nuestro caso de estudio fue necesario generar un programa numérico en MATLAB, el cual nos permite obtener estudios de flujos de potencia empleando el método de Newton – Raphson. Dicho programa permite de igual manera hacer simulaciones en las que se presenten pequeñas contingencias en los cambios de voltaje, esto permite observar cuando el sistema se colapsa y así poder dar una solución que nos lleve nuevamente a la estabilidad del sistema.

En este capítulo se analiza el caso de estudio con diferentes configuraciones, ante pequeños disturbios que se le provocan al sistema con el fin de conocer los límites de estabilidad del sistema. El caso de estudio presentado es un sistema de 4 nodos (sistema de prueba Grainer / Stevenson).

El análisis presentado se realiza con la finalidad de observar los cambios reflejados en el perfil de voltaje de la red y en los flujos de potencia. Las corridas de flujos se realizan antes y después del colapso del sistema, al obtener los resultados es posible deducir si se incorporan al sistema reactores o capacitores con la finalidad de proporcionar estabilidad al sistema de prueba.

4.2 CASO DE ESTUDIO (SISTEMA DE 4 NODOS).

Para ilustrar el caso de estudio, se presenta un sistema de 4 nodos cuyos datos del sistema se muestran a continuación (Figura 4.1), con referencia en el libro de John J. Grainer / William D. Stevenson Análisis de Sistemas de Potencia.

El sistema está compuesto por 4 nodos (barras), 4 líneas de transmisión, 2 generadores conectados en los nodos 1 y 4, mientras las cargas se encuentran conectadas en los cuatro nodos. Los valores base para el sistema de transmisión son 100 MVA y 230 kV. Los datos de las líneas de transmisión se encuentran en la tabla 4.1. Donde se muestran las impedancias serie en por unidad y las susceptancias de carga de la línea para los circuitos equivalentes nominales π de las cuatro líneas identificadas por los nodos en los que terminan. Los datos de los nodos se presentan en la tabla 4.2, donde se enlistan los valores para P, Q y V de cada uno de ellos [2].

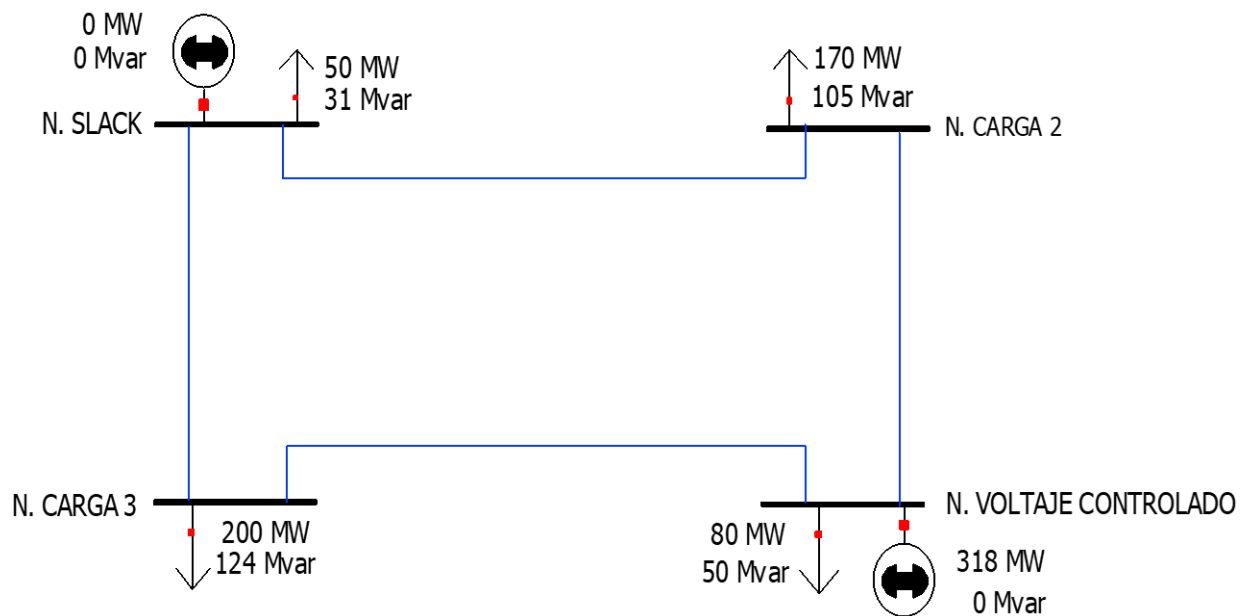


Figura 4.1 Diagrama unifilar del caso de estudio [2].

- Los valores base para el sistema de transmisión son de 100 MVA y 230 kV.
- Los valores Q de la carga se calculan de los valores de P suponiendo un factor de potencia de 0.85.

Las tablas 4.1 y 4.2 contienen los datos de las líneas correspondientes al sistema de prueba de 4 nodos.

Línea, de nodo a nodo	Serie Z		Serie $Y = Z^{-1}$		Y en paralelo	
	R Por unidad	jX Por unidad	G Por unidad	jB Por unidad	MVAR Totales de carga	$jY/2$ Por unidad
1 – 2	0.01008	0.05040	3.815629	-19.078144	10.25	0.05125
1 – 3	0.00744	0.03720	5.169561	-25.847809	7.75	0.03875
2 – 4	0.00744	0.03720	5.169561	-25.847809	7.75	0.03875
3 – 4	0.01272	0.06360	3.023705	-15.118528	12.75	0.06375

Tabla 4.1 Datos de las líneas para el caso de estudio [2].

Barra	Generación		Carga		V por unidad	Tipo de nodo
	P, MW	Q, MVAR	P, MW	Q, MVAR		
1	-	-	50	30.99	1.00 0°	Nodo de compensación
2	0	0	170	105.35	1.00 0°	Nodo de carga (inductiva)
3	0	0	200	123.94	1.00 0°	Nodo de carga (inductiva)
4	318	-	80	49.58	1.02 0°	Voltaje controlado

Tabla 4.2 Datos de nodos para el caso de estudio [2].

4.3 SOLUCIÓN AL CASO DE ESTUDIO (SISTEMA DE 4 NODOS).

Una vez establecidos los datos del sistema, se procede a la formulación de la matriz Y_{bus} que se muestra en la tabla 4.3, se construye a partir de los datos de las líneas presentados en la tabla 4.1. Se observa que los elementos fuera de la diagonal que no son cero, Y_{21} y Y_{24} , están asociados con el nodo 2 de la figura 4.1 y son iguales a los negativos de sus respectivas admitancias de línea.

A continuación, se presenta la formulación de la matriz de admitancias Y_{bus} .

No. de nodo	1	2	3	4
1	8.985190 -j 44.835953	-3.815629 +j 19.078144	-5.169561 +j 25.847809	0
2	-3.815629 +j 19.078144	8.985190 -j 44.835953	0	-5.169561 +j 25.847809
3	-5.169561 +j 25.847809	0	8.193267 -j 40.863838	-3.023705 +j 15.118528
4	0	-5.169561 +j 25.847809	-3.023705 +j 15.118528	8.193267 -j 40.863838

Tabla 4.3 Matriz de admitancias correspondiente al caso de estudio [2].

La codificación y simulación que permite dar solución al sistema de 4 nodos propuesto (caso de estudio) [2], se realizó con ayuda del software de programación *MATLAB R2017A*, en el cual se desarrolló un programa por el método numérico de Newton – Raphson que nos permite dar solución al problema mencionado anteriormente.

Ya establecidos el sistema de prueba, los datos de las líneas de transmisión y nodos de este y la matriz Y_{bus} , se realiza el estudio de flujos de potencia con el método de Newton – Raphson ya programado, se obtiene una matriz jacobiana, la cual es calculada en cada iteración con los valores más actualizados que se tengan.

Una vez que el programa realiza las iteraciones necesarias que hagan que el criterio de convergencia de los errores de potencia sea menores o iguales a la tolerancia épsilon establecida ($\Delta g^k \leq \varepsilon$), el programa se da por terminado y nos arroja la solución encontrada en la ($k - \text{ésima}$) iteración.

Los resultados obtenidos mediante el método de Newton – Raphson para el sistema de prueba se muestran a continuación:

$$J^{(k)} = \begin{bmatrix} 44.3271 & 0 & -25.6512 & 7.0208 & 0 \\ 0 & 39.6096 & -14.7401 & 0 & 5.7887 \\ -26.1024 & -15.0936 & 41.1960 & -5.1803 & -2.9886 \\ -10.3721 & 0 & 6.3033 & 42.3363 & 0 \\ 0 & -9.6932 & 3.8670 & 0 & 37.3470 \end{bmatrix}$$

Figura 4.2 Matriz jacobiana correspondiente a la última iteración de la solución del sistema.

Nodo			Generación		Carga	
	Voltaje (p.u.)	Ángulo (p.u.)	P, MW	Q, MVAR	P, MW	Q, MVAR
1	1.0000	0.0000	186.8100	114.5007	50.000	30.9900
2	0.9824	-0.9761	0.0000	0.0000	170.000	105.3500
3	0.9690	-1.8722	0.0000	0.0000	200.000	123.9400
4	1.0200	1.5230	317.9992	181.4299	80.000	49.5800

Tabla 4.4 Solución de flujos de potencia por Newton – Raphson para sistema de prueba.

Por lo tanto, la solución final para las variables de estado V y δ extraídas de la tabla 4.4 son:

	V1	V2	V3	V4
$ V =$	1.0000	0.9824	0.9690	1.0200
$\text{Ángulos}^\circ =$	0	-0.9761	-1.8722	1.5230

Tabla 4.5 Solución final para voltajes V y ángulos δ del sistema.

