

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN ESTADO ESTABLE
DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA BASADO EN EL
MÉTODO DE CONTINUACIÓN APLICADO A FLUJOS DE
POTENCIA**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
ELÉCTRICO EN LA ESPECIALIZACIÓN DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE
POTENCIA**

**FRANKLIN LENIN QUILUMBA GUDIÑO
quigufrale1184@yahoo.com**

**DIRECTOR: DR. JESÚS JÁTIVA IBARRA
jjativa@yahoo.com**

Quito, marzo 2008

DECLARACIÓN

Yo FRANKLIN LENIN QUILUMBA GUDIÑO declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Franklin Lenin Quilumba Gudiño

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por FRANKLIN LENIN QUILUMBA GUDIÑO, bajo mi supervisión.

Dr. Jesús Játiva Ibarra
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Quiero comenzar agradeciendo a mi director del proyecto, Dr. Jesús Játiva, por el apoyo brindado durante la ejecución del proyecto, por el continuo ánimo y entrega, y sobretodo por su amistad.

Un especial agradecimiento al Dr. Claudio Cañizares de la Universidad de Waterloo, Canadá, por la ayuda desinteresada y tomarse su tiempo en responder mis inquietudes.

Gracias a mis profesores, por la enseñanza impartida en la aulas de la Politécnica.

Gracias a los miembros del PSAT Forum, por la ayuda brindada en conseguir algunos papers.

Al último pero los más importantes, quiero agradecer a mis padres, por su amor y comprensión, por enseñarme a superarme cada día más, como hijo, como amigo, como persona, como estudiante; a mi ñaña, mi amiga de duras batallas que hemos sabido sobrellevar con coraje. Porque juntos somos más.

A Risty, Luigi y Sany

CONTENIDO

Carátula	i
Declaración	ii
Certificación	iii
Agradecimiento	iv
Dedicatoria	v
Contenido	vi
Lista de tablas	ix
Resumen	xii
Presentación	xiii
Capítulo 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Justificación del proyecto	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.2.1 Objetivo General	2
1.2.2 Objetivos Específicos	2
Capítulo 2	4
CONCEPTOS TEÓRICOS BÁSICOS	4
2.1.1 MODELACIÓN	4
2.1.1.1 Generadores	5
2.1.1.2 Líneas de Transmisión	5
2.1.1.3 Transformadores	6
2.1.1.4 Cargas	7
2.1.2 Ecuaciones de red	8
2.1.3 No linealidad de las ecuaciones de flujos de potencia	9
2.2 MÉTODO NEWTON – RAPHSON (N – R)	10
2.2.1 Aplicación del método N-R en la solución de flujos de potencia	11

2.3	OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DEL JACOBIANO Y ECUACIONES DE ERRORES DE POTENCIA	14
2.3.1	Elementos Fuera de la Diagonal	15
2.3.2	Elementos de las Diagonales	15
2.4	ANÁLISIS DE FLUJOS DE POTENCIA POR EL MÉTODO DE CONTINUACIÓN	16
2.4.1	Introducción	16
2.4.2	MÉTODO DE CONTINUACIÓN (PERFIL DE VOLTAJES)	17
	<i>A. Predicción y Parametrización</i>	19
	<i>B. Corrección</i>	23
	Capítulo 3	26
	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE	26
3.1	INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA DE ESTABILIDAD DE SISTEMAS DE POTENCIA	26
3.2	DEFINICIÓN DE ESTABILIDAD DE SISTEMAS DE POTENCIA	26
3.3	CLASIFICACIÓN DE ESTABILIDAD DE SISTEMAS DE POTENCIA	27
3.4	ESTABILIDAD DE VOLTAJE	28
3.5	COLAPSO DE VOLTAJE	30
3.5.1	Caracterización General del Colapso de Voltaje	31
3.5.2	ESCALA DE TIEMPO	31
3.6	BREVES COMENTARIOS DE LA TEORÍA	33
3.6.1	Bifurcaciones	33
3.6.2	Análisis de grana perturbación y escala de tiempo rápido y lento	33
3.6.3	Modelación	33
3.6.4	Funciones de energía	34
3.6.5	Interacción de los cambiadores de tap, cargas y límites de generadores	34
3.6.6	Inestabilidad debida a los límites	35
3.6.7	Otros fenómenos no lineales	35
3.7	CASO DE ESTUDIO	36
3.7.1	Sistema radial simple	36

Capítulo 4	43
PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE POR EL MÉTODO DE CONTINUACIÓN	43
4.1 MATLAB EN EL ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE POTENCIA	43
4.2 PERSPECTIVA DEL PROGRAMA CPFepn	45
4.2.1 Flujo de Potencia	45
4.2.2 CONTINUACIÓN DE FLUJOS DE POTENCIA	48
4.2.3 Formulación de las Ecuaciones de Potencia	49
4.2.3.1 Predicción	51
4.2.3.2 Corrección	52
Capítulo 5	53
APLICACIONES DEL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE	53
5.1 SISTEMAD DE DOS BARRAS	53
5.2 COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON PSAT V.2.0.0	59
5.3 SISTEMA DE TRES BARRAS	60
5.4 SISTEMA DE NUEVE BARRAS	64
5.5 ESTABILIDAD DE VOLTAJE DEL SNI	68
5.5.1 PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA	68
5.5.2 Escenarios de prueba	70
5.5.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	76
Capítulo 6	77
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	78
Bibliografía	80
ANEXO 1	83

Lista de tablas

Capítulo 3

3.4-1 Colapsos de voltaje a nivel mundial	29
---	----

Capítulo 4

4.1-1 Paquetes basados en Matlab para análisis de sistemas de potencia	44
--	----

Capítulo 5

5.1-1 Voltajes en barra obtenidos del flujo de potencia <i>CPFepn</i>	55
5.1-2 Estadística de solución del flujo de potencia <i>CPFepn</i>	55
5.1-3 Voltajes críticos en barra obtenidos de <i>CPFepn</i>	55
5.1-4 Estadística de solución de <i>CPFepn</i>	55
5.1-5 Voltajes en barra obtenidos del flujo de potencia <i>PSAT</i>	57
5.1-6 Estadística de solución del flujo de potencia <i>PSAT</i>	57
5.1-7 Voltajes críticos en barra obtenidos de <i>PSAT</i>	58
5.1-8 Estadística de solución de <i>PSAT</i>	58
5.1-9 Comparación de resultados <i>CPFepn</i> - <i>PSAT</i>	60
5.3-1 Tres barras: barra oscilante y dos barras de carga, caso base y direcciones de carga propuestos	61
5.4-1 Datos del sistema de transmisión, nueve barras	65
5.4-2 Caso base y dirección de carga propuesta, nueve barras	66
5.4-3 Voltajes en barra cuando $\lambda = \lambda_{\max}$	68
5.5-1 SNI, anillo de 230kV caso base	70
5.5-2 Máxima cargabilidad en el SNI de 12 barras	71

ANEXO 1

4.1 Formato de datos de barra flujo de potencia	96
4.2 Formato de datos de barra CPF	97
4.3 Formato de datos de ramas PF y CPF	98

5.3-4	V vs. λ , sistema de tres barras, caso 3	63
5.4-1	Sistema WSCC de tres máquinas, nueve barras	65
5.4-2	Curvas P-V, sistema de nueve barras	66
5.4-3	Curvas P-V, sistema de nueve barras, barras 2 a 5	67
5.4-4	Curvas P-V, sistema de nueve barras, barras 6 a 9	67
5.5-1	SNI, diagrama unifilar, anillo de 230kV	69
5.5-2	Curva P-V en barra considerada para $S_D = 0.05S_0$	71
5.5-3	Curvas P-V en las barras de mayor y menor voltaje, punto de colapso, escenario 1	72
5.5-4	Curvas P-V en las 5 barra de menor voltaje en el punto de colapso	72
5.5-5	Curvas P-V en todas las barra del sistema	73
5.5-6	Curvas P-V en las barras de mayor y menor voltaje, punto de colapso, escenario 2	73
5.5-7	Curvas P-V en las barras de mayor y menor voltaje, punto de colapso, escenario 3	74
5.5-8	Curvas P-V escenario 3 (1)	74
5.5-9	Curvas P-V escenario 3 (2)	75
5.5-10	Curvas P-V escenario 3 (3)	75

Capítulo 6

6.1	Diagrama de bifurcación o curva PV	78
-----	------------------------------------	----

ANEXO 1

2.1	Ventana de inicio de <i>CPFepn</i>	88
2.2	Ventana principal de <i>CPFepn</i>	89
2.3	Interfaz gráfica para trazar las curvas	90
2.4	Ventana de configuración de <i>CPFepn</i>	92
2.5	Configuración Flujos de Potencia	92
2.6	Configuración del método de continuación	93

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN ESTADO ESTABLE DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA BASADO EN EL MÉTODO DE CONTINUACIÓN APLICADO A FLUJOS DE POTENCIA

Franklin Lenin Quilumba Gudiño
Bajo la supervisión del Dr. Jesús Játiva Ibarra
Escuela Politécnica Nacional

RESUMEN

Este proyecto de titulación presenta un comprensivo y detallado estudio de la técnica de continuación para identificar y analizar la bifurcación nodo-silla (SNB por sus siglas en inglés) de un sistema eléctrico de potencia, el cual es directamente asociado con problemas de estabilidad de voltaje de estos sistemas.

Un programa computacional básico, *CPFepn* “*Continuation Power Flow Escuela Politécnica Nacional*”, basado en el método de continuación aplicado a flujos de potencia en plataforma Matlab, desarrollado para el análisis de estabilidad de voltaje en estado estable de sistemas de potencia es presentado. Éste permite trazar las curvas PV, también conocidas como perfiles de voltaje.

CPFepn usa la técnica del vector tangente estándar en la predicción, con el inconveniente de la singularidad del Jacobiano en el punto de bifurcación, sin embargo, puesto que además se usa la técnica de la intersección perpendicular en la corrección con corte de paso se evita la singularidad y la parametrización no es necesaria en la práctica.

El software es usado en varios ejemplos, y finalmente en el Sistema Nacional Interconectado SNI.

PRESENTACIÓN

La estabilidad de voltaje es un tema crítico en la seguridad, operación y planificación de los sistemas eléctricos de potencia.

El presente proyecto de titulación establece una herramienta computacional básica para el estudio de la estabilidad de voltaje a través del análisis de las curvas PV obtenidas aplicando la técnica de continuación, que es un probado método muy bueno en el cálculo del punto de bifurcación en un sistema de potencia.

CPFepn “*Continuation Power Flow Escuela Politécnica Nacional*”, está diseñado para el análisis de flujos de potencia en estudios de estabilidad de voltaje en estado estable basado en el método de continuación (CPF). *CPFepn* usa como plataforma de programación MATLAB.

En el capítulo 1 se presenta una introducción global del tema a desarrollar, incluye la justificación así como también los objetivos del proyecto.

El capítulo 2 comienza por la revisión del análisis de flujos de potencia, así como también la terminología matemática relacionada, para establecer una estructura general teórica del Jacobiano del método de Newton-Raphson, todo esto encaminado para presentar en detalle la técnica de continuación aplicada a flujos de potencia.

El capítulo 3 explica de manera global el problema de estabilidad de sistemas de potencia y se centra en el estudio del fenómeno de estabilidad de voltaje.

El capítulo 4 presenta *CPFepn*, software desarrollado específicamente para analizar problemas de estabilidad de voltaje en sistemas de potencia.

En el capítulo 5 se someten a comparación los resultados obtenidos en *CPFepn* con *PSAT* “*Power System Analysis Toolbox*” situándolos en un contexto equiparable,

a través del análisis de un sistema de potencia de dos barras. Finalmente, *CPFepn* es usado para simular el Sistema Nacional Interconectado (SNI) y se discuten los resultados obtenidos en el análisis de bifurcación.

Las conclusiones y recomendaciones se exponen en el capítulo 6.

Finalmente, las referencias técnicas, en las que se basa la elaboración de este proyecto, son presentadas.

Se incluye además el manual del usuario de *CPFepn V1.0* en el Anexo 1.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

El continuo crecimiento en la demanda puede eventualmente conducir al sistema a un estado inestable caracterizado por una rápida disminución de las magnitudes del voltaje, este fenómeno es conocido como “colapso de voltaje”, y a menudo estudiado usando los perfiles de voltaje. La estabilidad de voltaje es una seria preocupación que debe ser examinada en estudios de planificación y operación de sistemas eléctricos de potencia.

El flujo de potencia es una poderosa herramienta para monitorear los voltajes del sistema como una función del cambio en la carga, es decir trazar los voltajes de barra versus los niveles de potencia de carga, desde un caso base hasta el límite de cargabilidad (conocido como punto de máxima cargabilidad, punto de colapso o punto de bifurcación), en donde el Jacobiano del sistema de ecuaciones de flujo de potencia llega a ser singular. Así que, el tradicional método de Newton – Raphson resulta en problemas de convergencia. En este caso, una modificación en el método de Newton – Raphson conocido como método de continuación es empleado.

1.1 Justificación del proyecto

Para operar un sistema de potencia con adecuados márgenes de seguridad, es esencial estimar la máxima cargabilidad permisible del sistema usando información relacionada con el punto actual de operación. Determinar la máxima cargabilidad, con límites de estabilidad de voltaje, ha llegado a ser un tema muy importante en estudios de planificación y operación de sistemas de potencia.

Las curvas convencionales P-V o Q-V son usadas a menudo como herramientas para evaluar la estabilidad de voltaje y encontrar la máxima cargabilidad en el

borde del colapso de voltaje. Una alternativa simple para encontrar este límite de cargabilidad es usar un programa de flujos de potencia ordinario e incrementar gradualmente la carga, sin embargo, al aproximarse al punto de colapso sufre problemas de convergencia.

Esta dificultad es superada usando métodos de continuación que permiten calcular los puntos de bifurcación y las curvas P-V en sistemas de potencia a través de soluciones sucesivas de flujos de potencia.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

- ∞ Desarrollar un programa básico en Matlab para analizar el fenómeno de bifurcación y determinar el perfil de voltaje en el estudio de estabilidad de voltaje en estado estable de un sistema eléctrico de potencia.

1.2.2 Objetivos Específicos

- ∞ Describir la solución de las ecuaciones de flujo de potencia por el método de Newton – Raphson.
- ∞ Introducir técnicas analíticas y computacionales usadas para el análisis de estabilidad de voltaje de sistemas de potencia como es el método de continuación aplicado a flujos de potencia.
- ∞ Detallar la implementación del método de continuación en el lenguaje de programación de Matlab.

∞ Determinar las curvas P-V (perfil de voltaje) y los límites de cargabilidad aplicado al Sistema Nacional Interconectado SNI.

Capítulo 2

CONCEPTOS TEÓRICOS BÁSICOS

El capítulo 2 presenta una revisión en detalle del análisis de flujos de potencia, iniciando con una visión general de la modelación del sistema de potencia, así como también la terminología matemática relacionada, para establecer una estructura general teórica del Jacobiano del método de Newton-Raphson, el cual llega a ser singular en el límite de estabilidad de voltaje en estado estable, y cómo la singularidad del Jacobiano puede ser evitada por reformulación de las ecuaciones de flujos de potencia y aplicando una técnica de continuación. El método de continuación es una metodología matemática trayectoria-siguiente¹ usado para resolver sistemas de ecuaciones no lineales. Usando el método de continuación se puede trazar una rama de solución alrededor del punto de curvatura sin dificultad. Esto hace al método de continuación bastante atractivo en aproximaciones del punto crítico² en sistemas de potencia. El método de continuación aplicado a flujos de potencia toma esta característica trayectoria-siguiente por medio del esquema predicción-corrección.

2.1 FUNDAMENTOS DEL ANÁLISIS DE FLUJOS DE POTENCIA [1]

El análisis de flujos de potencia implica el cálculo de los flujos de potencia y voltajes, en estado estable, en la red de transmisión para terminales específicos o condiciones de barra. El sistema se asume balanceado permitiendo una representación monofásica del sistema.

2.1.1 MODELACIÓN [5]

¹ Path-following en inglés, método para resolver ecuaciones algebraicas no lineales [2]

² Punto crítico, punto de colapso o saddle-node bifurcation en inglés [3, 4]

Los modelos en estado estable o de flujo de potencia de los principales elementos del sistema de potencia, es decir, generadores, sistema de transmisión y carga que se toman en cuenta en el desarrollo de este proyecto, son discutidos en esta sección.

Los modelos típicos presentados aquí son basados en el principio que el sistema es balanceado, es decir, solo una fase es realmente necesaria para modelar el sistema.

2.1.1.1 Generadores

El sistema de generación es operado en estado estable para entregar una potencia dada a un voltaje fijo (regulador de voltaje), este sistema puede ser modelado por una potencia constante P_G y una magnitud de voltaje de barra constante V_G , también conocida como barra PV. Adicionalmente se modela una barra PQ de generación, donde las potencias activa P_G y reactiva Q_G son dadas.

En este modelo, las potencias P_G y Q_G se deben mantener dentro de ciertos límites para representar las restricciones del sistema mecánico y de corriente eléctrica.

Uno de los generadores, típicamente el más robusto (alta inercia), es definido como barra "slack" u "oscilante", debido a que el sistema de cantidades fasoriales requieren un fasor de referencia, y proveer para los cambios y pérdidas del sistema de potencia un balance de conservación de energía. En tal virtud, la magnitud del fasor de voltaje V_G y del ángulo θ_G son definidos.

2.1.1.2 Líneas de Transmisión

Para flujo de potencia se considera el modelo π , Fig. 2.1.1.2-1, en las líneas de transmisión para longitud media. Aquí $R + jX$ y B es la susceptancia de la línea de transmisión de secuencia positiva. Este modelo π , es útil en longitudes de longitud media. Hay que tener en cuenta que en líneas de longitud corta $B \approx 0$.

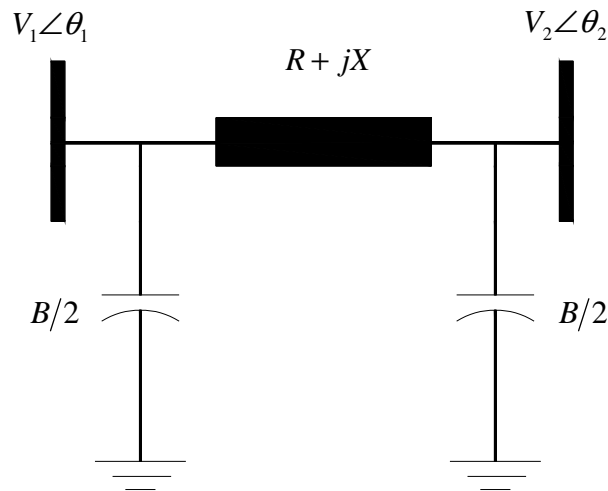
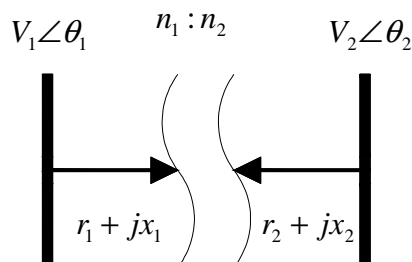


Figura 2.1.1.2-1 Modelo π de la línea de transmisión.

2.1.1.3 Transformadores

El transformador se modela considerando un transformador de dos devanados con taps n_1 y n_2 , en el lado 1 (lado de alto voltaje HV) y en el lado 2 (lado de bajo voltaje LV) respectivamente, así como también de las impedancias $z_1 = r_1 + jx_1$ y $z_2 = r_2 + jx_2$. En la figura 2.1.1.3-1 se indica el modelo del transformador de dos devanados. Cabe notar que si se tratara de un transformador de tres devanados la modelación puede ser simplificada considerando únicamente los lados primario y secundario del transformador.



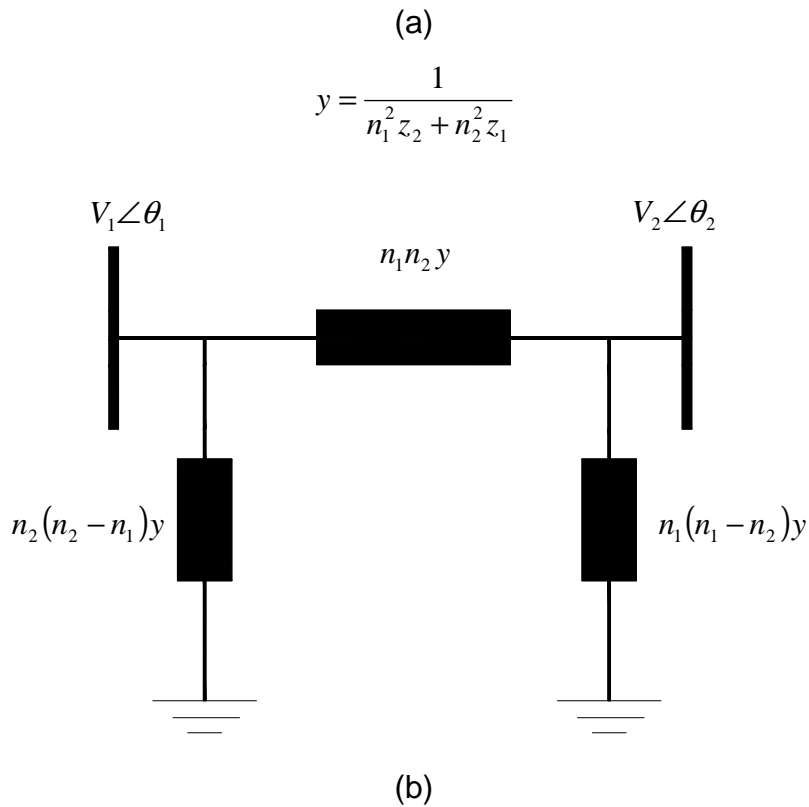


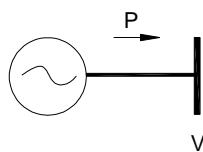
Figura 2.1.1.3-1 Modelo π del transformador considerando taps en los dos lados

2.1.1.4 Cargas

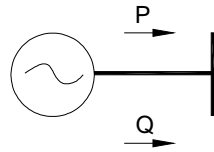
En estado estable, en el presente proyecto, la potencia activa P_L y la potencia reactiva Q_L de carga son vistas como valores constantes. Las barras de carga típicamente se representan como barras de potencia constante, y son conocidas como barras PQ.

En resumen, los elementos del sistema de potencia en estado estable, para el presente proyecto, pueden ser representados por los siguientes modelos por fase:

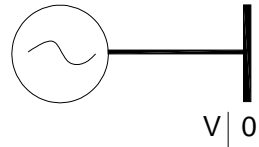
☞ Barra de Generación PV



∞ Barra de Generación PQ

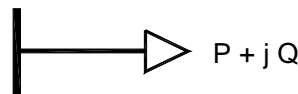


∞ Barra slack (referencia)



∞ Sistema de transmisión: Representado por un conjunto de modelos de impedancia equivalentes π conectados a las diferentes barras del sistema.

∞ Cargas PQ



2.1.2 Ecuaciones de red

Las relaciones entre el voltaje en la barra y las corrientes pueden ser representadas por las ecuaciones de malla o por las ecuaciones de nodo. Las ecuaciones de nodo se prefieren porque el número de ecuaciones independientes de nodo es menor que el número de las ecuaciones independientes de malla.

Las ecuaciones de red en términos de la matriz admitancia de nodo pueden ser escritas, así:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \dots \\ \bar{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \dots \\ \bar{V}_n \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

donde,

- n número total de nodos
- Y_{ii} admitancia propia del nodo i
 = suma de todas las admitancias conectadas al nodo i
- Y_{ij} admitancia mutua entre los nodos i y j
 = negativo de las suma de todas las admitancias entre los nodos i y j
- \bar{V}_i fasor de voltaje (fase – neutro) en el nodo i
- \bar{I}_i fasor de corriente fluyendo en la red al nodo i

Los efectos de los generadores, cargas no lineales, y otros dispositivos (por ejemplo, compensadores reactivos dinámicos, convertidores HVDC) conectados a los nodos de la red se reflejan en la corriente de nodo. Las cargas de impedancia constante (lineales) se incluyen en la matriz admitancia de nodo.

2.1.3 No linealidad de las ecuaciones de flujos de potencia

Las ecuaciones 2.1 podrían ser lineales si las inyecciones \bar{I} fuesen conocidas. En la práctica las inyecciones de corriente son desconocidas para la mayoría de barras. La corriente en cualquier nodo k es relacionado con P , Q , y \bar{V} , así:

$$\bar{I}_k = \frac{P_k - jQ_k}{\bar{V}_k^*} \quad (2.2)$$

Claramente las condiciones límites impuestas por los diferentes tipos de barras hacen el problema NO LINEAL y su solución es a través de técnicas iterativas: métodos de Gauss-Seidel y Newton-Raphson.

Para aplicación del análisis de flujos de potencia las ecuaciones 2.1 y 2.2 pueden ser escritas como se muestra:

$$\frac{P_k - jQ_k}{\bar{V}_k^*} = Y_{kk} \bar{V}_k + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n Y_{ki} \bar{V}_i \quad (2.3)$$

2.2 MÉTODO NEWTON – RAPHSON (N – R)

Técnica iterativa para resolver un conjunto de ecuaciones no lineales. Representa n ecuaciones en n incógnitas:

$$\begin{aligned}
 f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= b_1 \\
 f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) &= b_2 \\
 \dots \dots \dots \dots \dots \dots & \\
 f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) &= b_n
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

Si las iteraciones comienzan con condiciones iniciales de $x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0$ para las n incógnitas y si $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ son las correcciones necesarias de estimación, por lo tanto las ecuaciones son exactamente satisfechas,

$$\begin{aligned}
 f_1(x_1^0 + \Delta x_1, x_2^0 + \Delta x_2, \dots, x_n^0 + \Delta x_n) &= b_1 \\
 f_2(x_1^0 + \Delta x_1, x_2^0 + \Delta x_2, \dots, x_n^0 + \Delta x_n) &= b_2 \\
 \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots & \\
 f_n(x_1^0 + \Delta x_1, x_2^0 + \Delta x_2, \dots, x_n^0 + \Delta x_n) &= b_n
 \end{aligned}
 \tag{2.5}$$

Cada una de estas ecuaciones puede expandirse usando el teorema de Taylor. La forma expandida para la i-ésima ecuación es:

$$\begin{aligned}
 &f_i(x_1^0 + \Delta x_1, x_2^0 + \Delta x_2, \dots, x_n^0 + \Delta x_n) \\
 &= f_i(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) + \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_1}\right)_0 \Delta x_1 + \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_2}\right)_0 \Delta x_2 + \dots + \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_n}\right)_0 \Delta x_n \\
 &+ \text{términos con exponentes superiores de } \Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n \\
 &= b_i
 \end{aligned}$$

Los términos con exponentes superiores pueden ser despreciados si la estimación inicial es cercana a la solución verdadera.

