

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Eléctrica y  
Electrónica



**PROGRAMA INTERACTIVO GRAFICO PARA ESTUDIOS DE ESTABILIDAD  
TRANSITORIA EN SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA**

**TESIS**

**Para Optar el Título Profesional de**

**INGENIERO ELECTRICISTA**

**MOISES ALEJANDRO MUÑOZ JAUREGUI**

**PROMOCION 1989 - II**

**Lima - Perú  
1994**

## SUMARIO

En la presente tesis se desarrolla un programa interactivo de edición de datos, simulación de eventos y visualización de resultados en base a un programa ya conocido denominado TRANSDIR, que es un programa ampliamente utilizado y aceptado en la industria. El programa permite observar el comportamiento de algunas máquinas síncronas durante la simulación, mediante el despliegue gráfico de sus ángulos relativos. Además, se implementan modelos generalmente aceptados para las máquinas síncronas, reguladores y compensadores estáticos. Adicionalmente se estudian algunas perturbaciones severas en el Sistema Interconectado Centro - Norte para mostrar la efectividad del programa.

**PROGRAMA INTERACTIVO GRAFICO PARA ESTUDIOS DE ESTABILIDAD**

**TRANSITORIA EN SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA**

# EXTRACTO

TESIS : "PROGRAMA INTERACTIVO GRAFICO PARA ESTUDIOS  
DE ESTABILIDAD TRANSITORIA EN SISTEMAS  
ELECTRICOS DE POTENCIA"

AUTOR : MOISES ALEJANDRO MUÑOZ JAUREGUI

PARA OPTAR EL

TITULO

PROFESIONAL DE : INGENIERO ELECTRICISTA

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

LIMA - 1994

A continuación se da un resumen de los tópicos cubiertos en el presente trabajo :

En el capítulo I se presenta el modelamiento de los elementos del sistema eléctrico entre ellos las líneas, los transformadores, las cargas, la máquina síncrona, los sistemas de control (reguladores de tensión y de velocidad) y los compensadores estáticos.

En el capítulo II se muestra el planteamiento de la solución, la descripción general y el uso del programa computacional.

En el capítulo III se hace una aplicación al sistema interconectado Centro Norte (SICN), presentándose un análisis del sistema ante diversas perturbaciones.

# INDICE

Introducción	1
<b>CAPITULO I</b>	
<b>MODELAMIENTO DEL SISTEMA</b>	4
1.1.- Líneas de transmisión	4
1.2.- Transformadores	5
1.3.- Cargas	8
1.4.- Máquina síncrona	9
1.5.- Sistemas de control	16
1.5.1.- Regulador de tensión	16
1.5.2.- Regulador de velocidad	20
1.5.3.- Compensador estático	23
<b>CAPITULO II</b>	
<b>PROGRAMA DE ESTABILIDAD TRANSITORIA</b>	27
2.1.- Planteamiento general de la solución	27
2.2.- Descripción del programa	35
2.3.- Uso del programa	37
<b>CAPITULO III</b>	
<b>APLICACION AL SISTEMA INTERCONECTADO</b>	
<b>CENTRO - NORTE</b>	41
3.1.- Descripción general del sistema eléctrico	41
3.2.- Eventos simulados	46
3.3.- Análisis de los resultados	47

Conclusiones y Recomendaciones	52
--------------------------------	----

## Anexos

A. Ordenamiento óptimo y eliminación de Gauss	
A.1 Ordenamientos óptimos - criterio de Tinney	
A.2 Eliminación de Gauss	
B. Método de Euler	
C. Representación analógica de los diagramas bloques	
C.1 Bloques analógicos	
C.2 Diagramas analógicos de los modelos considerados	
D. Cuadros de datos del SICN	
E. Manual del programa	
F. Resultados de las simulaciones	

Bibliografía	107
--------------	-----

## Introducción

A medida que los sistemas eléctricos de potencia crecen cada vez más, la naturaleza de los problemas de estabilidad se hace más compleja, Por ello es importante predecir la capacidad que tiene el sistema para mantener su estabilidad ante diversas perturbaciones.

Se estudian dos tipos predominantes de estabilidad de sistemas de potencia : La estabilidad transitoria es la capacidad del sistema para mantener el sincronismo durante grandes perturbaciones. En estado estacionario la estabilidad permanente para una condición de operación es la capacidad del sistema de responder ante pequeñas perturbaciones.

La estabilidad transitoria de un sistema de potencia está comprometida basicamente con la configuración, los parámetros y las condiciones de operación del sistema. Una condición de inestabilidad transitoria puede ser causada por fallas o pérdida de componentes del sistema, es decir grandes perturbaciones que resultan ya sea de la pérdida de generación o de transmisión, de los cambios de carga momentáneas o sostenidos.

La presente tesis está dirigida al estudio de la estabilidad transitoria en un sistema eléctrico de potencia. Dado que un estudio de estabilidad involucra la

manipulación de gran cantidad de datos y cálculos complejos, la simulación de un evento requiere, por lo general, de un alto costo en términos de tiempos de computación y horas hombre para la preparación de los datos y la revisión de los resultados.

Además, Los programas que existen para realizar estas simulaciones actualmente no están accesibles a los profesionales y estudiantes, debido a su alto costo de adquisición o debido a que su ejecución sólo es posible en computadoras tipo "mainframe" [5].

Muchas de estas simulaciones se realizan en un modo "batch" lo que hace muy difícil el ingreso y modificación de datos y el análisis de resultados. El análisis sólo es posible después que el proceso ha concluido y se requieren de otros programas utilitarios (tales como QPRO, LOTUS, etc.) para visualizar los resultados gráficamente.

En la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la UNI, se dispone de un programa de estabilidad transitoria de dominio público denominado TRANSDIR [7], que es una versión modificada por la empresa FURNAS CENTRAIS ELECTRICAS SA del Brasil de una versión original del programa TRANSTAB desarrollado por la Philadelphia Electric Company ( PECO ) [8] para computadoras tipo "mainframe". A partir del programa TRANSDIR disponible en la UNI se generó una versión en computadora personal, la que también presenta los inconvenientes de la ejecución en modo "batch" mencionados anteriormente, y que además



requiere de un tiempo excesivo para la ejecución de simulaciones para un sistema eléctrico de cierta envergadura, tales como el Sistema Interconectado Centro - Norte.

Por consiguiente el objetivo del presente trabajo es desarrollar un programa interactivo de edición de datos, simulación de eventos y visualización de resultados en base al programa TRANSDIR anteriormente mencionado. Asimismo, el programa permitirá observar el comportamiento de algunas máquinas síncronas durante la simulación, mediante el despliegue gráfico de sus ángulos relativos. Además, se implementarán modelos generalmente aceptados para las máquinas síncronas, reguladores y compensadores estáticos. Adicionalmente, se estudian algunas perturbaciones severas en el Sistema Interconectado Centro - Norte para mostrar la efectividad del programa.

## CAPITULO I MODELAMIENTO DEL SISTEMA

A continuación se presenta el modelamiento del sistema planteado

### 1.1 Líneas de transmisión

La red considerada para nuestro estudio de estabilidad transitoria es un sistema trifásico balanceado, y se le representa por su diagrama unifilar. Las líneas se representan por su equivalente "pi" de parámetros concentrados y todos los valores deben ser usados en por unidad. El equivalente "pi" es mostrado en la figura 1.1.

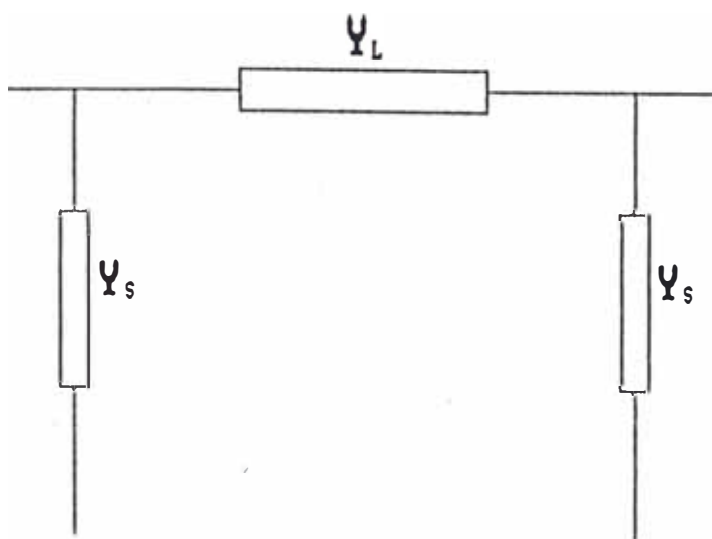


FIGURA 1.1 EQUIVALENTE "PI" DE UNA LINEA DE TRANSMISION

Donde

$Y_L$  - Admitancia serie

$Y_S$  - Admitancia paralelo

El comportamiento de la red esta descrito por el sistema matricial :

$$[ I_{inj} ] = [ Y ] [ V ]$$

Donde

El vector  $[ I_{inj} ]$  son las corrientes inyectadas debido a los generadores, cargas no lineales y compensadores estáticos,  $[ Y ]$  es la matriz de admitancia y  $[ V ]$  es el vector de los voltajes de nodo.

## 1.2 Transformadores

El modelo equivalente "pi" del transformador es obtenido a partir de la representación ilustrada en la figura 1.2, dicho modelo considera al transformador con el tap en una posición diferente a la relación de transformación nominal. Este efecto debe ser incluido en la matriz de admitancia propia y mútua en el nodo al que está conectado dicho transformador.

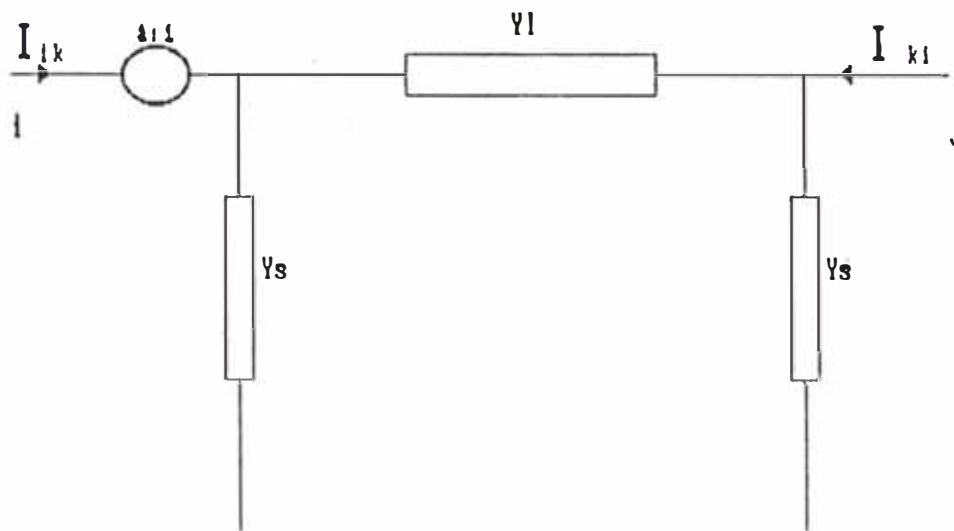


FIGURA 1.2 TRANSFORMADOR CON TAP

Donde :

$Y_1$  = Admitancia serie

$Y_s$  = Suceptancia paralelo

Sea el transformador ubicado entre los nodos (primario) y j (secundario). donde "a" es el tap en por unidad se tiene :

$$a I_{ik} = V_i Y_s / a - ( V_k - V_j / a ) Y_1$$

$$I_{ki} = ( V_k - V_i / a ) Y_1 + V_k Y_S$$

Ordenando :

$$I_{ik} = ( (Y_S - Y_1) / a^2 ) V_i - ( Y_i / a ) V_k$$

$$I_{ki} = ( - Y_1 / a ) V_i + ( Y_1 + Y_S ) V_k$$

Luego a partir de estas ecuaciones se puede obtener el equivalente "pi" mostrado en la figura 1.3 :

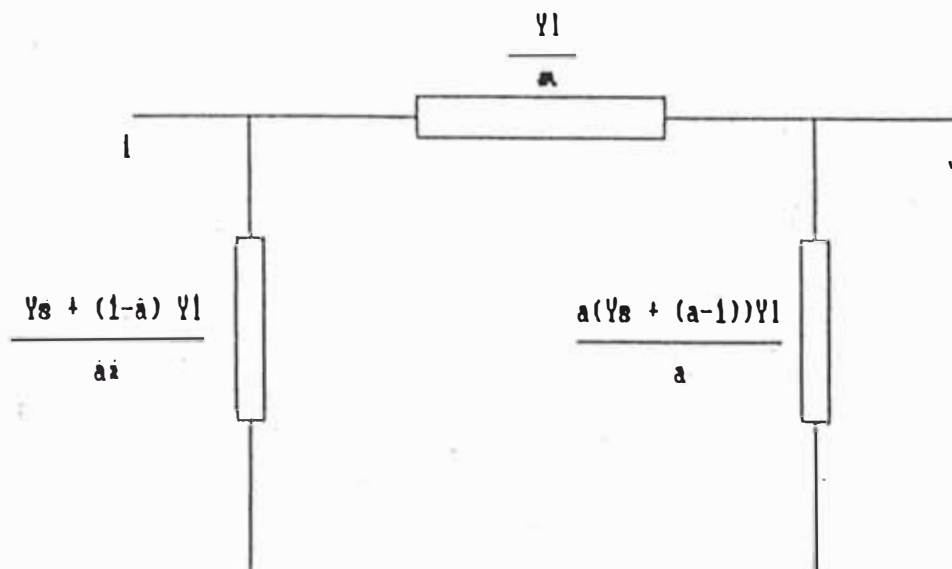


FIGURA 1.3 EQUIVALENTE "PI" DE UN TRANSFORMADOR

### 1.3 Cargas

Se representan como una combinación de 3 tipos de carga: Potencia constante, corriente constante e impedancia constante. La característica general puede ser dada tal que la potencia sea función del voltaje (V).

$$P = P_0 V^0 + P_1 V^1 + P_2 V^2$$

$$Q = Q_0 V^0 + Q_1 V^1 + Q_2 V^2$$

Donde:

$P_0$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $Q_0$ ,  $Q_1$  y  $Q_2$  son constantes que dependen del valor nominal de P y Q.

