

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**“ESTABILIDAD DE UN SISTEMA DE TRES GENERADORES
SÍNCRONOS CONSIDERANDO REGULADORES DE TENSIÓN Y
VELOCIDAD Y CARGAS DINÁMICAS”**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

**PRESENTADO POR:
GABRIEL ENRIQUE FLORES MEZA**

**PROMOCIÓN 1985-I
LIMA-PERÚ
2003**

*A Gladis:
Gracias por lo que me das...*

**ESTABILIDAD DE UN SISTEMA DE TRES
GENERADORES SÍNCRONOS CONSIDERANDO
REGULADORES DE TENSIÓN Y VELOCIDAD
Y CARGAS DINÁMICAS**

SUMARIO

Este trabajo esta realizado para demostrar sobre bases simples las características más importantes de la Teoría de estabilidad Transitoria de Sistemas de Potencia, con un estilo orientado hacia los estudiantes a fin que se planteen bases para un futuro desarrollo, asimismo, se utiliza el Lenguaje de Programación Matlab v5.3 como una técnica que nos permite visualizar las tendencias de las variables de estado involucradas en el problema.

El uso de reguladores de última tecnología y de los cuales se presenta su diagrama de bloques, para deducir así el comportamiento transitorio electromecánico casi real de los Sistemas de Potencia será aplicado en este Informe de Suficiencia además de presentar la forma de trabajo con cargas dinámicas deducidas a partir del Jacobiano de un modelo incremental.

ÍNDICE

PRÓLOGO	1
CAPÍTULO I	
MODELAMIENTO DEL SISTEMA	3
1.1 Representación de la Red de transmisión	5
1.1.1 Obtención de la Matriz de Admitancias del Sistema	6
1.1.2 Reducción de los nodos de Carga de la Matriz de Admitancias	8
1.2 Ecuaciones de la máquina síncrona en coordenadas primitivas	10
1.2.1 Suposiciones admitidas para la deducción de las ecuaciones de la Máquina Síncrona	11
1.2.2 Desarrollo de las ecuaciones de la Máquina Síncrona	12
1.2.3 Obtención de la ecuación de Oscilación de la Máquina Síncrona	33
1.2.4 Modelos de la Máquina Síncrona	38
1.3 Ecuaciones del Sistema de Excitación y el Regulador de Tensión	48
1.4 Ecuaciones del Regulador de Velocidad	52
1.5 Modelamiento de Carga Dinámica	54
1.5.1 Modelo de Carga homogénea	56
1.5.2 Modelo de Carga Compuesta	58

CAPÍTULO II		
REPRESENTACIÓN COMPUTACIONAL DE LOS COMPONENTES DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA		63
2.1	Introducción	63
2.2	Solución al Flujo de Potencia	63
2.3	Máquina Síncrona	65
2.4	Sistema de excitación y el Regulador de Tensión	69
2.5	Sistema de Regulación de Velocidad	72
2.6	Cargas Dinámicas	74
CAPÍTULO III		
FLUJO DE POTENCIA INICIAL EN EL SISTEMA DE POTENCIA ELÉCTRICO		76
3.1	Introducción	76
3.2	Datos del Sistema de Potencia	77
3.2.1	Datos Generales	78
3.2.2	Datos de los Componentes del Sistema de Potencia	78
3.3	Datos de los Controladores del sistema	80
3.4	Ejecución del programa de Flujo de Potencia inicial	80
CAPÍTULO IV		
ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD TRANSITORIA EN UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE OCHO BARRAS		83
4.1	Introducción	83
4.2	Análisis de la Respuesta Natural del Sistema	86
4.2.1	Definición de un Incidente en un Sistema Eléctrico de Potencia	86
4.2.2	Cargas con modelo de impedancia constante	87
4.2.3	Cargas con modelo dinámico	89

VII

4.3	Efectos de los controladores en la Estabilidad Transitoria	91
4.3.1	Efecto del Regulador de Tensión	91
4.3.2	Efecto de los Reguladores de Tensión y Velocidad	94
4.4	Pruebas de Ejecución del Programa de Estabilidad Transitoria	99
4.4.1	Prueba de entradas nulas	99
4.4.2	Prueba de Falla Súbita	104

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE LA UBICACIÓN DE LA FALLA EN LA ESTABILIDAD TRANSITORIA	107
---	-----

5.1	Introducción	107
5.2	Aplicación del Incidente 3 en el S.E.P. con reguladores de tensión y velocidad	108
5.3	Aplicación de Fallas consecutivas a todas las Barras del S.E.P. dado	118

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	121
---------------------------------------	-----

GLOSARIO	129
-----------------	-----

ANEXOS	130
---------------	-----

BIBLIOGRAFÍA	
---------------------	--

PRÓLOGO

En este Informe de Suficiencia se demostrará sobre las bases más simples y herramientas conocidas la Teoría de la Estabilidad Transitoria de Sistemas de Potencia, donde como primer paso se realiza un flujo de potencia previo mediante el método de Newton – Raphson en coordenadas polares, el método de integración utilizado será el de Runge – Kutta de cuarto orden, luego se plantearán las ecuaciones de oscilación de la turbina y el rotor de la máquina síncrona, y ésta será representada mediante un modelo de máquina de tercer orden, así como la ecuación del comportamiento dinámico del eje mecánico de la máquina.

Estas ecuaciones junto con las ecuaciones de los reguladores de tensión y velocidad forman un conjunto de ecuaciones diferenciales primer orden, que serán presentadas en forma matricial mediante matrices cuasivacias⁽¹⁾

En el Capítulo I se hará la representación matemática del sistema, como es la red de transmisión, los generadores síncronos, los diferentes tipos de diagramas de bloques de la excitatriz y los reguladores de tensión y velocidad.

En el Capítulo II se analizará el comportamiento dinámico de cada componente del sistema, realizándose ante todo el desarrollo de un flujo de potencia previo, definiendo el modelo de máquina síncrona a utilizarse, el análisis de respuesta dinámico del sistema de excitatriz y regulación de tensión, incluyendo asimismo el regulador de velocidad.

En el Capítulo III se aplicará el Flujo de potencia previo, mediante el método de Newton – Raphson en coordenadas polares; dándose su diagrama de flujo, valores de salida y un gráfico que muestra flujo de potencia inicial en toda la red.

En el Capítulo IV se desarrollarán y aplicarán los conceptos previos a un sistema multimáquinas dado, en un sistema de 8 barras, planteando asimismo diversas situaciones mediante el reporte de incidentes provocados por fallas que serán aplicadas a la red del sistema de ocho barras.

En el Capítulo V se aplicará un incidente dado, a lo largo de todas las barras de la red, a fin de determinar su incidencia en la misma.

Agradezco desde mi más alta estima personal la invaluable ayuda dada por los señores: Ing. José Zorrilla e Ing. Roberto Ramírez, por sus valiosos consejos e invaluable asistencia a lo largo del desarrollo de este informe para lograr una madurez y profesionalismo casi completos.

CAPÍTULO I MODELAMIENTO DEL SISTEMA

Una red eléctrica está compuesta de tres partes bien definidas que son: las centrales de generación, las líneas de transmisión y las unidades de distribución y suministro a las diferentes cargas del sistema^[11], esto se representa en la figura 1.1.

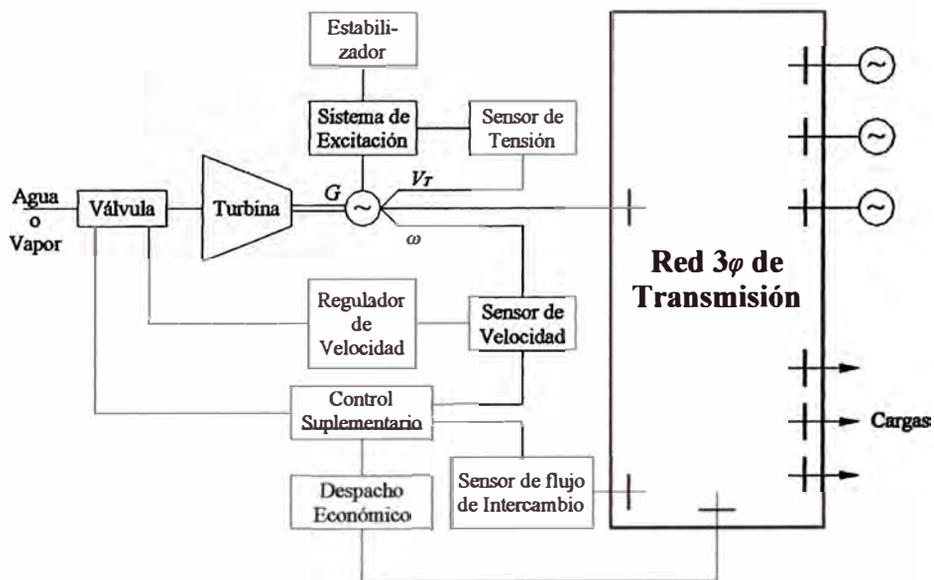


Figura 1.1
Configuración básica para estudios de estabilidad

Donde:

- G: Generador Síncrono
- V_T : Tensión en barras del generador
- ω : Velocidad angular en el eje de la máquina

Donde asimismo, se indican los principales sistemas de control que actúan sobre el generador síncrono:

- Control primario de velocidad que básicamente regula la velocidad del eje del conjunto turbina generador y el torque mecánico de la turbina de manera tal que la potencia generada se adapte a las variaciones de carga.

Como la actuación del control primario resulta en un desvío de la frecuencia, es necesario que se cuente con otro sistema para restablecer la frecuencia a su valor nominal. Las constantes de tiempo de tiempo del control primario son de algunos segundos.

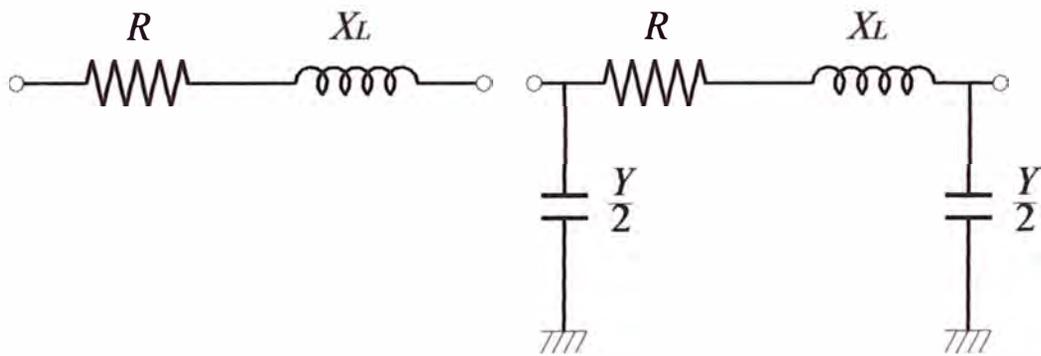
- El sistema de Control suplementario ó Control de generación, que en el caso de sistemas interconectados se encarga de mantener el intercambio de potencia entre concesionarias vecinas lo más próximo a valores previamente programados. Estos son sistemas de control centralizado desde centros de operación de las empresas, y cuyas constantes de tiempo son del orden de algunos minutos.
- Finalmente los objetivos de los controles de excitación pueden ser descritos como: (a) mantener la tensión de barras del generador dentro de tolerancias especificadas, (b) regular el flujo relativo entre las máquinas, (c) amortiguar las oscilaciones del rotor de la máquina en la ocurrencia de perturbaciones en el sistema. Las constantes de tiempo de este control son del orden de milisegundos

De esta configuración no se considerará el control suplementario, debido a la suposición que la red está siendo atendida por un solo concesionario, y compuesta por una red de transmisión de parámetros concentrados representada por una matriz

de admitancias; las máquinas síncronas por un juego de ecuaciones generales de la máquina síncrona.

1.1 Representación de la Red de transmisión

La red considerada en este estudio será de un sistema trifásico balanceado, representado por su diagrama unifilar, donde las líneas de transmisión son clasificadas de acuerdo a su longitud como líneas cortas ($L < 80$ km), y líneas medias ($80 < L \leq 240$), estas líneas pueden ser representadas de la manera mostrada en la figura 1.2 donde los valores R , X_L y Y_C , son los parámetros de la línea y son obtenidos de acuerdo a su configuración física y las tablas del fabricante.



(a) Línea corta

(b) Línea larga

Figura 1.2

Estas representaciones serán agrupadas en la matriz de admitancias de barra Y_{barra} para la aplicación de un flujo de potencia y la obtención de las tensiones de barra del sistema.

1.1.1 Obtención de la Matriz de Admitancias del Sistema

Sea el siguiente un nodo de generación del sistema dado:

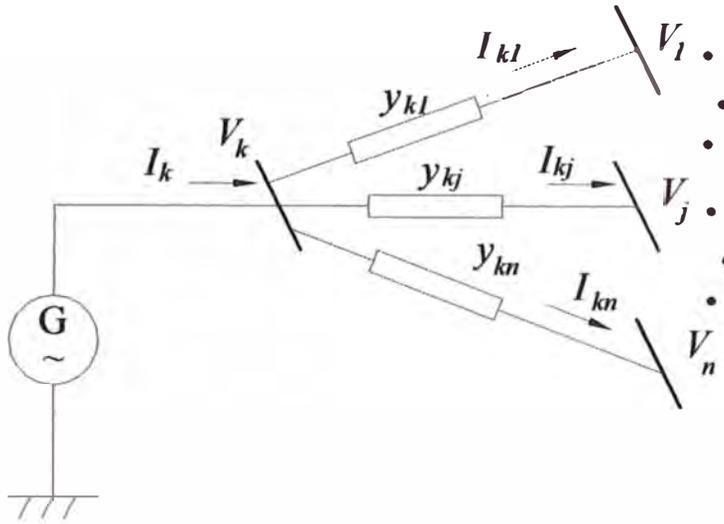


Figura 1.3
Nodo dinámico ó de generación

La corriente total que se inyecta en la barra k en términos de los elementos de la matriz de admitancias de barra está dada por la siguiente sumatoria:

$$\begin{aligned}
 I_1 &= y_{11}V_1 + y_{12}(V_1 - V_2) + \dots + y_{1k}(V_1 - V_k) + \dots + y_{1n}(V_1 - V_n) \\
 &\vdots \\
 I_k &= y_{k1}(V_k - V_1) + y_{k2}(V_k - V_2) + \dots + y_{kk}V_k + \dots + y_{kn}(V_k - V_n) \\
 &\vdots \\
 I_n &= y_{n1}(V_n - V_1) + y_{n2}(V_n - V_2) + \dots + y_{nk}(V_n - V_k) + \dots + y_{nn}V_n
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

Siendo k un nodo genérico de una red de nodos. Agrupando las admitancias correspondientes a la tensión de cada nodo se tiene:

$$\begin{aligned}
 I_1 &= (y_{11} + y_{12} + \dots + y_{kk} + \dots + y_{1n})V_1 - y_{12}V_2 - \dots - y_{kk}V_k - \dots - y_{1n}V_n \\
 &\vdots \\
 I_k &= -y_{k1}V_1 - y_{k2}V_2 - \dots + (y_{k1} + y_{k2} + \dots + y_{kk} + \dots + y_{kn})V_k - \dots - y_{kn}V_n \\
 &\vdots \\
 I_n &= -y_{n1}V_1 - y_{n2}V_2 - \dots - y_{nk}V_k - \dots + (y_{n1} + y_{n2} + \dots + y_{nk} + \dots + y_{nn})V_n
 \end{aligned} \tag{1.2}$$

Definiendo las admitancias de la siguiente manera:

$$\text{Admitancia propia: } Y_{ii} = \sum_{k=1}^n y_{ik} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1.3)$$

$$\text{Admitancia Mutua: } Y_{ik} = -y_{ik}, \quad i \neq k \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1.4)$$

y reemplazando en las ecuaciones (1.2), tenemos:

$$\begin{aligned} I_1 &= Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2 + \dots + Y_{1k}V_k + \dots + Y_{1n}V_n \\ &\vdots \\ I_2 &= Y_{k1}V_1 + Y_{k2}V_2 + \dots + Y_{kk}V_k + \dots + Y_{kn}V_n \\ &\vdots \\ I_n &= Y_{n1}V_1 + Y_{n2}V_2 + \dots + Y_{nk}V_k + \dots + Y_{nn}V_n \end{aligned} \quad (1.5)$$

ó en su forma más concisa:

$$\mathbf{I} = \mathbf{Y} \cdot \mathbf{V} \quad (1.6)$$

Donde \mathbf{Y} es una matriz cuadrada y simétrica, de fácil formulación. Con esta matriz de admitancias obtenida se puede ingresar a un programa de Flujo de Potencia el cual dará las tensiones del sistema en todas las barras.

Sin embargo en los casos en los que se pueda acceder a las barras internas de los generadores dependiendo del modelo de la máquina síncrona seleccionado, será posible obtener una matriz aumentada y aplicar la reducción de Kron para eliminar todas las demás barras que no tienen asociada una corriente de inyección de generación.

1.1.2 Reducción de los nodos de Carga de la Matriz de Admitancias

Una vez deducida la matriz de admitancias de barras Y_{barra} ésta se modifica para reproducir las condiciones y eventos de falla y post-falla y dependiendo del modelo de máquina síncrona seleccionado, la matriz de admitancias Y_{barra} se expande abarcando las reactancias transitorias de las máquinas de la red, figura 1.4.

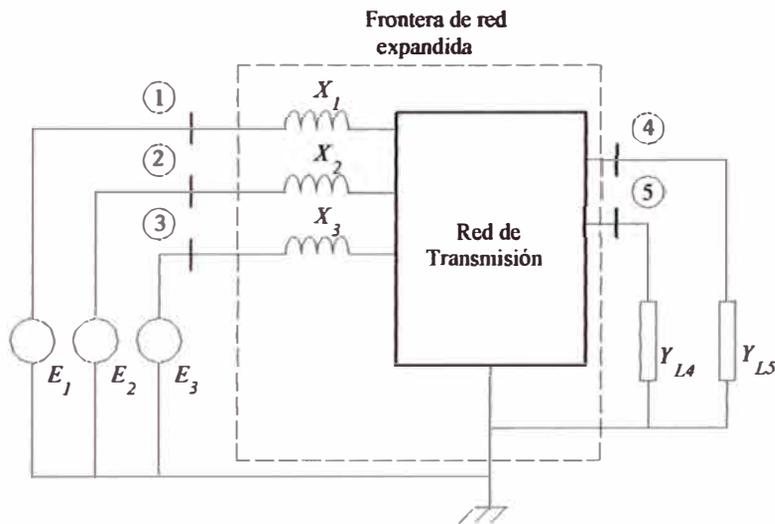


Figura 1.4
Red expandida de un sistema de potencia

De la figura 1.3 se ha visto que solo las barras de generación tienen inyección de corriente a su respectiva barra^[4], es posible eliminar el resto de las otras barras mediante la reducción de Kron. Mostrando la ecuación (1.5) en forma matricial desarrollada para un sistema de n barras siendo k la primera barra de generación tendremos:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_k \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1k} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{k1} & \cdots & Y_{kk} & \cdots & Y_{kn} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{nk} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_k \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

Luego las corrientes I_{k+1} hasta la I_n son nulas puesto que no hay inyección de corrientes desde los nodos $k+1$ hasta n .

$$\begin{array}{c} I_A \\ \vdots \\ I_k \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} = \begin{array}{c} \left[\begin{array}{ccc|ccc} Y_{11} & \dots & Y_{1k} & Y_{1,k+1} & \dots & Y_{1n} \\ \vdots & & & \vdots & & \\ Y_{k1} & \dots & Y_{kk} & Y_{k,k+1} & \dots & Y_{kn} \\ \hline Y_{k+1,1} & \dots & Y_{k+1,k} & Y_{k+1,k+1} & \dots & Y_{k+1,n} \\ \vdots & & & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & \dots & Y_{nk} & Y_{nk} & \dots & Y_{nn} \end{array} \right] \begin{array}{c} V_1 \\ \vdots \\ V_k \\ V_{k+1} \\ \vdots \\ V_n \end{array} \end{array} \begin{array}{c} V_G \\ \\ \\ V_B \end{array} \quad (1.8)$$

donde los subíndices G indican las barras de generación, y las B las barras de carga, luego renombrando las matrices según la ecuación (1.8), se tiene:

$$\begin{bmatrix} I_G \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 & Y_2 \\ Y_3 & Y_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_G \\ V_B \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

$$I_G = Y_1 V_G + Y_2 V_B \quad (1.10)$$

$$0 = Y_3 V_G + Y_4 V_B \quad (1.11)$$

despejando V_B de la ecuación (1.11) y reemplazándolo en la ecuación (1.10)

tenemos:

$$V_B = -Y_4^{-1} Y_3 V_G \quad (1.12)$$

$$I_G = (Y_1 - Y_2 Y_4^{-1} Y_3) V_G \quad (1.13)$$

Donde definimos:

$$Y_{equiv} = Y_1 - Y_2 Y_4^{-1} Y_3 \quad (1.14)$$

Veremos mas adelante que esta matriz es la matriz reducida del sistema, en la que se incluyen las reactancias de los generadores, de acuerdo a la figura 1.4 aplicando luego los eventos de falla que ocurran en el sistema. Mas adelante, a través de la ecuación (1.13), se calcularan las tensiones en las barras de carga dinámica que serán representadas mediante el modelamiento adecuado.

1.2 Ecuaciones de la máquina síncrona en coordenadas primitivas

La máquina síncrona es uno de los convertidores electromecánicos que más uso intensivo tiene desde su invención, sin embargo necesita la conversión de grandes cantidades de energía primaria – petróleo, gas natural, agua, carbón, uranio – en energía y potencia eléctrica. La energía eléctrica puede ser transportada y convertida en otras formas de energía en forma limpia y económica^[1].

La máquina síncrona es un convertidor electromecánico de energía con una pieza giratoria denominada rotor ó campo cuya bobina es excitada mediante la inyección de corriente continua, y una pieza fija denominada estator ó armadura por cuyas bobinas circula corriente alterna. En estado estacionario las corrientes trifásicas desfasadas $2\pi/3$ del estator producen un campo magnético rotario que gira en el entrehierro e interacciona con la velocidad angular del rotor de la máquina. Si las velocidades angulares del campo magnético rotario y del rotor de la máquina son diferentes el torque medio es nulo, a esta condición se le denomina condición de torque medio, luego la condición necesaria pero no suficiente para la existencia de torque en una máquina síncrona es:

$$\omega_e = \omega_r \quad (1.15)$$

Desde otro punto de vista se dice que la condición de torque medio asegura que ocurra la máxima transformación unidireccional de energía en el entrehierro de la máquina^[7].

1.2.1 Suposiciones admitidas para la deducción de las ecuaciones de la Máquina Síncrona

(a) Consideraremos una máquina síncrona trifásica, de polos salientes, con tres devanados de fase en el estator a , b y c . Un devanado de campo f en el rotor. Dos devanados de amortiguamiento en el rotor, A y B ; uno para crear un sistema de corrientes longitudinales (es decir en el eje d) que se oponga a las variaciones de este campo A , y correspondientemente el otro para crear un sistema de corrientes transversales que se oponga a las variaciones de este campo B tal como se aprecia en la figura adjunta, las barras de amortiguación son cortocircuitadas y colocadas de tal manera que exista independencia entre ambos devanados.

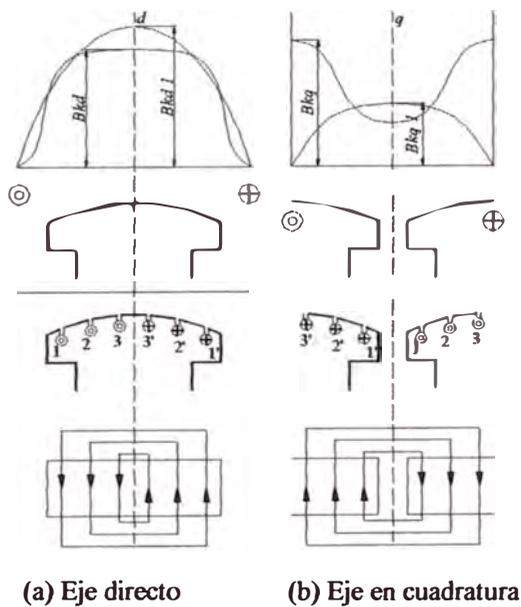


Figura 1.5

(b) La permeabilidad del material magnético es infinitamente grande en comparación con la permeabilidad del vacío, $\mu_r \rightarrow \infty$, por lo que se aceptará que la máquina síncrona es magnéticamente lineal, es decir que las inductancias son independientes de las corrientes.

(c) Del punto anterior podemos deducir que podemos aplicar el método de superposición y determinar el campo magnético de la máquina como la suma de los campos de cada uno de sus devanados.

(d) Despreciaremos los efectos de histéresis y saturación magnética.

A la frecuencia industrial los devanados de las máquinas se considerarán concentrados puesto que en este caso la longitud de onda electromagnética es mucho mayor que las dimensiones de los devanados.

1.2.2 Desarrollo de las ecuaciones de la Máquina Síncrona

La ecuación general del desarrollo de las ecuaciones de la máquina síncrona se encuentra analizando el comportamiento de las puertas eléctricas de la máquina en términos de los ejes de coordenadas correspondiente a las bobinas reales o físicas, satisfaciéndose la siguiente ecuación:

$$\mathbf{v} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{i} + \mathbf{e} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{i} + \frac{d\Psi}{dt} \quad (1.16)$$

siendo: \mathbf{R} la matriz de resistencias de cada devanado

\mathbf{i} la matriz de corrientes

Ψ es la matriz de flujo concatenado

la cual en un ambiente de entrehierro predominante es directamente proporcional a la corriente del devanado considerado.

$$\Psi = \mathbf{L} \mathbf{i} \quad (1.17)$$

siendo \mathbf{L} la matriz de inductancias que enlazan las bobinas de los devanados y que depende de la posición relativa θ del rotor con respecto al estator.

El sistema de ecuaciones diferenciales (1.16) puede expresarse en forma canónica como:

$$\mathbf{v} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{i} + \frac{d}{dt} (\mathbf{L} \mathbf{i}) \quad (1.18)$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{i} + \mathbf{L} \frac{d\mathbf{i}}{dt} + \mathbf{i} \frac{d\mathbf{L}}{dt} \frac{d\theta}{d\theta} \quad (1.19)$$

$$\mathbf{L} \frac{d\mathbf{i}}{dt} = \mathbf{v} - \left(\mathbf{R} \cdot \mathbf{i} + \mathbf{i} \frac{d\mathbf{L}}{d\theta} \right) \quad (1.20)$$

$$\frac{d\mathbf{i}}{dt} = \mathbf{L}^{-1} \mathbf{v} - \mathbf{L}^{-1} \left(\mathbf{R} \cdot \mathbf{i} + \mathbf{i} \frac{d\mathbf{L}}{d\theta} \right) \quad (1.21)$$

La solución del sistema de ecuaciones diferenciales 1.21 puede ser evaluada mediante cualquier método numérico de integración, utilizando algoritmos tales como Euler, Predictor – Corrector ó Runge – Kutta, que será el utilizado aquí^[1].

El principal inconveniente que se presenta es evaluar e invertir la matriz de inductancias de la máquina en cada paso de integración, debido a la dependencia de esta matriz con la posición angular del motor. La presencia de computadores mas avanzadas y de software adecuado posibilitan resolver este problema, sin embargo en la antigüedad esto presentaba grandes dificultades.

Este es el motivo por el cual durante décadas se desarrollaron transformaciones de coordenadas que simplificaban el problema, aceleran el proceso de cálculo y permiten interpretar más fácilmente el comportamiento dinámico y estático de la máquina.

De acuerdo a lo planteado anteriormente, en la figura 1.6 se muestra la disposición completa de una máquina síncrona, con sus devanados de fase, campo y amortiguación. A este modelo de máquina se le denomina de V orden.

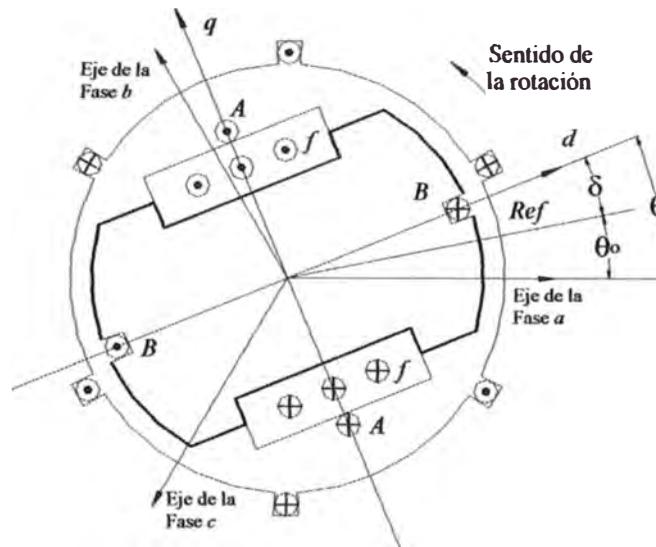


Figura 1.6
Máquina síncrona trifásica de polos salientes

- De la figura: a, b y c : Devanados de fase
 f : Devanado de campo
 A y B : Devanados de amortiguamiento en los ejes d y q

Se debe recalcar que la mayoría de textos presentan este tipo de disposición debido a que se ha supuesto que dada la posición geométrica de los devanados, y que cuando se inyectan corrientes de secuencia positiva el resultado es un campo giratorio en el sentido mostrado en la figura, cuando la máquina funcione como generador el sentido de giro del motor primo deberá ser el indicado en la figura a fin de obtener como salida corrientes desfasadas $2\pi/3$ y de secuencia positiva.

La ecuación (1.16) se puede desarrollar de acuerdo a la disposición de los arrollamientos del estator y el rotor, en las siguientes ecuaciones:

Circuito estatórico:
$$v_a = -Ri_a + \frac{d\psi_a}{dt} \quad (1.22)$$

$$v_b = -Ri_b + \frac{d\psi_b}{dt} \quad (1.23)$$

$$v_c = -Ri_c + \frac{d\psi_c}{dt} \quad (1.24)$$

Circuito rotórico:

$$v_f = R_f i_f + \frac{d\psi_f}{dt} \quad (1.25)$$

$$v_A = R_A i_A + \frac{d\psi_A}{dt} \quad (1.26)$$

$$v_B = R_B i_B + \frac{d\psi_B}{dt} \quad (1.27)$$

Ecuación magnética:

$$\Psi = \mathbf{L} \mathbf{i} \quad (1.28)$$

Pero de acuerdo a lo dicho respecto a los devanados de compensación, estos están cortocircuitados a fin de producir un flujo y corrientes transversales que se opongan a las variaciones de este campo.

$$\text{Por lo que:} \quad v_A = v_B = 0 \quad (1.29)$$

Luego desarrollando la matriz \mathbf{L} de inductancias:

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \\ \psi_f \\ \psi_A \\ \psi_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_a & L_{ab} & L_{ac} & L_{af} & L_{Aa} & L_{aB} \\ L_{ba} & L_b & L_{bc} & L_{bf} & L_{bA} & L_{bB} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_c & L_{cf} & L_{cA} & L_{cB} \\ L_{fa} & L_{fb} & L_{fc} & L_f & L_{fA} & L_{fB} \\ L_{Aa} & L_{Ab} & L_{Ac} & L_{Af} & L_A & L_{AB} \\ L_{Ba} & L_{Bb} & L_{Bc} & L_{Bf} & L_{BA} & L_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_f \\ i_A \\ i_B \end{bmatrix} \quad (1.30)$$

Siendo \mathbf{L} una matriz cuya diagonal principal incluye las inductancias propias de los devanados de la máquina.

1.2.2.1 Obtención de las Inductancias de la Matriz L

De la figura 1.6 se puede observar que: $L_{fB} = L_{Bf} = 0$ y $L_{AB} = L_{BA} = 0$.

Es importante señalar que de acuerdo a las ecuaciones del circuito estático 1.22, 1.23 y 1.24 la corriente y el flujo concatenado tienen signo contrario deducido del sentido de alimentación del generador, dándose por aceptado como convención que para corrientes que sean suministradoras de potencia la salida se realiza por los terminales con punto, dando como resultado la inversión del sentido del flujo concatenado.

(a) Inductancias propias de cada fase

La inductancia propia del inducido, enlazada con el campo de inducción mutua depende de la posición del rotor con respecto al eje de la fase, existiendo valores definidos como L_{md} y L_{mq} tales que cumplen con:

$$L_{a \max} = L_{b \max} = L_{c \max} = L_{md} \quad (1.31)$$

$$L_{a \min} = L_{b \min} = L_{c \min} = L_{mq} \quad (1.32)$$

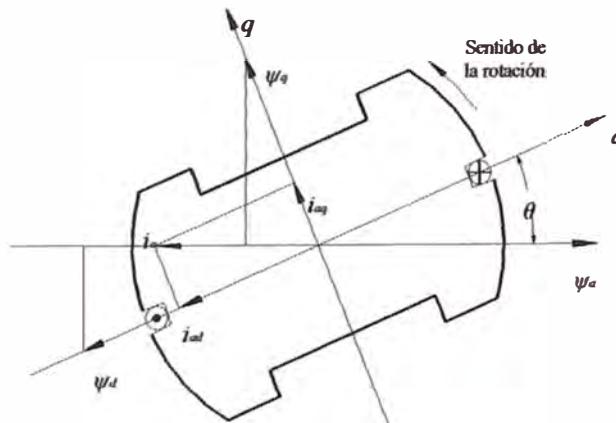


Figura 1.7
Diagrama de los flujos concatenados por la corriente i_a

Para determinar la inductancia principal de la fase a , con un ángulo θ entre el eje d y el eje de la fase se descompone la corriente de la fase a en las componentes longitudinales y transversales.

$$i_{ad} = -i_a \cos\theta; \quad \text{y} \quad i_{aq} = i_a \sin\theta \quad (1.33)$$

Los flujos enmagados de los campos longitudinal y transversal de la corriente de la fase se expresan mediante las inductancias principales de las fases según los ejes respectivos:

$$\psi_d = i_{ad} L_{md}; \quad \psi_q = i_{aq} L_{mq} \quad (1.34)$$

De la figura ψ_d está en la dirección negativa de d , y su proyección en la dirección negativa de ψ_a ; ψ_q está en la dirección positiva de q y su proyección en la dirección negativa de ψ_a :

$$\psi_a = \psi_d \cos\theta - \psi_q \sin\theta \quad (1.35)$$

reemplazando la ecuación (1.33) y (1.34) en la (1.35):

$$\psi_a = i_a L_{md} \cos^2\theta + i_a L_{mq} \sin^2\theta \quad (1.36)$$

$$L_a = \frac{\psi_a}{i_a} = -L_{md} \cos^2\theta - L_{mq} \sin^2\theta \quad (1.37)$$

realizando una reducción mas se obtiene:

$$\boxed{L_a = -L_s - L_m \cos 2\theta} \quad (1.38)$$

donde: $L_s = \frac{L_{md} + L_{mq}}{2}$ y $L_m = \frac{L_{md} - L_{mq}}{2}$ (1.39)

Análogamente para las demás fases:

$$\boxed{L_b = -L_s - L_m \cos\left(2\theta + \frac{2\pi}{3}\right)} \quad (1.40)$$

$$L_c = -L_s - L_m \cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (1.41)$$

(b) **Inductancia mutua entre fases**

La inductancia mutua entre las fases a y b es el flujo concatenado ψ_b en a debido a la corriente en la fase a . Se analiza la componente de ψ_b en los ejes d - q y el flujo ψ_a provocado por la corriente i_a en el eje de la fase b .

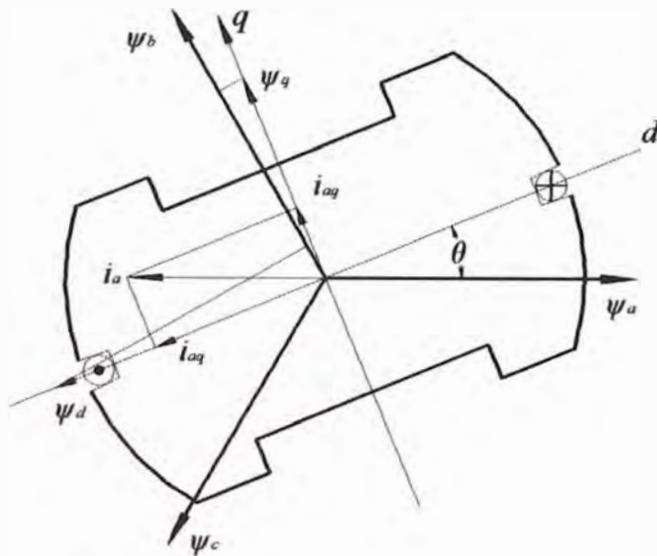


Figura 1.8
Diagrama de flujos concatenados de la corriente i_a en el devanado de la fase b

De la figura se ve que ψ_d está en la dirección negativa del eje d y su proyección en el sentido positivo de ψ_b , mientras que ψ_q está en la dirección positiva de q y su proyección en el sentido positivo de ψ_b . Luego:

$$\psi_{ba} = -\psi_d \cos\left(\frac{\pi}{3} + \theta\right) + \psi_q \sin\left(\frac{\pi}{3} + \theta\right) \quad (1.42)$$

reemplazando las ecuaciones 1.33 y 1.34 en la 1.42:

$$L_{ba} = \frac{\psi_{ba}}{i_a} = L_{md} \cos\theta \cos\left(\frac{\pi}{3} + \theta\right) + L_{mq} \sin\theta \sin\left(\frac{\pi}{3} + \theta\right) \quad (1.43)$$

Reduciendo términos:

$$L_{ab} = L_{ba} = M_s - L_m \cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (1.44)$$

$$L_{ac} = L_{ca} = M_s - L_m \cos\left(2\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (1.45)$$

$$L_{bc} = L_{cb} = M_s - L_m \cos 2\theta \quad (1.46)$$

Siendo: $M_s = \frac{L_s}{2}$ y $L_m = \frac{L_{md} - L_{mq}}{2}$ (1.47)

(c) Inductancia mutua entre los devanados de fase y campo

Para explicar este caso presentamos un diagrama parecido a la figura 1.8:

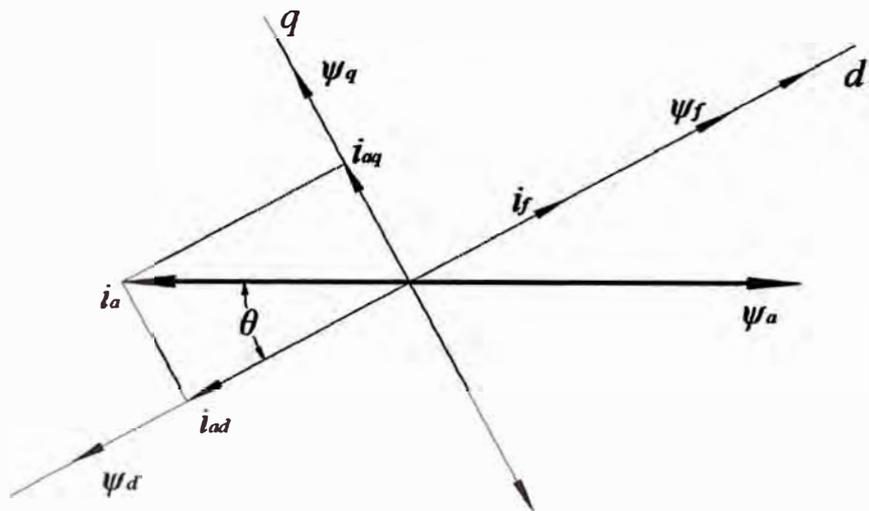


Figura 1.9
Flujos concatenados entre las fases y el campo

Se procede a la obtención de L_{fa} :

$$\psi_{fa} = \psi_d = -i_a L_{md} \cos \theta \quad (1.48)$$

En este caso la componente ψ_q no tiene proyección sobre ψ_f , asimismo ψ_d está en la dirección negativa del eje d y en el sentido negativo de ψ_f . Por lo tanto:

$$L_{fa} = \frac{\psi_{fa}}{i_a} = L_{md} \cos \theta \quad (1.49)$$

$$\boxed{L_{fa} = -L_{md} \cos \theta} \quad (1.50)$$

Ahora se procede a la obtención de L_{af} teniendo en cuenta que ψ_f esta en la dirección positiva del eje d pero su proyección es positiva en el sentido de ψ_a , por lo tanto:

$$\psi_{af} = \psi_d \cos \theta \quad (1.51)$$

En este caso i_f descansa sobre d , luego:

$$i_{fd} = i_f \quad (1.52)$$

luego:
$$\psi_d = i_{fd} L_{md} = i_f L_{md} \quad (1.53)$$

Por lo tanto:

$$\psi_{af} = i_f L_{md} \cos \theta \quad (1.54)$$

$$\boxed{L_{af} = L_{md} \cos \theta} \quad (1.55)$$

Luego para las otras fases:

$$\boxed{L_{bf} = L_{md} \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right)} \quad (1.56)$$

$$\boxed{L_{cf} = L_{md} \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right)} \quad (1.57)$$

y además:

$$\boxed{L_{fb} = -L_{md} \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right)} \quad (1.58)$$

$$\boxed{L_{fc} = -L_{md} \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right)} \quad (1.59)$$

(d) Inductancia Mutua entre los devanados de fase y amortiguamiento en el eje longitudinal

La disposición espacial de los vectores de flujo de fase y el flujo de los devanados de amortiguamiento, cuya dirección y sentido es el mismo que el devanado de campo, solo indica que la forma de todas las ecuaciones y consideraciones que se tuvo en el punto (c) serán las mismas en este punto, luego resumiendo:

$$\begin{aligned} L_{aA} &= L_{md} \cos\theta \\ L_{bA} &= L_{md} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{cA} &= L_{md} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (1.60)$$

$$\begin{aligned} L_{Aa} &= -L_{md} \cos\theta \\ L_{Ab} &= -L_{md} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{Ac} &= -L_{md} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (1.61)$$

(e) Inductancia Mutua entre los devanados de fase y amortiguamiento en el eje transversal

Aplicando el mismo método de trabajo y con la figura 1.8 se deduce que:

$$\begin{aligned} L_{aB} &= -L_{mq} \operatorname{sen}\theta \\ L_{bB} &= -L_{mq} \operatorname{sen}\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{cB} &= -L_{mq} \operatorname{sen}\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (1.62)$$

$$\begin{aligned} L_{Ba} &= L_{mq} \operatorname{sen}\theta \\ L_{Bb} &= L_{mq} \operatorname{sen}\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{Bc} &= L_{mq} \operatorname{sen}\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (1.63)$$

(f) Inductancia mutua entre el devanado de campo y el devanado de amortiguamiento longitudinal

Es constante y de valor: $L_{fA} = L_{Af}$ (1.64)

(g) Inductancia propia del devanado de campo

Esta dada por: L_f (1.65)

(h) Inductancia propia del devanado de amortiguamiento transversal

Es constante y de valor: L_A (1.66)

(i) Inductancia propia del devanado de amortiguamiento transversal

Esta dada por: L_B (1.67)

Reemplazando los elementos de la matriz L hallados:

$$L = \begin{bmatrix} -L_s - L_m \cos 2\theta & M_s - L_m \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) & M_s - L_m \cos(2\theta + \frac{2\pi}{3}) & L_{md} \cos \theta & L_{md} \cos \theta & -L_{mq} \sin \theta \\ M_s - L_m \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) & -L_s - L_m \cos(2\theta + \frac{2\pi}{3}) & M_s - L_m \cos 2\theta & -L_{md} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -L_{md} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -L_{mq} \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ M_s - L_m \cos(2\theta + \frac{2\pi}{3}) & M_s - L_m \cos 2\theta & -L_s - L_m \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) & -L_{md} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -L_{md} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -L_{mq} \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ L_{md} \cos \theta & -L_{md} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -L_{md} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & L_f & L_{fA} & 0 \\ L_{md} \cos \theta & -L_{md} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -L_{md} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & L_{fA} & L_A & 0 \\ -L_{mq} \sin \theta & -L_{mq} \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -L_{mq} \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 0 & 0 & L_B \end{bmatrix} \quad (1.68)$$

1.2.2.2 Aplicación de la Transformada de Park

Del diagrama se puede obtener la transformación de coordenadas primitivas del sistema abc a coordenadas $dq0$.

Dados tres vectores unitarios desplazados $2\pi/3$ uno del otro, estos pueden ser fácilmente descompuestos en otros tres vectores unitarios en los ejes $dq0$, siendo 0 otro vector no representado fijo en el espacio.

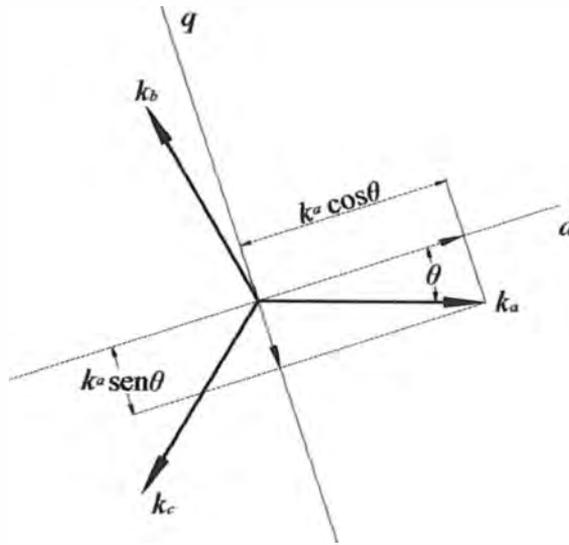


Figura 1.10
Vectores de transformación de coordenadas primitivas *abc* a *dq0*

$$k_a = k_d \cos \theta - k_q \operatorname{sen} \theta + k_0 \quad (1.69)$$

$$k_b = -k_d \cos\left(\frac{\pi}{3} + \theta\right) - k_q \cos\left(\frac{\pi}{6} - \theta\right) + k_0 \quad (1.70)$$

$$k_c = -k_d \cos\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) - k_q \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{6} + \theta\right) + k_0 \quad (1.71)$$

O en forma matricial, previamente acomodando las funciones trigonométricas:

$$\begin{bmatrix} k_a \\ k_b \\ k_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\operatorname{sen} \theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\operatorname{sen}\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\operatorname{sen}\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_d \\ k_q \\ k_0 \end{bmatrix} \quad (1.72)$$

$$\mathbf{K}_{abc} = \mathbf{A} \mathbf{K}_{dq0} \quad (1.73)$$

donde **A** es la matriz de transformación de fases *abc* a la variable *dq0*.