En forma matricial

$$\begin{bmatrix} b_1 - f_1(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) \\ b_2 - f_2(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ b_n - f_n(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)_0 & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\right)_0 & \dots & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right)_0 \\ \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_1}\right)_0 & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_2}\right)_0 & \dots & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_n}\right)_0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\right)_0 & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_2}\right)_0 & \dots & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right)_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \dots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

o

$$\underline{\Delta f} = \underline{J} \underline{\Delta x} \quad (2.7)$$

donde \underline{J} es el Jacobiano. Si la estimación de x_1^0, \dots, x_n^0 fuera exacta, entonces $\underline{\Delta f}$ y $\underline{\Delta x}$ deberían ser cero. Sin embargo, como x_1^0, \dots, x_n^0 son solo estimaciones, los errores $\underline{\Delta f}$ son finitos. La ecuación 2.6 proporciona relaciones linealizadas entre los errores $\underline{\Delta f}$ y las correcciones $\underline{\Delta x}$ a través del Jacobiano. Una solución para $\underline{\Delta x}$ puede ser obtenida por aplicación de cualquier método de solución de un conjunto de ecuaciones lineales. Los valores actuales de x son calculados de

$$x_i^1 = x_i^0 + \Delta x_i$$

El proceso se repite hasta que los errores Δf_i son tan pequeños como una tolerancia especificada. Las iteraciones tienen convergencia cuadrática. El Jacobiano se recalcula en cada paso.

2.2.1 Aplicación del método N – R en la solución de flujos de potencia

Para aplicar el método Newton – Raphson, cada ecuación compleja representada por 2.3 tiene que ser escrita como dos ecuaciones reales en términos de dos variables reales en lugar de una variable compleja.

Para cada barra k ,

$$\bar{S}_k = P_k + jQ_k = \bar{V}_k \bar{I}_k^* \quad (2.8)$$

De 2.1

$$\bar{I}_k = \sum_{m=1}^n \bar{Y}_{km} \bar{V}_m \quad (2.9)$$

$$P_k + jQ_k = \bar{V}_k \sum_{m=1}^n (G_{km} - jB_{km}) \bar{V}_m^* \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} \bar{V}_k \bar{V}_m^* &= (V_k e^{j\theta_k}) (V_m e^{-j\theta_m}) = V_k V_m e^{j(\theta_k - \theta_m)} \\ &= V_k V_m (\cos(\theta_{km}) + j \text{sen}(\theta_{km})), \quad (\theta_{km} = \theta_k - \theta_m) \end{aligned} \quad (2.11)$$

Así que, las expresiones de P_k y Q_k pueden ser escritas en forma real como sigue,

$$\begin{aligned} P_k &= V_k \sum_{m=1}^n (G_{km} V_m \cos(\theta_{km}) + B_{km} V_m \text{sen}(\theta_{km})) \\ Q_k &= V_k \sum_{m=1}^n (G_{km} V_m \text{sen}(\theta_{km}) - B_{km} V_m \cos(\theta_{km})) \end{aligned} \quad (2.12)$$

Por lo tanto, P y Q en cada barra son funciones de la magnitud V y del ángulo θ del voltaje de todas las barras.

Si la potencia activa y reactiva en cada barra son especificadas, y usando superíndices sp para denotar valores especificados se tiene,

$$\begin{aligned} \Delta P_1 &= P_1^{sp} - P_1(\theta_1, \dots, \theta_n, V_1, \dots, V_n) \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ \Delta P_n &= P_n^{sp} - P_n(\theta_1, \dots, \theta_n, V_1, \dots, V_n) \\ \Delta Q_1 &= Q_1^{sp} - Q_1(\theta_1, \dots, \theta_n, V_1, \dots, V_n) \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ \Delta Q_n &= Q_n^{sp} - Q_n(\theta_1, \dots, \theta_n, V_1, \dots, V_n) \end{aligned}$$

A continuación del procedimiento general descrito anteriormente para la aplicación del método N-R, se tiene

$$- \begin{bmatrix} P_1^{sp} - P_1(\theta_1^0, \dots, \theta_n^0, V_1^0, \dots, V_n^0) \\ \dots \\ P_n^{sp} - P_n(\theta_1^0, \dots, \theta_n^0, V_1^0, \dots, V_n^0) \\ Q_1^{sp} - Q_1(\theta_1^0, \dots, \theta_n^0, V_1^0, \dots, V_n^0) \\ \dots \\ Q_n^{sp} - Q_n(\theta_1^0, \dots, \theta_n^0, V_1^0, \dots, V_n^0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P_1}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial \theta_n} & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial V_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \Delta P_n}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial \Delta P_n}{\partial \theta_n} & \frac{\partial \Delta P_n}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial \Delta P_n}{\partial V_n} \\ \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial \theta_n} & \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial V_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \Delta Q_n}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial \Delta Q_n}{\partial \theta_n} & \frac{\partial \Delta Q_n}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial \Delta Q_n}{\partial V_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \dots \\ \Delta \theta_n \\ \Delta V_1 \\ \dots \\ \Delta V_n \end{bmatrix}$$

o

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta P}{\partial V} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial V} \end{bmatrix}}_{\text{Jacobiano}} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

o, de manera compacta:

$$D_z F(z) \cdot \Delta z = -F(z) \quad (2.14)$$

donde $z = [\underline{\theta} \quad \underline{V}]^T$.

La dispersión de cada submatriz del Jacobiano es la misma que la matriz admitancia de nodo. En 2.13 se asume que todas las barras son PQ. Para barras PV, P es especificada y V es fijado así que ΔQ y ΔV podrían ausentarse para cada barra PV. Por lo tanto el Jacobiano podría tener solo una fila y una columna para cada barra PV.

De la ecuación 2.14, seguidamente se debe calcular la nueva suposición de la siguiente iteración

$$z^{k+1} = z^k + \alpha \Delta z^k \quad (2.15)$$

donde α es un control de paso constante ($0 < \alpha \leq 1$) que garantiza la convergencia.

Y se debe parar cuando

$$\|F(z^k)\| = \max |F_i(z^k)| \leq \varepsilon$$

$$\varepsilon = \min(\varepsilon_{\Delta P}, \varepsilon_{\Delta Q})$$

donde $\varepsilon_{\Delta P}$ y $\varepsilon_{\Delta Q}$ son la tolerancia del mismatch de P y Q.

2.3 OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DEL JACOBIANO Y ECUACIONES DE ERRORES DE POTENCIA

Cuando se calcula una solución con el método de Newton – Raphson es necesario recalculer el Jacobiano. Para lo cual se han desarrollado métodos de flujos de potencia desacoplado rápido (FDLF por sus siglas en inglés), esquemas XB y BX, que hacen ciertas aproximaciones las cuales simplifican el problema de flujos de potencia. Sin embargo, con un adecuado manejo de las ecuaciones de errores de potencia activa y reactiva, y de las derivadas parciales de las mismas, se puede optimizar el cálculo del Jacobiano.

Las ecuaciones de errores de potencia para P y Q son

$$\Delta P_i = P_i^{sp} - P_i \quad (2.16)$$

$$\Delta Q_i = Q_i^{sp} - Q_i \quad (2.17)$$

como

$$S_i = V_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} - jB_{ij}) V_j (\cos(\theta_{ij}) + j \text{sen}(\theta_{ij})) \quad (2.18)$$

de donde se obtiene

$$\Delta P_i = P_i^{sp} - V_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} \cos(\theta_{ij}) + B_{ij} \text{sen}(\theta_{ij})) V_j \quad (2.19)$$

$$\Delta Q_i = Q_i^{sp} - V_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} \text{sen}(\theta_{ij}) - B_{ij} \cos(\theta_{ij})) V_j \quad (2.20)$$

Con las ecuaciones 2.19 y 2.20 se determinan las derivadas parciales que forman parte del Jacobiano para la solución de flujos de potencia por el método N-R. El tratamiento matemático será dado por separado a los elementos fuera de las diagonales de cada submatriz del Jacobiano, debido a que fuera de estas diagonales están las derivadas parciales de P_i y Q_i con respecto a θ_j y V_j , mientras que en las diagonales de cada submatriz del Jacobiano las derivadas parciales de P_i y Q_i son con respecto a θ_i y V_i .

2.3.1 Elementos Fuera de la Diagonal

$$\frac{\partial \Delta P_i}{\partial \theta_j} = V_i (-G_{ij} \text{sen}(\theta_{ij}) + B_{ij} \cos(\theta_{ij})) V_j \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial \Delta P_i}{\partial V_j} = V_i (-G_{ij} \cos(\theta_{ij}) - B_{ij} \text{sen}(\theta_{ij})) \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \theta_j} = V_i (G_{ij} \cos(\theta_{ij}) + B_{ij} \text{sen}(\theta_{ij})) V_j \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial \Delta Q_i}{\partial V_j} = V_i (-G_{ij} \text{sen}(\theta_{ij}) + B_{ij} \cos(\theta_{ij})) \quad (2.24)$$

2.3.2 Elementos de las Diagonales

$$\frac{\partial \Delta P_i}{\partial \theta_i} = V_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} \text{sen}(\theta_{ij}) - B_{ij} \cos(\theta_{ij})) V_j + B_{ii} V_i^2$$

$$\frac{\partial \Delta P_i}{\partial V_i} = Q_i + B_{ii} V_i^2 \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial \Delta P_i}{\partial V_i} = - \sum_{j=1}^n (G_{ij} \cos(\theta_{ij}) + B_{ij} \text{sen}(\theta_{ij})) V_j - G_{ii} V_i$$

$$\frac{\partial \Delta P_i}{\partial V_i} = -\frac{P_i}{V_i} - G_{ii} V_i \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \theta_i} = -V_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} \cos(\theta_{ij}) + B_{ij} \text{sen}(\theta_{ij})) V_j + G_{ii} V_i^2$$

$$\frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \theta_i} = -P_i + G_{ii} V_i^2 \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial \Delta Q_i}{\partial V_i} = -\sum_{j=1}^n (G_{ij} \text{sen}(\theta_{ij}) - B_{ij} \cos(\theta_{ij})) V_j + B_{ii} V_i$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = -\frac{Q_i}{V_i} + B_{ii} V_i \quad (2.28)$$

2.4 ANÁLISIS DE FLUJOS DE POTENCIA POR EL MÉTODO DE CONTINUACIÓN

2.4.1 Introducción

El incremento en el pico de la demanda y la transferencia de potencia entre las empresas de servicio eléctrico conlleva problemas de seguridad de voltaje en sistema de potencia. El colapso de voltaje ha sido el responsable de muchos de los mayores disturbios a nivel mundial e importantes investigaciones fueron y son llevadas a cabo para entender el fenómeno de voltaje (tratado en mayor detalle en el capítulo 3). Efectivamente, numerosos autores han propuesto índices de estabilidad de voltaje basado en un tipo de análisis de flujos de potencia. En tales investigaciones una dificultad en particular ha sido encontrada y ésta es que el Jacobiano del flujo de potencia del método de Newton – Raphson llega a ser singular en el límite de estabilidad de voltaje en estado estable. En este capítulo se describe un método de encontrar soluciones continuas de flujos de potencia comenzando en algún caso base y llegando al límite de estabilidad de voltaje en estado estable (punto crítico) del sistema evitando el problema de singularidad en el Jacobiano.

2.4.2 MÉTODO DE CONTINUACIÓN (PERFIL DE VOLTAJES)

El perfil de voltajes, también conocido como curvas PV o QV es a menudo utilizado para determinar la proximidad al colapso. La idea es usar soluciones sucesivas de flujos de potencia o métodos de continuación para calcular completamente el perfil de voltaje y el punto de colapso (punto de máxima carga), y determinar el margen de cargabilidad. Este método tiene la ventaja de presentar información adicional como es el comportamiento del voltaje en las barras del sistema. El problema con esta técnica es que, aunque confiable y muy informativa, su alto costo computacional, especialmente en grandes sistemas de potencia con múltiples límites [6].

El método de continuación supera ciertas dificultades del método de sucesivas soluciones de flujos de potencia, ya que no se basa en un modelo particular del sistema y permite graficar el perfil de voltaje completo para cambios automáticos del valor de λ conocido como el parámetro de continuación [6].

El principio general detrás del método de continuación aplicado a flujos de potencia es muy simple. Se emplea un esquema predicción – corrección para encontrar una trayectoria de solución de un conjunto de ecuaciones que han sido reformuladas para incluir el parámetro de la carga como se muestra en la figura 2.4.2-1 [7].

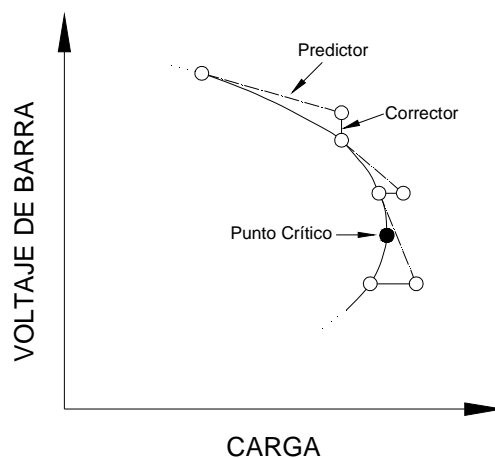


Fig. 2.4.2-1 Esquema predicción – corrección usado en el método de continuación aplicado a flujos de potencia [7].

La estrategia usada en estos métodos es ilustrada en la figura 2.4.2-2, donde un punto de equilibrio conocido (z_1, λ_1) es usado para calcular el vector dirección Δz_1 y un cambio $\Delta \lambda_1$ en el parámetro del sistema. El primer paso es conocido como predicción, este genera una suposición inicial $(z_1 + \Delta z_1, \lambda_1 + \Delta \lambda_1)$, la cual es usada en el paso de corrección para calcular un nuevo punto de equilibrio (z_2, λ_2) del perfil del sistema (diagrama de bifurcación). Dado que el Jacobiano $D_z F|_*$ es singular en el punto de colapso (bifurcación), una parametrización es a veces necesaria en los pasos de predicción y/o corrección, dependiendo de las técnicas usadas, para garantizar un comportamiento adecuado de la solución numérica de las ecuaciones relacionadas.

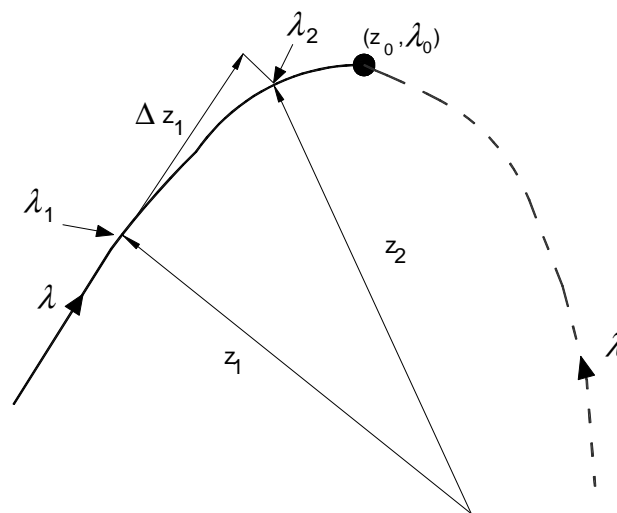


Fig. 2.4.2-2 Método de continuación

Algunos autores han propuesto diferentes maneras de implementar el método de continuación para detectar el punto de bifurcación nodo-silla³ en sistemas de potencia [3, 4, 7, 8, 9, 10], éstas técnicas están descritas detalladamente en [6] como seguidamente se presenta:

³ Saddle-node bifurcation en inglés.

A. Predicción y Parametrización Una manera de calcular el vector dirección Δz_1 en el punto de equilibrio (z_1, λ_1) en el perfil del sistema, es calcular el vector tangente a esta trayectoria en aquel punto. Sea $F(z_1, \lambda_1) = 0$, entonces

$$\frac{dF}{d\lambda}(z_1, \lambda_1) = D_z F(z_1, \lambda_1) \frac{dz}{d\lambda} \Big|_{\lambda_1} + \frac{\partial F}{\partial \lambda} \Big|_{\lambda_1} = 0$$

$$\Rightarrow D_z F \Big|_{\lambda_1} \frac{dz}{d\lambda} \Big|_{\lambda_1} = - \frac{\partial F}{\partial \lambda} \Big|_{\lambda_1} \quad (2.29)$$

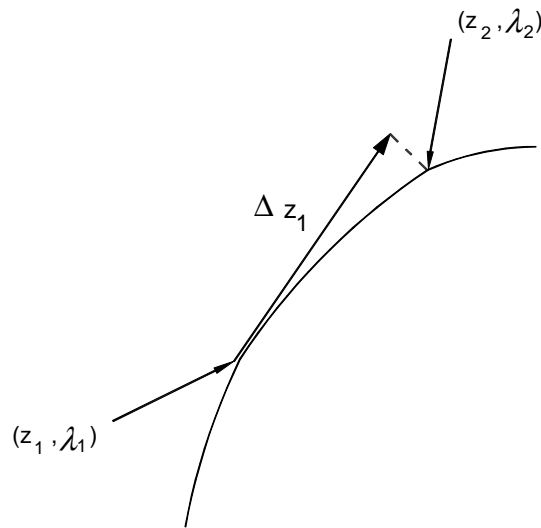


Fig. 2.4.2-3 Predicción tangente estándar

Así, el vector dirección y el paso del parámetro viene de la normalización del vector tangente, es decir,

$$\Delta \lambda_1 = \frac{k}{\|dz/d\lambda\|} \quad (2.30)$$

$$\Delta z_1 = \Delta \lambda_1 \frac{dz}{d\lambda} \Big|_{\lambda_1}$$

Donde $\|dz/d\lambda\|$ es la norma euclidiana y k es un escalar constante positivo que controla el tamaño del paso de predicción. La normalización en (2.30) resulta en la reducción del tamaño del paso mientras el sistema se aproxima al punto de colapso. Si el paso es demasiado grande la suposición inicial $(z_1 + \Delta z_1, \lambda_1 + \Delta \lambda_1)$

conlleva problemas de convergencia en la fase de corrección, por otro lado si el paso es demasiado pequeño, el método toma muchísimos pasos para trazar la curva de bifurcación. Buenos resultados fueron reportados en [4] para $k=1$, usando corte de paso cuando los límites o problemas de convergencia son encontrados.

Esta técnica tiene la ventaja particular de generar una aproximación al “cero” eigenvector-derecho en el punto de colapso, dado que el vector tangente converge uniformemente a este eigenvector.

El cálculo del vector tangente en (2.29) no representa un costo de cálculo significativo, dado que se puede usar el último Jacobiano factorizado $D_z F(z_1, \lambda_1)$. Sin embargo, este método tiene dificultades cuando el punto de equilibrio es cercano al punto de colapso, dado que el sistema llega a estar mal acondicionado. Para evitar este problema la parametrización debe ser usada. Una técnica exitosa relativamente simple es la parametrización local, la cual consiste en intercambiar el parámetro λ con la variable del sistema $z_i \in z$ que tenga la mayor entrada de normalización en el vector tangente, así que λ llega a ser parte de las variables de la ecuación, mientras que z_i llega a ser el nuevo parámetro de continuación p , es decir,

$$p = \max_i \left\{ \left| \frac{\Delta z_i}{z_i} \right|, \left| \frac{\Delta \lambda_i}{\lambda_i} \right| \right\} \quad (2.31)$$

Otro tipo de predicción con parametrización usado para tomar al sistema alrededor de la singularidad del punto de colapso es el método de la longitud de arco. Esta técnica es basada en la idea que las variables del sistema y el parámetro en los puntos de equilibrio pueden ser representados como una función de la longitud de arco s del perfil del sistema, es decir, para $F(z_1(s), \lambda_1(s) = 0)$,

$$D_z F|_1 \frac{dz}{ds}|_1 + \frac{\partial F}{\partial \lambda}|_1 \frac{d\lambda}{ds}|_1 = 0 \quad (2.32)$$

donde la longitud de arco s debe satisfacer la condición

$$\left. \frac{dz}{ds} \right|_1^T \left. \frac{dz}{ds} \right|_1 + \left. \frac{d\lambda}{ds} \right|_1^2 = 1 \quad (2.33)$$

Aunque, por aproximación $\Delta z \approx dz$, $\Delta \lambda \approx d\lambda$, y $k = \Delta s \approx ds$ ($k \in \mathfrak{R}^+$), las ecuaciones (2.32) y (2.33) llegan a ser

$$D_z F|_1 \Delta z_1 + \left. \frac{\partial F}{\partial \lambda} \right|_1 \Delta \lambda_1 = 0 \quad (2.34)$$

$$\Delta z_1^T \Delta z_1 + \Delta \lambda_1^2 = k$$

donde k es una constante escalar positiva que define la longitud de arco y consecuentemente el tamaño del paso de predicción. Las ecuaciones (2.34) pueden ser usadas para calcular el paso de predicción en lugar de (2.29) y (2.31), garantizando la no singularidad en el punto de colapso.

Finalmente, un método de predicción simple que no requiere parametrización es el método de la secante. Esta técnica consiste en una aproximación al vector tangente $dz/d\lambda$ usando dos o más puntos determinados en el perfil del sistema. Así que, dados dos puntos (z_{1a}, λ_{1a}) y (z_{1b}, λ_{1b}) en el perfil, tal que $\lambda_{1b} > \lambda_{1a}$,

$$\left. \frac{dz}{d\lambda} \right|_1 \approx z_1^b - z_1^a$$

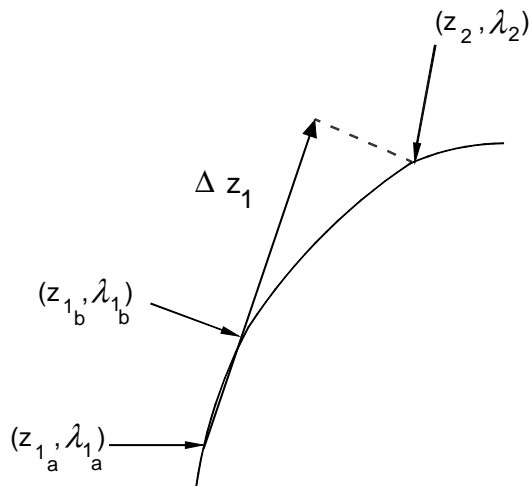


Fig. 2.4.2-4 Predicción secante.

La ecuación (2.30) puede entonces ser usada para calcular el vector dirección y el paso del parámetro. Nótese que tan cercanos son estos dos puntos, con una tolerancia numérica razonable, la mejor aproximación del vector tangente; sin embargo, más puntos tienen que ser calculados, tomando mucho tiempo en trazar el diagrama deseado. De otro lado, puntos demasiado alejados generan una aproximación inadecuada de $dz/d\lambda$, que conlleva a que suposiciones iniciales lideren en problemas de convergencia durante el paso de corrección. Usando más puntos en el perfil del sistema para mejorar la predicción de su curvatura, requiere grandes recursos de cálculo, pero puede ser usado como un procedimiento alternativo para aproximar al vector tangente cuando el diagrama cambia rápidamente de dirección, particularmente cuando los límites de control son encontrados. Así que, depende de la curvatura del perfil. La figura 2.4.2-4 ilustra el procedimiento de la predicción secante, y la figura 2.4.2-5 describe los problemas con esta técnica cuando agudos cambios en el perfil del sistema son encontrados.

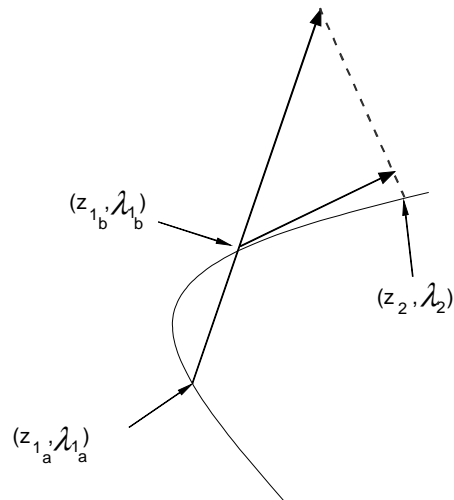


Fig. 2.4.2-5 Problemas de convergencia en la predicción secante cuando “esquinas agudas” son encontradas.

B. Corrección Una vez que la suposición inicial $(z_1 + \Delta z_1, \lambda_1 + \Delta \lambda_1)$ es determinada en el paso de predicción, con o sin parametrización, el punto actual (z_2, λ_2) en el perfil del sistema debe ser calculado resolviendo el siguiente conjunto de ecuaciones para z y λ :

$$\begin{aligned} F(z, \lambda) &= 0 & (2.35) \\ \rho(z, \lambda) &= 0 \end{aligned}$$

La primera ecuación vectorial en (2.35) corresponde al sistema de ecuaciones en estado estable, las cuales tienen un Jacobiano singular $D_z F|_*$ en el punto de colapso (z_*, λ_*) . La segunda ecuación escalar representa una condición de fase que garantiza la no singularidad del Jacobiano de las ecuaciones de corrección

$$\begin{bmatrix} D_z F & \frac{\partial F}{\partial \lambda} \\ D_z \rho & \frac{\partial \rho}{\partial \lambda} \end{bmatrix}_{(n+1) \times (n+1)}$$

en todos los puntos del perfil del sistema.

Dos condiciones de fase $\rho(\cdot)$ diferentes han sido exitosamente usadas en estudios de colapso de sistemas de potencia. La primera condición consiste en definir un vector perpendicular a Δz_1 , el cual comienza en $(z_1 + \Delta z_1, \lambda_1 + \Delta \lambda_1)$ e interseca al diagrama de bifurcación en (z, λ) , así:

$$\rho(z, \lambda) = \Delta z_1^T (z - z_1 - \Delta z_1) + \Delta \lambda_1 (\lambda - \lambda_1 - \Delta \lambda_1) \quad (2.36)$$

Esta condición no requiere ningún tipo de parametrización para garantizar la no singularidad de las ecuaciones (2.35) para todo el sistema de equilibrio.

Una simple condición de fase basada en la parametrización local del sistema alrededor del punto de colapso. En este caso, un parámetro local p (λ o $z_i \in z$) es puesto como valor constante, es decir,

$$\rho(z, \lambda) = p - p_1 - \Delta p_1$$

El parámetro p se escoge basado en la parametrización en (2.31) garantizando la no singularidad del Jacobiano de las ecuaciones (2.35).

De estas dos técnicas de corrección, la intersección perpendicular tiene la ventaja de no requerir ningún tipo de parametrización.

