

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**CALCULO DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA Y MODOS
DE OSCILACION LOCAL DE LA CENTRAL CAÑÓN DEL
PATO, UTILIZANDO MODELOS DE ALTO ORDEN DE LA
MAQUINA SÍNCRONA**

INFORME DE SUFICIENCIA

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO ELÉCTRICISTA**

PRESENTADO POR:

VANESSA GLICERIA RUIZ QUISPE

PROMOCIÓN

2006 – I

LIMA – PERÚ

2013

**CALCULO DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA Y MODOS
DE OSCILACION LOCAL DE LA CENTRAL CAÑÓN DEL
PATO, UTILIZANDO MODELOS DE ALTO ORDEN DE LA
MAQUINA SÍNCRONA**

Un enorme agradecimiento al Ingeniero Roberto Ramirez, que me apoyó desinteresadamente en el logro de esta importante meta en mi carrera profesional. Se lo dedico a mis adoradas hijas y a mi querida familia.

SUMARIO

En el presente informe de suficiencia se desarrolla el análisis de estabilidad de modos de oscilación local para modelos de alto orden de la máquina síncrona, así como el análisis de Calidad de la Energía.

En el primer capítulo se ha mostrado el procedimiento de cálculo de los coeficientes de estabilidad permanente, tal como se ha venido desarrollando hasta la actualidad, con el modelo más simplificado de la máquina síncrona, el modelo de tercer orden. Así mismo, se ha desarrollado el mismo procedimiento con modelos más completos de la máquina síncrona, el modelo de cuarto (que incorpora el efecto del eje en cuadratura) y el de sexto orden (que incorpora el efecto de los devanados amortiguadores). De otro lado, se ha mostrado una breve descripción del significado de la Calidad de la Energía Eléctrica, sus causas y efectos principales.

En el segundo capítulo, teniendo en cuenta el desarrollo mostrado en el primer capítulo, se realizó una aplicación a la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato (generador y transformador equivalente) conectada al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) mediante una impedancia variable, ajustada para reproducir las condiciones de operación más críticas posibles en el sistema propuesto en [6]. Se utilizaron los parámetros y controladores reales de esta central (máquina síncrona, sistema de excitación, regulador de tensión y estabilizador de sistemas de potencia) y el análisis se realizó en los tres escenarios ya propuestos: sistema clásico y sistemas de alto orden. Asimismo, se identificaron los casos de operación crítica de la mencionada Central, ocurridos en los últimos años. Tomando como base dicha información, se realizó la simulación de los armónicos de la Central Cañón del Pato.

En el tercer capítulo se desarrolló un análisis los resultados obtenidos en los capítulos precedentes. En primer lugar se revisó la relación de dependencia de los coeficientes de estabilidad de los sistemas de alto orden para diversas condiciones iniciales de operación. En segundo lugar se analizaron las curvas de variación del ángulo δ y de la velocidad angular ω_r del rotor de la máquina síncrona en función del tiempo ante perturbaciones en los sistemas de alto orden. Finalmente se determinaron los modos de oscilación del sistema de prueba con los modelos de alto orden. De otro, analizaron los resultados de la simulación de armónicos de la Central Cañón del Pato.

INDICE

PROLOGO	01
CAPITULO I	
CALIDAD DE LA ENERGÍA Y COEFICIENTES DE ESTABILIDAD PERMANENTE CON MODELOS DE ALTO ORDEN DE LA MÁQUINA SÍNCRONA	
1.1. Definiciones Previas	02
1.1.1. Modos de Oscilación del SEP	02
1.1.2. Modelos de Alto Orden de la máquina Síncrona	03
1.2. Coeficientes de Estabilidad Permanente	05
1.2.1. Resumen de Ecuaciones	14
1.3. Matriz de Espacio de Estado	19
1.4. Coeficientes de Amortiguamiento y Sincronización	35
1.5. Calidad de la Energía	43
CAPITULO II	
DETERMINACIÓN DEL MODO LOCAL DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA CAÑÓN DEL PATO	
2.1. Cálculo de los Coeficientes de Amortiguamiento y Sincronización	49
2.1.1. Con el Modelo Transitorio en eje directo	51
2.1.2. Con el Modelo Transitorio en ambos ejes	53
2.1.3. Con el Modelo Subtransitorio en ambos ejes	55
2.2. Cálculo de la Matriz de Espacio de Estado	58
2.2.1. Con el Modelo Transitorio en eje directo	62
2.2.2. Con el Modelo Transitorio en ambos ejes	69
2.2.3. Con el Modelo Subtransitorio en ambos ejes	76
2.3. Calidad de la Energía de la C.H. Cañón del Pato	83
2.3.1. Evento 2008	83
2.3.2. Evento Febrero 2009	84
2.3.3. Evento Noviembre 2009	84
2.3.4. Evento 2010	84
CAPITULO III	
ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS	

3.1.	Análisis de la contribución de los Coeficientes de Estabilidad en los sistemas de alto orden	86
3.1.1.	Influencia de Operación de la Central en la Estabilidad del Sistema	86
3.1.2.	Influencia de Operación del SEIN en la Estabilidad del Sistema	89
3.1.3.	Influencia en los Coeficientes KS y KD	93
3.2.	Análisis de la respuesta en el tiempo de los sistemas de alto orden ante una perturbación	99
3.3.	Resultados del análisis de la calidad de la energía de la CH Cañón del Pato	104
	CONCLUSIONES	105
	ANEXOS	
	BIBLIOGRAFIA	

PRÓLOGO

En los estudios de estabilidad permanente de sistemas de potencia, el modelo matemático de la máquina síncrona admite ciertas aproximaciones descritas en las referencias [1] y [2]. De acuerdo a la magnitud de las aproximaciones el modelo puede ser simplificado en mayor o menor escala, obteniéndose tres casos principales: Modelo Transitorio en un eje (o Modelo de Tercer Orden), Modelo Transitorio en dos ejes (o Modelo de Cuarto Orden) y el Modelo Subtransitorio en ambos ejes (o Modelo de Sexto Orden). Los dos últimos son los llamados modelos de alto orden de la máquina síncrona, por ser más completos al tener un menor grado de simplificación.

El modelo matemático de tercer orden es ampliamente utilizado en los estudios de estabilidad permanente de sistemas eléctricos de potencia [3], [4]. Este modelo omite el efecto transitorio del eje en cuadratura y de los devanados amortiguadores de la máquina síncrona en su comportamiento con la finalidad de simplificar los cálculos que pueden ser muy extensos en la medida que el sistema eléctrico adopta mayor cantidad de elementos (cargas, centrales de generación, subestaciones, etc).

En el presente informe se ha desarrollado la metodología para determinar los coeficientes de estabilidad permanente de la Central Cañón del Pato, utilizando el sistema elemental Máquina-Línea-Sistema de Potencia con modelos más completos de la máquina síncrona, los de cuarto y sexto orden, con la finalidad de establecer la magnitud del error que se comete al utilizar el modelo más simplificado (el de tercer orden) y analizar las implicancias de su uso en la práctica. Adicionalmente se ha realizado una simulación de armónicos en eventos críticos que se presentaron en los últimos años en dicha Central, en el marco del análisis de la Calidad de la Energía.

CAPITULO I

CALIDAD DE LA ENERGÍA Y COEFICIENTES DE ESTABILIDAD PERMANENTE CON MODELOS DE ALTO ORDEN DE LA MÁQUINA SÍNCRONA

1.1. Definiciones Previas

La estabilidad permanente es la habilidad del Sistema de Potencia (SEP) para mantenerse en sincronismo luego de ser sometido a una pequeña perturbación (variación de carga o de potencia generada).

La estabilidad del SEP puede romperse principalmente por dos causas:

Con un incremento estacionario en el ángulo del rotor del generador debido a la carencia o al insuficiente torque sincronizante (inestabilidad monotónica). Se le denomina también aperiódica y esta asociada con aquella condición de operación en la cual se ha excedido el límite de transmisión de potencia en estado estacionario del sistema. Matemáticamente esta inestabilidad corresponde al caso en que las ecuaciones linealizadas tienen al menos una raíz real positiva.

Con oscilaciones rotóricas de amplitud creciente debido al insuficiente torque de amortiguamiento o carácter negativo del mismo (inestabilidad oscilatoria).

Corresponde a aquella situación en la cual surgen oscilaciones electromecánicas entre máquinas o grupos de máquinas.

1.1.1. Modos de Oscilación del SEP

Los Modos de Oscilación reflejan las interacciones entre el sistema de transmisión eléctrico y el sistema mecánico de impulso de los generadores, pueden ocurrir entre una máquina síncrona o una central eléctrica y el resto del sistema o entre grandes grupos de unidades generadoras. Desde la mitad de los años 60 se ha observado en los sistemas de transmisión en diferentes países y, en particular en líneas de interconexión entre zonas o sistemas eléctricos, oscilaciones en la potencia, tensión, corriente y frecuencia.

Los Modos de Oscilación pueden aparecer ante los cambios de operación del sistema eléctrico o después de que ha soportado con éxito un proceso transitorio originado por una perturbación.

Los Modos de Oscilación se dividen en categorías: Modos Locales, Modos Interárea, Modos de Control y Modos de Torsión. En la figura 1.1 se muestra las oscilaciones estudiadas por la estabilidad permanente o de pequeña señal.

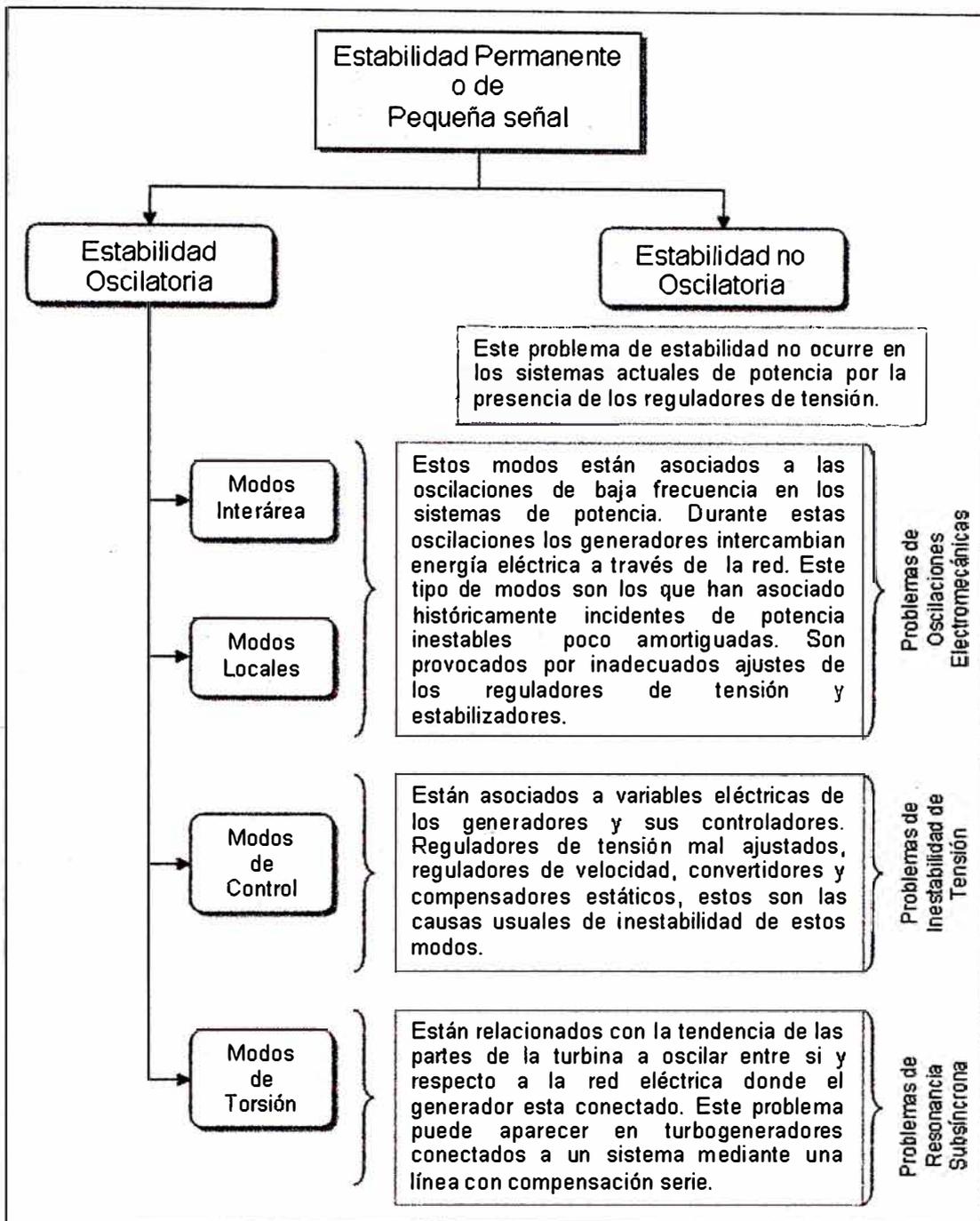


Fig. 1.1 Oscilaciones estudiadas por la estabilidad permanente

En este Informe de Suficiencia se analizarán los modos de oscilación local, es decir, la oscilación de la máquina síncrona respecto al resto del sistema (0,8 a 1,8 Hz).

Se utilizará la técnica de linealización de las ecuaciones del sistema de potencia alrededor de un punto de operación. Para la simulación del sistema de potencia se utilizará el sistema de prueba desarrollado en la referencia [6] y los modelos de alto orden de la máquina síncrona. También se mostrará el caso del sistema clásico a fin de efectuar comparaciones en capítulos posteriores.

1.1.2. Modelos de Alto Orden de la máquina Síncrona

El generador síncrono es un elemento importante dentro del sistema eléctrico de

potencia, razón por la cual es necesario estudiar y conocer su comportamiento en diversos estados de operación. Normalmente estos estudios requieren un modelo matemático de máquina en función de variables denominadas parámetros, tales como las reactancias de eje directo cuadratura, la constante de inercia, el factor amortiguamiento, entre otros.

En el presente Informe de Suficiencia se utilizan los siguientes modelos matemáticos de la máquina síncrona:

- El modelo clásico o modelo de tercer orden, utilizado ampliamente en el análisis de estabilidad permanente de SEP; en este modelo se omite el efecto del eje en cuadratura del rotor, es decir, se cuenta únicamente con el eje directo. Se utilizará este modelo para mostrar el procedimiento, tal como se viene desarrollando actualmente.
- El modelo de cuarto orden o modelo transitorio en eje directo, en este caso se consideran ambos ejes del rotor en su modelamiento. Se desarrollará el mismo procedimiento mencionado en el caso anterior, con la variante del modelo de la máquina síncrona.
- El modelo de sexto orden o modelo subtransitorio en ambos ejes, adicionalmente a los ejes del rotor, en este modelo se considera el efecto de los devanados amortiguadores del mismo. También se desarrollará el procedimiento análisis de estabilidad permanente con este, que es el modelo más completo.

Los parámetros de la máquina síncrona que serán utilizados para realizar el análisis de estabilidad permanente, que nos conducirá a determinar los coeficientes de amortiguamiento y sincronización del sistema, son los siguientes:

$$\begin{array}{lll}
 X_d = 1.0; & X_q = 0.737; & X'_d = 0.351; \\
 X'_q = 0.42; & X''_d = 0.197; & X''_q = 0.231; \\
 T'_{do} = 4.86; & T'_{qo} = 0.91; & T''_{do} = 0.02; \\
 T''_{qo} = 0.04; & H = 1.82; & r_a = 0;
 \end{array}$$

Donde:

X_d, X_q : Reactancias síncronas de ejes directo y en cuadratura.

X'_q, X'_d : Reactancias transitorias de ejes directo y en cuadratura.

X''_d, X''_q : Reactancias subtransitorias de ejes directo y en cuadratura.

T'_{do}, T'_{qo} : Constantes de tiempo transitorias de ejes directo y en cuadratura.

T''_{do}, T''_{qo} : Constantes de tiempo subtransitorias de ejes directo y en cuadratura.

r_a : Resistencia del devanado de armadura

H: Constante de Inercia de la máquina síncrona

1.2. Coeficientes de Estabilidad Permanente

Las oscilaciones en el ángulo del rotor de la máquina síncrona generan un torque de frenado que tiene dos componentes: el componente de torque sincronizante (ΔT_S), en fase con la variación del ángulo del rotor y el componente de torque amortiguador (ΔT_D), en fase con la variación de la velocidad del rotor. En el primer caso, el coeficiente de proporcionalidad es conocido como el coeficiente de torque sincronizante (KS), y en el segundo caso, el coeficiente de proporcionalidad es el coeficiente de torque amortiguador (KD). El siguiente gráfico representa al Torque y sus componentes:

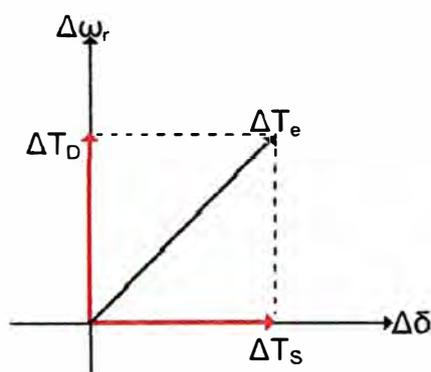


Fig. 1.2 Componentes del Torque Eléctrico

A continuación se linealizarán las ecuaciones del sistema externo a la máquina síncrona mostrado en la figura 1.2, para determinar los coeficientes de estabilidad permanente de los tres modelos de la máquina síncrona.

El sistema eléctrico máquina-barra infinita que se analizará se representa en la siguiente figura:

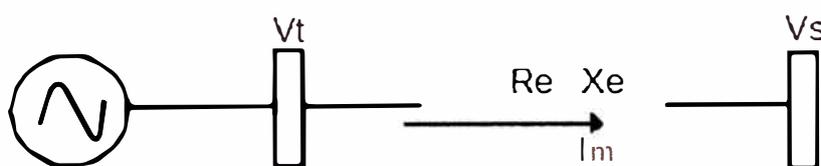


Fig. 1.3 Sistema Externo

$$\vec{V}_t = (R_e + jX_e) \vec{I}_m + \vec{V}_s$$

$$V_t^r + jV_t^i = R_e I_m^r - X_e I_m^i + V_s^r + j(X_e I_m^r + R_e I_m^i + V_s^i)$$

Despejando la última ecuación y representandola en forma matricial se obtiene lo siguiente:

$$\begin{bmatrix} V_t^r \\ V_t^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_e & -X_e \\ X_e & R_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_m^r \\ I_m^i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_s^r \\ V_s^i \end{bmatrix}$$

Llevando la referencia del sistema matricial a los ejes d, q y linealizando:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_q \\ \Delta V_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_e & -X_e \\ X_e & R_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_q \\ \Delta I_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -|V_s| \text{Sen}(\delta_o - \alpha) \Delta \delta \\ -|V_s| \text{Cos}(\delta_o - \alpha) \Delta \delta \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

a. Con el modelo transitorio en eje directo

1. Las ecuaciones linealizadas del estator de la máquina síncrona con el modelo matemático de tercer orden son:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_q \\ \Delta V_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & X'_d \\ -X_q & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_q \\ \Delta I_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta E'_q \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

Remplazando la ecuación (1.1) en esta última ecuación y despejando las corrientes $\Delta I_q, \Delta I_d$ se obtiene:

$$\begin{bmatrix} \Delta I_q \\ \Delta I_d \end{bmatrix} = \frac{1}{K} \begin{bmatrix} R_e & (X'_d + X_e) \\ -(X_q + X_e) & R_e \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} \Delta E'_q \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} |V_s| \text{Sen}(\delta_o - \alpha) \Delta \delta \\ |V_s| \text{Cos}(\delta_o - \alpha) \Delta \delta \end{bmatrix} \right\} \quad (1.3)$$

Donde:

$$K = (X_e + X_q)(X'_d + X_e) + R_e^2$$

2. El torque eléctrico se representa de la siguiente manera:

$$T_e = V_d I_d + V_q I_q$$

Linealizando esta ecuación:

$$\Delta T_e = V_{d0} \Delta I_d + I_{d0} \Delta V_d + V_{q0} \Delta I_q + I_{q0} \Delta V_q$$

Remplazando (1.2), que corresponde a las ecuaciones linealizadas del estator de la máquina síncrona, en la ecuación anterior resulta lo siguiente:

$$\Delta T_e = I_{q0} \Delta E'_q + E'_{q0} \Delta I_q - (X'_q - X'_d) I_{d0} \Delta I_q - (X'_q - X'_d) I_{q0} \Delta I_d$$

Sustituyendo (1.3), correspondiente a las ecuaciones de corriente $\Delta I_q, \Delta I_d$, en la ecuación anterior se obtiene la siguiente expresión:

$$\Delta T_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta E'_q \quad (1.4)$$

Donde:

$$K_1 = \left(E'_{q0} - (X_q - X'_d) I_{d0} \right) \left[\frac{|V_s| R_e}{K} \text{Sen}(\delta_o - \alpha) + \frac{|V_s|}{K} (X'_d + X_e) \text{Cos}(\delta_o - \alpha) \right] \\ - (X_q - X'_d) I_{d0} \left[\frac{|V_s| R_e}{K} \text{Cos}(\delta_o - \alpha) - \frac{|V_s|}{K} (X_q + X_e) \text{Sen}(\delta_o - \alpha) \right] \\ K_2 = \frac{I_{q0}}{K} \left(R_e^2 + (X_e + X_q)^2 \right) + \frac{R_e}{K} \left(E'_{q0} - (X_q - X'_d) I_{d0} \right)$$

3. La ecuación del rotor de la máquina síncrona con el modelo de tercer orden es:

$$\frac{dE'_q}{dt} = \frac{1}{T'_{do}} \left[E_{fd} - E'_q + (X_d - X'_d) I_d \right]$$

Se lleva esta ecuación diferencial lineal al dominio de Laplace para poder convertirla en una ecuación algebraica simple:

$$sE'_q = \frac{1}{T'_{do}} \left[E_{fd} - E'_q + (X_d - X'_d) I_d \right]$$

Linealizando la ecuación anterior:

$$s\Delta E'_q = \frac{1}{T'_{do}} \left[\Delta E_{fd} - \Delta E'_q + (X_d - X'_d) \Delta I_d \right]$$

Al reemplazar la ecuación de la corriente ΔI_d se obtiene:

$$s\Delta E'_q = \frac{1}{T'_{do}} \left[\Delta E_{fd} - \Delta E'_q + (X_d - X'_d) \left\{ \frac{1}{K} \left[- (X'_q + X'_e) \left[\frac{\Delta E'_q}{+ |V_s| \text{Sen}(\delta_o - \alpha) \Delta \delta} \right] \right] \right\} \right]$$

Despejando $\Delta E'_q$ se obtiene:

$$\Delta E'_q = \frac{K_3}{(1 + K_3 T'_{do} s)} \Delta E_{fd} - \frac{K_3 K_4}{(1 + K_3 T'_{do} s)} \Delta \delta \quad (1.5)$$

Donde:

$$K_3 = \frac{1}{\left[1 + \frac{(X_d + X'_d)(X_q + X'_e)}{K} \right]}$$

$$K_4 = \frac{|V_s|}{K} (X_d - X'_d) \left[(X_q + X'_e) \text{Sen}(\delta_o - \alpha) - R_c \text{Cos}(\delta_o - \alpha) \right]$$

4. El módulo de la tensión en los bornes de la máquina síncrona es la siguiente:

$$V_t^2 = V_d^2 + V_q^2$$

Linealizando esta ecuación:

$$\Delta V_t = \left[\frac{V_{do}}{V_{to}} \right] \Delta V_d + \left[\frac{V_{qo}}{V_{to}} \right] \Delta V_q$$

Sustituyendo las ecuaciones del estator de la máquina síncrona ($\Delta V_d, \Delta V_q$) se obtiene:

$$\Delta V_t = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q \quad (1.6)$$

Donde:

$$K_5 = -\left(\frac{V_{do}}{V_{to}}\right)\frac{(X_q)}{K}|V_s|\left[R_e \text{Sen}(\delta_o - \alpha) + (X'_d + X_e)\text{Cos}(\delta_o - \alpha)\right]$$

$$+ \left(\frac{V_{qo}}{V_{to}}\right)\frac{(X'_d)}{K}|V_s|\left[R_e \text{Cos}(\delta_o - \alpha) - (X_q + X_e)\text{Sen}(\delta_o - \alpha)\right]$$

$$K_6 = \left(\frac{V_{qo}}{V_{to}}\right)\left[1 - \frac{(X'_d)(X_q + X_e)}{K}\right] - \left[\left(\frac{V_{do}}{V_{to}}\right)\frac{R_e}{K}X'_q\right]$$

b. Con el modelo transitorio en ambos ejes

El procedimiento es similar al caso anterior, esta vez se utilizarán las ecuaciones del modelo transitorio en ambos ejes o modelo de cuarto orden de la máquina síncrona.

1. Las ecuaciones linealizadas del estator de la máquina síncrona con el modelo transitorio en ambos ejes son:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_q \\ \Delta V_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & X'_q \\ X'_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_q \\ \Delta I_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta E'_q \\ \Delta E'_d \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

Remplazando la ecuación (1.1) en esta última ecuación y despejando las corrientes $\Delta I_q, \Delta I_d$ se obtiene:

$$\begin{bmatrix} \Delta I_q \\ \Delta I_d \end{bmatrix} = \frac{1}{K} \begin{bmatrix} R_e & (X'_d + X_e) \\ -(X'_q + X_e) & R_e \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} \Delta E'_q \\ \Delta E'_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} |V_s| \text{Sen}(\delta_o - \alpha) \Delta \delta \\ |V_s| \text{Cos}(\delta_o - \alpha) \Delta \delta \end{bmatrix} \right\} \quad (1.8)$$

Donde:

$$K = (X_e + X'_q)(X'_d + X_e) + R_e^2$$

2. El torque eléctrico se representa de la siguiente manera:

$$T_e = V_d I_d + V_q I_q$$

Linealizando y remplazando (1.7), correspondiente a las ecuaciones del estator de la máquina síncrona, resulta la siguiente ecuación:

$$\Delta T_e = I_{d0} \Delta E'_d + I_{q0} \Delta E'_q + E'_{d0} \Delta I_d + E'_{q0} \Delta I_q - (X'_q - X'_d) I_{d0} \Delta I_q$$

$$- (X'_q - X'_d) I_{q0} \Delta I_d$$

Sustituyendo (1.8), correspondiente a las ecuaciones de corriente $\Delta I_q, \Delta I_d$, en la ecuación anterior se obtiene la siguiente expresión:

$$\Delta T_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta E'_q + K_{2a} \Delta E'_d \quad (1.9)$$

Donde:

$$K_1 = \left(E'_{qo} - (X'_q - X'_d) I_{do} \right) \left[\frac{|V_s| R_e}{K} \text{Sen}(\delta_o - \alpha) + \frac{|V_s|}{K} (X'_d + X'_e) \text{Cos}(\delta_o - \alpha) \right]$$

$$+ \left(E'_{do} - (X'_q - X'_d) I_{qo} \right) \left[\frac{|V_s| R_e}{K} \text{Cos}(\delta_o - \alpha) - \frac{|V_s|}{K} (X'_q + X'_e) \text{Sen}(\delta_o - \alpha) \right]$$

$$K_2 = I_{qo} + \frac{R_e}{K} \left(E'_{qo} - (X'_q - X'_d) I_{do} \right) - \frac{1}{K} \left[E'_{do} - I_{qo} (X'_q - X'_d) \right] (X'_q + X'_e)$$

$$K_{2a} = I_{do} + \frac{(X'_d + X'_e)}{K} \left(E'_{qo} - (X'_q - X'_d) I_{do} \right) + \frac{R_e}{K} \left[E'_{do} - I_{qo} (X'_q - X'_d) \right]$$

3. Las ecuaciones del rotor de la máquina síncrona con el modelo de cuarto orden son:

$$\frac{dE'_q}{dt} = \frac{1}{T'_{do}} \left[E_{fd} - E'_q + (X'_d - X'_d) I_d \right]$$

$$\frac{dE'_d}{dt} = \frac{1}{T'_{qo}} \left[-E'_d - (X'_q - X'_q) I_q \right]$$

Llevando estas ecuaciones al dominio de Laplace se tiene:

$$sE'_q = \frac{1}{T'_{do}} \left[E_{fd} - E'_q + (X'_d - X'_d) I_d \right]$$

$$sE'_d = \frac{1}{T'_{qo}} \left[-E'_d - (X'_q - X'_q) I_q \right]$$

Linealizando las ecuaciones anteriores:

$$s\Delta E'_q = \frac{1}{T'_{do}} \left[\Delta E_{fd} - \Delta E'_q + (X'_d - X'_d) \Delta I_d \right]$$

$$s\Delta E'_d = \frac{1}{T'_{qo}} \left[-\Delta E'_d - (X'_q - X'_q) \Delta I_q \right]$$

Al remplazar las ecuaciones de corriente ΔI_d , ΔI_q se obtiene:

$$s\Delta E'_q = \frac{1}{T'_{do}} \left[\begin{array}{c} \Delta E_{fd} - \Delta E'_q \\ + (X'_d - X'_d) \left\{ \frac{1}{K} \left[- (X'_q + X'_e) (\Delta E'_q + |V_s| \text{Sen}(\delta_o - \alpha) \Delta \delta) \right] \right. \right. \\ \left. \left. + R_e (\Delta E'_d + |V_s| \text{Cos}(\delta_o - \alpha) \Delta \delta) \right\} \right] \end{array} \right]$$

$$s\Delta E'_d = \frac{1}{T'_{qo}} \left[\begin{array}{c} -\Delta E'_d \\ - (X'_q - X'_q) \left\{ \frac{1}{K} \left[R_e (\Delta E'_q + |V_s| \text{Sen}(\delta_o - \alpha) \Delta \delta) \right. \right. \\ \left. \left. + (X'_d + X'_e) (\Delta E'_d + |V_s| \text{Cos}(\delta_o - \alpha) \Delta \delta) \right] \right\} \right] \end{array} \right]$$

Finalmente, despejando $\Delta E'_q$ y $\Delta E'_d$ se obtiene:

$$\Delta E'_q = \frac{K_3}{(1 + K_3 T'_{do} s)} \Delta E'_{fd} - \frac{K_3 K_4}{(1 + K_3 T'_{do} s)} \Delta \delta + \frac{K_3 K_7}{(1 + K_3 T'_{do} s)} \Delta E'_d \quad (1.10)$$

$$\Delta E'_d = -\frac{K_{3a}}{(1 + K_{3a} T'_{qo} s)} \Delta \delta - \frac{K_{3a}}{(1 + K_{3a} T'_{qo} s)} \Delta E'_q \quad (1.11)$$

Donde:

$$K_3 = \frac{1}{\left[1 + \frac{(X'_d - X'_d)(X'_q + X'_e)}{K} \right]}$$

$$K_{3a} = \frac{1}{\left[1 + \frac{(X'_q - X'_q)(X'_d + X'_e)}{K} \right]}$$

$$K_4 = \frac{|V_s|}{K} (X'_d - X'_d) \left[(X'_q + X'_e) \text{Sen}(\delta_o - \alpha) - R_e \text{Cos}(\delta_o - \alpha) \right]$$

$$K_{3a} = \frac{|V_s|}{K} (X'_q - X'_q) \left[(X'_d + X'_e) \text{Cos}(\delta_o - \alpha) + R_e \text{Sen}(\delta_o - \alpha) \right]$$

$$K_7 = \frac{R_e}{K} (X'_d - X'_d)$$

$$K_{3a} = \frac{R_e}{K} (X'_q - X'_q)$$

4. Ya se ha visto que la ecuación linealizada de la tensión en bornes de la máquina síncrona es la siguiente:

$$\Delta V_t = \left[\frac{V_{do}}{V_{to}} \right] \Delta V_d + \left[\frac{V_{qo}}{V_{to}} \right] \Delta V_q$$

Sustituyendo (1.7), correspondiente a las ecuaciones del estator de la máquina síncrona ($\Delta V_d, \Delta V_q$), en la ecuación anterior se obtiene:

$$\Delta V_t = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q + K_{6a} \Delta E'_d \quad (1.12)$$

Donde:

$$K_5 = -\left(\frac{V_{do}}{V_{to}} \right) \frac{(X'_q)}{K} |V_s| \left[R_e \text{Sen}(\delta_o - \alpha) + (X'_d + X'_e) \text{Cos}(\delta_o - \alpha) \right] \\ + \left(\frac{V_{qo}}{V_{to}} \right) \frac{(X'_d)}{K} |V_s| \left[R_e \text{Cos}(\delta_o - \alpha) - (X'_q + X'_e) \text{Sen}(\delta_o - \alpha) \right]$$

$$K_6 = \left(\frac{V_{q0}}{V_{\omega}} \right) \left[1 - \left(\frac{X'_d}{K} \right) (X'_q + X'_e) \right] - \left[\left(\frac{V_{d0}}{V_{\omega}} \right) \frac{R_e}{K} X'_q \right]$$

$$K_{6a} = \left(\frac{V_{d0}}{V_{\omega}} \right) \left[1 - \left(\frac{X'_q}{K} \right) (X'_d + X'_e) \right] + \left[\left(\frac{V_{q0}}{V_{\omega}} \right) \frac{R_e}{K} X'_d \right]$$

c. Con el modelo subtransitorio en ambos ejes

1. El modelo subtransitorio en ambos ejes incluye el efecto de los devanados amortiguadores de la máquina síncrona. Las ecuaciones linealizadas del estator de la máquina síncrona con el modelo matemático subtransitorio en ambos ejes son:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_q \\ \Delta V_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & X'_q \\ X'_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_q \\ \Delta I_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta E'_q \\ \Delta E'_d \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

Reemplazando la ecuación (1.1) en esta última ecuación y despejando las corrientes $\Delta I_q, \Delta I_d$ se obtiene:

$$\begin{bmatrix} \Delta I_q \\ \Delta I_d \end{bmatrix} = \frac{1}{K} \begin{bmatrix} R_e & (X'_d + X'_e) \\ -(X'_q + X'_e) & R_e \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} \Delta E'_q \\ \Delta E'_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} |V_s| \text{Sen}(\delta_o - \alpha) \Delta \delta \\ |V_s| \text{Cos}(\delta_o - \alpha) \Delta \delta \end{bmatrix} \right\} \quad (1.14)$$

Donde:

$$K = (X'_e + X'_q)(X'_d + X'_e) + R_e^2$$

2. El torque eléctrico se representa de la siguiente manera:

$$T_e = V_d I_d + V_q I_q$$

Linealizando esta ecuación:

$$\Delta T_e = V_{d0} \Delta I_d + I_{d0} \Delta V_d + V_{q0} \Delta I_q + I_{q0} \Delta V_q$$

Reemplazando (1.13), que corresponde a las ecuaciones linealizadas del estator de la máquina síncrona, en la ecuación anterior resulta lo siguiente:

$$\begin{aligned} \Delta T_e = & I_{d0} \Delta E'_d + I_{q0} \Delta E'_q + E'_{d0} \Delta I_d + E'_{q0} \Delta I_q \\ & - (X'_q - X'_d) I_{d0} \Delta I_q - (X'_q - X'_d) I_{q0} \Delta I_d \end{aligned} \quad (1.15)$$

Sustituyendo (1.14), correspondiente a las ecuaciones de corriente $\Delta I_q, \Delta I_d$, en la ecuación anterior se obtiene la siguiente expresión:

$$\Delta T_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta E'_q + K_{2a} \Delta E'_d \quad (1.16)$$

Donde:

$$K_1 = \left(E'_{q0} - (X'_q - X'_d) I_{d0} \right) \left[\frac{|V_s| R_e}{K} \text{Sen}(\delta_o - \alpha) + \frac{|V_s|}{K} (X'_d + X'_e) \text{Cos}(\delta_o - \alpha) \right]$$

$$+ \left(E_{do}^* - (X_q^* - X_d^*) I_{qo} \right) \left[\frac{|V_s| R_c}{K} \cos(\delta_o - \alpha) - \frac{|V_s|}{K} (X_q^* + X_c) \text{Sen}(\delta_o - \alpha) \right]$$

$$K_2 = I_{qo} + \frac{R_c}{K} \left(E_{qo}^* - (X_q^* - X_d^*) I_{do} \right) - \frac{1}{K} \left[E_{do}^* - I_{qo} (X_q^* - X_d^*) \right] (X_q^* + X_c)$$

$$K_{2a} = I_{do} + \frac{(X_d^* + X_c)}{K} \left(E_{qo}^* - (X_q^* - X_d^*) I_{do} \right) + \frac{R_c}{K} \left[E_{do}^* - I_{qo} (X_q^* - X_d^*) \right]$$

3. Las ecuaciones del rotor de la máquina síncrona con el modelo de sexto orden son:

$$\frac{dE_q'}{dt} = \frac{1}{T_{do}'} \left[E_{fd} - E_q' + (X_d - X_d') I_d \right]$$

$$\frac{dE_d'}{dt} = \frac{1}{T_{qo}'} \left[-E_d' - (X_q - X_q') I_q \right]$$

$$\frac{dE_d''}{dt} = \frac{1}{T_{qo}''} \left[E_d' - E_d'' - (X_q - X_q'') I_q \right]$$

$$\frac{dE_q''}{dt} = \frac{1}{T_{do}''} \left[E_q' - E_q'' + (X_d' - X_d'') I_d \right]$$

Llevando estas ecuaciones al dominio de Laplace se tiene:

$$sE_q' = \frac{1}{T_{do}'} \left[E_{fd} - E_q' + (X_d - X_d') I_d \right]$$

$$sE_d' = \frac{1}{T_{qo}'} \left[-E_d' - (X_q - X_q') I_q \right]$$

$$sE_q'' = \frac{1}{T_{do}''} \left[E_q' - E_q'' + (X_d' - X_d'') I_d \right]$$

$$sE_d'' = \frac{1}{T_{qo}''} \left[E_d' - E_d'' - (X_q - X_q'') I_q \right]$$

Linealizando estas ecuaciones se obtienen:

$$s \Delta E_q' = \frac{1}{T_{do}'} \left[\Delta E_{fd} - \Delta E_q' + (X_d - X_d') \Delta I_d \right]$$

$$s \Delta E_d' = \frac{1}{T_{qo}'} \left[-\Delta E_d' - (X_q - X_q') \Delta I_q \right]$$

$$s \Delta E_q'' = \frac{1}{T_{do}''} \left[\Delta E_q' - \Delta E_q'' + (X_d' - X_d'') \Delta I_d \right]$$

$$s \Delta E_d'' = \frac{1}{T_{qo}''} \left[\Delta E_d' - \Delta E_d'' - (X_q - X_q'') \Delta I_q \right]$$

Remplazando (1.14), que corresponde a las ecuaciones de corriente ΔI_d , ΔI_q y despejando E_q' , E_d' , E_q'' y E_d'' se obtiene:

$$\Delta E_q' = \left(\frac{1}{(1 + T_{do}'s)} \Delta E_{fd} + \frac{R_E}{(1 + T_{do}'s)} \Delta E_d'' - \frac{(X_E + X_q')}{(1 + T_{do}'s)} \Delta E_q'' + \frac{R_e}{(1 + T_{do}'s)} \Delta \delta \right) \quad (1.17)$$

$$\Delta E_d' = \left[\frac{R_E}{(1 + T_{qo}'s)} \Delta \delta - \frac{R_E}{(1 + T_{qo}'s)} \Delta E_q'' - \frac{(X_E + X_d')}{(1 + T_{qo}'s)} \Delta E_d'' \right] \quad (1.18)$$

$$\Delta E_q'' = \left[\frac{K_3}{(1 + K_3 T_{do}'s)} \Delta E_q' + \frac{K_3 K_7}{(1 + K_3 T_{do}'s)} \Delta E_d'' - \frac{K_3 K_4}{(1 + K_3 T_{do}'s)} \Delta \delta \right] \quad (1.19)$$

$$\Delta E_d'' = \left[-\frac{K_{3a}}{(1 + K_{3a} T_{qo}'s)} \Delta \delta - \frac{K_{3a}}{(1 + K_{3a} T_{qo}'s)} \Delta E_q'' + \frac{K_{3a}}{(1 + K_{3a} T_{qo}'s)} \Delta E_d' \right] \quad (1.20)$$

Donde:

$$K_3 = \frac{1}{\left[1 + \frac{(X_d' - X_d'')(X_q'' + X_e)}{K} \right]}$$

$$K_{3a} = \frac{1}{\left[1 + \frac{(X_q' - X_q'')(X_d' + X_e)}{K} \right]}$$

$$K_4 = \frac{|V_S|}{K} (X_d' - X_d'') \left[(X_q' + X_e) \text{Sen}(\delta_o - \alpha) - R_e \text{Cos}(\delta_o - \alpha) \right]$$

$$K_{3a} = \frac{|V_S|}{K} (X_q' - X_q'') \left[(X_d' + X_e) \text{Cos}(\delta_o - \alpha) + R_e \text{Sen}(\delta_o - \alpha) \right]$$

$$K_7 = \frac{R_e}{K} (X_d' - X_d'')$$

$$K_8 = \frac{R_e}{K} (X_q' - X_q'')$$

$$K_9 = \frac{(X_q - X_q')}{K}$$

$$K_{10} = \frac{(X_d - X_d')}{K}$$

$$K_{11} = |V_S| \left[R_e \text{Cos}(\delta_o - \alpha) + (X_d' + X_e) \text{Sen}(\delta_o - \alpha) \right]$$

$$K_{12} = |V_S| \left[R_e \text{Cos}(\delta_o - \alpha) - (X_q'' + X_e) \text{Sen}(\delta_o - \alpha) \right]$$

4. La tensión en bornes de la máquina síncrona, como ya se vio, es la siguiente:

$$\Delta V_t = \left[\frac{V_{do}}{V_{to}} \right] \Delta V_d + \left[\frac{V_{qo}}{V_{to}} \right] \Delta V_q$$

Sustituyendo (1.13), correspondiente a las ecuaciones del estator de la máquina síncrona ($\Delta V_d, \Delta V_q$), en la ecuación anterior se obtiene:

$$\Delta V_t = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E_q' + K_{6a} \Delta E_d' \quad (1.21)$$

Donde:

$$K_5 = \left\{ \begin{array}{l} \left[R_e \left(\frac{V_{do}}{V_{to}} \right) - X_e \left(\frac{V_{qo}}{V_{to}} \right) \right] \frac{|V_s|}{K} \left[R_e \cos(\delta_o - \alpha) - (X_q' + X_e) \text{Sen}(\delta_o - \alpha) \right] \\ + \left[R_e \left(\frac{V_{qo}}{V_{to}} \right) + X_e \left(\frac{V_{do}}{V_{to}} \right) \right] \frac{|V_s|}{K} \left[R_e \text{Sen}(\delta_o - \alpha) + (X_d' + X_e) \cos(\delta_o - \alpha) \right] \\ - |V_s| \left[\left(\frac{V_{do}}{V_{to}} \right) \cos(\delta_o - \alpha) + \left(\frac{V_{qo}}{V_{to}} \right) \text{Sen}(\delta_o - \alpha) \right] \end{array} \right\}$$

$$K_6 = \left[R_e \left(\frac{V_{do}}{V_{to}} \right) - X_e \left(\frac{V_{qo}}{V_{to}} \right) \right] \left(\frac{-(X_q' + X_e)}{K} \right) + \left[R_e \left(\frac{V_{qo}}{V_{to}} \right) + X_e \left(\frac{V_{do}}{V_{to}} \right) \right] \left(\frac{R_e}{K} \right)$$

$$K_{6a} = \left[R_e \left(\frac{V_{do}}{V_{to}} \right) - X_e \left(\frac{V_{qo}}{V_{to}} \right) \right] \left(\frac{R_e}{K} \right) + \left[R_e \left(\frac{V_{qo}}{V_{to}} \right) + X_e \left(\frac{V_{do}}{V_{to}} \right) \right] \left(\frac{(X_d' + X_e)}{K} \right)$$

1.2.1. Resumen de Ecuaciones

A continuación se mostrarán todas las ecuaciones linealizadas con sus respectivos coeficientes de estabilidad permanente determinados en este acápite:

a. Con el modelo transitorio en eje directo

$$1. \quad \Delta T_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta E_q'$$

$$2. \quad \Delta E_q' = \frac{K_3}{(1 + K_3 T_{do}' s)} \Delta E_{fd} - \frac{K_3 K_4}{(1 + K_3 T_{do}' s)} \Delta \delta$$

$$3. \quad \Delta V_t = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E_q'$$

Donde:

- $K = (X_e + X_q)(X_d' + X_e) + R_e^2$
- $K_1 = (E_{qo}' - (X_q - X_d') I_{do}) \left[\frac{|V_s| R_e}{K} \text{Sen}(\delta_o - \alpha) + \frac{|V_s|}{K} (X_d' + X_e) \cos(\delta_o - \alpha) \right]$
 $- (X_q - X_d') I_{do} \left[\frac{|V_s| R_e}{K} \cos(\delta_o - \alpha) - \frac{|V_s|}{K} (X_q + X_e) \text{Sen}(\delta_o - \alpha) \right]$

- $K_2 = \frac{I_{qo}}{K} \left(R_e^2 + (X_e + X_q)^2 \right) + \frac{R_e}{K} \left(E'_{qo} - (X_q - X'_d) I_{do} \right)$
- $K_3 = \frac{1}{\left[1 + \frac{(X_d + X'_d)(X_q + X_e)}{K} \right]}$
- $K_4 = \frac{|V_s|}{K} (X_d - X'_d) \left[(X_q + X_e) \text{Sen}(\delta_o - \alpha) - R_e \text{Cos}(\delta_o - \alpha) \right]$
- $K_5 = - \left(\frac{V_{do}}{V_{to}} \right) \frac{(X_q)}{K} |V_s| \left[R_e \text{Sen}(\delta_o - \alpha) + (X'_d + X_e) \text{Cos}(\delta_o - \alpha) \right]$
- $+ \left(\frac{V_{qo}}{V_{to}} \right) \frac{(X'_d)}{K} |V_s| \left[R_e \text{Cos}(\delta_o - \alpha) - (X_q + X_e) \text{Sen}(\delta_o - \alpha) \right]$
- $K_6 = \left(\frac{V_{qo}}{V_{to}} \right) \left[1 - \frac{(X'_d)(X_q + X_e)}{K} \right] - \left[\left(\frac{V_{do}}{V_{to}} \right) \frac{R_e}{K} X'_q \right]$

Remplazando los parámetros de la máquina síncrona, propuestos anteriormente, se tiene los siguientes Coeficientes de Estabilidad Permanente:

Tabla 1.1 Coeficientes de Estabilidad Permanente. Modelo de Tercer Orden

K ₁	0,9421
K ₂	0,9722
K ₃	0,5431
K ₄	0,6763
K ₅	-0,1447
K ₆	0,4647

b. Con el modelo transitorio en ambos ejes

1. $\Delta T_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta E'_q + K_{2a} \Delta E'_d$
2. $\Delta E'_q = \frac{K_3}{(1 + K_3 T'_{do} s)} \Delta E'_{fd} - \frac{K_3 K_4}{(1 + K_3 T'_{do} s)} \Delta \delta + \frac{K_3 K_7}{(1 + K_3 T'_{do} s)} \Delta E'_d$
3. $\Delta E'_d = - \frac{K_{3a}}{(1 + K_{3a} T'_{qo} s)} \Delta \delta - \frac{K_{3a}}{(1 + K_{3a} T'_{qo} s)} \Delta E'_q$
4. $\Delta V_t = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q + K_{6a} \Delta E'_d$

Donde:

- $K = (X_e + X'_q)(X'_d + X_e) + R_e^2$

- $$K_1 = (E'_{qo} - (X'_q - X'_d)I_{do}) \left[\frac{|V_s|R_e}{K} \text{Sen}(\delta_o - \alpha) + \frac{|V_s|}{K} (X'_d + X'_e) \text{Cos}(\delta_o - \alpha) \right]$$

$$+ (E'_{do} - (X'_q - X'_d)I_{qo}) \left[\frac{|V_s|R_e}{K} \text{Cos}(\delta_o - \alpha) - \frac{|V_s|}{K} (X'_q + X'_e) \text{Sen}(\delta_o - \alpha) \right]$$
- $$K_2 = I_{qo} + \frac{R_e}{K} (E'_{qo} - (X'_q - X'_d)I_{do}) - \frac{1}{K} [E'_{do} - I_{qo} (X'_q - X'_d)] (X'_q + X'_e)$$
- $$K_{2a} = I_{do} + \frac{(X'_d + X'_e)}{K} (E'_{qo} - (X'_q - X'_d)I_{do}) + \frac{R_e}{K} [E'_{do} - I_{qo} (X'_q - X'_d)]$$
- $$K_3 = \frac{1}{\left[1 + \frac{(X'_d - X'_d)(X'_q + X'_e)}{K} \right]}$$
- $$K_{3a} = \frac{1}{\left[1 + \frac{(X'_q - X'_q)(X'_d + X'_e)}{K} \right]}$$
- $$K_4 = \frac{|V_s|}{K} (X'_d - X'_d) [(X'_q + X'_e) \text{Sen}(\delta_o - \alpha) - R_e \text{Cos}(\delta_o - \alpha)]$$
- $$K_{4a} = -\frac{|V_s|}{K} (X'_q - X'_q) [(X'_d + X'_e) \text{Cos}(\delta_o - \alpha) + R_e \text{Sen}(\delta_o - \alpha)]$$
- $$K_5 = -\left(\frac{V_{do}}{V_{to}} \right) \frac{(X'_q)}{K} |V_s| [R_e \text{Sen}(\delta_o - \alpha) + (X'_d + X'_e) \text{Cos}(\delta_o - \alpha)]$$

$$+ \left(\frac{V_{qo}}{V_{to}} \right) \frac{(X'_d)}{K} |V_s| [R_e \text{Cos}(\delta_o - \alpha) - (X'_q + X'_e) \text{Sen}(\delta_o - \alpha)]$$
- $$K_6 = \left(\frac{V_{qo}}{V_{to}} \right) \left[1 - \left(\frac{X'_d}{K} \right) (X'_q + X'_e) \right] - \left[\left(\frac{V_{do}}{V_{to}} \right) \frac{R_e}{K} X'_q \right]$$
- $$K_{6a} = \left(\frac{V_{do}}{V_{to}} \right) \left[1 - \left(\frac{X'_q}{K} \right) (X'_d + X'_e) \right] + \left[\left(\frac{V_{qo}}{V_{to}} \right) \frac{R_e}{K} X'_d \right]$$
- $$K_7 = \frac{R_e}{K} (X'_d - X'_d)$$
- $$K_{7a} = \frac{R_e}{K} (X'_q - X'_q)$$

Remplazando los parámetros de la máquina síncrona, propuestos anteriormente, se tiene los siguientes Coeficientes de Estabilidad Permanente:

Tabla 1.2 Coeficientes de Estabilidad Permanente. Modelo de Cuarto Orden

K_1	1,0433	K_{4a}	-0,0108
K_2	0,9669	K_5	-0,1835
K_{2a}	0,6716	K_6	0,4667
K_3	0,5432	K_{6a}	-0,2579
K_{3a}	0,7262	K_7	-0,0221
K_4	0,6796	K_{7a}	0,2073

c. Con el modelo subtransitorio en ambos ejes

$$1. \Delta T_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta E_q^* + K_{2a} \Delta E_d^*$$

$$2. \Delta E_q^* = \left(\frac{1}{(1+T'_{do} s)} \Delta E_{fd} + \frac{K R_E}{(1+T'_{do} s)} \Delta E_d^* - \frac{K (X_E + X_q^*)}{(1+T'_{do} s)} \Delta E_q^* + \frac{K \Delta \delta}{(1+T'_{do} s)} \right)$$

$$3. \Delta E_d^* = \frac{\Delta \delta}{(1+T'_{qo} s)} - \frac{R_E}{(1+T'_{qo} s)} \Delta E_q^* - \frac{(X_E + X_d^*)}{(1+T'_{qo} s)} \Delta E_d^*$$

$$4. \Delta E_q^* = \frac{K_3}{(1+K_3 T'_{do} s)} \Delta E_q^* + \frac{K_3 K_7}{(1+K_3 T'_{do} s)} \Delta E_d^* - \frac{K_3 K_4}{(1+K_3 T'_{do} s)} \Delta \delta$$

$$5. \Delta E_d^* = -\frac{K_{3a} K_4}{(1+K_{3a} T'_{qo} s)} \Delta \delta - \frac{K_{3a} K_7}{(1+K_{3a} T'_{qo} s)} \Delta E_q^* + \frac{K_{3a}}{(1+K_{3a} T'_{qo} s)} \Delta E_d^*$$

$$6. \Delta V_t = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E_q^* + K_{6a} \Delta E_d^*$$

Donde:

- $K = (X_e + X_q^*)(X_d^* + X_e) + R_e^2$
- $K_1 = (E_{qo}^* - (X_q^* - X_d^*) I_{do}) \left[\frac{|V_s| R_e}{K} \text{Sen}(\delta_o - \alpha) + \frac{|V_s|}{K} (X_d^* + X_e) \text{Cos}(\delta_o - \alpha) \right] + (E_{do}^* - (X_q^* - X_d^*) I_{qo}) \left[\frac{|V_s| R_e}{K} \text{Cos}(\delta_o - \alpha) - \frac{|V_s|}{K} (X_q^* + X_e) \text{Sen}(\delta_o - \alpha) \right]$
- $K_2 = I_{qo} + \frac{R_e}{K} (E_{qo}^* - (X_q^* - X_d^*) I_{do}) - \frac{1}{K} [E_{do}^* - I_{qo} (X_q^* - X_d^*)] (X_q^* + X_e)$
- $K_{2a} = I_{do} + \frac{(X_d^* + X_e)}{K} (E_{qo}^* - (X_q^* - X_d^*) I_{do}) + \frac{R_e}{K} [E_{do}^* - I_{qo} (X_q^* - X_d^*)]$
- $K_3 = \frac{1}{\left[1 + \frac{(X_d^* - X_d^*)(X_q^* + X_e)}{K} \right]}$

- $$K_{3d} = \frac{1}{\left[1 + \frac{(X'_q - X_q^*)(X_d^* + X_e)}{K} \right]}$$
- $$K_4 = \frac{|V_s|}{K} (X'_d - X_d^*) \left[(X_q^* + X_e) \text{Sen}(\delta_o - \alpha) - R_e \text{Cos}(\delta_o - \alpha) \right]$$
- $$K_5 = \frac{|V_s|}{K} (X'_q - X_q^*) \left[(X_d^* + X_e) \text{Cos}(\delta_o - \alpha) + R_e \text{Sen}(\delta_o - \alpha) \right]$$
- $$K_5 = \left[\begin{aligned} & \left[R_e \left(\frac{V_{do}}{V_{to}} \right) - X_e \left(\frac{V_{qo}}{V_{to}} \right) \right] \frac{|V_s|}{K} \left[R_e \text{Cos}(\delta_o - \alpha) - (X_q^* + X_e) \text{Sen}(\delta_o - \alpha) \right] \\ & + \left[R_e \left(\frac{V_{qo}}{V_{to}} \right) + X_e \left(\frac{V_{do}}{V_{to}} \right) \right] \frac{|V_s|}{K} \left[R_e \text{Sen}(\delta_o - \alpha) + (X_d^* + X_e) \text{Cos}(\delta_o - \alpha) \right] \\ & - |V_s| \left[\left(\frac{V_{do}}{V_{to}} \right) \text{Cos}(\delta_o - \alpha) + \left(\frac{V_{qo}}{V_{to}} \right) \text{Sen}(\delta_o - \alpha) \right] \end{aligned} \right]$$
- $$K_6 = \left[R_e \left(\frac{V_{do}}{V_{to}} \right) - X_e \left(\frac{V_{qo}}{V_{to}} \right) \right] \left(\frac{-(X_q^* + X_e)}{K} \right) + \left[R_e \left(\frac{V_{qo}}{V_{to}} \right) + X_e \left(\frac{V_{do}}{V_{to}} \right) \right] \left(\frac{R_e}{K} \right)$$
- $$K_{6a} = \left[R_e \left(\frac{V_{do}}{V_{to}} \right) - X_e \left(\frac{V_{qo}}{V_{to}} \right) \right] \left(\frac{R_e}{K} \right) + \left[R_e \left(\frac{V_{qo}}{V_{to}} \right) + X_e \left(\frac{V_{do}}{V_{to}} \right) \right] \left(\frac{(X_d^* + X_e)}{K} \right)$$
- $$K_7 = \frac{R_e}{K} (X'_d - X_d^*)$$
- $$K_8 = \frac{R_e}{K} (X'_q - X_q^*)$$
- $$K_{8a} = \frac{(X_q - X_q^*)}{K}$$
- $$K_{8b} = \frac{(X_d - X_d^*)}{K}$$
- $$K_{9a} = |V_s| \left[R_e \text{Cos}(\delta_o - \alpha) + (X_d^* + X_e) \text{Sen}(\delta_o - \alpha) \right]$$
- $$K_{9b} = |V_s| \left[R_e \text{Cos}(\delta_o - \alpha) - (X_q^* + X_e) \text{Sen}(\delta_o - \alpha) \right]$$

Remplazando los parámetros de la máquina síncrona, propuestos anteriormente, se tiene los siguientes Coeficientes de Estabilidad Permanente:

Tabla 1.3 Coeficientes de Estabilidad Permanente. Modelo de Sexto Orden

K_1	1,3450	K_6	0,5857
K_2	1,2010	K_{6a}	-0,3288

K_{2a}	0,8745
K_3	0,8005
K_{3a}	0,7752
K_4	0,2025
K_{4a}	0,1578
K_5	-0,1297

K_7	-0,0084
K_{7a}	-0,0104
K_8	-0,7880
K_{8a}	1,6133
K_9	0,3358
K_{9a}	-0,5290

1.3. Matriz de Espacio de Estado

Se representará el sistema eléctrico máquina-barra infinita (incluyendo el regulador de tensión y estabilizador del sistemas de potencia) en el espacio de estado para determinar la matriz de estado y los correspondientes eigenvalores, los cuales permitirán definir si el sistema es estable o inestable para los parámetros dados.

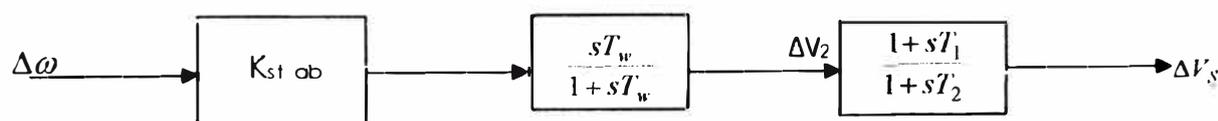


Fig. 1.4 Estabilizador de Sistemas de Potencia

Del gráfico mostrado:

$$(*) \Delta V_s = \left(\frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \right) \Delta V_2$$

$$\Delta V_s + T_2 \dot{\Delta V}_s = \Delta V_2 + T_1 \dot{\Delta V}_2 \tag{1.22}$$

$$(*) \Delta V_2 = K_{stab} \left(\frac{sT_w}{1 + sT_w} \right) \Delta \omega_r$$

$$\Delta V_2 + T_w \dot{\Delta V}_2 = K_{stab} T_w \dot{\Delta \omega}_r$$

$$\dot{\Delta V}_2 = \frac{1}{T_w} \left(K_{stab} T_w \dot{\Delta \omega}_r - \Delta V_2 \right) \tag{1.23}$$

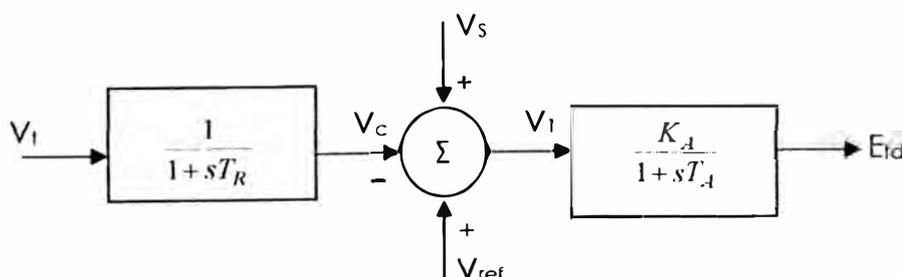


Fig. 1.5 Tensión de Campo Efd

De la Fig. 1.5 Tensión de Campo Efd:

$$V_1 \left(\frac{K_A}{1 + sT_A} \right) = E_{fd}$$

$$K_A V_1 = E_{fd} + T_A \dot{E}_{fd}$$

$$\dot{E}_{fd} = \frac{1}{T_A} (K_A V_1 - E_{fd})$$

$$\dot{E}_{fd} = \frac{K_A}{T_A} V_1 - \frac{1}{T_A} E_{fd} \quad (1.24)$$

$$\Delta V_{ref} + \Delta V_S - \Delta V_C = \Delta V_1 \quad (1.25)$$

Para la máquina síncrona se cumple que:

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_r - \omega_0$$

Linealizando y llevando al sistema p.u.:

$$\Delta \dot{\delta} = \omega_0 \Delta \omega_r \quad (1.26)$$

a. Con el modelo transitorio en eje directo

Sabemos que:

$$\Delta \dot{\omega} = -\frac{K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{K_2}{2H} \Delta E'_q + \frac{1}{2H} \Delta T_m \quad (1.27)$$

Reemplazando (1.27) en (1.23):

$$\begin{aligned} \Delta \dot{V}_2 &= \frac{1}{T_w} \left(K_{stab} T_w \left(-\frac{K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{K_2}{2H} \Delta E'_q + \frac{1}{2H} \Delta T_m \right) - \Delta V_2 \right) \\ \Delta \dot{V}_2 &= \left(-\frac{K_{stab} K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{K_{stab} K_2}{2H} \Delta E'_q + \frac{K_{stab}}{2H} \Delta T_m - \frac{1}{T_w} \Delta V_2 \right) \end{aligned} \quad (1.28)$$

Reemplazando (1.28) en (1.22):

$$\begin{aligned} \Delta V_S + T_2 \Delta \dot{V}_S &= \Delta V_2 + T_1 \left(-\frac{K_{stab} K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{K_{stab} K_2}{2H} \Delta E'_q + \frac{K_{stab}}{2H} \Delta T_m - \frac{1}{T_w} \Delta V_2 \right) \\ \Delta \dot{V}_S &= \frac{1}{T_2} \left(\Delta V_2 + T_1 \left(-\frac{K_{stab} K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{K_{stab} K_2}{2H} \Delta E'_q + \frac{K_{stab}}{2H} \Delta T_m - \frac{1}{T_w} \Delta V_2 \right) - \Delta V_S \right) \\ \Delta \dot{V}_S &= \left(\frac{1}{T_2} \Delta V_2 - \frac{T_1}{T_2} \frac{K_{stab} K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{T_1}{T_2} \frac{K_{stab} K_2}{2H} \Delta E'_q + \frac{T_1}{T_2} \frac{K_{stab}}{2H} \Delta T_m - \frac{T_1}{T_2 T_w} \Delta V_2 - \frac{\Delta V_S}{T_2} \right) \\ \Delta \dot{V}_S &= \left(\left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2 T_w} \right) \Delta V_2 - \frac{T_1}{T_2} \frac{K_{stab} K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{T_1}{T_2} \frac{K_{stab} K_2}{2H} \Delta E'_q + \frac{T_1}{T_2} \frac{K_{stab}}{2H} \Delta T_m - \frac{\Delta V_S}{T_2} \right) \end{aligned} \quad (1.29)$$

De la Fig. 1.5:

$$\Delta V_C = \left(\frac{1}{1 + sT_R} \right) \Delta V_t$$

Remplazando (1.6) en la ecuación anterior:

$$\Delta V_c = \left(\frac{1}{1 + sT_R} \right) (K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q) \quad (1.30)$$

Remplazando (1.30) en (1.25):

$$\begin{aligned} \Delta V_{ref} + \Delta V_S - \left(\frac{1}{1 + sT_R} \right) (K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q) &= \Delta V_1 \\ \Delta V_{ref} + \Delta V_S + T_R \Delta \dot{V}_S - (K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q) &= \Delta V_1 + T_R \Delta \dot{V}_1 \end{aligned} \quad (1.31)$$

Teniendo en cuenta que $\Delta V_{ref} = 0$ y remplazando (1.29) en (1.31):

$$\begin{aligned} \Delta V_S + T_R \left(\begin{array}{l} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2 T_w} \right) \Delta V_2 - \frac{T_1 K_{stab} K_1}{T_2 2H} \Delta \delta \\ - \frac{T_1 K_{stab} K_2}{T_2 2H} \Delta E'_q + \frac{T_1 K_{stab}}{T_2 2H} \Delta T_m - \frac{1}{T_2} \Delta V_S \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} K_5 \Delta \delta \\ + K_6 \Delta E'_q \end{array} \right) &= \Delta V_1 + T_R \Delta \dot{V}_1 \\ \Delta \dot{V}_1 &= \left[\begin{array}{c} -\frac{1}{T_R} \Delta V_1 + \frac{1}{T_R} \Delta V_S \\ + \left(\begin{array}{l} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2 T_w} \right) \Delta V_2 - \frac{T_1 K_{stab} K_1}{T_2 2H} \Delta \delta \\ - \frac{T_1 K_{stab} K_2}{T_2 2H} \Delta E'_q + \frac{T_1 K_{stab}}{T_2 2H} \Delta T_m - \frac{1}{T_2} \Delta V_S \end{array} \right) \\ - \frac{1}{T_R} (K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q) \end{array} \right] \\ \Delta \dot{V}_1 &= \left[\begin{array}{c} -\frac{1}{T_R} \Delta V_1 + \left(\frac{1}{T_R} - \frac{1}{T_2} \right) \Delta V_S \\ + \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2 T_w} \right) \Delta V_2 + \frac{T_1 K_{stab}}{T_2 2H} \Delta T_m \\ - \left(\frac{T_1 K_{stab} K_1}{T_2 2H} + \frac{K_5}{T_R} \right) \Delta \delta - \left(\frac{T_1 K_{stab} K_2}{T_2 2H} + \frac{K_6}{T_R} \right) \Delta E'_q \end{array} \right] \end{aligned} \quad (1.32)$$

Tomando la transformada inversa de Laplace a la ecuación (1.5):

$$\begin{aligned} (1 + K_3 T_{do} s) \Delta E'_q &= K_3 \Delta E_{fd} - K_3 K_4 \Delta \delta \\ \Delta E'_q + K_3 T_{do} \frac{d\Delta E'_q}{dt} &= K_3 \Delta E_{fd} - K_3 K_4 \Delta \delta \\ \frac{d\Delta E'_q}{dt} &= \frac{1}{T_{do}} \Delta E_{fd} - \frac{K_4}{T_{do}} \Delta \delta - \frac{1}{K_3 T_{do}} \Delta E'_q \\ \Delta \dot{E}'_q &= \frac{1}{T_{do}} \Delta E_{fd} - \frac{K_4}{T_{do}} \Delta \delta - \frac{1}{K_3 T_{do}} \Delta E'_q \end{aligned} \quad (1.33)$$

Resumen de ecuaciones:

$$\bullet \quad \Delta \dot{\omega} = \begin{bmatrix} -\frac{K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{K_2}{2H} \Delta E'_q \\ + \frac{1}{2H} \Delta T_m \end{bmatrix}$$

$$\bullet \quad \Delta \dot{\delta} = \omega_0 \Delta \omega_r$$

$$\bullet \quad \dot{E}_{fd} = \frac{K_A}{T_A} V_1 - \frac{1}{T_A} E_{fd}$$

$$\bullet \quad \Delta \dot{V}_1 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_R} \Delta V_1 + \left(\frac{1}{T_R} - \frac{1}{T_2} \right) \Delta V_S \\ + \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2 T_w} \right) \Delta V_2 + \frac{T_1 K_{stab}}{T_2} \frac{\Delta T_m}{2H} \\ - \left(\frac{T_1 K_{stab} K_1}{T_2} + \frac{K_5}{T_R} \right) \Delta \delta - \left(\frac{T_1 K_{stab} K_2}{T_2} + \frac{K_6}{T_R} \right) \Delta E'_q \end{bmatrix}$$

$$\bullet \quad \Delta \dot{V}_2 = \begin{bmatrix} -\frac{K_{stab} K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{K_{stab} K_2}{2H} \Delta E'_q \\ + \frac{K_{stab}}{2H} \Delta T_m - \frac{1}{T_w} \Delta V_2 \end{bmatrix}$$

$$\bullet \quad \Delta \dot{V}_S = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2 T_w} \right) \Delta V_2 - \frac{T_1 K_{stab} K_1}{T_2} \frac{\Delta \delta}{2H} \\ - \frac{T_1 K_{stab} K_2}{T_2} \frac{\Delta E'_q}{2H} + \frac{T_1 K_{stab}}{T_2} \frac{\Delta T_m}{2H} - \frac{\Delta V_S}{T_2} \end{bmatrix}$$

$$\bullet \quad \Delta \dot{E}'_q = \begin{bmatrix} \frac{1}{T'_{do}} \Delta E_{fd} - \frac{K_4}{T'_{do}} \Delta \delta \\ - \frac{1}{K_3 T'_{do}} \Delta E'_q \end{bmatrix}$$

Estas ecuaciones permiten determinar el sistema de Espacio de Estado del modelo de tercer orden y su diagrama de bloques. Ambos se muestran a continuación:

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta\omega_r} \\ \dot{\Delta\delta} \\ \dot{\Delta E_{fd}} \\ \dot{\Delta V_1} \\ \dot{\Delta V_2} \\ \dot{\Delta V_s} \\ \dot{\Delta E_q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{K_1}{2H} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_2}{2H} \\ \omega_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_A} & \frac{K_3}{T_A} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\left(\frac{T_1 K_{stab} K_1}{2H \times T_2} + \frac{K_5}{T_R}\right) & 0 & -\frac{1}{T_R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2 \times T_w}\right) & \left(\frac{1}{T_R} - \frac{1}{T_2}\right) & -\left(\frac{T_1 K_{stab} K_2}{2H \times T_2} + \frac{K_6}{T_R}\right) & \Delta V_1 \\ 0 & -\frac{K_{stab} K_1}{2H} & 0 & 0 & -\frac{1}{T_w} & 0 & \Delta V_2 \\ 0 & -\frac{T_1 K_{stab} K_1}{2H \times T_2} & 0 & 0 & \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2 \times T_w}\right) & -\frac{1}{T_2} & \Delta V_s \\ 0 & -\frac{K_4}{T_{db}} & \frac{1}{T_{db}} & 0 & 0 & 0 & \Delta E_q' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega_r \\ \Delta\delta \\ \Delta E_{fd} \\ \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_s \\ \Delta E_q' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2H} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \left(\frac{T_1 K_{stab}}{2HT_2}\right) & \frac{1}{T_R} \\ \left(\frac{K_{stab}}{2H}\right) & 0 \\ \left(\frac{T_1 K_{stab}}{2HT_2}\right) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \Delta T_m$$