Esta transformación se le denomina también de Clark cuando $\theta = 0$. En nuestro caso las variables que necesitan ser transformadas serán solo las que no estén fijas al rotor de la máquina por lo que solo se aplicarán a los devanados del estator *abc*, y solo se utilizan en variables de tensión, corriente y flujo, pero como se necesita

incluir todos los devanados de la máquina en el proceso, la matriz resultante será la matriz **P** de Park:

$$\mathbf{P} = \frac{1}{f} \begin{array}{c} a \\ b \\ c \\ f \\ A \\ B \end{array} \left[\begin{array}{ccc|cc} & a & b & c & f & A & B \\ \hline & \cos\theta & -\text{sen}\theta & 1 & & & \\ & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\text{sen}(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 & & \mathbf{[0]} & \\ & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\text{sen}(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 & & & \\ \hline & & & & & & \\ & & & & & \mathbf{[0]} & \\ & & & & & & \mathbf{[I]} \end{array} \right] \quad (1.74)$$

donde **[0]** es una matriz de ceros e **[I]** es la matriz identidad ambas de tamaño tres.

Es fácil darse cuenta que llevando las variables de los ejes de referencia *abc*, a un sistema que se mueve con el rotor de la máquina se establece la independencia angular de las variables. Asimismo, esta transformación permite definir una máquina energéticamente equivalente a la que inicialmente se tenía; caracterizada además de los arrollamientos rotóricos *f, A, B*, de otros arrollamientos *d, q, 0*, que representan para todos los efectos a los arrollamientos del estator *a, b, c*.

De estos tres arrollamientos; dos, *d* y *q* son solidarios respecto al eje directo y en cuadratura del rotor, es decir, son estacionarios respecto al rotor, mientras el tercero, *0* es fijo e independiente en el espacio.

Entonces podemos escribir: $\Psi_{abc} = \mathbf{P} \Psi_{dq0}$ (1.75)

luego: $\Psi_{dq0} = \mathbf{P}^{-1} \Psi_{abc}$ (1.76)

reemplazando la ecuación (1.17) en la (1.76), tenemos

$$\Psi_{dq0} = \mathbf{P}^{-1} \mathbf{L} \mathbf{i}_{abc} \quad (1.77)$$

$$\Psi_{dq0} = \mathbf{P}^{-1} \mathbf{L} (\mathbf{P} \mathbf{i}_{dq0}) \quad (1.78)$$

$$\Psi_{dq0} = (\mathbf{P}^{-1} \mathbf{L} \mathbf{P}) \mathbf{i}_{dq0} \quad (1.79)$$

de donde:
$$\mathbf{L}_{equiv} = \mathbf{P}^{-1} \mathbf{L} \mathbf{P} \quad (1.180)$$

Luego reemplazando la ecuación (1.68) en la (1.80) y ejecutando el producto de matrices se puede obtener:

$$\mathbf{L}_{equiv} = \begin{bmatrix} -(L_s + M_s + \frac{3}{2} L_m) & 0 & 0 & L_{md} & L_{md} & 0 \\ 0 & -(L_s + M_s - \frac{3}{2} L_m) & 0 & 0 & 0 & L_{mq} \\ 0 & 0 & -(L_s - 2M_s) & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{3}{2} L_{md} & 0 & 0 & L_f & L_{fA} & 0 \\ -\frac{3}{2} L_{md} & 0 & 0 & L_{fA} & L_A & 0 \\ 0 & -\frac{3}{2} L_{mq} & 0 & 0 & 0 & L_B \end{bmatrix} \quad (1.81)$$

Definimos lo siguiente:

$$L_d = L_s + M_s + \frac{3}{2} L_m \quad (1.82)$$

$$L_q = L_s + M_s - \frac{3}{2} L_m \quad (1.83)$$

$$L_0 = L_s - 2M_s \quad (1.84)$$

Donde L_d es la inductancia síncrona de eje directo, L_q la inductancia síncrona del eje en cuadratura y L_0 la inductancia de secuencia 0.

Como habíamos dicho este tercer eje hace referencia a un eje fijo en el espacio, que puede ser fácilmente eliminado si hacemos uso de la ecuación (1.47) reemplazándola en las ecuaciones (1.82), (1.83) y (1.84), de esta manera L_d y L_q mantienen su valor original y la matriz \mathbf{L}_{equiv} queda reducida de tamaño 5.

Debido a que los arrollamientos d, f y A están sobre un mismo eje, tendrán un flujo mutuamente concatenado, los arrollamientos q y B por la misma razón tienen un flujo mutuamente concatenado.

El arrollamiento 0 no tiene concatenamiento de flujo con ningún arrollamiento.

El arrollamiento 0 no está presente en un sistema trifásico abc , simétrico y equilibrado.

Reemplazando las ecuaciones (1.81), (1.82), (1.83) y (1.84) en la ecuación (1.79):

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_0 \\ \psi_f \\ \psi_A \\ \psi_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_d & 0 & 0 & L_{md} & L_{md} & 0 \\ 0 & -L_q & 0 & 0 & 0 & L_{mq} \\ 0 & 0 & -L_0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{3}{2}L_{md} & 0 & 0 & L_f & L_{fA} & 0 \\ -\frac{3}{2}L_{md} & 0 & 0 & L_{fA} & L_A & 0 \\ 0 & -\frac{3}{2}L_{mq} & 0 & 0 & 0 & L_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \\ i_f \\ i_A \\ i_B \end{bmatrix} \quad (1.85)$$

La ecuación (1.85) es la ecuación de flujos de la máquina síncrona.

Con los valores de matriz de inductancias obtenida, se puede observar que esta tiene algunas propiedades importantes^[13]:

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \\ \psi_f \\ \psi_A \\ \psi_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -[L_{ee}] & [L_{er}] \\ -[L_{re}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_f \\ i_A \\ i_B \end{bmatrix} \quad (1.86)$$

donde la matriz original se descompone en 4 de tamaño 3×3 que relacionan elementos del estator (e) y del rotor (r).

- El signo negativo entre los flujos y las corrientes es debido a la convención adoptada por la cual si la máquina es suministradora de potencia y el sentido de la corriente es de sentido positivo ($i_a, i_b, i_c > 0$), le corresponde una fuerza magnetomotriz y por lo tanto un flujo concatenado ($\psi_a, \psi_b, \psi_c < 0$). Esto explica la posición de los vectores de flujo y corriente dadas en las figuras 1.7 y 1.8.

- $[L_{rr}]$ es una matriz de los devanados que están ya situados en los ejes d-q de la máquina, no requiriendo transformación posterior. Comparece las ecuaciones 1.68 y 1.81.
- Cada elemento de $[L_{er}]$ contiene valores tales que $[L_{er}] = [L_{re}]^T$, siendo esto aplicable a las ecuaciones 1.68 y 1.81. Siendo la ecuación (1.68) una función periódica de θ con período par a 2π ,
- En la ecuación (1.68), cada elemento de $[L_{ee}]$ es una función periódica de θ con período par a π radianes.
- Como θ es dependiente del tiempo la matriz de inductancias de la ecuación (1.68) también lo es.

Aplicando la transformación de Park a la ecuación (1.16) que está en valores de fase abc , se obtiene:

$$\mathbf{v}_{abc} = \mathbf{R} \mathbf{i}_{abc} + \frac{d\mathbf{\Psi}_{abc}}{dt} \quad (1.87)$$

pero:

$$\mathbf{v}_{dq0} = \mathbf{P}^{-1} \mathbf{v}_{abc} = \mathbf{P}^{-1} \mathbf{R} \mathbf{i}_{abc} + \mathbf{P}^{-1} \frac{d\mathbf{\Psi}_{abc}}{dt} \quad (1.88)$$

$$\mathbf{v}_{dq0} = \mathbf{R} (\mathbf{P}^{-1} \mathbf{i}_{abc}) + \mathbf{P}^{-1} \frac{d(\mathbf{P} \mathbf{\Psi}_{dq0})}{dt} \quad (1.89)$$

$$\mathbf{v}_{dq0} = \mathbf{R} \mathbf{i}_{dq0} + \mathbf{P}^{-1} \left(\mathbf{P} \frac{d\mathbf{\Psi}_{dq0}}{dt} + \frac{d\mathbf{P}}{dt} \mathbf{\Psi}_{dq0} \right) \quad (1.90)$$

$$\mathbf{v}_{dq0} = \mathbf{R} \mathbf{i}_{dq0} + \mathbf{P}^{-1} \mathbf{P} \frac{d\mathbf{\Psi}_{dq0}}{dt} + \mathbf{P}^{-1} \frac{d\mathbf{P}}{dt} \mathbf{\Psi}_{dq0} \quad (1.91)$$

En términos de las variables $dq0$, y desarrollando la ecuación (1.91), tenemos:

$$\mathbf{v}_{dq0} = \mathbf{R} \mathbf{i}_{dq0} + \frac{d\mathbf{\Psi}_{dq0}}{dt} + \mathbf{e}_{\omega d} \quad (1.92)$$

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \\ v_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \left[\text{diag } R, R, R, R_f, R_A, R_B \right] \begin{bmatrix} -i \\ -i_q \\ -i_0 \\ i_f \\ i_A \\ i_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d\psi_d}{dt} \\ \frac{d\psi_q}{dt} \\ \frac{d\psi_0}{dt} \\ \frac{d\psi_f}{dt} \\ \frac{d\psi_A}{dt} \\ \frac{d\psi_B}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega\psi_d \\ -\omega\psi_q \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.93)$$

donde los signos negativos de las corrientes son debido a los signos de las corrientes de las fases descritas en las ecuaciones rotóricas (1.22), (1.23) y (1.24), y asimismo, e_ω es la matriz de las tensiones que se vienen a generar por efecto de la rotación, dicha f.e.m. está solo presente sobre los arrollamientos d y q y son representados por la f.e.m. instantánea^[13].

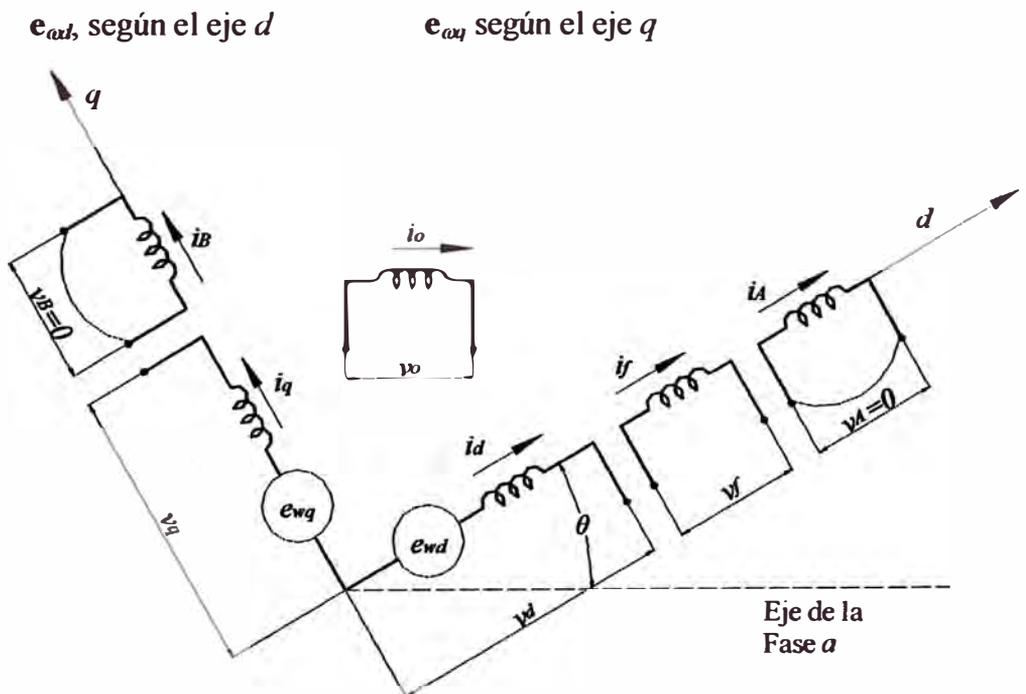


Figura 1.11
Ejes dq0 y sus relaciones entre tensiones y corrientes

Todas las ecuaciones presentadas hasta aquí describen el comportamiento de la máquina síncrona en componentes $dq0$ y en términos de cantidades reales e instantáneas.

1.2.2.3 Expresión de las variables de Park en p.u.

En este punto se reescribirán en forma ordenada las ecuaciones hasta ahora obtenidas:

Ecuaciones de tensión en el eje directo:

$$\begin{aligned} v_d &= -Ri_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega\psi_q \\ v_f &= R_f i_f + \frac{d\psi_f}{dt} \\ 0 &= R_A i_A + \frac{d\psi_A}{dt} \end{aligned} \quad (1.94)$$

Ecuaciones de tensión en el eje de cuadratura:

$$\begin{aligned} v_q &= -Ri_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega\psi_d \\ 0 &= R_B i_B + \frac{d\psi_B}{dt} \end{aligned} \quad (1.95)$$

Ecuación de tensión en el eje 0:

$$v_0 = -Ri_0 + \frac{d\psi_0}{dt} \quad (1.96)$$

Ecuaciones magnéticas en el eje directo:

$$\begin{aligned} \psi_d &= -L_d i_d + L_{md} i_f + L_{md} i_a \\ \psi_f &= -\frac{3}{2} L_{md} i_d + L_f i_f + L_{fA} i_A \\ \psi_A &= -\frac{3}{2} L_{md} i_d + L_{fA} i_f + L_A i_A \end{aligned} \quad (1.97)$$

Ecuaciones magnéticas en el eje en cuadratura:

$$\begin{cases} \psi_q = -L_q i_q + L_{mq} i_B \\ \psi_B = -\frac{3}{2} L_{mq} i_q + L_B i_B \end{cases} \quad (1.98)$$

Ecuación magnética en el eje 0:

$$\psi_0 = -L_0 i_0 \quad (1.99)$$

Estos seis conjuntos de ecuaciones son los mismos que se han obtenido a partir de la transformación de Park. Se procederá a realizar su conversión a valores en por unidad (p.u.) escogiendo como valores base la tensión de línea a neutro pico V_0 , y la corriente de línea pico I_0 , en la Tabla I se adjuntan las relaciones de bases entre los distintos devanados:

Se toma como ejemplo el flujo ψ_A :

$$\psi_{A.pu} = \frac{\psi_A}{\psi_{BASE}} = \frac{\psi_A}{\frac{V_0 N_A}{\omega_0 N_0}} = \frac{-\frac{3}{2} L_{md} i_d}{\frac{V_0 N_A}{\omega_0 N_0}} + \frac{L_{fA} i_f}{\frac{V_0 N_A}{\omega_0 N_0}} + \frac{L_A i_A}{\frac{V_0 N_A}{\omega_0 N_0}} \quad (1.100)$$

Quedando en p.u.:
$$\psi_A = -x_{md} + x_{fA} i_f + x_A i_A \quad (1.101)$$

donde se define:

$$x_{md} = \frac{3 L_{md} I_0 \omega_0 N_0}{2 V_0 N_A}$$

$$x_{fA} = \frac{3 L_{fA} I_0 \omega_0 N_0^2}{2 V_0 N_A N_f}$$

$$x_A = \frac{3 L_A I_0 \omega_0}{2 V_0} \left(\frac{N_0}{N_A} \right)^2$$

Tabla 1.1

Devanado	V_{BASE}	I_{BASE}	ψ_{BASE}
d	V_0	I_0	$\frac{V_0}{\omega_0}$
q	V_0	I_0	$\frac{V_0}{\omega_0}$
f	$\frac{V_0 N_f}{N_0}$	$\frac{3I_0 N_0}{2N_f}$	$\frac{V_0 N_f}{\omega_0 N_0}$
A	$\frac{V_0 N_A}{N_0}$	$\frac{3I_0 N_0}{2N_A}$	$\frac{V_0 N_A}{\omega_0 N_0}$
B	$\frac{V_0 N_B}{N_0}$	$\frac{3I_0 N_0}{2N_B}$	$\frac{V_0 N_B}{\omega_0 N_0}$

Seguendo este mismo criterio y con las ecuaciones 1.94 a la 1.99, obtenemos las

ecuaciones en p.u. de la máquina síncrona, donde se ha utilizado el operador $p = \frac{d}{dt}$:

Ecuaciones diferenciales de tensión en p.u. en el eje directo:

$$\begin{cases}
 v_d = -R i_d + \frac{1}{\omega_0} p \psi_d - \frac{\omega}{\omega_0} \psi_q \\
 v_f = R_f i_f + \frac{1}{\omega_0} p \psi_f \\
 0 = R_A i_A + \frac{1}{\omega_0} p \psi_A
 \end{cases}
 \tag{1.102}$$

donde se define:

$$e_{\omega d} \equiv -\frac{\omega}{\omega_0} \psi_q
 \tag{1.103}$$

Ecuaciones diferenciales de tensión en p.u. en el eje en cuadratura:

$$\begin{cases} v_q = -Ri_q + \frac{1}{\omega_0} p\psi_q + \frac{\omega}{\omega_0} \psi_d \\ 0 = R_B i_B + \frac{1}{\omega_0} p\psi_B \end{cases} \quad (1.104)$$

donde se define:

$$e_{\omega q} \equiv \frac{\omega}{\omega_0} \psi_d \quad (1.105)$$

Ecuaciones magnético algebraicas del eje directo:

$$\begin{cases} \psi_d = -x_d i_d + x_{md} i_f + x_{md} i_A \\ \psi_f = -x_{md} i_d + x_f i_f + x_{fA} i_A \\ \psi_A = -x_{md} i_d + x_{fA} i_f + x_A i_A \end{cases} \quad (1.106)$$

Ecuaciones magnético algebraicas del eje en cuadratura:

$$\begin{cases} \psi_q = -x_q i_q + x_{mq} i_B \\ \psi_B = -x_{mq} i_q + x_B i_B \end{cases} \quad (1.107)$$

Como se puede observar las ecuaciones de secuencia cero han sido eliminadas en el proceso anterior, el haber usado la variable M_s en la obtención de la matriz \mathbf{L}_{equiv} , dio lugar a la aparición de la secuencia cero, este parámetro carece de importancia en sistemas eléctricos simétricos y equilibrados. Aún cuando en realidad esto tiene que ver con el tipo de falla que el sistema soporte, en este caso particular omitiremos el estudio de ese tipo de falla y solo se presentará el caso de falla trifásica a tierra.

Es importante destacar que como consecuencia directa de despreciar la secuencia cero la tensión en terminales de la máquina se puede presentar en una forma más simple:

$$v_t^2 = v_d^2 + v_q^2 \quad (1.108)$$

1.2.2 Obtención de la Ecuación de Oscilación de la Máquina Síncrona

Ahora se obtendrán expresiones para la potencia eléctrica, y las ecuaciones de oscilación y ángulo de la máquina.

a. Potencia Eléctrica

La potencia eléctrica de la máquina en sus coordenadas primitivas abc está dada como la suma de las potencias de sus puertos eléctricos individuales:

$$P = \mathbf{v}_{abc}^t \mathbf{i}_{abc} \quad (1.109)$$

donde \mathbf{v}_{abc}^t es la matriz traspuesta de las tensiones de entrada de la máquina, e \mathbf{i}_{abc} es la matriz de las corrientes de las fases de la máquina:

$$P = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (1.110)$$

$$P = \mathbf{v}_{abc}^t \mathbf{i}_{abc} = \mathbf{P}^{-1} \mathbf{v}_{dq0}^t \mathbf{P}^{-1} \mathbf{i}_{dq0} \quad (1.111)$$

$$P = \mathbf{v}_{dq0}^t \mathbf{P}^{-1} \mathbf{P}^{-1} \mathbf{i}_{dq0} = \mathbf{v}_{dq0} \mathbf{P} \mathbf{P}^{-1} \mathbf{i}_{dq0} \quad (1.112)$$

$$P = \mathbf{v}_{dq0}^t \mathbf{i}_{dq0} = v_d i_d + v_q i_q + v_0 i_0 \quad (1.113)$$

en estas ecuaciones se hace evidente que la matriz \mathbf{P} es ortogonal^[3], cumpliéndose que $\mathbf{P}^{-1} = \mathbf{P}^t$ y que $\mathbf{P}^{-1} \mathbf{P}^t = \mathbf{I}$, cumpliéndose además que esto implica que la potencia es invariante teniéndose por lo tanto la misma expresión en cualquier marco de referencia ya sea abc ó $dq0$.

Por las razones expuestas en la parte final del punto 1.2.2.3 despreciaremos la secuencia cero y llevando esta expresión a p.u. de acuerdo a las bases elegidas, tenemos que:

$$P = v_d i_d + v_q i_q \quad (1.114)$$

Hay que señalar que esta potencia es la potencia de salida de la máquina, para hallar la potencia que cruza el entrehierro de la máquina es necesario aumentar a esta potencia las pérdidas de armadura ó pérdidas óhmicas, luego la ecuación (1.113) se convierte en:

$$P = v_d i_d + v_q i_q + R i_d^2 + R i_q^2 \quad (1.115)$$

Solo cuando la naturaleza de la máquina lo permita, se puede despreciar la resistencia del devanado de armadura, siendo posible entonces trabajar con la ecuación (1.113) con suficiente aproximación

b. Ecuación de Oscilación

La ecuación que gobierna la máquina síncrona se basa en un principio elemental de dinámica, que establece que el par de rotación es el producto del momento de inercia por su aceleración angular:

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt} = T_a = T_m - T_e \quad (\text{N-m}) \quad (1.116)$$

donde:

J : Momento total de inercia del rotor (kg-m^2).

θ : Desplazamiento angular del rotor respecto al eje de la fase a en radianes mecánicos.

t : Tiempo (s).

T_m : Es la diferencia entre el torque mecánico y el torque de retardo debido a las pérdidas rotacionales.

En equilibrio los torques T_m y T_e son de signo opuesto, siendo el giro de T_m en el sentido de rotación de la máquina, luego el torque acelerante es cero, y por lo tanto se produce la anulación de la ecuación (1.116) y se dice que la

velocidad a la cual esto ocurre es la velocidad síncrona. La masa rotatoria J incluye el rotor del generador y la fuente energía mecánica, estando ambas en sincronismo con otras máquinas que operan a la misma velocidad en un sistema de potencia. El regulador de velocidad no actúa hasta que se perciba un cambio en la velocidad.

El torque eléctrico T_e corresponde a la salida de potencia neta en el entrehierro mas las pérdidas de armadura ó pérdidas óhmicas I^2R .

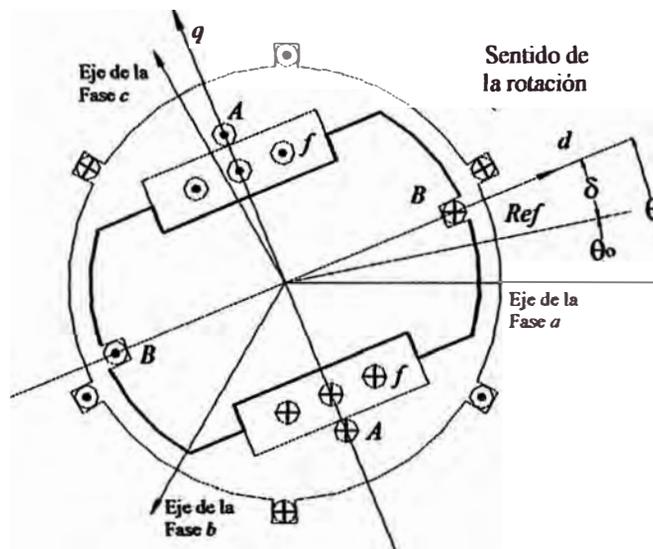


Figura 1.12
Relación angular en la Máquina Síncrona

De la figura:

$$\theta = \theta_0 + \delta \quad (1.117)$$

pero: $\theta_0 = \omega_0 t \quad (1.118)$

luego: $\theta = \omega_0 t + \delta \quad (1.119)$

donde ω_0 es la velocidad síncrona en unidades mecánicas (rad/s), δ es el desplazamiento angular del motor (radianes mecánicos), derivando ambos miembros:

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_0 + \frac{d\delta}{dt} \quad (1.120)$$

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{d^2\delta}{dt^2} \quad (1.121)$$

La Ecuación (1.120) nos muestra que $d\theta/dt$ es constante e igual a la velocidad síncrona cuando $d\delta/dt$ es cero. Luego $d\delta/dt$ representa la desviación del rotor respecto a la velocidad síncrona, reemplazando la ecuación (1.121) en (1.116):

$$J \frac{d^2\delta}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (1.122)$$

Multiplicando ambos miembros por la velocidad angular ω :

$$J\omega \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (1.123)$$

El coeficiente $J\omega$ es el momento angular del rotor, a la velocidad síncrona este coeficiente se denota con M y se le llama constante de inercia de la máquina, es decir:

$$M = J\omega \quad (1.124)$$

luego:

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (1.125)$$

Frecuentemente los fabricantes suministran la llamada constante de H que se relaciona con la inercia^[4]:

$$H = \frac{\text{Energía Cinética almacenada en MJ a la velocidad síncrona}}{\text{Potencia Nominal de la máquina en MVA}}$$

luego:

$$H = \frac{\frac{1}{2} J \omega_0^2}{N_B} = \frac{\frac{1}{2} M \omega_0}{N_B} \quad (1.126)$$

despejando M :

$$M = \frac{2H}{\omega_0} N_B \quad (1.127)$$

Reemplazando 1.126 en 1.122:

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{P_a}{N_B} = \frac{P_m - P_e}{N_B} \quad (1.128)$$

Recordar que hasta ahora se ha trabajado en valores reales, luego tomaremos el valor de la potencia nominal de la máquina como valor base N_B , para obtener los siguientes valores en p.u.:

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (1.129)$$

Estando esta ecuación en p.u. relativos a los valores nominales de la máquina. Si denominamos $T_m = 2H$, tendremos la ecuación de oscilación de la máquina síncrona:

$$\frac{1}{\omega_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{P_m - P_e}{T_m} \quad (1.130)$$

En realidad el usuario deberá decidir el tipo de expresión de las que hemos presentado la más conveniente a sus objetivos, es importante hacer notar que:

en grados:
$$\frac{H}{\pi f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (1.131)$$

en radianes:
$$\frac{H}{180 f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (1.132)$$

como esta es una ecuación de segundo orden podemos bajar el orden creando otra ecuación que relacione el ángulo de la máquina:

$$\begin{aligned} \frac{2H}{\omega_0} \frac{d\omega}{dt} &= P_m - P_e \\ \frac{d\delta}{dt} &= \omega - \omega_0 \end{aligned} \quad (1.133)$$

En problemas donde intervengan varias máquinas de diferente potencia, y que pertenezcan al mismo sistema, habrá que homogeneizar la variable H a fin de contar con un mismo valor base para todo el sistema.

$$H_{Sist} = H_{Maq} \frac{N_{Maq}}{N_{Sist}} \quad (1.134)$$

1.2.4 Órdenes de la Máquina Síncrona

Los modelos de la máquina síncrona se clasifican de acuerdo a los devanados de amortiguamiento que se consideren, estas ecuaciones son deducidas de las ecuaciones 1.102 a la 1.107 de la máquina síncrona.

Para la deducción de las siguientes ecuaciones se deberá tener en cuenta las siguientes hipótesis además de las que se han descrito en 1.2.1, las que serán aplicadas a todos los órdenes de la máquina^[13].

- Si despreciamos la f.e.m. de transformación, es decir los términos de la ecuación (1.102):

$$\frac{1}{\omega_0} p\psi_d = 0 \quad y; \quad \frac{1}{\omega_0} p\psi_q = 0 \quad (1.135)$$

- Si asimismo, despreciamos el efecto del deslizamiento ω/ω_0 de la f.e.m. de rotación en la ecuación (1.102), tendremos:

$$-\frac{\omega}{\omega_0} \psi_q = -\psi_q \quad y; \quad \frac{\omega}{\omega_0} \psi_d = \psi_d \quad (1.136)$$

- Si despreciamos la resistencia de armadura R .
- Si despreciamos las pérdidas mecánicas rotacionales

Además se procederá a presentar las ecuaciones (1.102) a la (1.107) agrupadas en el eje directo y en cuadratura como sigue:

De tensión en el eje directo:

$$\begin{aligned} v_d &= -\psi_q \\ v_f &= R_f i_f + \frac{1}{\omega_0} p \psi_f \\ 0 &= R_A i_A + \frac{1}{\omega_0} p \psi_A \end{aligned} \quad (1.137)$$

En el eje en cuadratura:

$$\begin{aligned} v_q &= \psi_d \\ 0 &= R_B i_B + \frac{1}{\omega_0} p \psi_B \end{aligned} \quad (1.138)$$

Ecuaciones magnéticas del eje directo:

$$\begin{aligned} \psi_d &= -x_d i_d + x_{md} i_f + x_{md} i_A \\ \psi_f &= -x_{md} i_d + x_f i_f + x_{fA} i_A \\ \psi_A &= -x_{md} i_d + x_{fA} i_f + x_A i_A \end{aligned} \quad (1.139)$$

En el eje en cuadratura:

$$\begin{aligned} \psi_q &= -x_q i_q + x_{mq} i_B \\ \psi_B &= -x_{mq} i_q + x_B i_B \end{aligned} \quad (1.140)$$

Ecuaciones mecánicas

$$\begin{aligned} p\delta &= \omega - \omega_0 \\ P_m &= \frac{T_a}{\omega_0} p\omega + P_e \\ P_e &= v_d i_d + v_q i_q \end{aligned} \quad (1.141)$$

1.2.4.1 Modelo de V Orden

Es el modelo más completo de la máquina síncrona, sus ecuaciones son las deducidas más arriba, de donde resulta la siguiente ecuación de eje directo:

$$\psi_d = v_q = \frac{1 + pT_{AA}}{1 + pT'_{d0}} \frac{1 + pT''_{d0}}{1 + pT''_{d0}} v_f - x_d \frac{1 + pT'_d}{1 + pT'_{d0}} \frac{1 + pT''_d}{1 + pT''_{d0}} i_d \quad (1.142)$$

donde:
$$T_{AA} = \frac{x_A - x_{fA}}{\omega_0 R_A} \quad (1.143)$$

$$x'_d = x_d \frac{T'_d}{T'_{d0}} \quad (1.144)$$

$$x''_d = x'_d \frac{T''_d}{T''_{d0}} \quad (1.145)$$

Ecuación del eje en cuadratura:

$$-\psi_q = v_d = x_q \frac{1 + pT''_q}{1 + pT''_{q0}} i_q \quad (1.146)$$

donde:
$$x''_q = x_q \frac{T''_q}{T''_{q0}} \quad (1.147)$$

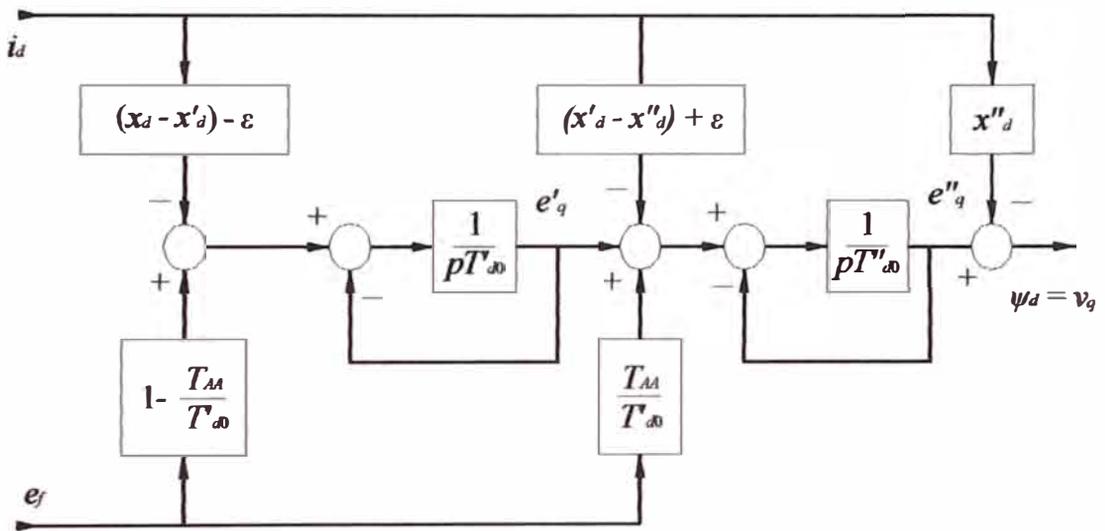


Figura 1.13
Mod. de V Orden Eje directo

donde se define:
$$\varepsilon = \frac{T''_d}{T'_{d0}} (x_d - x'^2_d) \quad (1.148)$$

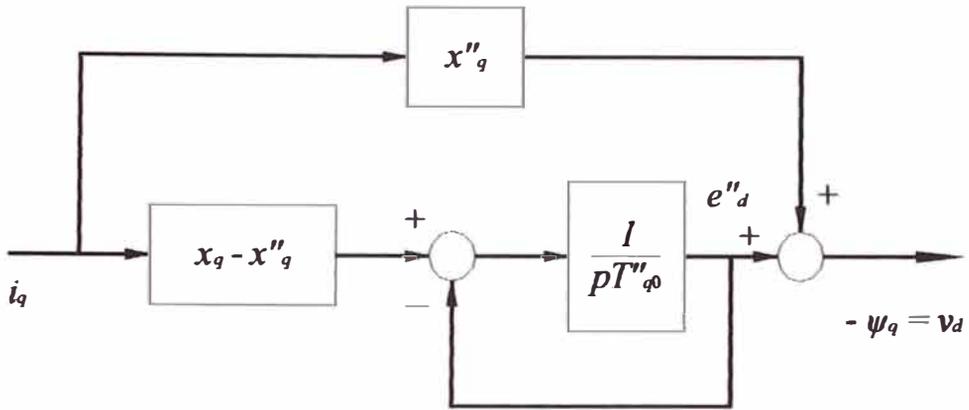


Figura 1.14
Mod. de V Orden Eje en cuadratura

De los datos experimentales que se realizan sobre máquinas síncronas tanto en grupos hidráulicos como en grupos térmicos, es posible encontrar un modelo de V orden simplificado, si se desprecia la ecuación (1.145), y se desprecia el cociente T_{AA}/T_{ω} , quedando luego la Figura 1.14 como el resultado de tal simplificación.

El diagrama de bloques del eje en cuadratura no presenta ningún cambio.

La parte mecánica presenta dos variables de estado, la velocidad angular ω y la posición angular δ .

La parte electromagnética presenta tres variables de estado; dos en el eje directo la f.e.m. transitoria e'_q del eje en cuadratura y la f.e.m. subtransitoria e''_q del eje en cuadratura; y la última en el eje en cuadratura la tensión subtransitoria e''_d del eje directo, esta tensión es proporcional al flujo ψ_B .

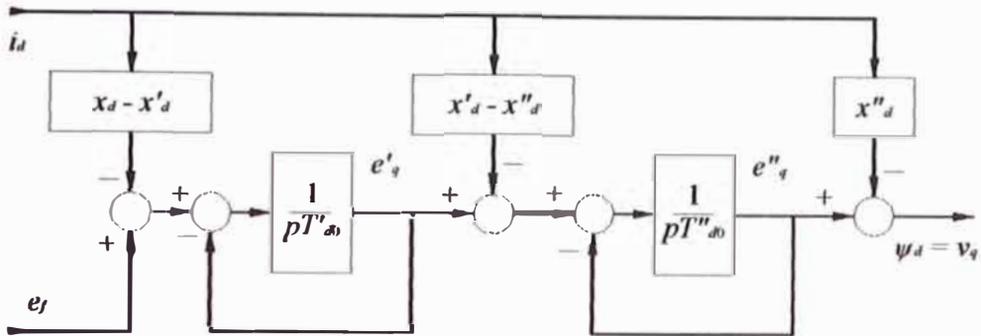


Figura 1.15
Mod. V Orden simplificado

1.2.4.2 Modelo de IV Orden

En este caso se desprecia el devano de amortiguación en el eje directo (devanado A), esto es debido nuevamente a resultados experimentales en los cuales el valor de x''_d es bastante próximo a x'_d .

Bajo estas hipótesis tenemos de las ecuaciones (1.135) a la (1.139):

$$\begin{aligned} v_d &= -\psi_q \\ \text{De eje directo:} \quad v_f &= R_f i_f + \frac{1}{\omega_0} p\psi_f \end{aligned} \quad (1.149)$$

$$\begin{aligned} v_q &= \psi_d \\ \text{De eje en cuadratura:} \quad 0 &= R_B i_B + \frac{1}{\omega_0} p\psi_B \end{aligned} \quad (1.150)$$

Ecuaciones magnéticas del eje directo:

$$\begin{aligned} \psi_d &= -x_d i_d + x_{md} i_f \\ \psi_f &= -x_{md} i_d + x_f i_f \end{aligned} \quad (1.151)$$

De eje en cuadratura:

$$\begin{aligned} \psi_q &= -x_q i_q + x_{mq} i_B \\ \psi_B &= -x_{mq} i_q + x_B i_B \end{aligned} \quad (1.152)$$

De estas ecuaciones se pueden deducir las siguientes ecuaciones:

Ecuación del eje directo:

$$\psi_d = v_q = \frac{1}{1 + pT'_{d0}} v_f - x_d \frac{1 + pT'_d}{1 + pT'_{d0}} i_d \quad (1.153)$$

Ecuación del eje en cuadratura:

$$-\psi_q = v_d = x_q \frac{1 + pT''_q}{1 + pT''_{q0}} i_q \quad (1.154)$$

De estas dos ecuaciones se muestran en las siguientes figuras los diagramas de bloques de esta máquina.

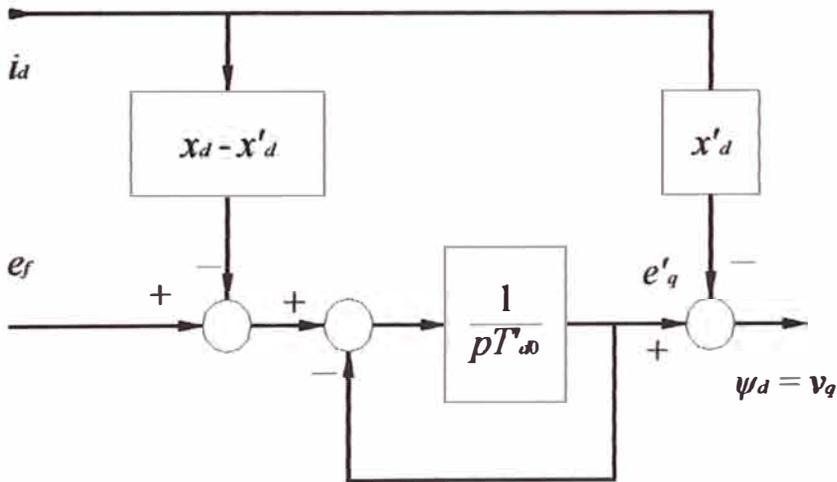


Figura 1.16
Mod. de IV Orden Eje directo

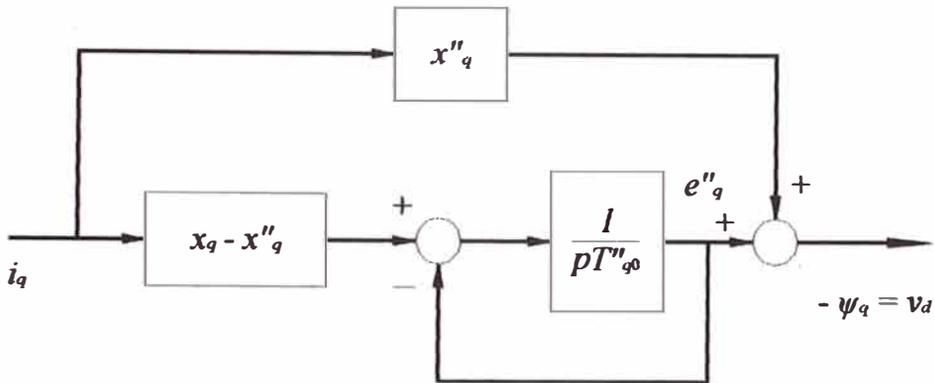


Figura 1.17
Mod. de IV Orden Eje en cuadratura

En este tipo de máquina, la parte mecánica presenta dos variables de estado, la velocidad angular ω_0 y la posición angular δ .

La parte electromagnética presenta dos variables de estado; la f.e.m. transitoria e'_q del eje en cuadratura, proporcional al flujo ψ_f , y la f.e.m. subtransitoria e''_d del eje directo y proporcional al flujo ψ_B .

1.2.4.3 Modelo de III Orden

En este caso además de todo lo supuesto anteriormente, se desprecia el devanado de amortiguación del eje en cuadratura (devanado B) por lo que las ecuaciones que resultan a partir de la (1.135) a la (1.139), resulta:

Ecuaciones de tensión del eje directo:

$$\begin{aligned} v_d &= -\psi_q \\ v_f &= R_f i_f + \frac{1}{\omega_0} p \psi_f \end{aligned} \quad (1.155)$$

Ecuación de tensión del eje en cuadratura:

$$v_d = \dot{\psi}_d \tag{1.156}$$

Ecuación magnética del eje directo:

$$\begin{aligned} \psi_d &= -x_d i_d + x_{md} i_f \\ \psi_f &= -x_{md} i_d + x_f i_f \end{aligned} \tag{1.157}$$

Ecuación magnética del eje en cuadratura:

$$\psi_q = -x_q i_q \tag{1.158}$$

De estas ecuaciones deducimos las ecuaciones de la máquina de III orden:

En el eje directo:
$$\psi_d = v_q = \frac{1}{1 + pT'_{d0}} v_f - x_d \frac{1 + pT'_d}{1 + pT'_{d0}} i_d \tag{1.159}$$

En el eje en cuadratura:
$$-\psi_q = v_d = x_q i_q \tag{1.160}$$

Por lo que es posible mostrar su diagrama de bloques

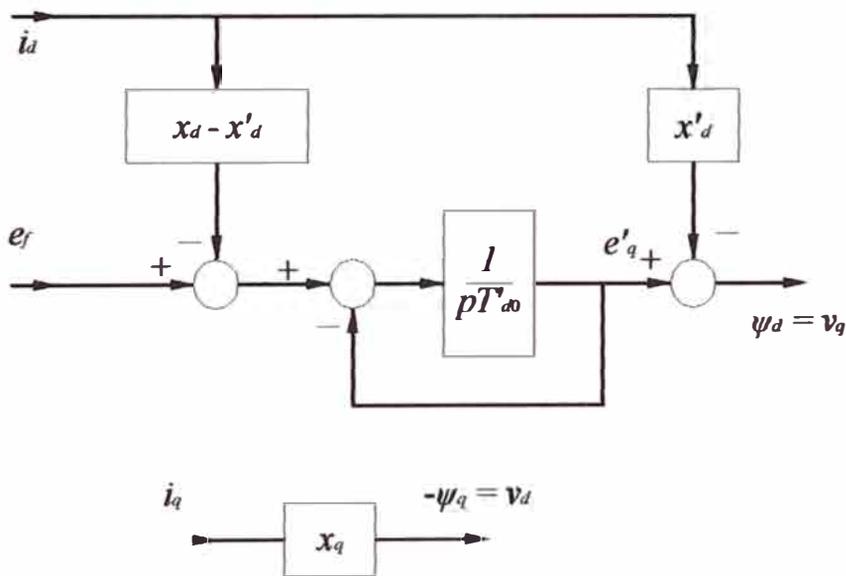


Figura 1.18
Mod. de III Orden Eje directo y en cuadratura

La parte mecánica presenta dos variables de estado la velocidad angular ω y la posición angular δ .

La parte electromagnética presenta una variable de estado en el eje directo, la f.e.m. e'_q del eje en cuadratura que es proporcional al flujo ψ_f .

1.2.4.4 Modelo de II Orden

El modelo de II orden es el modelo más simple de la máquina síncrona y es obtenido a partir de la de III orden suponiendo que e'_q (proporcional a ψ_f) es constante, por lo que se obtienen las siguientes ecuaciones:

Ecuaciones electromagnéticas de eje directo:

$$\psi_d = v_q = e'_q - x'_d i_d \quad (1.161)$$

Del eje en cuadratura:

$$-\psi_q = v_d = x_q i_q \quad (1.62)$$

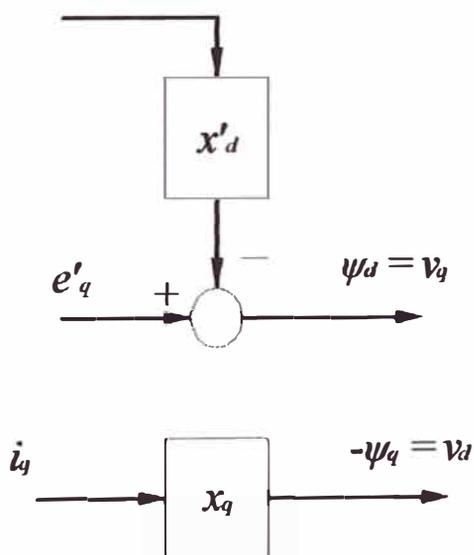


Figura 1.19
Mod. de II Orden Anisotrópico Ejes d y q

Existe el modelo clásico donde las reactancias tienen igual valor, y se cumple que

$$x'_d = x_q.$$

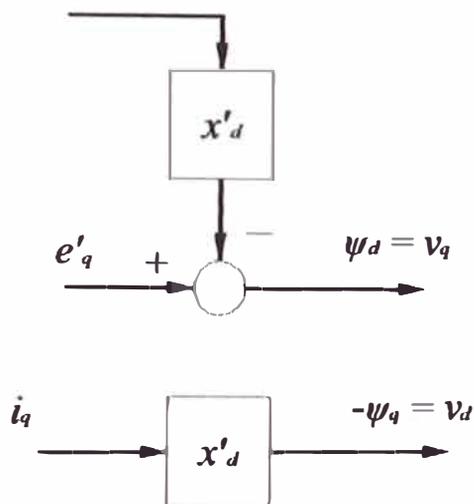


Figura 1.20
Mod. de II Orden Clásico Ejes d y q

En este tipo de máquina tenemos casi las mismas ecuaciones que en la anterior:

$$\begin{aligned} \psi_d = v_q &= e'_q - x'_d i_d \\ -\psi_q = v_d &= x'_d i_q \end{aligned} \quad (1.163)$$

La parte mecánica presenta dos variables de estado, la velocidad angular ω y la posición angular δ .

