

ANÁLISIS DEL CONTROL DE LA EXCITACION DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA PAUTE

SOBRE LA ESTABILIDAD DINAMICA DEL

SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO

Gonzalo Uquillas V.

Santiago Sánchez M.

Centro Nacional de Control de Energía

Instituto Ecuatoriano de Electrificación

IEEE - Sección Ecuador

RESUMEN

El tema de estabilidad dinámica es analizado en el presente trabajo describiendo el efecto del control de la excitación de un generador sobre el sistema eléctrico. Se desarrolla el modelo matemático del generador y sus sistemas complementarios y se presenta un método para el análisis de la estabilidad dinámica de la Central Hidroeléctrica Paute en el Sistema Nacional Interconectado.

INTRODUCCION

La Central Hidroeléctrica Paute inició su operación en enero de 1984, con una capacidad instalada de 555 MVA, proporcionada por cinco unidades de 111 MVA cada una. Debido a que la configuración en anillo del Sistema Nacional de Transmisión, a 230 KV, no está terminada en el tramo Paute-Totoras-Quito, la energía de Paute se transmite por la línea de doble circuito Paute-Milagro-Pascuales, con una longitud de 190 km. Restricciones operativas se presentan en esta línea, las que no permiten evacuar toda la generación de Paute.

Uno de los problemas más graves, que afectan la confiabilidad del sistema, ocurre cuando operando la línea Paute-Milagro-Pascuales con sus dos circuitos en paralelo (unidas en sus extremos) y generando Paute sobre 350 MW, al ocurrir una falla en uno de los circuitos de esta línea, el otro circuito es insuficiente para transportar la energía total generada y se produce, por efectos de colapso de voltaje, la inestabilidad del sistema, que ocasiona la pérdida de generación de Paute, y una interrupción en el servicio eléctrico para todo el SNI.

Luego de realizar estudios de estabilidad transitoria, se concluyó que una manera de solucionar este problema era operar la Central Paute como dos centrales independientes, cuando la generación excedía los 280 MW, abriendo el interruptor de acoplamiento de barras en la subestación Molino. De esta manera, dos unidades se agruparían a un circuito de la línea Paute-Milagro y las restantes tres unidades se conectarían al segundo circuito. El sistema estuvo operando de esta manera por algunas semanas, con la novedad que cuando se abría la barra en la S/E Molino, se presentaban oscilaciones de potencia entre 10 y 20 MW. Estas oscilaciones espontáneas eran disminuidas regulando manualmente el voltaje en las barras de la S/E Molino. Algo similar había acontecido con la Central Térmica de Esmeraldas.

Este problema ocurrido en Paute requería una investigación profunda, por lo que se inició el estudio de la estabilidad dinámica del SNI, siendo importante el

análisis de las oscilaciones de potencia en la Central Paute. En el siguiente trabajo, se presentan las bases teóricas para el desarrollo de dicho estudio y una metodología para llevar a cabo esta investigación.

El problema de las oscilaciones de potencia en el Paute, es un caso típico de inestabilidad dinámica que ya ha ocurrido en otros países. Cuando una central importante alimenta una carga considerable del sistema a través de una línea de transmisión larga de alta reactancia, el sistema es propenso a sufrir oscilaciones espontáneas iniciadas por perturbaciones menores, y aún por maniobras que se ejecutan sobre el equipo conectado a la red. Si estas oscilaciones no se reducen, pueden incrementarse hasta provocar la salida de sincronismo de las unidades de generación y la consecuente pérdida de estabilidad del sistema.

En el estudio de estabilidad dinámica, es primordial el análisis del sistema de control de la excitación del generador, pues se conoce que ciertos valores de ajuste de los parámetros de la excitación pueden dar lugar a la aparición de estas oscilaciones.

El equipo auxiliar más importante en el control de la excitación es el Estabilizador de Sistemas de Potencia (PSS), cuyo propósito es generar una señal complementaria que compense la acción del regulador automático de voltaje, el cual puede introducir amortiguamiento negativo bajo ciertas condiciones operativas del sistema y causar oscilaciones no amortiguadas. Ha sido de especial interés estudiar el PSS, ya que el control de la excitación de la Central Paute tiene instalado este equipo y una calibración adecuada del mismo puede resolver el problema de las oscilaciones.

En este trabajo se presenta el modelo detallado de un generador sincrónico, y su sistema de excitación, regulador de voltaje y equipo de control complementario, incluyendo el estabilizador de sistemas de potencia. El objetivo de este trabajo es presentar un método para analizar la estabilidad dinámica de la Central Paute, sugiriendo tanto el modelo matemático, como el procedimiento analítico que debe seguirse para obtener resultados prácticos aplicados a la Central Paute.

Este trabajo teórico es una primera parte de un informe realizado por los autores, cuyos resultados prácticos se obtendrán en breve. El propósito final es sugerir valores de calibración de los parámetros del sistema de excitación de los generadores de la Central Paute para que se pueda mejorar la estabilidad dinámica del sistema nacional.

La estabilidad de un sistema eléctrico de potencia se entiende como la habilidad que tienen los generadores conectados al mismo para mantenerse en sincronismo y de su tendencia a regresar a un estado estable luego de ocurrido un disturbio en el sistema.

Se define un disturbio como un cambio repentino, o una secuencia de cambios en uno o más parámetros del sistema, o en una o más de sus condiciones operativas, pudiendo estos disturbios ser menores o mayores. Cuando las ecuaciones que describen la dinámica del sistema pueden ser linealizadas para efectos del análisis, se habla de un disturbio menor. Si estas ecuaciones no pueden ser linealizadas, entonces el disturbio es mayor. Generalmente se linealizan las ecuaciones cuando la variación de las condiciones operativas ocurre próxima al punto de operación en estado estable, haciendo de este modo más fácil el estudio matemático del sistema.

El problema de estabilidad transitoria de un sistema de potencia es determinar si las máquinas del sistema permanecen en sincronismo durante un disturbio mayor y tienden a condiciones estables. La solución de este problema consiste de un proceso iterativo en el cual dos conjuntos de ecuaciones se resuelven sucesivamente a fin de determinar las curvas de oscilación ángulo vs. tiempo de las máquinas del sistema. El primer conjunto lo constituyen las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento mecánico de las máquinas; el segundo, es un sistema de ecuaciones algebraicas que describen el comportamiento eléctrico de las máquinas y de la red de transmisión. El tiempo típico de observación en un estudio de estabilidad transitoria va de 1 a 10 segundos.

