



xx (79 878.1)



**CENTRO DE INVESTIGACION Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL IPN**  
**UNIDAD GUADALAJARA**

**CINVESTAV I.P.N.**  
**SECCION DE INFORMACION**  
**Y DOCUMENTACION**

**ANALISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN**  
**ESTADO ESTABLE MEDIANTE TECNICAS DE**  
**ANALISIS MODAL**



**TESIS QUE PRESENTA**  
**ING. RAMON OCTAVIO JIMENEZ BETANCOURT\***

**PARA OBTENER EL GRADO DE**  
**MAESTRO EN CIENCIAS**

**EN LA ESPECIALIDAD DE**  
**INGENIERIA ELECTRICA**

**GUADALAJARA, JAL. SEPTIEMBRE DE 1999**

**\* BECARIO CONACYT No. 121131**

CLASIF.:	
ADQUIS.:	TESIS-1999
FECHA:	24-XI-99
PROCED.:	Depto. Serv. Bibliográficos

Bibliográficos

**ANALISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN  
ESTADO ESTABLE MEDIANTE TECNICAS DE  
ANALISIS MODAL**

**Tesis de Maestría en Ciencias  
Ingeniería Eléctrica**

Por:

**Ramón Octavio Jiménez Betancourt**

Ingeniero Electricista  
Instituto Tecnológico de Tepic, 1990-1994

Becario de CONACyT, expediente No. 121131

Director de Tesis:

**Dr. Arturo Román Messina**

**CINVESTAV del IPN Unidad Guadalajara, Septiembre de 1999**

## **RESUMEN**

En este trabajo se presenta el desarrollo de un enfoque sistemático para el estudio de la estabilidad de voltaje ante pequeñas perturbaciones en sistemas eléctricos de potencia, basado en el análisis modal de las ecuaciones estáticas de flujos de potencia. La metodología de estudio propuesta se basa en la suposición de que el comportamiento del sistema es descrito por un punto de operación en estado estacionario y que los parámetros del sistema cambian de manera lenta y continua.

Se identifican los principales requerimientos de modelado para el estudio de la estabilidad de voltaje en estado estable y se propone un modelo generalizado del sistema de potencia con características deseables para efectuar este análisis en redes eléctricas complejas. Se ofrece un análisis de las principales características del modelo propuesto, enfatizando la naturaleza de los modos de estabilidad de voltaje y su relación con otras técnicas de análisis. Se definen indicadores de uso práctico, que permiten estimar la cercanía de un sistema de potencia a la condición de inestabilidad y se estudia el efecto de la aplicación de dispositivos de control para mejorar la estabilidad.

La metodología desarrollada se aplica al estudio de la estabilidad de voltaje del sistema de prueba de Nueva Inglaterra. Se presentan estudios comparativos con los resultados obtenidos por otros investigadores así como con otras técnicas descritas en la literatura especializada. Se reportan estudios mostrando el efecto de contingencias en el sistema y las características de la carga en el fenómeno de la estabilidad de voltaje. Finalmente, se investiga la utilización de la técnica de análisis modal en el desarrollo de medidas correctivas basadas en la aplicación de compensación controlable de potencia reactiva, para mejorar las características de estabilidad de los modos críticos de voltaje.

***Dedico esta Tesis a mi Esposa y a mi Padre Q. E. P. D.,  
Norma Alicia Carrillo Orozco y Guadalupe Jiménez Flores  
quienes con Dios piden por mí.***

***A mi Madre Evangelina Betancourt González y a mi  
Hermano José Guadalupe quienes han estado conmigo en  
todos momentos.***

***Con todo mi amor a mi Novia Concepción Guzmán Rubio,  
con quien conocí de nuevo el Amor y me hizo ver lo  
hermoso de la vida.***

# AGRADECIMIENTOS

*Agradezco al Dr. Arturo Roman Messina por su valiosa contribución al desarrollo de mi persona en la realización de este proyecto. Quien sin sus consejos, comentarios y sugerencias este trabajo no hubiese logrado concluir.*

*A todos los compañeros de generación, especialmente a mis mejores amigos el Ing. Isidro Castillo Toledo y el Ing. Agustín Jaime Navarro y Familia, por su inigualable amistad.*

*Al CONACYT por el apoyo económico brindado durante mis estudios de maestría y al CINVESTAV Unidad Guadalajara por las facilidades brindadas para la conclusión de mis estudios.*



# ÍNDICE GENERAL

<b>RESUMEN .....</b>	<b>2</b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>4</b>
<b>CONTENIDO .....</b>	<b>5</b>
<b>LISTA DE TABLAS .....</b>	<b>9</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>10</b>
<b>NOTACIÓN.....</b>	<b>12</b>

## CAPÍTULO 1

### INTRODUCCIÓN

<b>1.1 MOTIVACIÓN .....</b>	<b>15</b>
<b>1.2 BREVE REVISIÓN DEL TRABAJO PREVIO.....</b>	<b>17</b>
<b>1.3 ANÁLISIS MODAL .....</b>	<b>18</b>
<b>1.4 OBJETIVO DE ESTA TESIS .....</b>	<b>19</b>
<b>1.5 APORTACIONES DE ESTA TESIS .....</b>	<b>19</b>
<b>1.6 ESTRUCTURA DE LA TESIS .....</b>	<b>20</b>

## CAPÍTULO 2

### CONCEPTOS BÁSICOS

<b>2.1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>21</b>
<b>2.2 CONCEPTOS BÁSICOS .....</b>	<b>21</b>
<b>2.2.1. Curvas <math>VQ</math> y <math>VP</math> .....</b>	<b>23</b>
<b>2.2.2. Sensitividad <math>VQ</math>.....</b>	<b>26</b>

<b>2.1.3. El concepto de margen de estabilidad .....</b>	<b>28</b>
<b>2.1.4. Modelo incremental de las ecuaciones de balance de potencia.....</b>	<b>29</b>
<b>2.1.5. Efecto de dispositivos de control en el margen de estabilidad.....</b>	<b>31</b>

## **CAPÍTULO 3**

### **MODELADO DEL SISTEMA DE POTENCIA PARA ESTUDIOS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE MEDIANTE TÉCNICAS DE ANÁLISIS MODAL**

<b>3.1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>35</b>
<b>3.2 REQUERIMIENTOS BÁSICOS DE MODELADO .....</b>	<b>35</b>
<b>3.3 MODELO BÁSICO DEL SEP PARA ESTUDIOS EN ESTADO ESTABLE ....</b>	<b>37</b>
<b>3.3.1 Características de la matriz jacobiana .....</b>	<b>38</b>
<b>3.4 MODELOS AVANZADOS DEL SEP PARA ESTUDIOS DE ANÁLISIS MODAL .....</b>	<b>40</b>
<b>3.4.1 Modelado de la red de transmisión .....</b>	<b>40</b>
<b>3.4.2 Modelado de elementos de control.....</b>	<b>40</b>
<b>3.4.3 Generadores síncronos .....</b>	<b>41</b>
<b>3.4.4. Cargas no lineales con dependencia de voltaje.....</b>	<b>43</b>
<b>3.4.5. Representación de dispositivos de control en la red .....</b>	<b>44</b>
3.4.5.1 Compensación estática de VARs .....	44
3.4.5.2 Compensación inductiva Serie .....	45
<b>3.4.6. Representación generalizada de dispositivos de control para estudios en estado estable.....</b>	<b>47</b>

## **CAPÍTULO 4**

### **METODOLOGÍA DE ANÁLISIS MODAL**

<b>4.1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>48</b>
-------------------------------	-----------

<b>4.2 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN COORDENADAS REALES</b>	
4.2.1. Análisis de sensibilidades <i>V-Q</i> .....	48
4.2.2. Modelos de orden reducido .....	49
<b>4.3. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN COORDENADAS MODALES</b>	
4.3.1 Modos de estabilidad .....	51
4.3.2 Análisis de sensibilidades <i>VQ</i> .....	51
4.3.2.1 Sensitividad de voltaje en coordenadas modales.....	52
4.3.3 Interpretación física de modos de voltaje.....	53
4.3.4 Factor de participación nodal .....	53
4.3.5 Factor de participación de rama .....	53
4.3.6 Factor de participación de fuente de potencia reactiva.....	55
<b>4.4. LA TÉCNICA DE DESCOMPOSICIÓN EN VALORES SINGULARES.....</b>	<b>56</b>
<b>4.5. METODOLOGÍA PROPUESTA Y ALGORITMO COMPUTACIONAL .....</b>	<b>58</b>

## **CAPÍTULO 5**

### **APLICACIÓN**

<b>5.1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>63</b>
<b>5.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE NUEVA INGLATERRA .....</b>	<b>63</b>
<b>5.3 VALIDACIÓN DEL PROGRAMA VOLSTAB .....</b>	<b>64</b>
5.3.1 Análisis modal .....	65
5.3.2 Análisis de sensibilidades <i>VQ</i> .....	66
5.3.3 Análisis de valores singulares.....	67
<b>5.4 APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ANÁLISIS MODAL AL ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN EL SPNI.....</b>	<b>67</b>
5.4.1 Análisis del caso base de operación .....	68
5.4.1.1 Areas de potencia reactiva .....	68

5.4.1.2 Factores de participación de ramas y generadores.....	71
5.4.1.3 Efectos de contingencias en la estabilidad de voltaje.....	73
5.4.1.3.1 Efecto de la salida de línea de transmisión.....	73
5.4.1.3.2 Efecto de la salida de un generador.....	74
<b>5.4.2 Determinación del caso crítico de operación.....</b>	<b>75</b>
5.4.2.1 Efecto de las características de la carga .....	80
<b>5.5 DESARROLLO DE MEDIDAS CORRECTIVAS.....</b>	<b>82</b>
<b>5.6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>84</b>

## **CAPITULO 6**

### **CONCLUSIONES, APORTACIONES Y RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS**

<b>6.1 CONCLUSIONES GENERALES .....</b>	<b>86</b>
<b>6.3 APORTACIONES .....</b>	<b>87</b>
<b>6.2 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS .....</b>	<b>88</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>89</b>
<b>APÉNDICE A .....</b>	<b>93</b>

# LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1. Características deseables de modelado del SEP para estudios de estabilidad de voltaje en estado estable .....	36
Tabla 5.1. Comparación de los valores propios obtenidos mediante el programa VOLSTAB y los resultados obtenidos en [37].....	65
Tabla 5.2. Factores de participación nodal para los modos críticos de estabilidad de voltaje .....	66
Tabla 5.3. Sensitividad $V-Q$ correspondientes al caso base de operación.....	66
Tabla 5.4. Comparación de valores propios y valores singulares críticos obtenidos con VOLSTAB .....	67
Tabla 5.5. Modos críticos para el CBO .....	68
Tabla 5.6. Factores de participación nodal para los modos 1 y 2 del CBO.....	69
Tabla 5.7. Factores de participación de rama para el modo 1 del CBO.....	71
Tabla 5.8. Factores de participación de generador para el modo 1 del CBO.....	71
Tabla 5.9. Modos críticos del CBO ante la salida de la LT 1-39.....	73
Tabla 5.10. Factores de participación nodal de los modos 1 y 2 ante la salida de la LT 1-39.....	74
Tabla 5.11. Modos críticos del CBO ante la salida del generador del nodo 32.....	74
Tabla 5.12. Factores de participación nodal de los modos 1 y 2 ante la salida del generador del nodo 32 .....	75
Tabla 5.13. Modos dominantes de estabilidad de voltaje correspondientes al CCO.....	76
Tabla 5.14. Factores de participación nodal de los modos 1 y 2 del CCO.....	76
Tabla 5.15. Factores de participación de rama para el modo 1 del CCO.....	78
Tabla 5.16. Factores de participación de generador para el modo 1 del CCO.....	78
Tabla A.1. Datos de nodos.....	93
Tabla A.2. Datos de ramas del sistema de prueba en pu.....	94

# LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Sistema radial en estudio .....	22
Figura 2.2. Curva $VQ$ para el nodo de carga .....	24
Figura 2.3. Perdidas de potencia reactiva en el enlace de transmisión en función del voltaje en el nodo de carga .....	26
Figura 2.4. Curvas $VQ$ para la carga y el sistema ilustrando el concepto del margen de estabilidad de voltaje.....	29
Figura 2.5. Sistema en estudio mostrando la instalación de un dispositivo de control de voltaje en el punto medio de la red de transmisión .....	32
Figura 2.6. Curvas $VQ$ mostrando el efecto de control ideal de voltaje en el punto medio de la red de transmisión.....	33
Figura 2.7. Comparación de las diferentes alternativas de control sobre el margen de estabilidad del sistema .....	34
Figura 3.1. Curva típica de capacidad de un generador síncrono.....	42
Figura 3.2. Curva simplificada de capacidad del generador síncrono para estudios en estado estable.....	42
Figura 3.3. Curva $VQ$ típica de un compensador estático de VARs (CEV).....	44
Figura 3.4. Representación de un capacitor serie controlado por tiristores conectado entre los nodos $k$ y $m$ de un enlace de transmisión.....	45
Figura 3.5. Representación del CSCT mediante inyecciones de potencia activa y reactiva .....	46
Figura 4.1. Diagrama de flujo del algoritmo computacional para análisis de estabilidad de voltaje ante pequeñas perturbaciones.....	60
Figura 5.1. Diagrama esquemático del Sistema de Prueba de Nueva Inglaterra (SPNI) mostrando las zonas con características radiales.....	64
Figura 5.3. Curvas $VQ$ para los nodos con menor margen de potencia reactiva correspondientes al CBO.....	69
Figura 5.2. Localización física de factores de participación nodal para el CBO .....	70

Figura 5.4. Localización de las participaciones de nodo, generación y rama para el modo 1 del CBO .....	72
Figura 5.5. Localización de los modos críticos de estabilidad de voltaje para el CCO.....	77
Figura 5.6. Localización de participaciones del modo 1 para el CCO.....	79
Figura 5.7. Curvas $VQ$ correspondientes a los nodos con menor margen de estabilidad para el CCO.....	80
Figura 5.8. Curvas $QV$ para el nodo 24 correspondiente al CCO y distintos modelos de carga.....	81
Figura 5.9. Factores de participación nodal para el CBO y distintos modelos de carga...	82
Figura 5.10. Comparación de los 3 casos de compensación sobre los modos críticos.....	83
Figura 5.11. Factores de participación nodal del modo 1 para los 3 casos de compensación.....	84

# NOTACIÓN

$a, b$	Coeficientes exponencial para potencia activa y reactiva respectivamente
$B_{ij}$	Susceptancia de transferencia entre los nodos $ij$
$B_C$	Susceptancia Capacitiva del CEV
$B_L$	Susceptancia inductiva del CEV
$B_{serie}$	Susceptancia equivalente del CSCT
$det()$	Determinante de una matriz
$E$	Magnitud del voltaje en el nodo generador
$E_q$	Máximo voltaje inducido del generador
$FP_n$	Factor de participación nodal
$FP_G$	Factor de participación de dispositivo de control
$FP_{ramaij}$	Factor de participación de la rama $ij$
$G_{ij}$	Conductancia de transferencia entre los nodos $ij$
$ I $	Magnitud de la corriente de carga
$J$	Matriz jacobiana
$J_{P\theta}$	Matriz de derivadas parciales de $P$ con respecto a $\theta$
$J_{PV}$	Matriz de derivadas parciales de $P$ con respecto a $V$
$J_{PE}$	Matriz de derivadas parciales de $P$ con respecto a $E$
$J_{Q\theta}$	Matriz de derivadas parciales de $Q$ con respecto a $\theta$
$J_{QV}$	Matriz de derivadas parciales de $Q$ con respecto a $V$
$J_{QE}$	Matriz de derivadas parciales de $Q$ con respecto a $E$
$J_{QG\theta}$	Matriz de derivadas parciales de $Q_G$ con respecto a $\theta$
$J_{QGV}$	Matriz de derivadas parciales de $Q_G$ con respecto a $V$
$J_{QGE}$	Matriz de derivadas parciales de $Q_G$ con respecto a $E$
$J_{QV}^R$	Matriz jacobiana reducida
$m$	Pendiente de la curva $V-Q$
$M$	Pendiente del CEV en el rango de control lineal
$nb$	Numero de nodos
$nbc$	Numero de nodos de carga
$P, Q$	Potencia activa y reactiva de carga respectivamente
$P_d^i$	Potencia activa demandada en el $i$ -ésimo nodo
$P_t^i$	Potencia activa inyectada al $i$ -ésimo nodo
$P_g^i$	Potencia activa generada en el $i$ -ésimo nodo
$P_G$	Potencia activa generada por el generador
$P_{max}$	Limite superior de potencia activa del generador
$P_{min}$	Limite inferior de potencia activa del generador
$P_0$	Potencia activa de carga a voltaje nominal
$Q$	Potencia reactiva de carga
$Q_{cev}$	Potencia reactiva aportada por el CEV



$Q_{cev}$	Potencia reactiva aportada por el CEV
$Q_g^i$	Potencia reactiva generada en el i-ésimo nodo
$Q_d^i$	Potencia reactiva demandada en el i-ésimo nodo
$Q_t^i$	Potencia reactiva inyectada al i-ésimo nodo
$Q_g^{max}$	Máxima potencia reactiva de salida del generador
$Q_{max}, Q_{min}$	Limite superior e inferior de potencia reactiva del generador respectivamente
$Q_0$	Potencia reactiva de carga a voltaje nominal
$S$	Potencia compleja aportada por el generador
$U$	Matriz de vectores singulares derechos
$V$	Matriz de vectores singulares izquierdos y Magnitud del voltaje en el nodo de carga
$V_{crit}$	Magnitud del voltaje critico
$V_i$	Magnitud de voltaje del i-ésimo nodo
$V_m$	Magnitud del voltaje a mitad de la línea de transmisión
$V_t$	Voltaje en terminales del generador
$V_T$	Voltaje en terminales del CEV
$V_{ref}$	Voltaje de referencia del CEV
$X$	Reactancia inductiva de la línea de transmisión
$X_d$	Reactancia transitoria en eje d del generador
$X_q$	Reactancia transitoria en eje q del generador
$X_L$	Reactancia inductiva del CSCT
$X_C$	Reactancia capacitiva del CSCT
$\alpha$	Angulo de disparo en tiristores del CSCT
$\delta$	Angulo de fase del voltaje del nodo generador
$\delta_{crit}$	Angulo de fase critico del generador
$\phi$	Angulo de factor de potencia en la carga
$\eta$	Matriz de vectores propios izquierdos
$\lambda$	Valor propio
$\theta$	Angulo de fase del voltaje del nodo de carga
$\theta_{ij}$	Angulo de transmisión entre los nodos ij
$\theta_m$	Angulo de fase del voltaje del nodo a mitad de la linea de transmisión
$\sigma$	Valor singular
$\xi$	Matriz de vectores propios derechos
$\Delta\delta$	Variación del ángulo del generador
$\Delta P$	Cambio incremental en la potencia activa de carga
$\Delta P_d$	Cambio incremental en la potencia activa de salida del dispositivo de la red
$\Delta Q$	Cambio incremental en la potencia reactiva de carga
$\Delta Q_d$	Cambio incremental en la potencia reactiva de salida del dispositivo de la red
$\Delta Q_m$	Vector de variaciones modales de potencia reactiva
$\Delta V_m$	Vector de variaciones modales de magnitudes de voltaje nodal

$\Delta\theta_d$	Cambio incremental en el ángulo de fase del nodo de conexión del dispositivo de la red
$\Delta\theta_m$	Vector de variaciones modales de ángulos de fase nodal
$\Delta Q_{mi_{perdidasi_j}}$	Perdidas modales de potencia reactiva de la rama ij
$\Delta V$	Variación del voltaje en la carga
$\Delta V_d$	Cambio incremental en la magnitud del voltaje del nodo de conexión del dispositivo de la red
$\partial/\partial x$	Símbolo de derivada parcial
$\Sigma$	Matriz diagonal de valores singulares
$\Lambda$	Matriz diagonal de valores propios

## ACRÓNIMOS

CBO	Caso Base de Operación
CCO	Caso Critico de Operación
CEV	Compensador Estático de VARs
CSCT	Capacitor Serie Controlado por Tiristores
DVS	Descomposición en Valores Singulares
EPRI	Electric Power Research Institute
FACTS	Flexible Aternating Current Transmission System
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
SPNI	Sistema de Prueba de Nueva Inglaterra
WSCC	Western Systems Coordinating Council

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 MOTIVACIÓN

El fenómeno de estabilidad de voltaje ha emergido en los últimos años como uno de los problemas de mayor importancia en la planeación y operación de los sistemas eléctricos de potencia. La tendencia a operar los sistemas en condiciones de niveles de demanda elevadas ha conducido a la presencia de problemas severos de voltaje. Ejemplos importantes de inestabilidad de voltaje han acontecido en: la red eléctrica Francesa en 1978 y 1987, en Suecia en 1983, en la zona de Tokio en 1987 [44] y más recientemente en el sistema del WSCC (Western Systems Coordinating Council) en los Estados Unidos en 1996 [3]. En cualquiera de los casos mencionados, los costos derivados de estos incidentes fueron en general muy elevados y condujeron a una fuerte reacción de la opinión pública lo cual ha motivado una revisión de los criterios de seguridad actualmente utilizados por las empresas de suministro de energía.

Una revisión de los eventos ocurridos en estos sistemas revela que el problema de estabilidad de voltaje es extremadamente complejo y puede envolver periodos de tiempo y características de evolución muy diferentes, la acción de elementos de control y en muchos casos errores de operación.

El análisis de los eventos que producen una condición de inestabilidad de voltaje, indica que el fenómeno puede presentarse de forma muy rápida o muy lenta; esto depende de la naturaleza de la perturbación a que se someta el sistema. Dos observaciones aparecen en forma repetida en estos incidentes:

1. En la condición de operación anterior al disturbio los sistemas de potencia se encontraban operando sin un elemento principal, por ejemplo, una línea de transmisión o un generador. Aunado a ello, los márgenes de potencia reactiva disponibles eran mínimos.
2. En algunos casos, la pérdida de estabilidad se inicio generalmente con la salida de un solo elemento. En otros casos la pérdida de estabilidad fue consecuencia de fallos sucesivos.

Los eventos que llevan al sistema a una condición de inestabilidad de voltaje de forma muy rápida se han caracterizado por presentarse después de la salida de una línea, generador o carga importante conduciendo a un deterioro de las magnitudes de voltaje en nodos de carga, en periodos de tiempo típicos de 1 a 10 minutos, el mismo lapso en el que los fenómenos de estabilidad angular se han presentado. Esto ha generado una fuerte incertidumbre sobre la naturaleza real del fenómeno en el sentido de estabilidad angular o de voltaje [1]. Por otra parte, los eventos que han llevado a la aparición de este fenómeno

de forma lenta, se han caracterizado por la presencia de un aumento progresivo en la demanda o la salida de líneas, generadores o cargas poco importantes, llevando a los generadores cercanos a la carga a sus límites de potencia reactiva. En estos casos el fenómeno de inestabilidad se ha manifestado por una disminución progresiva del voltaje (pico de la mañana o de la tarde) tomando horas para que el problema se presente.

El fenómeno de estabilidad (inestabilidad) de voltaje no ha sido comprendido de manera apropiada por la industria conduciendo a la creación de grupos de trabajo por diferentes instituciones, industrias y centros de investigación entre los que cabe destacar los grupos de trabajo del CIGRE, IEEE, y el EPRI entre otros organismos.

A más de dos décadas de los primeros incidentes asociados con la pérdida de estabilidad de voltaje, incidentes recientes en Norteamérica, Brasil y otros sistemas muestran que la industria no ha logrado desarrollar herramientas efectivas para prevenir el fenómeno. En la actualidad, existe una necesidad creciente de desarrollar procedimientos y herramientas analíticas para el estudio de la estabilidad de voltaje. Esta necesidad involucra diferentes aspectos relacionados con el análisis de la confiabilidad de la operación de un sistema de potencia. En un reciente estudio, motivado por los fenómenos de inestabilidad de voltaje en Estados Unidos en 1996, el Western Systems Coordinating Council (WSCC) identificó los siguientes aspectos críticos para el análisis y prevención de la inestabilidad de voltaje para las cuales propuso las siguientes recomendaciones a las compañías integrantes [3]:

- Mejoramiento de las metodologías de estudio del fenómeno de estabilidad
- Definición de criterios apropiados de estabilidad de voltaje
  - Consideración de incertidumbres
- Mejoramiento de modelos del sistema de potencia y programas de análisis de la estabilidad
  - Estrategias de corte de carga por bajo voltaje
  - Metodología para la medición de reservas de potencia reactiva en tiempo real
- Entrenamiento de operadores

La magnitud y alcance de estas recomendaciones refleja en forma fiel, la importancia del fenómeno en estudio.

El fenómeno de estabilidad de voltaje se ha analizado mediante técnicas de análisis en el dominio del tiempo o análisis dinámico y técnicas en estado estable o análisis estático [19]. La elección de la técnica utilizada depende de la información que se requiera obtener acerca del comportamiento del sistema. El análisis dinámico, proporciona información acerca de la interacción de dispositivos en la estabilidad local del sistema, tal es el caso de reguladores automáticos de voltaje, excitadores de campo y otros elementos. La principal limitación de esta técnica de análisis se relaciona al elevado costo computacional requerido, así como la incapacidad de proporcionar márgenes o medidas de la distancia del sistema a la condición de inestabilidad. Esto ha motivado el desarrollo de técnicas de análisis basadas principalmente en las ecuaciones convencionales de flujos de potencia [16].

Por otra parte, las técnicas de análisis estático han sido utilizadas en forma exhaustiva en las últimas décadas, ya que da información desde una perspectiva amplia sobre la estabilidad global del sistema de potencia, además que computacionalmente es más rápida que la técnica del dominio del tiempo y los resultados obtenidos son muy similares [38]. Muchos investigadores han propuesto diversas técnicas de análisis basadas principalmente en flujos de potencia. Los primeros resultados muestran que la estabilidad esta fuertemente asociada con la singularidad de la matriz Jacobiana.

En el contexto del estudio de la estabilidad de voltaje mediante técnicas de análisis estático, en esta tesis se presenta la aplicación del análisis modal como una técnica de solución al problema de identificación de los mecanismos de inestabilidad. Asimismo se propone una metodología para incluir modelos de cargas no lineales y dispositivos de FACTS y así evaluar su impacto en la estabilidad de voltaje del sistema eléctrico de potencia.

## **1.2 BREVE REVISIÓN DEL TRABAJO PREVIO**

El fenómeno de estabilidad de voltaje ha sido asociado tradicionalmente a la incapacidad de satisfacer la demanda de potencia reactiva en un nodo de carga en un sistema de configuración radial [2]. En este contexto, las primeras metodologías de uso práctico para el análisis de estabilidad se basaron en el estudio de relaciones de sensibilidad de la magnitud del voltaje al cambio en la demanda de potencia reactiva. Este tipo de ideas ha motivado la utilización de las curvas  $V-Q$  como la herramienta de análisis más utilizada por la industria eléctrica [3].

La primera metodología analítica basada en la utilización de programas flujos de potencia para análisis de estabilidad de voltaje fue propuesta en 1961 por Venikov [4], quien sugiere un indicador de estabilidad para un sistema de dos nodos. En ese trabajo el signo de la pendiente en la curva de voltaje de envío contra voltaje de recepción, se utiliza para definir un criterio de estimación de la estabilidad de voltaje. Posteriormente, Venikov [5] demuestra que la estabilidad de un sistema multinodal puede estudiarse con base al signo del determinante de la matriz Jacobiana obtenida del flujo de potencia.

En este sentido, Abe y colegas [6] extienden el primer criterio de Venikov al caso multinodo considerando cargas no lineales dependientes de la magnitud del voltaje, demostrando que el modelo de potencia constante es el modelo más crítico. Mas tarde en [7] proponen una metodología para calcular las mejores condiciones iniciales para el estudio de flujo potencia en un sistema que opera en la vecindad del límite de estabilidad de voltaje, y así asegurar la convergencia del flujo de potencia en el límite del punto de colapso.

Los resultados anteriores presentan el inconveniente de que al utilizar el primer término de la expansión en series de Taylor en las expresiones de flujos de potencia, el espectro

de no linealidades del fenómeno no es cubierto del todo. Motivados por esta problemática, Iwamoto y Tamura proponen en [8] una metodología para retener los efectos no lineales mediante un estudio de flujos convencional. Posteriormente, utilizando estos resultados se propone una metodología para encontrar múltiples soluciones en el estudio de flujos de potencia [9].

En contraste a estas investigaciones, Galiana propone una metodología para análisis de estabilidad que no utiliza un estudio de flujos de potencia previo [10]. Esta técnica es eficiente en sistemas de pequeña dimensión pero para redes de gran tamaño, su planteamiento analítico es complejo dificultándose su implementación computacional.

Por otro lado, Borremans propone cuatro estimadores de estabilidad de voltaje bastante rápidos y confiables que utilizan una solución de flujos de potencia previa para su cálculo [11]. Este concepto fue posteriormente extendido por Carpentier quien propone un indicador similar pero que utilizaba estudios de flujos de potencia óptimos [12].

Otros investigadores que han seguido enfoques similares de estudio son P. Kessel y H. Glavitch quienes proponen un indicador de estabilidad que supera computacionalmente a los desarrollados por Borremans y Carpentier [13]. Estos enfoques, sin embargo, tienen la limitante de que no es posible calcular los índices de estabilidad cuando no se tiene convergencia en el estudio de flujo de potencia.

Es importante destacar que estos primeros desarrollos se enfocan en determinar solamente si el sistema es estable o no, sin proporcionar una medida del grado o margen de estabilidad del sistema. En este sentido, Flatabo y otros investigadores [14] proponen la primer metodología de uso práctico para obtener márgenes de estabilidad utilizando los elementos de la matriz Jacobiana; a este criterio se le denomina criterio de sensibilidades.

Más recientemente, Schlueter y colegas utilizando los resultados obtenidos por Flatabo, proponen la aplicación de técnicas de análisis de sistemas lineales al estudio de estabilidad de voltaje en sistemas de potencia con el objeto de determinar si un sistema de potencia que opera cerca del punto de voltaje crítico es controlable y observable [15]. Este tipo de enfoques ha conducido al desarrollo de distintas metodologías para la estimación de la estabilidad de voltaje en tiempo real [16].

En paralelo a este desarrollo algunos académicos han investigado la aplicación de métodos de análisis no lineal, principalmente basados en conceptos de energía al estudio la estabilidad de voltaje. Entre estos esfuerzos cabe destacar las contribuciones de I. Dobson [17] y Cañizares [18] quienes han investigado los mecanismos no lineales que conducen a la inestabilidad.

### **1.3 ANÁLISIS MODAL**

La técnica de análisis modal aplicada al estudio de estabilidad de voltaje en redes de gran dimensión fue inicialmente propuesta en 1991 [45]. La noción fundamental sobre la que se basa esta metodología es que el comportamiento del sistema puede describirse por un

punto de equilibrio estable en la vecindad de la condición de inestabilidad, y que los parámetros del sistema cambian de manera lenta y continua. Bajo estas consideraciones, el comportamiento del sistema puede analizarse al introducir una transformación lineal que permite estudiar el fenómeno de estabilidad de voltaje en coordenadas modales. El análisis de las participaciones nodales permite identificar las zonas del sistema susceptibles de experimentar problemas de inestabilidad, la identificación de los enlaces de transmisión con mayor participación en cada modo de voltaje y el desarrollo de medidas correctivas para mejorar los márgenes de inestabilidad.

Los esfuerzos de investigación basados en la aplicación de técnicas de análisis modal han culminado en el desarrollo del programa VSTAB [19] por el EPRI (Electric Power Research Institute) en los Estados Unidos el cual ha sido adoptado como herramienta de trabajo por el WSCC.

