

En la Figura 4.23 se muestra el cambio de la característica de sistema  $Q'_c-V$ , el cual puede ser significativo y depende de los niveles de carga, del voltaje de las líneas de transmisión y del soporte local de potencia reactiva. Si para el análisis del caso se utilizan las características  $P-V$ , el cambio muestra la tendencia hacia el colapso al tener mayor sensibilidad del voltaje respecto a cambios en la demanda de potencia activa. En la Figura 4.24 se muestra tal efecto.

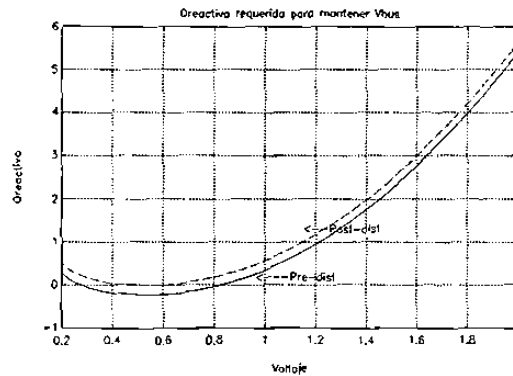


Fig. 4.23 Impacto en el flujo de potencia reactiva ante la salida de una línea.

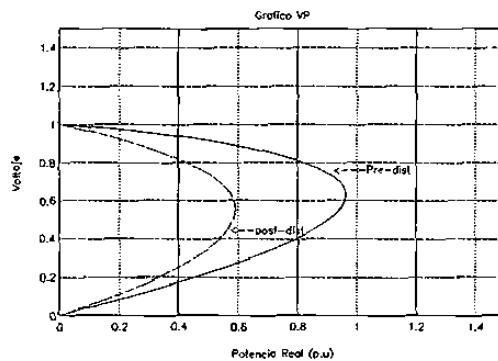


Fig. 4.24 Impacto en el flujo de potencia reactiva ante la salida de una línea.

#### 4.7 PERSPECTIVAS TRI-DIMENSIONALES DE LAS RELACIONES V-P-Q EN LOS SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Utilizando la modelación para la carga como la usada en la sección anterior se analizarán las relaciones entre voltaje, potencia activa y la potencia reactiva desde diferentes perspectivas tridimensionales. El objetivo es identificar y caracterizar las regiones en las cuales la operación del sistema es factible, desde el punto de vista de la estabilidad del voltaje. En base a dichos conceptos se puede establecer de manera más completa las condiciones bajo

las cuales se presenta el colapso de voltaje. Los resultados presentados a continuación se obtienen mediante el uso del paquete **MAPLE V**, basándose en las relaciones **P-V** y **Q-V** ya definidas anteriormente.

Se utiliza la expresión (4.67) como relación **P-V-Q**, con un valor de reactancia de 0.2064 p.u., correspondiente a una línea de 500 KV, 161 Km de longitud y que representa el enlace para un sistema o su equivalente; como el mostrado en la Figura 4.1. Se considera un voltaje de Thévenin en el lado de envío de 1.0 p.u., y la variación de la potencia activa desde 0 hasta 2.5 p.u., el voltaje desde 0 a 1 p.u., y la potencia reactiva desde -1 hasta 1. Para tales valores se obtiene la superficie **P-V-Q** de la Figura 4.25.

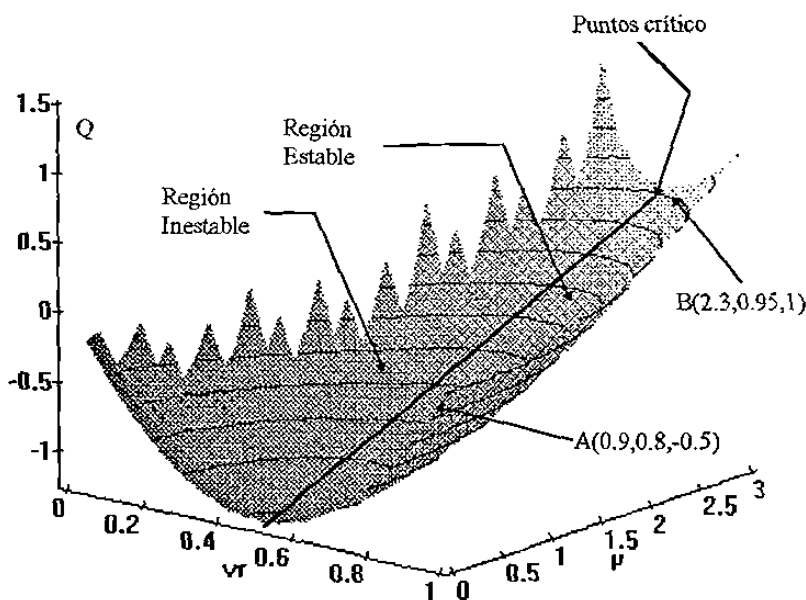


Fig 4.25 Superficie tridimensional **P-V-Q**.

En la Figura 4.25 se puede observar las trayectorias que sigue el punto de operación del sistema, ante variaciones en la potencia activa y las variaciones en los requerimientos de potencia reactiva. La potencia reactiva es necesaria para controlar el perfil de voltaje del nodo de prueba, dentro de la banda operativa de estado estable; como lo muestran los puntos A y B de la gráfica. Desde la perspectiva utilizada para mostrar dicha superficie es posible identificar cierta concavidad, la cual se ve más pronunciada para la parte en que Q toma valores negativos.

Si se proyecta la superficie sobre el plano **Q-V**, como lo muestra la Figura 4.26, se observa que la concavidad obedece a las características gráficas **Q-V**, para diferentes niveles de potencia de transmisión representadas en la superficie.

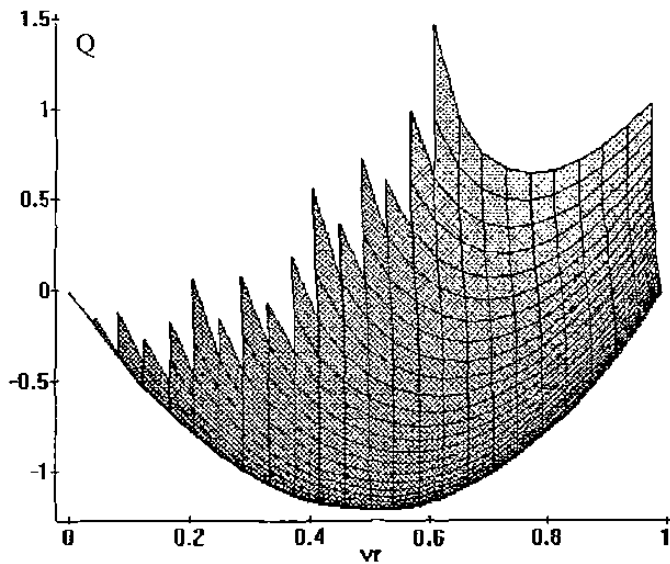


Fig. 4.26 Proyección de la Superficie **P-V-Q** sobre el plano **Q -V**

Si se proyecta sobre el plano **P-V**, como lo muestra la Figura 4.27, se obtienen las características ya representadas en el espacio tridimensional de la Figura 4.25, por los contornos que aparecen en la superficie **P-V-Q**.

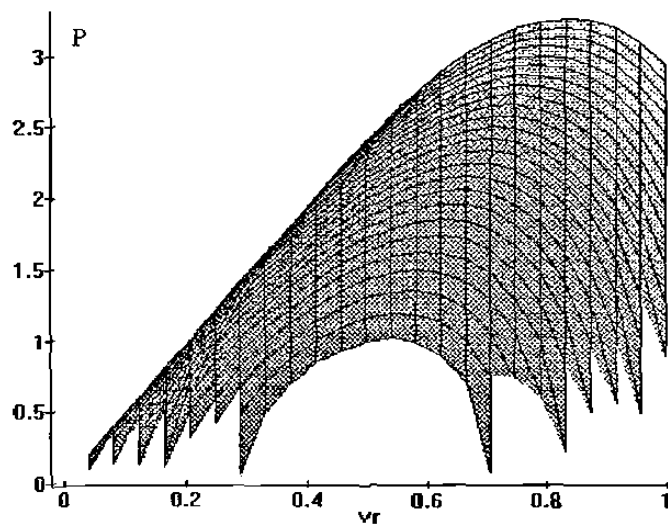


Fig. 4.27 Proyección de la Superficie **P-V-Q** sobre el plano **P-V**.

Los puntos críticos en voltaje en la superficie **P-V-Q** pueden ser caracterizados por una línea infinita que toca a la superficie en los puntos donde, en forma coincidente, se tiene los valores críticos para las proyecciones del plano **Q-V**, Figura 4.26, y del plano **P-V**, Figura 4.27, respectivamente. Lo que implica que en el punto crítico en voltaje para una área o nodo de prueba se cumple que:  $\frac{\partial V}{\partial P} = \infty$ ,  $\frac{\partial V}{\partial Q} = \infty$ .

De esta manera, a partir de la identificación en la superficie **P-V-Q** de los puntos críticos en voltaje para el sistema, es posible ubicar a la región de operación factible en voltaje para el sistema como aquella que se encuentra ubicada en la parte de la derecha de los puntos críticos; observando a dicha superficie desde una perspectiva frontal.

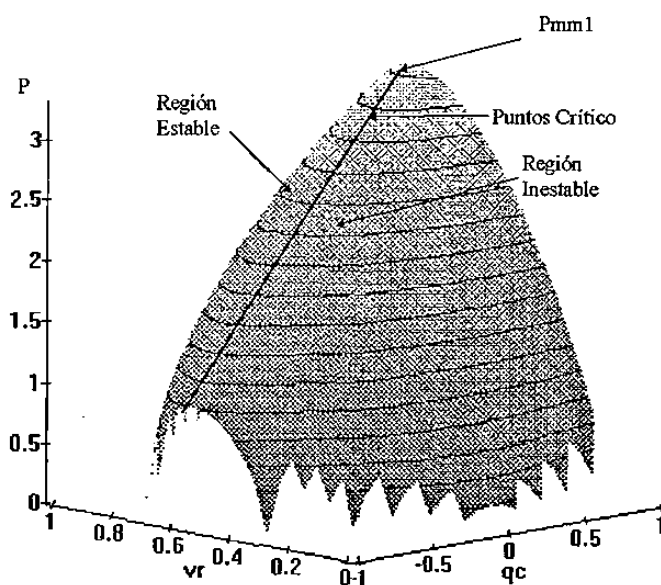


Fig. 4.28 Superficie tridimensional **Q-V-P**.