La parte electromagnética no presenta variables de estado.

1.2.4.5 Modelo de I Orden

Este modelo es presentado en la mayoría de textos por lo cual no se necesita más detalles.

Es posible ver que todos estos modelos presentan las mismas condiciones en la parte mecánica y aún más, tienen el mismo conjunto de ecuaciones que rigen este comportamiento las dadas en la ecuación (1.141) de lo cual se puede deducir su diagrama de bloques de dicho comportamiento.

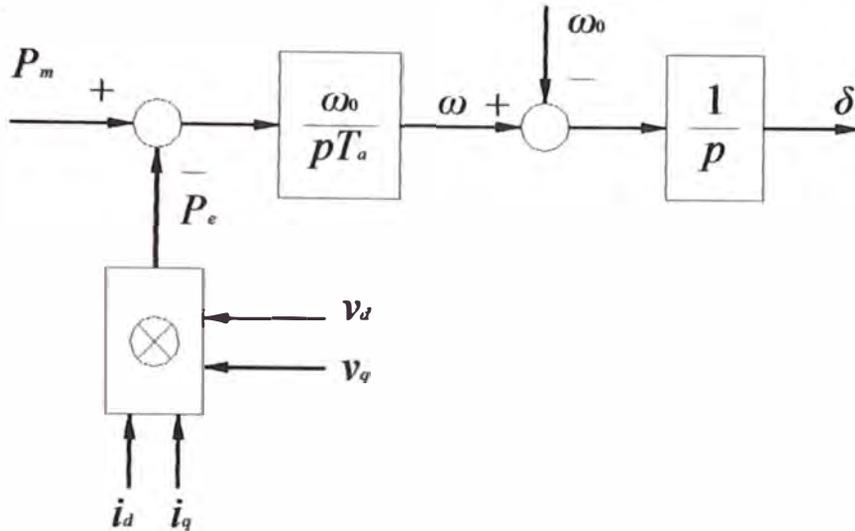


Figura 1.21
Diagrama de bloques del sistema mecánico

De donde se tiene:

$$\otimes \quad P_e = v_d i_d + v_q i_q \quad (1.164)$$

1.3 Ecuaciones del Sistema de Excitación y el Regulador de Tensión

La función básica de un sistema de excitación es proveer de corriente continua al devanado de campo de la máquina síncrona^[11]. Además de esta función este sistema desempeña funciones de protección y control esenciales para asegurar el comportamiento satisfactorio del sistema eléctrico de potencia. Así mediante el control de la tensión de campo, no solo se controla la tensión de terminales del generador sino también el factor de potencia y la magnitud de la corriente en la máquina. El regulador del sistema de potencia permite estabilizar y mejorar la respuesta dinámica del sistema, su representación en simulaciones no lineales es muy común puesto que permite observar las bondades de uno u otro método de sintonización de sus parámetros.

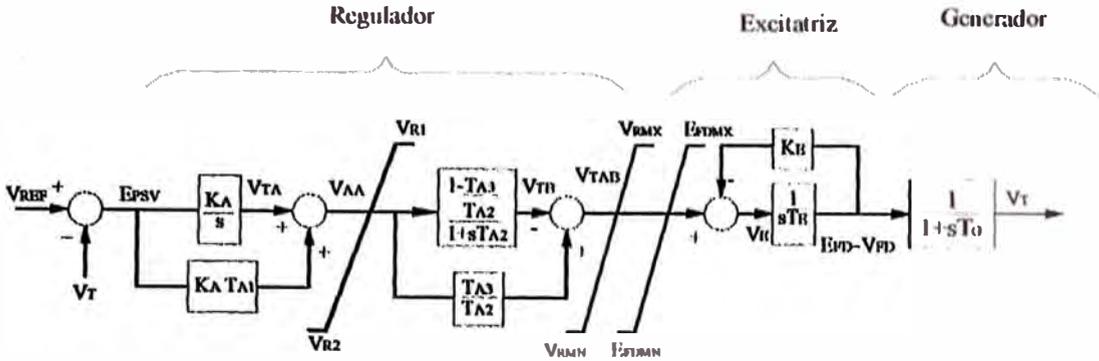


Figura 1.22
Regulador de Tensión Modelo I

El sistema de entrada es un controlador con un limitador de la tensión de salida V_{R1} (límite máximo) y V_{R2} (límite mínimo), en la siguiente etapa viene un transductor, que asimismo presenta límites máximo y mínimo (V_{RMX} y V_{RMN}), que luego son también limitados antes de su ingreso en el sistema excitatriz de la máquina. Estos límites serán despreciados en el presente estudio ya que no contribuyen a la determinación de la estabilidad, asimismo generalmente K_B debería ser una función de la saturación del material magnético de la máquina e igualmente obviaremos este caso. La salida de la tensión de campo es conectada al generador siendo esta conexión utilizada para condición de la máquina en vacío, también se desprecian efectos del ángulo sobre la tensión, el mismo modelo podrá ser usado como aproximación de primer orden para generadores con sobrecarga. Cuando conectemos a la red, veremos que el bloque de transferencia del generador será reemplazado por las ecuaciones de la máquina síncrona, y que la entrada de V_{REF}

será la tensión de terminales de la máquina V_T , de tal manera que en la red, dada una tensión V_T se dará como respuesta E_{FD} .

Luego, las ecuaciones simplificadas del regulador son:

$$\frac{dV_T}{dt} = \frac{V_{FD} - V_T}{T_G} \quad (1.165)$$

$$\frac{dV_{TA}}{dt} = K_A (V_{REF} - V_T) \quad (1.166)$$

$$\frac{dV_{TB}}{dt} = \frac{V_{AA}}{T_{A2}} \left[V_{AA} \left(1 - \frac{T_{A2}}{T_{A3}} \right) - V_{TB} \right] \quad (1.167)$$

$$\frac{dV_{FD}}{dt} = \frac{1}{T_E} (V_{TAB} - V_{FD}) \quad (1.168)$$

Con las condiciones iniciales:

$$V_T(0) = 1.0 \quad V_{FD}(0) = 1.0 \quad (1.169)$$

$$V_{TB}(0) = V_{TAB}(0) \left(1 - \frac{T_{A3}}{T_{A2}} \right) \quad (1.170)$$

$$V_{TAB}(0) = V_{FD}(0) K_E \quad (1.171)$$

$$V_{AA}(0) = V_{TAB}(0) \quad (1.172)$$

$$V_{TA}(0) = V_{AA}(0) \quad (1.173)$$

$$E_{PSV}(0) = 0 \quad (1.174)$$

Y con las ecuaciones algebraicas:

$$E_{PVS} = -V_T + V_{REF} \quad (1.175)$$

$$V_{AA} = V_{TA} + E_{PSV} K_A T_{A1} \quad (1.176)$$

$$V_{TAB} = V_{TB} + V_{AA} \frac{T_{A3}}{T_{A2}} \quad (1.177)$$

Con las ecuaciones arriba expuestas se muestra la matriz de ecuaciones diferenciales del regulador:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_T \\ \dot{V}_{TA} \\ \dot{V}_{TB} \\ \dot{V}_{FD} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_G} & 0 & 0 & \frac{1}{T_G} & 0 & 0 \\ -K_A & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_{A2}} & 0 & \frac{1 - \frac{T_{A3}}{T_{A2}}}{T_{A2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{K_E}{T_E} & 0 & \frac{1}{T_E} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_T \\ V_{TA} \\ V_{TB} \\ V_{FD} \\ V_{AA} \\ V_{TAB} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ V_{REF} K_A \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.178)$$

De todas las ecuaciones, la ecuación (1.170) es la más interesante en demostrar:

De la figura:
$$V_{TAB} = V_{TB} + V_{AA} \frac{T_{A3}}{T_{A2}} \quad (1.179)$$

También:
$$V_{TB} = V_{AA} \left(\frac{1 - \frac{T_{A3}}{T_{A2}}}{1 + sT_{A2}} \right) \quad (1.180)$$

Reemplazando en la ecuación anterior y despejando V_{AA} :

$$V_{AA} = V_{TAB} \left(\frac{1 + sT_{A2}}{1 + sT_{A3}} \right) \quad (1.181)$$

Reemplazando en (1.176):

$$V_{TB} (1 + sT_{A3}) = V_{TAB} \left(1 - \frac{T_{A3}}{T_{A2}} \right) \quad (1.182)$$

De esta ecuación, podemos asumir que $dV_{TB}(0)/dt = 0$ entonces:

$$V_{TB} (0) = V_{TAB} (0) \left(1 - \frac{T_{A3}}{T_{A2}} \right) \quad (1.183)$$

El mismo criterio se sigue para la demostración de la ecuación (1.171).

1.4 Ecuaciones del Regulador de Velocidad

Las máquinas motrices convierten la fuente de energía primaria como es la energía cinética del agua y la energía proveniente de los combustibles fósiles en energía mecánica; esta a su vez se transforma en energía eléctrica por medio de generadores síncronos. Las máquinas motrices incorporan sistemas de regulación cuya función original es mantener la velocidad constante^[11].

Tal función se ha extendido para proveer un medio de control de la potencia el cual comúnmente se conoce como carga – frecuencia o control automático de la generación.

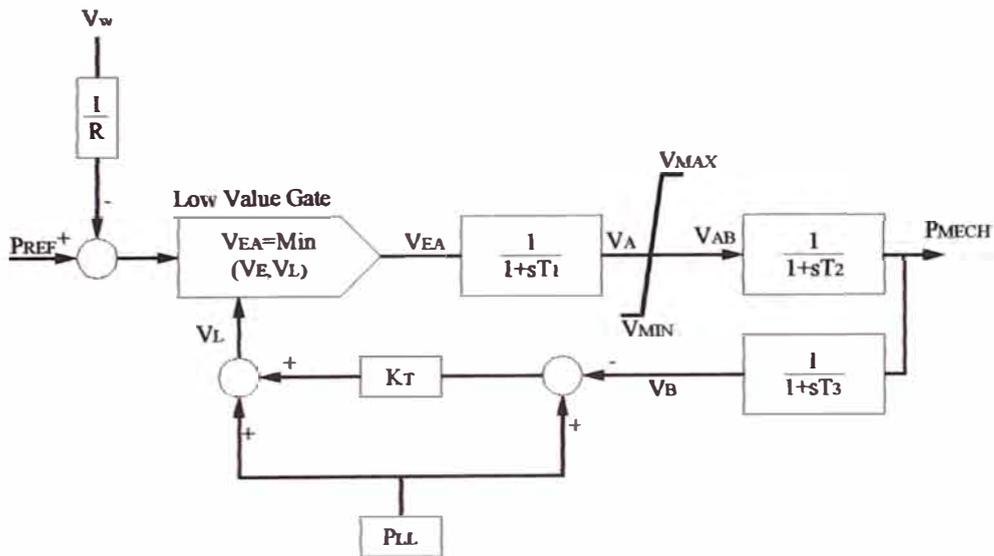


Figura 1.23
Regulador de Velocidad

Del diagrama del regulador es fácil observar que dada una señal de la velocidad angular ω se obtiene como salida la potencia mecánica de del sistema, como anteriormente se dijo la ecuación de oscilación siempre deberá ser adecuada al propósito del trabajo, por lo que de la ecuación (1.133):

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e \quad (1.184)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \quad (1.185)$$

Introduciendo la variable ω_0 dentro de la diferencial en la ecuación (1.184), y

llamando ω_{pu} al cociente se tiene:

$$2H \frac{d\omega_{pu}}{dt} = P_m - P_e \quad (1.186)$$

lo que usualmente se hace es denominar $T_M = 2H$, luego reemplazando:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{P_m - P_e}{T_M} \quad (1.187)$$

y:

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \quad (1.188)$$

donde T_M es la constante de tiempo de la máquina síncrona.

Estas ecuaciones junto con las ecuaciones del regulador de velocidad y de tensión serán las ecuaciones que nos darán el comportamiento del sistema eléctrico de potencia.

Las ecuaciones del regulador son:

$$\frac{dP_M}{dt} = \frac{V_A - P_M}{T_2} \quad (1.189)$$

$$\frac{dV_A}{dt} = -\frac{1}{RT_1} V_w - \frac{1}{T_1} V_A + \frac{1}{T_1} P_{REF} \quad (1.190)$$

$$\frac{dV_B}{dt} = \frac{P_M - V_B}{T_3} \quad (1.191)$$

con las condiciones iniciales:

$$P_M(0) = P_E(0) \quad (1.192)$$

$$V_A(0) = P_M(0) \quad (1.193)$$

$$V_E(0) = V_A(0) \quad (1.194)$$

$$V_B(0) = P_M(0) \quad (1.195)$$

$$V_w(0) = 1.0 \quad (1.196)$$

Luego la matriz de ecuaciones diferenciales será:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_w \\ \dot{P}_M \\ \dot{V}_A \\ \dot{V}_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{T_M} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_2} & \frac{1}{T_2} & 0 \\ -\frac{1}{RT_1} & 0 & -\frac{1}{T_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_3} & 0 & \frac{1}{T_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_w \\ P_M \\ V_A \\ V_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{P_{M0}}{T_M} \\ 0 \\ \frac{P_{REF}}{T_1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.197)$$

1.5 Modelamiento de Carga Dinámica

La representación de cargas dinámicas siempre ha presentado un formidable problema por su modelamiento, de acuerdo a la barra que se está analizando, la predominancia de cargas de algún tipo ha servido para clasificar de alguna manera homogeneizar las muchas clases de equipamiento eléctrico^[9].

1. Lámparas de alumbrado
2. Calentadores
3. Equipos conversores
4. Hornos de Arco
5. Máquinas de Inducción

El comportamiento de estas cargas bajo grandes caídas de tensión y oscilaciones de frecuencia, característica de los sistemas con falla, generalmente es desconocido.

Una investigación a través de los textos, indica que la representación de cargas para estudios de estabilidad transitoria⁽³⁾ puede ser de la siguiente manera:

- a. Potencia activa y reactiva constante
- b. Corriente activa y reactiva constante
- c. Impedancia ó admitancia constante
- d. Combinaciones de a. b. y c. por ejemplo 50% de potencia constante y 50% de admitancia constante
- e. Representación polinómica

$$P = k + k_1V + k_2V^2 + \dots + k_iV^i \quad (1.198)$$

- f. Relación exponencial de tensión:

$$P = P_0V^n \quad (1.199)$$

con una expresión similar para Q.

- g. Formas híbridas

Los métodos a. - d. y g. asumen que las cargas son estáticas e independientes de la frecuencia. Generalmente tienen muy poca semejanza con las características actuales de carga. Los valores utilizados se obtienen de cuadros de potencia activa y reactiva, calculados a partir de Flujo de Carga previo al disturbio. Se usan los métodos e. y f. para aproximar curvas que representen el comportamiento dinámico de las cargas. Estas representaciones excluyen los efectos de la frecuencia.

1.5.1 Modelo de Carga homogénea

La suposición básica es que la potencia activa y reactiva P y Q sean diferenciables con respecto a la tensión y la frecuencia.

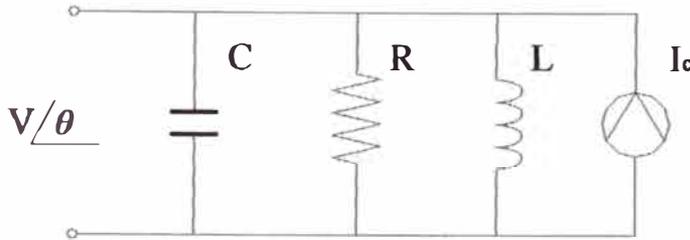


Figura 1.24
Forma híbrida

Es decir: $P = F(V, f)$ (1.200)

Aplicando el Teorema de Taylor expandido a varias variables independientes:

$$F(V+h, f+k) = F(V, f) + \left(h \frac{\partial}{\partial V} + k \frac{\partial}{\partial f} \right) F(V, f) + \frac{1}{2!} \left(h \frac{\partial}{\partial V} + k \frac{\partial}{\partial f} \right)^2 F(V, f) + \dots$$

(1.201)

Un cambio en P , ΔP , debido a un cambio de voltaje ΔV y a un cambio de frecuencia Δf resulta en:

$$\Delta P = P(V + \Delta V, f + \Delta f) - P(V, f)$$

(1.202)

Considerando cambios en V y f suficientemente pequeños que justifique despreciar todas las potencias mas allá de la primera, de la ecuación (1.201), se obtiene:

$$\Delta P = \frac{\partial P}{\partial V} \Delta V + \frac{\partial P}{\partial f} \Delta f$$

(1.203)

Consecuentemente:

$$P^{k+1} = P^k + \left. \frac{dP^k}{dV} \right|_{f=C^{ke}} \Delta V + \left. \frac{dP^k}{df} \right|_{V=C^{ke}} \Delta f$$

(1.204)

Razonando de la misma manera para Q :

$$Q^{k+1} = Q^k + \left. \frac{dQ^k}{dV} \right|_{f=Cte} \Delta V + \left. \frac{dQ^k}{df} \right|_{V=Cte} \Delta f \quad (1.205)$$

Donde k es la posición de iteración.

Una aproximación adicional puede hacerse asumiendo que dentro de ciertos límites, los coeficientes diferenciales dP/dV , dP/df , dQ/dV y dQ/df se mantienen constantes, las ecuaciones (1.204) y (1.205) pueden ser ahora expresadas como:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \cong \begin{bmatrix} \frac{dP}{dV} & \frac{dP}{df} \\ \frac{dQ}{dV} & \frac{dQ}{df} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta f \end{bmatrix} \quad (1.206)$$

La ecuación (1.206) es el Jacobiano de la tensión y frecuencia de la potencia activa y reactiva y representa el modelo básico de carga para considerarse en estudios de estabilidad transitoria.

Analíticamente se han obtenido los coeficientes diferenciales de los componentes de carga derivados de sus ecuaciones transitorias. Estas fueron evaluadas numéricamente, usando parámetros típicos de carga y en puntos de operación apropiados. Estos valores están tabulados en la Tabla 1.2

Tabla 1.2
Coeficientes diferenciales de cargas homogéneas

Carga	$\frac{dP}{dV}$	$\frac{dP}{df}$	$\frac{dQ}{dV}$	$\frac{dQ}{df}$
Lámparas Incandescentes	1.55	0.00	0.00	0.00
Lámparas de Descarga	0.00	1.63	0.00	2.75
Calentadores y resistores	2.00	0.00	0.00	0.00
Convertidores	0.00	-0.66	0.74	0.48
Hornos de Arco	1.54	0.44	0.00	0.69
Motores de Inducción	0.85	18.00	3.00	7.00

Estos coeficientes nos sugieren el uso del modelo de Carga Homogénea de acuerdo a la ecuación (1.206).

Para cambios pequeños y lentos en tensión y frecuencia, las cargas se adecuan aproximándose más de un modo de estado estable de operación y representación de un modelo simple transitorio. Durante la caída de tensión, sin embargo, la extensión a la cual los pequeños cambios del modelo, ecuación (1.156), se puede adoptar para incrementar grandes cambios enfatizando así un gran error en el resultado. Cargas de alumbrado, resistencias, hornos de arco y convertidores, exhiben básicamente una estabilidad natural no existente ó controlada en esos transitorios durante la caída de tensión. Los motores de inducción, de otro modo, producen grandes transitorios durante el cambio rápido de tensión, los cuales son gobernados por la inercia, así como efectos del torque y constantes de tiempo del rotor y estator del motor de inducción.

1.5.2 Modelos de Carga Compuesta

La representación de cargas compuestas son de más importancia ya que constituyen el total de todos los grupos de cargas homogéneas.

Habíamos visto que la ecuación (1.206) es el modelo de carga básica que consideraremos. Respecto a la carga total en cualquier punto del sistema consistente de cargas homogéneas, la carga total está dada por:

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_n \quad (1.207)$$

luego:

$$P = \sum_{i=1}^n P_i \quad Q = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (1.208)$$

diferenciando respecto a la tensión:

$$\frac{dP}{dV} = \sum_{i=1}^n \frac{dP_i}{dV} \qquad \frac{dQ}{dV} = \sum_{i=1}^n \frac{dQ_i}{dV} \qquad (1.209)$$

El componente de los modelos de carga desarrollado usa coeficientes derivados en cada base en p.u. Estas bases difieren considerablemente entre los componentes de las cargas, y por lo tanto, las Ecuaciones (1.208) y (1.209) no pueden ser usadas directamente. Un modo en torno a este problema es “normalizar” la potencia activa y reactiva alrededor de un punto de operación. Esto es, en efecto definir potencia por unidad activa y reactiva y valores nominales de tensión y frecuencia. Así, P cambia a P/P_0 y Q cambia a Q/Q_0 .

De acuerdo a estas consideraciones, extendiendo la ecuación (1.199) para incluir la frecuencia, el modelo básico de carga Compuesta cambia a:

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^A \left(\frac{f}{f_0} \right)^B \qquad Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^C \left(\frac{f}{f_0} \right)^D \qquad (1.210)$$

Derivando con respecto a la tensión:

$$\left. \frac{\partial P}{\partial V} \right|_{f=Cte.} = P_0 A \frac{V^{A-1}}{V_0^A} \frac{f^B}{f_0^B} = P_0 \frac{A}{V} \left(\frac{V}{V_0} \right)^A \left(\frac{f}{f_0} \right)^B = \frac{A}{V} P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^A \left(\frac{f}{f_0} \right)^B \qquad (1.211)$$

Sustituyendo en la ecuación (1.210):

$$\left. \frac{\partial P}{\partial V} \right|_{f=Cte.} = \frac{A}{V} P \qquad (1.212)$$

Por lo tanto:

$$A = \frac{\frac{\partial P}{\partial V}}{\frac{P}{V}} \qquad (1.213)$$

De manera similar se derivan los exponentes B , C , y D :

$$B = \frac{\partial P / \partial f}{\frac{P}{f}} \quad C = \frac{\partial Q / \partial V}{\frac{Q}{V}} \quad D = \frac{\partial Q / \partial f}{\frac{Q}{f}} \quad (1.214)$$

De la ecuación (1.208):

$$P = \sum_{i=1}^n P_i \quad (1.215)$$

$$\left. \frac{\partial P}{\partial V} \right|_{f=\text{cte.}} = \frac{\partial}{\partial V} \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n \frac{\partial P_i}{\partial V} \quad (1.216)$$

$$\frac{\partial P / \partial V}{\frac{P}{V}} = \frac{V}{P} \sum_{i=1}^n \frac{\partial P_i}{\partial V} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial P_i}{\partial V} \right) \frac{V}{P} \quad (1.217)$$

Pero:

$$P_i = N_i P \quad (1.218)$$

$$\frac{\partial P / \partial V}{\frac{P}{V}} = \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\partial P_i}{\partial V} \right) V \frac{N_i}{P_i} \right] \quad (1.219)$$

$$= \sum_{i=1}^n N_i \left(\frac{\partial P_i / \partial V}{\frac{P_i}{V}} \right) \quad (1.220)$$

Luego:

$$\boxed{A = \sum_{i=1}^n N_i A_i} \quad (1.221)$$

Donde N_i es la composición relativa de la i -ésima carga homogénea, los exponentes B , C y D pueden ser derivados de manera similar.

La siguiente tabla fue hecha sobre la base de una clasificación establecida para la representación de los cuatro tipos de carga: Residencial, Comercial Industrial y Agrícola, pudiendo el usuario variar de acuerdo a la existencia porcentual dada en la barra en estudio.

Tabla 1.3
Porcentaje de Composición de cargas compuestas

Componente	Porcentaje de Composición(%)			
	Residencial	Comercial	Industrial	Agrícola
Lámparas incandescentes	15	10	5	12
Lámparas de Descarga	10	30	5	20
Calentadores	70	35	10	50
Convertidores	0	0	10	0
Hornos de Arco	0	5	10	3
Motores de Inducción	5	20	60	3
TOTAL (%):	100	100	100	100

De acuerdo a la ecuación (1.171), la Tabla 1.5 es el producto de las Tablas 1.3 y 1.4, siendo estas dos últimas los exponentes para cargas homogéneas y compuestas respectivamente.

Tabla 1.4
Exponentes de cargas homogéneas

Carga	A	B	C	D
Lámparas Incandescentes	1.55	0.00	0.00	0.00
Lámparas de Descarga	0.00	1.39	0.00	5.53
Calentadores y Resistores	2.00	0.00	0.00	0.00
Convertidores	0.00	-1.89	1.54	1.00
Hornos de Arco	1.43	0.40	0.00	1.00
Motores de Inducción	1.65	34.92	8.68	20.24

Tabla 1.5
Exponentes de Cargas Compuestas

Cargas Compuestas	Coeficientes			
	A	B	C	D
Residencial	1.72	1.93	0.43	1.57
Comercial	1.26	7.57	1.74	5.76
Industrial	1.41	20.90	5.26	12.62
Agrícola	1.43	5.56	1.35	4.17

Se ha estudiado el comportamiento eléctrico de cargas compuestas de un sistema de potencia examinando las respuestas de las representaciones exactas de los componentes de carga a cambios típicos de tensión y frecuencia en un sistema con falla. De esto, fueron determinados los parámetros transitorios de un modelo de carga muy simple para los componentes de carga, fue posible establecer los exponentes de los parámetros para cargas compuestas, una vez conocida la composición relativa de las cargas.

CAPÍTULO II

REPRESENTACIÓN COMPUTACIONAL DE LOS COMPONENTES DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA

2.1 Introducción

En el transcurso de estos 10 últimos años el impacto del desarrollo de sistemas de computo ha sido enorme en todos los campos en lo que se refiere al análisis de Sistemas de potencia ha sido un gran impulso, debido al empleo de nuevo software de características más amigables y comprensible, es así que se introdujo en nuestro medio el Lenguaje de programación MatLab (Matrix Laboratory Laboratorio Matricial) el desarrollo de este software es conveniente por la facilidad en la presentación gráfica, y en la aplicación del análisis de estabilidad transitoria muy importante pues nos permite ver al instante y mediante de solo una sola línea de instrucción las gráficas y tendencias de las curvas de oscilación de un sistema.

En esta forma todas las ecuaciones de la máquina serán puestas en este entorno de programación.

2.2 Solución al Flujo de Potencia

En los sistemas de Potencia es necesario la inclusión del estudio de flujo de la carga por medio de un programa que permita visualizar los valores iniciales de tensión y ángulos en las barras del sistema. En nuestro caso se hará por medio del

método de Newton – Raphson en coordenadas polares, cuyo programa fuente se encuentra en el Anexo 2.1, denominado *NEWTON.m*.

El programa ha sido desarrollado teniendo en cuenta que no debe circunscribirse a un problema en particular sino que debe ser lo más general posible.

En nuestro caso este ha sido diseñado para trabajar bajo las siguientes condiciones:

- a) Trabaja para cualquier número de barras, restringiéndose tal vez por la memoria de la computadora ó la capacidad del Programa Matlab para manejar cierto número de variables.
- b) Está restringido a solo tres tipos de barra P-V, P-Q y la barra de compensación
- c) Trabaja hasta 150 iteraciones pudiendo cambiarse fácilmente:

El presente programa se ha realizado lo más independiente de la topología de la red, esto significa que puede trabajar con cualquier circuito sin importar en número de barras que pueda tener ni las condiciones iniciales del sistema.

En la Figura adjunta se presenta un diagrama de flujo simplificado para entender el modo en que trabaja el programa.

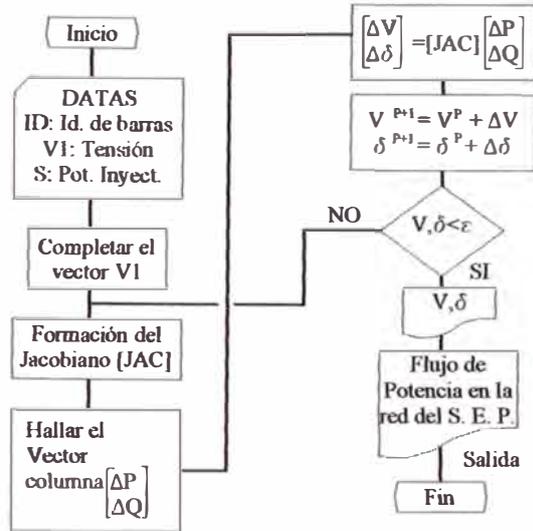


Figura 2.1
Flujo del programa Newton Raphson

Se ha tratado de este modo emular a los programas profesionales que independizando las entradas de datos, el programa puede ser mas general y aplicarse a una gran variedad de casos.

2.3 Máquina Síncrona

La máquina síncrona que se empleará será la máquina de III Orden y cuyas ecuaciones principales se han visto en el capítulo anterior, en la que se dedujo que la máquina síncrona de III orden posee solo una ecuación diferencial, que es la denominada ecuación de enlace estator – rotor, esta ecuación esta dada por:

$$\frac{dE'_q}{dt} = \frac{E_{fd} - E_i}{T'_{d0}} \quad (2.1)$$

La cual puede ser deducida de las ecuaciones de la máquina síncrona descrita en el Capítulo I por medio de las ecuaciones (1.102) a (1.107).

A estas ecuaciones se aplicarán las siguientes restricciones:

- Si se desprecia la f.e.m de transformación $p\psi_d/\omega_0$, $p\psi_q/\omega_0$, y el efecto de deslizamiento ω/ω_0 , sobre la f.e.m. de movimiento, es decir:

$$-\frac{\omega}{\omega_0}\psi_q = -\psi_q; \quad \frac{\omega}{\omega_0} = \psi_d \quad (2.2)$$

- Si se desprecia la resistencia de armadura
- Y por último, si se eliminan los devanados de amortiguación en el eje directo y en el de cuadratura, tendremos una máquina síncrona de III orden

Ecuaciones del eje directo:

$$v_d = -\psi_q \quad (2.3)$$

$$v_f = r_f i_f + \frac{1}{\omega_0} p\psi_f \quad (2.4)$$

Ecuación del eje en cuadratura:

$$v_q = \psi_d \quad (2.5)$$

Ecuaciones algebraicas del eje directo:

$$\psi_d = -x_d i_d + x_{md} i_f \quad (2.6)$$

$$\psi_f = -x_{md} i_d + x_f i_f \quad (2.7)$$

Ecuaciones algebraicas del eje en cuadratura:

$$\psi_q = -x_q i_q \quad (2.8)$$

Ahora demostraremos la ecuación (2.1):

De la ecuación (2.4):

$$\frac{d\psi_f}{dt} = \omega v_f - r_f i_f \quad (2.9)$$

De la ecuación (2.6) despejamos i_f y reemplazándola en la ecuación (2.7):

$$x_{md}\psi_f = x_f\psi_d + x_f i_d \left(x_d - \frac{x_{md}^2}{x_f} \right) \quad (2.10)$$

Definiendo:

$$x'_d = x_d - \frac{x_{md}^2}{x_f} \quad (2.11)$$

Reemplazando y reduciendo queda:

$$\frac{x_{md}\psi_f}{x_f} = \psi_d + x'_d i_d \quad (2.12)$$

Definiendo:

$$e'_q = \frac{x_{md}\psi_f}{x_f} \quad (2.13)$$

reemplazando en la ecuación (2.9):

$$\frac{de'_q}{dt} = \frac{\omega r_f}{x_f} \left(\frac{x_{md}v_f}{r_f} - x_{md}i_f \right) \quad (2.14)$$

Ahora definiremos las siguientes igualdades:

$$e_{fd} = \frac{x_{md}v_f}{r_f} \quad (2.15)$$

$$e_i = x_{md}i_f \quad (2.16)$$

Y también:

$$T'_{d0} = \frac{x_f}{\omega r_f} \quad (2.17)$$

reemplazando estas tres últimas ecuaciones en la ecuación (2.14), tenemos:

$$\frac{de'_q}{dt} = \frac{e_{fd} - e_i}{T'_{d0}} \quad (2.18)$$

De valores instantáneos a valores p.u.:

$$\frac{dE'_q}{dt} = \frac{E_{fd} - E_i}{T'_{d0}} \quad (2.19)$$

De las ecuaciones (2.15) y (2.16) se observa que en estado estable se cumple que:

$v_f = r_f i_f$ luego la ecuación (2.18) es nula, para el estado transitorio esta igualdad no se cumple por lo que la ecuación (2.18) y (2.19) se llama ecuación diferencial de acoplamiento magnético de la máquina síncrona.

También es posible obtener el diagrama fasorial de la máquina del cual se puede apreciar lo siguiente:

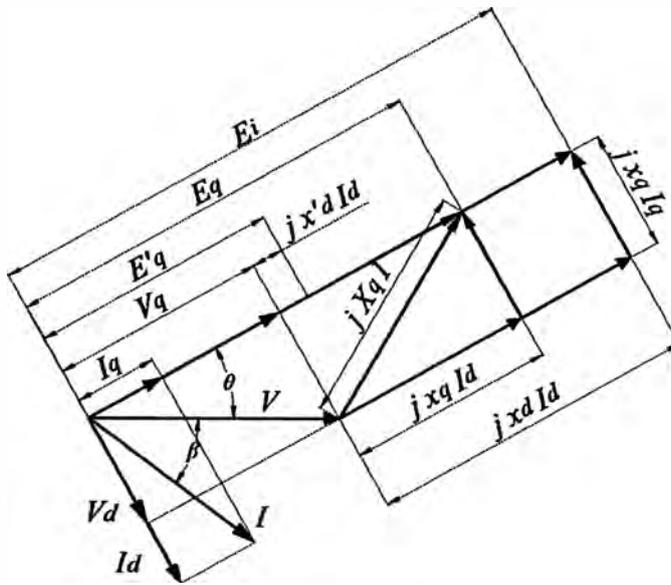


Figura 2.2
Diagrama fasorial de la máquina síncrona

De este diagrama se observa que se cumple que:

$$E_q = V + jx_q I \quad (2.20)$$

Esta ecuación de la máquina síncrona; que es independiente del orden de que se trate, puede representar de una manera más conveniente la aplicación a un programa de estabilidad debido a su simpleza, y evitar el complicamiento de la matriz de admitancias y seguir el mismo procedimiento en ese sentido como si se tratara de una máquina de primer orden, expandiendo de este modo la matriz del sistema Y_{barra} y aplicar a ésta los incidentes o fallas que han ocurrido.

Luego esta será la representación final de la máquina síncrona y que estará así representada en el programa Matlab que será presentado más adelante.

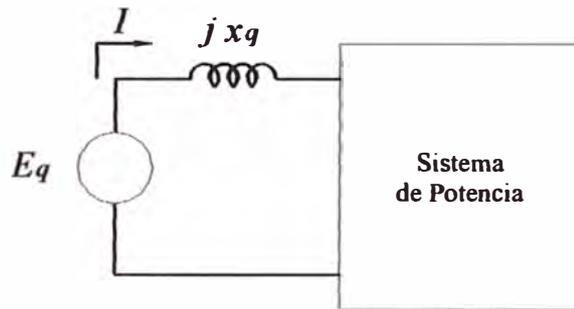


Figura 2.3
Representación de la máquina síncrona

Una de las simplificaciones más importantes que podemos obtener de este modelo es la potencia eléctrica debido a que esta transformación nos lleva a la Figura 1.3, de la cual esta potencia puede ser fácilmente calculable desde cada barra de generación en función de la admitancia de barras expandida, se tiene:

$$P = \sum_{n=1}^N |Y_m V_i V_n| \cos \theta_m + \delta_n - \delta_i \quad (2.21)$$

donde la matriz Y será puesta de acuerdo a la ocurrencia del evento, es decir, en falla ó después de la falla.

2.4 Sistema de excitación y el Regulador de Tensión

Esta representación en un programa Matlab se realiza planteando las ecuaciones diferenciales obtenidas en el capítulo I (1.3).

En esta fase se realiza una prueba con un escalón de prueba de 0.5 p.u. aplicado a la entrada referencial del regulador e interpretar las salidas de sus variables de estado, como este regulador opera con señales digitales todas las señales dadas en el programa serán interpretadas como variables en p.u.

En el Anexo 2.2 se adjunta el programa fuente de este regulador denominado *RT.m*.

En el punto 5 de dicho programa, se utiliza la función FUN que la que realmente multiplica las matrices, en Matlab a esto se le denomina programa script o subprograma del principal.

Es obvio que las ecuaciones diferenciales de los reguladores ya han sido apropiadamente formuladas para trabajar con este tipo de matrices, teniendo el cuidado de expresarlos como la operación matricial de la forma:

$$\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{C} \begin{bmatrix} \mathbf{y} \\ \mathbf{z} \end{bmatrix} + \mathbf{F} \quad (2.22)$$

En el regulador de velocidad esta ecuación es la misma pero con la variante de tener $\mathbf{z} = 0$.

En el punto 2 del programa *RT.m* del regulador de tensión, en la última línea podemos apreciar la inyección de un escalón de 0.5 p.u. como señal perturbadora, luego podemos obtener las respuestas de las variables de estado de dicho regulador.

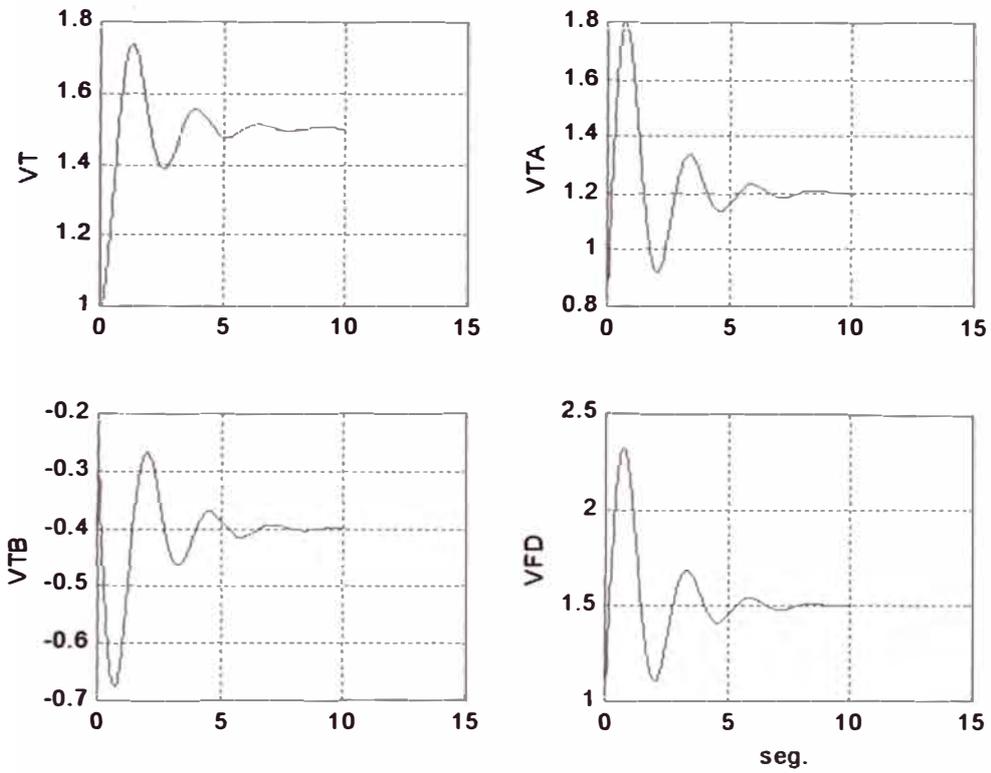


Figura 2.4
Respuesta a un escalón de 0.5 p.u. $RT.m$

En este tipo de programas es importante tener el control de los mismos y tener un respaldo de la manera como se ha armado el programa por lo que es necesario hacer una prueba de entrada nula, resultado todas las salidas como líneas horizontales constantes, lógicamente, si no existe una perturbación la respuesta deberá ser una constante ó línea recta.

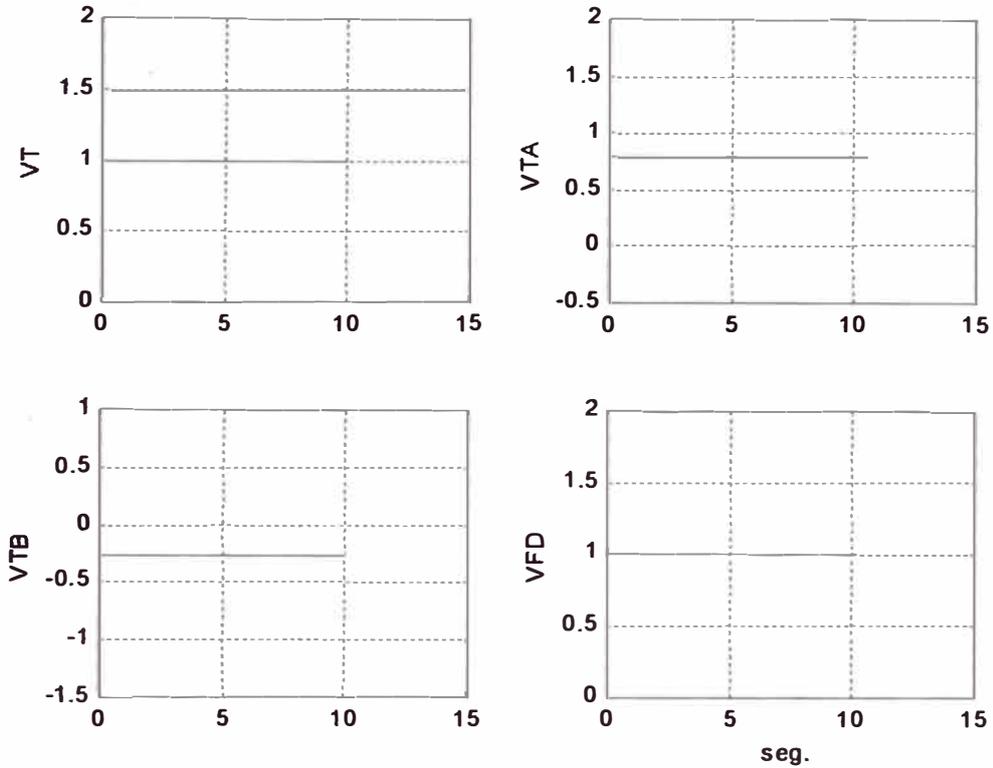


Figura 2.5
Prueba con perturbación nula

2.5 Sistema de Regulación de Velocidad

De manera similar al regulador de tensión la configuración del regulador de velocidad se basa en las ecuaciones diferenciales obtenidas en el capítulo anterior.

Asimismo, en este caso, se aplica una perturbación de 0.5 p.u. esperando que éste pueda regular su salida, cuyo programa fuente se encuentra en el Anexo 2.3 llamado *RV.m*.

Es necesario decir que en este caos hay un particular detalle respecto a la variable V_w , esta es la velocidad angular en p.u. luego:

$$V_w = \frac{\omega}{\omega_0} \tag{2.23}$$

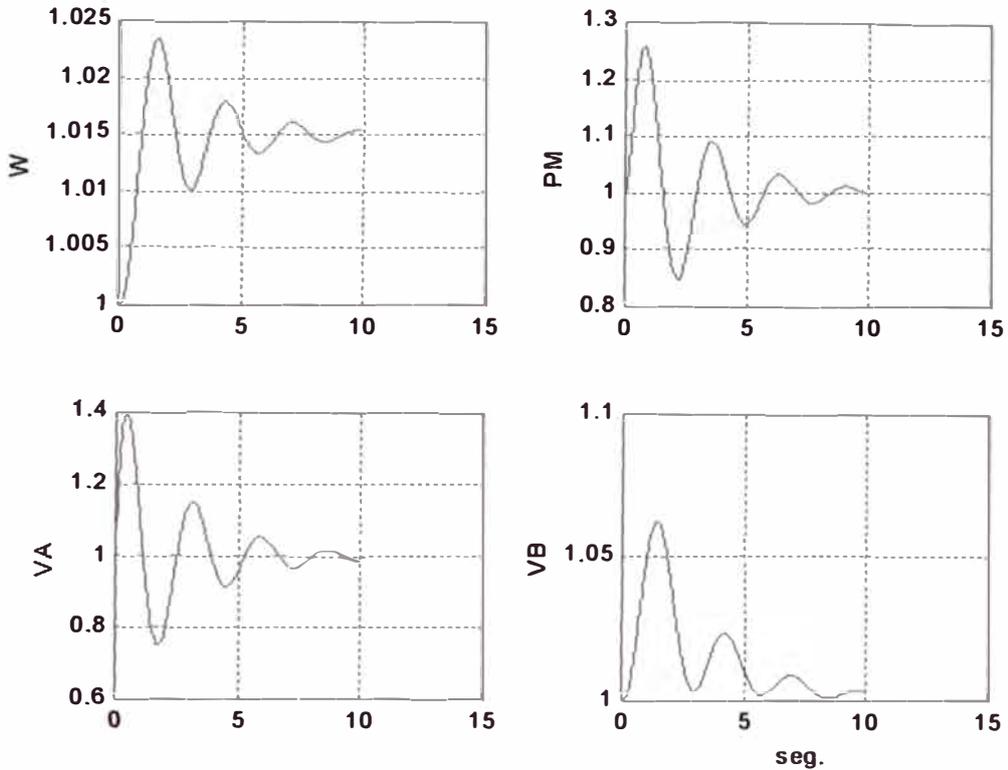


Figura 2.6
Respuesta a un escalón de 0.5 p.u. *RV.m*

Asimismo, este programa debe tener su prueba de entrada nula, para lo cual eliminamos la perturbación de entrada.

