

SIMULACION Y ANALISIS DE LAS CARACTERISTICAS Q-V DE UN SISTEMA  
ELECTRICO EQUIVALENTE

Horacio Nelson Díaz Rojas

RESUMEN:

En este trabajo se analiza, desde un punto de vista estático, el efecto del comportamiento de la carga y la compensación de potencia reactiva en la estabilidad de tensión de un sistema eléctrico. El estudio se hace con un sistema eléctrico equivalente que alimenta, a través de un transformador regulador de tensión, una carga formada por un motor de inducción y una carga termostática. Empleando diferentes modelos de carga se obtienen las características potencia reactiva – tensión en un nudo de la red, después de la ocurrencia de una perturbación. Los resultados obtenidos demuestran la fuerte dependencia en la estabilidad de tensión del sistema, del modelo de la carga y de la rapidez con que actúe el control de reactiva.

1.- INTRODUCCION

El análisis de la estabilidad de tensión de una red eléctrica ha motivado en los últimos quince años una fuerte preocupación por el problema, siendo actualmente un tema de interés debido a la importancia de este fenómeno en la seguridad y calidad de suministro, en especial cuando por presiones de tipo económicas los sistemas eléctricos operan cada vez más cerca de sus límites de estabilidad.

Un sistema de potencia es estable en tensión si después de una perturbación los voltajes en las cargas se mantienen en límites aceptables, de manera que el sistema opere de forma segura, esto significa la existencia de un margen considerable entre el punto de operación después de la perturbación y el punto donde ocurre la inestabilidad de voltaje.

En la literatura especializada, se observa que para el estudio del problema se han utilizado diferentes tipos de formulaciones, tanto estáticas como cuasi-dinámicas y dinámicas existiendo diferentes teorías respecto a la necesidad y validez de estos

modelos que básicamente lo que hacen es considerar de distintas formas la carga, la generación y los mecanismos de control de potencia reactiva.

En este trabajo se analizan los aspectos básicos del fenómeno de estabilidad de tensión, utilizándose una red equivalente para ilustrar el efecto de los diferentes modelos de carga y el control de potencia reactiva. El estudio se realiza obteniendo las curvas Q-V para diferentes condiciones de operación del sistema.

### 2.- SISTEMA ELECTRICO EQUIVALENTE

El estudio se realizará con el sistema eléctrico que se muestra en la Fig. 1, el cual alimenta una carga de 600 MW a través de dos líneas en paralelo de 230 KV y de 113 Km. cada una, alimentadas desde una barra infinita (no se analiza el efecto de la generación). El sistema está fuertemente cargado y con una gran compensación de potencia reactiva (bancos de condensadores), posiblemente debido a la dificultad de construir nuevas líneas de transmisión.

La carga está compuesta por un consumo de naturaleza resistiva (50%), termostáticamente controlado, y un motor de inducción (50%) que está 80% compensado. El voltaje en la carga está regulado por un transformador con tomas variables (LTC) y en el extremo receptor de las líneas de 230 KV existe un banco de condensadores que se encarga del control de potencia reactiva en la barra REC.

El análisis se realizará de manera cuasi-dinámica, obteniéndose las curvas Q-V en el extremo receptor de la línea (Barra REC) para diferentes condiciones de operación del sistema, considerando distintos modelos de representación de las cargas antes e inmediatamente después que ocurre una perturbación en la red, que hace que una de las líneas de 230 KV quede fuera de servicio. Como el motor se modela de manera estática el análisis es aproximado; sin embargo, suficiente para comprender algunos de los problemas que pueden originar el colapso de tensión de una red eléctrica.

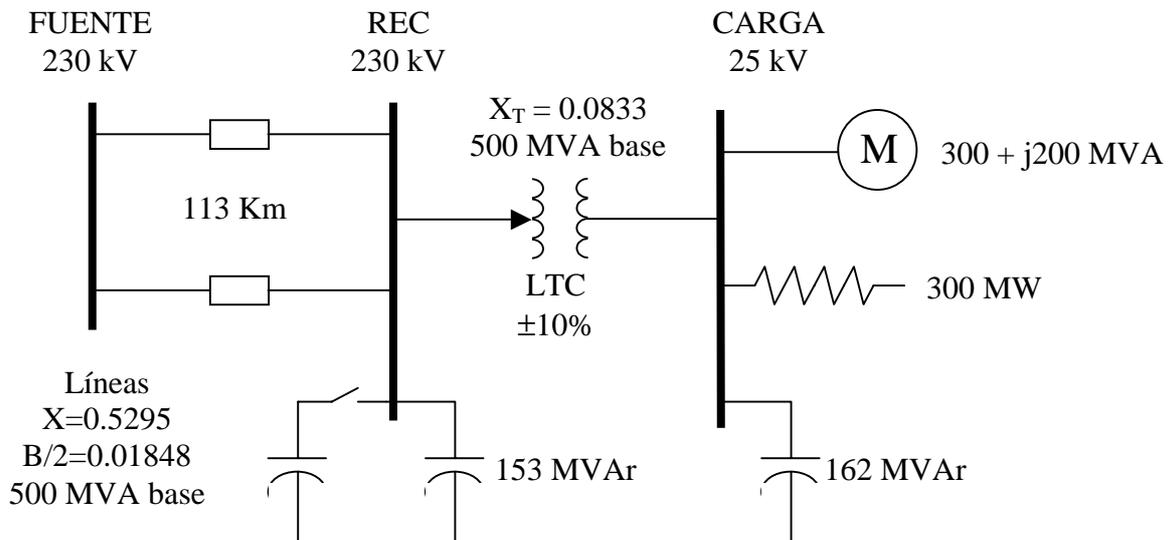


Fig. 1.- Red eléctrica equivalente utilizada para el análisis de los efectos de la carga y de la compensación de potencia reactiva en el problema de estabilidad de tensión. Los parámetros de los elementos están indicados en pu.

### 3.- CASOS DE ESTUDIO

Para estudiar el efecto de la carga y la compensación de potencia reactiva se proponen cinco casos en los cuales el sistema se comporta con diferentes características, que tienen como objetivo tratar de simular de manera cuasi-dinámica el comportamiento de la red ante la pérdida de una de las líneas, para ello se considerarán diferentes modelos de cargas en el tiempo y la capacidad del LTC de controlar la tensión en la carga. Se determinarán las curvas Potencia Reactiva Inyectada – Voltaje en la barra REC del sistema para los siguientes casos:

#### 3.1.- CASO 1

En este caso el sistema opera en régimen permanente en condiciones normales alimentando la carga especificada. Las tensiones en las barras FUENTE y REC son

iguales a 1.05 pu. y la tensión en la barra de CARGA es 1.0 pu. Los componentes de la red se comportan de la siguiente forma:

Sistema: Normal, no existe aun pérdida de la línea.

LTC : Las tomas están actuando para mantener la tensión en la carga en 1.0 pu, siempre y cuando sea posible considerando que las tomas pueden variar entre 0.9 y 1.1.

Motor : Potencia Activa = Constante , Potencia Reactiva = Constante.

Carga Termostática : Potencia Activa = Constante.

### 3.2.- CASO 2

Este caso trata de simular la operación del sistema en el instante inmediatamente después que una de las líneas queda fuera de servicio. Los componentes de la red se comportan de la siguiente forma:

Sistema : Anormal, pues se ha perdido una de las líneas.

LTC : El LTC no tiene tiempo de actuar, por lo cual la toma queda fija en el valor de pre-falla.

Motor : Se considera como impedancia constante.

Carga termostática : Se considera como impedancia constante.

### 3.3.- CASO 3

El primer instante de la perturbación ha pasado y se trata de simular ahora el comportamiento del sistema instantes después de la pérdida de una de las líneas. Los componentes de la red se comportan de la siguiente forma:

Sistema : Anormal, pues se ha perdido una de las líneas.

LTC : El LTC aun no tiene tiempo de actuar, por lo cual la toma permanece con el valor que tenía en el caso 2.

Motor : Potencia activa=constante, Potencia Reactiva  $Q = Q(V)$  (varia con la tensión)

Carga termostática : Se considera como impedancia constante.

### 3.4.- CASO 4

La línea ha salido de servicio y ha pasado un tiempo suficiente para que reaccionen las tomas del transformador. Los componentes de la red se comportan de la siguiente forma:

Sistema : Anormal, pues se ha perdido una de las líneas.

LTC : El LTC comienza nuevamente a actuar, pero si sale de sus límites de toma, superior o inferior, no será capaz de mantener la tensión en la carga en 1.0 pu.

Motor : Potencia activa=constante, Potencia Reactiva  $Q = Q(V)$  (varia con la tensión)

Carga termostática : Se considera como impedancia constante.

### 3.5.- CASO 5

Ha pasado un tiempo tal que la red, después de perder una de sus líneas, alcanza su régimen de operación permanente. Los componentes de la red se comportan de la siguiente forma:

Sistema : Opera en régimen permanente, pero con una línea fuera de servicio.

LTC : Las tomas están actuando para mantener la tensión en la carga en 1.0 pu, siempre y cuando sea posible considerando que las tomas pueden variar entre 0.9 y 1.1.

Motor : Potencia activa=constante, Potencia Reactiva  $Q = Q(V)$  (varia con la tensión)

Carga termostática : Potencia activa = constante.

En la Fig. 2, se presenta un diagrama de estados donde es posible observar el comportamiento en el tiempo de cada uno de los elementos de la red correspondientes a los cinco casos de Interés. En este diagrama sólo se señalan estados de operación y no magnitudes de las variables, por lo cual no deben mal interpretarse las gráficas presentadas.