El problema de estabilidad dinámica de un sistema de potencia se refiere a la capacidad de las máquinas de mantenerse en sincronismo y de volver a sus condiciones originales luego de ocurrido un disturbio menor en el sistema. A diferencia del caso de estabilidad transitoria, la solución del problema dinámico se hace evaluando las raíces de la ecuación característica del sistema. La formulación de la ecuación característica es básicamente un proceso algebraico.

COMPORTAMIENTO DINAMICO DE UN GENERADOR SINCRONICO

Ecuación de Oscilación

Para una máquina sincrónica bajo excitación constante y conectada a una barra infinita, la descripción de su dinámica se obtiene relacionando la aceleración del rotor con los torques actuantes sobre el mismo. Esta relación viene dada por:

$$(Inercia) \frac{d^2(\Delta\delta)}{dt^2} + (\text{torque de amortiguamiento}) + (\text{torque eléctrico} - \text{torque de la turbina}) = 0$$

$$2H \frac{d^2(\Delta\delta)}{dt^2} + D \frac{d(\Delta\delta)}{dt} + K_1(\Delta\delta) = 0$$

Para pequeños cambios cerca de un punto de operación en régimen estable, el comportamiento se describe por la ecuación de oscilación:

$$2H \frac{d^2(\Delta\delta)}{dt^2} + D \frac{d(\Delta\delta)}{dt} + K_1(\Delta\delta) = 0$$

donde:

$\Delta\delta$  [radianes] = desviación del ángulo del rotor de un punto operativo en estado estable.

H [KW-s/KVA] = constante de inercia del rotor de la máquina.

$\omega_s$  [radianes/s] = frecuencia sincrónica a 60 Hz. (377 rad/s).

D  $\left[ \frac{\text{potencia p.u.}}{\Delta f \text{ p.u.}} \right]$  = coeficiente de amortiguamiento que considera la fricción y el rozamiento en la turbina, y el amortiguamiento propio de la carga.

$K_1$  [ $\Delta P$  p.u./radian] = coeficiente sincronizante.

El término  $K_1\Delta\delta$ , llamado potencia sincronizante, actúa para acelerar o desacelerar la masa rotativa a fin de llevar el generador de vuelta a su punto operativo sincrónico.  $K_1$  se define como:

$$K_1 = \left. \frac{dP_e}{d\delta} \right|_{\delta_0} = \frac{E_q' e_0}{X_d + X_e} \cos\delta_0$$

donde los parámetros se muestran en la Figura 1 y se los detalla en el apéndice.

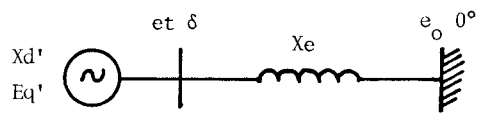


Figura 1. Sistema generador - barra infinita.

Los sistemas de transmisión robustos, con  $X_e$  pequeños, tienen valores de  $K_1$  grandes, suministrando de esta manera una mayor potencia sincronizante al generador. La ecuación de oscilación gobierna la respuesta dinámica del sistema de potencia con un comportamiento oscilatorio amortiguado, teniendo una frecuencia natural de oscilación dada por:

$$\omega_n \approx \sqrt{\frac{K_1 \omega_s}{2H}} \text{ [ rad/s ]}$$

La frecuencia exhibida por las oscilaciones depende de factores tales como: inercia de la máquina, reactancia del sistema de transmisión y nivel de la carga.

Torque Sincronizante y Torque Amortiguante

La ecuación de oscilación es:

$$\Delta T_m - K_1 \Delta\delta - \frac{M d^2(\Delta\delta)}{dt^2} - D \frac{d(\Delta\delta)}{dt} = 0$$

donde:  $M=2H$

Esta ecuación puede ser convertida en diagrama de bloques y utilizando  $\Delta\delta$  en radianes en lugar del valor por unidad, tenemos la Figura 2.

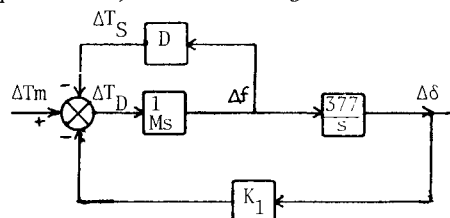


Figura 2. Representación en diagrama de bloques de la ecuación de oscilación.

La ecuación característica resultante es:

$$s^2 + \frac{D}{M} s + K_1 \frac{377}{M} = 0 \quad (5)$$

lo que dá lugar a la frecuencia natural de oscilación para este sistema:

$$\omega_0 = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2} \text{ [rad/s]} \quad (6)$$

donde:  $\omega_n = \sqrt{\frac{K_1 \cdot 377}{M}} \text{ [rad/s]}, \xi = \frac{D}{2\sqrt{377K_1}}$

Este sistema presenta dos características importantes:

- 1) La componente de torque  $\Delta T_s$ , en fase con el ángulo de torque  $\Delta \delta$ , se denomina torque sincronizante y el coeficiente de torque sincronizante es  $K_1$ .
- 2) La componente de torque  $\Delta T_D$ , en fase con la velocidad de la máquina  $\Delta \omega$ , se denomina torque amortiguante y el coeficiente de torque amortiguante es D.

Para oscilaciones localizadas en una máquina, la desviación de ángulo  $\Delta \delta$  está atrasada 90 grados respecto a la desviación de velocidad  $\Delta \omega$  y 180 grados con respecto al voltaje terminal  $\Delta e_t$ . A continuación se muestra un diagrama fasorial a fin de ilustrar los conceptos de torques sincronizantes y amortiguantes (Figura 3).

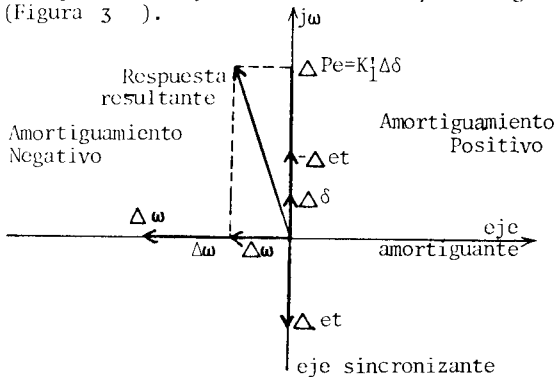


Figura 3. Diagrama fasorial representado los torques amortiguante y sincronizante.

El eje vertical de la Figura 3 es el eje sincronizante, y componentes de la potencia restaurativa a lo largo de este eje en la dirección positiva tienden a incrementar la frecuencia de las oscilaciones dinámicas. El eje horizontal es el eje de amortiguamiento. Las componentes de potencia que están en fase con las oscilaciones de velocidad de la máquina suministran amortiguamiento. Sin embargo, componentes que están fuera de fase con la velocidad de la máquina y apuntan hacia la derecha del plano tienden a cancelar el amortiguamiento natural suministrado por la unidad. Las componentes de potencia que se indican en el diagrama corresponden al de una máquina bajo control manual de excitación. La acción resultante está localizada a la izquierda del eje vertical indicando de esta manera que las oscilaciones son amortiguadas.