En años recientes, diferentes investigadores han extendido estos conceptos con base a la descomposición en valores singulares de la matriz de sensibilidad voltaje-potencia reactiva. Así por ejemplo, en 1991 Hill y Anderson proponen un indicador de estabilidad utilizando el mínimo valor singular de la matriz Jacobiana [20]. Este indicador presenta ventajas sobre la técnica de sensibilidades ya que los vectores singulares proporcionan información sobre la localización de las zonas problemáticas del sistema y presenta características de robustez numérica.

La utilidad de este enfoque de análisis ha sido evaluada en el estudio de estabilidad de voltaje en redes eléctricas complejas. Mas recientemente, este enfoque de análisis ha sido adoptado por otros investigadores [46] e implementado como herramienta para la evaluación y mejoramiento de los márgenes de estabilidad de voltaje

#### **1.4 OBJETIVO DE ESTA TESIS**

El principal objetivo de esta tesis es la evaluación y aplicación de técnica de análisis modal al análisis de estabilidad de voltaje ante pequeñas perturbaciones y el desarrollo de medidas correctivas basadas en la aplicación sistemática de dispositivos de control de voltaje.

Con este propósito se propone una metodología sistemática de uso práctico basada en el análisis modal de las ecuaciones de flujos de potencia, con la capacidad de identificar zonas vulnerables del sistema a experimentar problemas de estabilidad de voltaje, la evaluación de márgenes de estabilidad para una condición específica de operación, y la aplicación de elementos e control para mejorar la estabilidad de voltaje ante pequeñas perturbaciones.

#### **1.5 APORTACIONES DE ESTA TESIS**

Las principales contribuciones de esta tesis son:

1. El análisis de los mecanismos que conducen a la inestabilidad de voltaje con base al estudio de un sistema simplificado
2. El desarrollo de un modelo generalizado del sistema de potencia adecuado para el estudio de estabilidad de voltaje ante pequeñas perturbaciones.
3. El desarrollo de una metodología de uso práctico que permite la identificación de los mecanismos que conducen a la inestabilidad de voltaje, zonas del sistema susceptibles a experimentar problemas de inestabilidad y el desarrollo de medidas correctivas.
4. La extensión de los algoritmos existentes en la literatura, basados en el análisis modal, para calcular la participación modal de líneas de transmisión, generadores y cargas.
5. El desarrollo de una herramienta de simulación en computadora digital para el análisis sistemático de la estabilidad de voltaje ante pequeñas perturbaciones.
6. La evaluación sistemática de las metodologías desarrolladas en el estudio de la estabilidad de voltaje en un sistema de prueba con características reales.

## **1.6 ESTRUCTURA DE LA TESIS**

La estructura general de esta tesis es la siguiente:

En el Capítulo 2 se presenta un análisis del fenómeno de estabilidad de voltaje en un sistema de estructura radial, ilustrando los principales conceptos utilizados en este trabajo. En el Capítulo 3 se describen los modelos del sistema de potencia utilizados en este trabajo de tesis. Se enfatiza la necesidad de disponer de modelos detallados de los distintos dispositivos del sistema, particularmente el modelo de las cargas del sistema y de dispositivos de control en la red de transmisión. En el Capítulo 4 se describen las técnicas de análisis estático así como una metodología para la identificación de los mecanismos que conducen a la inestabilidad mediante la técnica de análisis modal. Finalmente en el Capítulo 5 se presenta un estudio de la aplicación sistemática de la técnica de análisis modal al estudio de la estabilidad de voltaje ante pequeñas perturbaciones en un sistema de potencia de características reales. Se evalúa el impacto del modelo de la carga en la estabilidad de voltaje, se proponen medidas correctivas basado en la incorporación de compensadores estáticos de VARs (CEVs); los resultados obtenidos se comparan con aquellos obtenidos por otros investigadores así como con otras técnicas de análisis.



# CAPÍTULO 2

## CONCEPTOS BÁSICOS

### 2.1 INTRODUCCIÓN

La estabilidad de voltaje se define, como la capacidad de un sistema eléctrico de potencia (SEP) para mantener niveles de voltaje aceptables bajo condiciones normales de operación y ante contingencias [21]. En este sentido, un sistema de potencia se encuentra en una condición de inestabilidad o colapso de voltaje cuando una perturbación ocasiona una caída progresiva e incontrolable del voltaje la cual conduce a la operación del equipo de protección y eventualmente a la desconexión de elementos de transmisión o la carga misma.

Los mecanismos que conducen a la inestabilidad son complejos y pueden involucrar: respuestas del sistema en períodos de tiempo largos, acciones de control y la presencia de fallos secuenciales. La acción de dispositivos de control ó protección así como las características de la carga y el punto de operación pueden afectar en forma importante la manera en que el sistema responde a la perturbación, y con ello su capacidad para mantener una condición de operación estable.

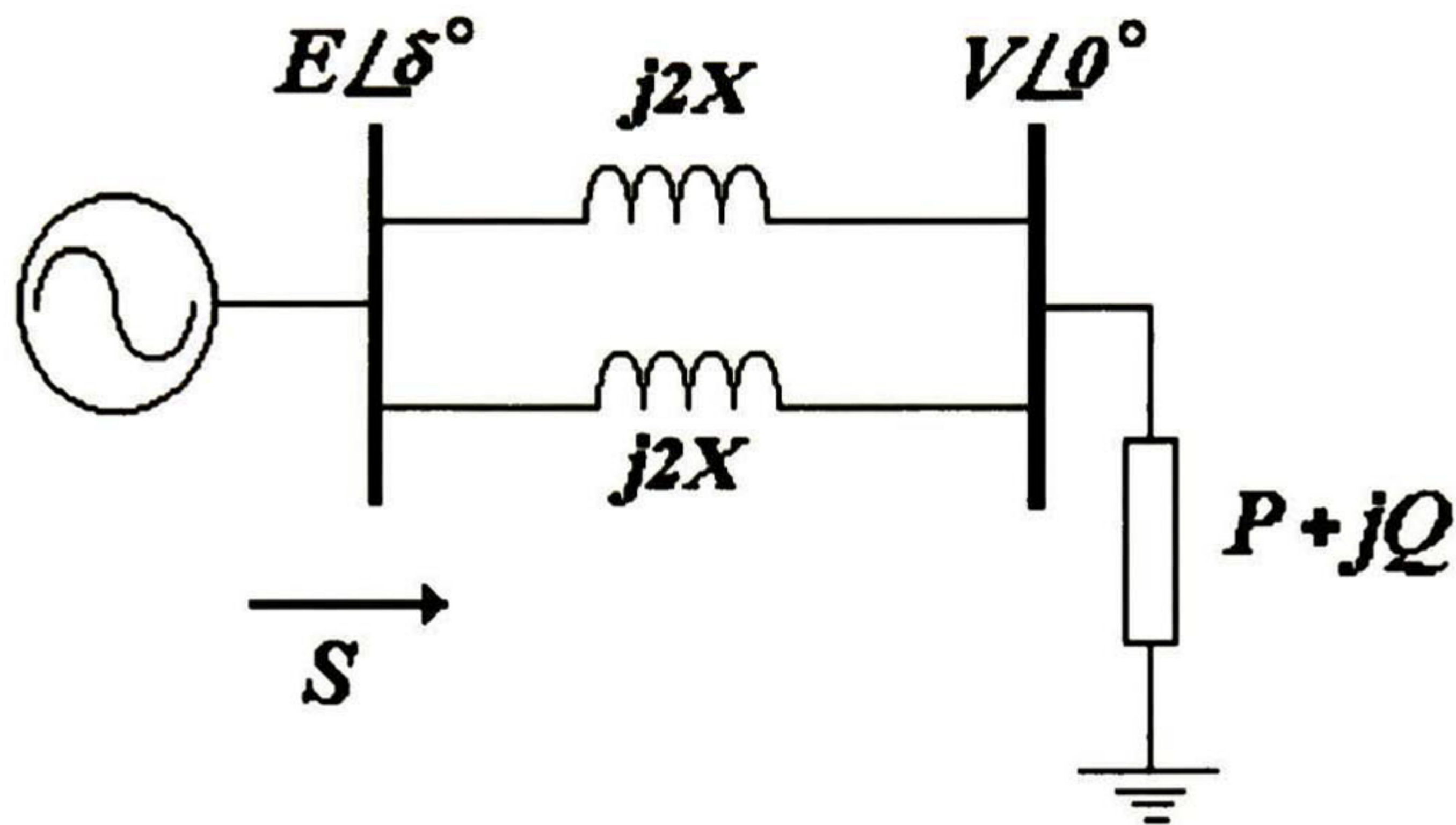
En este capítulo se presenta un análisis fundamental de las principales características del fenómeno de estabilidad de voltaje en sistemas simplificados. Con base en este análisis, se introducen los conceptos de curvas  $V-P$  y  $V-Q$  y se define el concepto de margen de estabilidad de voltaje. Se presenta una discusión sobre el efecto de las características de la carga y la acción de elementos de control en el fenómeno de estabilidad de voltaje

Este capítulo esta estructurado de la siguiente manera: En la sección 2.2 se derivan expresiones analíticas que ilustran la presencia de soluciones múltiples en el problema de flujos de potencia así como el efecto de las características de la carga y la estructura del sistema sobre el fenómeno de estabilidad. A partir de estas expresiones analíticas se define el concepto de margen de estabilidad y se presenta un análisis de las principales herramientas para el estudio de la estabilidad de voltaje. Finalmente se introducen algunos conceptos relacionados a la instalación de dispositivos de control para mitigar el problema de estabilidad de voltaje. Este análisis es relevante debido a que los sistemas radiales son más sensibles a problemas de voltaje.

### 2.2 CONCEPTOS BÁSICOS

La Figura 2.1 muestra el diagrama del sistema considerado para el análisis del fenómeno de inestabilidad de voltaje. Por simplicidad en el análisis, se desprecia la resistencia y

capacitancia del sistema y se asume, por otra parte, que el generador en el extremo emisor tiene una capacidad ilimitada de suministro de potencia reactiva.



**Figura 2.1.- Sistema radial en estudio**

Las ecuaciones que definen el balance de potencia para el nodo de carga son:

$$P = \frac{EV}{X} \sin \delta \quad (2.1)$$

$$Q = \frac{EV}{X} \cos \delta - \frac{V^2}{X} \quad (2.2)$$

en donde:

- $E$  = Magnitud del voltaje en el nodo generador
- $\delta$  = Angulo de fase del voltaje del nodo generador
- $V$  = Magnitud del voltaje en el nodo de carga
- $S$  = Potencia compleja aportada por el generador
- $P$  = Potencia activa de carga
- $Q$  = Potencia reactiva de carga
- $X$  = Reactancia de la línea de transmisión

Combinando las ecuaciones (2.1) y (2.2) desaparece la dependencia del ángulo  $\delta$  obteniéndose la expresión:

$$V^4 + V^2(2QX - E^2) + X^2(P^2 + Q^2) = 0 \quad (2.3)$$

Por consiguiente, la magnitud del voltaje  $V$  en el nodo de carga puede expresarse por la relación no lineal:

$$V = \left[ \frac{E^2 - 2QX}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(2QX - E^2)^2 - 4X^2(P^2 + Q^2)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.4)$$

Si  $P$  y  $Q$  representan las variables independientes y el voltaje  $V$  es la variable dependiente, la solución de la ecuación (2.4) para un nivel dado de la carga  $P^o, Q^o$  conduce a dos soluciones, una o ninguna como se explica a continuación.

En el caso más general, para cada nivel de demanda existirán dos soluciones de voltaje que satisfacen la ecuación (2.4); en el espacio tridimensional  $P, Q, V$ , la solución de esta ecuación conduce a un número infinito de curvas. El análisis puede simplificarse si se asume que la carga varía en el transcurso del tiempo con una característica de factor de potencia constante  $\phi$  ( $Q=P*\tan \phi=P*cte$ ), lo cual reduce el número de parámetros.

Con estas consideraciones, la solución para (2.4) con  $Q$  como variable independiente describe una curva cuadrática cuyos extremos están dados por  $V=E$  y  $V=0$  para  $P=Q=0$ . El punto máximo de carga se obtiene en el caso de que el término del radical en (2.4) sea cero; en este caso la solución será única y se cumple cuando:

$$Q_{max} = \frac{E^2}{4X} - \frac{XP^2}{E^2} \quad (2.5)$$

Al voltaje correspondiente a esta condición de demanda se le denomina voltaje crítico y se expresa como:

$$V_{crítico} = \sqrt{\left[ \frac{E^2 - 2QX}{2} \right]} \quad (2.6)$$

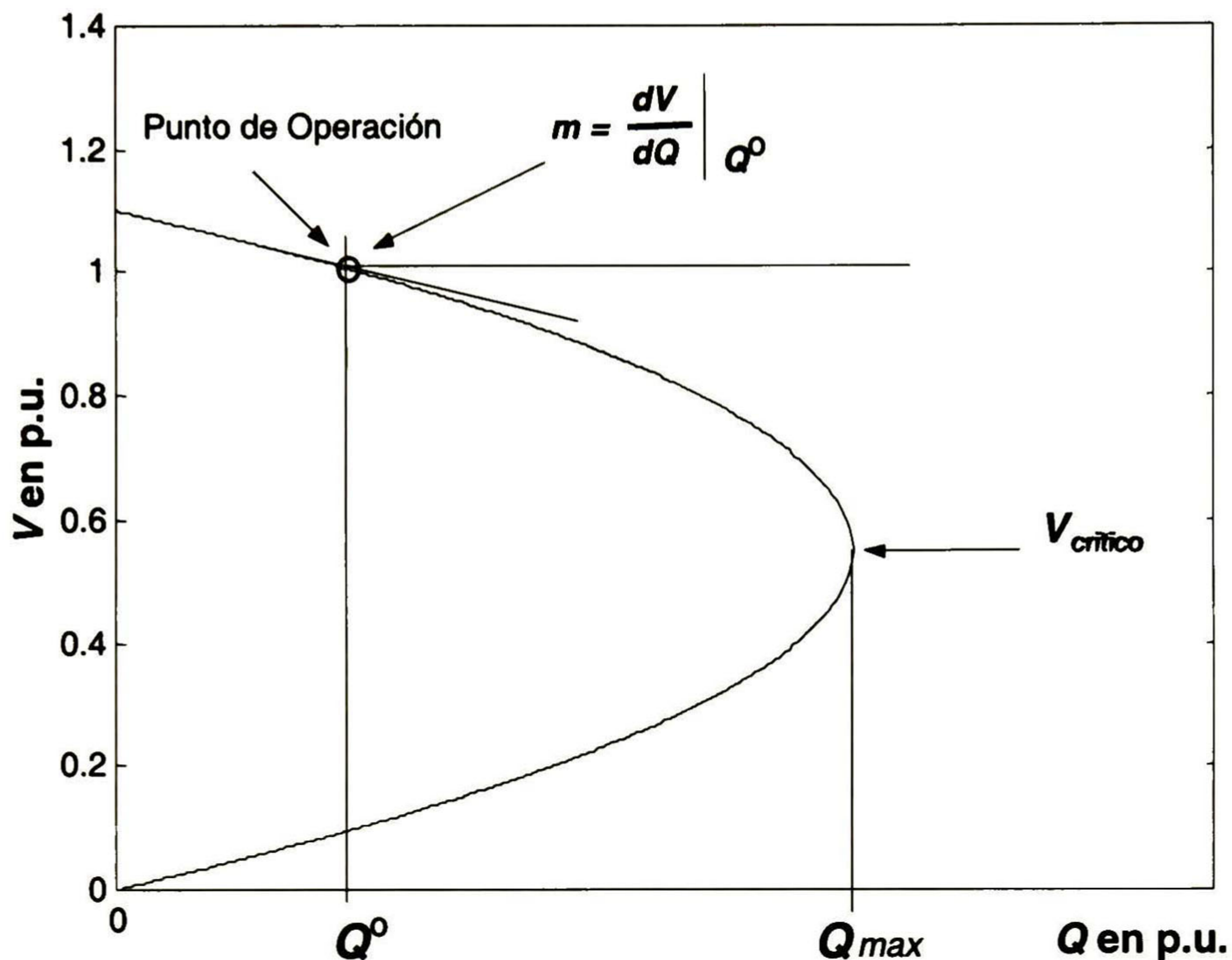
La ecuación (2.6) representa el punto de colapso de voltaje del nodo de carga, definido por la relación ( $V_{crítico}, Q_{max}$ ); a partir de esta condición de carga el voltaje decrece siguiendo la trayectoria de la parábola descrita por la ecuación (2.4). Físicamente,  $Q_{max}$  representa la carga máxima para la cual se tiene una solución real para la ecuación (2.4), o bien, la carga máxima para la cual se tiene una solución al problema de flujo de potencia. A continuación se proporciona una interpretación gráfica de este mecanismo el cual permite una mejor interpretación del fenómeno.

### 2.2.1 Curvas $V-Q$ y $V-P$

En el estudio de la estabilidad de voltaje resulta conveniente obtener curvas que muestren la sensibilidad del cambio en la magnitud de voltaje ante cambios en la demanda de potencia activa o reactiva; estas curvas reciben el nombre genérico de curvas características  $V-P$  y  $V-Q$ , respectivamente. Analíticamente, estas curvas representan la proyección de la familia de curvas resultantes de la solución de la ecuación (2.4) sobre los planos bidimensionales  $V-P$  y  $V-Q$ , respectivamente.

La Figura 2.2 muestra una curva típica  $V-Q$  obtenida de la solución de la ecuación (2.4) para el sistema de ejemplo. En esta figura  $V^o$  representa el voltaje inicial de operación,

correspondiente a un nivel de demanda  $Q^0$ , mientras que el voltaje crítico  $V_{crítico}$  y la potencia reactiva máxima  $Q_{max}$  están definidos por las ecuaciones (2.5) y (2.6).



**Figura 2.2.- Curva V-Q para el nodo de carga**

Se puede apreciar que la magnitud del voltaje  $V$  en el nodo de carga decrece conforme  $Q$  aumenta, hasta alcanzar el punto de voltaje crítico; en este punto se dice que el sistema entra en una condición de colapso de voltaje [22], definido por el punto  $(V_{crítico}, Q_{max})$ . Es importante notar en este análisis, que para cada condición de carga reactiva existen dos soluciones de voltaje como se mostró en la sección anterior. Esto constituye un problema de soluciones múltiples en estudios de flujos de potencia el cual ha sido observado en análisis teóricos y estudios reales de sistemas de potencia [23, 24], y es dependiente del nivel de carga del sistema.

Este análisis sugiere también que el problema de soluciones múltiples puede presentarse principalmente en condiciones de demanda ligera. Conforme el nivel de demanda  $Q$  aumenta, la solución superior e inferior correspondientes al nivel de demanda  $Q^0$  tienden a converger al mismo valor en el punto crítico. En este punto, si la demanda continúa aumentando no existirá solución para el problema de flujos de potencia, lo cual se interpreta analíticamente, como una solución compleja para (2.4).

La naturaleza de las curvas  $V-Q$  y  $V-P$  ha motivado el desarrollo de diversas técnicas de análisis de estabilidad de voltaje. Así por ejemplo, el análisis de la pendiente de la curva  $V-Q$  en la Figura 2.2 muestra que esta cambia de signo en el punto de voltaje crítico. En esta

condición, la pendiente de la curva toma un valor infinito lo cual se ha adoptado como un criterio para el determinar el límite de estabilidad.

En la parte superior de la curva, la pendiente es negativa, en tanto que en la parte inferior es positiva. Físicamente esto significa que en la operación del sistema en la parte superior, aumentos en la demanda de potencia reactiva ocasionarán que el voltaje disminuya, mientras que en la parte inferior, aumentos en la demanda de potencia reactiva ocasionarán que el voltaje aumente. Esto ha motivado que distintos autores consideren a la operación en la región inferior de la curva  $V-Q$  como la zona inestable de operación en el sentido de la estabilidad de voltaje.

En la práctica, la operación en la región superior de la curva  $V-Q$  es considerada deseable debido a las siguientes razones:

- Los voltajes resultantes de operación son muy cercanos al valor nominal de diseño.
- El valor de la corriente en el enlace de transmisión es menor y en consecuencia se tendrán menores pérdidas por calentamiento así como menores pérdidas de potencia reactiva.

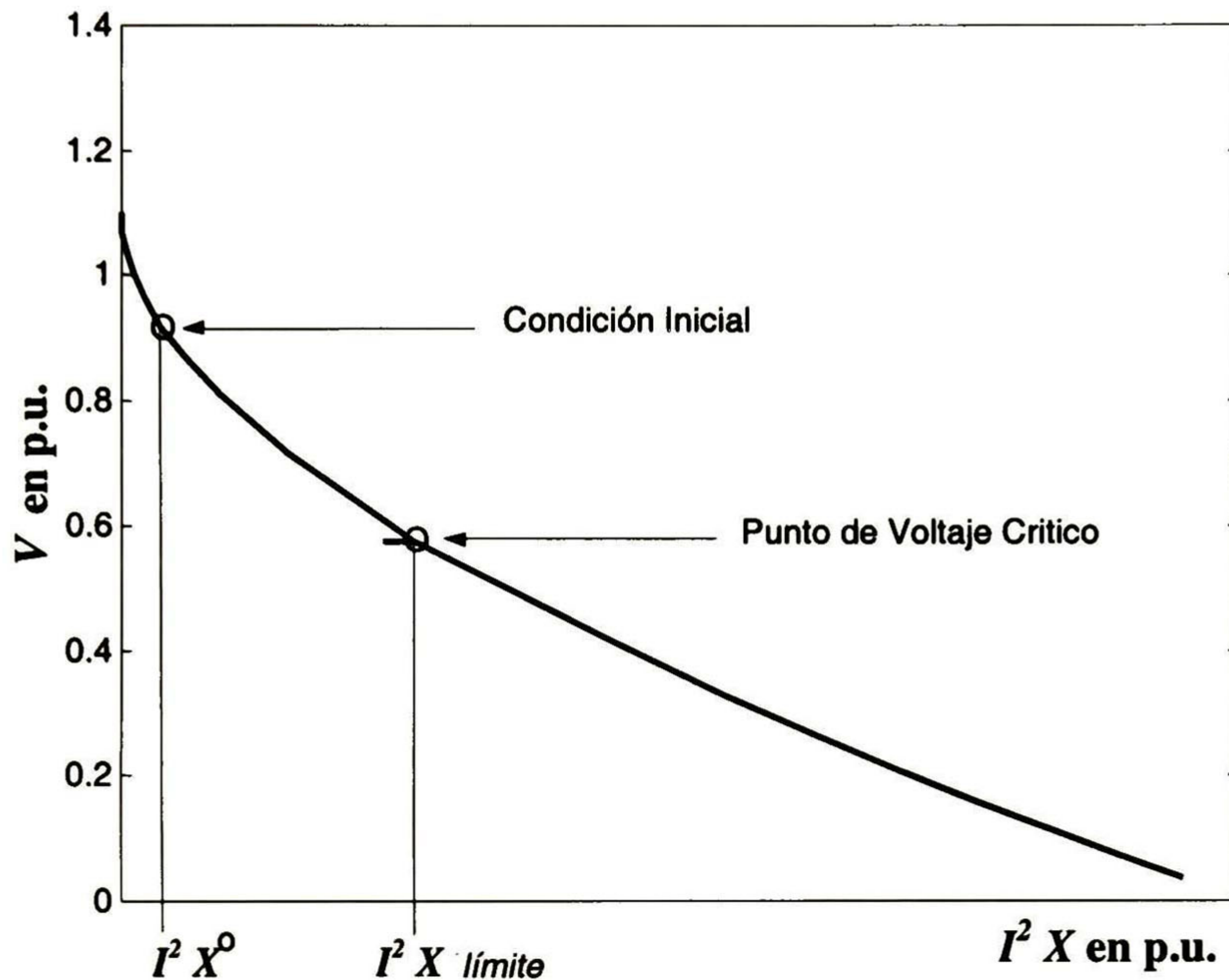
Para ilustrar estos conceptos es conveniente obtener la corriente en el circuito a partir de (2.1) y (2.2) como:

$$|I| = \frac{|S|}{|V|} = \sqrt{\frac{P^2 + Q^2}{V^2}} = \sqrt{\frac{E^2}{X^2} - \frac{V^2}{X^2} - \frac{2Q}{X}} \quad (2.7)$$

Esta relación muestra que para un nivel dado de potencia reactiva  $Q$ , y en consecuencia  $V$  se tendrán también dos niveles posibles de corriente  $I$ , correspondientes a la operación en la parte superior e inferior de la curva  $V-Q$ . Se puede observar en (2.7) que en la región superior de la curva  $V-Q$ , la magnitud de la corriente en el circuito será siempre menor que la corriente en la parte inferior de la curva.

En la práctica, la operación en la parte inferior de esta curva puede conducir a valores excesivamente altos para la corriente, aumentando en forma significativa las pérdidas  $I^2X$  en el circuito, como se ilustra en la Figura 2.3.

Físicamente el fenómeno anterior puede explicarse al notar que en la parte inestable de la curva, las pérdidas excesivas de potencia reactiva en la red resultantes del incremento en la corriente, provocan que el voltaje decrezca hasta que se presente el colapso total del voltaje  $V$ .



**Figura 2.3.- Perdidas de potencia reactiva en el enlace de transmisión en función del voltaje en el nodo de carga**

### 2.2.2 Sensitividad $V-Q$

Para un determinado punto de operación  $P^0, Q^0$  el efecto aproximado de un cambio en la carga sobre la magnitud de los voltajes nodales puede expresarse por la relación de sensibilidad:

$$\left. \frac{dV}{dQ} \right|_{P,Q} = \frac{1}{2V} \left[ -X \pm \frac{XE^2}{\sqrt{E^4 - 4XE^2Q - 4X^2P^2}} \right] \quad (2.8)$$

Sustituyendo en ambas expresiones los valores correspondientes de  $P$  y  $Q$ , y simplificando se obtiene:

$$\left. \frac{dV}{dQ} \right|_{V,\delta} = \left[ \frac{XE \pm XE + 2XV \cos \delta}{E - 2V \cos \delta} \right] \quad (2.9)$$

Analizando la expresión anterior, la pendiente de la curva  $V-Q$  es infinita cuando:

$$E - 2V \cos \delta = 0 \quad (2.10)$$

Por lo tanto, el voltaje crítico que representa la condición de inestabilidad puede expresarse como:

$$V = \frac{E}{2 \cos \delta} \quad (2.11)$$

La ecuación anterior muestra que el problema de estabilidad de voltaje está relacionado estrechamente con el de estabilidad angular en estado estable. Para ángulos  $\delta$ , cercanos a cero, el voltaje crítico tiende a ser muy pequeño ( $E/2$ ). Conforme el ángulo crece el voltaje crítico tiende a aumentar. Cuando el ángulo es de  $90^\circ$  la magnitud del voltaje crítico es infinito. Esto sugiere que en un sistema de potencia que exhibe oscilaciones angulares muy severas y de frecuencia muy baja pueden conducir a que el punto de voltaje crítico sea alcanzado a voltajes muy por arriba de los voltajes mínimos de seguridad.

Con el fin de obtener el ángulo al cual se presenta el voltaje crítico, es conveniente expresar la demanda de la potencia reactiva en función de la potencia activa y del factor de potencia como:

$$Q = P \tan \phi \quad (2.12)$$

donde  $\phi$  es el ángulo del factor de potencia de la carga.

Sustituyendo esta expresión en la ecuación (2.2) se tiene que:

$$P \tan \phi = \frac{EV}{X} \cos \delta - \frac{V^2}{X} \quad (2.13)$$

y sustituyendo la ecuación (2.1) en la expresión anterior:

$$V = E(\cos \delta - \sin \delta \tan \phi) \quad (2.14)$$

Finalmente sustituyendo la expresión (2.11) en la anterior se obtiene:

$$\frac{1}{2 \cos \delta} = \cos \delta - \sin \delta \tan \phi \quad (2.15)$$

Por consiguiente el ángulo crítico estará dado como:

$$\delta_{cri} = \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \quad (2.16)$$

Como se observa el ángulo crítico depende del factor de potencia de la demanda.

### 2.2.3 El concepto de margen de estabilidad de voltaje

En los últimos años se han realizado esfuerzos importantes por definir márgenes o distancias a la inestabilidad de voltaje que puedan ser expresados en función de cantidades que tengan un sentido práctico para los operadores y analistas. Entre ellas, cabe destacar medidas basadas en niveles de voltaje o potencia reactiva.

Los dos parámetros fundamentales para definir un margen de estabilidad de uso práctico son la capacidad del sistema de proporcionar la potencia reactiva a la carga y la característica de dependencia de la propia carga con respecto al voltaje.

Para ejemplificar este concepto se considera que la carga exhibe un comportamiento dependiente del voltaje de la forma [25]:

$$Q = Q_0 \left( \frac{V}{V^0} \right)^b \quad (2.17)$$

donde  $Q_0$  es la potencia de la carga correspondiente al voltaje nominal  $V^0$  y  $b$  es un coeficiente que define la sensibilidad del voltaje a variaciones en la potencia reactiva. En consecuencia, el punto de operación del sistema estará dado por la intersección de la curva característica de la carga en (2.17) con la curva de potencia reactiva proporcionada por el enlace de transmisión (ver ecuación 2.2) como se muestra en la Figura 2.4.

Ante la ocurrencia de una contingencia en el sistema, por ejemplo, la salida de un circuito de transmisión, la reactancia equivalente  $X$  cambiará, conduciendo a una nueva curva de postfalla  $V-Q$ . Por consiguiente, el nuevo punto de operación (postfalla) estará dado por la intersección de la curva característica de la carga, con la curva  $V-Q$  de postfalla del sistema.

En este trabajo, el margen de estabilidad de voltaje puede definirse como la distancia entre el punto base de operación de prefalla  $Q_0$ , y el punto crítico de la curva  $V-Q$  de postfalla ( $Q_{max}$ ) en la Figura 2.4. Este margen pueden expresarse en función de niveles de tensión o márgenes de potencia reactiva en MVARs [14].

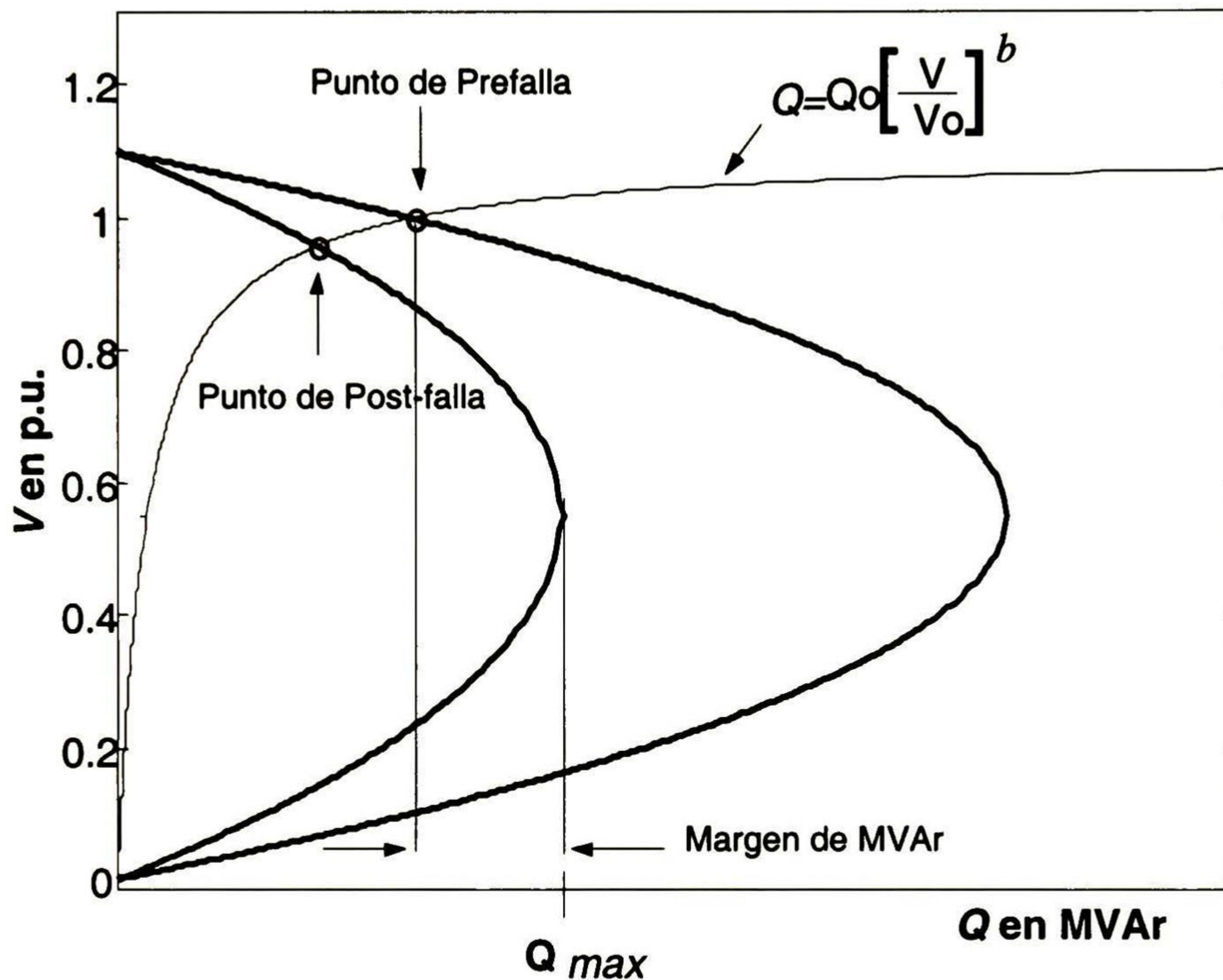
La transición entre la condición de prefalla y postfalla constituye un problema dinámico que debe ser estudiado con las herramientas apropiadas. Si se asume que el sistema es transitoriamente estable en el sentido de voltaje, el nuevo punto de equilibrio estacionario corresponde al punto de operación de postfalla. Se puede observar que el efecto de una contingencia es el de reducir el margen de estabilidad.