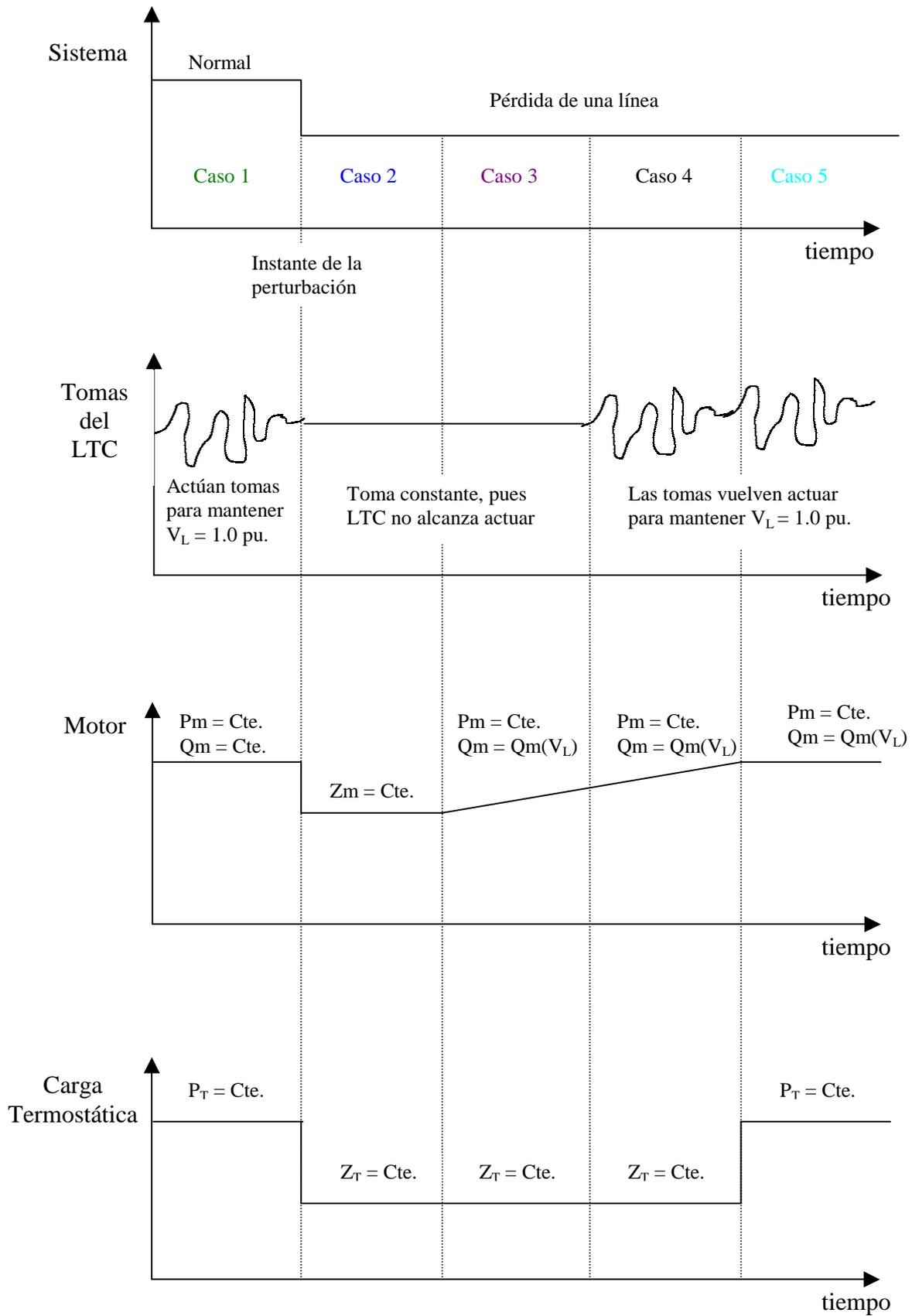


Fig. 2.- Diagrama de estados para indicar las condiciones de operación en el tiempo de los distintos componentes de la red.

#### 4.- METODOLOGÍA PARA SIMULAR LOS CASOS DE INTERES

En general pueden plantearse dos metodologías para resolver el problema de encontrar las curvas Q-V para los cinco casos de interés:

##### 4.1.- Metodología ocupando un programa de flujo de carga

En este caso, haciendo uso de un programa de flujo de carga se resuelve el problema simulando el sistema para cada caso de interés y corriendo tantos flujos de carga como sea necesario, para trazar aceptablemente cada curva Q-V. En general esta metodología puede resumirse en los siguientes pasos:

1. Modelar el sistema de acuerdo a las características indicadas para cada caso, teniendo especial cuidado en seleccionar adecuadamente el modelo de carga que corresponda y el valor de la toma del transformador.
2. Definir la barra de interés, en este caso la barra REC, como nudo PV especificando el valor de tensión correspondiente.
3. Ejecutar el programa de flujo de carga y tomar nota de la potencia reactiva obtenida en la barra PV definida en 2.
4. Graficar la potencia reactiva obtenida en 3.- versus la tensión especificada en 2, que corresponderá a un punto de la curva Q-V.
5. Repetir los pasos 2 a 4 tantas veces como sea necesario para graficar aceptablemente la curva Q-V, observar en cada caso las posibles variaciones que experimenta la toma.

#### 4.2.- Metodología analítica directa

En este caso se trata de analizar analíticamente la red, de manera de obtener un modelo que permita evaluar y simular de manera directa y no iterativa cada una de las curvas Q-V de interés. Para ello se han seguido los siguientes pasos:

##### 4.2.1.- Modelo de los componentes de la red eléctrica

Para el estudio que se realiza es importante el modelo que se ocupa para cada uno de los componentes de la red eléctrica, en especial los de las cargas, por lo que a continuación se describen los modelos utilizados para la simulación.

##### a) Modelo del Sistema:

Se considera como sistema a la red que alimenta a la barra REC tal como se muestra en la Fig. 3, modelándose con su respectivo equivalente de thevenin visto desde este nudo, el cual debe determinarse tanto para el caso de operación normal como para los casos en que se ha perdido una de las líneas.

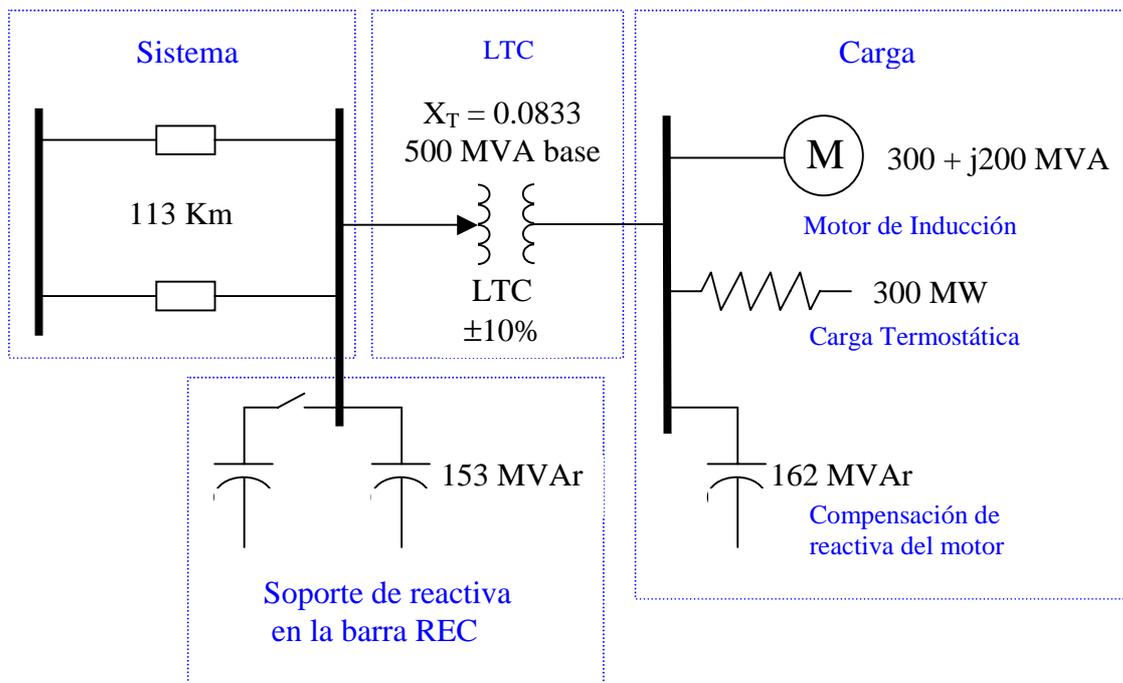


Fig. 3.- Subsistemas de la red eléctrica equivalente de la Fig. 1.

Equivalente de Thevenin del sistema en condiciones normales:

En condiciones normales el sistema está formado por una barra infinita que alimenta la barra REC mediante dos líneas largas conectadas en paralelo.

$$X_{TH} = \frac{j \frac{X_L}{2} \cdot \left( \frac{-j}{B_L} \right)}{j \frac{X_L}{2} - \frac{j}{B_L}} = \frac{j \frac{0.5295}{2} \cdot \left( \frac{-j}{2 \cdot 0.01848} \right)}{j \frac{0.5295}{2} - \frac{j}{2 \cdot 0.01848}} = j0.2674 \text{ pu.}$$

$$V_{TH} = V_{FUENTE} \cdot \frac{\frac{-j}{B_L}}{j \frac{X_L}{2} - \frac{j}{B_L}} = 1.05 \cdot \frac{\frac{-j}{2 \cdot 0.01848}}{j \frac{0.5295}{2} - \frac{j}{2 \cdot 0.01848}} = 1.0604 \text{ pu.}$$

Equivalente de Thevenin del sistema en condiciones anormales :

Al perder una línea de transmisión el equivalente de thevenin del sistema será:

$$V_{TH} = 1.0604 \text{ pu.}$$

$$X_{TH} = 2 \cdot 0.2674 = 0.5347 \text{ pu.}$$

Por lo tanto el circuito equivalente de thevenin del sistema se muestra en la Fig. 4.

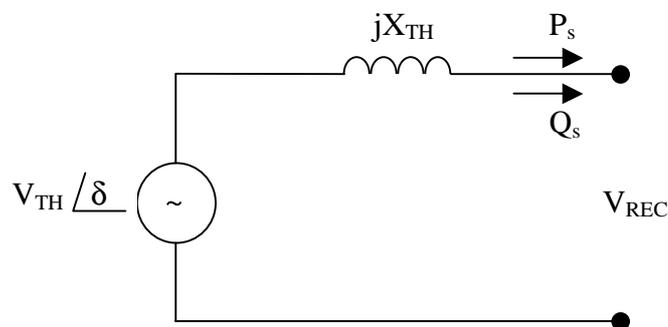


Fig. 4.- Circuito equivalente de thevenin del sistema indicado en la Fig. 3.

Los parámetros dependerán del caso de análisis que se estudie.