Amortiguamiento Negativo debido a la Acción del Regulador de Voltaje.

El amortiguamiento natural del sistema, representado por el término D positivo en la ecuación 1 previene el que se produzcan oscilaciones sostenidas, a menos que exista una fuente de amortiguamiento negativo.

La acción de control con realimentación de los reguladores automáticos de voltaje tienen el potencial de contribuir amortiguamiento negativo y causar oscilaciones dinámicas no amortiguadas. Esto ha sido evidente por el hecho que oscilaciones sostenidas en sistemas de potencia han sido suprimidas al cambiar los reguladores de voltaje de control automático a control manual. Como es de suponer, esta acción no constituye una solución realística puesto que se pierden las características beneficiosas del regulador de voltaje.

La función principal del regulador de voltaje es ajustar continuamente el nivel de excitación del generador en respuesta a cambios del voltaje terminal. El regulador de voltaje actúa para mantener el valor de voltaje en el generador.

La Figura 4 muestra un diagrama de bloques de los principales elementos asociados con una unidad generadora bajo control de regulador de voltaje. Cualquier desviación del voltaje terminal  $e_t$  al valor de referencia, suministra una señal de error ( $\Delta e_t$ ) al regulador de voltaje que a su vez produce un cambio en el nivel de excitación. El mayor atraso en este lazo de realimentación de voltaje se debe a la respuesta del flujo de la máquina  $\Delta E_q$  para un cambio del voltaje de campo del generador ( $E_{fd}$ ). Esta demora se debe al elevado valor de inductancia del devanado de campo del generador.

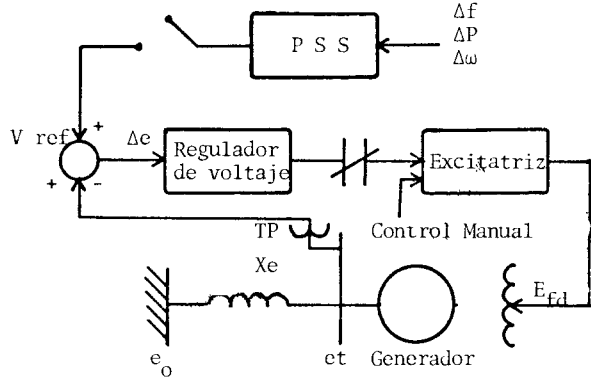


Figura 4. Esquema de bloques del generador con sus sistemas de control.

A fin de ilustrar como la acción de control del regulador de voltaje afecta las oscilaciones dinámicas presentamos a continuación la ecuación de oscilación que incluye el efecto de los cambios en el flujo de la máquina  $\Delta E_q$ :

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2(\Delta \delta)}{dt^2} + \frac{D}{\omega_s} \frac{d(\Delta \delta)}{dt} + K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta E_q = 0 \quad (7)$$

El término  $K_2 \Delta E_q$  es determinado principalmente por los cambios en nivel de excitación producto de la acción de control del regulador de voltaje con atraso de fase debido al circuito de campo y a la excitatriz del generador.

El efecto del control del regulador de voltaje sobre las oscilaciones puede ser observado analizando los ángulos de fase de las componentes de potencia, debido a cambios en el nivel de excitación. La desviación de voltaje terminal ( $\Delta e_t$ ) es sensada por el detector de error del regulador con la polaridad cambiada debido a la realimentación negativa del control de voltaje. Es esta señal la que inicia la acción de control del sistema de excitación del generador.

La Figura 5 muestra el efecto de la señal de realimentación de voltaje sobre la potencia restaurativa resultante para el caso de una central conectada al sistema mediante un sistema de transmisión muy débil. El atraso de fase  $\phi_1$  y  $\phi_2$  entre la señal de error ( $-\Delta et$ ) y el flujo del generador ( $\Delta Eq'$ ) corresponden a los retrasos de tiempo asociados con la acción del sistema R.A.V - excitatriz y con la constante de tiempo de campo del generador respectivamente. La potencia debida a  $Eq$  tiene una componente que actúa para reducir el amortiguamiento de las oscilaciones dinámicas. La acción resultante puede estar localizada a la derecha del eje sincronizante que es la región de inestabilidad y traer como consecuencia oscilaciones no amortiguadas que crecen en amplitud. Una apropiada selección de los parámetros del R.A.V puede minimizar este problema de estabilidad dinámica, aunque el resultado final es un deterioro de la estabilidad transitoria de la unidad.

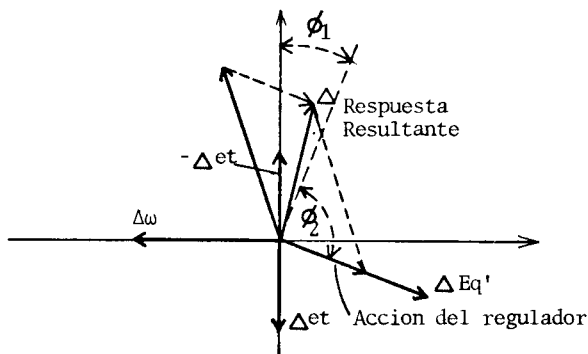


Figura 5. Diagrama fasorial donde se muestra la acción del regulador de voltaje.

#### Estabilizador de Sistemas de Potencia (P.S.S)

Reguladores automáticos de voltaje de alta ganancia y rápida respuesta contribuyen a mantener la estabilidad transitoria del sistema, sin embargo bajo ciertas condiciones operativas tienen el potencial de introducir amortiguamiento negativo y que puede resultar en la inestabilidad oscilatoria del sistema. A fin de corregir esta situación, modernos equipos de excitación y regulación de voltaje incluyen un equipo de control complementario denominado estabilizador de sistemas de potencia, el mismo que sirve para generar una señal que aplicada al R.A.V cancela el amortiguamiento negativo y permite la operación del generador aún más allá del límite de estabilidad en régimen permanente.

La Figura 6 muestra los elementos constitutivos de un P.S.S.

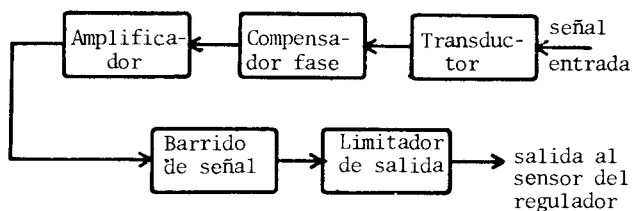


Figura 6. Bloques constitutivos del estabilizador de sistemas de potencia (PSS).