Las cargas estáticas son modeladas generalmente con impedancias constantes. En el programa este modelamiento es asumido por defecto.

La figura 1.4 muestra las características de los modelos de carga.

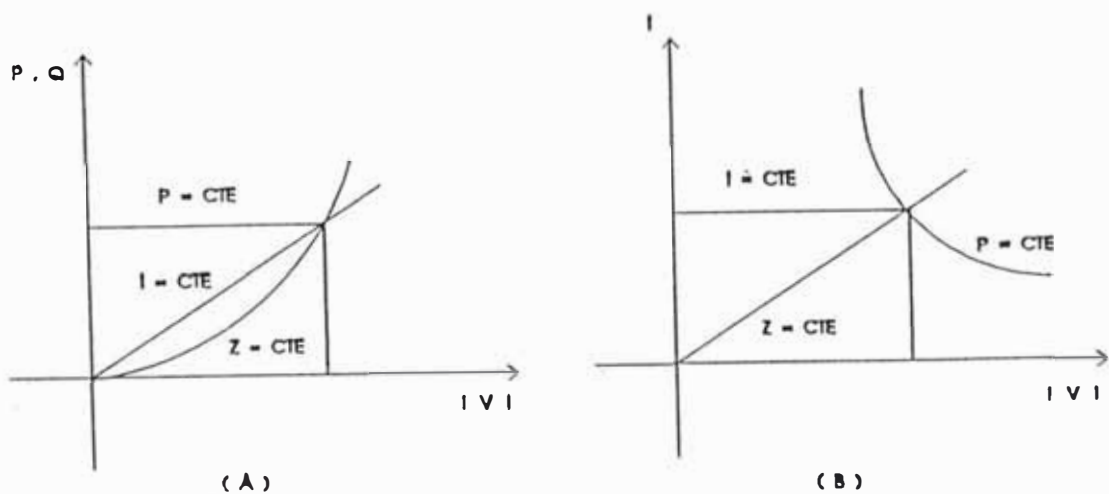


FIGURA 1.4 CARACTERISTICAS DE LOS DIFERENTES MODELOS DE CARGAS (A) POTENCIA VS VOLTAJE (B) CORRIENTE VS VOLTAJE

#### 1.4 Máquina síncrona

La representación de la máquina síncrona debería ser lo mas simple posible para minimizar los costos de tiempo de proceso computacional, pero a la vez es necesario tener una adecuada precisión, de acuerdo a los requerimientos de la simulación.

Durante un estudio de estabilidad transitoria es común tener diferentes modelos de máquina síncrona. Es recomendable que las máquinas que están cerca a la perturbación sean representadas por un modelo detallado y las que están lejos sean representadas por un modelo simple.

En el desarrollo de los modelos usados en el programa se identifican dos modelos básicos, a continuación se describe cada uno de ellos [4,9]:

##### MODELO I

El modelo clásico, el cual usa una magnitud de voltaje constante detrás de la reactancia transitoria. Cuando se representa por un norton equivalente, la reactancia transitoria ( $X'_d$ ) está representada por una reactancia a tierra en el terminal de la máquina síncrona y una corriente inyectada en ese nodo igual a  $E'/X'_d$  donde  $E'$  es el voltaje detrás de reactancia transitoria. La figura 1.5 muestra su diagrama fasorial.

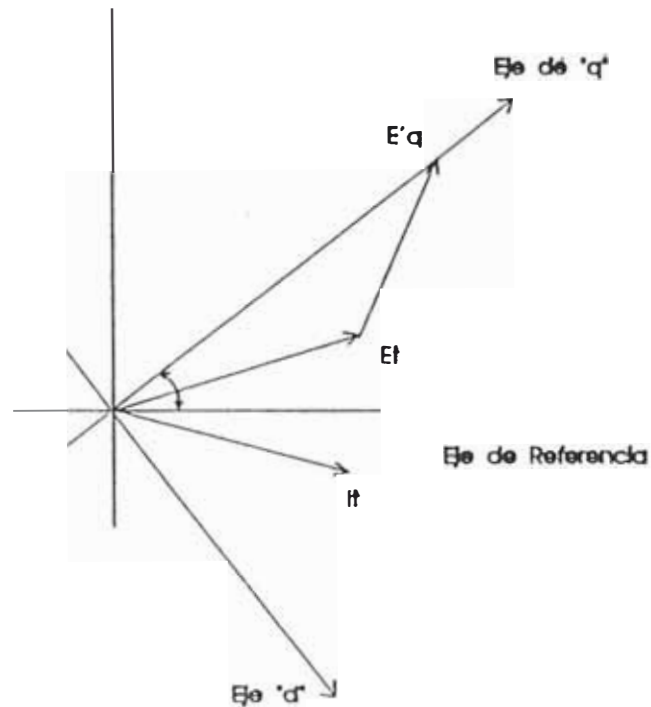


FIGURA 1.5 DIAGRAMA FASORIAL DEL MODELO I

#### MODELO IV

Este modelo se representa por un circuito en el estator y tres circuitos en el rotor. Los circuitos en el rotor son el circuito de campo, el circuito amortiguador en el eje directo y el circuito amortiguador en el eje cuadratura. La figura 1.6 muestra su diagrama fasorial.



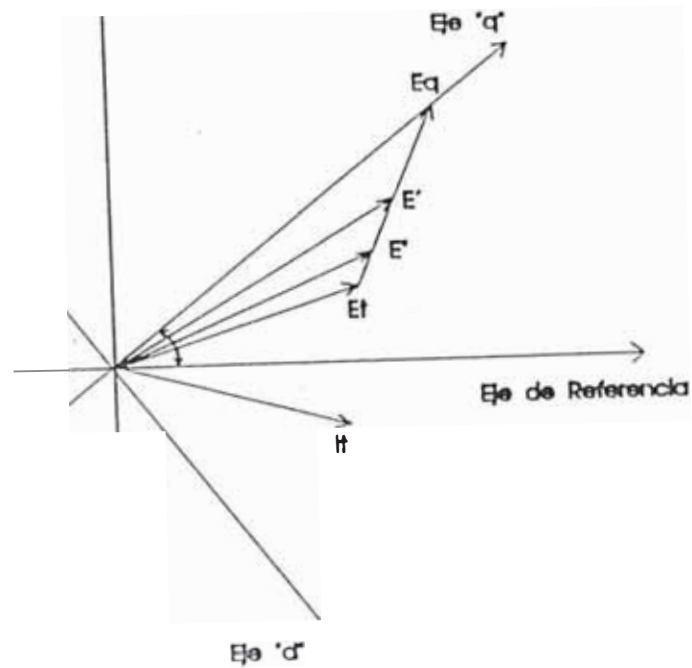


FIGURA 1.6 DIAGRAMA FASORIAL DEL MODELO IV

Las ecuaciones para este modelo son las siguientes

$$pE'_{q} = (E_{fd} - E_{i}) / T'_{do}$$

$$p\phi''_{q} = - ( - ( X_{q} - X''_{d} ) I_{q} + \phi''_{q} ) / T''_{qo}$$

$$\phi''_{d} = \phi_{kd} + ( X''_{d} - X_{l} ) / ( X''_{d} - X_{l} ) ( E'_{q} - \phi_{kd} )$$

$$p\phi_{kd} = - ( ( X'_d - X_l ) I_d + \phi_{kd} + E'_q ) / T''_{q0}$$

$$E_i = E'_q + ( X_d - X'_d ) ( I_d - I_{kd} ) + SG$$

$$I_{ik} = ( ( X'_d - X''_d ) / ( X'_d - X_l ) ) ( \phi_{kd} - E'_q + ( X'_d - X_l ) I_d )$$

$$w = p\delta$$

$$pw = ( w_0 / 2 H ) ( T_m - T_e )$$

$$T_e = \phi''_d I_q + \phi''_q I_d$$

Donde :

$p$  = Operador  $d/dt$ .

$\delta$  = Angulo entre el eje  $q$  y la referencia en radianes.

$t$  = Tiempo en segundos.

$I_d$  = Componente directa de la corriente del estator en p.u.

$I_q$  = Componente de cuadratura de la corriente del estator en p.u.

$I_{kd}$  = Componente directa de la corriente del devanado de amortiguamiento en p.u.

$E_i$  = Corriente de campo en p.u.

$E'_q$  = Flujo concatenado del campo en p.u.

$E_{fd}$  = Voltaje de campo en p.u.

- $\phi_{kd}$  - flujo concatenado en eje directo del devanado amortiguador en p.u.
- $\phi''_d$  - Componente directa del flujo subtransitorio en el rotor.
- $\phi''_q$  - Componente del eje cuadratura del flujo subtransitorio en el rotor.
- $w$  - Velocidad en radianes por segundo.
- $w_0$  - Velocidad base en radianes por segundo.
- $f_0$  - Frecuencia base en hertz.
- $T_m$  - Torque mecánico en p.u.
- $T_e$  - Torque eléctrico en p.u.
- $X_l$  - Reactancia de dispersión en p.u.
- $X''_d$  - Reactancia subtransitoria en el eje directo en p.u.
- $X'_d$  - Reactancia transitoria en el eje directo en p.u.
- $X_d$  - Reactancia en el eje directo en p.u.
- $X''_q$  - Reactancia subtransitoria en el eje cuadratura en p.u.
- $X'_q$  - Reactancia transitoria en el eje cuadratura en p.u.
- $X_q$  - Reactancia en el eje cuadratura en p.u.
- $T''_{d0}$  - Constante de tiempo subtransitoria en el eje directo en segundos.
- $T''_{q0}$  - Constante de tiempo subtransitoria en el eje cuadratura en segundos.
- $T'_{d0}$  - Constante de tiempo transitoria en el eje directo en segundos.

SG - Efecto de la saturación.

El diagrama de bloques del modelo IV de la máquina síncrona se muestra en la figura 1.7 . Este modelo puede ser usado como un standard por la información que generalmente dan los fabricantes. Asimismo, este grado de detalle es suficiente para tener una adecuada precisión en un programa de estabilidad.

El efecto de la saturación, que es la característica no lineal entre el flujo concatenado y la fuerza magnetomotriz, es representado a partir del modelo clásico que es una aproximación a una curva exponencial por ser más fácil de usar dentro del programa. Asumiendo que no hay saturación hasta 0.8 p.u. del voltaje nominal, luego cualquier saturación puede ser estimada por la función exponencial de la forma [12]:

$$SG = A \text{ Exp}( B ( E'q - 0.8 ) )$$

Donde

A y B - Constantes de saturación.

E'q - Flujo concatenado del campo en p.u.