Fig. 1.4 Sistema de Espacio de Estado con el Modelo de Tercer Orden

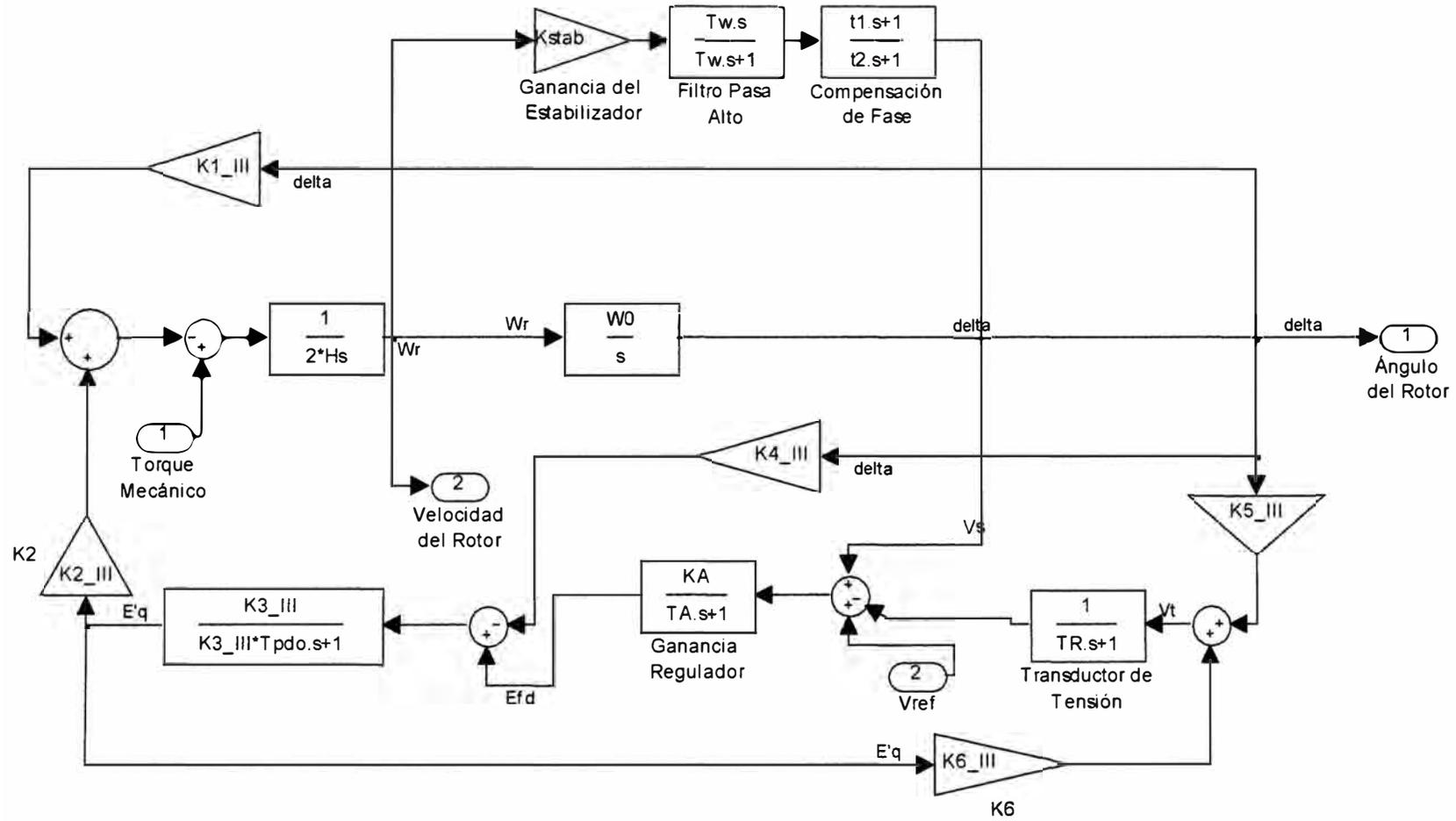


Fig. 1.6 Modelo Transitorio de Tercer Orden

b. Con el modelo transitorio en ambos ejes

Sabemos que:

$$\Delta \dot{\omega} = -\frac{K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{K_2}{2H} \Delta E'_q - \frac{K_{2a}}{2H} \Delta E'_d + \frac{1}{2H} \Delta T_m \quad (1.34)$$

Remplazando (1.34) en (1.23):

$$\begin{aligned} \Delta \dot{V}_2 &= \frac{1}{T_w} \left(K_{stab} T_w \left(-\frac{K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{K_2}{2H} \Delta E'_q - \frac{K_{2a}}{2H} \Delta E'_d + \frac{1}{2H} \Delta T_m \right) - \Delta V_2 \right) \\ \Delta \dot{V}_2 &= \left(\begin{array}{l} -\frac{K_{stab} K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{K_{stab} K_2}{2H} \Delta E'_q \\ -\frac{K_{stab} K_{2a}}{2H} \Delta E'_d + \frac{K_{stab}}{2H} \Delta T_m - \frac{1}{T_w} \Delta V_2 \end{array} \right) \end{aligned} \quad (1.35)$$

Remplazando (1.35) en (1.22):

$$\begin{aligned} \Delta V_s + T_2 \Delta \dot{V}_s &= \Delta V_2 + T_1 \left(\begin{array}{l} -\frac{K_{stab} K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{K_{stab} K_2}{2H} \Delta E'_q \\ -\frac{K_{stab} K_{2a}}{2H} \Delta E'_d + \frac{K_{stab}}{2H} \Delta T_m - \frac{1}{T_w} \Delta V_2 \end{array} \right) \\ \Delta \dot{V}_s &= \frac{1}{T_2} \left(\Delta V_2 + T_1 \left(\begin{array}{l} -\frac{K_{stab} K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{K_{stab} K_2}{2H} \Delta E'_q \\ -\frac{K_{stab} K_{2a}}{2H} \Delta E'_d + \frac{K_{stab}}{2H} \Delta T_m - \frac{1}{T_w} \Delta V_2 \end{array} \right) - \Delta V_s \right) \\ \Delta \dot{V}_s &= \left(\begin{array}{l} \frac{1}{T_2} \Delta V_2 - \frac{T_1}{T_2} \frac{K_{stab} K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{T_1}{T_2} \frac{K_{stab} K_2}{2H} \Delta E'_q \\ -\frac{T_1}{T_2} \frac{K_{stab} K_{2a}}{2H} \Delta E'_d + \frac{T_1}{T_2} \frac{K_{stab}}{2H} \Delta T_m - \frac{T_1}{T_2 T_w} \Delta V_2 - \frac{\Delta V_s}{T_2} \end{array} \right) \\ \Delta \dot{V}_s &= \left(\left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2 T_w} \right) \Delta V_2 - \frac{T_1}{T_2} \frac{K_{stab} K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{T_1}{T_2} \frac{K_{stab} K_2}{2H} \Delta E'_q \right. \\ &\quad \left. - \frac{T_1}{T_2} \frac{K_{stab} K_{2a}}{2H} \Delta E'_d + \frac{T_1}{T_2} \frac{K_{stab}}{2H} \Delta T_m - \frac{\Delta V_s}{T_2} \right) \end{aligned} \quad (1.36)$$

De la Fig. 1.5 Tensión de Campo Efd:

$$\Delta V_C = \left(\frac{1}{1 + sT_R} \right) \Delta V_t$$

Remplazando (1.12) en la ecuación anterior:

$$\Delta V_C = \left(\frac{1}{1 + sT_R} \right) (K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q + K_{6a} \Delta E'_d) \quad (1.37)$$

Remplazando (1.37) en (1.25):

$$\Delta V_{ref} + \Delta V_s - \left(\frac{1}{1 + sT_R} \right) (K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q + K_{6a} \Delta E'_d) = \Delta V_1$$

$$\Delta V_{ref} + \Delta V_S + T_R \Delta \dot{V}_S - (K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q + K_{6a} \Delta E'_d) = \Delta V_1 + T_R \Delta \dot{V}_1 \quad (1.38)$$

Teniendo en cuenta que $\Delta V_{ref} = 0$ y reemplazando (1.36) en (1.38):

$$\begin{aligned} & \left[\Delta V_S + T_R \begin{pmatrix} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2 T_w} \right) \Delta V_2 - \frac{T_1 K_{stab} K_1}{T_2 2H} \Delta \delta - \frac{T_1 K_{stab} K_2}{T_2 2H} \Delta E'_q \\ - \frac{T_1 K_{stab} K_{2a}}{T_2 2H} \Delta E'_d + \frac{T_1 K_{stab}}{T_2 2H} \Delta T_m - \frac{\Delta V_S}{T_2} \\ - (K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q + K_{6a} \Delta E'_d) \end{pmatrix} \right] = \Delta V_1 + T_R \Delta \dot{V}_1 \\ & \Delta \dot{V}_1 = \begin{pmatrix} -\frac{1}{T_R} \Delta V_1 + \frac{1}{T_R} \Delta V_S \\ + \begin{pmatrix} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2 T_w} \right) \Delta V_2 - \frac{T_1 K_{stab} K_1}{T_2 2H} \Delta \delta - \frac{T_1 K_{stab} K_2}{T_2 2H} \Delta E'_q \\ - \frac{T_1 K_{stab} K_{2a}}{T_2 2H} \Delta E'_d + \frac{T_1 K_{stab}}{T_2 2H} \Delta T_m - \frac{\Delta V_S}{T_2} \\ - \frac{1}{T_R} (K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q + K_{6a} \Delta E'_d) \end{pmatrix} \end{pmatrix} \\ & \Delta \dot{V}_1 = \begin{pmatrix} -\frac{1}{T_R} \Delta V_1 + \left(\frac{1}{T_R} - \frac{1}{T_2} \right) \Delta V_S + \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2 T_w} \right) \Delta V_2 + \frac{T_1 K_{stab}}{T_2 2H} \Delta T_m \\ - \left(\frac{T_1 K_{stab} K_1}{T_2 2H} + \frac{K_5}{T_R} \right) \Delta \delta - \left(\frac{T_1 K_{stab} K_2}{T_2 2H} + \frac{K_6}{T_R} \right) \Delta E'_q \\ - \left(\frac{T_1 K_{stab} K_{2a}}{T_2 2H} + \frac{K_{6a}}{T_R} \right) \Delta E'_d \end{pmatrix} \quad (1.39) \end{aligned}$$

Tomando la transformada inversa de Laplace a las ecuaciones (1.10) y (1.11):

$$\bullet \quad (1 + K_3 T_{do} s) \Delta E'_q = K_3 \Delta E_{fd} - K_3 K_4 \Delta \delta + K_3 K_7 \Delta E'_d$$

$$\Delta E'_q + K_3 T_{do} \frac{d \Delta E'_q}{dt} = K_3 \Delta E_{fd} - K_3 K_4 \Delta \delta + K_3 K_7 \Delta E'_d$$

$$\Delta \dot{E}'_q = \frac{1}{T_{do}} \Delta E_{fd} - \frac{K_4}{T_{do}} \Delta \delta + \frac{K_7}{T_{do}} \Delta E'_d - \frac{1}{K_3 T_{do}} \Delta E'_q \quad (1.40)$$

$$\bullet \quad (1 + K_{3a} T_{qo} s) \Delta E'_d = -K_{3a} K_9 \Delta \delta - K_{3a} K_8 \Delta E'_q$$

$$\Delta E'_d + K_{3a} T_{qo} \frac{d \Delta E'_d}{dt} = -K_{3a} K_9 \Delta \delta - K_{3a} K_8 \Delta E'_q$$

$$\Delta \dot{E}'_d = -\frac{K_9}{T_{qo}} \Delta \delta - \frac{K_8}{T_{qo}} \Delta E'_q - \frac{1}{K_{3a} T_{qo}} \Delta E'_d \quad (1.41)$$

Resumen de ecuaciones:

- $$\Delta \dot{\omega} = \begin{bmatrix} -\frac{K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{K_2}{2H} \Delta E'_q \\ -\frac{K_{2a}}{2H} \Delta E'_d + \frac{1}{2H} \Delta T_m \end{bmatrix}$$
- $$\Delta \dot{\delta} = \omega_0 \Delta \omega,$$
- $$E_{fd} \dot{=} \frac{K_{A1}}{T_{A1}} V_1 - \frac{1}{T_{A1}} E_{fd}$$
- $$\Delta \dot{V}_1 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_R} \Delta V_1 + \left(\frac{1}{T_R} - \frac{1}{T_2} \right) \Delta V_S + \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2 T_w} \right) \Delta V_2 \\ + \frac{T_1 K_{stab}}{T_2 2H} \Delta T_m - \left(\frac{T_1 K_{stab} K_1}{T_2 2H} + \frac{K_3}{T_R} \right) \Delta \delta \\ - \left(\frac{T_1 K_{stab} K_2}{T_2 2H} + \frac{K_6}{T_R} \right) \Delta E'_q - \left(\frac{T_1 K_{stab} K_{2a}}{T_2 2H} + \frac{K_{6a}}{T_R} \right) \Delta E'_d \end{bmatrix}$$
- $$\Delta \dot{V}_2 = \begin{bmatrix} -\frac{K_{stab} K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{K_{stab} K_2}{2H} \Delta E'_q \\ -\frac{K_{stab} K_{2a}}{2H} \Delta E'_d \\ + \frac{K_{stab}}{2H} \Delta T_m - \frac{1}{T_w} \Delta V_2 \end{bmatrix}$$
- $$\Delta \dot{V}_S = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2 T_w} \right) \Delta V_2 - \frac{T_1 K_{stab} K_1}{T_2 2H} \Delta \delta \\ - \frac{T_1 K_{stab} K_2}{T_2 2H} \Delta E'_q - \frac{T_1 K_{stab} K_{2a}}{T_2 2H} \Delta E'_d \\ + \frac{T_1 K_{stab}}{T_2 2H} \Delta T_m - \frac{\Delta V_S}{T_2} \end{bmatrix}$$
- $$\Delta \dot{E}'_q = \begin{bmatrix} \frac{1}{T'_{dq}} \Delta E_{fd} - \frac{K_4}{T'_{dq}} \Delta \delta \\ + \frac{K_7}{T'_{do}} \Delta E'_d - \frac{1}{K_3 T'_{do}} \Delta E'_q \end{bmatrix}$$
- $$\Delta \dot{E}'_d = -\frac{K_9}{T'_{qo}} \Delta \delta - \frac{K_8}{T'_{qo}} \Delta E'_q - \frac{1}{K_{3a} T'_{qo}} \Delta E'_d$$

Estas ecuaciones permiten determinar el sistema de Espacio de Estado del modelo de cuarto orden y su diagrama de bloques. Ambos se muestran a continuación:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\omega}_r \\ \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{E}_{fd} \\ \Delta \dot{V}_1 \\ \Delta \dot{V}_2 \\ \Delta \dot{V}_s \\ \Delta \dot{E}_q \\ \Delta \dot{E}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-K_1}{2H} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-K_2}{2H} & \frac{-K_{2a}}{2H} \\ \omega_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{T_A} & \frac{K_A}{T_A} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_R} \left(\frac{T_R T_1 K_{stab} K_1}{2HT_2} \right) & 0 & \frac{-1}{T_R} & \left(\frac{T_1}{T_w T_2} - \frac{1}{T_2} \right) & \left(\frac{1}{T_R} + \frac{1}{T_2} \right) & \left(\frac{T_R T_1 K_{stab} K_2}{2H} - K_6 \right) & \left(\frac{T_1 K_{stab} K_{2a}}{2HT_2} - \frac{K_6}{T_R} \right) \\ 0 & -K_{stab} \left(\frac{K_1}{2H} \right) & 0 & 0 & \frac{-1}{T_w} & 0 & -K_{stab} \left(\frac{K_2}{2H} \right) & -K_{stab} \left(\frac{K_{2a}}{2H} \right) \\ 0 & -K_{stab} \left(\frac{T_1 K_1}{2HT_2} \right) & 0 & 0 & \frac{1}{T_2} \left(1 - \frac{T_1}{T_w} \right) & \frac{-1}{T_2} & -K_{stab} \left(\frac{T_1 K_2}{2HT_2} \right) & -K_{stab} \left(\frac{T_1 K_{2a}}{2HT_2} \right) \\ 0 & \frac{-K_4}{T'_{do}} & \frac{1}{T'_{do}} & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{K_3 T'_{do}} & \frac{K_7}{T'_{do}} \\ 0 & \frac{-K_9}{T'_{qo}} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-K_8}{T'_{qo}} & \frac{-1}{K_{3a} T'_{qo}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega_r \\ \Delta \delta \\ \Delta E_{fd} \\ \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_s \\ \Delta E_q \\ \Delta E_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta T_m$$

Fig. 1.7 Sistema de Espacio de Estado con el Modelo de Cuarto Orden

c. Con el modelo subtransitorio en ambos ejes

Sabemos que:

$$\Delta \dot{\omega} = -\frac{K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{K_2}{2H} \Delta E_q^* - \frac{K_{2a}}{2H} \Delta E_d^* + \frac{1}{2H} \Delta T_m \quad (1.42)$$

Remplazando (1.42) en (1.23):

$$\begin{aligned} \Delta \dot{V}_2 &= \frac{1}{T_w} \left(K_{stab} T_w \left(-\frac{K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{K_2}{2H} \Delta E_q^* - \frac{K_{2a}}{2H} \Delta E_d^* + \frac{1}{2H} \Delta T_m \right) - \Delta V_2 \right) \\ \Delta \dot{V}_2 &= \left(-\frac{K_{stab} K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{K_{stab} K_2}{2H} \Delta E_q^* - \frac{K_{stab} K_{2a}}{2H} \Delta E_d^* + \frac{K_{stab}}{2H} \Delta T_m - \frac{1}{T_w} \Delta V_2 \right) \end{aligned} \quad (1.43)$$

Remplazando (1.43) en (1.22):

$$\begin{aligned} \Delta V_s + T_2 \Delta \dot{V}_s &= \Delta V_2 + T_1 \left(-\frac{K_{stab} K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{K_{stab} K_2}{2H} \Delta E_q^* - \frac{K_{stab} K_{2a}}{2H} \Delta E_d^* + \frac{K_{stab}}{2H} \Delta T_m - \frac{1}{T_w} \Delta V_2 \right) \\ \Delta \dot{V}_s &= \frac{1}{T_2} \left(\Delta V_2 + T_1 \left(-\frac{K_{stab} K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{K_{stab} K_2}{2H} \Delta E_q^* - \frac{K_{stab} K_{2a}}{2H} \Delta E_d^* + \frac{K_{stab}}{2H} \Delta T_m - \frac{1}{T_w} \Delta V_2 \right) - \Delta V_s \right) \\ \Delta \dot{V}_s &= \left(\begin{aligned} &-\frac{T_1 K_{stab} K_1}{2HT_2} \Delta \delta + \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_w T_2} \right) \Delta V_2 - \frac{1}{T_2} \Delta V_s \\ &\frac{T_1 K_{stab} K_2}{2HT_2} \Delta E_q^* - \frac{T_1 K_{stab} K_{2a}}{2HT_2} \Delta E_d^* + \frac{T_1 K_{stab}}{2HT_2} \Delta T_m \end{aligned} \right) \end{aligned} \quad (1.44)$$

De la Fig. 1.5 Tensión de Campo Efd:

$$\Delta V_c = \left(\frac{1}{1+sT_R} \right) \Delta V_t$$

Remplazando (1.21) en la ecuación anterior:

$$\Delta V_c = \left(\frac{1}{1+sT_R} \right) (K_5 \Delta \delta + K_{6a} \Delta E_d^* + K_6 \Delta E_q^*) \quad (1.45)$$

Remplazando (1.45) en (1.25):

$$\begin{aligned} \Delta V_{ref} + \Delta V_s - \left(\frac{1}{1+sT_R} \right) (K_5 \Delta \delta + K_{6a} \Delta E_d^* + K_6 \Delta E_q^*) &= \Delta V_1 \\ \left[\Delta V_{ref} + \Delta V_s + T_R \Delta \dot{V}_s - (K_5 \Delta \delta + K_{6a} \Delta E_d^* + K_6 \Delta E_q^*) \right] &= \Delta V_1 + T_R \Delta \dot{V}_1 \end{aligned} \quad (1.46)$$

Teniendo en cuenta que $\Delta V_{ref} = 0$ y remplazando (1.44) en (1.46):

$$V_s + T_R \left(\begin{aligned} &-\frac{T_1 K_{stab} K_1}{2HT_2} \Delta \delta + \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_w T_2} \right) \Delta V_2 - \frac{1}{T_2} \Delta V_s \\ &-\frac{T_1 K_{stab} K_2}{2HT_2} \Delta E_q^* - \frac{T_1 K_{stab} K_{2a}}{2HT_2} \Delta E_d^* + \frac{T_1 K_{stab}}{2HT_2} \Delta T_m \end{aligned} \right) - \left(\begin{aligned} &K_5 \Delta \delta + K_{6a} \Delta E_d^* \\ &+ K_6 \Delta E_q^* \end{aligned} \right) = \Delta V_1 + T_R \Delta \dot{V}_1$$

$$\left(\begin{array}{l} \Delta V_S - \frac{T_R T_1 K_{stab} K_1}{2HT_2} \Delta \delta + \left(\frac{T_R}{T_2} - \frac{T_R T_1}{T_w T_2} \right) \Delta V_2 - \frac{T_R}{T_2} \Delta V_S - \frac{T_R T_1 K_{stab} K_2}{2HT_2} \Delta E_q^* \\ - \frac{T_R T_1 K_{stab} K_{2a}}{2HT_2} \Delta E_d^* + \frac{T_R T_1 K_{stab}}{2HT_2} \Delta T_m - K_5 \Delta \delta - K_{6a} \Delta E_d^* - K_6 \Delta E_q^* \end{array} \right) = \Delta V_1 + T_R \dot{\Delta V}_1$$

$$\dot{\Delta V}_1 = \left[\begin{array}{l} \left(-\frac{T_1 K_{stab} K_1}{2HT_2} - \frac{K_5}{T_R} \right) \Delta \delta - \frac{1}{T_R} \Delta V_1 + \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_w T_2} \right) \Delta V_2 + \left(\frac{1}{T_R} - \frac{1}{T_2} \right) \Delta V_S \\ + \left(-\frac{T_1 K_{stab} K_2}{2HT_2} - \frac{1}{T_R} K_6 \right) \Delta E_q^* + \left(-\frac{T_1 K_{stab} K_{2a}}{2HT_2} - \frac{K_{6a}}{T_R} \right) \Delta E_d^* + \frac{T_1 K_{stab}}{2HT_2} \Delta T_m \end{array} \right] \quad (1.47)$$

Tomando la transformada inversa de Laplace a las ecuaciones (1.17), (1.18), (1.19) y (1.20):

$$\bullet \quad (1 + T_{do}^* s) \Delta E_q^* = \left(\begin{array}{l} \Delta E_{fd} + K_{10a} R_E \Delta E_d^* \\ -K_{10a} (X_E + X_q^*) \Delta E_q^* + K_{10a} K_{11a} \Delta \delta \end{array} \right)$$

$$\Delta E_q^* + T_{do}^* \frac{d \Delta E_q^*}{dt} = \left(\Delta E_{fd} + K_{10a} R_E \Delta E_d^* - K_{10a} (X_E + X_q^*) \Delta E_q^* + K_{10a} K_{11a} \Delta \delta \right)$$

$$\dot{\Delta E}_q^* = \left(\begin{array}{l} \frac{1}{T_{do}^*} \Delta E_{fd} + \frac{K_{10a} R_E}{T_{do}^*} \Delta E_d^* - \frac{K_{10a} (X_E + X_q^*)}{T_{do}^*} \Delta E_q^* \\ + \frac{K_{10a} K_{11a}}{T_{do}^*} \Delta \delta - \frac{1}{T_{do}^*} \Delta E_q^* \end{array} \right) \quad (1.48)$$

$$\bullet \quad (1 + T_{qo}^* s) \Delta E_d^* = \left[K_{10} K_{11} \Delta \delta + K_{10} R_E \Delta E_q^* + K_{10} (X_E + X_d^*) \Delta E_d^* \right]$$

$$\Delta E_d^* + T_{qo}^* \frac{d \Delta E_d^*}{dt} = \left[K_{10} K_{11} \Delta \delta + K_{10} R_E \Delta E_q^* + K_{10} (X_E + X_d^*) \Delta E_d^* \right]$$

$$\dot{\Delta E}_d^* = \left[\frac{K_{10} K_{11}}{T_{qo}^*} \Delta \delta + \frac{K_{10} R_E}{T_{qo}^*} \Delta E_q^* + \frac{K_{10} (X_E + X_d^*)}{T_{qo}^*} \Delta E_d^* - \frac{1}{T_{qo}^*} \Delta E_d^* \right] \quad (1.49)$$

$$\bullet \quad (1 + K_3 T_{do}^* s) \Delta E_q^* = K_3 \Delta E_d^* + K_3 K_7 \Delta E_d^* - K_3 K_4 \Delta \delta$$

$$\Delta E_q^* + K_3 T_{do}^* \frac{d \Delta E_q^*}{dt} = K_3 \Delta E_d^* + K_3 K_7 \Delta E_d^* - K_3 K_4 \Delta \delta$$

$$\dot{\Delta E}_q^* = \frac{1}{T_{do}^*} \Delta E_d^* + \frac{K_7}{T_{do}^*} \Delta E_d^* - \frac{K_4}{T_{do}^*} \Delta \delta - \frac{1}{K_3 T_{do}^*} \Delta E_q^* \quad (1.50)$$

$$\bullet \quad (1 + K_{3a} T_{qo}^* s) \Delta E_d^* = -K_{3a} K_9 \Delta \delta - K_{3a} K_8 \Delta E_q^* + K_{3a} \Delta E_d^*$$

$$\Delta E_d^* + K_{3a} T_{qo}^* \frac{d \Delta E_d^*}{dt} = -K_{3a} K_9 \Delta \delta - K_{3a} K_8 \Delta E_q^* + K_{3a} \Delta E_d^*$$

$$\dot{\Delta E}_d^* = -\frac{K_9}{T_{qo}^*} \Delta \delta - \frac{K_8}{T_{qo}^*} \Delta E_q^* + \frac{1}{T_{qo}^*} \Delta E_d^* - \frac{1}{K_{3a} T_{qo}^*} \Delta E_d^* \quad (1.51)$$

Resumen de ecuaciones:

$$\Delta \dot{\omega} = -\frac{K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{K_2}{2H} \Delta E'_q + \frac{1}{2H} \Delta T_m$$

$$\Delta \dot{\delta} = \omega_0 \Delta \omega_r$$

$$\dot{E}_{fd} = \frac{K_A}{T_A} V_1 - \frac{1}{T_A} E_{fd}$$

$$\Delta \dot{V}_1 = \begin{bmatrix} \left(-\frac{T_1 K_{stab} K_1}{2HT_2} - \frac{K_s}{T_R} \right) \Delta \delta - \frac{1}{T_R} \Delta V_1 + \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_w T_2} \right) \Delta V_2 \\ + \left(\frac{1}{T_R} - \frac{1}{T_2} \right) \Delta V_s + \left(-\frac{T_1 K_{stab} K_2}{2HT_2} - \frac{1}{T_R} K_c \right) \Delta E'_q \\ + \left(-\frac{T_1 K_{stab} K_{2d}}{2HT_2} - \frac{K_{c'd}}{T_R} \right) \Delta E'_d + \frac{T_1 K_{stab}}{2HT_2} \Delta T_m \end{bmatrix}$$

$$\Delta \dot{V}_2 = \begin{bmatrix} -\frac{K_{stab} K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{1}{T_w} \Delta V_2 - \frac{K_{stab} K_2}{2H} \Delta E'_q \\ -\frac{K_{stab} K_{2d}}{2H} \Delta E'_d + \frac{K_{stab}}{2H} \Delta T_m \end{bmatrix}$$

$$\Delta \dot{V}_s = \begin{bmatrix} -\frac{T_1 K_{stab} K_1}{2HT_2} \Delta \delta + \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_w T_2} \right) \Delta V_2 - \frac{1}{T_2} \Delta V_s \\ -\frac{T_1 K_{stab} K_2}{2HT_2} \Delta E'_q - \frac{T_1 K_{stab} K_{2d}}{2HT_2} \Delta E'_d + \frac{T_1 K_{stab}}{2HT_2} \Delta T_m \end{bmatrix}$$

$$\Delta \dot{E}'_q = \begin{bmatrix} \frac{1}{T'_{do}} \Delta E'_{fd} + \frac{K_{10a} R_E}{T'_{do}} \Delta E'_d - \frac{K_{10a} (X_E + X''_q)}{T'_{do}} \Delta E''_q \\ + \frac{K_{10a} K_{11a}}{T'_{do}} \Delta \delta - \frac{1}{T'_{do}} \Delta E'_q \end{bmatrix}$$

$$\Delta \dot{E}'_d = \begin{bmatrix} \frac{K_{10} K_{11}}{T'_{qo}} \Delta \delta + \frac{K_{10} R_E}{T'_{qo}} \Delta E'_q \\ + \frac{K_{10} (X_E + X''_d)}{T'_{qo}} \Delta E'_d - \frac{1}{T'_{qo}} \Delta E'_d \end{bmatrix}$$

$$\Delta \dot{E}''_q = \frac{1}{T''_{do}} \Delta E'_d + \frac{K_7}{T''_{do}} \Delta E'_d - \frac{K_4}{T''_{do}} \Delta \delta - \frac{1}{K_5 T''_{do}} \Delta E''_q$$

$$\Delta \dot{E}''_d = -\frac{K_9}{T''_{qo}} \Delta \delta - \frac{K_8}{T''_{qo}} \Delta E'_q + \frac{1}{T''_{qo}} \Delta E'_d - \frac{1}{K_{3a} T''_{qo}} \Delta E''_d$$

$$\begin{pmatrix} \dot{\Delta\omega_r} \\ \dot{\Delta\delta} \\ \dot{\Delta E_{fd}} \\ \dot{\Delta V_1} \\ \dot{\Delta V_2} \\ \dot{\Delta V_s} \\ \dot{\Delta E_q} \\ \dot{\Delta E_d} \\ \dot{\Delta E_q} \\ \dot{\Delta E_d} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{K_{1ub}}{2H} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{2zb}}{2H} & -\frac{K_{2usb}}{2H} \\ \omega_e & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_A} & \frac{K_A}{T_A} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \left(\frac{T_1 K_{stab} K_1}{2HT_2} - \frac{K_s}{T_R} \right) & 0 & -\frac{1}{T_R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_w T_2} \right) & \left(\frac{1}{T_R} - \frac{1}{T_2} \right) & 0 & 0 & \left(-\frac{T_1 K_{stab} K_2}{2HT_2} - \frac{K_o}{T_R} \right) & \left(-\frac{T_1 K_{stab} K_{2a}}{2HT_2} - \frac{K_{oa}}{T_R} \right) \\ 0 & \frac{K_{stab} K_1}{2H} & 0 & 0 & \left(\frac{1}{T_w} \right) & 0 & 0 & -\frac{K_{stab} K_2}{2H} & -\frac{K_{stab} K_{2a}}{2H} \\ 0 & \frac{T_1 K_{stab} K_1}{2HT_2} & 0 & 0 & \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_w T_2} \right) & -\frac{1}{T_2} & 0 & \frac{T_1 K_{stab} K_2}{2HT_2} & -\frac{T_1 K_{stab} K_{2a}}{2HT_2} \\ 0 & \left(\frac{K_{10a} K_{11a}}{T_{d0}} \right) & \left(\frac{1}{T_{d0}} \right) & 0 & 0 & 0 & \left(-\frac{1}{T_{d0}} \right) & \left(-\frac{K_{10a} (X_e + X'_q)}{T_{d0}} \right) & \left(-\frac{R_e K_{10a}}{T_{d0}} \right) \\ 0 & \left(\frac{K_{10} K_{11}}{T_{d0}} \right) & 0 & 0 & 0 & 0 & \left(-\frac{1}{T_{d0}} \right) & \left(\frac{R_e K_{10}}{T_{d0}} \right) & \left(-\frac{K_{10} (X_e + X'_d)}{T_{d0}} \right) \\ 0 & \left(-\frac{K_4}{T_{d0}} \right) & 0 & 0 & 0 & 0 & \left(\frac{1}{T_{d0}} \right) & \left(-\frac{1}{T_{d0} K_3} \right) & \left(\frac{K_2}{T_{d0}} \right) \\ 0 & \left(-\frac{K_4}{T_{d0}} \right) & 0 & 0 & 0 & 0 & \left(\frac{1}{T_{d0}} \right) & \left(-\frac{K_8}{T_{d0}} \right) & \left(-\frac{1}{T_{d0} K_{3a}} \right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\omega_r \\ \Delta\delta \\ \Delta E_{fd} \\ \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_s \\ \Delta E_q \\ \Delta E_d \\ \Delta E_q \\ \Delta E_d \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{2H} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \left(\frac{T_1 K_{stab}}{2HT_2} \right) & \frac{1}{T_R} \\ \left(\frac{K_{stab}}{2H} \right) & 0 \\ \left(\frac{T_1 K_{stab}}{2HT_2} \right) & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta T_m \\ \Delta V_{ref} \end{pmatrix}$$

Fig. 1.9 Sistema de Espacio de Estado con el Modelo de Sexto Orden

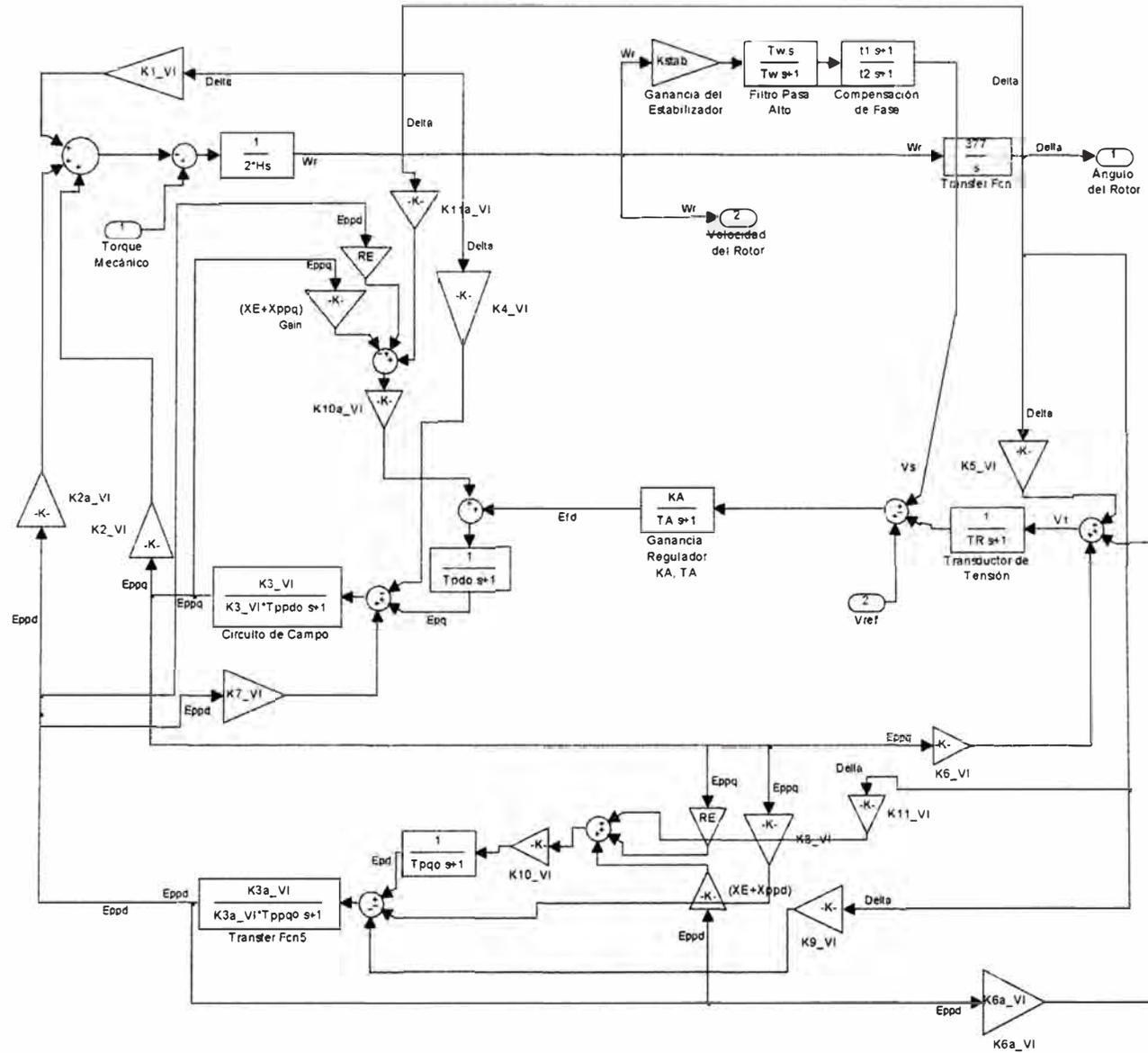


Fig. 1.10 Modelo Subtransitorio

1.4. Coeficientes de Amortiguamiento y Sincronización

En el ítem 0 se han linealizado las ecuaciones de la máquina síncrona y el sistema externo; obteniéndose los coeficientes de estabilidad permanente de cada uno de los modelos de la máquina síncrona. Para completar el sistema eléctrico se incluirán los reguladores de la máquina (regulador de tensión y estabilizador de sistemas de potencia); lo que permitirá determinar los coeficientes de amortiguamiento y sincronización. En este capítulo se utilizarán reguladores clásicos cuyos modelos se muestran a continuación:

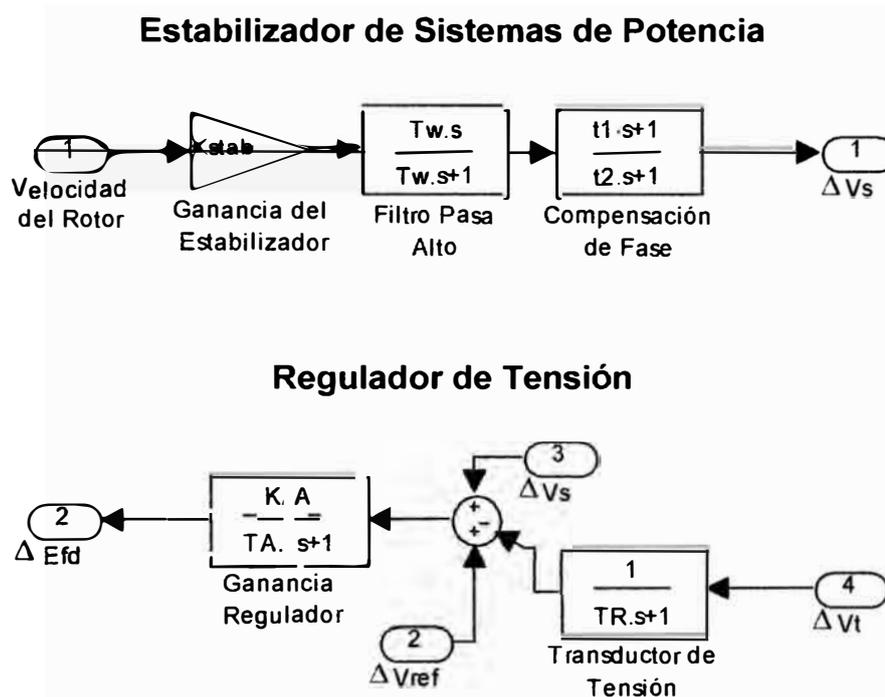


Fig. 1.11 Reguladores de la Máquina Síncrona

K_{stab} , T_w , t_1 , t_2 , K_A , T_A y T_R son los parámetros de los reguladores cuyo valor será este caso:

$$\begin{aligned}
 K_{stab} &= 8; & \omega_{os} &= 2\pi(0.8); & T_R &= 0.02; \\
 T_w &= 2; & \omega_0 &= 2\pi(60); & K_A &= 30; \\
 t_1 &= 1; t_2 &= 0.1; & T_A &= 0.01;
 \end{aligned}$$

El transductor de tensión que se observa en la Fig. 1.11 Reguladores de la Máquina Síncrona no tiene efecto significativo sobre la magnitud ΔV_t , por lo tanto se omitirá su presencia. En ese sentido, la Tensión de Campo se representa de la siguiente manera:

$$\Delta E_{fd} = \left(\frac{K_A}{T_A s + 1} \right) (\Delta V_s + \Delta V_{ref} - \Delta V_t) \quad (1.52)$$

La tensión ΔV_s que sale del Estabilizador de Sistemas de Potencia se representa así:

$$\Delta V_s = K_{stab} \left(\frac{T_w s}{T_w s + 1} \right) \left(\frac{1 + t_1 s}{1 + t_2 s} \right) \Delta \omega_r \quad (1.53)$$

a. Con el modelo transitorio en eje directo

Al reemplazar (1.5) en (1.4) se obtiene:

$$\Delta T'_e = \left[K_1 - \frac{K_2 K_3 K_4}{(1 + K_3 T'_{do} s)} \right] \Delta \delta - \frac{K_2 K_3}{(1 + K_3 T'_{do} s)} \Delta E_{fd} \quad (1.54)$$

La tensión de referencia es un valor constante, por lo tanto, $\Delta V_{ref}=0$. Reemplazando (1.6) y (1.53) en (1.52) se obtiene:

$$\Delta E_{fd} = \left[\begin{aligned} & - \left(\frac{1}{1 + s T_R} \right) \left(\frac{K_A}{1 + s T_A} \right) K_5 \Delta \delta - \left(\frac{1}{1 + s T_R} \right) \left(\frac{K_A}{1 + s T_A} \right) K_6 \Delta E'_q \\ & + K_{stab} \left(\frac{K_A}{1 + s T_A} \right) \left(\frac{s T_W}{1 + s T_W} \right) \left(\frac{1 + s T_1}{1 + s T_2} \right) \Delta \omega_r \end{aligned} \right] \quad (1.55)$$

Reemplazando (1.55) en (1.5):

$$\Delta E'_q = \left\{ \begin{aligned} & \frac{K_3}{(1 + K_3 T'_{do} s)} \left[\begin{aligned} & - \left(\frac{1}{1 + s T_R} \right) \left(\frac{K_A}{1 + s T_A} \right) K_5 \Delta \delta - \left(\frac{1}{1 + s T_R} \right) \left(\frac{K_A}{1 + s T_A} \right) K_6 \Delta E'_q \\ & + K_{stab} \left(\frac{K_A}{1 + s T_A} \right) \left(\frac{s T_W}{1 + s T_W} \right) \left(\frac{1 + s T_1}{1 + s T_2} \right) \Delta \omega_r \end{aligned} \right] \\ & - \frac{K_3 K_4}{(1 + K_3 T'_{do} s)} \Delta \delta \end{aligned} \right\}$$

Despejando $\Delta E'_q$:

$$\Delta E'_q = \frac{\left(\frac{K_3}{1 + s K_3 T'_{do}} \right)}{\left(1 + \frac{K_3 K_A K_6}{(1 + s K_3 T'_{do})(1 + s T_R)(1 + s T_A)} \right)} \left[\begin{aligned} & - \left(\frac{K_A K_5}{(1 + s T_R)(1 + s T_A)} + K_4 \right) \Delta \delta \\ & + \frac{K_{stab} K_A s T_W (1 + s T_1)}{(1 + s T_A)(1 + s T_W)(1 + s T_2)} \Delta \omega_r \end{aligned} \right]$$

Para poder manipular esta ecuación se reemplazará a la variable compleja "s" por "j ω_{os} ", donde ω_{os} es la frecuencia de oscilación del sistema y puede estar en el rango de 0,8-1,8 Hz, de esta manera se conseguirá despejar a los coeficientes que acompañan a $\Delta \delta$

teniendo en cuenta que $\Delta \omega_r = j \frac{\omega_{os}}{\omega_0} \Delta \delta$.

El proceso completo es largo y está detallado en anexo adjunto; para facilitar el desarrollo de las ecuaciones se ha recurrido a utilizar cambios de variables que han permitido hacer más manejables los coeficientes obtenidos:

$$\Delta E'_q = \{-\varphi 1 - j\varphi 2\} \Delta \delta$$

Remplazando la ecuación anterior en (1.4):

$$\Delta T_e = \underbrace{(K_1 - K_2 \varphi 1)}_{K_S} \Delta \delta - \underbrace{K_2 \varphi 2}_{K_D} \frac{\omega_0}{\omega_{os}} \Delta \omega_r \quad (1.56)$$

Donde:

$$\varphi 1 = \frac{\alpha 1 \varepsilon 1 + \alpha 2 \varepsilon 2}{\{\varepsilon 1^2 + \varepsilon 2^2\}} + \frac{(K_3 K_A K_5 + \chi 1) \beta 1 + \chi 2 \beta 2}{\{\beta 1^2 + \beta 2^2\}}$$

$$\varphi 2 = \left\{ \frac{(\alpha 2 \varepsilon 1 - \alpha 1 \varepsilon 2)}{\{\varepsilon 1^2 + \varepsilon 2^2\}} + \frac{(\chi 2 \beta 1 - (K_3 K_A K_5 + \chi 1) \beta 2)}{\{\beta 1^2 + \beta 2^2\}} \right\}$$

$$\alpha 1 = K_3 K_{stab} K_A \omega_{os}^2 T_W (1 - \omega_{os}^2 T_1 T_R)$$

$$\alpha 2 = K_3 K_{stab} K_A \omega_{os}^2 T_W \omega_{os} (T_1 + T_R)$$

$$\beta 1 = (1 - \omega_{os}^2 T_R T_A) - \omega_{os}^2 K_3 T_{d_0}' (T_R + T_A) + K_3 K_A K_6$$

$$\beta 2 = \omega_{os} (K_3 T_{d_0}' (1 - \omega_{os}^2 T_R T_A) + (T_R + T_A))$$

$$\chi 1 = K_3 K_4 (1 - \omega_{os}^2 T_R T_A)$$

$$\chi 2 = \omega_{os} K_3 K_4 (T_R + T_A)$$

Remplazando los parámetros de los reguladores y los Coeficientes de Estabilidad Permanente se obtienen los siguientes coeficientes de amortiguamiento y sincronización:

Tabla 1. 4 Coeficientes de Amortiguamiento y Sincronización. Modelo de Tercer Orden

Orden	
K _S	0,9993
K _D	30,1232

b. Con el modelo transitorio en ambos ejes

Remplazando (1.12) y (1.53) en (1.52) se obtiene ($\Delta V_{ref}=0$):

$$\Delta E_{fd} = \left(\frac{K_A}{1 + sT_A} \right) \left[\begin{array}{l} K_{stab} \left(\frac{sT_w}{1 + sT_w} \right) \left(\frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \right) \Delta \omega_r \\ - \left(\frac{1}{1 + sT_R} \right) (K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q + K_{6a} \Delta E'_d) \end{array} \right] \quad (1.57)$$

Con las ecuaciones (1.9), (1.10) y (1.57) se obtienen los componentes amortiguador y sincronizante del torque eléctrico. Para poder despejar estas componentes y obtener sus coeficientes (K_S y K_D) se procede de manera similar al caso anterior; el proceso completo está detallado en anexo adjunto; para facilitar el desarrollo de las ecuaciones se recurrió

a cambios de variables que han permitido hacer más manejables los coeficientes obtenidos:

$$\Delta T_e = \left\{ K_1 - \left[K_2 - \frac{K_{2a}K_{3a}K_{7a}}{1 + (\omega_{os}K_{3a}T'_{qo})^2} \right] \phi 1 + \frac{\omega_{os}K_{2a}K_{3a}K_{7a}K_{3a}T'_{qo}}{1 + (\omega_{os}K_{3a}T'_{qo})^2} \phi 2 - \frac{K_{2a}K_{3a}K_{4a}}{1 + (\omega_{os}K_{3a}T'_{qo})^2} \right\} \Delta \delta$$

$$+ \left\{ -\frac{\omega_0}{\omega_{os}} \left[K_2 - \frac{K_{2a}K_{3a}K_{7a}}{1 + (\omega_{os}K_{3a}T'_{qo})^2} \right] \phi 2 - \frac{\omega_0 K_{2a}K_{3a}K_{7a}K_{3a}T'_{qo}}{1 + (\omega_{os}K_{3a}T'_{qo})^2} \phi 1 + \frac{\omega_0 K_{2a}K_{3a}K_{4a}K_{3a}T'_{qo}}{1 + (\omega_{os}K_{3a}T'_{qo})^2} \right\} \Delta \omega_r$$

Donde:

$$\phi 1 = \left(\frac{\alpha 1 \varepsilon 1 + \alpha 2 \varepsilon 2}{\varepsilon 1^2 + \varepsilon 2^2} + \frac{\chi 1 \beta 1 + \chi 2 \beta 2}{\beta 1^2 + \beta 2^2} \right)$$

$$\phi 2 = \left[\frac{\chi 2 \beta 1 - \beta 2 \chi 1}{\beta 1^2 + \beta 2^2} + \frac{\alpha 2 \varepsilon 1 - \alpha 1 \varepsilon 2}{\varepsilon 1^2 + \varepsilon 2^2} \right]$$

$$\alpha 1 = K_3 K_{stab} K_A \omega_{os}^2 T_w \left[1 - \omega_{os}^2 T_R T_1 - \omega_{os}^2 K_{3a} T'_{qo} (T_1 + T_R) \right]$$

$$\alpha 2 = K_3 K_{stab} K_A \omega_{os}^3 T_w \left[T_1 + T_R + K_{3a} T'_{qo} (1 - \omega_{os}^2 T_1 T_R) \right]$$

$$\beta 1 = \left\{ \begin{aligned} & \left[1 + K_3 K_{3a} (K_8 K_7 - \omega_{os}^2 T'_{do} T'_{qo}) \right] (1 - \omega_{os}^2 T_A T_R) \\ & - \omega_{os}^2 (K_3 T'_{do} + K_{3a} T'_{qo}) (T_A + T_R) + K_3 K_A (K_6 - K_8 K_{6a} K_{3a}) \end{aligned} \right\}$$

$$\beta 2 = \omega_{os} \left\{ \begin{aligned} & (K_3 T'_{do} + K_{3a} T'_{qo}) (1 - \omega_{os}^2 T_A T_R) \\ & + \left[1 + K_3 K_{3a} (K_8 K_7 - \omega_{os}^2 T'_{do} T'_{qo}) \right] (T_A + T_R) + K_3 K_A K_6 K_{3a} T'_{qo} \end{aligned} \right\}$$

$$\chi 1 = K_3 \left[\begin{aligned} & (K_4 + K_7 K_{3a} K_9) (1 - \omega_{os}^2 T_A T_R) \\ & - \omega_{os}^2 K_4 K_{3a} T'_{qo} (T_A + T_R) + K_A (K_5 - K_{6a} K_{3a} K_9) \end{aligned} \right]$$

$$\chi 2 = \omega_{os} K_3 \left[\begin{aligned} & (K_4 + K_7 K_{3a} K_9) (T_A + T_R) \\ & + K_4 K_{3a} T'_{qo} (1 - \omega_{os}^2 T_A T_R) + K_A K_5 K_{3a} T'_{qo} \end{aligned} \right]$$

$$\varepsilon 1 = \omega_0 \left[(1 - \omega_{os}^2 T_2 T'_w) \beta 1 - \omega_{os}^2 \beta 2 (T_2 + T'_w) \right]$$

$$\varepsilon 2 = \omega_{os} \omega_0 \left[(T_2 + T'_w) \beta 1 + \beta 2 (1 - \omega_{os}^2 T_2 T'_w) \right]$$

Remplazando los parámetros de los reguladores y los Coeficientes de Estabilidad Permanente se obtienen los siguientes coeficientes de amortiguamiento y sincronización:

Tabla 1.5 Coeficientes de Amortiguamiento y Sincronización. Modelo de Cuarto Orden

K_S	1,1184
K_D	29,8701

c. Con el modelo subtransitorio

Teniendo en cuenta que $\Delta V_{ref}=0$, se reemplazan las ecuaciones (1.21) y (1.53) en (1.52) y se obtiene:

$$\Delta E_{fd} = \left(\frac{K_A}{1+sT_A} \right) \left(\begin{array}{l} K_{stab} \left(\frac{sT_W}{1+sT_W} \right) \left(\frac{1+sT_1}{1+sT_2} \right) \Delta \omega \\ - \left(\frac{1}{1+sT_R} \right) (K_{5,sh} \Delta \delta + K_{6,asb} \Delta E_d^* + K_{6,sb} \Delta E_q^*) \end{array} \right) \quad (1.58)$$

Con las ecuaciones (1.16), (1.20) y (1.58) se obtienen los componentes amortiguador y sincronizante del torque eléctrico de manera similar a los casos anteriores. El proceso completo está detallado en anexo adjunto; para facilitar el desarrollo de las ecuaciones se recurrió a cambios de variables que han permitido hacer más manejables los coeficientes obtenidos:

$$\Delta T_e = \underbrace{\left[\begin{array}{l} K_1 - \left\{ K_2 - \frac{K_{2a} K_{3a} \left[K_{7a} \left\{ 1 + K_{3a} K_8 (X_e + X_d^*) + (\omega_{os} T_{q_0}')^2 \right\} + K_8 R_e \left\{ 1 - \omega_{os}^2 K_{3a} T_{q_0}^* T_{q_0}' + K_{3a} K_8 (X_e + X_d^*) \right\} \right]}{\left[\left\{ 1 - \omega_{os}^2 K_{3a} T_{q_0}^* T_{q_0}' + K_{3a} K_8 (X_e + X_d^*) \right\}^2 + \left[\omega_{os} (K_{3a} T_{q_0}^* + T_{q_0}') \right]^2 \right]} \right\} \phi 1 \\ + \left\{ \frac{\omega_{os} K_{2a} K_{3a} \left[K_{7a} K_{3a} \left\{ T_{q_0}' \left[(\omega_{os} T_{q_0}')^2 + 1 \right] - K_8 T_{q_0}' (X_e + X_d^*) \right\} + K_8 R_e (K_{3a} T_{q_0}^* + T_{q_0}') \right]}{\left[\left\{ 1 - \omega_{os}^2 K_{3a} T_{q_0}^* T_{q_0}' + K_{3a} K_8 (X_e + X_d^*) \right\}^2 + \left[\omega_{os} (K_{3a} T_{q_0}^* + T_{q_0}') \right]^2 \right]} \right\} \phi 2 \right\} \Delta \delta \\ \underbrace{\left[\frac{K_{2a} K_{3a} \left[\left\{ 1 + K_{3a} K_8 (X_e + X_d^*) + (\omega_{os} T_{q_0}')^2 \right\} + K_8 K_9 \left\{ 1 - \omega_{os}^2 K_{3a} T_{q_0}^* T_{q_0}' + K_{3a} K_8 (X_e + X_d^*) \right\} \right]}{\left[\left\{ 1 - \omega_{os}^2 K_{3a} T_{q_0}^* T_{q_0}' + K_{3a} K_8 (X_e + X_d^*) \right\}^2 + \left[\omega_{os} (K_{3a} T_{q_0}^* + T_{q_0}') \right]^2 \right]} \right]}_{K_S} \end{array} \right]$$

$$\beta 1 = \left[\begin{array}{l} \left[\begin{array}{l} 1 - \omega_{os}^2 T_R T_A \\ -\omega_{os}^2 K_{3a} T_{q_0}^* (T_R + T_A) \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{l} \left(\begin{array}{l} 1 - \omega_{os}^2 K_3 T_{d_0}^* T_{d_0}' \\ + K_3 K_{8a} (X_e + X_q^*) \end{array} \right) \left(\begin{array}{l} 1 - \omega_{os}^2 K_{3a} T_{q_0}' T_{q_0}'' \\ - K_{3a} K_8 (X_e + X_d^*) \end{array} \right) \\ -\omega_{os}^2 (K_3 T_{d_0}^* + T_{d_0}') (T_{q_0}' + K_{3a} T_{q_0}'') \\ + K_3 K_{3a} \left\{ \begin{array}{l} (K_{7a} - K_8 R_e) (K_7 + K_{8a} R_e) \\ -\omega_{os}^2 T_{d_0}' T_{q_0}' K_{7a} K_7 \end{array} \right\} \end{array} \right\} \\ -\omega_{os}^2 \left[\begin{array}{l} T_R + T_A \\ + K_{3a} T_{q_0}'' (1 - \omega_{os}^2 T_R T_A) \end{array} \right] \left[\begin{array}{l} (K_3 T_{d_0}'' + T_{d_0}') \left[\begin{array}{l} 1 - \omega_{os}^2 K_{3a} T_{q_0}' T_{q_0}'' \\ - K_{3a} K_8 (X_e + X_d^*) \end{array} \right] \\ + (T_{q_0}' + K_{3a} T_{q_0}'') \left[\begin{array}{l} 1 - \omega_{os}^2 K_3 T_{d_0}' T_{d_0}'' \\ + K_3 K_{8a} (X_e + X_q^*) \end{array} \right] \\ + K_3 K_{3a} \left[\begin{array}{l} T_{d_0}' K_7 (K_{7a} - K_8 R_e) \\ + T_{q_0}' K_{7a} (K_7 + K_{8a} R_e) \end{array} \right] \end{array} \right] \\ + K_3 K_{3a} \left\{ \begin{array}{l} K_6 \left[1 - 2\omega_{os}^2 K_{3a} T_{q_0}' T_{q_0}'' - K_{3a} K_8 (X_e + X_d^*) \right] \\ - (K_{7a} - K_8 R_e) K_{6a} K_{3a} - \omega_{os}^2 K_{3a} K_{3a} T_{q_0}' \left[K_6 T_{q_0}'' - K_{6a} T_{q_0}' K_{7a} \right] \end{array} \right\} \end{array} \right]$$

$$\beta 2 = \omega_{os} \left[\begin{array}{l} \left[\begin{array}{l} K_{3a} T_{q_0}' (1 - \omega_{os}^2 T_R T_A) \\ + (T_R + T_A) \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{l} \left(\begin{array}{l} 1 - \omega_{os}^2 K_3 T_{d_0}' T_{d_0}'' \\ + K_3 K_{8a} (X_e + X_q^*) \end{array} \right) \left(\begin{array}{l} 1 - \omega_{os}^2 K_{3a} T_{q_0}' T_{q_0}'' \\ - K_{3a} K_8 (X_e + X_d^*) \end{array} \right) \\ -\omega_{os}^2 (K_3 T_{d_0}' + T_{d_0}'') (T_{q_0}' + K_{3a} T_{q_0}'') \\ + K_3 K_{3a} \left\{ \begin{array}{l} (K_{7a} - K_8 R_e) (K_7 + K_{8a} R_e) \\ -\omega_{os}^2 T_{d_0}' T_{q_0}' K_{7a} K_7 \end{array} \right\} \end{array} \right\} \\ \left[\begin{array}{l} 1 - \omega_{os}^2 T_R T_A \\ -\omega_{os}^2 K_{3a} T_{q_0}'' (T_R + T_A) \end{array} \right] \left[\begin{array}{l} (K_3 T_{d_0}'' + T_{d_0}') \left[\begin{array}{l} 1 - \omega_{os}^2 K_{3a} T_{q_0}' T_{q_0}'' \\ - K_{3a} K_8 (X_e + X_d^*) \end{array} \right] \\ + (T_{q_0}' + K_{3a} T_{q_0}'') \left[\begin{array}{l} 1 - \omega_{os}^2 K_3 T_{d_0}' T_{d_0}'' \\ + K_3 K_{8a} (X_e + X_q^*) \end{array} \right] \\ + K_3 K_{3a} \left[\begin{array}{l} T_{d_0}' K_7 (K_{7a} - K_8 R_e) \\ + T_{q_0}' K_{7a} (K_7 + K_{8a} R_e) \end{array} \right] \end{array} \right] \\ + K_3 K_{3a} \left\{ \begin{array}{l} K_6 K_{3a} T_{q_0}'' \left[2 - \omega_{os}^2 K_{3a} T_{q_0}' T_{q_0}'' - K_{3a} K_8 (X_e + X_d^*) \right] \\ - K_{6a} K_{3a} \left[(K_{7a} - K_8 R_e) K_{3a} T_{q_0}'' + T_{q_0}' K_{7a} \right] + K_6 T_{q_0}' \end{array} \right\} \end{array} \right]$$

$$\chi 1 = K_3 \left[\begin{array}{l} \left\{ \begin{array}{l} K_4 \left[1 - \omega_{os}^2 K_{3a} T_{q_0}' T_{q_0}'' - K_{3a} K_8 (X_e + X_d) \right] \\ + K_7 K_{3a} (K_{4a}' - K_8 K_9) \end{array} \right\} (1 - \omega_{os}^2 K_{3a} T_{d_0}' T_{q_0}'') \\ - \omega_{os}^2 \left[K_4 (K_{3a} T_{q_0}'' + T_{q_0}') + K_7 K_{3a} K_{4a}' T_{q_0}' \right] (T_{d_0}' + K_{3a} T_{q_0}'') \\ + K_{8a} \left\{ \begin{array}{l} K_{3a} R_e \left[K_{4a}' - K_8 K_9 - \omega_{os}^2 K_{4a}' K_{3a} T_{q_0}' T_{q_0}'' \right] \\ - K_{9a} \left[1 - 2\omega_{os}^2 K_{3a} T_{q_0}' T_{q_0}'' - K_{3a} K_8 (X_e + X_d) - (\omega_{os} K_{3a} T_{q_0}'')^2 \right] \end{array} \right\} \end{array} \right] (1 - \omega_{os}^2 T_R T_A) \\ \\ \left[\begin{array}{l} K_4 \left\{ \begin{array}{l} (K_{3a} T_{q_0}'' + T_{d_0}') \left[1 - \omega_{os}^2 K_{3a} T_{q_0}' T_{q_0}'' - K_{3a} K_8 (X_e + X_d) \right] \\ + (K_{3a} T_{q_0}' + T_{q_0}'') (1 - \omega_{os}^2 T_{d_0}' K_{3a} T_{q_0}'') \end{array} \right\} \\ - \omega_{os}^2 \left[K_7 K_{3a} \left[T_{q_0}' K_{4a}' (1 - \omega_{os}^2 T_{d_0}' K_{3a} T_{q_0}'') + (K_{4a}' - K_8 K_9) (T_{d_0}' + K_{3a} T_{q_0}'') \right] \right. \\ \left. + K_{8a} \left[\begin{array}{l} R_e K_{3a} \left[T_{q_0}' K_{4a}' + K_{3a} T_{q_0}'' (K_{4a}' - K_8 K_9) \right] \\ - K_{9a} \left\{ K_{3a} T_{q_0}' \left[2 - \omega_{os}^2 K_{3a} T_{q_0}' T_{q_0}'' - K_{3a} K_8 (X_e + X_d) \right] + T_{q_0}' \right\} \right] \right] \end{array} \right] (T_R + T_A) \\ \\ + K_A \left\{ \begin{array}{l} K_5 \left[1 - K_{3a} K_8 (X_e + X_d) - \omega_{os}^2 K_{3a} T_{q_0}' (K_{3a} T_{q_0}'' + 2T_{q_0}') \right] \\ - K_{6a} K_{3a} \left[K_{4a}' - K_8 K_9 - \omega_{os}^2 T_{q_0}' K_{4a}' K_{3a} T_{q_0}'' \right] \end{array} \right\} \end{array} \right]$$

$$\chi 2 = \omega_{os} K_3 \left[\begin{array}{l} \left\{ \begin{array}{l} K_4 \left[1 - \omega_{os}^2 K_{3a} T_{q_0}' T_{q_0}'' - K_{3a} K_8 (X_e + X_d) \right] \\ + K_7 K_{3a} (K_{7a}' - K_8 K_9) \end{array} \right\} (1 - \omega_{os}^2 K_{3a} T_{d_0}' T_{q_0}'') \\ - \omega_{os}^2 \left[K_4 (K_{3a} T_{q_0}'' + T_{q_0}') + K_7 K_{3a} K_{7a}' T_{q_0}' \right] (T_{d_0}' + K_{3a} T_{q_0}'') \\ + K_{8a} \left\{ \begin{array}{l} R_e K_{3a} \left[K_{7a}' - K_8 K_9 - \omega_{os}^2 T_{q_0}' K_{7a}' K_{3a} T_{q_0}'' \right] \\ - K_{9a} \left[1 - \omega_{os}^2 K_{3a} T_{q_0}' (K_{3a} T_{q_0}'' + 2T_{q_0}') - K_{3a} K_8 (X_e + X_d) \right] \end{array} \right\} \end{array} \right] (T_R + T_A) \\ \\ \left[\begin{array}{l} K_4 \left\{ \begin{array}{l} (K_{3a} T_{q_0}'' + T_{d_0}') \left[1 - \omega_{os}^2 K_{3a} T_{q_0}' T_{q_0}'' - K_{3a} K_8 (X_e + X_d) \right] \\ + (K_{3a} T_{q_0}' + T_{q_0}'') (1 - \omega_{os}^2 K_{3a} T_{q_0}' T_{d_0}') \end{array} \right\} \\ + K_7 K_{3a} \left[T_{q_0}' K_{7a}' (1 - \omega_{os}^2 T_{d_0}' K_{3a} T_{q_0}'') + (K_{7a}' - K_8 K_9) (T_{d_0}' + K_{3a} T_{q_0}'') \right] \\ + K_{8a} \left[\begin{array}{l} K_{3a} R_e \left[T_{q_0}' K_{7a}' + K_{3a} T_{q_0}'' (K_{7a}' - K_8 K_9) \right] \\ - K_{9a} \left\{ K_{3a} T_{q_0}' + T_{q_0}' + K_{3a} T_{q_0}'' \left[\begin{array}{l} 1 - \omega_{os}^2 K_{3a} T_{q_0}' T_{q_0}'' \\ - K_{3a} K_8 (X_e + X_d) \end{array} \right] \right\} \end{array} \right] \end{array} \right] (1 - \omega_{os}^2 T_R T_A) \\ \\ + K_A \left\{ \begin{array}{l} K_5 \left\{ K_{3a} T_{q_0}'' + T_{d_0}' + K_{3a} T_{q_0}' \left[1 - \omega_{os}^2 K_{3a} T_{q_0}' T_{q_0}'' - K_{3a} K_8 (X_e + X_d) \right] \right\} \\ - K_{6a} K_{3a} \left[T_{q_0}' K_{7a}' + K_{3a} T_{q_0}'' (K_{7a}' - K_8 K_9) \right] \end{array} \right\} \end{array} \right]$$

$$\phi_1 = \left\{ \frac{(\alpha_1 \varepsilon_1 + \alpha_2 \varepsilon_2)}{(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2)} + \frac{[\chi_1 \beta_1 + \chi_2 \beta_2]}{(\beta_1^2 + \beta_2^2)} \right\}$$

$$\phi_2 = \left\{ \frac{(\alpha_2 \varepsilon_1 - \alpha_1 \varepsilon_2)}{(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2)} + \frac{(\chi_2 \beta_1 - \chi_1 \beta_2)}{(\beta_1^2 + \beta_2^2)} \right\}$$

Remplazando los parámetros de los reguladores y los Coeficientes de Estabilidad Permanente se obtienen los siguientes coeficientes de amortiguamiento y sincronización:

Tabla 1.6 Coeficientes de Amortiguamiento y Sincronización. Modelo de Sexto

Orden

K _S	1,1521
K _D	32,7369

1.5. Calidad de la Energía

La calidad de la energía eléctrica puede definirse como una ausencia de interrupciones, sobre tensiones y deformaciones producidas por armónicas en la red y variaciones de voltaje RMS suministrado al usuario; esto referido a la estabilidad del voltaje, la frecuencia y la continuidad del servicio eléctrico. Asimismo se ha determinado que uno de los problemas más comunes que ocasiona el desperdicio de energía eléctrica en las empresas es la calidad de esta, pues influye en la eficiencia de los equipos eléctricos que la usan.

Actualmente, la calidad de la energía es el resultado de una atención continua; en años recientes esta atención ha sido de mayor importancia debido al incremento del número de cargas sensibles en los sistemas de distribución, las cuales por sí solas, resultan ser una causa de la degradación en la calidad de la energía eléctrica.

Podemos decir que existe un problema de calidad de la energía eléctrica cuando ocurre cualquier desviación de la tensión, la corriente o la frecuencia que provoque la mala operación de los equipos de uso final y deteriore la economía o el bienestar de los usuarios; asimismo cuando ocurre alguna interrupción del flujo de energía eléctrica.

Los efectos asociados a problemas de calidad de la energía son:

- Incremento en las pérdidas de energía.
- Daños a la producción, a la economía y la competitividad empresarial
- Incremento del costo, deterioro de la confiabilidad, de la disponibilidad y del confort.

Un aspecto importante de la calidad del sistema de potencia es la habilidad para transmitir y entregar energía eléctrica a los consumidores dentro de los límites

especificados por los estándares de EMC

Compatibilidad Electromagnética (CEM): La aptitud de un equipo o sistema para funcionar satisfactoriamente en su entorno electromagnético introducir perturbaciones electromagnéticas intolerables a ningún otro en su entorno.

Efectos de los Armonicos

- Mala operación de los dispositivos de control y relés de protección
- Pérdidas adicionales en los condensadores, transformadores y máquinas eléctricas.
- Ruido adicional de motores y otros aparatos.
- Interferencia telefónica.
- Amplificación de la tensión por resonancia serie paralelo debido a los condensadores para corrección de factor de potencia y la capacitancia de los cables.

CAPITULO II

DETERMINACIÓN DEL MODO LOCAL DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA CAÑÓN DEL PATO

En este capítulo se aplicará el análisis de calidad de la energía y de estabilidad permanente a una central hidroeléctrica perteneciente al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN), la Central Cañón del Pato. Utilizando los parámetros de la máquina síncrona de esta central, sus reguladores (de tensión y estabilizador de sistemas de potencia) y el sistema de prueba desarrollado en "Metodología de Análisis Simplificado de la Estabilidad Permanente en Centrales de Generación – Aplicación a la C.H. Cañón del Pato" [6], se desarrollará la metodología de estabilidad permanente, desarrollado en el capítulo precedente, para determinar los eigenvalores y los coeficientes de amortiguamiento y sincronización de este sistema eléctrico. Asimismo, con los parámetros de tensión y frecuencia trabajos, se determinará la calidad de la energía de dicha Central.