La señal de entrada al estabilizador, que puede ser de frecuencia, potencia o velocidad, es convertida en una señal de tensión proporcional mediante transductores, luego se modifica el ángulo de fase de esta señal mediante un conjunto de circuitos de adelanto/atraso de fase ajustables y que sirven para compensar los retardos de tiempo en el R.A.V, sistema de excitación y circuito de campo del generador. La señal resultante es amplificada y se aplica a un módulo de barrido que sirve para balancear la salida del estabilizador y evitar desviaciones de voltaje terminal para excursiones prolongadas de frecuencia; por último, el limitador de la señal de salida previene que la misma cause cambios excesivos de voltaje cuando se produce un rechazo de carga.

La calibración y ajuste del P.S.S consiste en determinar los valores apropiados de la ganancia del amplificador y las constantes de tiempo del circuito compensador de fase a fin de suprimir las oscilaciones dinámicas del sistema.

#### Causas de Oscilaciones en el Sistema

La inestabilidad dinámica de un sistema se manifiesta por la presencia espontánea de oscilaciones de potencia y voltaje. Estas oscilaciones pueden originarse por una o varias de las siguientes causas:

- Sistema de transmisión débil, con altas reactancias.
- Altos niveles de generación en la central alejada de una carga importante, presentándose una gran diferencia del ángulo de potencia entre ambos extremos.
- Acción del regulador automático de voltaje, que puede introducir en ciertos casos amortiguamiento negativo en el sistema.

Cuando se realiza estudios de estabilidad dinámica, es importante considerar estos factores en la modelación del generador y su sistema de excitación, a fin de determinar una calibración adecuada del mismo.

#### Oscilaciones en Modo Local y en Modo Interárea

En un sistema de potencia, las oscilaciones electromecánicas de los rotores de las máquinas, son de dos tipos: en modo local y en modo interárea.

Las oscilaciones en modo local son aquellas que ocurren en uno o varios generadores localizados en una planta que está sirviendo a una carga importante mediante líneas largas de interconexión. La frecuencia de las oscilaciones en modo local varía entre 1 y 3 Hz dependiendo principalmente de la impedancia externa vista desde el generador. Como regla práctica, si esta reactancia es mayor a 0.5 p.u, tomando como base la potencia total en MVA de la planta, el sistema es propenso a tener oscilaciones dinámicas no amortiguadas en modo local. Este tipo de oscilaciones son factibles de determinarse mediante el análisis de un modelo lineal que representa el comportamiento dinámico de un generador conectado a una barra infinita.

Un segundo tipo conocido como oscilaciones en modo interárea, ocurre entre grupos de máquinas interconectadas y que oscilan entre sí. Valores de frecuencia de oscilación entre 0.1 y 0.6 Hz corresponden a este modo interárea. Para su análisis se utiliza modelos más complejos, ya que hay que considerar varios generadores unidos por una compleja red de transmisión.

En el caso de la Central Paute las oscilaciones se las ha considerado como de modo local y se ha modelado el sistema como un generador equivalente-barra

infinita. Del resultado final del trabajo se podrá concluir si esta suposición fue correcta, pues de puede pensar que al abrir las barras en la S/E Molino, Paute queda conformada por dos centrales que pueden oscilar entre si, siendo en este caso las oscilaciones de modo interárea.

A continuación se va a revisar algunos métodos matemáticos para el análisis de estabilidad dinámica y además seleccionar el método para el presente estudio.

#### MÉTODOS DE ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DINÁMICA

Existen dos maneras de realizar un análisis de estabilidad dinámica de un sistema eléctrico de potencia. La primera se basa en la teoría de control clásico, que representa el sistema de control solamente con una entrada y una salida. En este método se encuentra la ecuación característica del sistema mediante la formulación de una serie de ecuaciones que describen el sistema dinámico, o lo que es lo mismo, el diagrama de bloques del sistema. Investigando el efecto que tiene la variación de ciertos parámetros sobre las raíces de la ecuación característica, se puede analizar la estabilidad dinámica del sistema.

Una segunda manera de estudiar la estabilidad dinámica se basa en la teoría de control moderno mediante la técnica de espacio de estado. Aquí, el sistema de control se modela para aceptar entradas y salidas múltiples, lo que hace posible observar más efectivamente el comportamiento dinámico y global del sistema eléctrico.

#### MÉTODOS CLÁSICOS

##### a) Criterio de Nyquist

El método en el criterio de Nyquist, utiliza datos de respuesta de frecuencia obtenidos experimentalmente de la salida del sistema de control al aplicar una señal sinusoidal a la entrada del mismo y cuando se ha llegado a una condición estable del sistema. Los diagramas de Nyquist y de Bode, que muestran la ganancia y el ángulo de fase del sistema, son utilizados en este método de análisis. En un lazo de realimentación de un sistema de control, con función de transferencia de lazo abierto (descrito más adelante), igual a  $GH$ , el criterio de estabilidad de Nyquist dice que un sistema es estable si:

$$\begin{aligned} |GH| > 1 \text{ cuando } \angle GH = 180^\circ, \text{ y} \\ \angle GH < 180^\circ \text{ cuando } |GH| = 1 \end{aligned} \quad (8)$$

para un rango amplio de frecuencias, donde:

$G$  es la ganancia del lazo directo.  
 $H$  es la ganancia del lazo de realimentación.  
 $|GH|, \angle GH$  son el módulo y el ángulo de  $GH$ .

##### b) Criterio de Routh-Hurwitz

El método de Routh-Hurwitz es un método algebraico que proporciona información acerca de la estabilidad de un sistema lineal invariante en el tiempo. El criterio permite determinar si alguna de las raíces de la ecuación característica (eigenvalores) está localizada en la mitad derecha del plano complejo (lo que indica inestabilidad), así como el número de raíces así ubicadas.

##### c) Método de Root-Locus o del lugar geométrico de las raíces de la ecuación característica

El diagrama del lugar geométrico de las raíces de

la ecuación característica permite observar el desplazamiento de las raíces cuando varía un parámetro del sistema. Cuando estas raíces se ubican en la mitad derecha del plano complejo, el sistema de control de lazo cerrado es inestable. Este método ha sido seleccionado para determinar la estabilidad dinámica de la Central Paute, por lo que conviene conocerlo en más detalle.

Un sistema de control con una entrada y una salida se puede representar en el dominio de la frecuencia mediante el diagrama de bloques de la Figura 7.