Si se giran los ejes de referencia de la superficie **P-V-Q**, mostrada en la Figura 4.25, de tal manera que la perspectiva final corresponda a un ordenamiento **Q-V-P**, el resultado es la superficie cóncava mostrada en la Figura 4.28. Ahora los contornos de la superficie se podrán proyectar sobre el plano **Q-V**, obteniendo las características de sistema Potencia reactiva-Voltaje ya mostradas en la Figura 4.26.

Los puntos críticos en esta superficie, nuevamente se ven representados por una línea infinita que al igual que para la superficie presentada en la Figura 4.25, toca a la superficie **Q-V-P** en los puntos donde se cumple que los valores críticos son coincidentes para sus

proyecciones en el plano **Q-V**, Figura 4.26, y en el plano **P-V**, Figura 4.27. Con base en tales proyecciones, se puede identificar la región de operación factible en voltaje para el sistema en la superficie **Q-V-P**, como la que se ubica en la parte izquierda de los puntos críticos; observando dicha superficie desde una perspectiva frontal.

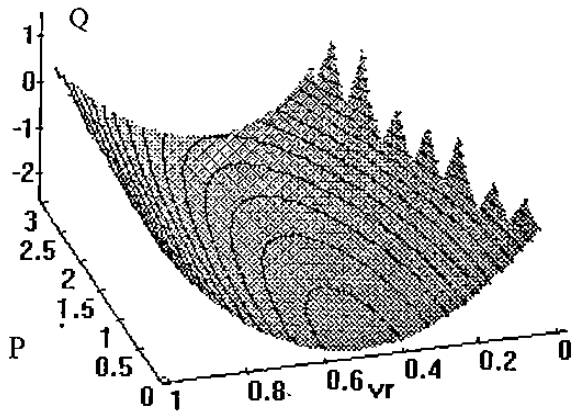
El punto cónico superior, identificado por  $P_{\text{mm1}}$ , corresponde al límite máximo absoluto de transmisión por estabilidad de ángulo y es el último en el que la línea de puntos críticos toca a la superficie **Q-V-P**. Se puede concluir que existe *un único punto crítico en voltaje para el cual se cumple que:  $\frac{\partial V}{\partial P}=\infty, \frac{\partial V}{\partial Q}=\infty, \frac{\partial Q}{\partial P}=\infty$* , conclusión que establece la relación existente entre el límite de estabilidad en estado estable y el límite de estabilidad de voltaje o punto crítico.

#### 4.8 ANALISIS DE CONTINGENCIAS Y ANIMACION

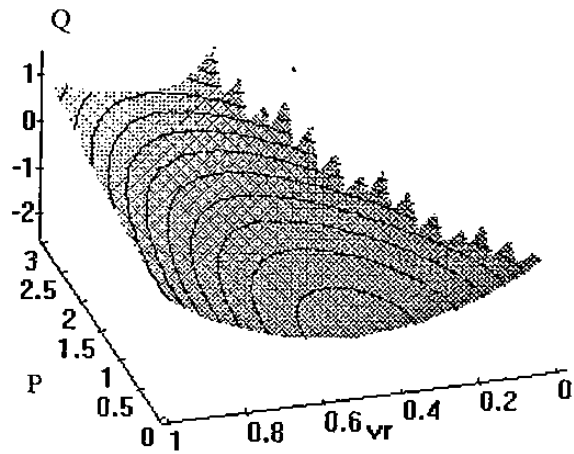
Hace tiempo el concepto de animación de objetos y/o figuras se asociaba solamente a los juegos de video, hoy en día este concepto se puede encontrar como software disponible para el uso ingenieril y de varios campos de las matemáticas, por lo cual debe pensarse como una herramienta más de análisis, para la simulación de fenómenos físicos de interés. Un grupo de programas que presenta esta ventaja es el **MAPLE V**, el cual además de ejecutar operaciones matemáticas en forma simbólica con alta calidad de estructuración, posee también capacidad gráfica para la representación de figuras de dos y tres dimensiones con o sin animación.

Se trata de explotar la capacidad gráfica animada con la que cuenta el **MAPLE V**, para simular la presencia de contingencias y su impacto en las condiciones de la estabilidad de voltaje en un sistema eléctrico, y de esta manera comprobar conceptos ya establecidos o visualizar de manera diferente los conceptos. En el material gráfico se toma como variable de animación a la reactancia de línea, para no tener gráficos como **Q-V-X**, que se desvían del objetivo a lograr en esta parte del trabajo. A continuación se presenta una perspectiva **P-V-Q**, con la presencia de variaciones en los niveles de potencia activa como una posible contingencia a ocurrir, haciendo uso de cuatro secuencias gráficas (fotografías), las cuales avanzan en evento del 1 al 4.

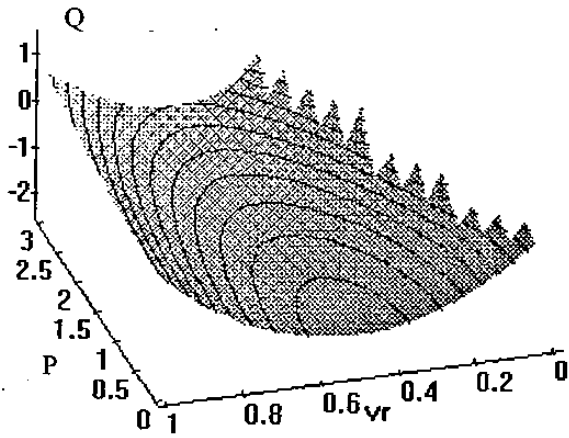
Fig. 4.29 Secuencias Gráficas animadas, Superficie P-V-Q



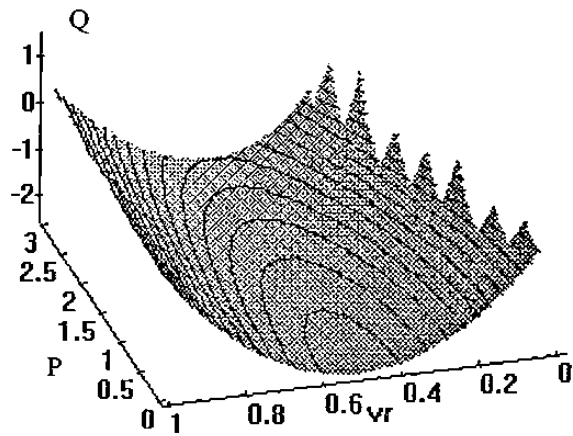
Secuencia 1



Secuencia 3



Secuencia 2

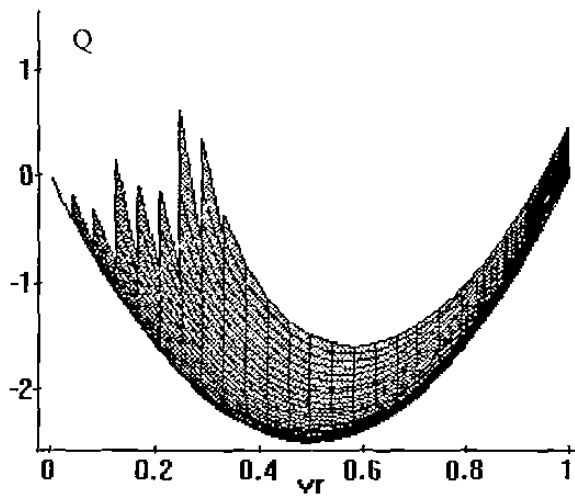


Secuencia 4

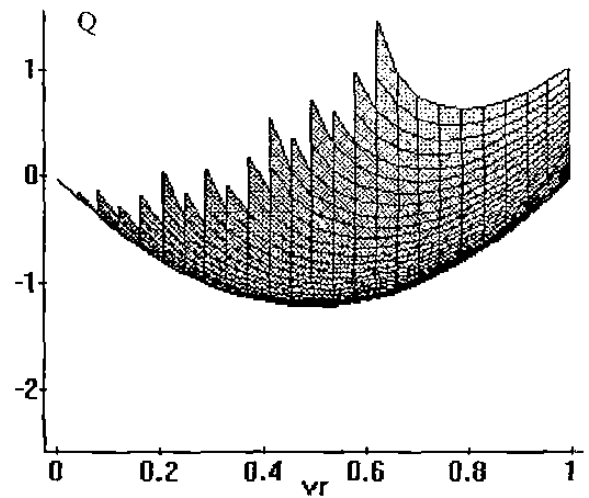
En cada una de las secuencias presentadas, al ir disminuyendo la reactancia de línea se puede observar, en las proyecciones de la superficie **P-V-Q** sobre el plano **P-V**, la variación de los límites de transmisión de potencia por estabilidad de voltaje. La reactancia varía incrementándose en la secuencia 1 hasta la 4. De manera simultánea, a medida que los niveles de transmisión son más altos, se puede apreciar en la pendiente que va tomando el gráfico **P-V-Q**, respecto al plano **P-V**, el incremento en los requerimientos de potencia reactiva asociada al nodo de prueba, para poder controlar el voltaje en los perfiles deseados.

A continuación, se presenta la simulación de la misma contingencia, pero ahora observada desde una perspectiva bi-dimensional, donde se puede apreciar de manera más directa la cantidad de potencia reactiva requerida para mantener el voltaje en perfiles aceptables, dentro de la región estable, ante las variaciones correspondientes en la potencia de transmisión.