En el sistema de la Fig. 4, se cumple que:

$$P_s = \frac{V_{REC} V_{TH}}{X_{TH}} \cdot \text{sen}(\delta)$$

$$Q_s = \frac{V_{REC} V_{TH}}{X_{TH}} \cdot \text{cos}(\delta) - \frac{V_{REC}^2}{X_{TH}}$$

de donde se establece que :

$$P_s^2 = \left( \frac{V_{REC} V_{TH}}{X_{TH}} \right)^2 \cdot \text{sen}^2(\delta)$$

$$\left( Q_s + \frac{V_{REC}^2}{X_{TH}} \right)^2 = \left( \frac{V_{REC} V_{TH}}{X_{TH}} \right)^2 \cdot \text{cos}^2(\delta)$$

luego :

$$Q_s = \sqrt{\left( \frac{V_{REC} V_{TH}}{X_{TH}} \right)^2 - P_s^2} - \frac{V_{REC}^2}{X_{TH}}$$

b) Modelo del transformador con cambio de tomas:

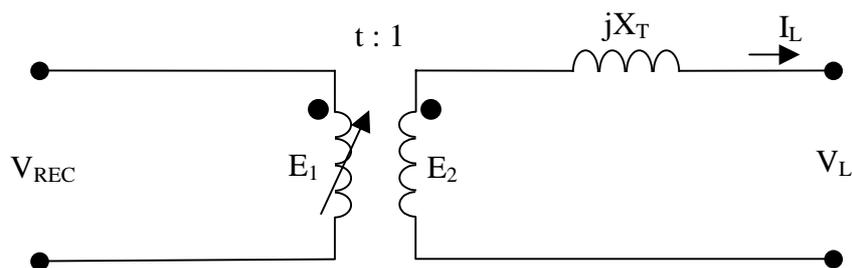


Fig. 5.- Modelo del transformador con cambio de tomas (LTC)

Es importante destacar el hecho que el LTC sólo es capaz de controlar la tensión en la carga con las tomas variando entre 0.9 y 1.1, por lo tanto si se necesitan valores superiores o inferiores a estos rangos el transformador quedará con la toma en el límite correspondiente según sea el caso.

La potencia reactiva consumida por el transformador puede obtenerse como:

$$Q_T = X_T \cdot I_L^2$$

c) Modelo del motor

Para el motor se consideran los siguientes modelos:

i) Potencia activa constante

$$P_M = \frac{300}{500} = 0.6 \text{ pu.}$$

ii) Potencia reactiva constante

$$Q_M = \frac{200}{500} = 0.4 \text{ pu.}$$

iii) Impedancia constante  $Z_M = G_M + jB_M = \text{cte.}$

$G_M$  y  $B_M$  pueden obtenerse de las condiciones nominales.

$$G_M = \frac{P_{MN}}{V_{LN}^2} = \frac{0.6}{1} = 0.6 \text{ pu.}$$
$$B_M = \frac{Q_{MN}}{V_{LN}^2} = \frac{0.4}{1} = 0.4 \text{ pu.}$$

Por lo tanto, en este caso las potencias activas y reactivas consumidas por el motor para una tensión  $V_L$  cualquiera será :

$$P_M = G_M \cdot V_L^2$$
$$Q_M = B_M \cdot V_L^2$$

iv) Potencia Reactiva variable con la tensión  $Q_M = Q_M(V_L)$

Para los casos en que se requiere la potencia reactiva dependiente de la tensión se ha considerado el modelo del motor que se muestra en la Fig. 6.

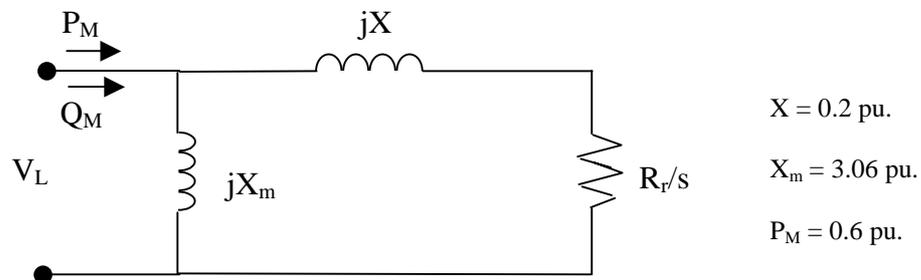


Fig. 6.- Circuito equivalente del motor de inducción

La potencia reactiva  $Q_M$  absorbida por el motor se obtiene a partir de :

$$Q_M = \frac{V_L^2}{X_m} + \frac{V_L^2}{2 \cdot X} - \sqrt{\left(\frac{V_L^2}{2 \cdot X}\right)^2 - P_M}$$

d) Modelo de la Carga Termostática

Esta es una carga de naturaleza resistiva controlada termostáticamente para la cual se consideran los dos modelos siguientes :

i) Potencia Constante :

$$P_T = \frac{300}{500} = 0.6 \text{ pu.}$$

ii) Impedancia Constante :  $G_T = \text{cte.}$

$$G_T = \frac{P_{TN}}{V_{LN}^2} = \frac{300/500}{1} = 0.6 \text{ pu.}$$

Por lo tanto, en este caso la potencia activa consumida por la carga termostática para una tensión  $V_L$  cualquiera será :

$$P_T = G_T \cdot V_L^2$$

e) Modelo de la compensación reactiva del motor

El banco de condensadores que se utiliza para la compensación de potencia reactiva del motor, se modela como impedancia constante, por lo tanto de los datos nominales se tiene:

$$B_c = \frac{162/500}{1} = 0.324 \text{ pu.}$$

Luego la potencia reactiva aportada por este banco a una tensión  $V_L$  cualquiera será :

$$Q_c = B_c \cdot V_L^2$$

f) Modelo del soporte de reactiva en la barra REC

En la barra REC existe un Banco de condensadores variables que actúa como soporte de reactiva en este nudo y que simula la presencia de un condensador sincrónico o un SVC (Static Voltage Control). Se consideran para el estudio tres tamaños equivalentes, 153MVar, 228 MVar y 278 MVar, por lo tanto:

$$B_1 = \frac{153}{500} = 0.306 \text{ pu.} \quad ; \quad B_2 = \frac{228}{500} = 0.456 \text{ pu.} \quad ; \quad B_3 = \frac{278}{500} = 0.556 \text{ pu.}$$

En consecuencia la inyección de potencia reactiva al nudo REC estará dada por :

$$Q_{\text{Banco}} = B_i \cdot V_{\text{REC}}^2$$

4.2.2.- Balance de Potencias en la Barra REC

Considerando los modelos comentados anteriormente el sistema de la Fig. 3, se puede representar como se muestra en la Fig. 7

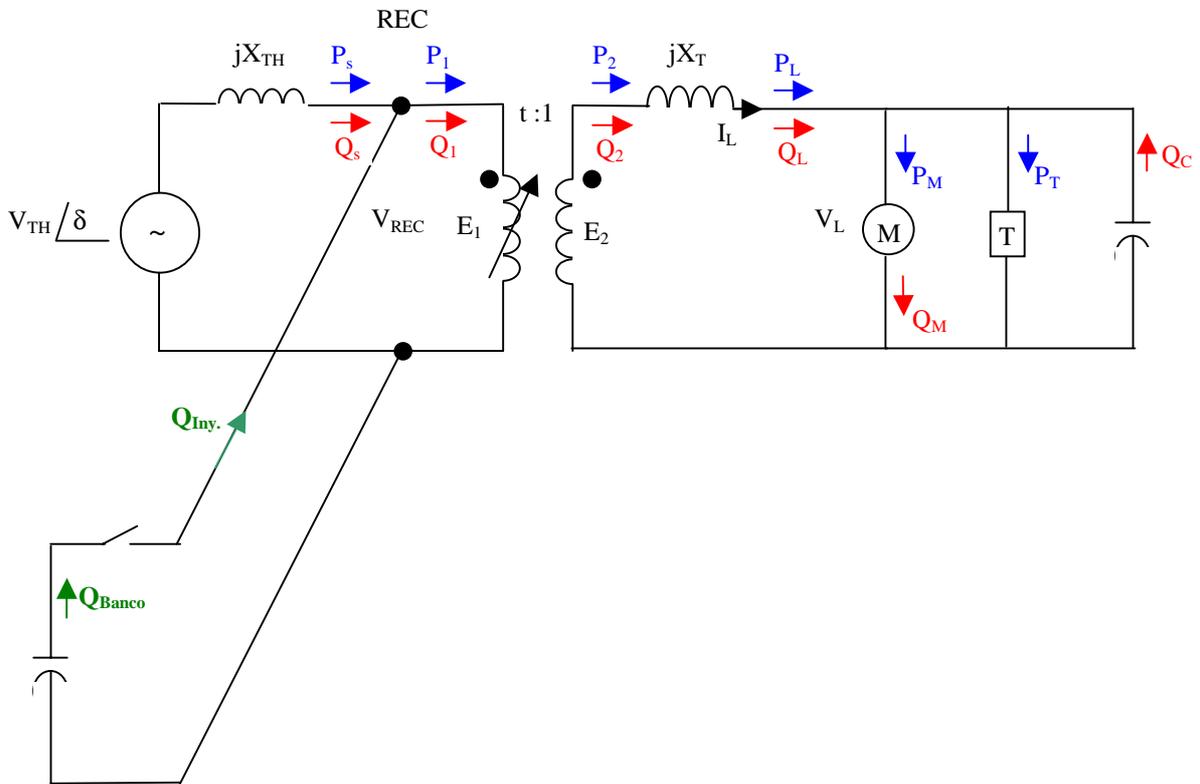


Fig. 7.- Red equivalente para la red de la Fig. 3, donde se indican los flujos de potencia que fluyen por cada uno de los elementos del sistema.

En la red de la Fig. 7, puede realizarse el siguiente balance de potencias en el nudo REC

Balance de Potencias Activas :

$$\begin{aligned}
 P_s &= P_1 \\
 P_1 &= P_2 \\
 P_2 &= P_L \\
 P_L &= P_M + P_T
 \end{aligned}$$

Balace de Potencias Reactivas :

$$Q_{Iny.} = Q_1 - Q_s$$

$$Q_1 = Q_2$$

$$Q_2 = Q_T + Q_L$$

$$Q_L = Q_M - Q_C$$

Por lo tanto la potencia reactiva inyectada en la barra REC está dada por :

$$Q_{Iny.} = Q_T + Q_M - Q_C - Q_s$$

Nótese que en el punto de equilibrio del sistema debe satisfacerse que la potencia reactiva inyectada sea igual a la potencia reactiva suministrada por el Banco de condensadores (soporte de reactiva en la barra REC); es decir:

$$Q_{Iny.} = Q_{Banco}$$

Cada una de las potencias que forman parte de la potencia reactiva inyectadas están definidas por las expresiones deducidas cuando se modelaron los elementos del sistema. Se observa de esta forma que el sistema de la Fig. 7, para los efectos de obtener las curvas  $Q_{Iny.} - V_{REC}$  (barra REC) puede interpretarse como se muestra en la Fig. 8.