Es importante recalcar que esta respuesta no tiene significación física, solo se trata de una comprobación de la estructura del programa y asegurar su correcto funcionamiento, esto es debido a que para entradas invariables, la salida también es invariable ó constante. Cuando se formule el programa completo se necesitara también correr un programa con entradas nulas a fin de saber si nuestro programa esta yendo en la dirección correcta, cabe señalar que existe una prueba adicional pero es aplicable solo a los programas de estabilidad transitoria y será explicado más adelante.

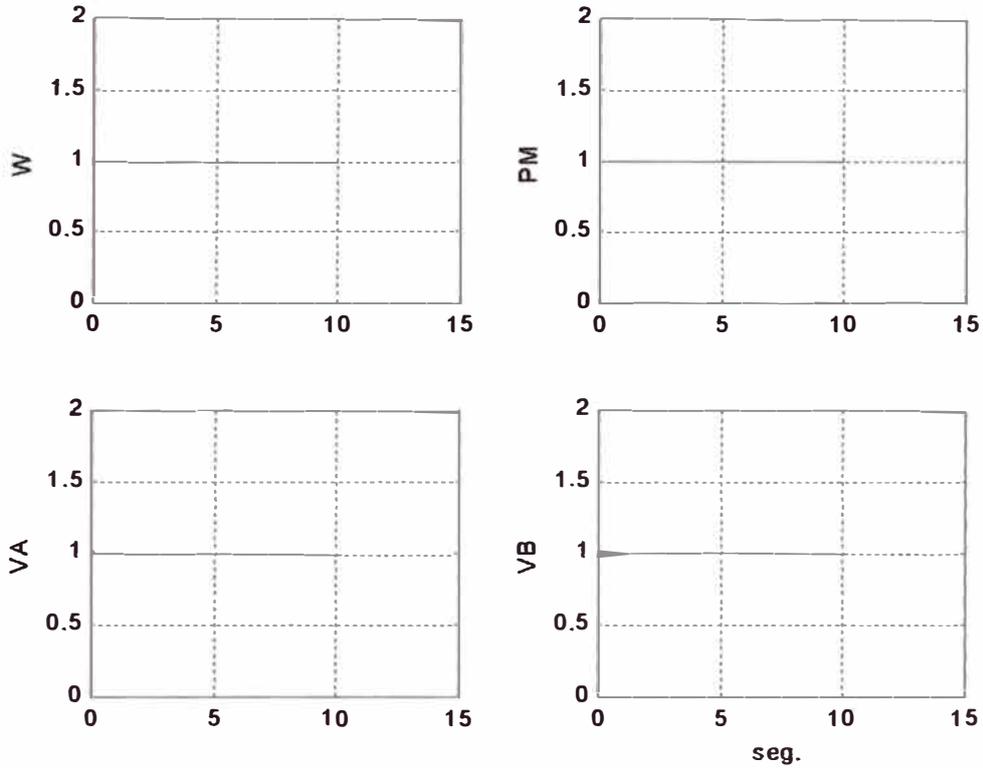


Figura 2.7
Respuesta a una perturbación nula

2.6 Modelamiento de las Cargas Dinámicas

Habíamos visto en el Capítulo I la Ecuación (1.210) que expresa la relación entre potencia activa y reactiva, tensión y frecuencia.

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^A \left(\frac{f}{f_0} \right)^B \quad (2.24)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^C \left(\frac{f}{f_0} \right)^D \quad (2.25)$$

que fue despejada del modelo incremental a través de un Jacobiano de diferenciales de la Potencia activa y Reactiva con respecto a la tensión y frecuencia.

Como resultado se tienen las expresiones de las ecuaciones (2.24) y (2.25), a través de ellas se podrá calcular la potencia activa y reactiva de la barra de carga de acuerdo a los valores de tensión y frecuencia de la barra respectiva.

En el Capítulo 1 en la Ecuación (1.12) pudimos expresar la tensión en la barra de carga en función de la tensión de generación aplicada:

$$V_B = -Y_4^{-1} Y_3 V_G \quad (2.26)$$

En nuestro caso cuando culmine el programa de flujo inicial se obtendrán los valores de potencia en cada barra, luego de lo cual se podrán calcular los valores P_0 y Q_0 de las barras con cargas dinámicas, junto con los valores de tensión y frecuencia iniciales, y asociar a esta potencia una admitancia equivalente en la barra de carga, luego de hacer lo mismo en las demás barras dinámicas, se podrá hallar la nueva matriz Y_0 de admitancia con falla para el nuevo intervalo, y seguir así hasta que el tiempo cambie al momento en que la admitancia del sistema sea, según la secuencia de eventos, Y_0 , la matriz de admitancias superada la falla.

Estos valores serán distintos que los valores sin cargas dinámicas pues en este caso la corriente I del sistema será el parámetro equilibrante, para el siguiente intervalo, en el cálculo de la potencia activa de las barras generadoras.

También es importante señalar que la frecuencia del sistema se tomará como valor promedio y aplicarlo así en las ecuaciones (2.24) y (2.25), donde se definirá:

$$f_{pu} = \omega_{pu} = \frac{\omega_1 + \omega_2 + \omega_3}{3} \quad (2.27)$$

Esta será la ecuación que se utilizará para configurar la frecuencia en cada intervalo de las cargas dinámicas.

CAPÍTULO III

FLUJO DE POTENCIA INICIAL EN EL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA

3.1 Introducción

En este capítulo se inicializarán todos los datos para la aplicación de los principios de estabilidad transitoria que se han visto hasta ahora, empezando por plantear un sistema eléctrico de potencia dado en el cual se definirán diversos incidentes, ya sea de falla ó pruebas de funcionamiento del programa principal.

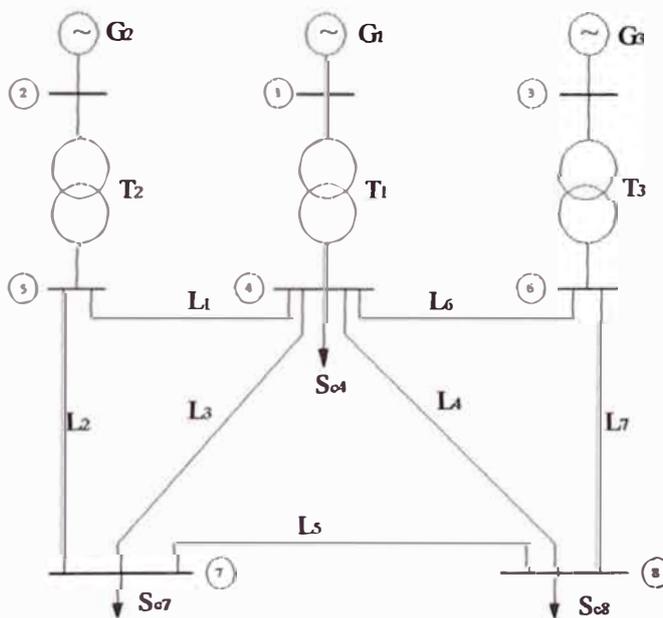


Figura 3.1
Sistema eléctrico de potencia aplicativo

En este sistema se han considerado líneas largas y cortas, así como transformadores que serán representados solo con su impedancia de cortocircuito, despreciándose el efecto de los taps, ya que para este nivel potencia, estos son reemplazados por

reguladores de tensión que regulan la tensión de acuerdo a la variación de carga que pueda presentarse, el efecto de estos reguladores también se desprecia; así como la saturación del transformador. Dependiendo del grado de sofisticación o del objetivo deseado, es en algunos casos representada la curva de saturación con cantidades discretas dentro de una matriz de datos.

En los estudios de estabilidad no son representados la mayoría de los elementos de protección, tales como pararrayos y sistemas auxiliares, solo se tomarán en cuenta la presencia de los reclosers; comandados por relés direccionales o relés de distancia, o relés de frecuencia; actúan de acuerdo al seteo correspondiente aperturan la línea con falla durante un período de tiempo para permitir la extinción del arco repitiendo esta operación durante un determinado número de veces hasta abrir y rechazar la carga asociada en forma permanente.

3.2 Datos del Sistema de Potencia

De acuerdo al lenguaje de programación utilizado, la entrada de datos es el evento inicial del programa, en Matlab la entrada de datos es sencilla realizada por medio del subprograma ó script DATA, cuyo programa fuente está en el Anexo 3.1. y cuyo cuadro de datos será desarrollado aquí.

Solo es necesario recordar que se debe tener un cierto cuidado en nombrar las variables, y evitar que dos variables se indiquen con el mismo termino literal, Matlab no detecta este error y trabaja con el último o más reciente dato introducido.

3.2.1 Datos Generales

Se muestra a continuación los datos básicos del sistema de potencia.

Tabla 3.1
Datos generales

Tensión Base (V_B)	230 kV
Potencia Base (S_B)	500 MVA
Impedancia Base (Z_B)	105.8 Ω
Frecuencia Base (f)	60 Hz
Velocidad Angular Base (ω_0)	376.99 rad/s
Tolerancia (t_0)	1×10^{-7}
Tiempo de Análisis (T)	10 s
Tiempo de Falla (t_f)	0.25 s
Tiempo de recuperación (t_r)	0.30 s
Paso de Integración (h)	0.01

3.2.2 Datos de los Componentes del Sistema de Potencia

Tabla 3.2
Datos de las líneas

Líneas	Longitud (km)	Resistencia (Ω)	Inductancia (H/km)	Capacitancia (F/km)
$L_1 = L_6$	500	0.127	1.25×10^{-3}	1.1×10^{-11}
$L_2 = L_7$	100	0.131	1.18×10^{-3}	0.8×10^{-11}
$L_3 = L_4 = L_5$	60	1.145	1.11×10^{-3}	---

Tabla 3.3
Datos de los Transformadores

Trafo	Potencia (MVA)	Relación de Transformación (kV)	Reactancia de CC en porcentaje (%)
1	500	60/230	15
2	400	60/230	15
3	300	60/230	12

Asimismo, se necesitan datos del sistema para el inicio del Programa de Flujo de Potencia por el método de Newton - Raphson en coordenadas polares.

Tabla 3.4
Datos para el flujo de Potencia

Barra	Tipo de Barra	Tensión (kV)	Generación		Carga	
			P(MW)	Q(MVAR)	P(MW)	Q(MVAR)
1	COMP	264.5	320	240	----	----
2	PQ	0	240	180	----	----
3	PQ	0	----	----	450	----
4	PV	241.5	----	----	----	----
5	PQ	0	----	----	----	----
6	PQ	0	----	----	----	----
7	PQ	0	----	----	225	75
8	PQ	0	----	----	150	55

Todos estos valores se traducen en los vectores ID , V y S para el cálculo inicial del Flujo de Potencia.

Tabla 3.5
Máquinas Síncronas

Máquina	Tipo	Potencia Nominal (MVA)	H_m	x_d	x_q	x'_d	x'_q
1	Vapor	500	6.9	1.25	1.16	0.23	2.10
2	Vapor	400	7.4	1.23	1.15	0.25	2.15
3	Vapor	300	8.5	1.20	1.14	0.26	2.20

Tabla 3.6
Parámetros de la Carga Dinámica

Barra	Tipo	A	B	C	D
7	Comercial	1.72	1.93	0.43	1.57
8	Residencial	1.26	7.57	1.74	5.76

3.3 Datos de los Controladores del Sistema

Tabla 3.7
Datos del Regulador de Tensión

Central	K_A	T_{A1}	T_{A2}	T_{A3}	K_E	T_E	T_G
1	4.7	1	0.75	1	0.8	1	1
2	4.5	1.05	0.77	1	0.85	1.04	1.2
3	4.6	1	0.8	1	0.75	1.05	1.1

Tabla 3.8
Datos del Regulador de Velocidad

Central	T_1	T_2	T_3	R
1	0.1	0.01	3	0.05
2	0.1	0.01	3	0.05
3	0.1	0.01	3	0.05

3.4 Ejecución del programa de Flujo de Potencia Inicial

Ahora con los datos iniciales se puede correr el programa *NEWTON.m* y obtener el flujo inicial del sistema de potencia.

A continuación se imprimen los resultados dados por Matlab y se grafican los valores de potencia activa y reactiva en la Figura 3.2.

Resultados del programa *NEWTON.m*.

```
»  
p =  
    55  
Barra =    1  
Tensión = 1.150000  
Ángulo = 0.000000 °  
  
Barra =    2  
Tensión = 1.294280  
Ángulo = 8.543435 °  
  
Barra =    3  
Tensión = 1.251585  
Ángulo = 6.064394 °
```

Barra = 4
Tensión = 1.050000
Ángulo = -4.233804 °

Barra = 5
Tensión = 1.228248
Ángulo = 4.214280 °

Barra = 6
Tensión = 1.196519
Ángulo = 2.388934 °

Barra = 7
Tensión = 1.071053
Ángulo = -3.805646 °

Barra = 8
Tensión = 1.072190
Ángulo = -3.705243 °

S14	=	0.5943	+	0.78863i
S41	=	-0.5943	-	0.67803i
S25	=	0.64	+	0.48i
S52	=	-0.64	-	0.40837i
S36	=	0.48	+	0.36i
S63	=	-0.48	-	0.31404i
S45	=	-0.098853	-	0.051237i
S54	=	0.10559	+	0.075967i
S46	=	-0.077068	-	0.044668i
S64	=	0.081382	+	0.060396i
S47	=	-0.060393	-	0.072091i
S74	=	0.061052	+	0.073995i
S48	=	-0.069383	-	0.073936i
S84	=	0.070149	+	0.076149i
S57	=	0.53441	+	0.3324i
S75	=	-0.5019	-	0.22204i
S68	=	0.39862	+	0.25364i
S86	=	-0.37931	-	0.18812i
S78	=	-0.0091559	-	0.0019508i
S87	=	0.0091621	+	0.0019689i

S1	=	0.5943	+	0.78863i
S2	=	0.64	+	0.48i
S3	=	0.48	+	0.36i
S4	=	-0.9	-	0.91996i
S5	=	3.9668e-007	-	4.1873e-008i
S6	=	2.7309e-007	-	2.3288e-008i
S7	=	-0.45	-	0.15i
S8	=	-0.3	-	0.11i

»

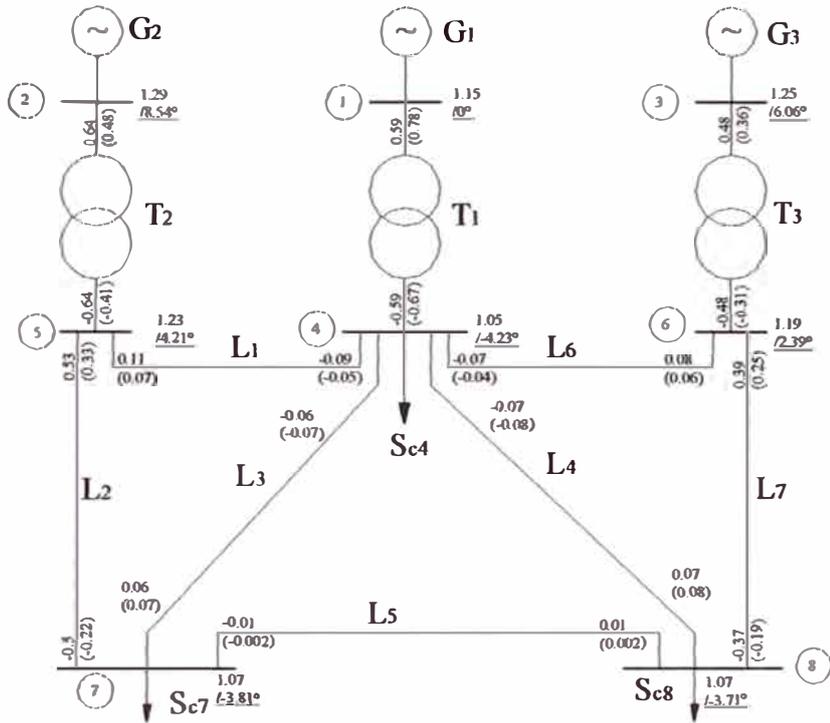


Figura 3.2
Flujos de Potencia P, (Q) en p.u.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD TRANSITORIA EN UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE OCHO BARRAS

4.1 Introducción

La definición de la estabilidad transitoria en un sistema de potencia puede ser definida según el criterio dado por la IEEE^[14] y que puede ser aplicado según el resultado obtenido después de aplicar una perturbación al sistema^[4].

Si después de aplicar una pequeña perturbación, como el aumento de ganancia de un regulador automático de voltaje de una central, el sistema recobra aparentemente su estabilidad con una condición igual o cercana a la que tenía inicialmente, se dice que la estabilidad de dicho sistema es de estado estable.

Si después de aplicar una gran perturbación, como la ocurrencia de una falla en la red, el sistema recobra su estabilidad de manera aceptable pero con variables de estado diferentes a las que tenía inicialmente, se dice que la estabilidad de dicho sistema es transitoria.

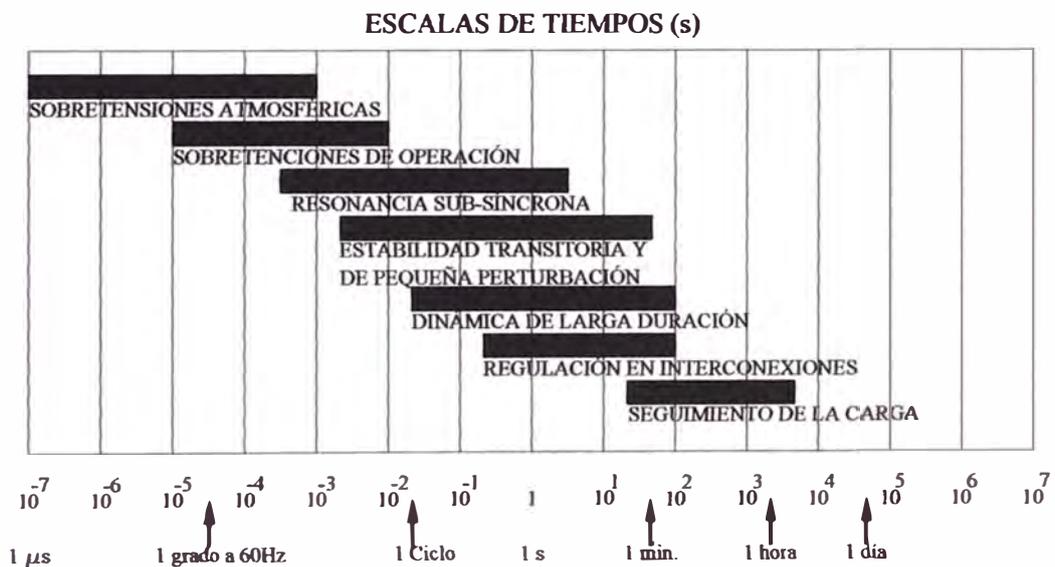
Pero en un sistema que está trabajando en forma “normal” las cargas conectadas a él varían en forma aleatoria, mientras en una barra la potencia sube 2% en otra parte del sistema baja 5%, ó por razones estacionales (invierno por ejemplo) el uso de artefactos de una clase hace que el diagrama de carga diario pueda, en un rango del día, tener una subida apreciable. Bajo esta premisa, el estudio de la estabilidad de las máquinas sincronas bajo la condición de pequeños cambios de carga a sido llamado

estabilidad de estado estable^[2], sin embargo, un nombre más apropiado es estabilidad dinámica, ya que ese es mas propiamente el estado del sistema.

En el pasado se hicieron por razones de tratamiento matemático, simplificaciones y suposiciones; la separación de ambos conceptos pero ahora, esto ya carece de justificación.

Pero subsisten aún diversas formas de clasificar la estabilidad, en la Figura 4.1 se muestran fenómenos involucrados según una escala de tiempos de ocurrencia.

Hay además otras clasificaciones según la magnitud de la perturbación; de gran perturbación (estabilidad transitoria) y de pequeña perturbación, según la forma de producirse la estabilidad; monotónica y oscilatoria, y según las dinámicas involucradas; de corta duración y de larga duración.



Existe asimismo, definiciones más de acuerdo a lo dicho anteriormente dadas en base a la estabilidad de la tensión y el ángulo. La estabilidad de la tensión es frecuentemente denominada como estabilidad de la carga, la característica de carga y

su dinámica indican la dependencia entre la carga y la tensión y por lo tanto ambos términos ligados a la estabilidad de la tensión.

La capacidad del sistema para mantener el sincronismo en máquinas interconectadas es definida como estabilidad angular. Pequeños disturbios ó estabilidad de pequeña señal resultan en oscilaciones electromecánicas no amortiguadas debidas a un insuficiente torque amortiguante, mientras que grandes disturbios ó estabilidad transitoria puede conducir a la pérdida del torque sincronizante.

La escala del marco temporal para la estabilidad angular es denominada de corta duración y es aproximadamente de pocos segundos.

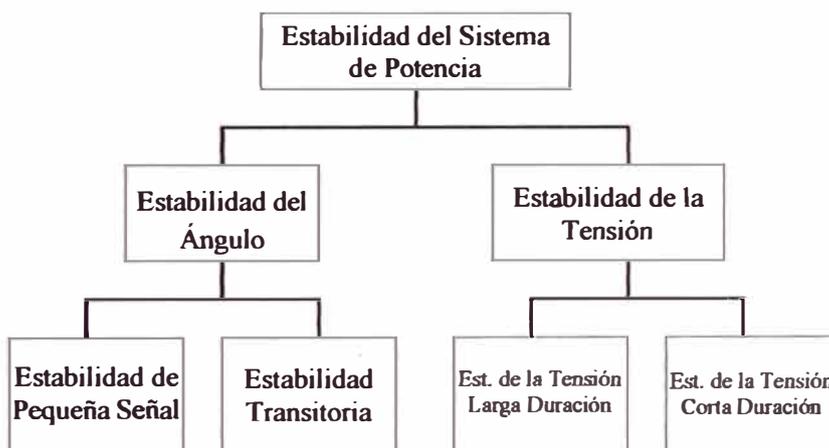


Figura 4.2

Clasificación de la estabilidad Dinámica de los Sistemas de Potencia

En este capítulo se verá la aplicación del programa de estabilidad transitoria a un sistema eléctrico de potencia dado y se apreciarán sus gráficas de salida en el dominio del tiempo, conjuntamente con la actuación de los controladores de tensión y velocidad sobre el sistema eléctrico de potencia.

4.2 Análisis de la Respuesta Natural del Sistema

Cuando ocurre un incidente, para un sistema no protegido es muy posible la pérdida completa de la estabilidad debido a la falta del control sobre los parámetros básicos de la máquina dependiendo de la naturaleza del incidente, de su localización física y del tiempo de ocurrencia de la falla el sistema está en un gran riesgo de perder su estabilidad, se estudiarán dos casos para observar el comportamiento del sistema frente al modelo de cargas elegido, ya sea del tipo impedancia constante ó del modelo dinámico.

4.2.1 Definición de un Incidente en un Sistema Eléctrico de Potencia

Toda falla ó incidente en el sistema eléctrico de potencia tiene asociado un evento inicial, puede ser natural como la falla de una línea causada por un rayo ó el mal funcionamiento de los dispositivos y componentes de protección, que pueden causar el disparo simultaneo de varias líneas ó unidades, ó el aislamiento de una parte del sistema eléctrico de potencia sin que haya existido ninguna falla real.

Al igual que lo anterior las fallas de origen humano tienen la misma gravedad dado que ni el sistema ni sus dispositivos de protección consideran en su diseño este tipo de fallas, el resultado puede ser muy severo.

Existen grados de severidad en las fallas^[4], que indican que la falla mas severa es la falla trifásica y es este tipo de falla, que siendo más simple su análisis circuital obliga a seleccionarla en estudios de estabilidad transitoria y como veremos en siguiente capítulo considerarla en diversos puntos de la red.

En este caso a fin de hacer lo mas simple la comprensión de nuestro objetivo, supondremos un incidente dado y de acuerdo a él, se analizará la respuesta del

sistema y la actuación de los controladores de tensión y velocidad, tanto cuando se suponga que la red está representada con cargas de modelo de impedancia constante ó cuando se represente con modelo de carga dinámica.

Sea el siguiente incidente, que se produce en el sistema eléctrico de potencia dado, y que se describe en la siguiente Tabla.

Tabla 4.1
Incidente 1

Fecha y Hora del Incidente	-----
Área involucrada	Línea 5 y barra 8
Indicaciones previas	Estado normal
Evento Inicial	Cortocircuito trifásico a tierra en la línea 5 muy cerca de la barra 8
Consecuencias	Duración de la falla 0.25 segundos. Debido a la falla se produjo el disparo del recloser correspondiente lográndose la extinción del arco, en el instante $t = 0.55$ se produce el recierre de la línea, reconectándose exitosamente.

4.2.2 Cargas con modelo de impedancia constante

Este programa esta descrito en el Anexo 4.1 *ENCF.m* ó Estabilidad Natural con Cargas Fijas, indicándose su diagrama de Flujo en la siguiente figura.

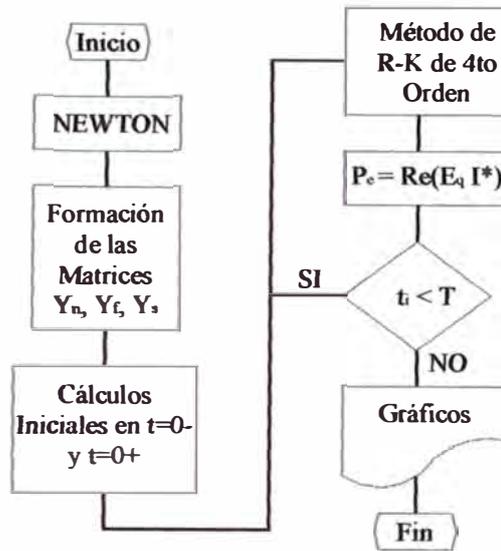


Figura 4.3
Diagrama de Flujo del Programa *ENCF.m*.

En la siguiente Figura se tienen las curvas de las variables de estado.

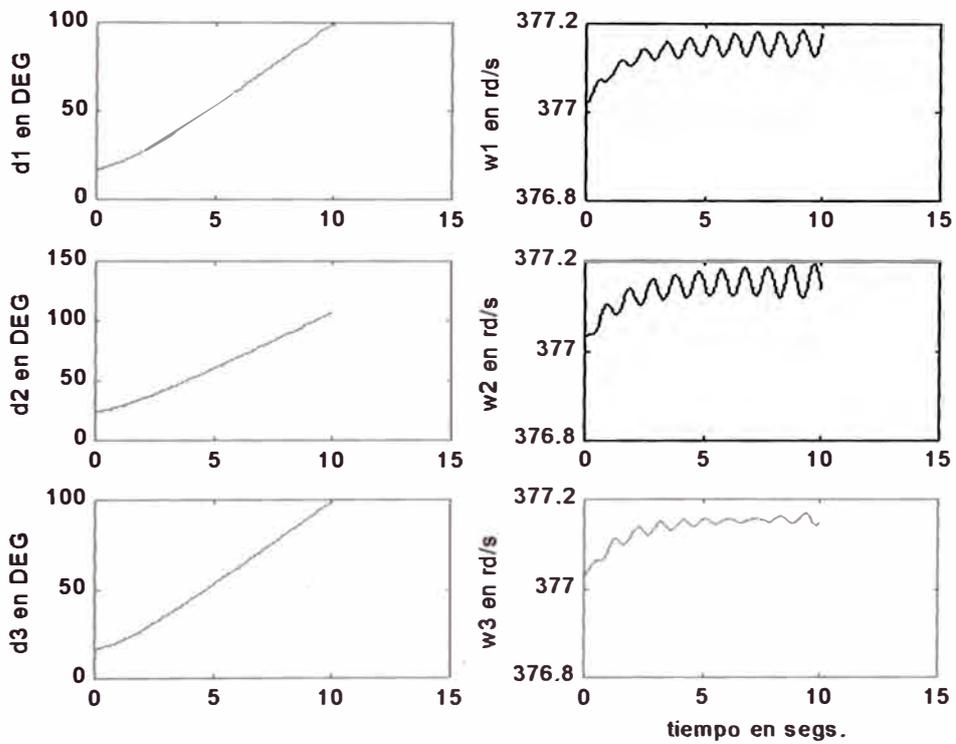


Figura 4.4(a)
Programa *ENCF.m*.

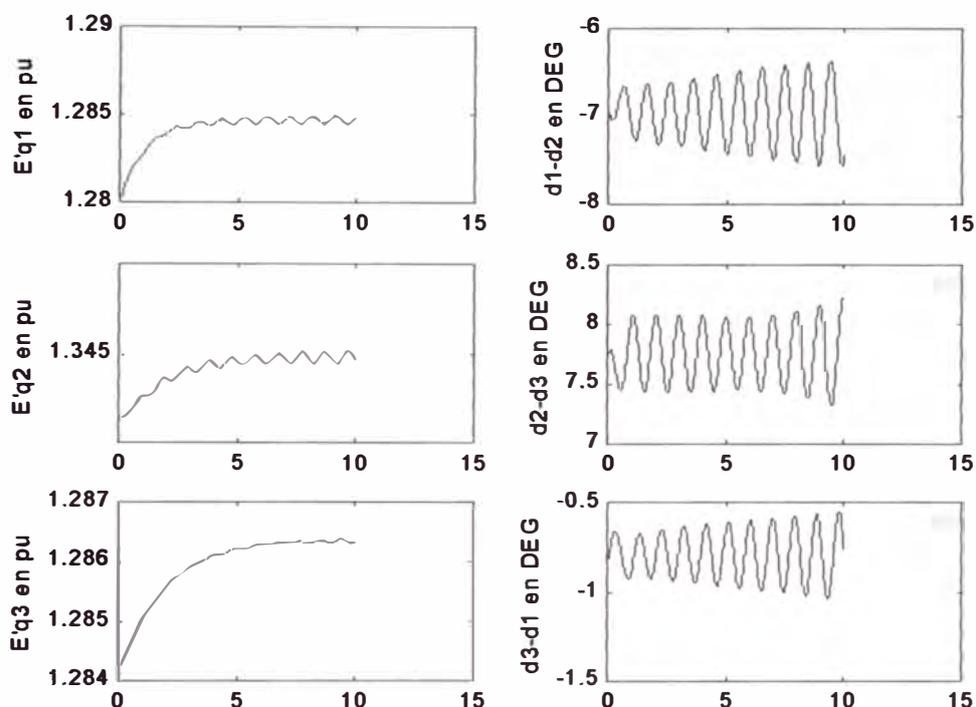


Figura 4.4 (b)
Programa *ENCF.m*.

Puede apreciarse que la diferencia angular tiende a la inestabilidad del sistema, lo que se espera en este tipo de casos.

4.2.3 Cargas con modelo dinámico

Ahora veremos el mismo tipo de fenómeno pero bajo la influencia de la carga dinámica, el programa fuente se encuentra en el Anexo 4.2 *ENC.D.m* Estabilidad Natural con Carga Dinámica.

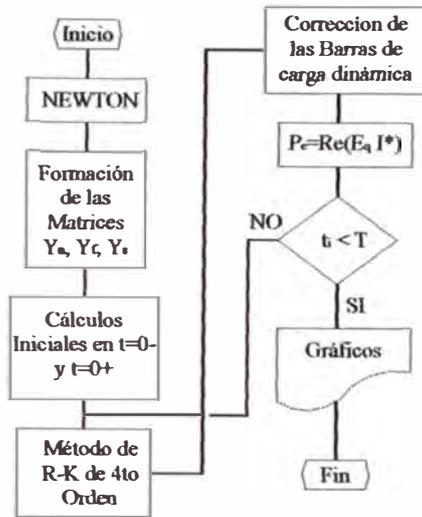


Figura 4.5
Diagrama de Flujo del Programa *ENCD.m*.

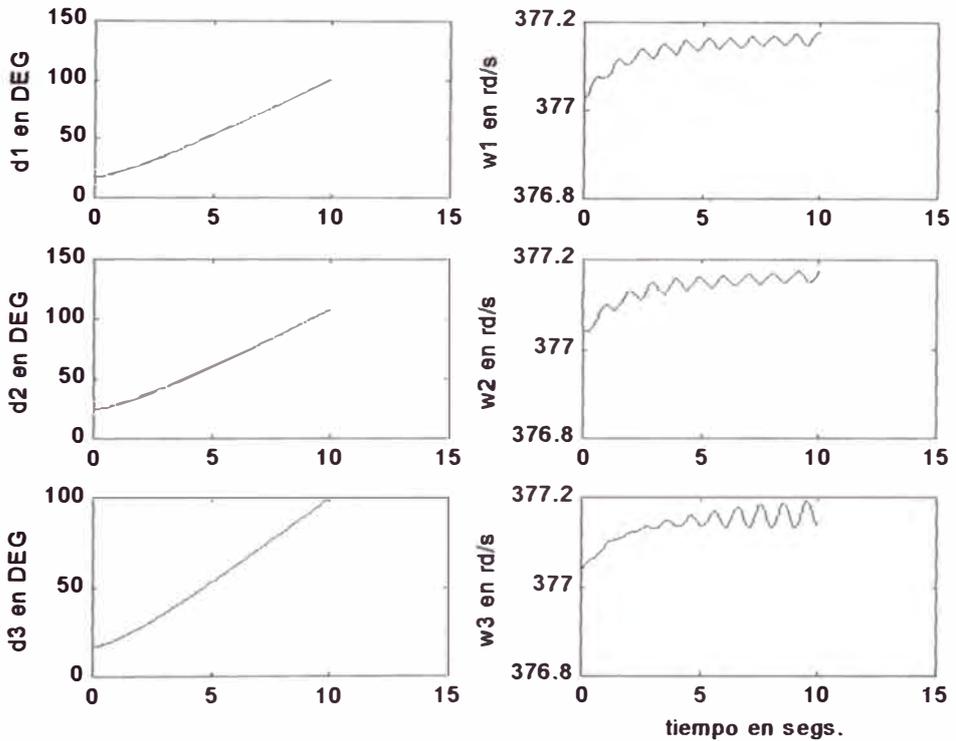


Figura 4.6(a)
Programa *ENCD.m*.

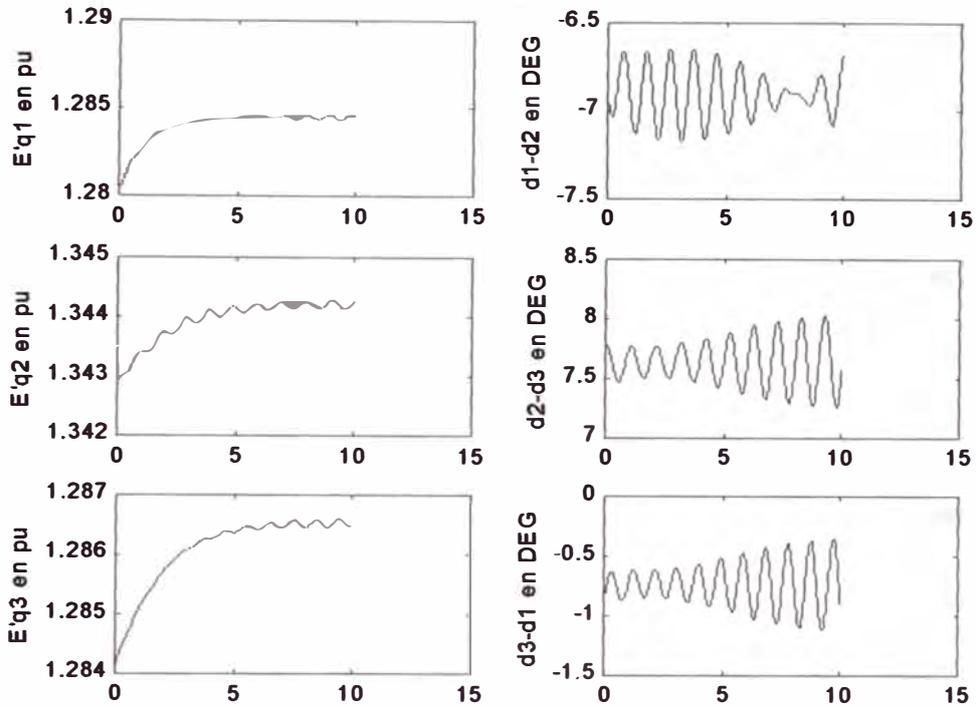


Figura 4.6 (b)
Programa *ENCD.m*.

4.3 Efecto de los controladores en la Estabilidad Transitoria

La incorporación de los reguladores de tensión y velocidad en el sistema será hecha de manera gradual, comenzando con el regulador de tensión para luego, seguidamente trabajar con ambos, el regulador de tensión y velocidad.

4.3.1 Efecto del Regulador de Tensión

Se realizará la introducción de este regulador siempre bajo la premisa que existe un incidente 1 descrito más arriba, por lo que el programa fuente se encuentra en el Anexo 4.3 *EDRT1.m*, ó Estabilidad Dinámica con Regulador de Tensión sometido al incidente 1.

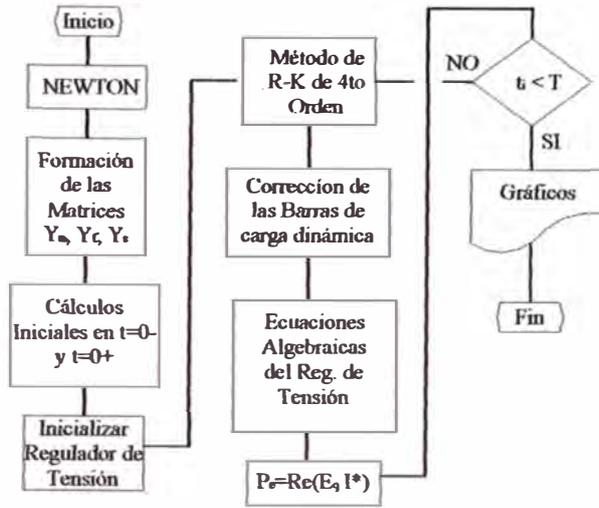


Figura 4.7
Diagrama de Flujo del Programa *EDRT1.m*.

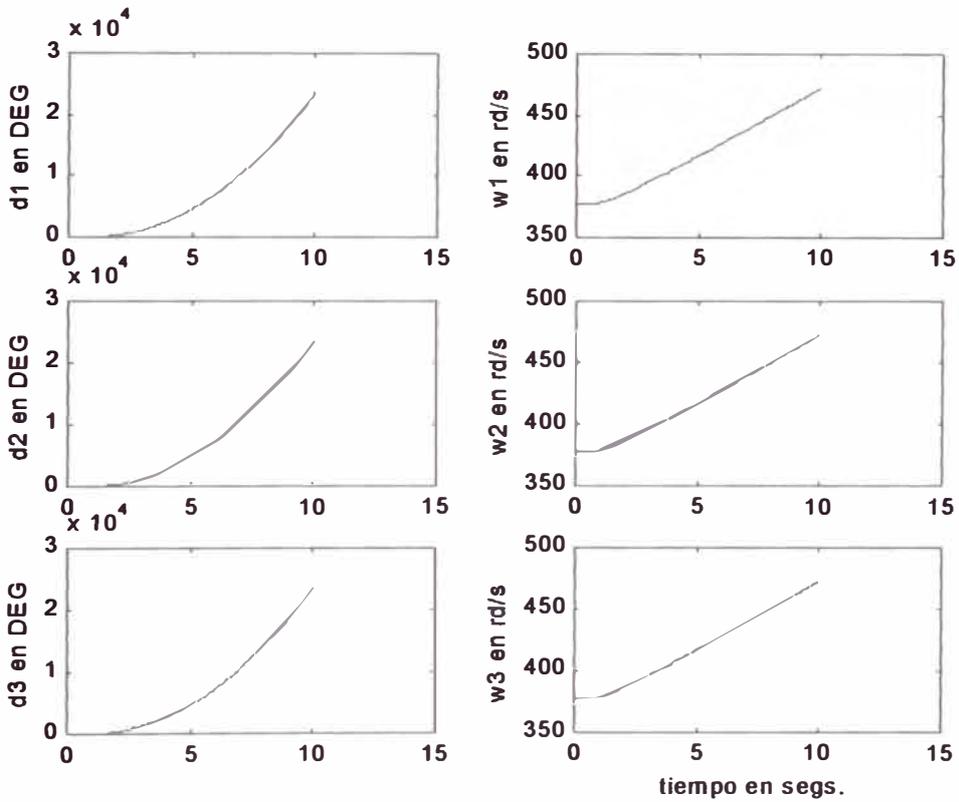


Figura 4.8(a)
Programa *EDRT1.m*.

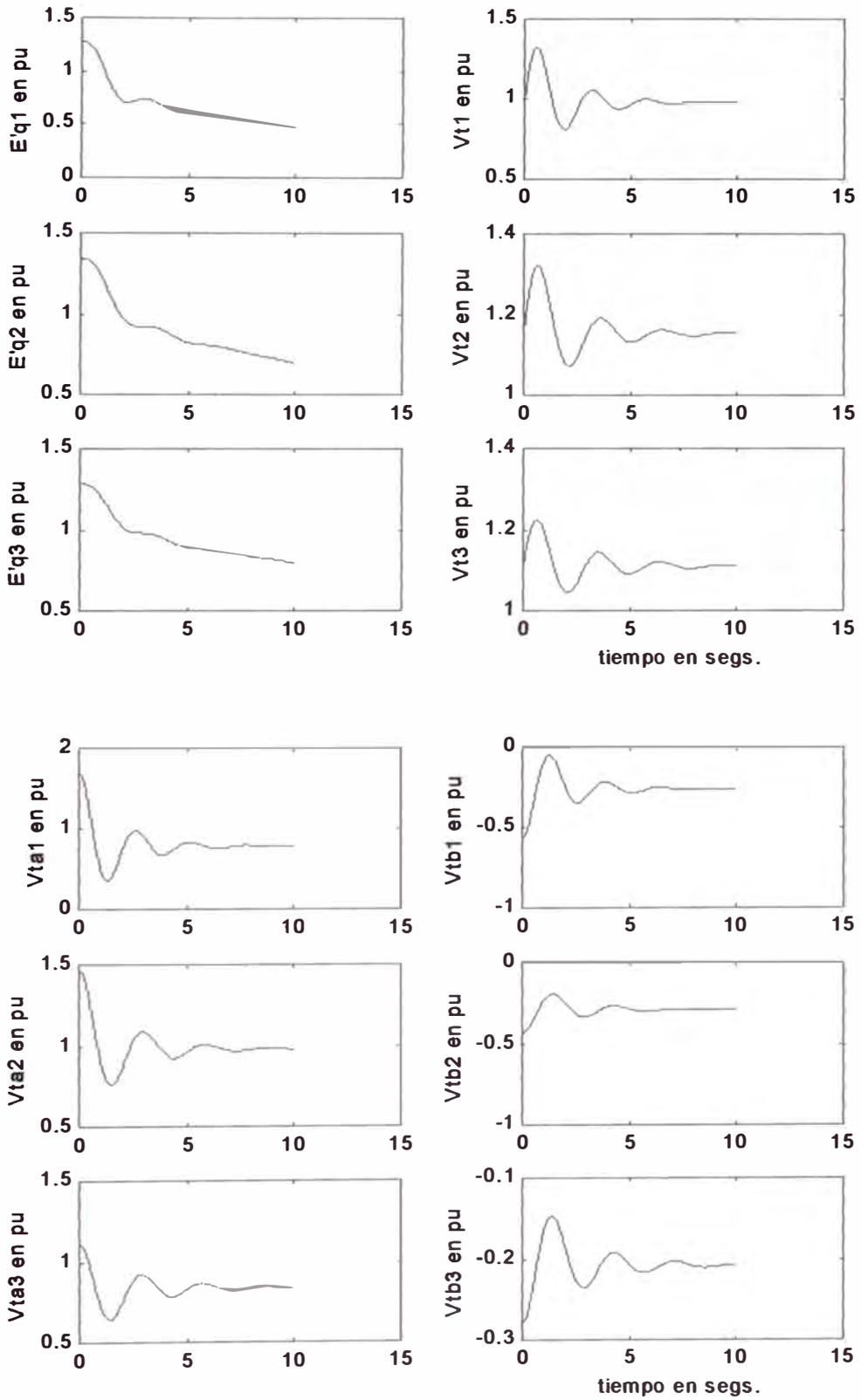


Figura 4.8(b)
Programa *EDRT1.m*.

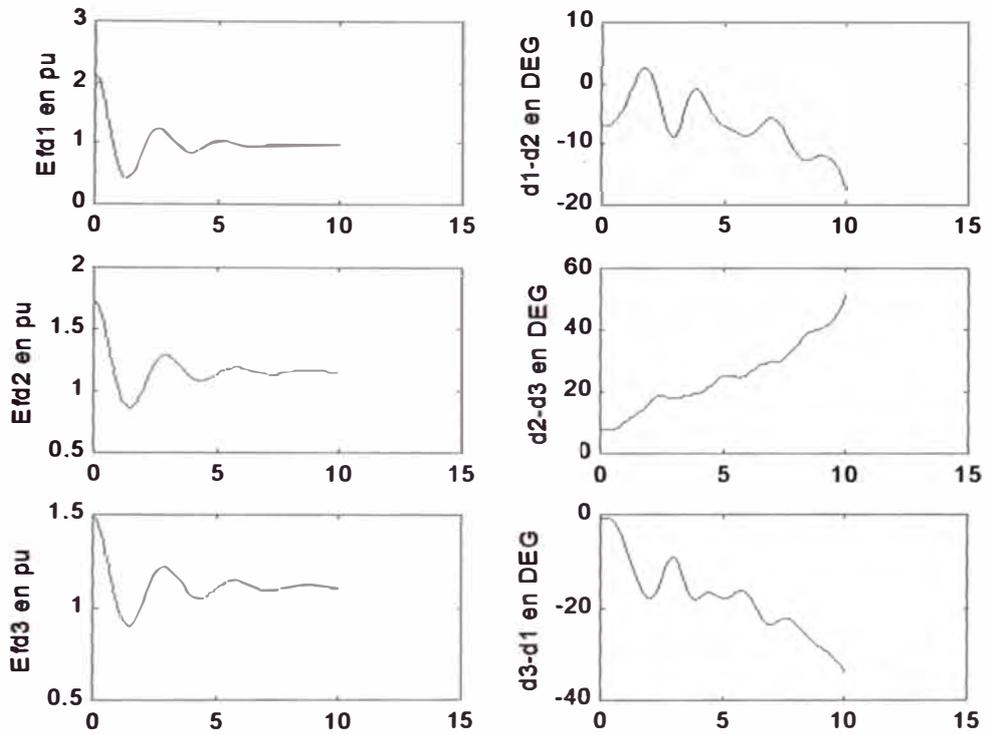


Figura 4.8(c)
Programa *EDRT1.m*.