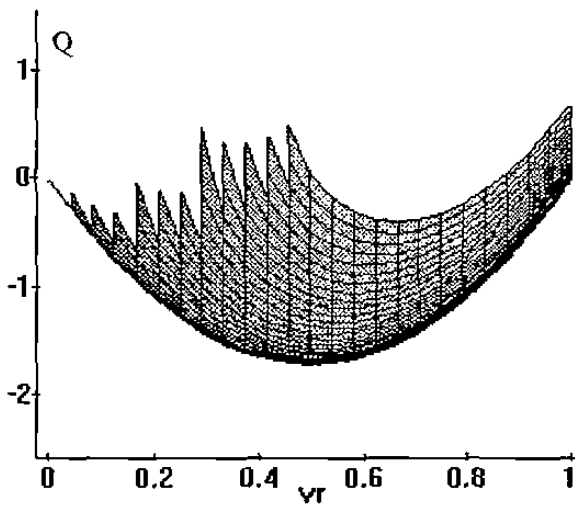
Fig. 4.30 Superficies gráficas animadas, Gráficos Q-V



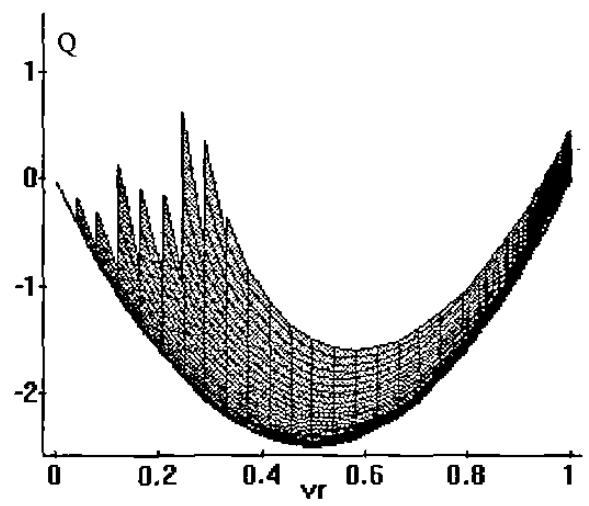
Secuencia 1



Secuencia 3.



Secuencia 2.



Secuencia 4.

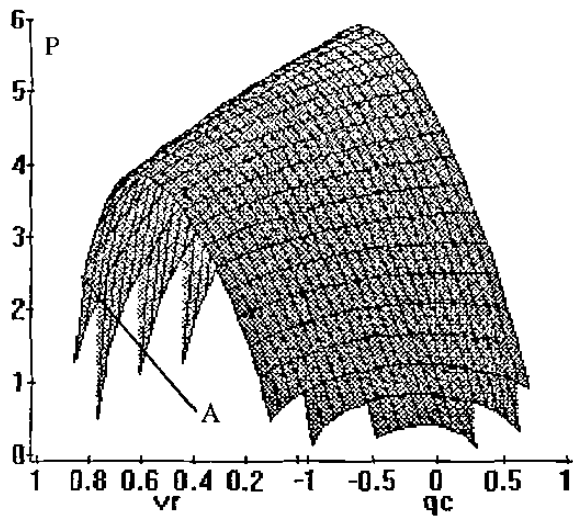


Si ahora se utiliza la perspectiva tri-dimensional **Q-V-P**, se puede simular la variación en las inyecciones nodales de potencia reactiva en un punto de prueba, como contingencia posible en un sistema de potencia, y su impacto en la capacidad de transmisión de potencia entre dos nodos y en los perfiles de voltaje en el nodo de recepción.

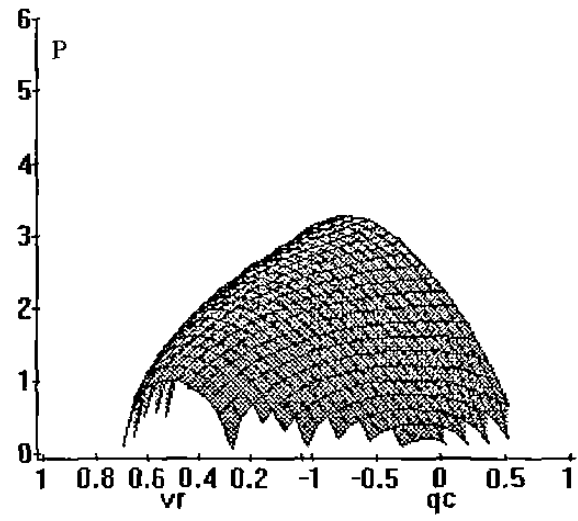
Por ejemplo, si el punto A se ubica como punto de operación en la secuencia uno, se observa en la secuencia dos, que debido a la menor cantidad de potencia reactiva inyectada en el nodo de prueba, el punto A ya no existe como punto de operación factible con perfil de voltaje dentro de la banda de estado estable. Por otro lado, los niveles de transmisión posibles para la condición del sistema en la secuencia dos y tres son mucho menores que en el caso de la primer secuencia, donde la disponibilidad de reservas reactivas es mayor.

En los grupos de las tres perspectivas presentadas: **P-V-Q**, **Q-V** y **Q-V-P**, cada una en secuencias de cuatro gráficos, ha sido posible comprobar algunos de los conceptos más importantes relacionados con el fenómeno del voltaje tratado a lo largo de la presente investigación. Se pueden obtener otros grupos de secuencias gráficas, en diferentes perspectivas, sin embargo con el material presentado es suficiente para tener un panorama del problema de la estabilidad del voltaje en los sistemas eléctricos de potencia, siendo este el objetivo principal que se ha fijado alcanzar a lo largo del presente trabajo.

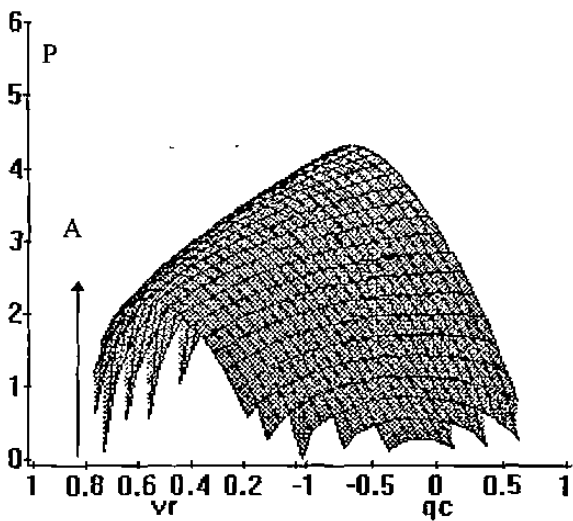
Fig. 4.31 Secuencias Gráficas animadas, Superficie P-V-Q



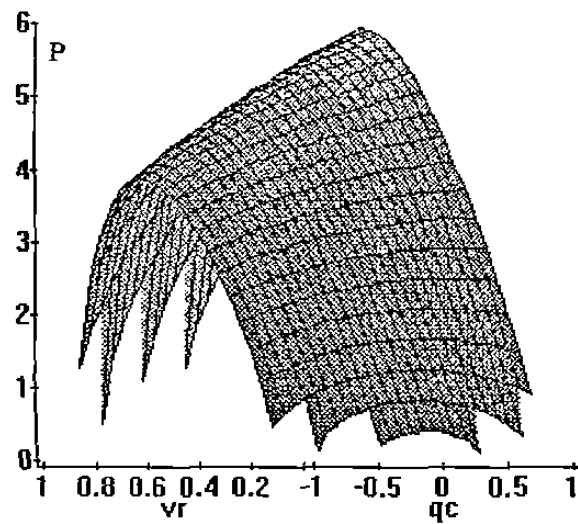
Secuencia 1



Secuencia 3



Secuencia 2



Secuencia 4

#### 4.9 RESUMEN

En este capítulo se presentó de manera detallada el aspecto teórico de las características gráficas de sistema P-Q, P-V y Q-V. Describiendo el plano de definición para cada una de ellas, así como su formulación matemática. Se estableció el concepto del Plano complejo S para los gráficos P-Q, y haciendo uso de este, se planteó un criterio para la identificación de las condiciones de estabilidad por voltaje y por ángulo en un sistema de potencia, definiendo de esta manera la aplicación de los mismos como herramienta de análisis para la operación y control de los sistemas eléctricos de potencia.

Mediante el uso de los gráficos P-V, se investigó el impacto de factores tales como: el tipo de las componentes de carga, las características topológicas de la red de transmisión, el nivel de compensación en un nodo de carga, así como la posición del tap de un transformador bajo carga, en la determinación de los límites de transmisión por voltaje en un sistema eléctrico de potencia. Se planteó el uso de los gráfico P-V en el análisis de las condiciones de estabilidad respecto a un nodo de generación.

Se establecieron gráfica y matemáticamente las relaciones potencia reactiva-voltaje en un sistema eléctrico de potencia. Por último, se definieron las relaciones entre el voltaje, potencia activa y reactiva en un sistema de potencia, mediante un análisis tridimensional.

## CAPITULO 5

### SOFTWARE IMPLEMENTADO Y ANALISIS DE RESULTADOS

#### 5.1 INTRODUCCION

Las características gráficas de sistema **P-V**, **Q-V** y **P-Q**, representan el comportamiento no-lineal del sistema ante variaciones en su condición de operación; sin embargo, su aplicación sistemática como herramienta de análisis en la operación y el control de los sistemas eléctricos de potencia, es todavía limitada debido a que su obtención es costosa computacionalmente y la información a desplegar está limitada a un sólo nodo; el nodo de prueba del sistema de potencia. Desde el punto de vista del análisis de la estabilidad de voltaje, tópico particularmente analizado en este trabajo, estas han sido aun más relajadas, ya que en opinión de los especialistas en el tema, el problema de la estabilidad de voltaje debe de ser analizado desde el punto de vista de sistema, tendiendo a su implementación en tiempo real.

Partiendo de los comentarios anteriores y haciendo un balance de éstos ha resultado motivante el emprender la investigación y la tarea de desarrollar una metodología que conduzca a la obtención de las características gráficas con un menor esfuerzo computacional. Teniendo como objetivo final el explotar su aplicación a nivel de sistema para cada caso de análisis, y así conocer de la manera más aproximada posible, para una condición de operación dada, la estabilidad de voltaje para el sistema de prueba; visto desde varios nodos de manera simultánea.