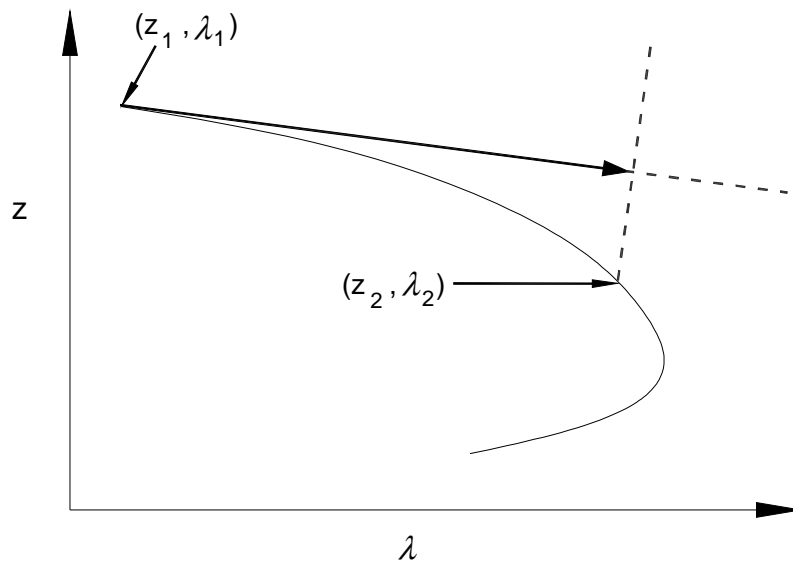


Fig. 2.4.2-6 Corrección con intersección perpendicular

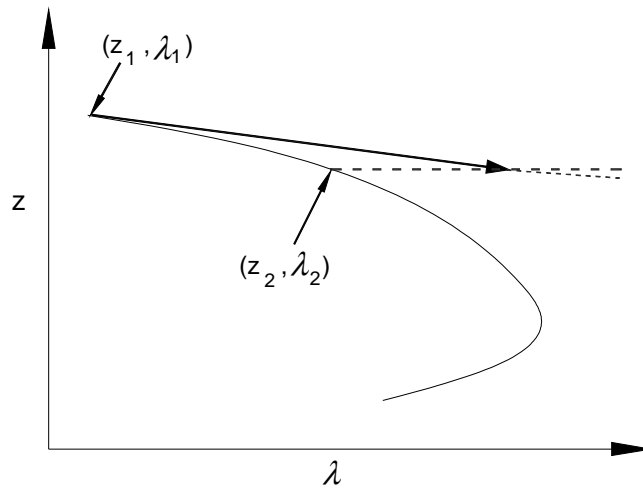


Fig. 2.4.2-7 Corrección con parámetro fijo.

Capítulo 3

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE

3.1 INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA DE ESTABILIDAD DE SISTEMAS DE POTENCIA [11]

La estabilidad de un sistema de potencia ha sido reconocida como un importante problema de seguridad en la operación del sistema desde 1920s. Muchos de los principales apagones causados por la inestabilidad del sistema de potencia ilustran la importancia de este fenómeno.

3.2 DEFINICIÓN DE ESTABILIDAD DE SISTEMAS DE POTENCIA

La estabilidad de un sistema de potencia es la capacidad del SEP, para dadas las condiciones iniciales de operación, recuperar el estado de operación de equilibrio después de ser sujeto a un disturbio físico, con la mayoría de las variables del sistema limitantes que prácticamente mantiene intacto el sistema completo.

La inestabilidad en un sistema de potencia puede manifestarse de diferentes maneras dependiendo de la configuración del sistema y del modo de operación [1].

El sistema de potencia es un sistema altamente no lineal que opera en un ambiente de constante cambio; cargas, salidas de generadores y los parámetros de operación cambian continuamente. Cuando está sujeto a una perturbación, la estabilidad del sistema depende de las condiciones iniciales de operación así como también de la naturaleza de la perturbación.

Un sistema de potencia está sujeto a un amplio rango de perturbaciones, pequeñas y grandes. Pequeñas perturbaciones en la forma de cambios en la carga ocurren continuamente; el sistema debe estar en la capacidad de ajustarse a las condiciones de cambio y operar satisfactoriamente. El SEP también debe estar en la capacidad de sobrevivir a numerosas perturbaciones severas, tales como un cortocircuito en una línea de transmisión o pérdida de una importante fuente de generación. Una gran perturbación puede ocasionar cambios estructurales debido al aislamiento de los elementos fallados.

Un sistema de potencia puede ser estable para una (gran) perturbación física dada, y ser inestable para otra. Es impráctico y no es económicamente viable diseñar un SEP para cada posible perturbación. El diseño de contingencias es seleccionado en base a una razonable alta probabilidad de ocurrencia de las mismas.

Los sistemas de potencia están constantemente experimentando fluctuaciones de pequeña magnitud. Sin embargo, para evaluar la estabilidad cuando es sometido a una específica perturbación, usualmente es válido asumir que el sistema está inicialmente en una verdadera condición de operación en estado estable.

3.3 CLASIFICACIÓN DE ESTABILIDAD DE SISTEMAS DE POTENCIA

La estabilidad de sistemas de potencia es esencialmente un problema único; sin embargo, las varias formas de inestabilidad que un SEP puede sufrir no pueden ser adecuadamente entendidas ni efectivamente tratadas. Debido a la alta dimensionalidad y complejidad de los problemas de estabilidad, ayuda hacer simplificaciones asumidas para analizar tipos de problemas específicos usando un apropiado grado de detalle de la representación del sistema y una apropiada técnica analítica. El análisis de estabilidad, incluyendo identificar los factores que contribuyen a la inestabilidad e idear métodos para mejorar la operación estable, es más fácil si la estabilidad se clasifica en adecuadas categorías.

La figura 3.3-1 proporciona una visión global del problema de estabilidad de sistemas de potencia, identificando sus categorías y subcategorías; incluye la estabilidad de voltaje.

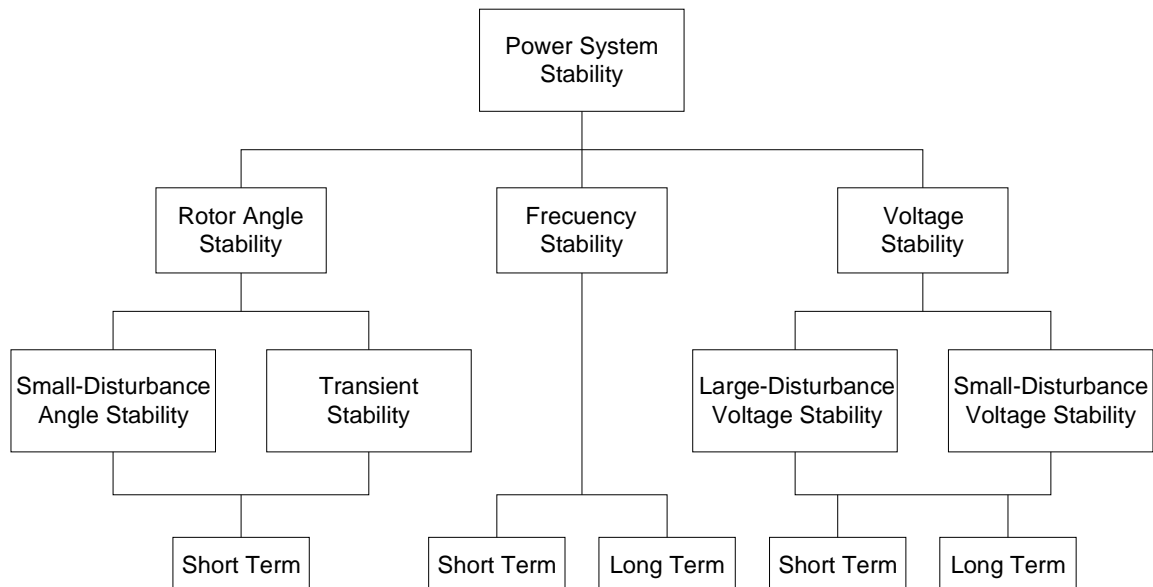


Fig. 3.3-1. Clasificación de Estabilidad de Sistemas de Potencia

3.4 ESTABILIDAD DE VOLTAJE

En términos generales, la estabilidad de voltaje es definida como la capacidad del sistema de potencia de mantener voltajes constantes en todas las barras del sistema después de una perturbación dada una condición inicial de operación. Depende de la capacidad de mantener y recuperar el equilibrio entre demanda y generación del SEP. La inestabilidad que puede resultar ocurre en la forma de una progresiva caída o subida del voltaje en algunas barras. Un posible resultado de la inestabilidad es la pérdida de carga en un área, o el disparo de una línea de transmisión y otros elementos por sus sistemas de protección. La pérdida de sincronismo de algunos generadores puede resultar de una de estas salidas o de las condiciones de operación que violan el límite de corriente de campo.

El control y los problemas de estabilidad de voltaje no son nuevos en la industria eléctrica. La inestabilidad de voltaje ha sido el responsable de los principales colapsos de sistemas de potencia a nivel mundial como se indica en la Tabla 3.4-1.

Como consecuencia, lo términos “inestabilidad de voltaje” y “colapso de voltaje” aparecen frecuentemente en la literatura y en las discusiones de planificación y operación de sistemas de potencia.

Tabla 3.4-1. Colapsos de voltaje a nivel mundial [12]

INCIDENTES DE COLAPSO DE VOLTAJE		
<small>A NIVEL MUNDIAL</small>		
<i>fecha</i>	<i>localización</i>	<i>marco de tiempo</i>
11/30/86	SE Brasil, Paraguay	2 segundos
5/17/85	Sur de Florida	4 segundos
8/22/87	Memphis, Tennessee	10 segundos
12/27/83	Suecia	50 segundos
7/79	Col. Británica, Costa Norte	1 minute
9/2/82	Florida	1 – 3 minutos
11/26/82	Florida	1 – 3 minutos
12/28/82	Florida	1 – 3 minutos
12/30/82	Florida	2 minutos
9/22/77	Jacksonville, Florida	pocos minutos
12/09/65	Francia, Brittany	?
11/20/76	Francia, Brittany	?
12/01/87	Francia	?
8/4/82	Bélgica	4.5 minutos
1/12/87	Occidente de Francia	4-6 minutos
7/23/87	Tokio	20 minutos
12/19/78	Francia	26 minutos
8/22/70	Japón	30 minutos
9/22/70	Nueva York	?

El principal factor causante de la inestabilidad es la incapacidad del sistema de potencia de satisfacer la demanda de potencia reactiva. El centro del problema es usualmente la caída de voltaje que ocurre cuando la potencia activa y la potencia reactiva fluyen a través de las reactancias inductivas asociadas a la red de transmisión [1].

Un criterio para estabilidad de voltaje es que, en una condición de operación dada para cada barra en el sistema, la magnitud del voltaje se incrementa tanto como la potencia reactiva inyectada en la misma barra está incrementándose. Un sistema es inestable, si al menos en una barra en el sistema, la magnitud del voltaje (V) disminuye tanto como la inyección de potencia reactiva (Q) en la misma barra se incrementa [1].

La progresiva caída de voltaje en las barras puede estar asociada también con la inestabilidad del ángulo del rotor.

La inestabilidad de voltaje es esencialmente un fenómeno local; sin embargo, sus consecuencias pueden expandirse. El colapso de voltaje es más complejo que una simple inestabilidad de voltaje.

3.5 COLAPSO DE VOLTAJE

El término **colapso de voltaje** se usa a menudo, y es el proceso por el cual la secuencia de eventos que acompañan a la inestabilidad de voltaje conducen a un apagón o a voltajes bajos anormales en una parte significativa del sistema de potencia [11].

El colapso de voltaje es un fenómeno inherentemente no lineal y es natural usar técnicas de análisis no lineales como la teoría de bifurcación para estudiar el colapso de voltaje e idear maneras de evitarlo.

3.5.1 Caracterización General del Colapso de Voltaje [1]

El evento de inicialización puede ser debido a una variedad de causas: pequeños cambios graduales en el sistema como el incremento en el sistema de carga, o una repentina perturbación como la pérdida de una unidad de generación o una línea considerablemente cargada.

El problema radica en la incapacidad del sistema de satisfacer su demanda de potencia reactiva.

El colapso de voltaje generalmente se manifiesta como un lento decaimiento del voltaje, y es el resultado de un proceso acumulativo que involucra las acciones e interacciones de muchos dispositivos, controles y sistemas de protección. El marco de tiempo del colapso en tales casos podría estar en el orden de algunos minutos.

El colapso de voltaje es fuertemente influenciado por las condiciones y características del sistema. Los siguientes son los factores significativos que contribuyen a la inestabilidad/colapso de voltaje:

- ∞ Grandes distancias entre generación y carga.
- ∞ Acción del ULTC durante condiciones de bajo voltaje.
- ∞ Desfavorables características de carga.
- ∞ Pobre coordinación entre varios sistemas de control y protección.

El problema de colapso de voltaje puede ser agravado por el excesivo uso de capacitores de compensación en paralelo. La compensación reactiva puede ser hecha más efectiva por la juiciosa elección de una mezcla de capacitores en paralelo, SVS y posibles condensadores sincrónicos.

3.5.2 ESCALA DE TIEMPO [6]

El colapso de voltaje ocurre en el siguiente rango de escalas de tiempo, desde segundos hasta horas:

- (1) Transitorios electromecánicos (p.e. generadores, reguladores, máquinas de inducción) y dispositivos electrónicos de potencia (p.e. SVC, HVDC) en el orden de los segundos.
- (2) Dispositivos discretos de interrupción, tales como cambiadores de tap bajo carga y limitadores de excitación actúan en el intervalo de decenas de segundos.
- (3) Proceso de recuperación de carga abarca algunos minutos.

En el colapso de voltaje el tiempo de escala 1 es llamado escala de tiempo transitorio. La escala de tiempo 2 y 3 constituyen la escala de tiempo a largo plazo (long-term en inglés) para análisis de estabilidad de voltaje (esta escala de tiempo a largo plazo es a veces referida como mediano plazo o “midterm en inglés”). Los transitorios electromagnéticos en las líneas de transmisión y en las máquinas sincrónicas (p.e. componentes DC de las corrientes de cortocircuito) ocurren tan rápidamente como para ser importantes en el colapso de voltaje. El incremento en la carga en una escala de tiempo amplia puede ser significativo en el colapso de voltaje. La figura 3.5-1 resume un modelo relevante de sistema de potencia para el fenómeno de voltaje el cual es descompuesto en marcos de tiempo transitorio y a largo plazo.

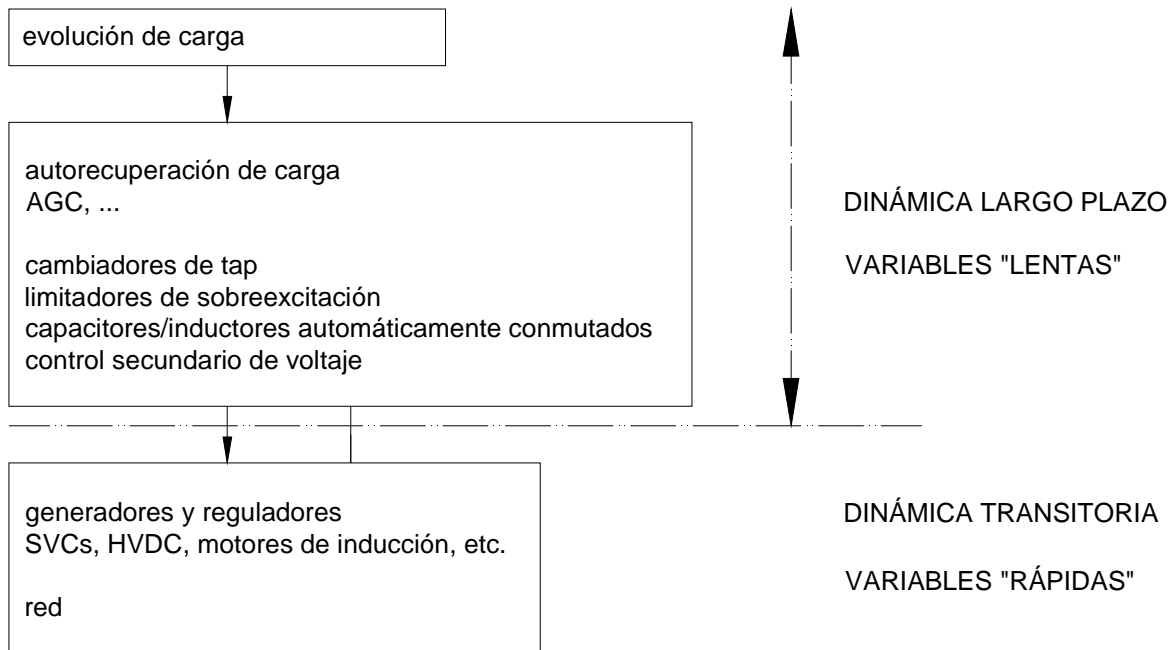


Figura 3.5-1. Escala de tiempos en el colapso de voltaje

3.6 BREVES COMENTARIOS DE LA TEORÍA [6]

La teoría debería ayudar a explicar y clasificar el fenómeno, y proveer ideas y cálculos para aquellos eventos imaginados y encontrados. La teoría presentada explota y adapta ideas de matemática, ciencia y otras partes de la ingeniería, particularmente la teoría no lineal de sistemas dinámicos.

3.6.1 Bifurcaciones: La teoría de bifurcaciones asume que los parámetros del sistema varían lentamente y predice cómo el sistema típicamente llega a ser inestable. La idea principal es estudiar el umbral de inestabilidad de un sistema. A pesar del tamaño o de la complejidad del modelo del sistema, existen pocos caminos en la cual el sistema puede típicamente llegar a ser inestable y la teoría de bifurcación describe las maneras y cálculos asociados. Muchas de estas ideas y cálculos pueden ser usadas o adaptadas para propósitos de ingeniería.

3.6.2 Análisis de gran perturbación y escala de tiempo rápido y lento: La teoría de bifurcación asume una variación lenta de los parámetros y no explica para una gran perturbación encontrada en muchos colapsos de voltaje. Sin embargo, algunos conceptos útiles de la teoría de bifurcación pueden ser usados, aunque

con mucho cuidado, para estudiar escenarios de gran perturbación. El colapso de voltaje a menudo tiene un período inicial lento de descenso de voltaje. Una idea clave es dividir la dinámica en rápida y lenta. Entonces el descenso lento puede ser estudiado por aproximación del estable, la dinámica rápida como instantánea. Después en el colapso de voltaje, esta dinámica rápida puede perder su estabilidad en una bifurcación y suceder un rápido descenso del voltaje. Esta teoría de escala de tiempo rápida-lenta sugiere acciones correctivas en las cuales rápidas acciones pueden recuperar la estabilidad de potencia durante el colapso inicial lento.

3.6.3 Modelación: Como era de esperarse, no existe un modelo único que pueda ser usado para estudiar todos los posibles problemas de colapso de voltaje. Los modelos de flujos de potencia han sido típicamente usados para estudios de colapso de voltaje, éstos permiten un análisis rápido y aproximado de los cambios en las condiciones de operación que lideran el comienzo de las condiciones por las cuales eventualmente conducen un colapso del sistema. Sin embargo, existe una clara necesidad de un mejor modelo que los simples modelos clásicos de flujos de potencia en el análisis de colapso de voltaje, debido a que este tipo de modelos no representan con exactitud algunos de los principales dispositivos y controles que llevan a problemas de colapso, particularmente cargas (p.e. respuesta dinámica) y los reguladores de voltaje de los generadores (p.e. limitadores de baja/sobre excitación).

3.6.4 Funciones de energía: El análisis de funciones de energía ofrece una visión “geométrica” diferente del colapso de voltaje. En este enfoque, un sistema de potencia operando establemente es como una pelota la cual yace en la parte baja del valle. La estabilidad puede ser vista como una pelota rodando hacia la parte inferior del valle cuando existe una perturbación. Como los parámetros del sistema de potencia cambian, el paisaje de montañas y montañas que pasan rodeando el valle cambian. Un colapso de voltaje corresponde a pasar una montaña existente desde la parte baja de tal manera que con una pequeña perturbación la pelota puede comenzar a rodar desde la parte inferior del valle pasar sobre la montaña y descender hacia el otro lado de la misma. El ancho de

la parte baja de la montaña puede ser medida por medio de su energía potencial asociada, y entonces usar un índice para monitorear la proximidad al colapso de voltaje. Esta energía potencial es típicamente asociada con el modelo del sistema usado para análisis de estabilidad, y es usado como una medida relativa de la región de estabilidad de un punto de operación (parte baja del valle).

3.6.5 Interacción de los cambiadores de tap, cargas y límites de generadores: Ciertamente los colapsos de voltaje pueden ser estudiados examinando la interacción dinámica de los cambiadores de tap, el sistema de carga y los límites de potencia reactiva de los generadores. Si la frecuencia del sistema se asume invariable la ecuación de oscilación no llega a involucrarse en la dinámica, entonces el efecto de estas interacciones en el colapso de voltaje pueden ser exitosamente analizados en términos de las regiones de estabilidad. Una región de estabilidad es la región alrededor de un punto de operación estable por la cual el estado regresará a aquel punto de operación. Una suficientemente amplia región de estabilidad alrededor de un punto de operación es deseable y el sistema llegará a ser inestable si la región de estabilidad desaparece. Cuando la carga aumenta, los límites de potencia reactiva se aplican y los cambiadores de tap bajo carga actúan, la región de estabilidad puede reducirse e inclusive desaparecer llevando a un colapso de voltaje. Esta visión del problema da una idea de cómo la dinámica de los cambiadores de tap, el sistema de carga y los límites de potencia reactiva de los generadores actúan para causar el colapso de voltaje y mostrar cómo bloqueando los cambiadores de tap puede prevenir el colapso de voltaje.

3.6.6 Inestabilidad debida a los límites: Cuando la carga se incrementa, la demanda de potencia reactiva generalmente se incrementa y los límites de la potencia reactiva de generadores o de otros dispositivos reguladores de voltaje pueden ser alcanzados. Estos límites de potencia reactiva pueden tener un gran efecto en la estabilidad de voltaje. Las ecuaciones modeladas del sistema de potencia cambian cuando un límite de potencia reactiva es encontrado. El efecto de encontrar límites de potencia reactiva es que el margen de estabilidad es repentinamente reducido. En algunos casos, el punto de operación del sistema

de potencia puede llegar a ser inestable o desaparecer cuando el límite es alcanzado y esto causa un colapso de voltaje.

3.6.7 Otros fenómenos no lineales: Los sistemas de potencia son grandes sistemas dinámicos con significativas no linealidades. Así que es bastante posible que los sistemas de potencia puedan mostrar comportamientos dinámicos “exóticos” tal como caos, como muchos otros sistemas lineales lo hacen. Ciertamente, algunos modelos matemáticos de sistemas de potencia, en ciertas regiones de operación, producen caos y un comportamiento inusual.

A pesar de que cada uno se esfuerce por operar los sistemas de potencia establemente, inesperados e inexplicables eventos ocurren algunas veces. La manera de reconocer el caos de otros comportamientos inusuales está basada en que la teoría no lineal proporciona una galería de comportamientos típicos de sistemas no lineales. Algunos de estos, particularmente las bifurcaciones silla-nodo y Hopf, ayudan a explicar ciertamente el fenómeno en sistemas de potencia como colapsos monótonos y oscilaciones respectivamente. Otros comportamientos menos comunes tal como el caos pueden tener características cualitativas que pueden ser reconocidas, y aprender de estas características abre nuevas posibilidades en interpretar resultados inusuales.

3.7 CASO DE ESTUDIO

3.7.1 Sistema radial simple [1]

La inestabilidad de voltaje puede ocurrir en diferentes maneras. En su forma simple puede ser ilustrado considerando la red de dos terminales de la Figura 3.7-1. Ésta consiste de una fuente de voltaje constante (E_s) abasteciendo a una carga (Z_{LD}) a través de una impedancia serie (Z_{LN}). Esta es la representación de un alimentador radial simple que sirve a un área de carga grande a través de una línea de transmisión.

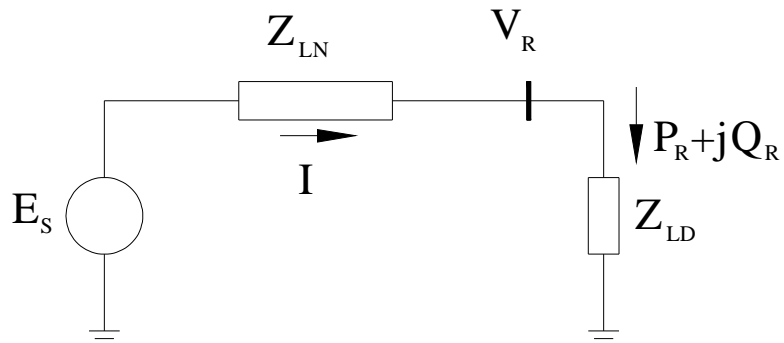


Figura 3.7-1. Sistema radial simple para ilustrar el fenómeno de estabilidad de voltaje

La expresión para la corriente \bar{I} en la figura 3.7-1 es:

$$\bar{I} = \frac{\bar{E}_s}{\bar{Z}_{LN} + \bar{Z}_{LD}} \quad (3.1)$$

donde \bar{I} y \bar{E}_s son fasores, y

$$\bar{Z}_{LN} = Z_{LN} \angle \theta, \quad \bar{Z}_{LD} = Z_{LD} \angle \phi$$

$$\bar{Z}_{LN} + \bar{Z}_{LD} = Z_{LN} \cos(\theta) + Z_{LD} \cos(\phi) + j(Z_{LN} \text{sen}(\theta) + Z_{LD} \text{sen}(\phi))$$

La magnitud de la corriente está dada por

$$I = \frac{E_s}{\sqrt{(Z_{LN} \cos(\theta) + Z_{LD} \cos(\phi))^2 + (Z_{LN} \text{sen}(\theta) + Z_{LD} \text{sen}(\phi))^2}}$$

Esto puede ser expresado como

$$I = \frac{1}{\sqrt{F}} \frac{E_s}{Z_{LN}} \quad (3.2)$$

donde

$$F = 1 + \left(\frac{Z_{LD}}{Z_{LN}} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_{LD}}{Z_{LN}} \right) \cos(\theta - \phi)$$

La magnitud del voltaje en la barra de recepción está dada por

$$V_R = Z_{LD} I$$
$$V_R = \frac{1}{\sqrt{F}} \frac{Z_{LD}}{Z_{LN}} E_S \quad (3.3)$$

La potencia suministrada a la carga es

$$P_R = V_R I \cos(\phi)$$
$$P_R = \frac{Z_{LD}}{F} \left(\frac{E_S}{Z_{LN}} \right)^2 \cos(\phi) \quad (3.4)$$

Gráficas de I , V_R y P_R son mostradas en la Figura 3.7-2 en función de Z_{LN} / Z_{LD} , con $\tan(\theta)=10.0$ y $\cos(\phi)=0.95$. Para hacer los resultados aplicables para cualquier valor de Z_{LN} , los valores de I , V_R y P_R están apropiadamente normalizados.