Los flujos en las líneas son:

Nodo de envío	Nodo receptor	P, MW	Q, MVAR
1	2	38.6920	22.2984
1	3	98.1180	61.2124
2	1	-38.4653	-31.2362
2	4	-131.5347	-74.1138
3	1	-97.0866	-63.5687
3	4	-102.9135	-60.3714
4	2	133.2502	74.9196
4	3	104.7490	56.9302

Tabla 4.6 Flujos de potencia en las líneas del sistema.

De la solución de flujos de potencia del sistema de 4 nodos (caso de estudio) se obtienen los datos siguientes:

- La potencia total generada en "Mw" es de: 504.8093
- La demanda total en "Mw" es de: 500.0000
- Las Perdidas de energía por transm. en "Mw": 4.8093

4.4 ANÁLISIS DE VOLTAJE ANTE VARIACIONES DE CARGA.

En esta sección se realizan pruebas de colapso del sistema ante pequeñas o grandes variaciones de carga en el sistema con el objetivo de analizar el comportamiento del voltaje en los nodos de carga (nodo 2 y nodo 3) del caso de estudio. El propósito de estas pruebas es dar una solución al colapso de voltaje que se presente al incrementar significativamente la carga del sistema.

El problema del colapso de tensión se presenta mediante el análisis de contingencias de flujos de potencia, observando que conforme se incrementa gradualmente la carga, el perfil de voltaje ante esta situación tiende a deteriorarse hasta un punto donde se llega a presentar un colapso en la tensión en los nodos de carga afectados.

Previamente se realizó un análisis sin compensadores con la finalidad de observar el comportamiento del voltaje de los nodos 2 y nodo 3 del sistema con los resultados obtenidos de los flujos de potencia presentados anteriormente.

El fenómeno de caída de voltaje es también conocido como *brownout* y puede tener ciertas repercusiones en el funcionamiento de los equipos conectados a las líneas de transmisión de este sistema, entre los problemas más comunes que se presentan ante estas caídas de voltaje son daños parciales o totales en los equipos conectados.

A continuación se presentan los resultados de las pruebas realizadas al sistema de 4 nodos, donde se hacen incrementos en la potencia de carga y se observa el comportamiento del voltaje en los nodos de carga (nodo 2 y nodo 3).

4.4.1 ANÁLISIS DE VOLTAJE ANTE VARIACIÓN DE CARGA (SIN CAPACITORES).

En la Figura 4.3 se presenta una gráfica donde se representan los nodos 2 y 3 con su respectivo aumento de carga. La carga natural inicial del nodo del 'nodo 2' es $1.7 - j1.0535$ y la carga del 'nodo 3' es $2.0 - j1.2394$. El incremento de estas cargas en el análisis de flujos se expresa de la siguiente manera.

$$X1 = [170 \quad 340 \quad 510 \quad 680 \quad 850 \quad 1020 \quad 1190 \quad 1360 \quad 1530 \quad 1700]$$

$$X2 = [200 \quad 400 \quad 600 \quad 800 \quad 1000 \quad 1200 \quad 1400 \quad 1600 \quad 1800 \quad 2000]$$

Donde X1 representa el 'nodo 2' y X2 representa el 'nodo 3' del sistema respectivamente. El incremento de los valores de carga se representa de esa manera, ya que la base del sistema es 100 MVA.

Nótese que, al incrementar la potencia de carga, el perfil de voltaje tiende a disminuir, es ahí cuando se presenta el colapso del perfil de voltaje.

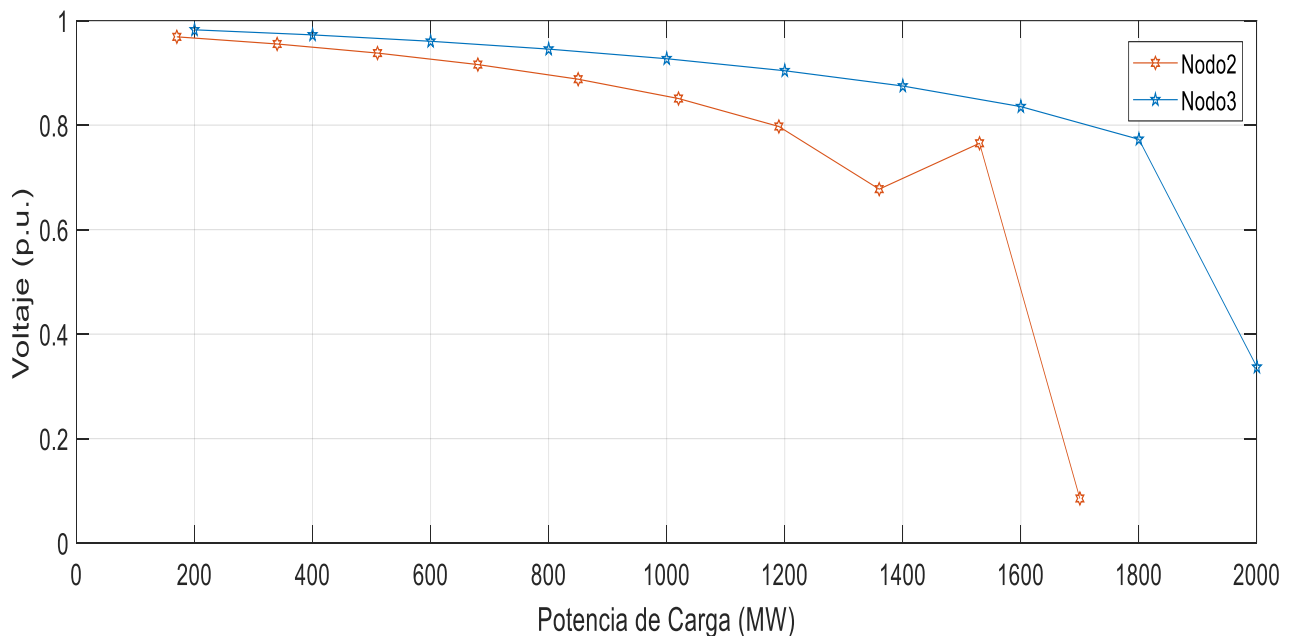


Figura 4.3 Representación gráfica de los Nodos 2 y 3 ante variaciones de carga (sin capacitor).

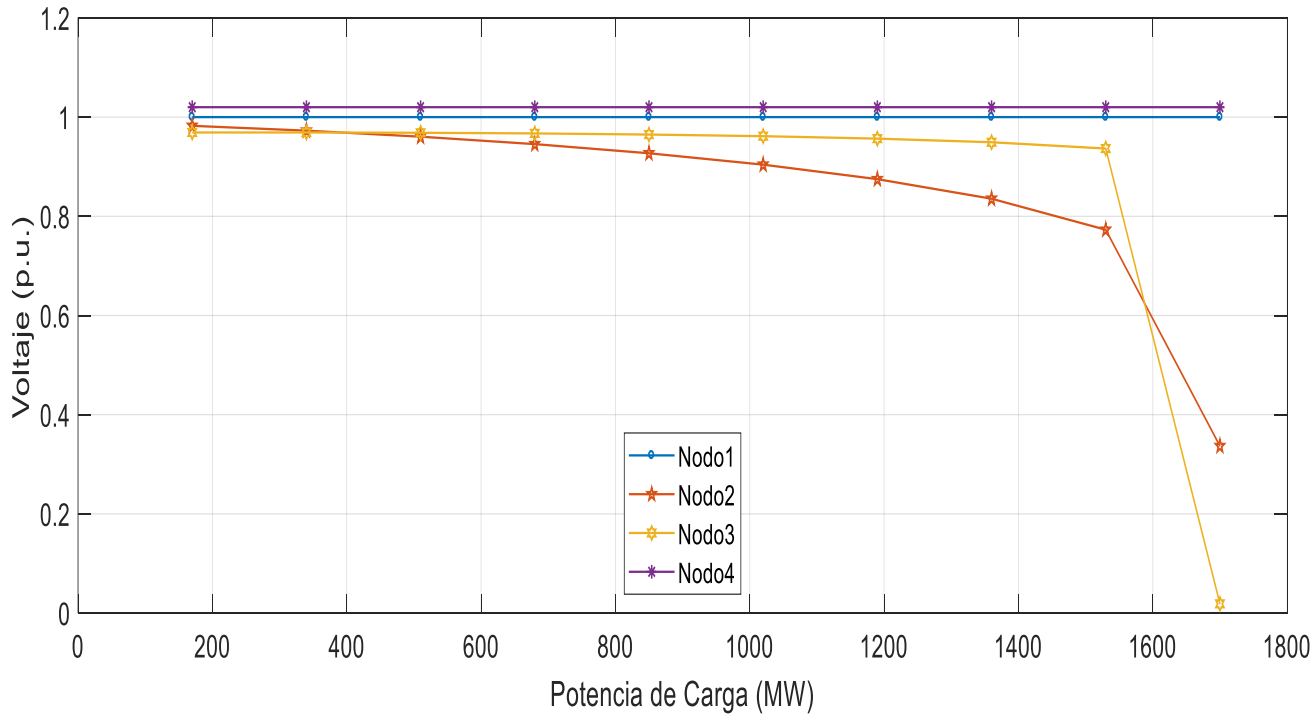


Figura 4.4 Gráfica: Nodo 2 (carga de 170 MW a 1700 MW) vs Voltajes de nodo 1, 3 y 4 (Sin capacitor).