Una vez cubierta la parte teórico-matemática que existe detrás de las características de sistema **P-V**, **Q-V** y **P-Q**, el objetivo en este capítulo se centra en describir con detalle los algoritmos desarrollados para la obtención de tales características. Los algoritmos para su realización hacen uso extensivo de la capacidad gráfica de las computadoras tipo PC, habiéndose desarrollado el trabajo de programación en el lenguaje declarativo **MATLAB**.

La idea central en la que se basan los algoritmos consiste en el uso de equivalentes de Thévenin (ver Figura 5.1), para cada uno de los nodos de prueba que se desean considerar como parte del análisis de estabilidad de voltaje para el sistema de potencia bajo estudio. Los equivalentes son parametrizados en su parte activa, cálculo del voltaje equivalente de

Thévenin,  $E_{TH}$ , a partir del uso de la solución de flujos de potencia, considerando de manera alternada una condición de operación en vacío (sin carga), para cada uno de los nodos de prueba. La parte pasiva del equivalente, cálculo de las impedancias Thévenin,  $Z_{ii}$ , se obtienen a partir de las características pasivas de la red, y que son elementos de la matriz  $Z_{NODAL}$ .

## 5.2 OBTENCION DE LAS CARACTERISTICAS DE SISTEMA

Para la obtención de las características de sistema, se planteó el utilizar un voltaje de Thévenin constante para cada equivalente Thévenin; correspondiente a cada uno de los nodos de prueba del sistema. A continuación se presenta el algoritmo correspondiente, el cual es tratado primeramente de manera descriptiva del proceso, señalando detalladamente la formulación matemática requerida. Posteriormente se presenta el algoritmo utilizando un diagrama de flujo de información.

### 5.2.1 DESCRIPCION DEL PROCESO POR ETAPAS

1. Para un sistema de potencia dado, encontrar su balance nodal de potencia mediante un estudio de flujos.
2. Con la solución de flujos se seleccionan los nodos de prueba, almacenando las potencias P y Q netas asociadas a dichos nodos, así como sus voltajes.
3. Con los valores de las potencias P y Q netas de cada nodo de prueba, calcular los factores de potencia. Y a partir del uso de la solución de flujos de potencia considerando de manera alternada una condición de vacío para cada uno de los nodos de prueba, calcular los voltajes de thévenin.
4. Con los voltajes de Thévenin calculados, para cada uno de los nodos de prueba, se varía el voltaje en cada uno de ellos, considerando un factor de potencia constante, y se encuentra su respuesta P-V, usando (4.58), su respuesta Q-V, con P<sub>neto</sub> constante y usando (4.61), (4.63), (4.65), y (4.69). Las relaciones P-Q usando (4.15), y (4.22).
5. Para las características P-V y Q-V, con (4.58), (4.61), (4.63), (4.65), y (4.69) en su evaluación se generan raíces imaginarias, las cuales tienen que ser eliminadas ya que no tienen interpretación física.

6. Después de eliminar las raíces imaginarias de los vectores **P-V-Q** obtenidos se despliegan las características **P-V**, **Q-V**, y **P-Q**; para cada uno de los nodos de prueba seleccionados al inicio del estudio.
7. Si se desea simular la ocurrencia de una contingencia (sencilla, doble, etc.), se plantea en la entrada de datos, al inicio del estudio y nuevamente se realiza todo el procedimiento anterior, para determinar gráficamente la respuesta del sistema ante el disturbio. Los resultados gráficos (**P-V**, **Q-V**), se despliegan junto con los gráficos del caso base.

### 5.2.2 DIAGRAMA DE FLUJO

En la Figura 5.2 se presenta el diagrama de flujo que describe el algoritmo computacional de la metodología.

### 5.3 RESULTADOS USANDO EL ALGORITMO PROPUESTO

En esta sección se presentan los resultados obtenidos mediante el uso de la herramienta desarrolladas en el presente trabajo de investigación. La herramienta está diseñada para obtener las características de sistema: **P-V**, **Q-V** y **P-Q** con voltaje de Thévenin constante. El objetivo principal es mostrar a la herramienta como una metodología para el análisis en el problema de la estabilidad de voltaje en los sistemas eléctricos de potencia.

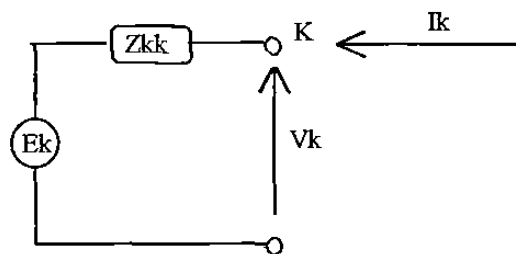


Fig. 5.1 Equivalente de Thévenin visto desde el nodo k

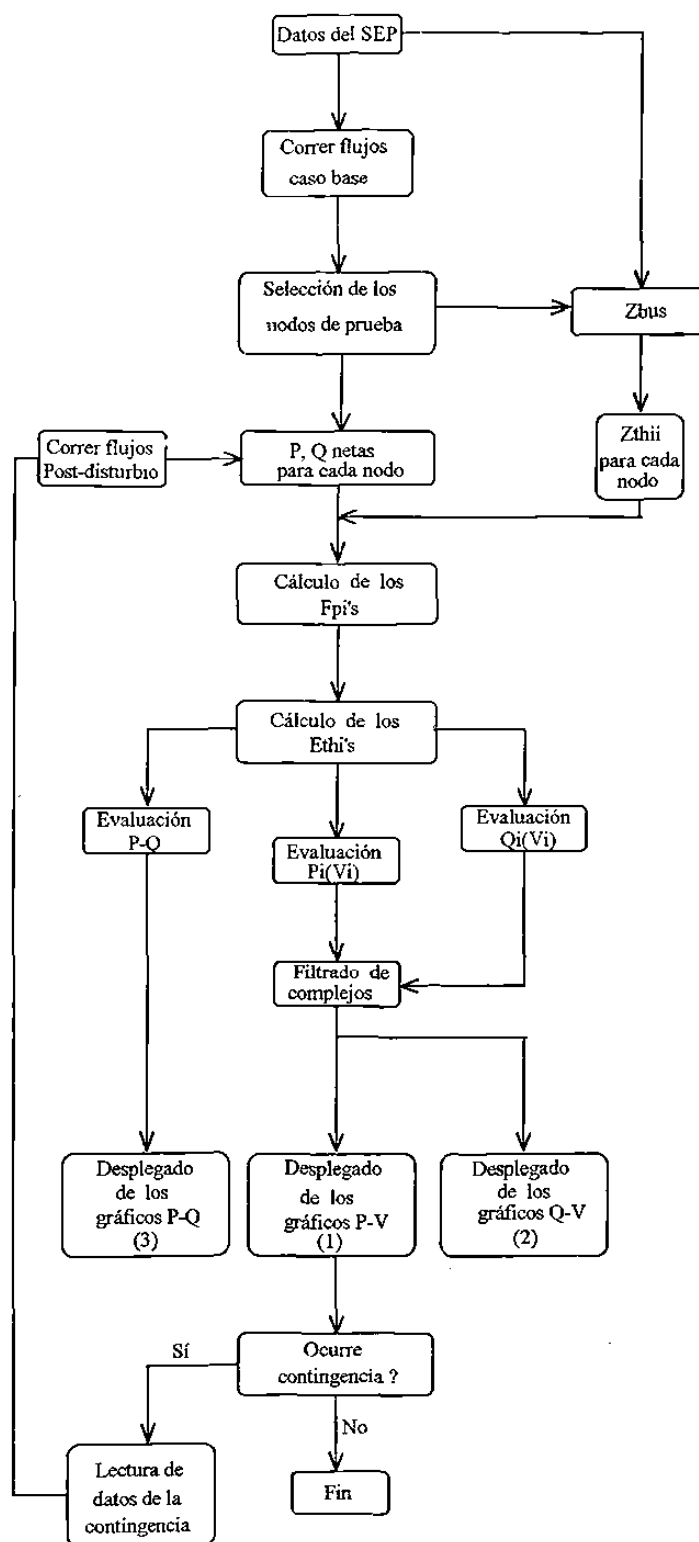


Fig. 5.2 Diagrama de flujo para obtener características gráficas del sistema.

El enfoque de la metodología propuesta consiste en obtener las características gráficas **P-V**, **Q-V** y **P-Q** desde un punto de vista de sistema, y poder así representar el comportamiento no-lineal de los sistemas de potencia ante cualquier variación en su condición de operación. Se presenta un conjunto de desplegados gráficos como resultado de cada caso de estudio analizado, tanto para un caso base, como para condiciones de post disturbio, si es que se aplica alguna contingencia al sistema dado.

Para no saturar la pantalla de trabajo con un gran número de desplegados gráficos, en un caso de estudio dado, el análisis de las condiciones de la estabilidad de voltaje para un sistema se realiza en grupos de tres nodos de prueba que se seleccionan previamente, y se muestran los resultados que se mencionan a continuación.

- Gráficos **P-V** correspondientes tanto a un caso base, como a un caso de contingencia si es que existe.
- Gráficos **Q-V** para las cantidades de potencia reactiva de balance nodal, requerimientos de soporte de voltaje, y consumo de potencia reactiva por el equivalente pasivo de cada uno de los nodos de prueba seleccionados. Para el caso base, así como para el caso de contingencia propuesto.
- Gráficos **P-Q** para cada nodo de prueba seleccionado. Para el caso base, así como para el caso de contingencia propuesto.

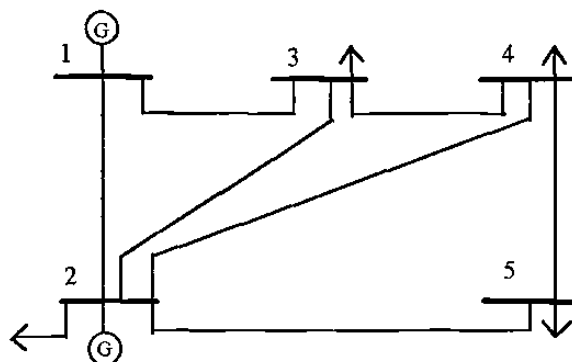


Fig 5.3 Sistema eléctrico de prueba.