La Central Hidráulica Cañón del Pato está ubicada en el margen derecho del río Santa, en el distrito de Huallanca, provincia de Huaylas, departamento de Ancash, Perú, aproximadamente a 100 Km de la ciudad de Huaraz, a 1390 m sobre el nivel del mar.

Es una central del tipo subterránea, que posee seis grupos de generación de 43,26 MVA, accionados por turbinas Pelton, cuya tensión nominal de generación es 13,8KV y mediante bancos trifásicos conformados por transformadores monofásicos se eleva la tensión a 138 KV.

La central aprovecha las aguas del río Santa, el cual tiene una cuenca de captación de 4,897 Km². En 1992 se pusieron en servicio los embalses de las lagunas de Parón y Cullicocha; en el 2003 la laguna de Aguascocha y en el 2005 la laguna de Rajucolta que en conjunto aportan 70 millones de m³ en la época seca. Estos embalses constituyen un valioso aporte para incrementar la generación de la central.

Esta central se conecta al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional, en la barra de 138 KV de la subestación de Chimbote¹, mediante tres líneas de transmisión de 138 KV (L-1103, L-1104, L-1105).

Un esquema eléctrico simplificado del SEIN que incluye a la central se muestra en la siguiente figura:

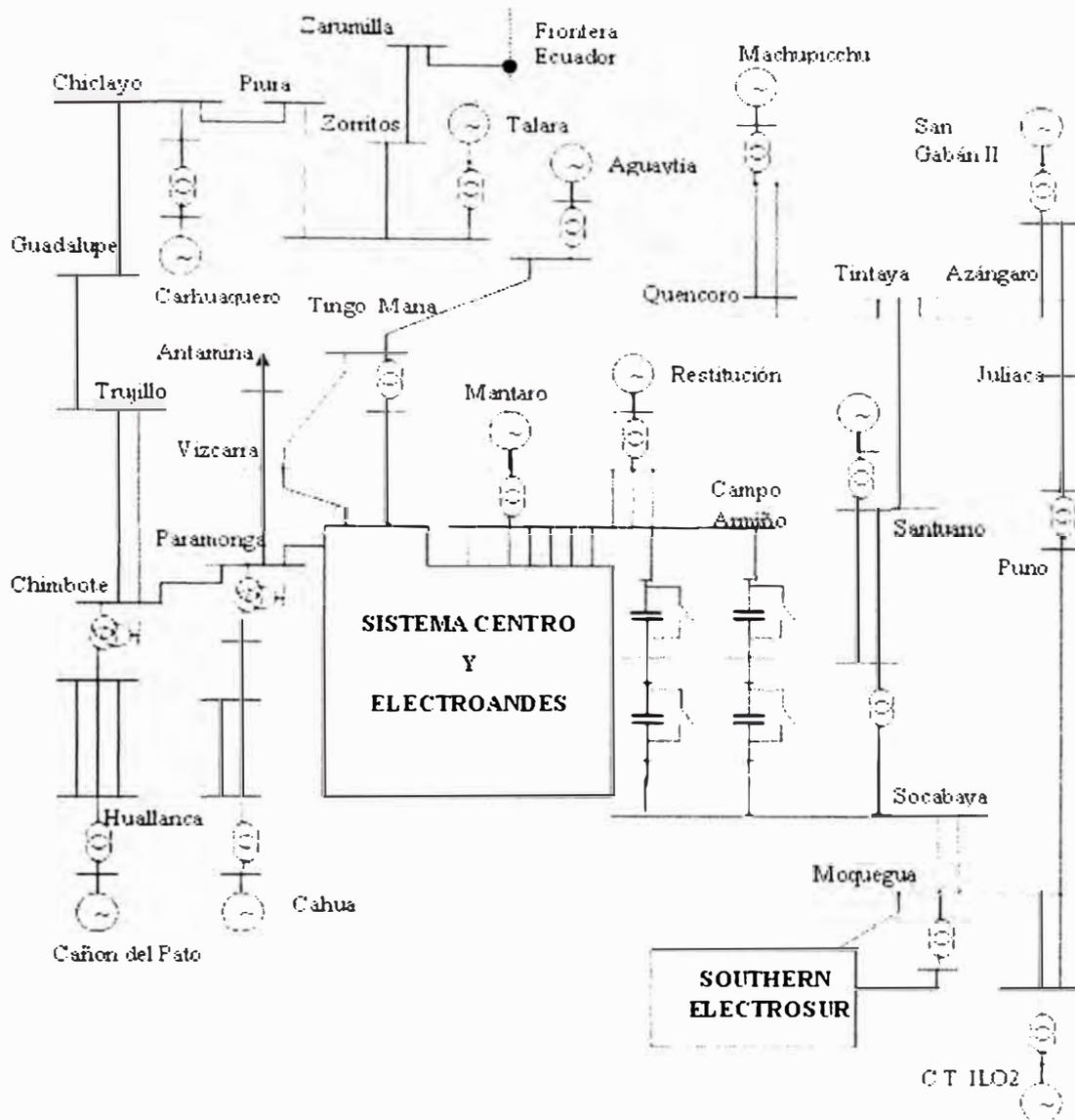


Fig. 2.1 Esquema simplificado del SEIN con la C.H. Cañón del Pato

Las principales características técnicas de los equipos electromecánicos de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato son los siguientes:

Tabla 2.1 Parámetros del Generador Síncrono de la C.H. Cañón del Pato

Grupos Generadores			
Tipo	Hidroeléctrico – 20 polos (W325/150/20)		
Potencia nominal	A_N	43,260	MVA
Tensión nominal	U_N	13,8	KV
Intensidad nominal	I_N	1,81	KA
Factor de potencia nominal		0,95	
Reactancia síncrona del eje directo	x_d	1,00	p.u.
Reactancia síncrona del eje cuadratura	x_q	0,737	p.u.

Grupos Generadores			
Tipo	Hidroeléctrico – 20 polos (W325/150/20)		
Reactancia transitoria del eje directo	x'_d	0,351	p.u.
Reactancia transitoria del eje cuadratura	x'_q	0,420	p.u.
Reactancia subtransitoria del eje directo	x''_d	0,197	p.u.
Reactancia subtransitoria del eje cuadratura	x''_q	0,231	p.u.
Constante de tiempo transitoria a circuito abierto en el eje d	T'_{do}	4,860	s
Constante de tiempo transitoria a circuito abierto en el eje q	T'_{qo}	0,91	s
Constante de tiempo subtransitoria del circuito abierto en el eje d	T''_{do}	0,02	s
Constante de tiempo subtransitoria del circuito abierto en el eje q	T''_{qo}	0,04	s
Constante de tiempo transitoria en cc eje d	T'_d	1,48	s.
Constante de tiempo transitoria en cc eje q	T'_q	0,18	s
Constante de tiempo subtransitoria del circuito en cc eje d	T''_d	0,043	s
Constante de tiempo subtransitoria del circuito en cc eje q	T''_q	0,018	s
Constante de Inercia	H	1,82	s

Tabla 2.2 Datos de placa del Transformador elevador de la C. H. Cañón del Pato

Fabricante	ABB		
Tipo	Grupos: 1-2-3 (Grupos: 4-5-6)		
Potencia nominal	PTU	2 x10 (14,1)	MVA
Relación nominal U_{out} / U_{in}	σ_T	138,0/13,8 (138,27/13,8)	KV/KV KV/KV
Reactancia equivalente	X_T	0,082 (0,0994)	p.u.

Tabla 2.3 Parámetros del Sistema de Excitación de la C.H. Cañón del Pato:

Sistema de Excitación			
Fabricante	ABB		
Tipo-Modelo	FMTBE11		
Tecnología	Estática		
Sistema estático			
Puente de tiristores controlado totalmente	Si	Puente de tiristores semi-controlados	
Alimentación dependiente de excitatriz		Alimentación independiente excitatriz	Si
Potencia del transformador de excitación	P_H	0,45	MVA
Tensión secundaria del transformador de excitación	V_C	325	V
Tensión máxima de excitación	V_{Cp}	410	V
Tensión mínima de excitación	V_{Cn}		V

En el siguiente gráfico se puede observar el diagrama de bloques del sistema de regulación de tensión de la Central Cañón del Pato:

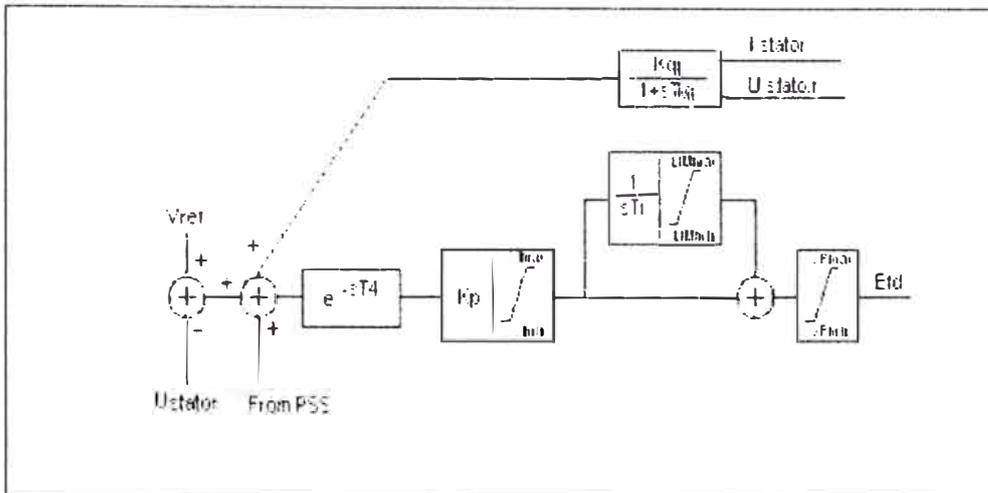


Fig. 2.2 Sistema de Regulación de Tensión

Donde:

- T_i : Constante de tiempo de integración.
- T_d : Constante de tiempo de amortiguación.
- T_q : Constante de tiempo del traductor de potencia reactiva.
- K_p : Ganancia proporcional del AVR.
- $V_{i\max}$: Limite interno máximo del error del integrador.
- $V_{i\min}$: Limite interno mínimo del error del integrador.
- LIM_{\max} : Limite máximo del rango de operación del integrador.
- LIM_{\min} : Limite mínimo del rango de operación del integrador.
- $V_{R\max}$: Tensión máxima del puente de tiristores.
- $V_{R\min}$: Tensión mínima del puente de tiristores.

El diagrama de bloques del estabilizador de sistemas de potencia tiene la siguiente estructura:

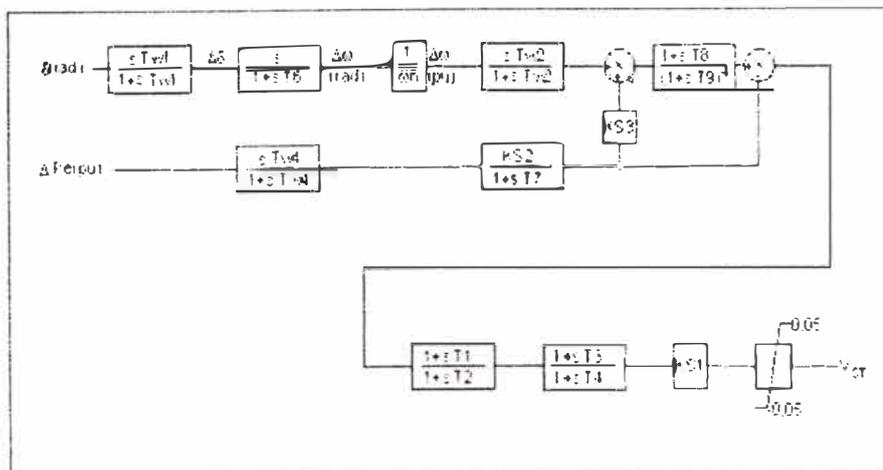


Fig. 2.3 Estabilizador de Sistemas de Potencia

Donde:

KS_1, KS_2 y KS_3 : Ganancias de compensación del PSS.

$T_1, T_2, T_3, T_4, T_6, T_7, T_8, T_9, TW_1, TW_2$ y TW_4 : Constantes de tiempo.

Los valores de ajuste de los parámetros del regulador de tensión y estabilizador de sistemas de potencia son los siguientes [5]:

$TW_1 = 4$	$TW_2 = 4$	$TW_4 = 4$	$T_1 = 0.03$
$T_2 = 0.02$	$T_3 = 0.03$	$T_4 = 0.02$	$T_6 = 0.064$
$T_7 = 4$	$T_8 = 0.32$	$T_9 = 0.08$	$KS_1 = 12$
$KS_2 = 1.1$	$KS_3 = 1$	$KP = 30$	$T_i = 1.3$

Los valores de los coeficientes de estabilidad permanente obtenidos en el capítulo anterior, se determinaron con los mismos parámetros de la máquina síncrona de la central Cañón del Pato, por lo tanto se utilizarán dichos valores para los cálculos que se realizarán en el presente capítulo.

2.1. Cálculo de los Coeficientes de Amortiguamiento y Sincronización

Para realizar las simulaciones de estabilidad permanente del sistema eléctrico de la Central Cañón del Pato se elaboró el siguiente diagrama de bloques para el estabilizador de sistemas de potencia; en el que, a diferencia de la Fig. 2.3 Estabilizador de Sistemas de Potencia, se ha omitido la señal del ángulo del rotor ($\Delta\delta$) considerando únicamente a la velocidad angular síncrona ($\Delta\omega$) en el sistema p.u.; ya que esta se obtiene directamente del diagrama de bloques de la máquina síncrona, como se verá mas adelante:

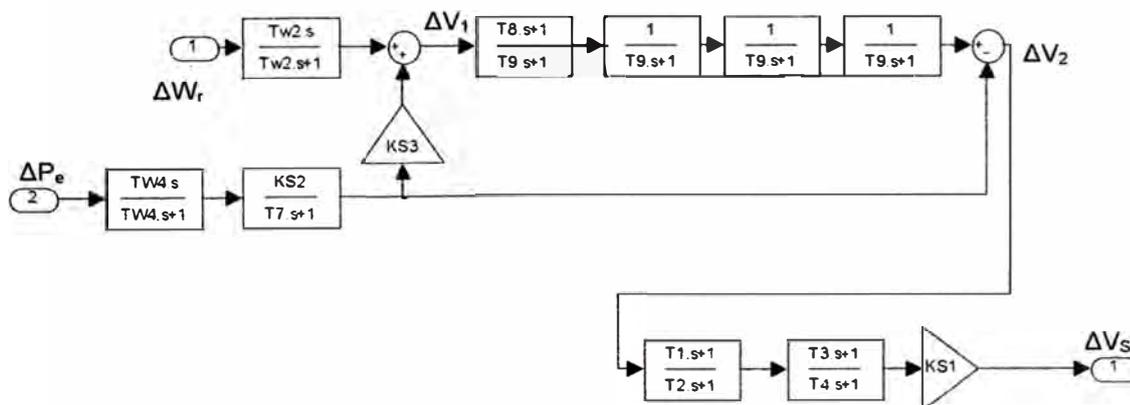


Fig. 2.4 Estabilizador de Sistemas de Potencia

En el caso del regulador de tensión se elaboró un diagrama de bloques en el que se ha reemplazado el bloque de amortiguación (con el término exponencial e^{-sT^4}) de la Fig. 2.2,

por uno equivalente expresado como una fracción ($\frac{1}{sT_4 + 1}$), a fin de poder representarlo

en el software Simulink. Asimismo, se ha omitido el bloque de compensación reactiva (cuyas señales de entrada son V1 e I1), ya que su inclusión no modifica el cálculo de los eigenvalores en el análisis de estabilidad permanente:

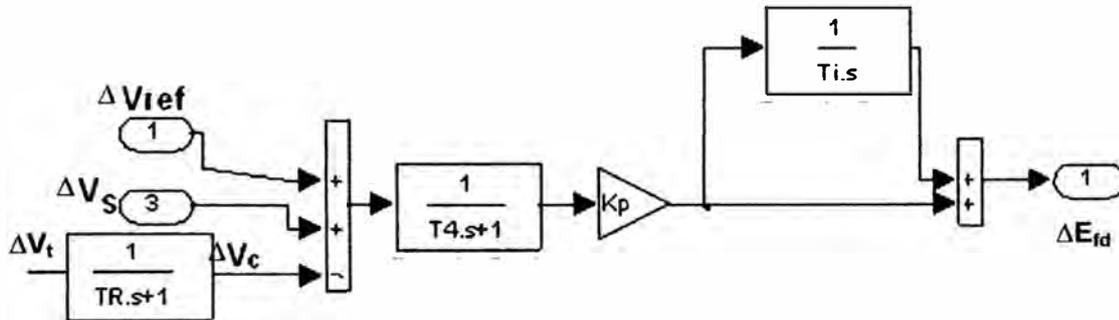


Fig. 2.5 Regulador de Tensión

Teniendo en cuenta que $\Delta V_c \approx \Delta V_r$, y $\Delta V_{ref}=0$, en el Fig. 2.4 y Fig. 2.5 se obtiene lo siguiente:

$$\Delta V_1 = \left(\frac{sT_{W2}}{sT_{W2} + 1} \right) \Delta \omega_r + K_{S3} \left(\frac{K_{S2}}{sT_7 + 1} \right) \left(\frac{sT_{W4}}{sT_{W4} + 1} \right) \Delta P_e \quad (2.1)$$

$$\Delta V_2 = \left(\frac{sT_8 + 1}{(sT_9 + 1)^4} \right) \Delta V_1 - \left(\frac{K_{S2}}{sT_7 + 1} \right) \left(\frac{sT_{W4}}{sT_{W4} + 1} \right) \Delta P_e \quad (2.2)$$

$$\Delta V_s = K_{S1} \left(\frac{sT_1 + 1}{sT_2 + 1} \right) \left(\frac{sT_3 + 1}{sT_4 + 1} \right) \Delta V_2 \quad (2.3)$$

$$\Delta E_{fd} = \left[\left(\frac{K_p}{1 + sT_4} \right) \left(\frac{1}{sT_i} \right) + \left(\frac{K_p}{1 + sT_4} \right) \right] (\Delta V_s - \Delta V_1) \quad (2.4)$$

Remplazando (2.1) en (2.2):

$$\Delta V_2 = \left\{ \begin{array}{l} \left[\left(\frac{sT_8 + 1}{(sT_9 + 1)^4} \right) \left[\left(\frac{sT_{W2}}{sT_{W2} + 1} \right) \Delta \omega_r + K_{S3} \left(\frac{K_{S2}}{sT_7 + 1} \right) \left(\frac{sT_{W4}}{sT_{W4} + 1} \right) \Delta P_e \right] \right. \\ \left. - \left(\frac{K_{S2}}{sT_7 + 1} \right) \left(\frac{sT_{W4}}{sT_{W4} + 1} \right) \Delta P_e \right\} \\ \Delta V_2 = \left\{ \left(\frac{sT_8 + 1}{(sT_9 + 1)^4} \right) \left(\frac{sT_{W2}}{sT_{W2} + 1} \right) \Delta \omega_r + \left(\frac{K_{S2}}{sT_7 + 1} \right) \left(\frac{sT_{W4}}{sT_{W4} + 1} \right) \left[\frac{K_{S3} (sT_8 + 1)}{(sT_9 + 1)^4} - 1 \right] \Delta P_e \right\} \quad (2.5)$$

Remplazando (2.5) en (2.3):

$$\Delta V_s = K_{s1} \left(\frac{sT_1 + 1}{sT_2 + 1} \right) \left(\frac{sT_3 + 1}{sT_4 + 1} \right) \left\{ \left(\frac{sT_8 + 1}{(sT_9 + 1)^4} \right) \left(\frac{sT_{w2}}{sT_{w2} + 1} \right) \Delta \omega_r \right. \\ \left. + \left(\frac{K_{s2}}{sT_7 + 1} \right) \left(\frac{sT_{w4}}{sT_{w4} + 1} \right) \left[\frac{K_{s3}(sT_8 + 1)}{(sT_9 + 1)^4} - 1 \right] \Delta P_e \right\} \\ \Delta V_s = \left\{ \frac{K_{s1}(sT_1 + 1)(sT_3 + 1)}{(sT_2 + 1)(sT_4 + 1)} \frac{(sT_8 + 1)sT_{w2}}{(sT_9 + 1)^4 (sT_{w2} + 1)} \Delta \omega_r \right. \\ \left. + \frac{K_{s1}(sT_1 + 1)(sT_3 + 1)}{(sT_2 + 1)(sT_4 + 1)} \frac{K_{s2}sT_{w4}}{(sT_7 + 1)(sT_{w4} + 1)} \left[\frac{K_{s3}(sT_8 + 1)}{(sT_9 + 1)^4} - 1 \right] \Delta P_e \right\} \quad (2.6)$$

Remplazando (2.6) en (2.4) y luego de resolver se obtiene:

$$\Delta E_{fd} = \frac{K_p(1 + sT_i)}{(1 + sT_4)sT_i} \left\{ \left[\frac{K_{s1}(sT_1 + 1)(sT_3 + 1)(sT_8 + 1)sT_{w2}}{(sT_2 + 1)(sT_4 + 1)(sT_9 + 1)^4 (sT_{w2} + 1)} \Delta \omega_r \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{K_{s1}(sT_1 + 1)(sT_3 + 1)K_{s2}sT_{w4}}{(sT_2 + 1)(sT_4 + 1)(sT_7 + 1)(sT_{w4} + 1)} \left[\frac{K_{s3}(sT_8 + 1)}{(sT_9 + 1)^4} - 1 \right] \Delta P_e \right] \right. \\ \left. - \Delta V_i \right\} \quad (2.7)$$

2.1.1. Con el Modelo Transitorio en eje directo

Se sabe que:

$$\Delta T_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta E'_q \quad (2.8)$$

$$\Delta E'_q = \frac{K_3}{(1 + K_3 T_{do} s)} \Delta E_{fd} - \frac{K_3 K_4}{(1 + K_3 T_{do} s)} \Delta \delta \quad (2.9)$$

$$\Delta V_i = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q \quad (2.10)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta I_q \\ \Delta I_d \end{bmatrix} = \frac{1}{K} \begin{bmatrix} R_e & (X'_d + X_e) \\ -(X'_q + X_e) & R_e \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} \Delta E'_q \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} |V_s| \text{Sen}(\delta_o - \alpha) \Delta \delta \\ |V_s| \text{Cos}(\delta_o - \alpha) \Delta \delta \end{bmatrix} \right\} \quad (2.11)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta V_q \\ \Delta V_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & X'_d \\ -X'_q & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_q \\ \Delta I_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta E'_q \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

La Potencia Eléctrica se expresa de la siguiente manera:

$$P_e = V_d I_d + V_q I_q \quad (2.13)$$

Linealizando la ecuación (2.13):

$$\Delta P_e = V_{d_0} \Delta I_d + I_{d_0} \Delta V_d + V_{q_0} \Delta I_q + I_{q_0} \Delta V_q \quad (2.14)$$

Remplazando (2.11) y (2.12) en (2.14) y desarrollando se obtiene:

$$\Delta P_e = K_\alpha \Delta \delta + K_\beta \Delta E'_q \quad (2.15)$$

Donde:

$$K_{\alpha} = |V_s| \left[\begin{array}{l} \left[\left[\begin{array}{l} (V_{d_0} + R_e I_{d_0} - X_e I_{q_0}) R_e \\ + (V_{q_0} + I_{d_0} X_e + R_e I_{q_0}) (X'_d + X_e) \end{array} \right] \left(\frac{1}{K} \right) - I_{d_0} \right] \cos(\delta_0 - \alpha) \\ + \left[\left[\begin{array}{l} -(V_{d_0} + R_e I_{d_0} - X_e I_{q_0}) (X'_q + X_e) \\ + (V_{q_0} + I_{d_0} X_e + R_e I_{q_0}) R_e \end{array} \right] \left(\frac{1}{K} \right) - I_{q_0} \right] \sin(\delta_0 - \alpha) \end{array} \right]$$

$$K_{\beta} = \left[\begin{array}{l} -(V_{d_0} + R_e I_{d_0} - X_e I_{q_0}) \left(\frac{1}{K} \right) (X'_q + X_e) \\ + (V_{q_0} + I_{d_0} X_e + R_e I_{q_0}) \left(\frac{1}{K} \right) R_e \end{array} \right]$$

Remplazando (2.10) y (2.15) en (2.7) se obtiene:

$$\Delta E'_{fd} = \left[\begin{array}{l} - \left(\frac{1}{1 + sT_R} \right) \left(\frac{K_A}{1 + sT_A} \right) K_5 \Delta \delta - \left(\frac{1}{1 + sT_R} \right) \left(\frac{K_A}{1 + sT_A} \right) K_6 \Delta E'_q \\ + K_{stab} \left(\frac{K_A}{1 + sT_A} \right) \left(\frac{sT_W}{1 + sT_W} \right) \left(\frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \right) \Delta \omega_r \end{array} \right] \quad (2.16)$$

Remplazando (2.16) en (2.9) y desarrollando se obtiene:

$$\Delta E'_q = \frac{\left(\frac{K_3}{1 + sK_3 T'_{d_0}} \right)}{\left(1 + \frac{K_3 K_A K_6}{(1 + sK_3 T'_{d_0})(1 + sT_R)(1 + sT_A)} \right)} \left[\begin{array}{l} - \left(\frac{K_A K_5}{(1 + sT_R)(1 + sT_A)} + K_4 \right) \Delta \delta \\ + \frac{K_{stab} K_A sT_W (1 + sT_1)}{(1 + sT_A)(1 + sT_W)(1 + sT_2)} \Delta \omega_r \end{array} \right] \quad (2.17)$$

De manera similar al procedimiento del capítulo anterior, en esta ecuación se reemplazará a la variable compleja "s" por "j ω_{os} ", para obtener los coeficientes de amortiguamiento y sincronización.

El detalle del desarrollo de todo este procedimiento se encuentra en anexos:

$$\Delta E'_q = (\delta 1 + j\delta 2) \Delta \omega_r + (\varepsilon 1 + j\varepsilon 2) \Delta \delta \quad (2.18)$$

Donde:

$$\delta 1 = \frac{\alpha 1 (\chi 1 - \chi 2 \omega_{os} T_{W2}) + \alpha 2 (\chi 2 + \chi 1 \omega_{os} T_{W2})}{\{ (\chi 1 - \chi 2 \omega_{os} T_{W2})^2 + (\chi 2 + \chi 1 \omega_{os} T_{W2})^2 \}}$$

$$\delta 2 = \frac{[\alpha 2 (\chi 1 - \chi 2 \omega_{os} T_{W2}) - \alpha 1 (\chi 2 + \chi 1 \omega_{os} T_{W2})]}{\{ (\chi 1 - \chi 2 \omega_{os} T_{W2})^2 + (\chi 2 + \chi 1 \omega_{os} T_{W2})^2 \}}$$

$$\varepsilon 1 = \frac{(\beta 1 \chi 1 + \beta 2 \chi 2)}{\{ \chi 1^2 + \chi 2^2 \}}$$

$$\varepsilon 2 = \frac{(\beta 2 \chi 1 - \chi 2 \beta 1)}{\{ \chi 1^2 + \chi 2^2 \}}$$

Las constantes $\alpha_1, \alpha_2, \beta_2, \beta_1, \chi_1$ y χ_2 , cuya expresión es extensa, se precisan en anexos.

Remplazando la ecuación (2.18) en (2.8):

$$\Delta T_e = \underbrace{\left(K_1 + \varepsilon 1 K_2 - \left(\frac{\omega_{os}}{\omega_0} \right) K_2 \delta 2 \right)}_{K_S} \Delta \delta + \underbrace{\left(K_2 \delta 1 + \left(\frac{\omega_0}{\omega_{os}} \right) \varepsilon 2 K_2 \right)}_{K_D} \Delta \omega_r \quad (2.19)$$

Remplazando los parámetros de los reguladores y los Coeficientes de Estabilidad Permanente se obtienen los siguientes coeficientes de amortiguamiento y sincronización para la Central Cañón del Pato con el modelo de tercer orden de la máquina síncrona:

Tabla 2.4 Coeficientes de Amortiguamiento y Sincronización con el modelo de Tercer Orden

K_S	0.9295
K_D	8.2133

2.1.2. Con el Modelo Transitorio en ambos ejes

Se sabe que:

$$\Delta T_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta E'_q + K_{2a} \Delta E'_d \quad (2.20)$$

$$\Delta E'_q = \frac{K_3}{(1 + K_3 T'_{do,s})} \Delta E'_{fd} - \frac{K_3 K_4}{(1 + K_3 T'_{do,s})} \Delta \delta + \frac{K_3 K_7}{(1 + K_3 T'_{do,s})} \Delta E'_d \quad (2.21)$$

$$\Delta E'_d = -\frac{K_{3a} K_9}{(1 + K_{3a} T'_{qa,s})} \Delta \delta - \frac{K_{3a} K_8}{(1 + K_{3a} T'_{qa,s})} \Delta E'_q \quad (2.22)$$

$$\Delta V_t = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q + K_{6a} \Delta E'_d \quad (2.23)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta V_q \\ \Delta V_d \end{bmatrix} = \frac{1}{K} \begin{bmatrix} R_e & (X'_d + X'_e) \\ -(X'_q + X'_e) & R_e \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} \Delta E'_q \\ \Delta E'_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} |V_s| \text{Sen}(\delta_o - \alpha) \Delta \delta \\ |V_s| \text{Cos}(\delta_o - \alpha) \Delta \delta \end{bmatrix} \right\} \quad (2.24)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta V'_q \\ \Delta V'_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & X'_q \\ X'_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_q \\ \Delta V_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta E'_q \\ \Delta E'_d \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Remplazando (2.24) y (2.25) en (2.14) y desarrollando se obtiene:

$$\Delta P_e = K_\alpha \Delta \delta + K_\beta \Delta E'_q + K_\chi \Delta E'_d \quad (2.26)$$

Donde:

$$K_\beta = \left(\frac{1}{K} \right) \left[- (V_{d_0} + R_e I_{d_0} - X'_e I_{q_0}) (X'_q + X'_e) + (V_{q_0} + I_{d_0} X'_e + R_e I_{q_0}) R_e \right]$$

$$K_\chi = \left(\frac{1}{K} \right) \left[(V_{d_0} + R_e I_{d_0} - X'_e I_{q_0}) R_e + (V_{q_0} + I_{d_0} X'_e + R_e I_{q_0}) (X'_d + X'_e) \right]$$

$$K_{\alpha} = |V_s| \left[\begin{array}{l} \left[\left[\begin{array}{l} (V_{d_0} + R_e I_{d_0} - X_e I_{q_0}) R_e \\ + (V_{q_0} + I_{d_0} X_e + R_e I_{q_0}) (X'_d + X_e) \end{array} \right] \left(\frac{1}{K} \right) - I_{d_0} \right] \text{Cos}(\delta_0 - \alpha) \\ + \left[\left[\begin{array}{l} -(V_{d_0} + R_e I_{d_0} - X_e I_{q_0}) (X'_q + X_e) \\ + (V_{q_0} + I_{d_0} X_e + R_e I_{q_0}) R_e \end{array} \right] \left(\frac{1}{K} \right) - I_{q_0} \right] \text{Sen}(\delta_0 - \alpha) \end{array} \right]$$

Remplazando (2.23) y (2.26) en (2.7) se obtiene:

$$\Delta E'_{fd} = \left[\begin{array}{l} \frac{K_{S1}(sT_1+1)(sT_3+1)(sT_8+1)K_p sT_{W2}}{(sT_2+1)(sT_4+1)(sT_9+1)^4(1+sT_4)(sT_{W2}+1)} \left[\frac{1}{sT_i} + 1 \right] \Delta \omega \\ + \frac{K_p}{(1+sT_4)} \left\{ \frac{K_{\alpha} K_{S1}(sT_1+1)(sT_3+1)K_{S2} sT_{W4}}{(sT_2+1)(sT_4+1)(sT_7+1)(sT_{W4}+1)} \left[\frac{1}{sT_i} + 1 \right] \left\{ -1 + \frac{K_{S3}(sT_8+1)}{(sT_9+1)^4} \right\} \right. \\ \left. - K_5 \left[\frac{1}{sT_i} + 1 \right] \right\} \Delta \delta \\ + \left\{ \frac{K_6 K_p}{(1+sT_4)} \left[\frac{1}{sT_i} + 1 \right] \right. \\ \left. + \frac{(K_{\beta} K_{S1} sT_1 + 1)(sT_3+1)K_{S2} sT_{W4} K_p}{(sT_2+1)(sT_4+1)(sT_7+1)(sT_{W4}+1)(1+sT_4)} \left[\frac{1}{sT_i} + 1 \right] \left\{ -1 + \frac{K_{S3}(sT_8+1)}{(sT_9+1)^4} \right\} \right\} \Delta E'_q \\ + \left\{ \frac{K_{S3} K_p}{(1+sT_4)} \left[\frac{1}{sT_i} + 1 \right] \right. \\ \left. + \frac{K_{\alpha} K_{S1}(sT_1+1)(sT_3+1)K_{S2} sT_{W4} K_p}{(sT_2+1)(sT_4+1)(sT_7+1)(sT_{W4}+1)(1+sT_4)} \left[\frac{1}{sT_i} + 1 \right] \left\{ -1 + \frac{K_{S3}(sT_8+1)}{(sT_9+1)^4} \right\} \right\} \Delta E'_d \end{array} \right] \quad (2.27)$$

Desarrollando las ecuaciones (2.21), (2.22) y (2.27) en (2.20) se obtiene:

$$\Delta T_e = \left[\begin{array}{l} \left[K_1 + K_2 \left[\varepsilon 1 - \left(\frac{\omega_{os}}{\omega_0} \right) \delta 2 \right] + K_{2a} K_{3a} \left\{ K_8 \left[\left(\frac{\omega_{os}}{\omega_0} \right) \delta 2 - \varepsilon 1 \right] - K_9 \right\} \left[\frac{1}{1 + \left(\omega_{os} K_{3a} T'_{qo} \right)^2} \right] \right] \right] \Delta \delta \\ - K_8 K_{2a} K_{3a} \left\{ \left(\frac{\omega_0}{\omega_{os}} \right) \varepsilon 2 + \delta 1 \right\} \left[\frac{\omega_{os} K_{3a} T'_{qo}}{1 + \left(\omega_{os} K_{3a} T'_{qo} \right)^2} \right] \left(\frac{\omega_{os}}{\omega_0} \right) \end{array} \right] \Delta \delta$$

$$+ \left[\begin{array}{l} -K_{2a} K_{3a} \left\{ K_8 \left[\left(\frac{\omega_{os}}{\omega_0} \right) \delta 2 - \varepsilon 1 \right] - K_9 \right\} \left[\frac{\omega_{os} K_{3a} T'_{qo}}{1 + \left(\omega_{os} K_{3a} T'_{qo} \right)^2} \right] \left(\frac{\omega_0}{\omega_{os}} \right) \\ + \left[K_2 \left[\varepsilon 2 \left(\frac{\omega_0}{\omega_{os}} \right) + \delta 1 \right] - K_8 K_{2a} K_{3a} \left\{ \left(\frac{\omega_0}{\omega_{os}} \right) \varepsilon 2 + \delta 1 \right\} \left[\frac{1}{1 + \left(\omega_{os} K_{3a} T'_{qo} \right)^2} \right] \right] \right] \Delta \omega$$

Las constantes $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \delta_1$ y δ_2 , así como el desarrollo detallado de las ecuaciones precedentes, se precisan en anexos.

Remplazando los parámetros de los reguladores y los Coeficientes de Estabilidad Permanente se obtienen los siguientes coeficientes de amortiguamiento y sincronización para la Central Cañón del Pato con el modelo de cuarto orden de la máquina síncrona:

Tabla 2.5 Coeficientes de Amortiguamiento y Sincronización con el modelo de Cuarto Orden

K_S	0.9024
K_D	13.6181

2.1.3. Con el Modelo Subtransitorio en ambos ejes

Se sabe que:

$$\Delta T_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta E_q'' + K_{2a} \Delta E_d'' \quad (2.28)$$

$$\Delta E_q' = \left[\begin{array}{l} \frac{1}{(1 + T_{do}' s)} \Delta E_{fd} + \frac{K_{10a} R_E}{(1 + T_{do}' s)} \Delta E_d'' \\ - \frac{K_{10a} (X_E + X_q'')}{(1 + T_{do}' s)} \Delta E_q'' + \frac{K_{10a} K_{11a}}{(1 + T_{do}' s)} \Delta \delta \end{array} \right] \quad (2.29)$$

$$\Delta E_d' = \left[\frac{K_{10} K_{11}}{(1 + T_{qo}' s)} \Delta \delta + \frac{K_{10} R_E}{(1 + T_{qo}' s)} \Delta E_q'' + \frac{K_{10} (X_E + X_d'')}{(1 + T_{qo}' s)} \Delta E_d'' \right] \quad (2.30)$$

$$\Delta E_q'' = \left[\frac{K_3}{(1 + K_3 T_{do}'' s)} \Delta E_d' + \frac{K_3 K_7}{(1 + K_3 T_{do}'' s)} \Delta E_d'' - \frac{K_3 K_4}{(1 + K_3 T_{do}'' s)} \Delta \delta \right] \quad (2.31)$$

$$\Delta E_d'' = \left[- \frac{K_{3a} K_9}{(1 + K_{3a} T_{qo}'' s)} \Delta \delta - \frac{K_{3a} K_8}{(1 + K_{3a} T_{qo}'' s)} \Delta E_q'' + \frac{K_{3a}}{(1 + K_{3a} T_{qo}'' s)} \Delta E_d' \right] \quad (2.32)$$

$$\Delta V_t = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E_q'' + K_{6a} \Delta E_d'' \quad (2.33)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta I_q \\ \Delta I_d \end{bmatrix} = \frac{1}{K} \begin{bmatrix} R_e & (X_d' + X_e) \\ -(X_q' + X_e) & R_e \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} \Delta E_q' \\ \Delta E_d' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} |V_s| \text{Sen}(\delta_o - \alpha) \Delta \delta \\ |V_s| \text{Cos}(\delta_o - \alpha) \Delta \delta \end{bmatrix} \right\} \quad (2.34)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta V_q \\ \Delta V_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & X_q'' \\ X_d'' & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_q \\ \Delta I_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta E_q'' \\ \Delta E_d'' \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Remplazando (2.34) y (2.35) en (2.14) y desarrollando se obtiene:

$$\Delta P_e = K_\alpha \Delta \delta + K_\beta \Delta E_q'' + K_\gamma \Delta E_d'' \quad (2.36)$$

Donde:

$$K_\alpha = |V_s| \left[\begin{aligned} & \left[\begin{aligned} & (V_{d_0} + R_e I_{d_0} - X_e I_{q_0}) R_e \\ & + (V_{q_0} + I_{d_0} X_e + R_e I_{q_0}) (X_d'' + X_e) \end{aligned} \right] \left(\frac{1}{K} \right) - I_{d_0} \right] \text{Cos}(\delta_0 - \alpha) \\ & + \left[\begin{aligned} & -(V_{d_0} + R_e I_{d_0} - X_e I_{q_0}) (X_q'' + X_e) \\ & + (V_{q_0} + I_{d_0} X_e + R_e I_{q_0}) R_e \end{aligned} \right] \left(\frac{1}{K} \right) - I_{q_0} \right] \text{Sen}(\delta_0 - \alpha) \end{aligned} \right]$$

$$K_\beta = \left(\frac{1}{K} \right) \left[-(V_{d_0} + R_e I_{d_0} - X_e I_{q_0}) (X_q'' + X_e) + (V_{q_0} + I_{d_0} X_e + R_e I_{q_0}) R_e \right]$$

$$K_\gamma = \left(\frac{1}{K} \right) \left[(V_{d_0} + R_e I_{d_0} - X_e I_{q_0}) R_e + (V_{q_0} + I_{d_0} X_e + R_e I_{q_0}) (X_d'' + X_e) \right]$$

Reemplazando (2.33) y (2.36) en (2.7) se obtiene:

$$\Delta E_{fd} = \left[\begin{aligned} & \frac{K_{S1} (sT_1 + 1) (sT_3 + 1) (sT_8 + 1) K_p sT_{W2}}{(sT_2 + 1) (sT_4 + 1) (sT_9 + 1)^4 (1 + sT_4) (sT_{W2} + 1)} \left(\frac{1}{sT_i} + 1 \right) \Delta \omega_r \\ & + \frac{K_p}{(1 + sT_4)} \left(\frac{1}{sT_i} + 1 \right) \left\{ K_\alpha \left[\begin{aligned} & \frac{-K_{S1} (sT_1 + 1) (sT_3 + 1) K_{S2} sT_{W4}}{(sT_2 + 1) (sT_4 + 1) (sT_7 + 1) (sT_{W4} + 1)} \\ & + \frac{K_{S3} K_{S1} K_{S2} sT_{W4} (sT_1 + 1) (sT_3 + 1) (sT_8 + 1)}{(sT_7 + 1) (sT_{W4} + 1) (sT_2 + 1) (sT_4 + 1) (sT_9 + 1)^4} \end{aligned} \right] - K_5 \right\} \Delta \delta \\ & + \frac{K_p}{(1 + sT_4)} \left\{ -K_6 \left(\frac{1}{sT_i} + 1 \right) \right. \\ & \quad \left. + K_\beta \left[\begin{aligned} & \frac{K_{S1} (sT_1 + 1) (sT_3 + 1) K_{S2} sT_{W4}}{(sT_2 + 1) (sT_4 + 1) (sT_7 + 1) (sT_{W4} + 1)} \\ & + \frac{K_{S3} K_{S1} K_{S2} sT_{W4} (sT_1 + 1) (sT_3 + 1) (sT_8 + 1)}{(sT_7 + 1) (sT_{W4} + 1) (sT_2 + 1) (sT_4 + 1) (sT_9 + 1)^4} \end{aligned} \right] \left(\frac{1}{sT_i} + 1 \right) \right\} \Delta E_q'' \\ & + \frac{K_p}{(1 + sT_4)} \left\{ -K_{6a} \left(\frac{1}{sT_i} + 1 \right) \right. \\ & \quad \left. + K_\gamma \left[\begin{aligned} & -K_{S1} \left(\frac{sT_1 + 1}{sT_2 + 1} \right) \left(\frac{sT_3 + 1}{sT_4 + 1} \right) \left(\frac{K_{S2}}{sT_7 + 1} \right) \left(\frac{sT_{W4}}{sT_{W4} + 1} \right) \right] \left(\frac{1}{sT_i} + 1 \right) \right\} \Delta E_d'' \end{aligned} \right] \quad (2.37)$$

Desarrollando las ecuaciones (2.29), (2.30), (2.31), (2.32) y (2.37) en (2.28) se obtiene:

$$\Delta T_e = K_S \Delta \delta + K_D \Delta \omega_r$$

$$K_S = \left[\begin{aligned} & K_1 + \frac{\left\{ K_{2a} K_{3asb} (K_{10sb} K_{11sb} - K_{9sb}) \left[1 - \omega_{os}^2 T'_{q_0} K_{3asb} T''_{q_0} - K_{10sb} K_{3asb} (X_e + X_d) \right] - \omega_{os}^2 T'_{q_0} K_{2a} K_{3asb} K_{9sb} (T'_{q_0} + K_{3asb} T''_{q_0}) \right\}}{\left[1 - \omega_{os}^2 T'_{q_0} K_{3asb} T''_{q_0} - K_{10sb} K_{3asb} (X_e + X_d) \right]^2 + \left[\omega_{os} (T'_{q_0} + K_{3asb} T''_{q_0}) \right]^2} \\ & + \left[K_2 + \frac{\left\{ K_{2a} K_{3asb} (K_{10sb} R_e - K_{8sb}) \left[1 - \omega_{os}^2 T'_{q_0} K_{3asb} T''_{q_0} - K_{10sb} K_{3asb} (X_e + X_d) \right] - \omega_{os}^2 K_{2a} K_{3asb} K_{8sb} T'_{q_0} (T'_{q_0} + K_{3asb} T''_{q_0}) \right\}}{\left[1 - \omega_{os}^2 T'_{q_0} K_{3asb} T''_{q_0} - K_{10sb} K_{3asb} (X_e + X_d) \right]^2 + \left[\omega_{os} (T'_{q_0} + K_{3asb} T''_{q_0}) \right]^2} \right] \left[\varepsilon 1 - \delta 2 \left(\frac{\omega_{os}}{\omega_0} \right) \right] \\ & + \frac{\omega_{os} \left[K_{2a} K_{3asb} K_{8sb} T'_{q_0} \left[1 - \omega_{os}^2 T'_{q_0} K_{3asb} T''_{q_0} - K_{10sb} K_{3asb} (X_e + X_d) \right] + K_{2a} K_{3asb} (K_{10sb} R_e - K_{8sb}) (T'_{q_0} + K_{3asb} T''_{q_0}) \right]}{\left[1 - \omega_{os}^2 T'_{q_0} K_{3asb} T''_{q_0} - K_{10sb} K_{3asb} (X_e + X_d) \right]^2 + \left[\omega_{os} (T'_{q_0} + K_{3asb} T''_{q_0}) \right]^2} \left[\varepsilon 2 + \delta 1 \left(\frac{\omega_{os}}{\omega_0} \right) \right] \end{aligned} \right]$$

$$K_D = \left\{ \begin{aligned} & \frac{\omega_{os} \left[K_{2a} K_{3asb} K_{9sb} T'_{q_0} \left[1 - \omega_{os}^2 T'_{q_0} K_{3asb} T''_{q_0} - K_{10sb} K_{3asb} (X_e + X_d) \right] + K_{2a} K_{3asb} (K_{10sb} K_{11sb} - K_{9sb}) (T'_{q_0} + K_{3asb} T''_{q_0}) \right]}{\left[1 - \omega_{os}^2 T'_{q_0} K_{3asb} T''_{q_0} - K_{10sb} K_{3asb} (X_e + X_d) \right]^2 + \left[\omega_{os} (T'_{q_0} + K_{3asb} T''_{q_0}) \right]^2} \left(\frac{\omega_0}{\omega_{os}} \right) \\ & + \frac{\omega_{os} \left[K_{2a} K_{3asb} K_{8sb} T'_{q_0} \left[1 - \omega_{os}^2 T'_{q_0} K_{3asb} T''_{q_0} - K_{10sb} K_{3asb} (X_e + X_d) \right] + K_{2a} K_{3asb} (K_{10sb} R_e - K_{8sb}) (T'_{q_0} + K_{3asb} T''_{q_0}) \right]}{\left[1 - \omega_{os}^2 T'_{q_0} K_{3asb} T''_{q_0} - K_{10sb} K_{3asb} (X_e + X_d) \right]^2 + \left[\omega_{os} (T'_{q_0} + K_{3asb} T''_{q_0}) \right]^2} \left(\delta 2 - \varepsilon 1 \left(\frac{\omega_0}{\omega_{os}} \right) \right) \\ & + \left[K_2 + \frac{\left\{ K_{2a} K_{3asb} (K_{10sb} R_e - K_{8sb}) \left[1 - \omega_{os}^2 T'_{q_0} K_{3asb} T''_{q_0} - K_{10sb} K_{3asb} (X_e + X_d) \right] - \omega_{os}^2 K_{2a} K_{3asb} K_{8sb} T'_{q_0} (T'_{q_0} + K_{3asb} T''_{q_0}) \right\}}{\left[1 - \omega_{os}^2 T'_{q_0} K_{3asb} T''_{q_0} - K_{10sb} K_{3asb} (X_e + X_d) \right]^2 + \left[\omega_{os} (T'_{q_0} + K_{3asb} T''_{q_0}) \right]^2} \right] \left[\delta 1 + \varepsilon 2 \left(\frac{\omega_0}{\omega_{os}} \right) \right] \end{aligned} \right\}$$

Las constantes $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \delta_1$ y δ_2 , así como el desarrollo detallado de las ecuaciones precedentes, se precisan en anexos.

Remplazando los parámetros de los reguladores y los Coeficientes de Estabilidad Permanente se obtienen los siguientes coeficientes de amortiguamiento y sincronización para la Central Cañón del Pato con el modelo de cuarto orden de la máquina síncrona:

Tabla 2.6 Coeficientes de Amortiguamiento y Sincronización con el modelo de Sexto Orden

K_S	0.9112
K_D	18.0044

2.2. Cálculo de la Matriz de Espacio de Estado

Ahora se desarrollará el procedimiento para determinar el espacio de estado y los correspondientes eigenvalores, del sistema eléctrico de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato.

En el regulador de tensión y en el estabilizador de sistemas de potencia se han utilizado variables intermedias ($\Delta X_1, \Delta X_2, \Delta X_3, \dots, \Delta X_7$) que han permitido determinar la matriz de estado de este sistema:

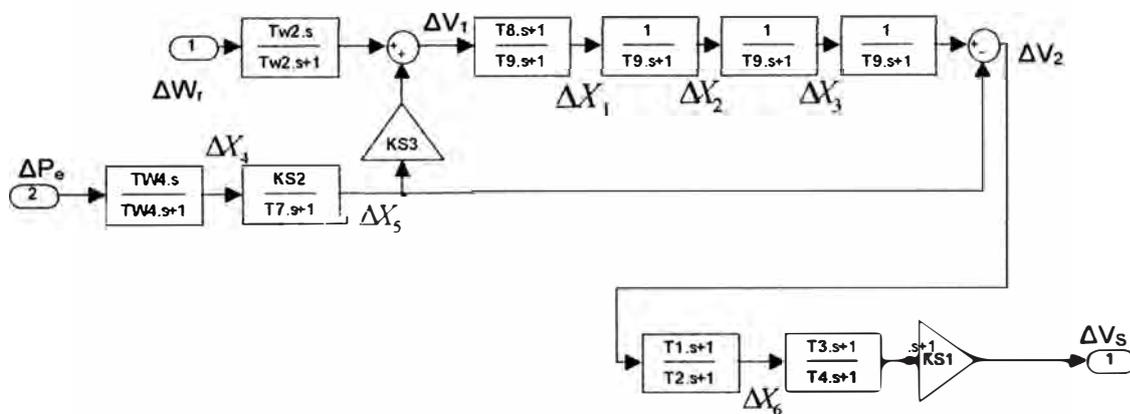


Fig. 2.6 Estabilizador de Sistemas de Potencia

De la Fig. 2.6:

$$\bullet \quad \Delta X_4 = \left(\frac{sTW_4}{sTW_4 + 1} \right) \Delta P_e$$

$$(sTW_4 + 1)\Delta X_4 = (sTW_4)\Delta P_e$$

$$TW_4\Delta \dot{X}_4 + \Delta X_4 = TW_4\Delta \dot{P}_e$$

$$\Delta \dot{X}_4 = \Delta \dot{P}_e - \frac{1}{TW_4} \Delta X_4 \tag{2.38}$$

- $$\Delta X_5 = \left(\frac{KS_2}{1 + sT_7} \right) \Delta X_4$$

$$(1 + sT_7) \Delta X_5 = KS_2 \Delta X_4$$

$$\Delta X_5 + T_7 \Delta \dot{X}_5 = KS_2 \Delta X_4$$

$$T_7 \Delta \dot{X}_5 = KS_2 \Delta X_4 - \Delta X_5$$

$$\Delta \dot{X}_5 = \frac{KS_2}{T_7} \Delta X_4 - \frac{1}{T_7} \Delta X_5 \quad (2.39)$$

- $$\Delta V_1 = KS_3 \Delta X_5 + \left(\frac{sTW_2}{1 + sTW_2} \right) \Delta \omega_r$$

$$(1 + sTW_2) \Delta V_1 = (1 + sTW_2) KS_3 \Delta X_5 + (sTW_2) \Delta \omega_r$$

$$\Delta V_1 + TW_2 \Delta \dot{V}_1 = KS_3 \Delta X_5 + TW_2 KS_3 \Delta \dot{X}_5 + TW_2 \Delta \dot{\omega}_r$$

$$\Delta \dot{V}_1 = \frac{KS_3}{TW_2} \Delta X_5 + KS_3 \Delta \dot{X}_5 + \Delta \dot{\omega}_r - \frac{1}{TW_2} \Delta V_1 \quad (2.40)$$

- $$\Delta X_1 = \left(\frac{1 + sT_8}{1 + sT_9} \right) \Delta V_1$$

$$\left(\Delta X_1 + T_9 \Delta \dot{X}_1 \right) = \left(\Delta V_1 + T_8 \Delta \dot{V}_1 \right)$$

$$\Delta \dot{X}_1 = \frac{1}{T_9} \Delta V_1 + \frac{T_8}{T_9} \Delta \dot{V}_1 - \frac{1}{T_9} \Delta X_1 \quad (2.41)$$

- $$\Delta X_2 = \left(\frac{1}{1 + sT_9} \right) \Delta X_1$$

$$\Delta X_2 + T_9 \Delta \dot{X}_2 = \Delta X_1$$

$$\Delta \dot{X}_2 = \frac{1}{T_9} \Delta X_1 - \frac{1}{T_9} \Delta X_2 \quad (2.42)$$

- $$\Delta X_3 = \left(\frac{1}{1 + sT_9} \right) \Delta X_2$$

$$\Delta X_3 + T_9 \Delta \dot{X}_3 = \Delta X_2$$

$$\Delta \dot{X}_3 = \frac{1}{T_9} \Delta X_2 - \frac{1}{T_9} \Delta X_3 \quad (2.43)$$

$$\bullet \quad \Delta V_2 = \left(\frac{1}{1 + sT_9} \right) \Delta X_3 - \Delta X_5$$

$$(1 + sT_9) \Delta V_2 = \Delta X_3 - (1 + sT_9) \Delta X_5$$

$$\left(\Delta V_2 + T_9 \Delta \dot{V}_2 \right) = \Delta X_3 - \left(\Delta X_5 + T_9 \Delta \dot{X}_5 \right)$$

$$\Delta \dot{V}_2 = \frac{1}{T_9} \Delta X_3 - \frac{1}{T_9} \Delta X_5 - \Delta \dot{X}_5 - \frac{1}{T_9} \Delta V_2 \quad (2.44)$$

$$\bullet \quad \Delta X_6 = \left(\frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \right) \Delta V_2$$

$$(1 + sT_2) \Delta X_6 = (1 + sT_1) \Delta V_2$$

$$\Delta X_6 + T_2 \Delta \dot{X}_6 = \Delta V_2 + T_1 \Delta \dot{V}_2$$

$$\Delta \dot{X}_6 = \frac{1}{T_2} \Delta V_2 + \Delta \dot{V}_2 - \frac{1}{T_2} \Delta X_6 \quad (2.45)$$

$$\bullet \quad \Delta V_s = KS_1 \left(\frac{1 + sT_3}{1 + sT_4} \right) \Delta X_6$$

$$(1 + sT_4) \Delta V_s = KS_1 (1 + sT_3) \Delta X_6$$

$$\Delta V_s + T_4 \Delta \dot{V}_s = KS_1 \Delta X_6 + KS_1 T_3 \Delta \dot{X}_6$$

$$\Delta \dot{V}_s = \frac{1}{T_4} KS_1 \Delta X_6 + \frac{1}{T_4} KS_1 T_3 \Delta \dot{X}_6 - \frac{1}{T_4} \Delta V_s \quad (2.46)$$

Ya se ha visto que:

$$\bullet \quad \Delta \dot{\delta} = \omega_0 \Delta \omega_r \quad (2.47)$$

Remplazando (2.39) en (2.44):

$$\Delta \dot{V}_2 = \frac{1}{T_9} \Delta X_3 - \frac{1}{T_9} \Delta X_5 - \left(\frac{KS_2}{T_7} \Delta X_4 - \frac{1}{T_7} \Delta X_5 \right) - \frac{1}{T_9} \Delta V_2$$

$$\Delta \dot{V}_2 = \frac{1}{T_9} \Delta X_3 + \left(\frac{1}{T_7} - \frac{1}{T_9} \right) \Delta X_5 - \frac{KS_2}{T_7} \Delta X_4 - \frac{1}{T_9} \Delta V_2 \quad (2.48)$$

Remplazando (2.48) en (2.45):

$$\begin{aligned} \Delta \dot{X}_6 &= \frac{1}{T_2} \Delta V_2 + \left(\frac{1}{T_9} \Delta X_3 + \left(\frac{1}{T_7} - \frac{1}{T_9} \right) \Delta X_5 - \frac{KS_2}{T_7} \Delta X_4 - \frac{1}{T_9} \Delta V_2 \right) - \frac{1}{T_2} \Delta X_6 \\ \Delta \dot{X}_6 &= \left[\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_9} \right) \Delta V_2 + \frac{1}{T_9} \Delta X_3 + \left(\frac{1}{T_7} - \frac{1}{T_9} \right) \Delta X_5 - \frac{KS_2}{T_7} \Delta X_4 - \frac{1}{T_2} \Delta X_6 \right] \end{aligned} \quad (2.49)$$

Remplazando (2.49) en (2.46):

$$\begin{aligned} \Delta \dot{V}_S &= \frac{1}{T_4} KS_1 \Delta X_6 + \frac{1}{T_4} KS_1 T_3 \left[\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_9} \right) \Delta V_2 + \frac{1}{T_9} \Delta X_3 + \left(\frac{1}{T_7} - \frac{1}{T_9} \right) \Delta X_5 - \frac{KS_2}{T_7} \Delta X_4 - \frac{1}{T_2} \Delta X_6 \right] - \frac{1}{T_4} \Delta V_S \\ \Delta \dot{V}_S &= \left[\left(\frac{KS_1}{T_4} - \frac{KS_1 T_3}{T_4} \frac{1}{T_2} \right) \Delta X_6 + \frac{KS_1 T_3}{T_4} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_9} \right) \Delta V_2 + \frac{KS_1 T_3}{T_4} \frac{1}{T_9} \Delta X_3 + \frac{KS_1 T_3}{T_4} \left(\frac{1}{T_7} - \frac{1}{T_9} \right) \Delta X_5 - \frac{KS_1 T_3}{T_4} \frac{KS_2}{T_7} \Delta X_4 - \frac{1}{T_4} \Delta V_S \right] \end{aligned} \quad (2.50)$$

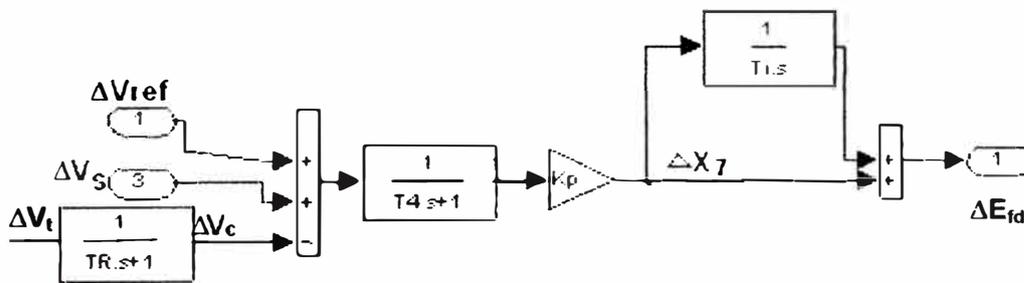


Fig. 2.7 Regulador de Tensión

De la Fig. 2.7:

$$\bullet \quad \Delta V_c = \left(\frac{1}{1 + sT_R} \right) \Delta V_t$$

$$\Delta V_c + T_R \Delta \dot{V}_c = \Delta V_t$$

$$\Delta V_c = \frac{1}{T_R} \Delta V_t - \frac{1}{T_R} \Delta V_c \quad (2.51)$$

$$\bullet \quad \Delta X_7 = \frac{K_p}{1 + sT_4} (\Delta V_S + \Delta V_c + \Delta V_{ref})$$

$$(1 + sT_4) \Delta X_7 = K_p \Delta V_S + K_p \Delta V_c + K_p \Delta V_{ref}$$

$$\Delta X_7 + T_4 \Delta \dot{X}_7 = K_p \Delta V_s + K_p \Delta V_c + K_p \Delta V_{ref}$$

$$\Delta \dot{X}_7 = \frac{K_p}{T_4} \Delta V_s + \frac{K_p}{T_4} \Delta V_c + \frac{K_p}{T_4} \Delta V_{ref} - \frac{1}{T_4} \Delta X_7 \quad (2.52)$$

- $$\Delta E_{fd} = \left(1 + \frac{1}{sT_i}\right) \Delta X_7$$
- $$\Delta E_{fd} = \left(\frac{sT_i + 1}{sT_i}\right) \Delta X_7$$
- $$(sT_i) \Delta E_{fd} = (sT_i + 1) \Delta X_7$$
- $$T_i \Delta \dot{E}_{fd} = T_i \Delta \dot{X}_7 + \Delta X_7$$
- $$\Delta \dot{E}_{fd} = \Delta \dot{X}_7 + \frac{1}{T_i} \Delta X_7 \quad (2.53)$$

Remplazando (2.52) en (2.53):

$$\dot{E}_{fd} = \left(\frac{K_p}{T_4} \Delta V_s + \frac{K_p}{T_4} \Delta V_c + \frac{K_p}{T_4} \Delta V_{ref} - \frac{1}{T_4} \Delta X_7 \right) + \frac{1}{T_i} \Delta X_7$$

$$\dot{E}_{fd} = \frac{K_p}{T_4} \Delta V_s + \frac{K_p}{T_4} \Delta V_c + \frac{K_p}{T_4} \Delta V_{ref} + \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_4} \right) \Delta X_7 \quad (2.54)$$

2.2.1. Con el Modelo Transitorio en eje directo

Ya se ha visto que:

- $$\Delta \dot{\omega}_r = -\frac{K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{K_2}{2H} \Delta E'_q + \frac{1}{2H} \Delta T_m \quad (2.55)$$

- $$\Delta P_e = K_\alpha \Delta \delta + K_\beta \Delta E'_q$$
- $$\Delta \dot{P}_e = K_\alpha \Delta \dot{\delta} + K_\beta \Delta \dot{E}'_q \quad (2.56)$$

- $$\Delta E'_q = \frac{K_3}{(1 + K_3 T'_{do} s)} \{ \Delta E_{fd} - K_4 \Delta \delta \}$$
- $$\Delta \dot{E}'_q + K_3 T'_{do} \Delta \dot{E}'_q = K_3 \Delta \dot{E}_{fd} - K_3 K_4 \Delta \dot{\delta}$$
- $$\Delta \dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{do}} \Delta E_{fd} - \frac{K_4}{T'_{do}} \Delta \delta - \frac{1}{K_3 T'_{do}} \Delta \dot{E}'_q \quad (2.57)$$

- $$\Delta V_c = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q \quad (2.58)$$

Remplazando (2.47) y (2.57) en (2.56):

$$\begin{aligned}\Delta \dot{P}_e &= K_\alpha \Delta \dot{\delta} + K_\beta \Delta \dot{E}'_q \\ \Delta \dot{P}_e &= K_\alpha \omega_0 \Delta \omega_r + K_\beta \left(\frac{1}{T'_{do}} \Delta E'_{fd} - \frac{K_4}{T'_{do}} \Delta \delta - \frac{1}{K_3 T'_{do}} \Delta E'_q \right) \\ \Delta \dot{P}_e &= K_\alpha \omega_0 \Delta \omega_r + \frac{K_\beta}{T'_{do}} \Delta E'_{fd} - \frac{K_\beta K_4}{T'_{do}} \Delta \delta - \frac{K_\beta}{K_3 T'_{do}} \Delta E'_q\end{aligned}\quad (2.59)$$

Remplazando (2.59) en (2.38):

$$\begin{aligned}\Delta \dot{X}_4 &= \Delta \dot{P}_e - \frac{1}{TW_4} \Delta X_4 \\ \Delta \dot{X}_4 &= K_\alpha \omega_0 \Delta \omega_r + \frac{K_\beta}{T'_{do}} \Delta E'_{fd} - \frac{K_\beta K_4}{T'_{do}} \Delta \delta - \frac{K_\beta}{K_3 T'_{do}} \Delta E'_q - \frac{1}{TW_4} \Delta X_4\end{aligned}\quad (2.60)$$

Remplazando (2.39) y (2.55) en (2.40):

$$\begin{aligned}\Delta \dot{V}_1 &= \frac{KS_3}{TW_2} \Delta X_5 + KS_3 \Delta \dot{X}_5 + \Delta \dot{\omega}_r - \frac{1}{TW_2} \Delta V_1 \\ \Delta \dot{V}_1 &= \left[\frac{KS_3}{TW_2} \Delta X_5 + KS_3 \left(\frac{KS_2}{T_7} \Delta X_4 - \frac{1}{T_7} \Delta X_5 \right) \right. \\ &\quad \left. + \left(-\frac{K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{K_2}{2H} \Delta E'_q + \frac{1}{2H} \Delta T_m \right) - \frac{1}{TW_2} \Delta V_1 \right] \\ \Delta \dot{V}_1 &= \left[\left(\frac{KS_3}{TW_2} - \frac{KS_3}{T_7} \right) \Delta X_5 + \frac{KS_3 KS_2}{T_7} \Delta X_4 \right. \\ &\quad \left. - \frac{K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{K_2}{2H} \Delta E'_q + \frac{1}{2H} \Delta T_m - \frac{1}{TW_2} \Delta V_1 \right]\end{aligned}\quad (2.61)$$

Remplazando (2.61) en (2.41):

$$\begin{aligned}\Delta \dot{X}_1 &= \frac{1}{T_9} \Delta V_1 + \frac{T_8}{T_9} \left[\left(\frac{KS_3}{TW_2} - \frac{KS_3}{T_7} \right) \Delta X_5 + \frac{KS_3 KS_2}{T_7} \Delta X_4 - \frac{K_1}{2H} \Delta \delta \right. \\ &\quad \left. - \frac{K_2}{2H} \Delta E'_q + \frac{1}{2H} \Delta T_m - \frac{1}{TW_2} \Delta V_1 \right] - \frac{1}{T_9} \Delta X_1 \\ \Delta \dot{X}_1 &= \left[\left(\frac{1}{T_9} - \frac{T_8}{T_9} \frac{1}{TW_2} \right) \Delta V_1 + \frac{T_8}{T_9} \left(\frac{KS_3}{TW_2} - \frac{KS_3}{T_7} \right) \Delta X_5 + \frac{T_8}{T_9} \frac{KS_3 KS_2}{T_7} \Delta X_4 \right. \\ &\quad \left. - \frac{T_8}{T_9} \frac{K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{T_8}{T_9} \frac{K_2}{2H} \Delta E'_q + \frac{T_8}{T_9} \frac{1}{2H} \Delta T_m - \frac{1}{T_9} \Delta X_1 \right]\end{aligned}\quad (2.62)$$

Remplazando (2.58) en la ecuación (2.51):

$$\Delta \dot{V}_c = \frac{1}{T_R} (K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q) - \frac{1}{T_R} \Delta V_c$$

$$\Delta \dot{V}_c = \frac{K_5}{T_R} \Delta \delta + \frac{K_6}{T_R} \Delta E'_q - \frac{1}{T_R} \Delta V_c \quad (2.63)$$

Remplazando (2.58) en la ecuación (2.54):

$$\begin{aligned} \dot{E}_{fd} &= \left[\begin{array}{l} \frac{K_p}{T_4} \Delta V_s + \frac{K_p}{T_4} (K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q) \\ + \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_4} \right) \Delta X_7 + \frac{K_p}{T_4} \Delta V_{ref} \end{array} \right] \\ \dot{E}_{fd} &= \left[\begin{array}{l} \frac{K_p}{T_4} \Delta V_s + \frac{K_p K_5}{T_4} \Delta \delta + \frac{K_p K_6}{T_4} \Delta E'_q \\ + \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_4} \right) \Delta X_7 + \frac{K_p}{T_4} \Delta V_{ref} \end{array} \right] \end{aligned} \quad (2.64)$$

Resumen de ecuaciones:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{\delta} &= \omega_0 \Delta \omega_r \\ \Delta \dot{\omega}_r &= \left[\begin{array}{l} -\frac{K_{1sb}}{2H} \Delta \delta - \frac{K_2}{2H} \Delta E'_q \\ + \frac{1}{2H} \Delta T_m \end{array} \right] \\ \Delta \dot{E}_{fd} &= \left[\begin{array}{l} \frac{K_p K_5}{T_4} \Delta \delta + \frac{K_p}{T_4} \Delta V_s \\ + \frac{K_p K_6}{T_4} \Delta E'_q + \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_4} \right) \Delta X_7 \\ + \frac{K_p}{T_4} \Delta V_{ref} \end{array} \right] \\ \Delta \dot{V}_c &= \left[\begin{array}{l} \frac{K_5}{T_R} \Delta \delta - \frac{1}{T_R} \Delta V_c \\ + \frac{K_6}{T_R} \Delta E'_q \end{array} \right] \\ \Delta \dot{V}_s &= \left[\begin{array}{l} -\frac{1}{T_4} \Delta V_s + \frac{KS_1 T_3}{T_4} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_9} \right) \Delta V_2 \\ + \frac{KS_1 T_3}{T_4 T_9} \Delta X_3 - \frac{KS_1 T_3 KS_2}{T_4 T_7} \Delta X_4 \\ + \frac{KS_1 T_3}{T_4} \left(\frac{1}{T_7} - \frac{1}{T_9} \right) \Delta X_5 + \frac{KS_1}{T_4} \left(1 - \frac{T_3}{T_2} \right) \Delta X_6 \end{array} \right] \end{aligned}$$

$$\Delta \dot{V}_1 = \begin{bmatrix} -\frac{K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{1}{TW_2} \Delta V_1 - \frac{K_2}{2H} \Delta E'_q \\ + \frac{KS_3 KS_2}{T_7} \Delta X_4 \\ + KS_3 \left(\frac{1}{TW_2} - \frac{1}{T_7} \right) \Delta X_5 + \frac{1}{2H} \Delta T_m \end{bmatrix}$$

$$\Delta \dot{V}_2 = -\frac{1}{T_9} \Delta V_2 + \frac{1}{T_9} \Delta X_3 - \frac{KS_2}{T_7} \Delta X_4 + \left(\frac{1}{T_7} - \frac{1}{T_9} \right) \Delta X_5$$

$$\Delta \dot{E}'_q = -\frac{K_4}{T_{do}} \Delta \delta + \frac{1}{T_{do}} \Delta E'_{fd} - \frac{1}{K_3 T_{do}} \Delta E'_q$$

$$\Delta \dot{X}_1 = \begin{bmatrix} -\frac{T_8 K_1}{2HT_9} \Delta \delta + \frac{1}{T_9} \left(1 - \frac{T_8}{TW_2} \right) \Delta V_1 - \frac{T_8 K_2}{2HT_9} \Delta E'_q - \frac{1}{T_9} \Delta X_1 \\ + \frac{T_8 KS_3 KS_2}{T_9 T_7} \Delta X_4 + \frac{T_8 KS_3}{T_9} \left(\frac{1}{TW_2} - \frac{1}{T_7} \right) \Delta X_5 + \frac{T_8}{T_9 2H} \Delta T_m \end{bmatrix}$$

$$\Delta \dot{X}_2 = \frac{1}{T_9} \Delta X_1 - \frac{1}{T_9} \Delta X_2$$

$$\Delta \dot{X}_3 = \frac{1}{T_9} \Delta X_2 - \frac{1}{T_9} \Delta X_3$$

$$\Delta \dot{X}_4 = \begin{bmatrix} -\frac{K_\beta K_4}{T_{do}} \Delta \delta + K_\alpha \omega_0 \Delta \omega_r + \frac{K_\beta}{T_{do}} \Delta E'_{fd} \\ - \frac{K_\beta}{K_3 T_{do}} \Delta E'_q - \frac{1}{TW_4} \Delta X_4 \end{bmatrix}$$

$$\Delta \dot{X}_5 = \frac{KS_2}{T_7} \Delta X_4 - \frac{1}{T_7} \Delta X_5$$

$$\Delta \dot{X}_6 = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_9} \right) \Delta V_2 + \frac{1}{T_9} \Delta X_3 - \frac{KS_2}{T_7} \Delta X_4 \\ + \left(\frac{1}{T_7} - \frac{1}{T_9} \right) \Delta X_5 - \frac{1}{T_2} \Delta X_6 \end{bmatrix}$$

$$\Delta \dot{X}_7 = \frac{K_p}{T_4} \Delta V_c + \frac{K_p}{T_4} \Delta V_s - \frac{1}{T_4} \Delta X_7 + \frac{K_p}{T_4} \Delta V_{ref}$$