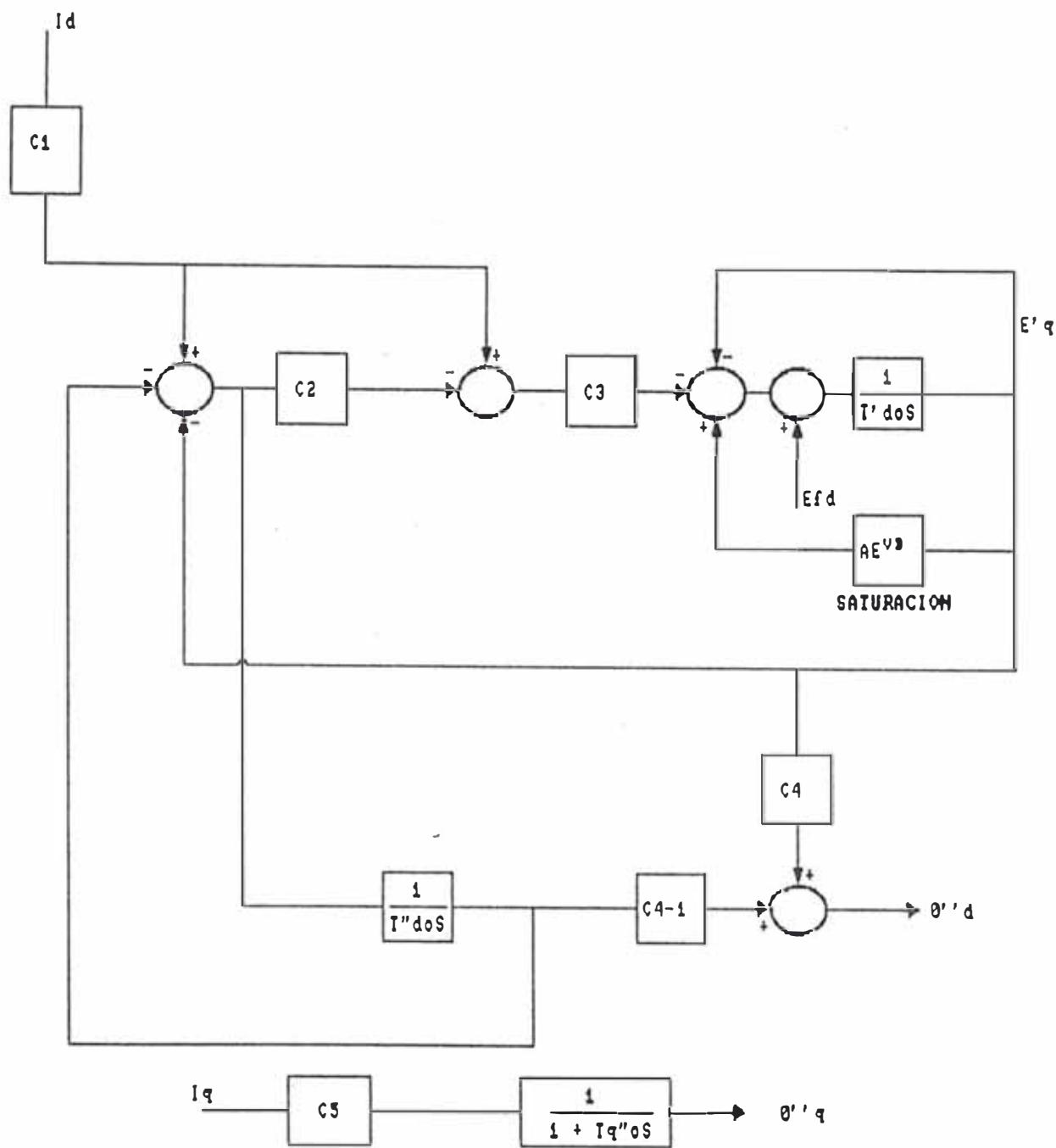


FIGURA 2.7 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL MODELO IV DE LA MAQUINA SINCRONA

Donde :

$$C1 = X'd - X1$$

$$C2 = ( X'd - X''d ) / ( X'd - X1 )^2$$

$$C3 = Xd - X'd$$

$$C4 = ( X''d - X1 ) / ( X'd - X1 )$$

$$C5 = ( Xq - X''d )$$

## 1.5.- Sistemas de control

### 1.5.1.- Regulador de tensión

Su función es proporcionar la tensión de campo adecuada para mantener la magnitud de la tensión terminal en la máquina síncrona dentro de una tolerancia especificada. Una característica importante es la capacidad de responder a las variaciones de tensión que se presentan durante la operación. Existe una diversidad de modelos por eso es conveniente que sea definido y suministrado por el proveedor de la máquina síncrona. Con el fin de facilitar la entrega de información y el intercambio de experiencias, un grupo de trabajo de la IEEE [3,9] ha establecido la siguiente clasificación

Tipos de sistemas de excitación

Tipo 1: Acción continua y excitatriz rotativa.

Tipo 2: Con sistema de rectificación rotativa.

Tipo 3: Estático con señales de entrada de tensión y de corriente.

Tipo 4: Con regulador de acción discontinua.

Por lo general, un sistema de control de excitación está compuesto por dispositivos de medición, comparación, amplificación y amortiguamiento, los cuales conjuntamente

con las características de la excitatriz determinan la fuerza electromotriz que actúa sobre el devanado de campo del alternador.

La mayoría de los sistemas de control de excitación modernos en servicio y los que están siendo suministrados actualmente, corresponden al tipo 1 de la clasificación dada. El comportamiento transitorio de cada dispositivo se describe mediante ecuaciones diferenciales, en las cuales a cada elemento le corresponde una función de transferencia. Por lo tanto el sistema físico de la figura 1.8 se modela mediante las ecuaciones correspondientes al diagrama de bloques de la figura 1.9.

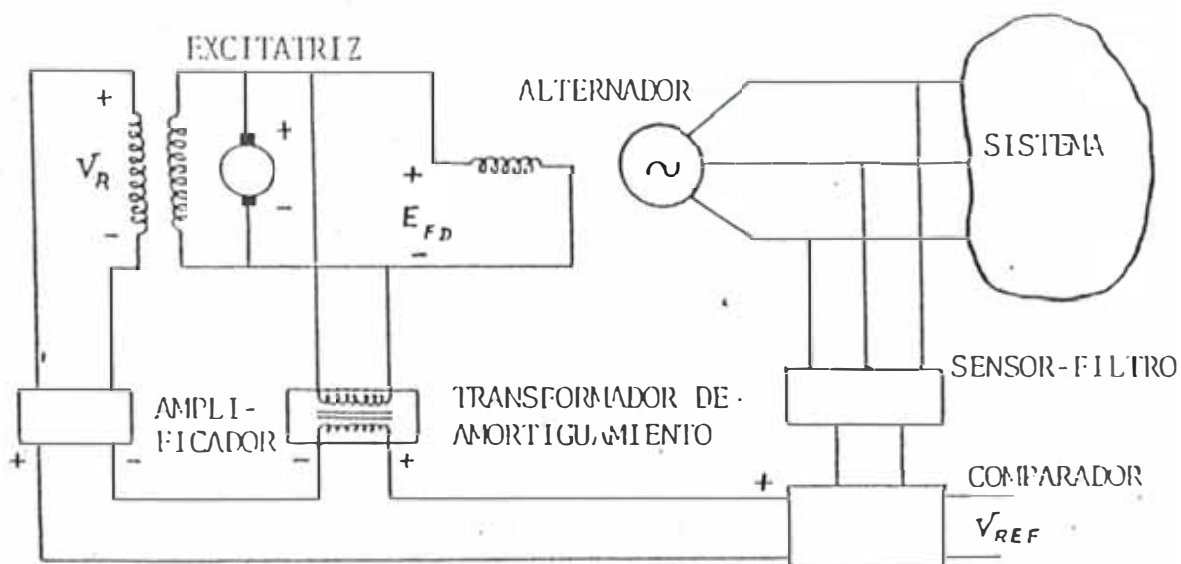


FIGURA 1.8 REGULADOR DE TENSION TIPICO

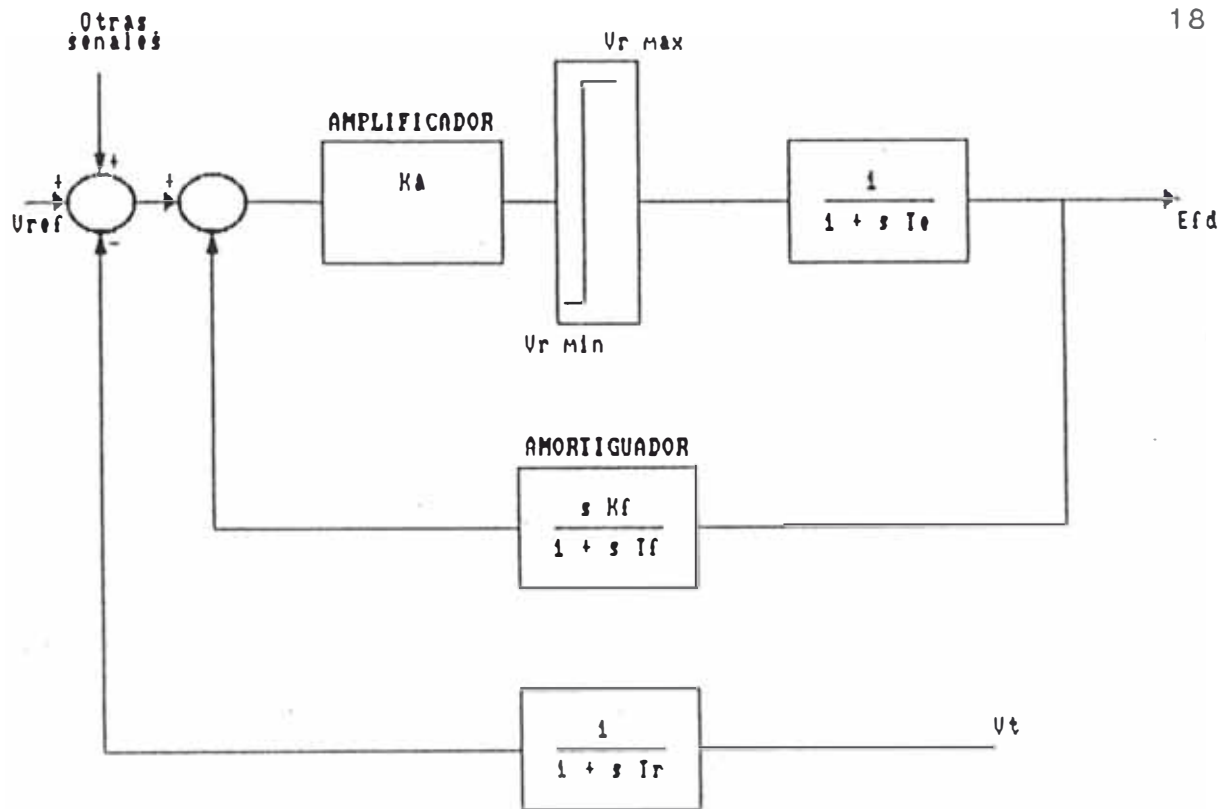


FIGURA 1.9 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL REGULADOR DE TENSION

Donde :

- Efd - Tensión de salida del excitador aplicado al campo del generador.
- Ka - Ganancia del regulador.
- Ke - Constante de la excitatriz, relacionado al campo autoexcitado.
- Te - Constante de tiempo de la excitatriz.
- Tf - Constante de tiempo del amortiguador.
- Tr - Constante de tiempo del filtro de entrada.
- Vr - Tensión de salida del regulador.
- V<sub>rmax</sub> - Valor máximo de Vr.
- V<sub>rmin</sub> - Valor mínimo de Vr.
- Kf - Ganancia del amortiguador.



En el diagrama de la figura 1.9,  $V_t$  es la tensión controlada (tensión en bornes del alternador) la cual constituye la señal de entrada del filtro del regulador, dicho filtro tiene una constante de tiempo igual a  $T_r$ . Para la mayoría de los sistemas  $T_r$  es muy pequeña y se puede considerar igual a cero.

El primer operador suma, compara la referencia del regulador con la señal de salida del filtro-sensor, para determinar el valor del error en la tensión, el cual constituye parte de la señal de alimentación del amplificador. El segundo operador suma el error de la tensión con la señal resultante de la acción del elemento amortiguador. La función de transferencia principal es la del amplificador, caracterizado por una ganancia de magnitud  $K_a$ . Se incluye además en el diagrama un bloque limitador, tal que en situaciones donde las señales de error sean grandes, ello no determine una señal de salida  $V_r$  que exceda los límites físicos del regulador. La señal resultante es retroalimentada y proporciona la amortiguación de la señal  $E_{fd}$ .

En el desarrollo de los diagramas de bloques del sistema de excitación, fue necesario establecer una tensión base. Para el análisis, 1.0 p.u. de tensión se define como la tensión nominal. 1.0 p.u. de la tensión de salida de la excitatriz es la tensión requerida para producir la tensión nominal en el generador.

### 1.5.2.- Regulador de velocidad

Este sistema tiene como objetivo regular el torque mecánico que la turbina entrega al generador, mediante el control de la posición de las válvulas o las compuertas de admisión del fluido. Dicho torque es el que define la potencia activa que el generador entrega a la red eléctrica.

Un esquema simplificado de un sistema regulador de velocidad típico [1,9] se muestra en la figura 1.10, En estado estable la velocidad " $n_s$ " es comparada con la velocidad de referencia " $n_r$ ", que es modificada por la caída permanente de velocidad por cada posición de válvula o por la potencia de salida del generador.