Esta disminución dependerá en forma importante de la característica de dependencia de la carga con respecto a la magnitud del voltaje. Como se muestra en la Figura 2.4, un valor pequeño del coeficiente  $b$  tiende, en general, a reducir los márgenes de estabilidad;



claramente, el caso de una carga con características de potencia constante ( $b=0$ ) constituye el caso más crítico de operación para el cual se tiene el menor margen de estabilidad.

Estudios en redes reales confirman que cargas con características de potencia constante tienden a reducir los márgenes de estabilidad, pero esto dependerá de otros factores como la ubicación de la carga, sus características y el efecto de otras acciones de control [25].



**Figura 2.4.- Curvas V-Q para la carga y el sistema ilustrando el concepto del margen de estabilidad de voltaje utilizado en este trabajo**

#### 2.2.4 Modelo incremental de las ecuaciones de balance de potencia

El análisis de las ecuaciones de balance de potencia proporciona una forma alterna de evaluar la distancia de un punto de operación a la inestabilidad. Considere que las ecuaciones de balance de potencia en (2.1) y (2.2) se expanden en series de Taylor alrededor de un punto de operación. Reteniendo términos de primer orden se deduce que:

$$\begin{aligned}\Delta P &= \frac{E}{X} \sin \delta^0 \Delta V + \frac{EV^0}{X} \cos \delta^0 \Delta \delta \\ \Delta Q &= \left[ \frac{\cos \delta^0 - 2V^0}{X} \right] \Delta V - \frac{EV^0}{X} \sin \delta^0 \Delta \delta\end{aligned}\tag{2.18}$$

donde

- $\Delta P$  = Cambio incremental en la potencia activa de carga
- $\Delta Q$  = Cambio incremental en la potencia reactiva de carga
- $\Delta V$  = Cambio incremental en la magnitud del voltaje del nodo de carga
- $\Delta \delta$  = Cambio incremental en el ángulo de fase del voltaje del nodo generador

Por consiguiente, el modelo incremental de potencia del sistema, para el nodo de carga puede expresarse como:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix}\tag{2.19}$$

donde  $J$  es la matriz Jacobiana definida por la relación

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} = \frac{1}{X} \begin{bmatrix} VE \cos \delta & E \sin \delta \\ -VE \sin \delta & E \cos \delta - 2V \end{bmatrix}\tag{2.20}$$

evaluada en la condición de equilibrio.

Resolviendo para la magnitud y fase del voltaje, se tiene

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}\tag{2.20}$$

La ecuación (2.20) permite expresar el efecto de la variación en la potencia activa y reactiva de la carga sobre la magnitud y fase del voltaje en el nodo de carga. Esta solución existe solo cuando la matriz Jacobiana no es singular lo que ha motivado su utilización como un indicador del margen de estabilidad [14].

En la condición de singularidad se muestra que:

$$\det(J) = \frac{1}{X^2} [VE^2 - EV^2 \cos \delta] = 0\tag{2.21}$$

Por consiguiente, el voltaje crítico estará dado por:

$$V = \frac{E}{2 \cos \delta} \quad (2.22)$$

De la expresión (2.22), se observa que la condición de singularidad de la matriz  $J$ , coincide con la condición de pendiente infinita en la curva  $V-Q$ . De acuerdo con este criterio, el determinante de la matriz Jacobiana proporciona una medida de la estabilidad de voltaje, es decir, una magnitud grande del determinante indica que el sistema es estable existiendo un margen de estabilidad considerable. En el caso contrario cuando el valor del determinante es muy pequeño, el margen de estabilidad es muy reducido. El límite de estabilidad está representado por un valor cero para el determinante. Algunos simuladores de sistemas de potencia incorporan este criterio para evaluar la cercanía a la condición de inestabilidad. En la práctica, sin embargo, la determinación numérica del determinante de una matriz de dimensión grande constituye un problema extremadamente complejo lo cual ha limitado la aplicación de este enfoque de análisis.

Si se asume, por otra parte, que el  $\det(J) \neq 0$ , entonces:

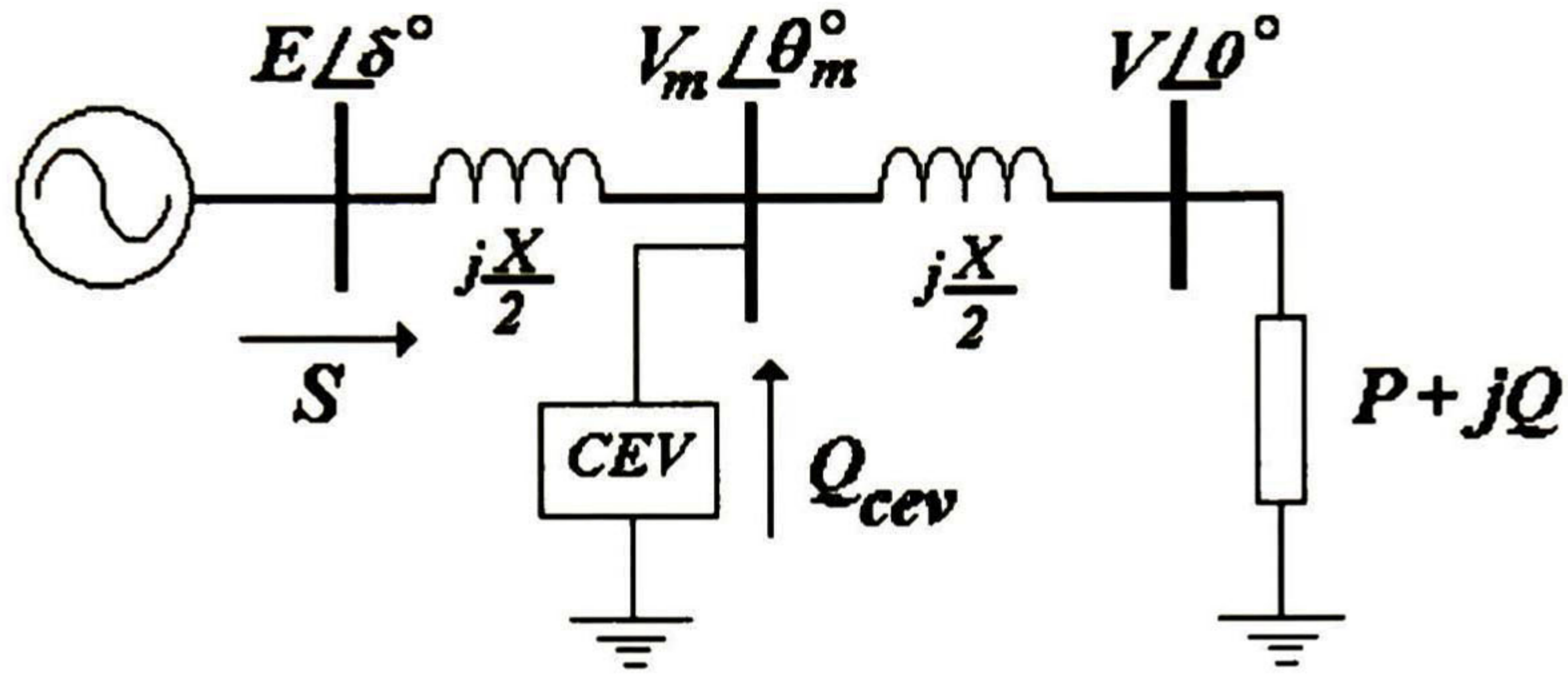
$$J^{-1} = X \begin{bmatrix} \frac{E \cos \delta - 2V}{VE^2 - V^2 E \cos \delta} & \frac{E \sin \delta}{VE - V^2 \cos \delta} \\ \frac{\sin \delta}{E - 2V \cos \delta} & \frac{\cos \delta}{E - 2V \cos \delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \delta}{\partial P} & \frac{\partial \delta}{\partial Q} \\ \frac{\partial V}{\partial P} & \frac{\partial V}{\partial Q} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Las elementos de la matriz  $J^{-1}$  en (2.23) representan relaciones de sensibilidad como se indica en (2.9). Entre ellas, la relación de sensibilidad  $\partial V / \partial Q$  permite estimar el efecto de un cambio incremental en la carga sobre la magnitud del voltaje en terminales cuando  $\Delta P = 0$ .

La sensibilidad  $\partial V / \partial Q$  representa la pendiente de la curva  $V-Q$ . Una sensibilidad muy pequeña es indicativo de que existe una distancia considerable en MVAR al punto de voltaje crítico, mientras que una sensibilidad muy grande indica que existe un margen pequeño de estabilidad. Cuando la sensibilidad es negativa se considera que el sistema es inestable debido a que un aumento en la demanda ocasionará que el voltaje aumente.

### 2.2.5 Efecto de dispositivos de control en el margen de estabilidad

En esta sección se introducen algunos conceptos fundamentales relacionados con el efecto de instalar dispositivos de control para mejorar la estabilidad de voltaje. El sistema en estudio es el mismo considerado en secciones anteriores, modificado para incluir un dispositivo ideal de control de voltaje en la red de transmisión el cual representa un Compensador Estático de VARs (CEV) como se muestra en la Figura 2.5. Para simplificar el análisis, se asume que el elemento de control tiene una capacidad ilimitada de potencia reactiva.



**Figura 2.5.- Sistema en estudio mostrando la instalación de un dispositivo de control de voltaje en el punto medio de la red de transmisión**

Cuando el dispositivo de control se ubica en el punto medio de la red de transmisión, las ecuaciones de balance de carga serán:

*Nodo de Carga:*

$$P = \frac{2VV_m}{X} \sin\theta_m \quad (2.24)$$

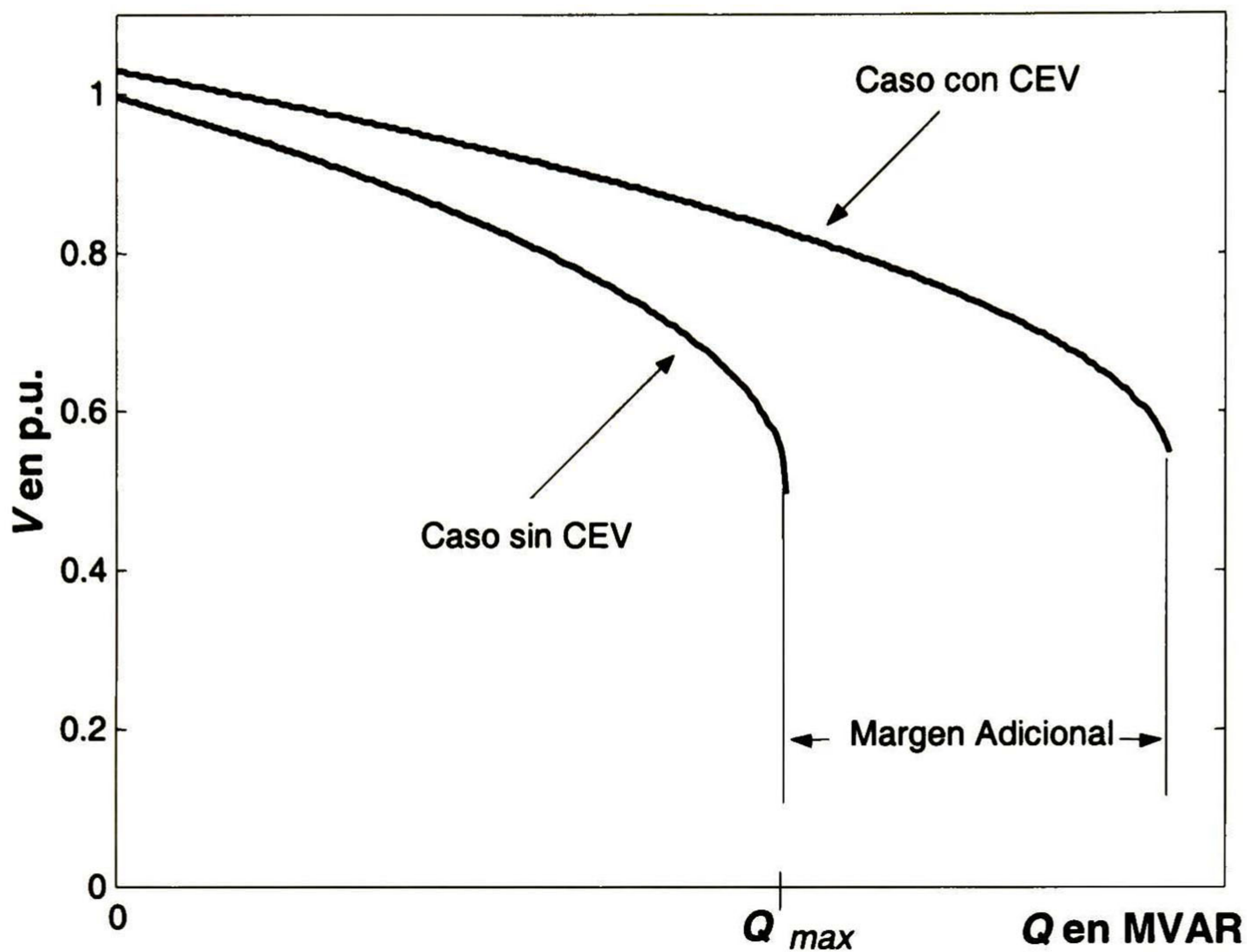
$$Q = \frac{2VV_m}{X} \cos\theta_m - \frac{2V^2}{X} \quad (2.25)$$

*Nodo compensado:*

$$Q_{cev} = \frac{2V_mE}{X} \cos(\theta_m - \delta) + \frac{2V_mV}{X} \cos\theta_m - \frac{4V_m^2}{X} \quad (2.26)$$

$$0 = -\frac{2V_mE}{X} \sin(\theta_m - \delta) - \frac{2V_mV}{X} \sin\theta_m \quad (2.27)$$

En la Figura 2.6 se muestra la curva  $V-Q$  en el nodo de carga para el caso sin compensación y con compensación, obtenidas con las ecuaciones (2.24) a (2.27).

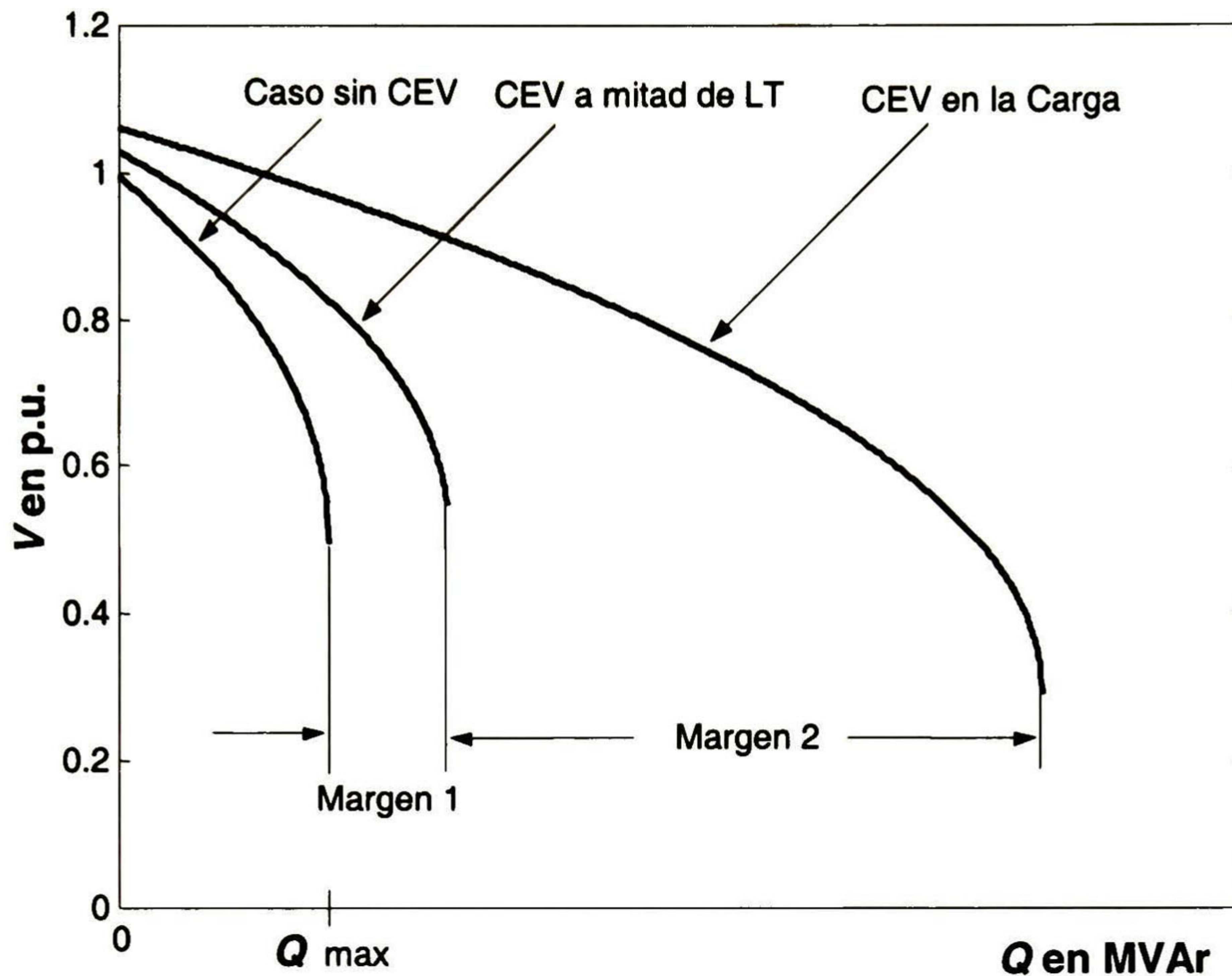


**Figura 2.6.- Curvas  $V-Q$  mostrando el efecto de control ideal de voltaje en el punto medio de la red de transmisión**

El análisis de las curvas  $V-Q$  en la Figura 2.6 muestra que el control de voltaje puede mejorar en forma significativa los márgenes de estabilidad, si se asume una capacidad ilimitada de generación de potencia reactiva.

Puede mostrarse, sin embargo, que los requerimientos de potencia reactiva para el elemento de control varían en forma inversamente proporcional a la reducción en la magnitud del voltaje en la carga, lo cual limita su ubicación en nodos alejados de la carga.

Finalmente, en la Figura 2.7 se muestra el efecto de las diferentes alternativas de localización sobre el margen de estabilidad de voltaje.



**Figura 2.7.- Comparación de las diferentes alternativas de control sobre el margen de estabilidad del sistema**

Como se puede observar en la Figura 2.7 la ubicación del elemento de control tiene un impacto importante sobre el margen de estabilidad. En el caso ideal, un elemento de control instalado en el nodo de carga permite los mejores resultados de operación. En sistemas complejos, caracterizados por cientos o miles de nodos de carga, la ubicación de los dispositivos de control conduce a un problema de difícil solución como se muestra en secciones posteriores de este documento.

# CAPÍTULO 3

## MODELADO DEL SISTEMA DE POTENCIA PARA ESTUDIOS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE MEDIANTE TÉCNICAS DE ANÁLISIS MODAL

### 3.1 INTRODUCCIÓN

El uso de técnicas de análisis en estado estable para el estudio de la estabilidad de voltaje se basa en la suposición de que el comportamiento del sistema puede describirse por un punto de operación en estado estacionario y que los parámetros del sistema cambian de manera lenta y continua. Bajo estas consideraciones, el sistema es descrito por las ecuaciones estáticas de balance de potencia.

En este capítulo se propone un modelo generalizado del SEP para estudio de estabilidad de voltaje en estado estable. El enfoque propuesto de análisis tiene validez cuando el fenómeno de estabilidad de voltaje es de naturaleza lenta, y en consecuencia, el sistema experimenta caídas graduales de voltaje las cuales pueden ser analizadas mediante técnicas en estado estable. A diferencia de otros enfoques de análisis, en el análisis modal es importante considerar la forma en que el sistema se aproxima a la condición de inestabilidad. Así por ejemplo, es importante incluir en forma adecuada, límites de operación en dispositivos de control así como la respuesta de la carga y otros dispositivos, ante cambios incrementales de voltaje. Estas características pueden ser introducidas de manera aproximada en las ecuaciones convencionales de flujos de potencia.

Este capítulo está organizado de la siguiente forma: en la sección 3.2 se presentan los requerimientos básicos de modelado para estudios de estabilidad de voltaje. En la sección 3.3 se describe en forma breve el modelo del sistema de potencia utilizado en estudios convencionales de flujos de potencia. En la sección 3.4 se propone una metodología para incluir modelos avanzados de dispositivos de control en la técnica de análisis modal, particularmente límites de operación en generadores síncronos, cargas no lineales y elementos de control de potencia reactiva.

### 3.2 REQUERIMIENTOS BÁSICOS DE MODELADO

La aplicación de técnicas de análisis modal al estudio de la estabilidad de voltaje comprende, en general, tres pasos principales.

1. La determinación del caso base de operación.
2. La búsqueda del punto crítico de colapso de voltaje en la vecindad de la condición de inestabilidad.

3. La determinación de las características de estabilidad de voltaje del sistema mediante técnicas de análisis modal, y en su caso, el desarrollo de medidas correctivas.

La determinación del caso base de operación involucra, generalmente, una condición de demanda máxima, en la que elementos críticos del sistema como líneas de transmisión o generadores, operan en condiciones cercanas a sus límites máximos de operación. Para propósitos de modelado y análisis, el sistema puede dividirse en una región de estudio o zona de interés que representa la parte de la red con problemas de voltaje y el resto del sistema. En el primer caso, la red involucrada en el fenómeno de estabilidad debe modelarse en detalle con un énfasis particular en la representación de aquellos elementos con mayor influencia en el problema. Por el contrario, las zonas de la red alejadas de la zona crítica puede modelarse en forma simplificada, reduciendo así la dimensión del modelo en estudio.

Los requerimientos de modelado y herramientas de análisis para los pasos 2) y 3), son en general, distintos como se explica en secciones posteriores de este documento. En el paso 2, la carga del sistema se incrementa en forma gradual (incremental) y se realiza estudio de flujo de potencia para cada nueva condición incremental, hasta que no se pueda obtener convergencia. La condición última para la cual sea posible obtener una solución válida, puede representar el punto de colapso de voltaje en la vecindad del punto crítico de operación. Este enfoque presenta la ventaja adicional de permitir la utilización de modelos convencionales disponibles en los programas de análisis de flujos de potencia.

En el paso 3, sin embargo, puede ser necesario incluir una representación más adecuada de los distintos dispositivos del sistema debido a que el sistema se encuentra en una condición cercana a la inestabilidad. La Tabla 3.1 sugiere algunas características deseables de modelado para el estudio de estabilidad de voltaje utilizando técnicas de análisis modal.

**Tabla 3.1**  
**Características deseables de modelado del SEP para estudios de estabilidad de voltaje en estado estable [26]**

<b>Dispositivo</b>	<b>Modelo recomendado</b>
<b>CARGAS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Area de estudio:</i> modelo dependiente de voltaje</li> <li>• <i>Area externa:</i> MVA constante</li> </ul>
<b>TRANSFORMADORES CON CAMBIO AUTOMÁTICO DE DERIVACIÓN</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Representación de los cambios de derivación</li> <li>• Bandas muertas</li> </ul>
<b>GENERADORES</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Area de estudio:</i> representación de la curva de capacidad</li> <li>• <i>Area externa:</i> nodos PV</li> </ul>
<b>DISPOSITIVOS DE CONTROL</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Area de estudio:</i> característica de control V-Q</li> <li>• <i>Area externa:</i> nodos PV</li> </ul>



En las siguientes secciones se propone un modelo generalizado del sistema de potencia, con características deseables para estudios de estabilidad de voltaje derivados del análisis modal de las ecuaciones de flujos de potencia.

### 3.3 MODELO BÁSICO DEL SEP PARA ESTUDIOS EN ESTADO ESTABLE

Las ecuaciones que describen el comportamiento del sistema en estado estable alrededor de un punto de operación estable pueden escribirse como [39]:

$$\begin{aligned} P_i(\theta, V) &= \mathbf{0} = P_{g_i} - P_{d_i} - P_{t_i} \\ Q_i(\theta, V) &= \mathbf{0} = Q_{g_i} - Q_{d_i} - Q_{t_i} \end{aligned} \quad (3.1)$$

*para  $i = 1, \dots, nb$*

donde  $nb$  es el número de nodos del sistema  $\theta$  y  $V$  son los vectores de magnitudes y fases de los voltajes nodales;  $P_{g_i}$ ,  $Q_{g_i}$  son las potencias activa y reactiva inyectadas por las fuentes;  $P_{d_i}$  y  $Q_{d_i}$  son las potencias activa y reactiva demandadas por las cargas;  $P_{t_i}$  y  $Q_{t_i}$  representan las potencias activa y reactiva inyectadas al sistema en el  $i$ -ésimo nodo, definidas por las relaciones [35]:

$$P_{t_i} = V_i \sum_{j=1}^{nb} (G_{ij} V_j \cos \theta_{ij} + B_{ij} V_j \sen \theta_{ij}) \quad (3.2)$$

$$Q_{t_i} = V_i \sum_{j=1}^{nb} (G_{ij} V_j \sen \theta_{ij} - B_{ij} V_j \cos \theta_{ij}) \quad (3.3)$$

en donde  $G_{ij}$  y  $B_{ij}$  representan la conductancia y susceptancia respectivamente del enlace de transmisión y  $\theta_{ij}$  es el ángulo de fase entre los nodos  $i$  y  $j$ . En estudios convencionales de flujos de potencia, las potencias de generación y carga en (3.1) son constantes e independientes de las desviaciones de voltajes nodales, para un punto dado de operación.

La solución de las ecuaciones (3.1) mediante el método de Newton-Raphson puede expresarse por la ecuación incremental [27]:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

donde

- $\Delta P$  = Cambio incrementales de potencia activa en todos los nodos con excepción del nodo de referencia
- $\Delta Q$  = Cambio incrementales de potencia reactiva en los nodos de carga

$\Delta\theta$  = Cambios incrementales de los ángulos de fase en los todos los nodos con excepción del nodo de referencia  
 $\Delta V$  = Cambio incrementales de las magnitudes de los voltajes en los nodos de carga

y

$$J = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

es la matriz Jacobiana de sensitividades de dimensiones

$$\begin{array}{ll}
 J_{P\theta} & (nb-1) \times (nb-1) \\
 J_{PV} & (nb-1) \times (nbc) \\
 J_{Q\theta} & (nbc) \times (nb-1) \\
 J_{QV} & (nbc) \times (nbc)
 \end{array}$$

donde  $nbc$  es el numero de nodos de carga.

El proceso de solución de las ecuaciones de flujo de potencia utilizando el método de Newton Raphson así como la representación de los distintos elementos del sistema se describe con amplitud en la literatura especializada [39].

### 3.3.1 Características de la matriz Jacobiana

En aplicaciones típicas la matriz Jacobiana  $J$ , en (3.5) es real y prácticamente simétrica. Entra las causas que provocan asimetría se pueden mencionar:

- La presencia de transformadores con cambio de fase.
- Las resistencias de la red.
- El perfil de voltaje del sistema.

Con el objeto de clarificar estos aspectos, a continuación se describen las principales características de estas submatrices.

**Condiciones de simetría en la submatriz  $J_{P\theta}$ :** Los elementos fuera de la diagonal esta submatriz (elementos  $ij$  y  $ji$  respectivamente) son:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} = V_i (G_{ij} V_j \sin \theta_{ij} - B_{ij} V_j \cos \theta_{ij})$$

$$\frac{\partial P_j}{\partial \theta_i} = V_j (-G_{ij} V_i \sin \theta_{ij} - B_{ij} V_i \cos \theta_{ij})$$

Se puede observar que la presencia de resistencias en la red u otros elementos que afectan las conductancias de rama  $G_{ij}$  tiende a reducir el grado de simetría de esta matriz.

**Condiciones de simetría en la submatriz  $J_{QV}$ :** Los elementos  $ij$  y  $ji$  respectivamente de esta submatriz son:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_j} = V_i (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij})$$

$$\frac{\partial Q_j}{\partial V_i} = V_j (-G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij})$$

Claramente en este caso el grado de asimetría se relaciona al perfil de voltajes del sistema así como a la presencia de la conductancia de la rama  $G_{ij}$ . Es importante destacar que las condiciones de asimetría pueden acentuarse especialmente en condiciones críticas de operación, por ejemplo, asociadas con el colapso de voltaje.

**Condiciones de simetría en las matrices  $J_{PV}$  y  $J_{Q\theta}$ :** Estas matrices no son simétricas debido a sus características estructurales, sin embargo, presentan relaciones de simetría entre si como se demuestra a continuación. Para mostrar esto considere que los elementos  $ij$  y  $ji$  de estas submatrices son:

Para  $J_{PV}$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_j} = V_i (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij})$$

Para  $J_{Q\theta}$

$$\frac{\partial Q_j}{\partial \theta_i} = V_j (-G_{ij} V_i \cos \theta_{ij} + B_{ij} V_i \sin \theta_{ij})$$

Como se puede observar, si se desprecia el efecto de las conductancias de rama, entonces,  $J_{PV}^T \approx J_{P\theta}$ .

En aplicaciones a sistemas típicos, caracterizados por relaciones altas  $B_{ij} \gg G_{ij}$ , la matriz Jacobiana es prácticamente simétrica. Esta característica tiene un efecto importante en la interpretación física del fenómeno de estabilidad de voltaje así como en el desarrollo de

herramientas analíticas para su estudio como se muestra en el Capítulo 4 de este documento.

### 3.4 MODELOS AVANZADOS DEL SEP PARA ESTUDIOS DE ANÁLISIS MODAL

La aplicación de técnicas de análisis modal al estudio de estabilidad de voltaje requiere de modelos del SEP que aproximen la transición del sistema de un estado de operación a otro. La presencia de límites es particularmente importante debido a que un cambio en la representación de un dispositivo puede alterar la determinación de los modos críticos, así como la determinación de las zonas vulnerables del sistema susceptibles de experimentar problemas de voltaje.