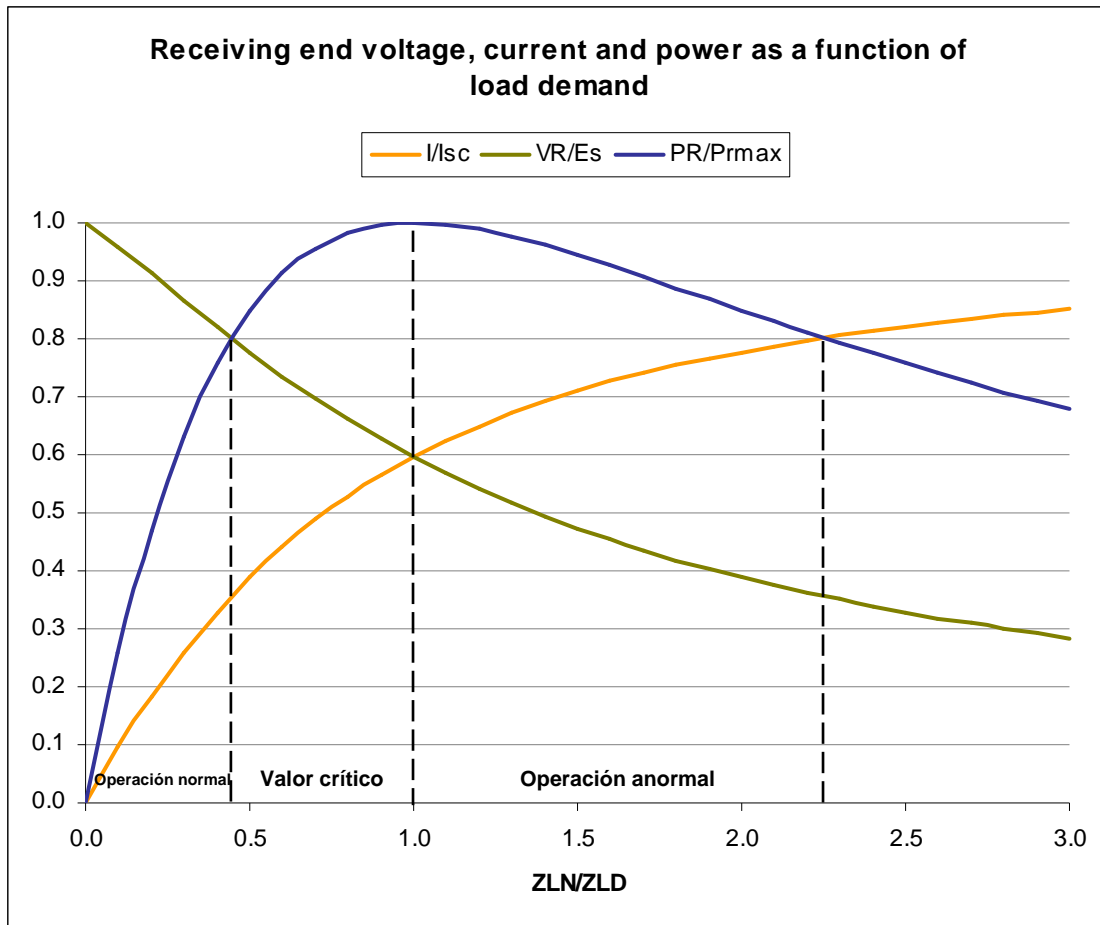


Figura 3.7-2. Voltaje de entrega, corriente y potencia en función de la demanda de carga para el sistema de la Figura 3.7-1

$$(I_{sc} = E_S / Z_{LN}; \cos(\phi) = 0.95 \text{ atraso}; \tan(\theta) = 10.0)$$

Cuando la demanda de carga se incrementa por decremento de Z_{LD} , P_R se incrementa rápidamente al inicio y luego lentamente antes de alcanzar su máximo, luego del cual decrece. Existe así un valor máximo de potencia activa que puede ser transmitida a través de una impedancia de una fuente de voltaje constante.

La potencia transmitida es máxima cuando la caída de voltaje en la línea es igual en magnitud a V_R , y esto es cuando $Z_{LN} / Z_{LD} = 1$. Cuando Z_{LD} se disminuye gradualmente, la corriente I se incrementa y V_R decrece. Inicialmente, en altos valores de Z_{LD} el incremento en la I domina sobre el decremento en V_R y por lo tanto P_R se incrementa rápidamente con el decremento de Z_{LD} . Cuando Z_{LD} se

aproxima a Z_{LN} , el efecto del decremento en la corriente es solo un poco mayor que aquel decremento en V_R . Cuando Z_{LD} es menor que Z_{LN} , el decremento en V_R domina sobre el incremento en la I , y el efecto neto es un decremento en P_R .

La condición de operación crítica corresponde a la máxima potencia que representa el límite de operación satisfactoria. Para una mayor demanda de carga, el control de potencia por variación de la carga sería inestable; esto es, un decremento en la impedancia de carga reduce la potencia. Si el voltaje se disminuyera progresivamente y el sistema llegara a ser inestable dependerá de las características de la carga. Con una característica de carga estática de impedancia constante, el sistema se estabiliza en niveles bajos de potencia y voltaje que los valores deseados. De otro lado, con una característica de carga de potencia constante, el sistema llegará a ser inestable a través del colapso voltaje de la barra de carga. Con otras características, el voltaje es determinado por la composición de características de la línea de transmisión y de la carga. Si la carga es suministrada por transformadores con cambiadores automáticos de taps bajo carga (ULTC), la acción del cambiador de tap tratará de elevar el voltaje en la carga. Esto tiene el efecto de reducir la Z_{LD} efectiva que ve el sistema. Y para bajos voltajes de V_R lleva a una reducción progresiva de voltaje. Ésta es pura y simplemente una clase de inestabilidad de voltaje.

Desde el punto de vista de estabilidad de voltaje, la relación entre P_R y V_R es de interés. Esto es mostrado en la Figura 3.7-3 para el sistema en consideración cuando el factor de potencia de la carga es igual a 0.95 en atraso.

De las ecuaciones 3.3 y 3.4, se puede observar que el factor de potencia de la carga tiene un efecto significativo en la característica potencia-voltaje del sistema. Esto es de esperarse debido a que la caída de voltaje en la línea de transmisión es función de la potencia activa así como también de la potencia reactiva transferida. La estabilidad de voltaje, de hecho, depende de la relación entre P , Q y V . La forma tradicional de la relación entre P y V , se muestra en la Figura 3.7-4. La localización del punto crítico de operación es mostrada por la línea punteada

en la Figura 3.7-4. Normalmente, solo los puntos de operación por encima del punto crítico representan condiciones satisfactorias de operación. Una repentina reducción en el factor de potencia (incremento de Q_R) puede así causar que el sistema cambie de una condición estable de operación a una insatisfactoria, y posiblemente inestable, esta condición se representa por la parte baja de la curva P-V.

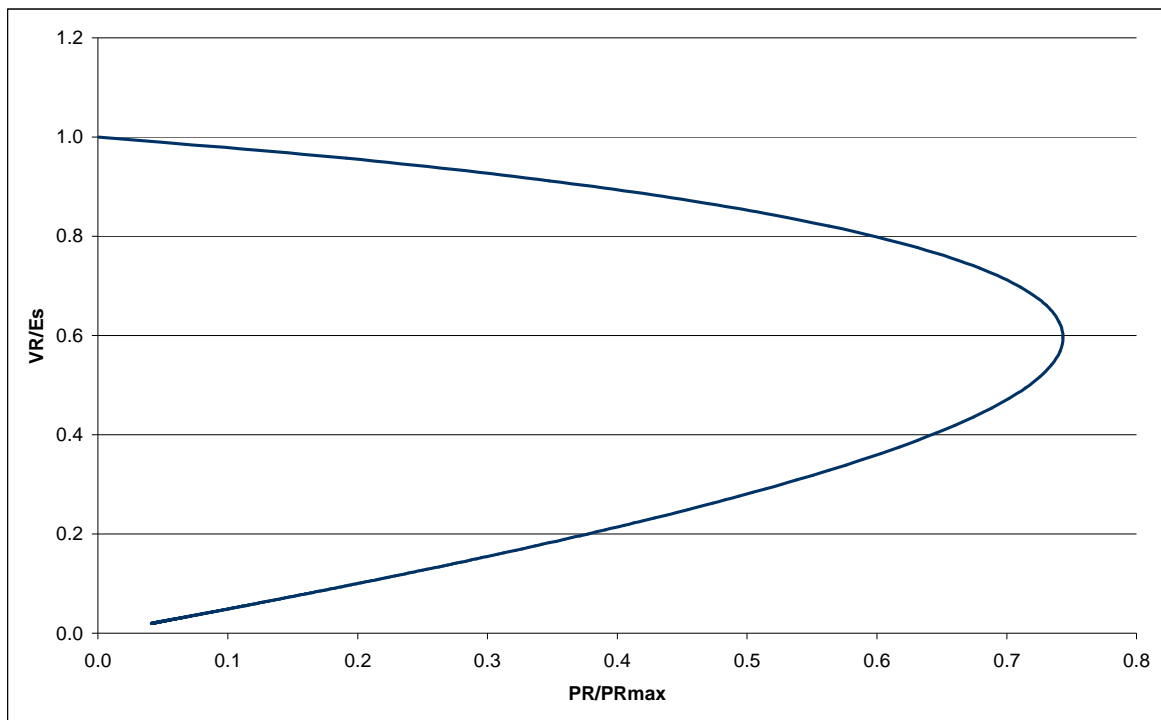


Figura 3.7-3. Característica potencia-voltaje del sistema de la Figura 3.7-1

$$(\cos(\phi) = 0.95 \text{ atraso}; \tan(\theta) = 10.0)$$

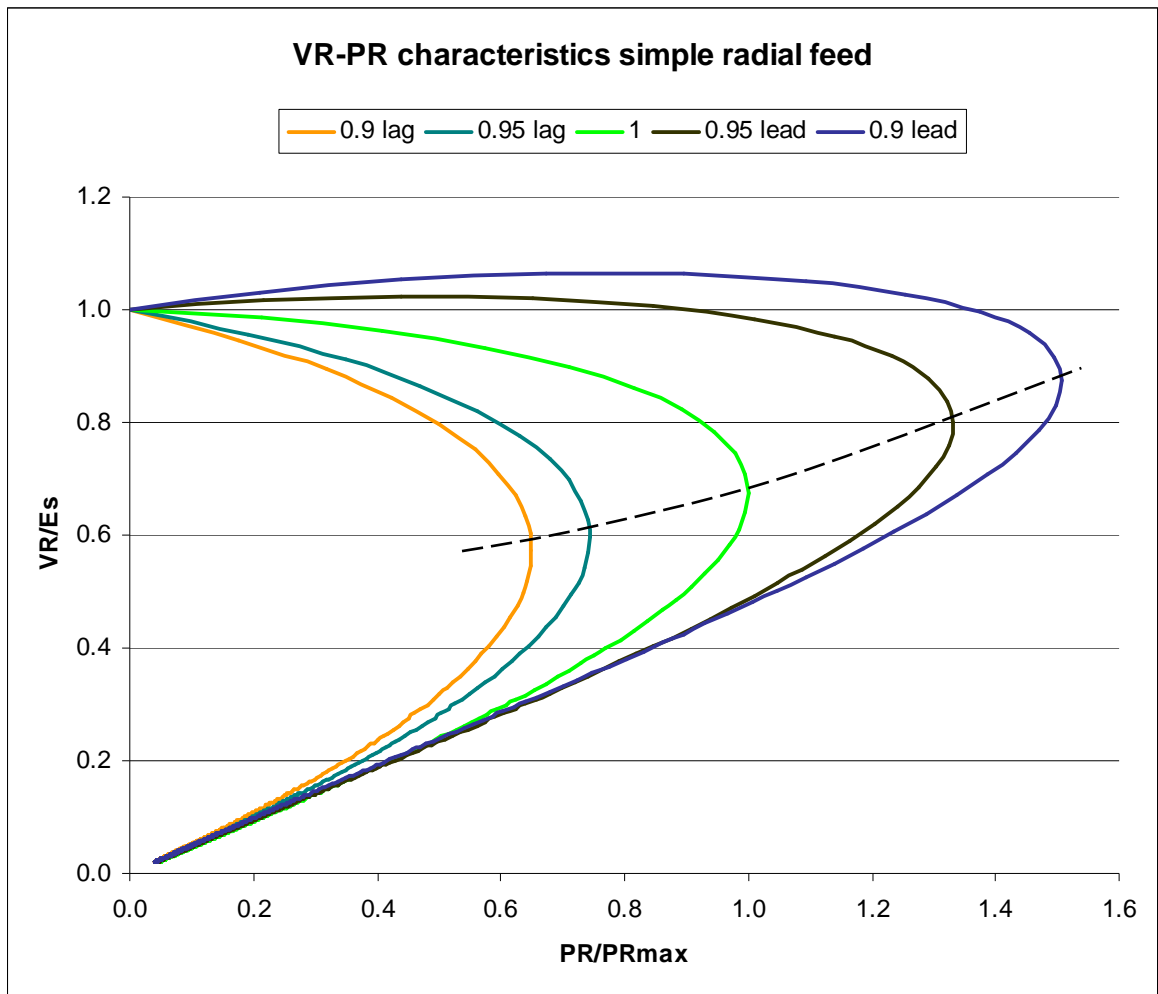


Figura 3.7-4 Características $P_R - V_R$ potencia-voltaje del sistema de la Figura 3.7-1 con diferentes factores de potencia

Capítulo 4

PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE POR EL MÉTODO DE CONTINUACIÓN

Una manera típica de aprender la operación de sistemas de potencia es por la modelación del sistema y simulación de su funcionamiento. Esto es posible debido al desarrollo de algoritmos matemáticos e interfaces gráficas con hardware dedicado y plataformas de software muy útiles en la presentación y entendimiento de conceptos matemáticos complejos.

4.1 MATLAB EN EL ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE POTENCIA

Matlab es un poderoso y versátil software de simulación, muy popular en la industria y academia. Fue diseñado originalmente para análisis numérico y control lineal de sistemas; por ello, es muy bien adaptado para manipulación de matrices numéricas. Sin embargo, debido a su flexibilidad en permitir programación directa y enlace a FORTRAN y rutinas C, el paquete ha crecido inmensamente, con muchas rutinas añadidas que permiten además simulaciones de sistemas no lineales. El mayor inconveniente de este programa es su tamaño y su relativa complejidad; toma algo de tiempo conseguir usar su lenguaje y llegar a ser familiar con algunas de las principales rutinas necesarias para simulaciones básicas. Las ecuaciones pueden ser manejadas en cierta forma y secuencia, requiriendo del usuario ser familiar con el fenómeno analizado, haciendo un tanto complejo para usuarios inexpertos [13].

Matlab es un entorno de cálculo el cual proporciona análisis numérico, cálculos matriciales e interfaces gráficas para usuarios. Además, existen varios toolboxes

que suministran soluciones de aplicación específicas en áreas como procesamiento de señal, diseño de sistemas de control, redes neuronales, sistemas de potencia, etc.

Tabla 4.1-1 Paquetes basados en Matlab para análisis de sistemas de potencia [14]

<i>Paquete</i>	PF	CPF	OPF	SSSA	TDS	EMT	GUI	CAD
<i>EST</i>	▲			▲	▲			▲
<i>MatEMTP</i>					▲	▲	▲	▲
<i>Matpower</i>	▲		▲					
<i>PAT</i>	▲			▲	▲			▲
<i>PSAT</i>	▲	▲	▲	▲	▲		▲	▲
<i>PST</i>	▲	▲		▲	▲			
<i>SPS</i>	▲			▲	▲	▲	▲	▲
<i>VST</i>	▲	▲		▲	▲		▲	

[14] La tabla 4.1-1 describe una comparación aproximada de los paquetes de software actuales basados en la plataforma de Matlab para el análisis y simulación de sistemas de potencia. Estos son:

1. Educational Simulation Tool (EST) [Vournas et al. 2004];
2. MatEMTP [Mahseredjian y Alvarado 1997];
3. Matpower [Zimmerman y Gan 1997];
4. Power System Toolbox (PST) [Chow y Cheung 1992, Chow 1991-1999, Chow 1991-1997];
5. Power Analysis Toolbox (PAT) [Schoder et al. 2003];
6. SimPowerSystems (SPS) [Sybille 2004];
7. Voltage Stability Toolbox (VST) [Chen et al. 1996, Nwankpa 2002].

Las características ilustradas en la tabla son flujo de potencia (PF Power Flow), continuación de flujo de potencia y/o análisis de estabilidad de voltaje (CPF-VS Continuation Power Flow – Voltage Stability), flujo óptimo de potencia (OPF Optimal Power Flow), análisis de estabilidad de pequeña señal (SSSA Small Signal Stability Analysis), simulación en el dominio del tiempo (TDS Time Domain Simulation) y transitorios electromagnéticos (EMT Electromagnetic Transient),

junto con algunas características “estéticas” como interfaz gráfica de usuario (GUI Graphical User Interface) y construcción de red gráfica (CAD).

4.2 PERSPECTIVA DEL PROGRAMA CPFepn

En estudios de estabilidad de voltaje en estado estable, el método de continuación (CPF) y métodos de optimización son las principales herramientas de análisis, y son usados para encontrar márgenes de estabilidad de voltaje y márgenes de cargabilidad del sistema. La técnica CPF involucra resolver una serie de cálculos de flujos de potencia con pasos de predicción y corrección. La técnica de optimización involucra resolver ecuaciones con condiciones necesarias basadas en una función objetivo y restricciones. Sin embargo, requiere un dedicado gran esfuerzo en crear el programa [15].

CPFepn simula flujos de potencia y CPF en estudios de estabilidad de voltaje en estado estable usando como plataforma de programación MATLAB.

El paquete computacional propuesto aplica las técnicas de flujo de potencia y la técnica de continuación. El flujo de potencia es simulado en primer lugar. Luego, el método aplica el proceso CPF.

Nota 1: *Se debe tener presente que el flujo de potencia y el método de continuación es modelado con barras: slack, PQ de generación y PQ de carga, introducidas en el capítulo 2, adicionalmente se prevé la implementación de barras PV sólo en el flujo de potencia, y hay que tener en cuenta que el orden es muy importante en la numeración de barras, ésta iniciará en 1 con la barra oscilante, a continuación irán todas las barras PQ desde 2 hasta n_{PQ} y finalmente seguirán las barras PV desde $n_{PQ} + 1$ hasta n_{PV} .*

Nota 2: *Los resultados de cálculo de flujo de potencia que se obtienen a través de *CPFepn* son únicamente de voltajes en módulo y ángulo, y además la potencia*

netas en las barras, por la concepción de que solo se necesitará observar los módulos de voltaje en cada barra.

4.2.1 Flujo de Potencia

El flujo de potencia consiste en resolver las ecuaciones de balance de potencia activa y reactiva en todas las barras del sistema de potencia. En base a esto, CPFepn puede calcular los voltajes (módulo y ángulo) en cada una de las barras. La función llamada “runPF” ejecuta el flujo de potencia de Newton Raphson descrito en el capítulo 2. Los pasos detrás del método, son:

1. Cargar datos, para lo cual se ha creado la función “cpfepn_data”, que lee el sistema de potencia de estudio en un formato específico creado para CPFepn, este formato está descrito en la Parte 4 del Anexo 1.

2. Resolver el flujo de potencia:

∞ Determinar la matriz de admitancia Y de barra.

∞ Iniciar con una suposición inicial, típicamente $V_i^0 = 1$, $\delta_i^0 = 0$, $Q_{Gi}^0 = 0$, $P_{slack}^0 = 0$, que se debe ingresar en la base de datos del SEP.

∞ En cada iteración k ($k = 0, 1, 2, \dots$), calcular el Jacobiano,

$$\left. \frac{\partial f}{\partial z} \right|_{z^k} = J_k = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_I}{\partial z_I} \right|_{z^k} & \dots & \left. \frac{\partial f_I}{\partial z_N} \right|_{z^k} \\ \vdots & & \vdots \\ \left. \frac{\partial f_N}{\partial z_I} \right|_{z^k} & \dots & \left. \frac{\partial f_N}{\partial z_N} \right|_{z^k} \end{bmatrix}$$

∞ Resolver el problema lineal

$$J_k \Delta z^k = -f(z^k)$$

es decir, encontrar Δz^k resolviendo este conjunto de ecuaciones lineales.

∞ Calcular la nueva suposición de la siguiente iteración

$$z^{k+1} = z^k + \alpha \Delta z^k$$

donde α es un control de paso constante ($0 < \alpha \leq 1$) que garantiza la convergencia, en *CPFepn* se usa $\alpha = 1$.

∞ Parar cuando

$$\|f(z^k)\| = \max |f_i(z^k)| \leq \varepsilon$$

$$\varepsilon = \min(\varepsilon_{\Delta P}, \varepsilon_{\Delta Q})$$

Esta técnica converge rápidamente, (típicamente en 4 – 5 iteraciones).

La figura 4.2.1-1 resume la metodología implementada en el flujo de potencia de *CPFepn*.

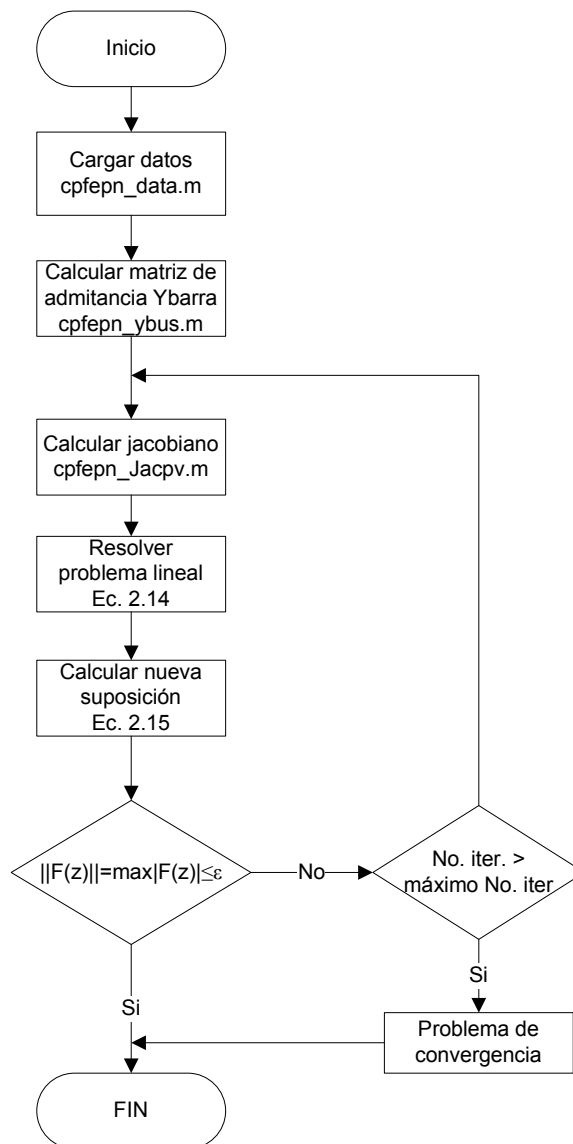


Figura 4.2.1-1 Algoritmo usado en el flujo de potencia de *CPFepn*.

“*cpfepn_data*”, se estructura de la siguiente manera,

1. Despliega la caja de diálogo estándar de apertura, en donde se elegirá la base de datos del sistema previamente almacenada en formato .xls o .m.
2. Si la base está en formato .xls, carga los datos al programa y se prevé guardar estos datos en un archivo .m para su posterior uso, ya que leer los datos en formato .m toma un tiempo considerablemente menor que su similar en .xls.
3. Y, por supuesto, si la base de datos está en formato .m simplemente carga los datos listos para simulación.

En el cálculo del Jacobiano, cálculo basado en la optimización descrita en el capítulo 2 e implementada en “*cpfepn_Jacpv*”, el primer paso es determinar la matriz de admitancia Y de barra, cuya función es nombrada como “*cpfepn_ybus*”, que considera el modelo π en líneas de transmisión, compensación paralela en cualquier barra del sistema, modelo π del transformador con taps en alto y bajo voltaje, si fuese el caso.

4.2.2 CONTINUACIÓN DE FLUJOS DE POTENCIA

El método de continuación, método general en el análisis de bifurcación, aplicado a flujos de potencia es básicamente una serie de cálculos de flujo de potencia con pasos de predicción, corrección y eventualmente parametrización, la parametrización puede ser usada para asegurar que el Jacobiano, en el punto de bifurcación sea no singular. El desarrollo de CPF es complicado y requiere de una buena habilidad en programación [15].

“*runCPF*” es la función encargada de resolver el método CPF, existen varias técnicas para implementar los pasos de predicción, corrección y parametrización, [3, 6, 7, 8, 9] como fue descrito en el capítulo 2.

CPFepn usa la técnica del vector tangente estándar en la predicción, con el inconveniente de la singularidad del Jacobiano en el punto de bifurcación, sin embargo, puesto que además se usa la técnica de la intersección perpendicular en la corrección con corte de paso la parametrización no es necesaria en la práctica [3, 4]. El método “naturalmente” lleva alrededor del punto de colapso, permitiendo trazar el lado “inestable” de la curva de equilibrio [3].

La figura 4.2.2-1 resume la metodología implementada en *CPFepn*.

4.2.3 Formulación de las Ecuaciones de Potencia

El análisis de bifurcación requiere que las ecuaciones de flujos de potencia sean reformuladas para incluir el parámetro de carga, λ :

$$F(z, \lambda) = 0$$

Esta reformulación puede ser llevada a cabo para expresar la carga y la generación en función del parámetro de carga, λ , como sigue:

$$P_G = P_{G_0} + \lambda P_{S_0}$$

$$P_L = P_{L_0} + \lambda P_{D_0}$$

$$Q_L = Q_{L_0} + \lambda Q_{D_0}$$

Donde P_{G_0} , P_{L_0} y Q_{L_0} son las potencias de generación y carga en el “caso base”, mientras que P_{S_0} , P_{D_0} y Q_{D_0} son las direcciones de potencia de generación y carga. Las direcciones de potencia son definidas en la base de datos del sistema de potencia objeto de estudio.