Como puede verse en la Figura 4.6 (b) algunos valores como las tensiones E_{fd} ó E_q del sistema tienden a la convergencia, pero la estabilidad definida por la diferencia de ángulos no se concreta.

4.3.2 Efecto de los Reguladores de Tensión y Velocidad

Ahora veremos el proceso completo en el cual el sistema cuenta con ambos reguladores en cada central.

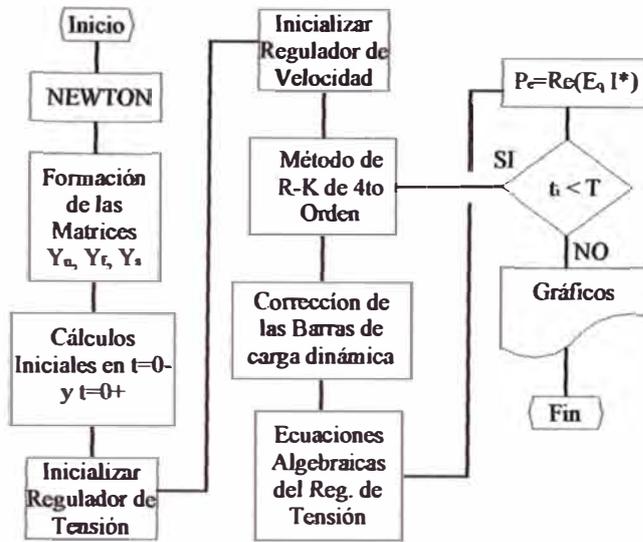


Figura 4.9
Diagrama de Flujo del Programa *EDRTV.m*.

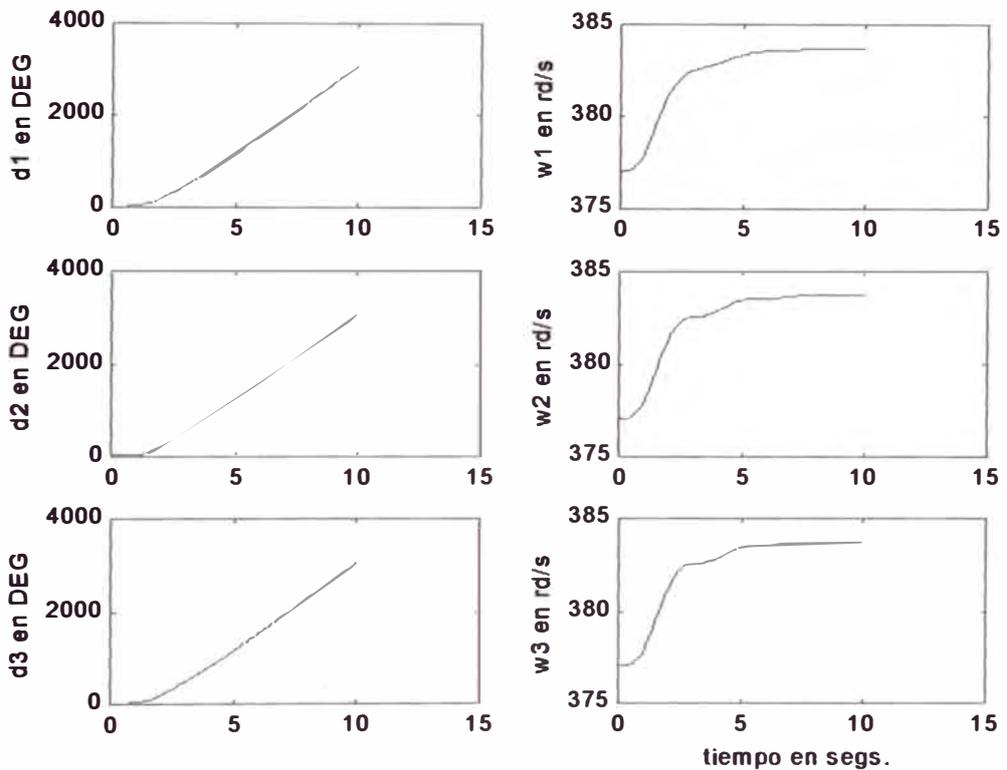


Figura 4.10 (a)
Programa *EDRTV1.m*.

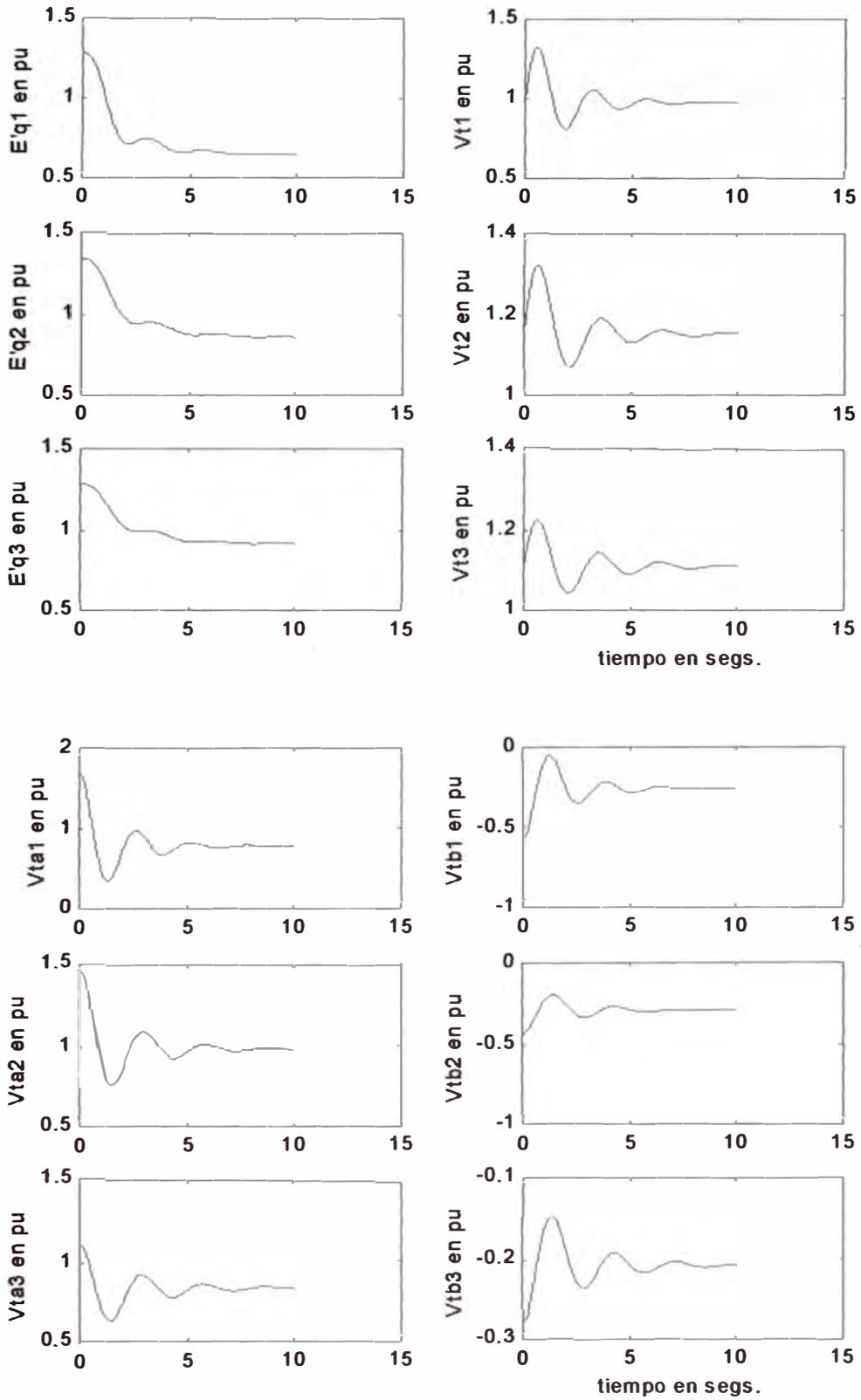


Figura 4.10(b)
Programa *EDRTV1.m*.

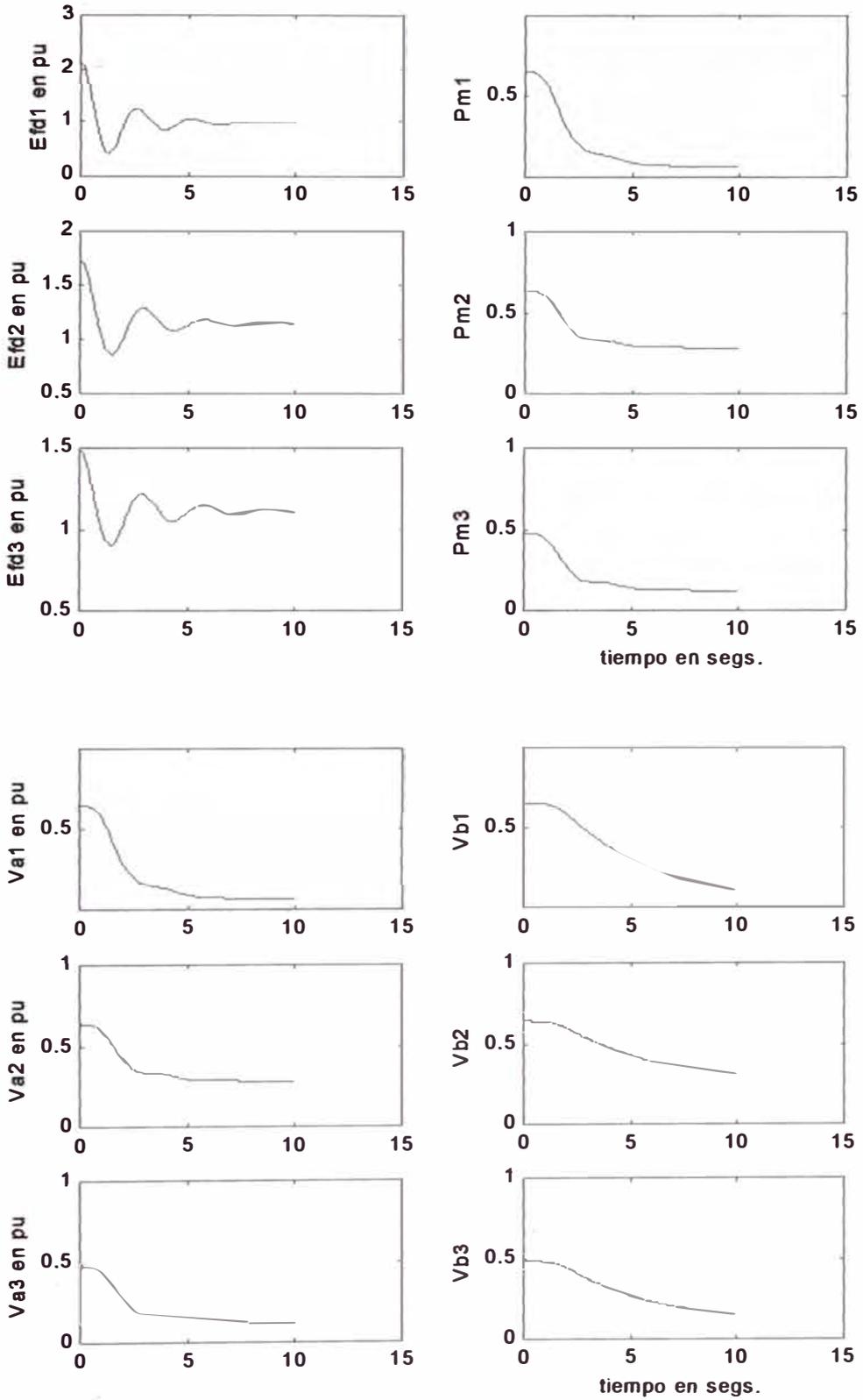


Figura 4.10(c)
Programa *EDRTVI.m*.

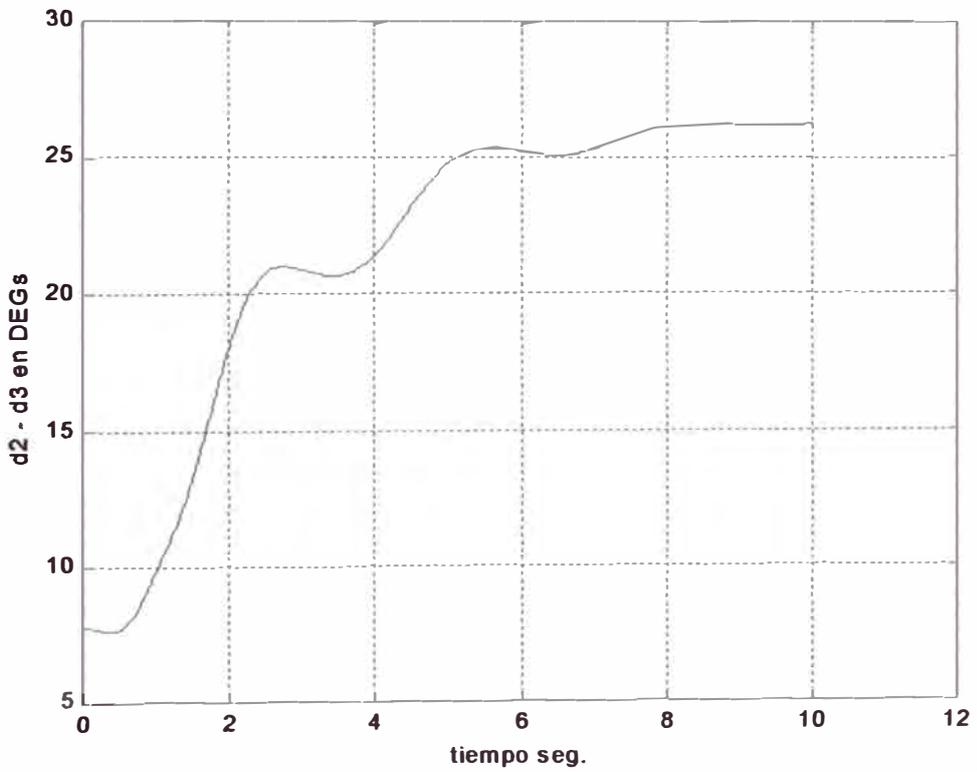
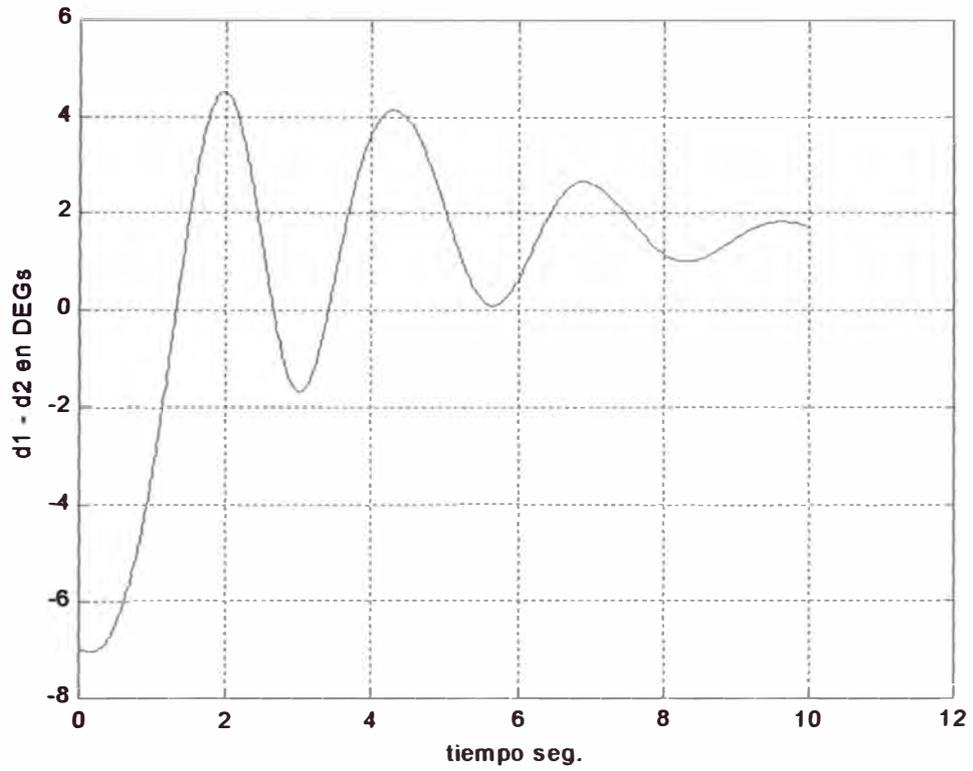


Figura 4.10(d)
Programa *EDRIV1.m*.

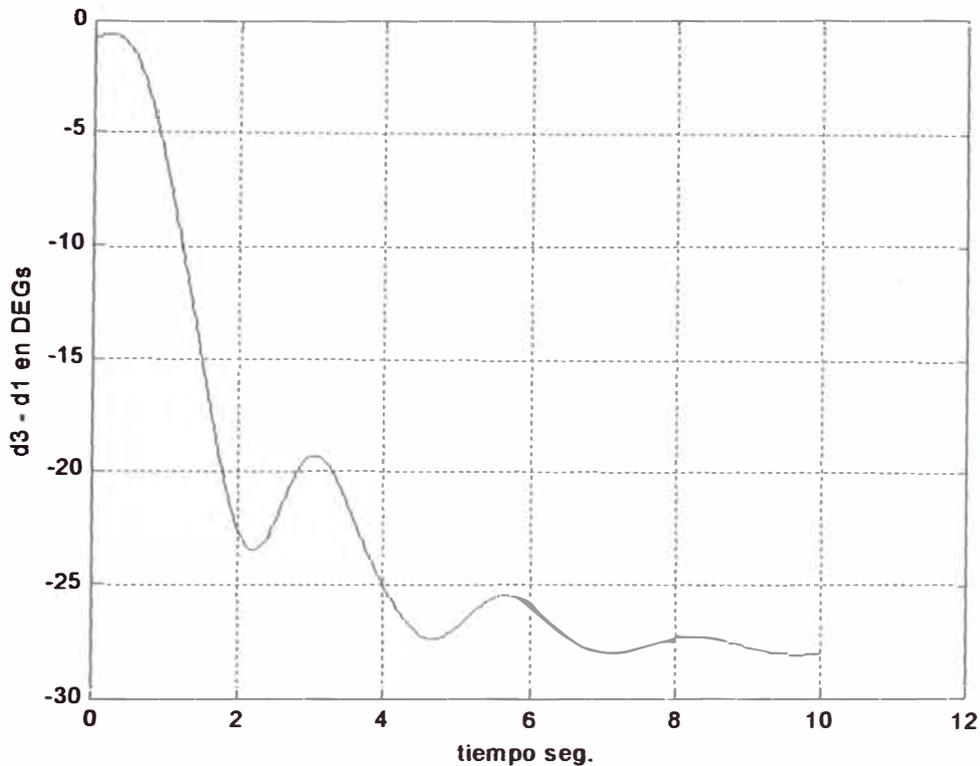


Figura 4.10(e)
Programa ETRTV1.m.

4.4 Pruebas de Ejecución del Programa de Estabilidad Transitoria

Al igual como se hizo con los reguladores de tensión y velocidad en este caso también se deben hacer pruebas de ejecución del programa de estabilidad transitoria.

4.4.1 Prueba de entradas nulas

Esta prueba la aplicaremos, solo con propósitos de ejercicio, en el programa de estabilidad con cargas dinámicas y con regulador de tensión, se consigue esta prueba simplemente manteniendo constante la matriz Y en la entrada del punto 5 del programa, la lógica dice que si la matriz de admitancias no cambia todos los parámetros del sistema deben permanecer constantes.

El programa fuente de esta prueba esta en el Anexo 4.5 *PEDRT.m* ó Prueba de Estabilidad Dinámica con Regulador de Tensión.

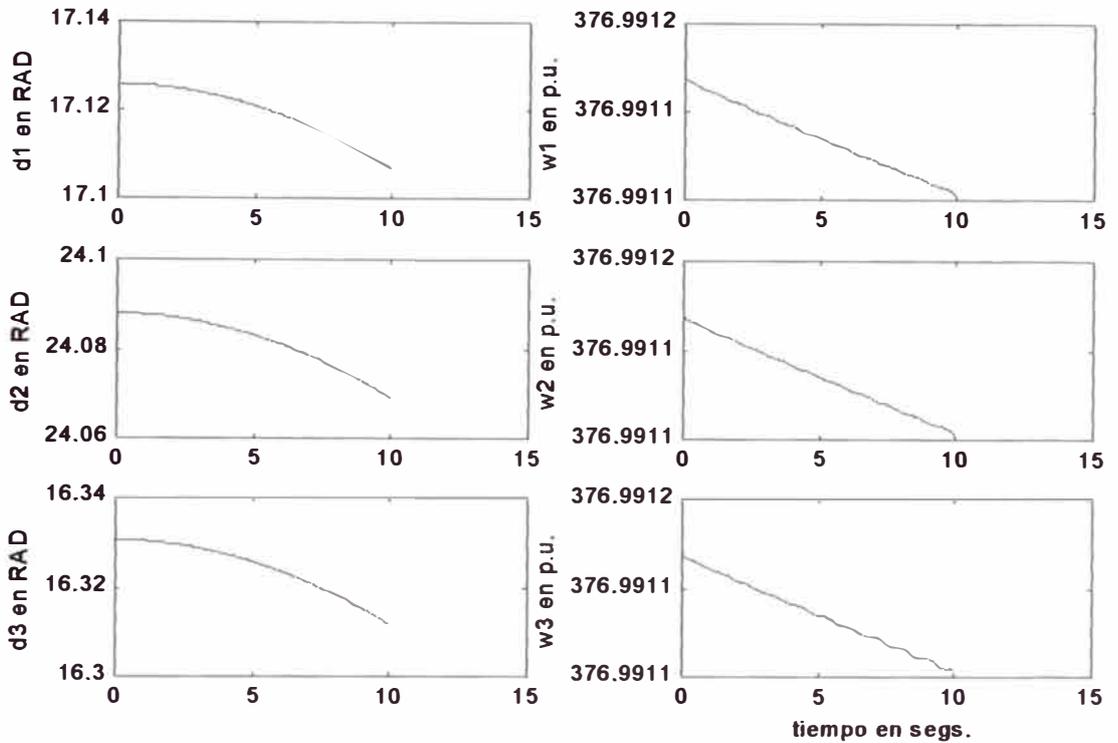


Figura 4.11
Programa *PEDRT.m*.

Se aprecia que el diagrama no produce las salidas constantes que esperábamos, esto es debido a la presencia de líneas de longitud media y que en su representación se usaron admitancias en derivación, esto produce restos de potencia que al final inciden en el resultado, para corregir esto solo usamos la función *AXIS* de Matlab que funciona como un zoom, si lo hacemos de la manera apropiada tenemos:

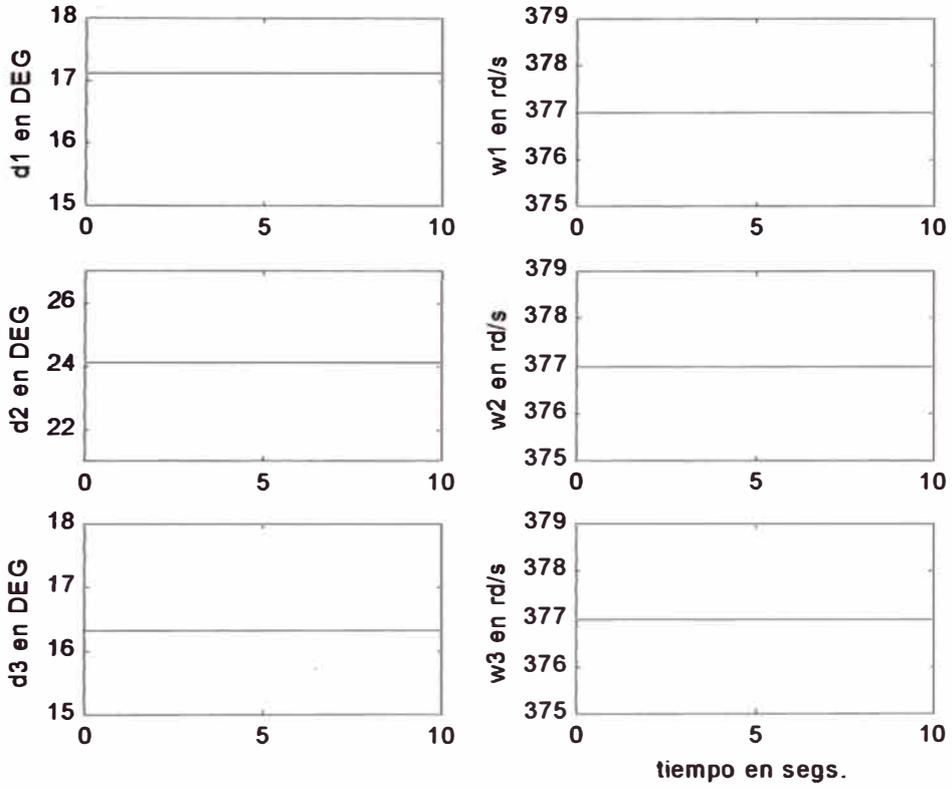


Figura 4.12
Corrección de los gráficos del programa *PEDRT.m*.

Luego podemos ver que necesitamos aplicar este mismo criterio para E_q y la diferencia angular de los generadores.

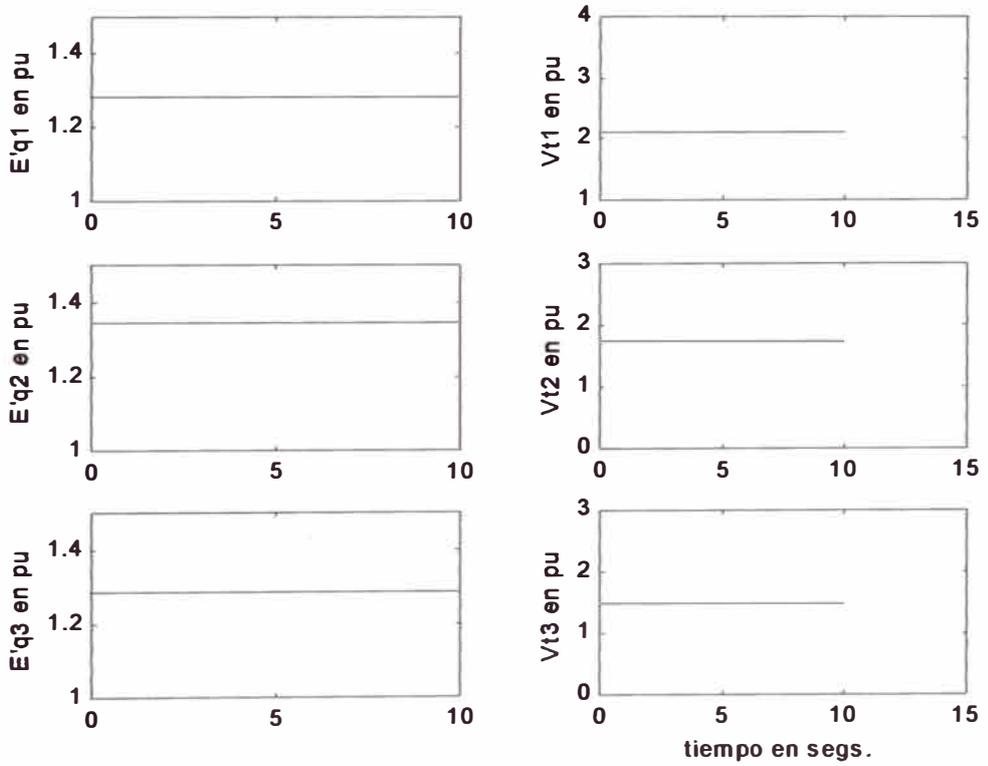
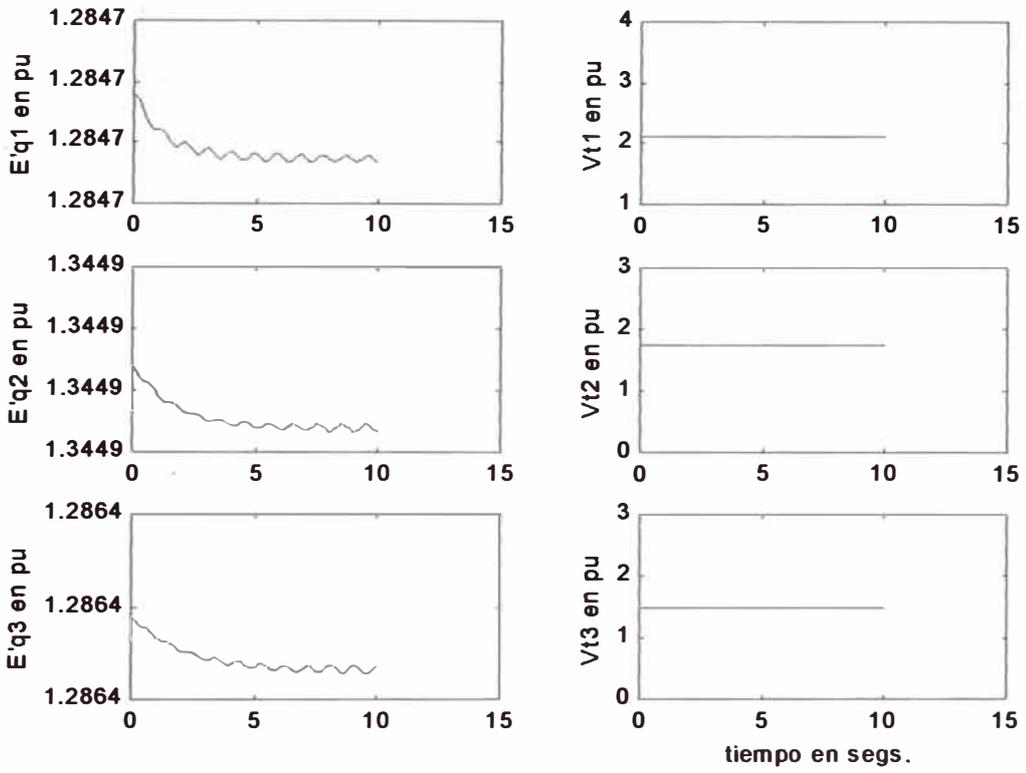


Figura 4.13 (a)
Programa *PEDRT.m*.

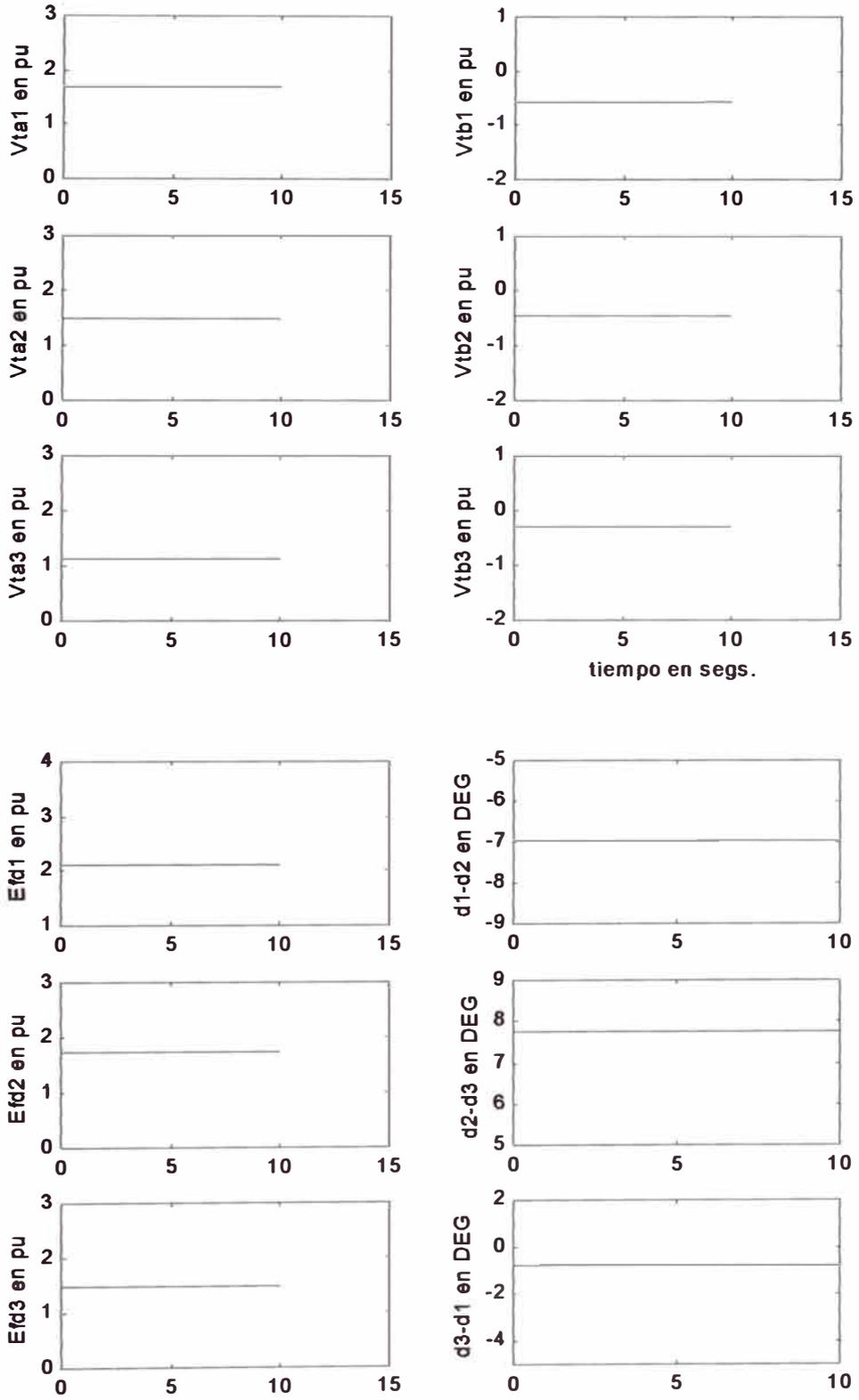


Figura 4.13 (b)
Programa *PEDRT.m*.

Este comportamiento no ocurre en sistemas en los cuales la representación de las líneas se hace solo con una impedancia serie ó líneas cortas y por tanto no tienen lugar potencias de pérdidas en el sistema.

Asimismo, en esta prueba no es necesario el cálculo de los parámetros en $t = 0^+$ por lo que el punto 3.2 del programa *EDRT1.m* es eliminado.

4.4.2 Prueba de Falla Súbita

La idea en esta prueba es que cuando ocurre un incidente, si en el momento inicial existía un Δ entre la señal A y B una vez transcurrido el evento la diferencia permanecerá constante.

Para lograr esto supongamos el incidente 2

Tabla 4.2
Incidente 2

Fecha y Hora del Incidente	_____
Área involucrada	Barra 7
Indicaciones previas	Estado normal
Evento Inicial	Arranque de un gran motor en la barra 7
Consecuencias	Duración de la falla 0.01 segundos. Aumento del 10% de potencia en la barra 7 Debido a la falla no se produjo el disparo del recloser correspondiente no lográndose la estabilidad deseada

El programa fuente se encuentra en el Anexo 4.6 *PENCF2.m*, que quiere decir Prueba en Estabilidad Natural con Carga Fija.

Una vez corrido el programa encontramos los siguientes resultados.

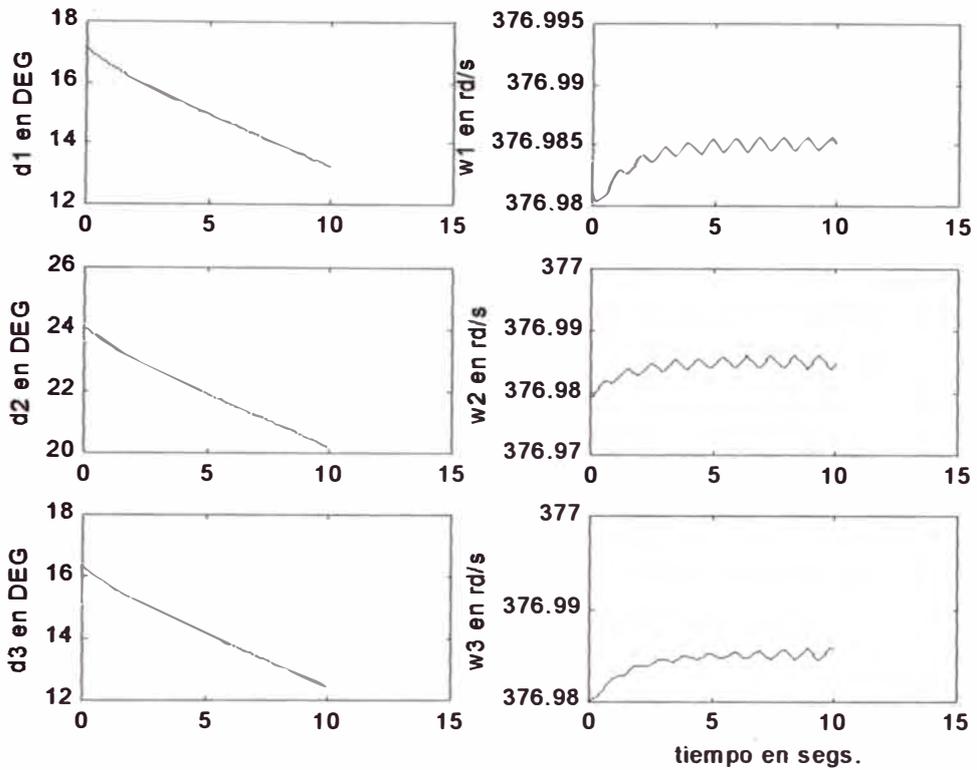


Figura 4.14
Programa *PENCF2.m*.

Ahora podemos encontrar la diferencia de los ángulos y considerar si estas diferencias se aprecian constantes.

Por ejemplo en el programa *PENCF2.m* la variable *dm* contiene los ángulos iniciales de las máquinas, y *d0* son los valores finales una vez terminado todo el ciclo de integración.

Si se pregunta por estos valores Matlab responde:

```
» do
do =
    0.23112
    0.35237
    0.21727
» dm
dm =
    17.126    24.088    16.331
» d2r(dm)
ans =
    0.2989    0.42041    0.28502
»
```

Donde $D2R$ es una función autocreada que convierte los valores originales de dm dados de grados a radianes, vemos que dm es un vector fila y do un vector columna, luego podemos crear una tabla donde comparar las diferencias iniciales y finales.

Tabla 4.3
Diferencias iniciales y finales de do y dm

	1 - 2	2 - 3	3 - 1
do	-0.12125	0.1351	-0.01385
dm	-0.12151	0.13539	-0.01388

Vemos pues que existe una gran aproximación de los resultados teniendo en cuenta que el incidente asumido no es muy grave, y en realidad debería permitir la estabilidad del sistema, aún así podemos ver que la diferencia de ángulos se conserva.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE LA UBICACIÓN DE LA FALLA EN LA ESTABILIDAD TRANSITORIA

5.1 Introducción

En este capítulo describiremos nuevos incidentes que se aplicaran al sistema con el cual se está trabajando, en algunos casos dependiendo de la situación del incidente planteado se verá que aún con los reguladores de tensión y velocidad, no es posible la estabilidad del sistema en todos los casos.

Plantearemos un nuevo incidente:

Tabla 5.1
Incidente 3

Fecha y Hora del Incidente	-----
Área involucrada	Línea 6 y barra 6
Indicaciones previas	Estado normal
Evento Inicial	Cortocircuito trifásico a tierra en la línea 6 muy cerca de la barra 6
Consecuencias	Duración de la falla 0.25 segundos. Debido a la falla se produjo el disparo del recloser correspondiente lográndose la extinción del arco, en el instante $t = 0.55$ se produce el recierre de la línea, reconectándose exitosamente.

Con el fin de simplificar y dirigir el objetivo del análisis no se han cambiado los tiempos de falla del incidente 3 respecto al 1, solo la ubicación de la falla.

5.2 Aplicación del Incidente 3 en el S.E.P. con reguladores de tensión y velocidad

En el Anexo 5.1 se tiene el programa fuente llamado *EDRTV3.m*, es decir, Estabilidad Dinámica con Reguladores de Tensión y Velocidad con el incidente 3.

Cuando ejecutamos el programa obtenemos el siguiente resultado.

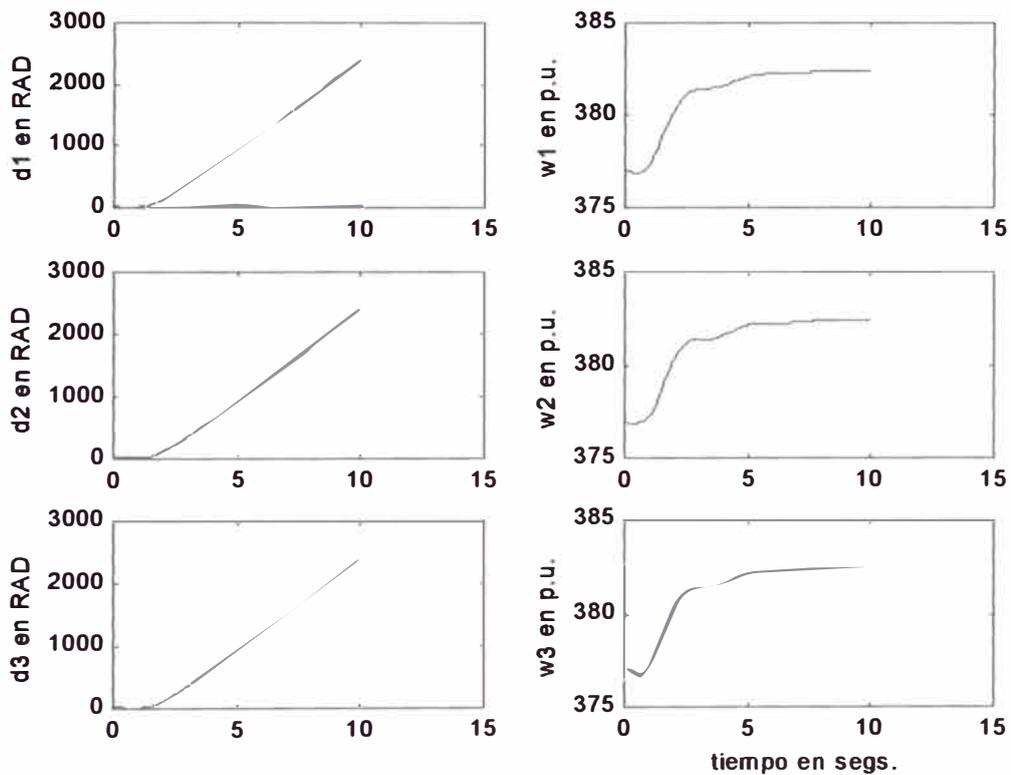


Figura 5.1 (a)
Programa *EDRTV3.m*.

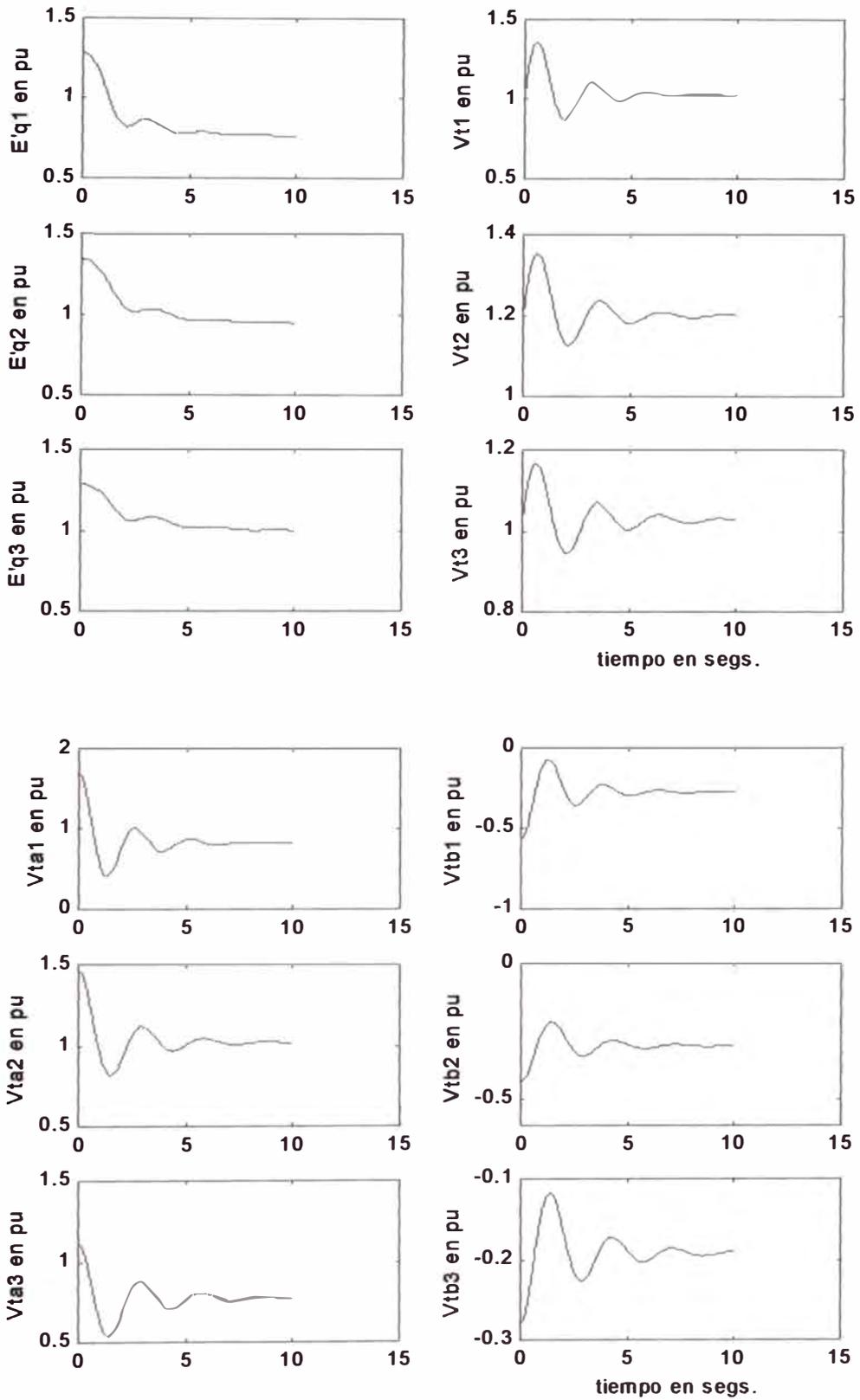


Figura 5.1 (b)
Programa *EDRTV3.m*.