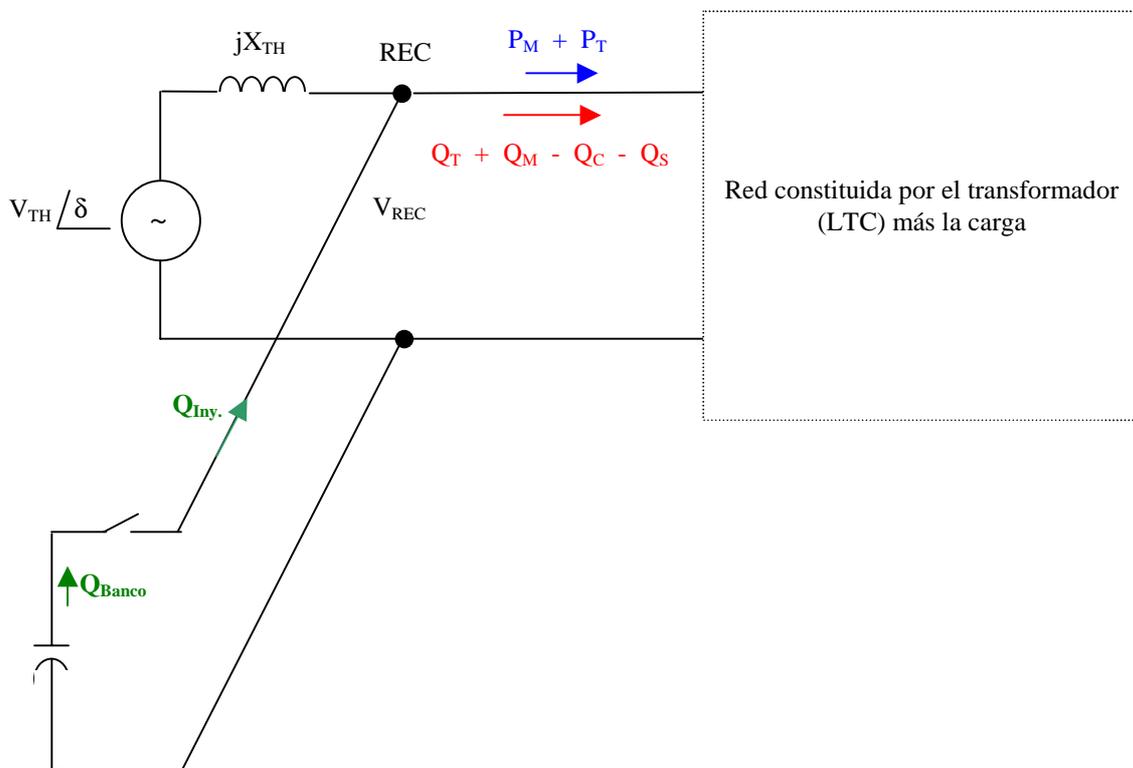


Fig. 8.- Sistema equivalente de la Fig. 7 visto desde la barra REC

En consecuencia, el problema se ha reducido a evaluar cada una de las potencias que salen de la barra REC indicada en la Fig. 8. Puesto que estas potencias dependen del modelo de carga que se seleccione, su magnitud dependerá del caso de estudio que se analice. En general, lo que se ha hecho para evaluar estas potencias es lo siguiente:

- i) Dar un valor a la tensión en la carga ( $V_L$ ).
- ii) Especificar un modelo para la carga (depende del caso de estudio)
- iii) Con los datos de i) y ii) quedan determinadas las potencias en la carga ( $P_M$ ,  $Q_M$ ,  $P_T$ ,  $Q_c$ ) y la corriente de carga ( $I_L$ ), con lo cual es posible calcular  $Q_T$ .
- iv) Calcular la tensión  $E_2$  en los enrollados secundarios del transformador (LTC) :

$$E_2 = jX_T \cdot \dot{I}_T + V_L$$

- v) Calcular la tensión en la barra REC :

$$V_{REC} = t \cdot E_2$$

El valor de la toma depende del caso que se estudie y es importante tener en cuenta que sólo puede variar entre 0.9 y 1.1.

- vi) Con la tensión obtenida en v) se puede determinar  $Q_s$  y de esta forma evaluar la potencia reactiva inyectada  $Q_{Iny}$ .

## 5.- ANÁLISIS DE LOS CASOS DE ESTUDIO

Cada uno de los casos de interés se ha simulado con Matlab, en esta sección se presentan y analizan las curvas obtenidas, para todos los casos se ha considerado que las tomas pueden variar de manera continua y que el soporte de reactiva en la barra REC puede ser de 153 MVar, 228 MVar y 278 MVAR.

### 5.1.- ANALISIS CASO 1

En este caso existirán tres tramos de curvas en función de las tomas ( $t$ ) que existan en el transformador:

- a) toma = 0.9
  - Variar  $V_L$  entre, por ejemplo, 0.8 y 1.0
  - Calcular potencias de acuerdo a la metodología general
- b)  $0.9 < \text{toma} < 1.1$

- En este caso las tomas pueden mantener la tensión en la carga en 1 pu., es decir  $V_L$  permanece constante.
  - Las potencias en la carga son constantes,  $E_2 = \text{cte.}$  y  $Q_T = \text{cte.}$
  - Variar las tomas entre 0.9 y 1.0 y determinar  $V_{REC}$
  - Calcular potencias de acuerdo a la metodología general
- c) Toma = 1.1
- Variar  $V_L$  entre, por ejemplo, 1.0 y 1.2
  - Calcular potencias de acuerdo a la metodología general.

Este procedimiento fue programado en Matlab y los resultados se muestran en la Fig 9.

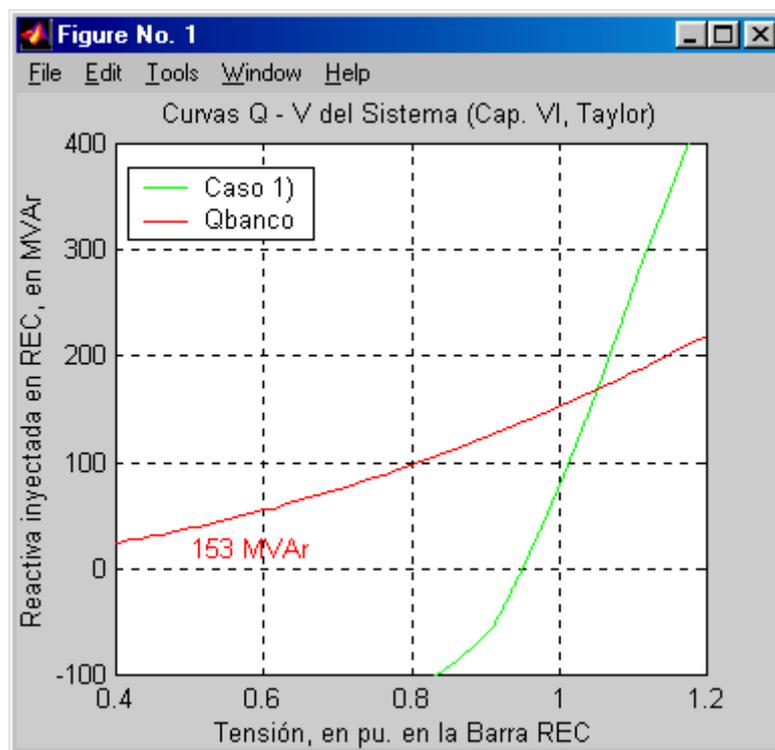


Fig. 9.- Curva  $Q_{Iny} - V_{REC}$  para el caso 1)

Sistema operando en condiciones normales

De la Fig. 9, se puede observar que el punto de operación del conjunto formado por el sistema ( $Q_{Iny.}$ ) y el soporte de reactiva (banco de condensadores) en la barra REC ( $Q_{Banco}$ ) es el punto de intersección de ambas curvas, el cual corresponde una tensión de aproximadamente de 1.05 pu. Por lo tanto, el sistema operando en condiciones normales y regimen permanente funciona de manera estable.

El quiebre que se produce en la curva de potencia reactiva inyectada (color verde) en torno a una tensión de 0.91 pu. se debe a que la toma del transformador ha alcanzado su límite inferior ( $t = 0.9$ ), por lo que permanece constante para cualquier tensión menor que 0.91 pu., lo cual provoca el cambio de pendiente que se aprecia en la curva.

## 5.2.- ANALISIS CASO 2

En este caso el sistema pierde una línea, la toma del transformador permanece constante y la curva  $Q_{Iny} - V_{REC}$  se determina como:

- Obtener con los datos de Pre-falla el valor de la toma ( $t = 1.0383$ )
- Variar  $V_L$  entre, por ejemplo, 0.7 y 1.2
- Calcular potencias de acuerdo a la metodología general, considerando el modelo de carga que se usa en este caso (impedancias constantes).

Los resultados de la simulación se muestran en la Fig. 10.

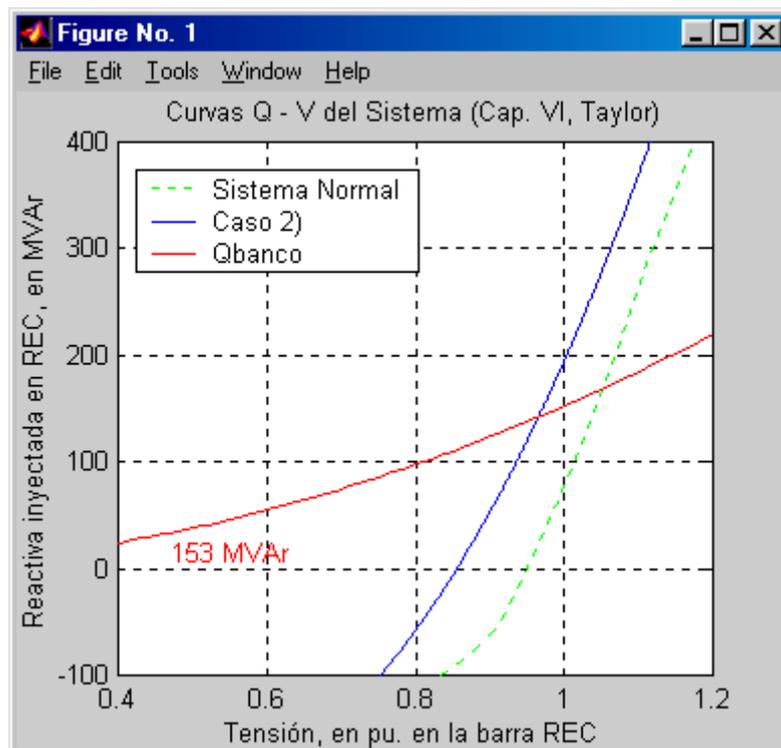


Fig. 10.- Curva  $Q_{Iny} - V_{REC}$  para el caso 2), se muestra el caso normal para Efectos de comparación (curva de color verde).