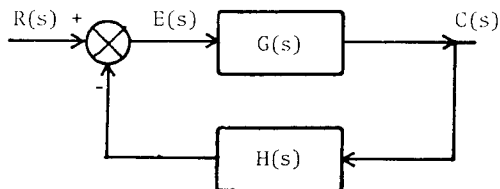


Figura 7. Sistema de control con lazo de realimentación.

La función de transferencia de este sistema es la relación entre la señal de salida  $C(s)$  y la señal de entrada  $R(s)$ .

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1+G(s)H(s)} \quad (9)$$

La ecuación característica de este sistema de control se obtiene igualando el denominador de la ecuación 9 a cero, es decir:  $1+G(s)H(s)=0$ . Si se encuentran las raíces de esta ecuación, se puede demostrar que las partes reales corresponden a las constantes de tiempo del sistema de control, y que las partes imaginarias de las raíces dan una indicación directa de la velocidad con que decaen las oscilaciones amortiguadas del sistema.

El producto  $G(s)H(s)$  se conoce como la Función de Transferencia del Lazo abierto y puede escribirse como:

$$K = \frac{\pi (s+Z_i)}{\pi (s+P_j)} = -1 \quad (10)$$

donde  $-Z_i$  y  $-P_j$  son los ceros y los polos de  $G(s)H(s)$ , y  $K$  es la ganancia del lazo. El método de root-locus muestra en forma gráfica cómo se desplazan las raíces cuando variamos el parámetro  $K$  entre 0 e infinito.

#### Técnicas en el espacio de estado

Debido a la limitación de los métodos clásicos que no permiten analizar sistemas con múltiples entradas y salidas y requieren de un largo proceso algebraico para obtener la ecuación característica, se usa los métodos de espacio de estado. Mediante esta técnica se obtiene también la ecuación característica, pero además es factible efectuar un estudio más completo del sistema. Esta técnica ha sido aplicada para diseñar sistemas de control óptimos, encontrar equivalentes dinámicos y realizar estudios de sensibilidad. El método consiste en expresar el sistema físico como un conjunto de ecuaciones diferenciales de primer orden, cuyas variables definen un estado, o condición operativa del sistema en cualquier instante  $t$ . Una vez definidas las variables de estado, la dinámica del sistema se representa en forma matricial como:

$$\dot{X} = A X + B F(t) \quad (11)$$

$$Y = C X \quad (12)$$

donde:

- $\underline{A}$  es la matriz característica del sistema de orden  $n \times n$ .
- $\underline{B}$  es una matriz de acoplamiento de orden  $n \times n$ .
- $\underline{C}$  es una matriz de acoplamiento de orden  $r \times n$ .
- $\underline{X}$  es el vector que contiene las  $n$  variables de estado.
- $\underline{Y}$  es el vector de salida del sistema de orden  $r \times 1$ .
- $\underline{E}$  es el vector de perturbación de orden  $n \times 1$ .
- $\dot{\underline{X}}$  es el vector de las primeras derivadas de  $\underline{X}$ .

Esta ecuación de estado se la obtiene de un modelo matemático del sistema y se la resuelve por computadora.

De la matriz característica  $A$  se calcula los valores característicos, de cuyo análisis se determina la estabilidad del sistema. Una cualidad de este método es que podemos observar la respuesta del sistema a lo largo del tiempo, cuando se ha variado un parámetro.

DIAGRAMA DE BLOQUES Y FUNCION DE TRANSFERENCIA DEL SISTEMA GENERADOR - BARRA INFINITA

El modelo que utilizaremos para el presente estudio es el modelo linearizado de Concordia-de Mello. El fenómeno de estabilidad y amortiguamiento de máquinas síncronas para pequeñas perturbaciones puede ser analizado mediante la ayuda de diagrama de bloques y relacionando las variables de: torque eléctrico, ángulo, velocidad, voltaje terminal, voltaje de campo, y enlaces de flujo. Las relaciones dentro de los diagramas de bloque son válidas para la representación en dos ejes de la máquina síncrona con el devanado de campo en el eje directo y sin devanados amortiguadores. El modelo utilizado corresponde al de una máquina conectada a un gran sistema o barra infinita mediante impedancia externa. Una derivación detallada del diagrama de bloques del modelo utilizado se presenta en el apéndice. Los parámetros dentro de las relaciones utilizadas han sido determinados del análisis para pequeños disturbios de las ecuaciones fundamentales de la máquina síncrona y por consiguiente son funciones de las impedancias de la máquina, del sistema, así como del punto operativo.

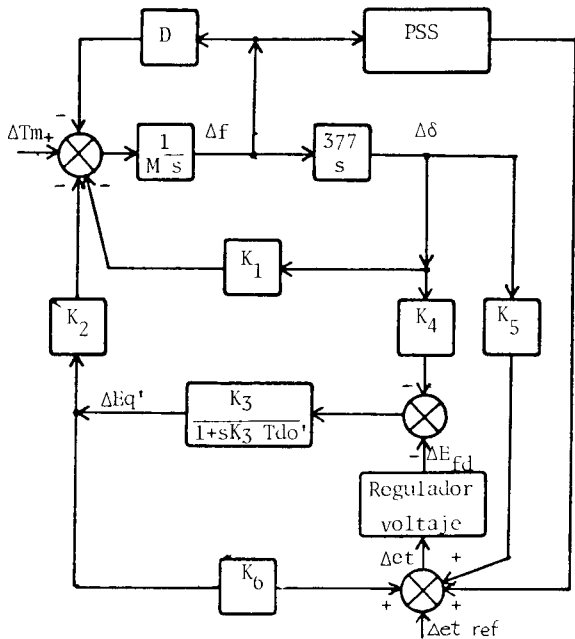


Figura 8. Diagrama de bloques del sistema total.

Los parámetros de la Figura 8 se definen a continuación:

- $K_1 = \frac{\Delta T_e}{\Delta \delta} \Big|_{E_q}$  Cambio en torque eléctrico para una modificación en el ángulo del rotor manteniendo constantes los enlaces de flujo en el eje d.
- $K_2 = \frac{\Delta T_e}{\Delta E'_q} \Big|_{\delta}$  Cambio en torque eléctrico para una modificación en los enlaces de flujo en el eje d, manteniendo constante el ángulo del rotor.
- $K_3 =$  Factor de impedancias
- $K_4 = \frac{1}{K_3} \frac{\Delta E'_q}{\Delta \delta}$  Efecto desmagnetizante producido por un cambio de ángulo del rotor. Reacción de armadura.
- $K_5 = \frac{\Delta E_T}{\Delta \delta}$  Cambio en voltaje terminal para una modificación en el ángulo del rotor con  $E_q$  constante.
- $K_6 = \frac{\Delta E_T}{\Delta E'_q}$  Cambio en voltaje terminal para una modificación en  $E_q$  manteniendo constante el ángulo del rotor.