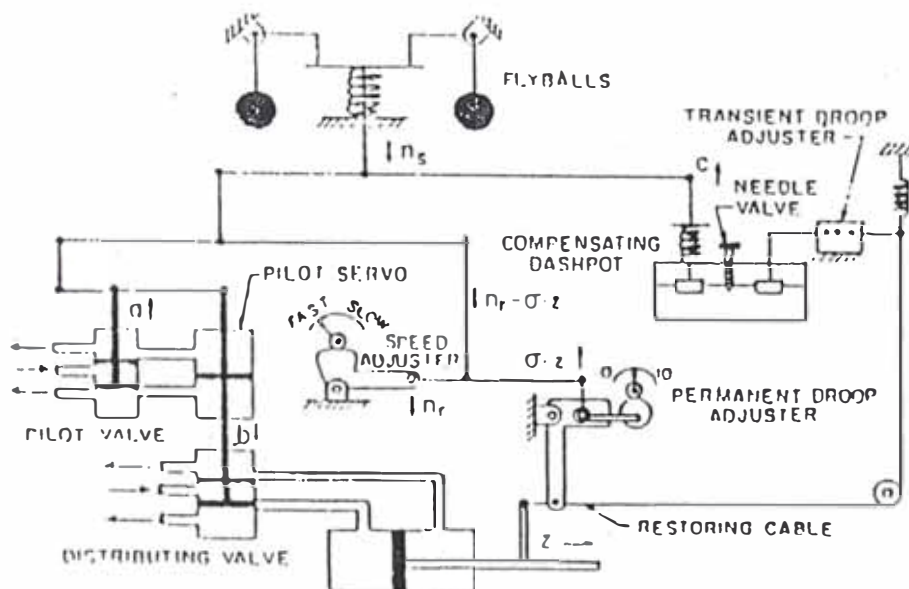


FIGURA 1.10 REGULADOR DE VELOCIDAD TÍPICO

Cuando hay un desbalance entre la velocidad actual y la velocidad de referencia fijada aparece un cambio en la entrada al servo piloto, provocando que la posición de la válvula varíe, una señal de caída transitoria es desarrollada para oponerse a los cambios rápidos de la válvula de posición.

En la figura 1.11 se muestra el diagrama de bloques correspondiente al esquema mostrado incluyendo el efecto de la turbina y tubería de presión.

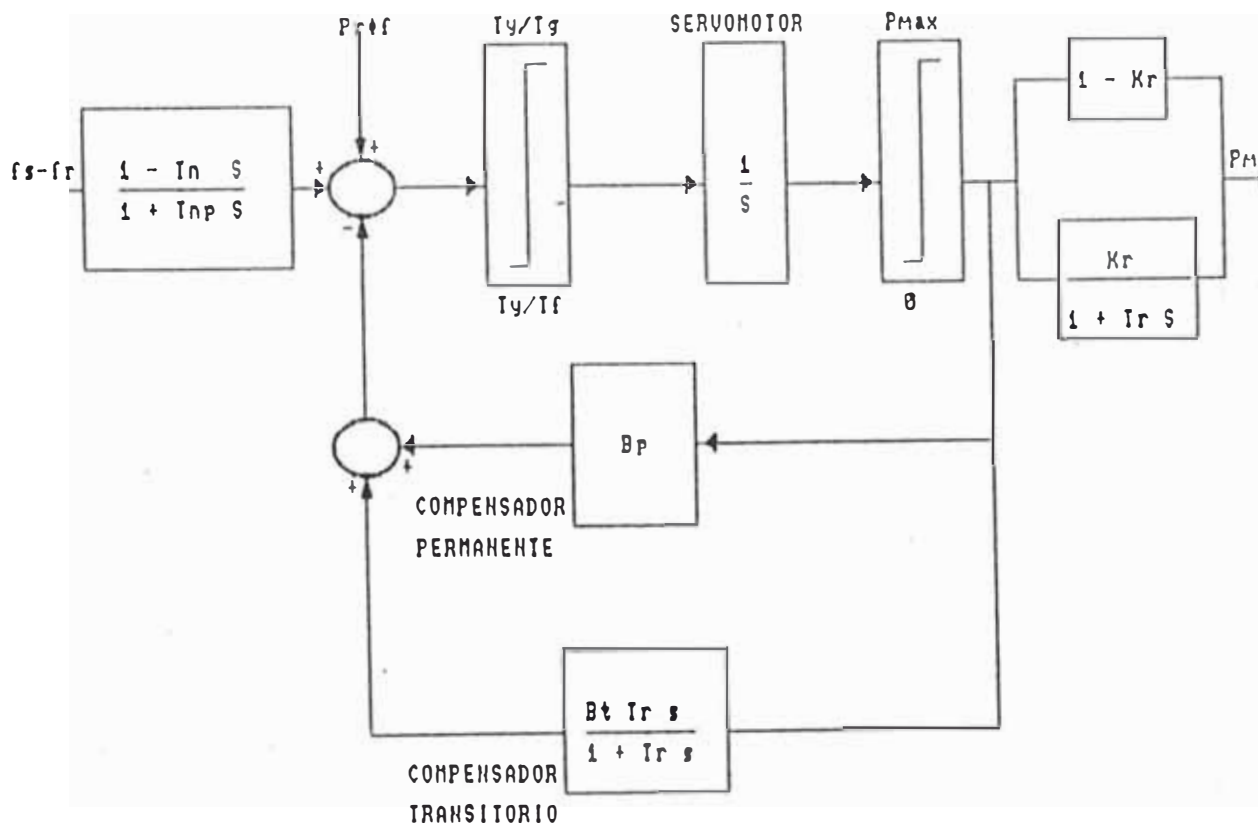


FIGURA 1.11 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL REGULADOR DE VELOCIDAD

A continuación describiremos las constantes del modelo especificado

- $f_s$  - Velocidad actual.
- $f_r$  - Velocidad de referencia.
- $P_{max}$  - Potencia máxima del generador.
- $T_y$  - Constante de tiempo del regulador.
- $T_{np}$  - Constante de tiempo del regulador.
- $T_f$  - Constante de tiempo del regulador.
- $T_g$  - Constante de tiempo del regulador.
- $T_p$  - Constante de tiempo de la válvula piloto.
- $T_d$  - Constante de tiempo del amortiguador.
- $T_r$  - Constante de tiempo de la inercia del agua.
- $B_p$  - Inclinação permanente del regulador.
- $B_t$  - Inclinação temporal del regulador.
- $K_r$  - Indicador del efecto del agua ( 3 si es una Central Hidráulica y 1 si es Central Térmica ).

### 1.5.3.- Compensador estático

A diferencia de los compensadores comunmente usados como son las máquinas rotativas y capacitores por escalones, la denominación de compensadores estáticos, se refiere a sistemas basados en el uso de tiristores de potencia para controlar la corriente que fluye en él, lo cual le permite una gran rapidez de respuesta ante cualquier variación de voltaje en el sistema de potencia. Estos compensadores están equipados con dispositivos de control de tecnología electrónica avanzada con aplicación a sistemas de potencia.

La función de los compensadores estáticos en alta tensión se puede resumir en lo siguiente:

- Mantener el voltaje en barras de salida en un valor prefijado.
- Efectuar el control dinámico de la potencia reactiva lo que mejora la estabilidad permanente y transitoria del sistema eléctrico.
- Disminución de pérdidas en líneas de transmisión, al elevarse los niveles de tensión en el sistema.

Los compensadores estáticos pueden tener las configuraciones típicas mostradas en la figura 1.12.

La rama 1 representa al reactor cuya corriente varía en función del ángulo de disparo del tiristor. La rama 2 representa el capacitor donde el tiristor cumple la

función de un interruptor ultra rápido, esto es, que permite o que impida el flujo de corriente en esta rama. La rama 3 es la de los filtros cuya finalidad es eliminar los armónicos generados en la rama 1. Es necesario elegir convenientemente el voltaje de referencia y la pendiente en el compensador estático. Por tanto la elección de los parámetros del compensador estático está en función de las características de la red, por eso es necesario determinar correctamente las curvas (V-Q) de la red de manera que se represente los casos más desfavorables.

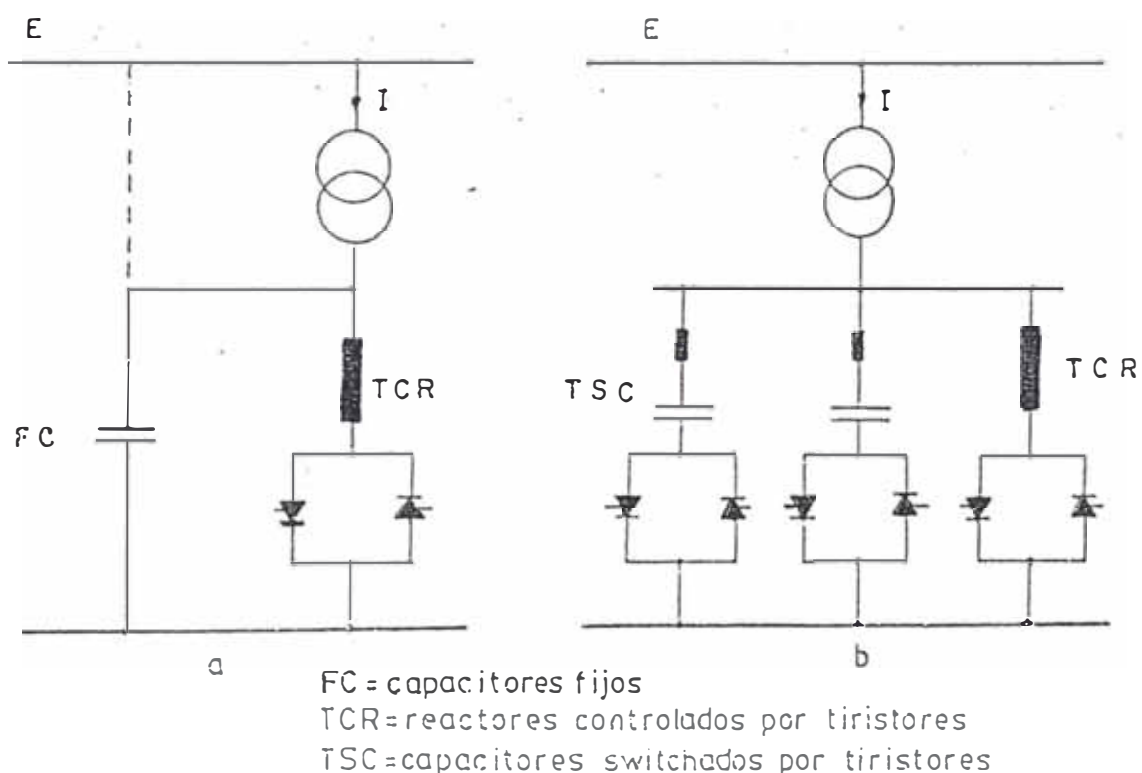


FIGURA 1.12 CONFIGURACIONES BASICAS PARA SISTEMAS DE COMPENSACION ESTATICA

Donde :

FC : Capacitores fijos.

TSR : Reactores controlados por tiristores.

TSC : Capacitores switchados por tiristores.

El modelo del compensador estático mostrado en la figura 1.13 se basa en representaciones desarrolladas por C.I.G.R.E. Working Group [2,10]. Este modelo facilita el uso de la información disponible. Además, permite representar al compensador estático con reactores controlados por tiristor en modo continuo. Cabe notar que este modelo no es aplicable para compensadores formados solamente con capacitores switchados por tiristores.

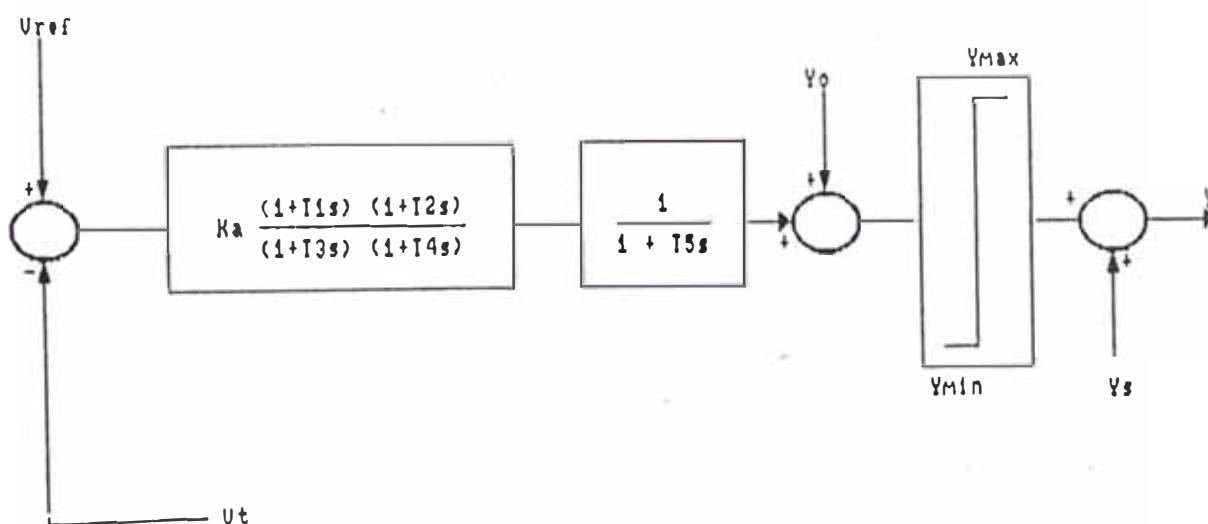


FIGURA 1.13 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL COMPENSADOR ESTÁTICO

A continuación describiremos las constantes del modelo especificado

$T_1, T_2, T_3, T_4$  = Constantes de tiempo del regulador.