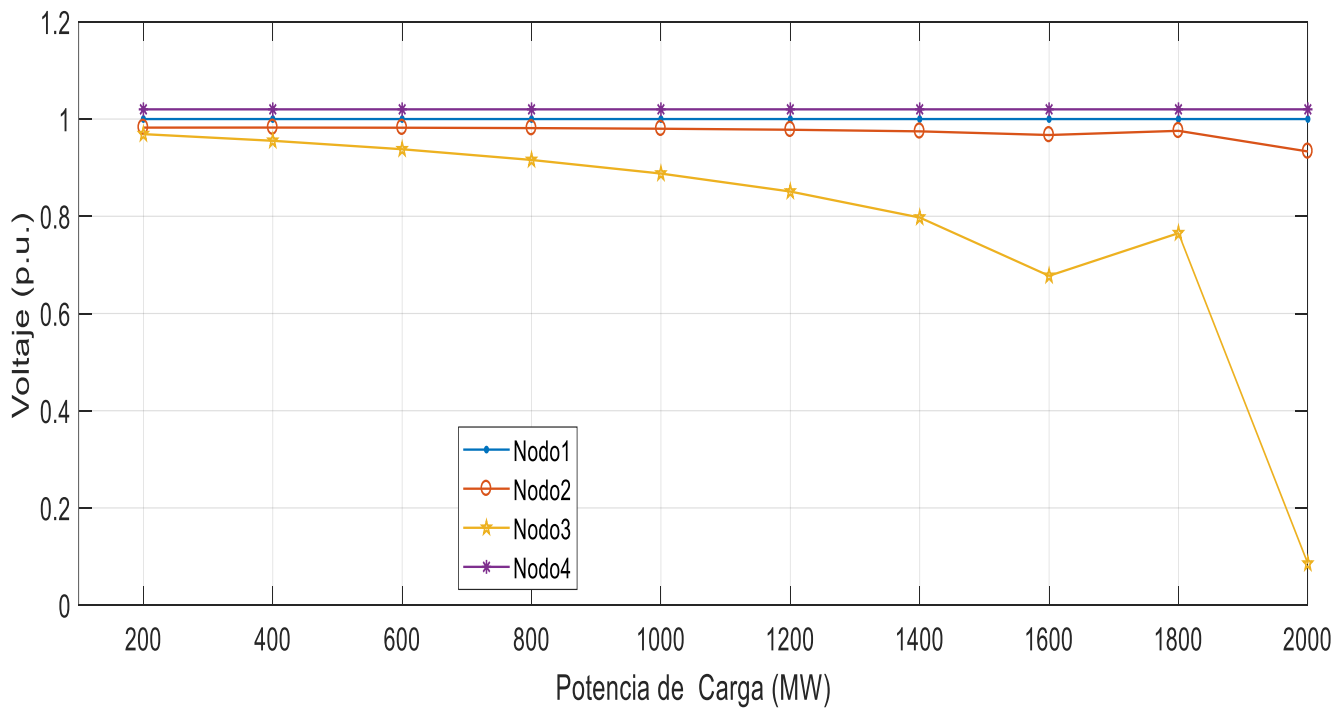


Figura 4.5 Gráfica: Nodo 3 (carga de 200 MW a 2000 MW) vs Voltajes de nodo 1, 2 y 4 (Sin capacitor).

Las gráficas 4.4 y 4.5 mostradas anteriormente, representan el comportamiento de los nodos 2 y 3 por separado en conjunto con los nodos 1 y 4 que no varían, se mantienen constantes durante el proceso y las pruebas de flujos de potencia.

La gráfica 4.6 ilustra la variación del voltaje en los nodos 2 y 3 (nodos afectados) ante un aumento gradual de potencia de carga, en esta, se incluyen de igual manera los nodos 1 y 4 (nodos constantes). Se incorporan los 4 nodos con las variaciones (X1 y X2) antes mencionadas, con la intención de mostrar y comparar el colapso de voltaje de los nodos afectados en distintos valores de carga. Lo anterior se muestra a continuación.

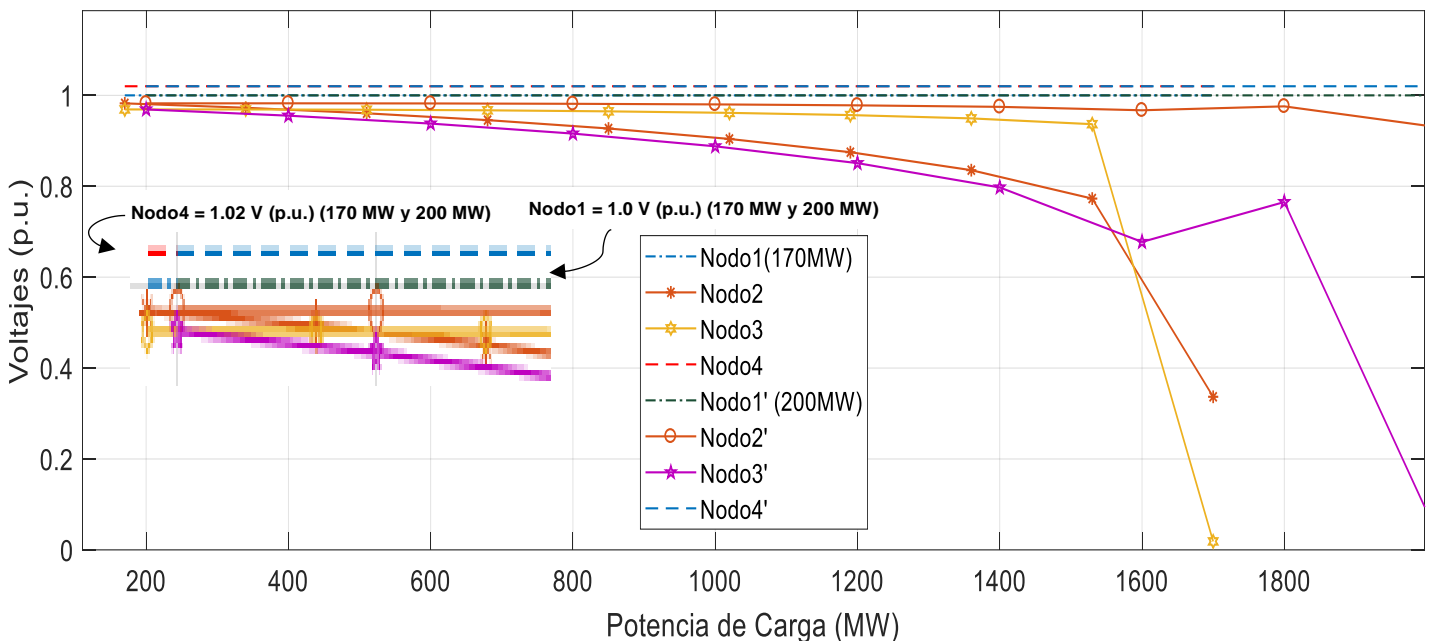


Figura 4.6 Gráfica comparativa de variación de Carga en Nodos 2 y 3 (170 MW y 200 MW) vs Voltajes de nodos 1 – 4 (Sin capacitor).

Una vez realizado el estudio de flujos de potencia con incrementos en los valores de carga de los nodos afectados (nodos 2 y 3) del sistema de 4 nodos y analizado el comportamiento que presentan ante dichas variaciones, se observa que estos nodos sufren una considerable caída de tensión.

4.4.2 ANÁLISIS DE VOLTAJE ANTE VARIACIÓN DE CARGA (CON CAPACITORES).

Anteriormente se analizó el sistema de 4 nodos (caso de estudio) realizando corridas de flujos de potencia y así observar el comportamiento que presenta el perfil de voltaje ante ciertos incrementos de carga, dicho análisis se realizó sin conexión de compensadores. Como resultado se obtuvo que entre más crece o se incrementa la carga (MW), el perfil de voltaje (V) sufre colapsos que provocan caídas de tensión en el sistema.

Como solución al problema de colapso de tensión en los nodos de carga (nodos 2 y 3) ante las variaciones de carga aplicadas, se propone el uso de capacitores que permitan la regulación del voltaje en estos nodos, dicha regulación de voltaje debe aproximarse a $1V \text{ (p.u.)} \pm 5\%$.

Los capacitores o banco de capacitores serán conectados en los nodos de carga afectados (nodos 2 y 3) del sistema de transmisión con la finalidad de proporcionar mayor soporte de tensión en esta área y de esa manera poder compensar el colapso de tensión que se presenta ante los aumentos de carga (demanda) en el sistema de transmisión.

Una vez realizada la selección de los capacitores que cumplan con la regulación de tensión a los nodos de carga afectados, estos serán conectados en los nodos afectados por las variaciones de carga, de manera que al realizar corridas de flujos, no sobrepasen los límites establecidos de $1V \text{ (p.u.)} \pm 5\%$ para el perfil de voltaje, dicho de otra manera $0.95 V < 1 V < 1.05 V \text{ (p.u.)}$.

Los capacitores seleccionados ($-j4 F$ y $-j10F$), son conectados en los nodos correspondientes del sistema ('nodo 2' y 'nodo 3') y se hacen simulaciones con sus correspondientes variaciones de carga con la finalidad de analizar el comportamiento que presentan estos nodos ya con los capacitores que ayudarán a compensar las caídas de tensión por aumento de carga.