En esta sección se presenta un modelo generalizado del sistema de potencia para estudios de estabilidad de voltaje derivados de la aplicación de técnicas de análisis modal. Se enfatiza la inclusión de no linealidades en los modelos de los dispositivos así como la diferencia con el modelado en estudios convencionales de flujos de potencia.

#### 3.4.1 Modelado de la red de transmisión

El modelo de la red de transmisión adoptado en este trabajo es esencialmente el mismo que el utilizado en estudios convencionales de flujos de potencia, con excepción de la representación de transformadores con cambio automático de derivación conectados a nodos de carga. Si el transformador opera dentro de sus límites físicos máximo y mínimo en el cambiador de derivaciones, el voltaje en el lado secundario (nivel de baja tensión) será mantenido constante en la condición de estado estable. En consecuencia, la carga asociada se representa con una característica de potencia constante.

#### 3.4.2 Modelado de elementos de control

En la técnica de análisis modal, el cambio incremental en la potencia activa y reactiva proporcionada por cada dispositivo del sistema puede representarse en forma incremental:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_d \\ \Delta Q_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta^d} & J_{PV^d} \\ J_{Q\theta^d} & J_{QV^d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_d \\ \Delta V_d \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

en donde:

- $\Delta P_d$  = Cambio incremental en la potencia activa de salida del dispositivo
- $\Delta Q_d$  = Cambio incremental en la potencia reactiva de salida del dispositivo
- $\Delta \theta_d$  = Cambio incremental en el ángulo de fase del nodo de conexión del dispositivo

$\Delta V_d$  = Cambio incremental en la magnitud del voltaje del nodo de conexión del dispositivo

Las submatrices  $J_{P\theta}^d$ ,  $J_{PV}^d$ ,  $J_{Q\theta}^d$ ,  $J_{QV}^d$  representan relaciones apropiadas de sensibilidad para cada dispositivo las cuales modifican la ecuación (3.4).

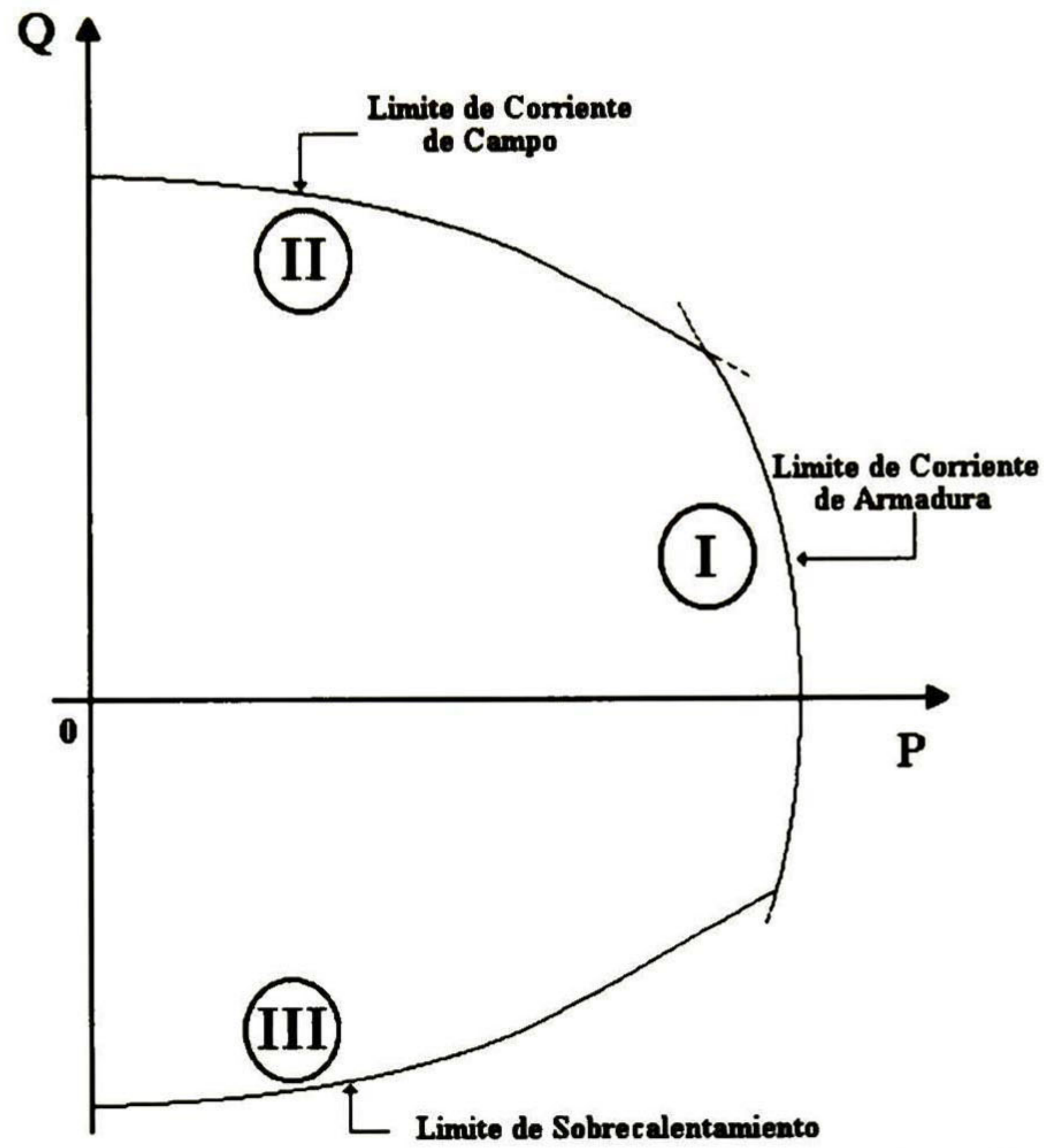
A continuación se presenta una breve descripción de las principales características de modelado consideradas en este trabajo de tesis. Se enfatiza la diferencia con los modelos convencionales utilizados en estudios de flujo de potencia así como su importancia en el contexto del análisis de la estabilidad de voltaje.

### 3.4.3 Generadores síncronos

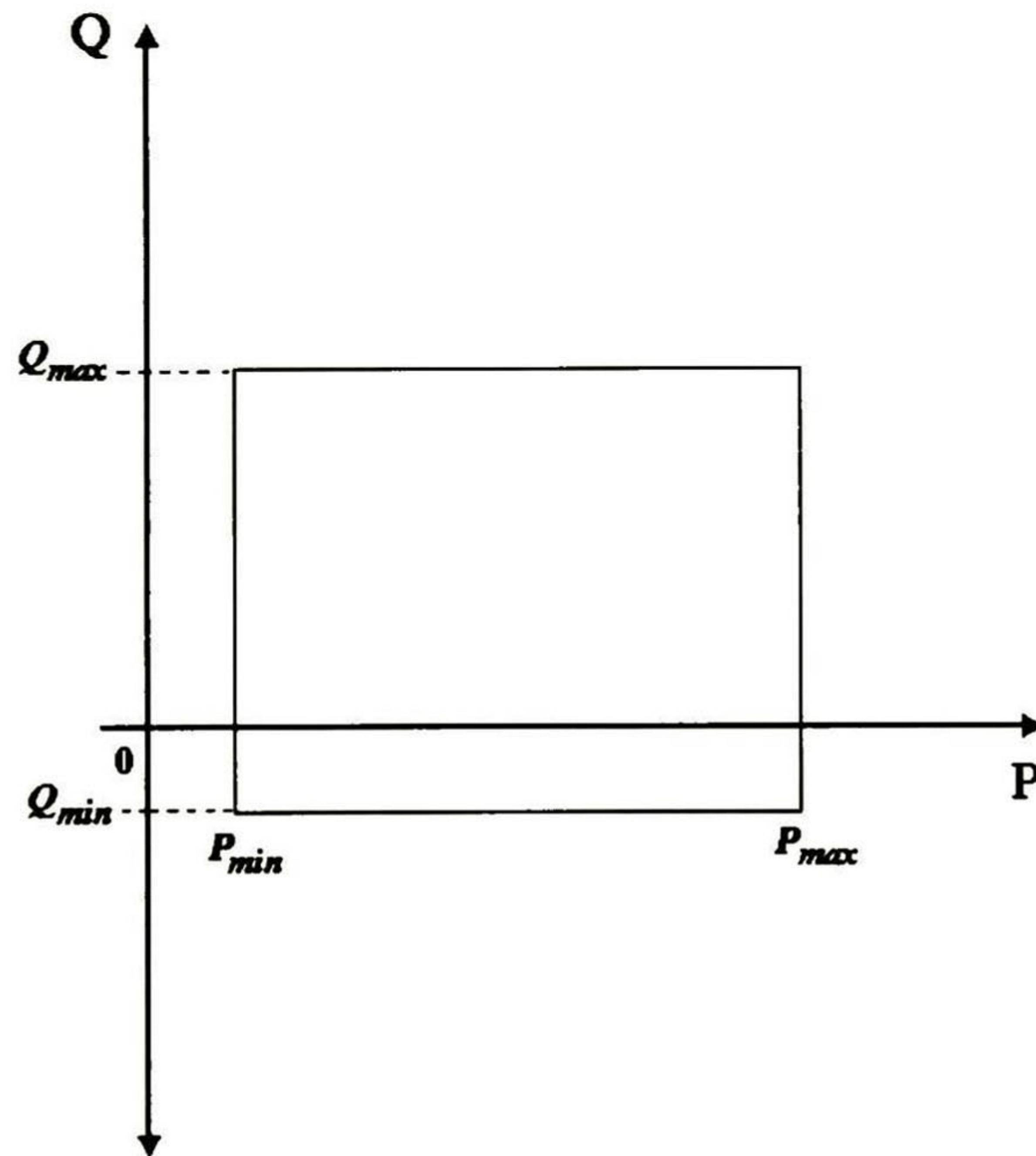
La máquina síncrona constituye el dispositivo más importante de control de voltaje en el sistema. Bajo condiciones normales de operación, el voltaje en terminales de los generadores es mantenido constante mediante la acción del regulador de voltaje por lo que es costumbre representar su efecto como un nodo *PV* en estudios de flujos de potencia. Durante condiciones de bajo voltaje, por ejemplo en condiciones cercanas al punto crítico de operación, la demanda de potencia reactiva puede causar que se excedan los límites nominales de la corriente de campo y/o la corriente de armadura.

Los dos fenómenos tienen características distintas, por lo que es importante incluir su efecto en estudios de estabilidad de voltaje. La Figura 3.1 muestra un diagrama típico de la curva de capacidad *P-Q* de un generador síncrono [40], mientras que la Figura 3.2 muestra una representación simplificada utilizada en estudios convencionales de flujos de potencia [40].

En estudios de estabilidad de voltaje, los límites de operación de interés corresponden al valor de la potencia reactiva máxima definida por los límites de corriente de armadura (región I) y de la corriente de campo (región II) [40]. Ambas regiones son función del nivel de voltaje en terminales del generador. Es importante observar que en el modelo simplificado, la sensibilidad obtenida para la región I es cero ( $\partial V/\partial Q=0$ ), mientras que la sensibilidad asociada con la operación en la región II puede alcanzar un valor infinito ( $\partial V/\partial Q=\infty$ ). Convencionalmente esto significa que en un generador que alcanza sus límites de operación de potencia reactiva, cambia su representación de un nodo *PV* a un nodo *PQ*. El análisis anterior evidencia que un cambio abrupto de pendiente en el modelo simplificado, puede conducir a resultados erróneos en el estudio de la estabilidad de voltaje.



**Figura 3.1.- Curva típica de capacidad de un generador síncrono**



**Figura 3.2.- Curva simplificada de capacidad de un generador síncrono para estudios de flujos de potencia**

En esta trabajo, la región de operación limitada por la potencia reactiva máxima de salida se aproxima mediante la relación [28]:

$$Q_{G^{max}} = -\frac{V_t^2}{X_q} + \sqrt{\frac{V_t^2 E_{q^{max}}^2}{X_d^2} - P_G^2} \quad (3.8)$$

en donde

$V_t$	=	Voltaje en terminales del generador
$E_{q^{max}}$	=	Voltaje máximo inducido en eje q
$X_d$	=	Reactancia síncrona en eje d
$X_q$	=	Reactancia síncrona en eje q
$P_G$	=	Potencia activa generada

La expansión de primer orden en series de Taylor de la ecuación (3.8) proporciona los términos  $J_{QV^d}$  en (3.7). En la literatura se proporcionan otras alternativas de modelado [29].

#### 3.4.4 Cargas no lineales con dependencia de voltaje

Los modelos de cargas más adecuados para el estudio de estabilidad de voltaje en estado estable están basados en pruebas de la respuesta del voltaje del sistema ante un cambio o perturbación en la carga del nodo de interés. La respuesta incluye una componente transitoria y otra de estado estable.

Las cargas de naturaleza estática del sistema exhiben por lo general dependencia del voltaje y la frecuencia. El efecto de esta última en el fenómeno de estabilidad de voltaje, es generalmente despreciable. La dependencia de voltaje, por otra parte, es comúnmente representada por funciones exponenciales de la forma [41]:

$$P_j = P_0 \left( \frac{V_j}{V_o} \right)^a \quad (3.9)$$

$$Q_j = Q_0 \left( \frac{V_j}{V_o} \right)^b \quad (3.10)$$

en donde  $P_0$  y  $Q_0$  son las potencias activa y reactiva nominales;  $V_j$  es la magnitud del voltaje del nodo  $j$ -ésimo nodo,  $a$  y  $b$  son coeficientes para representar los distintos tipos de carga con voltaje  $V_j$ . La inclusión de este modelo en las ecuaciones incrementales de flujo de potencia en (3.1) conduce a la modificación de los elementos diagonales de las submatrices  $J_{PV}$  y  $J_{QV}$ .

En este trabajo, la carga se representa como potencia constante en el proceso de obtener el caso crítico de operación (paso 2 en la metodología para estresar el sistema en la sección 3.2). Esta suposición permitir utilizar un programa convencional de flujos de potencia en todos los estudios requeridos para obtener la condición crítica de estabilidad.

Una vez determinado el punto crítico de colapso de voltaje la carga se representa mediante las relaciones (3.9) y (3.10).

### 3.4.5 Representación de dispositivos de control en la red

La inclusión de dispositivos de control en la red de transmisión se realiza en forma similar a la representación de generadores. Debido a su simplicidad, la inclusión de dispositivos tales como Compensadores Estáticos de VARs (CEV) se efectúa al incluir su efecto como una carga variable de potencia reactiva dependiente del nivel de tensión en terminales.

#### 3.4.5.1 Compensación estática de VARs

En estado estable, el comportamiento de un CEV puede representarse por su curva característica  $V-Q$  de la Figura 3.3 [30].

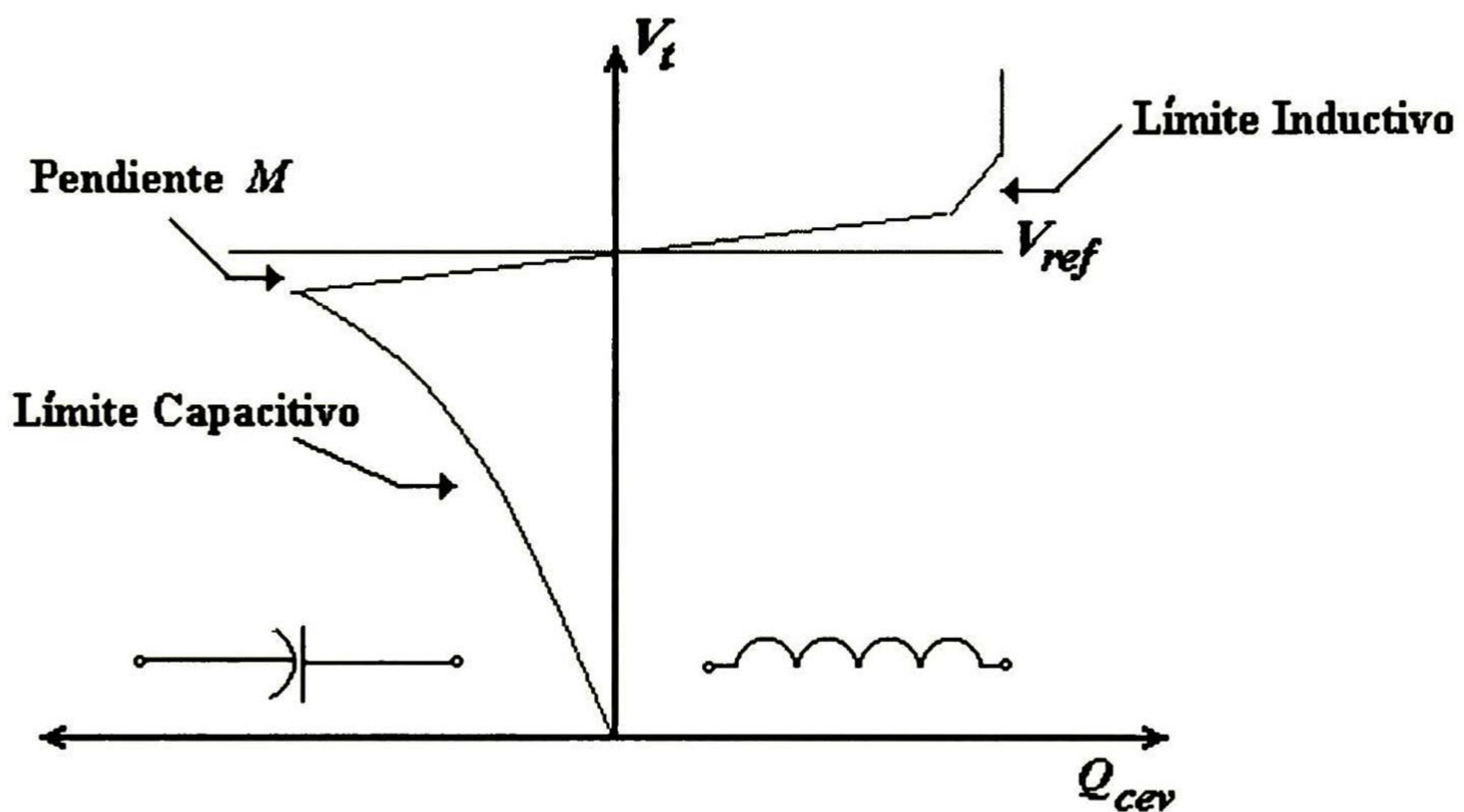


Figura 3.3.- Curva  $V-Q$  típica de un Compensador Estático de VARs (CEV)

En la región de control continuo de voltaje, la potencia reactiva aportada por el CEV ( $Q_{cev}$ ) puede aproximarse por la relación no lineal [42].

$$Q_{cev} = V_t \left[ \frac{V_t - V_{ref}}{M} \right] \quad (3.11)$$

donde  $V_t$  es la magnitud del voltaje en el nodo compensado,  $V_{ref}$  representa el voltaje de referencia y  $M$  es la pendiente de la curva  $V-Q$  en el rango de control continuo. La inclusión de la ecuación (3.11) en las ecuaciones de flujo de potencia se obtiene nuevamente al expandir esta relación alrededor del punto de operación, reteniendo términos de primer orden. Fuera del rango de control continuo, el CEV puede representarse como un nodo PQ con una admitancia de carga constante de valor igual a la



capacidad nominal de la rama capacitiva o inductiva del compensador, para ello las expresiones fuera del rango de control lineal son:

Límite inductivo

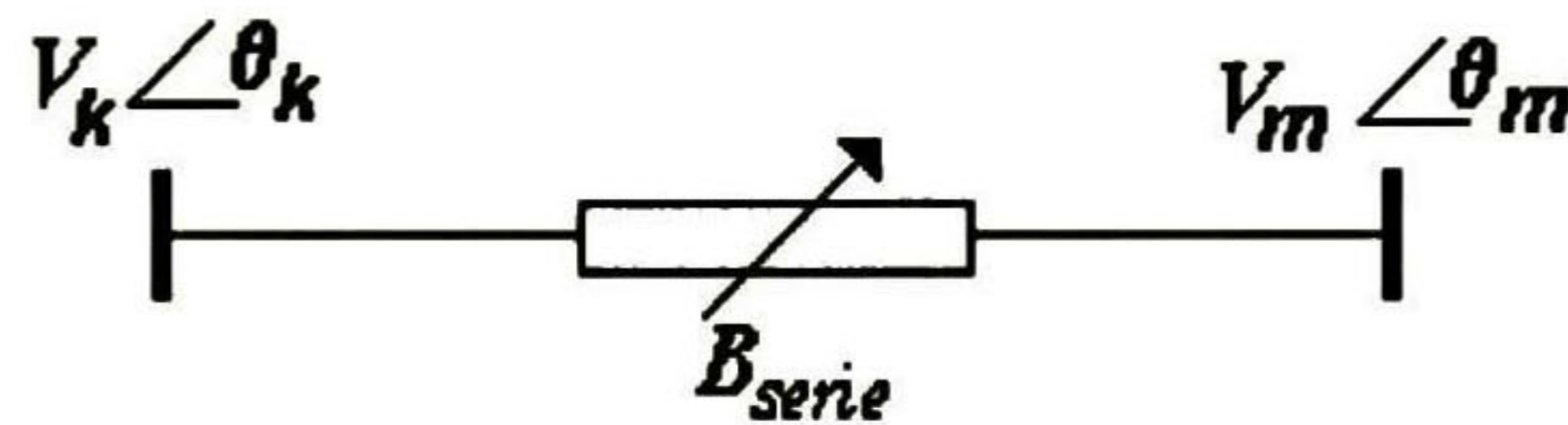
$$Q_{cev} = B_L V_t^2 \quad (3.12)$$

Límite capacitivo

$$Q_{cev} = B_C V_t^2 \quad (3.13)$$

### 3.4.5.2 Compensación inductiva serie

La metodología anterior puede también utilizarse para incluir otros dispositivos de control con conexión en serie o en paralelo. Para ejemplificar esto, suponga que se desea representar la operación de un Capacitor Serie Controlado por Tiristores (CSCT) entre los nodos  $k$  y  $m$  de una red de transmisión, como se muestra en la Figura 3.4.



**Figura 3.4.- Representación de un capacitor serie controlado por tiristores conectado entre los nodos  $k$  y  $m$  de un enlace de transmisión**

Este dispositivo, tiene la capacidad de compensar la reactancia serie de la línea de transmisión dentro de un rango ajustable, en una manera tal que depende de la estrategia de control utilizada. Si se asume que la susceptancia del capacitor  $B_{serie}$  puede ser ajustada continuamente, las expresiones para el flujo de potencia para la potencia activa y reactiva en los nodos  $k$  y  $m$  son:

Nodo  $k$

$$P_k = B_{serie} V_k V_m \sin(\theta_k - \theta_m) \quad (3.14)$$

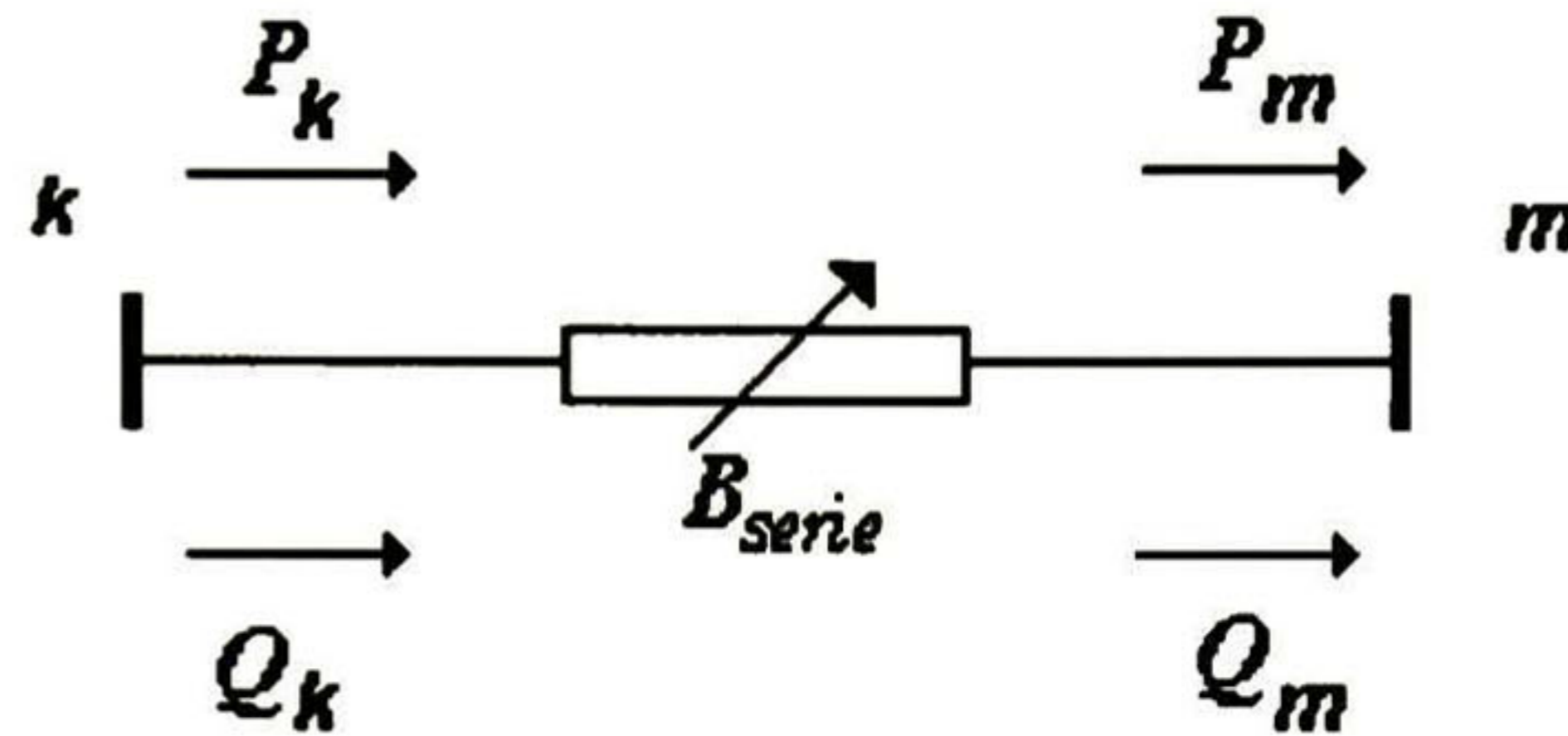
$$Q_k = B_{serie} V_k^2 - B_{serie} \cos(\theta_k - \theta_m) \quad (3.15)$$

Nodo  $m$

$$P_m = B_{serie} V_m V_k \sin(\theta_k - \theta_m) \quad (3.16)$$

$$Q_m = B_{serie} V_k V_m \cos(\theta_k - \theta_m) - B_{serie} V_m^2 \quad (3.17)$$

Comparando las expresiones (3.14) y (3.16), se concluye que la potencia activa que se inyecta en el nodo  $k$  por medio del enlace es idéntica a la que se inyecta al nodo  $m$  por medio del enlace, y esta puede ser controlada por medio del valor de  $B_{serie}$ . Por lo tanto el efecto del CSCT sobre la red puede ser incluido al simularlo por medio de inyecciones de potencia activa y reactiva como se muestra en la Figura 3.5.



**Figura 3.5.- Representación del CSCT mediante inyecciones de potencia activa y reactiva**

La susceptancia para dicho dispositivo es [31]:

$$B_{serie} = \frac{1}{X_{serie}} \quad (3.18)$$

donde

$$X_{serie} = -X_C \left[ 1 - \frac{k_x^2}{k_x^2 - 1} \left( \frac{\beta + \text{sen } \beta}{\pi} \right) + \frac{4k_x^2 \cos^2(\beta/2)}{\pi(k_x^2 - 1)^2} (k_x \tan(k_x \beta/2) - \tan(\beta/2)) \right]$$

$$\beta = 2(\pi - \alpha)$$

$$k_x = \sqrt{X_C / X_L}$$

$X_L$  = Reactancia inductiva nominal del CSCT

$X_C$  = Reactancia capacitiva nominal del CSCT

$\alpha$  = Ángulo de disparo en tiristores

Las principales estrategias de control que pueden incluirse en la operación del CSCT de acuerdo al análisis de las ecuaciones(3.14-3.17) son las siguientes:

- Control de reactancia constante del CSCT

$$X_{serie} = X_{esp} = f(\alpha_{esp})$$

- Control de potencia activa constante en el enlace

$$P = P_{esp} = f(X_e)$$

- Control constante de la magnitud de la corriente

$$I = I_{esp} = f(P, Q_k)$$

- Control constante del ángulo de transmisión

$$\delta_t = \theta_k - \theta_m$$

De acuerdo a la estrategia de control deseada, es como los límites se consideran, es decir, una vez que los límites de la estrategia de control elegida han sido violados entonces se conmuta a otra estrategia de control y a la cual se conmuta varia de acuerdo con cierta jerarquía de operación del CSCT.

### **3.4.6 Representación generalizada de dispositivos de control para estudios en estado estable**

En las secciones anteriores se demostró que cualquier dispositivo de control conectado al sistema eléctrico de potencia, es posible incluirlo en el estudio de flujo de potencia, para ello el dispositivo se modela con inyecciones de potencia activa y reactiva en las ecuaciones de balance de potencia tal y como sugiere Han Z. X. en [43]. En este trabajo esta metodología se extendió para incluir dispositivos de control avanzados y mediante el modelo incremental de la sección 3.4.2 para dichos dispositivos, el efecto sobre el estudio de flujos de potencia se obtiene al modificar en forma adecuada las submatrices de la matriz jacobiana  $J$ .

# CAPÍTULO 4

## METODOLOGÍA DE ANÁLISIS MODAL

### 4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta una metodología de uso práctico basada en el análisis modal de las ecuaciones de flujos de potencia para el estudio de estabilidad de voltaje en estado estable.

La metodología propuesta de análisis comprende tres pasos principales:

1. El sistema en estudio se lleva a la condición del punto crítico de colapso de voltaje para la cual se tiene una solución factible de flujo de potencia utilizando un modelo de carga como potencia constante. En este proceso, se modela en detalle la operación de límites en generadores y fuentes de potencia reactiva.
2. Se calculan los modos críticos y se determinan los elementos del sistema con mayor participación en los modos de interés, específicamente líneas de transmisión, generadores y otros dispositivos de control.
3. Se proponen medidas correctivas para mejorar las características de estabilidad de los modos críticos.

La organización de este capítulo es la siguiente: en la sección 4.2 se presenta el análisis de estabilidad de voltaje en coordenadas reales utilizando la técnica de sensibilidades  $VQ$ . En la sección 4.3 se efectúa el análisis de estabilidad de voltaje utilizando la técnica de análisis modal y se proponen indicadores para identificar los elementos del sistema con una mayor participación en el fenómeno de la inestabilidad de voltaje. Finalmente en la sección 4.4 se presenta una metodología de uso práctico para el análisis de estabilidad de voltaje en estado estable basada en la técnica de análisis modal y se describen brevemente las principales características de un programa de simulación desarrollado en computadora digital con base a la metodología propuesta denominado VOLSTAB.

### 4.2 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN COORDENADAS REALES

#### 4.2.1 Análisis de sensibilidades $V-Q$

En el capítulo anterior se mostró que el comportamiento del sistema de potencia alrededor de un punto de equilibrio estable puede expresarse por las ecuaciones incrementales de flujo de potencia:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

en donde las submatrices  $J_{P\theta}$ ,  $J_{PV}$ ,  $J_{Q\theta}$  y  $J_{QV}$  representan relaciones apropiadas de sensibilidad. A partir de esta relación, el cambio en la magnitud y fase de los voltajes nodales del sistema puede obtenerse de la relación inversa:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

La ecuación (4.2) muestra que un cambio en la demanda de potencia activa y reactiva en los nodos de carga provocará un cambio, en ambos parámetros, la magnitud y fase de los voltajes en los nodos de carga. Las submatrices de la matriz Jacobiana en (4.1) tienen una interpretación física de interés en el estudio de estabilidad de voltaje. Así, por ejemplo, la submatriz  $J_{QV}^{-1}$  puede ser interpretada como una relación de sensibilidad entre el cambio en la demanda de potencia reactiva y el cambio resultante en las magnitudes de voltaje, cuando  $\Delta P$  y  $\Delta\theta$  son cero. En estudios de estabilidad de voltaje, esta submatriz permite una primera estimación del efecto de un cambio en la demanda de potencia reactiva sobre las magnitudes de voltajes nodales como se explica a continuación.