$T_5$  - Constante de tiempo del tiristor.

$K_a$  - Ganancia del regulador.

$Y_{\max}$  = Valor máximo de la admitancia del compensador.

$Y_{\min}$  - Valor mínimo de la admitancia del compensador.

$Y_0$  = Admitancia inicial del compensador.

$Y_s$  - Admitancia fija conectada a la barra.



## CAPITULO II PROGRAMA DE ESTABILIDAD TRANSITORIA

En el presente trabajo se ha desarrollado un ambiente interactivo y gráfico sobre un programa ampliamente usado en la industria, el TRANSDIR [4,7].

Dicho programa representa los efectos transitorios y subtransitorios de las máquinas síncronas en los ejes "d" y "q" y los efectos de saturación. Asimismo el programa incluye modelos para reguladores de velocidad, de tensión y para los compensadores estáticos. Además, se facilita para las cargas un modelamiento no lineal.

El esquema de solución planteado por este programa se detalla a continuación.

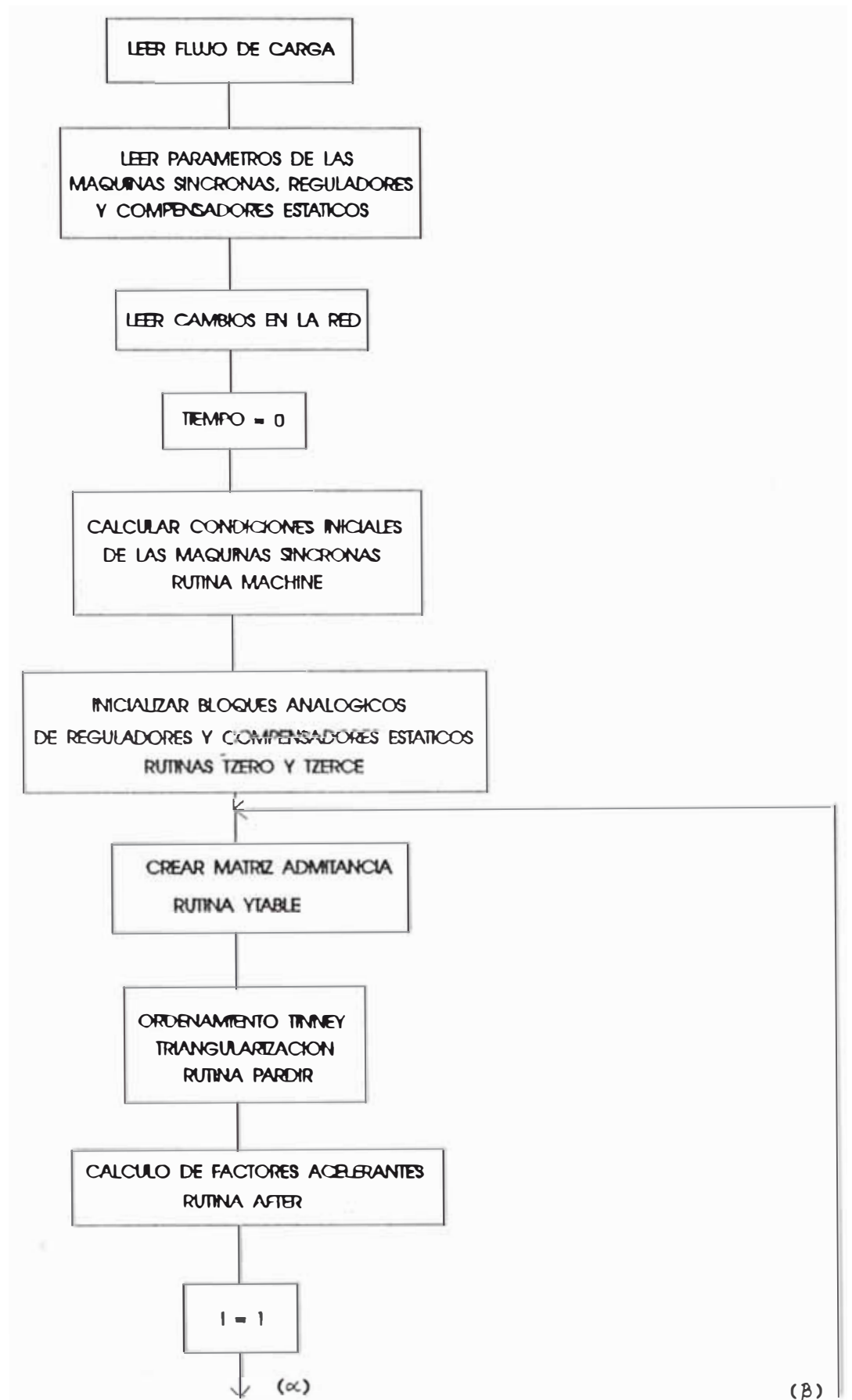
### 2.1 Planteamiento general de la solución

Para la representación del sistema eléctrico, el programa utiliza los modelos descritos en el capítulo uno.

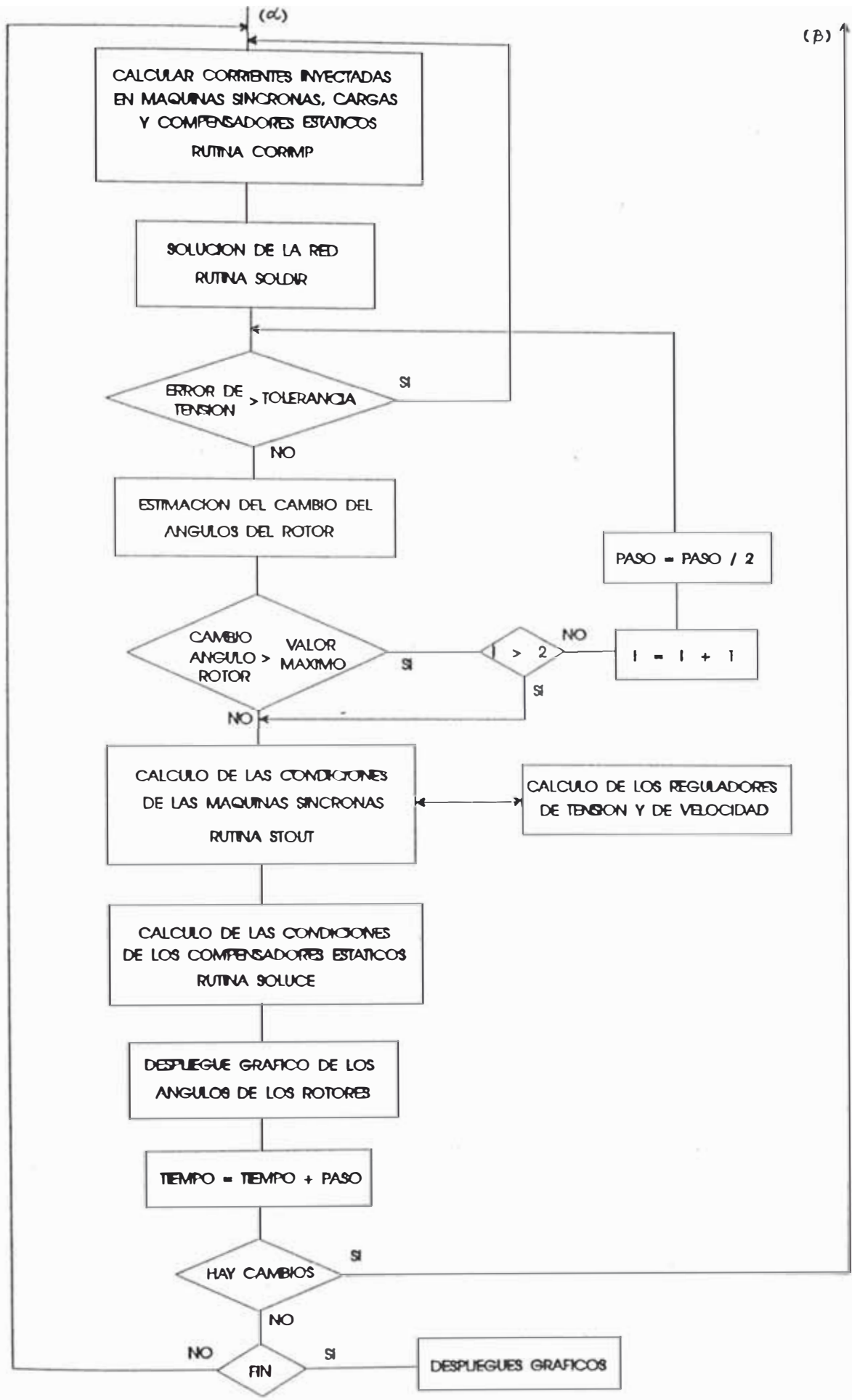
En la figura 2.1 se muestra la estructura del programa de estabilidad transitoria.

Para la simulación en el tiempo del comportamiento de un sistema eléctrico, se requiere de un flujo de carga base, que es generado por el programa computacional POWERFLO de la Phidalphia Electric Company.

FIGURA 2.1 ESTRUCTURA DEL PROGRAMA DE ESTABILIDAD TRANSITORIA



(β)



El flujo de carga representa las condiciones iniciales del sistema y suministra la información referida a los parámetros de las líneas y transformadores, los niveles de tensión, la demanda y la generación. Además, es necesario especificar los parámetros de las máquinas síncronas, que se editan dentro del programa.

El sistema se representa por medio de ecuaciones diferenciales y algebraicas, las cuales se pueden expresar en esquemas analógicos que están formados por bloques de funciones ( Ver anexo C.1). Estos esquemas se encuentran disponibles en un archivo de acceso directo de sólo lectura.

Los esquemas analógicos de los modelos considerados en el programa y descritos en el capítulo uno están especificados en el anexo C.2.

Para resolver las ecuaciones diferenciales, por medio de estos esquemas analógicos se usa el método de Euler (Ver anexo B).

Para el tiempo igual a cero, las condiciones iniciales en las máquinas síncronas son calculadas en la rutina MACHINE, a partir de la potencia y la tensión terminal suministrada por el flujo de carga. Si la máquina síncrona está representada por el modelo IV se calculan todas las tensiones y corrientes transitorias y subtransitorias en los ejes "d" y "q"

Las ecuaciones de la máquina síncrona presentadas en 1.4 están estructuradas para su representación en la red por un equivalente thevenin. Esto puede ser modificado a

un equivalente Norton, es decir a una fuente de corriente y una admitancia en paralelo. La admitancia de la máquina esta conectada directamente a un nodo y puede ser colocada en la matriz de admitancias. El equivalente Norton usado es mostrado en la figura 2.2 :

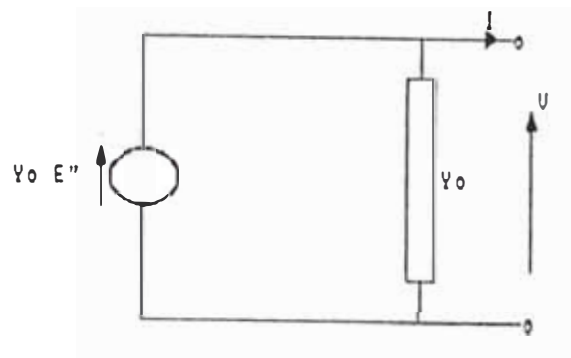


FIGURA 2.2 EQUIVALENTE NORTON DE LA MAQUINA SINCRONA

Donde

$Y_o$  - Admitancia Equivalente (  $1 / X''d$  )

$E''$  - Tensión Subtransitoria

Las ecuaciones de la máquina síncrona se plantean en un sistema de referencia común para todas las máquinas. Las componentes reales e imaginarias de las tensiones de la red, son dadas en la figura 2.3 , estas se obtienen de la siguiente transformación:

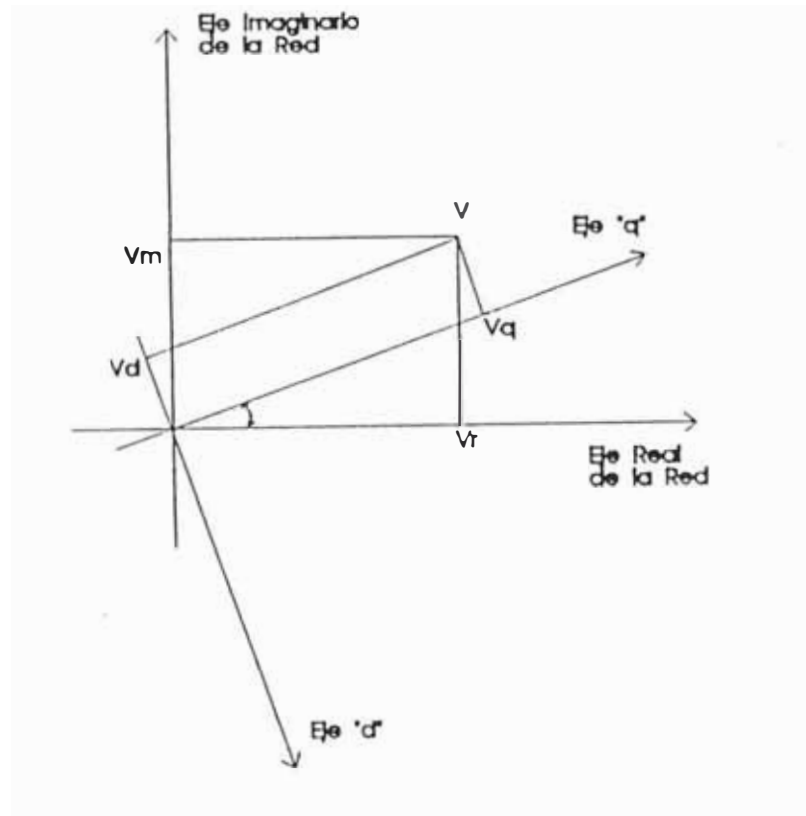


FIGURA 2.3 LA MAQUINA SINCRONA EN UN AMBIENTE DE REFERENCIA DE LA RED

Donde :

$$\begin{bmatrix} V_r \\ V_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta & -\sin\delta \\ \sin\delta & \cos\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_q \\ V_d \end{bmatrix}$$

La inicialización de los bloques analógicos de los reguladores y el compensador estático se realizan en las rutinas TZERO y TZERCE respectivamente.