De la Fig. 10, se puede observar que inmediatamente después que una de las líneas sale de servicio el punto de operación del conjunto cambia desde una tensión en la barra

REC, inicialmente de 1.05 pu. (sistema normal) a una tensión de 0.965 pu. con lo cual se aprecia una caída de tensión que podría significar el comienzo de algún problema de voltaje en la barra. Sin embargo, el sistema se mantiene estable porque existe una clara intersección entre las curvas.

### 5.3.- ANALISIS CASO 3

En este caso las tomas aun no alcanzan a actuar, pero las cargas se comportan de manera distinta y la curva  $Q_{Iny} - V_{REC}$  se ha obtenido como:

- La toma se mantiene en  $t = 1.0383$ .
- Variar  $V_L$  entre, por ejemplo, 0.7 y 1.2
- Calcular potencias de acuerdo a la metodología general, considerando el modelo de carga que se usa en este caso ( $P_M = cte$ ,  $Q_M = Q_M(V_L)$ ,  $Z_T = cte$ .)

Los resultados de la simulación se muestran en la Fig. 11.

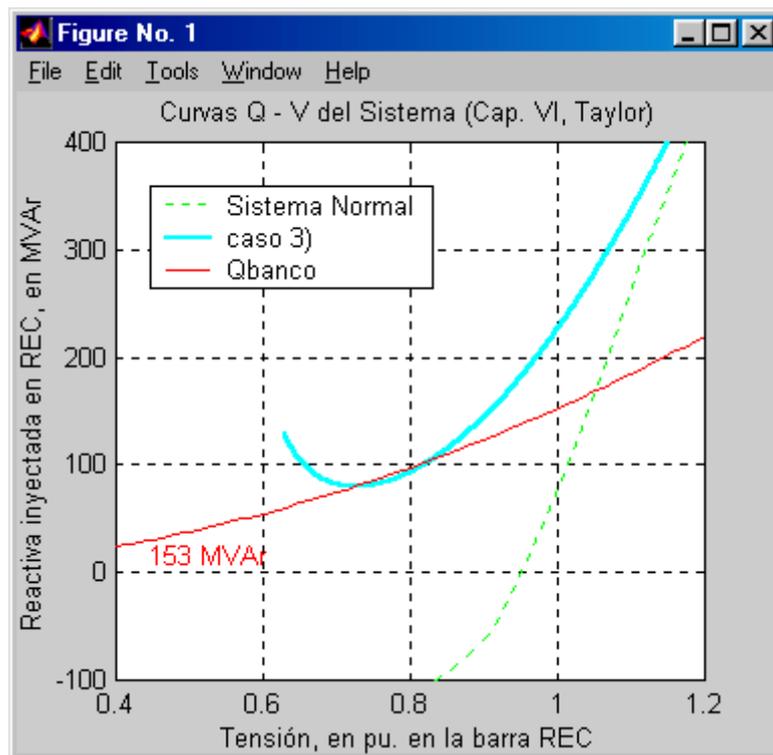


Fig. 11.- Curva  $Q_{Iny} - V_{REC}$  para el caso 3), se muestra el caso normal para efectos de comparación (curva de color verde).

De la Fig. 11, se observa que casi no existe intersección entre la curva de potencia reactiva inyectada ( $Q_{Iny}$ ) y la curva del soporte de reactiva en la barra REC ( $Q_{Banco}=153$

MVAR) y el punto de operación está muy cerca de su valor crítico en torno a una tensión cercana a 0.8 pu. valor que es inaceptable, ya que podría causar que el motor de inducción quede operando a rotor bloqueado, puesto que el torque desarrollado por éste depende del voltaje al cuadrado. En esta condiciones se requiere que el soporte de reactiva de la barra REC opere rápidamente para preservar temporalmente la estabilidad del sistema, puesto que la transición entre la característica del caso 2) al caso 3) se realiza tan solo en unos cuantos segundos. Agregando 75 MVAR al banco de 153 MVAR se obtiene un nuevo punto de operación temporal en torno a una tensión de 1.0 pu. tal como se puede observar en la Fig. 12, a pesar de ello la tensión en la carga sigue bajo su valor nominal.

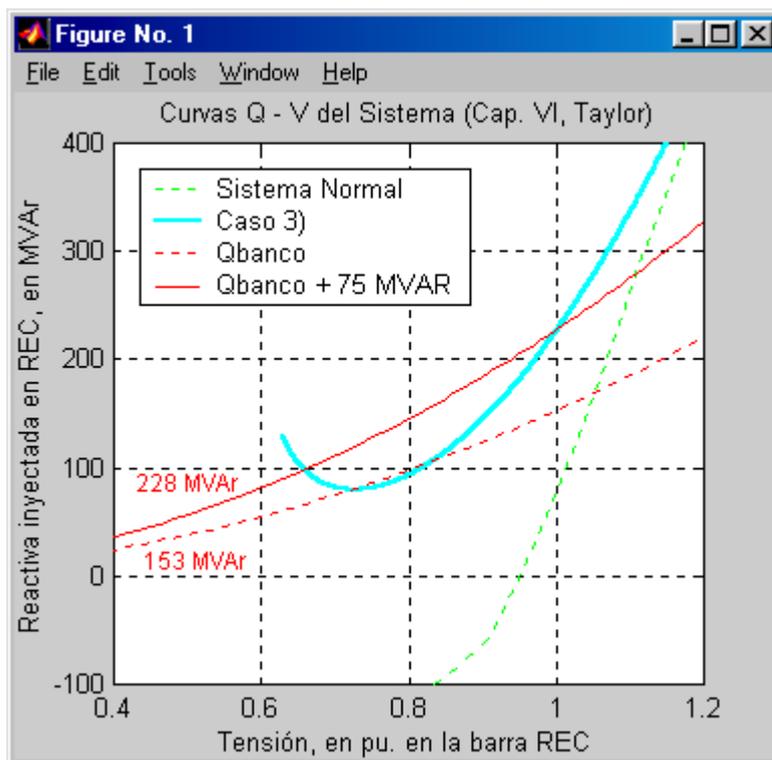


Fig. 12.- Curva  $Q_{iny} - V_{REC}$  para el caso 3) considerando que actúa la compensación de reactiva en la barra REC agregando 75 MVAR al banco.

## 5.4 .- ANALISIS CASO 4

En este caso las tomas vuelven a actuar, pero el comportamiento de la carga varía, en estas condiciones la curva  $Q_{Iny} - V_{REC}$  se ha obtenido de la misma forma que lo indicado en el caso 1), pero con otro modelo de la carga ( $P_M = cte$ ,  $Q_M = Q_M(V_L)$ ,  $Z_T = cte$ ).

Los resultados obtenidos se grafican en la Fig. 13.

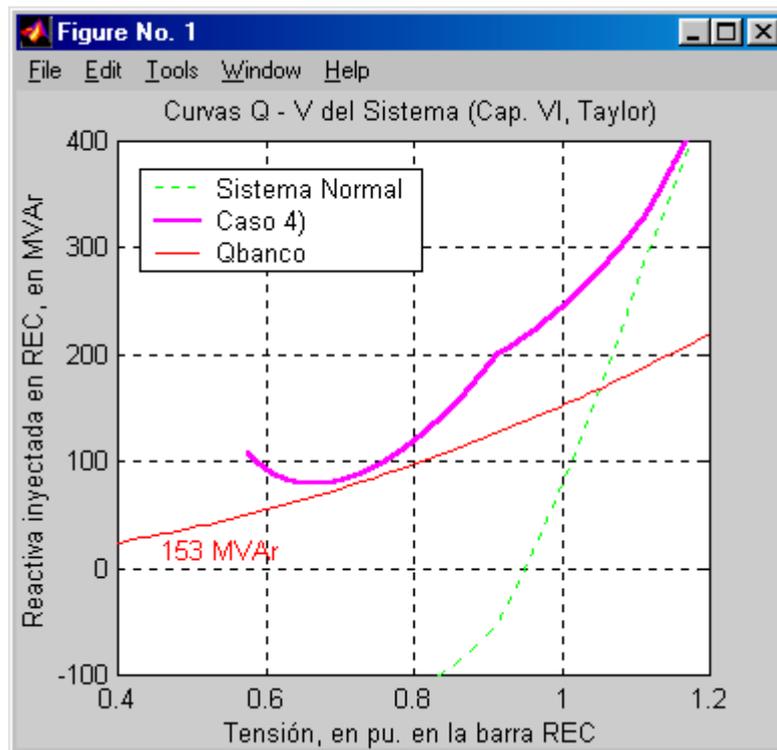


Fig. 13.- Curva  $Q_{Iny} - V_{REC}$  para el caso 4), se muestra el caso normal para efectos de comparación (curva de color verde).

De la Fig. 13, puede observarse que no existe intersección entre las curvas, por lo tanto el colapso de tensión podría ocurrir en un par de minutos si es que la velocidad de actuación de la compensación del caso 3) es demasiado lenta comparado con la variación del sistema que se representa en este caso. Por el contrario si los 25 MVAR que se agregan al banco actúan antes que se llegue a la condición crítica mostrada en la Fig. 13, entonces se establecerá un nuevo punto de operación en torno a una tensión de 0.89 pu, tal como se muestra en la Fig. 14. Sin embargo, la situación sigue siendo crítica

dado que la tensión ha sufrido una caída del orden del 20%, lo cual nuevamente podría significar problemas para el normal funcionamiento del motor.