#### 4.2.2 Modelos de orden reducido

En el estudio de la estabilidad de voltaje ha sido la costumbre asumir que el cambio en la magnitud de voltaje es debido básicamente al cambio en la demanda de potencia reactiva de la carga. Esto conduce a relaciones simplificadas que permiten una mayor comprensión física del fenómeno.

Si se asume que  $\Delta P = 0$  en (4.1), se deduce que:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Por consiguiente, se tiene que:

$$\Delta\theta = -J_{P\theta}^{-1} J_{PV} \Delta V \quad (4.4)$$

y

$$\Delta Q = J_{QV}^R \Delta V \quad (4.5)$$

donde

$$J^R_{QV} = J_{QV} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV} \quad (4.6)$$

es la matriz Jacobiana reducida. La matriz  $J^R_{QV}$  describe, para pequeñas perturbaciones, como se ven afectadas las magnitudes de voltajes nodales ante cambios incrementales en la potencia reactiva demandada por los nodos de carga. En este sentido, la matriz  $J^R_{QV}$  tiene una interpretación interesante como un indicador estático de la estabilidad de voltaje del sistema.

Si se asume que la submatriz  $J_{P\theta}$  en (4.1) no es singular se puede mostrar que el determinante de la matriz jacobiana  $J$  es [32]:

$$\det \mathbf{J} = \det J_{P\theta} \det J^R_{QV} \quad (4.7)$$

donde  $J^R_{QV}$  es el complemento de Schur definido en la ecuación (4.6). Se puede observar que la ecuación Jacobiana  $J$  será singular cuando una de las submatrices  $J^R_{QV}$  ó  $J_{P\theta}$  sea singular. Esto ha motivado la utilización de la matriz  $J^R_{QV}$  como un indicador estático de estabilidad de voltaje en estado estable [33], bajo la suposición de que no existen problemas de estabilidad angular estática.

Para el análisis de la estabilidad de voltaje es conveniente reescribir la ecuación (4.5) en la forma alterna

$$\Delta V = J^R_{QV}{}^{-1} \Delta Q \quad (4.8)$$

En aplicaciones prácticas la matriz  $(J^R_{QV})^{-1}$  es llena, por lo que la variación de potencia reactiva en un nodo, ocasionará que existan variaciones de magnitudes de voltaje en todos los nodos; esto dificulta la identificación de los mecanismos de inestabilidad.

El análisis de la ecuación (4.8) muestra que el  $i$ -ésimo elemento diagonal de  $(J^R_{QV})^{-1}$  representa la sensibilidad  $V-Q$  del  $i$ -ésimo nodo. La sensibilidad  $V-Q$  en un nodo representa la pendiente de la curva  $V-Q$  para una condición de operación dada. Una sensibilidad  $V-Q$  positiva es indicativo de una operación estable. Cuando la estabilidad disminuye, la magnitud de la sensibilidad aumenta, alcanzando un valor infinito en el límite de estabilidad. Inversamente, una sensibilidad  $V-Q$  negativa es indicativo de una operación inestable. Una sensibilidad negativa muy pequeña representa una operación muy inestable.

La ecuación (4.8) proporciona una interpretación física directa del fenómeno de estabilidad de voltaje. El sistema es estable, en el sentido de magnitud de voltaje para una condición de operación, si para una inyección de potencia reactiva de carga se tiene un decremento en la magnitud de los voltajes nodales. Por el contrario un sistema será inestable en el sentido de magnitud de voltaje si al menos para un nodo en el sistema, la magnitud de voltaje crece cuando se aumenta la potencia reactiva de carga en cualquiera de los nodos. Estos conceptos implican que el sistema es estable si todas las

sensitividad  $V-Q$  son positivas para todos los nodos e inestable si al menos una sensibilidad  $V-Q$  es negativa.

### 4.3 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN COORDENADAS MODALES

#### 4.3.1 Modos de estabilidad (inestabilidad de voltaje)

Sea  $\lambda_i$  un valor propio de la matriz Jacobiana reducida  $Q-V$ , tal que  $\det([J_{QV}^R - \lambda_i I]) = 0$ , para  $i=1, \dots, nbc$  y  $\xi_i, \eta_i$  los correspondientes vectores propios izquierdo y derecho, respectivamente [32]. Se puede entonces mostrar que:

$$J_{QV}^R = \xi \Lambda \eta \quad (4.9)$$

y

$$J_{QV}^{R^{-1}} = \xi \Lambda^{-1} \eta \quad (4.10)$$

en donde:

$\xi$  = Matriz de vectores propios derechos de  $J_{QV}^R$

$\eta$  = Matriz de vectores propios izquierdos de  $J_{QV}^R$

$\Lambda$  = Matriz diagonal de valores propios de  $J_{QV}^R = \text{diag} [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n]$  siendo todos distintos

Cada valor propio  $\lambda_i$  y sus correspondientes vectores propios izquierdo y derecho definen un modo de estabilidad (inestabilidad) de voltaje.

#### 4.3.2 Análisis de sensitividades $V-Q$

Las características de estabilidad de voltaje del sistema pueden ser identificadas por el cálculo de los valores y vectores propios de la matriz Jacobiana reducida. Si  $(J_{QV}^R)^{-1}$  existe, entonces (4.8) puede reescribirse en la forma:

$$\Delta V = \xi \Lambda^{-1} \eta \Delta Q \quad (4.11)$$

o bien

$$\Delta V = \sum_{i=1}^{nbc} \frac{\xi_i \eta_i}{\lambda_i} \Delta Q \quad (4.12)$$

Por consiguiente, la sensibilidad  $V-Q$  para el nodo  $i$  puede expresarse como:

$$\frac{\Delta V_i}{\Delta Q_i} = \sum_{k=1}^{nbc} \frac{\xi_{ki} \eta_{ik}}{\lambda_i} = \frac{P_{ki}}{\lambda_i} \quad (4.13)$$

en donde  $P_{ki}$  es el factor de participación nodal cuyas características se describen en la siguiente sección.

El análisis de la ecuación (4.13) conduce a las siguientes conclusiones:

La sensibilidad  $V-Q$  para el nodo  $i$  es inversamente proporcional a la contribución del valor propio  $\lambda_i$  y directamente proporcional al factor de participación  $P_{ki}$

Un valor propio de  $J^R_{QV}$  con magnitud cero indica que el sistema se encuentra en el límite de estabilidad.

- Si todos los valores propios son positivos, las sensibilidades  $V-Q$  serán también positivas, indicando que el sistema es estable.
- Valores propios negativos causan que algunos de los nodos tengan sensibilidades  $V-Q$  negativas, y en consecuencia, inestabilidad de voltaje.

#### 4.3.2.1 Sensitividad de voltaje en coordenadas modales

Las ecuaciones de flujos de potencia pueden ser simplificadas al introducir las transformaciones  $\Delta v = [\xi] \Delta V$  y  $\Delta q = [\xi] \Delta Q$ , donde  $[\xi]$  es la matriz modal de vectores propios derechos correspondiente a la matriz  $J^R_{QV}$ . Los vectores  $\Delta v$  y  $\Delta q$  tienen las mismas unidades que los vectores propios y representan combinaciones lineales de las cantidades originales.

En coordenadas modales, la ecuación de sensibilidad  $V-Q$  en (4.5) puede expresarse como:

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 & & & \\ & \lambda_2 & & \\ & & & \\ & & & \lambda_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v_1 \\ \Delta v_2 \\ \Delta v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta q_1 \\ \Delta q_2 \\ \Delta q_n \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

El análisis de la ecuación (4.14) muestra que la sensibilidad de la magnitud de voltaje del  $i$ -ésimo nodo al cambio de potencia reactiva en el propio nodo es inversamente proporcional a la magnitud del valor propio. Esto es, conforme  $\lambda_i \rightarrow 0$ , la variación de voltaje modal en el nodo  $i$  es muy sensible a los incrementos correspondientes de la carga en el propio nodo. El valor propio asociado tiene dos interpretaciones de interés en el estudio de estabilidad: la magnitud proporciona una medida del grado de estabilidad, mientras que el signo indica si el sistema es estable o inestable.



### 4.3.3 Interpretación física de los modos de voltaje

El análisis de las características de las ecuaciones de flujos de potencia en el capítulo 3 mostró que en aplicaciones típicas, la matriz  $J_{QV}^R$  es prácticamente simétrica. Esto implica que los valores propios serán reales [34], positivos, negativos o cero. Similarmente, los vectores propios izquierdos y derechos serán también reales e iguales. Un valor propio positivo indica que el sistema es estable dado que voltaje y potencia reactiva se mueven en el mismo sentido. Un valor propio con magnitud cero implica que el sistema se encuentra en el límite de estabilidad.

### 4.3.4 Factor de participación nodal

El factor de participación nodal se define en [35] como:

$$FP_n = P_{ki} = \xi_{ki} \eta_{ik} \quad (4.15)$$

donde  $P_{ki}$  indica la contribución del  $i$ -ésimo modo (valor propio) a la sensibilidad  $V-Q$  del  $k$ -ésimo nodo. Para los modos críticos, un factor de participación de magnitud grande determina los nodos, y en consecuencia, las áreas del sistema más relacionados al problema de inestabilidad de voltaje.

La experiencia en el análisis de los modos de inestabilidad de voltaje en un sistema eléctrico de potencia muestra que estos, en general, pueden clasificarse en dos categorías principales [16]:

- *Modos muy localizables.* Este tipo de modos tiene pocos nodos con participaciones importantes mientras que el resto exhibe una contribución despreciable. Ejemplos de este tipo de modos incluyen modos locales de inestabilidad, asociados por ejemplo, con un nodo de carga conectado en forma radial al resto del sistema.
- *Modos no localizables.* Este tipo de modos tiene muchos nodos participando pero de valores similares y el resto con participaciones cerca de cero o muy pequeñas.

### 4.3.5 Factor de participación de rama

En analogía con el concepto de factores de participación nodal, las participaciones de rama permiten identificar aquellos elementos del sistema de transmisión como líneas o generadores que están fuertemente asociados a un modo de inestabilidad.

En este trabajo, las participaciones de rama se calculan con base en el siguiente procedimiento. En coordenadas modales se excita solo el  $i$ -ésimo modo en (4.11) al asumir que  $\Delta Q = e_i = [0 \dots 1 \dots 0]$ , esto es, se asume que todas las entradas correspondientes al cambio incremental en la carga son cero, con excepción de la  $i$ -ésima carga, la cual es igual a 1. En consecuencia, las variaciones modales de potencia reactiva son:

$$\Delta Q_{mi} = \eta e_i = n_i^T = \xi_i \quad (4.16)$$

donde  $\xi_i$  es el  $i$ -ésimo vector propio derecho de  $\xi$  y se asume que  $\xi_i$  ha sido normalizado.

Conociendo las variaciones modales de potencia reactiva, las variaciones modales correspondientes de voltajes nodales se deducen de (4.14) como:

$$\Delta V_{mi} = \frac{\Delta Q_{mi}}{\lambda_i} = \frac{\xi_i}{\lambda_i} \quad (4.17)$$

Por otra parte, las variaciones modales asociadas a los ángulos de fase nodales se obtienen al sustituir (4.17) en (4.4) como:

$$\Delta \theta_{mi} = -J_{P\theta}^{-1} J_{PV} \Delta V_{mi} = -J_{P\theta}^{-1} J_{PV} \left( \frac{\xi_i}{\lambda_i} \right) \quad (4.18)$$

Finalmente, una vez que se han determinado los voltajes modales de envío y recepción para una rama se obtienen las pérdidas modales linealizadas de potencia reactiva mediante la relación:

$$\Delta Q_{mi \text{ pérdidas } km} = (I_{mi km})^2 X_{km}$$

en donde  $I_{mi km}$  es la corriente modal y  $X_{km}$  es la reactancia serie asociada con la rama conectada entre los nodos  $k$  y  $m$

El Factor de Participación de Rama ( $FP_{rama km}$ ) se define entonces de acuerdo a Gao y Kundur como [35]:

$$FP_{rama km} = \frac{\Delta Q_{mi \text{ pérdidas } km}}{\max[\Delta Q_{mi \text{ pérdidas }}]} \quad (4.19)$$

El factor de participación de rama indica, para cada modo, las ramas del sistema que consumen mayor potencia reactiva ante un cambio incremental en la carga. En este contexto, los  $FP_{rama}$  presentan las siguientes características de interés:

Ramas con  $FP_{rama}$  grande provocan que el modo de inestabilidad de voltaje asociado sea crítico.

Las ramas identificadas con este criterio proporcionan información útil para el desarrollo de medidas correctivas y/o el análisis de contingencias que pueden agravar el problema de inestabilidad.

#### 4.3.6 Factor de participación de fuente de potencia reactiva

La metodología anterior puede ser modificada para determinar la participación de cualquier fuente de potencia reactiva en el modo de inestabilidad de voltaje de interés.

Si se asume para tal efecto que el modelo incremental que describe al sistema eléctrico de potencia se reescribe en la forma:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta Q_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} & J_{PVG} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} & J_{QVG} \\ J_{QG\theta} & J_{QGV} & J_{QGVG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \\ \Delta V_G \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

en donde:

$\Delta V_G$  = Cambios incrementales de las magnitudes de voltajes en los nodos PV

$\Delta Q_G$  = Cambios incrementales de las inyecciones de potencia reactiva de los nodos PV

Asumiendo nuevamente que  $\Delta P = 0$ , se obtienen las siguientes relaciones incrementales:

$$0 = J_{P\theta}\Delta\theta + J_{PV}\Delta V + J_{PVG}\Delta V_G \quad (4.21)$$

$$\Delta Q = J_{Q\theta}\Delta\theta + J_{QV}\Delta V + J_{QVG}\Delta V_G \quad (4.22)$$

$$\Delta Q_G = J_{QG\theta}\Delta\theta + J_{QGV}\Delta V + J_{QGVG}\Delta V_G \quad (4.23)$$

Substituyendo  $\Delta\theta$  de (4.21) en (4.22) y despejando para  $\Delta Q$  se obtiene:

$$\Delta Q = J_{QV}^R \Delta V + [J_{QVG} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PVG}] \Delta V_G \quad (4.24)$$

Finalmente, resolviendo para  $\Delta V$  en (4.24) y substituyendo en (4.23) se obtiene:

$$\Delta Q_G = S_{QGQ} \Delta Q + S_{QGVG} \Delta V_G \quad (4.25)$$

donde:

$$S_{QGQ} = [J_{QGV} - J_{QG} J_{P\theta}^{-1} J_{PV}] J_{QV}^{R^{-1}}$$

es la matriz de sensibilidades entre la potencia reactiva generada y la potencia reactiva de la carga, y

$$S_{Q_G V_G} = [J_{Q_G V_G} - J_{Q_G \theta} J_{P \theta}^{-1} J_{P V_G}] - [J_{Q_G V} - J_{Q_G \theta} J_{P \theta}^{-1} J_{P V}] J_{Q V}^{R^{-1}} [J_{Q V_G} - J_{Q \theta} J_{P \theta}^{-1} J_{P V_G}]$$

es la matriz de sensibilidades entre la potencia reactiva generada y el voltaje de generación.

Si se asume adicionalmente que la variación de magnitudes de voltajes  $\Delta V_G$  de los nodos PV en (4.25) son igual a cero, entonces se obtiene la relación de interés:

$$\Delta Q_G = S_{Q_G Q} \Delta Q \quad (4.26)$$

La ecuación (4.26) permite analizar el impacto de las variaciones de potencia reactiva de la carga en la potencia de salida de los generadores u otras fuentes de potencia reactiva. De esta forma al sustituir (4.16) en (4.26) es posible obtener la variación modal de potencia reactiva de los generadores del *i*-ésimo modo debido al efecto de la carga mediante la relación:

$$\Delta Q_{G_m} = S_{Q_G Q} [\xi_i] \quad (4.27)$$

En analogía con la definición de participaciones de ramas, el Factor de Participación del *k*-ésimo Generador ( $FP_{G_k}$ ) se define como:

$$FP_{G_k} = \frac{\Delta Q_{G_m k}}{\max[\Delta Q_{G_m}]} \quad (4.28)$$

Los  $FP_G$  indican, para cada modo, los generadores con mayor participación de potencia reactiva ante un cambio incremental en la potencia reactiva de la carga. En este sentido, generadores o fuentes de potencia reactiva con una participación significativa, indican una contribución importante en la capacidad del sistema de mantener la estabilidad del modo de interés.

#### 4.4 LA TÉCNICA DE DESCOMPOSICIÓN EN VALORES SINGULARES

La descomposición en valores singulares (DVS) de la matriz  $J_{Q V}^R$  proporciona una medida alterna útil para analizar la estabilidad de voltaje del sistema.

Si se asume que la DVS de la matriz  $J_{Q V}^R$  se expresa en la forma [16]:

$$J_{Q V}^R = U \Sigma V^T \quad (4.29)$$

donde:

$U$  = matriz de vectores singulares derechos  
 $V^T$  = matriz de vectores singulares izquierdos  
 $\Sigma$  = matriz diagonal de valores singulares

Para una matriz cuadrada simétrica, el mínimo valor singular es una medida de la distancia en el sentido de *norma-2* de su cercanía a ser singular [34]. Por lo tanto el mínimo valor singular puede ser utilizado como un indicador de inestabilidad.

Tanto la matriz  $U$  como  $V^T$  son ortogonales, es decir que su inversa es igual a su traspuesta. Las columnas de  $U$  están formadas por los vectores singulares derechos y las filas de  $V^T$  están formadas por los vectores singulares izquierdos:

$$U = [u_1 \quad u_2 \quad \dots \quad u_n] \quad (4.30)$$

$$V^T = [v_1 \quad v_2 \quad \dots \quad v_n]^T \quad (4.31)$$

en tanto que la matriz  $\Sigma$  es una matriz formada por los valores singulares de  $J_{QV}^R$ . es decir:

$$\Sigma = \text{diag}[\sigma_1 \quad \sigma_2 \quad \dots \quad \sigma_n] \quad (4.32)$$

y con la característica de estar ordenados en la diagonal en forma descendente, es decir,  $\sigma_1 > \sigma_2 > \dots > \sigma_n$ . Por lo que (4.8) se puede escribir como:

$$\Delta V = V \Sigma^{-1} U^T \Delta Q \quad (4.33)$$

o bien

$$\Delta V = \sum_{i=1}^n \frac{v_i u_i}{\sigma_i} \Delta Q \quad (4.34)$$

De la ecuación (4.34) se puede observar que un valor  $\sigma_i$  muy pequeño puede causar cambios muy grandes en  $\Delta V$ . En este sentido un valor singular cercano a cero es indicativo de que el punto de colapso de voltaje a sido alcanzado y con ello la inestabilidad de voltaje.

Para mostrar la relación entre el análisis modal y la DVS, se considera que la relación  $J_{QV}^R [J_{QV}^R]^T = [J_{QV}^R]^T J_{QV}^R$  es cierta. De aquí se puede mostrar que:

$$\Lambda(J_{QV}^R J_{QV}^{R^T}) = \Lambda(J_{QV}^{R^T} J_{QV}^R) = \Sigma^2(J_{QV}) \quad (4.35)$$

Es decir, los eigenvalores de  $J^R_{QV} J^R_{QV}{}^T$  son los valores singulares de  $J^R_{QV}$  elevados al cuadrado, donde

$$\begin{aligned} \Lambda &= \text{matriz diagonal de eigenvalores de } J^R_{QV} J^R_{QV}{}^T \text{ o de } J^R_{QV}{}^T J^R_{QV} \\ \Sigma &= \text{matriz diagonal de valores singulares de } J^R_{QV} \end{aligned}$$

La demostración de esta igualdad es posible al considerar que la matriz  $J^R_{QV}$  es simétrica, teniéndose entonces que:

$$J^R_{QV} J^R_{QV}{}^T = J^R_{QV}{}^T J^R_{QV} = J^R_{QV}{}^2 \quad (4.36)$$

por lo que su descomposición en eigenvalores es:

$$J^R_{QV}{}^2 = (\xi \Lambda \eta)^2 = \xi \Lambda \eta \xi \Lambda \eta = \xi \Lambda^2 \eta \quad (4.37)$$

de la expresión (4.37) se observa que:

$$\sigma^2(J^R_{QV}) = \lambda(J^R_{QV})^2 \quad (4.38)$$

entonces de (4.38) se tiene que:

$$\sigma(J^R_{QV}) = \lambda(J^R_{QV}) \quad (4.39)$$

Es decir, los eigenvalores y valores singulares de  $J^R_{QV}$  son idénticos lo cual concluye la demostración.

En aplicaciones típicas la matriz  $J^R_{QV}$  es prácticamente simétrica, ya que las resistencias de la red son muy pequeñas; de aquí se concluye que los valores propios y los valores singulares correspondientes a  $J^R_{QV}$  serán muy similares, así como los vectores propios y vectores singulares asociados.

#### 4.5 METODOLOGÍA PROPUESTA Y ALGORITMO COMPUTACIONAL

En esta sección se describe brevemente una metodología de uso práctico para el estudio de la estabilidad de voltaje basada en la técnica de análisis modal.

La metodología propuesta para la evaluación de la estabilidad de voltaje y el desarrollo de medidas correctivas, comprende los siguientes pasos:

1. *Selección de un caso base de operación.* En esta etapa se elige una condición de demanda base, la cual típicamente incluye una condición de demanda máxima del sistema bajo estudio o el de una contingencia importante.
2. *Determinación de los modos críticos de estabilidad de voltaje.* Después de seleccionar el caso base de operación, se realiza el análisis modal verificándose que no existan condiciones inestables.
3. *Determinación del caso crítico de operación.* En esta etapa se aumenta la carga del sistema en forma proporcional y se resuelve para cada condición, un estudio de flujo de potencia. El último estudio de flujo de potencia para el cual sea posible obtener una solución factible, representa el punto de voltaje crítico o punto de colapso. En esta etapa se utiliza un modelo de carga a potencia constante y se incluyen todos los límites de operación en el sistema.
4. *Determinación de los mecanismos de inestabilidad.* Para el caso crítico de operación se determinan los elementos del sistema con mayor participación en los modos críticos. Se determinan las zonas del sistema vulnerables al problema de inestabilidad y se calculan márgenes de estabilidad para el conjunto de contingencias críticas determinadas del análisis de participaciones de rama.
5. *Evaluación de medidas correctivas.* Se evalúa el impacto de dispositivos de control sobre los modos críticos de inestabilidad

La metodología propuesta de análisis ha sido integrada a VOLSTAB, un programa de simulación en computadora digital para el estudio de la estabilidad de voltaje en estado estable, desarrollado durante este trabajo de tesis. El programa VOLSTAB está desarrollado en el ambiente MATLAB e integra diferentes rutinas externas para el cálculo de flujo de potencia y el análisis modal de las relaciones de sensibilidad.

El algoritmo computacional implementado en este trabajo, se ilustra en forma simplificada, en la Figura 4.1. En este simulador, el estudio de flujo de potencia se realiza con el programa PSTAB2 [47] modificado para permitir el análisis de curvas V-Q y el análisis de sensibilidades, mientras que el cálculo de valores modales se realiza con base en las rutinas de análisis modal existentes en Matlab [48].

A continuación se describen las principales características de este simulador:

- (1) *Determinación del caso crítico de operación (Pasos 1), 2) y 3), en la metodología propuesta).* A partir de una condición inicial de operación (caso base de operación), el simulador VOLSTAB permite obtener la condición crítica de operación la cual representa el punto de operación más cercano a la condición de inestabilidad para el cual se tiene una solución factible al problema de flujo de potencia. El procedimiento implementado en esta etapa es el siguiente.

- Se incrementa la demanda de potencia activa y reactiva del sistema y la potencia generada de acuerdo al siguiente criterio:

$$P_G^{act} = kP_G^{act}$$

$$P_L^{act} = kP_L^{act}$$

$$Q_L^{act} = kP_L^{act}$$

donde  $k > 1$  (en p.u.).

La potencia reactiva requerida en cada caso es determinada mediante la solución de un estudio de flujo de potencia. En estos estudios, se representan todos los efectos no lineales en el sistema que puedan afectar la determinación del punto crítico, específicamente:

- Límites de potencia reactiva en generadores y CEVs
- La carga se representa con una característica de potencia constante, para ambas, la potencia activa y reactiva

- En cada paso del proceso iterativo, se calcula la matriz Jacobiana reducida  $J_{QV}^R$  y se determinan los valores propios del sistema para verificar la condición de estabilidad (inestabilidad) de voltaje. De ser necesario, en la vecindad del punto crítico se disminuye el incremento de carga utilizando un criterio de convergencia entre una solución de flujo y la solución correspondiente al caso previo. Esta suposición, de naturaleza heurística, conduce a resultados aceptables y permite obtener una condición de operación cercana al punto crítico. Cuando se presenten problemas de convergencia en la condición cercana al punto de inestabilidad, el programa evalúa el efecto de un cambio en la característica de la carga del sistema mediante las ecuaciones (3.9) y (3.10).
- Para la condición de operación crítica determinada, se calculan las participaciones de rama para los modos críticos de voltaje. Se determinan aquellas con mayor participación en el modo crítico. Con base a esta información se analiza el impacto de las diferentes contingencias sobre los modos de estabilidad, determinando en cada caso, el margen de estabilidad. La condición más crítica de operación corresponde a aquella con menor margen de estabilidad y corresponde al caso crítico de operación.

En esta etapa se modifica el modelo del sistema para incluir una representación detallada de los diferentes elementos del sistema de potencia con mayor influencia en el problema de estabilidad de voltaje, específicamente:

Las cargas se representan por modelos dependientes del voltaje mediante las ecuaciones (3.7), (3.9) y (3.10)



Los límites de potencia reactiva se representan de manera analítica mediante las ecuaciones (3.7) y (3.8)

Se incluye la representación de la característica de dependencia de voltaje de elementos como CEVs mediante las ecuaciones (3.7) y (3.11) así como otros elementos de control en la red

(2) **Determinación de la participación de los diferentes elementos del sistema en los modos críticos de estabilidad (Paso 4)**. Para la condición crítica de operación se determina la participación de los diferentes elementos del sistema de acuerdo al siguiente procedimiento:

- Se determinan las participaciones modales de rama y de generadores. El método de análisis comprende los siguientes pasos:
  1. Para cada modo de interés, las participaciones nodales se determinan mediante la ecuación (4.15).
  2. Las participaciones de rama se obtienen mediante la ecuación (4.19)
  3. Se determinan las relaciones de sensibilidad entre el incremento en la potencia reactiva de la carga y la potencia reactiva de los generadores mediante las relaciones:

$$J^R_{QV} = J_{QV} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV}$$

y

$$J^R_{QV} S_{QGQ} = [ J_{QGQ} - J_{QG} J_{P\theta}^{-1} J_{PV} ]$$

4. Las participaciones asociadas con las fuentes de potencia reactiva (generadores, CEVs) se determinan mediante el procedimiento descrito en la sección (4.3.6)

(3) **Ubicación de dispositivos de control y desarrollo de medidas correctivas (Paso 5)**. Una vez determinados los modos críticos de inestabilidad, el programa permite el desarrollo de medidas correctivas tales como la ubicación de dispositivos de control. El procedimiento de ubicación comprende dos pasos principales:

Se seleccionan los nodos o ramas con mayor participación en el (los) modo(s) de interés

- Se evalúa el impacto de la alternativa deseada de compensación en los márgenes de estabilidad de voltaje mediante un estudio convencional de flujos de potencia. De ser necesario, se evalúan otras alternativas de compensación hasta satisfacer los criterios deseados para los márgenes de estabilidad requeridos por el usuario.

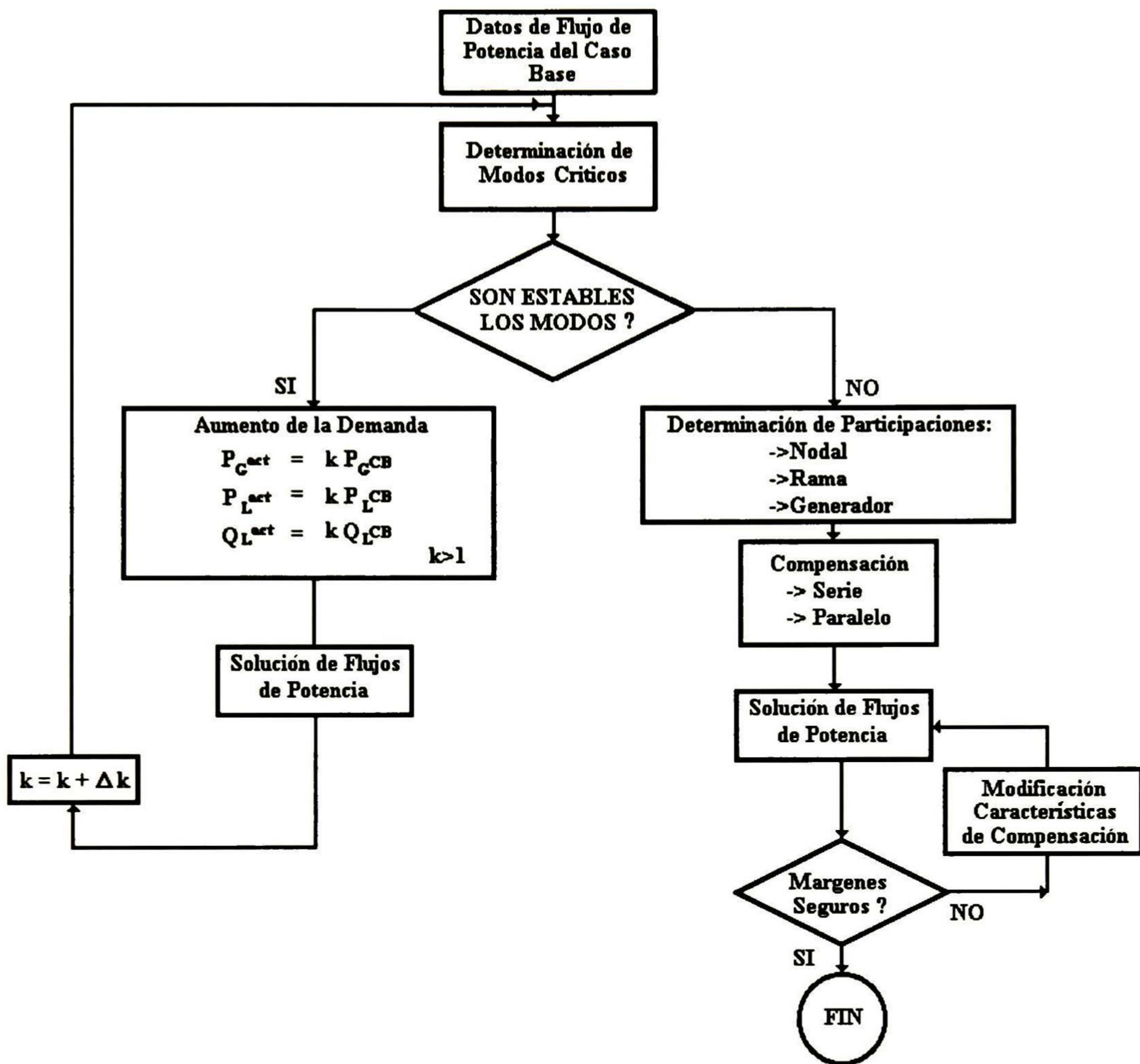


Figura 4.1.- Diagrama de flujo del algoritmo computacional para análisis de estabilidad de voltaje ante pequeñas perturbaciones.