Los resultados de este estudio de simulaciones con capacitores conectados en los nodos de carga afectados se muestran a continuación:

Para el 'nodo 2' con una potencia de carga de 170 MW, corresponde el capacitor $-j4 F$, el cual mantiene el voltaje del sistema en 1.0252 V (p.u.) en la carga de 850 MW. El estudio es realizado en cargas mínima, media y máxima; (170 MW, 850 MW y 1700 MW) con el fin de observar el comportamiento que presenta el perfil de voltaje ante estas variaciones de carga.

La figura 4.7 representa la gráfica del estudio correspondiente al 'nodo 2' enunciado anteriormente. Los 'nodos 1 y 4' se mantienen constantes (1V y 1.02V) y el 'nodo 3' es evaluado con los voltajes presentados con las variaciones de cargas seleccionadas.

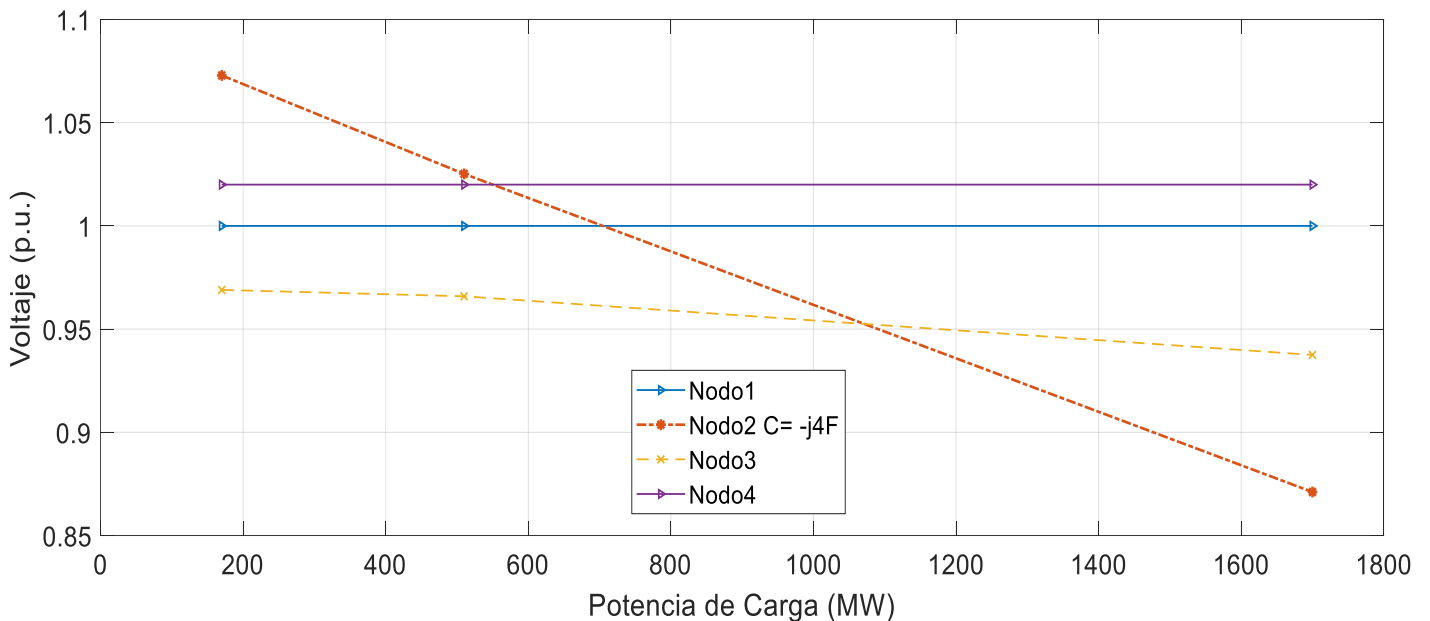


Figura 4.7 Gráfica de comportamiento de voltaje del nodo 2 con capacitor $-j4 F$ conectado.

A continuación, en la Figura 4.8, se presenta la misma gráfica anterior añadiéndole el comportamiento del perfil de voltaje del 'nodo 2' sin la conexión del capacitor que compense el voltaje.

El objetivo de mostrar el comportamiento del perfil de voltaje del 'nodo 2' con y sin el capacitor $-j4 F$ conectado es ver como se lleva a cabo la compensación de voltaje al conectar el capacitor en el nodo a estudiar.

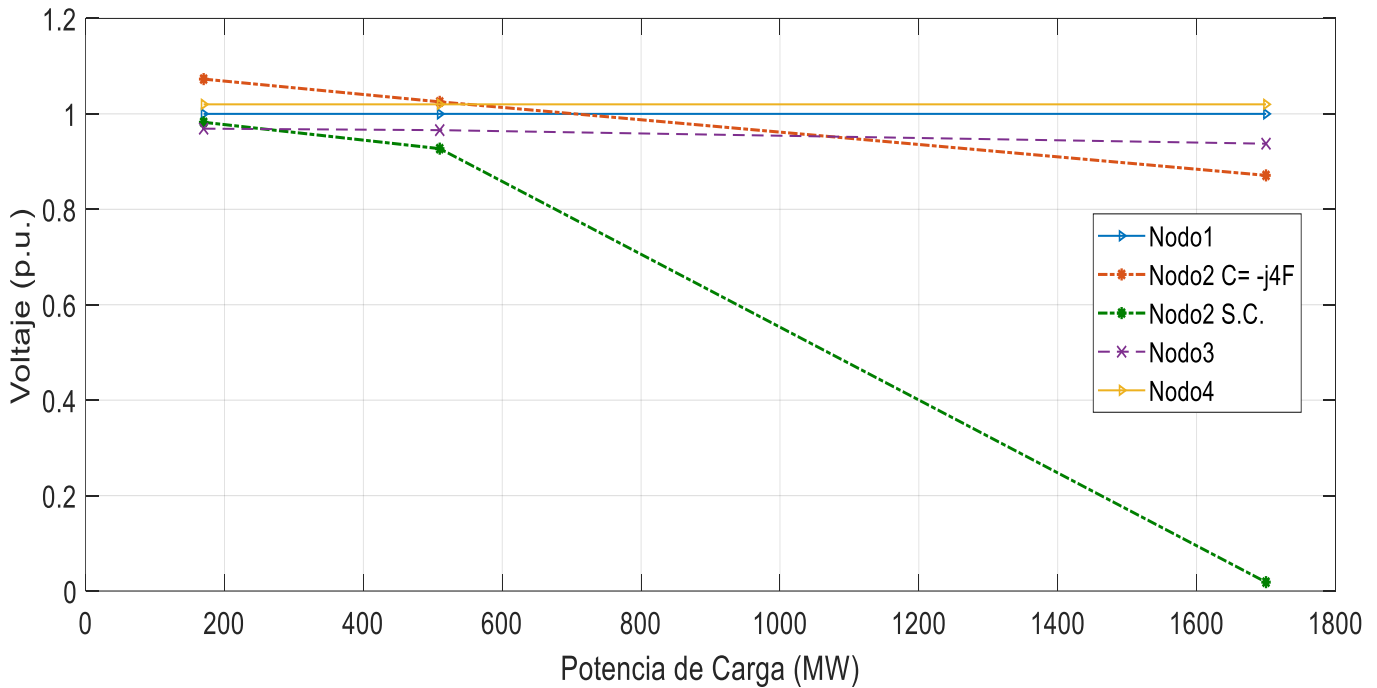


Figura 4.8 Gráfica comparativa del comportamiento del voltaje del nodo 2 con capacitor $-j4 F$ y sin capacitor $-j4 F$ conectado.

Una vez analizado y visto el comportamiento del ‘nodo 2’ con el capacitor conectado correspondiente, se procede a realizar el mismo estudio al ‘nodo 3’. Para este estudio se utilizó la misma metodología para encontrar el capacitor adecuado que mantenga el perfil de voltaje en niveles aceptables.

Para el ‘nodo 3’ se selecciona el capacitor $-j10 F$, el cual mantiene el voltaje en 1.0235 V (p.u.) en la carga de 2000 MW. De igual manera el estudio se realiza para cargas mínima, media y máxima (200 MW, 1000 MW y 2000 MW), se observa y analiza el comportamiento del perfil de voltaje para este nodo.

La figura 4.9 muestra el comportamiento obtenido del estudio para el perfil de voltaje del ‘nodo 3’ ante las variaciones de carga establecidas anteriormente con el capacitor de $-j10 F$ conectado. Se observa que ante una carga baja el capacitor no es necesario, ya que es colocado en la carga original del sistema antes de realizar las variaciones en la carga, a medida que la carga va en aumento, el capacitor se es requerido para realizar su función de compensar los niveles de tensión en el nodo.