Al igual que en el capítulo anterior, estas ecuaciones permiten determinar el sistema de Espacio de Estado del modelo de tercer orden y su diagrama de bloques. Ambos se muestran a continuación:

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta\delta} \\ \dot{\Delta\omega} \\ \dot{\Delta E'_{fd}} \\ \dot{\Delta V_c} \\ \dot{\Delta V_s} \\ \dot{\Delta V_1} \\ \dot{\Delta V_2} \\ \dot{\Delta E'_q} \\ \dot{\Delta X_1} \\ \dot{\Delta X_2} \\ \dot{\Delta X_3} \\ \dot{\Delta X_4} \\ \dot{\Delta X_5} \\ \dot{\Delta X_6} \\ \dot{\Delta X_7} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_4 & 0 & 0 & 0 & a_5 & 0 & 0 & a_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_7 \\ a_8 & 0 & 0 & a_9 & 0 & 0 & 0 & a_{10} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{11} & 0 & a_{12} & 0 & 0 & 0 & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} & 0 \\ a_{17} & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{18} & 0 & a_{19} & 0 & 0 & 0 & a_{20} & a_{21} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{22} & 0 & 0 & 0 & a_{23} & a_{24} & a_{25} & 0 & 0 \\ a_{26} & 0 & a_{27} & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{28} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{29} & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{30} & 0 & a_{31} & a_{22} & 0 & 0 & a_{32} & a_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{23} & a_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{23} & a_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{34} & a_{35} & a_{36} & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{37} & 0 & 0 & 0 & a_{38} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{39} & a_{40} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{41} & 0 & 0 & 0 & a_{23} & a_{42} & a_{25} & a_{43} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & a_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega_r \\ \Delta E'_{fd} \\ \Delta V_c \\ \Delta V_s \\ \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta E'_q \\ \Delta X_1 \\ \Delta X_2 \\ \Delta X_3 \\ \Delta X_4 \\ \Delta X_5 \\ \Delta X_6 \\ \Delta X_7 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{2H} & 0 \\ 0 & \frac{K_P}{T_4} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{2H} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{T_8}{T_9 2H} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_P}{T_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_m \\ \Delta V_{ref} \end{bmatrix}$$

Fig. 2.8 Sistema de Espacio de Estado con el Modelo de Tercer Orden

Donde:

$$a_1 = \omega_0$$

$$a_2 = -\frac{K_1}{2H}$$

$$a_3 = -\frac{K_2}{2H}$$

$$a_4 = \frac{K_P K_5}{T_4}$$

$$a_5 = \frac{K_P}{T_4}$$

$$a_6 = \frac{K_P K_6}{T_4}$$

$$a_7 = \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_4} \right)$$

$$a_8 = \frac{K_5}{T_R}$$

$$a_9 = -\frac{1}{T_R}$$

$$a_{10} = \frac{K_6}{T_R}$$

$$a_{11} = -\frac{1}{T_4}$$

$$a_{12} = \frac{KS_1 T_3}{T_4} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_9} \right)$$

$$a_{13} = \frac{KS_1 T_3}{T_4 T_9}$$

$$a_{14} = -\frac{KS_1 T_3 KS_2}{T_4 T_7}$$

$$a_{15} = \frac{KS_1 T_3}{T_4} \left(\frac{1}{T_7} - \frac{1}{T_9} \right)$$

$$a_{16} = \frac{KS_1}{T_4} \left(1 - \frac{T_3}{T_2} \right)$$

$$a_{17} = -\frac{K_1}{2H}$$

$$a_{18} = -\frac{1}{TW_2}$$

$$a_{19} = -\frac{K_2}{2H}$$

$$a_{20} = \frac{KS_3 KS_2}{T_7}$$

$$a_{21} = KS_3 \left(\frac{1}{TW_2} - \frac{1}{T_7} \right)$$

$$a_{22} = -\frac{1}{T_9}$$

$$a_{23} = \frac{1}{T_9}$$

$$a_{24} = -\frac{KS_2}{T_7}$$

$$a_{25} = \left(\frac{1}{T_7} - \frac{1}{T_9} \right)$$

$$a_{26} = -\frac{K_4}{T_{do}}$$

$$a_{27} = \frac{1}{T_{do}}$$

$$a_{28} = -\frac{1}{K_3 T_{do}}$$

$$a_{29} = -\frac{T_8 K_1}{2HT_9}$$

$$a_{30} = \frac{1}{T_9} \left(1 - \frac{T_8}{TW_2} \right)$$

$$a_{31} = -\frac{T_8 K_2}{2HT_9}$$

$$a_{32} = \frac{T_8 KS_3 KS_2}{T_9 T_7}$$

$$a_{33} = \frac{T_8 KS_3}{T_9} \left(\frac{1}{TW_2} - \frac{1}{T_7} \right)$$

$$a_{34} = -\frac{K_\beta K_4}{T_{do}}$$

$$a_{35} = K_\alpha \omega_0$$

$$a_{36} = \frac{K_\beta}{T_{do}}$$

$$a_{37} = -\frac{K_\beta}{K_3 T_{do}}$$

$$a_{38} = -\frac{1}{TW_4}$$

$$a_{39} = \frac{KS_2}{T_7}$$

$$a_{40} = -\frac{1}{T_7}$$

$$a_{41} = \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_9} \right)$$

$$a_{42} = -\frac{KS_2}{T_7}$$

$$a_{43} = -\frac{1}{T_2}$$

$$a_{44} = \frac{K_P}{T_4}$$

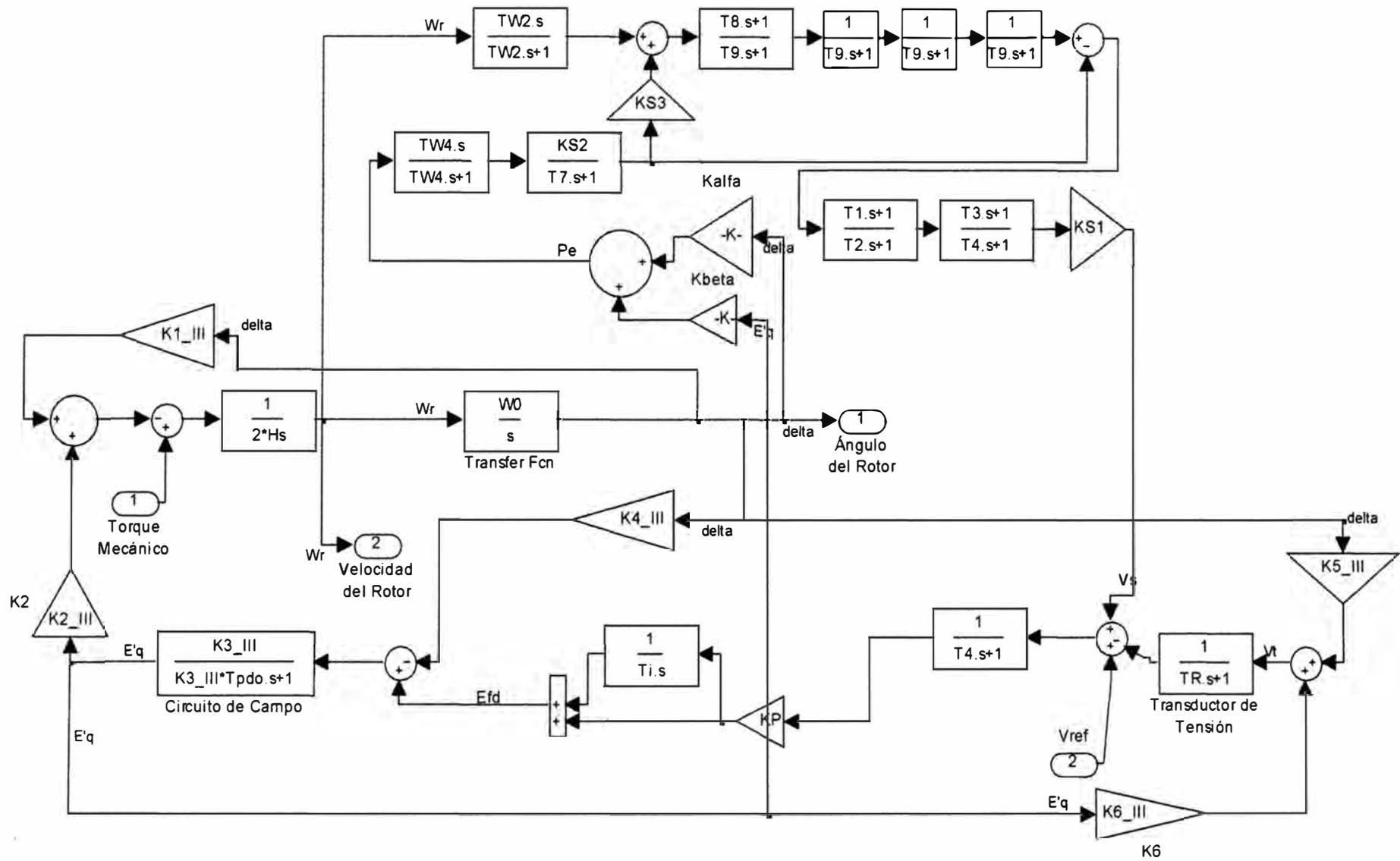


Fig. 2.9 Modelo Transitorio de Tercer Orden

2.2.2. Con el Modelo Transitorio en ambos ejes

Ya se ha visto que:

$$\bullet \quad \Delta \dot{\omega}_r = -\frac{K_{1sb}}{2H} \Delta \delta - \frac{K_2}{2H} \Delta E'_q - \frac{K_{2a}}{2H} \Delta E'_d + \frac{1}{2H} \Delta T'_m \quad (2.65)$$

$$\bullet \quad \Delta P_e = K_\alpha \Delta \delta + K_\beta \Delta E'_q + K_\gamma \Delta E'_d$$

$$\Delta \dot{P}_e = K_\alpha \Delta \dot{\delta} + K_\beta \Delta \dot{E}'_q + K_\gamma \Delta \dot{E}'_d \quad (2.66)$$

$$\bullet \quad \Delta E'_q = \frac{K_3}{(1 + K_3 T'_{do,s})} \left\{ \Delta E_{fd} - K_4 \Delta \delta + K_7 \Delta E'_d \right\}$$

$$\Delta E'_q + K_3 T'_{do} \Delta \dot{E}'_q = K_3 \Delta E_{fd} - K_3 K_4 \Delta \delta + K_3 K_7 \Delta E'_d$$

$$\Delta \dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{do}} \Delta E_{fd} - \frac{K_4}{T'_{do}} \Delta \delta + \frac{K_7}{T'_{do}} \Delta E'_d - \frac{1}{K_3 T'_{do}} \Delta E'_q \quad (2.67)$$

$$\bullet \quad \Delta E'_d = \frac{K_{3a}}{(1 + K_{3a} T'_{qo,s})} \left\{ -K_8 \Delta E'_q - K_9 \Delta \delta \right\}$$

$$\Delta E'_d + K_{3a} T'_{qo} \Delta \dot{E}'_d = -K_{3a} K_8 \Delta E'_q - K_{3a} K_9 \Delta \delta$$

$$\Delta \dot{E}'_d = -\frac{K_8}{T'_{qo}} \Delta E'_q - \frac{K_9}{T'_{qo}} \Delta \delta - \frac{1}{K_{3a} T'_{qo}} \Delta E'_d \quad (2.68)$$

$$\bullet \quad \Delta V_t = K_5 \Delta \delta + K_{6a} \Delta E'_d + K_6 \Delta E'_q \quad (2.69)$$

Remplazando (2.47), (2.67) y (2.68) en (2.66):

$$\begin{aligned} \Delta \dot{P}_e &= K_\alpha \Delta \dot{\delta} + K_\beta \Delta \dot{E}'_q + K_\gamma \Delta \dot{E}'_d \\ \Delta \dot{P}_e &= \left[K_\alpha \omega_0 \Delta \omega_r + K_\beta \left(\frac{1}{T'_{do}} \Delta E_{fd} - \frac{K_4}{T'_{do}} \Delta \delta + \frac{K_7}{T'_{do}} \Delta E'_d - \frac{1}{K_3 T'_{do}} \Delta E'_q \right) \right. \\ &\quad \left. + K_\gamma \left(-\frac{K_8}{T'_{qo}} \Delta E'_q - \frac{K_9}{T'_{qo}} \Delta \delta - \frac{1}{K_{3a} T'_{qo}} \Delta E'_d \right) \right] \\ \Delta \dot{P}_e &= \left[-\left(\frac{K_\beta K_4}{T'_{do}} + \frac{K_\gamma K_9}{T'_{qo}} \right) \Delta \delta + K_\alpha \omega_0 \Delta \omega_r + \frac{K_\beta}{T'_{do}} \Delta E_{fd} \right. \\ &\quad \left. - \left(\frac{K_\beta}{K_3 T'_{do}} + \frac{K_\gamma K_8}{T'_{qo}} \right) \Delta E'_q + \left(\frac{K_\beta K_7}{T'_{do}} - \frac{K_\gamma}{K_{3a} T'_{qo}} \right) \Delta E'_d \right] \quad (2.70) \end{aligned}$$

Remplazando (2.70) en (2.38):

$$\Delta \dot{X}_4 = \Delta \dot{P}_e - \frac{1}{TW_4} \Delta X_4$$

$$\Delta \dot{X}_4 = \begin{bmatrix} -\left(\frac{K_\beta K_4}{T_{do}'} + \frac{K_z K_9}{T_{qo}'}\right) \Delta \delta + K_\alpha \omega_0 \Delta \omega_r + \frac{K_\beta}{T_{do}'} \Delta E_{fd}' \\ -\left(\frac{K_\beta}{K_3 T_{do}'} + \frac{K_z K_8}{T_{qo}'}\right) \Delta E_q' + \left(\frac{K_\beta K_7}{T_{do}'} - \frac{K_z}{K_{3a} T_{qo}'}\right) \Delta E_d' - \frac{1}{TW_4} \Delta X_4 \end{bmatrix} \quad (2.71)$$

Remplazando (2.39) y (2.65) en (2.40):

$$\Delta \dot{V}_1 = \frac{KS_3}{TW_2} \Delta X_5 + KS_3 \Delta \dot{X}_5 + \Delta \dot{\omega}_r - \frac{1}{TW_2} \Delta V_1$$

$$\Delta \dot{V}_1 = \begin{bmatrix} \frac{KS_3}{TW_2} \Delta X_5 + KS_3 \left(\frac{KS_2}{T_7} \Delta X_4 - \frac{1}{T_7} \Delta X_5 \right) \\ + \left(-\frac{K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{K_2}{2H} \Delta E_q' - \frac{K_{2a}}{2H} \Delta E_d' + \frac{1}{2H} \Delta T_m \right) - \frac{1}{TW_2} \Delta V_1 \end{bmatrix}$$

$$\Delta \dot{V}_1 = \begin{bmatrix} -\frac{K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{1}{TW_2} \Delta V_1 - \frac{K_2}{2H} \Delta E_q' - \frac{K_{2a}}{2H} \Delta E_d' \\ + \frac{KS_3 KS_2}{T_7} \Delta X_4 + \left(\frac{KS_3}{TW_2} - \frac{KS_3}{T_7} \right) \Delta X_5 + \frac{1}{2H} \Delta T_m \end{bmatrix} \quad (2.72)$$

Remplazando (2.72) en (2.41):

$$\Delta \dot{X}_1 = \frac{1}{T_9} \Delta V_1 + \frac{T_8}{T_9} \left(\left(\frac{KS_3}{TW_2} - \frac{KS_3}{T_7} \right) \Delta X_5 + \frac{KS_3 KS_2}{T_7} \Delta X_4 - \frac{K_1}{2H} \Delta \delta \right) - \frac{1}{T_9} \Delta X_1$$

$$\Delta \dot{X}_1 = \begin{bmatrix} -\frac{T_8}{T_9} \frac{K_1}{2H} \Delta \delta + \left(\frac{1}{T_9} - \frac{T_8}{T_9} \frac{1}{TW_2} \right) \Delta V_1 - \frac{1}{T_9} \Delta X_1 + \frac{T_8}{T_9} \frac{KS_3 KS_2}{T_7} \Delta X_4 \\ + \frac{T_8}{T_9} \left(\frac{KS_3}{TW_2} - \frac{KS_3}{T_7} \right) \Delta X_5 - \frac{T_8}{T_9} \frac{K_2}{2H} \Delta E_q' - \frac{T_8}{T_9} \frac{K_{2a}}{2H} \Delta E_d' + \frac{T_8}{T_9} \frac{1}{2H} \Delta T_m \end{bmatrix} \quad (2.73)$$

Remplazando (2.69) en la ecuación (2.51):

$$\Delta \dot{V}_c = \frac{1}{T_R} (K_5 \Delta \delta + K_{6a} \Delta E_d' + K_6 \Delta E_q') - \frac{1}{T_R} \Delta V_c$$

$$\Delta \dot{V}_c = \frac{K_5}{T_R} \Delta \delta - \frac{1}{T_R} \Delta V_c + \frac{K_6}{T_R} \Delta E_q' + \frac{K_{6a}}{T_R} \Delta E_d' \quad (2.74)$$

Remplazando (2.69) en la ecuación (2.54):

$$\begin{aligned}
 \dot{E}_{fd} &= \left[\begin{aligned} &\frac{K_p}{T_4} \Delta V_s + \frac{K_p}{T_4} (K_5 \Delta \delta + K_{6a} \Delta E'_d + K_6 \Delta E'_q) \\ &+ \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_4} \right) \Delta X_7 + \frac{K_p}{T_4} \Delta V_{ref} \end{aligned} \right] \\
 \dot{E}'_d &= \left[\begin{aligned} &\frac{K_p K_5}{T_4} \Delta \delta + \frac{K_p}{T_4} \Delta V_s + \frac{K_p K_6}{T_4} \Delta E'_q \\ &+ \frac{K_p K_{6a}}{T_4} \Delta E'_d + \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_4} \right) \Delta X_7 + \frac{K_p}{T_4} \Delta V_{ref} \end{aligned} \right]
 \end{aligned} \tag{2.75}$$

Resumen de ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 \Delta \dot{\delta} &= \omega_0 \Delta \omega_r \\
 \Delta \dot{\omega}_r &= -\frac{K_{1sb}}{2H} \Delta \delta - \frac{K_2}{2H} \Delta E'_q - \frac{K_{2a}}{2H} \Delta E'_d + \frac{1}{2H} \Delta T'_m \\
 \dot{E}'_{fd} &= \left[\begin{aligned} &\frac{K_p K_5}{T_4} \Delta \delta + \frac{K_p}{T_4} \Delta V_s + \frac{K_p K_6}{T_4} \Delta E'_q \\ &+ \frac{K_p K_{6a}}{T_4} \Delta E'_d + \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_4} \right) \Delta X_7 + \frac{K_p}{T_4} \Delta V_{ref} \end{aligned} \right] \\
 \Delta \dot{V}_c &= \frac{K_5}{T_R} \Delta \delta - \frac{1}{T_R} \Delta V_c + \frac{K_6}{T_R} \Delta E'_q + \frac{K_{6a}}{T_R} \Delta E'_d \\
 \Delta \dot{V}_s &= \left[\begin{aligned} &-\frac{1}{T_4} \Delta V_s + \frac{KS_1 T_3}{T_4} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_9} \right) \Delta V_2 + \frac{KS_1 T_3}{T_4} \frac{1}{T_9} \Delta X_3 - \frac{KS_1 T_3}{T_4} \frac{KS_2}{T_7} \Delta X_4 \\ &+ \frac{KS_1 T_3}{T_4} \left(\frac{1}{T_7} - \frac{1}{T_9} \right) \Delta X_5 + \left(\frac{KS_1}{T_4} - \frac{KS_1 T_3}{T_4} \frac{1}{T_2} \right) \Delta X_6 \end{aligned} \right] \\
 \Delta \dot{V}_1 &= \left[\begin{aligned} &-\frac{K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{1}{TW_2} \Delta V_1 - \frac{K_2}{2H} \Delta E'_q - \frac{K_{2a}}{2H} \Delta E'_d \\ &+ \frac{KS_3 KS_2}{T_7} \Delta X_4 + \left(\frac{KS_3}{TW_2} - \frac{KS_3}{T_7} \right) \Delta X_5 + \frac{1}{2H} \Delta T'_m \end{aligned} \right] \\
 \Delta \dot{V}_2 &= -\frac{1}{T_9} \Delta V_2 + \frac{1}{T_9} \Delta X_3 - \frac{KS_2}{T_7} \Delta X_4 + \left(\frac{1}{T_7} - \frac{1}{T_9} \right) \Delta X_5 \\
 \Delta \dot{E}'_q &= -\frac{K_4}{T'_{do}} \Delta \delta + \frac{1}{T'_{do}} \Delta E'_{fd} - \frac{1}{K_3 T'_{do}} \Delta E'_q + \frac{K_7}{T'_{do}} \Delta E'_d \\
 \Delta \dot{E}'_d &= -\frac{K_9}{T'_{qo}} \Delta \delta - \frac{K_8}{T'_{qo}} \Delta E'_q - \frac{1}{K_{3a} T'_{qo}} \Delta E'_d
 \end{aligned}$$

$$\Delta \dot{X}_1 = \begin{bmatrix} -\frac{T_8 K_1}{2HT_9} \Delta \delta + \left(\frac{1}{T_9} - \frac{T_8}{T_9} \frac{1}{TW_2} \right) \Delta V_1 \\ -\frac{T_8 K_2}{2HT_9} \Delta E'_q - \frac{T_8 K_{2a}}{T_9 2H} \Delta E'_d \\ -\frac{1}{T_9} \Delta X_1 + \frac{T_8 K S_3 K S_2}{T_9 T_7} \Delta X_4 \\ + \frac{T_8}{T_9} \left(\frac{K S_3}{TW_2} - \frac{K S_3}{T_7} \right) \Delta X_5 \\ + \frac{T_8}{T_9 2H} \Delta T_m \end{bmatrix}$$

$$\Delta \dot{X}_2 = \frac{1}{T_9} \Delta X_1 - \frac{1}{T_9} \Delta X_2$$

$$\Delta \dot{X}_3 = \frac{1}{T_9} \Delta X_2 - \frac{1}{T_9} \Delta X_3$$

$$\Delta \dot{X}_4 = \begin{bmatrix} -\left(\frac{K_\beta K_4}{T'_{db}} + \frac{K_z K_9}{T'_{qo}} \right) \Delta \delta + K_\alpha \omega_0 \Delta \omega_r \\ + \frac{K_\beta}{T'_{db}} \Delta E'_{fd} - \left(\frac{K_\beta}{K_3 T'_{db}} + \frac{K_z K_8}{T'_{qo}} \right) \Delta E'_q \\ + \left(\frac{K_\beta K_7}{T'_{db}} - \frac{K_z}{K_{3a} T'_{qo}} \right) \Delta E'_d \\ - \frac{1}{TW_3} \Delta X_4 \end{bmatrix}$$

$$\Delta \dot{X}_5 = \frac{K S_2}{T_7} \Delta X_4 - \frac{1}{T_7} \Delta X_5$$

$$\Delta \dot{X}_6 = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_9} \right) \Delta V_2 + \frac{1}{T_9} \Delta X_3 \\ -\frac{K S_2}{T_7} \Delta X_4 + \left(\frac{1}{T_7} - \frac{1}{T_9} \right) \Delta X_5 \\ - \frac{1}{T_2} \Delta X_6 \end{bmatrix}$$

$$\Delta \dot{X}_7 = \frac{K_p}{T_4} \Delta V_c + \frac{K_p}{T_4} \Delta V_s - \frac{1}{T_4} \Delta X_7 + \frac{K_p}{T_4} \Delta V_{ref}$$

A continuación se muestran el sistema de Espacio de Estado del modelo de cuarto orden y su diagrama de bloques, determinados en base a las ecuaciones precedentes:

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta\delta} \\ \dot{\Delta\omega} \\ \dot{\Delta E_{fd}} \\ \dot{\Delta V_c} \\ \dot{\Delta V_s} \\ \dot{\Delta V_1} \\ \dot{\Delta V_2} \\ \dot{\Delta E'_q} \\ \dot{\Delta E'_d} \\ \dot{\Delta X_1} \\ \dot{\Delta X_2} \\ \dot{\Delta X_3} \\ \dot{\Delta X_4} \\ \dot{\Delta X_5} \\ \dot{\Delta X_6} \\ \dot{\Delta X_7} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_3 & a_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_5 & 0 & 0 & 0 & a_6 & 0 & 0 & a_7 & a_8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_9 \\ a_{10} & 0 & 0 & a_{11} & 0 & 0 & 0 & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{14} & 0 & a_{15} & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{16} & a_{17} & a_{18} & a_{19} & 0 \\ a_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{20} & 0 & a_3 & a_4 & 0 & 0 & 0 & a_{21} & a_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{24} & a_{25} & a_{26} & 0 & 0 \\ a_{27} & 0 & a_{28} & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{29} & a_{30} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{31} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{32} & a_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{35} & 0 & a_{36} & a_{37} & a_{23} & 0 & 0 & a_{38} & a_{39} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{22} & a_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{22} & a_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{40} & a_{41} & a_{42} & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{43} & a_{44} & 0 & 0 & 0 & a_{45} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{46} & a_{47} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{48} & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{49} & a_{50} & a_{26} & a_{51} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_6 & a_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{52} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega_r \\ \Delta E_{fd} \\ \Delta V_c \\ \Delta V_s \\ \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta E'_q \\ \Delta E'_d \\ \Delta X_1 \\ \Delta X_2 \\ \Delta X_3 \\ \Delta X_4 \\ \Delta X_5 \\ \Delta X_6 \\ \Delta X_7 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{2H} & 0 \\ 0 & \frac{K_p}{T_4} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{2H} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{T_8}{T_9 2H} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_p}{T_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_m \\ \Delta V_{ref} \end{bmatrix}$$

Fig. 2.10 Sistema de Espacio de Estado con el Modelo de Cuarto Orden

Donde:

$$\begin{aligned}
 a_1 &= \omega_0 & a_2 &= -\frac{K_1}{2H} & a_3 &= -\frac{K_2}{2H} \\
 a_4 &= -\frac{K_{2a}}{2H} & a_5 &= \frac{K_p K_5}{T_4} & a_6 &= \frac{K_p}{T_4} \\
 a_7 &= \frac{K_p K_6}{T_4} & a_8 &= \frac{K_p K_{6a}}{T_4} & a_9 &= \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_4} \right) \\
 a_{10} &= \frac{K_5}{T_R} & a_{11} &= -\frac{1}{T_R} & a_{12} &= \frac{K_6}{T_R} \\
 a_{13} &= \frac{K_{6a}}{T_R} & a_{14} &= -\frac{1}{T_4} & a_{15} &= \frac{KS_1 T_3}{T_4} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_9} \right) \\
 a_{16} &= \frac{KS_1 T_3}{T_4 T_9} & a_{17} &= -\frac{KS_1 T_3 KS_2}{T_4 T_7} & a_{18} &= \frac{KS_1 T_3}{T_4} \left(\frac{1}{T_7} - \frac{1}{T_9} \right) \\
 a_{20} &= -\frac{1}{TW_2} & a_{21} &= \frac{KS_3 KS_2}{T_7} & a_{22} &= KS_3 \left(\frac{1}{TW_2} - \frac{1}{T_7} \right) \\
 a_{23} &= -\frac{1}{T_9} & a_{24} &= \frac{1}{T_9} & a_{25} &= -\frac{KS_2}{T_7} \\
 a_{26} &= \left(\frac{1}{T_7} - \frac{1}{T_9} \right) & a_{27} &= -\frac{K_4}{T'_{do}} & a_{28} &= \frac{1}{T'_{do}} \\
 a_{29} &= -\frac{1}{K_3 T'_{do}} & a_{30} &= \frac{K_7}{T'_{do}} & a_{31} &= -\frac{K_9}{T'_{qo}} \\
 a_{32} &= -\frac{K_8}{T'_{qo}} & a_{33} &= -\frac{1}{K_{3a} T'_{qo}} & a_{34} &= -\frac{T_8 K_1}{2HT_9} \\
 a_{35} &= \frac{1}{T_9} \left(1 - \frac{T_8}{TW_2} \right) & a_{36} &= -\frac{T_8 K_2}{2HT_9} & a_{37} &= -\frac{T_8 K_{2a}}{T_9 2H} \\
 a_{38} &= \frac{T_8 KS_3 KS_2}{T_9 T_7} & a_{39} &= \frac{T_8 KS_3}{T_9} \left(\frac{1}{TW_2} - \frac{1}{T_7} \right) & a_{40} &= -\frac{1}{T'_{do}} (K_\beta K_4 + K_x K_9) \\
 a_{41} &= K_a \omega_0 & a_{42} &= \frac{K_\beta}{T'_{do}} & a_{43} &= -\frac{1}{T'_{do}} \left(\frac{K_\beta}{K_3} + K_x K_8 \right) \\
 a_{44} &= \frac{1}{T'_{do}} \left(K_\beta K_7 - \frac{K_x}{K_{3a}} \right) & a_{45} &= -\frac{1}{TW_4} & a_{46} &= \frac{KS_2}{T_7} \\
 a_{47} &= -\frac{1}{T_7} & a_{48} &= \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_9} \right) & a_{49} &= \frac{1}{T_9} \\
 a_{50} &= -\frac{KS_2}{T_7} & a_{51} &= -\frac{1}{T_2} & a_{52} &= -\frac{1}{T_4}
 \end{aligned}$$

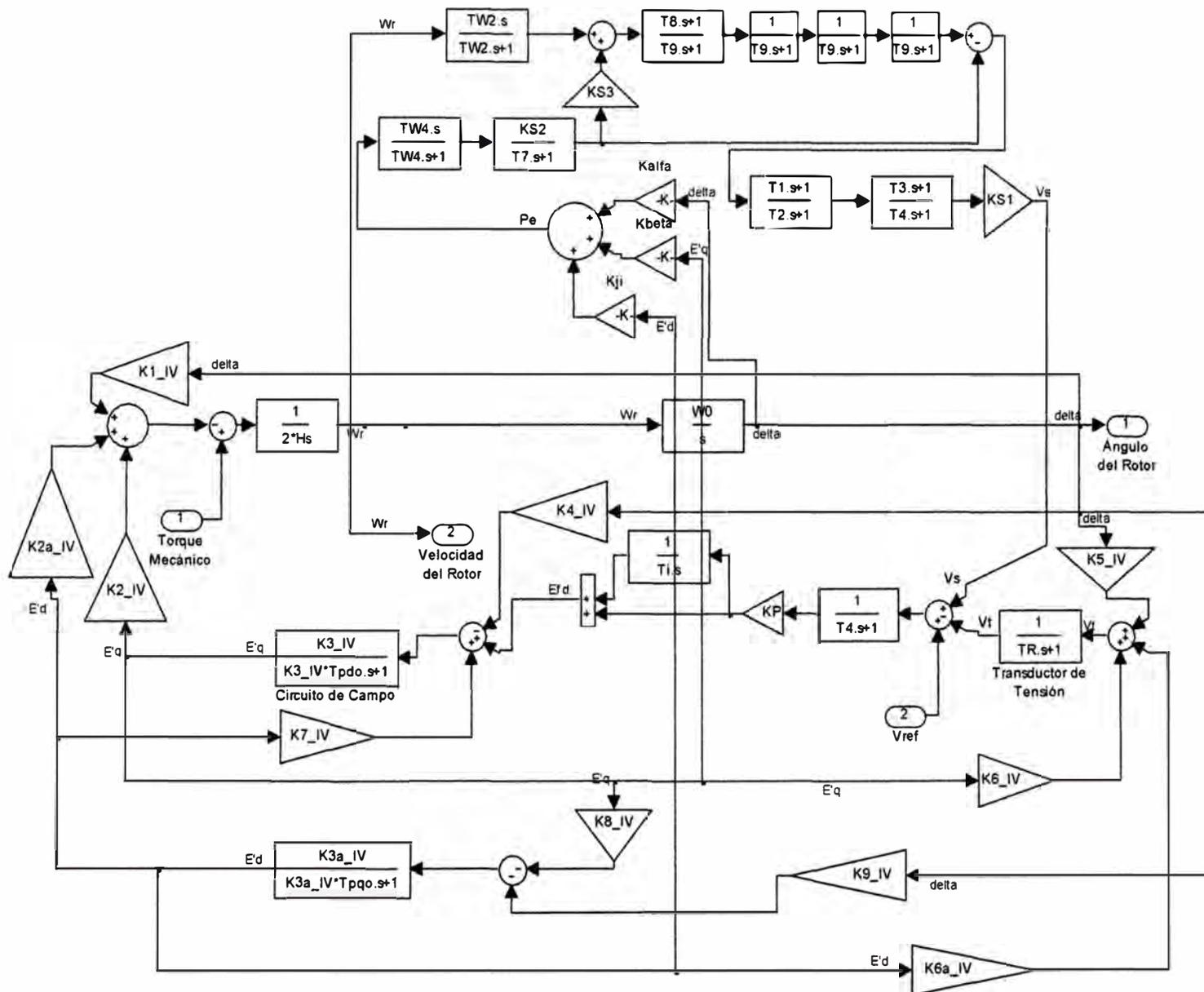


Fig. 2.11 Modelo Transitorio de Cuarto Orden

2.2.3. Con el Modelo Subtransitorio en ambos ejes

Ya se ha visto que:

$$\bullet \quad \Delta \dot{\omega} = -\frac{K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{K_2}{2H} \Delta E'_q - \frac{K_{2a}}{2H} \Delta E'_d + \frac{1}{2H} \Delta T_m \quad (2.76)$$

$$\bullet \quad \begin{aligned} \Delta P_e &= K_\alpha \Delta \delta + K_\beta \Delta E'_q + K_\gamma \Delta E'_d \\ \Delta \dot{P}_e &= K_\alpha \Delta \dot{\delta} + K_\beta \Delta \dot{E}'_q + K_\gamma \Delta \dot{E}'_d \end{aligned} \quad (2.77)$$

$$\bullet \quad \begin{aligned} \Delta E'_q &= \left(\frac{K_3}{1 + sK_3 T'_{d_0}} \right) (\Delta E'_q + K_7 \Delta E'_d - K_4 \Delta \delta) \\ \Delta E'_q + K_3 T'_{d_0} \Delta \dot{E}'_q &= K_3 \Delta E'_q + K_3 K_7 \Delta E'_d - K_3 K_4 \Delta \delta \\ \Delta \dot{E}'_q &= \frac{1}{T'_{d_0}} \Delta E'_q + \frac{K_7}{T'_{d_0}} \Delta E'_d - \frac{K_4}{T'_{d_0}} \Delta \delta + \frac{1}{K_3 T'_{d_0}} \Delta E'_q \end{aligned} \quad (2.78)$$

$$\bullet \quad \begin{aligned} \Delta E'_d &= \left(\frac{K_{3a}}{1 + sK_{3a} T'_{q_0}} \right) (\Delta E'_d - K_8 \Delta E'_q - K_9 \Delta \delta) \\ (1 + sK_{3a} T'_{q_0}) \Delta E'_d &= (K_{3a} \Delta E'_d - K_{3a} K_8 \Delta E'_q - K_{3a} K_9 \Delta \delta) \\ K_{3a} T'_{q_0} \Delta \dot{E}'_d &= K_{3a} \Delta E'_d - K_{3a} K_8 \Delta E'_q - K_{3a} K_9 \Delta \delta - \Delta E'_d \\ \Delta \dot{E}'_d &= \frac{1}{T'_{q_0}} \Delta E'_d - \frac{K_8}{T'_{q_0}} \Delta E'_q - \frac{K_9}{T'_{q_0}} \Delta \delta - \frac{1}{K_{3a} T'_{q_0}} \Delta E'_d \end{aligned} \quad (2.79)$$

$$\bullet \quad \begin{aligned} \Delta E'_q &= \left(\frac{1}{1 + sT'_{d_0}} \right) (\Delta E'_{fd} + K_{10a} R_e \Delta E'_d - K_{10a} (X_e + X'_q) \Delta E'_q + K_{10a} K_{11a} \Delta \delta) \\ \Delta E'_q + T'_{d_0} \Delta \dot{E}'_q &= [\Delta E'_{fd} + K_{10a} R_e \Delta E'_d - K_{10a} (X_e + X'_q) \Delta E'_q + K_{10a} K_{11a} \Delta \delta] \\ \Delta \dot{E}'_q &= \left[\frac{1}{T'_{d_0}} \Delta E'_{fd} + \frac{K_{10a} R_e}{T'_{d_0}} \Delta E'_d - \frac{K_{10a} (X_e + X'_q)}{T'_{d_0}} \Delta E'_q + \frac{K_{10a} K_{11a}}{T'_{d_0}} \Delta \delta - \frac{1}{T'_{d_0}} \Delta E'_q \right] \end{aligned} \quad (2.80)$$

$$\bullet \quad \begin{aligned} \Delta E'_d &= \left(\frac{1}{1 + sT'_{q_0}} \right) (K_{10} R_e \Delta E'_q + K_{10} (X_e + X'_d) \Delta E'_d + K_{10} K_{11} \Delta \delta) \\ (1 + sT'_{q_0}) \Delta E'_d &= (K_{10} R_e \Delta E'_q + K_{10} (X_e + X'_d) \Delta E'_d + K_{10} K_{11} \Delta \delta) \\ \Delta E'_d + T'_{q_0} \Delta \dot{E}'_d &= [K_{10} R_e \Delta E'_q + K_{10} (X_e + X'_d) \Delta E'_d + K_{10} K_{11} \Delta \delta] \end{aligned}$$

$$\Delta \dot{E}_d = \left[\frac{K_{10} R_e}{T_{q_0}^*} \Delta E_q^* + \frac{K_{10} (X_e + X_d)}{T_{q_0}^*} \Delta E_d^* + \frac{K_{10} K_{11}}{T_{q_0}^*} \Delta \delta - \frac{1}{T_{q_0}^*} \Delta E_d^* \right] \quad (2.81)$$

$$\bullet \quad \Delta V_1 = K_5 \Delta \delta + K_{6a} \Delta E_d^* + K_6 \Delta E_q^* \quad (2.82)$$

Remplazando (2.47), (2.78) y (2.79) en (2.77):

$$\begin{aligned} \Delta \dot{P}_e &= K_\alpha \Delta \delta + K_\beta \Delta E_q^* + K_\gamma \Delta E_d^* \\ \Delta \dot{P}_e &= \left[K_\alpha \omega_0 \Delta \omega_r + K_\beta \left(\frac{1}{T_{d_0}^*} \Delta E_q^* + \frac{K_7}{T_{d_0}^*} \Delta E_d^* - \frac{K_4}{T_{d_0}^*} \Delta \delta + \frac{1}{K_3 T_{d_0}^*} \Delta E_q^* \right) \right. \\ &\quad \left. + K_\gamma \left(\frac{1}{T_{q_0}^*} \Delta E_d^* - \frac{K_8}{T_{q_0}^*} \Delta E_q^* - \frac{K_9}{T_{q_0}^*} \Delta \delta - \frac{1}{K_{3a} T_{q_0}^*} \Delta E_d^* \right) \right] \\ \Delta \dot{P}_e &= \left[- \left(\frac{K_\beta K_4}{T_{d_0}^*} + \frac{K_\gamma K_9}{T_{q_0}^*} \right) \Delta \delta + K_\alpha \omega_0 \Delta \omega_r + \frac{K_\beta}{T_{d_0}^*} \Delta E_q^* + \frac{K_\gamma}{T_{q_0}^*} \Delta E_d^* \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{K_\beta}{K_3 T_{d_0}^*} - \frac{K_\gamma K_8}{T_{q_0}^*} \right) \Delta E_q^* + \left(\frac{K_\beta K_7}{T_{d_0}^*} - \frac{K_\gamma}{K_{3a} T_{q_0}^*} \right) \Delta E_d^* \right] \end{aligned} \quad (2.83)$$

Remplazando (2.83) en (2.38):

$$\begin{aligned} \Delta \dot{X}_4 &= \Delta \dot{P}_e - \frac{1}{TW_4} \Delta X_4 \\ \Delta \dot{X}_4 &= \left[- \left(\frac{K_\beta K_4}{T_{d_0}^*} + \frac{K_\gamma K_9}{T_{q_0}^*} \right) \Delta \delta + K_\alpha \omega_0 \Delta \omega_r + \frac{K_\beta}{T_{d_0}^*} \Delta E_q^* + \frac{K_\gamma}{T_{q_0}^*} \Delta E_d^* \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{K_\beta}{K_3 T_{d_0}^*} - \frac{K_\gamma K_8}{T_{q_0}^*} \right) \Delta E_q^* + \left(\frac{K_\beta K_7}{T_{d_0}^*} - \frac{K_\gamma}{K_{3a} T_{q_0}^*} \right) \Delta E_d^* - \frac{1}{TW_4} \Delta X_4 \right] \end{aligned} \quad (2.84)$$

Remplazando (2.39) y (2.76) en (2.40):

$$\begin{aligned} \Delta \dot{V}_1 &= \frac{KS_3}{TW_2} \Delta X_5 + KS_3 \Delta \dot{X}_5 + \Delta \dot{\omega}_r - \frac{1}{TW_2} \Delta V_1 \\ \Delta \dot{V}_1 &= \left[\frac{KS_3}{TW_2} \Delta X_5 + KS_3 \left(\frac{KS_2}{T_7} \Delta X_4 - \frac{1}{T_7} \Delta X_5 \right) + \left(-\frac{K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{K_2}{2H} \Delta E_q^* - \frac{K_{2a}}{2H} \Delta E_d^* + \frac{1}{2H} \Delta T_m \right) - \frac{1}{TW_2} \Delta V_1 \right] \\ \Delta \dot{V}_1 &= \left[-\frac{K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{1}{TW_2} \Delta V_1 - \frac{K_2}{2H} \Delta E_q^* - \frac{K_{2a}}{2H} \Delta E_d^* \right. \\ &\quad \left. + \frac{KS_3 KS_2}{T_7} \Delta X_4 + \left(\frac{KS_3}{TW_2} - \frac{KS_3}{T_7} \right) \Delta X_5 + \frac{1}{2H} \Delta T_m \right] \end{aligned} \quad (2.85)$$

Remplazando (2.85) en (2.41):

$$\Delta \dot{X}_1 = \left[\begin{array}{c} \frac{1}{T_9} \Delta V_1 + \frac{T_8}{T_9} \left(\left(\frac{KS_3}{TW_2} - \frac{KS_3}{T_7} \right) \Delta X_5 + \frac{KS_3 KS_2}{T_7} \Delta X_4 \right) \\ - \frac{K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{K_2}{2H} \Delta E_q' - \frac{K_{2\omega}}{2H} \Delta E_d' + \frac{1}{2H} \Delta T_m - \frac{1}{TW_2} \Delta V_1 \end{array} \right] - \frac{1}{T_9} \Delta X_1$$

$$\Delta \dot{X}_1 = \left[\begin{array}{c} - \frac{T_8 K_1}{T_9 2H} \Delta \delta + \left(\frac{1}{T_9} - \frac{T_8}{T_9} \frac{1}{TW_2} \right) \Delta V_1 - \frac{T_8 K_2}{T_9 2H} \Delta E_q' - \frac{T_8 K_{2\omega}}{T_9 2H} \Delta E_d' \\ - \frac{1}{T_9} \Delta X_1 + \frac{T_8 KS_3 KS_2}{T_9 T_7} \Delta X_4 + \frac{T_8}{T_9} \left(\frac{KS_3}{TW_2} - \frac{KS_3}{T_7} \right) \Delta X_5 + \frac{T_8}{T_9} \frac{1}{2H} \Delta T_m \end{array} \right] \quad (2.86)$$

Remplazando (2.82) en la ecuación (2.51):

$$\Delta \dot{V}_c = \frac{1}{T_R} \left(K_5 \Delta \delta + K_{6a} \Delta E_d' + K_6 \Delta E_q' \right) - \frac{1}{T_R} \Delta V_c$$

$$\Delta \dot{V}_c = \frac{K_5}{T_R} \Delta \delta + \frac{K_{6a}}{T_R} \Delta E_d' + \frac{K_6}{T_R} \Delta E_q' - \frac{1}{T_R} \Delta V_c \quad (2.87)$$

Remplazando (2.82) en la ecuación (2.54):

$$\dot{E}_{fd} = \frac{K_p}{T_4} \Delta V_s + \frac{K_p}{T_4} \left(K_5 \Delta \delta + K_{6a} \Delta E_d' + K_6 \Delta E_q' \right) + \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_4} \right) \Delta X_7 + \frac{K_p}{T_4} \Delta V_{ref}$$

$$\dot{E}_{fd} = \left[\frac{K_5 K_p}{T_4} \Delta \delta + \frac{K_p}{T_4} \Delta V_s + \frac{K_6 K_p}{T_4} \Delta E_q' + \frac{K_{6a} K_p}{T_4} \Delta E_d' + \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_4} \right) \Delta X_7 + \frac{K_p}{T_4} \Delta V_{ref} \right] \quad (2.88)$$

Resumen de ecuaciones:

$$\Delta \dot{\delta} = \omega_0 \Delta \omega_r$$

$$\Delta \dot{\omega}_r = - \frac{K_{1sb}}{2H} \Delta \delta - \frac{K_2}{2H} \Delta E_q' + \frac{1}{2H} \Delta T_m$$

$$\dot{E}_{fd} = \frac{K_p K_5}{T_4} \Delta \delta + \frac{K_p}{T_4} \Delta V_s + \frac{K_p K_6}{T_4} \Delta E_q' + \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_4} \right) \Delta X_7 + \frac{K_p}{T_4} \Delta V_{ref}$$

$$\Delta \dot{V}_c = \frac{K_5}{T_R} \Delta \delta - \frac{1}{T_R} \Delta V_c + \frac{K_6}{T_R} \Delta E_q'$$

$$\Delta \dot{V}_s = \left[\begin{array}{c} - \frac{1}{T_4} \Delta V_s + \frac{KS_1 T_3}{T_4} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_9} \right) \Delta V_2 + \frac{KS_1 T_3}{T_4 T_9} \Delta X_3 - \frac{KS_1 T_3 KS_2}{T_4 T_7} \Delta X_4 \\ + \frac{KS_1 T_3}{T_4} \left(\frac{1}{T_7} - \frac{1}{T_9} \right) \Delta X_5 + \frac{KS_1}{T_4} \left(1 - \frac{T_3}{T_2} \right) \Delta X_6 \end{array} \right]$$

$$\Delta \dot{V}_1 = \left[- \frac{K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{1}{TW_2} \Delta V_1 - \frac{K_2}{2H} \Delta E_q' + \frac{KS_3 KS_2}{T_7} \Delta X_4 + KS_3 \left(\frac{1}{TW_2} - \frac{1}{T_7} \right) \Delta X_5 + \frac{1}{2H} \Delta T_m \right]$$

$$\Delta \dot{V}_2 = - \frac{1}{T_9} \Delta V_2 + \frac{1}{T_9} \Delta X_3 - \frac{KS_2}{T_7} \Delta X_4 + \left(\frac{1}{T_7} - \frac{1}{T_9} \right) \Delta X_5$$

$$\Delta \dot{E}'_q = -\frac{K_4}{T_{do}} \Delta \delta + \frac{1}{T_{do}} \Delta E'_{fd} - \frac{1}{K_3 T_{do}} \Delta E'_q$$

$$\Delta \dot{X}_1 = \begin{bmatrix} -\frac{T_8 K_1}{2HT_9} \Delta \delta + \frac{1}{T_9} \left(1 - \frac{T_8}{TW_2}\right) \Delta V_1 \\ -\frac{T_8 K_2}{2HT_9} \Delta E'_q - \frac{1}{T_9} \Delta X_1 \\ + \frac{T_8 K S_3 K S_2}{T_9 T_7} \Delta X_4 \\ + \frac{T_8 K S_3}{T_9} \left(\frac{1}{TW_2} - \frac{1}{T_7}\right) \Delta X_5 \\ + \frac{T_8}{T_9 2H} \Delta T'_m \end{bmatrix}$$

$$\Delta \dot{X}_2 = \frac{1}{T_9} \Delta X_1 - \frac{1}{T_9} \Delta X_2$$

$$\Delta \dot{X}_3 = \frac{1}{T_9} \Delta X_2 - \frac{1}{T_9} \Delta X_3$$

$$\Delta \dot{X}_4 = \begin{bmatrix} -\frac{K_\beta K_4}{T_{do}} \Delta \delta + K_\alpha \omega_0 \Delta \omega_r + \frac{K_\beta}{T_{do}} \Delta E'_{fd} \\ -\frac{K_\beta}{K_3 T_{do}} \Delta E'_q - \frac{1}{TW_4} \Delta X_4 \end{bmatrix}$$

$$\Delta \dot{X}_5 = \frac{K S_2}{T_7} \Delta X_4 - \frac{1}{T_7} \Delta X_5$$

$$\Delta \dot{X}_6 = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_9}\right) \Delta V_2 + \frac{1}{T_9} \Delta X_3 - \frac{K S_2}{T_7} \Delta X_4 \\ + \left(\frac{1}{T_7} - \frac{1}{T_9}\right) \Delta X_5 - \frac{1}{T_2} \Delta X_6 \end{bmatrix}$$

$$\Delta \dot{X}_7 = \begin{bmatrix} \frac{K_p}{T_4} \Delta V_c + \frac{K_p}{T_4} \Delta V_s \\ -\frac{1}{T_4} \Delta X_7 + \frac{K_p}{T_4} \Delta V_{ref} \end{bmatrix}$$

Al igual que en el capítulo anterior, estas ecuaciones permiten determinar el sistema de Espacio de Estado del modelo de tercer orden y su diagrama de bloques. Ambos se muestran a continuación:

Donde:

$$\begin{aligned}
 a_1 &= \omega_0 & a_2 &= -\frac{K_1}{2H} & a_3 &= -\frac{K_2}{2H} & a_4 &= -\frac{K_{2a}}{2H} & a_5 &= \frac{K_5 K_P}{T_4} & a_6 &= \frac{K_P}{T_4} \\
 a_7 &= \frac{K_6 K_P}{T_4} & a_8 &= \frac{K_6 K_P}{T_4} & a_9 &= \frac{K_{6a} K_P}{T_4} & a_{10} &= \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_4} \right) \\
 a_{11} &= \frac{K_5}{T_R} & a_{12} &= -\frac{1}{T_R} & a_{13} &= \frac{K_6}{T_R} & a_{14} &= \frac{K_{6a}}{T_R} \\
 a_{15} &= -\frac{1}{T_4} & a_{16} &= \frac{KS_1 T_3}{T_4} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_9} \right) & a_{17} &= \frac{KS_1 T_3}{T_4 T_9} & a_{18} &= -\frac{KS_1 T_3 KS_2}{T_4 T_7} \\
 a_{19} &= \frac{KS_1 T_3}{T_4} \left(\frac{1}{T_7} - \frac{1}{T_9} \right) & a_{20} &= \frac{KS_1}{T_4} \left(1 - \frac{T_3}{T_2} \right) & a_{21} &= -\frac{1}{TW_2} & a_{22} &= \frac{KS_3 KS_2}{T_7} \\
 a_{23} &= KS_3 \left(\frac{1}{TW_2} - \frac{1}{T_7} \right) & a_{24} &= -\frac{1}{T_9} & a_{25} &= \frac{1}{T_9} & a_{26} &= -\frac{KS_2}{T_7} & a_{27} &= \left(\frac{1}{T_7} - \frac{1}{T_9} \right) \\
 a_{28} &= \frac{K_{10a} K_{11a}}{T'_{d_0}} & a_{29} &= \frac{1}{T'_{d_0}} & a_{30} &= -\frac{1}{T'_{d_0}} & a_{31} &= -\frac{K_{10a} (X_e + X_q)}{T'_{d_0}} & a_{32} &= \frac{K_{10a} R_e}{T'_{d_0}} \\
 a_{33} &= \frac{K_{10} K_{11}}{T'_{q_0}} & a_{34} &= -\frac{1}{T'_{q_0}} & a_{35} &= \frac{K_{10} R_e}{T'_{q_0}} & a_{36} &= \frac{K_{10} (X_e + X_d)}{T'_{q_0}} \\
 a_{37} &= -\frac{K_4}{T'_{d_0}} & a_{38} &= \frac{1}{T'_{d_0}} & a_{39} &= \frac{1}{K_3 T'_{d_0}} & a_{40} &= \frac{K_7}{T'_{d_0}} & a_{41} &= -\frac{K_9}{T'_{q_0}} & a_{42} &= \frac{1}{T'_{q_0}} & a_{43} &= -\frac{K_8}{T'_{q_0}} \\
 a_{44} &= -\frac{1}{K_{3a} T'_{q_0}} & a_{45} &= -\frac{T_8 K_1}{T_9 2H} & a_{46} &= \frac{1}{T_9} \left(1 - \frac{T_8}{TW_2} \right) & a_{47} &= -\frac{T_8 K_2}{T_9 2H} \\
 a_{48} &= -\frac{T_8 K_{2a}}{T_9 2H} & a_{49} &= \frac{T_8 KS_3 KS_2}{T_9 T_7} & a_{50} &= \frac{KS_3 T_8}{T_9} \left(\frac{1}{TW_2} - \frac{1}{T_7} \right) & a_{51} &= -\left(\frac{K_\beta K_4}{T'_{d_0}} - \frac{K_2 K_9}{T'_{q_0}} \right) \\
 a_{52} &= K_\alpha \omega_0 a_{53} = \frac{K_\beta}{T'_{d_0}} & a_{54} &= \frac{K_z}{T'_{q_0}} & a_{55} &= \left(\frac{K_\beta}{K_3 T'_{d_0}} - \frac{K_z K_8}{T'_{q_0}} \right) & a_{56} &= \left(\frac{K_\beta K_7}{T'_{d_0}} - \frac{K_z}{K_{3a} T'_{q_0}} \right) \\
 a_{57} &= -\frac{1}{TW_4} & a_{58} &= \frac{KS_2}{T_7} & a_{59} &= -\frac{1}{T_7} & a_{60} &= \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_9} \right) & a_{61} &= -\frac{KS_2}{T_7} \\
 a_{62} &= -\frac{1}{T_2} & a_{63} &= \frac{K_P}{T_4}
 \end{aligned}$$

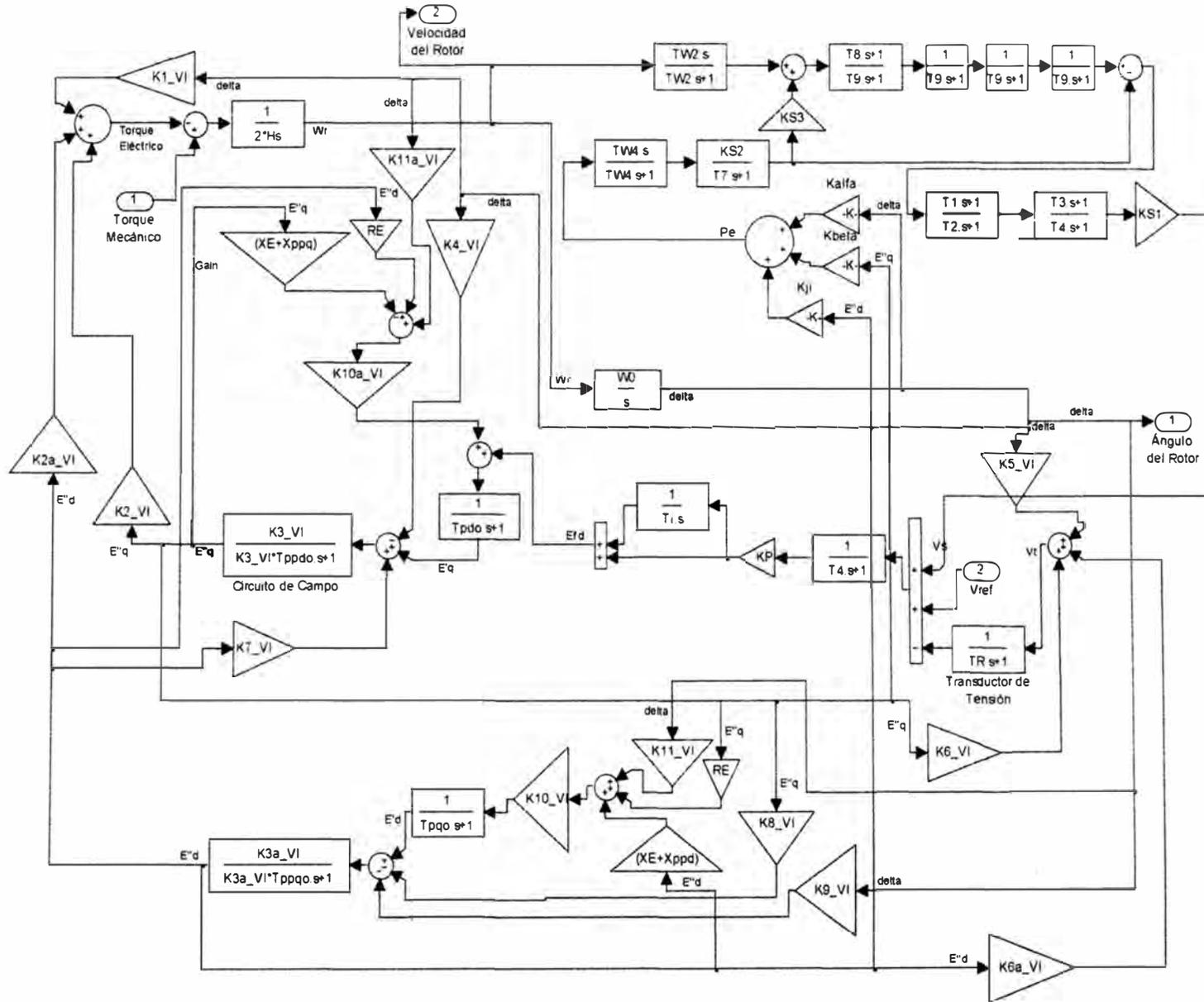


Fig. 2.13 Modelo Subtransitorio

2.3. Calidad de la Energía de la C.H. Cañón del Pato

Se elaboró el diagrama de la Central Cañón el Pato, utilizando los parámetros de cada una de las seis máquinas síncronas que lo conforman, así como de los transformadores y barras, tal como se muestra en el siguiente gráfico:

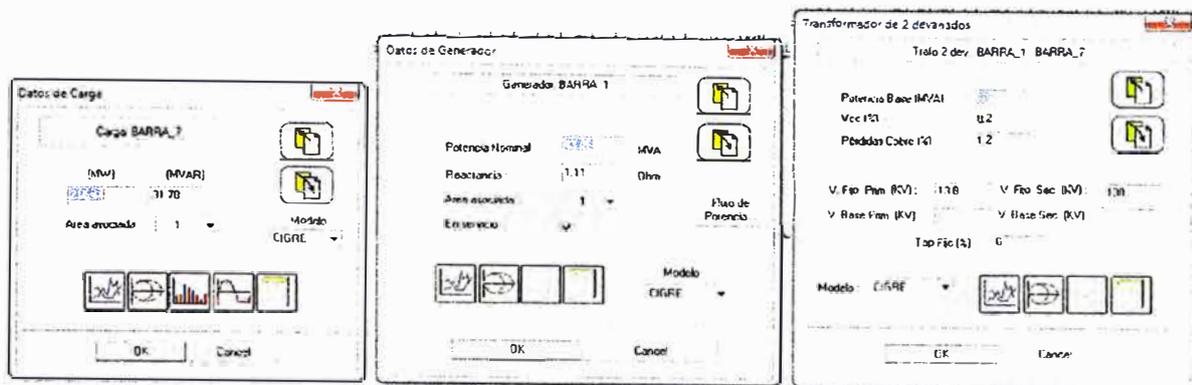


Fig. 2.14 Parámetros de los principales componentes

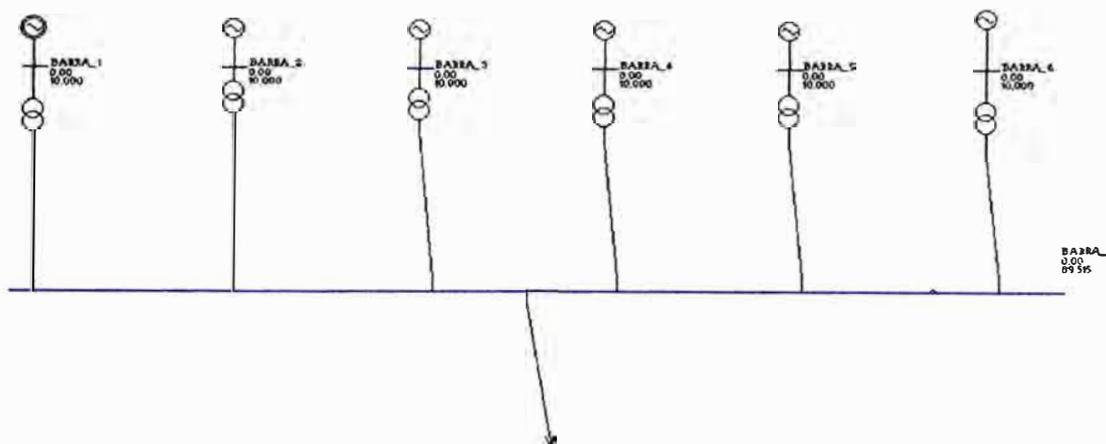


Fig. 2.15 Diagrama de la Central Cañón del Pato

La carga representa el despacho energético de la Central. Para establecer escenarios característicos se utilizaron eventos resaltantes y para ello se escogieron los informes de perturbaciones del SEIN, publicados por el COES, en los cuales la CH Cañón del Pato fuera la protagonista del evento.

Se identificaron cuatro principales, en los años 2008, febrero de 2009, noviembre de 2009 y 2010. En ellos se desconectó la central como consecuencia de fallas o eventos diversos que generaron variaciones sensibles de la tensión del sistema.

2.3.1. Evento 2008

Fecha: Viernes 18 de Enero de 2008

Descripción del Evento: Se desconectó la línea L-1105 (Huallanca – Chimbote1) de 138 kV debido a una falla monofásica en la fase “T” a 10.8 Km de la S.E. Chimbote 1 por contacto de ave con la línea L-1105. Como consecuencia, desconectó la línea L-1103 por sobrecarga al encontrarse fuera de servicio la línea L-1104 por mantenimiento

programado.

Como consecuencia de la salida de las líneas, se desconectó la C.H. Cañón del Pato con 215,44 MW y 31,78 MVAR. La frecuencia del SEIN disminuyó hasta 59,302 Hz. Se produjo una interrupción de 42,52 MW y una reducción de suministros de 83,08 MW.

2.3.2. Evento Febrero 2009

Fecha: Viernes 27 de febrero de 2009

Descripción del Evento: La Central Cañón del Pato se encontraba en operación normal con las Unidades 1, 2, 3, 4, 5, 6, sus líneas L-1103, L-1104 y L-1105 conectadas en la barra "B". En el momento de la falla, la generación total en Cañón del Pato era de 237,53 MW + j 23,81 MVAR.

A las 12:16:43.884, abre automáticamente el interruptor 52-6 de la U6.

A las 12:16:43.886, abre automáticamente el interruptor 52-5 de la U5.

A las 12:16:43.888, abre automáticamente el interruptor 52-4 de la U4.

A las 12:16:43.894, abre automáticamente el interruptor 52-2 de la U2.

A las 12:16:43.895, abre automáticamente el interruptor 52-3 de la U3.

A las 12:16:43.905, abre automáticamente el interruptor 52-1 de la U1.

2.3.3. Evento Noviembre 2009

Fecha: Domingo 22 de noviembre de 2009

Descripción del Evento: Se desconectaron las unidades G1, G3, G4, G5 y G6 de la CH Cañón del Pato y la CT Chiclayo por actuación de su protección del sistema de excitación. A las 19:06 h se desconectó la unidad G2 por actuación de su protección del sistema de excitación. Como consecuencia, la frecuencia del SEIN disminuyó hasta 59,19 Hz. Asimismo los niveles de tensión disminuyeron en las subestaciones de Trujillo Norte y Chimbote 1, lo que ocasionó una interrupción de 15,07 MW y una disminución de 119,50 MW por actuación de su protección de mínima tensión.

Energía de la Central Cañón del Pato al momento de la falla: 237,56 MW + j41 MVAR.

2.3.4. Evento 2010

Fecha: Sábado 08 de mayo de 2010

Descripción del Evento: La Central Cañón del Pato se encontraba en operación normal con las Unidades 1, 2, 3, 4, 5 y 6 y las líneas L-1103, L-1104, L-1127 y L-1132, conectadas en la barra "B". La L-1105 se encontraba en mantenimiento. En el momento de la falla, la generación total en Cañón del Pato era de 221.46 MW + j 33.09 MVAR.

A las 07:38:30.1771 hrs se abre el interruptor de la línea L-1104 por actuación de su protección de distancia.

A las 07:38:43.4917 hrs. se abre el interruptor de la Unidad 2, por actuación de su protección de sobrefrecuencia y sobrevelocidad, con señal de parada total, rechazando

37.97 MW.

A las 07:38:43.5234 hrs. se abre el interruptor de la Unidad 4, por actuación de su protección de sobrefrecuencia y sobrevelocidad, con señal de parada total, rechazando 38.40 MW.

A las 07:38:44.9259 hrs. se abre el interruptor de la Unidad 6, por actuación de su protección de sobrefrecuencia, quedando a tensión y velocidad nominal, rechazando 37.20 MW.

A las 07:38:44.9323 hrs. se abre el interruptor de la Unidad 1, por actuación de su protección de sobrefrecuencia, quedando a tensión y velocidad nominal, rechazando 35.01 MW.

A las 07:38:44.9336 hrs. se abre el interruptor de la Unidad 5, por actuación de su protección de sobrefrecuencia y sobrevelocidad, con señal de parada total, rechazando 36.26 MW.

A las 07:38:44.9411 hrs. se abre el interruptor de la Unidad 3, por actuación de su protección de sobrefrecuencia, quedando a tensión y velocidad nominal, rechazando 37.16 MW.

CAPITULO III

ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se analizarán los resultados obtenidos en los capítulos previos.

En primer lugar se revisará la relación de dependencia de los coeficientes de estabilidad de los sistemas de alto orden para diversas condiciones iniciales de operación.

En segundo lugar se analizarán las curvas de variación del ángulo δ y de la velocidad angular ω_r del rotor de la máquina síncrona en función de tiempo ante perturbaciones en los sistemas de alto orden.

Finalmente se determinarán los modos de oscilación del sistema de prueba con los modelos de alto orden.

3.1. Análisis de la contribución de los Coeficientes de Estabilidad en los sistemas de alto orden

Para poder apreciar la contribución de los Coeficientes de Estabilidad en los sistemas de alto orden, se mostrará el comportamiento de los tres modelos de la máquina síncrona en diferentes puntos de operación del SEIN y diferentes condiciones de operación de la Central.

Para analizar el efecto de las condiciones de operación de la Central en la estabilidad permanente se asumirá un valor constante de la reactancia externa ($X_{12} = 0,42$).

3.1.1. Influencia de Operación de la Central en la Estabilidad del Sistema

Para simular las condiciones de operación de la central se tomará un escenario de despacho de la central con el 75% del valor nominal de la capacidad de generación de la central. En ese sentido, los valores para la potencia activa y reactiva que serán considerados son los siguientes:

Tabla 3.1 Escenario de Simulación

P_1	X_{12}
0,712	0,42
$- 0,351 < Q_1 < 0,702$	

En los siguientes gráficos se puede apreciar la variación de los Coeficientes de Estabilidad Permanente para el escenario de simulación propuesto.

Adicionalmente, con la finalidad de establecer comparaciones y conclusiones, se muestran las figuras Fig. 3. 4 y Fig. 3. 5.