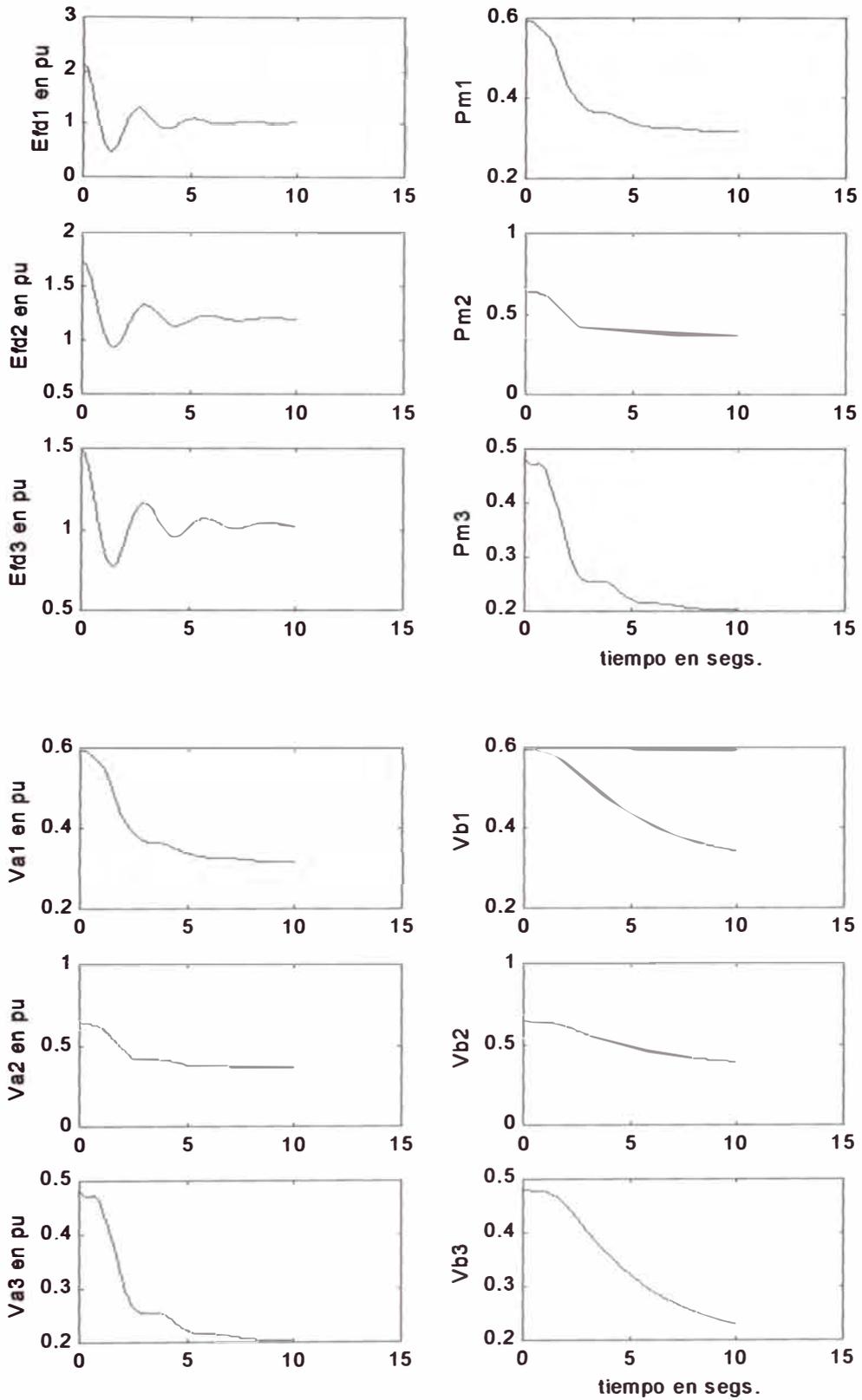


Figura 5.1 (c)
Programa *EDRTV3.m*.

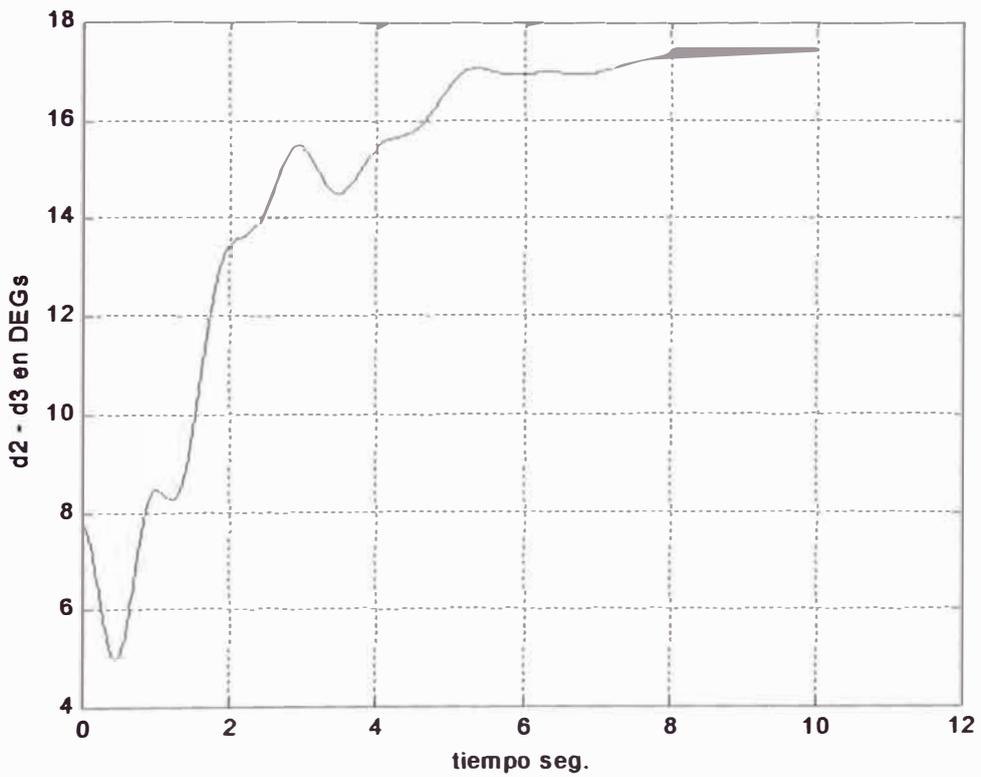
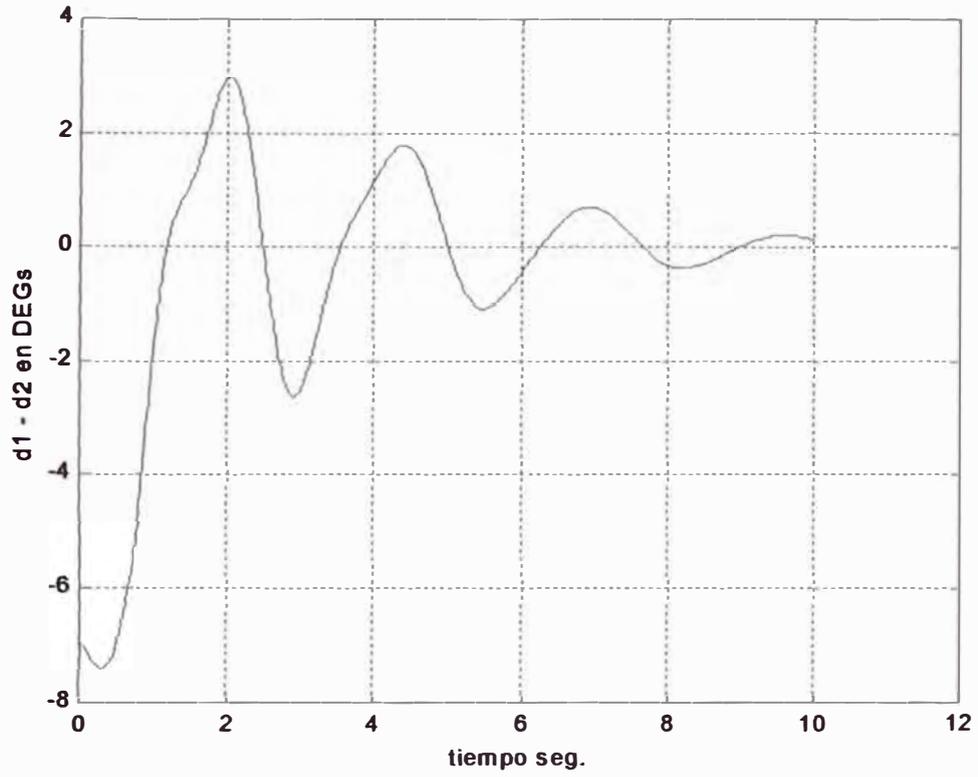


Figura 5.1 (d)
Diferencia angular - Programa *EDRTV3.m*.

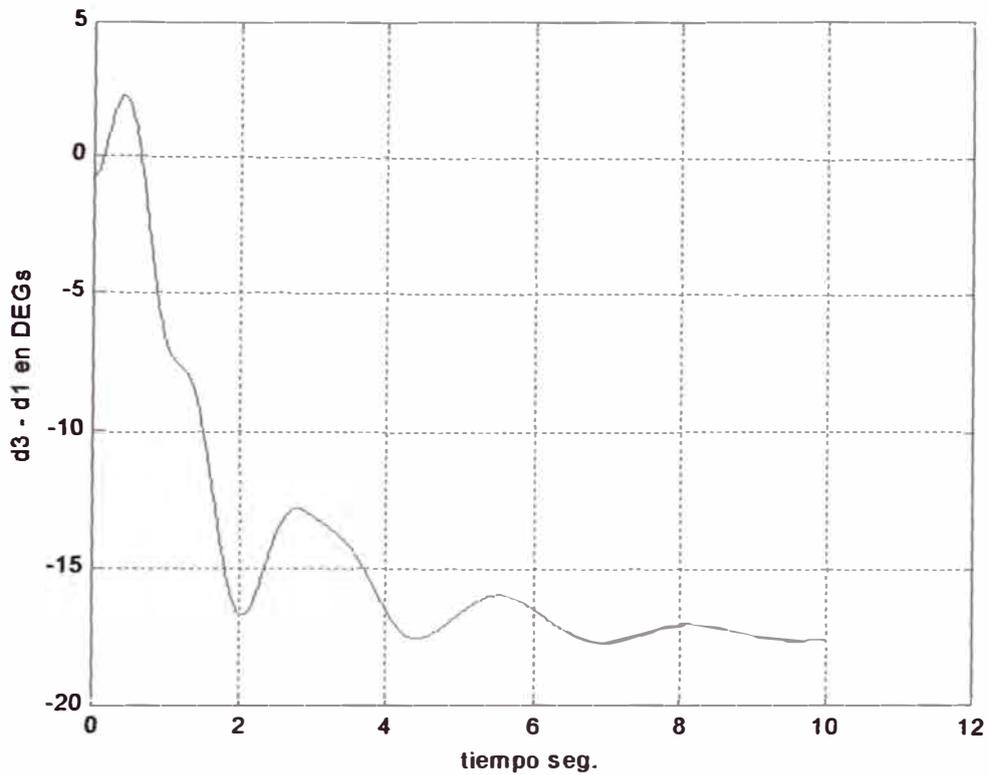


Figura 5.1 (e)
Diferencia angular – Programa *EDRTV3.m*.

Vemos que la estabilidad angular se conserva a pesar de que la falla se ha realizado cerca del generador 3, sin embargo, también se puede ver que el sistema tiende inicialmente a la inestabilidad, siendo recuperado por la acción de los reguladores y por el hecho que el incidente declara la reconexión de la línea por acción del recloser.

Pero que pasaría si el recloser debido a la falla simplemente no realiza su acción de recierre, dejando desconectadas las barras 4 y 6 a los 0.25 segundos de ocurrida la falla?

Realizando los cambios necesarios se puede ver que el programa arroja los siguientes gráficos de la Figura 5.2.

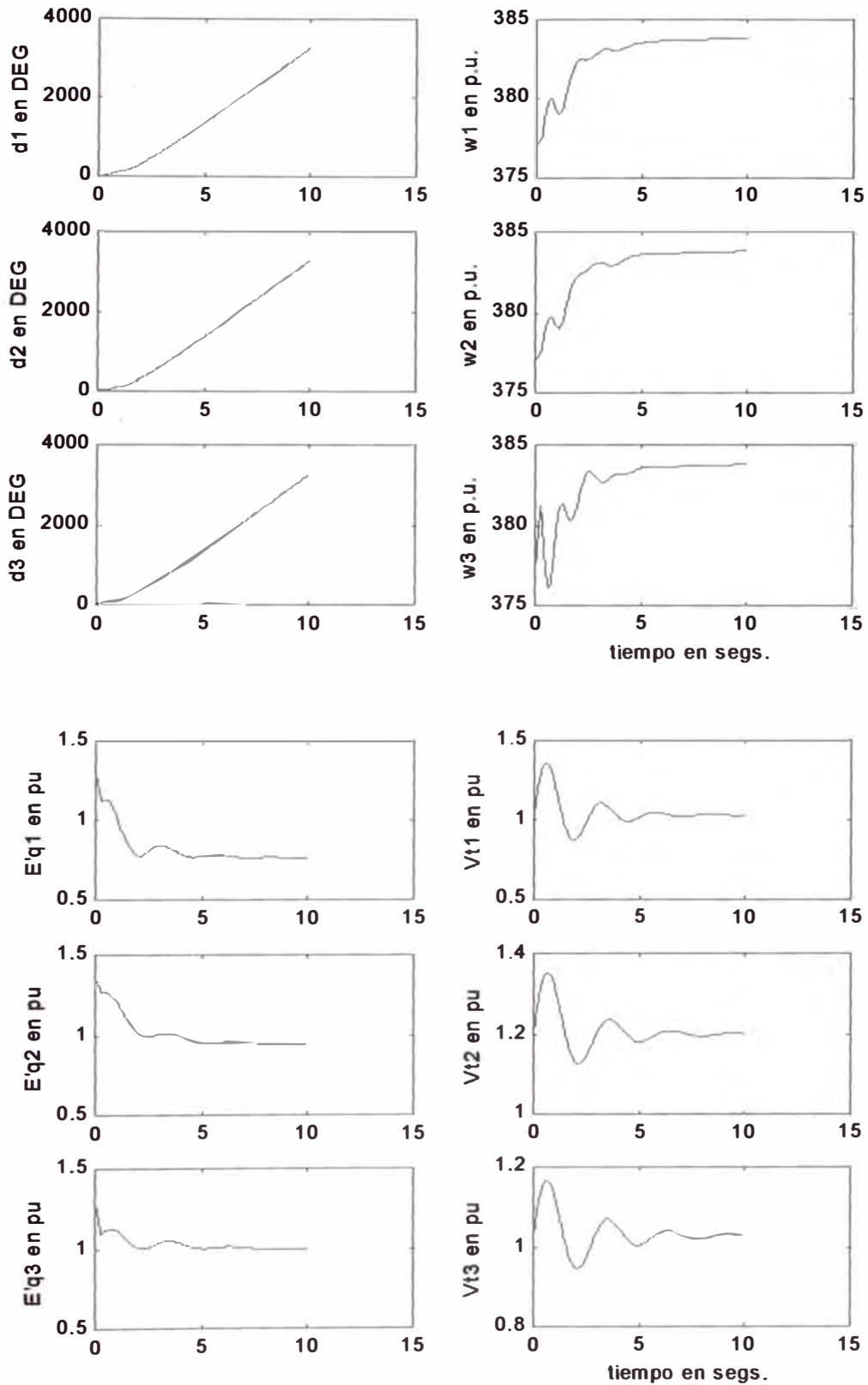


Figura 5.2 (a)
Programa *EDRTV3.m* con recloser sin accionamiento

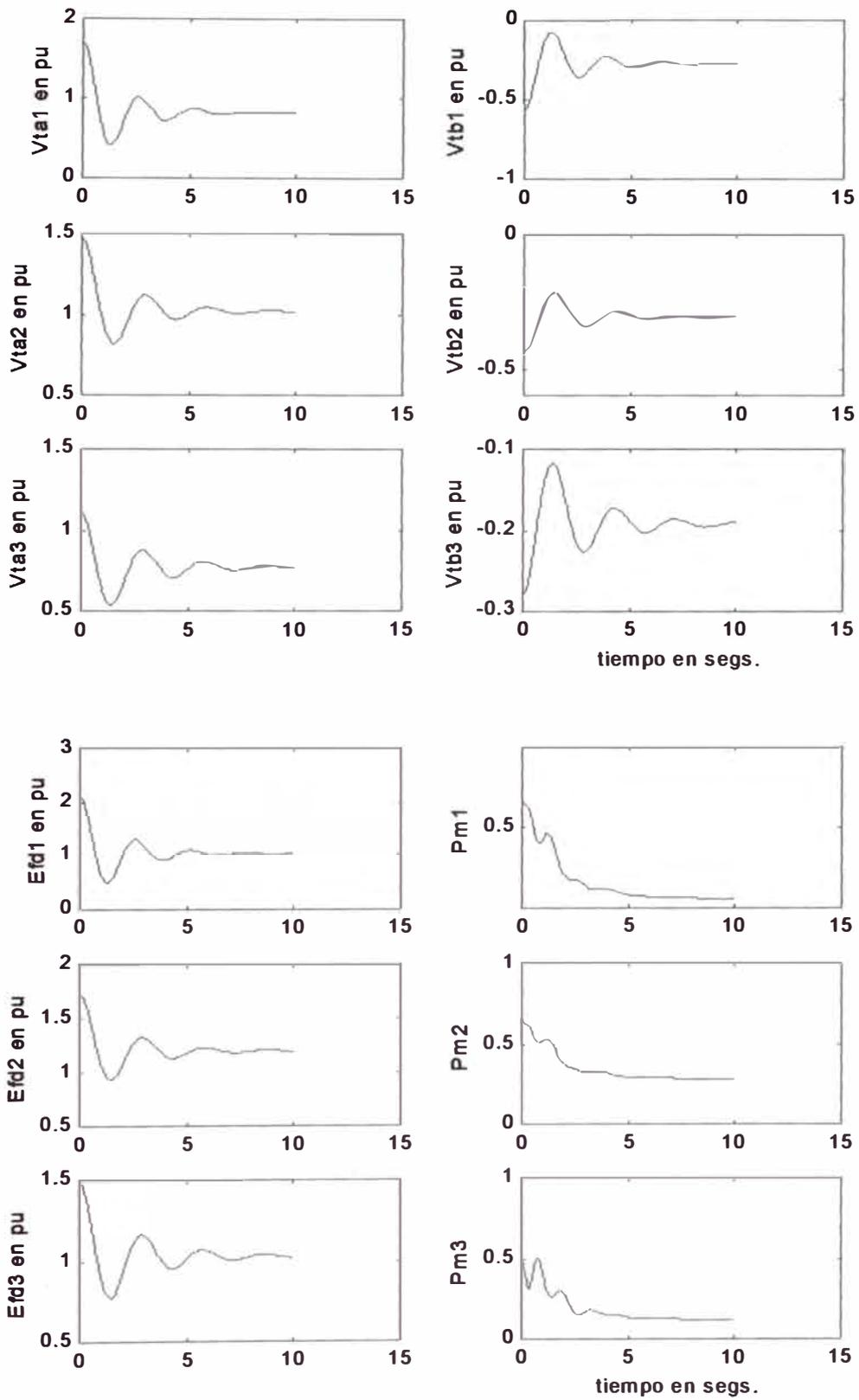


Figura 5.2 (b)
Programa *EDRTV3.m* con recloser sin accionamiento

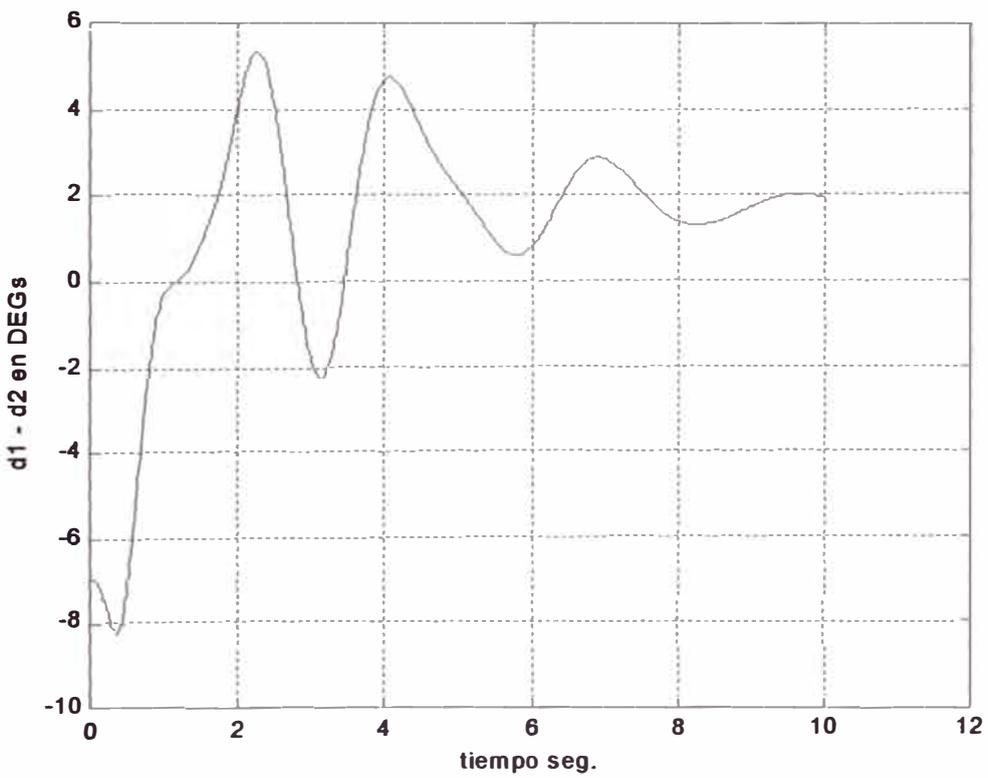
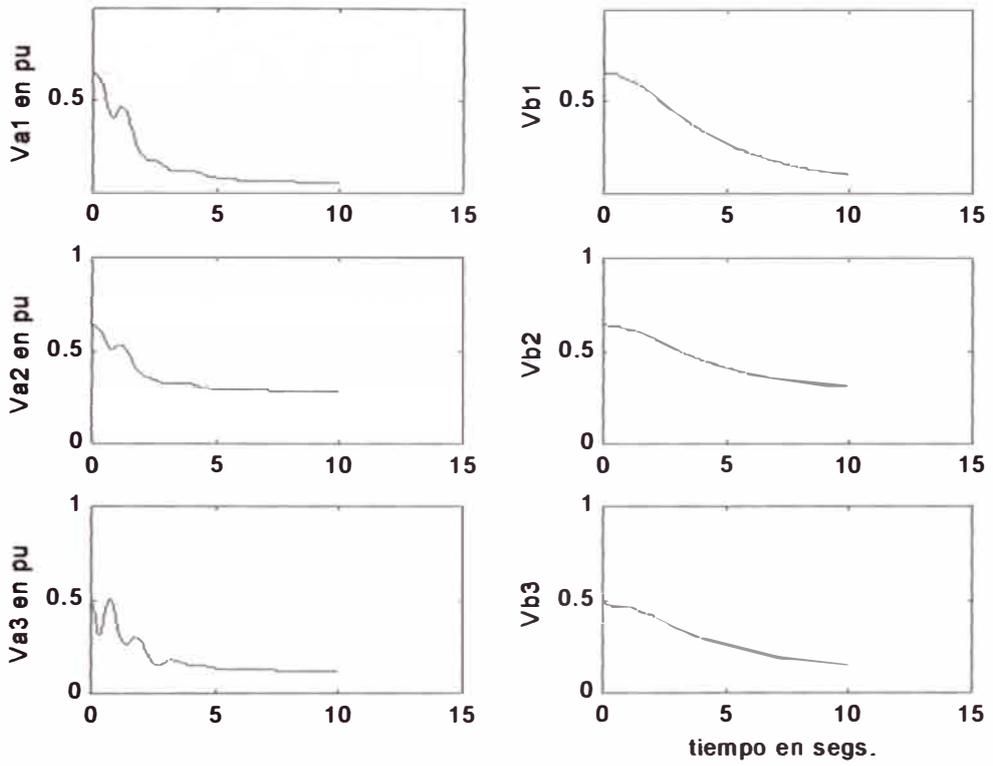


Figura 5.2 (c)
Programa *EDRTV3.m* con recloser sin accionamiento

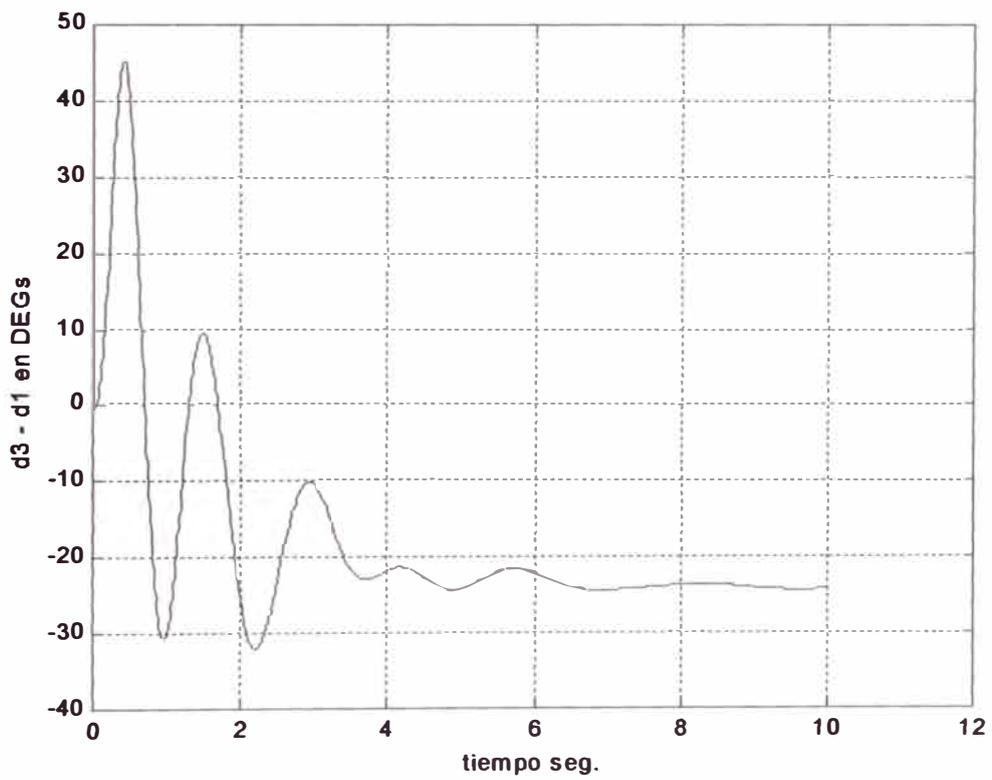
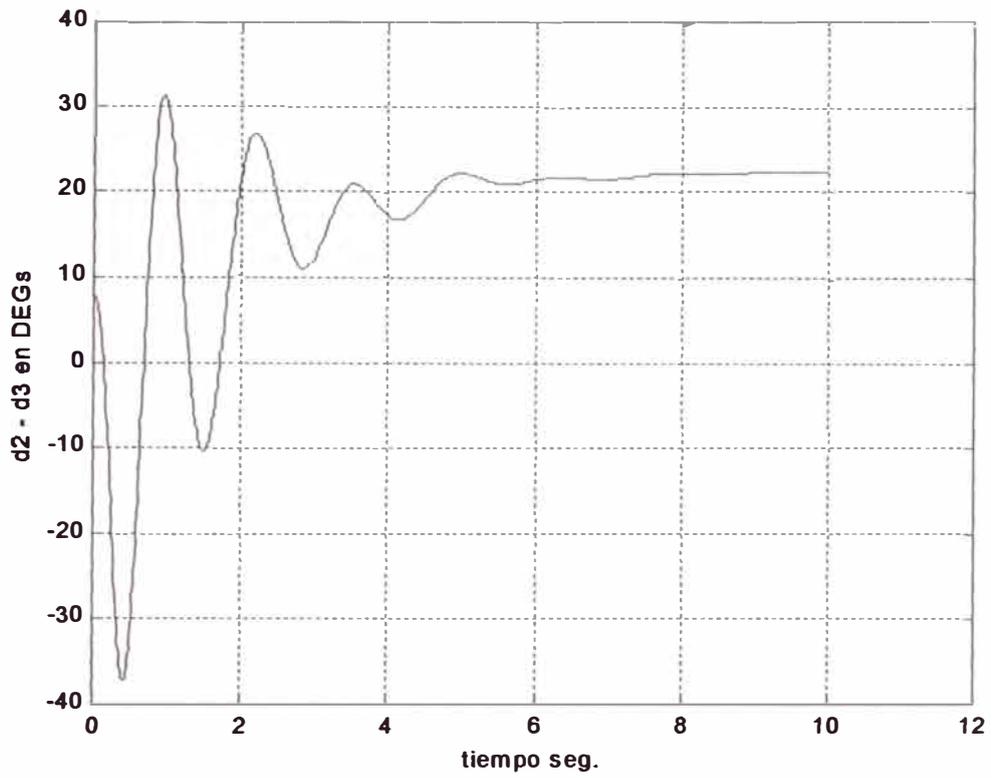
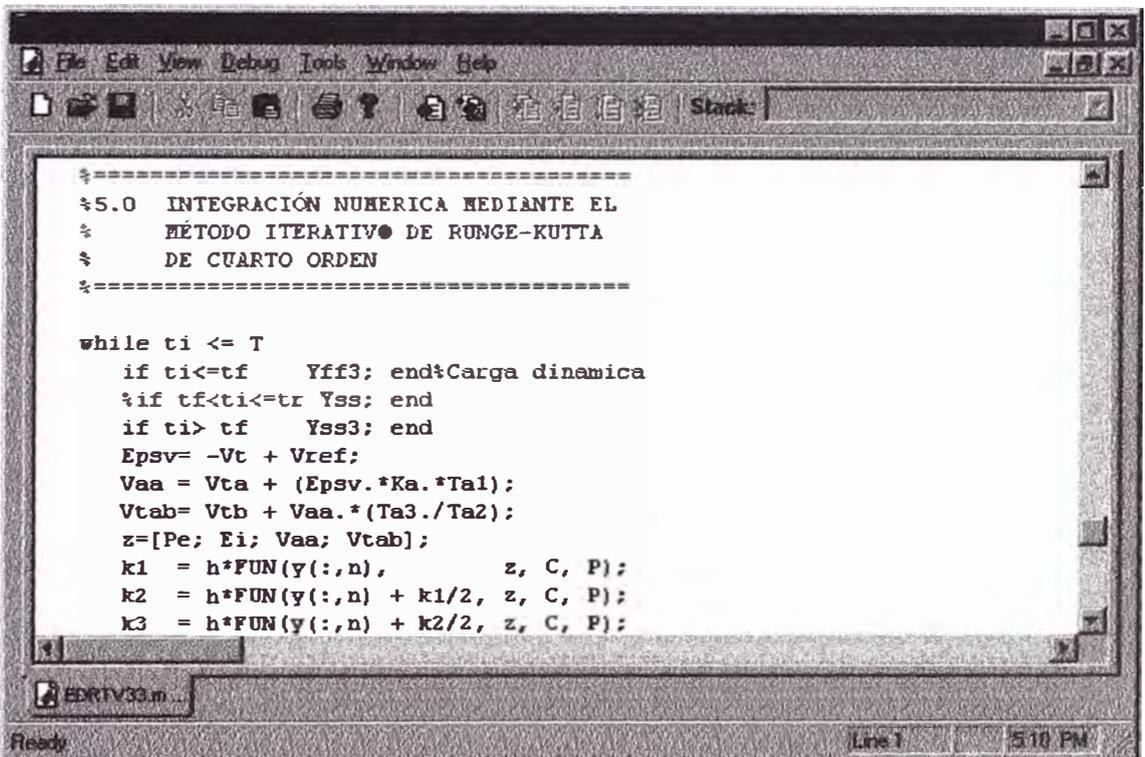


Figura 5.2 (d)
Programa *EDRTV3.m* con recloser sin accionamiento

Como se puede apreciar de la diferencia angular de las figuras, para una falla muy cerca al generador y dependiendo del tipo de falla se puede decir que las oscilaciones del sistema aumentan, aumentando la posibilidad de perder la estabilidad.

Líneas arriba se habló de unos cambios necesarios para adecuar el programa *EDRTV3.m* a la posibilidad del mismo evento pero sin el disparo del recloser, en este caso hubo que realizar los siguientes cambios:

Se comentó; es decir, se colocó un (%) en el grupo de IFs del punto 5 del programa principal, esto sirve para omitir la acción de la sentencia de dicha línea, según figura adjunta.



```
=====
%5.0 INTEGRACIÓN NUMERICA MEDIANTE EL
% MÉTODO ITERATIVO DE RUNGE-KUTTA
% DE CUARTO ORDEN
=====

while ti <= T
    if ti<=tf    Yff3; end%Carga dinamica
    %if tf<ti<=tr Yss; end
    if ti> tf    Yss3; end
    Epsv= -Vt + Vref;
    Vaa = Vta + (Epsv.*Ka.*Ta1);
    Vtab= Vtb + Vaa.*(Ta3./Ta2);
    z=[Pe; Ei; Vaa; Vtab];
    k1 = h*FUN(y(:,n), z, C, P);
    k2 = h*FUN(y(:,n) + k1/2, z, C, P);
    k3 = h*FUN(y(:,n) + k2/2, z, C, P);
```

Figura 5.3

Si hubiera cambios en la admitancia del sistema de acuerdo al incidente, se hace los cambios de Y_f matriz de admitancias de falla, Y_s matriz de admitancias superada la falla en los puntos 2.2 y 2.3 respectivamente.

Asimismo, las subrutinas *Yff.m*, *Yss.m* e *Ynn.m*, serán afectadas por las condiciones dadas por el incidente 3, siendo transformadas según este requerimiento.

Si hubiera cambios en los tiempos de actuación de los reclosers o de la actuación de la falla es mejor colocar los nuevos cambios en el programa de que se trate, ya que cambiar el programa *DATA.m* es riesgoso, ya que éste es compartido por todos los demás programas de estabilidad.

Estos tres puntos hay que tenerlos en mente y serán el siguiente paso a fin de realizar los cambios correspondientes sobre la base de una nueva tabla de incidencias a fin de analizar el efecto de la ubicación de la falla sobre la estabilidad transitoria.

5.3 Aplicación de Fallas consecutivas a todas las Barras del S.E.P. dado

Como hemos visto hasta ahora, hablar de fallas en barras implica también un rechazo de carga asociada, en este caso la línea de transmisión donde ocurre la falla, esto no significa que no pueda ocurrir una falla en la barra específicamente, ya sea por la acción defectuosa de un relé ó de una mala maniobra, en cualquier caso esta es la falla más severa que un sistema pueda tener, y en nuestro caso, siendo la capacidad de los reguladores empleados aquí, limitada ya que desde su diseño fueron deducidos de una forma simplificada; es mejor, sin perder objetividad ni la dirección de la meta trazada, seleccionar incidentes menos severos y que conduzcan a resultados que son los que se quieren mostrar.

Por lo expuesto, se creará un evento general y que será el que apliquemos a todas las barras considerando todas las combinaciones posibles Línea – Barra de acuerdo a la topología del sistema eléctrico dado.

Tabla 5.2
Incidente general

Fecha y Hora del Incidente	-----
Área involucrada	Línea <i>a</i> y barra <i>b</i>
Indicaciones previas	Estado normal
Evento Inicial	Cortocircuito trifásico a tierra en la línea <i>a</i> muy cerca de la barra <i>b</i>
Consecuencias	Debido a la falla no se produjo el recierre del recloser quedando la línea desenergizada por acción de los relés en ambos lados de la línea a los 0.25 segundos de ocurrido el evento.

Tabla 5.3
Tabla de Estabilidad
(E): Estable (I): Inestable

Barra	Líneas						
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7
4	E	---	E	E	----	E	----
5	E	I	---	----	----	----	----
6	---	----	---	---	---	E	E
7	---	I	E	---	E	---	---
8	---	----	----	E	E	----	E

La tabla 5.2 es un incidente general que se aplica a todas las barras del S.E.P. y con todas las combinaciones posibles de falla simultánea de las líneas a las que esta barra se conecta, según la tabla 5.3. El procedimiento ha sido ejecutado teniendo en cuenta la existencia de reguladores de tensión y velocidad. Solo se observa dos casos de inestabilidad del sistema correspondiente a la salida de la Línea 2.

En el incidente de falla en la línea 2, muy cercana a la barra 7, se observa en el desarrollo del programa respectivo un fenómeno interesante resultado de la selección del modelo de carga, se produce por la caída de la tensión de la barra, razón por la

cual para evitar estos casos se recomienda seleccionar siempre un voltaje $V_{j,crit}$, e incluir la siguiente ecuación^[9]:

$$P = P_0 \left(\frac{V_{j,crit}}{V_0} \right)^{A-2} \quad (5.1)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V_{j,crit}}{V_0} \right)^{C-2} \quad (5.2)$$

A fin de obtener una adecuada transición de las ecuaciones, necesitándose por lo tanto en futuras investigaciones un $V_{j,crit}$ por barra.

Estas ecuaciones se aplican en el programa cuando la tensión de una barra sea menor que la $V_{j,crit}$, y se pueda evitar que la matriz de admitancias llegue a valores singulares.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El estudio de la Estabilidad Transitoria se realiza mediante la simulación adecuada de los componentes del sistema eléctrico; el cual se elige de acuerdo a los propósitos trazados por el ingeniero, ya sea en la representación de un gran sistema eléctrico, como el peruano puede ser suficiente representar a los generadores como máquinas de primer orden, ó cuando se necesita estudiar el comportamiento individual de una central puede ser preferible el modelamiento del generador de quinto orden dependiendo de las variables y de la profundidad del estudio que se quiera realizar.

En este caso, se ha tratado de simular un sistema de prueba, en cual se han colocado modelos de generadores, de sistemas de excitación y regulación de tensión y reguladores de velocidad; asimismo, se han modelado las líneas de interconexión y se han dado valores referenciales reales a fin de completar el cuadro y desplegar un método experimental de prueba de fallas, también de estudio del comportamiento de los reguladores y su actuación frente a las solicitudes de incidentes supuestos que hemos desarrollado en diversos puntos del sistema, esperando tener un patrón de comportamiento, muy difícil de generalizar ya que como se ha visto la estabilidad de un sistema de potencia responde a una serie elaborada de parámetros de los cuales solo se ha querido dar un método de análisis, para luego aplicarlo en un problema específico y esperar alguna respuesta frente a un incidente, ó perturbación, ó falla

que pudiera desencadenar una serie de eventos que posibilitan la actuación de los reguladores de acuerdo a la selección que se ha realizado.

4.1 CONCLUSIONES

Bajo la aplicación de varios incidentes en el sistema eléctrico de ocho barras, hemos dado como respuesta la salida gráfica del comportamiento de las variables de estado de todo el sistema, se puede apreciar que cuando la diferencia angular entre las máquinas tiende a cero se ha concluido que el sistema es estable, esto es posible debido a la presencia de los reguladores de tensión y velocidad, en cualquier caso, las variables de estado nos muestran la respuesta del sistema frente a una falla, y es posible ver estos resultados viendo la gráfica de la variable de estado correspondiente.

Luego podemos enunciar algunas conclusiones de acuerdo al comportamiento gráfico observado y comprender mejor la teoría relacionada:

- El regulador de tensión ha operado sobre los valores internos de la máquina y ha logrado la estabilización de E_{fd} , restaurando la tensión de terminales V_i ; actuando ambas como variables de estado de la máquina síncrona, esto fue posible elevando la tensión aplicada al devanado de campo E_{fd} , traduciéndose este aumento en un incremento de flujo en el entrehierro con el cual se aplica un par de frenado sobre el rotor lo que tiende a disminuir la oscilación inicial del ángulo del rotor.
- Aunque el regulador de velocidad empleado es uno aplicado solo a turbinas de vapor, la velocidad angular ω está caracterizada por la constante del

tiempo H de la máquina síncrona, la velocidad es estabilizada una vez que ha sido detectada la diferencia entre la potencia mecánica y eléctrica del sistema ordenando el cierre de la válvula de la turbina y reduciendo por lo tanto la potencia acelerante de la máquina síncrona.

- Estos dos factores anteriormente descritos dan como resultado que los ángulos del rotor de las máquinas terminen oscilando juntos y se diga que existe estabilidad transitoria en el sistema
- El análisis de la influencia de la ubicación de la falla en la incidencia de la estabilidad transitoria se puede deducir de la tabla 5.3, donde se ha visto que aún con los reguladores de tensión y velocidad, existe inestabilidad en la Línea 5, esto es debido a que esta línea, según el flujo de potencia previo visto en el punto 3.4, es la línea por la que fluye la mayor cantidad de energía, este es el motivo por el cual en este tramo es recomendable el uso de temas en paralelo, a fin de disminuir la inestabilidad del sistema en caso de una falla.

Se puede concluir asimismo que las líneas y la carga que transportan son factores decisivos en la estabilidad de un sistema eléctrico de potencia.

Otro modo de dar mas estabilidad al sistema, bajo estas condiciones sería la inclusión de reguladores mas completos, debido a que los usados son modelos simplificados,

- Las cargas dinámicas son configuradas de manera experimental de los eventos reales, con la toma de datos de campo, y cuyos parámetros son ajustables a dichos fenómenos con el propósito de ajustar el cálculo matemático al evento que se observa. Prueba de esto son los estudios de

carga dinámica para fenómenos de estabilidad de larga duración⁽⁵⁾ de los que se deducen factores aplicables para este estudio. En otros estudios⁽⁶⁾ ya se ha generalizado este modelo y se ha deducido un método para hallar los parámetros de las cargas dinámicas y se propone este modelo en forma general para cualquier estudio de estabilidad dado.

- Se ha visto que la composición de las cargas homogéneas se puede variar de acuerdo al estudio específico de una barra dada, por lo cual se pueden conseguir nuevos exponentes de las cargas compuestas.

En el presente trabajo, los parámetros de las cargas dinámicas^[9] usadas están dados a partir de tablas que han explicado el comportamiento de dichas cargas frente a fenómenos transitorios de tensión y/o frecuencia.