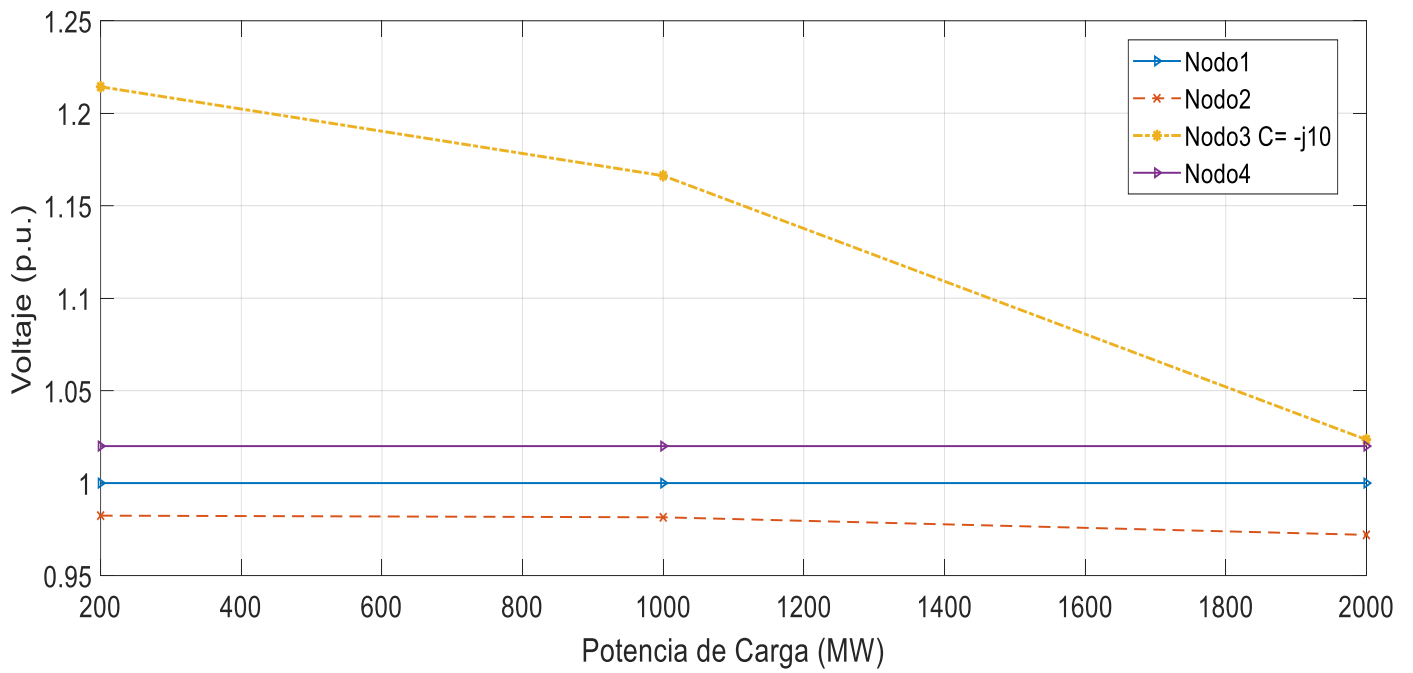


Figura 4.9 Gráfica de comportamiento del perfil de voltaje del nodo 3 con capacitor de -j10 F conectado.

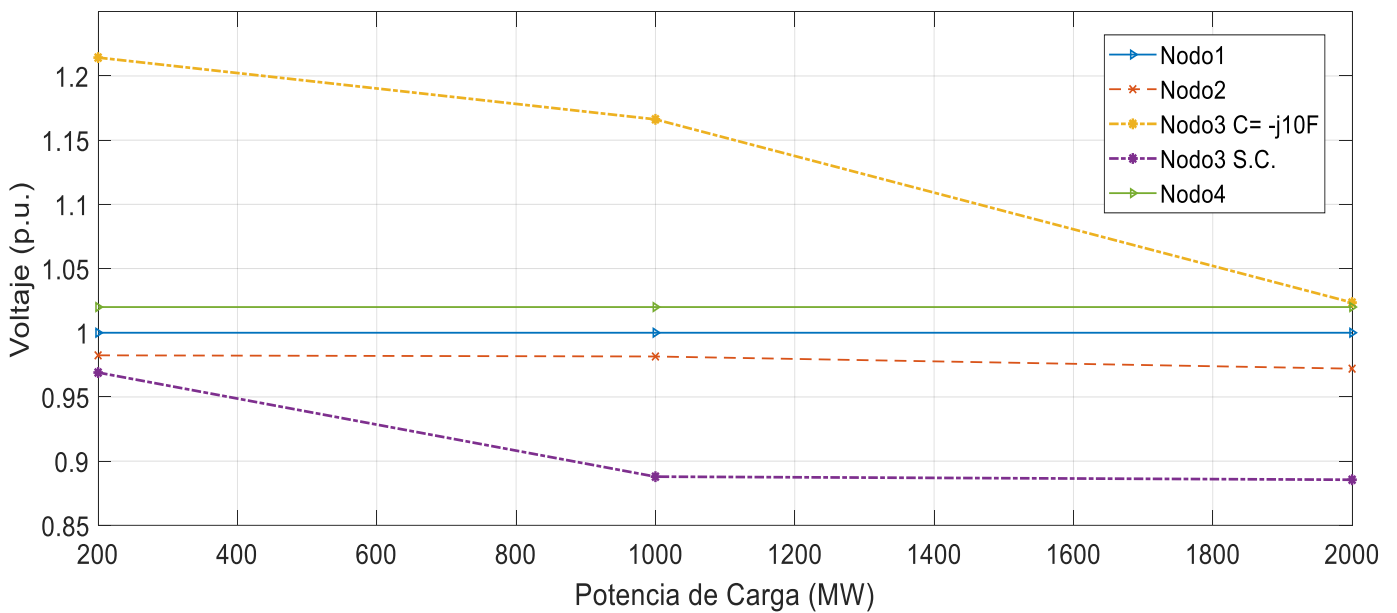


Figura 4.10 Gráfica comparativa del comportamiento del voltaje del nodo 3 con capacitor -j10 F y sin capacitor -j10 F conectado.

La gráfica 4.10 presenta el comportamiento del perfil de voltaje del 'nodo 3' con el capacitor seleccionado $-j10 F$ y de igual manera se expone el comportamiento del mismo nodo sin capacitor conectado.

Sin embargo, se puede apreciar al igual que en el 'nodo 2' que, al conectar el capacitor adecuado en el nodo afectado, el problema de colapso de tensión se va corrigiendo conforme se va aumentando la carga en el sistema.

4.5 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

Como análisis general del estudio de flujos de potencia para el sistema de 4 nodos realizado en MATLAB, se muestra que el sistema original converge tras 5 iteraciones. De igual manera se lleva a cabo el análisis de los casos de estudio con las variaciones de carga en los nodos 2 y 3. Los resultados obtenidos de los análisis y simulaciones, están plasmados en el Anexo B, donde se observa que, ante el colapso de tensión en los nodos afectados, al conectar el capacitor correspondiente al nodo requerido, el voltaje se estabiliza en $1V$ (p.u) $\pm 5\%$.

El presente apartado menciona los resultados obtenidos del análisis de flujos de potencia en Matlab comparados con los resultados obtenidos en el software PowerWorld Simulator.

Al realizar simulaciones en PowerWorld bajo las mismas condiciones, sin afectar los nodos de carga tanto en PowerWorld como con Matlab, se llega a la misma solución de las variables de estado. Al analizar el nodo 2, obtenemos resultados similares; con pequeñas variaciones entre los softwares. No obstante, al incrementar la carga en el nodo 3, los resultados obtenidos muestran mayor variación de un software a otro. Debido a que, al obtener distintos valores en la capacitancia de este nodo, se llega a un valor totalmente distinto de capacitor que compense el sistema en colapso.

Esto se puede apreciar en el Anexo C de la presente tesis, donde se muestran tabulaciones de la comparación de los resultados entre ambos softwares.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

5.1 CONCLUSIONES.

En este trabajo se desarrolló e implementó el método de Newton – Raphson (NR), para llevar a cabo el análisis de flujos a un sistema de potencia pequeño “4 nodos” usando como herramienta para el desarrollo del programa el software MATLAB.

Se llevó a cabo el análisis del mismo SEP ante considerables aumentos en la potencia de carga del sistema, simulando así incrementos de carga en la demanda de cualquier SEP. Observando que a medida en que la potencia de carga del sistema incrementó, así mismo se provocó un colapso en el perfil de voltaje causando al sistema caídas de tensión en los nodos de carga afectados.

De igual manera se observa que en ciertos niveles de carga el voltaje de uno de los nodos afectados disminuye (‘nodo 2’), que es lo que se esperaba, pero también se presentó que mientras este disminuía, en otro nodo de carga (‘nodo 3’) también presentaba colapsos en su perfil de voltaje.

Ante esta problemática que se originó y/o se provocó en el estudio, se concluye que la forma de compensar las caídas de tensión en los nodos es conectar capacitores en los buses de carga donde se presenten dichos colapsos. Mediante pruebas y simulaciones se concierta que para el ‘nodo 2’ con carga inicial mínima de 170 MW y con carga final de 1700 MW, se requiere un capacitor de $-j4 F$ y para el ‘nodo 3’ con carga natural mínima de 200 MW y una carga final de 2000 MW, un capacitor de $-j10 F$.

La selección de ambos capacitores se realizó teniendo en cuenta el límite de $\pm 5\%$ para el perfil de voltaje, por lo que ambos no superan los 1.05 V (p.u.) y ayudan a dar soporte en la estabilidad del sistema. Tratándose de este sistema de prueba, se tienen estos valores de capacitores como los efectivos para brindar solución al problema presentado.

5.2 TRABAJOS FUTUROS.

Es necesario realizar la expansión del sistema de prueba a más nodos para llevar un mejor análisis de flujos de potencia, para esto se va a requerir una nueva metodología para el desarrollo del programa, así como también cambiar el método de solución (NR) a Desacoplado Rápido, que permitirá obtener resultados en menor tiempo y menos iteraciones.

Al proponer cambiar el tamaño del sistema se tiene en cuenta que esto conlleva al uso de algunas otras formas para llevar a cabo el control de voltaje, como pueden ser reactores y CEV's de distintas configuraciones como CEV's de reactores, capacitores o mixtos. Esto suponiendo que se tenga la misma problemática de estudios ante colapsos de tensión del sistema elegido.