### 5.3.1 CASOS DE PRUEBA

A continuación se presenta el desplegado del conjunto de resultados gráficos para un caso base y la aplicación de una contingencia, utilizando como sistema de prueba el mostrado en la Figura 5.3. La contingencia que se seleccionó comprende en forma simultánea la salida de la línea 1-3, y la disminución en un 15 % del nivel de generación de la unidad conectada al nodo 2. Los datos para el caso base, así como para el caso de contingencia, se muestran a continuación en las Tablas 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4.

Tabla 5.1 Datos del caso base: Topología de red.

Nodos p-q	Impedancia $Z_{p-q}$	Elemento Shunt $Y'_{pq}/2$
1-2	0.02+j0.06	0.0+j0.030
1-3	0.08+j0.24	0.0+j0.025
2-3	0.06+j0.18	0.0+j0.020
2-4	0.06+j0.18	0.0+j0.020
2-5	0.04+j0.12	0.0+j0.015
3-4	0.01+j0.03	0.0+j0.010
4-5	0.08+j0.24	0.0+j0.025

Tabla 5.2 Datos del caso base: Voltajes y potencias nodales.

Nodo p	Voltajes nodales	Generación P(MW)	Generación Q(MVARs)	Carga P(MW)	Carga Q (MVARs)
1	1.0+j0	0	0	0	0
2	1.0+j0	40	0	10	4
3	1.0+j0	0	0	95	5
4	1.0+j0	0	0	50	9
5	1.0+j0	0	0	30	10

Tabla 5.3 Datos de contingencia: Topología de red.

Nodos p-q	Impedancia $Z_{p-q}$	Elemento Shunt $Y'_{pq}/2$
1-2	0.02+j0.06	0.0+j0.030
2-3	0.06+j0.18	0.0+j0.020
2-4	0.06+j0.18	0.0+j0.020
2-5	0.04+j0.12	0.0+j0.015
3-4	0.01+j0.03	0.0+j0.010
4-5	0.08+j0.24	0.0+j0.025

Tabla 5.4 Datos de la contingencia: Voltajes y potencias nodales.

Nodo p	Voltajes nodales	Generación P(MW)	Generación Q(MVARs)	Carga P(MW)	Carga Q (MVARs)
1	1.0+j0	0	0	0	0
2	1.0+j0	34	0	10	4
3	1.0+j0	0	0	95	5
4	1.0+j0	0	0	50	9
5	1.0+j0	0	0	30	10

A continuación se presenta primeramente, el conjunto de resultados gráficos del caso base, y posteriormente los resultados gráficos que muestran el impacto de la contingencia una vez aplicada al sistema de prueba. El desplegado que se muestra, tanto para el caso base como para el caso de contingencia, no abarca todo el conjunto de gráficos que se obtienen en una sola corrida mediante el uso de la herramienta de análisis. Se seleccionó solamente un grupo de desplegados que muestran el tipo de resultados que se pueden obtener.

Los parámetros de operación que definen a cada uno de los desplegados presentados, tales como: factor de potencia, magnitud de los voltajes nodales, magnitud del voltaje de Thévenin e impedancias de Thévenin, asociados al equivalente de cada uno de los nodos de

prueba seleccionados, aunque no serán presentados sus valores son desplegados para cada caso de estudio analizado, tanto para las condiciones de pre contingencia como para el caso de post-contingencia.

### 5.3.2 RESULTADOS PARA EL CASO BASE

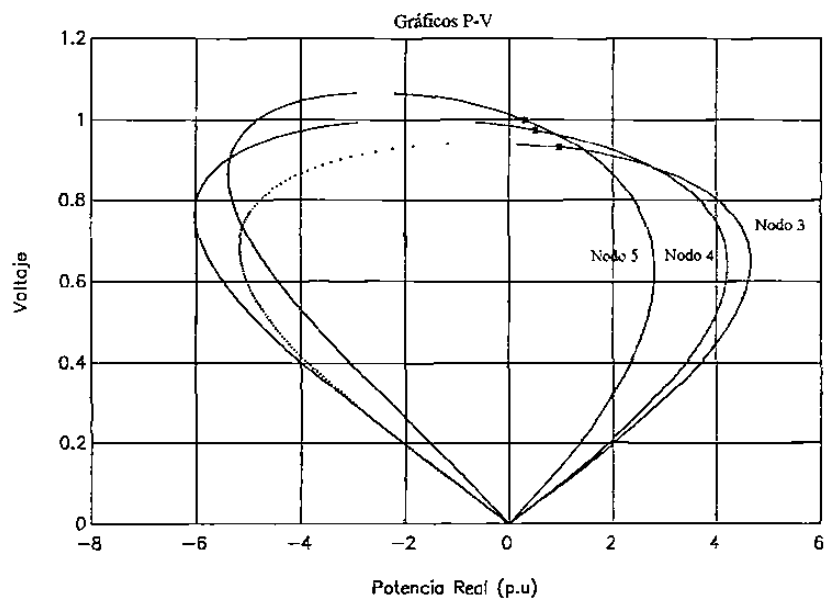


Fig 5.4. Gráficos P-V de los nodos 3, 4 y 5, caso base.

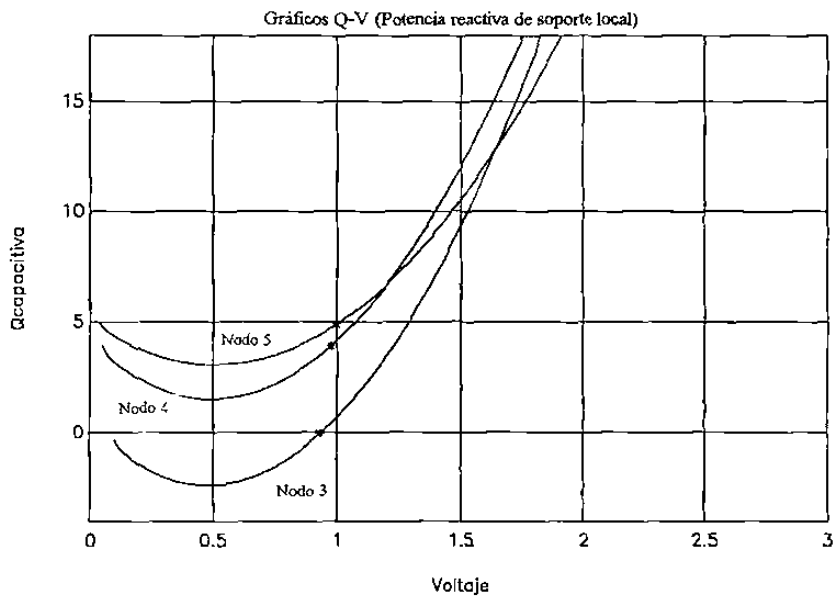


Fig 5.5. Gráficos Q-V de los nodos 3, 4 y 5, caso base.

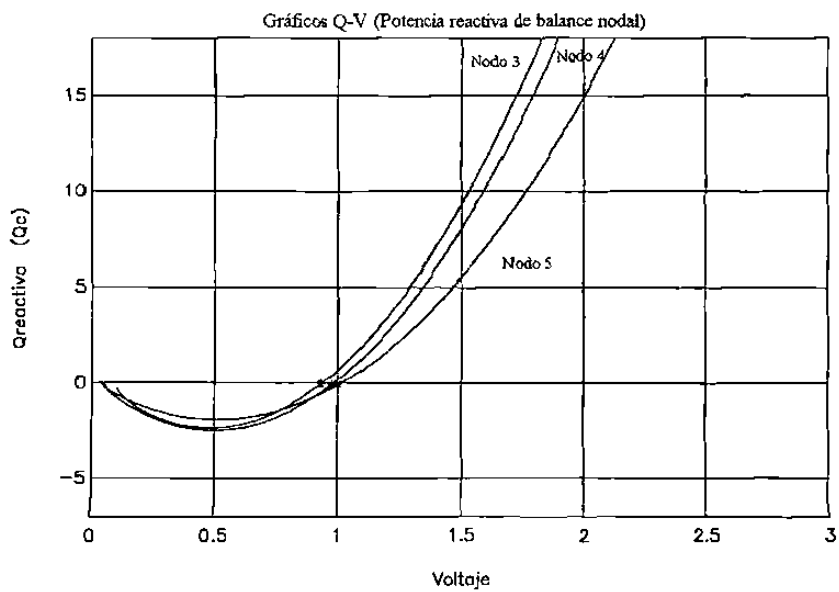


Fig 5.6 Gráficos Q-V de los nodos 3, 4 y 5, caso base.