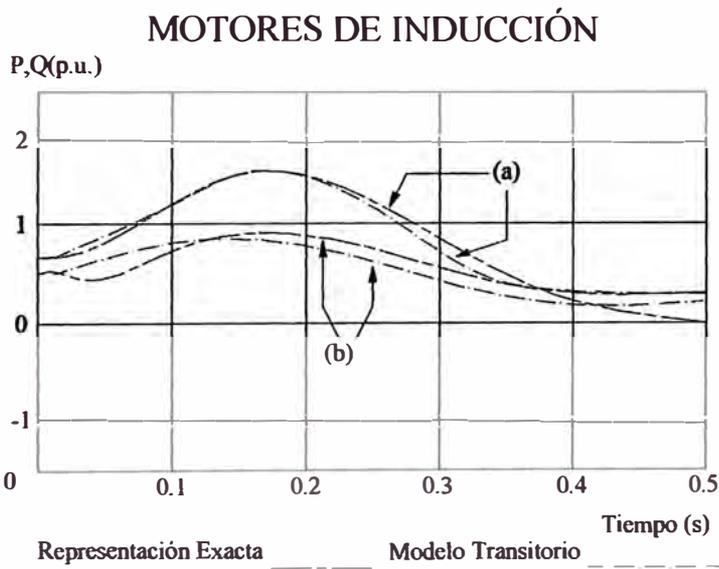


Figura 6.1
Potencia Activa (a) y Reactiva (b) versus tiempo de la carga de un motor de Inducción bajo un disturbio de **frecuencia**

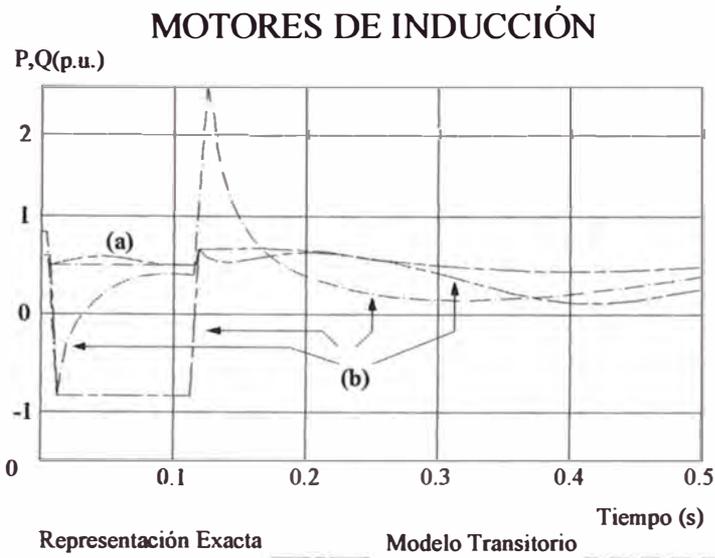


Figura 6.2
Potencia Activa (a) y Reactiva (b) versus tiempo de la carga de un motor de Inducción bajo un disturbio de **tensión**

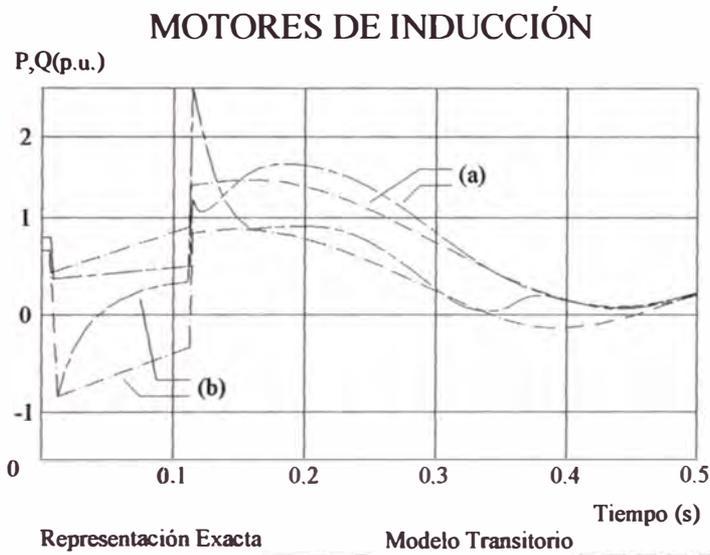


Figura 6.3
Potencia Activa (a) y Reactiva (b) versus tiempo de la carga de un motor de Inducción bajo un disturbio de **tensión y frecuencia**

Con estas figuras, se justifica el hecho de utilizar el modelo propuesto, como se dijo, se deducen tablas de los parámetros de las cargas dinámicas a partir del fenómeno dado.

¿Pero cual es el efecto del modelo de carga dinámica en la estabilidad del sistema de prueba de ocho barras que se está utilizando?

La respuesta la hemos dado ya parcialmente más arriba, en la que la respuesta del sistema con carga dinámica y cuyo modelo transitorio está respondiendo con una tendencia mas precisa frente a su representación exacta, con una falla presente, por lo que se puede concluir que es necesario modelar, lo mejor posible, el efecto de las cargas dinámicas a fin de conseguir un resultado más realista.

En nuestro caso de las ocho barras podemos graficar el comportamiento dinámico de las barras 7 y 8 del programa Matlab *EDRTV.m* para el caso de falla en la Línea 6 muy cerca de la barra 6.

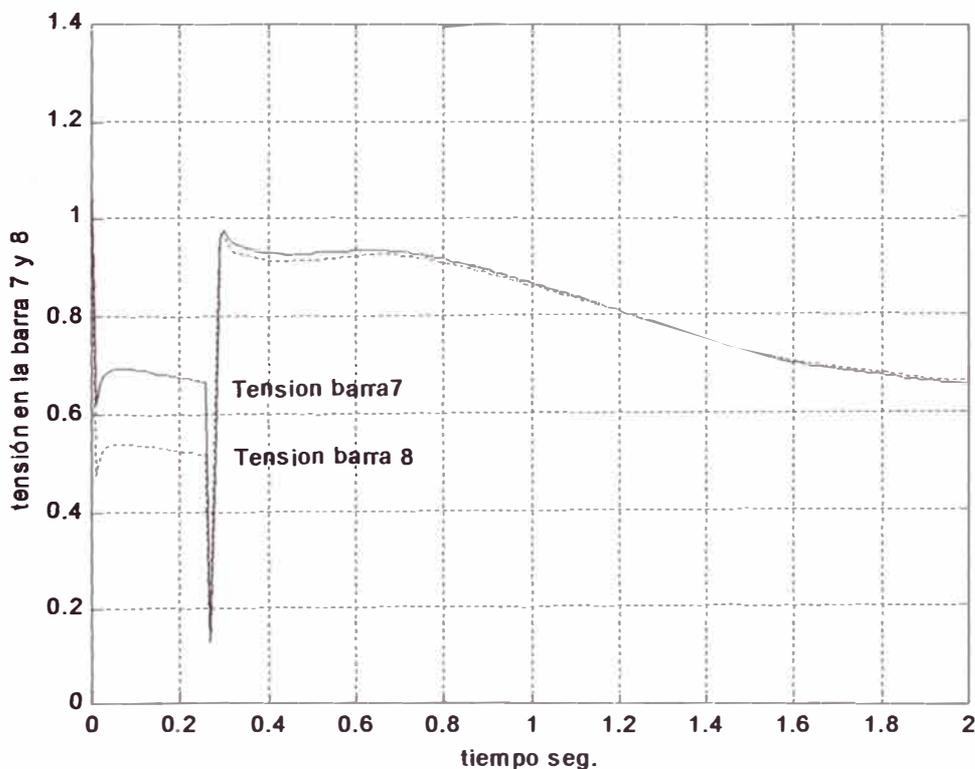


Figura 6.4
Tensiones de las barras dinámicas para el caso de una falla en la Línea 6 muy cerca de la barra 6

4.2 RECOMENDACIONES

- Estudiar la estabilidad, se ha convertido hoy por el uso intensivo de softwares más avanzados en una técnica que permite simular lo mejor posible, el comportamiento de un sistema frente a la ocurrencia de una falla, debido al continuo avance de las investigaciones se supera cualquier expectativa, sin embargo, la técnica de simulación esta expandida a varias ramas de la ingeniería.
- En el modelamiento de la máquina síncrona se usó el modelo de tercer orden para su representación, despreciando de este modo la presencia de los devanados amortiguadores, cuya presencia obviamente es para aumentar la estabilidad de la máquina frente a una falla, este fenómeno es importante debido a que la simulación lograda así es más real y merece ser realizada de manera más detallada.
- Los reguladores de velocidad utilizados aquí, como se dijo antes, son modelos de una turbina a gas, es necesario pues rediseñar estos modelos ó aplicar sistemas con reguladores de velocidad hidráulicos, pero cuyos parámetros deben ser evaluados de manera específica y elegidos a partir de los datos de las máquinas utilizadas, a fin de conseguir la estabilidad deseada, ya sea por algún criterio como el Routh – Horwitz, ó el lugar geométrico de las raíces ó los diagramas de Bode.
- En la Figura 1.1, se describieron muchas áreas de control no vistas aquí, como el control automático de generación (ACG) ó el control suplementario, que pueden ser incluidos en posteriores estudios.

- Existen muchos aspectos que merecen ser ampliados en posteriores estudios como la regulación de nivel de centrales hidráulicas, ó el análisis de la estabilidad siguiendo el criterio de Lyapunov.
- Mejorar el modelo de cargas dinámicas de acuerdo a las nuevas⁽⁶⁾ propuestas sería deseable y evitar el riesgo de que se produzca la singularidad de la Matriz de Admitancias.

GLOSARIO

- (1) Matrices esparcidas ó Sparse matriz
- (2) En cuanto a las unidades baste saber que:

$$v_t = \omega r$$

es decir que dimensionalmente $m/s = rad \cdot m/s$ relacionando unidades lineales con unidades rotacionales

- (3) Existen otros estudios de representación de cargas dinámicas como por ejemplo “Voltage stability analysis using generic dynamic loads models” de Wilson Xu y Yakaout Mansour - IEEE Transactions on Power systems Vol.9 No.1, February 1994.
- (4) Arroyo, J. M. “Estabilidad de Máquinas síncronas” Universidad La Castilla, España – 2002
- (5) “Modelling and identification of nonlinear dynamic loads in power systems” de Karlsson, Daniel y Hill, David J. – IEEE Transactions on power systems Vol.9, No.1, February 1994.
- (6) “Dynamics Load models for Power Systems” Estimation of time-varying parameters during normal operation Romero Navarro, Inés Lund University Sweden – 2002

ANEXOS

ANEXO 2.1 – PROGRAMA *NEWTON.m*

```
%*****
%*           NEWTON           *
%*   Flujo de Potencia Inicial   *
%*
%*****

clc
clear

%=====
%1.0   DATOS INICIALES
%=====

DATA

%=====
%2.0   EJECUCIÓN DE UN PROGRAMA DE FLUJO
%       DE POTENCIA NEWTON-RAPHSON EN
%       COORDENADAS POLARES
%=====

n=size(Y,1);
for i=1:n
    for k=1:n
        G(i,k) = real(Y(i,k));
        B(i,k) = imag(Y(i,k));
    end
end

%2.1   VALORES INICIALES DE VOLTAJE
%
%       'k' POS. DE BARRA
%       V1(k): Iteración (p)
%       V(k):   Iteración (p+1)
%
%       INICIALIZANDO VALORES,
%       HALLANDO ek, fk, dk(DELTA)
for k=1:n
    if abs(V1(k))==0;V1(k)=1; end
end
for k=1:n
    e(k) = real(V1(k));
    f(k) = imag(V1(k));
    d1(k) = angle(V1(k));
end
for k=1:n
    if ID(k)==0 r=k; end
end
```

```
%2.2  FORMACIÓN DEL JACOBIANO, SE HIZO
%      POR ESCAQUES;
%
%      [H] (1,1)          SI ES PV
%
%      [H  N|
%      |    |
%      |J  L|          SI ES PQ
%      (1,1)
%
%'j','k' contadores de la Matriz de Admitancias
%'jj','kk' contadores de la Matriz Jacobiana.

for p=0:150
  jj=1; kk=1;
  for i=1:n
    if i~=r
      for k=1:n
        if k~=r
          if (ID(i)==1) & (ID(k)==1) & (i==k)
            YV = 0;
            for kx=1:n; YV = YV + Y(i,kx)*V1(kx); end
            Qi(k) = -imag(conj(V1(k))*YV);
            H(i,k) = Qi(k) + B(i,k)*abs(V1(k)*V1(k));
            JAC(jj,kk) = H(i,k); kk=kk+1;
          elseif (ID(i)==2) & (ID(k)==2) & (i==k)
            YV=0;
            for kx=1:n; YV = YV + Y(i,kx)*V1(kx); end
            Qi(k) = -imag(conj(V1(k))*YV);
            Pi(k) = real(conj(V1(k))*YV);
            H(i,k) = Qi(k) + B(i,k)*abs(V1(k)*V1(k));
            N(i,k) = -Pi(k) - G(i,k)*abs(V1(k)*V1(k));
            J(i,k) = -Pi(k) + G(i,k)*abs(V1(k)*V1(k));
            L(i,k) = -Qi(i) + B(i,k)*abs(V1(k)*V1(k));
            JAC(jj,kk) = H(i,k); JAC(jj,kk+1) = N(i,k);
            JAC(jj+1,kk) = J(i,k); JAC(jj+1,kk+1) = L(i,k);
            kk=kk+2;
          elseif (ID(i)==1) & (ID(k)==2)
            c(k) = e(k)*G(i,k) - f(k)*B(i,k);
            d(k) = e(k)*B(i,k) + f(k)*G(i,k);
            H(i,k) = e(i)*d(k) - f(i)*c(k);
            N(i,k) = -e(i)*c(k) - f(i)*d(k);
            JAC(jj,kk)=H(i,k); JAC(jj,kk+1)=N(i,k);
            kk=kk+2;
          elseif (ID(i)==2) & (ID(k)==1)
            c(k) = e(k)*G(i,k) - f(k)*B(i,k);
            d(k) = e(k)*B(i,k) + f(k)*G(i,k);
            H(i,k) = e(i)*d(k) - f(i)*c(k);
            J(i,k) = e(i)*c(k) + f(i)*d(k);
            JAC(jj,kk)=H(i,k); JAC(jj+1,kk)=J(i,k);
            kk=kk+1;
          elseif (ID(i)==1) & (ID(k)==1) & (i~=r)
            c(k) = e(k)*G(i,k) - f(k)*B(i,k);
            d(k) = e(k)*B(i,k) + f(k)*G(i,k);
            H(i,k) = e(i)*d(k) - f(i)*c(k);
            JAC(jj,kk)=H(i,k); kk=kk+1;
          elseif (ID(i)==2) & (ID(k)==2) & (i~=r)
            c(k) = e(k)*G(i,k) - f(k)*B(i,k);
            d(k) = e(k)*B(i,k) + f(k)*G(i,k);
            H(i,k) = e(i)*d(k) - f(i)*c(k);
            N(i,k) = -e(i)*c(k) - f(i)*d(k);
            J(i,k) = -N(i,k); L(i,k)=H(i,k);
            JAC(jj,kk) = H(i,k); JAC(jj,kk+1) = N(i,k);
            JAC(jj+1,kk)=J(i,k); JAC(jj+1,kk+1)= L(i,k);
            kk=kk+2;
          end
        end
      end
    end
  end
  if ID(i)==2
    jj=jj+2;
  end
end
```

```
elseif ID(i)==1
    jj=jj+1;
end
kk=1;
end
```

%2.3 Hallando la Matriz Columna DPQ1

```
jj=1;
for i=1:n
    if i~=r
        if ID(i)==1
            YV=0;
            for kx=1:n; YV = YV + Y(i,kx)*V1(kx); end
            DPQ1(jj,1) = real(S(i)) - real(conj(V1(i))*YV);
            jj=jj+1;
        elseif ID(i)==2
            YV=0;
            for kx=1:n; YV = YV + Y(i,kx)*V1(kx); end
            DPQ1(jj,1) = real(S(i)) - real(conj(V1(i))*YV);
            DPQ1(jj+1,1) = imag(S(i)) + imag(conj(V1(i))*YV);
            jj=jj+2;
        end
    end
end
```

%2.4 Hallando la Matriz columna DdV

```
% Incrementos de dk y Vk
DdV = -inv(JAC)*DPQ1;
```

%2.5 Identificando los incrementos

```
jj=1;
for i=1:n
    if i~=r
        if ID(i)==1
            d2(i) = DdV(jj) + d1(i);
            jj=jj+1;
        elseif ID(i)==2
            d2(i) = DdV(jj) + d1(i);
            V(i) = V1(i)*(1 + DdV(jj+1));
            jj=jj+2;
        end
    end
end
for i=1:n
    if ID(i)==1
        V(i) = abs(V1(i))*exp(j*d2(i));
    elseif ID(i)==2
        V(i) = abs(V(i))*exp(j*d2(i));
    elseif ID(i)==0
        V(i) = V1(i);
    end
end
jj=1;
for i=1:n
    if i~=r
        if ID(i)==1
            YV=0;
            for kx=1:n YV = YV + Y(i,kx)*V(kx); end
            DPQ2(jj,1) = real(S(i)) - real(conj(V(i))*YV);
            jj=jj+1;
        elseif ID(i)==2
            YV=0;
            for kx=1:n YV = YV + Y(i,kx)*V(kx); end
            DPQ2(jj,1) = real(S(i)) - real(conj(V(i))*YV);
            DPQ2(jj+1,1)=imag(S(i)) + imag(conj(V(i))*YV);
            jj=jj+2;
        end
    end
end
end
abs(abs(DPQ1)-abs(DPQ2))<= to;
if ans==ones(1)
```

```
        break
    end
    V1 = V;
    DPQ1 = DPQ2;
    d1 = d2;
end
if p==200 break; end
```

```
=====
%3.0    FIN DE LA ITERACIÓN NEWTON-RAPHSON
=====
```

```
p, d2 = d2*180/pi;
for i=1:n
    fprintf('Barra = %3.0f \n',i)
    fprintf('Tensión = %8.6f \n',abs(V(i)))
    fprintf('Ángulo = %8.6f °\r\r',d2(i))
end
```

```
=====
%4.0    FLUJO DE POTENCIA DEL SISTEMA DE
%        ACUERDO A LA TOPOLOGIA DE LA RED
=====
```

```
S14 = conj(conj(V(1))*(V(4)-V(1))*Y(1,4))
S41 = conj(conj(V(4))*(V(1)-V(4))*Y(4,1))
S25 = conj(conj(V(2))*(V(5)-V(2))*Y(2,5))
S52 = conj(conj(V(5))*(V(2)-V(5))*Y(5,2))
S36 = conj(conj(V(3))*(V(6)-V(3))*Y(3,6))
S63 = conj(conj(V(6))*(V(3)-V(6))*Y(6,3))
S45 = conj(conj(V(4))*(V(5)-V(4))*Y(4,5) + conj(V(4))*V(4)*b45)
S54 = conj(conj(V(5))*(V(4)-V(5))*Y(5,4) + conj(V(5))*V(5)*b54)
S46 = conj(conj(V(4))*(V(6)-V(4))*Y(4,6) + conj(V(4))*V(4)*b46)
S64 = conj(conj(V(6))*(V(4)-V(6))*Y(6,4) + conj(V(6))*V(6)*b64)
S47 = conj(conj(V(4))*(V(7)-V(4))*Y(4,7))
S74 = conj(conj(V(7))*(V(4)-V(7))*Y(7,4))
S48 = conj(conj(V(4))*(V(8)-V(4))*Y(4,8))
S84 = conj(conj(V(8))*(V(4)-V(8))*Y(8,4))
S57 = conj(conj(V(5))*(V(7)-V(5))*Y(5,7) + conj(V(5))*V(5)*b57)
S75 = conj(conj(V(7))*(V(5)-V(7))*Y(7,5) + conj(V(7))*V(7)*b75)
S68 = conj(conj(V(6))*(V(8)-V(6))*Y(6,8) + conj(V(6))*V(6)*b68)
S86 = conj(conj(V(8))*(V(6)-V(8))*Y(8,6) + conj(V(8))*V(8)*b86)
S78 = conj(conj(V(7))*(V(8)-V(7))*Y(7,8))
S87 = conj(conj(V(8))*(V(7)-V(8))*Y(8,7))
```

```
S1 = S14, S2 = S25, S3 = S36,
S4 = S41 + S45 + S46 + S47 + S48
S5 = S52 + S54 + S57
S6 = S63 + S64 + S68
S7 = S74 + S75 + S78
S8 = S84 + S87 + S86
```

ANEXO 2.2 – PROGRAMA RT.m

```
%Programa RT.m
%REGULADOR DE TENSION

%=====
%1.0  ENTRADA DE DATOS
%=====

KA = 4.8;
TA1 = 1.05;
TA2 = 0.8;
TA3 = 1;
KE = 0.8;
TE = 1;
TG = 1;

%=====
%2.0  VALORES INICIALES CON CARGA EN t=0.
%=====

VT0 = 1;
VFD0 = 1;
VTAB0 = VFD0*KE;
VTB0 = VTAB0*(1 - TA3/TA2);
VAA0 = VTAB0;
VTA0 = VAA0;
EPSV0 = 0;
%Aplicación de una perturbación:
VREF = EPSV0 + VT0 + 0.5;

%=====
%3.0  PRESENTACIÓN DE LAS MATRICES DE
%      LAS ECUACIONES DIFERENCIALES
%=====

y(:,1)=[VT0; VTA0; VTB0; VFD0];
t(1)=0; n=1; h=0.01; ti=n*h;

C=[-1/TG  0  0          1/TG          0          0
   -KA    0  0          0              0          0
    0     0 -1/TA2     0              (1-(TA3/TA2))/TA2  0
    0     0  0         -KE/TE         0          1/TE];

F=[0; VREF*KA; 0; 0];

%=====
%4.0  DATOS DEL PRIMER PASO DE ITERACIÓN
%=====

EPSV = EPSV0;
VT = VT0;
VTA = VTA0;
VTB = VTB0;
VFD = VFD0;

%=====
%5.0  INTEGRACIÓN NUMERICA POR EL MÉTODO
%      DE RUNGE-KUTTA DE CUARTO ORDEN
%=====

while ti<=10
    EPSV = -VT + VREF;
    VAA = VTA + (EPSV*KA*TA1);
    VTAB = VTB + VAA*(TA3/TA2);
    z = [VAA; VTAB];
    k1 = h*FUN(y(:,n), z, C, F);
    k2 = h*FUN(y(:,n) + k1/2, z, C, F);
    k3 = h*FUN(y(:,n) + k2/2, z, C, F);
    k4 = h*FUN(y(:,n) + k3, z, C, F);
    y(:,n+1) = y(:,n) + (k1 + 2*k2 + 2*k3 + k4)/6;
    ti = ti + h;
end
```

```
t(n+1)=n*h; ti=n*h; n=n+1;
%Extraccion para la iteración siguiente
VT = y(1,n);
VTA = y(2,n);
VTB = y(3,n);
end
subplot(2,2,1), plot(t,y(1,:)),grid
ylabel('VT')
subplot(2,2,2), plot(t,y(2,:)),grid
ylabel('VTA')
subplot(2,2,3), plot(t,y(3,:)),grid
ylabel('VTB')
subplot(2,2,4), plot(t,y(4,:)),grid
xlabel('seg.'),ylabel('VFD')
```

SUBPROGRAMA SCRIPT – FUNC.m

```
% FUNCION
function f = FUNC(y, z, C, F)
f = C*[y;z] + F;
```

SUBPROGRAMA SCRIPT – FUN.m

```
% FUNCION
function f = FUN(z, C, F)
f = C*z + F;
```

Estos scripts ó subprogramas son usados por todos los demás programas.

ANEXO 2.3 – PROGRAMA RV.m

```
%Programa RV.m
%REGULADOR DE VELOCIDAD

%=====
%1.0  ENTRADA DE DATOS
%=====

TM = 10;
T1 = 0.2;
T2 = 0.5;
T3 = 3;
R = 0.03;

%=====
%2.0  VALORES INICIALES CON CARGA EN t=0
%=====

PE0 = 1;
PM0 = PE0;
VA0 = PM0;
VE0 = VA0;
VB0 = PM0;
Vw = 1;

%Aplicación de una perturbación
PREF = Vw/R + VE0 + 0.5;

%=====
%3.0  PRESENTACIÓN DE LAS MATRICES DE
%      LAS ECUACIONES DIFERENCIALES
%=====

y(:,1)=[Vw; PM0; VA0; VB0];
t(1)=0; n=1; h=0.01; ti=n*h;

C=[0          1/TM   0      0
   0          -1/T2  1/T2   0
  -1/(R*T1)   0      -1/T1  0
   0          1/T3   0     -1/T3];

F=[-PE0/TM; 0; PREF/T1; 0];

%=====
%4.0  INTEGRACIÓN NUMERICA POR EL MÉTODO
%      DE RUNGE-KUTTA DE CUARTO ORDEN
%=====

while ti<=10
    k1 = h*FUNC(y(:,n), C, F);
    k2 = h*FUNC(y(:,n)+k1/2, C, F);
    k3 = h*FUNC(y(:,n)+k2/2, C, F);
    k4 = h*FUNC(y(:,n)+k3, C, F);
    y(:,n+1)=y(:,n)+(k1 + 2*k2 + 2*k3 + k4)/6;
    t(n+1)=n*h; ti=n*h; n=n+1;
end
subplot(2,2,1), plot(t,y(1,:)),grid
ylabel('W')
subplot(2,2,2), plot(t,y(2,:)),grid
ylabel('PM')
subplot(2,2,3), plot(t,y(3,:)),grid
ylabel('VA')
subplot(2,2,4), plot(t,y(4,:)),grid
xlabel('seg. '),ylabel('VB')
```

ANEXO 3.1 – PROGRAMA *DATA.m*

```
%DATA
%REUNE TODOS LOS DATOS DEL SISTEMA
%ELÉCTRICO DE POTENCIA

=====
%1.0  DATOS GENERALES
=====

j = sqrt(-1);
VB = 230;      %Voltaje base en kV
SB = 500;     %Potencia base en MVA
ZB = VB^2/SB; %Impedancia base en Ohms
f = 60;       %Frecuencia en Hz
wo = 2*pi*f;  %Velocidad angular rad/s

to = 1e-7;    %Tolerancia
T = 10;      %Período de análisis (s)
tf = 0.25;   %Tiempo de Falla (s)
tr = 0.55;   %Tiempo de Reconexión (s)
h = 0.01;    %Paso de integración

=====
%2.0  DATOS DE LINEAS DE TRANSMISIÓN
=====

%2.1  Longitudes de Líneas (km)
l1 = 500;
l2 = 100;
l3 = 60;

%2.2  Resistencias de Líneas (Ohm/km)
r1 = 0.127;
r2 = 0.131;
r3 = 0.145;

%2.3  Inductancias (Henrios/km)
L1 = 1.25e-3;
L2 = 1.18e-3;
L3 = 1.11e-3;

%2.4  Capacitancias (F/km)
% solo en líneas largas
C1 = 1.1e-11;
C2 = 0.8e-11;

=====
%3.0  DATOS DE TRANSFORMADORES
=====

%3.1  Potencias nominales en MVA
St1 = 500; St2 = 400; St3 = 300;

%3.2  Reactancia de CC. en porcentaje
xt1 = 0.15;
xt2 = 0.15;
xt3 = 0.12;

%3.3  Puesta a base del sistema p.u.
zt1 = xt1*SB/St1;
zt2 = xt2*SB/St2;
zt3 = xt3*SB/St3;

=====
%4.0  OBTENCIÓN DE LA Ybarra
=====

%4.1  Líneas 1 y 6
r1 = r1*l1/ZB; x1 = wo*L1*l1/ZB;
y45 = 1/(r1 + j*x1); y54 = y45;
```

y46 = y45; y64 = y46;
b1 = wo*C1^11*ZB;
b45 = j*b1/2; b54 = b45;
b46 = b45; b64 = b46;

%4.2 Lineas 2 y 7
r2 = r2^12/ZB; x2 = wo^12^12/ZB;
y57 = 1/(r2 + j*x2); y75 = y57;
y68 = y57; y86 = y68;
b2 = wo^C2^12*ZB;
b57 = j*b2/2; b75 = b57;
b68 = b57; b86 = b68;

%4.3 Lineas 3, 4 y 5
r3 = r3^13/ZB; x3 = wo^13^13/ZB;
y47 = 1/(r3 + j*x3); y74 = y47;
y78 = y47; y87 = y78;
y48 = y47; y84 = y48;

%4.4 Transformadores
y14 = 1/(j^zt1); y41 = y14;
y25 = 1/(j^zt2); y52 = y25;
y36 = 1/(j^zt3); y63 = y36;

%4.5 Diagonal principal de Ybarra
Y11 = y14; Y22 = y25; Y33 = y36;
Y44 = y41 + y45+b45 + y46+b46 + y47 + y48;
Y55 = y52 + y54+b54 + y57+b57;
Y66 = y63 + y64+b64 + y68+b68;
Y77 = y74 + y75+b75 + y78;
Y88 = y84 + y86+b86 + y87;

%4.6 Matriz Ybarra para el Flujo de Potencia
Y=[Y11 0 0 -y14 0 0 0 0
0 Y22 0 0 -y25 0 0 0
0 0 Y33 0 0 -y36 0 0
-y14 0 0 Y44 -y45 -y46 -y47 y48
0 -y25 0 -y45 Y55 0 y57 0
0 0 -y36 -y46 0 Y66 0 -y68
0 0 0 -y47 -y57 0 Y77 -y78
0 0 0 -y48 0 -y68 -y78 Y88];

%-----
%5.0 IDENTIFICACIÓN DE BARRAS
%-----

ID=[0 2 2 1 2 2 2 2];

%-----
%6.0 VOLTAJES DE BARRA
%-----

V1=[264.5 0 0 241.5 0 0 0 0]/VB;

%-----
%7.0 POTENCIA INYECTADA NETA
% Sneto = Sgeneración - Scarga
%-----

S=[0 320+j*240 240+j*180 -450 0 0 -225-j*75 -150 -j*55]/MB;

%-----
%8.0 DATOS DE LAS MÁQUINAS SINCRONAS
%-----

%Potencia Nominal de las Máquinas (MVA)
Pn = [500; 400; 300];

%Constante de Inercia reducida a la
%Base del sistema (s)
Hm = [6.9; 7.4; 8.5].^Pn/ZB;

%Reactancia de Eje Directo Xd (p.u)
Xd = [1.25; 1.23; 1.2].*Pn/SB;

%Reactancia de Eje en Cuadratura Xq (p.u)
Xq = [1.16; 1.15; 1.14].*Pn/SB;

%Reactancia subtransitoria
%de Eje Directo X'd (p.u)
Xpd= [0.23; 0.25; 0.26].*Pn/SB;

%Reactancia subtransitoria
%de Eje en Cuadratura X'q (p.u)
Xpq= [0.14; 0.13; 0.15].*Pn/SB;

%Constante de tiempo transitoria
%del devanado de excitación en el
%eje directo (s)
Td1= 2.1; Td2= 2.15; Td3= 2.2;

Td =[Td1; Td2; Td3];
Tm = 2*Hm;
Tm1= Tm(1); Tm2= Tm(2); Tm3= Tm(3);

=====

%9.0 DATOS DE LOS REGULADORES DE TENSION

=====

% Central 1
Ka1=4.7; Ta11=1; Ta21=0.75; Ta31=1;
Kel=0.8; Tel=1; Tg1=1;
% Central 2
Ka2=4.5; Ta12=1.05; Ta22=0.77; Ta32=1;
Ke2=0.85; Te2=1.04; Tg2=1.2;
% Central 3
Ka3=4.6; Ta13=1; Ta23=0.8; Ta33=1;
Ke3=0.75; Te3=1.05; Tg3=1.1;

=====

%10.0 DATOS DE LOS REGULADORES DE VELOCIDAD

=====

% Central 1
T11=0.1; T21=0.01; T31=3; R1=0.05;
% Central 2
T12=0.1; T22=0.01; T32=3; R2=0.05;
% Central 3
T13=0.1; T23=0.01; T33=3; R3=0.05;
Ka = [Ka1; Ka2; Ka3];
Ta1 = [Ta11; Ta12; Ta13];
Ta2 = [Ta21; Ta22; Ta23];
Ta3 = [Ta31; Ta32; Ta33];
Ke = [Kel; Ke2; Ke3];
Te = [Tel; Te2; Te3];
Tg = [Tg1; Tg2; Tg3];
T1 = [T11; T12; T13];
T2 = [T21; T22; T23];
T3 = [T31; T32; T33];
R = [R1; R2; R3];

=====

%11.0 PARÁMETROS DE LAS CARGAS DINÁMICAS

% Barra 7: Residencial

% Barra 8: Comercial

=====

A7 = 1.72; B7 = 1.93; C7 = 0.43; D7 = 1.57;
A8 = 1.26; B8 = 7.57; C8 = 1.74; D8 = 5.76;

ANEXO 4.1 - PROGRAMA ENCF.m

%Estabilidad Natural con Cargas Fijas (Incidente 1)

Newton

pause

S = [S1; S2; S3];

Yc4 = conj(-S4)/(abs(V(4)))^2

Yc7 = conj(-S7)/(abs(V(7)))^2

Yc8 = conj(-S8)/(abs(V(8)))^2

=====

%1.0 CÁLCULO DE LAS MATRICES EXPANDIDAS
% DEL INCIDENTE 1

% - ANTES DE LA FALLA: Yn

% - DURANTE LA FALLA: Yf

% - SUPERADA LA FALLA: Ys

=====

%1.1 Antes de la Falla

Y11 = 1/(j*zt1 + j*Xq(1));

Y22 = 1/(j*zt2 + j*Xq(2));

Y33 = 1/(j*zt3 + j*Xq(3));

Y44 = Y11 + y45+b45 + y47 + Yc4 + y48 + y46+b46;

Y55 = Y22 + y57+b57 + y45+b54;

Y66 = Y33 + y64+b64 + y68+b68;

Y77 = y75+b75 + Yc7 + y78 + y74;

Y88 = y86+b86 + y84 + y78 + Yc8;

Yn1 = [

Y11 0 0
0 Y22 0
0 0 Y33];

Yn2 = [

-Y11 0 0 0 0
0 -Y22 0 0 0
0 0 -Y33 0 0];

Yn3 = [

-Y11 0 0
0 -Y22 0
0 0 -Y33
0 0 0
0 0 0];

Yn4 = [

Y44 -y45 -y46 -y47 -y48
-y45 Y55 0 -y57 0
-y46 0 Y66 0 -y68
-y47 -y57 0 Y77 -y78
-y48 0 -y68 -y78 Y88];

Yn = Yn1 - Yn2*inv(Yn4)*Yn3;

%1.2 DURANTE LA FALLA

Yf1 = Yn1;

Yf2 = [

-Y11 0 0 0
0 -Y22 0 0
0 0 -Y33 0];

Yf3 = [

-Y11 0 0
0 -Y22 0
0 0 -Y33
0 0 0];

Yf4 = [

Y44 -y45 -y46 -y47
-y45 Y55 0 -y57
-y46 0 Y66 0
-y47 -y57 0 Y77];

Yf = Yf1 - Yf2*inv(Yf4)*Yf3;


```
if ti>tr      Y=Yn; end
z      = [Pe; Ei];
k1     = h*FUN(y(:,n),      z, C, P);
k2     = h*FUN(y(:,n) + k1/2, z, C, P);
k3     = h*FUN(y(:,n) + k2/2, z, C, P);
k4     = h*FUN(y(:,n) + k3,  z, C, P);
y(:,n+1) = y(:,n) + (k1 + 2*k2 + 2*k3 + k4)/6;
t(n+1)=n*h; ti=n*h, n=n+1;

%4.1 Extracción de datos
Epq    = [y(7,n);y(8,n);y(9,n)];
do     = [y(1,n);y(2,n);y(3,n)];
I      = Y*(Eq.*exp(j*do));
Id     = abs(I).*sin(do - angle(I));
Eq     = Epq + (Xq - Xpd).*Id;

%4.2 Valores para la iteración siguiente
Pe     = real((Eq.*exp(j*do)).*conj(I));
Ei     = Eq + (Xd - Xq).*Id;
end

%=====
%5.0   SALIDA DE RESULTADOS
%=====

subplot(3,2,1), plot(t,y(1,:)*180/pi),
ylabel('d1 en DEG')
subplot(3,2,3), plot(t,y(2,:)*180/pi),
ylabel('d2 en DEG')
subplot(3,2,5), plot(t,y(3,:)*180/pi),
ylabel('d3 en DEG')
subplot(3,2,2), plot(t,y(4,:)*wo),
ylabel('w1 en rd/s')
subplot(3,2,4), plot(t,y(5,:)*wo),
ylabel('w2 en rd/s')
subplot(3,2,6), plot(t,y(6,:)*wo),
ylabel('w3 en rd/s'), xlabel('tiempo en segs.')
pause

clf, hold off
subplot(3,2,1), plot(t,y(7,:)),
ylabel('E''q1 en pu')
subplot(3,2,3), plot(t,y(8,:)),
ylabel('E''q2 en pu')
subplot(3,2,5), plot(t,y(9,:)),
ylabel('E''q3 en pu')
subplot(3,2,2),plot(t, (y(1,:)-y(2,:))*180/pi)
ylabel('d1 - d2 en DEGs')
subplot(3,2,4),plot(t, (y(2,:)-y(3,:))*180/pi)
ylabel('d2 - d3 en DEGs')
subplot(3,2,6),plot(t, (y(3,:)-y(1,:))*180/pi)
ylabel('d3 - d1 en DEGs')
```

ANEXO 4.2 - PROGRAMA ENCD.m

%Estabilidad Natural con Cargas Dinámicas (Incidente 1)

Newton

pause

S = [S1; S2; S3];

Yc4 = conj(-S4)/(abs(V(4)))^2

Yc7 = conj(-S7)/(abs(V(7)))^2

Yc8 = conj(-S8)/(abs(V(8)))^2

```
=====
%1.0 CONFIGURANDO LAS CARGAS DINÁMICAS
% BARRA 7: RESIDENCIAL
% BARRA 8: COMERCIAL
%=====
```

Po7 = real(-S7); Qo7 = imag(-S7);

Po8 = real(-S8); Qo8 = imag(-S8);

Vo7 = abs(V(7)); Vo8 = abs(V(8));

```
=====
%2.0 CÁLCULO DE LAS MATRICES EXPANDIDAS
% DEL INCIDENTE 1
% - ANTES DE LA FALLA: Yn
% - DURANTE LA FALLA: Yf
% - SUPERADA LA FALLA: Ys
%=====
```

%2.1 Antes de la Falla

Y11 = 1/(j*zt1 + j*Xq(1));

Y22 = 1/(j*zt2 + j*Xq(2));

Y33 = 1/(j*zt3 + j*Xq(3));

Y44 = Y11 + y45+b45 + y47 + Yc4 + y48 + y46+b46;

Y55 = Y22 + y57+b57 + y45+b54;

Y66 = Y33 + y64+b64 + y68+b68;

Y77 = y75+b75 + Yc7 + y78 + y74;

Y88 = y86+b86 + y84 + y78 + Yc8;

Yn1 = [
Y11 0 0
0 Y22 0
0 0 Y33];

Yn2 = [
-Y11 0 0 0 0
0 -Y22 0 0 0
0 0 -Y33 0 0];

Yn3 = [
-Y11 0 0
0 -Y22 0
0 0 -Y33
0 0 0
0 0 0];

Yn4 = [
Y44 -y45 -y46 -y47 -y48
-y45 Y55 0 -y57 0
-y46 0 Y66 0 -y68
-y47 -y57 0 Y77 -y78
-y48 0 -y68 -y78 Y88];

Yn = Yn1 - Yn2*inv(Yn4)*Yn3;

%2.2 DURANTE LA FALLA

Yf1 = Yn1;

Yf2 = [
-Y11 0 0 0
0 -Y22 0 0
0 0 -Y33 0];

Yf3 = [
-Y11 0 0
0 -Y22 0

```

0      0      -Y33
0      0      0];
Yf4 = [
Y44    -y45   -y46   -y47
-y45   Y55    0      -y57
-y46    0      Y66    0
-y47   -y57   0      Y77];

```

```
Yf = Yf1 - Yf2*inv(Yf4)*Yf3;
```

%2.3 SUPERADA LA FALLA

```

Y77 = Y77 - y78;
Y88 = Y88 - y78;
Ys1 = Yn1; Ys2 = Yn2; Ys3 = Yn3;
Ys4 = [
Y44    -y45   -y46   -y47   -y48
-y45   Y55    0      -y57   0
-y46    0      Y66    0      -y68
-y47   -y57   0      Y77    0
-y48    0      -y68   0      Y88];

```

```
Ys = Ys1 - Ys2*inv(Ys4)*Ys3;
```

```

%=====
%3.0 CÁLCULOS INICIALES EN t(0-) Y
% t(0+) DE LA Pe, Pm, do
% INICIALIZACIÓN DEL SISTEMA
%=====

```

%3.1 Cálculo de 'do', Pe(0-) y Pm(0-)

```

Vt = [V(1); V(2); V(3)];
I = conj(S./Vt);
Eq = Vt + j*Xq.*I;
Pe = real(Eq.*conj(I));
Pm = Pe; Pmo = Pm;
do = angle(Eq); dm = (do*180/pi)';
Eq = abs(Eq); Em = (Eq)';
Id = abs(I).*sin(do - angle(I));
Epq = Eq - (Xq - Xpd).*Id;
Efd = Eq + (Xd - Xq).*Id; %|Efd| = Ei(0-)

```

%2.2 Cálculo de Pe(0+)

```

% Aún no se manifiestan los efectos
% de los reguladores
I = Yf*(Eq.*exp(j*do));
Id = abs(I).*sin(do - angle(I));
Eq = Epq + (Xq - Xpd).*Id;
Pe = real((Eq.*exp(j*do)).*conj(I));
Ei = Eq + (Xd - Xq).*Id; %Ei en t(0+)
Vt = Eq.*exp(j*do) - j*Xq.*I; %Vt en t(0+)
Vt = abs(Vt);
w = [1;1;1];

```

```

%=====
%4.0 CREACIÓN DE LAS MATRICES DEL SISTEMA
%=====

```

```

t(1)=0; n=1; ti=n*h;
y(:,1) = [do; w; Epq];

```

```

C=[0 0 0 wo 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 wo 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 wo 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1/Tm1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1/Tm2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1/Tm3 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1/Td1 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1/Td2 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

```

```
P=[-wo; -wo; -wo; Pm./Tm; Efd./Td];
```

```
=====
%5.0 INTEGRACIÓN NUMERICA MEDIANTE EL
% MÉTODO ITERATIVO DE RUNGE-KUTTA
% DE CUARTO ORDEN
%=====

while ti <= T
    if ti<=tf Yff; end
    if tf<ti<=tr Yss; end
    if ti>tr Ynn; end
    z = [Pe; Ei];
    k1 = h*FUN(y(:,n), z, C, P);
    k2 = h*FUN(y(:,n) + k1/2, z, C, P);
    k3 = h*FUN(y(:,n) + k2/2, z, C, P);
    k4 = h*FUN(y(:,n) + k3, z, C, P);
    y(:,n+1) = y(:,n) + (k1 + 2*k2 + 2*k3 + k4)/6;
    t(n+1)=n*h; ti=n*h, n=n+1;

    %4.1 Extracción de datos
    Epq = [y(7,n);y(8,n);y(9,n)];
    do = [y(1,n);y(2,n);y(3,n)];
    I = Y*(Eq.*exp(j*do));
    Id = abs(I).*sin(do - angle(I));
    Eq = Epq + (Xq - Xpd).*Id;

    %4.2 Valores para la iteración siguiente
    Pe = real((Eq.*exp(j*do)).*conj(I));
    Ei = Eq + (Xd - Xq).*Id;
end
```

```
=====
%6.0 SALIDA DE RESULTADOS
%=====

subplot(3,2,1), plot(t,y(1,:)*180/pi)
ylabel('d1 en DEG')
subplot(3,2,3), plot(t,y(2,:)*180/pi)
ylabel('d2 en DEG')
subplot(3,2,5), plot(t,y(3,:)*180/pi)
ylabel('d3 en DEG')
subplot(3,2,2), plot(t,y(4,:)*wo)
ylabel('w1 en rd/s')
subplot(3,2,4), plot(t,y(5,:)*wo)
ylabel('w2 en rd/s')
subplot(3,2,6), plot(t,y(6,:)*wo)
ylabel('w3 en rd/s'), xlabel('tiempo en segs.')
clf, hold off

subplot(3,2,1), plot(t,y(7,:)),
ylabel('E''q1 en pu')
subplot(3,2,3), plot(t,y(8,:)),
ylabel('E''q2 en pu')
subplot(3,2,5), plot(t,y(9,:)),
ylabel('E''q3 en pu')
subplot(3,2,2),plot(t,(y(1,:)-y(2,:))*180/pi)
ylabel('d1 - d2 en DEGS')
subplot(3,2,4),plot(t,(y(2,:)-y(3,:))*180/pi)
ylabel('d2 - d3 en DEGS')
subplot(3,2,6),plot(t,(y(3,:)-y(1,:))*180/pi)
ylabel('d3 - d1 en DEGS')
```

SUBPROGRAMA SCRIPT – *Ynn.m*

```
w = [y(4,n);y(5,n);y(6,n)];
fpu = (w(1) + w(2) + w(3))/3;
Vc = -inv(Yn4)*Yn3*(Eq.*exp(j*do));
V7 = abs(Vc(4)); V8 = abs(Vc(5));
P7 = Po7*((V7/Vo7)^A7)*fpu^B7;
Q7 = Qo7*((V7/Vo7)^C7)*fpu^D7;
P8 = Po8*((V8/Vo8)^A8)*fpu^B8;
Q8 = Qo8*((V8/Vo8)^C8)*fpu^D8;
Yc7 = (P7 - j*Q7)/V7^2;
Yc8 = (P8 - j*Q8)/V8^2;
Y77 = y75+b75 + Yc7 + y78 + y74;
Y88 = y68+b68 + y48 + y78 + Yc8;
Yn4 = [
    Y44    -y45    -y46    -y47    -y48
    -y45    Y55     0      -y57     0
    -y46     0      Y66     0      -y68
    -y47    -y57     0      Y77    -y78
    -y48     0      -y68    -y78    Y88];
Y = Yn1 - Yn2*inv(Yn4)*Yn3;
```

SUBPROGRAMA SCRIPT – *Yff.m*

```
w = [y(4,n);y(5,n);y(6,n)];
fpu = (w(1) + w(2) + w(3))/3;
Vc = -inv(Yf4)*Yf3*(Eq.*exp(j*do));
V7 = abs(Vc(4));
P7 = Po7*((V7/Vo7)^A7)*fpu^B7;
Q7 = Qo7*((V7/Vo7)^C7)*fpu^D7;
Yc7 = (P7 - j*Q7)/V7^2;
Y77 = y75+b75 + Yc7 + y78 + y74;
Yf4 = [
    Y44    -y45    -y46    -y47
    -y45    Y55     0      -y57
    -y46     0      Y66     0
    -y47    -y57     0      Y77];
Y = Yf1 - Yf2*inv(Yf4)*Yf3;
```

SUBPROGRAMA SCRIPT – *Yss.m*

```
w = [y(4,n);y(5,n);y(6,n)];
fpu = (w(1) + w(2) + w(3))/3;
Vc = -inv(Ys4)*Ys3*(Eq.*exp(j*do));
V7 = abs(Vc(4)); V8 = abs(Vc(5));
P7 = Po7*((V7/Vo7)^A7)*fpu^B7;
Q7 = Qo7*((V7/Vo7)^C7)*fpu^D7;
P8 = Po8*((V8/Vo8)^A8)*fpu^B8;
Q8 = Qo8*((V8/Vo8)^C8)*fpu^D8;
Yc7 = (P7 - j*Q7)/V7^2;
Yc8 = (P8 - j*Q8)/V8^2;
Y77 = y75+b75 + Yc7 + y74;
Y88 = y68+b68 + y48 + Yc8;
Ys4 = [
    Y44    -y45    -y46    -y47    -y48
    -y45    Y55     0      -y57     0
    -y46     0      Y66     0      -y68
    -y47    -y57     0      Y77     0
    -y48     0      -y68     0      Y88];
Y = Ys1 - Ys2*inv(Ys4)*Ys3;
```