El diagrama de bloques correspondiente al sistema generador-barra infinita incluye la dinámica del rotor y del regulador de voltaje, así como el equipo complementario de control del sistema de excitación denominado P.S.S.

La representación del sistema de excitación-regulador de voltaje utilizado corresponde al de un sistema de excitación estático con fuente de potencial y rectificadores controlados similar al instalado en las unidades de generación de la central Paute. El diagrama de bloques se muestra en la Figura 9.

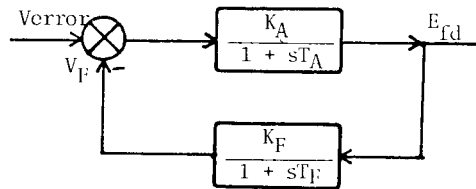


Figura 9. Diagrama de bloques del sistema de excitación.

La función de transferencia correspondiente es:

$$\frac{\Delta E_{fd}}{\Delta e_t} = \frac{K_A (1 + s T_F)}{(1 + s T_A) (1 + s T_F) + K_A K_F s} \quad (13)$$

Con los parámetros correspondientes definidos de la siguiente manera:

- $K_A$  = ganancia del regulador de voltaje.
- $K_F$  = ganancia del sistema estabilizador del control de excitación.
- $T_A$  = constante de tiempo del regulador de voltaje.
- $T_F$  = constante de tiempo del sistema estabilizador del control de excitación.

La Figura 10 muestra la representación del estabilizador de sistemas de potencia cuya señal de entrada es la velocidad del rotor de la máquina.

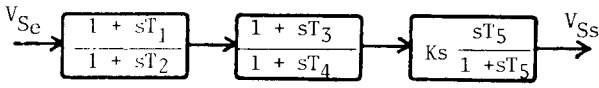


Figura 10. Modelo del estabilizador de sistemas de potencia.

Los parámetros del estabilizador se definen a continuación:

$T_1, T_3$  constantes de tiempo del circuito de adelanto de fase.

$T_2, T_4$  constantes de tiempo del circuito de atraso de fase.

$T_5$  constante de tiempo de la señal de barrido.

$K_s$  ganancia del estabilizador de sistemas de potencia.

$V_{se}$  entrada al P.S.S.

$V_s$  salida del P.S.S (en p.u del voltaje terminal).

Mediante técnicas conocidas de reducción de diagramas de bloque se puede obtener la función de transferencia entre dos variables cualesquiera del modelo.

La función de transferencia  $\frac{\Delta\delta}{\Delta e_{trIF}}$  sin incluir el es-

tabilizador de sistemas de potencia nos permitirá determinar el polinomio característico y consecuentemente encontrar las raíces del mismo que constituyen los valores característicos del sistema y de cuya ubicación en el plano complejo depende la estabilidad dinámica del generador. Se ha determinado que la función de transferencia antes mencionada es igual a:

$$\frac{\Delta\delta}{\Delta e_{trIF}} = \frac{377 K_2 K_3 P_3}{P_5} \quad (14)$$

donde los polinomios se definen de la siguiente manera:

$$P_1 = M_s^2 + D_s + 377 K_1$$

$$P_2 = K_3 T d^0 s + 1$$

$$P_3 = K_A (1 + sT_F)$$

$$P_4 = (1 + sT_A) (1 + sT_F) + K_A K_F s$$

$$\frac{\Delta E_{fd}}{\Delta e_{trIF}} = \frac{P_3}{P_4} \quad (15)$$

$$P_5 = P_1 P_2 P_4 + K_3 K_6 P_1 P_3 - 377 K_2 K_3 (K_5 P_3 + K_4 P_4)$$

La cuestión de estabilidad dinámica consiste ahora en determinar las raíces del polinomio  $P_5$ . Este polinomio, que no incluye los efectos del estabilizador de sistemas de potencia, es de quinto orden. En este estudio, el polinomio característico,  $P_5$ , es factorado con varios parámetros del sistema como variables. Esto permite determinar el efecto que cada parámetro tiene en la localización de las raíces y los resultados se muestran como el lugar geométrico de las mismas (root-locus).

Los resultados anteriores permiten detectar los modos de oscilación inestables (raíces localizadas en la parte derecha del plano complejo). A fin de corregir esta situación, es decir, localizar los valores característicos en la mitad izquierda del plano complejo, se utiliza el equipo estabilizador. Una nueva función de transferencia  $\frac{\Delta\delta}{\Delta e_{trIF}}$  que incluye los efectos del

PSS es derivada y el polinomio característico analizado para diferentes valores de ajuste de los parámetros del estabilizador, este procedimiento nos permite seleccionar los valores óptimos de calibración, a fin de corregir en forma efectiva el problema de oscilaciones no amortiguadas presentes en el sistema, para diferentes condiciones operativas.

La ecuación utilizada para el estabilizador es:

$$\frac{\Delta e}{\Delta\delta} = \frac{K_s P_6}{377 P_7} \quad (16)$$

$$P_6 = T_5 s^2 (1 + sT_1) (1 + sT_3)$$

$$P_7 = (1 + sT_2) (1 + sT_4) (1 + sT_5)$$

y la función de transferencia resultante del sistema es:

$$\frac{\Delta\delta}{\Delta e_{trIF}} = \frac{P_8}{P_9} \quad (17) \quad P_8 = 377 K_2 K_3 P_7$$

$$P_9 = P_5 P_7 + K_2 K_3 K_5 P_3 P_6$$

donde  $P_9$  es el polinomio característico del sistema y en este caso es de octavo orden.

#### ESTUDIO ANALITICO PARA EL CASO DE LA CENTRAL PAUTE

##### Metodología

La metodología aplicada en este trabajo se resume en 1ª Figura 11, la misma que se explica en cierto detalle a continuación: Primero se define el problema a estudiarse y el alcance del trabajo, luego se procede a la modelación matemática del sistema mediante la linealización de las ecuaciones de la máquina y la aplicación de los diagramas de bloque para encontrar la ecuación característica del sistema. A continuación, se reemplaza los valores de la máquina y de la red en esta ecuación obtenida y se aplica el método de root-locus para varias condiciones de operación. Esto permite obtener una visión completa del sistema.

En los métodos clásicos de análisis de estabilidad como el de root-locus, utilizado en la primera parte de este estudio, un largo proceso algebraico es requerido a fin de comprimir las ecuaciones dinámicas del sistema en una expresión con una señal de entrada y otra de salida y conseguir de esta manera el polinomio característico que sirve para determinar la estabilidad del sistema.