Donde

- $P_G^{act}$  = Potencia activa de generación del CBO  
 $P_L^{act}$  = Potencia activa de carga del CBO  
 $Q_L^{act}$  = Potencia reactiva de carga del CBO

# CAPÍTULO 5

## APLICACIÓN

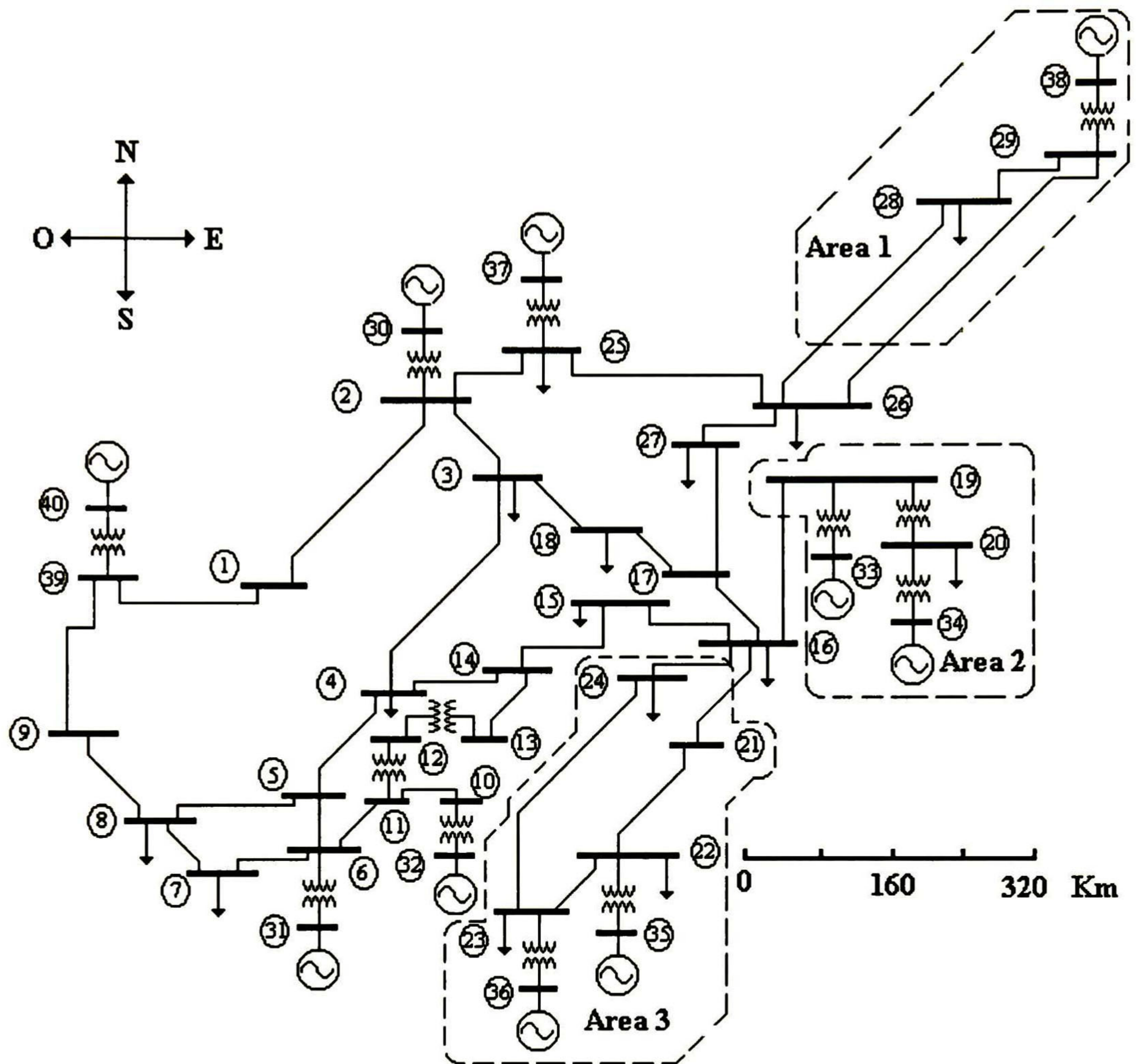
### 5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta la aplicación del método de análisis modal al estudio de estabilidad de voltaje ante pequeñas perturbaciones en un sistema de potencia con características reales. Se discute la aplicación práctica de la metodología propuesta en el capítulo 4 para determinar los modos críticos de estabilidad de voltaje, así como la identificación de los nodos o áreas, líneas de transmisión y generadores del sistema más vinculados al problema de estabilidad. Se analiza el efecto de las características de la carga y el efecto de contingencias en el sistema sobre la estabilidad. Los resultados obtenidos se comparan con otras técnicas de análisis así como con los obtenidos por otros investigadores. Se discuten distintas alternativas para mejorar la estabilidad de voltaje en el sistema incluyendo la aplicación múltiple de compensación estática de VARs en nodos críticos del sistema.

La organización de este capítulo es la siguiente. En la sección 5.2 se describen las características esenciales del sistema de Nueva Inglaterra utilizado en la aplicación de la técnica del análisis modal. En la sección 5.3 se presentan algunos estudios comparativos de la aplicación de la técnica de análisis modal con los resultados obtenidos por otros investigadores así como con los resultados obtenidos mediante otros enfoques de análisis, específicamente las curvas  $V-Q$  y la técnica de descomposición en valores singulares. En la sección 5.4 se presenta la aplicación de la metodología propuesta al análisis de estabilidad de voltaje en el sistema de Nueva Inglaterra. Finalmente en la sección 5.5 se presenta una discusión de los resultados obtenidos.

### 5.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PRUEBA NUEVA INGLATERRA (SPNI)

La Figura 5.1 presenta un diagrama esquemático a escala del sistema de prueba de Nueva Inglaterra (SPNI) utilizado en este trabajo. El SPNI es un equivalente de la red troncal de 345 KV de la zona de Nueva Inglaterra en los Estados Unidos y su interconexión con el sistema eléctrico Canadiense, el cual comprende 10 generadores equivalentes, 40 nodos y 34 líneas de transmisión [36]. En este modelo, el generador conectado al nodo 40 constituye un equivalente de Thevenin del sistema interconectado entre Estados Unidos y Canadá y su comportamiento dinámico y en estado estable se asemeja al de un nodo infinito. Los parámetros de la red y dispositivos de control así como el caso base de operación considerados en esta tesis se presentan en el apéndice A.



**Figura 5.1.- Diagrama esquemático del Sistema de Prueba de Nueva Inglaterra (SPNI) mostrando las zonas con características radiales**

El SPNI posee 3 zonas eléctricas de estructura esencialmente radial, en las cuales la pérdida de control de voltaje de las unidades generadoras asociadas puede conducir a problemas severos de estabilidad. Este sistema ha sido estudiado por diferentes investigadores, además de que presenta características apropiadas para el estudio de las diferentes manifestaciones del fenómeno de inestabilidad de voltaje así como el desarrollo de medidas correctivas.

### 5.3 VALIDACIÓN DEL PROGRAMA VOLSTAB

En esta sección se presentan algunos estudios comparativos que muestran la capacidad de los métodos desarrollados para analizar las características de estabilidad de voltaje de un

sistema real. Los resultados obtenidos se comparan con aquellos reportados en la literatura del dominio publico, así como los obtenidos mediante otros enfoques de análisis [37].

Para facilitar la comparación de estos estudios se adoptan las siguientes consideraciones de modelado, las cuales han sido consideradas por otros investigadores en trabajos previos [37]:

- No se consideran los transformadores de los generadores.
- Se consideran límites de potencia reactiva en todos los generadores.
- La carga se representa como potencia constante en todos los nodos.

La demanda total del sistema corresponde a 6150 MW y 1290 MVar.

### 5.3.1 Análisis modal

El sistema simplificado de Nueva Inglaterra, obtenido al despreciar los transformadores elevadores de voltaje en las unidades generadoras, comprende 20 modos de estabilidad de voltaje correspondientes a los nodos de carga del sistema. En la Tabla 5.1 se muestran los 10 modos críticos de menor magnitud correspondientes al caso base de operación. Los valores propios de menor magnitud definen los modos críticos de estabilidad de voltaje. Los resultados obtenidos mediante el simulador VOLSTAB desarrollado en este trabajo, se compararon con aquellos presentados en [37] calculados mediante el programa VSTAB del EPRI (Electric Power Research Institute, de los Estados Unidos). Es importante señalar que en esta referencia sólo se describen los dos modos de menor magnitud, por lo que nos es posible establecer una comparación exhaustiva de los resultados. Como se muestra en la Tabla 5.1, todos los valores propios son reales positivos indicando que el sistema opera en un punto de operación estable en el sentido de voltaje.

**Tabla 5.1**  
**Comparación de los valores propios obtenidos mediante el programa VOLSTAB y los resultados obtenidos en [37]**

Modo	VOLSTAB	VSTAB	Error (%)
1	28.3504	27.8832	1.68
2	40.9920	41.1560	0.40
3	47.9922	-	-
4	596.530	-	-
5	665.703	-	-
6	863.159	-	-
7	922.398	-	-
8	1036.183	-	-
9	1144.501	-	-
10	1518.945	-	-

El análisis de estabilidad se concentró en los dos modos críticos caracterizados por la menor magnitud. En la Tabla 5.2 se presentan los factores de participación nodal ( $FP_n$ ) asociados con estos dos modos, obtenidos con el programa desarrollado y los reportados en [37].

**Tabla 5.2**  
**Factores de participación nodal para los modos críticos de estabilidad de voltaje**

VOLSTAB				VSTAB			
Modo 1		Modo 2		Modo 1		Modo 2	
Nodo	$FP_n$	Nodo	$FP_n$	Nodo	$FP_n$	Nodo	$FP_n$
27	0.1995	12	0.9651	27	0.1923	12	0.9667
17	0.1567	13	0.0085	17	0.1657	13	0.0082
18	0.1471	27	0.0068	18	0.1518	27	0.0059
15	0.0949	14	0.0045	15	0.1130	14	0.0040
26	0.0914	11	0.0044	26		11	0.0043
16	0.0817	26	0.0042	16	0.0990	26	-
24	0.0798	17	0.0020	24	-	17	-
3	0.0487	18	0.0016	3	-	18	-
21	0.0333	4	0.0010	21	-	4	-

Como se observa en las Tablas 5.1 y 5.2 los resultados obtenidos con VOLSTAB muestran un alto grado de similitud con los reportados en [37]. Las diferencias encontradas son básicamente atribuibles a consideraciones en el modelado del sistema de potencia. En particular, la referencia [37] no proporciona información suficiente sobre el modelado de la carga así como la definición de los criterios utilizados para representar límites de operación.

### 5.3.2 Análisis de sensibilidades $V-Q$

El análisis de sensibilidades  $V-Q$  se utilizó en este trabajo para determinar los modos críticos de carga. En este análisis, las sensibilidades  $V-Q$  se calcularon directamente a partir de la matriz Jacobiana reducida, previo al análisis modal. En la Tabla 5.3 se muestran las 8 sensibilidades  $V-Q$  de mayor magnitud, obtenidas para el caso base de operación.

**Tabla 5.3**  
**Sensibilidades  $V-Q$  correspondientes al caso base de operación**

Orden de Magnitud	Nodo	Sensibilidades $V-Q$	
		VOLSTAB	VSTAB
1	12	0.02410	0.02407
2	24	0.00930	0.02176
3	9	0.01550	0.01549
4	1	0.01500	0.01502
5	27	0.01450	0.01480
6	28	0.01170	
7	26	0.01130	
8	18	0.01800	

Como se puede observar de la Tabla 5.3, los resultados obtenidos con VOLSTAB son muy similares a los obtenidos con VSTAB a excepción de la sensibilidad del nodo 24, esto puede atribuirse como ya se menciona, a consideraciones de modelado utilizadas en [37].

### 5.3.3 Análisis de valores singulares

Finalmente, con el objeto de verificar los resultados teóricos obtenidos del análisis estructural de la matriz Jacobiana reducida, se compararon los resultados obtenidos del cálculo de valores propios y los valores singulares. En la Tabla 5.4 se muestran los 10 modos críticos y los 10 valores singulares críticos

**Tabla 5.4**  
**Comparación de valores propios y valores Singulares críticos obtenidos con VOLSTAB**

Valor Propio	Valor Singular
28.3504	28.0326
40.9920	40.9734
57.9922	57.7326
59.6530	59.5188
66.5703	66.5705
86.3159	85.7512
92.2398	91.9320
103.6183	103.3156
114.4501	114.3414
151.8945	151.1204

Se puede apreciar que los valores propios y los valores singulares correspondientes son muy similares, lo cual como se mencionó en el capítulo 4, es indicativo que la matriz Jacobiana reducida posee un grado de simetría importante. Este aspecto ha motivado el desarrollo de metodologías basadas en la descomposición en valor singular para la evaluación de la estabilidad de voltaje [20].

## 5.4 APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ANÁLISIS MODAL AL ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN EL SPNI

En esta sección se presenta la aplicación del método de análisis modal al estudio de la estabilidad de voltaje en el SPNI. Con base a éste análisis se determinan las zonas del sistema susceptibles a experimentar problemas de inestabilidad así como los elementos que más contribuyen a este fenómeno.

Con el objeto de obtener resultados más representativos de un sistema real, se considera en este caso la operación de todos los transformadores de elevación de voltaje en los generadores y se asumen diferentes condiciones de operación y características del sistema.

### 5.4.1 Análisis del caso base de operación (CBO)

El CBO adoptado en este trabajo corresponde a una demanda total del sistema de 6150.5 MW y 1593.3 MVar. En este análisis se consideró que todos los transformadores del sistema tienen relaciones de transformación fijas. Adicionalmente, sólo se consideraron límites de potencia reactiva en los generadores 35 y 36 para permitir el análisis del efecto de la pérdida de control de voltaje en el Area 3.

La Tabla 5.5 muestra los modos críticos de inestabilidad de voltaje correspondientes a esta condición de operación. El análisis de los resultados muestra que el sistema es estable en el sentido de voltaje.

**Tabla 5.5**  
**Modos críticos de voltaje para el CBO**

Modo	Valor propio
1	8.7418
2	18.3546
3	26.8183
4	32.2631
5	43.8633
6	52.9346
7	72.2563
8	76.4607
9	82.4656
10	92.9436

#### 5.4.1.1 Areas de potencia reactiva

Se utilizó el análisis de factores de participación nodal para determinar las áreas críticas del sistema susceptibles de presentar problemas de estabilidad de voltaje. En la Tabla 5.6 se muestran los factores de participación nodales para el caso base de operación y un modelo de carga a potencia constante, correspondientes a los modos críticos del sistema.

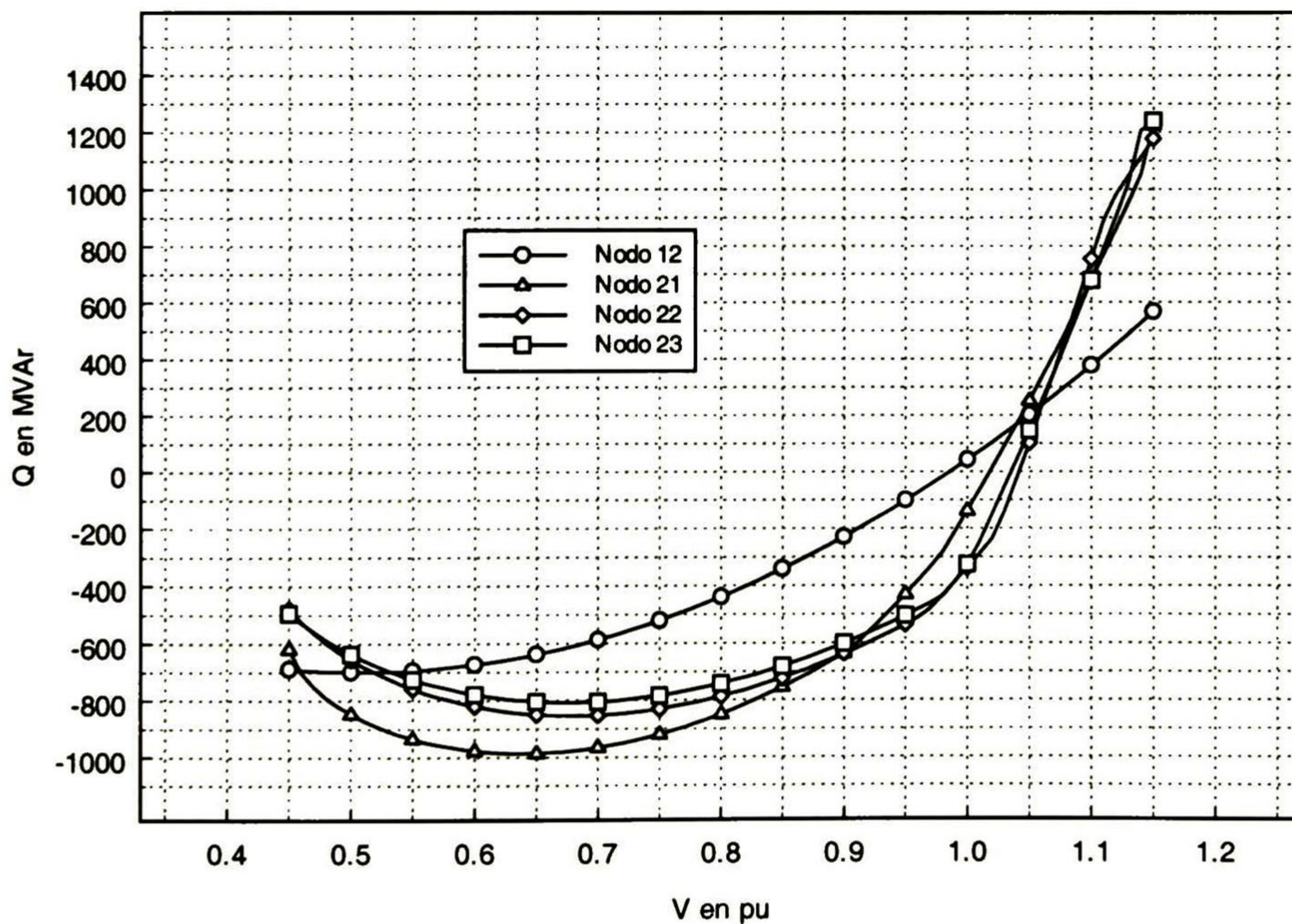
En la Figura 5.2 se muestra la localización física de los nodos con mayor participación en los dos modos más críticos. El análisis de factores de participación nodal en la Tabla 5.6 y la Figura 5.2 muestra que una cantidad importante de nodos participan prácticamente con la misma magnitud en los modos críticos 1 y 2; la unión de estos nodos determina las áreas del sistema cercanas a la inestabilidad.



**Tabla 5.6**  
**Factores de participación nodal para los modos 1 y 2 del CBO**

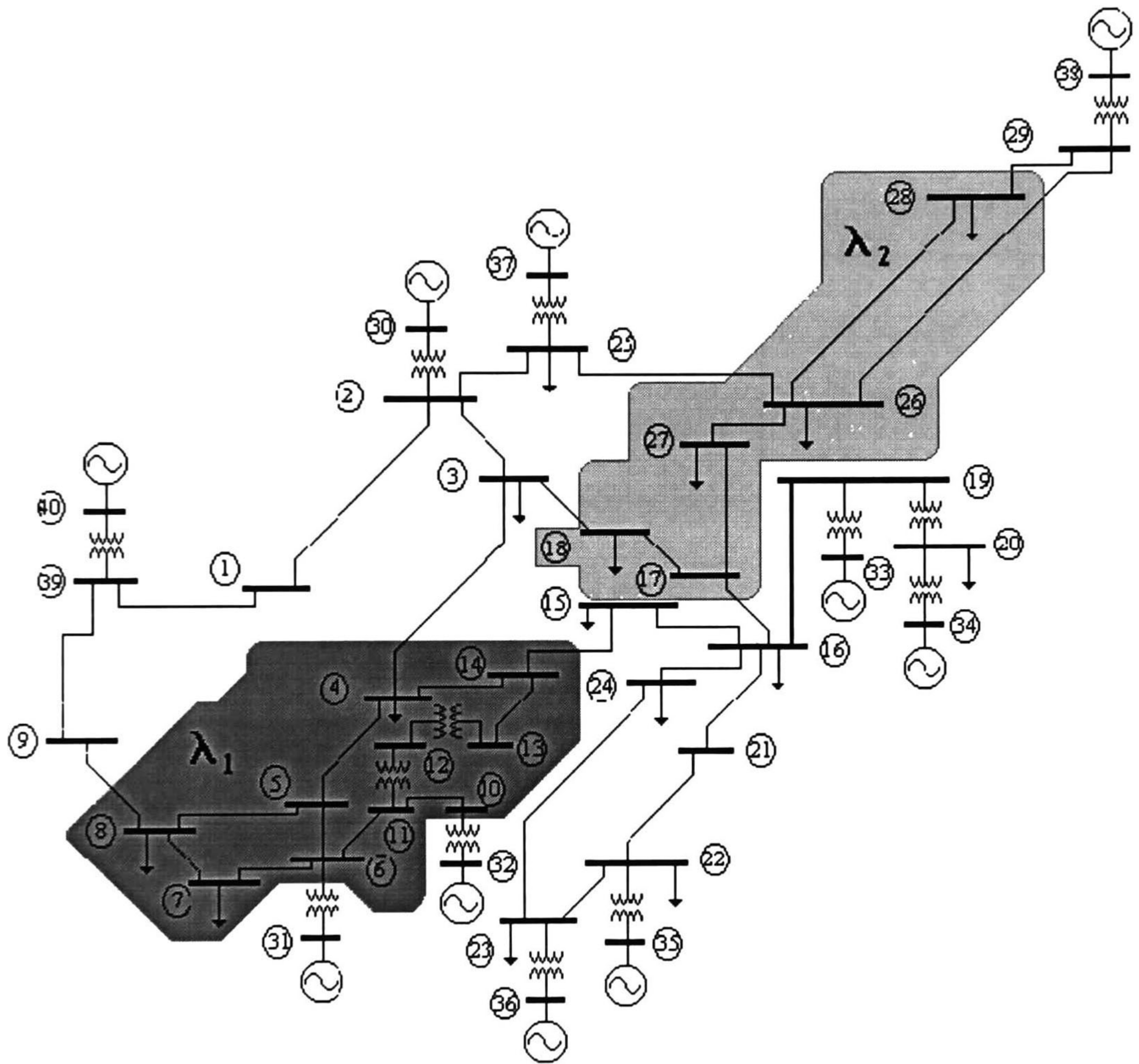
Modo 1		Modo 2	
Nodo	$FP_n$	Nodo	$FP_n$
12	0.1065	27	0.1201
7	0.0660	26	0.1022
14	0.0644	28	0.0890
8	0.0637	17	0.0657
4	0.0626	18	0.0523
13	0.0626	24	0.0429
5	0.0611	29	0.0413
11	0.0603	7	0.0398
6	0.0571	16	0.0384
10	0.0534	8	0.0384
15	0.0451	21	0.0335

Con base a éste análisis se calcularon las curvas  $V-Q$  para todos los nodos del sistema. La Figura 5.3 muestra las curvas correspondientes a los nodos con menor margen de potencia reactiva. Es importante destacar que ambas técnicas de análisis son capaces de determinar el nodo crítico del sistema, pero el análisis de las curvas  $V-Q$  requiere del estudio individual de cada nodo del sistema.



**Figura 5.3.- Curvas  $V-Q$  para los nodos con menor margen de potencia reactiva correspondientes al CBO**

De la Figura 5.3, el margen de potencia reactiva para el nodo 12 es de 700 MVar, lo cual como puede observarse es coherente con la información arrojada por el análisis modal; en este caso dichas curvas fueron obtenidas considerando un modelo de carga a potencia constante.



**Figura 5.2. Localización física de factores de participación nodal para el CBO**

### 5.4.1.2 Factores de participación de ramas y generadores

En las Tablas 5.7 y 5.8 se presentan los factores de participación de rama y generador para el modo 1.

**Tabla 5.7**  
**Factores de participación de rama ( $FP_{rama}$ )**  
**para el modo 1 del CBO**

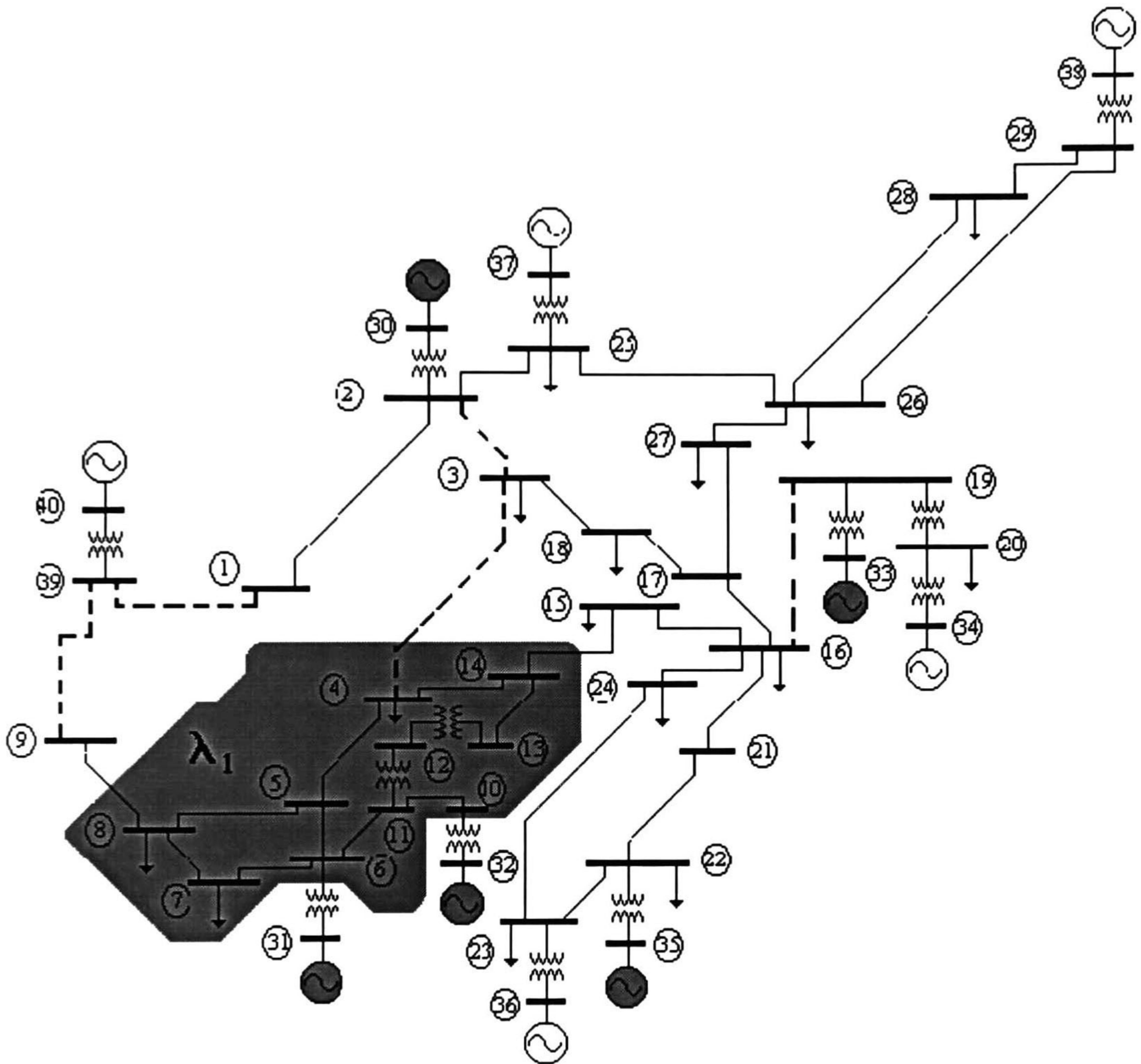
Línea		$FP_{rama}$
Del nodo	al nodo	
1	39	1.0000
2	3	0.6012
16	19	0.4847
3	4	0.3261
9	39	0.3000
21	22	0.2118
15	16	0.2089
23	24	0.1857
1	2	0.1612
12	13	0.1230
12	11	0.1180
14	15	0.1170

**Tabla 5.8**  
**Factores de participación de generador ( $FP_G$ )**  
**para el modo 1 del CBO**

Nodo	$FP_G$
32	1.0000
31	0.8282
30	0.1667
35	0.1639
33	0.1116
38	0.0858
37	0.0826
36	0.0772
34	0.0331
40	0.0040

El análisis de participaciones de rama en la Tabla 5.7 revela que existen cinco líneas de transmisión con pérdidas importantes involucradas, mientras que el análisis de las participaciones de generadores en la Tabla 5.8 muestra que los generadores 32 y 31 tienen la mayor contribución. En la Figura 5.4 se ilustra gráficamente la zona de interés del sistema así como los elementos con mayor participación en este modo. En esta representación las líneas punteadas indican las ramas con mayor participación, mientras que

un generador sombreado indica una participación significativa. Cabe destacar que las líneas con mayor participación inciden en la zona geográfica cercana a la inestabilidad como es de esperarse del análisis físico.



**Figura 5.4.- Localización de las participaciones de nodo, rama y generación para el modo 1 del CBO.**

En este trabajo, las participaciones de rama y generador se utilizan para seleccionar contingencias que conduzcan al sistema a la inestabilidad así como para desarrollar medidas correctivas. Las siguientes secciones ilustran la aplicación práctica de estos criterios.

### 5.4.1.3 Efectos de contingencias en la estabilidad de voltaje

Los factores de participación de rama y generadores se utilizaron para identificar las contingencias más críticas que pueden conducir al sistema a la inestabilidad. El caso analizado corresponde al caso base de operación y las consideraciones de modelado son idénticas a las adoptadas en la sección anterior.

#### 5.4.1.3.1 Efecto de la salida de una línea de transmisión

La contingencia más crítica de línea corresponde a la pérdida del enlace entre los nodos 1 y 39 como se sugiere en la Tabla 5.7. La Tabla 5.9 muestra el efecto de esta contingencia sobre los modos críticos del sistema. Debe observarse en este análisis que ante la salida del enlace no es posible obtener convergencia en la solución de flujos de potencia al utilizar una representación de la carga mediante un modelo de potencia constante, por lo que se utilizó una representación de la carga con un modelo de corriente constante. Esto es un indicativo de la severidad de la contingencia analizada. En la práctica, como se describió en el Capítulo 3 de esta tesis, es deseable la utilización de modelos de carga más realistas.

**Tabla 5.9**  
**Modos críticos del CBO ante la salida de la LT 1-39**

Modo	Caso Base	Salida de LT
1	9.5642	2.1167
2	19.2416	9.4634
3	28.6595	18.6156
4	32.8356	25.3792
5	45.3370	32.0377
6	53.4588	40.0100
7	73.3378	52.1516
8	77.3214	68.1707
9	83.1207	76.4237
10	93.7750	79.9361

El análisis de los modos del sistema muestra que el modo 1 disminuye en forma considerable del valor de precontingencia. Esta disminución es alrededor del 77.8 %, mientras que otros los otros modos muestran también una disminución apreciable.

En la Tabla 5.10 se muestra los factores de participación nodal correspondientes a este caso.

**Tabla 5.10**  
**Factores de participación nodal**  
**de los modos 1 y 2 ante la salida de**  
**la línea de transmisión 1-39**

Modo 1		Modo 2	
Nodo	Fpn	Nodo	Fpn
39	0.5737	39	0.1217
9	0.3537	12	0.1030
8	0.0190	7	0.0691
7	0.0145	8	0.0674
5	0.0080	5	0.0614
6	0.0072	13	0.0594
11	0.0043	11	0.0592
12	0.0042	14	0.0583
4	0.0036	6	0.0574
10	0.0031	4	0.0563
13	0.0031	10	0.0512

El análisis de los factores de participación nodal en la Tabla 5.10, muestra por otra parte, que la zona crítica del sistema para el modo 1 es de característica muy localizable desplazándose hacia la vecindad de los nodos 39 y 9, lo cual es congruente con la interpretación física del fenómeno. En tanto que el modo 2, por sus participaciones nodales, indica que se trata de un modo no localizable.