Es importante de igual manera contar con más datos para el sistema y más exactos, si es posible utilizar datos en tiempo real o de problemáticas y contingencias reales de los SEP, para así poder simular y analizar el circuito ante diversas contingencias como salidas o entradas de equipos que alteren en cierta forma el SEP propuesto.

Formular alguna metodología que ayude a costear, prevenir el envejecimiento o desgaste de elementos de compensación y de equipos en general y el cómo seleccionar de mejor manera estos equipos para el SEP y los lugares óptimos para conectarlos. Para el caso de esta tesis, seleccionar capacitores que no excedan ciertos presupuestos y que compensen el sistema por un tiempo prolongado (10 años, por ejemplo).

No se llevó a cabo la simulación de un sistema más grande, por lo que cambiar la configuración y tamaño del sistema teniendo en cuenta lo antes mencionado, ampliará el conocimiento del comportamiento de SEP ante diversas contingencias y problemáticas que podrían ser útiles a otras generaciones.

Para profundizar un poco más este estudio, se recomienda realizar nuevos estudios de este tema en diversos softwares de simulación y dar solución a las nuevas problemáticas que se lleguen a presentar.

REFERENCIAS

- [1] **Comisión Federal de Electricidad.** “Manual del participante, Curso: Fundamentos de Sistemas Eléctricos de Potencia”. Noviembre 2010.
- [2] John J **Grainer**, William D. **Stevenson Jr.** “Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia”. Ed. McGraw-Hill, Primera edición 1996.
- [3] **J. Duncan Glover**, Mulukutla S. Sarma. “Sistemas de Potencia, Análisis y Diseño”. Thomson, 3ra edición.
- [4] **Hadi Saadat.** “Power System Analysis”. 1999
- [5] **Juan Carlos Escamilla Sánchez.** “Tesis de Maestría en Ingeniería Eléctrica: Modelado para análisis de la transferencia de sobretensiones por descargas atmosféricas en sistemas de distribución”. IPN. Junio 2008.
- [6] Bhag S. **Guru** – Hüseyin R. **Hiziroglu.** Máquinas Eléctricas y Transformadores. Oxford University. Tercera edición 2009.
- [7] **Armengol Blanco Benito.** “Máquinas Eléctricas”. Facultad Nacional de Ingeniería – Ingeniería Eléctrica e Ingeniería Electrónica. Diciembre 2014.
- [8] **Luis Juárez Perea.** “Apuntes Máquinas Síncronas – Transformadores y Motores de Inducción”. BUAP 2017.
- [9] **Stephen J. Chapman.** Máquinas Eléctricas. McGraw-Hill, Quinta edición 2012.

- [10] **G. Arguello.** “Análisis y Control de Sistemas Eléctricos de Potencia”. Quito. Escuela Politécnica Nacional, 1998.
- [11] **Enríquez Harper.** “Introducción al Análisis de los Sistemas Eléctricos de Potencia”. Tercera edición
- [12] **Dass B.** “Electrical Power Systems”. Ed. New Age International Publishers, 2006.
- [13] **César López Servin.** “Tesis de Licenciatura: Solución al problema de flujos óptimos de potencia usando el modelo clásico”. IPN. Abril 2015.
- [14] **Jesús Reyes García.** “Curso: Métodos Numéricos y Programción”. SEPI – ESIME IPN, México 2019.
- [15] **Ramiro Patiño Bedolla.** “Tesis de Maestría en Ingeniería Eléctrica: Análisis y control de flujos de potencia en estado estable”. UANL. Julio 1995.

ANEXO A. ALGORITMOS DE SOLUCIÓN PARA FLUJOS DE POTENCIA.

A.1. MÉTODO DE GAUSS – SEIDEL.

1. Construir matriz de admitancias del sistema.
2. Elegir nodo compensador.
3. Proceso “*inicio plano*” [2]; asignar $1\angle 0^\circ$ a los voltajes desconocidos en los nodos de carga.
4. Inicio del proceso iterativo con la ecuación (3.15) para calcular los nuevos valores de los voltajes de nodos.
5. Aplicar “factor de aceleración” [2]; multiplicando la corrección en el voltaje de cada nodo por una constante (α) que incremente la cantidad de corrección para que el voltaje sea más cercano al valor que se está aproximando. El valor acelerado de la barra i durante la iteración k está dado por:

$$V_{i,ac}^{(k)} = (1 - \alpha)V_{i,ac}^{(k-1)} + \alpha V_{i,ac}^{(k)} = V_{i,ac}^{(k-1)} + \alpha(V_{i,ac}^{(k)} - V_{i,ac}^{(k-1)})$$

Por lo general en estudios de flujos de potencia $\alpha=1.6$.

6. Si se cuenta con nodos de voltaje controlado; P_i y $|V_i|$ son conocidos. Por lo que es requerido calcular la potencia reactiva mediante la siguiente expresión:

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

Que se representa de igual manera como [12]:

$$Q_i^{(k+1)} = - \sum_{j=1}^N |Y_{ij}| |V_i|^k |V_j|^k \text{sen}(\theta_{ij} + \delta_j^k - \delta_i^k)$$

7. Una vez teniendo el cálculo de la potencia reactiva [2], se procede a calcular el nuevo valor del voltaje; al ser nodo de voltaje controlado, se debe mantener la misma magnitud por lo que se corrige la magnitud del voltaje de la siguiente forma:

$$V_i^{(k)} = |V_i| \frac{V_i^{(k)}}{|V_i^{(k)}|}$$

A.2. MÉTODO DE NEWTON – RAPHSON.

1. Elegir un nodo como nodo de compensación.
2. Calcular las potencias inyectadas (activa y reactiva) en los demás buses.
3. Construir matriz de admitancias del sistema.
4. Iniciar proceso iterativo para calcular P_i y Q_i a partir de las ecuaciones de flujos de potencia (3.7) y (3.8).
5. Llevar a cabo las derivadas parciales para la matriz Jacobiana (J_{11} , J_{12} , J_{21} , J_{22}) de los valores obtenidos del desarrollo de las ecuaciones de flujos.
6. Calcular el vector de errores (ΔP , ΔQ), ecuaciones (3.37) y (3.38) para nodos ($P - Q$) y ($P - V$).
7. Cálculo de vector de errores, ecuación (3.39).
8. Llevar a cabo las iteraciones hasta converger con la tolerancia (ε).
9. Calcular las potencias del bus de compensación y en los demás buses con las ecuaciones de flujos de potencia.

ANEXO B. ANÁLISIS DE SISTEMA DE 4 NODOS ANTE VARIACIONES DE CARGA (MATLAB).

El presente anexo contiene los datos obtenidos mediante el análisis de flujos de potencia del sistema de 4 nodos original sin ninguna alteración de sus valores naturales de carga propuesto en el Capítulo 4.

El sistema (diagrama unifilar) se muestra como sigue:

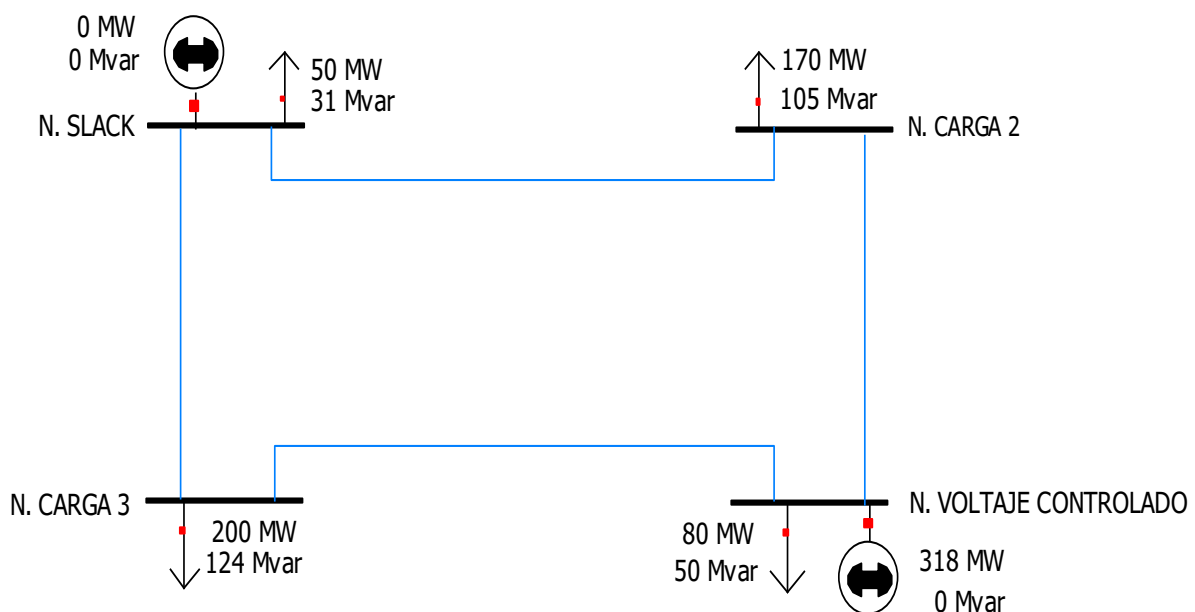


Figura B.1. Sistema de 4 nodos en estado estable sin variación en nodos de carga.

A continuación, se muestran las iteraciones (presentadas como matriz jacobiana) en las que el programa llega a la solución de acuerdo con la tolerancia asignada ($\epsilon = 0.0001$), los valores finales de los nodos obtenidos de la corrida de flujos de potencia, los flujos de potencia totales de la líneas y valores de potencia final y demanda del sistema.