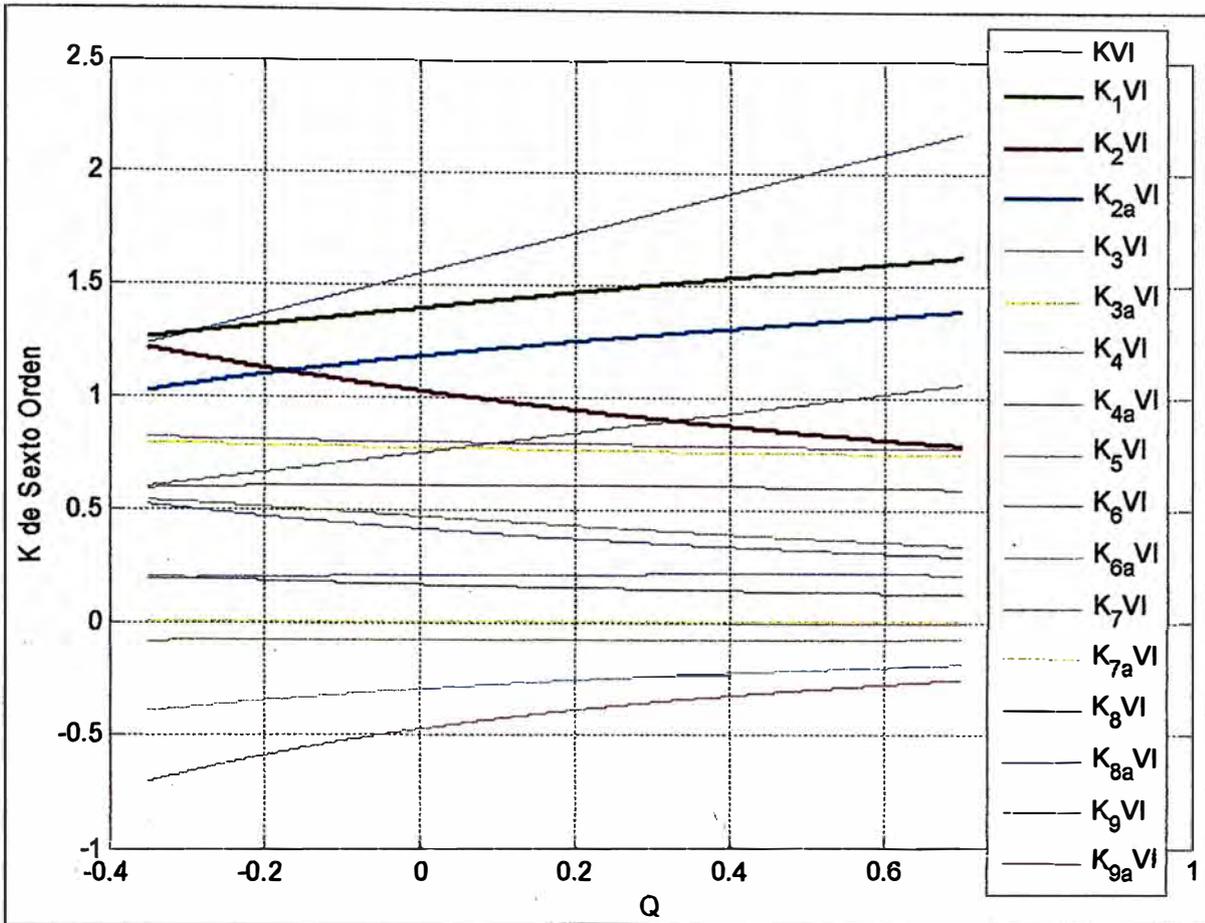


Fig. 3.1 Coeficientes de Estabilidad Permanente del Sistema de Sexto Orden

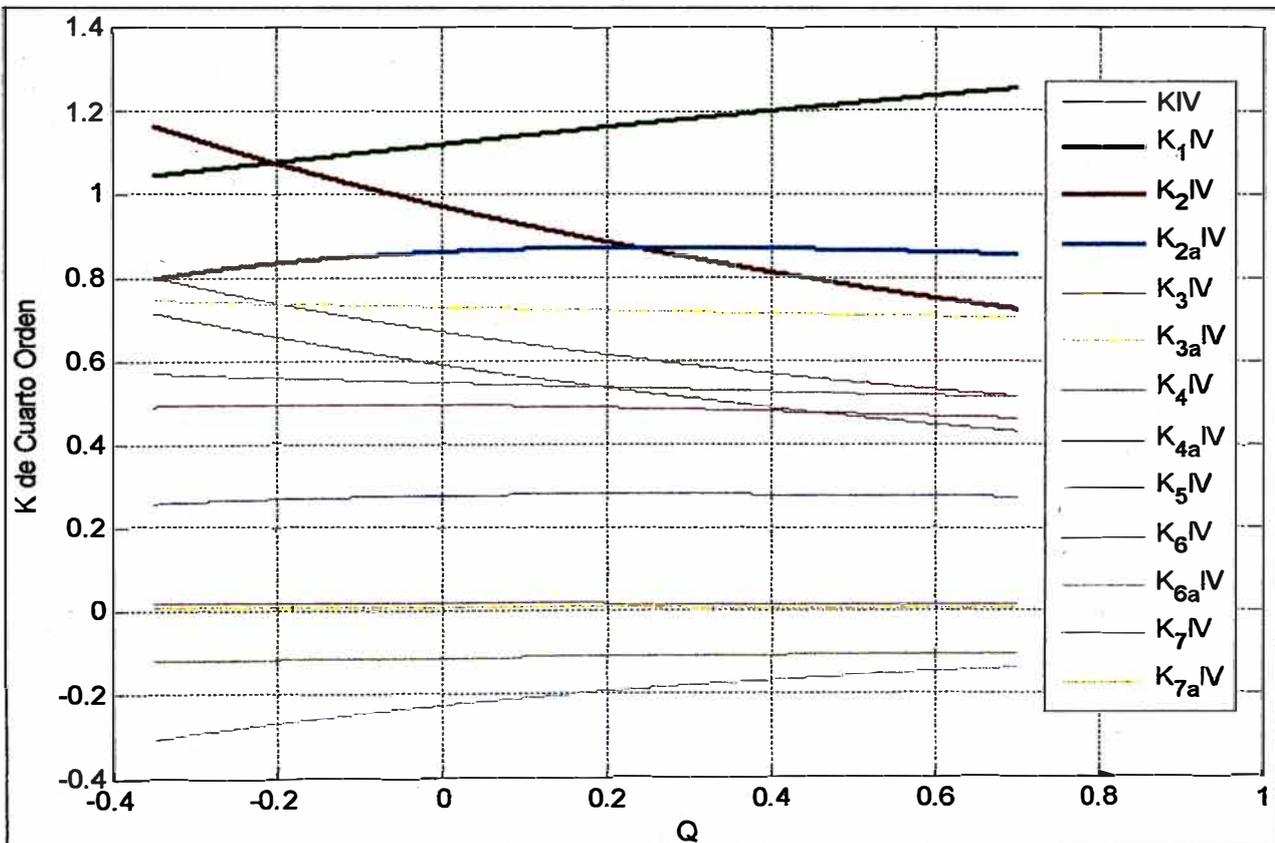


Fig. 3.2 Coeficientes de Estabilidad Permanente del Sistema de Cuarto Orden

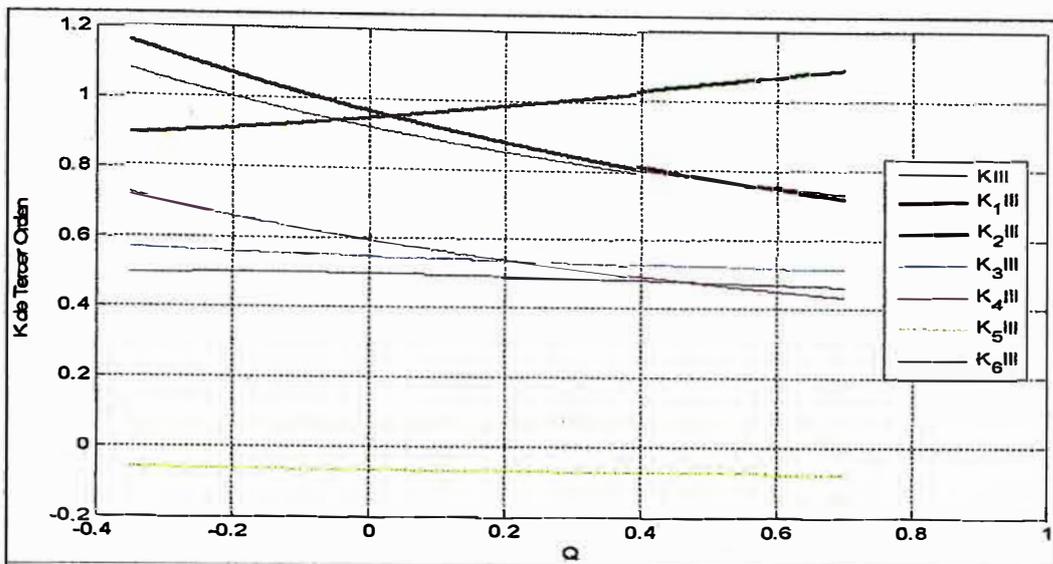


Fig. 3.3 Coeficientes de Estabilidad Permanente del Sistema de Tercer Orden K1 y K2:

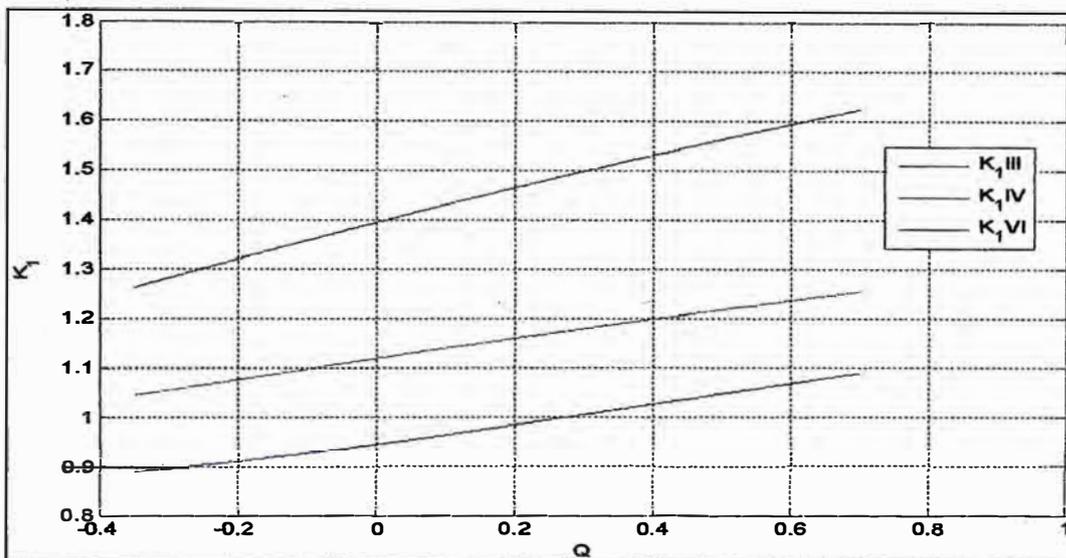


Fig. 3.4 Coeficiente de Estabilidad K1 de los Tres Sistemas de Alto Orden

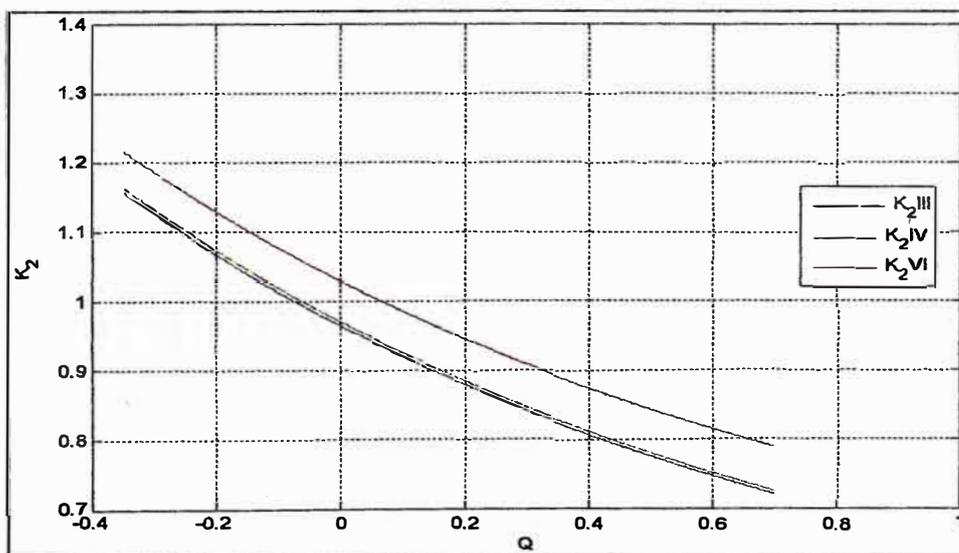


Fig. 3.5 Coeficiente de Estabilidad K2 de los Tres Sistemas de Alto Orden

3.1.2. Influencia de Operación del SEIN en la Estabilidad del Sistema

Para poder apreciar la influencia de operación del SEIN sobre la estabilidad del sistema, se simulará el alejamiento eléctrico de la central con respecto al SEIN. Esto se conseguirá haciendo variar la reactancia externa X_{12} entre $[0,025 - 1]$ p.u.

La simulación se desarrollará en cada condición de operación de la máquina síncrona (sobree excitado y subexcitado); de esta manera se apreciará la influencia del alejamiento eléctrico entre la central y el SEIN sobre la estabilidad permanente del sistema.

- **Con el Generador Sobree excitado**

En este caso la central está entregando potencia activa y reactiva a la red. Los valores de los parámetros del sistema que serán utilizados para esta simulación son los siguientes:

Tabla 3.2 Condición de Operación del sistema con el generador sobree excitado

Reactancia	Potencia	
	P1	Q1
$0,025 < X_{12} < 1$	0,712	0,702

En los siguientes gráficos se apreciará la variación de los Coeficientes de Estabilidad Permanente en función de la variación de la reactancia externa X_{12} :

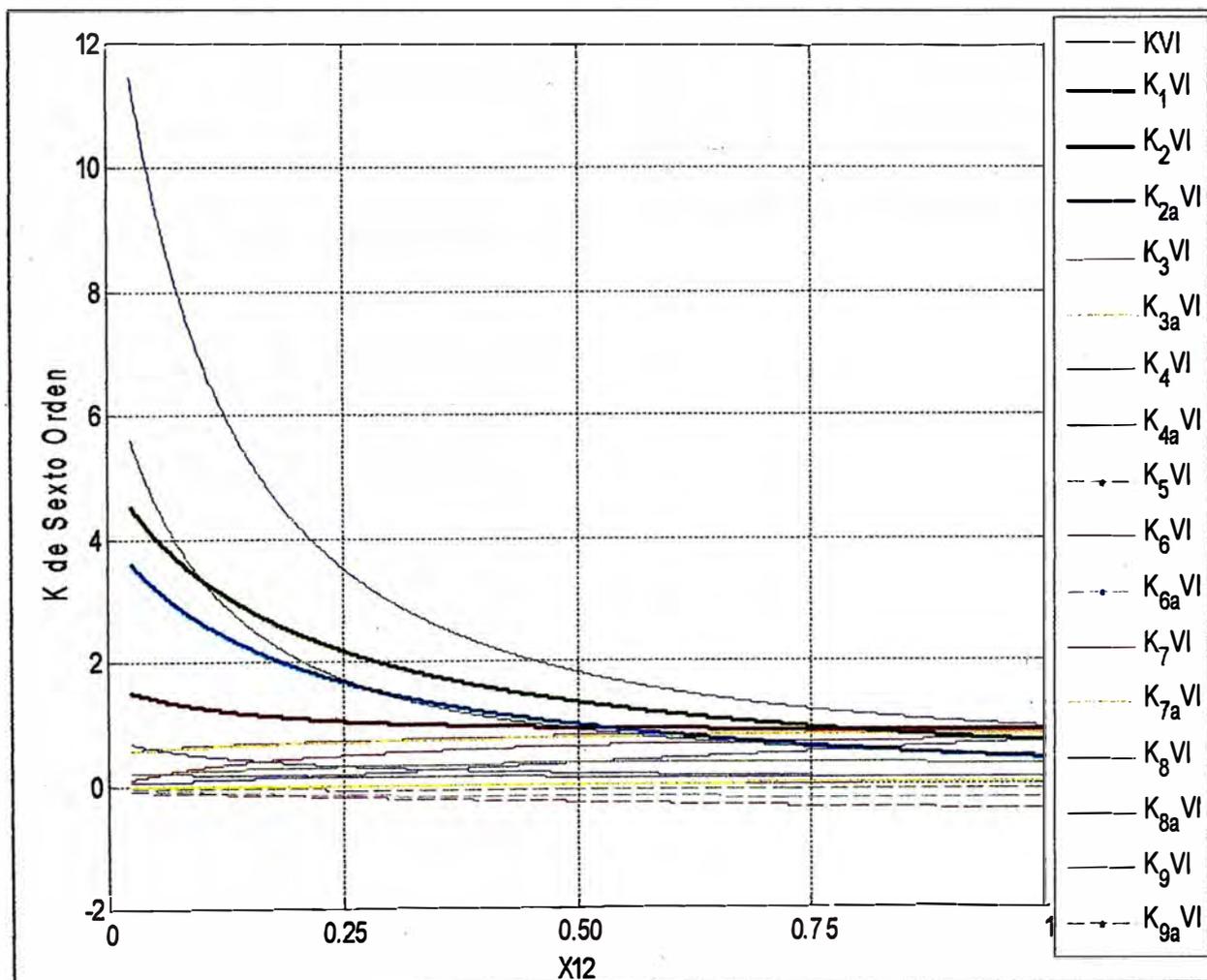


Fig. 3.6 Coeficientes de Estabilidad Permanente del Sistema de Sexto Orden

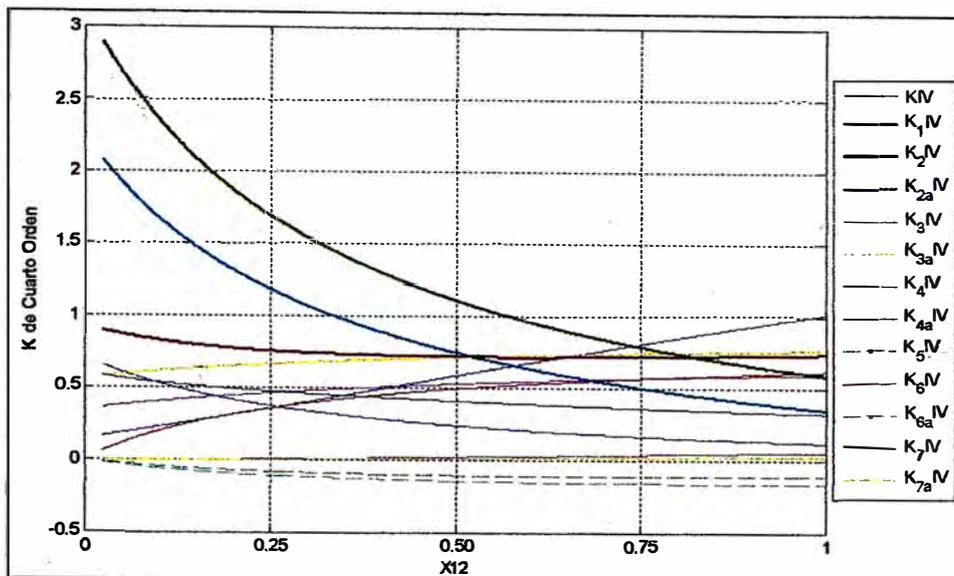


Fig. 3.7 Coeficientes de Estabilidad Permanente del Sistema de Cuarto Orden

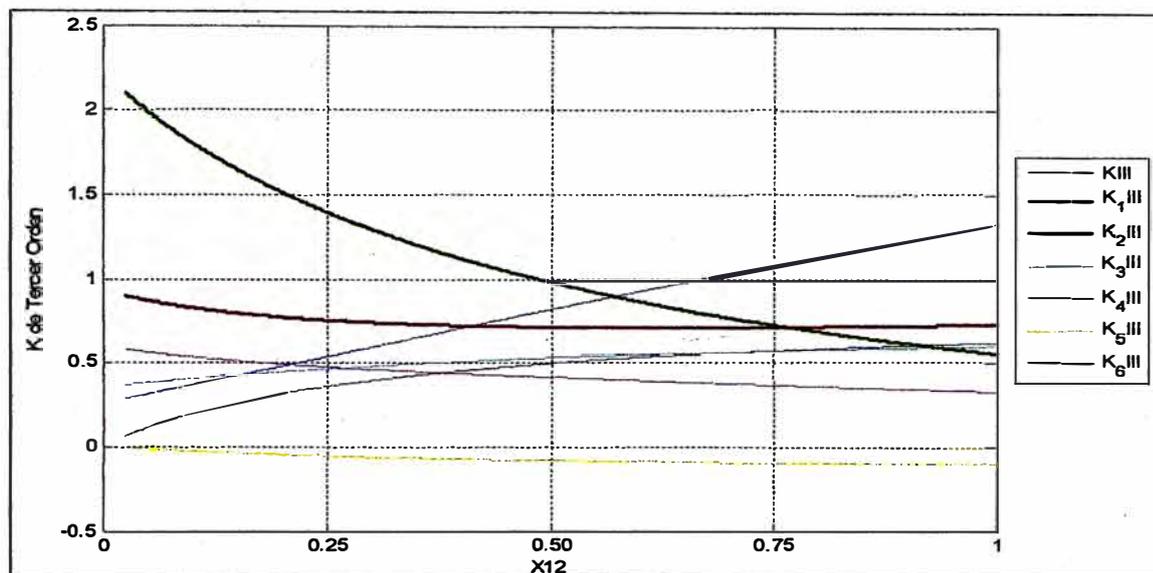


Fig. 3.8 Coeficientes de Estabilidad Permanente del Sistema de Tercer Orden

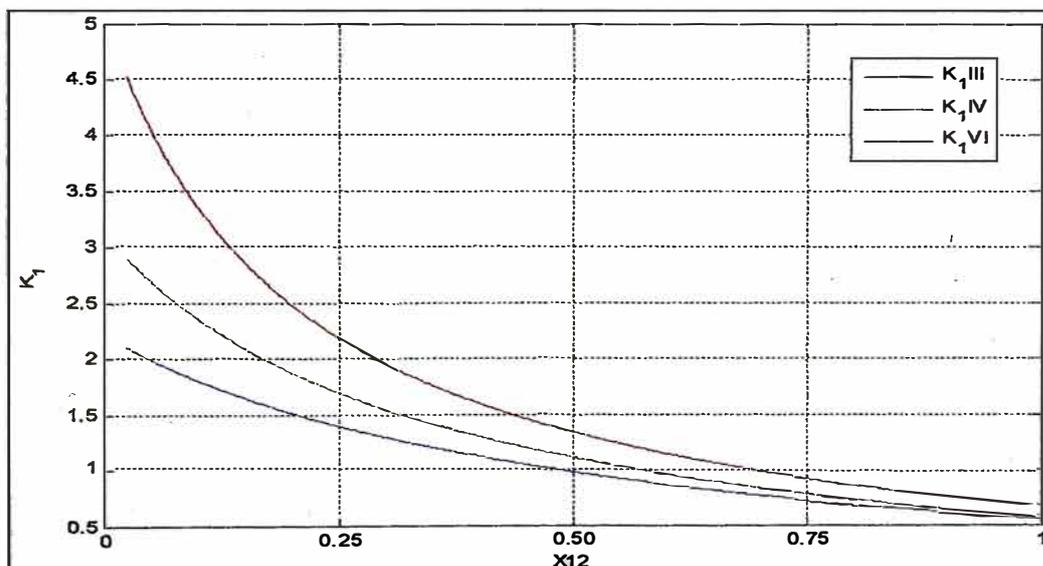


Fig. 3.9 Coeficiente de Estabilidad K1 de los Tres Sistemas de Alto Orden

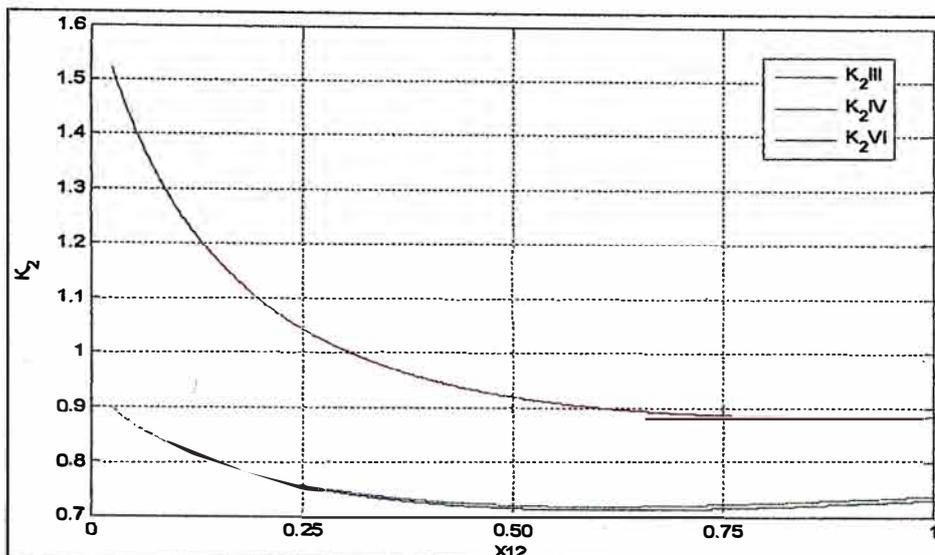


Fig. 3.10 Coeficiente de Estabilidad K2 de los Tres Sistemas de Alto Orden

• **Con el Generador Subexcitado**

Cuando el generador está subexcitado la central está entregando potencia activa y absorbe potencia reactiva de la red. Los valores de los parámetros del sistema que serán utilizados para esta simulación son los siguientes:

Tabla 3.3 Condición de Operación del sistema con el generador subexcitado

Reactancia	2do caso	
$0,025 < X_{12} < 1$	P1	Q1
	0,712	- 0,281

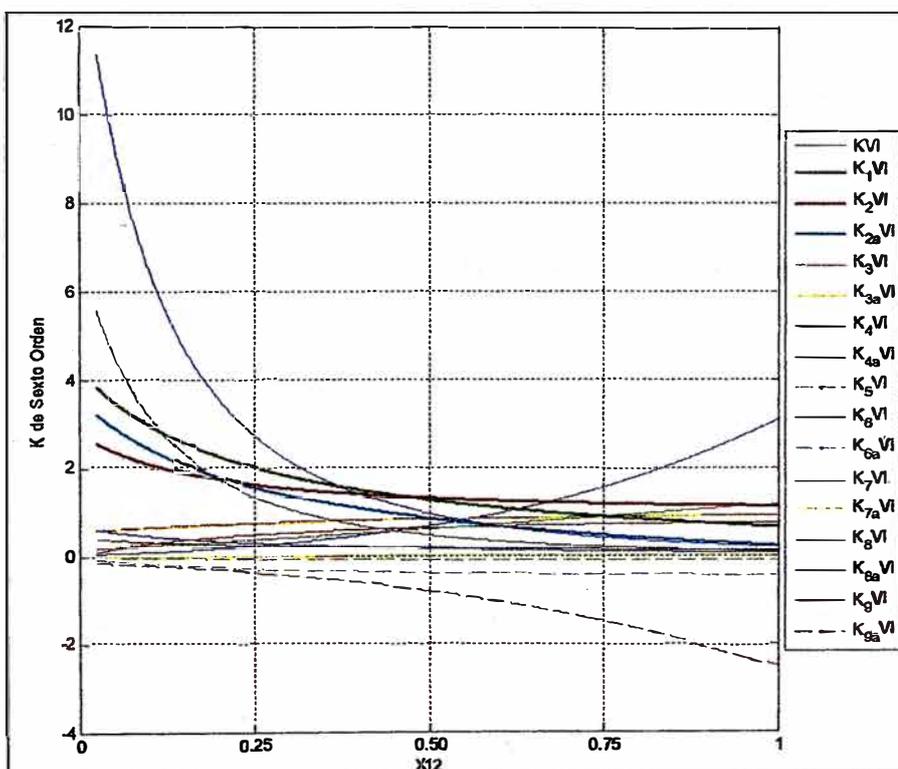


Fig. 3.11 Coeficientes de Estabilidad Permanente del Sistema de Sexto Orden

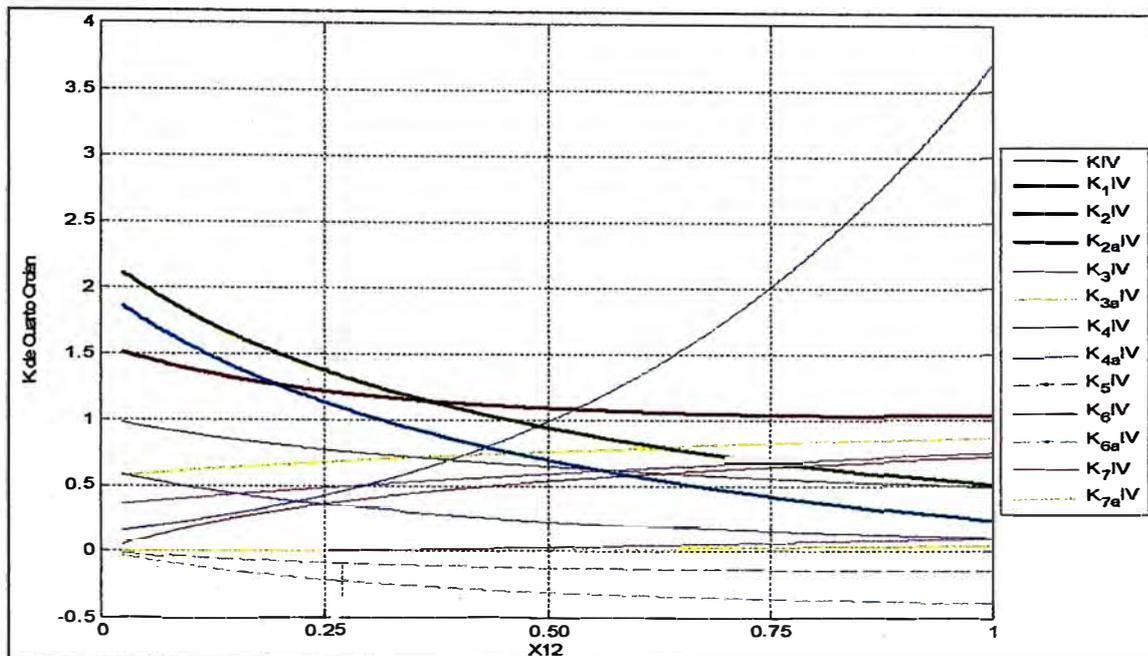


Fig. 3.12 Coeficientes de Estabilidad Permanente del Sistema de Cuarto Orden

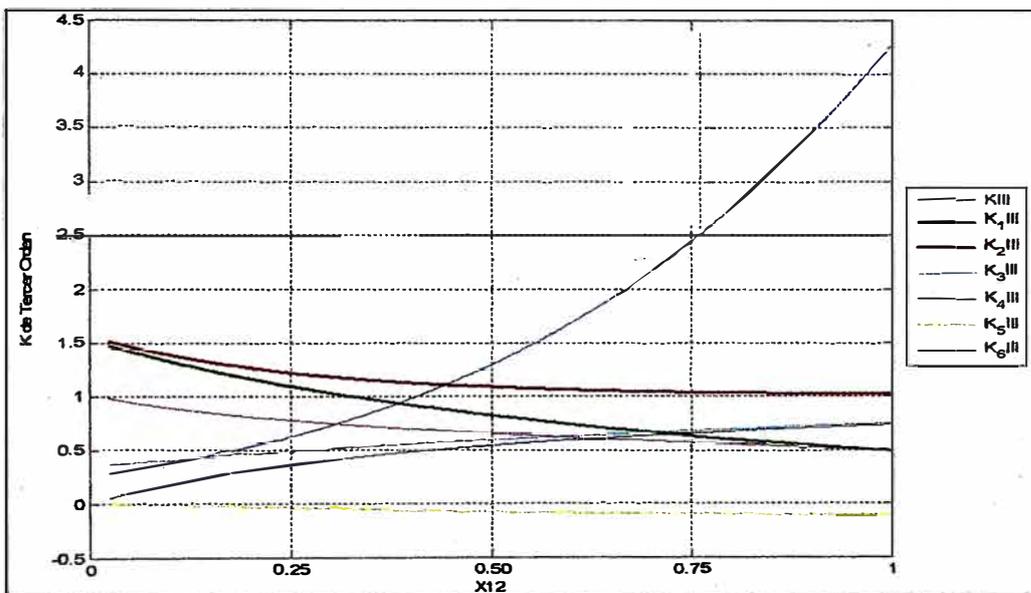


Fig. 3.13 Coeficientes de Estabilidad Permanente del Sistema de Tercer Orden

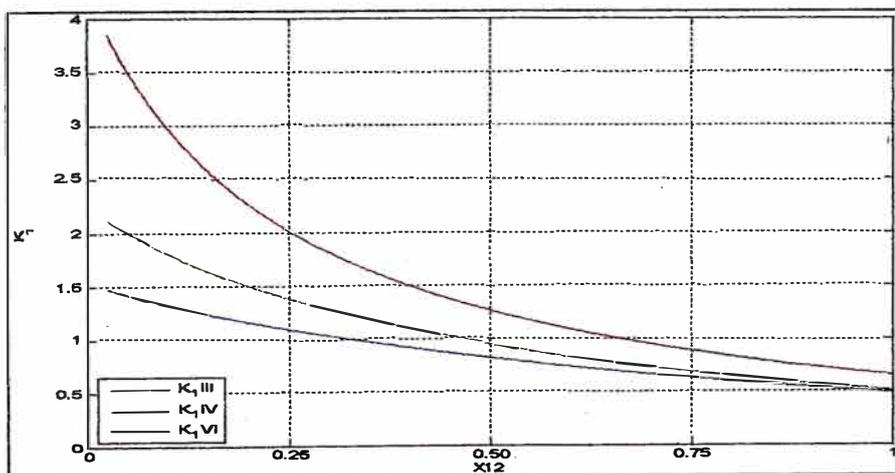


Fig. 3.14 Coeficiente de Estabilidad K1 de los Tres Sistemas de Alto Orden

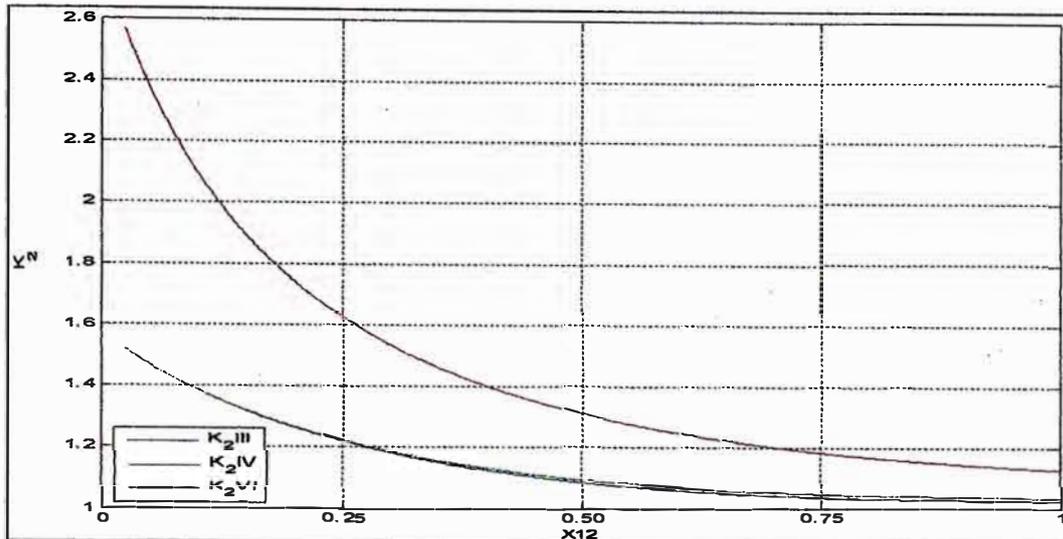


Fig. 3.15 Coeficiente de Estabilidad K2 de los Tres Sistemas de Alto Orden

En todos los casos mostrados se puede observar la misma relación entre los coeficientes K1 y K2 de los tres modelos de la máquina síncrona: $K1_{VI} > K1_{IV} > K1_{III}$
 $K2_{VI} > K2_{IV} > K2_{III}$

Como ya se mencionó, estos son los coeficientes que presentan los mas altos valores de todos los que pertenecen a cada modelo de estabilidad. Mas adelante se demostrará que su contribución en los coeficientes K_S y K_D también es la más importante.

3.1.3. Influencia en los Coeficientes KS y KD

Se analizará el comportamiento de los coeficientes K_S y K_D de cada uno de los modelos de la máquina síncrona sobre la estabilidad del sistema. A las expresiones K_S y K_D de cada uno de los modelos de la máquina síncrona obtenidos en el capítulo 2, se les ha descompuesto en su parte positiva y negativa con la finalidad de analizar que componentes aportan mas a la estabilización del sistema y que componentes lo desestabilizan. Las expresiones siguientes denotan subíndices que se han asignado a los componentes de las partes positiva y negativa de K_S y K_D , con el fin de distinguirlos y poder analizar su comportamiento ante la variación de la potencia reactiva del sistema.

Modelo de Tercer Orden:

$$K_S = K_1 - K_2 \phi_1 \quad K_{S(+)} = \underbrace{-K_2 \phi_{1(-)}}_{KS_{1a}} + \underbrace{K_1}_{KS_{1c}} \quad K_{S(-)} = \underbrace{-K_2 \phi_{1(+)}}_{KS_{2a}}$$

$$K_D = -K_2 \phi_2 \frac{\omega_0}{\omega_{os}} \quad K_{D(+)} = \underbrace{-K_2 \phi_{2(-)}}_{KD_{1a}} \frac{\omega_0}{\omega_{os}} \quad K_{D(-)} = \underbrace{-K_2 \phi_{2(+)}}_{KD_{2a}} \frac{\omega_0}{\omega_{os}}$$

Modelo de Cuarto Orden:

$$K_S = \left\{ K_1 - K_2 \phi \phi_1 + K_{2a} K_{3a} \left(\frac{K_{7a} \phi \phi_1 + \omega_{os} K_{7a} K_{3a} T'_{qo} \phi \phi_2 - K_{4a}}{1 + (\omega_{os} K_{3a} T'_{qo})^2} \right) \right\}$$

$$K_{S(+)} = \underbrace{(-K_2 \phi \phi_{1(-)})}_{KS_1a} + K_{2a} K_{3a} \underbrace{\left\{ \frac{K_{7a} \phi \phi_{1(+)} + \omega_{os} K_{7a} K_{3a} T'_{qo} \phi \phi_{2(+)}}{1 + (\omega_{os} K_{3a} T'_{qo})^2} \right\}}_{KS_1b} + \frac{K_1}{KS_1c}$$

$$K_{S(-)} = \underbrace{-K_2 \phi \phi_{1(+)}}_{KS_2a} + K_{2a} K_{3a} \underbrace{\left[\frac{-K_{4a} + K_{7a} \phi \phi_{1(-)} + \omega_{os} K_{7a} K_{3a} T'_{qo} \phi \phi_{2(-)}}{1 + (\omega_{os} K_{3a} T'_{qo})^2} \right]}_{KS_2b}$$

$$K_D = \left\{ -\frac{\omega_0}{\omega_{os}} \phi \phi_2 \left[K_2 - \frac{K_{2a} K_{3a} K_{7a}}{1 + (\omega_{os} K_{3a} T'_{qo})^2} \right] + \omega_0 \frac{K_{2a} K_{3a} K_{4a} K_{3a} T'_{qo}}{1 + (\omega_{os} K_{3a} T'_{qo})^2} - \omega_0 \phi \phi_1 \frac{K_{2a} K_{3a} K_{7a} K_{3a} T'_{qo}}{1 + (\omega_{os} K_{3a} T'_{qo})^2} \right\}$$

$$K_{D(+)} = \underbrace{\frac{-K_2 \omega_0 \phi \phi_{2(+)}}{\omega_{os}}}_{KD_1a} + K_{2a} K_{3a} \underbrace{\left[\frac{\omega_0 K_{4a} K_{3a} T'_{qo} - \omega_0 K_{7a} \phi \phi_{2(-)} - \omega_0 K_{7a} K_{3a} T'_{qo} \phi \phi_{1(-)}}{1 + (\omega_{os} K_{3a} T'_{qo})^2} \right]}_{KD_1b}$$

$$K_{D(-)} = \underbrace{\frac{-K_2 \omega_0 \phi \phi_{2(-)}}{\omega_{os}}}_{KD_2a} + K_{2a} K_{3a} \underbrace{\left[\frac{\omega_0 K_{7a} \phi \phi_{2(+)} - \omega_0 K_{7a} K_{3a} T'_{qo} \phi \phi_{1(+)}}{1 + (\omega_{os} K_{3a} T'_{qo})^2} \right]}_{KD_2b}$$

Modelo de Sexto Orden:

$$K_S = \left\{ \begin{array}{l} K_1 - \phi_1 K_2 \\ + K_{2a} K_{3a} \left\{ \begin{array}{l} \phi_1 \left[\begin{array}{l} (K_8 R_e + K_{7a}) \{ 1 - \omega_{os}^2 K_{3a} T'_{qo} T'_{qo} + K_{3a} K_8 (X_e + X_d) \} \\ + \omega_{os}^2 T'_{qo} K_{7a} (K_{3a} T'_{qo} + T'_{qo}) \end{array} \right] \\ + \phi_2 \omega_{os} \left\{ \begin{array}{l} -T'_{qo} K_{7a} \{ 1 - \omega_{os}^2 K_{3a} T'_{qo} T'_{qo} + K_{3a} K_8 (X_e + X_d) \} \\ + (K_8 R_e + K_{7a}) (K_{3a} T'_{qo} + T'_{qo}) \end{array} \right\} \\ - \left[(K_8 K_9 + K_{4a}) \{ 1 - \omega_{os}^2 K_{3a} T'_{qo} T'_{qo} + K_{3a} K_8 (X_e + X_d) \} + \omega_{os}^2 T'_{qo} K_{4a} (K_{3a} T'_{qo} + T'_{qo}) \right] \end{array} \right\} \end{array} \right\} \left[\begin{array}{l} \left[1 - \omega_{os}^2 K_{3a} T'_{qo} T'_{qo} + K_{3a} K_8 (X_e + X_d) \right]^2 + \left[\omega_{os} (K_{3a} T'_{qo} + T'_{qo}) \right]^2 \end{array} \right]$$

$$K_{S(+)} = \left\{ \begin{array}{l} \underbrace{-K_2 \phi_{1(-)}}_{KS_1a} + \frac{K_{2a} K_{3a} \left\{ \begin{array}{l} \phi_{1(+)} \left\{ (K_8 R_e + K_{7a}) [1 + K_{3a} K_8 (X_e + X_d)] + \omega_{os}^2 T'_{qo} K_{7a} (K_{3a} T'_{qo} + T'_{qo}) \right\} \right. \\ \left. - \omega_{os}^2 K_{3a} T'_{qo} T'_{qo} [(K_8 R_e + K_{7a}) \phi_{1(-)} - (K_8 K_9 + K_{4a})] \right. \\ \left. + \phi_{2(+)} \omega_{os} [T'_{qo} K_{7a} \omega_{os}^2 K_{3a} T'_{qo} T'_{qo} + (K_8 R_e + K_{7a}) (K_{3a} T'_{qo} + T'_{qo})] \right. \\ \left. - \phi_{2(-)} \omega_{os} T'_{qo} K_{7a} [1 + K_{3a} K_8 (X_e + X_d)] \right\}}_{KS_1b} \\ \left. + \frac{K_1}{KS_1c} \right\}$$

$$K_{S(-)} = \left\{ K_{2a}K_{3a} \left[\begin{array}{l} \underbrace{-K_2\phi_{1(+)}}_{KS_{-2a}} \\ \omega_{os}^2 K_{3a} T_{q_0}' T_{q_0}' (K_8 R_e - K_{7a}) \phi_{1(+)} \\ -\phi_{1(-)} \left[\begin{array}{l} (K_8 R_e - K_{7a}) [1 - K_{3a} K_8 (X_e + X_d')] \\ -\omega_{os}^2 T_{q_0}' K_{7a} (K_{3a} T_{q_0}' + T_{q_0}') \end{array} \right] \\ + [1 - K_{3a} K_8 (X_e + X_d')] [-\phi_{2(+)} \omega_{os} T_{q_0}' K_{7a} + K_8 K_9 - K_{4a}] \\ -\phi_{2(-)} \omega_{os} \left[\begin{array}{l} -T_{q_0}' K_{7a} \omega_{os}^2 K_{3a} T_{q_0}' T_{q_0}' \\ + (K_8 R_e - K_{7a}) (K_{3a} T_{q_0}' + T_{q_0}') \end{array} \right] \\ -\omega_{os}^2 T_{q_0}' K_{4a} (K_{3a} T_{q_0}' + T_{q_0}') \end{array} \right] \right\} \\ + \frac{\left\{ [1 - \omega_{os}^2 K_{3a} T_{q_0}' T_{q_0}' - K_{3a} K_8 (X_e + X_d')]^2 + [\omega_{os} (K_{3a} T_{q_0}' + T_{q_0}')]^2 \right\}}{KS_{-b}}$$

$$K_D = \left\{ K_{2a}K_{3a} \left[\begin{array}{l} -\phi_2 K_2 \\ \omega_{os} \phi_1 \left\{ \begin{array}{l} T_{q_0}' K_{7a} [1 - \omega_{os}^2 K_{3a} T_{q_0}' T_{q_0}' + K_{3a} K_8 (X_e + X_d')] \\ -(K_8 R_e + K_{7a}) (K_{3a} T_{q_0}' + T_{q_0}') \end{array} \right\} \\ + \phi_2 \left[\begin{array}{l} (K_8 R_e + K_{7a}) [1 - \omega_{os}^2 K_{3a} T_{q_0}' T_{q_0}' + K_{3a} K_8 (X_e + X_d')] \\ + \omega_{os}^2 T_{q_0}' K_{7a} (K_{3a} T_{q_0}' + T_{q_0}') \end{array} \right] \\ -\omega_{os} \left\{ \begin{array}{l} T_{q_0}' K_{4a} [1 - \omega_{os}^2 K_{3a} T_{q_0}' T_{q_0}' + K_{3a} K_8 (X_e + X_d')] \\ -(K_8 K_9 + K_{4a}) (K_{3a} T_{q_0}' + T_{q_0}') \end{array} \right\} \end{array} \right] \right\} \frac{\omega_0}{\omega_{os}} \\ + \frac{\left[1 - \omega_{os}^2 K_{3a} T_{q_0}' T_{q_0}' + K_{3a} K_8 (X_e + X_d') \right]^2 + [\omega_{os} (K_{3a} T_{q_0}' + T_{q_0}')]^2}{\omega_{os}}$$

$$K_{D(+)} = \left\{ K_{2a}K_{3a} \left[\begin{array}{l} \underbrace{-\phi_{2(-)} K_2 \frac{\omega_0}{\omega_{os}}}_{KD_{-1b}} \\ \phi_{1(+)} \omega_{os} T_{q_0}' K_{7a} [1 + K_{3a} K_8 (X_e + X_d')] \\ -\phi_{1(-)} \omega_{os} \left[\begin{array}{l} T_{q_0}' K_{7a} \omega_{os}^2 K_{3a} T_{q_0}' T_{q_0}' \\ + (K_8 R_e + K_{7a}) (K_{3a} T_{q_0}' + T_{q_0}') \end{array} \right] \\ -\phi_{2(-)} \omega_{os}^2 K_{3a} T_{q_0}' T_{q_0}' (K_8 R_e + K_{7a}) \\ + \phi_{2(+)} \left\{ \begin{array}{l} (K_8 R_e + K_{7a}) [1 + K_{3a} K_8 (X_e + X_d')] \\ + \omega_{os}^2 T_{q_0}' K_{7a} (K_{3a} T_{q_0}' + T_{q_0}') \end{array} \right\} \\ + \omega_{os} [\omega_{os}^2 K_{3a} T_{q_0}' T_{q_0}' T_{q_0}' K_{4a} + (K_8 K_9 + K_{4a}) (K_{3a} T_{q_0}' + T_{q_0}')] \end{array} \right] \right\} \frac{\omega_0}{\omega_{os}} \\ + \frac{\left[1 - \omega_{os}^2 K_{3a} T_{q_0}' T_{q_0}' + K_{3a} K_8 (X_e + X_d') \right]^2 + [\omega_{os} (K_{3a} T_{q_0}' + T_{q_0}')]^2}{KD_{-1a}}$$

$$K_{D(-)} = \frac{
 \underbrace{-\phi_{2(+)} K_2 \frac{\omega_0}{\omega_{os}}}_{KD_2b} +
 \underbrace{
 \left\{
 \begin{aligned}
 & -\phi_{1(+)} \omega_{os} \left[T'_{q_0} K_{7a} \omega_{os}^2 K_{3a} T'^*_{q_0} T'_{q_0} \right. \\
 & \quad \left. + (K_8 R_e + K_{7a}) (K_{3a} T'^*_{q_0} + T'_{q_0}) \right] \\
 & + \phi_{1(-)} \omega_{os} T'_{q_0} K_{7a} \left[1 + K_{3a} K_8 (X_e + X'_d) \right] \\
 & - \phi_{2(+)} \omega_{os}^2 K_{3a} T'^*_{q_0} T'_{q_0} (K_8 R_e + K_{7a}) \\
 & + \phi_{2(-)} \left\{ (K_8 R_e + K_{7a}) \left[1 + K_{3a} K_8 (X_e + X'_d) \right] \right\} \\
 & + \omega_{os}^2 T'_{q_0} K_{7a} (K_{3a} T'^*_{q_0} + T'_{q_0}) \\
 & - \omega_{os} T'_{q_0} K_9 \left[1 + K_{3a} K_8 (X_e + X'_d) \right]
 \end{aligned}
 \right\}}_{KD_2a}
 }{
 \left[1 - \omega_{os}^2 K_{3a} T'^*_{q_0} T'_{q_0} + K_{3a} K_8 (X_e + X'_d) \right]^2 +
 \left[\omega_{os} (K_{3a} T'^*_{q_0} + T'_{q_0}) \right]^2
 }
 \frac{\omega_0}{\omega_{os}}$$

En las figuras 3.16, 3.17, 3.18, 3.19, 3.20 y 3.21 se muestra el comportamiento de cada uno de los componentes de K_S y K_D con la variación de la potencia reactiva; de esta manera se podrá analizar su aporte a la estabilidad del sistema eléctrico de potencia.

Modelo de Tercer Orden:

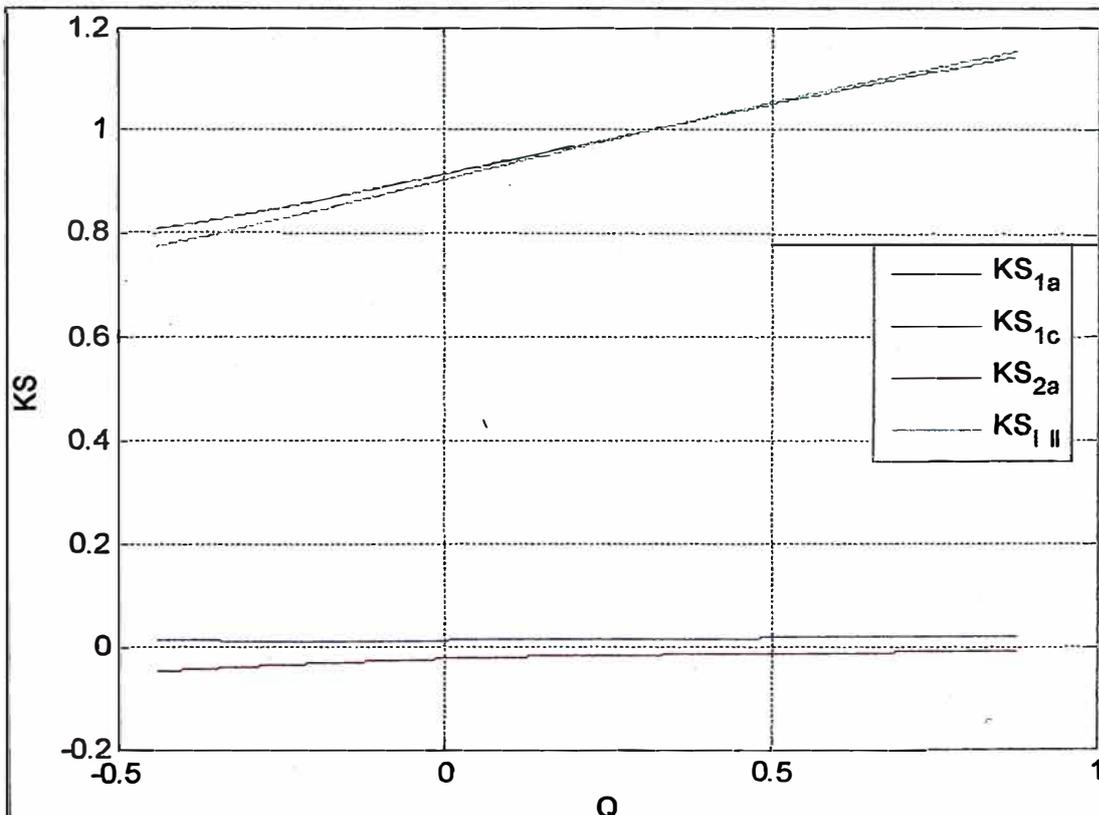


Fig. 3.16 Componentes del Coeficiente K_S de Tercer Orden

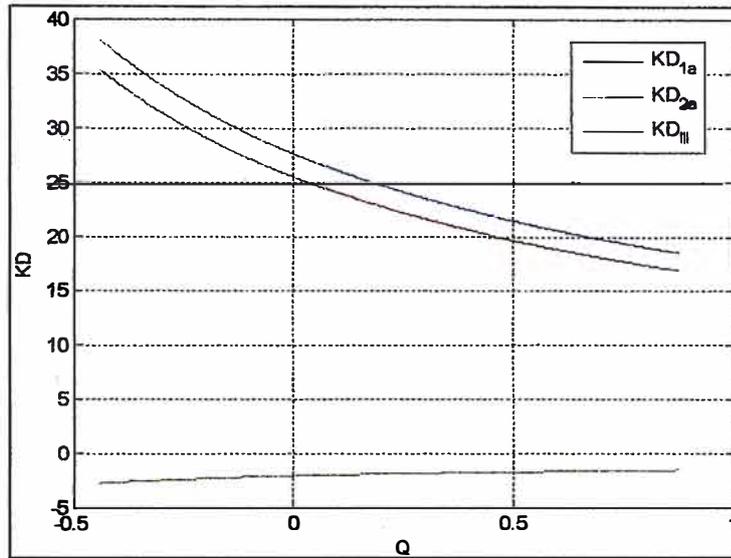


Fig. 3.17 Componentes del Coeficiente KD de Tercer Orden

Modelo de Cuarto Orden:

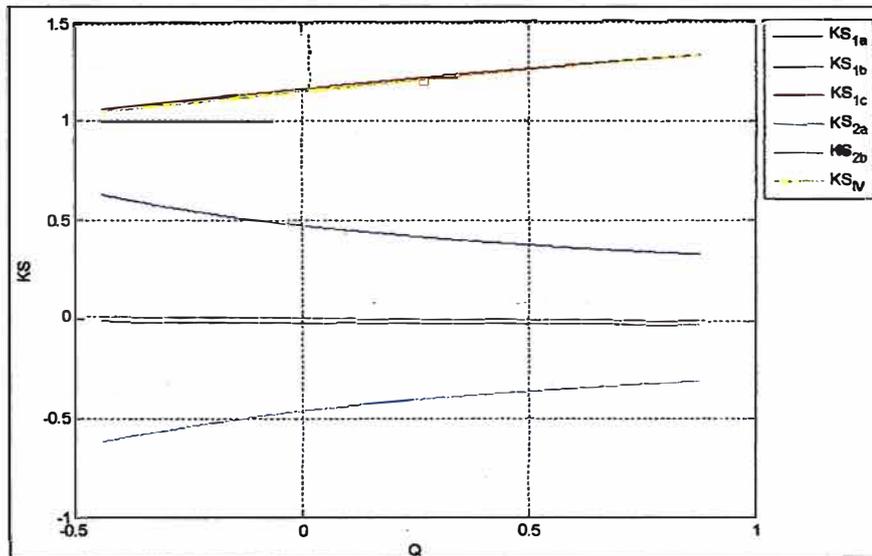


Fig. 3.18 Componentes del Coeficiente KS de Cuarto Orden

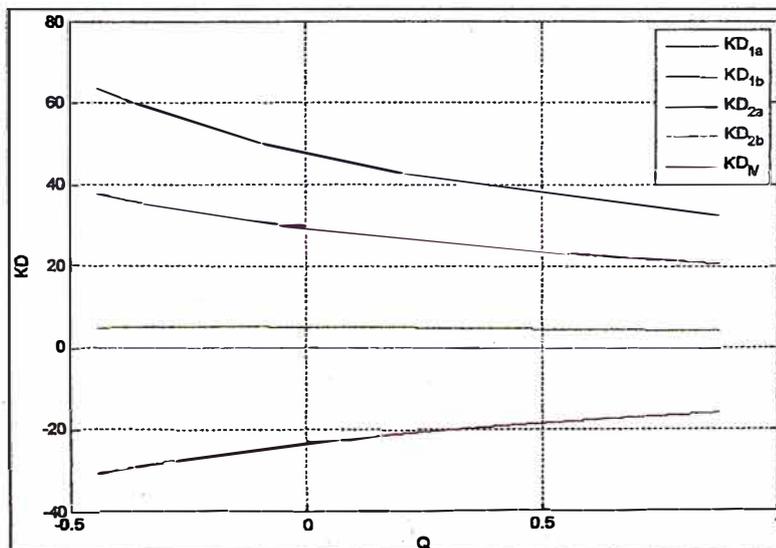


Fig. 3.19 Componentes del Coeficiente KD de Cuarto Orden

Modelo de Sexto Orden:

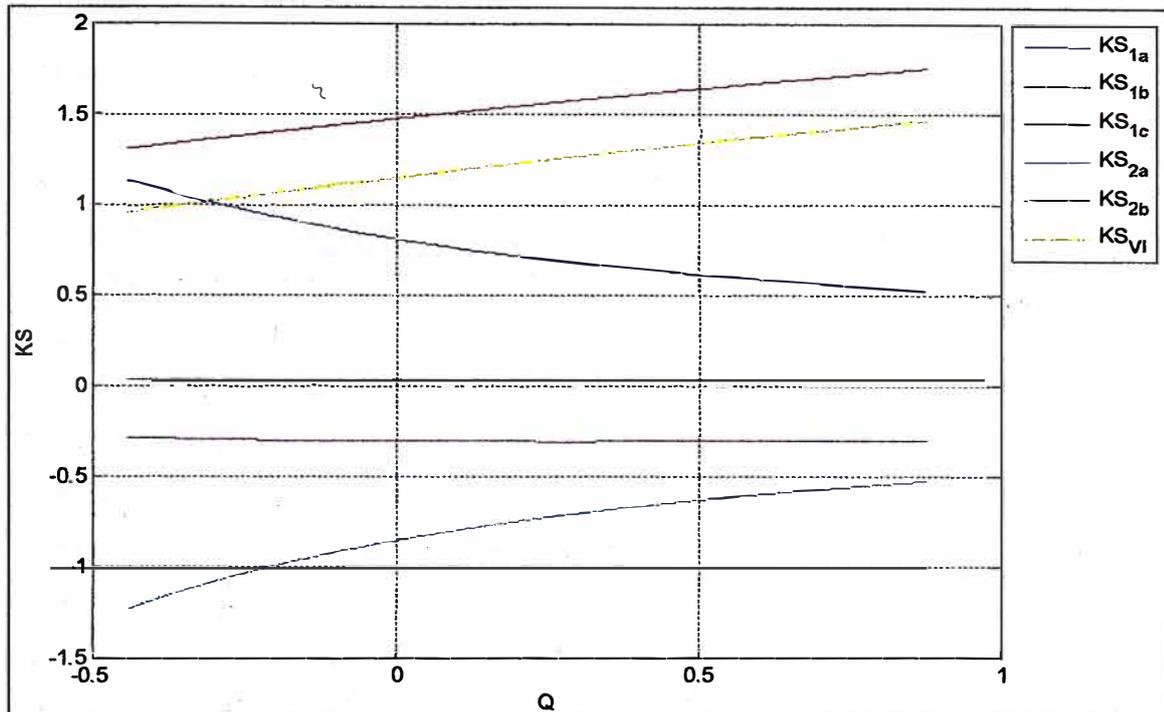


Fig. 3.20 Componentes del Coeficiente KS de Sexto Orden

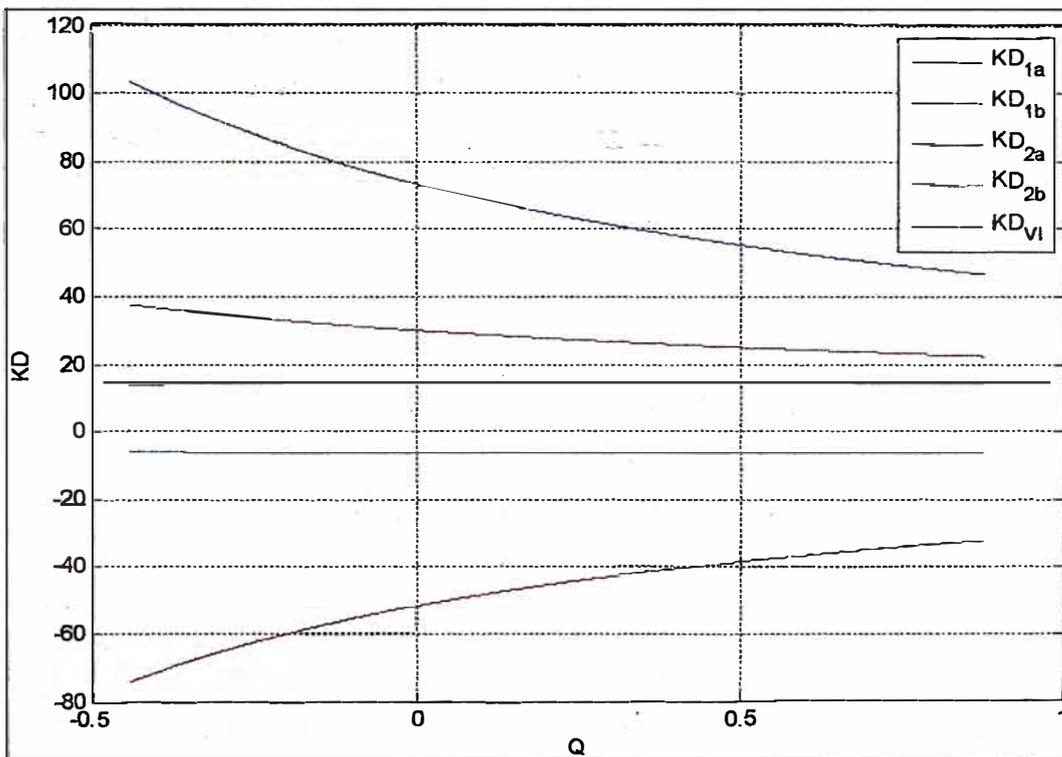


Fig. 3.21 Componentes del Coeficiente KD de Sexto Orden

Se observa que para los tres modelos de la máquina síncrona, el valor del coeficiente de sincronización (KS) es ligeramente menor al componente KS_{1c} debido a que los demás componentes (KS_{1a} , KS_{1b} , KS_{2a} , KS_{2b} ,) generan en conjunto un aporte negativo en KS. Además, en todos los casos, KS_{1c} corresponde al coeficiente de estabilidad K_1 de la máquina síncrona.

En el caso del coeficiente de amortiguamiento (KD), se observa que el mayor aporte lo genera el componente KD_{1a} , cuyo coeficiente principal es K_2 . Asimismo, todos los componentes con coeficiente " $K_{2a}K_{3a}$ " (KS_{1b} , KS_{2b} , KD_{1b} , KD_{2b}) generan un aporte mínimo a los coeficientes de oscilación y amortiguamiento; estos componentes solo se presentan en los modelos de cuarto y sexto orden y su valor es despreciable en el caso del modelo de cuarto orden.

3.2. Análisis de la respuesta en el tiempo de los sistemas de alto orden ante una perturbación

El diagrama de bloques de cada uno de los modelos de la máquina síncrona, mostrados en el capítulo 2, servirá para simular y graficar una perturbación del sistema en el tiempo. Para ello se formará un sistema en el que permitirá trabajar a los tres modelos de la máquina síncrona en paralelo; contarán con una misma señal de entrada y la salida de cada modelo se registrará en el mismo diagrama. En la entrada se colocará una señal de tipo escalón (step), que producirá la oscilación de los tres modelos al mismo tiempo; esta señal podrá ser aplicada al torque mecánico o la tensión de referencia del regulador, pero solo a uno de ellos a la vez. Para poder apreciar la oscilación, se colocarán a la salida bloques de visualización de gráficos (conocidos como scope) que registren la variación en el ángulo y en la velocidad del rotor de los tres modelos. El diagrama de bloques de este sistema se puede apreciar en la siguiente imagen:

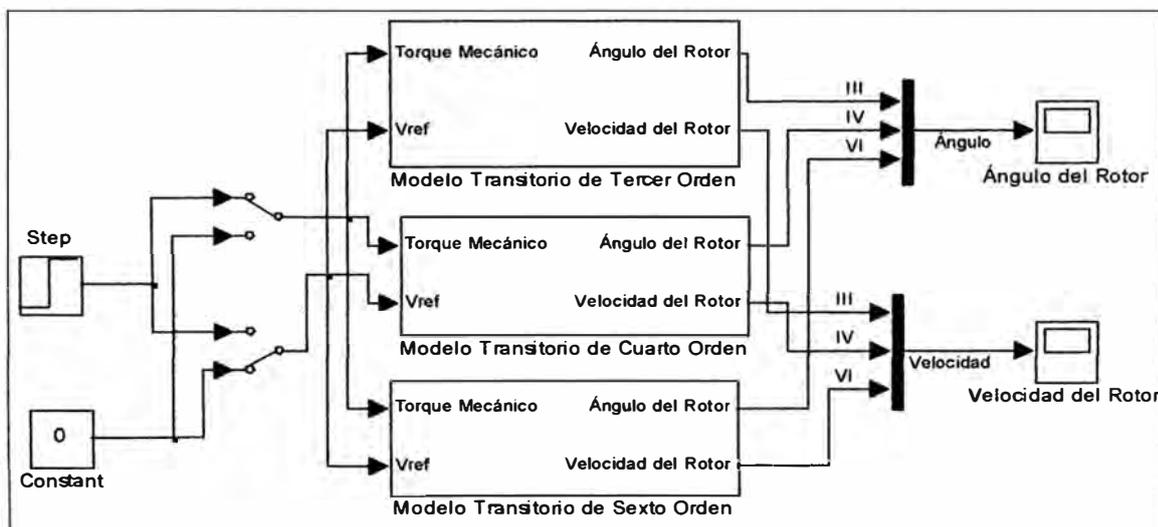


Fig. 3.22 Diagrama de Bloques para la Simulación de la Respuesta en el Tiempo de los Sistemas de Alto Orden con la Perturbación del Torque Mecánico

Los tres cuadros centrales llevan en el interior el diagrama de bloques de cada modelo de la máquina síncrona, tal como se indica en la parte inferior de cada uno de ellos. Cada cuadro tiene dos entradas y dos salidas; las entradas corresponden a los parámetros que recibirán la señal de perturbación (Torque Mecánico o Tensión de Referencia) y las salidas corresponden a los parámetros que serán analizados (Ángulo del Rotor y

Velocidad del Rotor).

A la izquierda se pueden observar dos interruptores que permitan el ingreso de la señal de perturbación a uno de los parámetros la entrada de los cuadros centrales. El arreglo de los interruptores está dispuesto de tal manera que cuando uno de ellos deja pasar la señal de entrada (step), el otro debe estar conectado al bloque cero (constant); esto permitirá que cuando uno de los parámetros de entrada recibe la señal, el otro parámetro no es perturbado.

A la derecha se han colocado dos scope que registrarán la variación de los parámetros de la salida y permitirán su visualización. Cada scope recoge uno de los parámetros de salida; al contar con tres modelos para la máquina síncrona (representados en los tres bloques centrales) se tendrán tres curvas de superpuestas en cada gráfico como resultado de la oscilación producida por la señal de entrada.

Es preciso recalcar que para producir la oscilación se perturbará una sola señal en cada simulación (Torque Mecánico o Tensión de Referencia).

En los siguientes gráficos se observan los primeros diez segundos de la oscilación producida por una perturbación en el Torque Mecánico. Para la simulación se ha utilizado el sistema eléctrico de la central Cañón del Pato descrito en el capítulo 2; cuyas condiciones iniciales son las siguientes:

$$P=0,475 \text{ p.u.}$$

$$Q=0,879 \text{ p.u.}$$

$$XE = 0.42 \text{ p.u.}$$

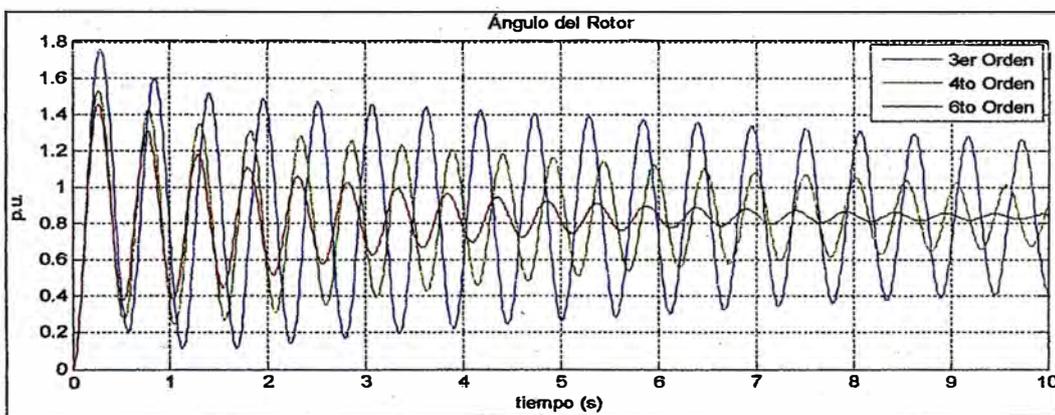


Fig. 3.23 Respuesta en el Tiempo del Ángulo del Rotor de los 3 modelos

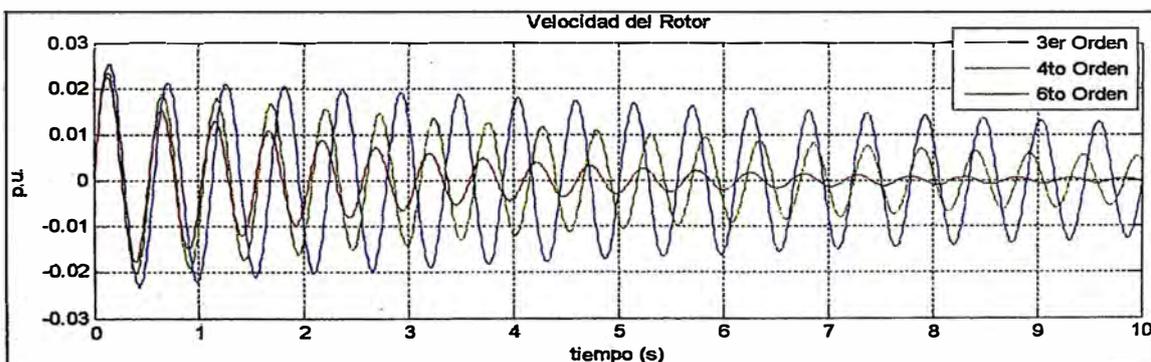


Fig. 3.24 Respuesta en el Tiempo de la Velocidad del Rotor de los 3 modelos

En este primer escenario, con los ajustes originales del regulador de tensión y del estabilizador de sistemas de potencia, se observan algunas diferencias notables en el comportamiento de los tres modelos ante la perturbación del sistema.