Los modelos de la máquina síncrona y el regulador de tensión se enlazan por medio de la tensión de campo y se inicializan a partir de los valores iniciales de la corriente directa, la corriente de cuadratura y la tensión en la barra terminal del generador. Las variables

de salida del modelo IV son las tensiones subtransitorias, estas son necesarias para el cálculo de la potencia eléctrica.

Para el modelo del regulador de velocidad se recibe como entrada una variación de la frecuencia con respecto al frecuencia nominal ( $f_0 = 60 \text{ Hz}$ ). Para  $t = 0$  la frecuencia de todas las máquinas síncronas es  $f_0 = 60 \text{ hz}$ , por tanto la variación que recibe el regulador es cero. Asimismo, a partir de esta variación se obtiene un cambio de potencia que luego se añade a la potencia mecánica del generador.

Para el caso del modelo analógico del compensador estático la inicialización se basa en el valor de la tensión inicial en la barra controlada y la admitancia equivalente inicial en el compensador. La admitancia equivalente inicial se calcula a partir de los valores de tensión y potencia reactiva en la barra del compensador. Estos valores son suministrados por el flujo de carga. El modelo toma en cuenta los capacitores o reactores fijos en la barra, obteniéndose una admitancia neta.

Las cargas son tomadas por defecto como impedancia constante. El programa considera un modelamiento no lineal de la carga como potencia y corriente constante, la admitancia equivalente inicial para cada carga es calculada a partir de los valores de potencia y tensión suministrados por el flujo de carga.

A continuación se crea una tabla conteniendo la información de la matriz admitancia, la rutina que lo realiza es YTABLE.

Luego las barras son renumeradas y ordenadas tomándose en cuenta las barras internas en los generadores. Los valores de la matriz admitancia son almacenados dentro 3 vectores. Uno de ellos contiene los elementos de la diagonal , el otro los demás elementos diferentes de cero y último es un vector auxiliar donde se indica la ubicación de los elementos diferentes de cero. Luego se realiza una ordenación según el segundo criterio Tinney [6]. Para ello se preparan estructuras que deberán adecuarse a dicho criterio. ( ver anexo A ), a continuación se realiza un proceso de triangularización superior, teniendo en cuenta la ordenación según Tinney. Esto se realiza dentro de la rutina PARDIR.

A continuación la rutina AFTER realiza el cálculo de los factores acelerantes por cada barra, que serán usados en el cálculo iterativo de la solución de la red.

A partir de los valores de tensiones y admitancias anteriores, la rutina CORIMP calcula las corrientes inyectadas por las máquinas síncronas, los compensadores estáticos y las cargas no lineales. A continuación en la rutina SOLDIR se resuelve la red obteniéndose nuevas tensiones, si estas cumplen la tolerancia fijada queda como la solución, en caso contrario se procede a un nuevo cálculo de las corrientes inyectadas.



Posteriormente se predice el cambio del ángulo de cada máquina síncrona y si éste excede del valor máximo de paso, se procede a fijar el paso de integración a la mitad; si persiste esta situación se fija el paso a la cuarta parte.

A partir de los nuevos valores de tensiones en los nodos la rutina STOUT y SOLUCE calculan las condiciones de la máquina síncrona, los reguladores y compensadores estáticos por medio de los bloques analógicos. La rutina ANALOG se encarga de las operaciones de cada representación analógica. Luego se procede a un despliegue gráfico de los ángulos de los rotores tomando como referencia una máquina síncrona especificada por el usuario del programa. Además, se genera un listado de los resultados en cada paso de tiempo.

Luego se incrementa el tiempo con un paso y se vuelve a calcular las corrientes inyectadas, para una nueva solución de la red. Antes de eso se verifica si no existen cambios en la red, si fuese así entonces se procede a crear una nueva tabla de admitancias y a realizar nuevos ordenamientos.

## 2.2 Descripción del programa

En el presente trabajo se ha implementado un programa interactivo gráfico tomando como base un programa conocido, el TRANSDIR [4,7], el cual es usado para simular el comportamiento de un sistema eléctrico de potencia bajo condiciones transitorias. Estas condiciones

pueden ser iniciadas por diversos fenómenos, tales como cortocircuitos, salida accidental de cargas, etc.

Las principales características del programa son :

.Ambiente interactivo de edición y simulación de eventos.

.Ayuda en línea.

.Posibilidad de observar los ángulos de las máquinas síncronas graficamente durante la simulación.

.Despliegue gráfico de los resultados despues de la simulación.

.Posibilidad para simular.

Salida de líneas de transmisión.

Salida de máquinas síncronas.

Modificación reactores y capacitores.

Modificación de las cargas.

Corto circuito 3 $\phi$  en barra.

.Interacción con un banco de datos de máquinas síncronas.

La presente versión del programa puede simular redes hasta de

250 Barras.

200 Líneas de transmisión.

- 250 Transformadores.
- 50 Máquinas síncronas.
- 10 Compensadores estáticos.

Se requiere una computadora personal 386 DX, equipada con un mínimo de 10 MBytes de espacio en disco duro y un coprocesador matemático. Es deseable que se tenga un monitor a color y una impresora de buena resolución (24 pines).

El programa no considera las pérdidas transversales de las líneas de transmisión y de los transformadores.

### 2.3 Uso del programa

El programa se ejecuta en un ambiente de computadora personal dentro del sistema operativo D.O.S., el archivo ejecutable se denomina UNISTAB.EXE. Básicamente el programa está formado por tres opciones las cuales son Archivo, Editar y Ejecutar.

#### Archivo

Se encarga de controlar los casos de contingencias y casos de flujos de carga. Tiene 4 opciones : Seleccionar un flujo de carga base, recuperar un caso de eventos o contingencias, guardar un caso y salir del programa (ver figura 2.4). Antes de empezar a crear un caso se debe seleccionar un flujo de carga base, que incluye la información requerida del sistema eléctrico en estudio.

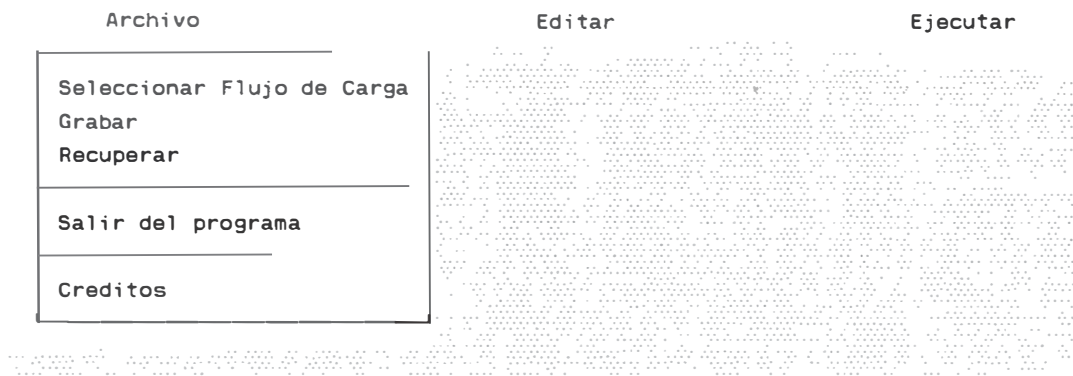


FIGURA 2.4 PANTALLA DEL MENU OPCIONES DE ARCHIVO

#### Editar :

Se realizan la edición de los datos necesarios para simular un evento sobre un sistema eléctrico seleccionado. Se puede editar : Las máquinas síncronas, los reguladores, los compensadores estáticos, las líneas monitoreadas, el modelamiento de cargas, las constantes globales y los eventos. Asimismo permite seleccionar las máquinas en las que se va a mostrar graficamente el comportamiento de los ángulos relativos durante la simulación. En la figura 2.6 se muestra una pantalla típica de edición que corresponde a las máquinas síncronas, la información prevista en la pantalla corresponde al modelo IV, el modelo I es un caso particular. Cuando se selecciona un flujo de carga, los nombres de las máquinas síncronas, son buscados en un banco de datos, si estos están dentro del banco de datos se colocan automáticamente los parámetros

correspondientes a dichas máquinas síncronas y si no estuviesen se colocan parámetros por defecto.

En cada edición de un campo aparece una ayuda rápida relacionado con el campo, además existe una ayuda más detallada, que se activa presionando la tecla [ F1 ].

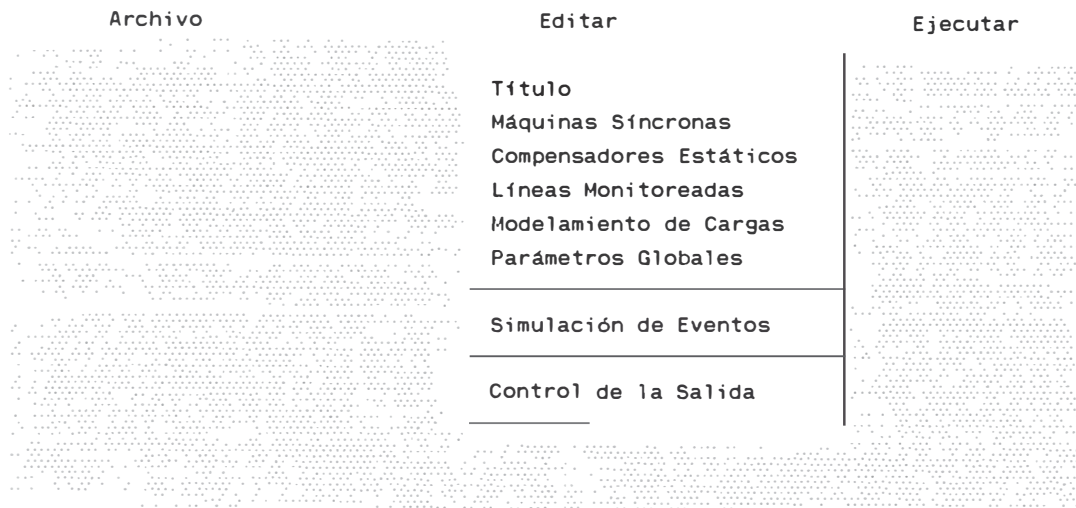


FIGURA 2.5 PANTALLA DEL MENU OPCIONES DE EDITAR

Máquinas Síncronas										
Código	Barra	Ng	MVA	cosφ	Modelo					
					Maq.	Xd	X'd	X''d	Xq	H
100	CENTRO	1	200.00	0.85	IV	0.500	0.200	0.150	0.500	2.000
200	LIMA	2	50.00	0.80	I	0.500	0.500	0.000	0.500	1.500
0			0.00	0.00		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0			0.00	0.00		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0			0.00	0.00		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0			0.00	0.00		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0			0.00	0.00		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

FIGURA 2.6 PANTALLA DE EDICION DE LAS MAQUINAS SINCRONAS

Ejecutar :

Se encarga de simular la estabilidad transitoria de un sistema eléctrico. Además, permite el despliegue gráfico de algunas variables del sistema despues del proceso de la simulación de estabilidad. Las variables que se despliegan son las tensiones, potencias, frecuencias en las máquinas sincronas, las tensiones y potencias reactivas en los compensadores estáticos y las potencias activas en las líneas monitoreadas. (ver Figura 2.7)

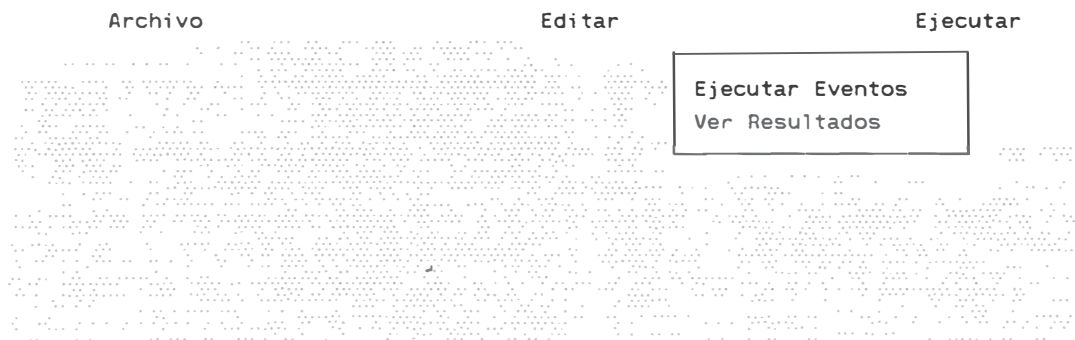


FIGURA 2.7 PANTALLA DEL MENU DE OPCIONES DE EJECUTAR

## CAPITULO III APLICACION AL SISTEMA INTERCONECTADO CENTRO - NORTE

### 3.1 Descripción general del sistema eléctrico

El sistema eléctrico de potencia utilizado para las simulaciones es el sistema interconectado Centro - Norte (SICN). El estudio se ha realizado a partir de un caso base de flujo de potencia para el año 1994 en máxima demanda. El sistema está formado por 232 barras, 130 líneas, 55 transformadores de 2 devanados 37 transformadores de 3 devanados y 28 generadores. La potencia de generación total es de 1775 MW y la estimación de la carga total es de 1698 MW (Anexo D).