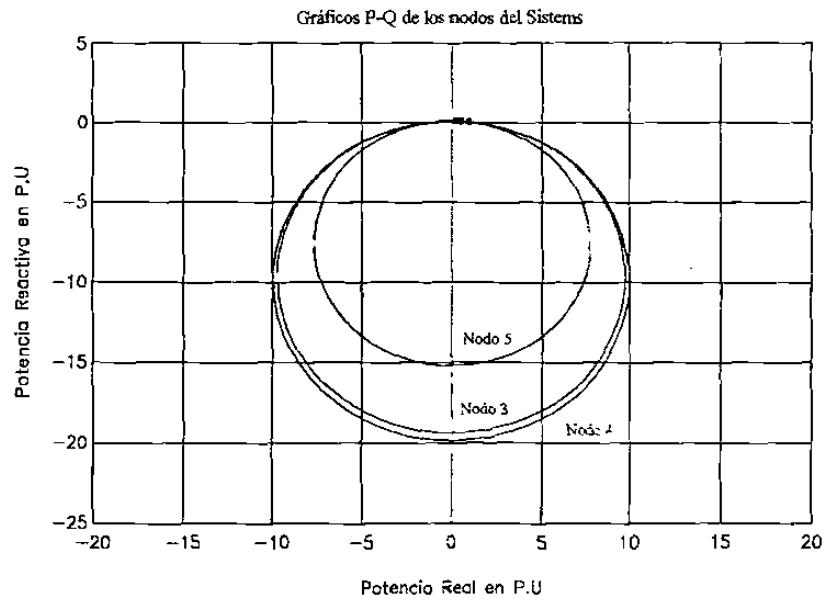


Fig 5.7 Gráficos P-Q de los nodos 3,4 y 5. Caso base

### 5.3.3 RESULTADOS PARA EL CASO DE CONTINGENCIA

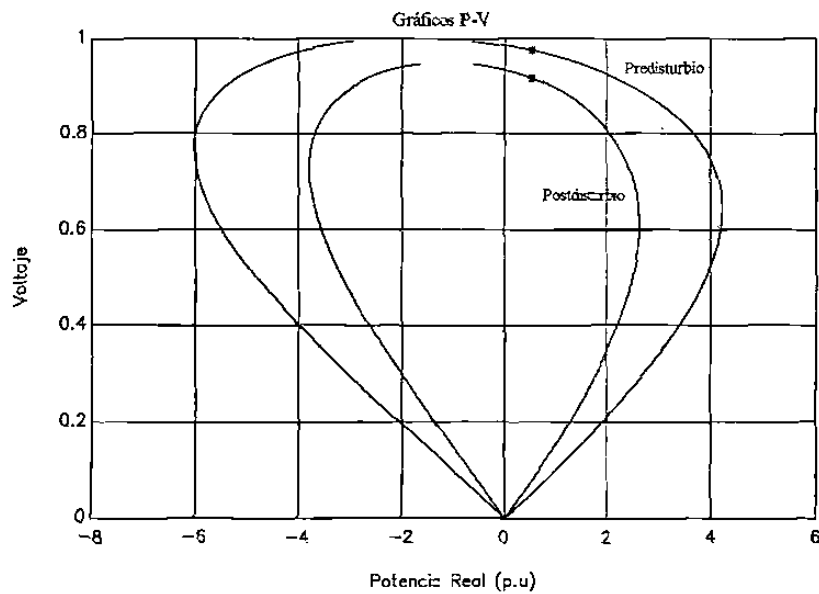


Fig 5.8 Gráficos P-V de pre-contingencia y post-contingencia para el nodo 4.

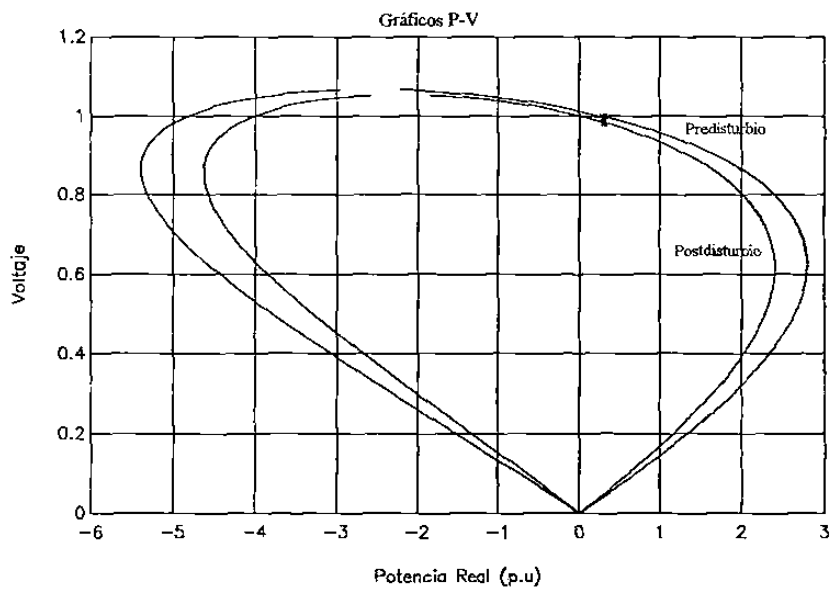


Fig 5.9 Gráficos P-V de pre-contingencia y post-contingencia en el nodo 5.

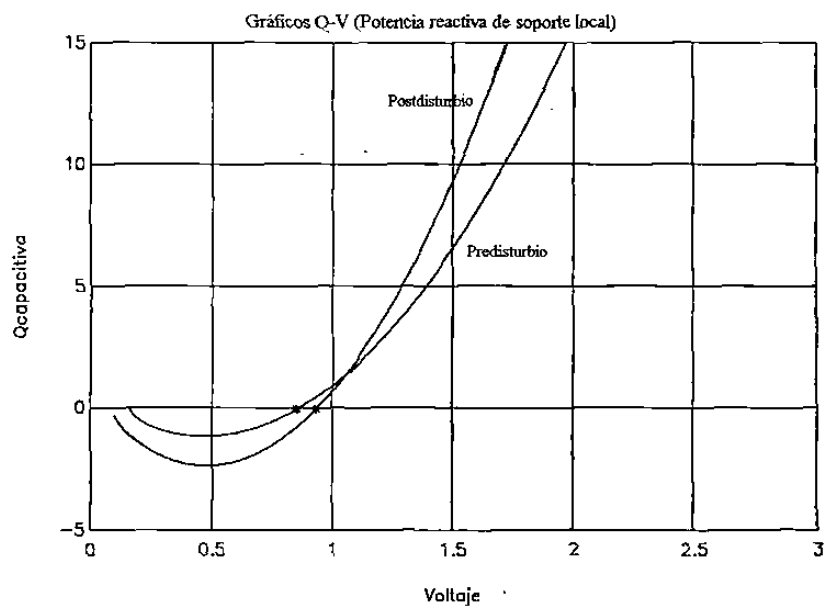


Fig 5.10 Gráficos Q-V de pre-contingencia y post-contingencia para el nodo 3.

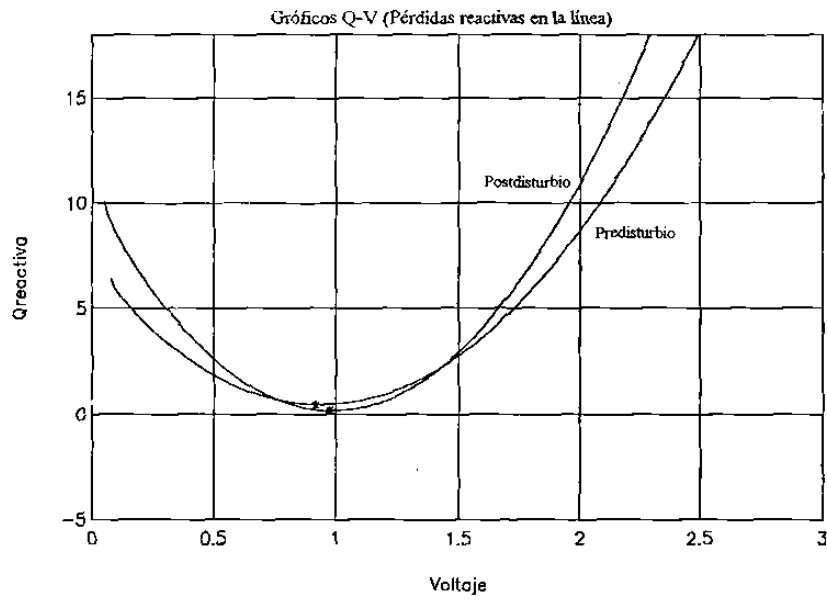


Fig 5.11. Gráficos **Q-V** para el caso de pre-contingencia y post-contingencia para el nodo 4.

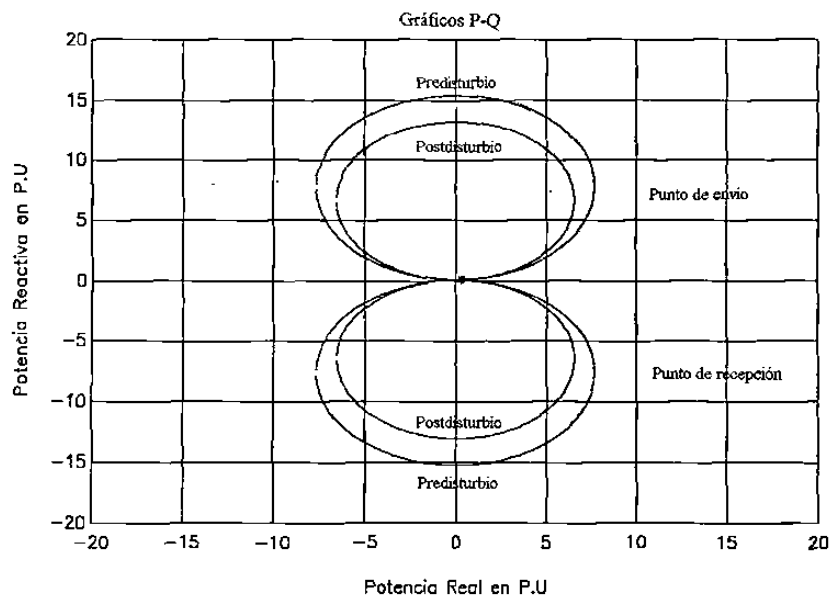


Fig. 5.12 Gráficos **P-Q** para el caso de pre-contingencia y post-contingencia en el nodo 5.

### 5.3.4 ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

A partir de los resultados obtenidos se pueden realizar las siguientes observaciones:

- Las relaciones entre la potencia activa y reactiva, entre la potencia activa y los voltajes nodales, así como las relaciones entre las cantidades de potencia reactiva: soporte local, consumo reactivo en el enlace, balance nodal, y los voltajes nodales de operación, son representadas por un asterisco en cada uno de los gráficos mostrados, y calculadas mediante el uso de las expresiones del capítulo cuatro, evaluandolas con los voltajes de operación de cada nodo de prueba y obtenidos a partir de una corrida de flujos, para una condición de operación dada.
- A través de la representación de los gráficos **P-Q** para los nodos de prueba, a partir de una condición de operación dada, es posible identificar el espacio de estado factible del sistema en el plano complejo de potencia  $S$  respecto a esos nodos.
- De manera análoga al punto anterior, la representación de los gráficos **P-Q**, asociados a un nodo de prueba y para las condiciones de pre-contingencia y post-contingencia, se puede identificar el espacio de estado factible del sistema en el plano complejo de potencia  $S$ , visto desde el nodo en cuestión. Esto es posible deducirlo ya que mientras el sistema tenga convergencia numérica o sea que la solución de flujos exista, ambas condiciones de operación pertenecen a dicho espacio.