Ahora sí, al conjunto completo de ecuaciones algebraicas F , con $z = [\theta, V]^T$, puede ser entonces aplicado el método de continuación predicción-corrección [3] descrito:

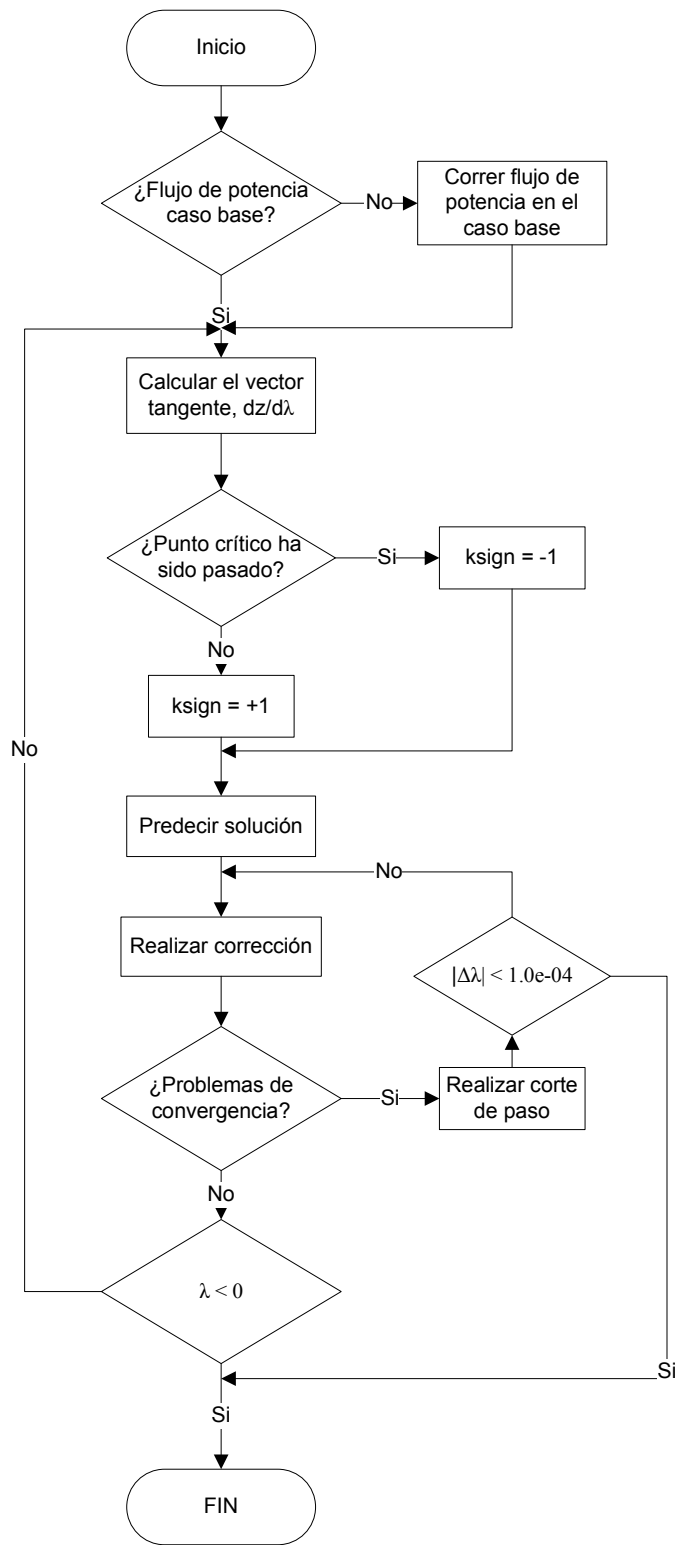


Figura 4.2.2-1 Algoritmo usado en *CPFepn*.

4.2.3.1 **Predicción:** De $F(z, \lambda) = 0$, se tiene que

$$D_z F(z_1, \lambda_1) \frac{dz}{d\lambda} \Big|_{\lambda_1} + \frac{\partial F}{\partial \lambda} \Big|_{\lambda_1} = 0$$

donde λ_1 y z_1 vienen de la iteración previa del método. La dirección Δz_1 en el punto de equilibrio (z_1, λ_1) puede encontrarse calculando el vector tangente a la trayectoria en aquel punto.

$$D_z F \Big|_{\lambda_1} \frac{dz}{d\lambda} \Big|_{\lambda_1} = - \frac{\partial F}{\partial \lambda} \Big|_{\lambda_1}$$

Aquí,

$$\Delta z_1 = \Delta \lambda_1 \frac{dz}{d\lambda} \Big|_{\lambda_1}$$

Donde el parámetro incremental $\Delta \lambda$ puede ser definido como función de una constante escalar k que controla el tamaño del paso de predicción y varía la velocidad en la que la curva de equilibrio es trazada; y un signo $k\text{sign} = \pm 1$, el cual determina el incremento o decremento de λ [16].

$$\Delta \lambda_1 = \frac{k\text{sign} \cdot k}{\left\| \frac{dz}{d\lambda} \Big|_{\lambda_1} \right\|}$$

k tiene un valor típico de 1 con buenos resultados reportados en [4], sin embargo en CPFepn se prefiere usar $k = 0.1$, para tener una curva de mejor aspecto desde que comienza a ser trazada.

$k\text{sign}$ inicialmente tiene el valor de +1 y una vez que el punto de bifurcación es pasado, punto que debe detectarse a través del cambio de signo en el determinante del Jacobiano del flujo de potencia, $k\text{sign}$ tomará el valor de -1.

4.2.3.2 **Corrección:** Encontrar la intersección entre el hiperplano perpendicular al vector tangente en el punto de equilibrio de la curva, es decir, resolviendo las ecuaciones

$$F(z, \lambda) = 0$$
$$\rho(z, \lambda) = \Delta z_1^T (z - z_1 - \Delta z_1) + \Delta \lambda_1 (\lambda - \lambda_1 - \Delta \lambda_1)$$

Inicialmente, $z = z_1 + \Delta z$ y $\lambda = \lambda_1 + \Delta \lambda_1$, resolver este conjunto de ecuaciones toma usualmente una u dos iteraciones. Aunque, si el proceso tiene problemas de convergencia, los pasos Δz y $\Delta \lambda$ deben ser cortados a la mitad hasta que la convergencia sea lograda. Cuando $|\Delta \lambda|$ es cortada menos que una cierta tolerancia (típicamente 10^{-4}) se opta por dar por finalizado el programa, y un mensaje sugiere disminuir k en el paso de predicción para repetir nuevamente el proceso predicción-corrección.

Nota 3: Cuando se ha realizado una corrida de flujos de potencia se habilita la opción de crear un reporte de resultados (Nota 2), en formato *.xls en la Hoja PFepn_reporte, si adicionalmente se corrió el método de continuación de flujos de potencia se creará la Hoja CPFepn_reporte.

Una vez presentada la parte teórica – técnica usada en *CPFepn*, en el Anexo 1, está el manual del usuario en donde se da una explicación detallada (escrita y gráfica) de la forma de la operabilidad de esta herramienta computacional, además se explica el formato de cómo debe escribirse la base de datos del sistema de potencia objeto de estudio.

Capítulo 5

APLICACIONES DEL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE

En este capítulo se someten a comparación los resultados obtenidos en *CPFepn* “Continuation Power Flow Escuela Politécnica Nacional” con *PSAT* “Power System Analysis Toolbox” situándolos en un contexto equiparable, a través del análisis de un sistema de potencia de dos barras. Se presentan dos casos de prueba de un sistema de tres barras y el sistema WSCC de tres máquinas, nueve barras. Finalmente, *CPFepn* es usado para simular el Sistema Nacional Interconectado (SNI) y se discuten los resultados obtenidos en el análisis de bifurcación.

5.1 SISTEMA DE DOS BARRAS

Considere el generador conectado a una barra de carga a través de una línea de transmisión como se muestra en la Fig. 5.1-1.

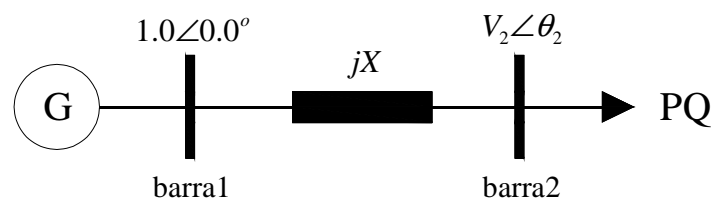


Figura 5.1-1 Sistema simple, barra de carga PQ con f.p. constante alimentada por una barra oscilante.

Para el sistema de la Fig. 5.1-1 se escogen valores en p.u. “típicos”: $X = 0.1$, $P_{L_0} = 1.0$, $Q_{L_0} = 0.5$ ($\cos(\phi) = 0.8944 \approx 0.9$). El incremento en la dirección de carga se escoge de acuerdo a la condición inicial de carga, así: $P_D = 1.0$, $Q_D = 0.5$. El

sistema es entonces conducido desde una condición inicial de operación hasta el punto de bifurcación por la variación del parámetro de continuación λ .

Se establece la configuración pertinente en cada software:

PSAT V. 2.0.0

Power Flow

PF tolerance	1e-005
Max PF iterations	20
Robust Power Flow	

Continuation Power Flow

Corrector step tolerance	1e-005
Step size control	0.05
Number of points	200
Initial loading param.	0
Corrector Step Method	Perpendicular Intersection

CPFepn V. 1.0

Flujo de Potencia

Mismatch potencia activa	1e-005
Mismatch potencia reactiva	1e-005
Número máximo de iteraciones	20
Newton – Raphson	

Continuación de Flujos de Potencia

Control tamaño de paso de predicción	0.05
Parámetro de carga inicial	0
Número de puntos	200
Predicción tangente estándar	
Corrección intersección perpendicular	

Con la ayuda de *CPFepn* se procede a la modelación y simulación del sistema de potencia de dos barras propuesto obteniendo los siguientes resultados.

Flujo de Potencia

Tabla 5.1-1 Voltajes en barra obtenidos del flujo de potencia *CPFepn*

Nombre Barra	Voltaje [p.u.]	Angulo [deg]	P_neta [p.u.]	Q_neta [p.u.]
<i>barra1</i>	1.00000	0.00000	1.00000	0.64110
<i>barra2</i>	0.94122	-6.09892	-1.00000	-0.50000

Tabla 5.1-2 Estadística de solución de flujo de potencia *CPFepn*

Número de iteraciones : 4
Tiempo transcurrido [s] : 0
Potencia base [MVA] : 100

Continuación de Flujos de Potencia

Solución en el punto de bifurcación

Tabla 5.1-3 Voltajes críticos en barra obtenidos de *CPFepn*

Nombre Barra	V_crítico [p.u.]	Angulo [deg]	P_neta [p.u.]	Q_neta [p.u.]
<i>barra1</i>	1.00000	0.00000	3.08875	4.87386
<i>barra2</i>	0.59848	-31.07099	-3.08875	-1.54437

Tabla 5.1-4 Estadística de solución de *CPFepn*

Número de pasos/iter : 25
Tiempo transcurrido [s] : 0.109
Lambda crítico en p.u. : 2.0884659
Potencia base [MVA] : 100

Gráficas

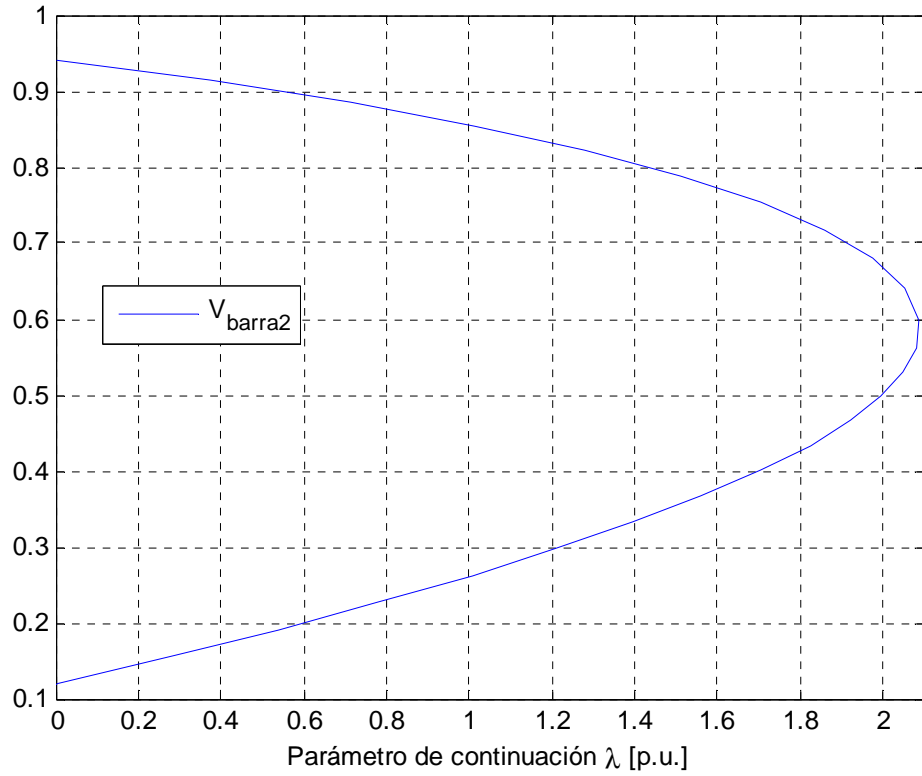


Figura 5.1-2 Curva P-V para la barra2, *CPFepn*

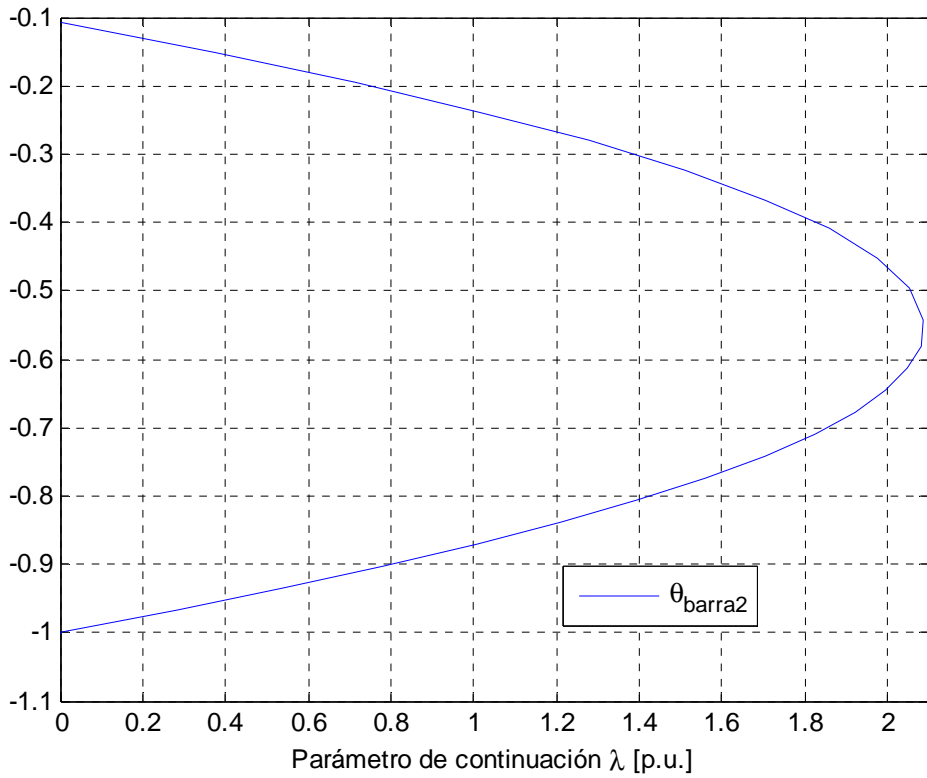


Figura 5.1-3 θ_{barra2} vs. parámetro de continuación, *CPFepn*

Con la ayuda de PSAT Versión 2.0.0 se procede a la modelación y simulación del sistema de potencia de dos barras propuesto obteniendo los siguientes resultados.

Modelo Sistema de Dos Barras

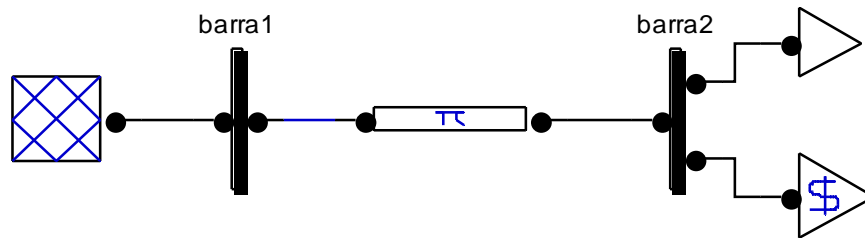


Figura 5.1-4 Sistema simple dos barras, modelación en PSAT

Flujo de Potencia

Tabla 5.1-5 Voltajes en barra obtenidos del flujo de potencia PSAT

Nombre Barra	Voltaje [p.u.]	Angulo [deg]	P_neta [p.u.]	Q_neta [p.u.]
barra1	1.00000	0.00000	0.99998	0.64109
barra2	0.94122	-6.09880	-1.00000	-0.50000

Tabla 5.1-6 Estadística de solución de flujo de potencia PSAT

ESTADÍSTICA DE SOLUCIÓN	
Número de iteraciones :	9
Tiempo transcurrido [s] :	0.156
Potencia base [MVA] :	100

Continuación de Flujos de Potencia

Solución en el punto de bifurcación

Tabla 5.1-7 Voltajes críticos en barra obtenidos de *PSAT*

Nombre Barra	V_crítico [p.u.]	Angulo [deg]
barra1	1.00000	0.00000
barra2	0.60114	-30.90921

Tabla 5.1-8 Estadística de solución de *PSAT*

ESTADÍSTICA DE SOLUCION	
Número de pasos/iter	: 32
Tiempo transcurrido [s]	: 1.063
Lambda crítico en p.u.	: 2.08794516
Potencia base [MVA]	: 100

Gráficas

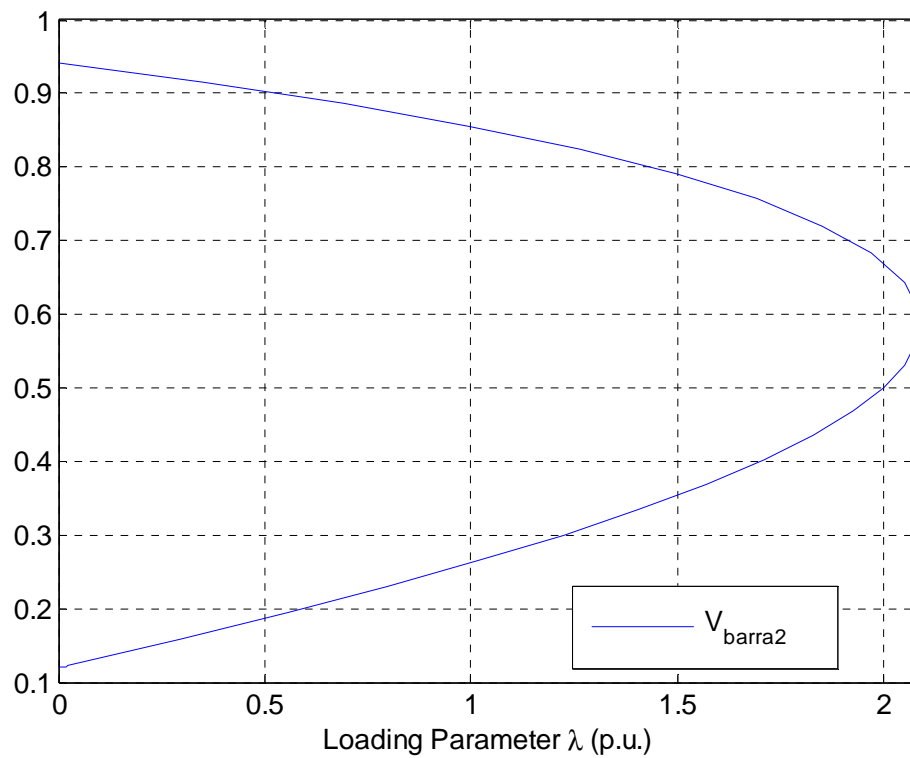


Figura 5.1-5 Curva P-V para la barra2, *PSAT*

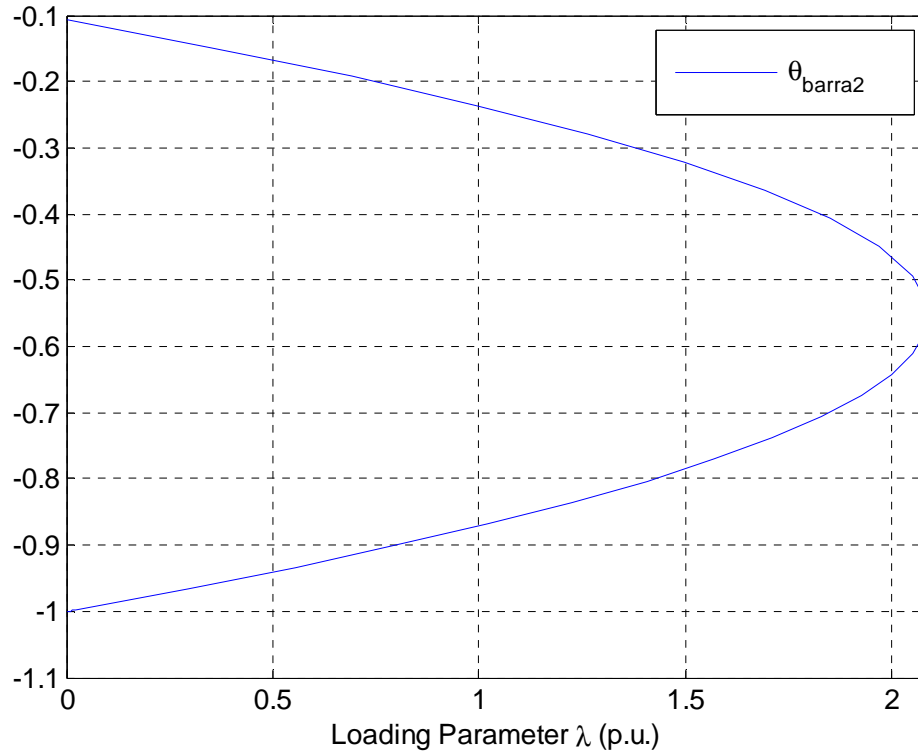


Figura 5.1-6 θ_{barra2} vs. parámetro de continuación, *PSAT*

5.2 COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON *PSAT* V. 2.0.0

Para ilustrar que los resultados obtenidos usando *CPFepn* V. 1.0 están bastante cercanos a los resultados usando *PSAT* V. 2.0.0, se define el siguiente error relativo:

$$\mathcal{E} = \frac{|X_{\text{CPFepn}} - X_{\text{PSAT}}|}{|X_{\text{CPFepn}}|}$$

donde X_{CPFepn} representa cualquier variable calculada en *CPFepn* y X_{PSAT} representa su variable correspondiente para ser comparada.

La tabla 5.1-9 presenta el error relativo en porcentaje, evaluado para el voltaje en barra2, parámetro de continuación, mientras que para el número de iteraciones,

número de pasos y tiempo transcurrido en obtener la solución, tiene una evaluación cualitativa como se muestra más abajo.

Tabla 5.1-9 Comparación de resultados *CPFepn* - *PSAT*

VARIABLE	CPFepn	PSAT	ε [%]
FLUJO DE POTENCIA			
Módulo de Voltaje barra2	0.94122	0.94122	0
Ángulo de Voltaje barra2	-6.09892	-6.0988	0.001968
Número de iteraciones	4	9	-
Tiempo transcurrido	0	0.156	-
CONTINUACION DE FLUJOS DE POTENCIA			
Solución en el punto de colapso			
Parámetro de continuación	2.08874	2.087945	0.038054
Módulo de Voltaje barra2	0.59848	0.60114	0.444459
Ángulo de Voltaje barra2	-31.07099	-30.90921	0.520679
Número de pasos	25	32	-
Tiempo transcurrido	0.109	1.063	-

El error relativo evaluado muestra que los cálculos obtenidos con *CPFepn* V. 1.0 se mantienen bastante cercanos a los valores calculados usando *PSAT* V. 2.0.0. Esto indica que los resultados alcanzados son prácticamente iguales.

Sin embargo, la ventaja de *CPFepn* es que la solución, en sistemas pequeños, se obtiene en tiempos considerablemente menores que con *PSAT*, y la curva P-V, en sistemas pequeños (o grandes), trazada con *CPFepn* es obtenida con un menor número de puntos de equilibrio y de mejor aspecto.

Cabe hacer notar que si la implementación de *CPFepn* hubiese sido hecha considerando límites, los tiempos de cálculo se incrementarían significativamente.

5.3 SISTEMA DE TRES BARRAS

Considere el modelo mostrado en la Fig. 5.3-1. La dirección de carga se plantea en tres casos, en todos ellos se determina un crecimiento del 100%, con lo que las ecuaciones:

$$P_L = P_{L_0} + \lambda P_{D_0} \text{ y } Q_L = Q_{L_0} + \lambda Q_{D_0}$$

con

$$P_{D_0} = P_{L_0} \text{ y } Q_{D_0} = Q_{L_0}$$

quedan

$$P_L = (1 + \lambda)P_{L_0} \text{ y } Q_L = (1 + \lambda)Q_{L_0}$$

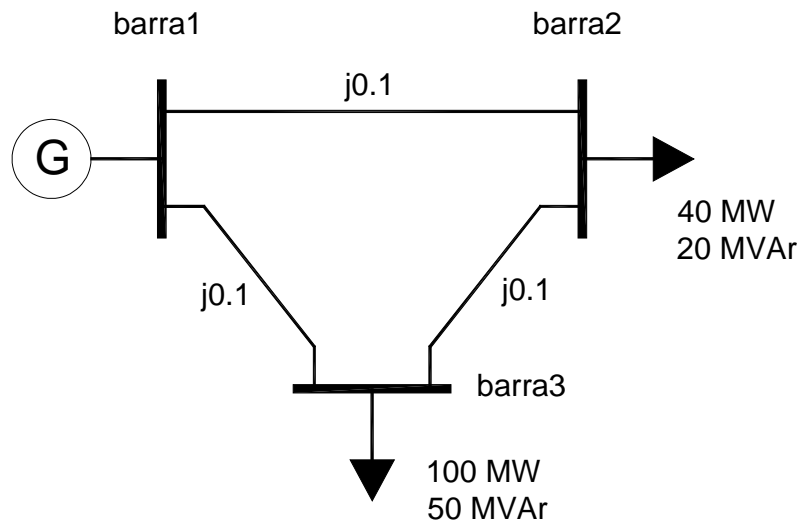


Figura 5.3-1 Sistema de tres barras: barra oscilante y dos barras de carga.

En la Tabla 5.3-1 se presenta el caso base y los tres casos de dirección de carga de prueba propuestos.