Los niveles de tensión para Transmisión del sistema son de : 220 KV, 138 KV, 60 KV y 50 KV. Para generación son de 10 KV, 13.8 KV, 6.9 KV y 4.2 KV.

El sistema está dividido en áreas para un mejor estudio, estas son : Centro, Lima, Centromin, Norte medio y el Norte.

La generación es predominantemente hidráulica, estando la mayor generación hidráulica en el área del Centro; la generación térmica es relevante en las áreas del Norte medio y el Norte.

La mayor concentración de carga en el sistema se presenta en el área de Lima que tiene aproximadamente 1,070 MW.

Las líneas de transmisión mas largas son las que vienen del area Centro a Lima y las líneas que salen de Lima al Norte, estas últimas tienen problemas de capacidad transmisión de potencia.

El sistema tiene dos compensadores estáticos, ubicados en el area de Lima, uno en Balnearios y el otro en Chavarria, que proporcionan la potencia reactiva necesaria para tener un adecuado perfil de voltajes.

Los sistemas de compensación principales por medio capacitores y reactores fijos se encuentran ubicados en Chiclayo, Chimbote, San Juan y en Marcona.

El sistema tiene además dos compensadores sincronos ubicados en el area del Centro, uno en Independencia y el otro en Marcona.

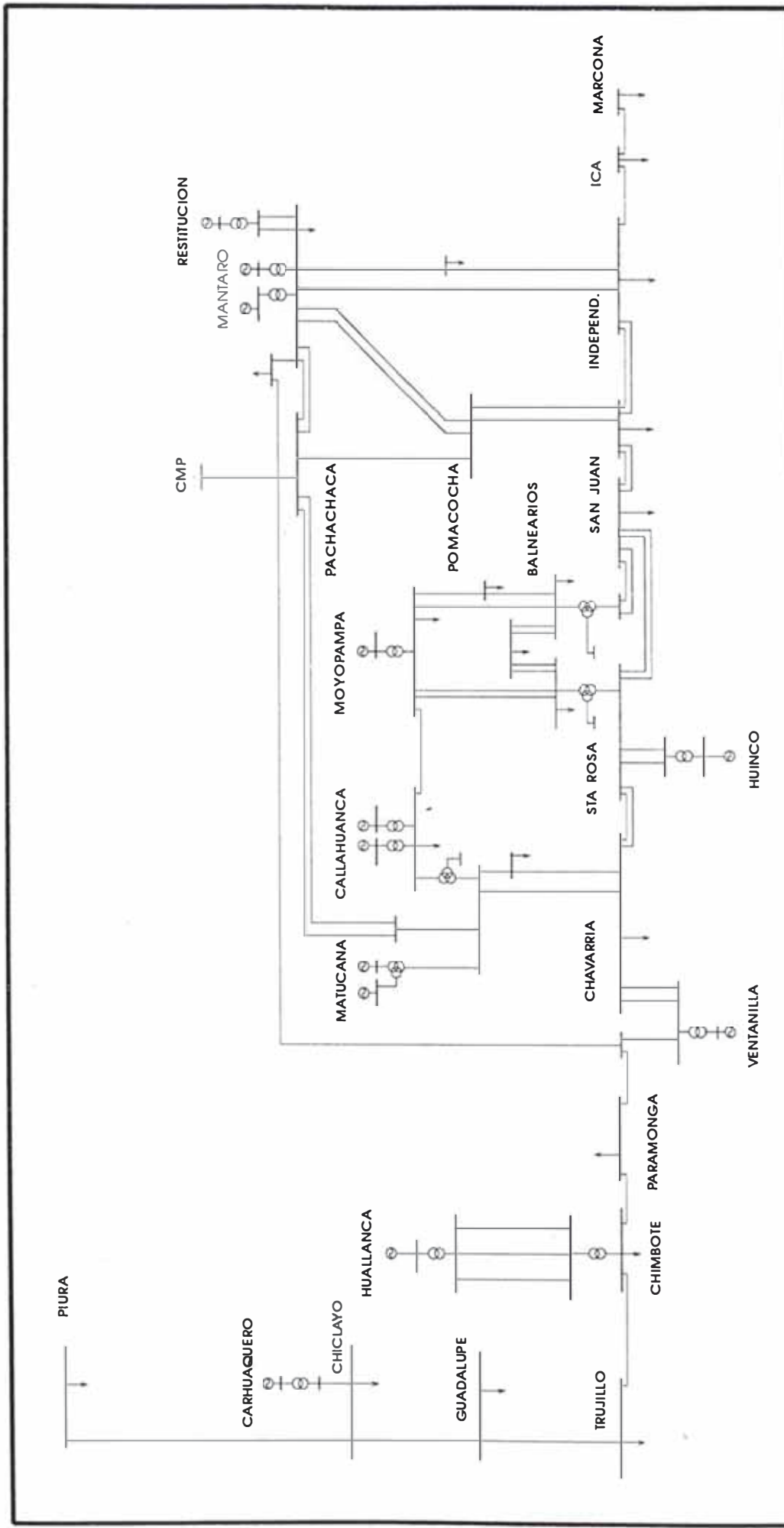
La generación, la demanda y los parámetros del sistema de transmisión, de los generadores, de los reguladores de tensión y de velocidad, asimismo los compensadores estáticos se muestran en los cuadros del anexo D.

En la figura 3.1 se presenta el diagrama unifilar del sistema interconectado centro - norte ( SICN ).

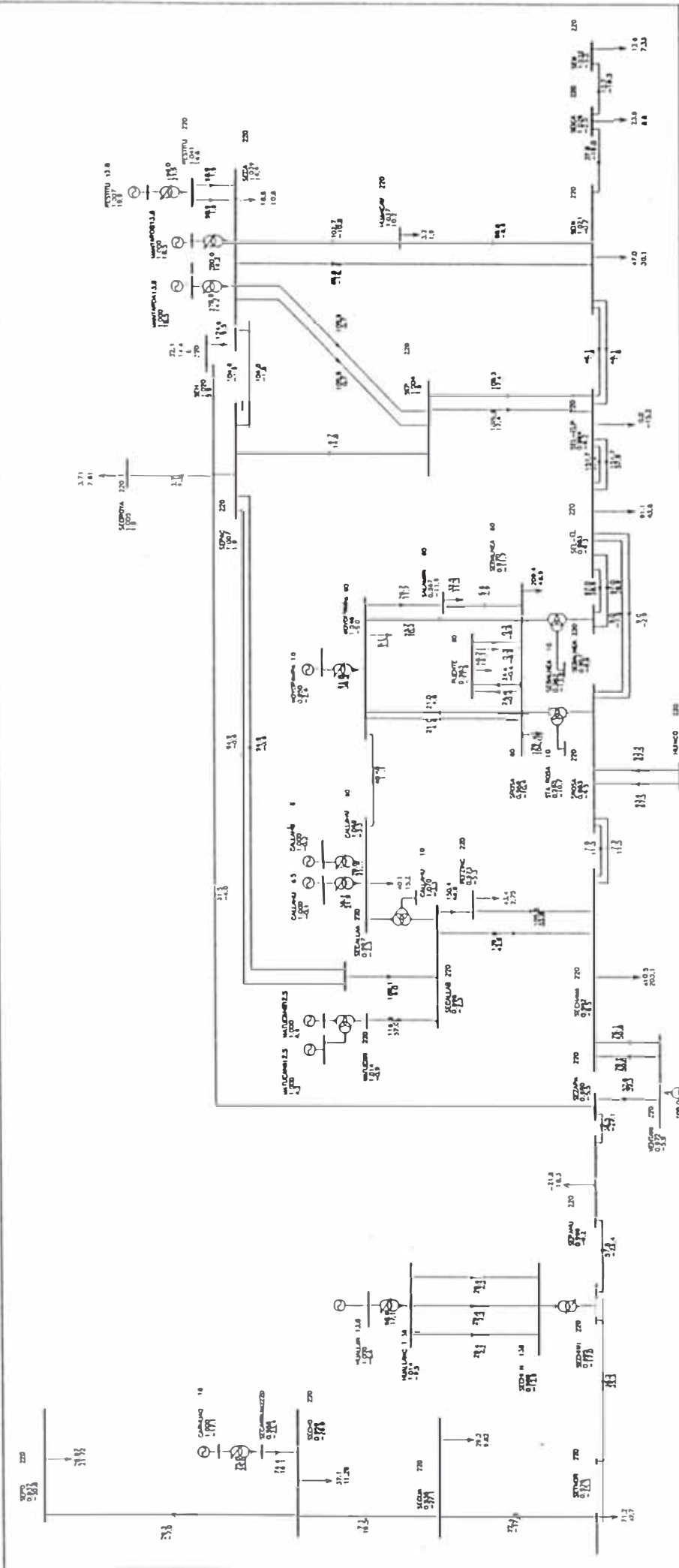
En la figura 3.2 se presenta con sus correspondientes valores de flujos y tensiones obtenidos despues de una simulación de flujo de carga.

Para analizar el efecto de los compensadores estáticos se muestra en la figura 3.3 el flujo de carga considerando dos compensadores estáticos adicionales, que están ubicados en Trujillo y en Chiclayo.





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA		
ESTUDIOS DEL SISTEMA ELECTRICO : ESTABILIDAD TRANSITORIA		
DIAGRAMA UNIFILAR SISTEMA INTERCONECTADO CENTRO NORTE		
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA		
ESCALA	S/E	FIGURA 3.1
FECHA	ENERO 1994	