En primer lugar el amortiguamiento, que es insuficiente para una rápida recuperación del transitorio, es mayor para el modelo de sexto orden que para el de cuarto y tercer orden respectivamente. Mientras que el modelo de sexto orden está llegando a la estabilidad en el décimo segundo, el ángulo del rotor oscila con una amplitud de $\pm 0,2$ p.u. y $\pm 0,4$ p.u. para el modelo de cuarto y tercer orden respectivamente. En el caso de la velocidad del rotor, los modelos de cuarto y tercer orden oscilan con una amplitud de $\pm 0,005$ p.u. y $\pm 0,015$ p.u. respectivamente.

En segundo lugar, el modelo de tercer orden tiene un adelanto de fase con respecto al modelo de cuarto orden que se va acentuando a medida que avanzan los segundos y llega a superar un ciclo de adelanto en el último segundo. Análogamente, el modelo de cuarto orden presenta un adelanto de fase respecto al modelo de sexto orden que llega a ser de aproximadamente un cuarto de ciclo en el décimo segundo.

Al observar esta situación será conveniente reconfigurar los parámetros de los reguladores a fin de obtener mejores resultados en el análisis de estabilidad. Para mejorar el performance del sistema eléctrico durante el transitorio se proponen algunos ajustes en los parámetros del regulador de velocidad y del regulador de sistemas de potencia. En el capítulo 2 se vió que dichos parámetros son:

$$\begin{array}{cccc}
 TW_1 = 4 & TW_2 = 4 & TW_4 = 4 & T_1 = 0.03 \\
 T_2 = 0.02 & T_3 = 0.03 & T_4 = 0.02 & T_6 = 0.064 \\
 T_7 = 4 & T_8 = 0.32 & T_9 = 0.08 & KS_1 = 12 \\
 KS_2 = 1.1 & KS_3 = 1 & KP = 30 & T_i = 1.3
 \end{array}$$

Para mejorar la calibración del regulador de velocidad y del regulador de sistemas de potencia de la Central Cañón del Pato se simuló el comportamiento del sistema en diversos escenarios variando los parámetros iniciales uno a uno, con el método de prueba y error. Como resultado de este proceso se identificaron algunos parámetros cuya variación permitió mejorar la estabilidad del sistema de potencia ante perturbaciones externas; estos parámetros y los valores propuestos para ellos se muestran a continuación:

$$T_1 = 0.05 \quad T_2 = 0.04 \quad T_3 = 0.05 \quad KS_1 = 18 \quad KS_2 = 1.7$$

El comportamiento del sistema en estas nuevas condiciones ante una perturbación en el Torque Mecánico, para cada uno de los modelos de alto orden de la máquina síncrona, mejoró considerablemente, tal como se muestra en las figuras 3.25 y 3.26:

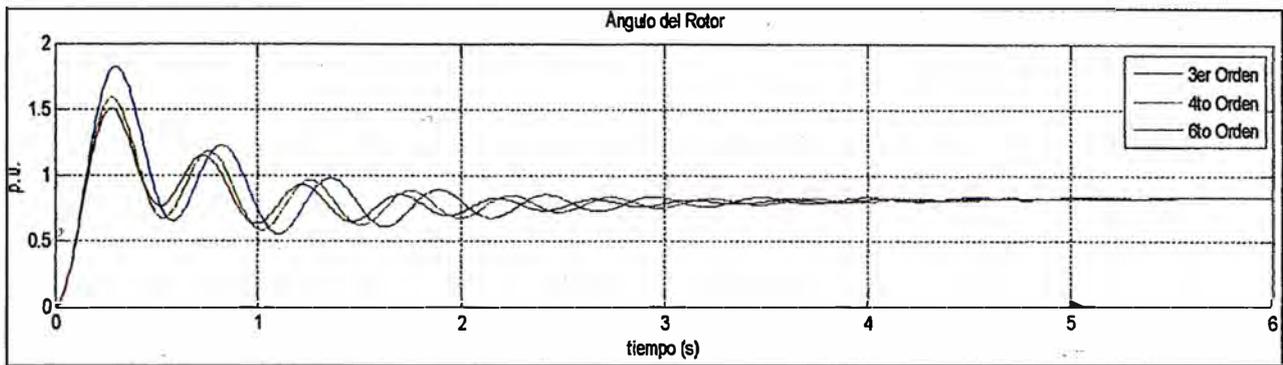


Fig. 3.25 Respuesta en el Tiempo del Ángulo del Rotor de los Sistemas de Alto Orden con los Parámetros Ajustados

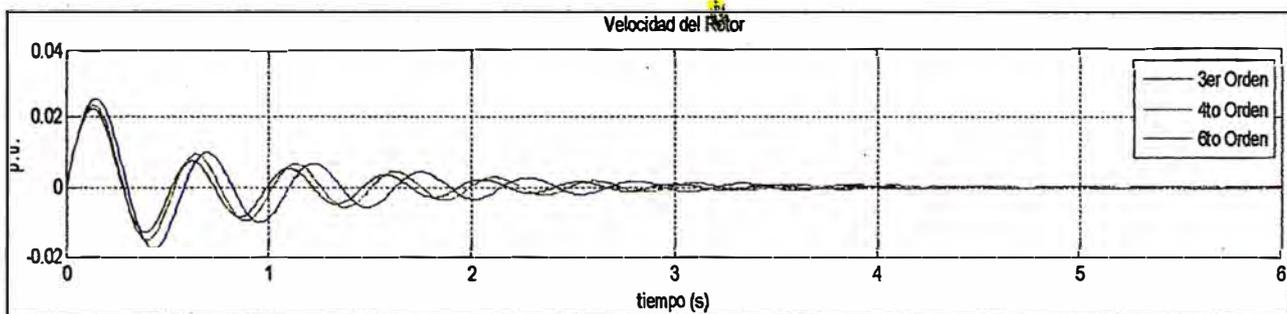


Fig. 3.26 Respuesta en el Tiempo de la Velocidad del Rotor de los Sistemas de Alto Orden con los Parámetros Ajustados

Al analizar estas oscilaciones, se observa que a comparación del escenario anterior el amortiguamiento es más parejo para los tres modelos de la máquina síncrona; de todos modos se mantiene la tendencia de que el modelo de más alto orden se estabiliza primero y el modelo mas simplificado se estabiliza con un pequeño retardo en comparación de los otros dos modelos.

El adelanto de fase sigue notándose claramente en el modelo de tercer orden con respecto a los otros dos modelos, y en el modelo de cuarto orden con respecto al modelo de sexto orden. Se observa que el adelanto del modelo de tercer orden es de medio ciclo respecto del modelo de cuarto orden al llegar al tercer segundo, a partir de cual se hace prácticamente imperceptible la oscilación de las curvas, sobre todo de las de cuarto y sexto orden. El desfase entre el modelo de cuarto y sexto orden es mucho menor (no llega ni a un cuarto de ciclo), estos dos modelos tienen un comportamiento casi idéntico en estas nuevas condiciones de operación.

Ahora se analizará el comportamiento del sistema aplicando la señal de perturbación a la tensión de referencia en lugar del torque mecánico. Para realizar esta simulación se intercambiarán las posiciones de los interruptores del diagrama de bloques del sistema, con ello se conseguirá que la señal de escalón ingrese al parámetro de tensión y que el torque mecánico no sea perturbado. El diagrama de bloques queda como se muestra a continuación:

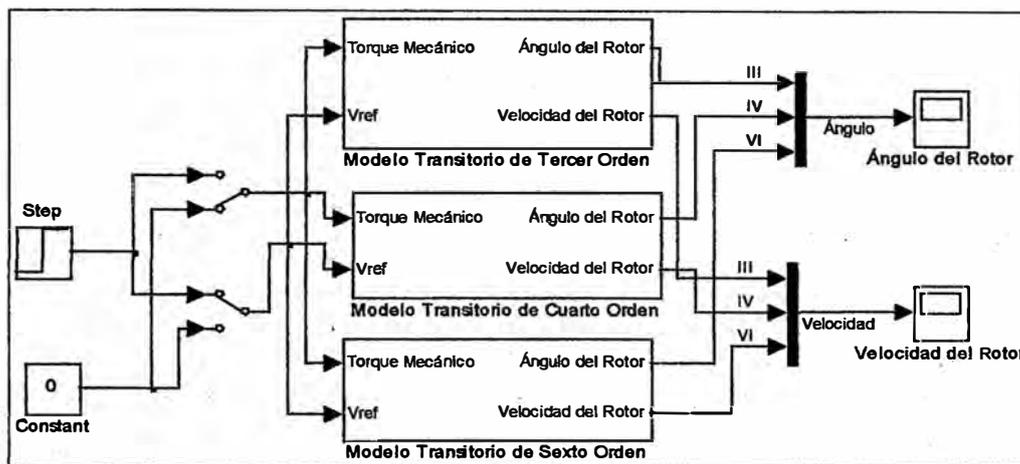


Fig. 3.27 Diagrama de Bloques para la Simulación de la Respuesta en el Tiempo de los Sistemas de Alto Orden con la Perturbación de la Velocidad de Referencia

El resultado de la simulación se muestra en los siguientes graficos:

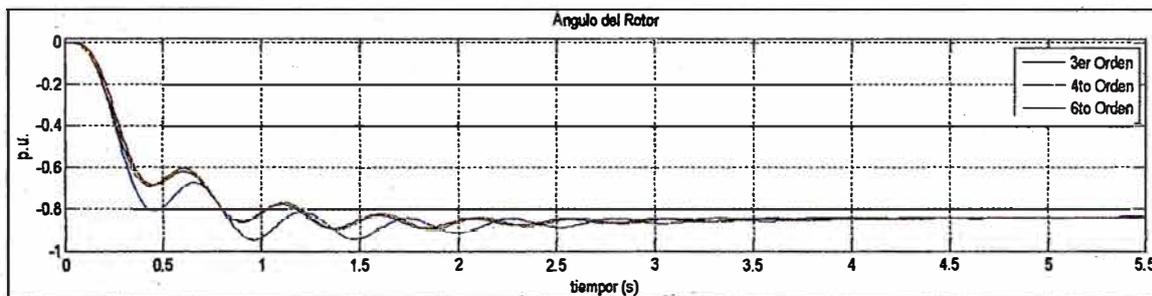


Fig. 3.28 Simulación de la Respuesta en el Tiempo del Ángulo del Rotor de los Sistemas de Alto Orden con la Perturbación de la Velocidad de Referencia

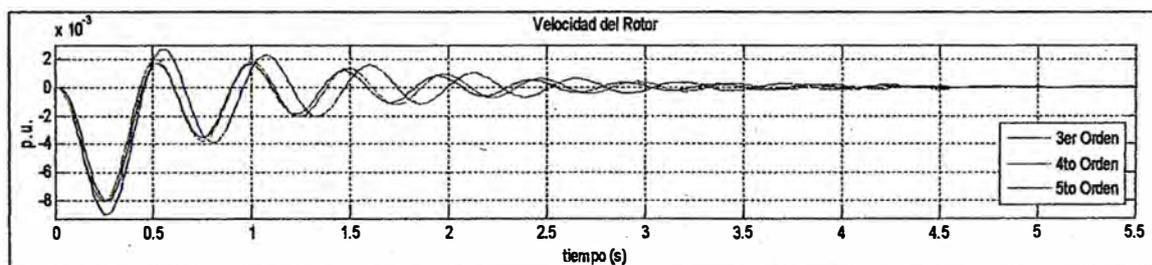


Fig. 3.29 Simulación de la Respuesta en el Tiempo de la Velocidad del Rotor de los Sistemas de Alto Orden con la Perturbación de la Velocidad de Referencia

En este nuevo escenario es resaltante la similitud entre el comportamiento de los modelos de cuarto y sexto orden, pues sus curvas son casi idénticas. El modelo de tercer orden mantiene una diferencia en las oscilaciones; sin embargo, el tiempo para la estabilización es casi el mismo para los tres modelos.

Las otras dos características analizadas en los casos anteriores se mantienen en esta nueva situación: la fase y el amortiguamiento. El modelo de tercer orden presenta un adelanto de fase con respecto al de cuarto orden y este último se adelanta al de sexto orden. De otro lado, el amortiguamiento es mayor en el modelo de sexto orden, luego en

el de cuarto y tercer orden respectivamente.

Por último, cabe resaltar que las variaciones en el comportamiento de los tres modelos es mucho menor debido a que el sistema se estabiliza rápidamente luego de los ajustes propuestos para los reguladores de la máquina síncrona. Asimismo, es importante mencionar que el modelo de tercer orden muestra una variación mas marcada que los modelos de cuarto y sexto orden, los cuales presentan curvas muy cercanas, ya sea con la perturbación del torque mecánico o de la tensión de referencia.

3.3. Resultados del análisis de la calidad de la energía de la CH Cañón del Pato

Al simular las perturbaciones en el SEIN que involucraron a la CH Cañón del Pato para analizar los armónicos generados se han obtenido resultados que demuestran que, incluso ante eventos extremos, la Central presenta armónicos que se encuentran dentro de los niveles adecuados de acuerdo al Estándar IEEE 519-1992, el cual indica que el THD de tensión para voltages menores a 161 kV no debe superar 1,5% para medición individual y 2,5% para medición total.

Tal como se muestra en la siguiente imagen, el THD ha sido 0,574% para el evento de 2008; 0.542% para el evento de febrero de 2009; 0,527% para el evento de noviembre de 2009 y 0,562% el evento de 2010.

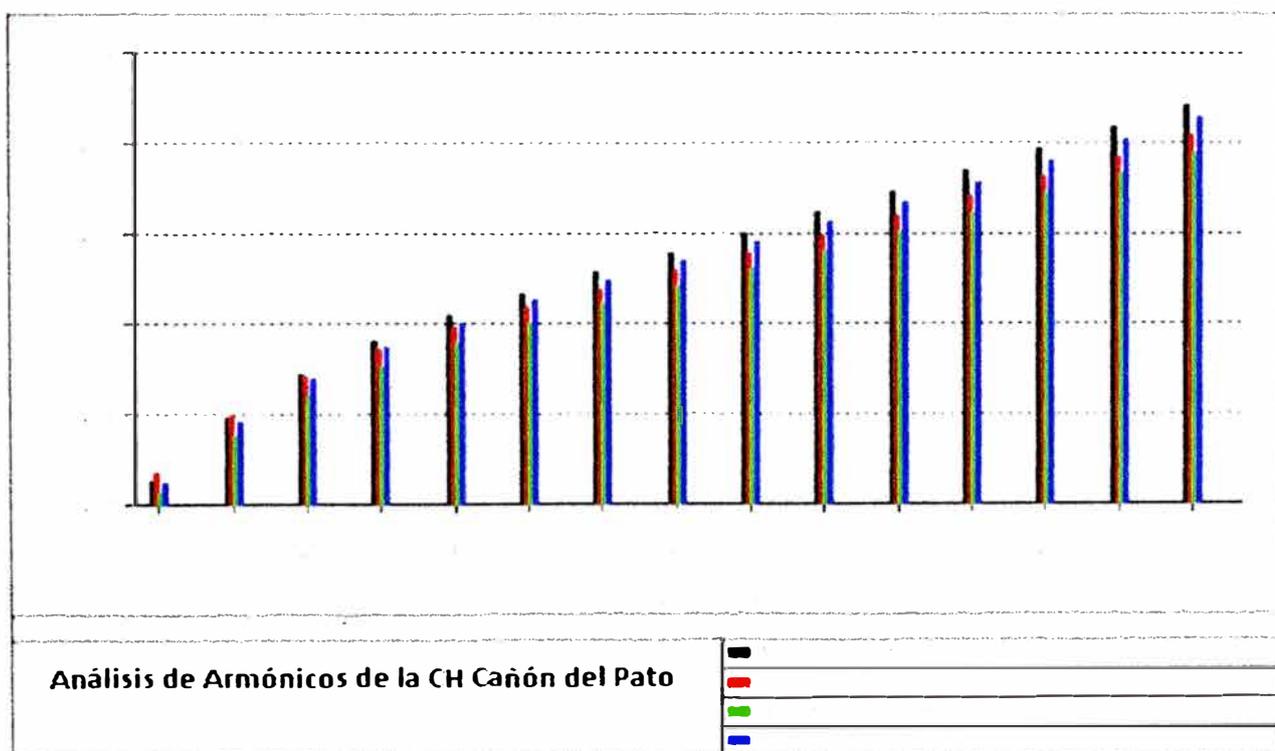


Fig. 3.30 Simulación de la Respuesta en el Tiempo de la Velocidad del Rotor de los Sistemas de Alto Orden con la Perturbación de la Velocidad de Referencia

CONCLUSIONES

En el desarrollo de la presente tesis se han calculado los coeficientes de estabilidad de los modelos matemáticos de cuarto y sexto orden de la máquina síncrona, así como sus coeficientes de amortiguamiento y sincronización a fin de apreciar el comportamiento de un sistema eléctrico utilizando ambos modelos y comparar los resultados con un sistema que utilice el modelo ampliamente utilizado de tercer orden.

A partir de este análisis se han obtenido las siguientes conclusiones:

1. En el modelo de tercer orden se tienen siete coeficientes de estabilidad (K , K_1 , K_2 , K_3 , K_4 , K_5 , K_6). En el modelo de cuarto orden se han obtenido trece coeficientes de estabilidad (K , K_1 , K_2 , K_{2a} , K_3 , K_{3a} , K_4 , K_{4a} , K_5 , K_6 , K_{6a} , K_7 , K_{7a}) debido a que en este modelo se consideran ambos ejes de la máquina síncrona. Siguiendo el orden de complejidad, en el modelo de sexto orden se han obtenido diecisiete coeficientes de estabilidad (K , K_1 , K_2 , K_{2a} , K_3 , K_{3a} , K_4 , K_{4a} , K_5 , K_6 , K_{6a} , K_7 , K_{7a}), ya que éste es el modelo matemático más completo de la máquina síncrona.
2. Los coeficientes de estabilidad son características de la máquina síncrona y solo dependen de sus parámetros. De otro lado, los coeficientes de amortiguamiento y sincronización dependen, además de la máquina síncrona, de sus reguladores (de tensión y estabilizador de sistemas de potencia). Debido a ello se desarrollaron dichos coeficientes utilizando dos modelos de reguladores diferentes: los clásicos y una aplicación real utilizando los reguladores de la central Cañón del Pato. La complejidad de las expresiones que permiten determinar a estos coeficientes varía según la complejidad del modelo de los reguladores y de la máquina síncrona.
3. La expresión obtenida para el coeficiente de sincronización está conformada por la suma de tres factores; el coeficiente K_1 y otros dos factores cuyo coeficiente principal es K_2 y K_{2a} respectivamente. La suma de los dos últimos factores tiene un valor muy cercano a cero y es prácticamente despreciable; mientras que el valor del coeficiente de sincronización es muy cercano al valor del coeficiente K_1 . K_1 y K_S son más cercanos mientras más simplificado es el modelo (Tercer Orden); a medida que el modelo es más completo (Cuarto y Sexto Orden), K_S se hace menor y más alejado de K_1 . Esto se explica porque el efecto de los transitorios y subtransitorios de la

máquina síncrona tienden a disminuir la capacidad de sincronización del sistema; en el caso del modelo de tercer orden solo se ha considerado el efecto transitorio en el eje "d", es por eso que K_1 y K_S tienden a ser prácticamente iguales. En el otro extremo, el modelo de sexto orden considera todo el efecto transitorio y subtransitorio de la máquina síncrona, llegando a tener diferencias de aproximadamente 0,4 p.u. entre K_1 y K_S .

4. El coeficiente de amortiguamiento está conformado por dos factores cuyo coeficiente principal es K_2 y K_{2a} , y cuyas expresiones son muy similares a los factores del coeficiente de sincronización; sin embargo, en este caso la suma de estos factores no es despreciable y representa el valor del coeficiente de amortiguamiento. Se hace evidente que la capacidad de amortiguamiento del sistema se incrementa debido a los reguladores y las características de la máquina síncrona. El efecto transitorio de la máquina síncrona tiende a amortiguar el sistema, en consecuencia, mientras más completo es el modelo matemático, mayor es el valor del coeficiente de amortiguamiento. K_D de sexto orden es mayor a K_D de cuarto orden, y este a su vez, es mayor que K_D de tercer orden para cada valor de la potencia reactiva Q entre -0.5 y 1 p.u.
5. A pesar de contar con varios coeficientes de estabilidad (K_1 , K_2 , K_3 , K_4 , etc), los más importantes son K_1 y K_2 ; ya que, como se ha explicado anteriormente, el valor de K_1 es prácticamente igual al coeficiente K_S . K_2 es el coeficiente principal de los factores que conforman la mayor parte del valor de K_D . En el caso del modelo de cuarto orden, K_2 es el coeficiente del factor que conforma entre el 80 y 90 por ciento de K_D . En el modelo de sexto orden, el factor que contiene a K_2 representa entre 70 y 80 por ciento de K_D ; tal como se observa en los siguientes gráficos:

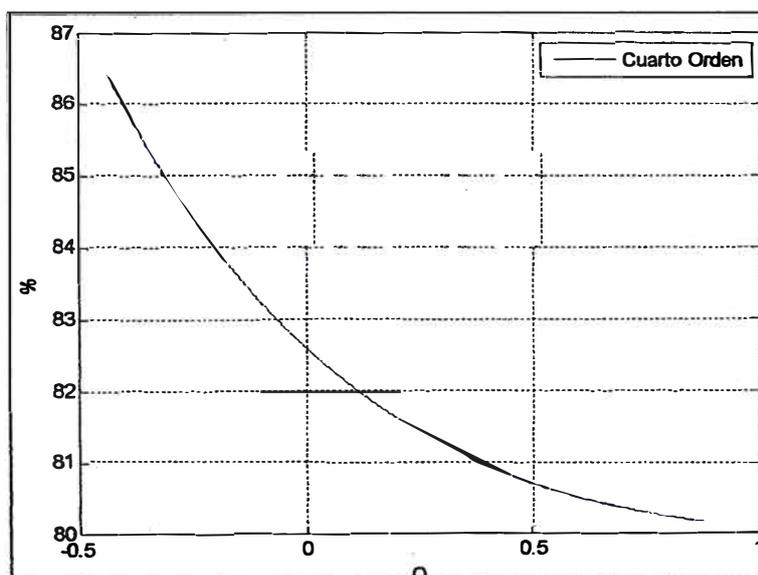


Fig.01 Relación entre K_2 y K_D en el modelo de cuarto orden para variaciones de Q

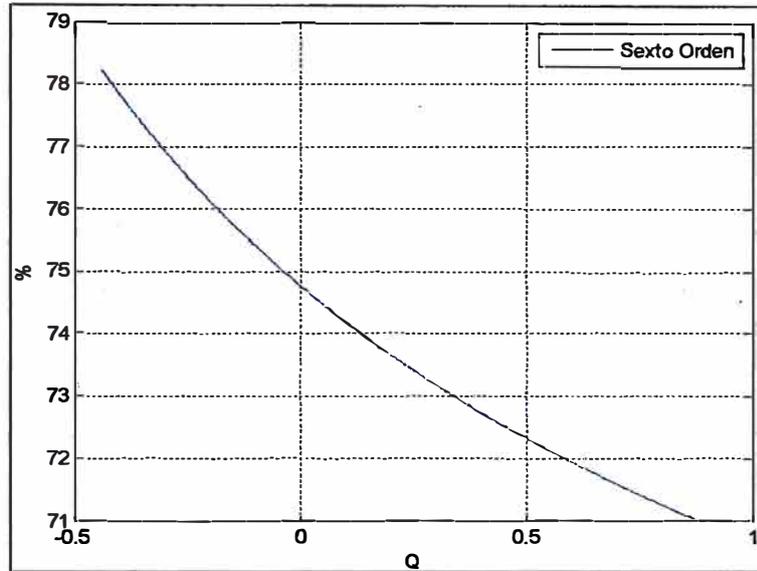


Fig.02 Relación entre K_2 y K_D en el modelo de sexto orden para variaciones de Q

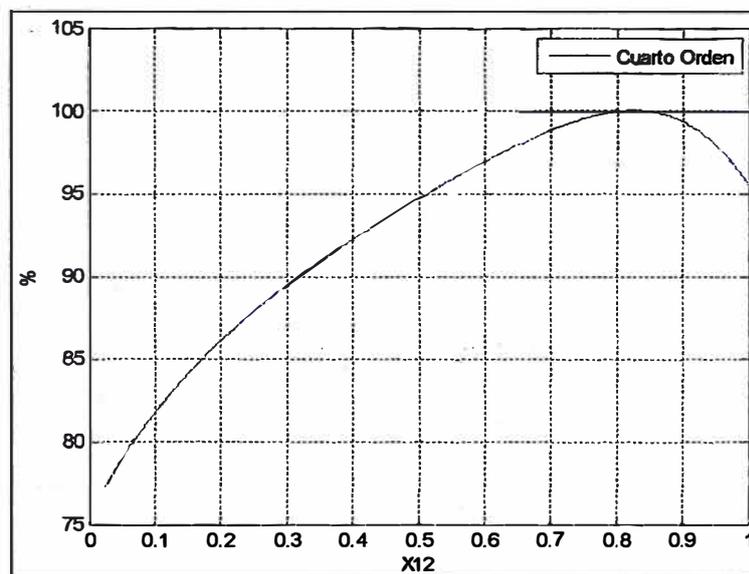


Fig.03 Relación entre K_2 y K_D en el modelo de cuarto orden para variaciones de X_{12}

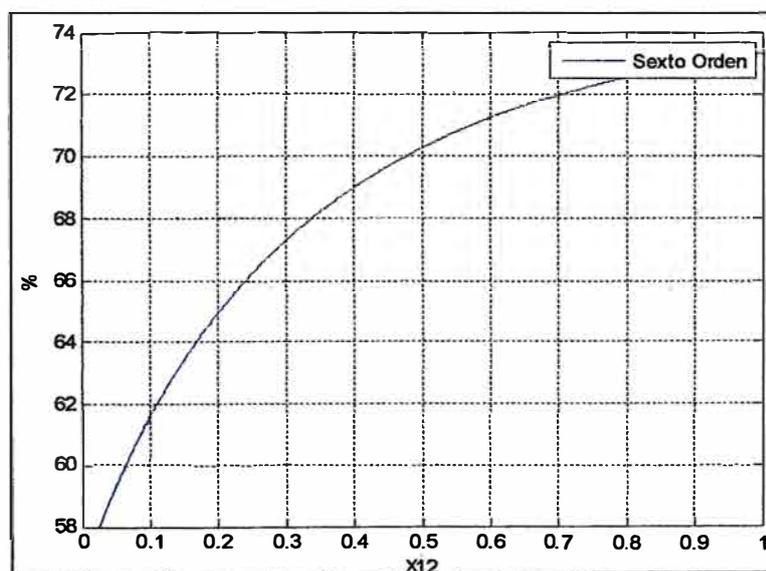


Fig.04 Relación entre K_2 y K_D en el modelo de sexto orden para variaciones de X_{12}

6. El modelo de tercer orden contiene a los factores principales (K1 y K2) por lo que se acerca a los otros modelos en el orden del 70 al 90 por ciento, dependiendo con cuál de ellos se compara.
7. En los siguientes gráficos se ha comparado el comportamiento de los coeficientes KD y KS de los tres modelos de la máquina síncrona en función de la variación de la potencia reactiva Q (operación de la central) y de la reactancia X12 (operación del SEIN).

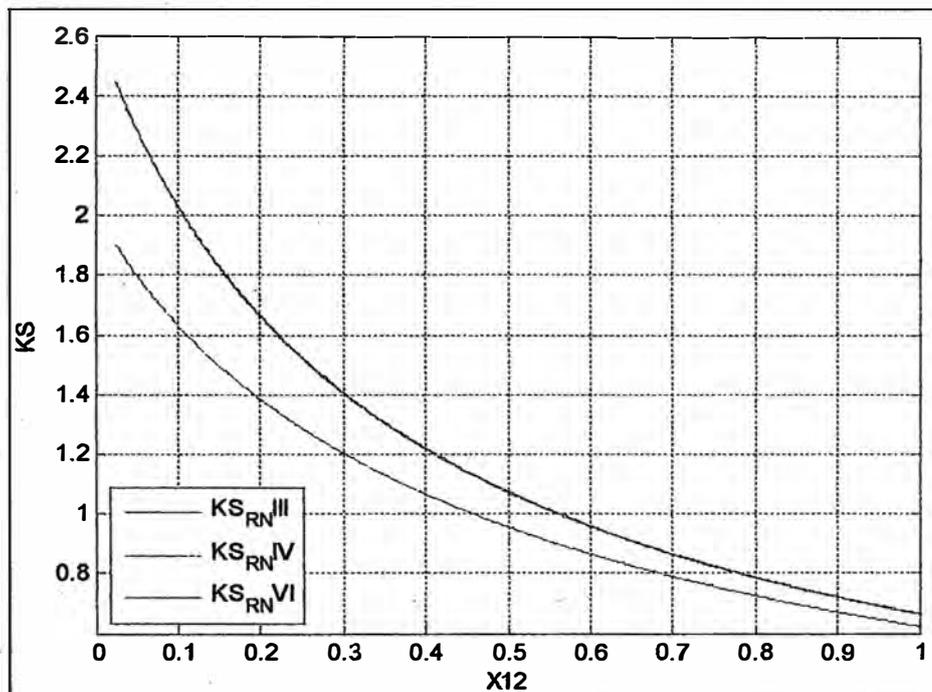


Fig.05 K_S de los tres modelos para variaciones de X_{12}

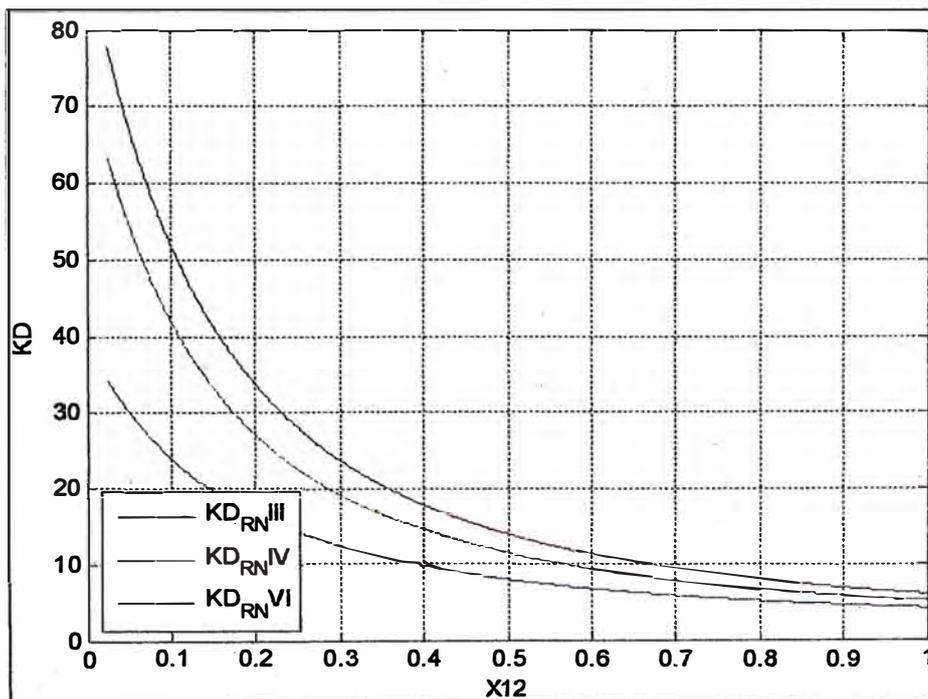


Fig.06 K_D de los tres modelos para variaciones de X_{12}

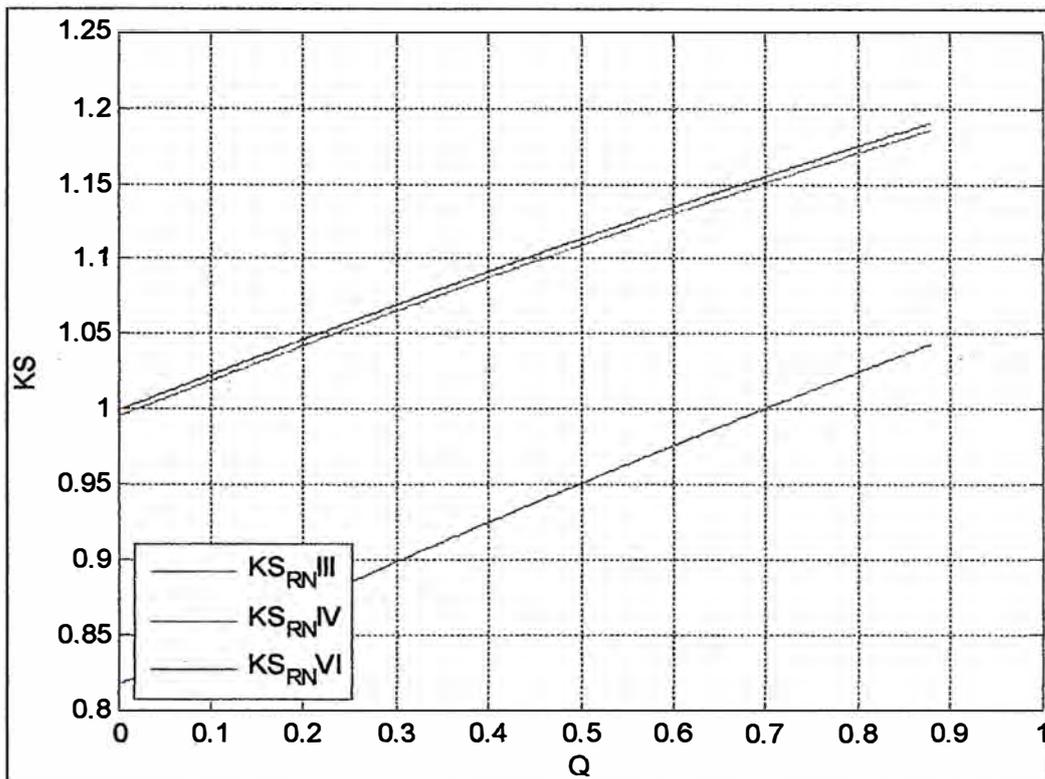


Fig.07 K_s de los tres modelos para variaciones de Q

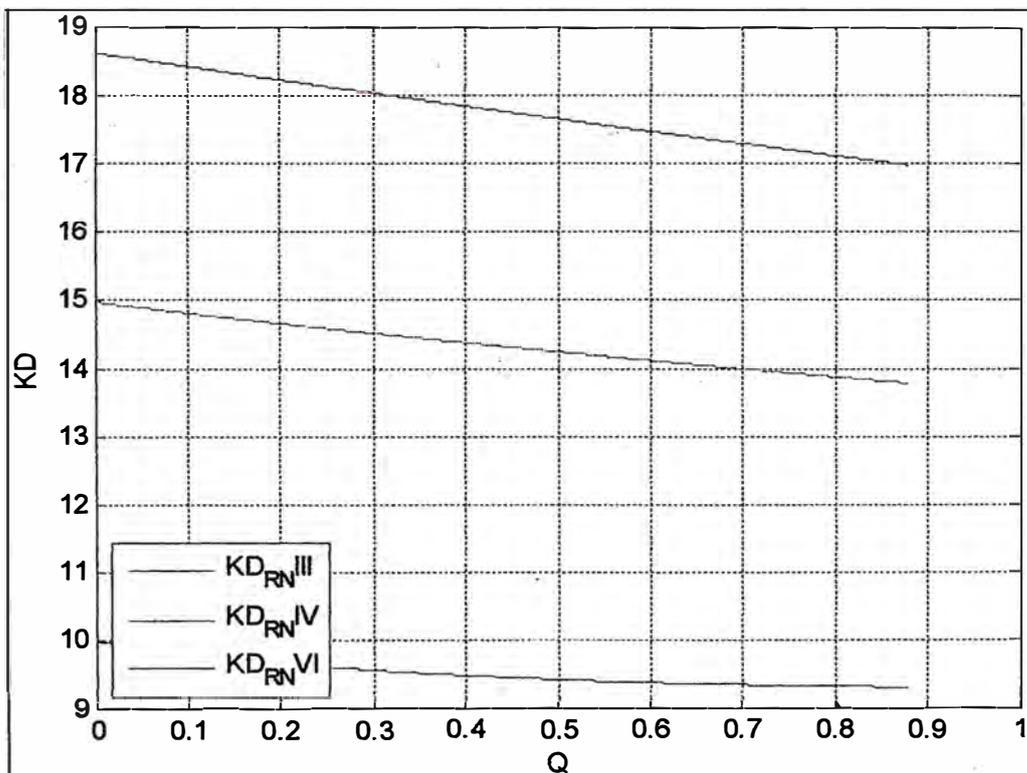


Fig.08 K_d de los tres modelos para variaciones de Q

Se aprecia que el modelo de tercer orden presenta menores valores de los coeficientes de sincronización y amortiguamiento en comparación a los modelos de cuarto y sexto orden, los mismos que presentan valores muy cercanos en el caso del coeficiente de sincronización.

8. Con ajustes de los reguladores y con los siguientes parámetros:

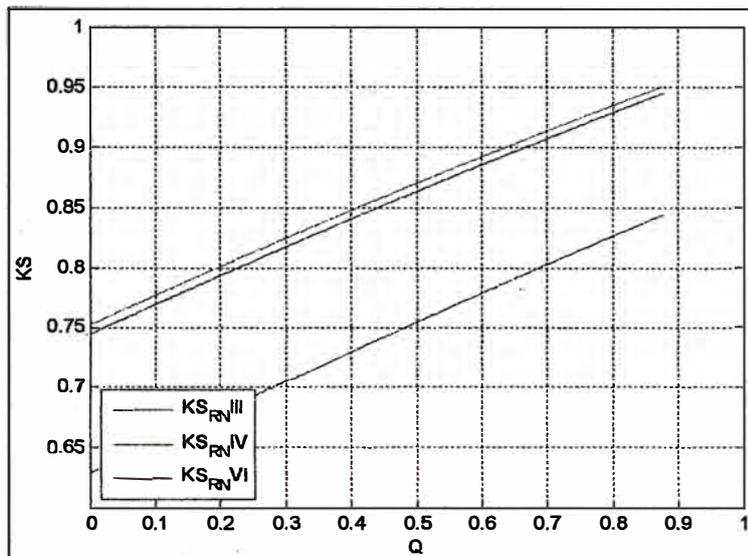


Fig.09 K_s de los tres modelos para variaciones de Q con parámetros ajustados

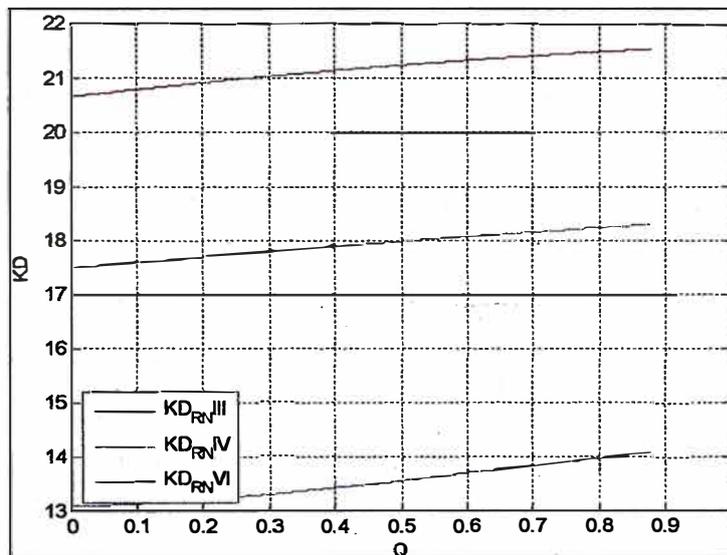


Fig.10 K_D de los tres modelos para variaciones de Q con parámetros ajustados

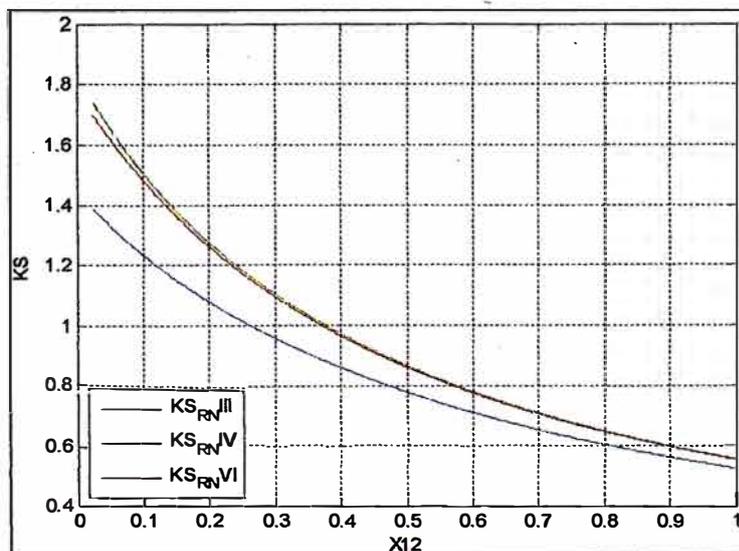


Fig.11 K_s de los tres modelos para variaciones de X_{12} con parámetros ajustados

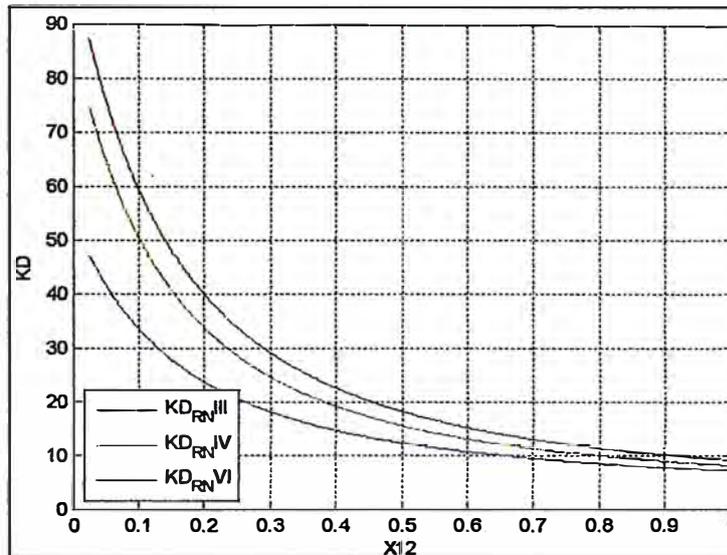


Fig.12 K_D de los tres modelos para variaciones de X_{12} con parámetros ajustados

9. El modelo de cuarto orden es una buena aproximación para la simulación del comportamiento de la máquina síncrona. El comportamiento del modelo de tercer orden de la máquina síncrona está más alejado del que presentan los modelos de Cuarto y Sexto Orden.
10. Sin embargo, se justifica el uso del modelo de tercer orden debido a que presenta un escenario pesimista en la estabilidad del sistema ante una perturbación, lo cual exige una mejor performance de dicho sistema y por ende garantiza que ésta se recupere ante una perturbación cuando se utilizan los parámetros obtenidos a partir de una simulación del modelo de tercer orden.
11. Con la información disponible se ha realizado un análisis de armónicos de la CH Cañón del Pato. Se escogieron eventos extremos, con información tomada del COES, para analizar escenarios variados. Se encontró que los niveles de THD de tensión se encontraban en niveles adecuados establecidos por el Estándar IEEE 519-1992. Se puede realizar análisis de mayor profundidad realizando pruebas in situ y utilizando equipos de medición que permitan monitorear otros parámetros para realizar un estudio de Calidad de Energía completo.

ANEXO A
SISTEMA DE PRUEBA PARA LA SIMULACIÓN DE
OSCILACIONES ELECTROMECAÑICAS DE BAJA
FRECUENCIA

En el Capítulo 1 del presente informe se utilizó el método de Espacio de Estado para simular la Estabilidad Permanente de un Sistema de Potencia con la finalidad de determinar los Coeficientes de Estabilidad Permanente.

En dicho análisis se ha tenido en cuenta que el Sistema de Potencia es autónomo, porque las derivadas de sus variables de estado no son funciones explícitas del tiempo, por tanto se representó como una función independiente del tiempo:

$$pX = F(X, u) \quad (A.1)$$

Asimismo, el sistema tiene ciertas variables de salida representadas por el vector Y , de orden $m \times 1$:

$$Y = G(X, u) \quad (A.2)$$

Adicionalmente, se debió representar matemáticamente, tanto la máquina síncrona como el resto del sistema.

El tema central del Informe está en la representación matemática de la máquina síncrona, por lo cual se ha mencionado reiteradamente que se están utilizando tres modelos: El modelo clásico o modelo de tercer orden, el modelo de cuarto orden o modelo transitorio en eje directo y el modelo de sexto orden o modelo subtransitorio en ambos ejes.

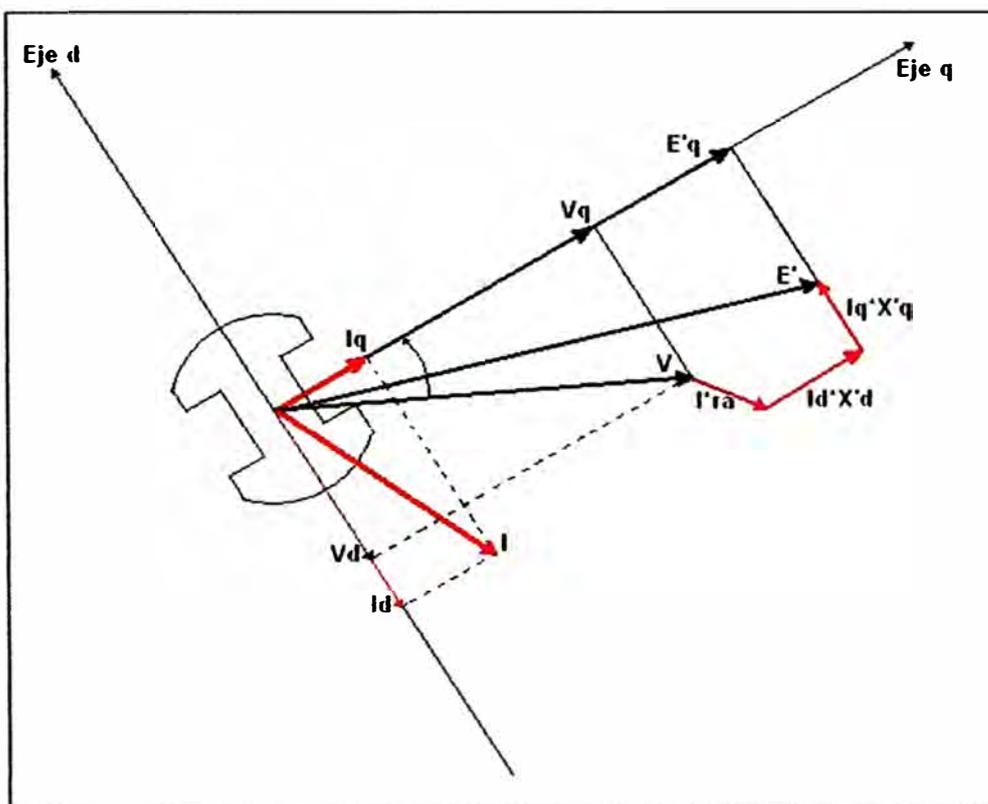


Fig. A. 1 Representación matemática de la máquina síncrona

Para representar el resto del sistema se utilizará un sistema de prueba simplificado, desarrollado como trabajo de tesis de ingeniería, cuyos alcances se presentan en el siguiente Paper:

SISTEMA DE PRUEBA PARA LA SIMULACIÓN DE OSCILACIONES ELECTROMECAÑICAS DE BAJA FRECUENCIA

Parte I : Conceptualización

Roberto Ramírez
COES-SINAC

Resumen

Se presenta un resumen de algunas experiencias sobre el problema de oscilaciones electromecánicas de baja frecuencia en el Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) del Perú.

Luego se propone un sistema de prueba (SP) que alimentado por el generador cuyo comportamiento dinámico se desea pronosticar, y variando las características de uno de sus componentes, el SP permite la generación de oscilaciones electromecánicas con bajas frecuencias, en el rango de 0.1 Hz a 3.0 Hz.

1. Introducción

Cuando ingresa una nueva central de generación al sistema o si una central existente ha sido repotenciada, como parte de los estudios de operatividad que el COES exige de acuerdo a sus procedimientos, el propietario debe mostrar que la nueva central no va a provocar efectos negativos sobre la dinámica del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) del Perú.

En este escenario de revisión se plantea la necesidad de evaluar la robustez de los reguladores de tensión (RT) y estabilizadores de sistemas de potencia (PSS), del nuevo componente dinámico, frente a diversas condiciones probables de operación del sistema del cual van a formar parte. Para ello es necesario disponer de los modelos dinámicos de todos los componentes del sistema, poseer una herramienta de simulación apropiada y efectuar un gran número de simulaciones de análisis

modal para identificar posibles problemas relacionados con los controladores de la nueva central. Estos problemas podrían ser provocados por una inadecuada selección de la lógica y tipo de controladores durante el proyecto de la central, por inapropiados ajustes durante la puesta en servicio o inclusive por errores en la preparación de los archivos para los análisis, u otros atribuibles a la Base de Datos del sistema.

En ese sentido es importante disponer de una metodología simple para pronosticar el comportamiento dinámico del conjunto Generador (G)-Sistema de Excitación y Regulación de Tensión (SERT)-Estabilizador de Sistemas de Potencia (PSS), operando en el sistema. En ese sentido, los indicadores del comportamiento dinámico deben poner en evidencia la estabilidad del conjunto G-SERT-PSS ante todos los modos de oscilación que existan o puedan ser producidos en el sistema. Significa que este conjunto debe ser robusto en numerosas condiciones probables de operación y frente a una gama de modos de oscilación presentes en el sistema.

Esta metodología tendría que ser de utilidad práctica para verificar el ajuste de los controladores de la nueva central o de centrales existentes en sistemas de gran tamaño.

En el presente artículo se desarrolla un sistema de prueba que permite la simulación de oscilaciones electromecánicas de bajas frecuencias, aproximadamente en el rango de 0.1 Hz a 3.0 Hz. Con este modelo será posible implementar una metodología para estimar el desempeño dinámico

del conjunto G-SERT-PSS de una determinada central en diferentes puntos de operación en el sistema o en otras palabras expuesto a diversos modos de oscilación de baja frecuencia, que serán producidas por el sistema de prueba propuesto.

Previamente se ha incluido un resumen sobre las oscilaciones de baja frecuencia mostrando algunas experiencias de este problema en el SEIN.

2. Oscilaciones de baja frecuencia

2.1 Características

Desde mitad de los años 60 se han observado en los sistemas de transmisión en diferentes países, en particular en las líneas que interconectan determinadas áreas, oscilaciones de las magnitudes eléctricas potencia, tensión, corriente y también de la frecuencia de la red. Por el rango de frecuencias (0,1 a 2,0 Hz) [1] con que se presentan estas oscilaciones, se les ha denominado oscilaciones de baja frecuencia (OBF). Algunas pruebas realizadas en el Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) del Perú, [2] y [3] han arrojado las magnitudes de frecuencia que se muestran en los Cuadros 1 y 2.

Central Ensayada	Modo Local (Hz)	Modo Interárea (Hz)
C.T. Ilo 2	1.1 - 1.4	0.65
C.H. Charcani V	1.2 - 1.4	-
C.H. San Gabán II	1.25	0.65

Cuadro 1. Tomado de referencia [2].

Central Ensayada	Modo Local (Hz)	Modo Interárea (Hz)
C.T. Talara (TGN4)	1.15	0.9
C.H. Cañón del Pato	1.4	0.65
C.T. Aguaytía	0.88	0.75

Cuadro 2. Tomado de referencia [3].

La experiencia muestra que estas oscilaciones pueden aparecer después de que el sistema eléctrico ha soportado con éxito un proceso transitorio originado por una perturbación o cuando, ante un cambio normal en las condiciones de operación, se activa alguno de los modos de oscilación que caracterizan al sistema.

2.1.1 Oscilaciones locales

El término "local" se usa porque las oscilaciones están localizadas en una central eléctrica o en una pequeña parte del sistema de potencia. Caracteriza a las oscilaciones del ángulo del rotor de un grupo de generación o una central, frente al resto del sistema. En estos problemas de oscilación del tipo local, también se incluye los modos de oscilación entre máquinas en una central de generación, que son denominadas "oscilaciones entre máquinas o modo intraplanta". En esta clasificación también puede incluirse las oscilaciones entre centrales de generación muy cercanas. Usualmente los modos locales y los modos intraplanta presentan frecuencias comprendidas en el rango de 0,7 a 2.0 Hz [1].

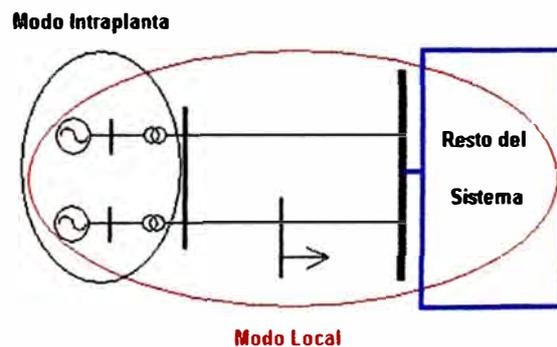


Figura 1. Modos locales e intraplanta

2.1.2 Oscilaciones entre áreas

Estas oscilaciones involucran a un grupo de máquinas en un área, las

cuales tienen un comportamiento coherente entre ellas y que oscilan en oposición frente a un grupo de generadores en otra área del sistema. Estas áreas están interconectadas por una línea de transmisión que constituye un enlace débil.

Estas oscilaciones se encuentran entre 0,1 y 0,7 Hz [1]. El problema de la estabilidad electromecánica interárea no se presenta normalmente, pero se evidencia en condiciones particulares de la red, que pueden ocurrir luego de maniobras normales [2], [3].

A las 18:10:30 h del 25 de julio de 2002, en el SEIN, al priorizarse el despacho de generación a mínimo costo se excedió levemente los límites de estabilidad permanente de la Chimbote-Paramonga, activándose un modo de oscilación del tipo interárea con amortiguamiento negativo, que provocó una secuela de desconexiones [4]. Las pruebas en la S.E. de Chimbote 1 del SEIN [5], para medir la potencia activa transmitida hacia la subestación Paramonga Nueva (Figura 2) pusieron en evidencia el modo de oscilación electromecánico interárea (0.65 Hz), que no resultaba problemático hasta un valor máximo de potencia transportada de 170 MW. Para valores superiores, tal oscilación resultaba evidente y persistente en la tensión y en la potencia reactiva; por ello, considerando el carácter de la carga de la planta SiderPerú, se ha recomendado que la transferencia de Norte a Centro en esta línea no supere 135 MW.

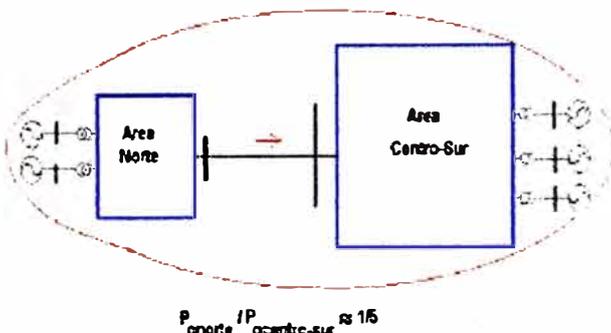


Figura 2. Modos interárea

2.2 Impacto de las OBF sobre el funcionamiento de la red

Dependiendo del amortiguamiento del sistema eléctrico, de los generadores y de los sistemas de regulación, estas oscilaciones pueden desaparecer o subsistir como oscilaciones de estado estacionario o bien presentar amplitudes crecientes.

Eventualmente un modo local no amortiguado (Figura 1) puede restringir la transmisión de potencia desde una central por un determinado sistema de transmisión [6].

En el caso de modos interárea, el efecto de su aparición se siente en toda la zona geográfica que este modo de oscilación acopla; presentándose oscilaciones en todas las magnitudes eléctricas como potencias activas, reactivas, tensiones, corrientes, frecuencia. Estas oscilaciones pueden tener un efecto, que es necesario evaluar, sobre los esquemas de rechazo de carga/generación por mínima o sobrefrecuencia del sistema [7] y [8]. Si las amplitudes son crecientes existe el peligro de la pérdida de estabilidad permanente, conducir a la partición del sistema eléctrico por efecto de la actuación de los sistemas de protección, con lo cual aumenta las probabilidades de efectuar cortes de carga y de que alguna zona del sistema evolucione hacia el colapso total [4].

2.3 Medidas en los sistemas de regulación

Un modo local poco amortiguado de una determinada central, puede mitigarse modificando el ajuste del estabilizador de su regulador de tensión [6].

En el caso de un modo interárea, por la naturaleza de la oscilación no-coherente entre las zonas o áreas involucradas, para amortiguar la oscilación, será

necesario inyectar una cantidad extra de energía en el área que instantáneamente se frena y/o consumir en el área que instantáneamente se acelera [9].

Los métodos de amortiguamiento de las oscilaciones interárea pueden resumirse en:

- a. Ubicar estabilizadores en el sistema de transmisión (FACTS), para modular la impedancia serie, la potencia activa o la potencia reactiva.
- b. Ubicar estabilizadores (PSS) en el sistema de regulación de tensión de las unidades de generación que presentan mayor participación en la formación del modo inestable.

En cuanto a la aplicación de PSS es importante mencionar que los controladores (tipo y lógica) tendrían que haber sido seleccionados para garantizar la estabilidad de las unidades de generación. Es decir mitigar el efecto de las grandes reactancias, dotando al sistema de adecuados torques sincronizantes y amortiguantes. Los estabilizadores que tienen señal de cambio de la frecuencia, tienen un buen comportamiento a bajas frecuencias (debajo del modo local), pero a mayores frecuencias puede volver inestable al modo de la excitatriz, provocar ruido y/o oscilaciones torsionales (de 10-20 Hz, que pueden activar en la red alguna condición de resonancia, si el grupo es de 2 polos) etc. [10, 11]. Los estabilizadores que tienen señal de potencia, no tiene ninguno de estos problemas en el rango alto de frecuencias, pero los tiene en las cercanías del modo local. Presenta disturbios en la tensión ante variaciones de generación, rechazos de carga, disturbios hidráulicos en la turbina [10, 11].

Cuando las centrales están muy alejadas del sistema, se recomienda

utilizar PSS con señales de integral de potencia acelerante [12]. En Argentina se han reemplazado los estabilizadores existentes en las centrales de mayor importancia del sistema, por este tipo de PSS, con lo cual han logrado incrementar la capacidad de transmisión en 300 MW [13].

3. Estructura del sistema de prueba

El sistema de prueba esta conformado por 2 barras, unidas por una reactancia variable X_{12} . En la barra 1 se va a conectar el generador, que entrega una potencia $P_1 + j Q_1$, cuyo regulador de tensión y estabilizador deben ser evaluados; asimismo, en esta barra se ha considerado una carga variable (P_{sh} y Q_{sh}). La barra 2 es una barra infinita con tensión 1.0 p.u.

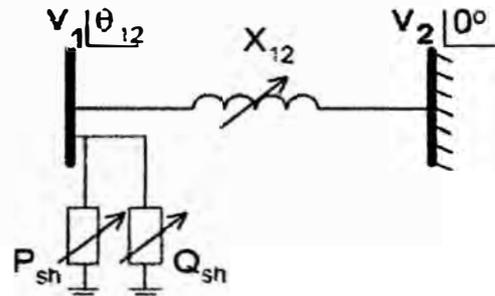


Figura 3. Sistema de Prueba

La frecuencia natural de oscilación (ω_n) y el factor de torque sincronizante (K_s) de una maquina sin regulación conectada a una barra infinita mediante una cierta reactancia externa, están dados por las relaciones (1) y (2) tomadas de [1]. En estas relaciones, K_s es inversamente proporcional a la reactancia externa X_T vista desde los bornes del generador y ω_n es proporcional a la raíz cuadrada de K_s .

$$\omega_n = \sqrt{(K_s w_0 / (2 * H))} \quad (1)$$

$$K_s = E'_q V_2 / X_T \cos \delta_0 \quad (2)$$

Se puede decir que en el sistema de prueba propuesto, una variación de la reactancia X_{12} va a cambiar la reactancia externa del generador y la frecuencia del modo electromecánico de oscilación presente en el sistema. La idea es variar la reactancia X_{12} en un determinado rango para producir una oscilación electromecánica con un rango de frecuencia que incluya modos interárea e intraplanta. De esa manera es posible estimar el desempeño de los controladores del generador en diferentes puntos de operación.

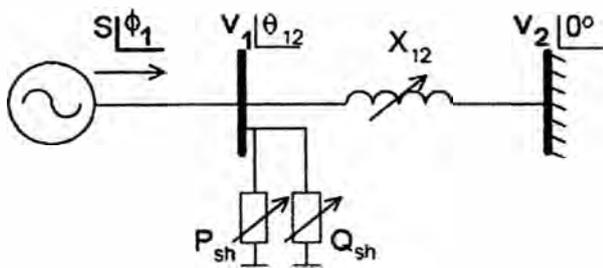


Figura 4. Generador-Sistema de Prueba

La idea es operar la central a tensión nominal, a potencia activa nominal y con cierto factor de potencia. En ese sentido, si se busca que la potencia generada por la máquina que se conecta a la barra 1 sea constante, aunque se varíe X_{12} , entonces la diferencia entre la potencia generada y la potencia transmitida por la reactancia, es absorbida por la carga conectada en la barra 1. De esta manera cuando la reactancia es muy grande, el flujo de potencia por la línea es muy pequeño y la carga absorbe prácticamente toda la potencia producida por la máquina. De manera inversa, cuando la reactancia es muy pequeña, prácticamente toda potencia generada es transmitida por la línea y absorbida por la barra infinita; en este caso, la potencia consumida por la carga tiende a cero.

Por lo tanto, con este sistema de prueba se puede evaluar el comportamiento dinámico de la máquina, que inyecta una determinada potencia aparente $P_1 + jQ_1$, frente a oscilaciones de diferentes frecuencias mediante la variación de la reactancia X_{12} . De esta manera se tiene un sistema de prueba que produce oscilaciones de diferente frecuencia a través del control de un parámetro independiente X_{12} , y otras magnitudes que son dependientes, tales como θ_{12} , P_{sh} y Q_{sh} .

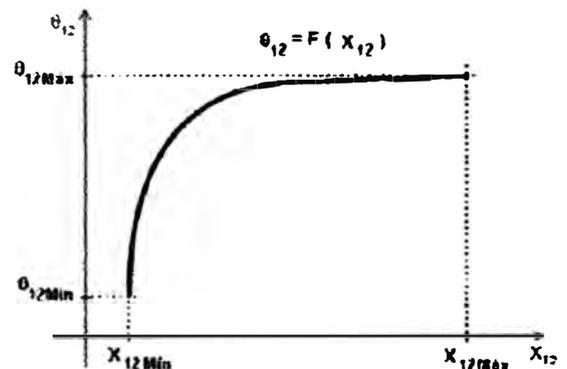


Figura 5. Relación entre X_{12} y θ_{12}

4. Ecuaciones del Sistema de Prueba

Si la máquina está operando en estado estacionario (Figura 4) con una determinada potencia aparente $P_1 + jQ_1$, se establece las siguientes ecuaciones:

$$P_1 = P_{sh} + P_{12} \quad (3)$$

$$Q_1 = Q_{sh} + Q_{12} \quad (4)$$

Las expresiones de P_{12} y Q_{12} están definidas por:

$$P_{12} = \frac{V_1 * V_2}{X_{12}} \sin(\theta_{12}) \quad (5)$$

$$Q_{12} = \frac{V_1^2}{X_{12}} - \frac{V_1 * V_2}{X_{12}} \cos(\theta_{12}) \quad (6)$$

La carga consumida por la carga variable se despeja de las ecuaciones (3) y (4), considerando las ecuaciones (5) y (6), se obtiene:

$$P_{sh} = P_1 - \frac{V_1 * V_2}{X_{12}} \sin(\theta_{12}) \quad (7)$$

$$Q_{sh} = Q_1 - \left(\frac{V_1^2}{X_{12}} - \frac{V_1 * V_2}{X_{12}} \cos \theta_{12} \right) \quad (8)$$

Se aprecia que las ecuaciones (7) y (8) se resuelven de modo muy simple si se conoce el valor que asume el ángulo θ_{12} entre las barras 1 y 2, para cada valor de reactancia X_{12} .

5. Relación $X_{12} - \theta_{12}$

La función que relaciona X_{12} y el ángulo θ_{12} debe ser escogida de modo tal que para muy valores pequeños de la reactancia X_{12} , la potencia enviada a la barra 2 sea prácticamente la potencia generada por la central y la potencia P_{sh} consumida por la carga sea pequeña.

Asimismo, para valores muy grandes de X_{12} el flujo de potencia por la línea debe ser mínimo y la carga debe consumir la mayor potencia posible.

Para representar estas características, es posible utilizar en forma empírica funciones logarítmicas de la forma $\theta_{12} = a \ln X_{12} + b$ que reproduzcan la forma de variación mostrado en la Figura 5.

Se ha escogido una ecuación del tipo Froelich, utilizada para representar características de saturación de núcleos ferromagnéticos [14]:

$$\theta_{12} = \frac{a \cdot X_{12}}{b + X_{12}} \quad (9)$$

Se debe definir un rango de variación de la reactancia X_{12} (Figura 5) y el valor máximo del ángulo θ_{12} , entonces se obtiene:

$$\theta_{12Min} = \arcsin(P_1 \cdot X_{12Min} / (V_1 \cdot V_2)) \quad (10)$$

$$a = (\theta_{12Max} / X_{12Max}) * (b + X_{12Max}) \quad (11)$$

$$b = \frac{X_{12Max} * (\theta_{12Min} - \theta_{12Max})}{(\theta_{12Max} - X_{12Max} * \theta_{12Min} / X_{12Min})} \quad (12)$$

En la Figura 6 se muestra la variación del ángulo θ_{12} en función de la reactancia X_{12} , cuyo rango ha sido definido como [0.05, 25] p.u.; en la Figura 7 se aprecia el comportamiento de la potencia P_{12} transmitida por la línea y la consumida por la carga P_{sh} , en función de la reactancia X_{12} , cuando el generador esta despachado con una potencia activa P_1 de 0.88 p.u. y las tensiones de las barras 1 y 2 son 1.0 p.u.

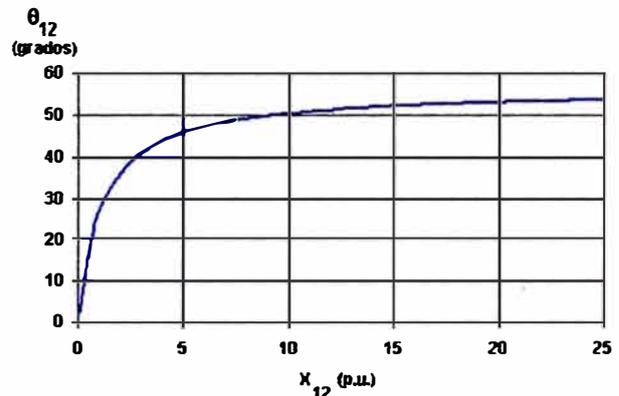


Figura 6. Relación $\theta_{12} = f(X_{12})$

6. Generación de modos electromecánicos de oscilación de baja frecuencia

Al conectar en la barra 1 del sistema de prueba un determinado generador, operado a tensión nominal y que esta despachado con $P_1 + j Q_1$, al variar la reactancia X_{12} en un determinado rango, se produce un modo de oscilación cuya frecuencia estará comprendida en el rango de las oscilaciones electromecánicas de baja frecuencia.

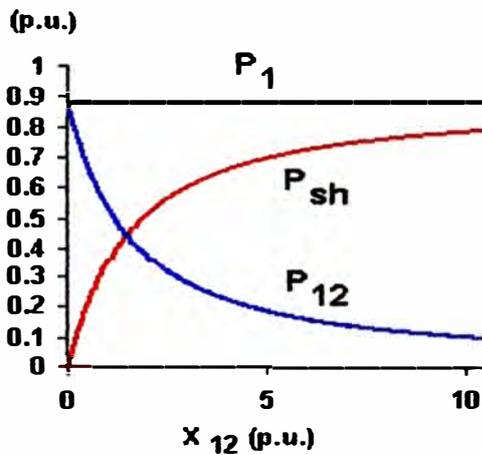


Figura 7. P_{12} y P_{sh} en función de X_{12}

Con la finalidad de mostrar lo explicado, de la forma más simple posible, se ha calculado la frecuencia natural de oscilación (ω_n) suponiendo que la maquina no tiene regulación y aceptando los siguientes supuestos:

- El generador se representa con el modelo clásico, reactancia transitoria (X'_d) detrás de una f.e.m. transitoria (E'_q).
- Se va construir un equivalente Thevenin visto desde los bornes del generador (impedancia Z_e y fuente V_e).
- R_e despreciable frente a Z_e .

Por lo tanto se tendrá el sistema mostrado en la Figura 8.