Tabla 5.3-1 Tres barras: barra oscilante y dos barras de carga, caso base y direcciones de carga propuestos

Barra	CASO BASE		CASO 1		CASO 2		CASO 3	
	PL0+jQL0		PD1+jQD1		PD2+jQD2		PD3+jQD3	
	[MW]	[MVar]	[MW]	[MVar]	[MW]	[MVar]	[MW]	[MVar]
barra2	40.00	20.00	40.00	20.00	0.00	0.00	40.00	20.00
barra3	100.00	50.00	0.00	0.00	100.00	50.00	100.00	50.00

Para los tres casos se presentan a continuación las curvas PV, Fig. 5.3-2 a Fig. 5.3-4, en las cuales, para cada caso se han dibujado en una misma gráfica el voltaje en p.u. de las tres barras versus el parámetro de continuación λ en p.u.

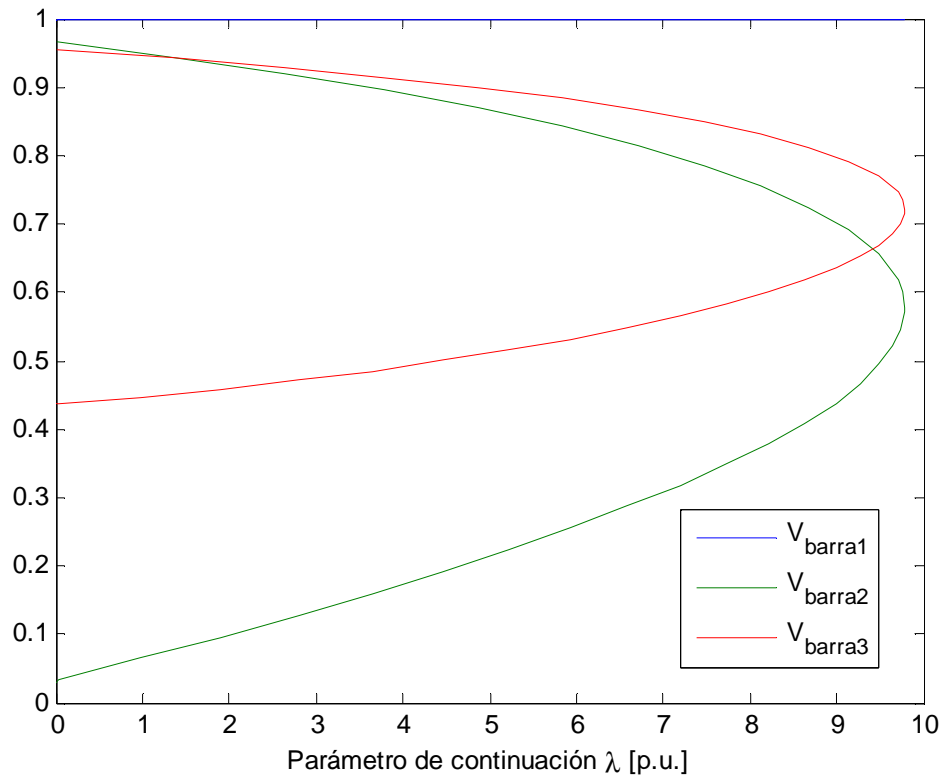


Figura 5.3-2 V vs. λ , sistema de tres barras, caso 1.

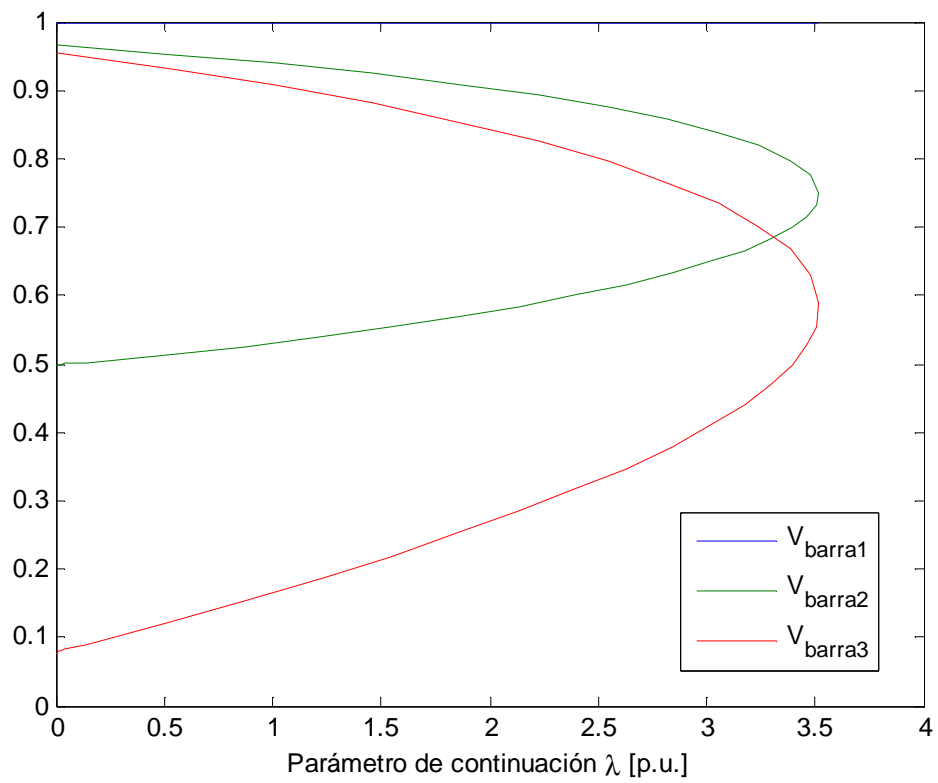


Figura 5.3-3 V vs. λ , sistema de tres barras, caso 2.

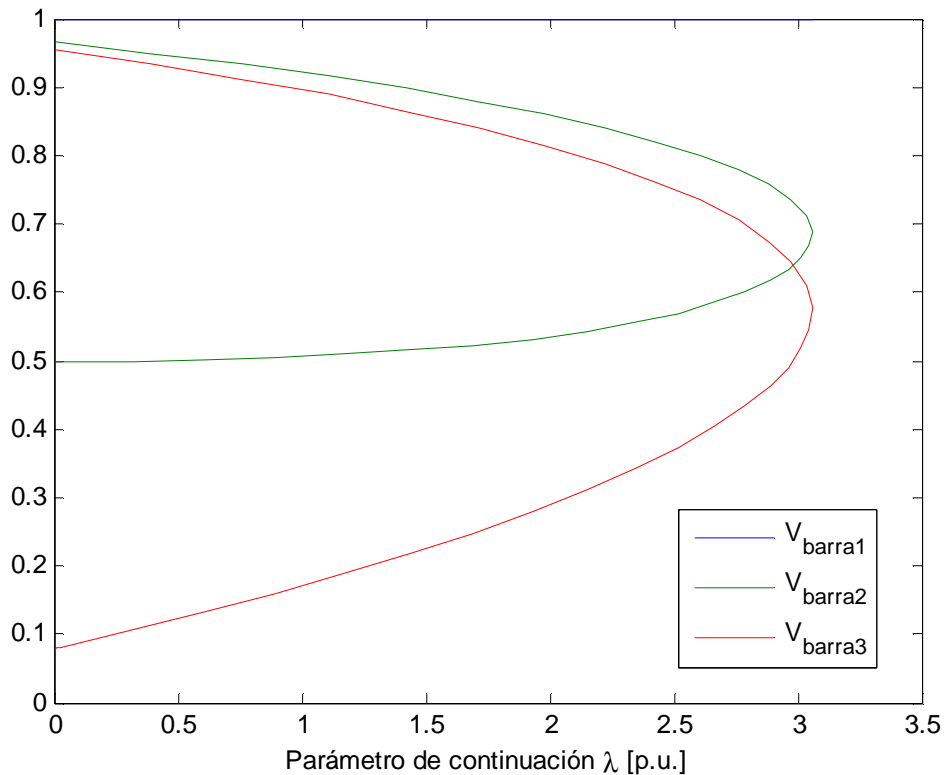


Figura 5.3-4 V vs. λ , sistema de tres barras, caso 3.

Resultados, análisis y comentarios:

Como se puede apreciar este sistema de tres barras es mallado, con impedancias de línea iguales, así que el colapso de voltaje estará dado por la barra, en la medida en que cualquiera de sus cargas crezca más una respecto a otra, según una dirección dada.

La dirección que se ha asignado es del 100% de la carga inicial, escogida de acuerdo a los casos 1 a 3 planteados.

La carga inicial en la barra2 es casi la mitad de la carga inicial de la barra3, así que cuando se asigna la dirección de carga en el caso 1, se nota que tiene una cargabilidad máxima λ_{max} de 9.779 p.u., como era de esperarse esta cargabilidad es la mayor en los tres casos, ya que la tendencia de crecimiento total del sistema de carga es menor.

En el caso 2, se plantea el crecimiento de carga solo en la barra3, así que el colapso de voltaje llega a causa de la carga de esta barra, en donde la máxima cargabilidad λ_{\max} es de 3.5169 p.u., y se puede notar que como la carga inicial es mayor de las dos barras y además su dirección es notablemente alta, tiene un menor parámetro λ , que el caso 1.

Para el caso 3, la dirección de carga está dada por el crecimiento en las dos barras de carga, así que esta es la peor condición posible, como se puede apreciar tiene una cargabilidad λ_{\max} de 3.0565 p.u., que es la menor en los tres casos.

En un sistema real, el crecimiento de carga, no viene dado únicamente por una sola barra del sistema, sino que este crecimiento es gradual y con diferentes porcentajes, además con diferente factor de potencia. La barra o barras que lleven al colapso de voltaje, pueden ser por ejemplo, barras de carga en ramas radiales, en donde no exista un soporte de potencia reactiva; los ULTCs también son responsables de llevar a un colapso de voltaje.

5.4 SISTEMA DE NUEVE BARRAS

Este ejemplo considera el modelo multi-máquina WSCC de nueve barras Fig. 5.4-1, modelado de acuerdo a los requerimientos y capacidades de *CPFepn*, las cargas son de potencia constante, la barra slack es la 1, y se consideran las barras PV 8 y 9 para la solución del flujo de potencia. El método de continuación considerará luego a estas barras PV como barras PQ de generación con potencia P_G y Q_G obtenidas del cálculo del flujo de potencia inicial.

Se presenta un solo caso de estudio, este escenario será de un crecimiento del 100% en todas las barras de carga y de un crecimiento de un 20% en la potencia activa en las barras de generación, excepto la slack, por supuesto.

Los datos del sistema de transmisión están dados en la Tabla 5.4-1, y en la Tabla 5.4-2 se presenta el caso base y la dirección de carga propuesta.

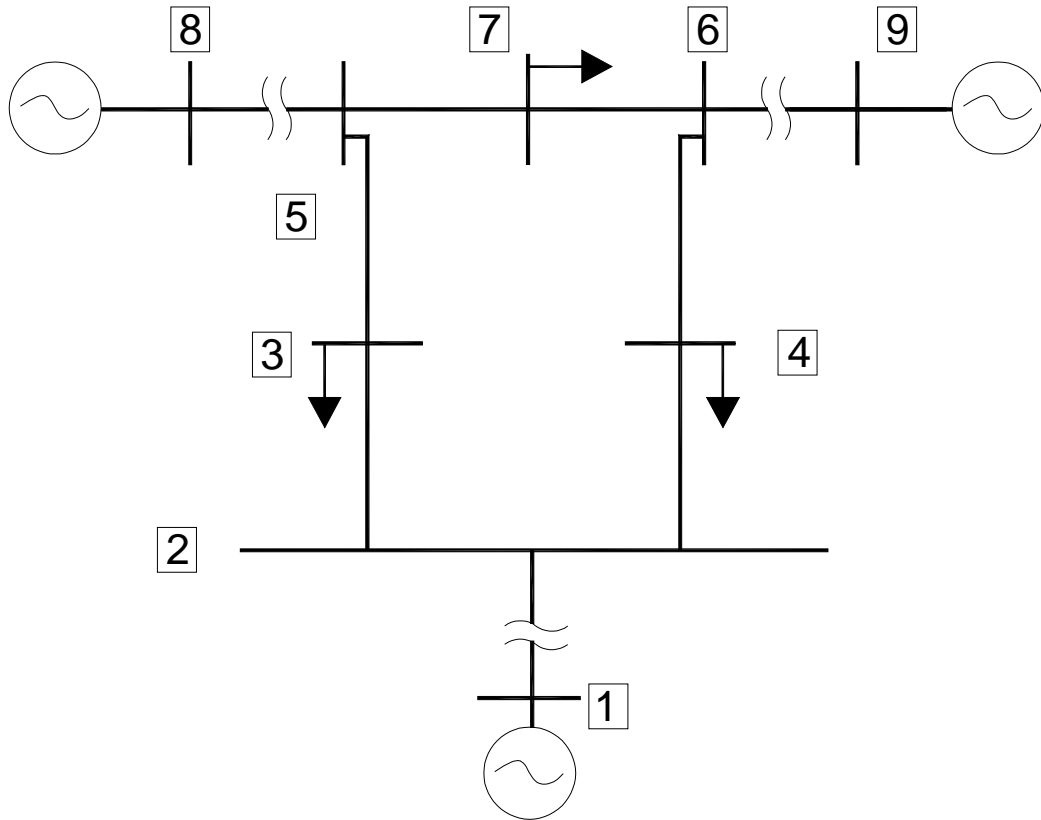


Figura 5.4-1 Sistema WSCC de tres máquinas, nueve barras.

Tabla 5.4-1 Datos del sistema de transmisión, nueve barras

FROM	TO	CIRCUITS	TYPE	Línea de transmisión			Transformador		Lado 1 Trafo		Lado 2 Trafo	
				R	X	B	TAP_n1	TAP_n2	r1	x1	r2	x2
1	2	1	1	0	0	0	1	1	0	0.0576	0	0
2	3	1	0	0.01	0.085	0.176	0	0	0	0	0	0
2	4	1	0	0.017	0.092	0.158	0	0	0	0	0	0
3	5	1	0	0.032	0.161	0.306	0	0	0	0	0	0
4	6	1	0	0.039	0.17	0.358	0	0	0	0	0	0
5	7	1	0	0.0085	0.072	0.149	0	0	0	0	0	0
5	8	1	1	0	0	0	1	1	0	0.0625	0	0
6	7	1	0	0.0119	0.1008	0.209	0	0	0	0	0	0
6	9	1	1	0	0	0	1	1	0	0.0586	0	0

Tabla 5.4-2 Caso base y dirección de carga propuesta, nueve barras.

BUS_No	V_pu_in guess	LOAD_ MW	LOAD_ MVar	GEN_ MW	GEN_ MVar	LOAD_ dir_MW	LOAD_ dir_MV Ar	GEN_dir _MW
1	1.04	0	0	71.6	27	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0	0
3	1	125	50	0	0	125	50	0
4	1	90	30	0	0	90	30	0
5	1	0	0	0	0	0	0	0
6	1	0	0	0	0	0	0	0
7	1	100	35	0	0	100	35	0
8	1.0251	0	0	163	0	0	0	32.6
9	1.025	0	0	85	0	0	0	17

A continuación de la Fig. 5.4-2 a la Fig. 5.4-4 se presentan las curvas PV obtenidas.

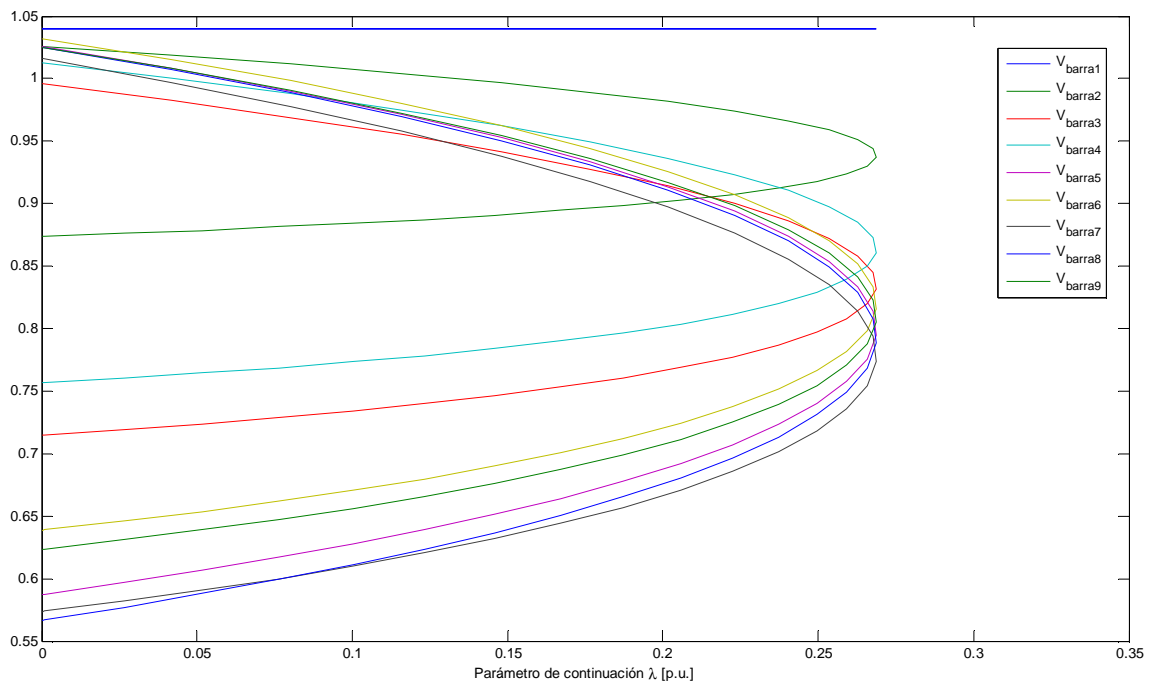


Figura 5.4-2 Curvas P-V, sistema de nueve barras.

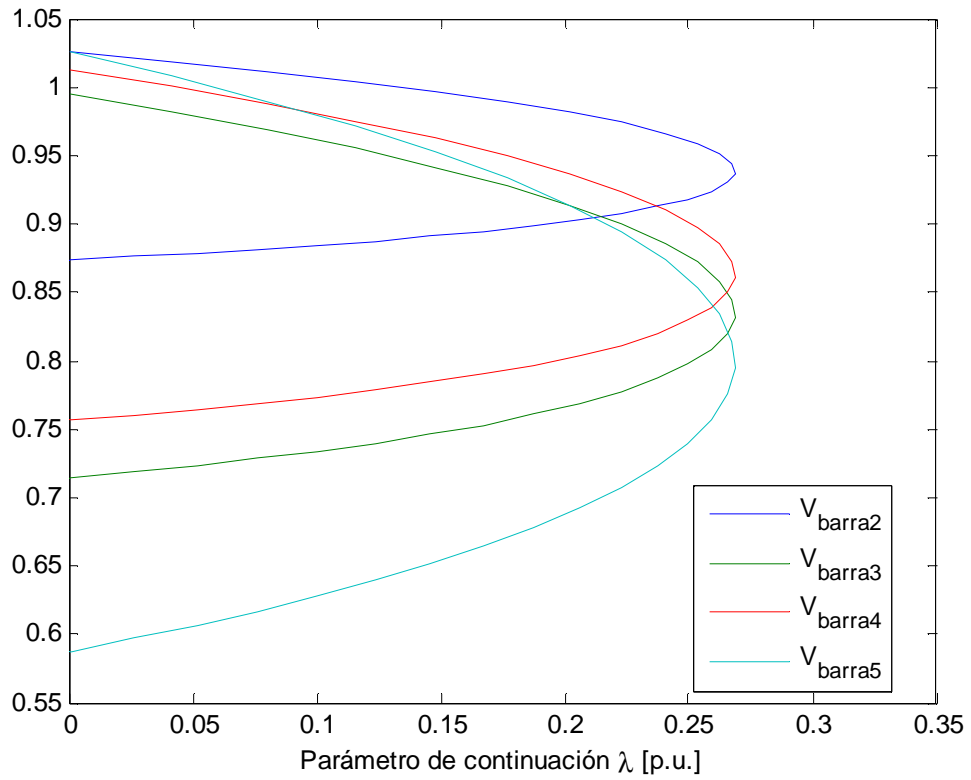


Figura 5.4-3 Curvas P-V, sistema de nueve barras, barras de 2 a 5

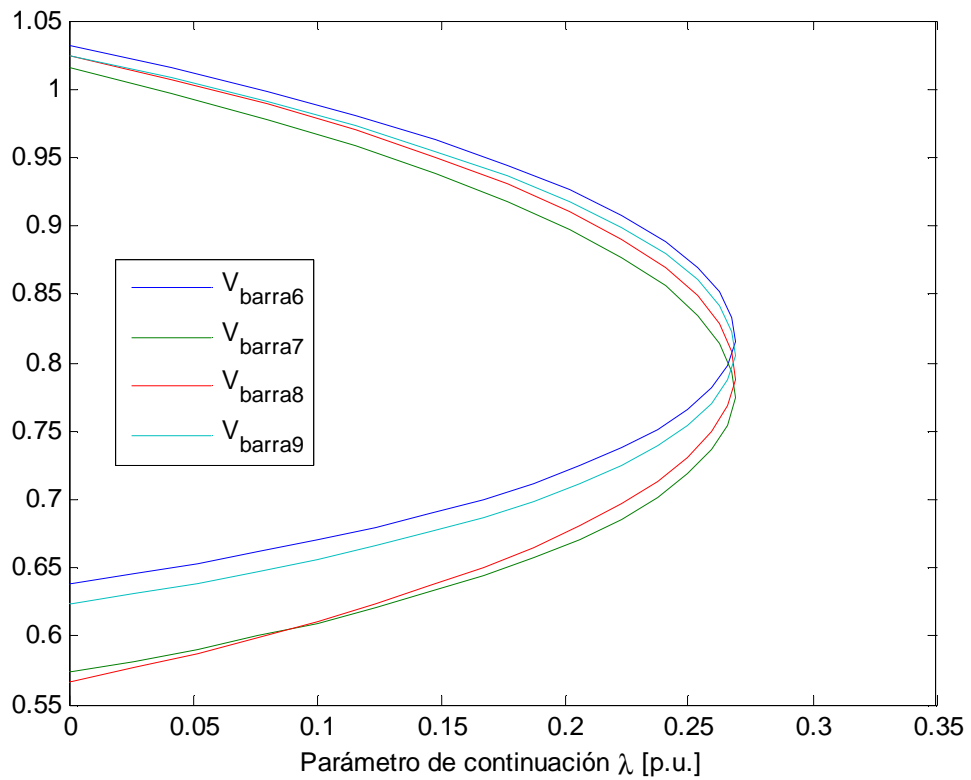


Figura 5.4-4 Curvas P-V, sistema de nueve barras, barras de 6 a 9

Resultados, análisis y comentarios:

La dirección que se ha asignado es del 100% de la carga inicial, escogida de acuerdo al caso planteado, la cargabilidad máxima λ_{\max} es de 0.26855 p.u. Los voltajes obtenidos en el punto de máxima cargabilidad están dados, en la Tabla 5.4-3. Aquí, la barra7 es la que tiene un menor voltaje en el punto de colapso.

Tabla 5.4-3 Voltajes en barra cuando $\lambda = \lambda_{\max}$

Barra	V_crítico[p.u.]	Ángulo [deg]
barra1	1.04	0
barra2	0.93703	-5.066987
barra3	0.83203	-9.499164
barra4	0.86098	-8.557863
barra5	0.79462	2.551127
barra6	0.81549	-0.344008
barra7	0.77389	-3.436836
barra8	0.78818	12.42023
barra9	0.80495	4.241974

Las curvas PV obtenidas en los ejemplos propuestos brindan una apreciación muy buena para que el operador pueda tomar las debidas acciones correctivas con el fin de poder evitar llegar al punto de colapso.

5.5 ESTABILIDAD DE VOLTAJE DEL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO

5.5.1 PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA

En la práctica, el problema de estabilidad de voltaje ocurre en redes de gran tamaño; siendo necesario muchas veces el desarrollo de un estudio previo que permita evaluar los sectores de la red más sensibles a posibles problemas de colapso de voltaje con el objetivo de reducir la red a una de menor tamaño a fin de realizar un estudio práctico del sistema como la que se propone en [9]. Las metodologías necesarias para esta evaluación escapan a los objetivos de este

proyecto de titulación, ya que lo que se pretende es iniciar en el estudio de la teoría de bifurcación con el análisis de la técnica de continuación de manera analítica, a través de un programa “básico” desarrollado en Matlab, razón por la cual se utilizará como sistema de estudio la red mostrada en la Fig. 5.5-1, la cual corresponde a la modelación del anillo de 230kV del Sistema Nacional Interconectado SNI ecuatoriano [17].