Con la técnica de espacio de estado, el modelo es formulado directamente de los bloques separados o ecuaciones describiendo el sistema físico y luego se aplican técnicas computacionales a la matriz  $[A]$  a fin de determinar los valores característicos del sistema, eliminando de esta manera manipulaciones algebraicas manuales. Es por esta razón que en la segunda parte de este estudio se aplica la formulación del espacio de estado para analizar la estabilidad del sistema generador-barra infinita, considerando variaciones de voltaje terminal, frecuencia, potencia, etc. Con esta formulación es factible obtener curvas de respuesta del sistema en función de la variable tiempo.

Finalmente se hace un análisis de los resultados a fin de determinar los valores adecuados de calibración de los sistemas de control del generador.

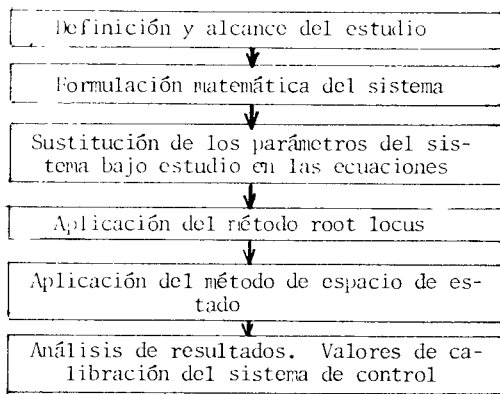


Figura 11 Metodología para el estudio de estabilidad dinámica

### Definición y Alcance del Estudio

El estudio de estabilidad dinámica de la Central Paute se efectuó para determinar las causas que originaron las oscilaciones y tratar de eliminarlas mediante la calibración del sistema de excitación y equipo complementario.

### Formulación Matemática del Sistema

El sistema se representa mediante un generador conectado a una barra infinita a través de una impedancia externa. Se toma el modelo en dos ejes del generador cuyo diagrama de bloques fue detallado anteriormente. El control de la excitación del equipo instalado en la Central Paute es del tipo THYRIPOL SIEMENS, accionado mediante tiristores, y cuyos datos se dan en el apéndice, conjuntamente con otros datos del generador. Aquí cabe mencionar que la impedancia externa no es, como se podría suponer, una línea física que une Paute con otro punto del sistema, sino la impedancia de Thévenin vista desde las barras de 13.8 KV, por lo que para su cálculo se debe tener el equivalente del sistema en esa barra, sin incluir las impedancias de los generadores de Paute.

La formulación matemática del sistema consiste en encontrar la función de transferencia ángulo - voltaje terminal, función que ha sido ya descrita en este artículo.

### Cálculo de Condiciones Iniciales y otros Parámetros

Paralelamente a la obtención analítica de la ecuación característica, se calcula: 1) Las condiciones iniciales del sistema, con los datos propios de la máquina utilizando las relaciones fasoriales apropiadas. Estos parámetros se los puede calcular de la ecuación expresadas en la Referencia (2), o mediante la aplicación del diagrama fasorial del apéndice. Lo que interesa es conocer las corrientes y voltajes en los ejes d y q,  $i_{d0}$ ,  $i_{q0}$ ,  $e_{d0}$ , etc, el ángulo  $\delta$  entre el voltaje terminal y el eje q, y los voltajes  $E_d$ ,  $E_q$  y  $e_t$ .

2) Una vez obtenidos estos valores iniciales se procede a calcular las constantes  $K_1$  a  $K_6$  aplicando las relaciones expresadas en el apéndice.

### Método de Root-Locus

Una vez obtenidas las condiciones iniciales y los valores de  $K_1$  a  $K_6$ , se reemplaza en la ecuación característica y se resuelve esta ecuación para encontrar sus raíces, lo que nos permite analizar la estabilidad del sistema para una condición de operación.

Como es necesario observar el comportamiento de las raíces para varios puntos de operación, se varía la potencia de entrada, la ganancia  $K_A$  del regulador de voltaje, la ganancia  $K_F$  del bloque de excitación, y la ganancia  $K_S$  del bloque del estabilizador, obteniendo sendos diagramas de root-locus para cada caso.

### Análisis de Estabilidad

El estudio se desarrolla, en un principio, sin incluir el bloque del estabilizador de sistemas de potencia. El polinomio característico en este caso, es de quinto orden, como se ha mencionado ya anteriormente. Las raíces de este polinomio permiten obtener un gráfico similar al de la Figura 12, donde se muestra el desplazamiento de las raíces para diferentes valores de  $K_A$  y  $K_F$ . El objetivo de este diagrama es observar si estas raíces se ubican en el lado derecho del plano complejo para una condición operativa dada. Si esto sucede, es necesario variar  $K_A$  y  $K_F$ , de manera de desplazar los valores característicos al lado izquierdo, lográndose así la estabilidad del sistema.

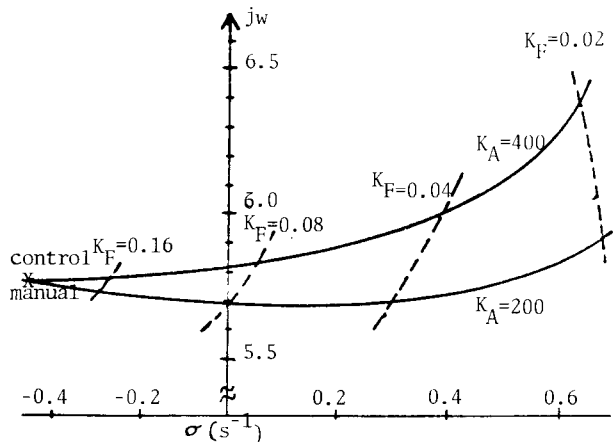


Figura 12: Desplazamiento de las raíces para diferentes valores de  $K_A$  y  $K_F$ .

Mediante un procedimiento similar al descrito para obtener el gráfico de  $K_A$  y  $K_F$ , se puede obtener un gráfico del desplazamiento de los modos de oscilación del generador y del sistema de excitación, similar al de la Figura 13, variando la potencia del generador en un rango apropiado. En el caso de Paute, como hay cinco unidades, se puede variar P desde 100 a 500 MW y considerar la variación del valor de la impedancia externa con la inclusión de las reactancias de sus transformadores de elevación. En este diagrama se observa si para un valor de potencia de generación y para ciertos valores de los parámetros del sistema de control y de la red de transmisión, se tiene inestabilidad o no en el sistema.