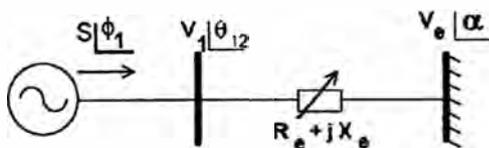


Figura 8. Sistema equivalente

5.1 Datos del Generador

Los datos utilizados corresponden a la C. H. San Gabán II que tiene 2 grupos de 63.5 MVA, cuyos parámetros se muestran en el Cuadro 5.1.

Dato	Valor	Unidad
S	63.5	MVA
$\cos \phi$	0.90	
X_d	1.19	p.u.
X_q	0.71	p.u.
X'_d	0.26	p.u.
T'_{do}	8.5	s
H	2.98	s

Cuadro 5.1 Parámetros

5.2 Resultados de simulación

Utilizando las ecuaciones se ha calculado la evolución de la frecuencia del modo de oscilación en función de la reactancia X_{12} , que se muestra en la Figura 9. Se aprecia que variando la reactancia X_{12} entre 0.05 p.u. y 2.5 p.u. se logran frecuencias entre 0.1 a 2.5 Hz.

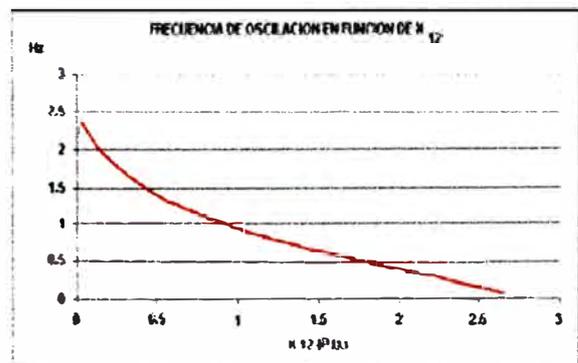


Figura 9. Frecuencia en función de X_{12}

De modo complementario se ha calculado el factor de torque sincronizante, que se muestra en la Figura 10.

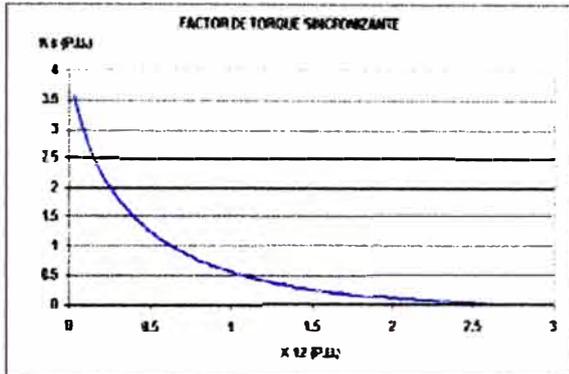


Figura 10. K_s en función de X_{12}

7. Conclusiones

Se ha desarrollado un sistema de prueba, para que sea alimentado por el generador cuyos controladores van a ser evaluados, de modo tal que variando uno de sus componentes (la reactancia variable X_{12}), el generador operando a plena carga o otra condición de carga definida por el usuario, estará expuesto a una oscilación cuya frecuencia puede variarse entre 0.1 a 3.0 Hz.

El paso siguiente es implementar una metodología para estimar el desempeño dinámico del conjunto G-SERT-PSS de una determinada central sometido a los diversos modos de oscilación de baja frecuencia, que serán producidas por el sistema de prueba propuesto.

8. Trabajos futuros

Utilizando el modelo Hefron-Philips se va a desarrollar una metodología de verificación de la estabilidad permanente de una determinada central sometido a los diversos modos de

oscilación que puede producir el sistema de prueba desarrollado. Se podrá verificar el efecto de utilizar para una misma central un PSS que procese las señales de potencia, velocidad, una combinación de potencia y velocidad o con una señal de integral de potencia acelerante.

9. Referencias bibliográficas

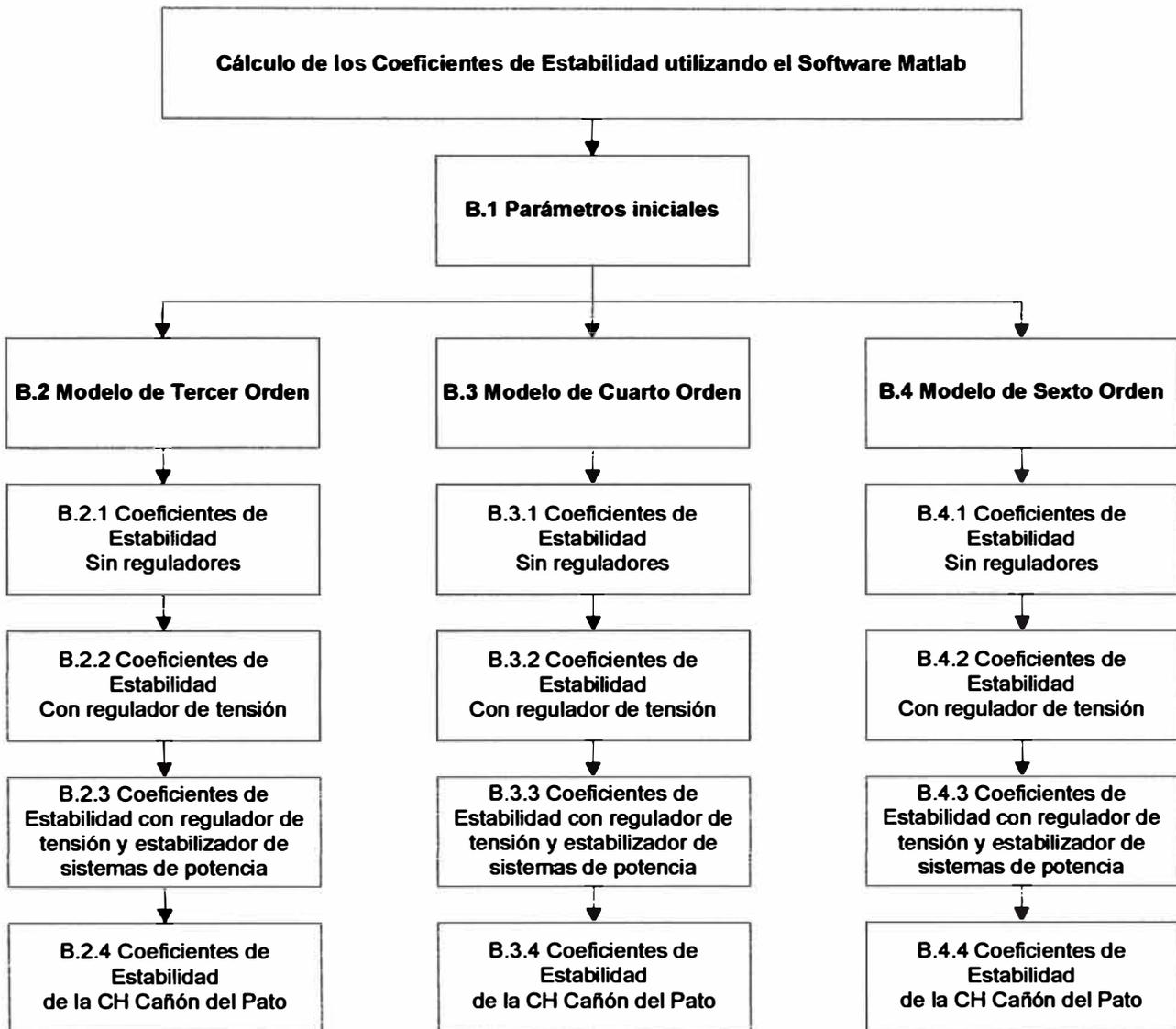
- [1] P. Kundur, "Power System Stability and Control, Mc Graw-Hill, New York, 1994.
- [2] Centrales Hidroeléctricas de San Gabán II, Charcani V y Central Térmica de Vapor Ilo 2 (Perú), Pruebas de Estabilidad Permanente, Octubre, 2002.
- [3] C. H. Cañón del Pato, C.T. Malacas (TGN4) y C.T. Aguaytía (Perú), Pruebas de Estabilidad Permanente, Enero, 2003.
- [4] INFORME TÉCNICO COES-SINAC/DEV-055-2002, Oscilaciones de Potencia en Área Operativa Norte del SEIN, julio 2002.
- [5] Capacidad de Transporte por Estabilidad Permanente de la línea Chimbote-Paramonga Nueva (L-2215), Enero, 2003.
- [6] Pruebas de Estabilidad del Sistema Eléctrico Peruano tras la puesta en marcha de la interconexión a 220 kV Socabaya-Mantaro, Informe CESI A0/038189, Noviembre de 2000.
- [7] Actualización del Esquema de Rechazo Automático de Carga/Generación del SEIN, año 2005, ISA, Septiembre 2004.
- [8] INFORME TÉCNICO COES-SINAC/DEV-001-2005, Desconexión de las Subestaciones Chiclayo-Guadalupe-Trujillo-Chimbote, Enero 2005.
- [9] R. WITZMANN, "Damping of Interárea Oscillations in Large Interconnected Power Systems, Dept. EV SE NC3, Siemens.
- [10] Lee, D.; Beaulieu, R., "A Power System Stabilizers Using Speed and

Electrical Power Inputs: Design and Field Experience", IEEE Transactions on PAS, vol. 100, n° 9, 1981.

- [11] Soares, J.; Reichert, F.; Neto, C., "Comparação entre Dierentes Sinais Adicionais Estabilizadores para Hidrogeradores: testes de Campo e Sumalação", 1° CLAA/5 °CBA, Campina Grande, 1984.
- [12] Lee, D.; Beaulieu, R.; Berube, G., "Accelerating Power versus Electrical Power as Input Signal to Power System Stabilizers", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 6 n 4, 1991.
- [13] Paiva, P.; Zeni, N.; Soares, J.; Pons, F., "Extensive PSS use in large systems: The Argentinean Case", IEEE 99° Summer Meeting, Edmonton, Canada, 1999.
- [14] Leander W. Match, "Máquinas Eléctricas y Electromecánicas", Universidad de Arizona, México, 1974.

ANEXO B
Algoritmos de Cálculo

Algoritmos de Cálculo



B.1 Parámetros Iniciales

`clearall`

`clc`

`closeall`

`%Punto Inicial`

`r=4052;`

`%Parámetros de los reguladores clásicos`

`Kstab=8;`

`Tw=2;`

`t1=1;`

`t2=.1;`

`Wos=2*pi*.8;`

`W0=2*pi*60;`

`KA=30;`

`TA=.01;`

`TR=.02;`

`%Parámetros de los reguladores reales`

`TW1=4;`

`TW2=4;`

`TW4=4;`

`T1=.05;`

`T2=.04;`

`T3=.05;`

`T4=.02;`

`T6=.064;`

`T7=4;`

`T8=.32;`

`T9=.08;`

KS1=18;

KS2=1.7;

KS3=1;

KP=30;

Ti=1.3;

%Parámetros de la Máquina

Xd=1.0;

Xq=0.737;

Xpd=0.351;

Xpq=0.42;

Xppd=.197;

Xppq=.231;

Tpdo=4.86;

Tpqo=0.91;

Tppdo=.02;

Tppqo=.04;

H=1.82;

ra=0;

%Condiciones Iniciales

P=0.95;

Q=.312;

Vto=1;

%Condiciones Iniciales del Sistema de Prueba

P1=P;

Q1=Q;

V1=1;

V2=1;

Xmin=.025;

```

Xmax=1;
teta_max=85*pi/180;
teta_min=asin(P1*Xmin/(V1*V2));
b=Xmax*(teta_min-teta_max)/(teta_max-Xmax*teta_min/Xmin);
a=teta_max*(b+Xmax)/Xmax;
paso=.0001;
q=(Xmax-Xmin)/paso+1;
X12=(Xmin:paso:Xmax);
%Declaración de Variables
teta12=zeros(1,q);
Psh=zeros(1,q);
Qsh=zeros(1,q);
Rsh=zeros(1,q);
Xsh=zeros(1,q);
Zsh=complex(zeros(1,q));
Re=zeros(1,q);
Xe=zeros(1,q);
Eth=complex(zeros(1,q));
Vs=zeros(1,q);
alfa_1=zeros(1,q);

for j=1:q,
teta12(j)=a*X12(j)/(b+X12(j));
Psh(j)=P1-V1*V2*sin(teta12(j))/X12(j);
Qsh(j)=Q1-(V1^2/X12(j)-V1*V2*cos(teta12(j))/X12(j));
Rsh(j)=V1^2*Psh(j)/(Psh(j)^2+Qsh(j)^2);
Xsh(j)=V1^2*Qsh(j)/(Psh(j)^2+Qsh(j)^2);
Zsh(j)=V1^2/(Psh(j)-1i*Qsh(j));

```

```

Xe(j)=imag(1/(1/(1i*X12(j))+1/Zsh(j)));
Re(j)=real(1/(1/(1i*X12(j))+1/Zsh(j)));
Vs(j)=abs(V2*Zsh(j)/(Zsh(j)+1i*X12(j)));
    alfa_1(j)=angle(V2*Zsh(j)/(Zsh(j)+1i*X12(j)));
end
%Punto Inicial
RE=Re(r);
XE=Xe(r);
VS=Vs(r);
alfa=alfa_1(r);
teta=teta12(r);
%Máquina Síncrona - Sistema de Potencia
Io=sqrt(P^2+Q^2)/Vto;
gamma=angle((V1*exp(1i*teta)-VS*exp(1i*alfa))/(RE+1i*XE));
fi=teta-gamma;
Ir=Io*cos(gamma);
Ii=Io*sin(gamma);
Vr=Vto*cos(teta);
Vi=Vto*sin(teta);
deltai=atan((Xq*Io*cos(fi)-ra*Io*sin(fi))/(Vto+ra*Io*cos(fi)+Xq*Io*sin(fi)));
deltao=deltai+teta;
Vqd=[Vto*cos(deltai) -Vto*sin(deltai)];
lqd=[Io*cos(deltai+fi) -Io*sin(deltai+fi)];

```

B.2 Modelo de Tercer Orden

B.2.1 Coeficientes de Estabilidad sin reguladores

a. Constantes Principales

```
run ('E:\CD Inf. Sup. Vanessa Ruiz Q\Algoritmos Matlab\Modelos Matlab\parametros')
```

```
Epqo=Vqd(1)-Xpd*Iqd(2)+ra*Iqd(1);
```

$$K_{III} = RE^2 + (XE + Xq) * (XE + Xpd);$$

$$K1_{III} = (VS/K_{III}) * ((Epqo - (-Xpd + Xq) * Iqd(2)) * (RE * \sin(\text{deltao} - \text{alfa}) ...$$

$$+ (XE + Xpd) * \cos(\text{deltao} - \text{alfa}) - (-Xpd + Xq) * Iqd(1) * (- (XE + Xq) * \sin(\text{deltao} - \text{alfa}) + RE * \cos(\text{deltao} - \text{alfa})))$$

$$K2_{III} = (Iqd(1) + (Epqo - (-Xpd + Xq) * Iqd(2)) * (RE/K_{III}) + (XE + Xq) * (-Xpd + Xq) * Iqd(1)/K_{III})$$

$$K3_{III} = 1 / (1 + (Xd - Xpd) * (Xq + XE) / K_{III})$$

$$K4_{III} = (VS/K_{III}) * (Xd - Xpd) * ((Xq + XE) * \sin(\text{deltao} - \text{alfa}) - RE * \cos(\text{deltao} - \text{alfa}))$$

$$K5_{III} = (- (VS/K_{III}) * ((Vqd(2)/Vto) * Xq * (RE * \sin(\text{deltao} - \text{alfa}) + (Xpd + XE) * \cos(\text{deltao} - \text{alfa})) ...$$

$$- (Vqd(1)/Vto) * Xpd * (RE * \cos(\text{deltao} - \text{alfa}) - (Xq + XE) * \sin(\text{deltao} - \text{alfa}))))$$

$$K6_{III} = (- (Vqd(2)/Vto) * (Xq/K_{III}) * RE + (Vqd(1)/Vto) * (- (Xpd/K_{III}) * (Xq + XE) + 1))$$

%Coeficientes de la Potencia Eléctrica (Regulador Nuevo)

$$K\text{alfa}_{RN_III} = VS * (((Vqd(2) + RE * Iqd(2) - XE * Iqd(1)) * RE + (Vqd(1) + Iqd(2) * XE + RE * Iqd(1)) * (Xpd + XE)) * (1/K_{III} - Iqd(2)) * ...$$

$$\cos(\text{deltao} - \text{alfa}) + ((- (Vqd(2) + RE * Iqd(2) - XE * Iqd(1)) * (Xq + XE) + (Vqd(1) + Iqd(2) * XE + RE * Iqd(1)) * RE) * (1/K_{III} - Iqd(1)) * ...$$

$$\sin(\text{deltao} - \text{alfa}))$$

$$K\text{beta}_{RN_III} = (1/K_{III}) * (- (Vqd(2) + RE * Iqd(2) - XE * Iqd(1)) * (Xq + XE) + (Vqd(1) + Iqd(2) * XE + RE * Iqd(1)) * RE)$$

b. Coeficientes de Amortiguamiento y de Sincronización

run('D:\Vane\Tesis\Modelo de 3er Orden\Sin regulación (III)\Matlab_III_sin\transitoriod')

$$KS_{\text{sin_III}} = K1_{III} - K2_{III} * K3_{III} * K4_{III} / (1 + (Wos * K3_{III} * Tpdo)^2)$$

$$KD_{\text{sin_III}} = K2_{III} * K4_{III} * K3_{III}^2 * Tpdo * W0 / (1 + (Wos * K3_{III} * Tpdo)^2)$$

B.2.2 Coeficientes de Estabilidad con regulador de tensión

run('D:\Vane\Tesis\Modelo de 3er Orden\Sin regulación (III)\Matlab_III_sin\transitoriod')

$$\text{beta1}_{RT_III} = (1 - Wos^2 * TR * TA) - Wos^2 * K3_{III} * Tpdo * (TR + TA) + K3_{III} * KA * K6_{III};$$

$$\text{beta2}_{RT_III} = Wos * (K3_{III} * Tpdo * (1 - Wos^2 * TR * TA) + (TR + TA));$$

$$j\text{i1}_{RT_III} = K3_{III} * K4_{III} * (1 - Wos^2 * TR * TA);$$

$$j\text{i2}_{RT_III} = Wos * K3_{III} * K4_{III} * (TR + TA);$$

$fi1_RT_III = ((K3_III * KA * K5_III + ji1_RT_III) * beta1_RT_III + beta2_RT_III * ji2_RT_III) / (beta1_RT_III^2 + beta2_RT_III^2);$

$fi2_RT_III = (beta1_RT_III * ji2_RT_III - beta2_RT_III * (K3_III * KA * K5_III + ji1_RT_III)) / (beta1_RT_III^2 + beta2_RT_III^2);$

$KS_RT_III = K1_III - K2_III * fi1_RT_III$

$KD_RT_III = -(K2_III * fi2_RT_III) * (W0 / Wos)$

B.2.3 Coeficientes de Estabilidad con regulador de tensión y estabilizador de sistemas de potencia

run ('E:\CD Inf. Suf. Vanessa Ruiz Q\Algoritmos Matlab\Modelo de 3er Orden\Sin regulación (III)\Matlab_III_sin\transitoriod')

$pp1_III = K2_III * K3_III * (KA * K5_III + K4_III * (1 - Wos^2 * TR * TA));$

$pp2_III = K2_III * K3_III * K4_III * Wos * (TR + TA);$

$qq1_III = Wos^2 * Kstab * K2_III * K3_III * KA * Tw * (1 - Wos^2 * TR * t1);$

$qq2_III = Wos^3 * Kstab * K2_III * K3_III * KA * Tw * (TR + t1);$

$rr1_III = (1 - Wos^2 * K3_III * Tpdo * TR) - Wos^2 * TA * (K3_III * Tpdo + TR) + K3_III * KA * K6_III;$

$rr2_III = Wos * (TA * (1 - Wos^2 * K3_III * Tpdo * TR) + K3_III * Tpdo + TR);$

$uu1_III = rr1_III * (1 - Wos^2 * Tw * t2) - Wos * rr2_III * (Tw + t2);$

$uu2_III = rr2_III * (1 - Wos^2 * Tw * t2) + Wos * (Tw + t2) * rr1_III;$

$KS_PSS_III = K1_III - (pp1_III * rr1_III + pp2_III * rr2_III) / (rr1_III^2 + rr2_III^2) - \dots$

$(qq1_III * uu1_III + qq2_III * uu2_III) / ((uu1_III^2 + uu2_III^2) * W0)$

$KD_PSS_III = -(pp2_III * rr1_III - pp1_III * rr2_III) / (rr1_III^2 + rr2_III^2) + \dots$

$(qq2_III * uu1_III - qq1_III * uu2_III) / ((uu1_III^2 + uu2_III^2) * W0) * (W0 / Wos)$

$q1_III = (1 - Wos^2 * K3_III * Tpdo * TR) - Wos^2 * TA * (K3_III * Tpdo + TR) + K3_III * KA * K6_III;$

$q2_III = Wos * (K3_III * Tpdo + TR + TA * (1 - Wos^2 * K3_III * Tpdo * TR));$

$p1_III = KA * K5_III + K4_III * (1 - Wos^2 * TR * TA);$

$p2_III = Wos * K4_III * (TR + TA);$

$r1_III = -Wos^2 * Tw * (t1 + TR);$

$$r2_III = Wos * Tw * (1 - Wos^2 * t1 * TR);$$

$$u1_III = q1_III * (1 - Wos^2 * Tw * t2) - q2_III * Wos * (Tw + t2);$$

$$u2_III = q2_III * (1 - Wos^2 * Tw * t2) + Wos * q1_III * (Tw + t2);$$

$$KD2_III = -K2_III * K3_III * (p2_III * q1_III - q2_III * p1_III) * (W0 / Wos) / (q1_III^2 + q2_III^2) + \dots$$

$$Kstab * K2_III * K3_III * KA * (r1_III * u1_III + r2_III * u2_III) / (u1_III^2 + u2_III^2);$$

$$KS2_III = K1_III - K2_III * K3_III * (p1_III * q1_III + p2_III * q2_III) / (q1_III^2 + q2_III^2) - \dots$$

$$Kstab * K2_III * K3_III * KA * (u1_III * r2_III - u2_III * r1_III) * (Wos / W0) / (u1_III^2 + u2_III^2);$$

B.2.4 Coeficientes de Estabilidad de la CH Cañón del Pato

run ('E:\CD Inf. Surf. Vanessa Ruiz Q\Algoritmos Matlab\Modelo de 3er Orden\Sin regulación (III)\Matlab_III_sin\transitoriod.m')

$$alfa1_RN_III = -Wos^2 * TW2 * KS1 * K3_III * KP * ((T7 + TW4) * ((1 - Wos^2 * T1 * T3) * (1 - Wos^2 * Ti * T8) - Wos^2 * (T1 + T3) * (Ti + T8)) + ((T1 + T3) * (1 - Wos^2 * Ti * T8) + (Ti + T8) * (1 - Wos^2 * T1 * T3))) * (1 - Wos^2 * T7 * TW4)$$

$$alfa2_RN_III = Wos * TW2 * KS1 * K3_III * KP * ((1 - Wos^2 * T7 * TW4) * ((1 - Wos^2 * T1 * T3) * (1 - Wos^2 * Ti * T8) - Wos^2 * (T1 + T3) * (Ti + T8)) - Wos^2 * (T7 + TW4) * ((T1 + T3) * (1 - Wos^2 * Ti * T8) + (Ti + T8) * (1 - Wos^2 * T1 * T3)))$$

$$beta1_RN_III = K3_III * (KP * (-K5_III * (((1 - Wos^2 * T2 * T4) * (1 - Wos^2 * T7 * TW4) - Wos^2 * (T2 + T4) * (T7 + TW4))) * ((1 - Wos^2 * T9^2)^2 - 4 * Wos^2 * T9^2) - Wos^2 * 4 * T9 * (1 - Wos^2 * T9^2) * ((T2 + T4) * (1 - Wos^2 * T7 * TW4) + (T7 + TW4) * (1 - Wos^2 * T2 * T4)))) - Wos^2 * TW4 * KS2 * Kalfa_RN_III * KS1 * ((T1 + T3) * (- (1 - Wos^2 * T9^2)^2 + 4 * Wos^2 * T9^2 + KS3)) + (-4 * T9 * (1 - Wos^2 * T9^2) + T8 * KS3) * (1 - Wos^2 * T1 * T3)) - Wos^2 * Ti * (TW4 * KS2 * Kalfa_RN_III * KS1 * ((1 - Wos^2 * T1 * T3) * (- (1 - Wos^2 * T9^2)^2 + 4 * Wos^2 * T9^2 + KS3) - Wos^2 * (T1 + T3) * (-4 * T9 * (1 - Wos^2 * T9^2) + T8 * KS3)) - K5_III * (((T2 + T4) * (1 - Wos^2 * T7 * TW4) + (T7 + TW4) * (1 - Wos^2 * T2 * T4))) * ((1 - Wos^2 * T9^2)^2 - 4 * Wos^2 * T9^2) + 4 * T9 * (1 - Wos^2 * T9^2) * ((1 - Wos^2 * T2 * T4) * (1 - Wos^2 * T7 * TW4) - Wos^2 * (T2 + T4) * (T7 + TW4))))))...$$

$$\begin{aligned}
& +Wos^2*Ti*K4_III*(T4*((1-Wos^2*T2*T4)*(1-Wos^2*T7*TW4)- \\
& Wos^2*(T2+T4)*(T7+TW4))*((1-Wos^2*T9^2)^2-4*Wos^2*T9^2)-Wos^2*4*T9*(1- \\
& Wos^2*T9^2)*... \\
& ((T2+T4)*(1-Wos^2*T7*TW4)+(T7+TW4)*(1-Wos^2*T2*T4))) +(((T2+T4)*(1- \\
& Wos^2*T7*TW4)+(T7+TW4)*(1-Wos^2*T2*T4))*((1-Wos^2*T9^2)^2-4*Wos^2*T9^2)... \\
& +4*T9*(1-Wos^2*T9^2))*((1-Wos^2*T2*T4)*(1-Wos^2*T7*TW4)- \\
& Wos^2*(T2+T4)*(T7+TW4))))))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{beta2_RN_III} &= Wos*K3_III*(KP*((TW4*KS2*Kalfa_RN_III*KS1*((1-Wos^2*T1*T3)*-(1- \\
& Wos^2*T9^2)^2+4*Wos^2*T9^2+KS3)-Wos^2*(T1+T3)*(-4*T9*(1-Wos^2*T9^2)+T8*... \\
& KS3)) -K5_III*(((T2+T4)*(1-Wos^2*T7*TW4)+(T7+TW4)*(1-Wos^2*T2*T4))*((1- \\
& Wos^2*T9^2)^2-4*Wos^2*T9^2)+4*T9*(1-Wos^2*T9^2))*((1-Wos^2*T2*T4)*... \\
& (1-Wos^2*T7*TW4)-Wos^2*(T2+T4)*(T7+TW4)))) +Ti*(-K5_III*(((1-Wos^2*T2*T4)*(1- \\
& Wos^2*T7*TW4)-Wos^2*(T2+T4)*(T7+TW4))*((1-Wos^2*T9^2)^2-4*Wos^2*... \\
& T9^2)-Wos^2*4*T9*(1-Wos^2*T9^2))*((T2+T4)*(1-Wos^2*T7*TW4)+(T7+TW4)*(1- \\
& Wos^2*T2*T4))) -Wos^2*TW4*KS2*Kalfa_RN_III*KS1*((T1+T3)*-(1-Wos^2*... \\
& T9^2)^2+4*Wos^2*T9^2+KS3)+(-4*T9*(1-Wos^2*T9^2)+T8*KS3)*(1-Wos^2*T1*T3))))... \\
& -Ti*K4_III*(((1-Wos^2*T2*T4)*(1-Wos^2*T7*TW4)-Wos^2*(T2+T4)*(T7+TW4))*((1- \\
& Wos^2*T9^2)^2-4*Wos^2*T9^2)-Wos^2*4*T9*(1-Wos^2*T9^2))*((T2+T4)*(1-... \\
& Wos^2*T7*TW4)+(T7+TW4)*(1-Wos^2*T2*T4))) -Wos^2*T4*(((T2+T4)*(1- \\
& Wos^2*T7*TW4)+(T7+TW4)*(1-Wos^2*T2*T4))*((1-Wos^2*T9^2)^2- \\
& 4*Wos^2*T9^2)+4*... \\
& T9*(1-Wos^2*T9^2))*((1-Wos^2*T2*T4)*(1-Wos^2*T7*TW4)- \\
& Wos^2*(T2+T4)*(T7+TW4))))))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{ji1_RN_III} &= (-Wos^2*Ti*(((T4+K3_III*Tpdo)*(1-Wos^2*T2*T4)+(T2+T4)*(1- \\
& Wos^2*K3_III*Tpdo*T4))*((1-Wos^2*T7*TW4))*((1-Wos^2*T9^2)^2-4*Wos^2*T9^2)-... \\
& Wos^2*4*T9*(1-Wos^2*T9^2)*(T7+TW4)) +((T7+TW4))*((1-Wos^2*T9^2)^2- \\
& 4*Wos^2*T9^2)+4*T9*(1-Wos^2*T9^2)*(1-Wos^2*T7*TW4))*((1-Wos^2*K3_III*... \\
& Tpdo*T4)*(1-Wos^2*T2*T4)-Wos^2*(T4+K3_III*Tpdo)*(T2+T4))))... \\
& -K3_III*KP*((-K6_III*(((1-Wos^2*T2*T4)*(1-Wos^2*T7*TW4)- \\
& Wos^2*(T2+T4)*(T7+TW4))*((1-Wos^2*T9^2)^2-4*Wos^2*T9^2) -Wos^2*4*T9*(1- \\
& Wos^2*T9^2)*... \\
& ((T2+T4)*(1-Wos^2*T7*TW4)+(T7+TW4)*(1-Wos^2*T2*T4))) - \\
& Wos^2*Kbeta_RN_III*KS1*KS2*TW4*((T1+T3)*-(1- \\
& Wos^2*T9^2)^2+4*Wos^2*T9^2+KS3)+(T8*KS3-...
\end{aligned}$$

$$4 * T9 * (1 - Wos^2 * T9^2) * (1 - Wos^2 * T1 * T3)) ...$$

$$- Wos^2 * Ti * (-K6_III * (((T2 + T4) * (1 - Wos^2 * T7 * TW4) + (T7 + TW4) * (1 - Wos^2 * T2 * T4)) * ((1 - Wos^2 * T9^2)^2 - 4 * Wos^2 * T9^2) + 4 * T9 * (1 - Wos^2 * T9^2) * ((1 - Wos^2 * T2 * T4) * (1 - Wos^2 * T7 * TW4) - Wos^2 * (T2 + T4) * (T7 + TW4))))$$

$$+ Kbeta_RN_III * KS1 * KS2 * TW4 * ((1 - Wos^2 * T1 * T3) * (- (1 - Wos^2 * T9^2)^2 + 4 * Wos^2 * T9^2 + KS3) - Wos^2 * (T1 + ...$$

$$T3) * (T8 * KS3 - 4 * T9 * (1 - Wos^2 * T9^2))))))$$

$$ji2_RN_III = Wos * (Ti * (((1 - Wos^2 * K3_III * Tpdo * T4) * (1 - Wos^2 * T2 * T4) - Wos^2 * (T4 + K3_III * Tpdo) * (T2 + T4)) * ((1 - Wos^2 * T7 * TW4) * ((1 - Wos^2 * T9^2)^2 - 4 * Wos^2 * T9^2) - ...$$

$$Wos^2 * 4 * T9 * (1 - Wos^2 * T9^2) * (T7 + TW4)) - Wos^2 * ((T4 + K3_III * Tpdo) * (1 - Wos^2 * T2 * T4) + (T2 + T4) * (1 - Wos^2 * K3_III * Tpdo * T4)) * ((T7 + TW4) * ((1 - Wos^2 * T9^2)^2 - 4 * Wos^2 * T9^2) + 4 * T9 * (1 - Wos^2 * T9^2) * (1 - Wos^2 * T7 * TW4)))) ...$$

$$- K3_III * KP * ((-K6_III * (((T2 + T4) * (1 - Wos^2 * T7 * TW4) + (T7 + TW4) * (1 - Wos^2 * T2 * T4)) * ((1 - Wos^2 * T9^2)^2 - 4 * Wos^2 * T9^2) + 4 * T9 * (1 - Wos^2 * T9^2) * ((1 - Wos^2 * T2 * T4) * (1 - Wos^2 * T7 * TW4) - Wos^2 * (T2 + T4) * (T7 + TW4))))$$

$$+ Kbeta_RN_III * KS1 * KS2 * TW4 * ((1 - Wos^2 * T1 * T3) * (- (1 - Wos^2 * T9^2)^2 + 4 * Wos^2 * T9^2 + KS3) - Wos^2 * (T1 + T3) * ...$$

$$(T8 * KS3 - 4 * T9 * (1 - Wos^2 * T9^2)))))) ...$$

$$+ Ti * (-K6_III * (((1 - Wos^2 * T2 * T4) * (1 - Wos^2 * T7 * TW4) - Wos^2 * (T2 + T4) * (T7 + TW4)) * ((1 - Wos^2 * T9^2)^2 - 4 * Wos^2 * T9^2) - Wos^2 * 4 * T9 * (1 - Wos^2 * T9^2) * ((T2 + T4) * (1 - ...$$

$$Wos^2 * T7 * TW4) + (T7 + TW4) * (1 - Wos^2 * T2 * T4))) -$$

$$Wos^2 * Kbeta_RN_III * KS1 * KS2 * TW4 * ((T1 + T3) * (- (1 - Wos^2 * T9^2)^2 + 4 * Wos^2 * T9^2 + KS3) + (T8 * KS3 - 4 * T9 * (1 - Wos^2 * ...$$

$$T9^2)) * (1 - Wos^2 * T1 * T3))))))$$

$$delta1_RN_III = (alfa1_RN_III * (ji1_RN_III - ji2_RN_III * Wos * TW2) + alfa2_RN_III * (ji2_RN_III + ji1_RN_III * Wos * TW2)) / ...$$

$$((ji1_RN_III - ji2_RN_III * Wos * TW2)^2 + (ji2_RN_III + ji1_RN_III * Wos * TW2)^2)$$

$$delta2_RN_III = (alfa2_RN_III * (ji1_RN_III - ji2_RN_III * Wos * TW2) -$$

$$alfa1_RN_III * (ji2_RN_III + ji1_RN_III * Wos * TW2)) / ...$$

$$((ji1_RN_III - ji2_RN_III * Wos * TW2)^2 + (ji2_RN_III + ji1_RN_III * Wos * TW2)^2)$$

$$\text{epsilon1_RN_III}=(\text{beta1_RN_III}*\text{ji1_RN_III}+\text{beta2_RN_III}*\text{ji2_RN_III})/(\text{ji1_RN_III}^2+\text{ji2_RN_III}^2)$$

$$\text{epsilon2_RN_III}=(\text{beta2_RN_III}*\text{ji1_RN_III}-\text{beta1_RN_III}*\text{ji2_RN_III})/(\text{ji1_RN_III}^2+\text{ji2_RN_III}^2)$$

$$\text{KS}=\text{K1_III}+\text{epsilon1_RN_III}*\text{K2_III}-(\text{Wos}/\text{W0})*\text{K2_III}*\text{delta2_RN_III}$$

$$\text{KD}=\text{K2_III}*\text{delta1_RN_III}+(\text{W0}/\text{Wos})*\text{K2_III}*\text{epsilon2_RN_III}$$

B.3 Modelo de Cuarto Orden

B.3.1 Coeficientes de Estabilidad sin reguladores

run ('E:\CD Inf. Suf. Vanessa Ruiz QVA algoritmos Matlab\Tesis\Modelo de 4to Orden\Sin regulaci3n (IV)\Matlab_IV_sin\transitoriodq.m')

$$\text{beta1_sin_IV}=(1-\text{Wos}^2*\text{K3_IV}*\text{Tpdo}*\text{K3a_IV}*\text{Tpqo}+\text{K3_IV}*\text{K3a_IV}*\text{K8_IV}*\text{K7_IV});$$

$$\text{beta2_sin_IV}=\text{Wos}*(\text{K3_IV}*\text{Tpdo}+\text{K3a_IV}*\text{Tpqo});$$

$$\text{ji1_sin_IV}=\text{K3_IV}*(\text{K4_IV}+\text{K9_IV}*\text{K7_IV}*\text{K3a_IV});$$

$$\text{ji2_sin_IV}=\text{Wos}*\text{K3_IV}*\text{K4_IV}*\text{K3a_IV}*\text{Tpqo};$$

$$\text{fi1_sin_IV}=(\text{ji1_sin_IV}*\text{beta1_sin_IV}+\text{beta2_sin_IV}*\text{ji2_sin_IV})/(\text{beta1_sin_IV}^2+\text{beta2_sin_IV}^2);$$

$$\text{fi2_sin_IV}=(\text{beta1_sin_IV}*\text{ji2_sin_IV}-\text{beta2_sin_IV}*\text{ji1_sin_IV})/(\text{beta1_sin_IV}^2+\text{beta2_sin_IV}^2);$$

$$\text{KS_sin_IV}=\text{K1_IV}-\text{K2a_IV}*\text{K9_IV}*\text{K3a_IV}/(1+(\text{K3a_IV}*\text{Tpqo}*\text{Wos})^2)-\text{fi1_sin_IV}*(\text{K2_IV}-\text{K2a_IV}*\text{K8_IV}*\text{K3a_IV}/(1+(\text{K3a_IV}*\text{Tpqo}*\text{Wos})^2))+\text{fi2_sin_IV}*(\text{K2a_IV}*\text{K8_IV}*\text{K3a_IV}^2*\text{Tpqo}*\text{Wos}/(1+(\text{K3a_IV}*\text{Tpqo}*\text{Wos})^2))$$

$$\text{KD_sin_IV}=-\text{fi1_sin_IV}*(\text{K2a_IV}*\text{K8_IV}*\text{K3a_IV}^2*\text{Tpqo}*\text{Wos}/(1+(\text{K3a_IV}*\text{Tpqo}*\text{Wos})^2))+\text{fi2_sin_IV}*(\text{K2_IV}-\text{K2a_IV}*\text{K8_IV}*\text{K3a_IV}/(1+(\text{K3a_IV}*\text{Tpqo}*\text{Wos})^2))- \text{K2a_IV}*\text{K9_IV}*\text{K3a_IV}^2*\text{Tpqo}*\text{Wos}/(1+(\text{K3a_IV}*\text{Tpqo}*\text{Wos})^2))*(\text{W0}/\text{Wos})$$

B.3.2 Coeficientes de Estabilidad con regulador de tensión

run ('D:\Vane\Tesis\Modelo de 4to Orden\Sin regulación

(IV)\Matlab_IV_sin\transitoriodq.m')

$$\text{beta1_RT_IV} = (1 - \text{Wos}^2 * \text{TR} * \text{TA}) * (1 - \text{Wos}^2 * \text{K3_IV} * \text{Tpdo} * \text{K3a_IV} * \text{Tpqo} + \text{K3_IV} * \text{K3a_IV} * \text{K8_IV} * \text{K7_IV}) - \text{Wos}^2 * (\text{TR} + \text{TA}) * (\text{K3_IV} * \text{Tpdo} + \text{K3a_IV} * \text{Tpqo}) + \text{K3_IV} * \text{KA} * \text{K6_IV} - \text{K3_IV} * \text{KA} * \text{K8_IV} * \text{K6a_IV} * \text{K3a_IV};$$
$$\text{beta2_RT_IV} = \text{Wos} * ((1 - \text{Wos}^2 * \text{TR} * \text{TA}) * (\text{K3_IV} * \text{Tpdo} + \text{K3a_IV} * \text{Tpqo}) + (\text{TR} + \text{TA}) * (1 - \text{Wos}^2 * \text{K3_IV} * \text{Tpdo} * \text{K3a_IV} * \text{Tpqo} + \text{K3_IV} * \text{K3a_IV} * \text{K8_IV} * \text{K7_IV}) + \text{K3_IV} * \text{KA} * \text{K6_IV} * \text{K3a_IV} * \text{Tpqo});$$
$$\text{ji1_RT_IV} = \text{K3_IV} * ((\text{K4_IV} + \text{K9_IV} * \text{K7_IV} * \text{K3a_IV}) * (1 - \text{Wos}^2 * \text{TR} * \text{TA}) - \text{Wos}^2 * \text{K4_IV} * \text{K3a_IV} * \text{Tpqo} * (\text{TR} + \text{TA}));$$
$$\text{ji2_RT_IV} = \text{Wos} * \text{K3_IV} * (\text{K4_IV} * \text{K3a_IV} * \text{Tpqo} * (1 - \text{Wos}^2 * \text{TR} * \text{TA}) + (\text{K4_IV} + \text{K9_IV} * \text{K7_IV} * \text{K3a_IV}) * (\text{TA} + \text{TR}));$$
$$\text{delta1_RT_IV} = \text{K3_IV} * (\text{KA} * \text{K6a_IV} * \text{K3a_IV} * \text{K9_IV} - \text{KA} * \text{K5_IV});$$
$$\text{delta2_RT_IV} = \text{Wos} * \text{K3_IV} * \text{KA} * \text{K5_IV} * \text{K3a_IV} * \text{Tpqo};$$
$$\text{fi1_RT_IV} = ((\text{ji1_RT_IV} - \text{delta1_RT_IV}) * \text{beta1_RT_IV} + \text{beta2_RT_IV} * (\text{ji2_RT_IV} + \text{delta2_RT_IV})) / (\text{beta1_RT_IV}^2 + \text{beta2_RT_IV}^2);$$
$$\text{fi2_RT_IV} = (\text{beta1_RT_IV} * (\text{ji2_RT_IV} + \text{delta2_RT_IV}) - \text{beta2_RT_IV} * (\text{ji1_RT_IV} - \text{delta1_RT_IV})) / (\text{beta1_RT_IV}^2 + \text{beta2_RT_IV}^2);$$
$$\text{KS_RT_IV} = \text{K1_IV} - \text{K2a_IV} * \text{K9_IV} * \text{K3a_IV} / (1 + (\text{K3a_IV} * \text{Tpqo} * \text{Wos})^2) - \text{fi1_RT_IV} * (\text{K2_IV} - \text{K2a_IV} * \text{K8_IV} * \text{K3a_IV} / (1 + (\text{K3a_IV} * \text{Tpqo} * \text{Wos})^2)) + \text{fi2_RT_IV} * (\text{K2a_IV} * \text{K8_IV} * \text{K3a_IV}^2 * \text{Tpqo} * \text{Wos} / (1 + (\text{K3a_IV} * \text{Tpqo} * \text{Wos})^2))$$
$$\text{KD_RT_IV} = -$$
$$(\text{fi1_RT_IV} * (\text{K2a_IV} * \text{K8_IV} * \text{K3a_IV}^2 * \text{Tpqo} * \text{Wos} / (1 + (\text{K3a_IV} * \text{Tpqo} * \text{Wos})^2)) + \text{fi2_RT_IV} * ($$

$$K2_{IV} - K2a_{IV} * K8_{IV} * K3a_{IV} / (1 + (K3a_{IV} * Tp_{qo} * Wos)^2) -$$

$$K2a_{IV} * K9_{IV} * K3a_{IV}^2 * Tp_{qo} * Wos / (1 + (K3a_{IV} * Tp_{qo} * Wos)^2) * (W0 / Wos)$$

B.3.3 Coeficientes de Estabilidad con regulador de tensión y estabilizador de sistemas de potencia

run ('E:\CD Inf. Surf. Vanessa Ruiz QA\Algoritmos Matlab\Modelo de 4to Orden\Sin regulación (IV)\Matlab_IV_sin\transitoriodq.m')

$$\text{alfa1_PSS_IV} = -K3_{IV} * KA * Kstab * Wos^2 * Tw * ((1 - Wos^2 * t1 * TR) - Wos^2 * K3a_{IV} * Tp_{qo} * (t1 + TR))$$

$$\text{alfa2_PSS_IV} = K3_{IV} * KA * Kstab * Wos^3 * Tw * ((t1 + TR) + K3a_{IV} * Tp_{qo} * (1 - Wos^2 * t1 * TR))$$

$$\text{beta1_PSS_IV} = ((1 - Wos^2 * TR * TA) * (1 - Wos^2 * K3_{IV} * Tp_{do} * K3a_{IV} * Tp_{qo} + K3_{IV} * K3a_{IV} * K8_{IV} * K7_{IV}) - Wos^2 * (TR + TA) * (K3_{IV} * Tp_{do} + K3a_{IV} * Tp_{qo}) + K3_{IV} * KA * K6_{IV} - K3_{IV} * KA * K8_{IV} * K6a_{IV} * K3a_{IV})$$

$$\text{beta2_PSS_IV} = (Wos * ((1 - Wos^2 * TR * TA) * (K3_{IV} * Tp_{do} + K3a_{IV} * Tp_{qo}) + (TR + TA) * (1 - Wos^2 * K3_{IV} * Tp_{do} * K3a_{IV} * Tp_{qo} + K3_{IV} * K3a_{IV} * K8_{IV} * K7_{IV}) + K3_{IV} * KA * K6_{IV} * K3a_{IV} * Tp_{qo}))$$

$$ji1_PSS_IV = K3_{IV} * ((K4_{IV} + K9_{IV} * K7_{IV} * K3a_{IV}) * (1 - Wos^2 * TR * TA) - Wos^2 * K4_{IV} * K3a_{IV} * Tp_{qo} * (TR + TA))$$

$$ji2_PSS_IV = Wos * K3_{IV} * (K4_{IV} * K3a_{IV} * Tp_{qo} * (1 - Wos^2 * TR * TA) + (K4_{IV} + K9_{IV} * K7_{IV} * K3a_{IV}) * (TA + TR))$$

$$\text{delta1_PSS_IV} = K3_{IV} * (KA * K6a_{IV} * K3a_{IV} * K9_{IV} - KA * K5_{IV})$$

$$\text{delta2_PSS_IV} = Wos * K3_{IV} * KA * K5_{IV} * K3a_{IV} * Tp_{qo}$$

$$\text{epsilon1_PSS_IV} = W0 * (\text{beta1_PSS_IV} * (1 - Wos^2 * Tw * t2) - Wos * \text{beta2_PSS_IV} * (Tw + t2))$$

$$\text{epsilon2_PSS_IV} = W0 * (\text{beta2_PSS_IV} * (1 - Wos^2 * Tw * t2) + Wos * (Tw + t2) * \text{beta1_PSS_IV})$$

$$fi1_PSS_IV = (\text{alfa1_PSS_IV} * \text{epsilon1_PSS_IV} - \text{alfa2_PSS_IV} * \text{epsilon2_PSS_IV}) / (\text{epsilon1_PSS_IV}^2 + \text{epsilon2_PSS_IV}^2) + (\text{delta1_PS}$$

$$S_{IV} \cdot \beta_{1_PSS_IV} - \Delta_{2_PSS_IV} \cdot \beta_{2_PSS_IV} - j i_{1_PSS_IV} \cdot \beta_{1_PSS_IV} - j i_{2_PSS_IV} \cdot \beta_{2_PSS_IV} / (\beta_{1_PSS_IV}^2 + \beta_{2_PSS_IV}^2)$$

$$f_{i2_PSS_IV} = (\alpha_{2_PSS_IV} \cdot \epsilon_{1_PSS_IV} + \alpha_{1_PSS_IV} \cdot \epsilon_{2_PSS_IV}) / (\epsilon_{1_PSS_IV}^2 + \epsilon_{2_PSS_IV}^2) + (\Delta_{2_PSS_IV} \cdot \beta_{1_PSS_IV} + \Delta_{1_PSS_IV} \cdot \beta_{2_PSS_IV} + j i_{2_PSS_IV} \cdot \beta_{1_PSS_IV} - j i_{1_PSS_IV} \cdot \beta_{2_PSS_IV}) / (\beta_{1_PSS_IV}^2 + \beta_{2_PSS_IV}^2)$$

$$K_{S_PSS_IV} = K_{1_IV} + f_{i1_PSS_IV} \cdot (K_{2_IV} - K_{2a_IV} \cdot K_{8_IV} \cdot K_{3a_IV} / (1 + (K_{3a_IV} \cdot T_{pqqo} \cdot W_{os})^2)) + f_{i2_PSS_IV} \cdot (K_{2a_IV} \cdot K_{8_IV} \cdot K_{3a_IV}^2 \cdot T_{pqqo} \cdot W_{os} / (1 + (K_{3a_IV} \cdot T_{pqqo} \cdot W_{os})^2) - K_{2a_IV} \cdot K_{9_IV} \cdot K_{3a_IV} / (1 + (K_{3a_IV} \cdot T_{pqqo} \cdot W_{os})^2))$$

$$K_{D_PSS_IV} = (f_{i1_PSS_IV} \cdot (K_{2a_IV} \cdot K_{8_IV} \cdot K_{3a_IV}^2 \cdot T_{pqqo} \cdot W_{os} / (1 + (K_{3a_IV} \cdot T_{pqqo} \cdot W_{os})^2) - f_{i2_PSS_IV} \cdot (K_{2_IV} - K_{2a_IV} \cdot K_{8_IV} \cdot K_{3a_IV} / (1 + (K_{3a_IV} \cdot T_{pqqo} \cdot W_{os})^2)) + (K_{2a_IV} \cdot K_{9_IV} \cdot K_{3a_IV}^2 \cdot T_{pqqo} \cdot W_{os} / (1 + (K_{3a_IV} \cdot T_{pqqo} \cdot W_{os})^2))) \cdot (W_0 / W_{os})$$

B.3.4 Coeficientes de Estabilidad de la CH Cañón del Pato

run ('E:\CD Inf. Suf. Vanessa Ruiz Q\Algoritmos Matlab\Modelo de 4to Orden\Sin regulación (IV)\Matlab_IV_sin\transitoriodq.m')

%Coeficientes de la Potencia Eléctrica (Regulador Nuevo)

$$\alpha_{1_RN_IV} = -W_{os}^2 \cdot K_{S1} \cdot K_{P} \cdot ((1 - W_{os}^2 \cdot T_1 \cdot T_3 - W_{os}^2 \cdot T_i \cdot (T_1 + T_3)) \cdot (T_{W2} \cdot ((1 - W_{os}^2 \cdot T_8 \cdot T_7) \cdot (1 - W_{os}^2 \cdot T_{W4} \cdot K_{3a_IV} \cdot T_{pqqo}) - W_{os}^2 \cdot (T_8 + T_7) \cdot (T_{W4} + K_{3a_IV} \cdot T_{pqqo})) + W_0 \cdot T_{W4} \cdot \dots$$

$$K_{S2} \cdot (T_{W2} \cdot ((-1 - W_{os}^2 \cdot T_9^2)^2 + 4 \cdot W_{os}^2 \cdot T_9^2 + K_{S3})) \cdot (K_{\alpha_RN_IV} - K_{9_IV} \cdot K_{ji_RN_IV} \cdot K_{3a_IV} + W_{os}^2 \cdot K_{\alpha_RN_IV} \cdot K_{3a_IV} \cdot T_{pqqo} \cdot (4 \cdot T_9 \cdot (1 - W_{os}^2 \cdot T_9^2) - T_8 \cdot K_{S3})) + \dots$$

$$(-(4 \cdot T_9 \cdot (1 - W_{os}^2 \cdot T_9^2) - T_8 \cdot K_{S3}) \cdot (K_{\alpha_RN_IV} - K_{9_IV} \cdot K_{ji_RN_IV} \cdot K_{3a_IV} + K_{\alpha_RN_IV} \cdot K_{3a_IV} \cdot T_{pqqo} \cdot (-1 - W_{os}^2 \cdot T_9^2)^2 + 4 \cdot W_{os}^2 \cdot T_9^2 + K_{S3}))) \dots$$

$$+ ((T_1 + T_3) + T_i \cdot (1 - W_{os}^2 \cdot T_1 \cdot T_3)) \cdot (-W_{os}^2 \cdot T_{W2} \cdot ((T_8 + T_7) \cdot (1 - W_{os}^2 \cdot T_{W4} \cdot K_{3a_IV} \cdot T_{pqqo}) + (1 - W_{os}^2 \cdot T_8 \cdot T_7) \cdot (T_{W4} + K_{3a_IV} \cdot T_{pqqo})) + W_0 \cdot T_{W4} \cdot K_{S2} \cdot (((-1 - W_{os}^2 \cdot T_9^2)^2 + \dots$$

$4 \cdot \text{Wos}^2 \cdot \text{T9}^2 + \text{KS3}) \cdot (\text{Kalfa_RN_IV} -$
 $\text{K9_IV} \cdot \text{Kji_RN_IV} \cdot \text{K3a_IV}) + \text{Wos}^2 \cdot \text{Kalfa_RN_IV} \cdot \text{K3a_IV} \cdot \text{Tpqo} \cdot (4 \cdot \text{T9} \cdot (1 - \text{Wos}^2 \cdot \text{T9}^2) -$
 $\text{T8} \cdot \text{KS3}) - \text{Wos}^2 \cdot \text{TW2} \cdot (-(4 \cdot \text{T9} \cdot (1 - \text{Wos}^2 \cdot \text{T9}^2) -$
 $\text{T9}^2) - \text{T8} \cdot \text{KS3}) \cdot (\text{Kalfa_RN_IV} -$
 $\text{K9_IV} \cdot \text{Kji_RN_IV} \cdot \text{K3a_IV}) + \text{Kalfa_RN_IV} \cdot \text{K3a_IV} \cdot \text{Tpqo} \cdot (-(1 -$
 $\text{Wos}^2 \cdot \text{T9}^2)^2 + 4 \cdot \text{Wos}^2 \cdot \text{T9}^2 + \text{KS3})$

$\text{alfa2_RN_IV} = \text{KS1} \cdot \text{KP} \cdot ((-\text{Wos}^2 \cdot \text{TW2} \cdot ((\text{T8} + \text{T7}) \cdot (1 - \text{Wos}^2 \cdot \text{TW4} \cdot \text{K3a_IV} \cdot \text{Tpqo}) + (1 -$
 $\text{Wos}^2 \cdot \text{T8} \cdot \text{T7}) \cdot (\text{TW4} + \text{K3a_IV} \cdot \text{Tpqo})) + \text{W0} \cdot \text{TW4} \cdot \text{KS2} \cdot (((1 - \text{Wos}^2 \cdot \text{T9}^2)^2 + 4 \cdot \text{Wos}^2 \cdot \text{T9}^2 +$
 $\text{KS3}) \cdot (\text{Kalfa_RN_IV} -$
 $\text{K9_IV} \cdot \text{Kji_RN_IV} \cdot \text{K3a_IV}) + \text{Wos}^2 \cdot \text{Kalfa_RN_IV} \cdot \text{K3a_IV} \cdot \text{Tpqo} \cdot (4 \cdot \text{T9} \cdot (1 - \text{Wos}^2 \cdot \text{T9}^2) -$
 $\text{T8} \cdot \text{KS3}) - \text{Wos}^2 \cdot \text{TW2} \cdot (-(4 \cdot \text{T9} \cdot (1 - \text{Wos}^2 \cdot \text{T9}^2) -$
 $-\text{T8} \cdot \text{KS3}) \cdot (\text{Kalfa_RN_IV} - \text{K9_IV} \cdot \text{Kji_RN_IV} \cdot \text{K3a_IV}) + \text{Kalfa_RN_IV} \cdot \text{K3a_IV} \cdot \text{Tpqo} \cdot (-(1 -$
 $\text{Wos}^2 \cdot \text{T9}^2)^2 + 4 \cdot \text{Wos}^2 \cdot \text{T9}^2 + \text{KS3})) \cdot (1 - \text{Wos}^2 \cdot \text{T1} \cdot \text{T3} - \text{Wos}^2 \cdot \text{Ti} \cdot (\text{T1} + \dots$
 $\text{T3})) \dots$
 $-\text{Wos}^2 \cdot ((\text{T1} + \text{T3}) + \text{Ti} \cdot (1 - \text{Wos}^2 \cdot \text{T1} \cdot \text{T3})) \cdot (\text{TW2} \cdot ((1 - \text{Wos}^2 \cdot \text{T8} \cdot \text{T7}) \cdot (1 -$
 $\text{Wos}^2 \cdot \text{TW4} \cdot \text{K3a_IV} \cdot \text{Tpqo}) - \text{Wos}^2 \cdot (\text{T8} + \text{T7}) \cdot (\text{TW4} + \text{K3a_IV} \cdot \text{Tpqo}))$
 $+ \text{W0} \cdot \text{TW4} \cdot \text{KS2} \cdot (\text{TW2} \cdot ((1 - \dots$
 $\text{Wos}^2 \cdot \text{T9}^2)^2 + 4 \cdot \text{Wos}^2 \cdot \text{T9}^2 + \text{KS3}) \cdot (\text{Kalfa_RN_IV} -$
 $\text{K9_IV} \cdot \text{Kji_RN_IV} \cdot \text{K3a_IV}) + \text{Wos}^2 \cdot \text{Kalfa_RN_IV} \cdot \text{K3a_IV} \cdot \text{Tpqo} \cdot (4 \cdot \text{T9} \cdot (1 - \text{Wos}^2 \cdot \text{T9}^2) -$
 $\text{T8} \cdot \text{KS3}) + (-(4 \cdot \text{T9} \cdot (1 - \dots$
 $\text{Wos}^2 \cdot \text{T9}^2) - \text{T8} \cdot \text{KS3}) \cdot (\text{Kalfa_RN_IV} -$
 $\text{K9_IV} \cdot \text{Kji_RN_IV} \cdot \text{K3a_IV}) + \text{Kalfa_RN_IV} \cdot \text{K3a_IV} \cdot \text{Tpqo} \cdot (-(1 -$
 $\text{Wos}^2 \cdot \text{T9}^2)^2 + 4 \cdot \text{Wos}^2 \cdot \text{T9}^2 + \text{KS3}))$

$\text{beta1_RN_IV} = -\text{K3_IV} \cdot (-\text{Wos}^2 \cdot \text{TW4} \cdot \text{KS1} \cdot \text{KP} \cdot \text{KS2} \cdot (((\text{T1} + \text{T3}) + \text{Ti} \cdot (1 - \text{Wos}^2 \cdot \text{T1} \cdot \text{T3})) \cdot (-(1 -$
 $\text{Wos}^2 \cdot \text{T9}^2)^2 + 4 \cdot \text{Wos}^2 \cdot \text{T9}^2 + \text{KS3}) - (4 \cdot \text{T9} \cdot (1 - \text{Wos}^2 \cdot \text{T9}^2) - \text{T8} \cdot \text{KS3}) \cdot (1 - \text{Wos}^2 \cdot \dots$
 $\text{T1} \cdot \text{T3} - \text{Wos}^2 \cdot \text{Ti} \cdot (\text{T1} + \text{T3}))) \cdot (\text{Kbeta_RN_IV} - \text{Kji_RN_IV} \cdot \text{K3a_IV} \cdot \text{K8_IV})$
 $+ \text{Kbeta_RN_IV} \cdot \text{K3a_IV} \cdot \text{Tpqo} \cdot ((1 - \text{Wos}^2 \cdot \text{T1} \cdot \text{T3} - \text{Wos}^2 \cdot \text{Ti} \cdot (\text{T1} + \text{T3})) \cdot (-(1 -$
 $\text{Wos}^2 \cdot \text{T9}^2)^2 + \dots$
 $4 \cdot \text{Wos}^2 \cdot \text{T9}^2 + \text{KS3}) + \text{Wos}^2 \cdot ((\text{T1} + \text{T3}) + \text{Ti} \cdot (1 - \text{Wos}^2 \cdot \text{T1} \cdot \text{T3})) \cdot (4 \cdot \text{T9} \cdot (1 - \text{Wos}^2 \cdot \text{T9}^2) -$
 $\text{T8} \cdot \text{KS3})) \dots$
 $+ ((1 - \text{Wos}^2 \cdot \text{T2} \cdot \text{T4}) \cdot (1 - \text{Wos}^2 \cdot \text{T7} \cdot \text{TW4}) - \text{Wos}^2 \cdot (\text{T2} + \text{T4}) \cdot (\text{T7} + \text{TW4})) \cdot (((1 -$
 $\text{Wos}^2 \cdot \text{T9}^2)^2 - 4 \cdot \text{Wos}^2 \cdot \text{T9}^2) \cdot (\text{KP} \cdot (-\text{K6_IV} + \text{K6a_IV} \cdot \text{K3a_IV} \cdot \text{K8_IV} + \text{Wos}^2 \cdot \text{Ti} \cdot \text{K6_IV} \dots$
 $\text{K3a_IV} \cdot \text{Tpqo}) + \text{Wos}^2 \cdot \text{T4} \cdot \text{Ti} \cdot \text{K7_IV} \cdot \text{K3a_IV} \cdot \text{K8_IV}) - \text{Wos}^2 \cdot (4 \cdot \text{T9} \cdot (1 -$
 $\text{Wos}^2 \cdot \text{T9}^2)) \cdot (\text{KP} \cdot (\text{Ti} \cdot (-\text{K6_IV} + \text{K6a_IV} \cdot \text{K3a_IV} \cdot \text{K8_IV}) - \text{K6_IV} \cdot \text{K3a_IV} \cdot \text{Tpqo}) - \text{Ti} \cdot \text{K7_IV} \dots$

$K3a_IV \cdot K8_IV$)...