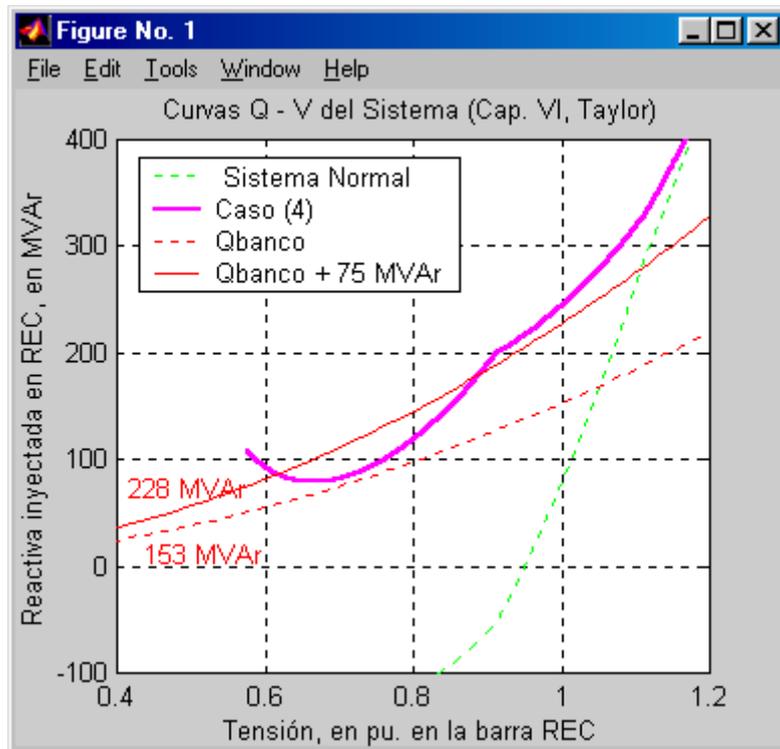


Fig. 14.- Curva  $Q_{Iny} - V_{REC}$  para el caso 4), considerando un soporte de reactiva de 228 MVAR.

### 5.5.- ANALISIS CASO 5

El problema es similar al anterior, excepto que ahora se considera que la carga térmica ha alcanzado ahora su régimen permanente y se comporta como  $P_T = cte$ . Este caso correspondería al nuevo establecimiento en régimen permanente del sistema después que ha ocurrido la perturbación.

Los resultados obtenidos se grafican en la Fig. 15.

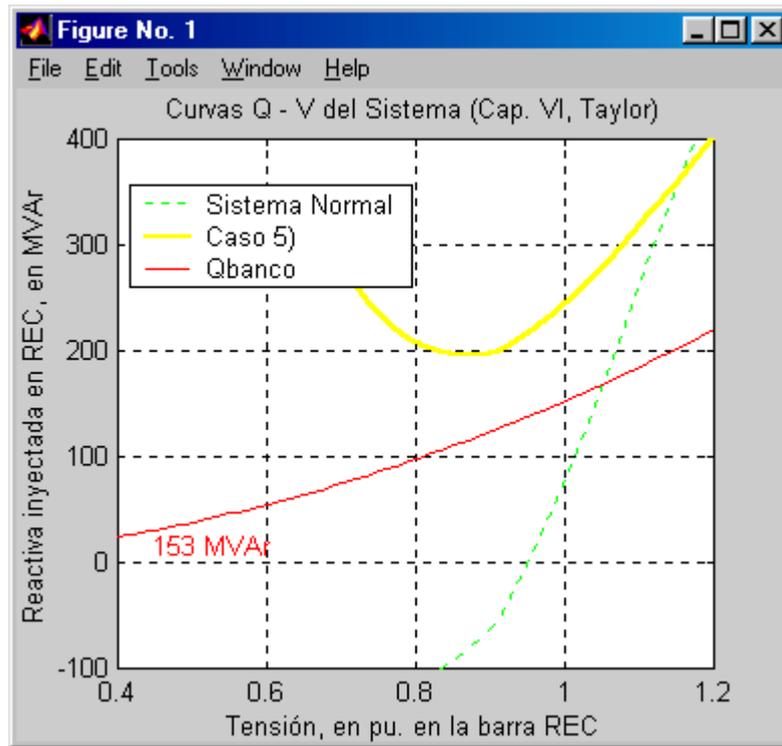


Fig. 15.- Curva  $Q_{\text{Iny}} - V_{\text{REC}}$  para el caso 5), se muestra el caso normal para efectos de comparación (curva de color verde).

De la Fig. 15, se observa que si no ha actuado el sistema de control del banco de condensadores el colapso de tensión es inminente, puesto que la curva de potencia reactiva inyectada está muy alejada de un punto de intersección con la característica de potencia reactiva aportada por el banco de condensadores.

Si se considera la situación a partir del caso 4), cuando ya ha actuado la inyección de 75 MVAR adicionales al banco de condensadores en la barra REC, la situación tampoco mejora, puesto que aun no existe intersección entre las curvas, tal como se muestra en la Fig. 15; es decir el sistema sufre de problemas de estabilidad de tensión.

Agregando 125 MVAR al banco de condensadores el sistema se estabiliza en torno a una tensión de 1.2 pu, Fig. 16, es decir en este caso existiría una sobretensión respecto al valor de pre-falla en la barra REC.

Finalmente, en la Fig. 17 se muestran todas las curvas  $Q_{\text{Iny}} - V_{\text{REC}}$  para cada uno de los casos analizados.

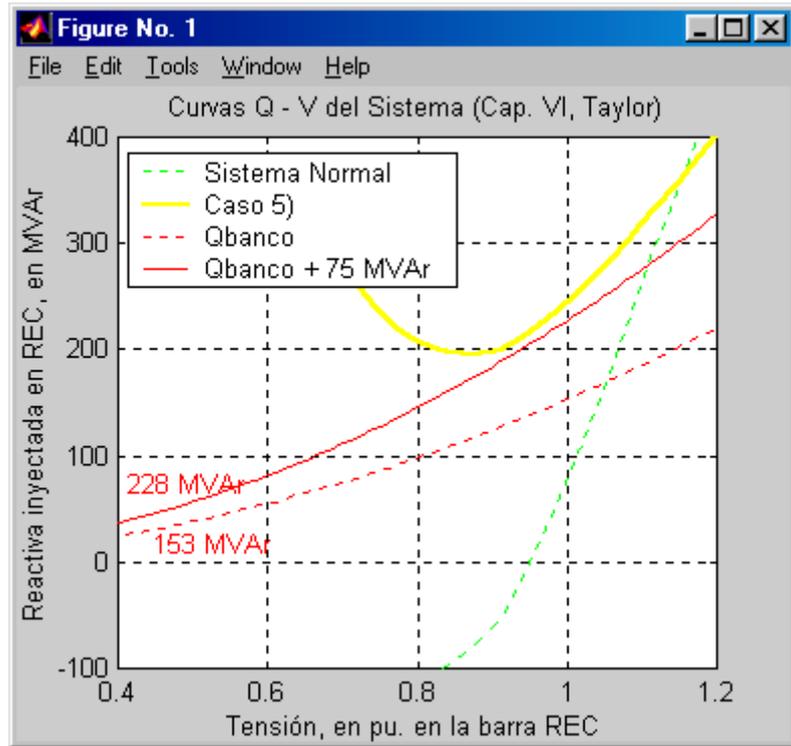


Fig. 16.- Curva  $Q_{Iny} - V_{REC}$  para el caso 5), considerando que el banco de condensadores inyecta 228 MVAR.

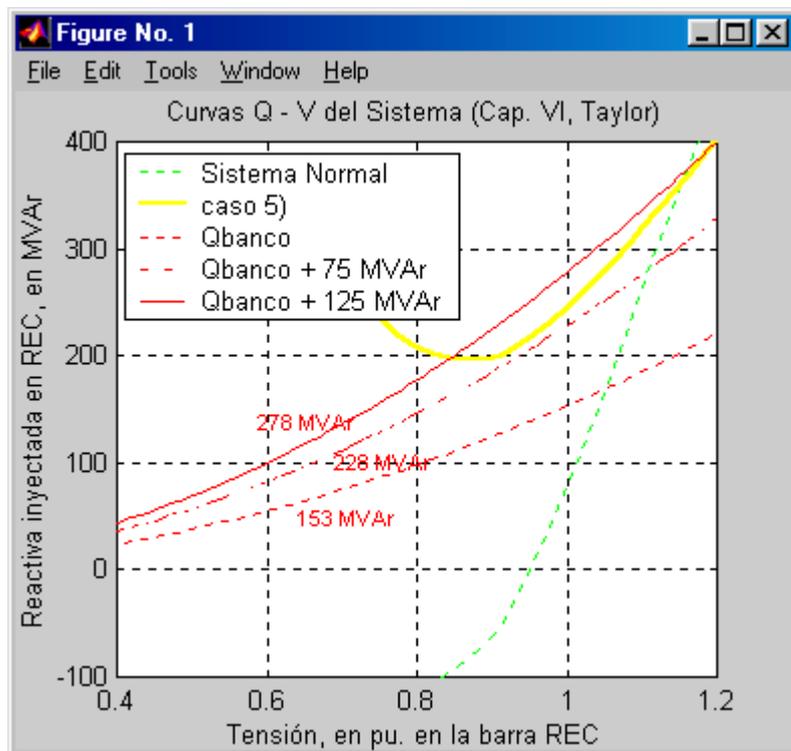


Fig. 17.- Curva  $Q_{Iny} - V_{REC}$  para el caso 5), considerando que el banco de condensadores inyecta 228 MVAR.