ANEXO 4.3 - PROGRAMA EDRT1.m

```
% Estabilidad Dinámica con Reguladores de Tensión
% Incidente 1
```

Newton

pause

S = [S1; S2; S3];

Yc4 = conj(-S4)/(abs(V(4)))^2

Yc7 = conj(-S7)/(abs(V(7)))^2

Yc8 = conj(-S8)/(abs(V(8)))^2

```
=====
%1.0 CONFIGURANDO LAS CARGAS DINÁMICAS
% BARRA 7: RESIDENCIAL
% BARRA 8: COMERCIAL
%=====
```

Po7 = real(-S7); Qo7 = imag(-S7);

Po8 = real(-S8); Qo8 = imag(-S8);

Vo7 = abs(V(7)); Vo8 = abs(V(8));

```
=====
%2.0 CÁLCULO DE LAS MATRICES EXPANDIDAS
% DEL INCIDENTE 1
% - ANTES DE LA FALLA: Yn
% - DURANTE LA FALLA: Yf
% - SUPERADA LA FALLA: Ys
%=====
```

%2.1 Antes de la Falla

Y11 = 1/(j*zt1 + j*Xq(1));

Y22 = 1/(j*zt2 + j*Xq(2));

Y33 = 1/(j*zt3 + j*Xq(3));

Y44 = Y11 + y45+b45 + y47 + Yc4 + y48 + y46+b46;

Y55 = Y22 + y57+b57 + y45+b54;

Y66 = Y33 + y64+b64 + y68+b68;

Y77 = y75+b75 + Yc7 + y78 + y74;

Y88 = y86+b86 + y84 + y78 + Yc8;

Yn1 = [

Y11 0 0
0 Y22 0
0 0 Y33];

Yn2 = [

-Y11 0 0 0 0
0 -Y22 0 0 0
0 0 -Y33 0 0];

Yn3 = [

-Y11 0 0
0 -Y22 0
0 0 -Y33
0 0 0
0 0 0];

Yn4 = [

Y44 -y45 -y46 -y47 -y48
-y45 Y55 0 -y57 0
-y46 0 Y66 0 -y68
-y47 -y57 0 Y77 -y78
-y48 0 -y68 -y78 Y88];

Yn = Yn1 - Yn2*inv(Yn4)*Yn3;

%2.2 DURANTE LA FALLA

Yf1 = Yn1;

Yf2 = [

-Y11 0 0 0
0 -Y22 0 0
0 0 -Y33 0];

Yf3 = [

-Y11 0 0
0 -Y22 0

```

0      0      -Y33
0      0      0];
Yf4 = [
Y44    -y45    -y46    -y47
-y45    Y55     0      -y57
-y46     0      Y66     0
-y47    -y57     0      Y77];

```

```
Yf = Yf1 - Yf2*inv(Yf4)*Yf3;
```

```
%2.3 SUPERADA LA FALLA
```

```

Y77 = Y77 - y78;
Y88 = Y88 - y78;
Ys1 = Yn1; Ys2 = Yn2 ; Ys3 = Yn3;
Ys4 = [
Y44    -y45    -y46    -y47    -y48
-y45    Y55     0      -y57     0
-y46     0      Y66     0      -y68
-y47    -y57     0      Y77     0
-y48     0      -y68     0      Y88];

```

```
Ys = Ys1 - Ys2*inv(Ys4)*Ys3;
```

```

%=====
%3.0 CÁLCULOS INICIALES EN t(0-) Y
% t(0+) DE LA Pe, Pm, do
% INICIALIZACIÓN DEL SISTEMA
%=====

```

```
%3.1 Cálculo de 'do', Pe(0-) y Pm(0-)
```

```

Vt = [V(1); V(2); V(3)];
I = conj(S./Vt);
Eq = Vt + j*Xq.*I;
Pe = real(Eq.*conj(I));
Pm = Pe; Pmo = Pm;
do = angle(Eq); dm = (do*180/pi)';
Eq = abs(Eq); Em = (Eq)';
Id = abs(I).*sin(do - angle(I));
Epd = Eq - (Xq - Xpd).*Id;
Efd = Eq + (Xd - Xq).*Id; %|Efd| = Ei(0-)

```

```
%3.2 Cálculo de Pe(0+)
```

```

% Aún no se manifiestan los efectos
% de los reguladores
I = Yf*(Eq.*exp(j*do));
Id = abs(I).*sin(do - angle(I));
Eq = Epd + (Xq - Xpd).*Id;
Pe = real((Eq.*exp(j*do)).*conj(I));
Ei = Eq + (Xd - Xq).*Id; %Ei en t(0+)
Vt = Eq.*exp(j*do) - j*Xq.*I; %Vt en t(0+)
Vt = abs(Vt);

```

```
%3.3 Inicialización de los parámetros
% del regulador de Tensión
```

```

Vtab = Efd.*Ke;
Vtb = Vtab.*(1 - Ta3./Ta2);
Vaa = Vtab;
Vta = Vaa;
Epsv = [0; 0; 0]; Vs = [0; 0; 0];
Vref = Epsv - Vs + Vt;
Tk = (1 - (Ta3./Ta2))./Ta2;
Tk1 = Tk(1); Tk2 = Tk(2); Tk3 = Tk(3);
w = [1; 1; 1];

```

```

%=====
%4.0 CREACIÓN DE LAS MATRICES DEL SISTEMA
%=====

```

```

t(1)=0; n=1; ti=n*h;
y(:,1) = [do; w; Epq; Vt; Vta; Vtb; Efd];

```

```

% 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 1 2 3 4 5 6 7

```



```
ylabel('w1 en p.u.')
subplot(3,2,4), plot(t,y(5,:)*wo),
ylabel('w2 en p.u.')
subplot(3,2,6), plot(t,y(6,:)*wo),
ylabel('w3 en p.u. '), xlabel('tiempo en segs. ')
pause

clf, hold off
subplot(3,2,1), plot(t,y(7,:)),
ylabel('E''q1 en pu')
subplot(3,2,3), plot(t,y(8,:)),
ylabel('E''q2 en pu')
subplot(3,2,5), plot(t,y(9,:)),
ylabel('E''q3 en pu')
subplot(3,2,2), plot(t,y(10,:)),
ylabel('Vt1 en pu')
subplot(3,2,4), plot(t,y(11,:)),
ylabel('Vt2 en pu')
subplot(3,2,6), plot(t,y(12,:)),
ylabel('Vt3 en pu'), xlabel('tiempo en segs. ')
pause

clf, hold off
subplot(3,2,1), plot(t,y(19,:)),
ylabel('Efd1 en pu')
subplot(3,2,3), plot(t,y(20,:)),
ylabel('Efd2 en pu')
subplot(3,2,5), plot(t,y(21,:)),
ylabel('Efd3 en pu')
subplot(3,2,2), plot(t, (y(1,:)-y(2,:))*180/pi),
ylabel('d1-d2 en DEG')
subplot(3,2,4), plot(t, (y(2,:)-y(3,:))*180/pi),
ylabel('d2-d3 en DEG')
subplot(3,2,6), plot(t, (y(3,:)-y(1,:))*180/pi),
ylabel('d3-d1 en DEG')
```

Este programa usa los mismos subprogramas ó Scripts Yff.m, Ynn.m y Yss.m ya que

se trata del mismo incidente.

Cuando el incidente cambia, estos scripts son adecuados según la nueva falla presente.

ANEXO 4.4 – PROGRAMA EDRTV1.m

```
% Estabilidad Dinámica con Reguladores de Tensión y Velocidad  
% Incidente 1
```

```
Newton
```

```
pause
```

```
S = [S1; S2; S3];
```

```
Yc4 = conj(-S4)/(abs(V(4)))^2;
```

```
Yc7 = conj(-S7)/(abs(V(7)))^2;
```

```
Yc8 = conj(-S8)/(abs(V(8)))^2;
```

```
=====
```

```
%1.0 CONFIGURANDO LAS CARGAS DINÁMICAS
```

```
% BARRA 7: RESIDENCIAL
```

```
% BARRA 8: COMERCIAL
```

```
=====
```

```
Po7 = real(-S7); Qo7 = imag(-S7);
```

```
Po8 = real(-S8); Qo8 = imag(-S8);
```

```
Vo7 = abs(V(7)); Vo8 = abs(V(8));
```

```
=====
```

```
%2.0 CÁLCULO DE LAS MATRICES EXPANDIDAS
```

```
% DEL INCIDENTE 1
```

```
% - ANTES DE LA FALLA: Yn
```

```
% - DURANTE LA FALLA: Yf
```

```
% - SUPERADA LA FALLA: Ys
```

```
=====
```

```
%2.1 Antes de la Falla
```

```
Y11 = 1/(j*zt1 + j*Xq(1));
```

```
Y22 = 1/(j*zt2 + j*Xq(2));
```

```
Y33 = 1/(j*zt3 + j*Xq(3));
```

```
Y44 = Y11 + y45+b45 + y47 + Yc4 + y48 + y46+b46;
```

```
Y55 = Y22 + y57+b57 + y45+b54;
```

```
Y66 = Y33 + y64+b64 + y68+b68;
```

```
Y77 = y75+b75 + Yc7 + y78 + y74;
```

```
Y88 = y86+b86 + y84 + y78 + Yc8;
```

```
Yn1 = [
```

```
Y11    0    0  
0      Y22  0  
0      0    Y33];
```

```
Yn2 = [
```

```
-Y11   0    0    0    0  
0      -Y22  0    0    0  
0      0    -Y33  0    0];
```

```
Yn3 = [
```

```
-Y11   0    0  
0      -Y22  0  
0      0    -Y33  
0      0    0  
0      0    0];
```

```
Yn4 = [
```

```
Y44    -y45  -y46  -y47  -y48  
-y45   Y55    0    -y57  0  
-y46   0     Y66    0    -y68  
-y47   -y57  0     Y77  -y78  
-y48   0    -y68  -y78  Y88];
```

```
Yn = Yn1 - Yn2*inv(Yn4)*Yn3;
```

```
%2.2 DURANTE LA FALLA
```

```
Yf1 = Yn1;
```

```
Yf2 = [
```

```
-Y11   0    0    0  
0      -Y22  0    0  
0      0    -Y33  0];
```

```
Yf3 = [
```

```
-Y11   0    0  
0      -Y22  0
```

```
0      0      -Y33
0      0      0];
Yf4 = [
Y44    -y45    -y46    -y47
-y45    Y55     0      -y57
-y46     0      Y66     0
-y47    -y57     0      Y77];
```

Yf = Yf1 - Yf2*inv(Yf4)*Yf3;

%2.3 SUPERADA LA FALLA

```
Y77 = Y77 - y78;
Y88 = Y88 - y78;
Ys1 = Yn1; Ys2 = Yn2 ; Ys3 = Yn3;
Ys4 = [
Y44    -y45    -y46    -y47    -y48
-y45    Y55     0      -y57     0
-y46     0      Y66     0      -y68
-y47    -y57     0      Y77     0
-y48     0      -y68     0      Y88];
```

Ys = Ys1 - Ys2*inv(Ys4)*Ys3;

```
=====
%3.0 CÁLCULOS INICIALES EN t(0-) Y
% t(0+) DE LA Pe, Pm, do
% INICIALIZACIÓN DEL SISTEMA
=====
```

%3.1 Cálculo de 'do', Pe(0-) y Pm(0-)

```
Vt = [V(1); V(2); V(3)];
I = conj(S./Vt);
Eq = Vt + j*Xq.*I;
Pe = real(Eq.*conj(I));
Pm = Pe; Pmo = Pm;
do = angle(Eq); dm = (do*180/pi)';
Eq = abs(Eq); Em = (Eq)';
Id = abs(I).*sin(do - angle(I));
Epq = Eq - (Xq - Xpd).*Id;
Efd = Eq + (Xd - Xq).*Id; %|Efd| = Ei(0-)
```

%3.2 Cálculo de Pe(0+)

```
% Aún no se manifiestan los efectos
% de los reguladores
I = Yf*(Eq.*exp(j*do));
Id = abs(I).*sin(do - angle(I));
Eq = Epq + (Xq - Xpd).*Id;
Pe = real((Eq.*exp(j*do)).*conj(I));
Ei = Eq + (Xd - Xq).*Id; %Ei en t(0+)
Vt = Eq.*exp(j*do) - j*Xq.*I; %Vt en t(0+)
Vt = abs(Vt);
```

%3.4 Inicialización de los parámetros del Regulador de Tensión

```
% del Regulador de Tensión
Vtab = Efd.*Ke;
Vtb = Vtab.*(1 - Ta3./Ta2);
Vaa = Vtab;
Vta = Vaa;
Epsv = [0; 0; 0]; Vs = [0; 0; 0];
Vref = Epsv - Vs + Vt;
Tk = (1 - (Ta3./Ta2))./Ta2;
Tk1 = Tk(1); Tk2 = Tk(2); Tk3 = Tk(3);
```

%3.5 Inicialización de los parámetros del Regulador de Velocidad

```
% del Regulador de Velocidad
Va=Pm; Ve=Va; Vb=Pm;
w = [1; 1; 1];
Pref = Ve + w./R;
RT1 = R(1)*T11;
RT2 = R(2)*T12;
RT3 = R(3)*T13;
```



```
ylabel('Vt1 en pu')
subplot(3,2,4), plot(t,y(11,:)),
ylabel('Vt2 en pu')
subplot(3,2,6), plot(t,y(12,:)),
ylabel('Vt3 en pu'), xlabel('tiempo en segs.')
pause
```

```
clf, hold off
subplot(3,2,1), plot(t,y(13,:)),
ylabel('Vta1 en pu')
subplot(3,2,3), plot(t,y(14,:)),
ylabel('Vta2 en pu')
subplot(3,2,5), plot(t,y(15,:)),
ylabel('Vta3 en pu')
subplot(3,2,2), plot(t,y(16,:)),
ylabel('Vtb1 en pu')
subplot(3,2,4), plot(t,y(17,:)),
ylabel('Vtb2 en pu')
subplot(3,2,6), plot(t,y(18,:)),
ylabel('Vtb3 en pu'), xlabel('tiempo en segs.')
pause
```

```
clf, hold off
subplot(3,2,1), plot(t,y(19,:)),
ylabel('Efd1 en pu')
subplot(3,2,3), plot(t,y(20,:)),
ylabel('Efd2 en pu')
subplot(3,2,5), plot(t,y(21,:)),
ylabel('Efd3 en pu')
subplot(3,2,2), plot(t,y(22,:)),
ylabel('Pm1')
subplot(3,2,4), plot(t,y(23,:)),
ylabel('Pm2')
subplot(3,2,6), plot(t,y(24,:)),
ylabel('Pm3'), xlabel('tiempo en segs.')
pause
```

```
clf, hold off
subplot(3,2,1), plot(t,y(25,:)),
ylabel('Val en pu')
subplot(3,2,3), plot(t,y(26,:)),
ylabel('Va2 en pu')
subplot(3,2,5), plot(t,y(27,:)),
ylabel('Va3 en pu')
subplot(3,2,2), plot(t,y(28,:)),
ylabel('Vb1')
subplot(3,2,4), plot(t,y(29,:)),
ylabel('Vb2')
subplot(3,2,6), plot(t,y(30,:)),
ylabel('Vb3'), xlabel('tiempo en segs.')
pause
```

```
clf, hold off
plot(t, (y(1,:)-y(2,:))*180/pi)
grid
xlabel('tiempo seg.')
ylabel('d1 - d2 en DEGs')
pause
```

```
clf, hold off
plot(t, (y(2,:)-y(3,:))*180/pi)
grid
xlabel('tiempo seg.')
ylabel('d2 - d3 en DEGs')
pause
```

```
clf, hold off
plot(t, (y(3,:)-y(1,:))*180/pi)
grid
xlabel('tiempo seg.')
ylabel('d3 - d1 en DEGs')
```

ANEXO 4.5 – PROGRAMA PEDRT.m

% Prueba de Estabilidad Dinámica con Reguladores de Tensión

Newton

pause

S = [S1; S2; S3];

Yc4 = conj(-S4)/(abs(V(4)))^2

Yc7 = conj(-S7)/(abs(V(7)))^2

Yc8 = conj(-S8)/(abs(V(8)))^2

=====
%1.0 CONFIGURANDO LAS CARGAS DINÁMICAS

% BARRA 7: RESIDENCIAL

% BARRA 8: COMERCIAL

=====

Po7 = real(-S7); Qo7 = imag(-S7);

Po8 = real(-S8); Qo8 = imag(-S8);

Vo7 = abs(V(7)); Vo8 = abs(V(8));

=====
%2.0 CÁLCULO DE LAS MATRICES EXPANDIDAS

% - ANTES DE LA FALLA: Yn

% - DURANTE LA FALLA: Yf

% - SUPERADA LA FALLA: Ys

=====

%2.1 Antes de la Falla

Y11 = 1/(j*zt1 + j*Xq(1));

Y22 = 1/(j*zt2 + j*Xq(2));

Y33 = 1/(j*zt3 + j*Xq(3));

Y44 = Y11 + y45+b45 + y47 + Yc4 + y48 + y46+b46;

Y55 = Y22 + y57+b57 + y45+b54;

Y66 = Y33 + y64+b64 + y68+b68;

Y77 = y75+b75 + Yc7 + y78 + y74;

Y88 = y86+b86 + y84 + y78 + Yc8;

Yn1 = [

Y11 0 0
0 Y22 0
0 0 Y33];

Yn2=[

-Y11 0 0 0 0
0 -Y22 0 0 0
0 0 -Y33 0 0];

Yn3=[

-Y11 0 0
0 -Y22 0
0 0 -Y33
0 0 0
0 0 0];

Yn4=[

Y44 -y45 -y46 -y47 -y48
-y45 Y55 0 -y57 0
-y46 0 Y66 0 -y68
-y47 -y57 0 Y77 -y78
-y48 0 -y68 -y78 Y88];

Yn = Yn1 - Yn2*inv(Yn4)*Yn3

%2.2 DURANTE LA FALLA

Yf1 = Yn1;

Yf2 = [

-Y11 0 0 0
0 -Y22 0 0
0 0 -Y33 0];

Yf3 = [

-Y11 0 0
0 -Y22 0
0 0 -Y33
0 0 0];

```
Yf4 = [
    Y44      -y45      -y46      -y47
    -y45     Y55       0        -y57
    -y46     0         Y66       0
    -y47     -y57     0         Y77];
```

```
Yf = Yf1 - Yf2*inv(Yf4)*Yf3
```

%2.3 SUPERADA LA FALLA

```
Y77 = y57+b57 + y47 + Yc7;
Y88 = y68+b68 + y48 + Yc8;
Ys1 = Yn1; Ys2 = Yn2 ; Ys3 = Yn3;
Ys4=[
    Y44      -y45      -y46      -y47      -y48
    -y45     Y55       0        -y57       0
    -y46     0         Y66       0        -y68
    -y47     -y57     0         Y77       0
    -y48     0         -y68     0         Y88];
Ys = Ys1 - Ys2*inv(Ys4)*Ys3
```

```
=====
%3.0 CÁLCULOS INICIALES EN t(0-) Y
% t(0+) DE LA Pe, Pm, do
% INICIALIZACIÓN DEL SISTEMA
=====
```

```
%3.1 Cálculo de 'do', Pe(0-) y Pm(0-)
Vt = [V(1); V(2); V(3)];
I = conj(S./Vt);
Eq = Vt + j*Xq.*I;
Pe = real(Eq.*conj(I));
Pm = Pe; Pmo = Pm;
do = angle(Eq); dm = (do*180/pi)';
Eq = abs(Eq); Em = (Eq)';
Id = abs(I).*sin(do - angle(I));
Epq = Eq - (Xq - Xpd).*Id;
Efd = Eq + (Xd - Xq).*Id; %|Efd| = Ei(0-)
Ei=Efd; Vt=Efd; %***
```

```
%3.2 Inicialización de los parámetros
% del regulador de Tensión
Vtab = Efd.*Ke;
Vtb = Vtab.*(1 - Ta3./Ta2);
Vaa = Vtab;
Vta = Vaa;
Epsv = [0; 0; 0]; Vs = [0; 0; 0];
Vref = Epsv - Vs + Vt;
Tk = (1 - (Ta3./Ta2))./Ta2;
Tk1 = Tk(1); Tk2 = Tk(2); Tk3 = Tk(3);
w = [1;1;1];
```

```
=====
%4.0 CREACIÓN DE LAS MATRICES DEL SISTEMA
=====
```

```
t(1)=0; n=1; ti=n*h;
y(:,1) = [do; w; Epq; Vt; Vta; Vtb; Efd];
```

```
% 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 1 2 3 4 5 6 7
C=[0 0 0 wo 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
    0 0 0 0 wo 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
    0 0 0 0 0 wo 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1/Tg1 0 0 0 0 0 0 0
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1/Tg2 0 0 0 0 0 0
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1/Tg3 0 0 0 0 0
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -Kal 0 0 0 0
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -Ka2 0 0 0 0 0 0
```

```

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
1/Ta21 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

```

```
P=[-wo; -wo; -wo; Pm./Tm; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0];
```

```

=====
%5.0 INTEGRACIÓN NUMERICA MEDIANTE EL
% METODO ITERATIVO DE RUNGE-KUTTA
% DE CUARTO ORDEN
=====

```

```

Y=Yn;
while ti <= T
    %if ti<=tf Yff; end
    %if ti> tf Yss; end
    %if ti>tr Ynn; end
    Epsv= -Vt + Vref;
    Vaa = Vta + (Epsv.*Ka.*Tal);
    Vtab= Vtb + Vaa.*(Ta3./Ta2);
    z = [Pe; Ei; Vaa; Vtab];
    k1 = h*FUN(y(:,n), z, C, P);
    k2 = h*FUN(y(:,n) + k1/2, z, C, P);
    k3 = h*FUN(y(:,n) + k2/2, z, C, P);
    k4 = h*FUN(y(:,n) + k3, z, C, P);
    y(:,n+1) = y(:,n) + (k1 + 2*k2 + 2*k3 + k4)/6;
    t(n+1)=n*h; ti=n*h, n=n+1;

```

```

%5.1 Extracción de datos
Epq = [y(7,n);y(8,n);y(9,n)];
do = [y(1,n);y(2,n);y(3,n)];
vt = [y(10,n);y(11,n);y(12,n)];
vta = [y(13,n);y(14,n);y(15,n)];
vtb = [y(16,n);y(17,n);y(18,n)];
I = Y*(Eq.*exp(j*do));
Id = abs(I).*sin(do - angle(I));
Eq = Epq + (Xq - Xpd).*Id;

```

```

%5.2 Valores para la iteración siguiente
Pe = real((Eq.*exp(j*do)).*conj(I));
Ei = Eq + (Xd - Xq).*Id;

```

```
end
```

```

=====
%6.0 SALIDA DE RESULTADOS
=====

```

```

subplot(3,2,1), plot(t,y(1,:)*180/pi),
ylabel('d1 en RAD')
subplot(3,2,3), plot(t,y(2,:)*180/pi),
ylabel('d2 en RAD')
subplot(3,2,5), plot(t,y(3,:)*180/pi),
ylabel('d3 en RAD')
subplot(3,2,2), plot(t,y(4,:)*wo),
ylabel('w1 en p.u.')
subplot(3,2,4), plot(t,y(5,:)*wo),
ylabel('w2 en p.u.')
subplot(3,2,6), plot(t,y(6,:)*wo),
ylabel('w3 en p.u. '), xlabel('tiempo en segs. ')
pause
clf, hold off
subplot(3,2,1), plot(t,y(1,:)*180/pi)
axis([0 10 15 18])
ylabel('d1 en DEG')
subplot(3,2,3), plot(t,y(2,:)*180/pi)
axis([0 10 20 28])
ylabel('d2 en DEG')
subplot(3,2,5), plot(t,y(3,:)*180/pi)
axis([0 10 15 18])

```

```
ylabel('d3 en DEG')
subplot(3,2,2), plot(t,y(4,:)*wo)
axis([0 10 375 379])
ylabel('w1 en rd/s')
subplot(3,2,4), plot(t,y(5,:)*wo)
axis([0 10 375 379])
ylabel('w2 en rd/s')
subplot(3,2,6), plot(t,y(6,:)*wo)
axis([0 10 375 379])
ylabel('w3 en rd/s'), xlabel('tiempo en segs.')
pause
clf,hold off
subplot(3,2,1), plot(t,y(7,:)),
ylabel('E''q1 en pu')
subplot(3,2,3), plot(t,y(8,:)),
ylabel('E''q2 en pu')
subplot(3,2,5), plot(t,y(9,:)),
ylabel('E''q3 en pu')
subplot(3,2,2), plot(t,y(10,:)),
ylabel('vt1 en pu')
subplot(3,2,4), plot(t,y(11,:)),
ylabel('vt2 en pu')
subplot(3,2,6), plot(t,y(12,:)),
ylabel('vt3 en pu'), xlabel('tiempo en segs.')
pause
clf, hold off
subplot(3,2,1), plot(t,y(7,:)),
axis([0 10 1 1.5])
ylabel('E''q1 en pu')
subplot(3,2,3), plot(t,y(8,:)),
axis([0 10 1 1.5])
ylabel('E''q2 en pu')
subplot(3,2,5), plot(t,y(9,:)),
axis([0 10 1 1.5])
ylabel('E''q3 en pu')
subplot(3,2,2), plot(t,y(10,:)),
ylabel('vt1 en pu')
subplot(3,2,4), plot(t,y(11,:)),
ylabel('vt2 en pu')
subplot(3,2,6), plot(t,y(12,:)),
ylabel('vt3 en pu'), xlabel('tiempo en segs.')
pause
clf, hold off
subplot(3,2,1), plot(t,y(13,:)),
ylabel('vtal en pu')
subplot(3,2,3), plot(t,y(14,:)),
ylabel('vta2 en pu')
subplot(3,2,5), plot(t,y(15,:)),
ylabel('vta3 en pu')
subplot(3,2,2), plot(t,y(16,:)),
ylabel('vtb1 en pu')
subplot(3,2,4), plot(t,y(17,:)),
ylabel('vtb2 en pu')
subplot(3,2,6), plot(t,y(18,:)),
ylabel('vtb3 en pu'), xlabel('tiempo en segs.')
pause
clf, hold off
subplot(3,2,1), plot(t,y(19,:)),
ylabel('Efd1 en pu')
subplot(3,2,3), plot(t,y(20,:)),
ylabel('Efd2 en pu')
subplot(3,2,5), plot(t,y(21,:)),
ylabel('Efd3 en pu')
subplot(3,2,2), plot(t,(y(1,:)-y(2,:))*180/pi),
axis([0 10 -9 -5])
ylabel('d1-d2 en DEG')
subplot(3,2,4), plot(t,(y(2,:)-y(3,:))*180/pi),
axis([0 10 5 9])
ylabel('d2-d3 en DEG')
subplot(3,2,6), plot(t,(y(3,:)-y(1,:))*180/pi),
axis([0 10 -5 2])
ylabel('d3-d1 en DEG')
```

ANEXO 4.6 – PROGRAMA PENCf2.m

% Prueba de Estabilidad Natural con Cargas Fijas (Incidente 2)

Newton

pause

S = [S1; S2; S3];

Yc4 = conj(-S4)/(abs(V(4)))^2

Yc7 = conj(-S7)/(abs(V(7)))^2

Yc8 = conj(-S8)/(abs(V(8)))^2

=====

%1.0 CÁLCULO DE LAS MATRICES EXPANDIDAS
% DEL INCIDENTE 1

% - ANTES DE LA FALLA: Yn

% - DURANTE LA FALLA: Yf

% - SUPERADA LA FALLA: Ys

=====

%1.1 Antes de la Falla

Y11 = 1/(j*zt1 + j*Xq(1));

Y22 = 1/(j*zt2 + j*Xq(2));

Y33 = 1/(j*zt3 + j*Xq(3));

Y44 = Y11 + y45+b45 + y47 + Yc4 + y48 + y46+b46;

Y55 = Y22 + y57+b57 + y45+b54;

Y66 = Y33 + y64+b64 + y68+b68;

Y77 = y75+b75 + Yc7 + y78 + y74;

Y88 = y86+b86 + y84 + y78 + Yc8;

Yn1 = [
Y11 0 0
0 Y22 0
0 0 Y33];

Yn2 = [
-Y11 0 0 0 0
0 -Y22 0 0 0
0 0 -Y33 0 0];

Yn3 = [
-Y11 0 0
0 -Y22 0
0 0 -Y33
0 0 0
0 0 0];

Yn4 = [
Y44 -y45 -y46 -y47 -y48
-y45 Y55 0 -y57 0
-y46 0 Y66 0 -y68
-y47 -y57 0 Y77 -y78
-y48 0 -y68 -y78 Y88];

Yn = Yn1 - Yn2*inv(Yn4)*Yn3;

%1.2 DURANTE LA FALLA

Yf1 = Yn1;

Yf2 = Yn2;

Yf3 = Yn3;

Yc7 = 1.1*Yc7; %Aumento de Carga del 10%

Y77 = y75+b75 + Yc7 + y78 + y74;

Yf4 = [
Y44 -y45 -y46 -y47 -y48
-y45 Y55 0 -y57 0
-y46 0 Y66 0 -y68
-y47 -y57 0 Y77 -y78
-y48 0 -y68 -y78 Y88];

Yf = Yf1 - Yf2*inv(Yf4)*Yf3

%1.3 SUPERADA LA FALLA

Ys = Yn;

```

=====
%2.0  CÁLCULOS INICIALES EN t(0-) Y
%      t(0+) DE LA Pe, Pm, do
%      INICIALIZACIÓN DEL SISTEMA
=====

```

```

%2.1  Cálculo de 'do', Pe(0-) y Pm(0-)
Vt = [V(1); V(2); V(3)];
I = conj(S./Vt);
Eq = Vt + j*Xq.*I;
Pe = real(Eq.*conj(I));
Pm = Pe; Pmo = Pm;
do = angle(Eq); dm = (do*180/pi)';
Eq = abs(Eq); Em = (Eq)';
Id = abs(I).*sin(do - angle(I));
Epq = Eq - (Xq - Xpd).*Id;
Efd = Eq + (Xd - Xq).*Id; %|Efd| = Ei(0-)

```

```

%2.2  Cálculo de Pe(0+)
%      Aún no se manifiestan los efectos
%      de los reguladores
I = Yf*(Eq.*exp(j*do));
Id = abs(I).*sin(do - angle(I));
Eq = Epq + (Xq - Xpd).*Id;
Pe = real((Eq.*exp(j*do)).*conj(I));
Ei = Eq + (Xd - Xq).*Id; %Ei en t(0+)
Vt = Eq.*exp(j*do) - j*Xq.*I; %Vt en t(0+)
Vt = abs(Vt);
w = [1;1;1];

```

```

=====
%3.0  CREACIÓN DE LAS MATRICES DEL SISTEMA
=====

```

```

t(1)=0; n=1; ti=n*h; tf=h;
y(:,1) = [do; w; Epq];

```

```

C=[0 0 0 wo 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 wo 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 wo 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1/Tm1 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1/Tm2 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1/Tm3 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1/Td1 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1/Td2 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1/Tc]

```

```

P=[-wo; -wo; -wo; Pm./Tm; Efd./Td];

```

```

=====
%4.0  INTEGRACIÓN NUMERICA MEDIANTE EL
%      MÉTODO ITERATIVO DE RUNGE-KUTTA
%      DE CUARTO ORDEN
=====

```

```

while ti <= T
if ti<=tf Y=Yf; end
if ti>tf Y=Yn; end
z = [Pe; Ei];
k1 = h*FUN(y(:,n), z, C, P);
k2 = h*FUN(y(:,n) + k1/2, z, C, P);
k3 = h*FUN(y(:,n) + k2/2, z, C, P);
k4 = h*FUN(y(:,n) + k3, z, C, P);
y(:,n+1) = y(:,n) + (k1 + 2*k2 + 2*k3 + k4)/6;
t(n+1)=n*h; ti=n*h; n=n+1;

```

```

%4.1 Extracción de datos

```

```

Epq = [y(7,n);y(8,n);y(9,n)];
do = [y(1,n);y(2,n);y(3,n)];
I = Y*(Eq.*exp(j*do));
Id = abs(I).*sin(do - angle(I));

```

```
Eq = Epq + (Xq - Xpd).*Id;

%4.2 Valores para la iteración siguiente
Pe = real((Eq.*exp(j*do)).*conj(I));
Ei = Eq + (Xd - Xq).*Id;
end

%=====
%5.0  SALIDA DE RESULTADOS
%=====

subplot(3,2,1), plot(t,y(1,:)*180/pi),
ylabel('d1 en DEG')
subplot(3,2,3), plot(t,y(2,:)*180/pi),
ylabel('d2 en DEG')
subplot(3,2,5), plot(t,y(3,:)*180/pi),
ylabel('d3 en DEG')
subplot(3,2,2), plot(t,y(4,:)*wo),
ylabel('w1 en rd/s')
subplot(3,2,4), plot(t,y(5,:)*wo),
ylabel('w2 en rd/s')
subplot(3,2,6), plot(t,y(6,:)*wo),
ylabel('w3 en rd/s'), xlabel('tiempo en segs.')
```

ANEXO 5.1 – PROGRAMA EDRTV3.m

```
% Estabilidad Dinámica con Reguladores de Tensión y Velocidad  
% Incidente 3
```

```
Newton  
pause
```

```
S = {S1; S2; S3};  
Yc4 = conj(-S4)/(abs(V(4)))^2;  
Yc7 = conj(-S7)/(abs(V(7)))^2;  
Yc8 = conj(-S8)/(abs(V(8)))^2;
```

```
=====
```

```
%1.0 CONFIGURANDO LAS CARGAS DINÁMICAS  
% BARRA 7: RESIDENCIAL  
% BARRA 8: COMERCIAL  
=====
```

```
Po7 = real(-S7); Qo7 = imag(-S7);  
Po8 = real(-S8); Qo8 = imag(-S8);  
Vo7 = abs(V(7)); Vo8 = abs(V(8));
```

```
=====
```

```
%2.0 CÁLCULO DE LAS MATRICES EXPANDIDAS  
% DEL INCIDENTE 1  
% - ANTES DE LA FALLA: Yn  
% - DURANTE LA FALLA: Yf  
% - SUPERADA LA FALLA: Ys  
=====
```

```
%2.1 Antes de la Falla  
Y11 = 1/(j*zt1 + j*Xq(1));  
Y22 = 1/(j*zt2 + j*Xq(2));  
Y33 = 1/(j*zt3 + j*Xq(3));  
Y44 = Y11 + y45+b45 + y47 + Yc4 + y48 + y46+b46;  
Y55 = Y22 + y57+b57 + y45+b54;  
Y66 = Y33 + y64+b64 + y68+b68;  
Y77 = y75+b75 + Yc7 + y78 + y74;  
Y88 = y86+b86 + y84 + y78 + Yc8;  
Yn1 = [  
Y11 0 0  
0 Y22 0  
0 0 Y33];  
Yn2 = [  
-Y11 0 0 0 0  
0 -Y22 0 0 0  
0 0 -Y33 0 0];  
Yn3 = [  
-Y11 0 0  
0 -Y22 0  
0 0 -Y33  
0 0 0  
0 0 0];  
Yn4 = [  
Y44 -y45 -y46 -y47 -y48  
-y45 Y55 0 -y57 0  
-y46 0 Y66 0 -y68  
-y47 -y57 0 Y77 -y78  
-y48 0 -y68 -y78 Y88];
```

```
Yn = Yn1 - Yn2*inv(Yn4)*Yn3;
```

```
%2.2 DURANTE LA FALLA  
Yf1 = Yn1;  
Yf2 = [  
-Y11 0 0  
0 -Y22 0 0  
0 0 0 0];  
Yf3 = [  
-Y11 0  
0 -Y22 0
```

```

0      0      0
0      0      0];
Yf4 = [
Y44    -y45   -y47   -y48
-y45    Y55   -y57    0
-y47    -y57   Y77   -y78
-y48    0     -y78   Y88];
Yf = Yf1 - Yf2*inv(Yf4)*Yf3;

```

§2.3 SUPERADA LA FALLA

```

Y66 = Y66 - (y46+b46);
Y44 = Y44 - (y46+b46);
Ys1 = Yn1; Ys2 = Yn2 ; Ys3 = Yn3;
Ys4 = [
Y44    -y45    0     -y47   -y48
-y45    Y55    0     -y57    0
0       0      Y66    0     -y68
-y47    -y57    0     Y77    y78
-y48    0     -y68   y78   Y88];

```

Ys = Ys1 - Ys2*inv(Ys4)*Ys3;

=====

§3.0 CÁLCULOS INICIALES EN t(0-) Y t(0+) DE LA Pe, Pm, do INICIALIZACIÓN DEL SISTEMA

=====

§3.1 Cálculo de 'do', Pe(0-) y Pm(0-)

```

Vt = [V(1); V(2); V(3)];
I = conj(S./Vt);
Eq = Vt + j*Xq.*I;
Pe = real(Eq.*conj(I));
Pm = Pe; Pmo = Pm;
do = angle(Eq); dm = (do*180/pi)';
Eq = abs(Eq); Em = (Eq)';
Id = abs(I).*sin(do - angle(I));
Epd = Eq - (Xq - Xpd).*Id;
Efd = Eq + (Xd - Xq).*Id; %|Efd| = Ei(0-)

```

§3.2 Cálculo de Pe(0+)

```

% Aún no se manifiestan los efectos de los reguladores
I = Yf*(Eq.*exp(j*do));
Id = abs(I).*sin(do - angle(I));
Eq = Epd + (Xq - Xpd).*Id;
Pe = real((Eq.*exp(j*do)).*conj(I));
Ei = Eq + (Xd - Xq).*Id; %Ei en t(0+)
Vt = Eq.*exp(j*do) - j*Xq.*I; %Vt en t(0+)
Vt = abs(Vt);

```

§3.4 Inicialización de los parámetros del Regulador de Tensión

```

%
Vtab = Efd.*Ke;
Vtb = Vtab.*(1 - Ta3./Ta2);
Vaa = Vtab;
Vta = Vaa;
Epsv = [0; 0; 0]; Vs = [0; 0; 0];
Vref = Epsv - Vs + Vt;
Tk = (1 - (Ta3./Ta2))./Ta2;
Tk1 = Tk(1); Tk2 = Tk(2); Tk3 = Tk(3);

```

§3.5 Inicialización de los parámetros del Regulador de Velocidad

```

%
Va=Pm; Ve=Va; Vb=Pm;
w = [1; 1; 1];
Pref = Ve + w./R;
RT1 = R(1)*T11;
RT2 = R(2)*T12;
RT3 = R(3)*T13;

```



```
ylabel('Vt1 en pu')
subplot(3,2,4), plot(t,y(11,:)),
ylabel('Vt2 en pu')
subplot(3,2,6), plot(t,y(12,:)),
ylabel('Vt3 en pu'), xlabel('tiempo en segs.')
pause
```

```
clf, hold off
subplot(3,2,1), plot(t,y(13,:)),
ylabel('Vta1 en pu')
subplot(3,2,3), plot(t,y(14,:)),
ylabel('Vta2 en pu')
subplot(3,2,5), plot(t,y(15,:)),
ylabel('Vta3 en pu')
subplot(3,2,2), plot(t,y(16,:)),
ylabel('Vtb1 en pu')
subplot(3,2,4), plot(t,y(17,:)),
ylabel('Vtb2 en pu')
subplot(3,2,6), plot(t,y(18,:)),
ylabel('Vtb3 en pu'), xlabel('tiempo en segs.')
pause
```

```
clf, hold off
subplot(3,2,1), plot(t,y(19,:)),
ylabel('Efd1 en pu')
subplot(3,2,3), plot(t,y(20,:)),
ylabel('Efd2 en pu')
subplot(3,2,5), plot(t,y(21,:)),
ylabel('Efd3 en pu')
subplot(3,2,2), plot(t,y(22,:)),
ylabel('Pm1')
subplot(3,2,4), plot(t,y(23,:)),
ylabel('Pm2')
subplot(3,2,6), plot(t,y(24,:)),
ylabel('Pm3'), xlabel('tiempo en segs.')
pause
```

```
clf, hold off
subplot(3,2,1), plot(t,y(25,:)),
ylabel('Va1 en pu')
subplot(3,2,3), plot(t,y(26,:)),
ylabel('Va2 en pu')
subplot(3,2,5), plot(t,y(27,:)),
ylabel('Va3 en pu')
subplot(3,2,2), plot(t,y(28,:)),
ylabel('Vb1')
subplot(3,2,4), plot(t,y(29,:)),
ylabel('Vb2')
subplot(3,2,6), plot(t,y(30,:)),
ylabel('Vb3'), xlabel('tiempo en segs.')
pause
```

```
clf, hold off
plot(t, (y(1,:)-y(2,:))*180/pi)
grid
xlabel('tiempo seg.')
ylabel('d1 - d2 en DEGs')
pause
```

```
clf, hold off
plot(t, (y(2,:)-y(3,:))*180/pi)
grid
xlabel('tiempo seg.')
ylabel('d2 - d3 en DEGs')
pause
```

```
clf, hold off
plot(t, (y(3,:)-y(1,:))*180/pi)
grid
xlabel('tiempo seg.')
ylabel('d3 - d1 en DEGs')
```

SUBPROGRAMA SCRIPT *Yff3.m*

```
w = [y(4,n);y(5,n);y(6,n)];
fpu = (w(1) + w(2) + w(3))/3;
Vc = -inv(Yf4)*Yf3*(Eq.*exp(j*do));
V7 = abs(Vc(3));
V8 = abs(Vc(4));
P7 = Po7*((V7/Vo7)^A7)*fpu^B7;
Q7 = Qo7*((V7/Vo7)^C7)*fpu^D7;
Yc7 = (P7 - j*Q7)/V7^2;
P8 = Po8*((V8/Vo8)^A8)*fpu^B8;
Q8 = Qo8*((V8/Vo8)^C8)*fpu^D8;
Yc8 = (P8 - j*Q8)/V8^2;
Y77 = y75+b75 + Yc7 + y78 + y74;
Y88 = y78 + y48 + y68+b68 + Yc8;
Yf4 = [
    Y44    -y45    -y47    -y48
   -y45    Y55    -y57     0
   -y47    -y57    Y77    -y78
   -y48     0    -y78    Y88];
Y = Yf1 - Yf2*inv(Yf4)*Yf3;
```

SUBPROGRAMA SCRIPIT *Yss3.m*

```
w = [y(4,n);y(5,n);y(6,n)];
fpu = (w(1) + w(2) + w(3))/3;
Vc = -inv(Ys4)*Ys3*(Eq.*exp(j*do));
V7 = abs(Vc(4)); V8 = abs(Vc(5));
P7 = Po7*((V7/Vo7)^A7)*fpu^B7;
Q7 = Qo7*((V7/Vo7)^C7)*fpu^D7;
P8 = Po8*((V8/Vo8)^A8)*fpu^B8;
Q8 = Qo8*((V8/Vo8)^C8)*fpu^D8;
Yc7 = (P7 - j*Q7)/V7^2;
Yc8 = (P8 - j*Q8)/V8^2;
Y77 = y75+b75 + Yc7 + y74 + y78;
Y88 = y68+b68 + y48 + Yc8 + y78;
Ys4 = [
    Y44 -y45     0    -y47    -y48
   -y45 Y55     0    -y57     0
     0     0    Y66     0    -y68
   -y47 -y57     0    Y77 -y78
   -y48     0    -y68    -y78    Y88];
Y = Ys1 - Ys2*inv(Ys4)*Ys3;
```

Debido a que el incidente a cambiado ahora las subrutinas ó scripts *Yff3.m* y *Yss3.m* son configurados de acuerdo a las nuevas condiciones de falla.

No hace falta variar *Ynn.m* ya que permanece invariable de acuerdo a la condición dada por la falla.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Aller, José Manuel “Conversión de Energía Eléctrica” Universidad Simón Bolívar Venezuela – 2000
URL: http://prof.u5.ve/Guia_Maq_pdf/
- [2] Anderson, P. M.; Foad, A. A. “Power System Control & Stability” Iowa State University - 1977
- [3] Ayres, Frank “Matrices” McGraw Hill – 1969
- [4] Grainger, John J.; Stevenson, William D. Jr, “Análisis de Sistemas de Potencia” McGraw Hill - 2000
- [5] Harper, Enriquez Gilberto “Análisis moderno de Sistemas de Potencia” Editorial Limusa - 1981
- [6] Harper, Enriquez “Introducción al Análisis de los Sistemas Eléctricos de Potencia” Editorial Limusa – 1982
- [7] Ivanov, A. V.; Smolensky “Máquinas Eléctricas” 3t Editorial Mir - 1980

- [8] Kostenko, M. P.; Piotrovsky L. M. “Máquinas Eléctricas” 3t Editorial Mir – 1973
- [9] Quan, George; Tarnawecky, Michael “Load Representation for Transient Studies – Digitally Modeling” IEEE Transactions on Power Apparatus.
- [10] Romero Navarro, Inés “Dynamic Load Models for Power Systems” Lund University Sweden - 2002
URL: <http://www.iea.lth.se/>
- [11] Simoes Costa, Antonio J.A. “Controle e Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência Florianópolis Brasil – 2000
URL: www.labspot.ufsc.br/~simoes/dincont/dc-capxx
xx = 1, 2-1, 2-2, 3-1, 3-2, 4, 5, 6, 7
- [12] Stevenson, William D. Jr. “Sistemas Eléctricos de Potencia” Editorial McGraw Hill – 1970
- [13] Curso de Especialización de Generadores Síncronos CESI – ELECTROPERÚ Italia
- [14] IEEE Task Force on terms & definitions “Proposed Terms & Definitions for Power System Stability” Transactions Vol. PAS 101 No.7 July - 1982