M_J =

45.4429	0	-26.3648	0	0
0	41.2687	-15.4209	0	0
-26.3648	-15.4209	41.7857	-5.2730	0
-9.0886	0	5.2730	0	0
0	-8.2537	3.0842	0	0

M_J =

45.4429	0	-26.3648	0	0
0	41.2687	-15.4209	0	0
-26.3648	-15.4209	41.7857	-5.2730	-3.0842
-9.0886	0	5.2730	0	0
0	-8.2537	3.0842	0	0

M_J =

44.3749	0	-25.6778	8.8818	0
0	39.7018	-14.7736	0	8.1328
-26.1256	-15.1217	41.2473	-5.1852	-3.0842
-10.3562	0	6.2998	44.2290	0
0	-9.6597	3.8597	0	40.4590

M_J =

44.3749	0	-25.6778	8.8818	0
0	39.7018	-14.7736	0	8.1328
-26.1256	-15.1217	41.2473	-5.1852	-2.9946
-10.3562	0	6.2998	44.2290	0
0	-9.6597	3.8597	0	40.4590

M_J =

44.3271	0	-25.6512	7.0208	0
0	39.6096	-14.7401	0	5.7887
-26.1024	-15.0936	41.1960	-5.1803	-2.9946
-10.3721	0	6.3033	42.3363	0
0	-9.6932	3.8670	0	37.3470

- Solución de Flujos de Potencia

BENEMERITA UNIVERSIDAD AUTONOMA DE PUEBLA

PUEBLA, PUE.

FACULTAD DE INGENIERIA

COLEGIO DE INGENIERIA MECANICA-ELECTRICA

PROGRAMA PARA EL CALCULO DE FLUJOS DE POTENCIA EN REDES DE TRANSMISION
POR EL METODO DE NEWTON - RAPHSON

GARCIA ANTONIO MIGUEL JESUS

Barra	Vols_pu	Ang_pu	Mw Gen	MVARs Gen	Mw Car	MVARs Car
1	1.0000	0.0000	186.8100	114.5007	50.0000	30.9900
2	0.9824	-0.9761	0.0000	0.0000	170.0000	105.3500
3	0.9690	-1.8722	0.0000	0.0000	200.0000	123.9400
4	1.0200	1.5230	317.9992	181.4299	80.0000	49.5800

Los flujos de potencia en la linea son:

N. Envio	N. Receptor	Pot.Mw	Pot Mvar
1	2	38.6920	22.2984
1	3	98.1180	61.2124
2	1	-38.4653	-31.2362
2	4	-131.5347	-74.1138
3	1	-97.0866	-63.5687
3	4	-102.9135	-60.3714
4	2	133.2502	74.9196
4	3	104.7490	56.9302

La potencia total generada en "Mw" es de: 504.8093

La demanda total en "Mw" es de: 500.0000

Las Perdidas de energia por transm. en "Mw": 4.8093

A diferencia del caso anterior (sin modificación de cargas), que llega a la solución del sistema en 5 iteraciones, los siguientes dos casos que se presentan cuentan con alteraciones de cargas en los nodos 2 y 3. Al ser una carga elevada, la solución del sistema requiere de mayor número de iteraciones, por lo que estas aumentan.

El caso del nodo 2 con carga de 1700 MW llega a su solución a las 98 iteraciones, mientras que el caso del nodo 3 llega a su solución a las 100 iteraciones; razón por la que solamente se hace mención.

A continuación, se presentan los sistemas de 4 nodos con variaciones de carga en los nodos antes mencionados.

- NODO 2 = 1700 MW

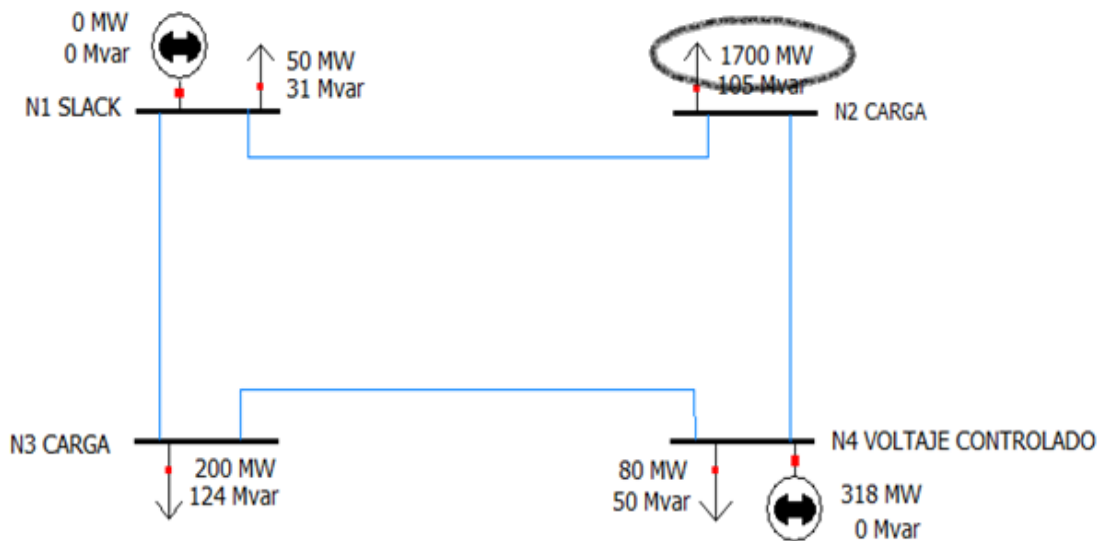


Figura B.2. Sistema de 4 nodos con variación de carga en Nodo 2.

- Solución de Flujos de Potencia

BENEMERITA UNIVERSIDAD AUTONOMA DE PUEBLA

PUEBLA, PUE.

FACULTAD DE INGENIERIA

COLEGIO DE INGENIERIA MECANICA-ELECTRICA

PROGRAMA PARA EL CALCULO DE FLUJOS DE POTENCIA EN REDES DE TRANSMISION
POR EL METODO DE NEWTON - RAPHSON

GARCIA ANTONIO MIGUEL JESUS

Barra	Vols_pu	Ang_pu	Mw Gen	MVARs Gen	Mw Car	MVARs Car
1	1.0000	0.0000	1541.3432	4215.0277	50.0000	30.9900
2	0.3368	-78.6784	0.0000	0.0000	1700.0000	105.3500
3	0.0186	2.8281	0.0000	0.0000	200.0000	123.9400
4	1.0200	-84.2370	640.8128	3438.7871	80.0000	49.5800

Los flujos de potencia en la linea son:

N. Envio	N. Receptor	Pot.Mw	Pot Mvar
1	2	986.3332	1650.5577
1	3	505.0100	2533.4799
2	1	-611.9480	215.6618
2	4	-32.1084	-608.2031
3	1	-7.0357	-47.4840
3	4	28.3853	-6.6615
4	2	275.0935	1818.6580
4	3	285.7191	1570.5490

La potencia total generada en "Mw" es de: 2182.1560

La demanda total en "Mw" es de: 2030.0000

Las Perdidas de energia por transm. en "Mw": 152.1560

- NODO 3 = 2000 MW

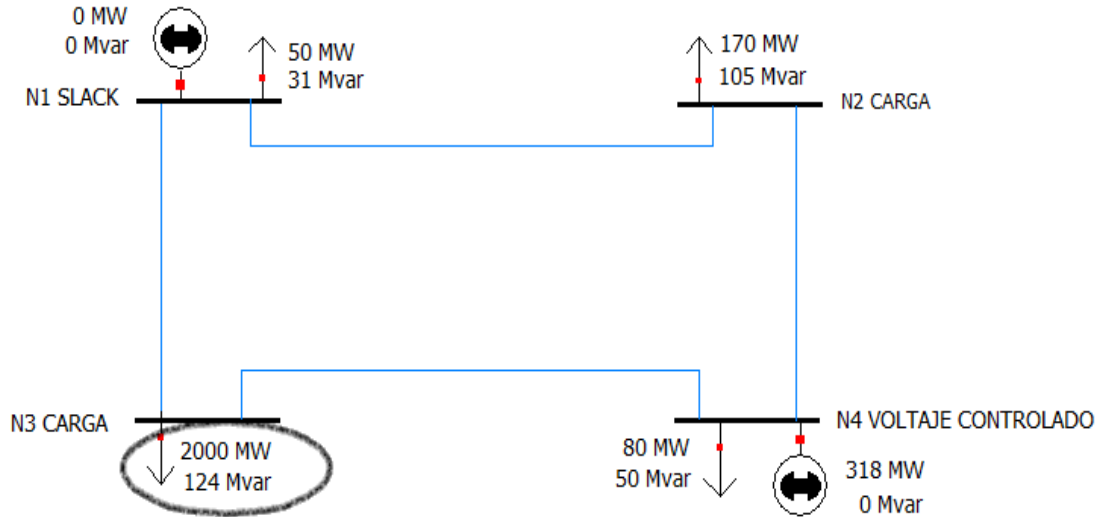


Figura B.3. Sistema de 4 nodos con variación de carga en Nodo 3.

- Solución de Flujos de Potencia

BENEMERITA UNIVERSIDAD AUTONOMA DE PUEBLA

PUEBLA, PUE.