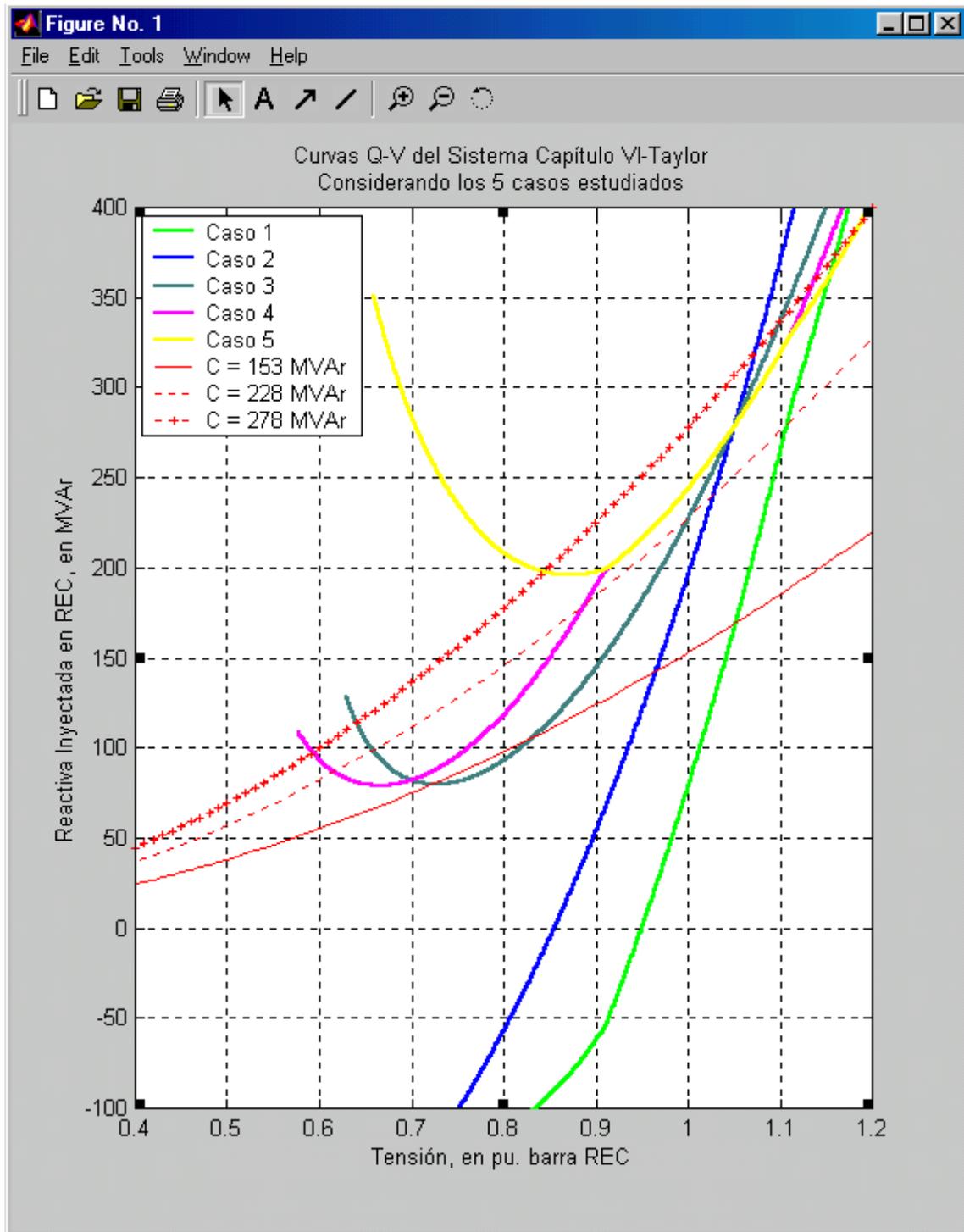


Fig. 18.- Curvas  $Q_{iny.} - V_{REC}$  para cada uno de los casos analizados.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se han analizado los mecanismos básicos que pueden conducir a una red eléctrica a un problema de estabilidad de tensión, el estudio se ha hecho a partir de un análisis estático de las características Q-V del sistema. De los resultados obtenidos se puede concluir que:

Las tensiones de operación de una red eléctrica dependen fuertemente de la potencia reactiva, razón por lo cual las curvas Q-V resultan de interés para el análisis de la estabilidad de tensión de un sistema eléctrico. Sin embargo, debe contarse con algún criterio para establecer que nudos o zonas de la red pueden presentar problemas de tensión, puesto que las curvas Q-V se realizan para un nudo específico del sistema.

Las curvas Q-V se pueden obtener de un análisis directo de la red; sin embargo, si el sistema es complejo puede resultar más sencillo obtener esta característica haciendo uso de un programa de flujo de potencia. Puesto que el problema de estabilidad de tensión es cada vez más importante, actualmente existen programas de flujo de carga comerciales que tienen disponible esta opción. Si bien en este trabajo se ocupó la metodología directa la técnica del flujo de carga se utilizó para demostrar la validez de los resultados.

A través de un análisis de las curvas Q-V trazadas en condiciones de pre y post falla y para diferentes modelos de cargas se puede comprobar la robustez del sistema al aumentar el soporte de potencia reactiva; sin embargo, esto no asegura la estabilidad de la red ya que el colapso de tensión depende del tiempo que tardan las acciones de control (inyección de reactiva, cambio de tomas, desprendimiento de carga, etc) en tomar efecto. Este hecho puede observarse claramente en los casos 3) y 4) del estudio realizado (Fig. 12 y Fig. 14).

Se ha demostrado que el modelo asumido para la carga es un factor muy importante para el análisis de la estabilidad de tensión de una red eléctrica, razón por la cual es importante conocer la naturaleza de las cargas que existen en el nudo donde se obtienen las características Q-V de manera de representarlas apropiadamente, de especial interés es el caso de las máquinas rotatorias puesto que puede ser necesario el empleo de un modelo más preciso.

Los comentarios anteriores demuestran que el problema de estabilidad de voltaje es un fenómeno dinámico, razón por lo cual una simulación de esta naturaleza permitirá determinar de mejor forma los niveles de potencia reactiva así como los tiempos de actuación de las acciones de control necesarios para preservar la estabilidad del sistema.

# ANEXO

## Programa de Simulación en Matlab

## Estabilidad de Tensión

---

```
%Ejercicio Capítulo 6 del texto de Carson W. Taylor
%
%Se obtienen las curvas Qinyectada - Voltaje en la barra REC del
%sistema de la Fig. 6.1 (Pag 140)

%Programa Principal
function simula
clear all
close all
clc

%Datos Nominales de la carga:
Pm = 0.6;           % Potencia activa del motor en pu.
Qm = 0.4;           % Potencia reactiva del motor en pu.
Pt = 0.6;           % Potencia activa de la carga termostatica en pu.
Bc = 0.324;         % Susceptancia del banco de condensadores

%Datos del transformador
Xt = 0.0833;        % Reactancia del transformador en pu.

% CASO 1: Sistema operando en condiciones normales : Prefalla

%Datos del sistema, equivalente de thevenin visto desde el nudo REC
Vth=1.0604;
Xth=0.2674;

%Modelo Cargas:
%   Motor           : Pm = cte   Qm = cte
%   Carga Termostática : Pt = cte
%Transformador      : Las tomas actuan para mantener Vl= 1 pu.

%Caso 1a: Curva Qin - Vrec en el caso que la toma alcanza su límite
%   inferior toma=0.9
k = 0;
toma = 0.9;        % Límite inferior de la toma
for Vl=0.8:0.001:1 % Tensión en la carga
    Pmot = Modelo_P(0,Pm,Vl); % Modelo motor a Pm=cte
    Pter = Modelo_P(0,Pt,Vl); % Carga termostatica a Pt=cte
    Ps = Pmot + Pter;         % Potencia activa total
    Qmot = Q_motor(0,Qm,0,0,0,Vl); % Modelo motor a Qm=cte
    Qcon = Q_banco(Bc,Vl);     % Reactiva del banco
    Icar = I_carga(Ps,Qmot,Qcon,Vl); % Corriente de carga
    Qtra = Q_trafo(Xt,Icar);   % Reactiva del transformador
    E2tr = Esec_trafo(Xt,Icar,Vl); % Tensión secundaria trafo
    k=k+1;
    Vrec(k) = toma*abs(E2tr);   % Tensión en la barra REC
    Qin(k) = Qtra + Qmot - Qcon - Q_sistema(Vth,Xth,Vrec(k),Ps); % Reactiva inyectada en REC
end

%Caso 1b: Curva Qin - Vrec en el caso que las tomas varian entre 0.9
%y 1.1 para mantener Vl = 1 pu.
%Note que en el caso 1a la tension final es 1.0 pu. que corresponde
%al valor que las tomas variando
%entre 0.9 y 1.1 deben mantener constante. Por lo tanto las
%potencias consumidas en la carga
%son las calculadas en la ultima iteración del ciclo anterior pues
%en este caso Vl=1 pu. Por lo tanto no es necesario re-calcularlas.
```

```

for toma=0.9:0.001:1.1;
    k = k + 1;
    Vrec(k)=toma*abs(E2tr);
    Qin(k) = Qtra + Qmot - Qcon - Q_sistema(Vth,Xth,Vrec(k),Ps);
end

%Caso 1c: Curva Qin - Vrec en el caso que la toma alcanza su límite
% superior toma=1.1
toma=1.1;
for Vl=1.0:0.001:1.2
    Pmot = Modelo_P(0,Pm,Vl);
    Pter = Modelo_P(0,Pt,Vl);
    Ps = Pmot + Pter;
    Qmot = Q_motor(0,Qm,0,0,0,Vl);
    Qcon = Q_banco(Bc,Vl);
    Icar = I_carga(Ps,Qmot,Qcon,Vl);
    Qtra = Q_trafo(Xt,Icar);
    E2tr = Esec_trafo(Xt,Icar,Vl);
    k=k+1;
    Vrec(k) = toma*abs(E2tr);
    Qin(k) = Qtra + Qmot - Qcon - Q_sistema(Vth,Xth,Vrec(k),Ps);
end

%Grafica resultados Caso 1
plot(Vrec,Qin*500)
grid on
axis([ 0.4 1.2 -100 400])
hold on

% CASO 2: Sistema pierde una linea, se analiza estado inmediatamente
% despues de la falla

%Datos del sistema en condiciones de falla
Vth=1.0604;
Xth=2*0.2674;

%Modelo Cargas:
% Motor : Zm = cte
% Carga Termostática : Zt = cte
%Trafo : No tiene tiempo de actuar, la toma
% queda en el valor de pre-falla
Eltr = 1.05; % Tension de pre-falla en el primario del
% trafo
Vl =1; % Tension de pre-falla en la carga
% Cálculo de la toma en condiciones de pre-falla
Pmot = Modelo_P(1,Pm,Vl);
Pter = Modelo_P(1,Pt,Vl);
Ps = Pmot + Pter;
Qmot = Q_motor(1,Qm,0,0,0,Vl);
Qcon = Q_banco(Bc,Vl);
Icar = I_carga(Ps,Qmot,Qcon,Vl);
Qtra = Q_trafo(Xt,Icar);
E2tr = Esec_trafo(Xt,Icar,Vl);
toma = abs(Eltr/E2tr); % Esta toma permanece constante
k=0;
for Vl=0.7:0.001:1.2
    Pmot = Modelo_P(1,Pm,Vl);
    Pter = Modelo_P(1,Pt,Vl);
    Ps = Pmot + Pter;
    Qmot = Q_motor(1,Qm,0,0,0,Vl);
    Qcon = Q_banco(Bc,Vl);