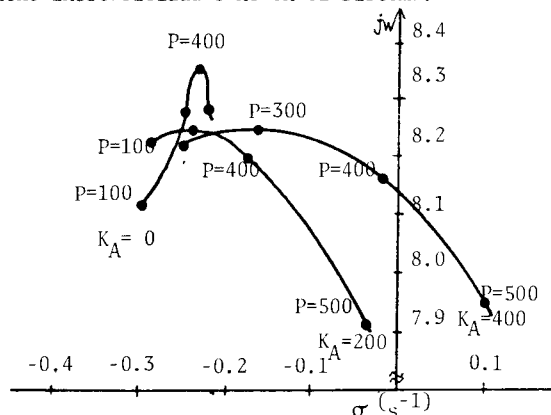


Figura 13. Desplazamiento de las raíces para diferentes valores de Potencia y  $K_A$ .



Una vez obtenidos los gráficos de root-locus, sin el P.S.S., se procede a incluir este término en la ecuación característica, obteniendo un polinomio de octavo orden. Se repite el proceso anterior hasta obtener gráficos similares a los ya descritos. De esta manera, se puede afirmar si la inclusión del P.S.S. mejora la estabilidad del sistema. Esto permite determinar los valores de calibración del P.S.S. y del sistema de control de la excitación, siendo este el objetivo final del estudio. Los parámetros así determinados deberán implementarse o ser ajustados en el sitio mismo, es decir, en la Central Paute donde está localizado el equipo. A fin de comprobar si el comportamiento del sistema de excitación y equipo estabilizador opera adecuadamente, es necesario registrar la respuesta de frecuencia del sistema de excitación compensado con el P.S.S. Procedimientos de ajuste y comprobación en sitio de los estabilizadores de sistemas de potencia caen fuera del alcance de este estudio, aunque al final se mencionan algunas referencias que pueden ser consultadas respecto con estos temas. A fin de facilitar la implementación de una calibración adecuada de los P.S.S. instalados en la Central Paute, se ha elaborado un programa digital que permite calcular las raíces de la ecuación característica para diferentes puntos de operación.

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. El empleo de excitatrices de estado sólido permite incrementar los niveles de transmisión por estabilidad transitoria debido a su alta velocidad de respuesta. Sin embargo, cuando el sistema de transmisión involucra líneas largas como es el caso de la línea Paute-Pascuales, el uso de estas excitatrices agrava la estabilidad dinámica del sistema.
2. El incremento de los niveles de potencia transmitida desde Paute, tiende a agravar el problema de oscilaciones pudiendo llegarse a condiciones inaceptables para la operación del sistema interconectado.
3. Una selección adecuada de los parámetros de ajuste de los estabilizadores de sistemas de potencia instalados en las unidades de Paute, mejorará sustancialmente el comportamiento oscilatorio del sistema, puesto que la función fundamental de los PSS es extender los límites de estabilidad en la transferencia de potencia, mejorando el amortiguamiento de las oscilaciones del sistema por medio del control de la excitación de los generadores.
4. Los problemas de estabilidad dinámica causados por oscilaciones débilmente amortiguadas, tales como las descritas en este trabajo pueden ser estudiados utilizando como primera aproximación el modelo lineal de Concordia-de Mello para un sistema generador-barra infinita.
5. El método de root-locus, escogido para el análisis inicial de la estabilidad dinámica de la Central Paute permite observar el comportamiento del sistema efectuando estudios de sensibilidad para varios parámetros del sistema, tales como: potencia de generación, reactancia externa, constantes del sistema de excitación.
6. En este trabajo se han presentado las bases teóricas y la metodología a aplicarse para el análisis de la estabilidad de la Central Paute. La utilización del programa digital a que se hace referencia anteriormente, servirá para calcular los valores característicos del sistema incluyendo el estabilizador de sistemas de potencia. Los resultados de este estudio permitirán seleccionar los parámetros tentativos de ajuste de los sistemas de excitación y estabilizador instalados en las

unidades de Paute.

7. A fin de comparar los resultados teóricos del estudio con el comportamiento real del sistema, es recomendable determinar la frecuencia del modo de oscilación débilmente amortiguado, lo que se puede efectuar de dos maneras: En la primera, una vez transcurrido un disturbio, el registro de una variable eléctrica importante mostrará la frecuencia de oscilación del modo crítico. En la segunda manera, el sistema es inducido a oscilar en el modo crítico inyectando una señal periódica en el voltaje terminal de referencia del RAV. Cuando se lleva la señal perturbadora cerca de la frecuencia del modo crítico, todo el sistema comenzará a oscilar.
8. Antes de efectuar el ajuste en sitio de los parámetros de los PSS, es conveniente el que se realicen pruebas experimentales de respuesta de frecuencia del sistema de excitación y reguladores devoltaje para asegurar que la operación con los PSS mejorará el comportamiento dinámico de la Central Paute.
9. Con la finalidad de garantizar una adecuada operación del SNI y tomando como referencia el trabajo aquí presentado y las pruebas experimentales que deberán efectuarse en las unidades de Paute, es necesario realizar un estudio más profundo de la estabilidad de todo el Sistema Interconectado, a fin de representar los generadores más importantes así como la red completa de transmisión lo que exige un mayor detalle en la modelación de los componentes del sistema y poder analizar de esta manera la interacción entre grupos de generadores conectados al SNI. Es por consiguiente, necesario, utilizar técnicas avanzadas de análisis como la de Espacio de Estado, la misma que permite calcular todos los valores característicos del sistema, los efectos del sistema de excitación y gobernador de la turbina sobre la estabilidad, efectuar estudios de sensibilidad de las raíces, así como determinar las características de respuesta de frecuencia del sistema de potencia.

### BIBLIOGRAFIA

- (1) Anderson, P.M., Fouad, A.A., Power System Control and Stability, Iowa State University Press, 1977.
- (2) De Mello, F.P., Concordia, C., "Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control", IEEE TPAS, Vol. PAS-88, April 1964, pp. 316-329.
- (3) Hernández, R., et al. "Dynamic Stability and Power System Analysis and Tests on the Venezuelan System", IEEE TPAS, Vol. PAS-96, No. 3, May-June 1977, pp. 855-862.
- (4) Kuo, Benjamin, Automatic Control Systems, Prentice.
- (5) Power System Stabilization Via Excitation Control, IEEE Tutorial Course # 81EHO 175-0 PWR, Spt. 1980.
- (6) Application of Power System Stabilizers to Dynamic Stability Problems, Energy Systems Research Center University of Texas at Arlington, 1980.
- (7) "Proposed Terms and Definitions for Power System Stability", IEEE Task Force on Terms and Definitions, IEEE TPAS, Vol. PAS-101 July 1982 pp 1824.
- (8) "Excitation System Models and Definitions for Power System Stability Studies", IEEE Committee Report, IEEE TPAS, Vol. PAS-100, February 1982, pp. 494-509.
- (9) "Test Procedure for Power System Stabilizers", Western System Coordinating Council, Julio 1976.