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

ESTUDIOS DEL SISTEMA ELECTRICO : ESTABILIDAD TRANSITORIA

DIAGRAMA UNIFILAR

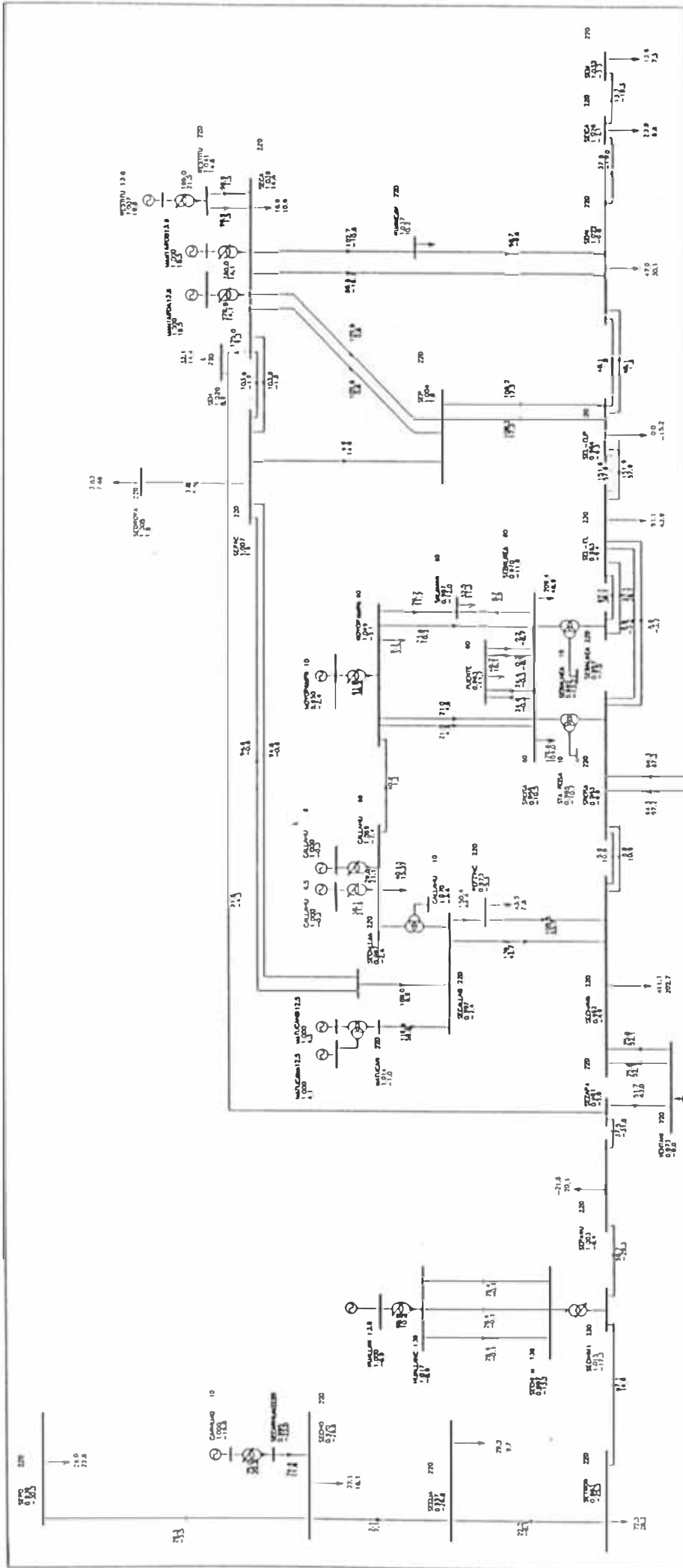
SISTEMA INTERCONECTADO CENTRO NORTE

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA

ESCALA S/E

FECHA JUNIO 1994

FIGURA 3.2



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

ESTUDIOS DEL SISTEMA ELECTRICO - ESTABILIDAD TRANSITORIA

DIAGRAMA UNIFILAR

SISTEMA INTERCONECTADO CENTRO NORTE

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA

ESCALA S/E

FECHA JUNIO 1994

FIGURA 3.3

### 3.2 Eventos simulados

Los eventos simulados son los siguientes

1. Falla trifásica en Pomacocha apertura definitiva de la línea ELECTROPERU - POMACOCHA. Debido a la frecuencia de fallas que se producen en esa zona.
2. Falla trifásica en Chavarria apertura definitiva de la línea CHAVARRIA VENTANILLA, debido a que en esa barra existe la mayor concentración carga.
3. Falla trifásica en Chavarria apertura definitiva de la línea CHAVARRIA - VENTANILLA, utilizando el modelo I en las máquinas síncronas, con la finalidad de poder comparar la precisión y el tiempo de procesamiento con el modelo IV.
4. Falla trifásica en Chimbote apertura definitiva de la línea CHIMBOTE TRUJILLO, con rechazo de carga en Trujillo , Guadalupe, Chiclayo y Piura. Para observar el efecto de separación de areas, entre Lima y el Norte.
5. Salida de la C.H. Carhuaquero. Para observar el efecto de la pérdida de la mayor generación en el Norte.
6. Salida de la C.H. Carhuaquero. Tomando en cuenta dos compensadores estáticos en Trujillo y Chiclayo. Para observar el efecto de los compensadores estáticos.

Para la simulación de los eventos arriba señalados se partió de la solución de flujo de carga correspondientes a las figuras 3.2 y 3.3.

Adicionalmente, se suministró al programa los parámetros de las máquinas síncronas, reguladores y

compensadores estáticos; por medio de las pantallas de edición correspondientes a estos elementos (Ver Anexo E).

Finalmente, se especifico la secuencia de eventos para cada caso; por medio de las pantallas preparadas para este fin.

Es importante notar que el procesamiento del caso N°1 en una computadora con procesador 80486 DX2 de 66 MHz, 4 MBytes de RAM, requiere de 20 minutos, para 5 segundos de simulación. Concluido el procesamiento el usuario puede presentar en la pantalla las gráficas de las variables previamente seleccionadas, e imprimirlas si lo desea.

Considerando el tiempo necesario para la especificación de eventos del caso, y los parámetros adicionales necesarios, es posible obtener resultados en papel en 30 minutos contados desde el momento en que se dispone del flujo de carga base.

### 3.3 Análisis de los resultados

En la presente se exponen los resultados del análisis de estabilidad transitoria, efectuados para la simulación y comprobación del comportamiento del Sistema Interconectado Centro-Norte (SICN). El análisis de estabilidad transitoria es efectuado en los puntos más relevantes del sistema (principales centrales, los enlaces de interconexión entre el Sistema Centro y el Norte, etc.).

Los resultados se presentan en cuadros y figuras que incluyen las curvas de oscilación del ángulo de potencia

en los principales generadores, asimismo las curvas de las tensiones en las principales Subestaciones del SICN.

Para las fallas trifásicas se asumió una duración de 100 ms, al cabo de los cuales la línea fallada queda definitivamente fuera de servicio. Además, se asumió un rechazo de carga, para los casos en que se consideró necesario.

Con el fin de analizar el comportamiento transitorio del sistema para las contingencias arriba señaladas, se simularon un total de 6 casos. En el cuadro 3.4, se presenta un resumen de estos resultados.

DESCRIPCION	OBSERVACION
Falla trifásica en Pomacocha apertura definitiva de la línea ELECTROPERU – POMACOCHA	ESTABLE
Falla trifásica en Chavarría apertura definitiva de la línea CHAVARRIA – VENTANILLA	ESTABLE
Falla trifásica en Chavarría apertura definitiva de la línea CHAVARRIA – VENTANILLA, con modelamiento de las máquinas síncronas con el modelo I	ESTABLE
Falla trifásica en Chimbote apertura definitiva de la línea CHIMBOTE – TRUJILLO, con rechazo de carga	ESTABLE
Salida de la C.H. Carhuaquero	INESTABLE
Salida de la C.H. Carhuaquero. Considerando dos compensadores estáticos en Trujillo y Chiclayo	ESTABLE

CUADRO 3.4 RESUMEN DE RESULTADOS

Tal como puede apreciarse en las curvas mostradas en las figuras F.1 y F.2, el sistema permanece estable para las fallas trifásicas simuladas en Pomacocha y Chavarria. No obstante, las oscilaciones producidas por estas perturbaciones en los ángulos de los generadores del Norte son de gran envergadura, lo que pone de manifiesto la debilidad del enlace entre ambos sistemas.

La falla trifásica en Chimbote (ver figura F.4), causa la apertura definitiva de la línea Chimbote-Trujillo, que produce la separación de las áreas Centro y Norte. En este caso se ha asumido que se rechaza por un monto aproximadamente 90 % de la potencia dejada de suministrar (100 MW). A fin de proteger la integridad del área Norte es preciso abrir las líneas de interconexión para formar subáreas. Para ello deberá coordinarse adecuadamente los relés de potencia inversa y de frecuencia para rechazo de carga.

Con el fin de comparar la precisión y el tiempo de procesamiento del modelo I con el modelo IV de la máquina síncrona, se efectuó una simulación colocándose a todos los generadores con el modelo I, con una falla trifásica en Chavarria. Se observa que las condiciones iniciales de las máquinas varían, pero se obtienen resultados similares hasta el primer segundo de simulación, pero luego el sistema oscila sin amortiguación, debido a la ausencia de los sistemas de control (reguladores de tensión y de velocidad), se concluye que el sistema es estable. Además, se pudo notar que el tiempo de

procesamiento utilizando el modelo I se redujo a la mitad, si es que se hubiese utilizado el modelo IV (ver figura F.3).

Se ha realizado una simulación para investigar el efecto de los sistemas de compensación estática sobre el comportamiento del SICN ante la salida de la central de Carhuaquero, la cual proporciona la regulación en el área Norte, la central está suministrando 75 MW de potencia activa y 25 MVAR de potencia reactiva. Cuando se colocan sistemas de compensación estática en Chiclayo y Trujillo que suministran 5 MVAR (inductivo) y 33 MVAR (capacitivo) respectivamente, la central proporciona 20 MVAR de reactivos.

Puede observarse en la figura F.5 que luego de la salida de la central de Carhuaquero, la regulación de tensión que se tendría desde la central de Huallanca no es suficiente, lo que provoca un colapso de tensión en Chiclayo. Por otro lado, la instalación de los compensadores estáticos en Trujillo y Chiclayo (ver figura F.6) provoca la recuperación de la tensión a su nivel normal. En la figura F.7 se muestra las tensiones en las barras donde están instalados los compensadores estáticos. Asimismo, se presenta la contribución de la potencia reactiva.

Por lo tanto, se concluye que la instalación de los sistemas estáticos de compensación evitaría los colapsos de tensión, así como las sobretensiones permanentes post contingencia en el área Norte del sistema. De otro modo,



estos sistemas reduziran los problemas de regulación causados por la operación de líneas largas bajo condiciones de cambios de carga. Resulta muy importante la influencia de un compensador estático en el incremento de la confiabilidad del sistema en condiciones transitorias, reduciendo la energía no suministrada a los usuarios.

## Conclusiones y Recomendaciones

El programa implementado es una herramienta computacional muy eficaz, versátil y amigable y está hecho a la necesidad del especialista en análisis de sistemas de potencia. Las facilidades gráficas incluidas contribuyen a dar una mejor calidad al análisis de estabilidad transitoria, permitiendo al usuario una mayor eficacia en su trabajo.

La ventaja de poder observar el comportamiento de los ángulos de algunas máquinas síncronas durante la simulación hace que se acorte el tiempo de procesamiento cuando hay problemas de inestabilidades o resultados incoherentes.

El modelamiento de las máquinas síncronas, los reguladores y los compensadores estáticos se logró mediante la implementación de bloques analógicos, a partir de modelos conocidos y aceptados. Los resultados obtenidos indican que esta implementación ha sido correctamente realizada.

El tiempo necesario para obtener gráficas de una simulación a partir la creación de caso de eventos es de 30 minutos para el Sistema Interconectado Centro - Norte teniendo como falla un cortocircuito trifásico en Pomacocha y cinco segundos de simulación, considerando el

modelo IV en todas máquinas síncronas. Este tiempo es muy satisfactorio respecto a lo que normalmente un especialista en análisis de sistemas de potencia se tardaría en un ambiente "mainframe" en crear un caso de eventos y obtener una salida gráfica de una variable requerida para el análisis.

En velocidad de procesamiento, impresión de resultados, edición de un caso de eventos y confiabilidad de los resultados, la herramienta es comparable con programas computacionales sofisticados [5] y su adquisición sería más accesible a los profesionales y a los estudiantes de pregrado.

La incorporación de un banco de datos de máquinas síncronas que interactúa con un flujo carga base, reduce el tiempo de la edición de los parámetros de las máquinas síncronas casi al mínimo.

Con relación a los casos simulados se concluye que; el efecto de fallas trifásicas en el SICN ubicadas en Pomacocha y Chavarria ponen de manifiesto la debilidad de los enlaces entre las áreas Lima y Norte. Al producirse la separación de áreas entre Lima y Norte, debido a una falla trifásica en Chimbote, es necesario rechazar carga para evitar que el sistema colapse. Se utilizó el modelo I de la máquina síncrona con el fin de compararlo con el modelo IV, dando como resultado que el tiempo de procesamiento es menor pero se reduce la precisión. Para la salida de la Central de Carhuaquero, que produjo un

colapso de tensión Chiclayo, se recomienda el uso de sistemas de compensación estática en Chiclayo y Trujillo.

La herramienta puede ser mejorada, pudiendose incluir un rechazo automático de carga por medio de la simulación de reles de frecuencia y además la posibilidad de implementar una rutina para calcular las impedancias vistas en una barra.

### Bibliografía

- 1.- Ramey, D.G.; Skooglund, J.W., "Detailed Hydrogovernor Representation for System Stability Studies", IEEE - trans. on power apparatus and systems, January 1970.
- 2.- C.I.G.R.E. Working Group 31-01, 1977. "Modelling of Static Shunt Var Systems for System Analysis", Electra (51).45-74.
- 3.- IEEE Committee Report 1968. "Computer Representation of Exciter Systems", IEEE transactions on power apparatus and systems, PAS-87, 1460-1464.
- 4.- C. C. Young, "Equipment and System Modelling for Large-Scale Stability Studies" IEEE trans. power apparatus and systems, January 1972.
- 5.- Bengiamin N.N. y Holocomb, F.H. "PC Based Power Systems Software Comparing Features and Functions" IEEE Computer applications in power, January 1992 pp 35-40.
- 6.- Tinney, W. F., Evaluation of concepts for Studying 'Trasient Stability, IEEE Tutorial Course: Modern Concepts of power System Dynamics, IEEE, New york 1970
- 7.- Grupo específico para análise do programa TRANSDIR relatorio final, Janerio 1980 ( SCEL - CEC )
- 8.- Philadelphia Electric Company-Power System Stability Program User's Guide UG004 - 2, April 1971.
- 9.- Byerly Richard; Kimbark Edward, "Stability of Large Electric Power System", IEEE Press 1974 VI 573
- 10.- Arrillaga; J. Arnold; Harker B.J., "Computer Modelling Electric Power System" John Wiley & Sons, 1984
- 11.- Gilberto Enriquez Harper, "Técnicas Computacionales en sistemas electricos de potencia", Editorial Limusa.
- 12.- Anderson P.M.; "Power Stability and Control".