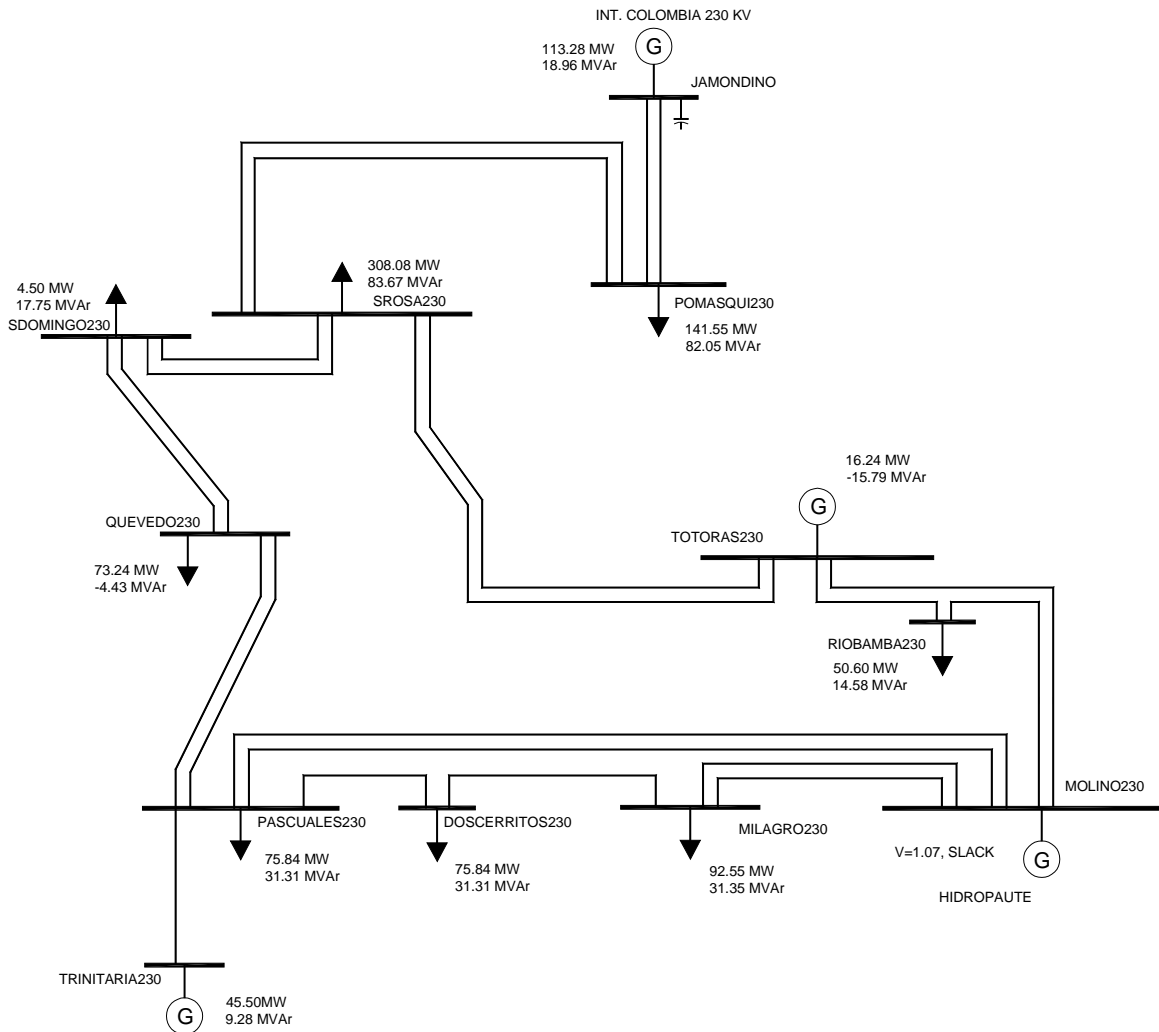


FIGURA 5.5-1 SNI, diagrama unifilar, anillo de 230kV

Se considera que el sistema está fuertemente cargado (demanda máxima), con una compensación de potencia reactiva en la barra de JAMONDINO. La Tabla 5.5-1 muestra el caso base a partir del cual se escogerá una dirección de potencia en cada uno de los escenarios propuestos.

Tabla 5.5-1 SNI, anillo de 230kV caso base

No. Barra	Nombre	Carga		Generación		Comp.
		[MW]	[MVA _r]	[MW]	[MVA _r]	[MVA _r]
1	MOLINO230	0.00	0.00	SLACK		0.00
2	RIOBAMBA230	50.60	14.58	0.00	0.00	0.00
3	TOTORAS230	0.00	0.00	16.24	-15.79	0.00
4	SROSA230	308.08	83.67	0.00	0.00	0.00
5	SDOMINGO230	4.50	17.75	0.00	0.00	0.00
6	POMASQUI230	141.55	82.05	0.00	0.00	0.00
7	QUEVEDO230	73.24	-4.43	0.00	0.00	0.00
8	JAMONDINO	0.00	0.00	113.28	18.96	40.00
9	PASCUALES230	291.87	132.95	0.00	0.00	0.00
10	DOSCERRITOS230	75.84	31.31	0.00	0.00	0.00
11	TRINITARIA230	0.00	0.00	45.50	9.28	0.00
12	MILAGRO230	92.55	31.35	0.00	0.00	0.00

5.5.2 Escenarios de prueba

Los siguientes casos han sido estudiados en la red de 12 barras del SNI:

Escenario 1: Crecimiento del 6% en la barra de carga PASCUALES230, respecto de su condición base.

Escenario 2: Todas las barras de carga crecen 5% de su condición inicial.

Escenario 3: Se prevé un crecimiento diferente en cada barra de carga, considerando que el mayor crecimiento está en las barras correspondientes a la CATEG, seguido de la EEQSA y en menor porcentaje las restantes barras, de acuerdo a [18].

El margen de cargabilidad máximo para los Escenarios 1-3 está mostrado en la Tabla 5.5-2. De la Tabla 5.5-2, puede verse claramente que la barra de POMASQUI230 es la que tiene un menor voltaje en el punto de colapso.

Tabla 5.5-2 Máxima cargabilidad en el SNI de 12 barras

Escenario	Máxima Cargabilidad λ máx	Magnitud de voltaje más bajo en el punto de máxima cargabilidad	Barra del menor voltaje
No.	[p.u.]	[p.u.]	nombre
1	15.4655	0.7324	POMASQUI230
2	2.924	0.7464	POMASQUI230
3	1.811	0.7534	POMASQUI230

Las figuras 5.5-2 a 5.5-10 muestran perfiles de voltaje para el sistema de prueba, en los escenarios propuestos.

Escenario 1.

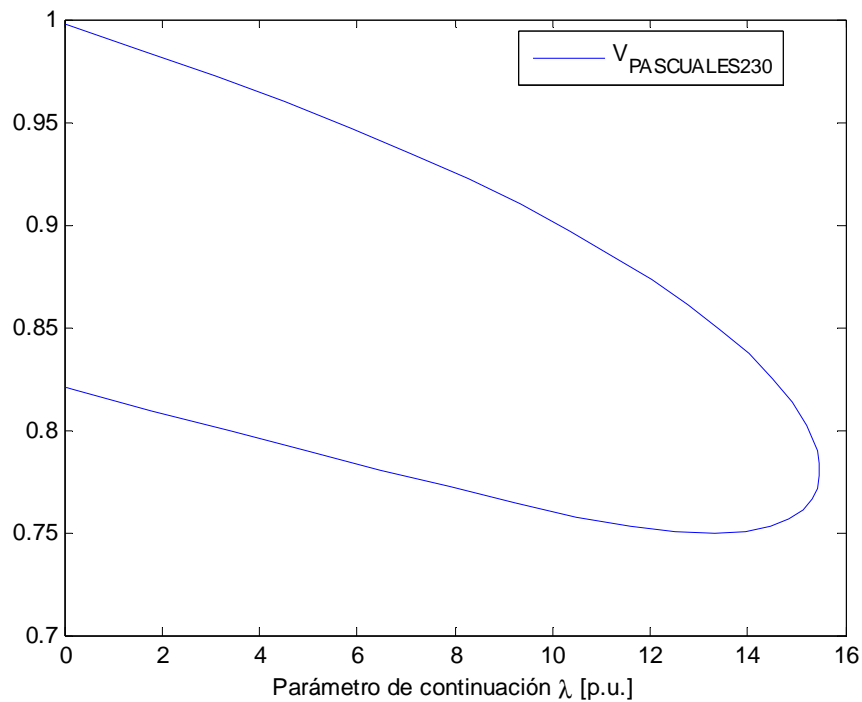


Figura 5.5-2 Curva P-V en la barra considerada para $S_D = 0.05S_0$

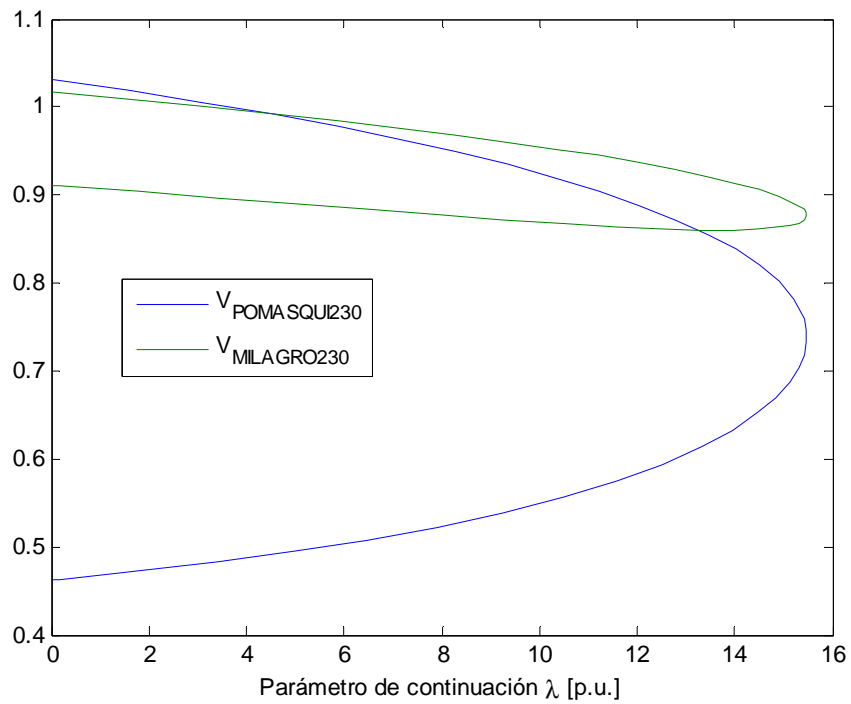


Figura 5.5-3 Curvas P-V en las barras de mayor y menor voltaje en el punto de colapso.

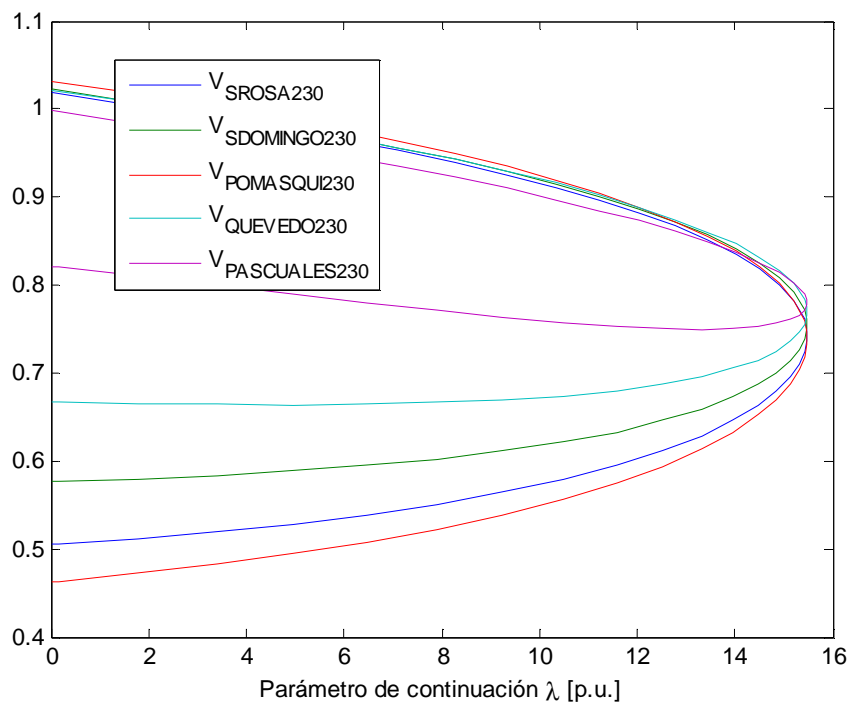


Figura 5.5-4 Curvas P-V en las cinco barras de menor voltaje en el punto de colapso.

Escenario 2.

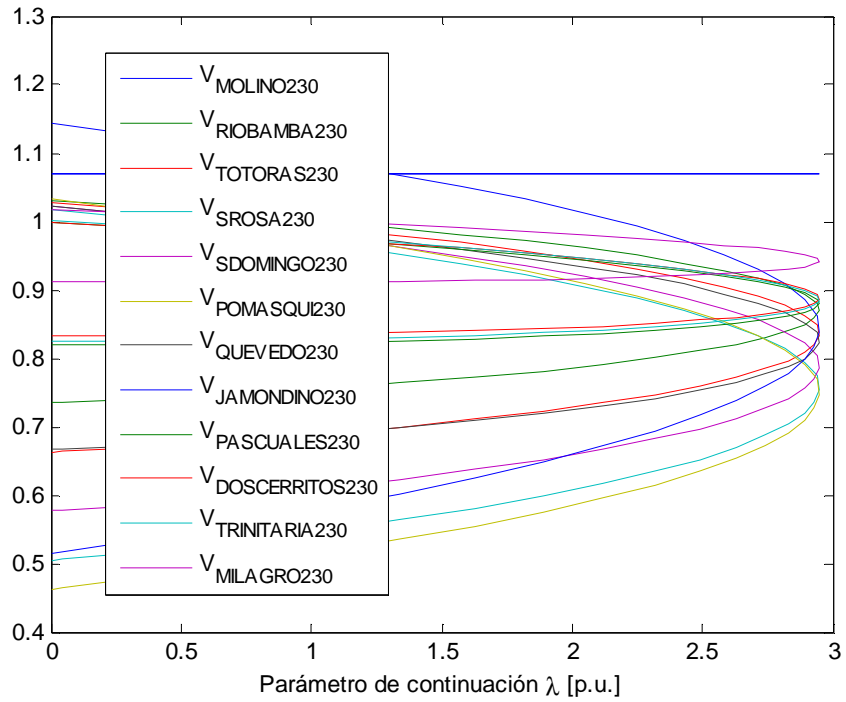


Figura 5.5-5 Curvas P-V en la todas las barras del sistema

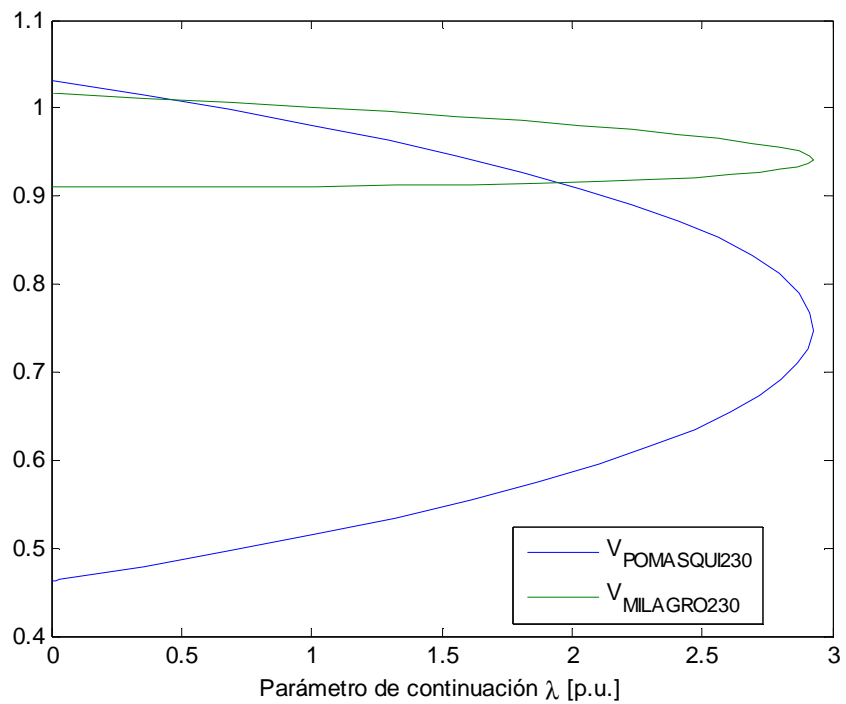


Figura 5.5-6 Curvas P-V en las barras de mayor y menor voltaje en el punto de colapso.

Escenario 3.

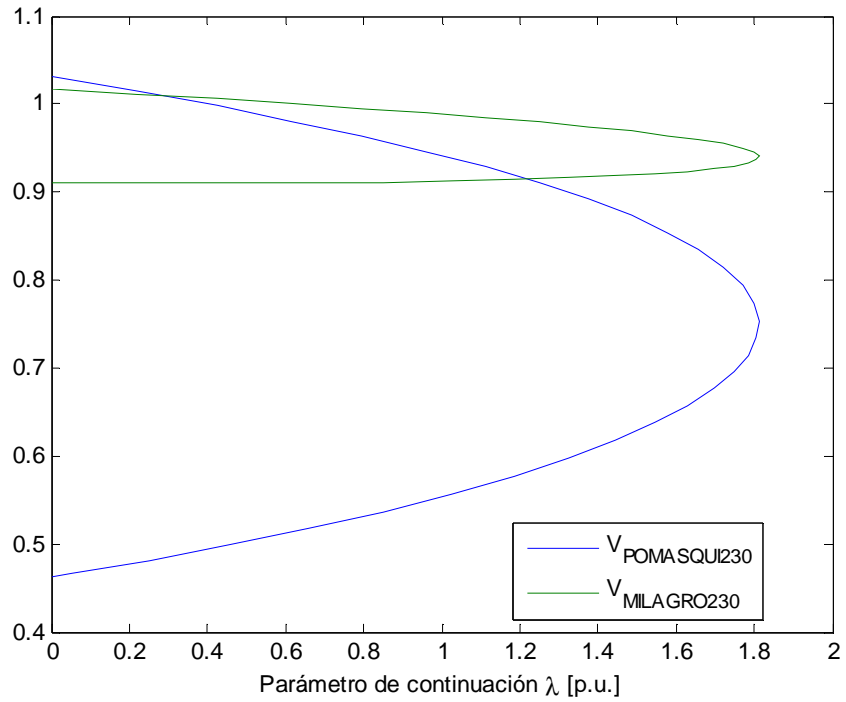


Figura 5.5-7 Curvas P-V en las barras de mayor y menor voltaje en el punto de colapso.

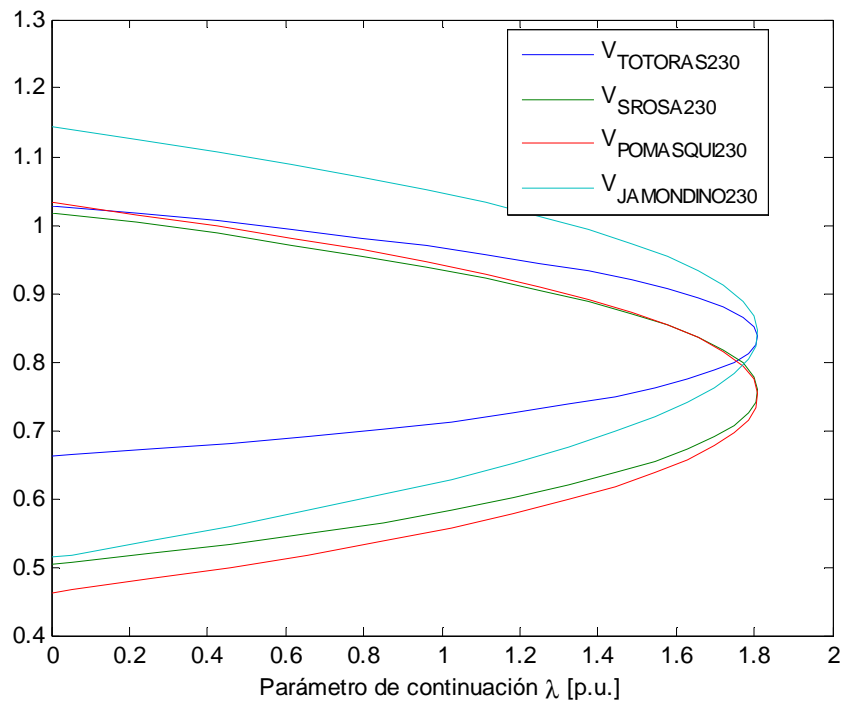


Figura 5.5-8 Curvas P-V escenario 3 (1).

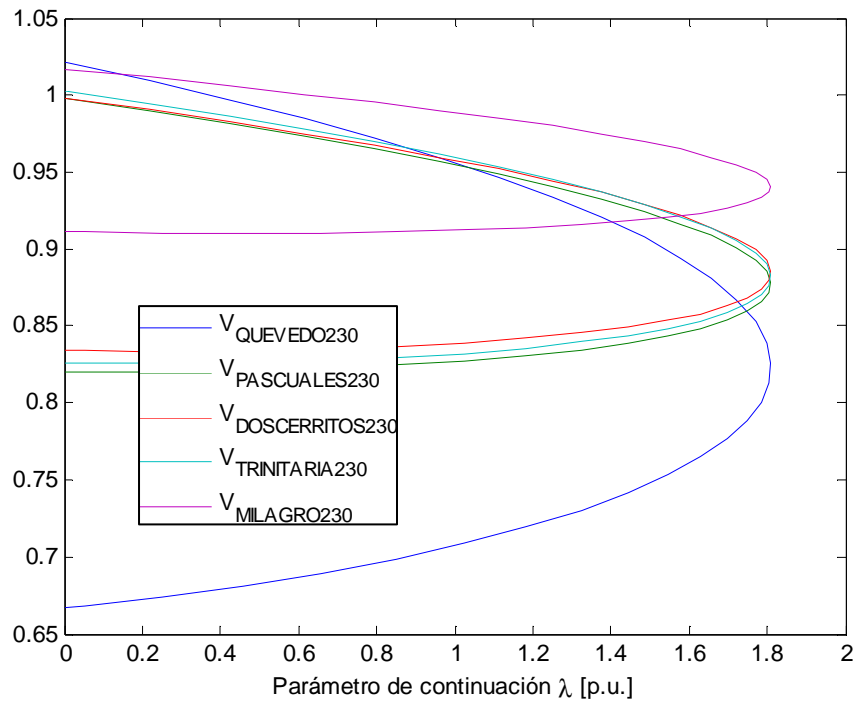


Figura 5.5-9 Curvas P-V escenario 3 (2).

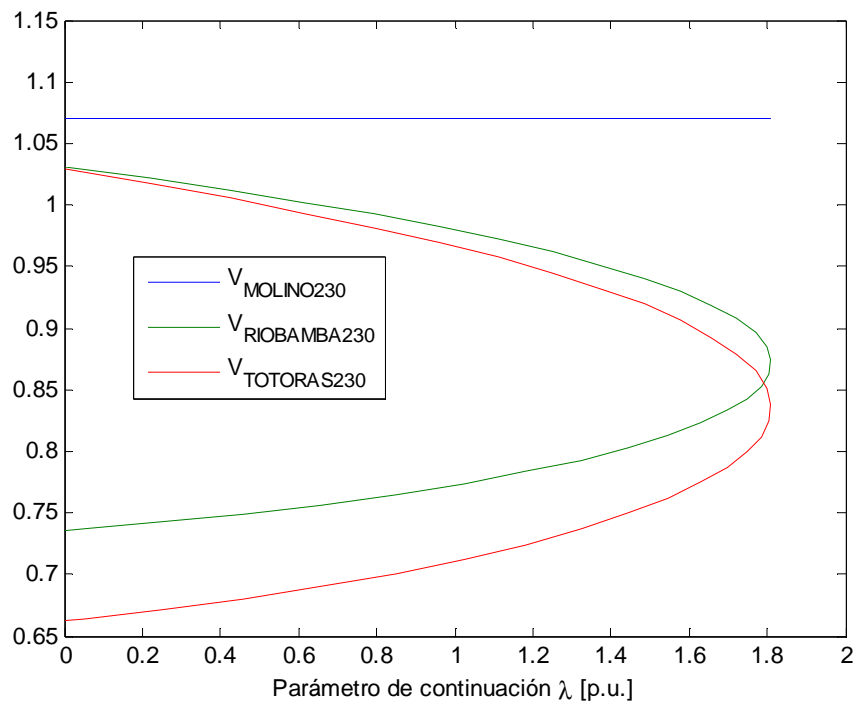


Figura 5.5-10 Curvas P-V escenario 3 (3).

5.5.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

- ∞ En los tres escenarios de prueba se determina un crecimiento de carga tanto en potencia activa como en potencia reactiva, y como era de esperarse el margen de cargabilidad se reduce bastante bajo condiciones más severas de crecimiento como es el escenario 3, en donde se establecen crecimientos porcentuales de cantidades pequeñas, 10% en PASCUALES230; 8% en SROSA230, POMASQUI230 y DOSCERRITOS230; 7% en QUEVEDO230, MILAGRO230, 6% en SDOMINGO230, 5% en RIOBAMBA230.

- ∞ Se puede apreciar que el menor voltaje está en la barra de POMASQUI230, esto se debe a que forma parte de una rama radial que se desprende del anillo de 230kV y además posee una carga considerable que corresponde a la zona de EMELNORTE, parte de EEQSA y que los reactivos que sostienen niveles aceptables de voltaje en esta zona son aportados por la interconexión con Colombia que para los casos de estudio se mantuvieron constantes.

- ∞ Se tiene un resultado natural de mantener un nivel de voltaje elevado en la barra de MILAGRO230 debido a su cercanía eléctrica con respecto a la barra slack.

- ∞ En relación a las posibles medidas de mitigación frente al colapso, los resultados sugieren que la barra POMASQUI230 necesita de un aporte de reactivos mayor para sostener un nivel de voltaje aceptable, que puede ser abastecido por la interconexión con Colombia.

Capítulo 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- ∞ Este proyecto de titulación presenta la técnica de predicción/corrección para determinar los puntos de equilibrio y encontrar el colapso de voltaje en sistemas de potencia. La implementación de este método está presentada en la programación de CPFepn en Matlab y una aplicación para estudio de bifurcación a través de los perfiles de voltaje en la red de prueba del SNI de 12 barras; CPFepn muestra ser un software amigable al usuario debido a la interfaz gráfica que maneja.
- ∞ Inicialmente se probó programar el software usando la técnica de desacoplado en las ecuaciones de flujos de potencia, como se plantea en [9], es interesante hacer conocer que con esta metodología es posible trazar la parte superior de la curva PV y llegar a aproximarse al punto de bifurcación tanto en cuanto el tamaño del paso se disminuya; la parte baja de la curva es prácticamente imposible trazar dado la alta no linealidad del Jacobiano que se presenta.
- ∞ La técnica de parametrización local, planteada en [7] también fue objeto de estudio, sin embargo, dado que la parametrización solo se usa cerca del punto máximo de carga y como se explica en [3] que en la práctica no hay necesidad de usarlo, se desiste esta metodología, para finalmente culminar con el planteamiento de la predicción a través del método de la tangente y la corrección por medio de la intersección perpendicular con corte de paso.
- ∞ Cabe hacer notar en la parametrización que el parámetro de continuación que se escoge inicialmente es λ y luego cambia por una variable de voltaje que tenga el mayor cambio en el vector tangente ignorando los ángulos, ya

que el voltaje tiene más “significado” que los ángulos en estabilidad de voltaje.