```

```
Icar = I_carga(Ps,Qmot,Qcon,Vl);
Qtra = Q_trafo(Xt,Icar);
E2tr = Esec_trafo(Xt,Icar,Vl);
k=k+1;
Vrec(k) = toma*abs(E2tr);
Qin(k) = Qtra + Qmot - Qcon - Q_sistema(Vth,Xth,Vrec(k),Ps);
end
plot(Vrec,Qin*500)

% CASO 3: Sistema pierde una linea, se analiza estado instantes
%          despues de la falla

%Datos del sistema en condiciones de falla
Vth=1.0604;
Xth=2*0.2674;

%Modelo Cargas:
%   Motor           : Pm = cte   Qm = Qm(Vl) Van Cutsem
%   Carga Termostática : Zt = cte
%Trafo              : la toma aun no alcanza actuar y queda
%                   en el valor del caso 2

%Parametros del motor:
xm = 3.06;
x  = 0.2;
k=0;
for Vl=0.55:0.001:1.2
    Pmot = Modelo_P(0,Pm,Vl);
    Pter = Modelo_P(1,Pt,Vl);
    Ps   = Pmot + Pter;
    Qmot = Q_motor(2,Qm,xm,x,Pmot,Vl);
    Qcon = Q_banco(Bc,Vl);
    Icar = I_carga(Ps,Qmot,Qcon,Vl);
    Qtra = Q_trafo(Xt,Icar);
    E2tr = Esec_trafo(Xt,Icar,Vl);
    k=k+1;
    Vrec(k) = toma*abs(E2tr);
    Qin(k) = Qtra + Qmot - Qcon - Q_sistema(Vth,Xth,Vrec(k),Ps);
end
plot(Vrec,Qin*500)

% CASO 4: Sistema pierde una linea, se analiza estado segundos después
%          de la falla

%Modelo Cargas:
%   Motor           : Pm = cte   Qm = Qm(Vl) Van Cutsem
%   Carga Termostática : Zt = cte
%Trafo              : Reaccionan las tomas las que tratan de
%                   mantener Vl= lpu.
%Caso 4a: Curva Qin - Vrec en el caso que la toma alcanza su límite
%          inferior toma=0.9
k=0;
toma=0.9;
for Vl=0.6:0.001:1;
    Pmot = Modelo_P(0,Pm,Vl);
    Pter = Modelo_P(1,Pt,Vl);
    Ps   = Pmot + Pter;
    Qmot = Q_motor(2,Qm,xm,x,Pmot,Vl);
    Qcon = Q_banco(Bc,Vl);
    Icar = I_carga(Ps,Qmot,Qcon,Vl);
    Qtra = Q_trafo(Xt,Icar);
```

```
E2tr = Esec_trafo(Xt,Icar,Vl);
k=k+1;
Vrec(k) = toma*abs(E2tr);
Qin(k) = Qtra + Qmot - Qcon - Q_sistema(Vth,Xth,Vrec(k),Ps);
end

%Caso 4b: Curva Qin - Vrec en el caso que las tomas varian entre 0.9
%y 1.1 para mantener Vl = 1 pu.
%Note que en el caso la la tension final es 1.0 pu. que corresponde
%al valor que las tomas variando
%entre 0.9 y 1.1 deben mantener constante. Por lo tanto las
%potencias consumidas en la carga
%son las calculadas en la ultima iteración del ciclo anterior pues
%en este caso Vl=1 pu. Por lo tanto
%no es necesario re-calcularlas.
for toma=0.9:0.001:1.1;
    k = k + 1;
    Vrec(k)=toma*abs(E2tr);
    Qin(k) = Qtra + Qmot - Qcon - Q_sistema(Vth,Xth,Vrec(k),Ps);
end

%Caso 4c: Curva Qin - Vrec en el caso que la toma alcanza su límite
%superior toma=1.1
toma=1.1;
for Vl=1.0:0.001:1.2;
    Pmot = Modelo_P(0,Pm,Vl);
    Pter = Modelo_P(1,Pt,Vl);
    Ps = Pmot + Pter;
    Qmot = Q_motor(2,Qm,xm,x,Pmot,Vl);
    Qcon = Q_banco(Bc,Vl);
    Icar = I_carga(Ps,Qmot,Qcon,Vl);
    Qtra = Q_trafo(Xt,Icar);
    E2tr = Esec_trafo(Xt,Icar,Vl);
    k=k+1;
    Vrec(k) = toma*abs(E2tr);
    Qin(k) = Qtra + Qmot - Qcon - Q_sistema(Vth,Xth,Vrec(k),Ps);
end

%Grafica resultados Caso 4
plot(Vrec,Qin*500,'r')

% CASO 5: Sistema pierde una linea, se analiza estado en regimen
% permanente de falla

%Modelo Cargas:
% Motor : Pm = cte Qm = Qm(Vl) Van Cutsem
% Carga Termostática : Pt = cte
%Trafo : Las tomas tratan de mantener Vl= 1pu.
%Caso 5a: Curva Qin - Vrec en el caso que la toma alcanza su límite
% inferior toma=0.9
k=0;
toma=0.9;
for Vl=0.7:0.001:1;
    Pmot = Modelo_P(0,Pm,Vl);
    Pter = Modelo_P(0,Pt,Vl);
    Ps = Pmot + Pter;
    Qmot = Q_motor(2,Qm,xm,x,Pmot,Vl);
    Qcon = Q_banco(Bc,Vl);
    Icar = I_carga(Ps,Qmot,Qcon,Vl);
    Qtra = Q_trafo(Xt,Icar);
    E2tr = Esec_trafo(Xt,Icar,Vl);
```

```

    k=k+1;
    Vrec(k) = toma*abs(E2tr);
    Qin(k) = Qtra + Qmot - Qcon - Q_sistema(Vth,Xth,Vrec(k),Ps);
end

%Caso 5b: Curva Qin - Vrec en el caso que las tomas varian entre 0.9
%y 1.1 para mantener Vl = 1 pu.
%Note que en el caso la la tension final es 1.0 pu. que corresponde
%al valor que las tomas variando
%entre 0.9 y 1.1 deben mantener constante. Por lo tanto las
%potencias consumidas en la carga
%son las calculadas en la ultima iteración del ciclo anterior pues
%en este caso Vl=1 pu. Por lo tanto
%no es necesario re-calcularlas.
for toma=0.9:0.001:1.1;
    k = k + 1;
    Vrec(k)=toma*abs(E2tr);
    Qin(k) = Qtra + Qmot - Qcon - Q_sistema(Vth,Xth,Vrec(k),Ps);
end

%Caso 5c: Curva Qin - Vrec en el caso que la toma alcanza su límite
%superior toma=1.1
toma=1.1;
for Vl=1.0:0.001:1.2;
    Pmot = Modelo_P(0,Pm,Vl);
    Pter = Modelo_P(0,Pt,Vl);
    Ps = Pmot + Pter;
    Qmot = Q_motor(2,Qm,xm,x,Pmot,Vl);
    Qcon = Q_banco(Bc,Vl);
    Icar = I_carga(Ps,Qmot,Qcon,Vl);
    Qtra = Q_trafo(Xt,Icar);
    E2tr = Esec_trafo(Xt,Icar,Vl);
    k=k+1;
    Vrec(k) = toma*abs(E2tr);
    Qin(k) = Qtra + Qmot - Qcon - Q_sistema(Vth,Xth,Vrec(k),Ps);
end

%Grafica resultados Caso 5
plot(Vrec,Qin*500,'g')

%Curvas Q-Vrec de los bancos de condensadores en la barra REC
B1=(153 / 500 ) ; %Banco de condensadores de 153 MVAR en la
                %Barra REC
B2=(153 + 75 )/500 ; %Se agregan 75 MVAR al banco
B3=(153 + 125 )/500 ; %Se agregan 125 MVAR al banco
Vrec=0:0.01:1.2;
Qbanco1=B1.*Vrec.^2;
Qbanco2=B2.*Vrec.^2;
Qbanco3=B3.*Vrec.^2;
plot(Vrec,Qbanco1*500,'k',Vrec,Qbanco2*500,'k',Vrec,Qbanco3*500,'k')

%Fin Programa principal

%***** DEFINICION DE SUBROUTINAS
%*****

%Función para obtener la potencia activa consumida por una carga
considerando diferentes modelos

```

```
function Pactiva = Modelo_P(tipo,ctel,voltaje)
%tipo: modelo de potencia activa de la carga  0: Potencia cte  1:
Z=cte  2: otros
%ctel : Constante de entrada para definir : Po si tipo=0, Go si tipo=1
%Voltaje: Tensión en bornes del elemento
switch tipo
case 0
    Pactiva=ctel;
case 1
    Pactiva=ctel*voltaje^2;
case 2
    %otro modelo puede agregarse aqui
otherwise
    disp('Error tipo de modelo de carga activa no existe'); pause; quit
end

%Función Para obtener la potencia reactiva suministrada por un banco
de condensadores

function Qc= Q_banco(Bc,voltaje)
%Bc : Susceptancia del banco de condensadores
%Voltaje: Tensión en bornes del banco
if Bc < 0
    disp('Error Bc debe ser mayor que cero'); pause; quit
end
Qc=Bc*voltaje^2;

%función para evaluar la potencia reactiva consumida por un motor

function Qm = Q_motor(tipo,ctel,xm,x,pm,voltaje)
%tipo: modelo de potencia reactiva del motor  0: Potencia cte  1:
Z=cte  2: Van Cutsen 3:otros
%ctel : Constante de entrada para definir : Qo si tipo=0 , Bo si
tipo=1
%Voltaje: Tensión en bornes del motor
switch tipo
case 0
    Qm = ctel;
case 1
    Qm = ctel*voltaje^2;
case 2
    Qm = voltaje^2/xm + voltaje^2/(2*x) - sqrt( ( voltaje^2/(2*x) )^2 -
pm^2 );
otherwise
    disp('Error tipo de modelo de potencia reactiva del motor no
existe'); pause; quit
end

%función para evaluar la potencia reactiva consumida por el
transformador

function Iload= I_carga(Psis,Qmot,Qban,Vl)
%Pmot : Potencia consumida por el motor
%Pter : Potencia consumida por la carga termostatica
%Qmot : Reactiva consumida por el motor
%Qban : Reactiva aportada por el banco de condensadores
%Vl : Tensión en bornes de la carga
Iload = ( Psis -j*(Qmot - Qban) ) / Vl;

function Qt = Q_trafo(xtrafo,Il)
```

```
Qt = xtrafo*abs(I1)^2;
```

```
%función para evaluar la potencia reactiva aportada por el sistema
```

```
function Qsis = Q_sistema(Vth,Xth,Vrec,Ps)
```

```
Qsis = sqrt( (Vth*Vrec/Xth)^2 - Ps^2 ) -Vrec^2/Xth;
```

```
%Función para evaluar la tension en los enrollados secundarios del transformador
```

```
function E2t = Esec_trafo(Xt,Icar,Vl)
```

```
E2t = j*Xt*Icar + Vl;
```