#### 5.4.1.3.2 Efecto de la salida de un generador

Con base en el análisis de las participaciones de generador obtenidas para el caso base, se seleccionó al generador 32 para el análisis de contingencia. En la Tabla 5.11 se muestran los modos críticos obtenidos para la condición de postcontingencia.

**Tabla 5.11**  
**Modos Críticos ante la salida**  
**del Generador del nodo 32**

Modo	Caso Base	Salida de Generador
1	8.7418	5.1315
2	18.3546	17.4444
3	26.8183	23.6121
4	32.2631	31.5247
5	43.8633	41.2272
6	52.9346	42.3636
7	72.2563	52.2178
8	76.4607	71.7547
9	82.4656	76.0317
10	92.9436	82.7407

Se puede observar que la salida del generador 32 disminuye en un 41.2 % el margen de estabilidad del modo 1, indicando que la estabilidad de voltaje pudiera agravarse ante la salida de este elemento. En la Tabla 5.12 se muestran los factores de participación nodal correspondientes a este caso.

**Tabla 5.12**  
**Factores de participación nodal de los modos 1 y 2**  
**ante la salida del generador del nodo 32**

Modo 1		Modo 2	
Nodo	$FP_n$	Nodo	$FP_n$
12	0.1107	27	0.1359
32	0.0993	26	0.1060
10	0.0833	17	0.0893
13	0.0804	28	0.0795
11	0.0785	18	0.0763
7	0.0653	24	0.0629
8	0.0646	16	0.0579
14	0.0601	21	0.0474
5	0.0597	15	0.0407
6	0.0584	29	0.0369
4	0.0524	3	0.0298

El análisis de la Tabla 5.12, muestra que para esta contingencia los dos modos más críticos son de naturaleza no localizable, y su localización física idéntica a la del CBO, esto es indicativo que el sistema se encuentra en condiciones normales de operación.

#### 5.4.2 Determinación del caso crítico de operación (CCO)

Para determinar el caso crítico de operación, la carga del sistema se aumentó en forma proporcional, manteniendo constante el factor de potencia. Para cada condición de operación resultante se resolvió un estudio de flujo de potencia; la última condición de operación para la cual se obtuvo convergencia define el caso crítico de operación. El procedimiento adoptado así como las condiciones de modelado son aquellas descritas en la sección 3.2 de esta tesis. El punto crítico de operación determinado para este caso es de 9417.65 MW y 2439.66 MVar.

La Tabla 5.13 presenta los modos más críticos para este caso considerando distintos modelos de carga.

**Tabla 5.13**  
**Modos dominantes de estabilidad de voltaje**  
**correspondientes al CCO\***

Modo	$P_{cte}$	$I_{cte}$	$Z_{cte}$
1	0.0785	2.0601	2.1025
2	7.0984	9.5627	10.1182
3	16.9139	19.835	20.5244
4	19.9476	25.5384	27.6917
5	29.2386	32.4308	33.0732
6	34.354	38.1278	39.0755
7	36.7708	41.6749	43.8275
8	51.9847	55.9658	57.4016
9	63.4687	68.6994	70.6487
10	72.2896	76.1536	77.1497

\*Se consideran distintos modelos de carga

En este caso, la magnitud del valor propio asociada al modo 1 es muy cercana a cero, indicando que el sistema se encuentra efectivamente operando en el límite de estabilidad de voltaje. Es importante destacar que la representación de la carga con un modelo de potencia constante constituye la condición más crítica de operación como se sugirió en el Capítulo 2 de esta tesis.

La Tabla 5.14 muestra los factores de participación nodal asociados a los modos críticos del sistema.

**Tabla 5.14**  
**Factores de participación nodal**  
**de los modos 1 y 2 del CCO\***

Modo 1		Modo 2	
Nodo	$FP_n$	Nodo	$FP_n$
36	1.0000	9	1.0000
23	0.9872	8	0.9071
22	0.9073	7	0.8687
35	0.8152	12	0.8410
21	0.6202	5	0.6491
24	0.3682	39	0.6267
16	0.2628	6	0.6089
15	0.2065	11	0.5205
17	0.1520	13	0.4446
18	0.1072	4	0.4366
27	0.0823	10	0.4151

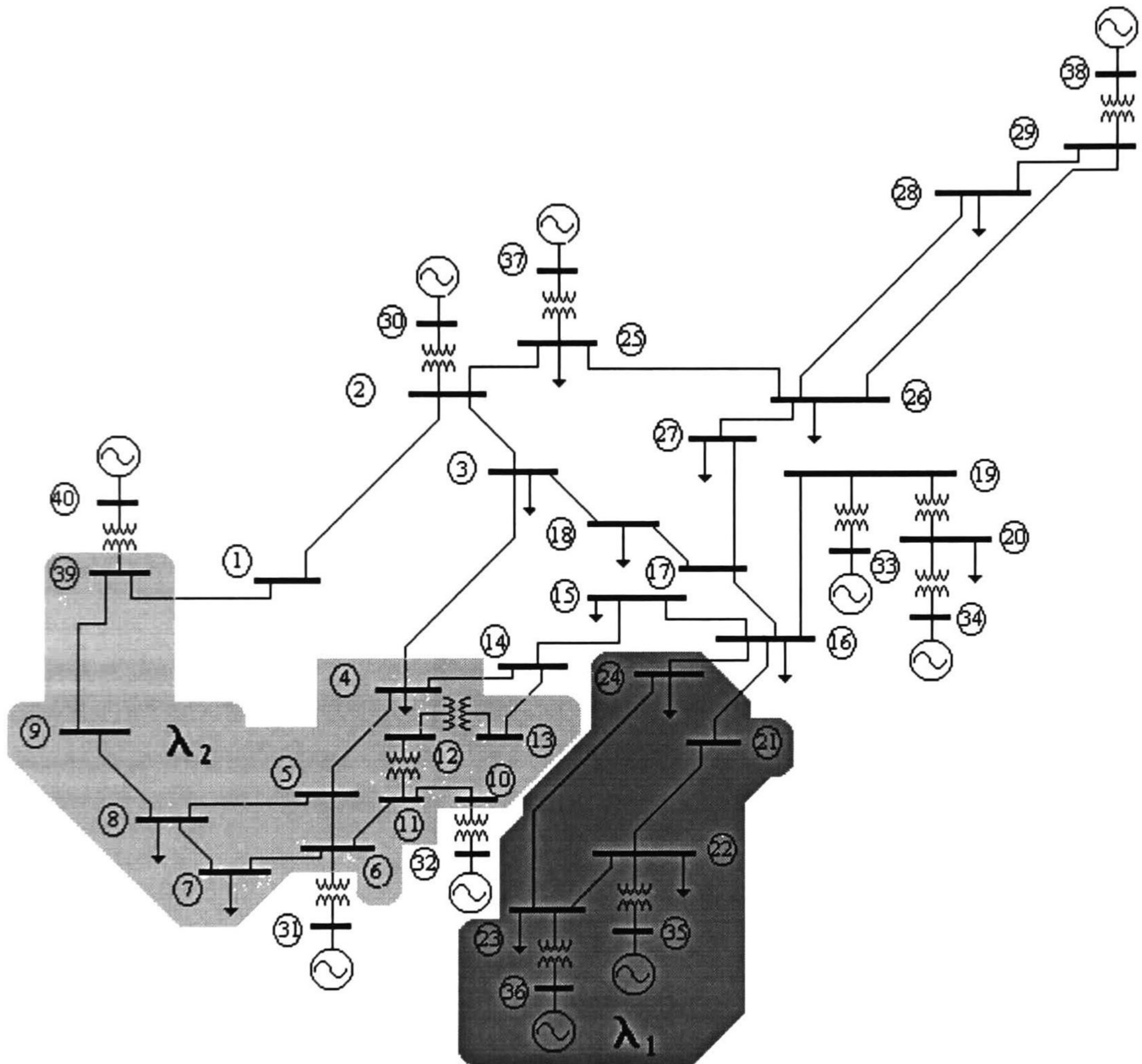
\* Valores normalizados con respecto a la mayor participación

El análisis de los resultados muestra que la zona crítica de estabilidad de voltaje obtenida para el caso crítico de operación se desplaza a una nueva región del sistema. Este análisis muestra que en general los resultados obtenidos para el caso base no son aceptables,



particularmente la presencia de límites de operación y otras no linealidades pueden cambiar en forma significativa la identificación de la zona crítica del sistema.

Se puede observar en este análisis la zona afectada se desplaza precisamente a la zona de los generadores que tienen límites de potencia reactiva como se muestra en la Figura 5.5. Esto tiene sentido debido a que para esta condición de demanda, dichos generadores tocan límites convirtiéndose en nodos PQ agravando el problema de estabilidad de voltaje.



**Figura 5.5.- Localización de los modos críticos de estabilidad de voltaje para el CCO**

En las Tabla 5.15 y 5.16 se muestran las participaciones de rama y generador correspondientes al modo 1, respectivamente.

**Tabla 5.15**  
**Factores de participación de rama**  
**para el Modo 1 del CCO**

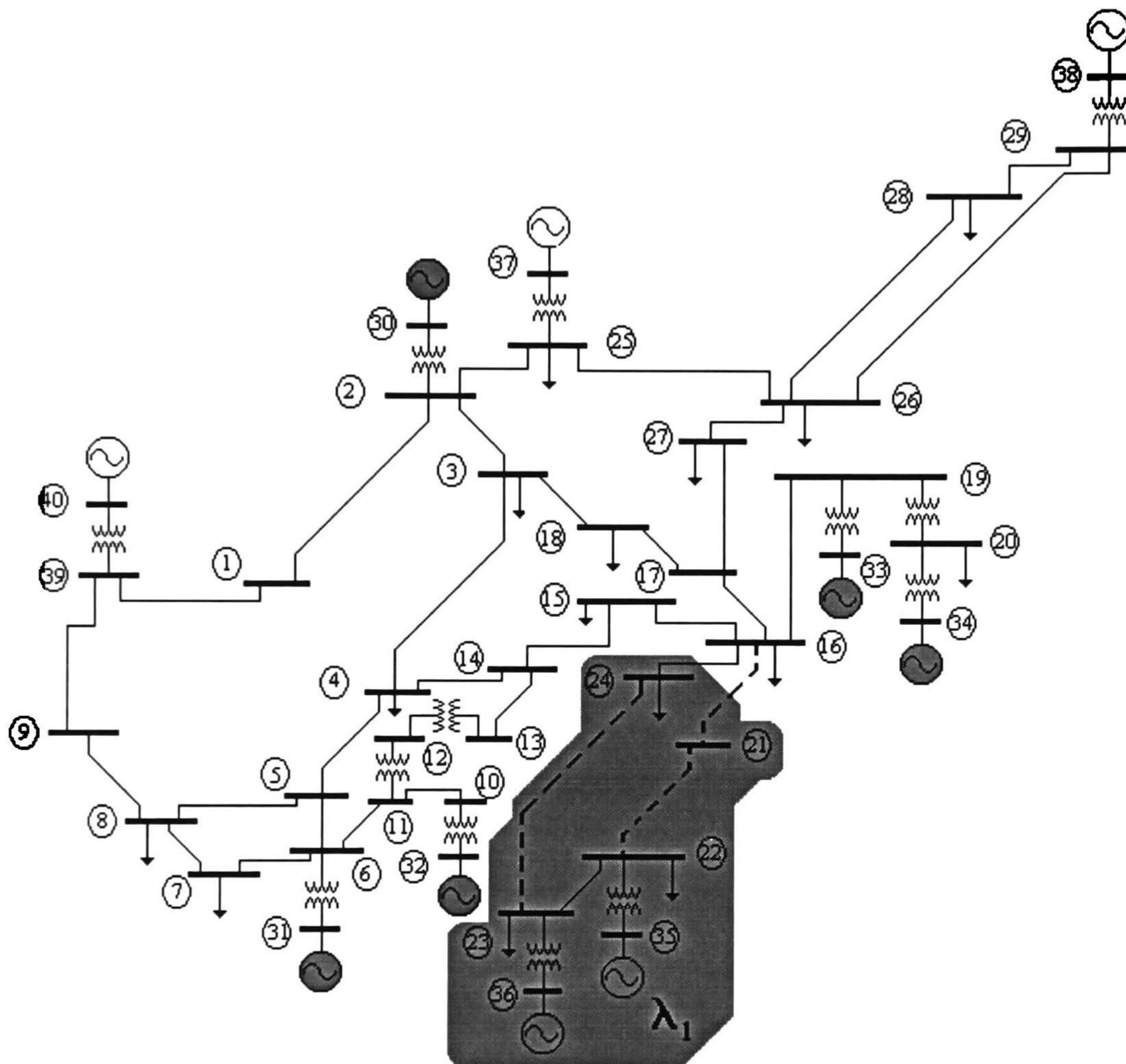
Línea	del nodo	Al nodo	$FP_{rama}$
1	21	22	1.0000
2	23	24	0.3989
3	16	21	0.1619
4	16	19	0.0369
5	15	16	0.0228
6	16	17	0.0131
7	14	15	0.0095
8	19	20	0.0024
9	1	39	0.0020
10	1	2	0.0015
11	26	29	0.0014
12	4	5	0.0014

El análisis de la Tabla 5.15 muestra que existen pocas líneas participando, coincidiendo como se puede observar en una zona bien definida.

**Tabla 5.16**  
**Factores de participación de generador**  
**para el Modo 1 del CCO**

Nodo	$FP_G$
33	1.0000
32	0.4826
31	0.3512
34	0.2359
30	0.2389
37	0.1424
38	0.1246
40	0.0017
35	
36	

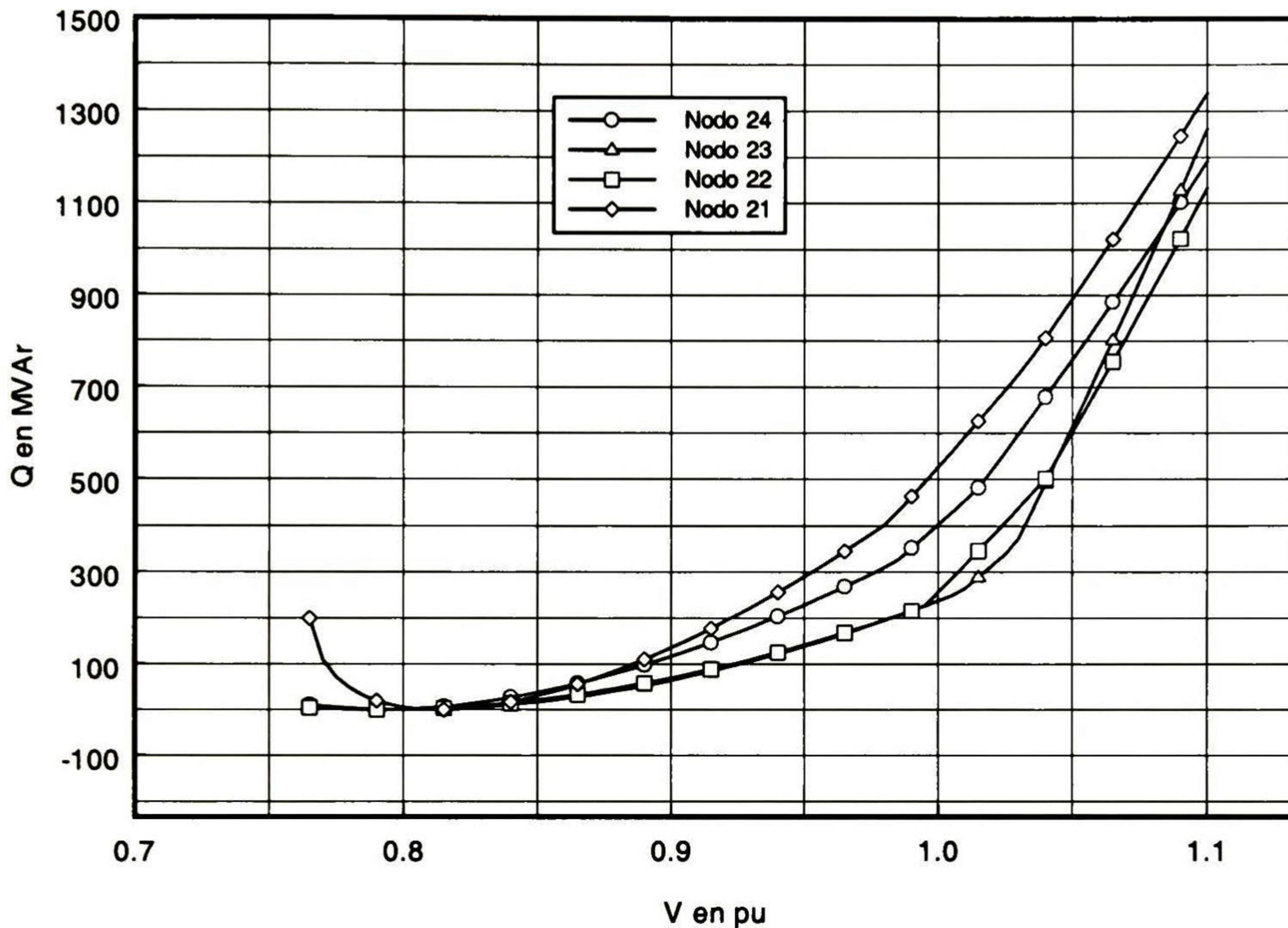
De la Tabla 5.16 se observa que ahora los generadores mas involucrados son: 33, 32 y 31, esto debido a que los generadores de los nodos 35 y 36 tocaron límites de potencia reactiva convirtiéndose en nodos PQ. La localización física de las participaciones para el modo 1 se muestra en forma más clara en la Figura 5.6.



**Figura 5.6.- Localización de participaciones del modo 1 para el CCO**

Se puede observar que las líneas mas involucradas inciden directamente en la zona afectada; los generadores con mayor participación son ahora el 33 y el 32 los cuales se encuentran cercanos al área afectada.

Con el objeto de verificar estas conclusiones se calcularon las curvas  $V-Q$  para todos los nodos del sistema utilizando las mismas condiciones de operación consideradas para el análisis modal. Las curvas  $V-Q$  de los nodos con menor margen de potencia reactiva se muestran en la Figura 5.7.

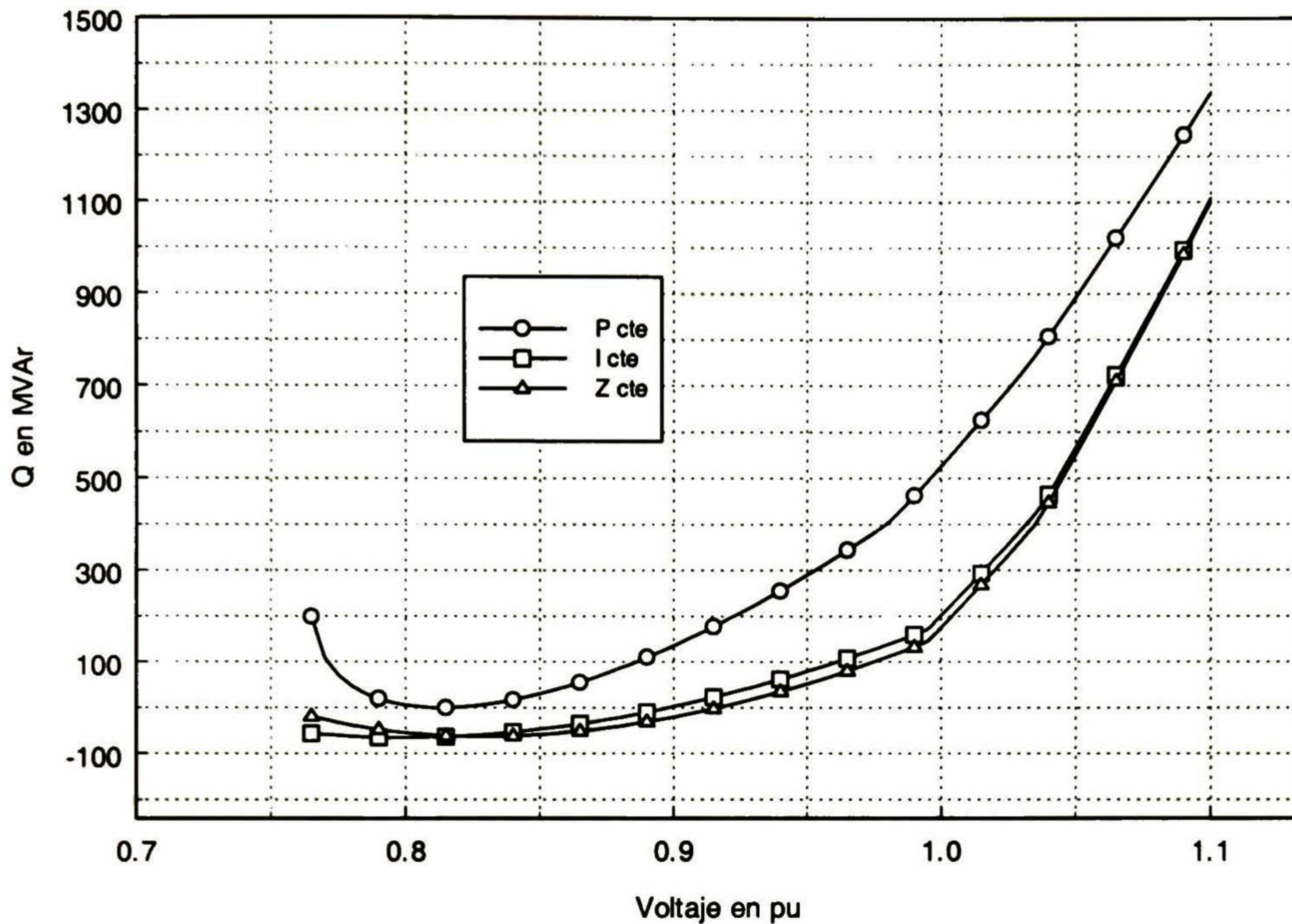


**Figura 5.7.- Curvas  $V-Q$  correspondientes a los nodos con menor margen de estabilidad para el CCO**

Como puede observarse en la Figura 5.7, los nodos débiles coinciden con los identificados por el análisis modal

#### 5.4.2.1 Efecto de las características de la carga

En esta sección se presenta un análisis del efecto de las características de la carga en el problema de inestabilidad de voltaje. El análisis de los valores propios en la Tabla 5.13 confirma que el modelo de la carga como potencia constante constituye el caso más crítico de los tres modelos analizados. El análisis de las curvas  $V-Q$  para el nodo 24 (ver figura 5.8) confirma los resultados obtenidos.



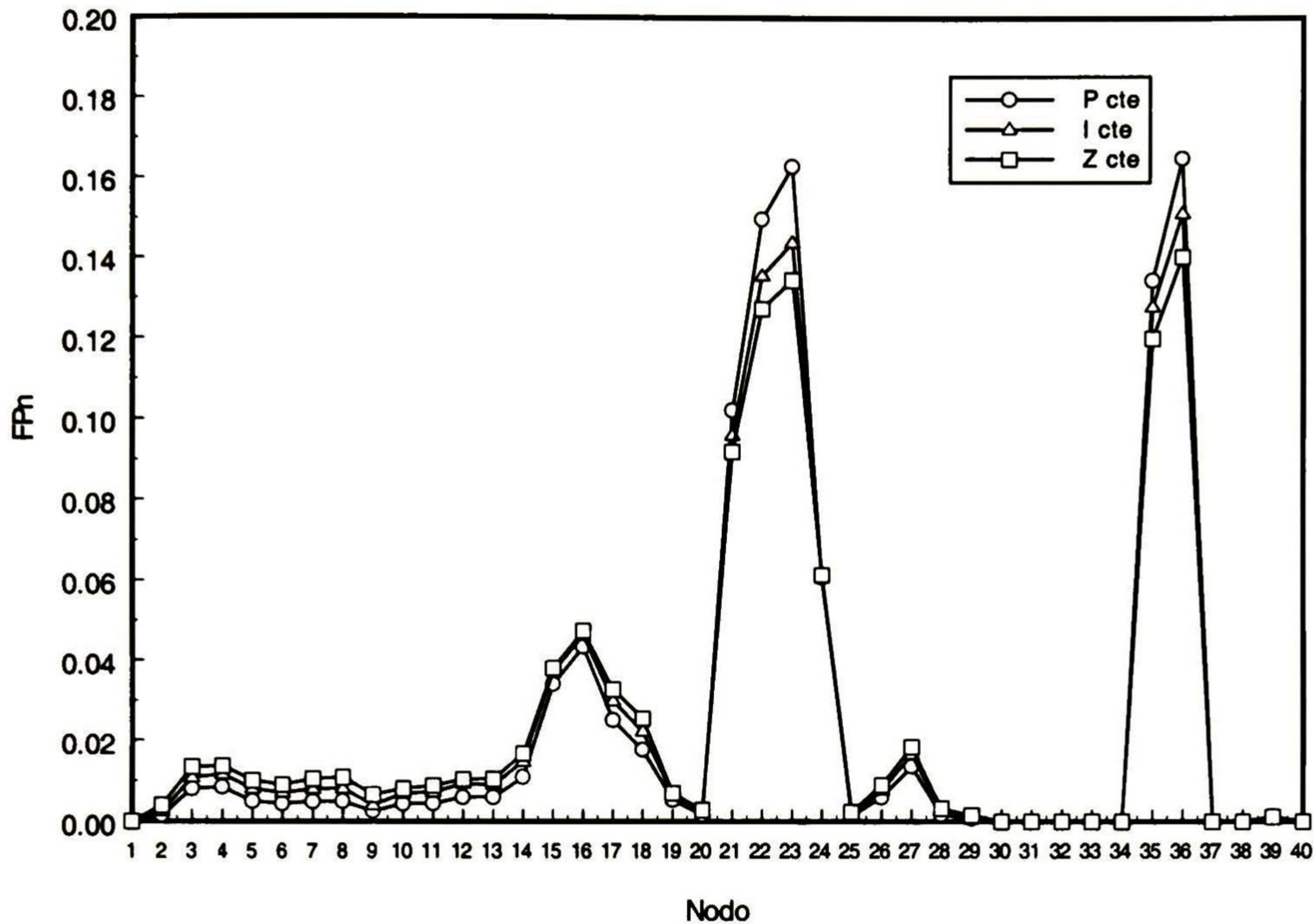
**Figura 5.8.- Curvas V-Q para el nodo 24 correspondiente al CCO y distintos modelos de carga**

Estos resultados sugieren que el efecto del modelado de la carga es fundamental, particularmente en la vecindad de la condición crítica de operación. Esto se traduce en un aumento en la distancia en MVAR al punto de colapso; para este caso puede verse que existe un margen de 50 MVAR entre el modelo de potencia constante y corriente constante, mientras que los modelos de impedancia y corriente constante producen márgenes muy similares.

En la Figura 5.9 se muestra el efecto del modelo de la carga sobre la magnitud de los factores de participación.

Como se puede observar de la Figura 5.9, el efecto de la carga se traduce en un decremento en la magnitud de los factores de participación, en tanto que la ubicación de las zonas afectadas permanece sin cambio. Este fenómeno ha sido observado en otros trabajos de investigación [16].

Físicamente menores magnitudes para las participaciones nodales implican que el área de interés sea menos vulnerable a la inestabilidad. Esto se traduce, a su vez, en mayores márgenes de estabilidad para los nodos de interés.



**Figura 5.9.- Factores de participación nodal para el CBO y distintos modelos de carga**

## 5.5 DESARROLLO DE MEDIDAS CORRECTIVAS

Con base al análisis modal se investigó la aplicación de Compensadores Estáticos de VARs (CEVs) para mejorar la estabilidad de los modos críticos de voltaje. El criterio adoptado para la ubicación de CEVs se basa principalmente en la magnitud de las participaciones nodales para los modos de interés. Esto es, una vez determinados los modos críticos, el análisis de las participaciones nodales asociadas a estos modos permite identificar los nodos más deseables para ubicar el elemento compensador. No se realizaron estudios para determinar el dimensionamiento óptimo de estos dispositivos.