FACULTAD DE INGENIERIA

COLEGIO DE INGENIERIA MECANICA-ELECTRICA

PROGRAMA PARA EL CALCULO DE FLUJOS DE POTENCIA EN REDES DE TRANSMISION
POR EL METODO DE NEWTON - RAPHSON

GARCIA ANTONIO MIGUEL JESUS

Barra	Vols_pu	Ang_pu	Mw Gen	MVARs Gen	Mw Car	MVARs Car
1	1.0000	0.0000	1502.7849	2842.2070	50.0000	30.9900
2	0.9333	-36.6575	0.0000	0.0000	170.0000	105.3500
3	0.0855	70.6928	0.0000	0.0000	2000.0000	123.9400
4	1.0200	-59.6357	-564.6693	2333.1591	80.0000	49.5800

Los flujos de potencia en la linea son:

N. Envio	N. Receptor	Pot.Mw	Pot Mvar
1	2	1158.9422	261.6568
1	3	293.8426	2549.5602
2	1	-1016.3788	441.5711
2	4	957.8157	-209.3762
3	1	197.6716	-95.8921
3	4	119.7522	76.2035
4	2	-875.8331	611.8818
4	3	231.1637	1671.6972

La potencia total generada en "Mw" es de: 938.1155

La demanda total en "Mw" es de: 2300.0000

Las Perdidas de energia por transm. en "Mw": -1361.8845

ANEXO C. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE MATLAB Y POWERWORLD.

En el presente anexo se muestra la comparación de los resultados obtenidos con el programa de Newton – Raphson en Matlab, con los resultados de simulación realizados en PowerWorld Simulator. Esta comparación se realizó con la finalidad de verificar que sean similares o iguales los datos obtenidos de un programa con el otro y tener mayor confiabilidad en nuestros resultados; tanto en el sistema original sin variaciones, como en los sistemas con variaciones de carga.

A continuación, se presentan los datos del *sistema de 4 nodos sin variaciones de carga* en los nodos respectivamente afectados.

- MATLAB

Barra	Vols_pu	Ang_pu	Mw Gen	MVARs Gen	Mw Car	MVARs Car
1	1.0000	0.0000	186.8100	114.5007	50.0000	30.9900
2	0.9824	-0.9761	0.0000	0.0000	170.0000	105.3500
3	0.9690	-1.8722	0.0000	0.0000	200.0000	123.9400
4	1.0200	1.5230	317.9992	181.4299	80.0000	49.5800

Tabla C.1. Resultados de flujos de potencia en Matlab.

- POWERWORLD SIMULATOR

Number	Name	Area Name	Nom kV	PU Volt	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar
1	N1 SLACK	1	230.00	1.00000	230.000	0.00	50.00	30.99	187.02	133.76
2	N2 CARGA	1	230.00	0.98048	225.510	-0.96	170.00	105.35		
3	N3 CARGA	1	230.00	0.96659	222.316	-1.85	200.00	123.94		
4	N4 VOLTAJE C1		230.00	1.02000	234.600	1.52	80.00	49.58	318.00	201.21

Tabla C.2. Resultados de flujos de potencia en PowerWorld.

Analizando el colapso de tensión de los nodos del sistema debido a la variación de carga del *nodo 2* (170 MW a 1700 MW), se lleva a cabo la compensación de voltaje mediante la conexión de elementos de compensación reactiva (capacitores) en paralelo.

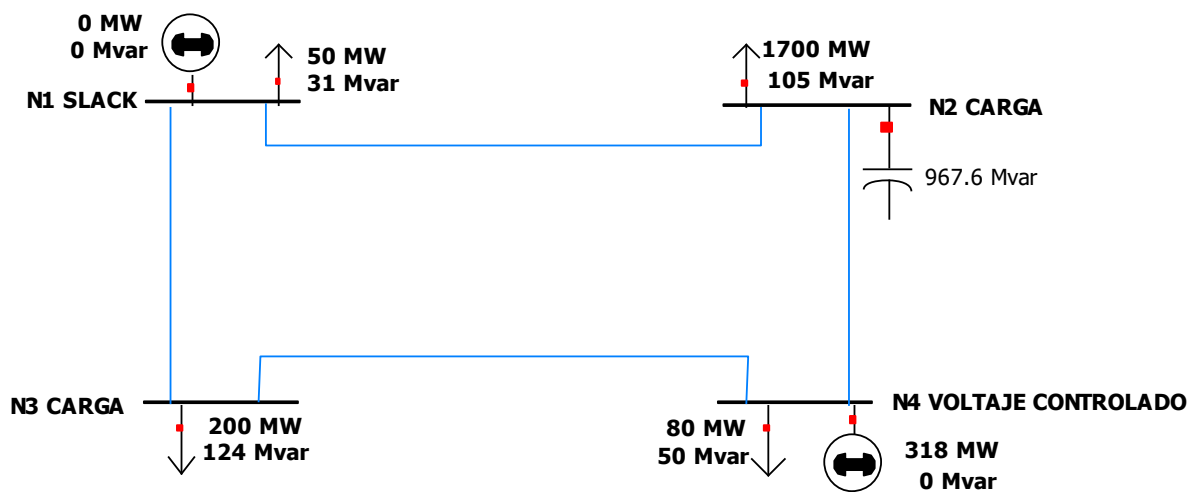


Figura C.1. Sistema de 4 nodos con variación de carga en Nodo 2 y compensado.

- MATLAB

Barra	Vols_pu	Ang_pu	Mw Gen	MVARs Gen	Mw Car	MVARs Car
1	1.0000	0.0000	1857.7833	493.2937	50.0000	30.9900
2	0.9036	-39.9071	0.0000	0.0000	1700.0000	105.3500
3	0.9403	-12.8763	0.0000	0.0000	200.0000	123.9400
4	1.0200	-27.7174	317.9948	544.3912	80.0000	49.5800

Tabla C.3. Resultados de análisis de flujos de potencia a Nodo 2 en Matlab.

- POWERWORLD SIMULATOR

Number	Name	Area Name	Nom kv	PU Volt	Volt (kv)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar	Switched Shunts Mvar
1	N1 SLACK	1	230.00	1.00000	230.000	0.00	50.00	30.99	1965.64	333.17	
2	N2 CARGA	1	230.00	1.00920	232.115	-40.12	1700.00	105.35			967.55
3	N3 CARGA	1	230.00	0.93741	215.604	-12.95	200.00	123.94			
4	N4 VOLTAJE C1	1	230.00	1.02000	234.600	-27.98	80.00	49.58	318.00	277.36	

Tabla C.4. Resultados de análisis de flujos de potencia a Nodo 2 en PowerWorld.

Al igual que en el caso anterior (nodo 2), *el nodo 3* también sufre alteraciones en su potencia de carga, lo que causa caídas de voltaje en el sistema; por lo que se conecta un capacitor en paralelo al nodo afectado para compensar la tensión,

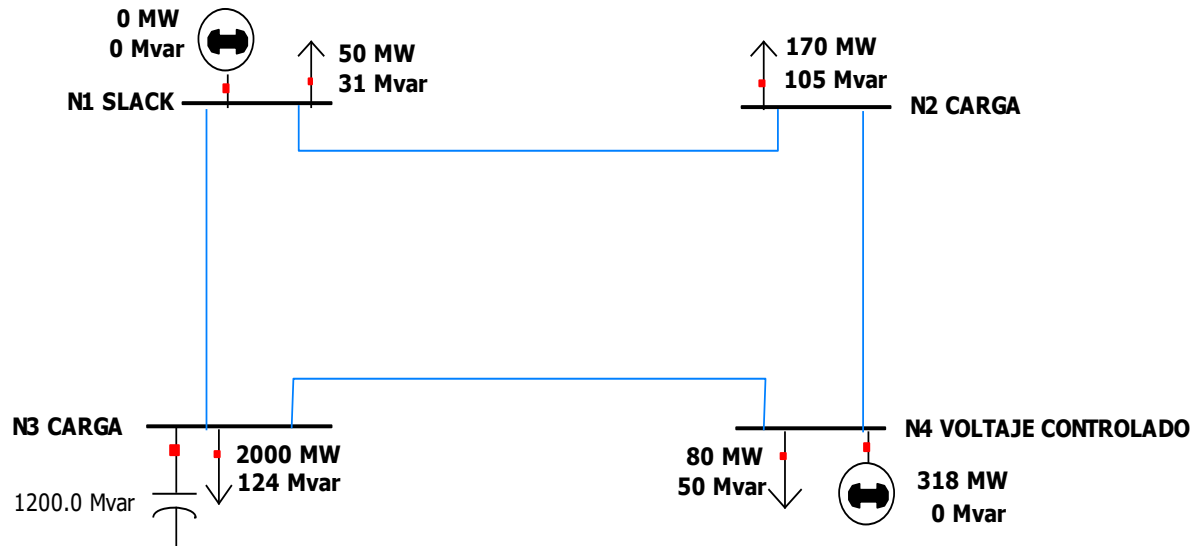


Figura C.2. Sistema de 4 nodos con variación de carga en Nodo 3 y compensado.

- MATLAB

El valor del capacitor calculado en Matlab es $C = -j10 F$.

- POWERWORLD SIMULATOR

Realizando simulación en PowerWorld y haciendo el cálculo del capacitor mediante

la fórmula $C = \frac{Q_c}{2 \pi f v^2}$; obtenemos que $C = 6.01720 \times 10^{-5} F$.

Observación: Ante esta discrepancia en resultados, se concluye que esta problemática puede ser resuelta mediante inyección de potencia reactiva del nodo de voltaje controlado, lo que ayudaría a compensar el nodo de carga 3, siendo este un control de voltaje local, pero al no ser el caso de estudio se deja como trabajo futuro, lo que implica el uso de otros elementos de compensación.