- El método de continuación nos da una muy buena aproximación del punto de colapso, la ventaja de este método es que se puede obtener toda la curva de bifurcación variando la carga desde un caso base o condición inicial hasta el punto de máxima cargabilidad o colapso. Cuando se ha llegado a este límite la carga disminuye hasta la carga original haciendo posible trazar toda la curva PV.
- Se pudo notar que el determinante del Jacobiano de las ecuaciones de flujo de potencia en la parte superior de la curva es mayor que cero, en la parte inferior es menor que cero, y en el punto de colapso es teóricamente cero. La siguiente figura ilustra lo expresado aquí:

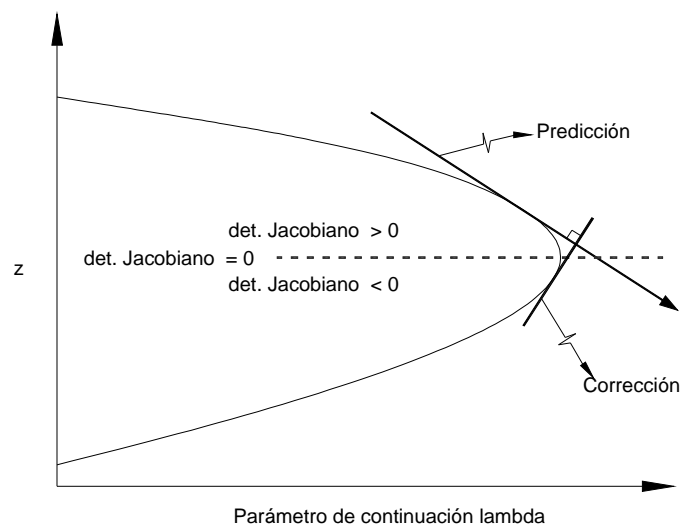


Figura 6.1 Diagrama de bifurcación o curva PV

- Cuando se cambia la dirección de la tangente para trazar la curva PV, si no se ha pasado el punto de máxima cargabilidad, se retraza la curva anterior.
- CPFepn está concebido para describir las características principales y la base matemática del método de continuación, y dar una introducción al

estudio de estabilidad de voltaje desde el punto de vista de la teoría de bifurcación. Las deficiencias del programa desarrollado son que el ingreso de datos debe ser ordenado como se explica en la Nota 1 del Capítulo 4, no considera barras de voltaje controlado ya que únicamente se modela barras PQ, y no considera los límites de potencia reactiva.

∞ El software planteado sienta las bases para futuros desarrollos, como son:

- Incluir barras de voltaje controlado y consecuentemente establecer límites de potencia reactiva, ya que estos límites tienen una significativa influencia en la estabilidad de voltaje puesto que si son alcanzados inmediatamente se precipita en colapso de voltaje.
- Considerar cambio automático de taps en los transformadores ya que pueden llevar al colapso de voltaje al tratar de mantener este voltaje en niveles aceptables.
- Incluir análisis de contingencia por colapso de voltaje para establecer un criterio de seguridad, debido a la salida de un elemento del sistema de potencia: línea de transmisión, transformador, generador; entre otras.

Bibliografía

- [1] P. Kundur, “Power System Stability and Control”, EPRI Power System Engineering Series, McGraw-Hill, 1994.
- [2] E. Allgower and K. George, “Numerical Path Following”, Department of Mathematics, Colorado State University, August 1994.
- [3] C. A. Cañizares, “Voltage Collapse and Transient Energy Function Analyzes of AC/DC Systems”, Ph. D. Thesis, University of Wisconsin – Madison, September 1991. Available at <http://thunderbox.uwaterloo.ca/~claudio/papers/phd.pdf>
- [4] C. A. Cañizares and F. L. Alvarado, “Point of Collapse and Continuation Methods for Large AC/DC Systems”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 8, No. 1, February 1993, pp. 1-8. Available at: <http://thunderbox.uwaterloo.ca/~claudio/papers/pflow.pdf>
- [5] C. A. Cañizares, “Power Flow”, University of Waterloo, Dep. Electrical & Computer Engineering E&CE 465, February 2001.
- [6] C. A. Cañizares, Editor, “Voltage Stability Assessment: Concepts, Practices and Tools”, Power Systems Stability Subcommittee Special Publication, IEEE-PES, August 2002.
- [7] V. Ajjarapu and C. Christy, “The continuation power flow: A tool for steady state voltage stability analysis”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 7, no. 1, February 1992, pp. 416-423.
- [8] H. Chiang and H. Li, “CPFLOW for Power Tracer and Voltage Monitoring”, Power Systems Engineering Research Center, PSERC Publication 01-02, 2001. http://www.pserc.wisc.edu/ecow/get/publicatio/reports/2001report/chiang_report.pdf

- [9] C. A. Cañizares, A. Z. de Souza, and V. H. Quintana, “Improving Continuation Methods for Tracing Bifurcation Diagrams in Power Systems”, *Proceedings of the Bulk Power System Voltage Phenomena III Seminar*, NSF/ECC Inc., Davos, Switzerland, August 1994, pp. 349-358. Available at <http://thunderbox.uwaterloo.ca/~claudio/papers/cont.pdf>
- [10] K. Iba, H. Suzuki, M. Egawa, T. Watanabe, “Calculation of Critical Loading Condition with Nose Curve Using Homotopy Continuation Method”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 6, No. 2, May 1991, pp. 584–593.
- [11] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, “Definition and Classification of Power System Stability”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 2, May 2004, pp. 1387-1401.
- [12] V. Ajjarapu, “Computational Techniques for Voltage Stability Assessment and Control”, *Power Electronics and Power Systems Series*, Springer Science+Business Media, LLC, 2006.
- [13] C. A. Cañizares and Z. T. Faur, “Comparative Study of Various Computer Tools in Electrical Engineering Courses”, University of Waterloo, Department of Electrical & Computer Engineering, Technical Report # 95-06, June 7, 1995.
- [14] F. Milano, “PSAT”, *Power System Analysis Toolbox Documentation for PSAT version 2.0.0*, February 14, 2008
<http://www.power.uwaterloo.ca/~fmilano/archive/psat-20080214.pdf>
- [15] A. Sode-Yome and N. Mithulananthan, “Static Voltage Stability Study Using MATLAB Symbolic and Optimization Toolboxes”, Royal Thai Government and Siam University, Thailand. Available at:
<http://www.energy-based.nrct.go.th/Article/Ts-3%20static%20voltage%20stability%20study%20using%20matlab%20symbolic%20and%20optimization%20toolboxes.pdf>

[16] F. Milano, “Pricing System Security in Electricity Market Models with Inclusion of Voltage Stability Constraints”, Ph. D. Thesis, University of Genova, Italy, April 2003.

Available at

http://www.power.uwaterloo.ca/~fmilano/archive/phdthesis_federico_milano.pdf

[17] CENACE, “Diagrama Unifilar del SNI a Diciembre 2007”, Centro Nacional de Control de Energía. Disponible en: <http://www.cenace.org.ec/download5.asp?id=65>

[18] CONELEC, “Plan Nacional de Electrificación 2006 – 2015”, Capítulo 4, “Demanda Eléctrica”. Disponible en: <http://www.conelec.gov.ec/>

[19] M. Crow, “Computational Methods for Electric Power Systems”, University of Missouri, Rolla – Missouri, CRC Press LLC, 2003.

[20] Working Group on a Common Format for Exchange of Solved Load Flow Data, “Common Format for the Exchange of Solved Load Flow Data”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 92, no. 6, pp. 1916–1925, Nov./Dec. 1973.

ANEXO 1

MANUAL DEL USUARIO



Continuation Power Flow Escuela Politécnica Nacional
Documentación para CPFePN 1.0, Marzo 03, 2008
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Proyecto de Titulación

Análisis de Estabilidad de Voltaje en Estado Estable
de Sistemas Eléctricos de Potencia basado en el
Método de Continuación aplicado a Flujos de Potencia

Autor: Ing. Franklin Quilumba Gudiño

Director: Dr. Jesús Játiva Ibarra

PARTE I

Introducción

El continuo crecimiento en la demanda puede eventualmente conducir al sistema a un estado inestable caracterizado por una rápida disminución de las magnitudes del voltaje, este fenómeno es conocido como “colapso de voltaje”, y a menudo estudiado usando los perfiles de voltaje. La estabilidad de voltaje es una seria preocupación que debe ser examinada en estudios de planificación y operación de sistemas eléctricos de potencia.

El flujo de potencia es una poderosa herramienta para monitorear los voltajes del sistema como una función del cambio en la carga, es decir trazar los voltajes de barra versus los niveles de potencia de carga, desde un caso base hasta el límite de cargabilidad [20] (conocido como punto de máxima cargabilidad, punto de colapso o punto de bifurcación⁴), en donde el Jacobiano del sistema de ecuaciones de flujo de potencia llega a ser singular. Así que, el tradicional método de Newton – Raphson resulta en problemas de convergencia. En este caso, una modificación en el método de Newton – Raphson conocido como método de continuación es empleado.

CPFepn está diseñado para el análisis de de flujos de potencia en estudios de estabilidad de voltaje en estado estable basado en el método de continuación (CPF). CPFepn usa como plataforma de programación MATLAB.

⁴ Saddle-node bifurcation

PARTE II

Iniciando

Este capítulo explica cómo instalar y correr CPFepn.

Requerimientos

CPFepn 1.0 ha sido desarrollado usando Matlab 7.0.0.19920 (R14) en plataforma Windows XP.

Para correr CPFepn, es necesario el paquete básico de Matlab, la base de datos está diseñada para ser construida en Microsoft Excel aunque con un poco de experiencia conociendo el formato de ingreso de los datos de barras y red se puede escribir la base en el editor de archivos *m* (M-File editor), y además el reporte está previsto se presente en formato *xls*.

Instalación

- ∞ Es indispensable que disponga de la carpeta CPF_epn con todos los archivos *m* necesarios para correr CPFepn almacenada en la unidad C de su disco duro.

C:\CPF_epn

- ∞ Entonces, abra Matlab, y antes de correr CPFepn se necesita actualizar el path de Matlab, es decir, la lista de carpetas donde Matlab busca el fichero o función para ser ejecutados. Esto queda determinado por el camino de búsqueda (search path) que el programa utiliza.

Nota 1: CPFepn no trabajará adecuadamente si el path de Matlab no contiene la carpeta CPF_epn instalada en la unidad C.

Nota 2: CPFepn hace uso de dos carpetas internas (imagenes y m_usuario), es recomendable no cambiar la posición ni los nombres de estas carpetas, y tampoco su contenido.

Iniciar CPFepn

Después de configurar la carpeta CPF_epn en el path de Matlab, escriba en el prompt de la ventana de comandos de Matlab:

```
>> runCPFepn
```

Este comando lanzará la ventana de inicio fig. 2.1 y creará las estructuras requeridas por el programa, como se muestra a continuación:

```
>> who
```

Your variables are:

```
CPF      Cpfout   DAT_bus  PF       Pfout    Sol_enc  frames  
Cpfnames DAT_branch  Flags   Path    SEP      Ybus
```

y desplegará la ventana principal de CPFepn, la cual se indica en la fig. 2.2.



Figura 2.1 Ventana de inicio de CPFepn

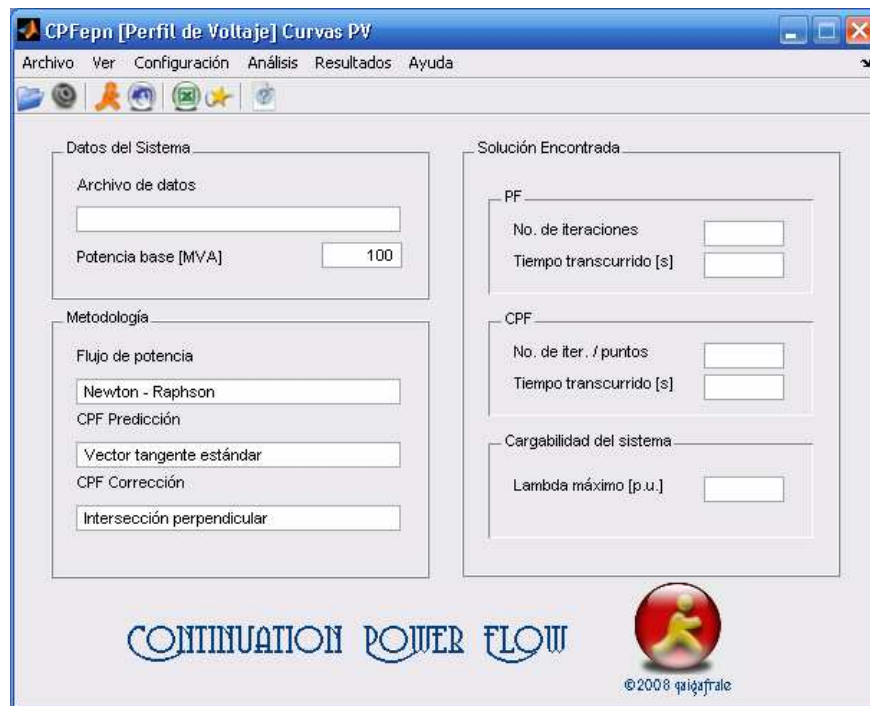





Figura 2.2 Ventana principal de CPFepn

Cargando Datos

Casi todas las operaciones requieren que el archivo de datos sea cargado. El nombre de este archivo es desplegado en el texto editable Archivo de datos. Para cargar un archivo simplemente dé doble clic sobre este texto editable, o use el primer botón de la barra de herramientas , el menú Archivo/Cargar sistema de potencia o el método abreviado <Ctrl. + L> cuando la ventana principal está activa.

El archivo de datos puede ser un archivo .m o un archivo .xls en formato CPFepn, cabe notar que si el archivo está en formato .xls se prevé realizar la conversión a .m y este archivo es almacenado en la ubicación de su similar en .xls. Además se actualiza la estructura SEP.

Mostrando resultados

Los resultados pueden ser expuestos en dos maneras. Por ejemplo los resultados de Flujos de Potencia pueden ser vistos a través de Resultados/Reporte o con el método abreviado <Ctrl. + R>, o usar el botón  Reporte de la barra de herramientas. Entonces, la interfaz gráfica permite guardar un reporte en un archivo .xls. Los resultados de Continuación de Flujos de Potencia permiten desplegar los resultados de las dos maneras posibles, es decir, el archivo en formato .xls similar al anterior pero incluyendo los resultados propios de CPF, y se habilita una salida gráfica en una nueva ventana para acceder a ésta puede dar clic en el botón  Salida gráfica, Resultados/Salida gráfica o el método abreviado <Ctrl. + V>.

Ventana de Salida Gráfica

La ventana de salida gráfica fig. 2.3, permite trazar las curvas PV conocidas también como perfil de voltaje o curva nariz (por su forma) luego de una corrida de continuación de flujos de potencia, para las barras del sistema de potencia en estudio.

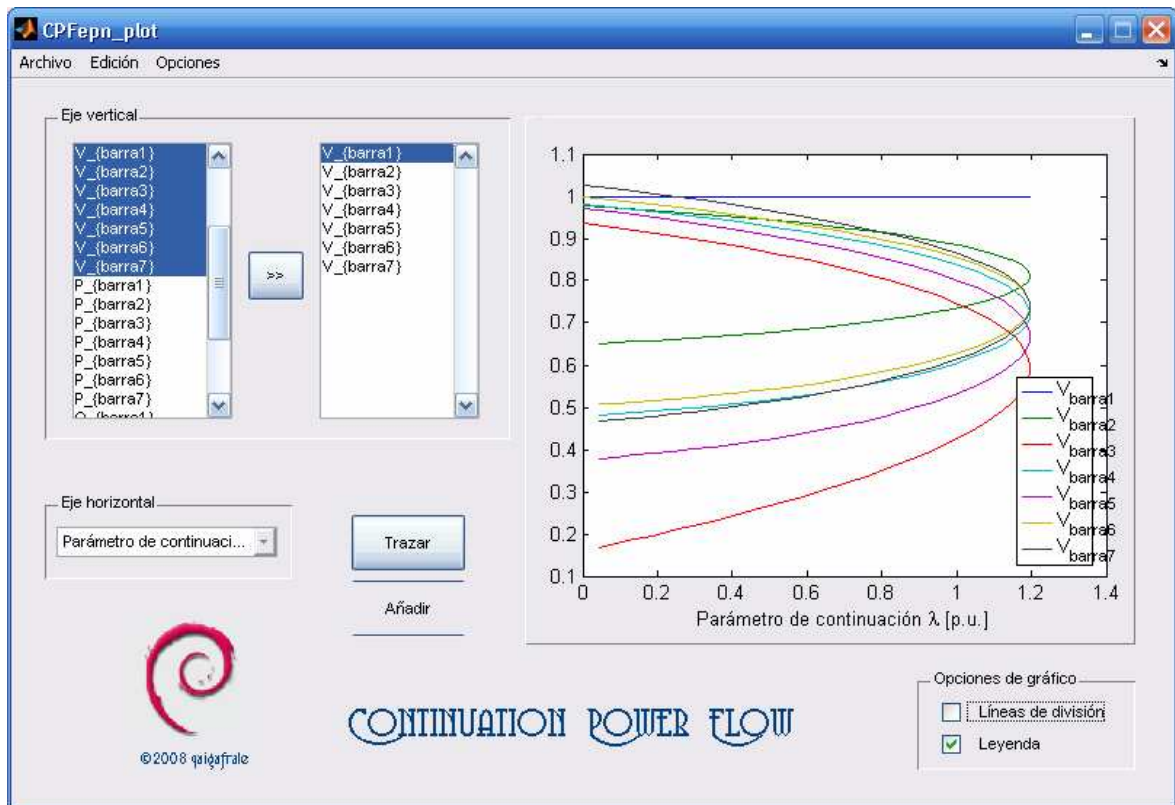


Figura 2.3 Interfaz gráfica para trazar las curvas

Además de poder graficar las curvas PV, se tiene la posibilidad de trazar las variables de: ángulos, potencia activa neta P y potencia reactiva neta Q de todas las barras del sistema.

Para graficar el usuario debe elegir las variables en el eje vertical (a través de las cajas de lista) y una variable en el eje horizontal (a través del menú desplegable).


Las curvas mostradas tienen la posibilidad de ser exportadas en formato .wmf para disponer de la imagen para otras aplicaciones a través del portapapeles, para lo cual use Archivo/Exportar datos como metafile o <Ctrl. + M>. Se puede inclusive exportar las curvas como una nueva figura en Matlab haciendo clic con el botón secundario del Mouse sobre la gráfica, y clic en Copiar en nueva figura. La misma acción se encuentra en Edición/Copiar en nueva figura o <Ctrl. + C>.

Al exportar o copiar la gráfica siempre irán con su leyenda asociada.

En el menú Opciones se puede elegir Trazar gráfico <Ctrl. + T>, para que una vez elegidas las variables pueda graficar las curvas.

Se adicionan elementos como líneas de división, en Opciones/Líneas de división o <Ctrl. + G> equivalente a *grid on/off*, Leyenda Opciones/Leyenda o <Ctrl. + L> permitiendo obtener de una información detallada de lo que está graficado, estas funciones están disponibles en los check boxes de Opciones de gráfico. Otra característica es el de poder graficar distintas curvas en los mismos ejes equivalente a *hold on/off*, a través del botón Añadir.

Configurando

Las configuraciones principales del sistema se incluyen directamente en la ventana principal y pueden ser modificadas en cualquier tiempo, haciendo clic en el botón  Configuración de la barra de herramientas se accede a la ventana de la fig. 2.4.

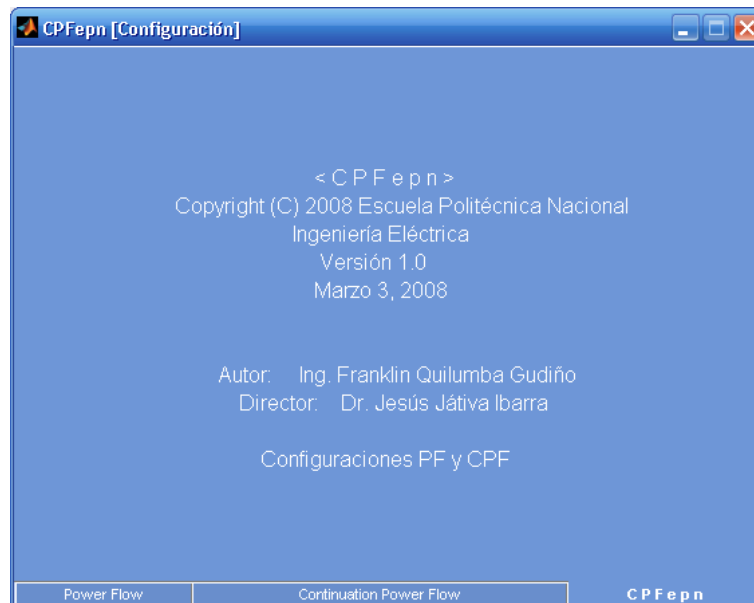


Figura 2.4 Ventana de configuración de CPFepn

Esta ventana dispone de las pestañas Power Flow, fig.2.5, y Continuation Power Flow, fig. 2.6, para configurar las opciones de flujo de potencia y método de continuación de flujos de potencia respectivamente; inicialmente se muestra la configuración por defecto.



Figura 2.5 Configuración Flujos de Potencia.



Figura 2.6 Configuración del método de continuación.

Desde la interfaz gráfica principal se puede acceder directamente a cada una de las pestañas a través del menú Configuración/Flujo de potencia o el método

abreviado <Ctrl. + D> y Configuración/Continuación de flujos de potencia cuyo método abreviado es <Ctrl. + G>.

PARTE III

Capacidad de CPFepn


Introducción

La técnica CPF involucra resolver una serie de cálculos de flujos de potencia con pasos de predicción y corrección. La técnica de optimización involucra resolver ecuaciones con condiciones necesarias basadas en una función objetivo y restricciones.

CPFepn simula flujos de potencia y CPF en estudios de estabilidad de voltaje en estado estable usando como plataforma de programación MATLAB.

El paquete computacional propuesto aplica las técnicas de flujo de potencia y la técnica de continuación. El flujo de potencia es simulado en primer lugar. Luego, el método aplica el proceso CPF.

FLUJO DE POTENCIA

El flujo de potencia consiste en resolver las ecuaciones de balance de potencia activa y reactiva en todas las barras del sistema de potencia. En base a esto, *CPFepn* puede calcular los voltajes (módulo y ángulo) en cada una de las barras. La función llamada “*runPF*” ejecuta el flujo de potencia de Newton Raphson, a través del botón  Flujo de potencia de la barra de herramientas, o Análisis/Flujo de potencia o a través de <Ctrl. + F>. Los pasos detrás del método, son:

CONTINUACIÓN DE FLUJOS DE POTENCIA

El método de continuación, método general en el análisis de bifurcación, aplicado a flujos de potencia es básicamente una serie de cálculos de flujo de potencia con

pasos de predicción, corrección y eventualmente parametrización, la parametrización puede ser usada para asegurar que el Jacobiano, en el punto de bifurcación sea no singular. El desarrollo de CPF es complicado y requiere de una buena habilidad en programación [15].

“runCPF” es la función encargada de resolver el método CPF, a través del botón



Continuación de flujos de potencia de la barra de herramientas, o Análisis/Continuación de flujos de potencia o a través de <Ctrl. + Q>.

PARTE 4

Formato CPFepn de datos⁵

Introducción

CPFepn tiene su propio formato de ingreso de datos, basado en el formato IEEE [20], con las modificaciones respectivas que se ajusten a los modelos en los que se basan el cálculo de flujo de potencia y el método de continuación.

Datos de barra⁶

El análisis de flujos de potencia implica el cálculo de los voltajes, en estado estable, en la red de transmisión para terminales específicos o “barras” del sistema, cuyo formato de ingreso para flujo de potencia se indica en la Tabla 4.1

Tabla 4.1 Formato de datos de barra flujo de potencia

Columna	Variable	Descripción	Unidad
1	BUS_No	Número de barra	entero
2	BUS_NAME	Nombre de barra	texto
3	TYPE	Tipo de barra	entero
4	V_pu_inguess	Suposición inicial del módulo del voltaje	p.u.
5	theta_rad_inguess	Suposición inicial del ángulo del voltaje	rad
6	LOAD_MW	Carga activa en el caso base	MW
7	LOAD_MVAr	Carga reactiva en el caso base	MVAr
8	GEN_MW	Generación activa en el caso base	MW
9	GEN_MVAr	Generación reactiva en el caso base	MVAr
10	COMP_MVAr	Compensación paralela conectada a la barra	MVAr

El número de barras debe ser puesto en orden, su numeración iniciará en 1 con la barra oscilante, a continuación irán todas las barras PQ desde 2 hasta n_{PQ} y finalmente seguirán las barras PV desde $n_{PQ} + 1$ hasta n_{PV} .

⁵ El formato CPFepn de datos está almacenado en un archivo de Microsoft Excel .xls.

⁶ En la hoja “bus” del archivo .xls se definen los datos de ingreso en las barras del SEP.

El número de barras no tiene limitación en el tamaño del sistema, mas bien estará determinada por las limitaciones de la RAM.

El tipo de barra será indicado con un número entero, se usará (3) para la barra oscilante, (0) para barras PQ y (2) para barras PV.

La suposición inicial del módulo del voltaje se sugiere poner en 1.0 p.u. a menos que se trate de una barra PV en cuyo caso deberá especificarse el valor del módulo de voltaje requerido en la barra.

La suposición inicial del ángulo del voltaje se sugiere sea de 0.0 rad.

El modelo de la carga es el modelo de Potencia Constante.

El análisis del flujo de potencia además de los valores indicados en la Tabla 4.1 requiere de la definición de la dirección de las potencias activa y reactiva de carga, y de la dirección de la potencia activa de los generadores Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Formato de datos de barra CPF

Columna	Variable	Descripción	Unidad
11	LOAD_dir_MW	Dirección de carga de potencia activa	MW
12	LOAD_dir_MVAr	Dirección de carga de potencia reactiva	MVAr
13	GEN_dir_MW	Dirección de generación de potencia activa	MW

Datos de ramas⁷

Entendiéndose por ramas las líneas de transmisión y transformadores conectadas a las barras del sistema de potencia. La Tabla 4.3 muestra los datos de ingreso necesarios para la modelación de las líneas de transmisión y transformadores.

El uso de los datos de la topología de la red es tanto para el análisis de flujos de potencia, así como también para el análisis de continuación de flujos de potencia.

⁷ En la hoja "branch" del archivo .xls se definen los datos de ingreso de las ramas del SEP.

Tabla 4.3 Formato de datos de ramas PF y CPF

Datos en	Columna	Variable	Descripción	Unidad
L/T y Transf.	1	FROM	Desde la barra	entero
	2	TO	Hasta la barra	entero
	3	CIRCUITS	Número de circuitos	entero
	4	TYPE	Tipo	entero
L/T	5	R	Resistencia L/T	pu
	6	X	Reactancia L/T	pu
	7	B	Susceptancia L/T	pu
Transf.	8	TAP_n1	Tap lado 1 del transformador	pu
	9	TAP_n2	Tap lado 2 del transformador	pu
	10	r1	Resistencia lado 1 del transformador	pu
	11	x1	Reactancia lado 1 del transformador	pu
	12	r2	Resistencia lado 1 del transformador	pu
	13	x2	Reactancia lado 2 del transformador	pu

El tipo hace referencia a si se trata de una línea de transmisión (0) o si se trata de un transformador (1), los campos siguientes se llenan de acuerdo al modelo planteado.