En este trabajo se consideró un CEV con las siguientes características:

- $V_{ref}$  1.05 pu
- $M = 3 \%$
- $Q_{max}$  150 MVar
- $Q_{min}$  -150 MVar
- $B_C$  1.5 pu a 1 pu de voltaje
- $B_L$  -1.5 pu a 1 pu de voltaje

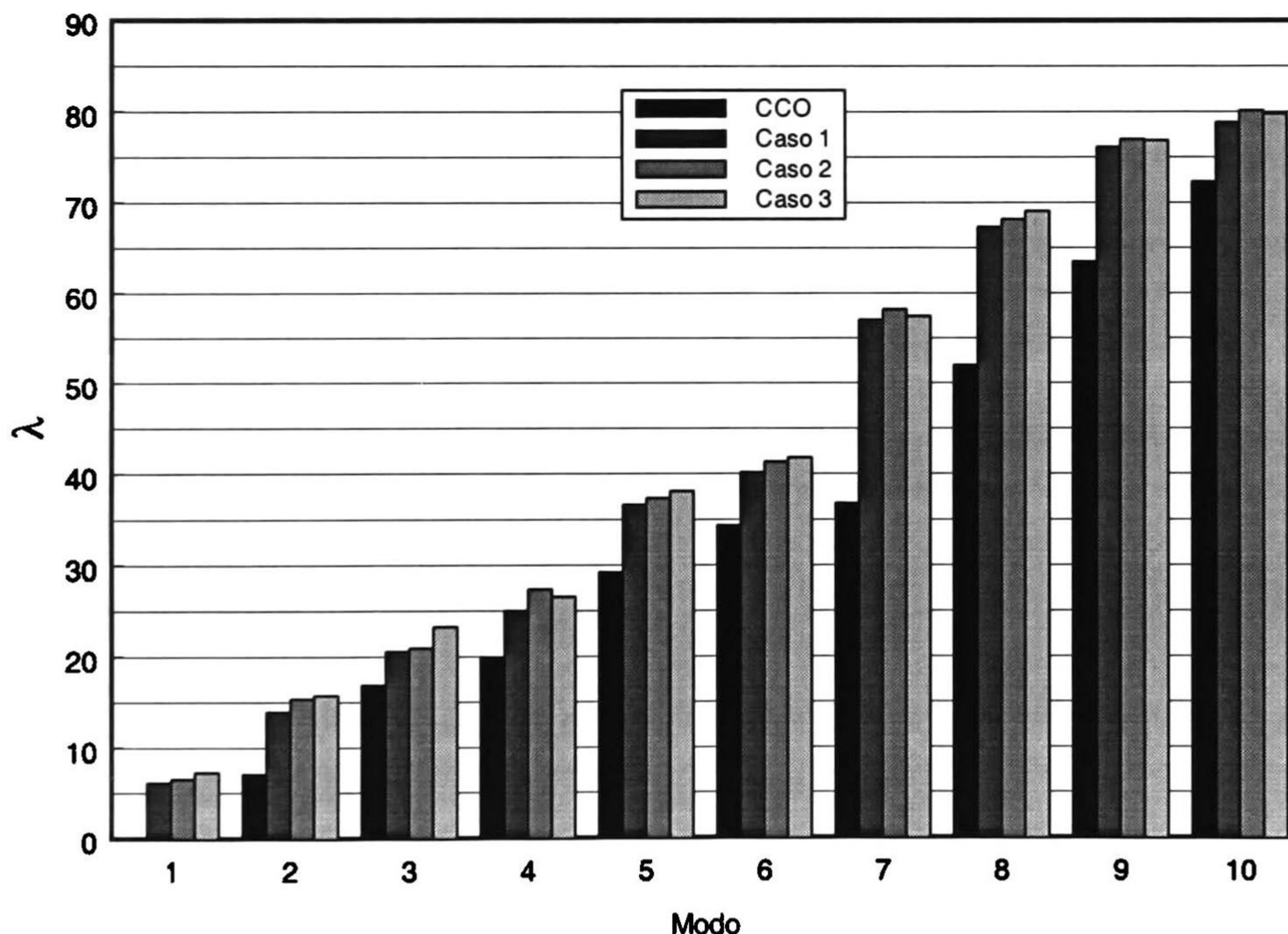
Los casos considerados de interés se basaron en el análisis de factores de participación nodal e incluyen:

*Caso 1.-* La aplicación de un CEV en cada uno de los 2 nodos de mayor participación nodal para el modo 1 de estabilidad de voltaje

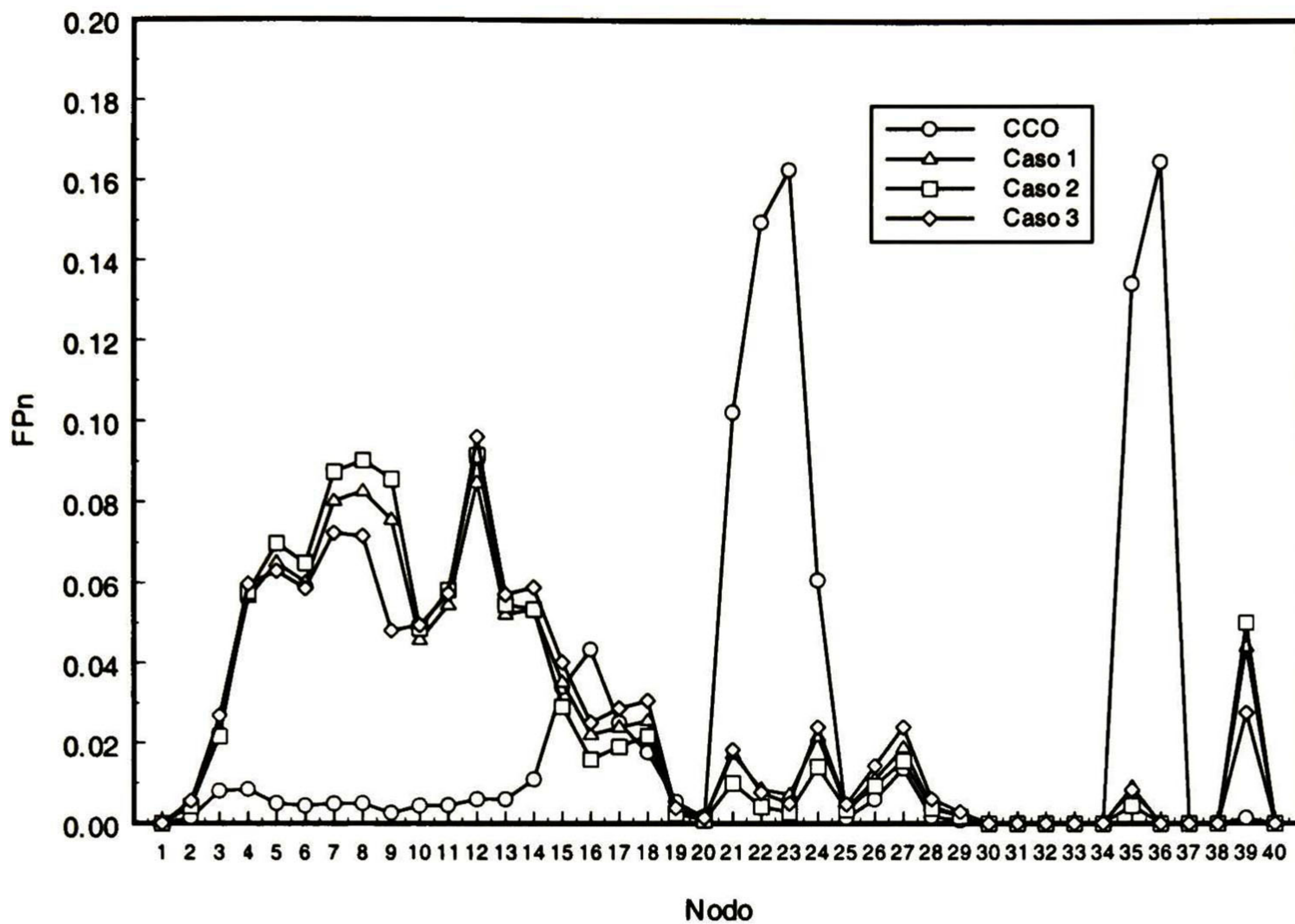
*Caso 2.-* La aplicación de un CEV en cada uno de los 4 nodos con mayor participación nodal para el modo 1 de estabilidad de voltaje

*Caso 3.-* La aplicación de un CEV en cada uno de los 2 nodos con mayor participación nodal del modo 1 y de igual forma para los dos nodos del modo 2.

En la Figura 5.10 se presentan los resultados obtenidos para los diferentes casos en estudio. El análisis de esta figura muestra efectos favorables sobre todos los modos críticos para los distintos casos de compensación; no obstante el caso 3 muestra un comportamiento más favorable que el caso 1 y el caso 2. La Figura 5.11 muestra los factores de participación nodal para los distintos casos de compensación.



**Figura 5.10.- Comparación de los 3 Casos de Compensación sobre los modos críticos**



**Figura 5.11.- Factores de Participación Nodal del modo 1 para los 3 casos de Compensación**

El análisis de la Figura 5.10 y la Figura 5.11 muestra que en todos los casos de compensación la zona problemática se mueve a la zona del CBO. Sin embargo, el caso 3 que incorpora la compensación de los dos modos más críticos muestra efectos más favorables que los casos que consideran únicamente la compensación del modo 1, esto se deduce de las magnitudes de los factores de participación nodal, esto es, el caso 3 disminuye aun más la magnitud que los casos 1 y 2, teniendo el caso 3 por tanto mayores márgenes de potencia reactiva. Esto indica la necesidad de compensar no solamente el modo más crítico, sino también, al menos un modo adicional.

## 5.6 DISCUSION DE RESULTADOS

El enfoque de análisis modal presenta características útiles para el estudio de la estabilidad de voltaje en sistemas de potencia. La aplicación eficiente de este método al estudio de la estabilidad de voltaje de un sistema de potencia con características reales presenta, sin embargo, dificultades específicas entre las que cabe destacar las siguientes:

1. La determinación del caso crítico de operación es uno de los aspectos más importantes y complejos de la técnica de análisis modal. En condiciones cercanas al punto de colapso, el modelo del sistema presenta un débil condicionamiento numérico que puede causar la falla en convergencia del estudio de flujos de potencia. En los casos estudiados, la utilización de un modelo de potencia constante para la carga y la



presencia de una contingencia sencilla de línea o generador condujo con frecuencia a este problema. Con frecuencia esto requiere modificar el modelo de la carga para obtener una solución factible. Si bien numéricamente esto puede resolver el problema, en la realidad la carga exhibe un comportamiento transitorio que debe ser simulado en forma adecuada con base a un conocimiento de estas características.

2. Los resultados obtenidos muestran que las características de la carga tienen un efecto importante en la estabilidad del sistema. En algunos casos estudiados, el cambio en las características de la carga condujo a resultados demasiado optimistas.
3. El sistema de Nueva Inglaterra exhibe un número pequeño de modos de voltaje, lo cual permite su análisis detallado. En el análisis de sistemas reales, sin embargo, el análisis modal demanda de la utilización de técnicas computacionales avanzadas. En la actualidad existen diversas herramientas computacionales que permiten lograr esto.
4. En el sistema de Nueva Inglaterra los modos de estabilidad de voltaje involucran en general, zonas geográficas extensas bien localizadas. Es probable que en sistemas longitudinales se presenten con otro patrón de comportamiento en el que el modo crítico involucre unos pocos nodos. Este aspecto requiere de mayor investigación.
5. La aplicación de compensación controlable de potencia reactiva demostró ser una buena opción para mejorar la estabilidad de los modos críticos del sistema. En este análisis, sin embargo, se consideraron modelos simples, generalizados de CEVs los cuales no toman en cuenta la rapidez de respuesta de los dispositivos. Este aspecto requiere de mayor atención, particularmente cuando el fenómeno de estabilidad de voltaje se presenta de manera más rápida.

# CAPÍTULO 6

## CONCLUSIONES, APORTACIONES Y RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

### 6.1 CONCLUSIONES GENERALES

En este trabajo se presenta el desarrollo de una metodología sistemática, basada en la utilización de técnicas de análisis modal, para el análisis de la estabilidad de voltaje en estado estable. La metodología propuesta tiene su principal aplicación cuando el fenómeno en estudio es de naturaleza lenta y los parámetros del sistema cambian en forma continua. Esto permite la utilización de técnicas de análisis en estado estable.

La técnica de análisis lineal presenta características deseables para el estudio de la estabilidad de voltaje. Las principales ventajas obtenidas del análisis de los resultados obtenidos en esta tesis, son la capacidad de permitir una mejor interpretación física del fenómeno, la identificación de los elementos que tienen un mayor efecto sobre la estabilidad y el desarrollo de medidas correctivas.

La aplicación de esta técnica al estudio de la estabilidad de voltaje en un sistema con características reales permitió, por otra parte, identificar los siguientes problemas:

- Un modelado no adecuado de la carga así como la presencia de elementos no lineales puede conducir a resultados falsos, particularmente en la vecindad del punto crítico de operación. Algunos resultados obtenidos sugieren que la determinación incorrecta del caso crítico de operación puede ocultar los modos críticos de voltajes, desplazar la identificación de las zonas cercanas a la inestabilidad así como conducir a una identificación incorrecta de los elementos con mayor impacto en el sistema. En este sentido, la presencia de límites asociados a esquemas de control en la vecindad del punto crítico puede también conducir a una evaluación incorrecta de las sensibilidades, y con ellos, los modos críticos de voltaje

La aplicación de la técnica de análisis modal al estudio de la estabilidad de voltajes en redes de gran dimensión es un problema computacionalmente complejo. A diferencia de otras áreas de estudio, no existen criterios para determinar equivalentes del sistema, en el sentido de voltaje, que permitan reducir el esfuerzo computacional así como la cantidad de información que proporciona información útil.

- La determinación del punto crítico de operación requiere de estudios secuenciales de flujos de potencia para un aumento incremental de la carga. En la vecindad del punto crítico puede ser necesario disminuir con base en algún criterio empírico el cambio incremental en la carga para permitir convergencia en el estudio de flujos de potencia

- La estabilidad de voltaje está determinada generalmente por unos pocos modos críticos de voltaje. Esto requiere de la utilización de técnicas avanzadas de cálculo de valores propios, por ejemplo, en un rango específico de magnitudes.
- El análisis modal no proporciona información confiable sobre el margen de estabilidad del sistema. Debido a la no linealidad del modelo del sistema, los valores propios solo proporcionan una información relativa del margen de estabilidad

En el análisis de estabilidad de voltaje de sistemas complejos, la técnica de análisis modal puede utilizarse en forma conjunta con el análisis en el dominio del tiempo. En este contexto, la técnica de análisis modal se utiliza, en la actualidad, en forma heurística al aproximar el comportamiento dinámico de los elementos del sistema a lo largo de la trayectoria de operación del sistema en el período de tiempo de interés. El procedimiento es complejo y requiere de un conocimiento detallado de las características de operación del sistema así como la respuesta de los diferentes dispositivos en el dominio del tiempo. Aunado a ello, la aplicación exitosa de esta técnica requiere de la intervención manual del analista para emular el comportamiento de los distintos dispositivos y simular condiciones específicas de operación tales como no linealidades.

Finalmente, el análisis modal conduce, generalmente, a resultados optimistas, respecto a otras técnicas de análisis como el estudio en el dominio del tiempo [38]. Estos resultados son inherentes a la aplicación de técnicas de análisis lineal por lo que los resultados obtenidos deben verificarse mediante estudios detallados de la respuesta del sistema.

## **6.2 APORTACIONES**

Se considera que las principales aportaciones de este trabajo son:

1. El análisis de las características fundamentales de la estabilidad de voltaje con base en el análisis de sistemas simplificados.
2. El desarrollo de un modelo generalizado del sistema de potencia con características deseables para el estudio de la estabilidad de voltaje en estado estable, considerando la representación de la carga, la acción de limitadores de operación en generadores y elementos de control en la red.
3. El desarrollo de una metodología sistemática, basada en la aplicación de técnicas de análisis lineal para el estudio de la estabilidad de voltaje en estado estable.
4. El desarrollo de un simulador en computadora digital para el estudio de la estabilidad de voltaje, basado en la metodología de análisis propuesta.
5. La aplicación de la metodología de estudio propuesta al estudio de la estabilidad de voltaje en un sistema de potencia con características reales así como al desarrollo de medidas correctivas.
6. La comparación de los resultados de análisis modal con otras técnicas de estudio.

### **6.3 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS**

En la opinión del autor, los siguientes aspectos requieren investigación adicional:

1. La aplicación de técnicas avanzadas de análisis de flujos de potencia para la determinación del punto exacto de colapso de voltaje. Esto pudiera hacerse, utilizando en forma combinada métodos de continuación y análisis modal
2. El desarrollo de modelos más realistas del sistema para su uso en la vecindad del punto crítico de operación, específicamente la representación de límites de operación, las características de la carga y otros efectos no lineales.
3. La evaluación del impacto de otros dispositivos de control en el fenómeno de inestabilidad de voltaje, específicamente dispositivos de FACTS y enlaces de corriente directa.
4. El desarrollo de metodologías avanzadas que permitan analizar el impacto de la carga en la estabilidad del sistema, considerando cambios a nivel nodo, área ó a nivel global. En este sentido se requiere determinar criterios para el aumento de la potencia real y reactiva de la carga que tenga el mayor impacto sobre la estabilidad de voltaje así como su incorporación en programas de flujos de potencia existentes
5. El desarrollo de metodologías para la estimación de seguridad dinámica de voltaje para estudio en línea.
6. La extensión de los algoritmos utilizados para incluir efectos de segundo orden
7. La utilización de la técnica de análisis modal para determinar acciones correctivas tales como el corte de carga para estabilizar al sistema

## REFERENCIAS

- [1] C. W. Taylor, *Power System Voltage Stability*, (Libro) ,McGraw-Hill, New York,1993.
- [2] B. M. Weedy and B. J. Cory, *Electric Power Systems*, (Libro), John Wiley & Sons, New York, 1998.
- [3] “Dynamic Versus Static VAR Sources”, Final Report Prepared by: Reactive Power Reserve Work Group Technical Studies Subcommittee WSCC, November 1997.
- [4] V. A. Venikov and M. N. Rozonov, “The Stability of a Load”, *Izd. Akad. Nauk SSSR (Energetica i Artomatica)*, No. 3, 1961, pp. 121-125.
- [5] V. A. Venikov, V.A. Stroeve, V. I. Idelchick, V. I. Tarasov, “Estimation of Electrical Power System Steady State Stability in Load Flow Calculations”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-94, No. 3, May/June 1975, pp. 1034-1041.
- [6] S. Abe, J. Makino, A. Isuno, U. Moroe, O. Nagasaki, “Criteria for Power System Voltage Stability by Steady State Analysis”, Paper Presented at the IEEE PES Summer Meeting, San Francisco, California, July 20-25, 1975.
- [7] S. Abe and E. Isono, “Determination of Power System Voltage Stability”, *Electrical Engineering in Japan* , Vol. 96, No. 2, April 1976, pp. 70-86.
- [8] S. Iwamoto, Y. Tamura, “A Fast Load Flow Method Retaining Nonlinearity”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Sept/Oct 1978, pp. 1586-1599.
- [9] Y. Tamura, S. Iwamoto, “ A method for Finding Multiple Load Flow Solutions for General Power Systems”, paper presented at the IEEE PES Winter Meeting, New York, NY, February 3-8, 1980.
- [10] F. D. Galiana, “Load Flow Feasibility and the Voltage Collapse Problem”, *Proceedings of 23<sup>rd</sup> Conference on Decision and Control*, Las Vegas, NV, December 1984.
- [11] P. Borremans, A. Calvaer, J. P. De Reuck, J. Gooserens, E. Van Geert, J. Van Hecke, and A. Van Ranst, “Voltage Stability: Fundamental Concepts and Comparison of Practical Criteria”, *International Conference on Large High Voltage Electric Systems, CIGRE 38-11*, August 1984.
- [12] J. Carpentier, R. Girard, E. Scanc, “Voltage Collapse Proximity Indicators Computed From an Optimal Power Flow”, *Proceedings of 8<sup>th</sup> PSCC*, Helsinki, 1984.

- [13] P. Kessel and H. Glavitch, "Estimating the Voltage Stability of a Power System", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. PWRD-1, No. 3, July 1986, pp. 346-354.
- [14] N. Flatabo, R. Ognedal, T. Carlsen, "Voltage Stability Condition in a Power Transmission System Calculated by Sensitivity Methods", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 4, November 1990, 1286-1293.
- [15] R. A. Schlueter, I. Hu, M. W. Chang, J. C. Lo, A. Costi, "Methods for Determining Proximity to Voltage Collapse", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. 1, February 1991, pp. 285-292.
- [16] IEEE Special Publication 93TH0620-5PWR, "Suggested Techniques For Voltage Stability Analysis", IEEE Power Engineering Society, 1993.
- [17] I. Dobson, "Observations on the Geometry of Saddle Node Bifurcation and Voltage Collapse in Electric Power Systems", IEEE Transactions on Circuits and Systems, Part 1, 39(3):240-243, March 1992.
- [18] C. A. Cañizares, F. L. Alvarado, C. L. Demarco, I. Dobson, and W. F. Long, "Point of Collapse Methods Applied to AC/DC Power Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 2, May 1992, pp. 673-683.
- [19] Voltage Stability, Security Assessment and On-Line Control, EPRI Final Report for Project RP3040-1, Ontario Hydro (1992).
- [20] P. A. Löf, T. Smed, G. Andersson, D. J. Hill, "Fast Calculation of a Voltage Stability Index", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. T-PS 7, no. 1, February 1992, pp. 54-64.
- [21] P. Kundur and G. K. Morison, "A Review Definitions and Classification of Stability Problems in Today's Power Systems", paper presented at the Panel Session on Stability Terms and Definitions, IEEE PES Meeting, February 2-6, 1997, New York, NY.
- [22] Proceedings: Bulk Power System Voltage Phenomena – Voltage Stability and Security, EPRI Report EL-6183, January, 1989.
- [23] B. K. Jhonson, "Extraneous and False Load Flow Solutions", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-96, No. 2, March/April 1977, pp. 524-534.
- [24] A. Chakrabarti and Mukhopadhyay, "Voltage Stability of Longitudinal Systems", paper presented and discussed at the Annual Paper Meeting held at Bhopal on January 16, 1990.
- [25] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, "Load Representation for Dynamic Performance Analysis", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 2, May 1993, pp. 472-482.

- [26] B. Gao, G. K. Morison, P. Kundur, "Towards the Development of a Systematic Approach for Voltage Stability Assessment of Large-Scale Power Systems", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 11, No.3, August 1996, pp. 1314-1324.
- [27] W. F. Tinney, C. E. Hart, "Power Flow by Newton's Method", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-86, No. 11, November 1967, pp 1449-1456.
- [28] P. A. Löf, G. Andersson, D. J. Hill, "Voltage Dependent Reactive Power Limits For Voltage Stability Studies", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, No. 1, February 1995, pp. 483-494.
- [29] C. A. Cañizares, "Conditions for Saddle Node Bifurcations in ac/dc Power Systems", *Electric Power & energy systems*, vol. 7, no. 1, 1995, pp. 61-68.
- [30] T. J. Miller, *Reactive Power Control in Electric Systems*, (Libro), John Wiley & Sons, New York, 1982.
- [31] C. A. Cañizares, Z. T. Faur, "Analysis of SVC and TCSC Controllers in Voltage Collapse", Paper Accepted for Publication In *IEEE Transactions on Power Systems*, March 1998, Paper PE-200-PWRS-0-2-1998.
- [32] F. R. Grantmacher, *The Theory of Matrices*, Vol 1(2), Chelsea Publishing Company, New York, 1977.
- [33] D. J. Hill, P. A. Löf, and G. Andersson, "Analysis of Long Term Voltage Stability", *Proceedings of the Tenth Power Systems Computation Conference*, Graz, Austria, August 1990, pp. 1252-1259.
- [34] G. H. Golub and C. F. Van Loan, *Matrix Computations*, (Libro), North Oxford Academic, Oxford, 1983.
- [35] P. Kundur, *Power System Control and Stability*, (Libro), The EPRI Power System Engineering Series, McGraw Hill, 1994.
- [36] "A Study of Static Reactive Power Compensators For High Voltage Power Systems", Final Report prepared by: Advanced Systems Technology Division and Distribution Systems Engineering Department, Westinghouse Electric Corporation, May 12, 1981.
- [37] Y. Mansour, P. Kundur, "Voltage Collapse: Industry Practices", in *Control and Dynamic Systems*, Vol. 42, Academic Press, Inc. , 1991, pp. 111-161.
- [38] G. K. Morison, B. Gao, and P. Kundur, "Voltage Stability Analysis Using Static and Dynamic Approaches", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. PWRS-8, No. 3, August 1993, pp. 1159-1171.

- [39] G. W. Stagg and A. H. El-Abiad, *Computer Methods in Power Systems Analysis*, (Libro), McGraw-Hill, New York, NY, 1968.
- [40] Charles H. Gross, *Power System Analysis*, (Libro), John Wiley & Sons, New York, NY, 1979.
- [41] E. Vaahedi, M. A. El-Kady, J. A. Libaque-Esaine, V. F. Carvalho, "Loads Models for Large-Scale Stability Studies from End-User Consumption", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. PWRS-2, No. 4, November 1987, pp. 864-872.
- [42] A. R. Messina, "Aplicación de Compensadores Estáticos de VARs para Mejorar el Comportamiento Dinámico de los Sistemas de Potencia", curso impartido en el Instituto Tecnológico de Morelia del 21 al 25 de Junio de 1983.
- [43] Han Z. X., "Phase Shifter and Power Flow Control", *IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems*, Vol. PAS-101, No. 9, October 1982, pp. 3790-3795.
- [44] IEEE Special Publication, 90TH0358-2-PWR, Voltage Stability of Power Systems: Concepts, Analytical Tools, and Industry Experience, 1990.
- [45] B. Gao, G. K. Morison and P. Kundur, "Voltage Stability Evaluation Using Modal Analysis", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 7, No. 4, November 1992, pp. 1529-1542.
- [46] A. Berizzi, A. Bignotti, P. Finazzi, D. Dosi, P. Marannino, "An Automatic Procedure for Evaluating and Improving Operating Margins Against Voltage Collapse", 12<sup>th</sup> Power System Computation Conference, pp. 644-650.
- [47] *Power System Toolbox, Version 2.0 Load Flow Tutorial and Functions for use with Matlab*, Cherry Tree Scientific Software.
- [48] The Math Works Inc., Natick, Massachusetts, *MATLAB*, 1998.



# APENDICE A

## DATOS DEL SISTEMA DE 40 NODOS DEL SISTEMA DE NUEVA INGLATERRA

### A.1 Caso base de operación

En la Tabla A.1 se presentan los datos del sistema de prueba de 40 nodos

**Tabla A.1**  
**Datos de Nodos**

<b>Nodo</b>	<b>V</b>	<b><math>\theta</math></b>	<b><math>P_g</math></b>	<b><math>Q_g</math></b>	<b><math>P_L</math></b>	<b><math>Q_L</math></b>	<b>Tipo de Nodo</b>
1	1.0297	-11.0548	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3
2	1.0412	-11.8901	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3
3	1.0168	-15.8016	0.0000	0.0000	322.00	2.4000	3
4	0.9873	-17.9003	0.0000	0.0000	500.00	184.00	3
5	0.9865	-17.4350	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3
6	0.9898	-16.7366	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3
7	0.9745	-19.3778	0.0000	0.0000	233.80	84.000	3
8	0.9714	-20.0829	0.0000	0.0000	522.00	176.00	3
9	0.9744	-23.1077	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3
10	1.0040	-13.9458	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3
11	0.9979	-14.8876	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3
12	0.9854	-14.7915	0.0000	0.0000	8.5000	88.000	3
13	1.0004	-14.5617	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3
14	0.9961	-15.9771	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3
15	0.9975	-15.8063	0.0000	0.0000	320.00	153.00	3
16	1.0133	-14.0929	0.0000	0.0000	329.40	32.300	3
17	1.0178	-14.8994	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3
18	1.0161	-15.6847	0.0000	0.0000	158.00	30.000	3
19	1.0430	-9.4070	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3
20	0.9870	-10.8420	0.0000	0.0000	680.00	103.00	3
21	1.0181	-11.6158	0.0000	0.0000	274.00	115.00	3
22	1.0416	-7.0778	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3
23	1.0353	-7.2680	0.0000	0.0000	247.50	84.600	3
24	1.0110	-13.9501	0.0000	0.0000	308.60	92.200	3
25	1.0502	-10.7432	0.0000	0.0000	224.00	47.200	3
26	1.0428	-12.5121	0.0000	0.0000	139.00	17.000	3
27	1.0252	-14.7823	0.0000	0.0000	281.00	75.500	3
28	1.0456	-8.9747	0.0000	0.0000	206.00	27.600	3
29	1.0470	-6.2029	0.0000	0.0000	283.50	26.900	3
30	1.0480	-9.4539	250.00	191.88	0.0000	0.0000	2
31	0.9820	-7.8072	573.22	272.18	9.2000	4.6000	2
32	0.9831	-5.8444	650.00	266.12	0.0000	0.0000	2
33	0.9972	-4.1737	632.00	155.07	0.0000	0.0000	2

34	1.0120	-5.6400	508.00	187.38	0.0000	0.0000	2
35	1.0490	-2.0753	650.00	269.34	0.0000	0.0000	2
36	1.0640	0.6433	560.00	140.57	0.0000	0.0000	2
37	1.0280	-3.9229	540.00	33.370	0.0000	0.0000	2
38	1.0270	0.8672	830.00	45.030	0.0000	0.0000	2
39	0.9596	-25.1628	0.0000	0.0000	1104.0	250.00	3
40	1.0300	-11.000	1013.58	261.79	0.0000	0.0000	1

### Tipos de nodos

- 1 Nodo de referencia
- 2 Nodo PV
- 3 Nodo PQ

Donde

- $V$  Magnitud del voltaje nodal en pu
- $\theta$  Angulo de fase del voltaje nodal en grados
- $P_G$  Potencia activa generada en MW
- $Q_G$  Potencia reactiva generada en MVAR
- $P_L$  Potencia activa de carga en MW
- $Q_L$  Potencia reactiva de carga en MVAR

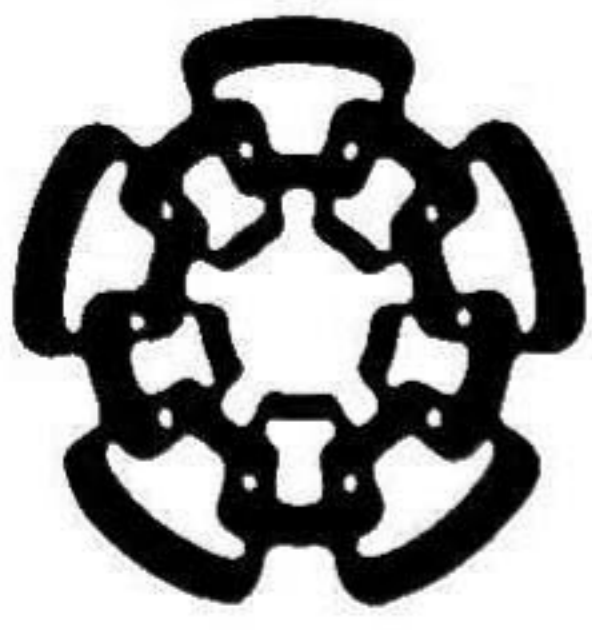
## A.2 Datos de Ramas

En la Tabla A.2 se muestran los datos de las ramas del sistema de prueba

**Tabla A3**  
**Datos de ramas del sistema de prueba en pu**

<i>Enlace</i>		<i>R</i>	<i>X</i>	<i>B<sub>total</sub></i>	<i>Tap</i>
<i>Nodo</i>	<i>Nodo</i>				
1	2	0.0035	0.0411	0.6987	1.0000
1	39	0.0010	0.0250	0.7500	1.0000
2	3	0.0013	0.0151	0.2572	1.0000
2	25	0.0070	0.0086	0.1460	1.0000
3	4	0.0013	0.0213	0.2214	1.0000
3	18	0.0011	0.0133	0.2138	1.0000
4	5	0.0008	0.0128	0.1342	1.0000
4	14	0.0008	0.0129	0.1382	1.0000
5	6	0.0002	0.0026	0.0434	1.0000
5	8	0.0008	0.0112	0.1476	1.0000
6	7	0.0006	0.0092	0.1130	1.0000
6	11	0.0007	0.0082	0.1389	1.0000
7	8	0.0004	0.0046	0.0780	1.0000
8	9	0.0023	0.0363	0.3804	1.0000
9	39	0.0010	0.0250	1.2000	1.0000
10	11	0.0004	0.0043	0.0729	1.0000

10	13	0.0004	0.0043	0.0729	1.0000
13	14	0.0009	0.0101	0.1723	1.0000
14	15	0.0018	0.0217	0.3660	1.0000
15	16	0.0009	0.0094	0.1710	1.0000
16	17	0.0007	0.0089	0.1342	1.0000
16	19	0.0016	0.0195	0.3040	1.0000
16	21	0.0008	0.0135	0.2548	1.0000
16	24	0.0003	0.0059	0.0680	1.0000
17	18	0.0007	0.0082	0.1319	1.0000
17	27	0.0013	0.0173	0.3216	1.0000
21	22	0.0008	0.0140	0.2565	1.0000
22	23	0.0006	0.0096	0.1846	1.0000
23	24	0.0022	0.0350	0.3610	1.0000
25	26	0.0032	0.0323	0.5130	1.0000
26	27	0.0014	0.0147	0.2396	1.0000
26	28	0.0043	0.0474	0.7802	1.0000
26	29	0.0057	0.0625	1.0290	1.0000
28	29	0.0014	0.0151	0.2490	1.0000
2	30	0.0000	0.0181	0.0000	1.0250
6	31	0.0000	0.0250	0.0000	1.0700
10	32	0.0000	0.0200	0.0000	1.0700
12	11	0.0016	0.0435	0.0000	1.0060
12	13	0.0016	0.0435	0.0000	1.0060
19	33	0.0007	0.0142	0.0000	1.0700
19	20	0.0007	0.0138	0.0000	1.0600
20	34	0.0009	0.0180	0.0000	1.0090
22	25	0.0000	0.0143	0.0000	1.0250
23	36	0.0005	0.0272	0.0000	1.0000
25	37	0.0006	0.0232	0.0000	1.0250
29	38	0.0008	0.0156	0.0000	1.0250
39	40	0.0000	0.0001	0.0000	1.0000



**CENTRO DE INVESTIGACION Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL IPN  
UNIDAD GUADALAJARA**

El Jurado designado por el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Ciencias de la Computación del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, aprobó la tesis: "Análisis de Estabilidad de Voltaje en Estado Estable Mediante Técnicas de Análisis Modal" el día 03 de Septiembre de 1999.

Dr. José Javier Ruiz León  
Investigador Cinvestav 2 A  
CINVESTAV DEL IPN  
Guadalajara

Dr. Juan Manuel Ramírez Arredondo  
Investigador Cinvestav 2 B  
CINVESTAV DEL IPN  
Guadalajara

Dra. Ofelia Begovich Mendoza  
Investigador Cinvestav 3 A  
CINVESTAV DEL IPN  
Guadalajara

Dr. Claudio Rubén Fuerte Esquivel  
Profesor Investigador  
Instituto Tecnológico de Morelia

Dr. Arturo Román Messina  
Investigador Cinvestav 3 A  
CINVESTAV DEL IPN  
Guadalajara.



CINEVESTAV  
BIBLIOTECA CENTRAL



SSIT000003842