### 5.3.5 VALIDACION Y ALCANCES DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

En esta parte del trabajo, se pretende mostrar el grado de aproximación de los resultados obtenidos a partir de la metodología propuesta, mediante el análisis de la respuesta P-V de un nodo del sistema de prueba mostrado en la Figura 5.3, bajo la condición de operación mostrada en la Tabla 5.5.



Tabla 5.5 Datos de la condición de operación de sistema: Voltajes y potencias nodales

Nodo	Voltajes nodales	Generación P(MW)	Generación Q(MVARs)	Carga P(MW)	Carga Q (MVARs)
1	1.0+j0	0	0	0	0
2	1.0+j0	40	0	10	4
3	1.0+j0	0	0	4	5
4	1.0+j0	0	0	12	9
5	1.0+j0	0	0	25	10

Seleccionado el nodo 5 del sistema de la Figura 5.3, se reprodujo su respuesta P-V mediante múltiples corridas de flujos, a fin de compararla con la que se obtiene a partir de la herramienta desarrollada, como se muestra en la Figura 5.13.

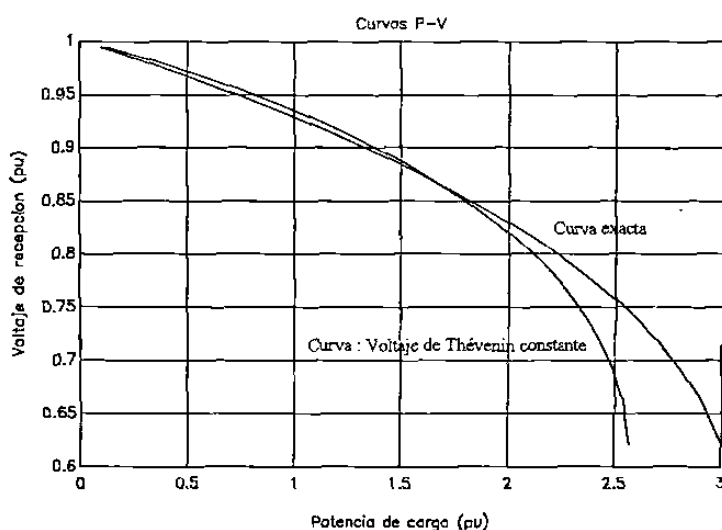


Figura 5.13 Gráficos P-V comparativos para el nodo 5

Se propuso una condición de operación para el sistema con poca demanda como la presentada en la Tabla 5.5, con el objetivo de obtener más rápidamente convergencia en cada una de las múltiples corridas de flujos desarrolladas para el cálculo de la curva exacta. Así mismo, se seleccionó el nodo 5 del sistema de la Figura 5.3 como nodo de prueba, ya que es el nodo menos robusto del sistema por presentar la mayor impedancia de Thévenin, buscando de

esta manera las condiciones de respuesta P-V menos lineales, a fin de evaluar los resultados obtenidos en forma restrictiva.

En la Figura 5.13 se puede observar que la evolución de la curva exacta, en un estrecho de banda operativa de voltaje cuyo límite inferior oscila en un 15% del nominal, es reproducida con una aproximación aceptable por la curva calculada por medio del equivalente con voltaje de thévenin constante, y que en torno a la "nariz" de la curva exacta la aproximación de la curva calculada se vuelve más pobre, debido a la no linealidad más pronunciada que dicha región de operación presenta.

La exactitud en el cálculo de las características gráficas del sistema, mediante el uso de equivalentes bajo la suposición de un voltaje de thévenin constante ha sido el esperado, ya que tal consideración se apega a un comportamiento totalmente lineal en cuanto a las contribuciones de otras inyecciones de potencia desde diferentes puntos eléctricos del sistema hacia el nodo probado, lo cual no corresponde al comportamiento real de un sistema de potencia. De tal manera, se puede pensar que es posible el cálculo de las características de sistema con una mayor aproximación haciendo uso de la metodología planteada, mediante la formulación de un modelo matemático adecuado que logre reproducir el comportamiento dinámico no-lineal del voltaje de thévenin que refleje a su vez las variaciones de las demás contribuciones de inyecciones de potencia en el sistema.

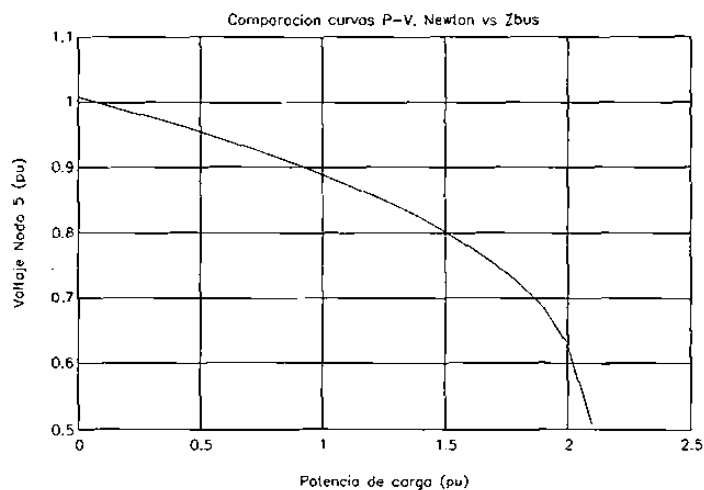


Figura 5.14 Comportamiento P-V en el nodo 5, calculado mediante Zbus y Newton formal para flujos.

Para la obtención del modelo matemático que permita el cálculo de un voltaje de Thévenin dinámico, se puede pensar en la formulación Zbus de flujos, ya que además de poder reproducir correctamente el comportamiento del sistema como lo muestra la Figura 5.14, se cuenta directamente con la matriz de sensibilidad (Matriz de impedancias), y el vector de las contribuciones de inyecciones de corriente nodal y la variaciones en los voltajes de nodo, lo cual implica mayor facilidad de cálculo en el problema planteado.

#### 5.4 RESUMEN

En este capítulo, se ha presentado la descripción completa de la metodología propuesta para la obtención de las características gráficas de sistema P-V, Q-V y P-Q. Se mostraron los resultados obtenidos a partir de la herramienta desarrollada, correspondientes a un caso base y a la aplicación de una contingencia al sistema de prueba establecido. Por último se realizó el análisis de los resultados obtenidos.

## CAPITULO 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1 INTRODUCCION

En este capítulo se muestran las conclusiones más importantes obtenidas a lo largo del desarrollo del presente trabajo de investigación, así como algunas recomendaciones para trabajos futuros que pueden realizarse a partir del mismo.

#### 6.2 CONCLUSIONES

Del presente trabajo de investigación se pueden obtener las siguientes conclusiones generales:

- El problema del control de la estabilidad de voltaje que antes se asociaba solamente a los sistemas eléctricos de potencia de características longitudinales, últimamente ha captado especial atención dentro del conjunto de problemas a resolver, en la planeación, operación y el control de todos los sistemas eléctricos del mundo, la tendencia apunta hacia el crecimiento, tanto en sus características topológicas como en sus niveles de carga.
- La necesidad del diseño, tanto de técnicas de análisis, así como de herramientas de simulación que ayuden al mejor entendimiento del fenómeno del voltaje es una realidad, y va en aumento al paralelo con los requerimientos de nuevas estrategias de operación que demandan los sistemas eléctricos de potencia de hoy en día. Tal es el caso del Sistema Eléctrico Nacional, el cual enfrenta cambios cruciales en su operación y control diario, así como por las condiciones planteadas en las nuevas políticas de privatización para la industria eléctrica que rigen en el país.
- Con lo mencionado anteriormente en este trabajo se trató y se logró plantear en detalle, el problema de la estabilidad de voltaje en los sistemas eléctricos de potencia, presentando la definición de los conceptos de mayor relevancia relacionados con el tópico, así como la formulación de un conjunto de técnicas propuestas en la literatura y adaptaciones y extensiones propuestas en esta tesis para el análisis del problema. Se establecieron ventajas y desventajas en su aplicación para el análisis del problema.

- Dentro del conjunto de las metodologías existentes para el análisis del problema, se encontró que el uso de las técnicas de modelación dinámica y estática puede llevarse a cabo en forma simultánea, de manera de complementar los alcances de cada una de ellas. Todo depende si los objetivos a alcanzar abarcan los dos aspectos que comprende el análisis de la estabilidad de voltaje, que son: el de valorar la proximidad a la inestabilidad de voltaje para un sistema eléctrico dado y los mecanismos que explican la aparición de este fenómeno.
- De lo revisado en la literatura técnica, respecto a la conceptualización, la formulación, así como de las ventajas y desventajas que presentan las metodologías del conjunto de técnicas de modelación estática para el análisis de la estabilidad de voltaje, se encontró que las características gráficas de sistema: **P-V**, **Q-V** y **P-Q**, poseen una buena cantidad de información de aplicación directa, la cual es de mucha utilidad en el análisis de las condiciones de estabilidad de voltaje que rigen a un sistema en una condición de operación determinada. Pero debido al costo computacional elevado y recursos humanos que representa el obtenerlas, su uso sistemático no ha sido ampliamente desarrollado como herramientas de análisis para la solución del problema.
- En este trabajo se logró el desarrollo de un algoritmo diseñado para la obtención de las características gráficas: **P-V**, **Q-V** y **P-Q**, con base en el uso de equivalentes de Thévenin vistos desde diferentes puntos eléctricos del sistema, bajo la suposición de un voltaje de Thévenin constante ante los cambios de carga propuestos durante el desarrollo de la simulación, utilizando el modelo de potencia constante para la carga. A partir de su implementación se propone una nueva metodología que permite determinar, tanto las condiciones de estabilidad de voltaje que rigen en un momento determinado a un sistema de potencia, como el análisis de la respuesta no-lineal del mismo, ante cualquier cambio presentado en su condición de operación.
- El planteamiento del algoritmo diseñado para la obtención de las características gráficas ya mencionadas, se probó para el cálculo de las características de sistema **P-V**, observando que la evolución de la curva exacta pudo ser reproducida por la curva calculada en un estrecho de banda operativa de voltaje, cuyo límite inferior oscila en un 15% del valor nominal, y que en torno a la "nariz" de la curva exacta, la aproximación de la curva calculada se vuelve más pobre, debido a la no linealidad más pronunciada de dicha región.

- La exactitud en el cálculo de las características gráficas de sistema, mediante el uso de equivalentes bajo la suposición de un voltaje de thévenin constante ha sido el esperado, ya que tal consideración se apega a un comportamiento totalmente lineal en cuanto a las contribuciones de otras inyecciones de potencia desde diferentes puntos eléctricos del sistema hacia el nodo probado, lo cual no corresponde al comportamiento real de un sistema de potencia.
- Para hacer posible el cálculo de las características gráficas de sistema con una mayor aproximación haciendo uso de la metodología planteada, se puede pensar en la formulación de un modelo matemático adecuado que logre reproducir, el comportamiento dinámico no-lineal del voltaje de thévenin que refleje a su vez, las variaciones de las demás contribuciones de inyecciones de potencia en el sistema hacia el nodo probado.
- Para la obtención del modelo matemático que permita el cálculo de un voltaje de thévenin dinámico, se puede pensar en la formulación Zbus de flujos, ya que además de poder reproducir correctamente el comportamiento del sistema, se cuenta directamente con la matriz de sensibilidad (Matriz de impedancias), y el vector de las contribuciones de inyecciones de corriente nodal y la variaciones en los voltajes de nodo, lo cual implica mayor facilidad de cálculo en el problema planteado.
- En el presente trabajo de investigación, se propuso el análisis desde una perspectiva tridimensional para las características de sistema. Se hizo uso extensivo de este recurso y se logró comprobar los factores de los cuales depende el fenómeno, así mismo se trató de introducir un concepto adicional para el estudio del problema.

### 6.3 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

Durante el desarrollo de la investigación se encontraron grandes posibilidades de una mayor aplicación de las características gráficas de sistema como herramientas de análisis en el problema de la estabilidad de voltaje. Tomando como base este trabajo se recomienda lo siguiente:

- El algoritmo desarrollado para la obtención de las características de sistema fue desarrollado en el lenguaje declarativo **MATLAB**, el grado de flexibilidad para su uso es aceptable, sin embargo, se puede mejorar ampliamente y con ello lograr la explotación del

mismo, sí se implementa como un módulo que forme parte del simulador digital de sistemas eléctricos de potencia, desarrollado en [31].

- Los resultados gráficos obtenidos con la metodología propuesta como una aproximación al cálculo exacto de las características de sistema mencionadas, pueden ser mejorados mediante el diseño de algoritmos que tomen en cuenta las variaciones en el voltaje de Thévenin y las características del comportamiento no-líneal de la carga, buscando el menor esfuerzo computacional posible.
- La simulación de la respuesta no-líneal del sistema, ante cambios en su condición de operación, mediante el uso de la herramienta desarrollada no toma en cuenta el impacto de la acción del esquema de protecciones con que cuenta un sistema de potencia. El esquema de protecciones es relevante en el desarrollo de un evento de inestabilidad de voltaje, bajo cualquier escenario dado. Es, por tanto, interesante modelar la operación de protecciones y adicionar su comportamiento dentro de la herramienta ya desarrollada a fin de valorar su impacto en la estabilidad de voltaje.
- Se deben de seguir dedicando esfuerzos para el diseño de algoritmos que permitan la obtención de las curvas características de sistema, tomando como base la idea propuesta en el presente trabajo que trata la obtención desde diferentes puntos eléctricos.

## REFERENCIAS

- [1] P. Kundur, "*Power Systems Stability and Control*," Mc Graw-Hill, Inc., 1994.
- [2] C. W. Taylor, "*Power System Voltage Stability*," Mc Graw-Hill, Inc., 1994.
- [3] V. Vénikov, "*Procesos Transitorios Eléctromecánicos en los Sistemas Eléctricos de Potencia*," Editorial Mir, Moscú, 1985.
- [4] Charles A. Gross, "*Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia*," Editorial Interamericana, México D. F., 1984.
- [5] W. D. Stevenson, "*Análisis de sistemas Eléctricos de Potencia*," Mc Graw-Hill, México, D. F, 1988, 2a. Edición.
- [6] P. M. Anderson, A. A. Fouad, "*Power System control and Stability*," IEEE Power Systems Engineering Series, New York, 1994.
- [7] F. Aboytes García, "*Control de Voltaje en Sistemas Eléctricos de Potencia*," Centro Nacional de Control de Energía, Comisión Federal de Electricidad, Monterrey, N. L, Mayo 1991.
- [8] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, "*Load Representation for Dynamic Performance Analysis*," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 2, May, 1993.
- [9] N. Yorino, H. Sasaki, A. Funahashi, F. D. Galiana, M. Kitagawa, "*On the Condition for Inverse Control Action of Tap-Changers*," Hiroshima University, Japan, Mc Gill University, Canada, Chugoku Electric Power Japan, 1992.
- [10] A. Chakrabarti, Member, A K Mukhopadhyay, Member, "*Voltage Stability of Longitudinal Power Systems*," UDC 621.311, 1990.
- [11] M. K. Pal, "*Voltage Stability Conditions Considering Load Characteristics*," Transactions on Power Systems, Vol 7, February, 1992.
- [12] W. R. Lachs Smieeee, D. Sutanto Smieeee, "*Diferent Types of Voltage Instability*," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 2, May, 1994.
- [13] CIGRE, "*Report on Planning Against Voltage Collapse*," October, 1986.



- [14] P. Kessel, H. Glavitsch, *"Estimating the Voltage Stability of a Power Systems,"* IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-1, No.3, July, 1986.
- [15] Charles Concordia, *"Voltage Stability Simplified,"* Butterworth-Heinemann Ltd., 1992.
- [16] W. W. Price, D. B. Klapper, N. W. Miller, A. Kurita, H. Okubo, *"A Multi-Faceted Approach to Power System Voltage Stability Analysis,"* CIGRE 75010, Paris, 1992 Session.
- [17] David J. Hill, L. A. Hiskens, *"Dynamic Analysis of Voltage Collapse in Power Systems,"* Proceedings of the 31st. Conference on Decision and Control, Tucson, Arizona, December, 1992.
- [18] H. Schattler, J. Zaborszky, *"Analysis of the Tap Changer Related Voltage Collapse Phenomena for the Large Electric Power Systems,"* Proceedings of the 31st. Conference on Decision and Control, Tucson, Arizona, December, 1992.
- [19] M. Stubbe, A. Bihain, J Deuse, *"Simulation of Voltage Collapse,"* Butterworth-Heinemann Ltd., 1992.
- [20] J. Deuse, M. Stubbe, *"Dynamic Simulation of Voltage Collapse,"* IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 3, August 1993.
- [21] C. Rajagopalan, B. Lesieutre, P. W. Sauer, M. A. Pai, *"Dynamic Aspects of Voltage/Power Characteristics,"* Transactions on Power Systems, Vol 7, No 3, August, 1992.
- [22] C.C Liu, K. Vu, R. Fishl, J. Chow, *"An Extended Study of Dynamic Voltage Collapse Mechanism,"* Proceedings of the 28th. Conference on Decision and Control, Tampa, Florida, December, 1989.
- [23] Byung Ha Lee, Kwang Y. Lee, Young Moon Park, *"Analysis and Control of Static and Dynamic Voltage Stabilities,"* Department of Electrical and Computer Engineering, Pennsylvania State University, Department of Electrical Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea.
- [24] K. Jimma, K. Vu, C. C Liu, *"A Study of Dynamic Load Models For Voltage Collapse,"* University of Washington, 1990.
- [25] J. Deuse, M. Stubbe, *"Dynamic Simulation of Voltage Phenomena",* Tracteel, Brussels, Belgium, 1993.

- [26] D. Karlsson, K. Linden, I. Segerqvist, B. Stenborg, *"Temporary Load-Voltage Characteristics for Voltage Stability Studies-Field and Laboratory Measurements,"* CIGRE 75010, Paris, 1992 Session.
- [27] Y. Sekine, K. Takahashi, Y. Ichida, Y. Ohura, N. Tsuchimori, *"Method of Analysis and Assessment on Power System Voltage Phenomena and Improvement Including Control Strategies for Greater Voltage Stability Margins,"* CIGRE 75010, Paris, 1992 Session.
- [28] E. Euxibie, M. Goubin, B. Heilbronn, L. Wehenkel, Y. Xue, *"Prospects of Application to the French System of Fast Methods for Transients Stability and Voltage Security Assessment,"* CIGRE 75010, Paris, 1992 Session.
- [29] O. B. Fosso, N. Flatab, T. Carlsen, O. Gjerde, M. Jostad, *"Margins to Voltage Instability Calculated for Normal and Outage Conditions,"* CIGRE 75010, Paris Session.
- [30] J. Avila Montes, S. Acha Daza, *"Herramientas Gráficas para la Enseñanza y el Análisis de la Estabilidad de Voltaje,"* RVP-94-EDU-03, 7a. Reunión de Verano de Potencia, Acapulco, México, Julio, 1994, Tomo II, pp. 20-29.
- [31] J. Alberto Avalos González, *"Ambientación Interactiva Basada en Objetos para la Simulación de Sistemas de Potencia,"* Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica, Programa Doctoral en Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, Nuevo León, México, Febrero, 1994.