$-Wos^2 \cdot ((T2+T4) \cdot (1-Wos^2 \cdot T7 \cdot TW4) + (T7+TW4) \cdot (1-Wos^2 \cdot T2 \cdot T4)) \cdot (4 \cdot T9 \cdot (1-Wos^2 \cdot T9^2) \cdot (KP \cdot (-K6_IV + K6a_IV \cdot K3a_IV \cdot K8_IV + Wos^2 \cdot Ti \cdot K6_IV \cdot K3a_IV \cdot Tpqqo) + \dots$
 $Wos^2 \cdot T4 \cdot Ti \cdot K7_IV \cdot K3a_IV \cdot K8_IV) + (KP \cdot (Ti \cdot (-K6_IV + K6a_IV \cdot K3a_IV \cdot K8_IV) -$
 $K6_IV \cdot K3a_IV \cdot Tpqqo) - Ti \cdot K7_IV \cdot K3a_IV \cdot K8_IV) \cdot ((1-Wos^2 \cdot T9^2)^2 - 4 \cdot Wos^2 \cdot \dots$
 $T9^2)))$

$\beta2_RN_IV = K3_IV \cdot (TW4 \cdot KS1 \cdot KP \cdot KS2 \cdot (((1-Wos^2 \cdot T1 \cdot T3 - Wos^2 \cdot Ti \cdot (T1+T3)) \cdot (- (1-Wos^2 \cdot T9^2)^2 + 4 \cdot Wos^2 \cdot T9^2 + KS3) + Wos^2 \cdot ((T1+T3) + Ti \cdot (1-Wos^2 \cdot T1 \cdot T3)) \cdot (4 \cdot T9 \cdot \dots$
 $(1-Wos^2 \cdot T9^2) - T8 \cdot KS3)) \cdot (K\beta2_RN_IV - Kji_RN_IV \cdot K3a_IV \cdot K8_IV)$
 $Wos^2 \cdot K\beta2_RN_IV \cdot K3a_IV \cdot Tpqqo \cdot ((T1+T3) + Ti \cdot (1-Wos^2 \cdot T1 \cdot T3)) \cdot (- (1-Wos^2 \cdot T9^2)^2 + \dots$
 $4 \cdot Wos^2 \cdot T9^2 + KS3) - (4 \cdot T9 \cdot (1-Wos^2 \cdot T9^2) - T8 \cdot KS3) \cdot (1-Wos^2 \cdot T1 \cdot T3 -$
 $Wos^2 \cdot Ti \cdot (T1+T3)))) \dots$

$+ ((T2+T4) \cdot (1-Wos^2 \cdot T7 \cdot TW4) + (T7+TW4) \cdot (1-Wos^2 \cdot T2 \cdot T4)) \cdot (((1-Wos^2 \cdot T9^2)^2 - 4 \cdot Wos^2 \cdot T9^2) \cdot (KP \cdot (-K6_IV + K6a_IV \cdot K3a_IV \cdot K8_IV + Wos^2 \cdot Ti \cdot K6_IV \cdot K3a_IV \cdot Tpqqo) \dots$
 $+ Wos^2 \cdot T4 \cdot Ti \cdot K7_IV \cdot K3a_IV \cdot K8_IV) - Wos^2 \cdot (4 \cdot T9 \cdot (1-Wos^2 \cdot T9^2)) \cdot (KP \cdot (Ti \cdot (-$
 $K6_IV + K6a_IV \cdot K3a_IV \cdot K8_IV) - K6_IV \cdot K3a_IV \cdot Tpqqo) - Ti \cdot K7_IV \cdot K3a_IV \cdot K8_IV)) \dots$
 $+ (4 \cdot T9 \cdot (1-Wos^2 \cdot T9^2) \cdot (KP \cdot (-$
 $K6_IV + K6a_IV \cdot K3a_IV \cdot K8_IV + Wos^2 \cdot Ti \cdot K6_IV \cdot K3a_IV \cdot Tpqqo) + Wos^2 \cdot T4 \cdot Ti \cdot K7_IV \cdot K3a_IV \cdot K8_IV) +$
 $(KP \cdot (Ti \cdot (-K6_IV + K6a_IV \cdot K3a_IV \cdot K8_IV) - K6_IV \cdot K3a_IV \cdot Tpqqo) - Ti \cdot K7_IV \cdot K3a_IV \cdot K8_IV) \cdot ((1-Wos^2 \cdot T9^2)^2 -$
 $4 \cdot Wos^2 \cdot T9^2)) \cdot ((1-Wos^2 \cdot T2 \cdot T4) \cdot (1-Wos^2 \cdot T7 \cdot TW4) - Wos^2 \cdot (T2+T4) \cdot (T7+TW4)))$

$ji1_RN_IV = K3_IV \cdot (\alpha1_RN_IV + W0 \cdot (((1-Wos^2 \cdot T2 \cdot T4) \cdot (1-Wos^2 \cdot T7 \cdot TW4) - Wos^2 \cdot (T2+T4) \cdot (T7+TW4)) \cdot (((1-Wos^2 \cdot T9^2)^2 - 4 \cdot Wos^2 \cdot T9^2) \cdot (KP \cdot (-K5_IV + K9_IV \cdot \dots$

$K6a_IV \cdot K3a_IV + Wos^2 \cdot Ti \cdot K5_IV \cdot K3a_IV \cdot Tpqqo) + Wos^2 \cdot Ti \cdot (T4 \cdot (K4_IV + K9_IV \cdot K7_IV \cdot K3a_IV) + K4_IV \cdot K3a_IV \cdot Tpqqo)) - Wos^2 \cdot 4 \cdot T9 \cdot (1-Wos^2 \cdot T9^2) \cdot (KP \cdot (Ti \cdot (-K5_IV \dots$
 $+ K9_IV \cdot K6a_IV \cdot K3a_IV) - K5_IV \cdot K3a_IV \cdot Tpqqo) - Ti \cdot ((K4_IV + K9_IV \cdot K7_IV \cdot K3a_IV) -$
 $Wos^2 \cdot T4 \cdot K4_IV \cdot K3a_IV \cdot Tpqqo))) - Wos^2 \cdot ((T2+T4) \cdot (1-Wos^2 \cdot T7 \cdot TW4) + (T7+TW4) \cdot \dots$
 $(1-Wos^2 \cdot T2 \cdot T4)) \cdot (4 \cdot T9 \cdot (1-Wos^2 \cdot T9^2) \cdot (KP \cdot (-$
 $K5_IV + K9_IV \cdot K6a_IV \cdot K3a_IV + Wos^2 \cdot Ti \cdot K5_IV \cdot K3a_IV \cdot Tpqqo) + Wos^2 \cdot Ti \cdot (T4 \cdot (K4_IV + K9_IV \cdot K7_IV \cdot K3a_IV) + K4_IV \cdot \dots$

$K3a_{IV} * Tpqq) + ((1 - Wos^2 * T9^2)^2 - 4 * Wos^2 * T9^2) * (KP * (Ti * (-$
 $K5_{IV} + K9_{IV} * K6a_{IV} * K3a_{IV}) - K5_{IV} * K3a_{IV} * Tpqq) - Ti * ((K4_{IV} + K9_{IV} * K7_{IV} * K3a_{IV}) -$
 $Wos^2 * T4 * ...$
 $K4_{IV} * K3a_{IV} * Tpqq)))))...$

$-Wos^2 * TW2 * (((T2 + T4) * (1 - Wos^2 * T7 * TW4) + (T7 + TW4) * (1 - Wos^2 * T2 * T4)) * (((1 -$
 $Wos^2 * T9^2)^2 - 4 * Wos^2 * T9^2) * (KP * (-K5_{IV} + K9_{IV} * K6a_{IV} * K3a_{IV} + ...$

$Wos^2 * Ti * K5_{IV} * K3a_{IV} * Tpqq) + Wos^2 * Ti * (T4 * (K4_{IV} + K9_{IV} * K7_{IV} * K3a_{IV}) + K4_{IV} * K3$
 $a_{IV} * Tpqq) - Wos^2 * 4 * T9 * (1 - Wos^2 * T9^2) * (KP * (Ti * (-K5_{IV} + K9_{IV} * K6a_{IV} * ...$
 $K3a_{IV}) - K5_{IV} * K3a_{IV} * Tpqq) - Ti * ((K4_{IV} + K9_{IV} * K7_{IV} * K3a_{IV}) -$
 $Wos^2 * T4 * K4_{IV} * K3a_{IV} * Tpqq))) + (4 * T9 * (1 - Wos^2 * T9^2) * (KP * (-$
 $K5_{IV} + K9_{IV} * K6a_{IV} * K3a_{IV} + ...$

$Wos^2 * Ti * K5_{IV} * K3a_{IV} * Tpqq) + Wos^2 * Ti * (T4 * (K4_{IV} + K9_{IV} * K7_{IV} * K3a_{IV}) + K4_{IV} * K3$
 $a_{IV} * Tpqq) + ((1 - Wos^2 * T9^2)^2 - 4 * Wos^2 * T9^2) * (KP * (Ti * (-K5_{IV} + K9_{IV} * ...$
 $K6a_{IV} * K3a_{IV}) - K5_{IV} * K3a_{IV} * Tpqq) - Ti * ((K4_{IV} + K9_{IV} * K7_{IV} * K3a_{IV}) -$
 $Wos^2 * T4 * K4_{IV} * K3a_{IV} * Tpqq))) * ((1 - Wos^2 * T2 * T4) * (1 - Wos^2 * T7 * TW4) -$
 $Wos^2 * (T2 + T4) * ...$
 $(T7 + TW4)))))$

$ji2_{RN_{IV}} = K3_{IV} * (alfa2_{RN_{IV}} + W0 * (((T2 + T4) * (1 - Wos^2 * T7 * TW4) + (T7 + TW4) * (1 -$
 $Wos^2 * T2 * T4)) * (((1 - Wos^2 * T9^2)^2 - 4 * Wos^2 * T9^2) * (KP * (-K5_{IV} + K9_{IV} * K6a_{IV} * ...$

$K3a_{IV} + Wos^2 * Ti * K5_{IV} * K3a_{IV} * Tpqq) + Wos^2 * Ti * (T4 * (K4_{IV} + K9_{IV} * K7_{IV} * K3a_{IV}) + K$
 $4_{IV} * K3a_{IV} * Tpqq) - Wos^2 * 4 * T9 * (1 - Wos^2 * T9^2) * (KP * (Ti * (-K5_{IV} + K9_{IV} * ...$
 $K6a_{IV} * K3a_{IV}) - K5_{IV} * K3a_{IV} * Tpqq) - Ti * ((K4_{IV} + K9_{IV} * K7_{IV} * K3a_{IV}) -$
 $Wos^2 * T4 * K4_{IV} * K3a_{IV} * Tpqq))) + (4 * T9 * (1 - Wos^2 * T9^2) * (KP * (-$
 $K5_{IV} + K9_{IV} * K6a_{IV} * ...$

$K3a_{IV} + Wos^2 * Ti * K5_{IV} * K3a_{IV} * Tpqq) + Wos^2 * Ti * (T4 * (K4_{IV} + K9_{IV} * K7_{IV} * K3a_{IV}) + K$
 $4_{IV} * K3a_{IV} * Tpqq) + ((1 - Wos^2 * T9^2)^2 - 4 * Wos^2 * T9^2) * (KP * (Ti * (-K5_{IV} ...$
 $+ K9_{IV} * K6a_{IV} * K3a_{IV}) - K5_{IV} * K3a_{IV} * Tpqq) - Ti * ((K4_{IV} + K9_{IV} * K7_{IV} * K3a_{IV}) -$
 $Wos^2 * T4 * K4_{IV} * K3a_{IV} * Tpqq))) * ((1 - Wos^2 * T2 * T4) * (1 - Wos^2 * T7 * TW4) - Wos^2 * ...$
 $(T2 + T4) * (T7 + TW4)))))...$
 $+ TW2 * (((1 - Wos^2 * T2 * T4) * (1 - Wos^2 * T7 * TW4) - Wos^2 * (T2 + T4) * (T7 + TW4)) * (((1 -$
 $Wos^2 * T9^2)^2 - 4 * Wos^2 * T9^2) * (KP * (-K5_{IV} + K9_{IV} * K6a_{IV} * K3a_{IV} + Wos^2 * Ti * K5_{IV} * ...$

$$\begin{aligned}
& K3a_IV*Tpqo)+Wos^2*Ti*(T4*(K4_IV+K9_IV*K7_IV*K3a_IV)+K4_IV*K3a_IV*Tpqo)) - \\
& Wos^2*4*T9*(1-Wos^2*T9^2)*(KP*(Ti*(-K5_IV+K9_IV*K6a_IV*K3a_IV)-K5_IV*... \\
& K3a_IV*Tpqo)-Ti*((K4_IV+K9_IV*K7_IV*K3a_IV)-Wos^2*T4*K4_IV*K3a_IV*Tpqo))) - \\
& Wos^2*((T2+T4)*(1-Wos^2*T7*TW4)+(T7+TW4)*(1-Wos^2*T2*T4))*(4*T9*... \\
& (1-Wos^2*T9^2)*(KP*(- \\
& K5_IV+K9_IV*K6a_IV*K3a_IV+Wos^2*Ti*K5_IV*K3a_IV*Tpqo)+Wos*Ti*(T4*(K4_IV+K9_I \\
& V*K7_IV*K3a_IV)+K4_IV*K3a_IV*Tpqo)) +((1-Wos^2*... \\
& T9^2)^2-4*Wos^2*T9^2)*(KP*(Ti*(-K5_IV+K9_IV*K6a_IV*K3a_IV)- \\
& K5_IV*K3a_IV*Tpqo)-Ti*((K4_IV+K9_IV*K7_IV*K3a_IV)- \\
& Wos^2*T4*K4_IV*K3a_IV*Tpqo))))))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{delta1_RN_IV} &= W0*((\text{beta1_RN_IV}-Wos^2*Ti((((T2+T4)*(1- \\
& Wos^2*T7*TW4)+(T7+TW4)*(1-Wos^2*T2*T4))+T4*((1-Wos^2*T2*T4)*(1- \\
& Wos^2*T7*TW4)-Wos^2*(T2+T4)*... \\
& (T7+TW4)))) *(((1-Wos^2*T9^2)^2-4*Wos^2*T9^2)*(1- \\
& Wos^2*K3a_IV*Tpqo*K3_IV*Tpdo)-Wos^2*4*T9*(1- \\
& Wos^2*T9^2)*(K3a_IV*Tpqo+K3_IV*Tpdo)) + (4*T9*... \\
& (1-Wos^2*T9^2)*(1- \\
& Wos^2*K3a_IV*Tpqo*K3_IV*Tpdo)+(K3a_IV*Tpqo+K3_IV*Tpdo)*((1-Wos^2*T9^2)^2- \\
& 4*Wos^2*T9^2)) *(((1-Wos^2*T2*T4)*(1-Wos^2*T7*TW4)-... \\
& Wos^2*(T2+T4)*(T7+TW4))-Wos^2*T4*((T2+T4)*(1-Wos^2*T7*TW4)+(T7+TW4)*(1- \\
& Wos^2*T2*T4)))))... \\
& -Wos^2*TW2*(Ti((((1-Wos^2*T2*T4)*(1-Wos^2*T7*TW4)-Wos^2*(T2+T4)*(T7+TW4))- \\
& Wos^2*T4*((T2+T4)*(1-Wos^2*T7*TW4)+(T7+TW4)*(1-Wos^2*T2*T4)))) *(((1-... \\
& Wos^2*T9^2)^2-4*Wos^2*T9^2)*(1-Wos^2*K3a_IV*Tpqo*K3_IV*Tpdo)-Wos^2*4*T9*(1- \\
& Wos^2*T9^2)*(K3a_IV*Tpqo+K3_IV*Tpdo)) -Wos^2*((T2+T4)*(1-Wos^2*... \\
& T7*TW4)+(T7+TW4)*(1-Wos^2*T2*T4))+T4*((1-Wos^2*T2*T4)*(1-Wos^2*T7*TW4)- \\
& Wos^2*(T2+T4)*(T7+TW4)))) * (4*T9*(1-Wos^2*T9^2)*(1-Wos^2*K3a_IV*Tpqo*... \\
& K3_IV*Tpdo)+(K3a_IV*Tpqo+K3_IV*Tpdo)*((1-Wos^2*T9^2)^2-4*Wos^2*T9^2))) - \\
& \text{beta2_RN_IV})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{delta2_RN_IV} &= W0*(TW2*(\text{beta1_RN_IV}-Wos^2*Ti((((T2+T4)*(1- \\
& Wos^2*T7*TW4)+(T7+TW4)*(1-Wos^2*T2*T4))+T4*((1-Wos^2*T2*T4)*(1- \\
& Wos^2*T7*TW4)-Wos^2*(T2+T4)*...
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& (T7+TW4))) *(((1-Wos^2*T9^2)^2-4*Wos^2*T9^2)*(1- \\
& Wos^2*K3a_IV*Tpqo*K3_IV*Tpdo)-Wos^2*4*T9*(1- \\
& Wos^2*T9^2)*(K3a_IV*Tpqo+K3_IV*Tpdo)) + (4*T9*(1-... \\
& Wos^2*T9^2)*(1-Wos^2*K3a_IV*Tpqo*K3_IV*Tpdo)+(K3a_IV*Tpqo+K3_IV*Tpdo)*((1- \\
& Wos^2*T9^2)^2-4*Wos^2*T9^2)) *(((1-Wos^2*T2*T4)*(1-Wos^2*T7*TW4)-... \\
& Wos^2*(T2+T4)*(T7+TW4))-Wos^2*T4*((T2+T4)*(1-Wos^2*T7*TW4)+(T7+TW4)*(1- \\
& Wos^2*T2*T4)))))... \\
& +(Ti*(((1-Wos^2*T2*T4)*(1-Wos^2*T7*TW4)-Wos^2*(T2+T4)*(T7+TW4))- \\
& Wos^2*T4*((T2+T4)*(1-Wos^2*T7*TW4)+(T7+TW4)*(1-Wos^2*T2*T4))) *(((1-Wos^2*... \\
& T9^2)^2-4*Wos^2*T9^2)*(1-Wos^2*K3a_IV*Tpqo*K3_IV*Tpdo)-Wos^2*4*T9*(1- \\
& Wos^2*T9^2)*(K3a_IV*Tpqo+K3_IV*Tpdo)) -Wos^2*((T2+T4)*(1-Wos^2*T7*TW4)... \\
& +(T7+TW4)*(1-Wos^2*T2*T4))+T4*((1-Wos^2*T2*T4)*(1-Wos^2*T7*TW4)- \\
& Wos^2*(T2+T4)*(T7+TW4))) * (4*T9*(1-Wos^2*T9^2)*(1- \\
& Wos^2*K3a_IV*Tpqo*K3_IV*Tpdo)... \\
& +(K3a_IV*Tpqo+K3_IV*Tpdo)*((1-Wos^2*T9^2)^2-4*Wos^2*T9^2))) -beta2_RN_IV))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
KS_RN_IV &= K1_IV + (((K2_IV - \\
& K8_IV * K2a_IV * K3a_IV) * (ji1_RN_IV * delta1_RN_IV + Wos^2 * ji2_RN_IV * delta2_RN_IV) - \\
& Wos^2 * K2_IV * K3a_IV * Tp qo * (ji2_RN_IV * delta1_RN_IV - ...
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& delta2_RN_IV * ji1_RN_IV)) + Wos^2 * K3a_IV * Tp qo * (K2_IV * K3a_IV * Tp qo * (ji1_RN_IV * delta1 \\
& _RN_IV + Wos^2 * ji2_RN_IV * delta2_RN_IV) + (ji2_RN_IV * delta1_RN_IV - ... \\
& delta2_RN_IV * ji1_RN_IV) * (K2_IV - \\
& K8_IV * K2a_IV * K3a_IV)) / ((1 + (Wos * K3a_IV * Tp qo)^2) * (delta1_RN_IV^2 + (Wos * delta2_RN \\
& _IV)^2))... \\
& -K9_IV * K2a_IV * K3a_IV / (1 + (Wos * K3a_IV * Tp qo)^2)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
KD_RN_IV &= W0 * (((K2_IV * K3a_IV * Tp qo * (ji1_RN_IV * delta1_RN_IV + Wos^2 * ji2_RN_IV * delt \\
& a2_RN_IV) + (ji2_RN_IV * delta1_RN_IV - delta2_RN_IV * ji1_RN_IV) * (K2_IV - ... \\
& K8_IV * ... \\
& K2a_IV * K3a_IV)) - K3a_IV * Tp qo * ((K2_IV - \\
& K8_IV * K2a_IV * K3a_IV) * (ji1_RN_IV * delta1_RN_IV + Wos^2 * ji2_RN_IV * delta2_RN_IV) - \\
& Wos^2 * K2_IV * K3a_IV * ... \\
& Tp qo * (ji2_RN_IV * delta1_RN_IV - \\
& delta2_RN_IV * ji1_RN_IV)) / ((1 + (Wos * K3a_IV * Tp qo)^2) * (delta1_RN_IV^2 + (Wos * delta2_R \\
& N_IV)^2)) + K3a_IV * Tp qo * K9_IV * K2a_IV * ...
\end{aligned}$$

$$K3a_IV/(1+(Wos*K3a_IV*Tpqo)^2))$$

B.4 Modelo de Sexto Orden

B.4.1 Coeficientes de Estabilidad sin reguladores

run('E:\CD Inf. Suf. Vanessa Ruiz QA\Algoritmos Matlab\Modelo de 6to Orden\Sin regulación (VI)\Matlab_VI_sin\subtransitoriodq')

$$\begin{aligned} \text{beta1_sin_VI} = & ((1-Wos^2*K3_VI*Tpdpdo*Tpdo+K3_VI*K10a_VI*(XE+Xppq))^(1- \\ & Wos^2*Tpqo*K3a_VI*Tpqqo-K3a_VI*K10_VI*(XE+Xppd))- \\ & Wos^2*(K3_VI*Tpdpdo+Tpdo)*(Tpqo+K3a_VI*Tpqqo)+K3_VI*K3a_VI*((K7_VI+K10a_VI*R \\ & E)*(K8_VI-K10_VI*RE)- Wos^2*Tpdo*K7_VI*Tpqqo*K8_VI)); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{beta2_sin_VI} = & Wos*((K3_VI*Tpdpdo+Tpdo)*(1-Wos^2*Tpqqo*K3a_VI*Tpqqo- \\ & K3a_VI*K10_VI*(XE+Xppd))+(Tpqo+K3a_VI*Tpqqo)*(1- \\ & Wos^2*K3_VI*Tpdpdo*Tpdo+K3_VI*K10a_VI*(XE+Xppq))+K3_VI*K3a_VI*(Tpdo*K7_VI*(K \\ & 8_VI-K10_VI*RE)+Tpqqo*K8_VI*(K7_VI+K10a_VI*RE))); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ji1_sin_VI} = & K3_VI*(K4_VI*(1-Wos^2*K3a_VI*Tpqqo*Tpqqo- \\ & K3a_VI*K10_VI*(XE+Xppd))+K7_VI*K3a_VI*(K9_VI-K10_VI*K11_VI)- \\ & Wos^2*Tpdpdo*(K4_VI*(K3a_VI*Tpqqo+Tpqqo)+ Tpqqo*K9_VI* K7_VI*K3a_VI)); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ji2_sin_VI} = & Wos* K3_VI*(K4_VI*(K3a_VI*Tpqqo+Tpqqo)+ Tpqqo*K9_VI* K7_VI* \\ & K3a_VI+Tpdpdo*(K4_VI*(1-Wos^2*K3a_VI*Tpqqo*Tpqqo-K3a_VI*K10_VI*(XE+Xppd))+ \\ & K7_VI*K3a_VI*(K9_VI-K10_VI*K11_VI))); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{delta1_sin_VI} = & K3_VI*(K3a_VI*K10a_VI*RE*(K9_VI-K10_VI*K11_VI)- \\ & K10a_VI*K11a_VI*(1-Wos^2*K3a_VI*Tpqqo*Tpqqo-K3a_VI*K10_VI*(XE+Xppd))); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{delta2_sin_VI} = & Wos*K3_VI*(K3a_VI* K10a_VI*RE*Tpqqo*K9_VI- \\ & K10a_VI*K11a_VI*(K3a_VI*Tpqqo+Tpqqo)); \end{aligned}$$

$$\text{fi1_sin_VI} = ((\text{ji1_sin_VI} + \text{delta1_sin_VI}) * \text{beta1_sin_VI} + \text{beta2_sin_VI} * (\text{ji2_sin_VI} + \text{delta2_sin_VI})) / (\text{beta1_sin_VI}^2 + \text{beta2_sin_VI}^2);$$

$$\begin{aligned} \text{fi2_sin_VI} = & (\text{beta1_sin_VI} * (\text{ji2_sin_VI} + \text{delta2_sin_VI}) - \\ & \text{beta2_sin_VI} * (\text{ji1_sin_VI} + \text{delta1_sin_VI})) / (\text{beta1_sin_VI}^2 + \text{beta2_sin_VI}^2); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
KS_{sin_VI} = & K1_VI - fi1_sin_VI * ((K2a_VI * K3a_VI * ((K10_VI * RE - K8_VI) * (1 - \\
& Wos^2 * K3a_VI * Tppqo * Tpqr - K3a_VI * K10_VI * (XE + Xppd))) - \dots \\
& Wos^2 * Tppqo * K8_VI * (K3a_VI * Tppqo + Tpqr)) / (((1 - Wos^2 * K3a_VI * Tppqo * Tpqr - \\
& K3a_VI * K10_VI * (XE + Xppd))^2 + (Wos * (K3a_VI * Tppqo + \dots \\
& Tpqr))^2) + K2_VI) - fi2_sin_VI * ((K2a_VI * K3a_VI * (Wos * (Tpqr * K8_VI * (1 - \\
& Wos^2 * K3a_VI * Tppqo * Tpqr - K3a_VI * K10_VI * (XE + Xppd))) + \dots \\
& (K10_VI * RE - K8_VI) * (K3a_VI * Tppqo + Tpqr))) / (((1 - Wos^2 * K3a_VI * Tppqo * Tpqr - \\
& K3a_VI * K10_VI * (XE + Xppd))^2 + (Wos * (K3a_VI * Tppqo + \dots \\
& Tpqr))^2) + (K2a_VI * K3a_VI * ((K10_VI * K11_VI - K9_VI) * (1 - Wos^2 * K3a_VI * Tppqo * Tpqr - \\
& K3a_VI * K10_VI * (XE + Xppd))) - \dots \\
& Wos^2 * Tppqo * K9_VI * (K3a_VI * Tppqo + Tpqr))) / ((1 - Wos^2 * K3a_VI * Tppqo * Tpqr - \\
& K3a_VI * K10_VI * (XE + Xppd))^2 + (Wos * (K3a_VI * Tppqo + \dots \\
& Tpqr))^2)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
KD_{sin_VI} = & (fi1_sin_VI * (K2a_VI * K3a_VI * (Wos * (Tpqr * K8_VI * (1 - \\
& Wos^2 * K3a_VI * Tppqo * Tpqr - K3a_VI * K10_VI * \dots \\
& (XE + Xppd))) + (K10_VI * RE - K8_VI) * (K3a_VI * Tppqo + Tpqr))) / (((1 - \\
& Wos^2 * K3a_VI * Tppqo * Tpqr - K3a_VI * \dots \\
& K10_VI * (XE + Xppd))^2 + (Wos * (K3a_VI * Tppqo + Tpqr))^2) - \\
& fi2_sin_VI * ((K2a_VI * K3a_VI * ((K10_VI * RE - \dots \\
& K8_VI) * (1 - Wos^2 * K3a_VI * Tppqo * Tpqr - K3a_VI * K10_VI * (XE + Xppd))) - \\
& Wos^2 * Tppqo * K8_VI * (K3a_VI * Tppqo \dots \\
& + Tpqr))) / (((1 - Wos^2 * K3a_VI * Tppqo * Tpqr - \\
& K3a_VI * K10_VI * (XE + Xppd))^2 + (Wos * (K3a_VI * Tppqo + Tpqr))^2) + \dots \\
& K2_VI) - (K2a_VI * K3a_VI * (Wos * (Tpqr * K9_VI * (1 - Wos^2 * K3a_VI * Tppqo * Tpqr - \\
& K3a_VI * K10_VI * \dots \\
& (XE + Xppd))) + (K10_VI * K11_VI - K9_VI) * (K3a_VI * Tppqo + Tpqr))) / (((1 - \\
& Wos^2 * K3a_VI * Tppqo * Tpqr - \dots \\
& K3a_VI * K10_VI * (XE + Xppd))^2 + (Wos * (K3a_VI * Tppqo + Tpqr))^2) * (W0 / Wos)
\end{aligned}$$

B.4.2 Coeficientes de Estabilidad con regulador de tensión

run('E:\CD Inf. Surf. Vanessa Ruiz Q\Algoritmos Matlab\Modelo de 6to Orden\Sin regulaci3n (VI)\Matlab_VI_sin\subtransitoriodq')

$$\begin{aligned}
\text{beta1_RT_VI} = & (1 - \text{Wos}^2 \cdot \text{TA} \cdot \text{TR}) \cdot ((1 - \\
& \text{Wos}^2 \cdot \text{K3_VI} \cdot \text{Tppdo} \cdot \text{Tpdo} + \text{K3_VI} \cdot \text{K10a_VI} \cdot (\text{XE} + \text{Xppq})) \cdot (1 - \text{Wos}^2 \cdot \text{Tpqo} \cdot \text{K3a_VI} \cdot \text{Tppqo} - \\
& \text{K3a_VI} \cdot \text{K10_VI} \cdot (\text{XE} + \text{Xppd})) - \\
& \text{Wos}^2 \cdot (\text{K3_VI} \cdot \text{Tppdo} + \text{Tpdo}) \cdot (\text{Tpqo} + \text{K3a_VI} \cdot \text{Tppqo}) + \text{K3_VI} \cdot \text{K3a_VI} \cdot ((\text{K7_VI} + \text{K10a_VI} \cdot \text{R} \\
& \text{E}) \cdot (\text{K8_VI} - \text{K10_VI} \cdot \text{RE}) - \text{Wos}^2 \cdot \text{Tpdo} \cdot \text{K7_VI} \cdot \text{Tpqo} \cdot \text{K8_VI}) - \\
& \text{Wos}^2 \cdot (\text{TR} + \text{TA}) \cdot (((\text{K3_VI} \cdot \text{Tppdo} + \text{Tpdo}) \cdot (1 - \text{Wos}^2 \cdot \text{Tpqo} \cdot \text{K3a_VI} \cdot \text{Tppqo} - \text{K3a_VI} \cdot \text{K10_VI} \\
& \cdot (\text{XE} + \text{Xppd})) + (\text{Tpqo} + \text{K3a_VI} \cdot \text{Tppqo}) \cdot (1 - \text{Wos}^2 \cdot \text{Tppdo} \cdot \text{K3_VI} \cdot \text{Tpdo} + \text{K3_VI} \cdot \text{K10a_VI} \\
& \cdot (\text{XE} + \text{Xppq}))) + \text{K3_VI} \cdot \text{K3a_VI} \cdot (\text{Tpdo} \cdot \text{K7_VI} \cdot (\text{K8_VI} - \\
& \text{K10_VI} \cdot \text{RE}) + \text{Tpqo} \cdot \text{K8_VI} \cdot (\text{K7_VI} + \text{K10a_VI} \cdot \text{RE}))) + \text{K6_VI} \cdot \text{K3_VI} \cdot \text{KA} \cdot (1 - \\
& \text{Wos}^2 \cdot \text{Tpqo} \cdot \text{K3a_VI} \cdot \text{Tppqo} - \text{K3a_VI} \cdot \text{K10_VI} \cdot (\text{XE} + \text{Xppd})) - \\
& \text{K6a_VI} \cdot \text{K3a_VI} \cdot \text{K3_VI} \cdot \text{KA} \cdot (\text{K8_VI} - \text{K10_VI} \cdot \text{RE});
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{beta2_RT_VI} = & \text{Wos} \cdot ((\text{TR} + \text{TA}) \cdot ((1 - \text{Wos}^2 \cdot \text{K3_VI} \cdot \text{Tppdo} \cdot \text{Tpdo} + \text{K3_VI} \cdot \text{K10a_VI} \cdot \dots \\
& (\text{XE} + \text{Xppq})) \cdot (1 - \text{Wos}^2 \cdot \text{Tpqo} \cdot \text{K3a_VI} \cdot \text{Tppqo} - \text{K3a_VI} \cdot \text{K10_VI} \cdot (\text{XE} + \text{Xppd})) - \dots \\
& \text{Wos}^2 \cdot (\text{K3_VI} \cdot \text{Tppdo} + \text{Tpdo}) \cdot (\text{Tpqo} + \text{K3a_VI} \cdot \text{Tppqo}) + \text{K3_VI} \cdot \text{K3a_VI} \cdot ((\text{K7_VI} + \dots \\
& \text{K10a_VI} \cdot \text{RE}) \cdot (\text{K8_VI} - \text{K10_VI} \cdot \text{RE}) - \text{Wos}^2 \cdot \text{Tpdo} \cdot \text{K7_VI} \cdot \text{Tpqo} \cdot \text{K8_VI})) + \dots \\
& ((\text{K3_VI} \cdot \text{Tppdo} + \text{Tpdo}) \cdot (1 - \text{Wos}^2 \cdot \text{Tpqo} \cdot \text{K3a_VI} \cdot \text{Tppqo} - \text{K3a_VI} \cdot \text{K10_VI} \cdot \dots \\
& (\text{XE} + \text{Xppd})) + (\text{Tpqo} + \text{K3a_VI} \cdot \text{Tppqo}) \cdot (1 - \text{Wos}^2 \cdot \text{K3_VI} \cdot \text{Tppdo} \cdot \text{Tpdo} + \dots \\
& \text{K3_VI} \cdot \text{K10a_VI} \cdot (\text{XE} + \text{Xppq})) + \text{K3_VI} \cdot \text{K3a_VI} \cdot (\text{Tpdo} \cdot \text{K7_VI} \cdot (\text{K8_VI} - \text{K10_VI} \cdot \text{RE}) \dots \\
& + \text{Tpqo} \cdot \text{K8_VI} \cdot (\text{K7_VI} + \text{K10a_VI} \cdot \text{RE}))) \cdot (1 - \text{Wos}^2 \cdot \text{TR} \cdot \text{TA}) + \text{K3_VI} \cdot \text{KA} \cdot \text{K6_VI} \cdot \dots \\
& (\text{Tpqo} + \text{K3a_VI} \cdot \text{Tppqo}) - \text{K3_VI} \cdot \text{KA} \cdot \text{K6a_VI} \cdot \text{K3a_VI} \cdot \text{Tpqo} \cdot \text{K8_VI});
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{ji1_RT_VI} = & \text{K3_VI} \cdot ((\text{K4_VI} \cdot (1 - \text{Wos}^2 \cdot \text{K3a_VI} \cdot \text{Tppqo} \cdot \text{Tpqo} - \text{K3a_VI} \cdot \text{K10_VI} \cdot (\text{XE} + \dots \\
& \text{Xppd})) + \text{K7_VI} \cdot \text{K3a_VI} \cdot (\text{K9_VI} - \text{K10_VI} \cdot \text{K11_VI})) \cdot (1 - \text{Wos}^2 \cdot \text{TR} \cdot \text{TA} - \text{Wos}^2 \cdot \dots \\
& \text{Tpdo} \cdot (\text{TR} + \text{TA})) - \text{Wos}^2 \cdot (\text{K4_VI} \cdot (\text{K3a_VI} \cdot \text{Tppqo} + \text{Tpqo}) + \text{Tpqo} \cdot \text{K9_VI} \cdot \text{K7_VI} \cdot \dots \\
& \text{K3a_VI}) \cdot (\text{Tpdo} \cdot (1 - \text{Wos}^2 \cdot \text{TR} \cdot \text{TA}) + \text{TR} + \text{TA}));
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{ji2_RT_VI} = & \text{Wos} \cdot \text{K3_VI} \cdot ((\text{K4_VI} \cdot (\text{K3a_VI} \cdot \text{Tppqo} + \text{Tpqo}) + \text{Tpqo} \cdot \text{K9_VI} \cdot \text{K7_VI} \cdot \dots \\
& \text{K3a_VI}) \cdot (1 - \text{Wos}^2 \cdot \text{TR} \cdot \text{TA} - \text{Wos}^2 \cdot \text{Tpdo} \cdot (\text{TR} + \text{TA})) + (\text{K4_VI} \cdot (1 - \text{Wos}^2 \cdot \dots \\
& \text{K3a_VI} \cdot \text{Tppqo} \cdot \text{Tpqo} - \text{K3a_VI} \cdot \text{K10_VI} \cdot (\text{XE} + \text{Xppd})) + \text{K7_VI} \cdot \text{K3a_VI} \cdot (\text{K9_VI} - \dots \\
& \text{K10_VI} \cdot \text{K11_VI})) \cdot (\text{Tpdo} \cdot (1 - \text{Wos}^2 \cdot \text{TR} \cdot \text{TA}) + \text{TR} + \text{TA}));
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{delta1_RT_VI} = & \text{K3_VI} \cdot ((1 - \text{Wos}^2 \cdot \text{K3a_VI} \cdot \text{Tppqo} \cdot \text{Tpqo} - \text{K3a_VI} \cdot \text{K10_VI} \cdot (\text{XE} + \dots \\
& \text{Xppd})) \cdot (\text{KA} \cdot \text{K5_VI} - \text{K10a_VI} \cdot \text{K11a_VI} \cdot (1 - \text{Wos}^2 \cdot \text{TR} \cdot \text{TA})) + \text{Wos}^2 \cdot (\text{K3a_VI} \cdot \dots \\
& \text{Tppqo} + \text{Tpqo}) \cdot \text{K10a_VI} \cdot \text{K11a_VI} \cdot (\text{TR} + \text{TA}) - \text{K3a_VI} \cdot ((\text{K9_VI} - \text{K10_VI} \cdot \text{K11_VI}) \cdot \dots \\
& (\text{KA} \cdot \text{K6a_VI} - \text{K10a_VI} \cdot \text{RE} \cdot (1 - \text{Wos}^2 \cdot \text{TR} \cdot \text{TA})) + \text{Wos}^2 \cdot \text{Tpqo} \cdot \text{K9_VI} \cdot \text{K10a_VI} \cdot \dots
\end{aligned}$$

RE*(TR+TA));

delta2_RT_VI= Wos*K3_VI*((K3a_VI*Tppqo+Tpqo)*(KA*K5_VI-K10a_VI*...
K11a_VI*(1-Wos^2*TR*TA))-K10a_VI*K11a_VI*(TR+TA)*(1-Wos^2*K3a_VI*...
Tppqo*Tpqo-K3a_VI*K10_VI*(XE+Xppd))-K3a_VI*(Tpqo*K9_VI*(KA*K6a_VI-...
K10a_VI*RE*(1-Wos^2*TR*TA))-K10a_VI*RE*(TR+TA)*(K9_VI-K10_VI*...
K11_VI));

fi1_RT_VI=((ji1_RT_VI+delta1_RT_VI)*beta1_RT_VI+beta2_RT_VI*(ji2_RT_VI...
+delta2_RT_VI))/(beta1_RT_VI^2+beta2_RT_VI^2);

fi2_RT_VI=(beta1_RT_VI*(ji2_RT_VI+delta2_RT_VI)-beta2_RT_VI*(ji1_RT_VI...
+delta1_RT_VI))/(beta1_RT_VI^2+beta2_RT_VI^2);

KS_RT_VI=K1_VI-fi1_RT_VI*((K2a_VI*K3a_VI*((K10_VI*RE-K8_VI)*(1-Wos^2*...
K3a_VI*Tppqo*Tpqo-K3a_VI*K10_VI*(XE+Xppd))-Wos^2*Tpqo*K8_VI*...
(K3a_VI*Tppqo+Tpqo)))/((1-Wos^2*K3a_VI*Tppqo*Tpqo-K3a_VI*K10_VI*...
(XE+Xppd))^2+(Wos*(K3a_VI*Tppqo+Tpqo))^2)+K2_VI)-fi2_RT_VI*...
((K2a_VI*K3a_VI*(Wos*(Tpqo*K8_VI*(1-Wos^2*K3a_VI*Tppqo*Tpqo-...
K3a_VI*K10_VI*(XE+Xppd)))+(K10_VI*RE-K8_VI)*(K3a_VI*Tppqo+Tpqo))))...
/((1-Wos^2*K3a_VI*Tppqo*Tpqo-K3a_VI*K10_VI*(XE+Xppd))^2+(Wos*...
(K3a_VI*Tppqo+Tpqo))^2)+(K2a_VI*K3a_VI*((K10_VI*K11_VI-K9_VI)*...
(1-Wos^2*K3a_VI*Tppqo*Tpqo-K3a_VI*K10_VI*(XE+Xppd))-Wos^2*Tpqo*...
K9_VI*(K3a_VI*Tppqo+Tpqo)))/((1-Wos^2*K3a_VI*Tppqo*Tpqo-K3a_VI*...
K10_VI*(XE+Xppd))^2+(Wos*(K3a_VI*Tppqo+Tpqo))^2)

KD_RT_VI=(fi1_RT_VI*(K2a_VI*K3a_VI*(Wos*(Tpqo*K8_VI*(1-Wos^2*K3a_VI*...
Tppqo*Tpqo-K3a_VI*K10_VI*(XE+Xppd)))+(K10_VI*RE-K8_VI)*(K3a_VI*...
Tppqo+Tpqo)))/((1-Wos^2*K3a_VI*Tppqo*Tpqo-K3a_VI*K10_VI*(XE+...
Xppd))^2+(Wos*(K3a_VI*Tppqo+Tpqo))^2)-fi2_RT_VI*((K2a_VI*K3a_VI*...
((K10_VI*RE-K8_VI)*(1-Wos^2*K3a_VI*Tppqo*Tpqo-K3a_VI*K10_VI*(XE+...
Xppd))- Wos^2*Tpqo*K8_VI*(K3a_VI*Tppqo+Tpqo)))/((1-Wos^2*K3a_VI*...
Tppqo*Tpqo-K3a_VI*K10_VI*(XE+Xppd))^2+(Wos*(K3a_VI*Tppqo+Tpqo))^2)...
+K2_VI)-(K2a_VI*K3a_VI*(Wos*(Tpqo*K9_VI*(1-Wos^2*K3a_VI*Tppqo*Tpqo-...
-K3a_VI*K10_VI*(XE+Xppd)))+(K10_VI*K11_VI-K9_VI)*(K3a_VI*Tppqo+...
Tpqo)))/((1-Wos^2*K3a_VI*Tppqo*Tpqo-K3a_VI*K10_VI*(XE+Xppd))^2+...

$$(Wos*(K3a_VI*Tpqqo+Tpqqo))^2)*(W0/Wos)$$

B.4.3 Coeficientes de Estabilidad con regulador de tensión y estabilizador de sistemas de potencia

run('E:\CD Inf. Surf. Vanessa Ruiz Q\Algoritmos Matlab\Modelo de 6to Orden\Sin regulación (VI)\Matlab_VI_sin\subtransitoriodq')

$$\begin{aligned} \text{alfa1_PSS_VI} = & K3_VI*KA*Kstab*Wos^2*Tw*((1-Wos^2*t1*TR- \\ & Wos^2*K3a_VI*Tpqqo*(t1+TR))*(1-Wos^2*K3a_VI*Tpqqo*... \\ & Tpqqo-K3a_VI*K10_VI*(XE+Xppd))- Wos^2*(t1+TR+K3a_VI*Tpqqo*(1- \\ & Wos^2*t1*TR))*(K3a_VI*Tpqqo+Tpqqo)); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{alfa2_PSS_VI} = & K3_VI*KA*Kstab*Wos^3*Tw*((t1+TR+K3a_VI*Tpqqo*(1- \\ & Wos^2*t1*TR))*(1- Wos^2*K3a_VI*Tpqqo*Tpqqo... \\ & -K3a_VI*K10_VI*(XE+Xppd)))+(1- Wos^2*t1*TR- \\ & Wos^2*K3a_VI*Tpqqo*(t1+TR))*(K3a_VI*Tpqqo+Tpqqo)); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{beta1_PSS_VI} = & (1- Wos^2*TA*TR)*((1- \\ & Wos^2*K3_VI*Tpddo*Tpdo+K3_VI*K10a_VI*(XE+Xppq))*(1-Wos^2*Tpqqo*K3a_VI*Tpqqo- \\ & K3a_VI*K10_VI*... \\ & (XE+Xppd))- Wos^2*(K3_VI*Tpddo+Tpdo)*(Tpqqo+K3a_VI*Tpqqo)+... \\ & K3_VI*K3a_VI*((K7_VI+K10a_VI*RE)*(K8_VI-K10_VI*RE)- \\ & Wos^2*Tpdo*K7_VI*Tpqqo*K8_VI))-Wos^2*(TR+TA)*(((K3_VI*Tpddo+Tpdo)*(1-Wos^2*... \\ & Tpqqo*K3a_VI*Tpqqo-K3a_VI*K10_VI*(XE+Xppd)))+(Tpqqo+K3a_VI*Tpqqo)*... \\ & (1- Wos^2*Tpddo*K3_VI*Tpdo+K3_VI*K10a_VI \\ & *(XE+Xppq)))+K3_VI*K3a_VI*(Tpdo*K7_VI*(K8_VI- \\ & K10_VI*RE)+Tpqqo*K8_VI*(K7_VI+K10a_VI*... \\ & RE)))+K6_VI*K3_VI*KA*(1-Wos^2*Tpqqo*K3a_VI*Tpqqo-K3a_VI*K10_VI*... \\ & (XE+Xppd))-K6a_VI*K3a_VI*K3_VI*KA*(K8_VI-K10_VI*RE); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{beta2_PSS_VI} = & Wos*((TR+TA)*((1-Wos^2*K3_VI*Tpddo*Tpdo+K3_VI*K10a_VI*... \\ & (XE+Xppq))*(1-Wos^2*Tpqqo*K3a_VI*Tpqqo-K3a_VI*K10_VI*(XE+Xppd))-... \\ & Wos^2*(K3_VI*Tpddo+Tpdo)*(Tpqqo+K3a_VI*Tpqqo)+K3_VI*K3a_VI*((K7_VI+... \\ & K10a_VI*RE)*(K8_VI-K10_VI*RE)- Wos^2*Tpdo*K7_VI*Tpqqo*K8_VI))+... \\ & ((K3_VI*Tpddo+Tpdo)*(1-Wos^2*Tpqqo*K3a_VI*Tpqqo-K3a_VI*K10_VI*... \\ & (XE+Xppd)))+(Tpqqo+K3a_VI*Tpqqo)*(1-Wos^2*K3_VI*Tpddo*Tpdo+K3_VI*... \\ & K10a_VI*(XE+Xppq))+K3_VI*K3a_VI*(Tpdo*K7_VI*(K8_VI-K10_VI*RE))+... \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{Tpqo} * \text{K8_VI} * (\text{K7_VI} + \text{K10a_VI} * \text{RE})) * (1 - \text{Wos}^2 * \text{TR} * \text{TA}) + \text{K3_VI} * \text{KA} * \text{K6_VI} * \dots \\ & (\text{Tpqo} + \text{K3a_VI} * \text{Tpqqo}) - \text{K3_VI} * \text{KA} * \text{K6a_VI} * \text{K3a_VI} * \text{Tpqqo} * \text{K8_VI}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ji1_PSS_VI} = & \text{K3_VI} * \text{K4_VI} * (((1 - \text{Wos}^2 * \text{Tpdo} * \text{K3a_VI} * \text{Tpqqo}) * (1 - \text{Wos}^2 * \text{K3a_VI} * \dots \\ & \text{Tpqqo} * \text{Tpqqo} - \text{K3a_VI} * \text{K10_VI} * (\text{XE} + \text{Xppd})) - \text{Wos}^2 * (\text{Tpdo} + \text{K3a_VI} * \text{Tpqqo}) * \dots \\ & (\text{K3a_VI} * \text{Tpqqo} + \text{Tpqqo}) * (1 - \text{Wos}^2 * \text{TR} * \text{TA}) - \text{Wos}^2 * ((\text{Tpdo} + \text{K3a_VI} * \text{Tpqqo}) * \dots \\ & (1 - \text{Wos}^2 * \text{K3a_VI} * \text{Tpqqo} * \text{Tpqqo} - \text{K3a_VI} * \text{K10_VI} * (\text{XE} + \text{Xppd})) + (\text{K3a_VI} * \text{Tpqqo} + \dots \\ & \text{Tpqqo}) * (1 - \text{Wos}^2 * \text{Tpdo} * \text{K3a_VI} * \text{Tpqqo})) * (\text{TR} + \text{TA})) + \text{K7_VI} * \text{K3_VI} * \text{K3a_VI} * \dots \\ & ((\text{K9_VI} - \text{K10_VI} * \text{K11_VI}) * (1 - \text{Wos}^2 * \text{Tpdo} * \text{K3a_VI} * \text{Tpqqo}) - \text{Wos}^2 * \text{Tpqqo} * \dots \\ & \text{K9_VI} * (\text{Tpdo} + \text{K3a_VI} * \text{Tpqqo})) * (1 - \text{Wos}^2 * \text{TR} * \text{TA}) - \text{Wos}^2 * \text{K7_VI} * \text{K3_VI} * \dots \\ & \text{K3a_VI} * (\text{Tpqqo} * \text{K9_VI} * (1 - \text{Wos}^2 * \text{Tpdo} * \text{K3a_VI} * \text{Tpqqo}) + (\text{K9_VI} - \text{K10_VI} * \dots \\ & \text{K11_VI}) * (\text{Tpdo} + \text{K3a_VI} * \text{Tpqqo})) * (\text{TR} + \text{TA}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ji2_PSS_VI} = & \text{Wos} * (\text{K3_VI} * \text{K4_VI} * (((\text{Tpdo} + \text{K3a_VI} * \text{Tpqqo}) * (1 - \text{Wos}^2 * \text{K3a_VI} * \dots \\ & \text{Tpqqo} * \text{Tpqqo} - \text{K3a_VI} * \text{K10_VI} * (\text{XE} + \text{Xppd})) + (\text{K3a_VI} * \text{Tpqqo} + \text{Tpqqo}) * (1 - \text{Wos}^2 * \dots \\ & \text{Tpdo} * \text{K3a_VI} * \text{Tpqqo})) * (1 - \text{Wos}^2 * \text{TR} * \text{TA}) + ((1 - \text{Wos}^2 * \text{Tpdo} * \text{K3a_VI} * \text{Tpqqo}) * \dots \\ & (1 - \text{Wos}^2 * \text{K3a_VI} * \text{Tpqqo} * \text{Tpqqo} - \text{K3a_VI} * \text{K10_VI} * (\text{XE} + \text{Xppd})) - \text{Wos}^2 * \dots \\ & (\text{Tpdo} + \text{K3a_VI} * \text{Tpqqo}) * (\text{K3a_VI} * \text{Tpqqo} + \text{Tpqqo})) * (\text{TR} + \text{TA})) + \text{K7_VI} * \text{K3a_VI} * \dots \\ & \text{K3_VI} * (1 - \text{Wos}^2 * \text{TR} * \text{TA}) * (\text{Tpqqo} * \text{K9_VI} * (1 - \text{Wos}^2 * \text{Tpdo} * \text{K3a_VI} * \text{Tpqqo}) + \dots \\ & (\text{K9_VI} - \text{K10_VI} * \text{K11_VI}) * (\text{Tpdo} + \text{K3a_VI} * \text{Tpqqo})) + (\text{TR} + \text{TA}) * \text{K7_VI} * \text{K3_VI} * \dots \\ & \text{K3a_VI} * ((\text{K9_VI} - \text{K10_VI} * \text{K11_VI}) * (1 - \text{Wos}^2 * \text{Tpdo} * \text{K3a_VI} * \text{Tpqqo}) - \text{Wos}^2 * \dots \\ & \text{Tpqqo} * \text{K9_VI} * (\text{Tpdo} + \text{K3a_VI} * \text{Tpqqo}))); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{delta1_PSS_VI} = & \text{K3_VI} * (\text{KA} * \text{K5_VI} * (1 - \text{Wos}^2 * \text{K3a_VI} * \text{Tpqqo} * \text{Tpqqo} - \text{K3a_VI} * \dots \\ & \text{K10_VI} * (\text{XE} + \text{Xppd}) - \text{Wos}^2 * \text{K3a_VI} * \text{Tpqqo} * (\text{K3a_VI} * \text{Tpqqo} + \dots \\ & \text{Tpqqo})) - (\text{K9_VI} - \text{K10_VI} * \text{K11_VI} - \text{Wos}^2 * \text{Tpqqo} * \text{K9_VI} * \text{K3a_VI} * \text{Tpqqo}) * \dots \\ & (\text{KA} * \text{K6a_VI} - \text{K10a_VI} * \text{RE} * (1 - \text{Wos}^2 * \text{TR} * \text{TA})) * \text{K3a_VI} - \dots \\ & \text{Wos}^2 * \text{K10a_VI} * \text{RE} * (\text{TR} + \text{TA}) * \text{K3a_VI} * (\text{Tpqqo} * \text{K9_VI} + \text{K3a_VI} * \text{Tpqqo} * (\text{K9_VI} - \dots \\ & \text{K10_VI} * \text{K11_VI})) - \text{K10a_VI} * \text{K11a_VI} * ((1 - \dots \\ & \text{Wos}^2 * \text{K3a_VI} * \text{Tpqqo} * \text{Tpqqo} - \text{K3a_VI} * \text{K10_VI} * (\text{XE} + \text{Xppd})) * (1 - \text{Wos}^2 * \text{TR} * \dots \\ & \text{TA} - \text{Wos}^2 * (\text{TR} + \text{TA}) * \text{K3a_VI} * \text{Tpqqo}) - \text{Wos}^2 * (\text{K3a_VI} * \text{Tpqqo} \dots \\ & + \text{Tpqqo}) * (\text{TR} + \text{TA} + (1 - \text{Wos}^2 * \text{TR} * \text{TA}) * \text{K3a_VI} * \text{Tpqqo}))); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{delta2_PSS_VI} = & \text{Wos} * \text{K3_VI} * (\text{KA} * \text{K5_VI} * (\text{K3a_VI} * \text{Tpqqo} + \text{Tpqqo} + \text{K3a_VI} * \text{Tpqqo} * \dots \\ & (1 - \text{Wos}^2 * \text{K3a_VI} * \text{Tpqqo} * \text{Tpqqo} - \text{K3a_VI} * \text{K10_VI} * \dots \\ & (\text{XE} + \text{Xppd}))) - ((\text{Tpqqo} * \text{K9_VI} + \text{K3a_VI} * \text{Tpqqo} * (\text{K9_VI} - \text{K10_VI} * \text{K11_VI})) * \dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& (KA \cdot K6a_{VI} - K10a_{VI} \cdot RE \cdot (1 - Wos^2 \cdot TR \cdot TA)) \cdot K3a_{VI} - \dots \\
& K10a_{VI} \cdot RE \cdot (TR + TA) \cdot K3a_{VI} \cdot (K9_{VI} - K10_{VI} \cdot K11_{VI} - Wos^2 \cdot Tpqo \cdot \dots \\
& K9_{VI} \cdot K3a_{VI} \cdot Tppqo) - K10a_{VI} \cdot K11a_{VI} \cdot ((K3a_{VI} \cdot Tppqo + Tpqo) \cdot (1 - \dots \\
& Wos^2 \cdot TR \cdot TA - Wos^2 \cdot (TR + TA) \cdot \dots \\
& K3a_{VI} \cdot Tppqo) + (TR + TA + (1 - Wos^2 \cdot TR \cdot TA) \cdot K3a_{VI} \cdot Tppqo) \cdot (1 - Wos^2 \cdot \dots \\
& K3a_{VI} \cdot Tppqo \cdot Tpqo - K3a_{VI} \cdot K10_{VI} \cdot (XE + Xppd))));
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\epsilon1_{PSS_{VI}} &= W0 \cdot ((1 - Wos^2 \cdot Tw \cdot t2 - Wos^2 \cdot K3a_{VI} \cdot Tppqo \cdot (Tw + t2)) \cdot \dots \\
\beta1_{PSS_{VI}} &= Wos \cdot \beta2_{PSS_{VI}} \cdot (K3a_{VI} \cdot Tppqo \cdot (1 - \dots \\
& Wos^2 \cdot Tw \cdot t2) + (Tw + t2));
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\epsilon2_{PSS_{VI}} &= W0 \cdot (Wos \cdot (K3a_{VI} \cdot Tppqo \cdot (1 - Wos^2 \cdot Tw \cdot t2) + (Tw + t2)) \cdot \dots \\
\beta1_{PSS_{VI}} &+ (1 - Wos^2 \cdot Tw \cdot t2 - \dots \\
& Wos^2 \cdot K3a_{VI} \cdot Tppqo \cdot (Tw + t2)) \cdot \beta2_{PSS_{VI}});
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
f1_{PSS_{VI}} &= (\alpha1_{PSS_{VI}} \cdot \epsilon1_{PSS_{VI}} + \alpha2_{PSS_{VI}} \cdot \dots \\
& \epsilon2_{PSS_{VI}}) / (\epsilon1_{PSS_{VI}}^2 + \epsilon2_{PSS_{VI}}^2) + \dots \\
& (j1_{PSS_{VI}} \cdot (\beta1_{PSS_{VI}} - Wos \cdot K3a_{VI} \cdot Tppqo \cdot \beta2_{PSS_{VI}}) + \dots \\
& j2_{PSS_{VI}} \cdot (Wos \cdot K3a_{VI} \cdot Tppqo \cdot \beta1_{PSS_{VI}} + \beta2_{PSS_{VI}}) + \dots \\
& \delta1_{PSS_{VI}} \cdot (\beta1_{PSS_{VI}} - Wos \cdot K3a_{VI} \cdot Tppqo \cdot \beta2_{PSS_{VI}}) + \dots \\
& \delta2_{PSS_{VI}} \cdot (Wos \cdot K3a_{VI} \cdot Tppqo \cdot \beta1_{PSS_{VI}} + \beta2_{PSS_{VI}})) / \dots \\
& ((\beta1_{PSS_{VI}} - Wos \cdot K3a_{VI} \cdot Tppqo \cdot \beta2_{PSS_{VI}})^2 + (Wos \cdot K3a_{VI} \cdot \dots \\
& Tppqo \cdot \beta1_{PSS_{VI}} + \beta2_{PSS_{VI}})^2);
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
f2_{PSS_{VI}} &= (\alpha2_{PSS_{VI}} \cdot \epsilon1_{PSS_{VI}} - \alpha1_{PSS_{VI}} \cdot \dots \\
& \epsilon2_{PSS_{VI}}) / (\epsilon1_{PSS_{VI}}^2 + \epsilon2_{PSS_{VI}}^2) + \dots \\
& (j2_{PSS_{VI}} \cdot (\beta1_{PSS_{VI}} - Wos \cdot K3a_{VI} \cdot Tppqo \cdot \beta2_{PSS_{VI}}) - \dots \\
& j1_{PSS_{VI}} \cdot (Wos \cdot K3a_{VI} \cdot Tppqo \cdot \beta1_{PSS_{VI}} + \beta2_{PSS_{VI}}) + \dots \\
& \delta2_{PSS_{VI}} \cdot (\beta1_{PSS_{VI}} - Wos \cdot K3a_{VI} \cdot Tppqo \cdot \beta2_{PSS_{VI}}) - \dots \\
& \delta1_{PSS_{VI}} \cdot (Wos \cdot K3a_{VI} \cdot Tppqo \cdot \beta1_{PSS_{VI}} + \beta2_{PSS_{VI}})) / \dots \\
& ((\beta1_{PSS_{VI}} - Wos \cdot K3a_{VI} \cdot Tppqo \cdot \beta2_{PSS_{VI}})^2 + (Wos \cdot K3a_{VI} \cdot \dots \\
& Tppqo \cdot \beta1_{PSS_{VI}} + \beta2_{PSS_{VI}})^2);
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
KS_{PSS_{VI}} &= K1_{VI} \cdot f1_{PSS_{VI}} \cdot ((K2a_{VI} \cdot K3a_{VI} \cdot ((K10_{VI} \cdot RE - K8_{VI}) \cdot (1 - \dots \\
& Wos^2 \cdot K3a_{VI} \cdot Tppqo \cdot Tpqo - K3a_{VI} \cdot K10_{VI} \cdot (XE + Xppd)) - \dots \\
& Wos^2 \cdot Tpqo \cdot K8_{VI} \cdot (K3a_{VI} \cdot Tppqo + Tpqo))) / ((1 - Wos^2 \cdot K3a_{VI} \cdot Tppqo \cdot Tpqo \dots
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -K3a_VI \cdot K10_VI \cdot (XE + Xppd))^2 + (Wos \cdot (K3a_VI \cdot Tppqo + \dots \\
& Tpqo))^2 + K2_VI - fi2_PSS_VI \cdot ((K2a_VI \cdot K3a_VI \cdot (Wos \cdot (Tpqo \cdot K8_VI \cdot (1 - \dots \\
& Wos^2 \cdot K3a_VI \cdot Tppqo \cdot Tpqo - K3a_VI \cdot K10_VI \cdot (XE + Xppd))) + \dots \\
& (K10_VI \cdot RE - K8_VI) \cdot (K3a_VI \cdot Tppqo + Tpqo)))) / ((1 - Wos^2 \cdot K3a_VI \cdot Tppqo \cdot \dots \\
& Tpqo - K3a_VI \cdot K10_VI \cdot (XE + Xppd))^2 + (Wos \cdot (K3a_VI \cdot Tppqo + \dots \\
& Tpqo))^2) + (K2a_VI \cdot K3a_VI \cdot ((K10_VI \cdot K11_VI - K9_VI) \cdot (1 - Wos^2 \cdot K3a_VI \cdot \dots \\
& Tppqo \cdot Tpqo - K3a_VI \cdot K10_VI \cdot (XE + Xppd))) - \dots \\
& Wos^2 \cdot Tpqo \cdot K9_VI \cdot (K3a_VI \cdot Tppqo + Tpqo))) / ((1 - Wos^2 \cdot K3a_VI \cdot Tppqo \cdot \dots \\
& Tpqo - K3a_VI \cdot K10_VI \cdot (XE + Xppd))^2 + (Wos \cdot (K3a_VI \cdot Tppqo + \dots \\
& Tpqo))^2)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
KD_PSS_VI = & (fi1_PSS_VI \cdot (K2a_VI \cdot K3a_VI \cdot (Wos \cdot (Tpqo \cdot K8_VI \cdot (1 - \\
& Wos^2 \cdot K3a_VI \cdot Tppqo \cdot Tpqo - K3a_VI \cdot K10_VI \cdot \dots \\
& (XE + Xppd))) + (K10_VI \cdot RE - K8_VI) \cdot (K3a_VI \cdot Tppqo + Tpqo)))) / ((1 - \\
& Wos^2 \cdot K3a_VI \cdot Tppqo \cdot Tpqo - K3a_VI \cdot \dots \\
& K10_VI \cdot (XE + Xppd))^2 + (Wos \cdot (K3a_VI \cdot Tppqo + Tpqo))^2) - \\
& fi2_PSS_VI \cdot ((K2a_VI \cdot K3a_VI \cdot ((K10_VI \cdot RE - \dots \\
& K8_VI) \cdot (1 - Wos^2 \cdot K3a_VI \cdot Tppqo \cdot Tpqo - K3a_VI \cdot K10_VI \cdot (XE + Xppd))) - \\
& Wos^2 \cdot Tpqo \cdot K8_VI \cdot (K3a_VI \cdot Tppqo \dots \\
& + Tpqo))) / ((1 - Wos^2 \cdot K3a_VI \cdot Tppqo \cdot Tpqo - \\
& K3a_VI \cdot K10_VI \cdot (XE + Xppd))^2 + (Wos \cdot (K3a_VI \cdot Tppqo + Tpqo))^2) + \dots \\
& K2_VI) - (K2a_VI \cdot K3a_VI \cdot (Wos \cdot (Tpqo \cdot K9_VI \cdot (1 - Wos^2 \cdot K3a_VI \cdot Tppqo \cdot Tpqo - \\
& K3a_VI \cdot K10_VI \cdot \dots \\
& (XE + Xppd))) + (K10_VI \cdot K11_VI - K9_VI) \cdot (K3a_VI \cdot Tppqo + Tpqo)))) / ((1 - \\
& Wos^2 \cdot K3a_VI \cdot Tppqo \cdot Tpqo - \dots \\
& K3a_VI \cdot K10_VI \cdot (XE + Xppd))^2 + (Wos \cdot (K3a_VI \cdot Tppqo + Tpqo))^2) \cdot (W0 / Wos)
\end{aligned}$$

B.4.4 Coeficientes de Estabilidadde la CH Cañón del Pato

run('E:\CD Inf. Suf. Vanessa Ruiz Q\Algoritmos Matlab\Modelo de 6to Orden\Sin regulación (VI)\Matlab_VI_sin\subtransitoriodq')

$$\begin{aligned}
alfa1_RN_VI = & -TW2 \cdot KS1 \cdot Wos^2 \cdot ((1 - Wos^2 \cdot T1 \cdot T3) - Wos^2 \cdot T8 \cdot (T1 + T3)) \cdot (1 - \\
& Wos^2 \cdot T7 \cdot TW4) + Wos^2 \cdot TW2 \cdot KS1 \cdot Wos^2 \cdot ((T1 + T3) + T8 \cdot (1 - Wos^2 \cdot T1 \cdot T3)) \cdot (T7 + TW4) - \\
& K5_VI \cdot W0 \cdot \dots
\end{aligned}$$

$$(((1-Wos^2*T2*T4)*(1-Wos^2*T7*TW4)-Wos^2*(T2+T4)*(T7+TW4))*((1-Wos^2*T9^2)^2-4*Wos^2*T9^2)-Wos^2*4*T9*TW2*(1-Wos^2*T9^2))-Wos^2*((T2+T4)*(1-$$

$$Wos^2*T7*TW4)+(T7+TW4)*(1-Wos^2*T2*T4))*(4*T9*(1-Wos^2*T9^2)+TW2*((1-Wos^2*T9^2)^2-4*Wos^2*T9^2)))-Wos^2*W0*TW4*Kalfa_RN_VI*KS1*...$$

$$KS2*((TW2*(1-Wos^2*T1*T3)+(T1+T3))*(-(1-Wos^2*T9^2)^2+4*Wos^2*T9^2+KS3)+(T8*KS3-4*T9*(1-Wos^2*T9^2))*(1-Wos^2*T1*T3-Wos^2*TW2*(T1+T3)))$$

$$alfa2_RN_VI=(-TW2*KS1*Wos^2*((1-Wos^2*T1*T3)-Wos^2*T8*(T1+T3))*(T7+TW4)-TW2*KS1*Wos^2*((T1+T3)+T8*(1-Wos^2*T1*T3))*(1-Wos^2*T7*TW4))-K5_VI*W0*(((...$$

$$T2+T4)*(1-Wos^2*T7*TW4)+(T7+TW4)*(1-Wos^2*T2*T4))*((1-Wos^2*T9^2)^2-4*Wos^2*T9^2)-Wos^2*4*T9*TW2*(1-Wos^2*T9^2)))+(4*T9*(1-Wos^2*...$$

$$T9^2)+TW2*((1-Wos^2*T9^2)^2-4*Wos^2*T9^2))*((1-Wos^2*T2*T4)*(1-Wos^2*T7*TW4)-Wos^2*(T2+T4)*(T7+TW4)))+W0*TW4*Kalfa_RN_VI*KS1*KS2*((1-Wos^2*T1*...$$

$$T3)-Wos^2*TW2*(T1+T3))*(-(1-Wos^2*T9^2)^2+4*Wos^2*T9^2+KS3)-Wos^2*(TW2*(1-Wos^2*T1*T3)+(T1+T3))*(T8*KS3-4*T9*(1-Wos^2*T9^2)))$$

$$beta1_RN_VI= -K6_VI*(((1-Wos^2*T2*T4)*(1-Wos^2*T7*TW4)-$$

$$Wos^2*(T2+T4)*(T7+TW4))*((1-Wos^2*T9^2)^2-4*Wos^2*T9^2)-Wos^2*4*T9*(1-Wos^2*T9^2))*((T2+T4)*(1-...$$

$$Wos^2*T7*TW4)+(T7+TW4)*(1-Wos^2*T2*T4)))-Wos^2*TW4*KS2*Kbeta_RN_VI*KS1*((T1+T3))*(-(1-$$

$$Wos^2*T9^2)^2+4*Wos^2*T9^2+KS3)+(1-Wos^2*T1*T3)*(T8*KS3-4*... T9*(1-Wos^2*T9^2)))$$

$$beta2_RN_VI=-K6_VI*(((T2+T4)*(1-Wos^2*T7*TW4)+(T7+TW4)*(1-Wos^2*T2*T4))*((1-Wos^2*T9^2)^2-4*Wos^2*T9^2)+4*T9*(1-Wos^2*T9^2))*((1-Wos^2*T2*T4)*(1-...$$

$$Wos^2*T7*TW4)-Wos^2*(T2+T4)*(T7+TW4)))+TW4*KS2*Kbeta_RN_VI*KS1*((1-Wos^2*T1*T3))*(-(1-Wos^2*T9^2)^2+4*Wos^2*T9^2+KS3)-Wos^2*(T1+T3)*(T8*KS3-4*... T9*(1-Wos^2*T9^2)))$$

$$ji1_RN_VI=(-K6a_VI*(((1-Wos^2*T2*T4)*(1-Wos^2*T7*TW4)-$$

$$Wos^2*(T2+T4)*(T7+TW4))*((1-Wos^2*T9^2)^2-4*Wos^2*T9^2)-Wos^2*4*T9*(1-Wos^2*T9^2))*((T2+...$$

$$T4)^*(1-Wos^2*T7*TW4)+(T7+TW4)*(1-Wos^2*T2*T4))-$$

$$Wos^2*TW4*Kji_RN_VI*KS1*KS2*((T1+T3)*(-(1-$$

$$Wos^2*T9^2)^2+4*Wos^2*T9^2+KS3)+(1-Wos^2*T1*T3)*...$$

$$(T8*KS3-4*T9*(1-Wos^2*T9^2))))$$

$$ji2_RN_VI=-K6a_VI*(((T2+T4)*(1-Wos^2*T7*TW4)+(T7+TW4)*(1-Wos^2*T2*T4))*((1-$$

$$Wos^2*T9^2)^2-4*Wos^2*T9^2)+4*T9*(1-Wos^2*T9^2)*((1-Wos^2*T2*T4)*(1-...$$

$$Wos^2*T7*TW4)-Wos^2*(T2+T4)*(T7+TW4)))+TW4*Kji_RN_VI*KS1*KS2*((1-$$

$$Wos^2*T1*T3)*(-(1-Wos^2*T9^2)^2+4*Wos^2*T9^2+KS3)-Wos^2*(T1+T3)*(T8*KS3-$$

$$4*T9*...$$

$$(1-Wos^2*T9^2)))$$

$$theta1_RN_VI=((((T4+T2)*(1-Wos^2*T7*TW4)+(1-Wos^2*T4*T2)*(T7+TW4))*((1-$$

$$Wos^2*T9^2)^2-4*Wos^2*T9^2)+4*T9*(1-Wos^2*T9^2)*((1-Wos^2*T4*T2)*(1-Wos^2*...$$

$$T7*TW4)-Wos^2*(T4+T2)*(T7+TW4)))*((K10a_VI*K11a_VI-$$

$$K4_VI)+Wos^2*K4_VI*Tpdo*TW2)+(TW2*(K10a_VI*K11a_VI-K4_VI)-K4_VI*Tpdo)*(((1-$$

$$Wos^2*T4*T2)*...$$

$$(1-Wos^2*T7*TW4)-Wos^2*(T4+...$$

$$T2)*(T7+TW4))*((1-Wos^2*T9^2)^2-4*Wos^2*T9^2)-Wos^2*4*T9*(1-$$

$$Wos^2*T9^2)*((T4+T2)*(1-Wos^2*T7*TW4)+(1-Wos^2*T4*T2)*(T7+TW4))))+T4*(((1-$$

$$Wos^2*T4*...$$

$$T2)*(1-Wos^2*T7*TW4)-Wos^2*(T4+T2)*(T7+TW4))*((1-Wos^2*T9^2)^2-$$

$$4*Wos^2*T9^2)-Wos^2*4*T9*(1-Wos^2*T9^2)*((T4+T2)*(1-Wos^2*T7*TW4)+(1-$$

$$Wos^2*T4*...$$

$$T2)*(T7+TW4))*((K10a_VI*K11a_VI-K4_VI)+Wos^2*K4_VI*Tpdo*TW2)-$$

$$Wos^2*(((T4+T2)*(1-Wos^2*T7*TW4)+(1-Wos^2*T4*T2)*(T7+TW4))*((1-Wos^2*T9^2)^2-$$

$$4*...$$

$$Wos^2*T9^2)+4*T9*(1-Wos^2*T9^2)*((1-Wos^2*T4*T2)*(1-Wos^2*T7*TW4)-$$

$$Wos^2*(T4+T2)*(T7+TW4)))*(TW2*(K10a_VI*K11a_VI-K4_VI)-K4_VI*Tpdo)))$$

$$theta2_RN_VI=((((1-Wos^2*T4*T2)*(1-Wos^2*T7*TW4)-Wos^2*(T4+T2)*(T7+TW4))*((1-$$

$$Wos^2*T9^2)^2-4*Wos^2*T9^2)-Wos^2*4*T9*(1-Wos^2*T9^2)*((T4+T2)*(1-...$$

$$Wos^2*T7*TW4)+(1-Wos^2*T4*T2)*(T7+TW4)))*((K10a_VI*K11a_VI-$$

$$K4_VI)+Wos^2*K4_VI*Tpdo*TW2)-Wos^2*(((T4+T2)*(1-Wos^2*T7*TW4)+(1-$$

$$Wos^2*T4*T2)*(T7+...$$

$$\begin{aligned}
& TW4)) * ((1 - Wos^2 * T9^2)^2 - 4 * Wos^2 * T9^2) + 4 * T9 * (1 - Wos^2 * T9^2) * ((1 - \\
& Wos^2 * T4 * T2) * (1 - Wos^2 * T7 * TW4) - \\
& Wos^2 * (T4 + T2) * (T7 + TW4))) * (TW2 * (K10a_VI * K11a_VI - \\
& K4_VI) - K4_VI * Tpdo) - Wos^2 * T4 * (((T4 + T2) * (1 - Wos^2 * T7 * TW4) + (1 - \\
& Wos^2 * T4 * T2) * (T7 + TW4))) * ((1 - Wos^2 * T9^2)^2 - 4 * Wos^2 * \\
& T9^2) + 4 * T9 * (1 - Wos^2 * T9^2) * ((1 - Wos^2 * T4 * T2) * (1 - Wos^2 * T7 * TW4) - \\
& Wos^2 * (T4 + T2) * (T7 + TW4))) * ((K10a_VI * K11a_VI - \\
& K4_VI) + Wos^2 * K4_VI * Tpdo * TW2) + (TW2 * (\\
& K10a_VI * K11a_VI - K4_VI) - K4_VI * Tpdo) * (((1 - Wos^2 * T4 * T2) * (1 - Wos^2 * T7 * TW4) - \\
& Wos^2 * (T4 + T2) * (T7 + TW4))) * ((1 - Wos^2 * T9^2)^2 - 4 * Wos^2 * T9^2) - Wos^2 * 4 * T9 * (\\
& 1 - Wos^2 * T9^2) * ((T4 + T2) * (1 - Wos^2 * T7 * TW4) + (1 - Wos^2 * T4 * T2) * (T7 + TW4))))))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{delta1_RN_VI} = & KP * ((-K6a_VI * (((1 - Wos^2 * T2 * T4) * (1 - Wos^2 * T7 * TW4) - \\
& Wos^2 * (T2 + T4) * (T7 + TW4))) * ((1 - Wos^2 * T9^2)^2 - 4 * Wos^2 * T9^2) - Wos^2 * 4 * T9 * (1 - \\
& Wos^2 * T9^2) * ((T2 + T4) * (1 - Wos^2 * T7 * TW4) + (T7 + TW4) * (1 - Wos^2 * T2 * T4))) - \\
& Wos^2 * TW4 * Kji_RN_VI * KS1 * KS2 * ((T1 + T3) * (- (1 - \\
& Wos^2 * T9^2)^2 + 4 * Wos^2 * T9^2 + KS3) + (1 - \\
& Wos^2 * T1 * T3) * (T8 * KS3 - 4 * T9 * (1 - Wos^2 * T9^2)))) - Wos^2 * Ti * (-K6a_VI * (((T2 + T4) * (1 - \\
& Wos^2 * T7 * TW4) + (T7 + TW4) * (1 - Wos^2 * T2 * T4))) * ((1 - Wos^2 * T9^2)^2 - 4 * Wos^2 * T9^2) ... \\
& + 4 * T9 * (1 - Wos^2 * T9^2) * ((1 - Wos^2 * T2 * T4) * (1 - Wos^2 * T7 * TW4) - \\
& Wos^2 * (T2 + T4) * (T7 + TW4))) + TW4 * Kji_RN_VI * KS1 * KS2 * ((1 - Wos^2 * T1 * T3) * (- (1 - \\
& Wos^2 * T9^2)^2 + 4 * \\
& Wos^2 * T9^2 + KS3) - Wos^2 * (T1 + T3) * (T8 * KS3 - 4 * T9 * (1 - Wos^2 * T9^2))))))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{delta2_RN_VI} = & KP * (Ti * (-K6a_VI * (((1 - Wos^2 * T2 * T4) * (1 - Wos^2 * T7 * TW4) - \\
& Wos^2 * (T2 + T4) * (T7 + TW4))) * ((1 - Wos^2 * T9^2)^2 - 4 * Wos^2 * T9^2) - Wos^2 * 4 * T9 * (1 - \\
& Wos^2 * T9^2) * ... \\
& ((T2 + T4) * (1 - Wos^2 * T7 * TW4) + (T7 + TW4) * (1 - Wos^2 * T2 * T4))) - \\
& Wos^2 * TW4 * Kji_RN_VI * KS1 * KS2 * ... \\
& ((T1 + T3) * (- (1 - Wos^2 * T9^2)^2 + 4 * Wos^2 * T9^2 + KS3) + (1 - Wos^2 * T1 * T3) * (T8 * KS3 - \\
& 4 * T9 * (1 - Wos^2 * T9^2)))) + (-K6a_VI * (((T2 + T4) * (1 - Wos^2 * T7 * TW4) + (T7 + TW4) * (1 - \\
& Wos^2 * T2 * T4))) * ((1 - Wos^2 * T9^2)^2 - 4 * Wos^2 * T9^2) + 4 * T9 * (1 - Wos^2 * T9^2) * ((1 - \\
& Wos^2 * T2 * T4) * (1 - Wos^2 * T7 * TW4) - Wos^2 * (T2 + T4) * (T7 + TW4))) + ... \\
& TW4 * Kji_RN_VI * KS1 * KS2 * ((1 - Wos^2 * T1 * T3) * (- (1 - \\
& Wos^2 * T9^2)^2 + 4 * Wos^2 * T9^2 + KS3) - Wos^2 * (T1 + T3) * (T8 * KS3 - 4 * T9 * (1 - Wos^2 * T9^2))))))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{epsilon1_RN_VI} = & K3_VI * (1 - \text{Wos}^2 * \text{Tpqo} * K3a_VI * \text{Tppqo} - \\ & K3a_VI * K10_VI * (\text{XE} + \text{Xppd})) * (\text{KP} * (\text{alfa1_RN_VI} - \text{Wos}^2 * \text{Ti} * \text{alfa2_RN_VI}) - \\ & \text{Wos}^2 * \text{Ti} * \text{W0} * \text{theta1_RN_VI}) - \text{Wos}^2 * \dots \end{aligned}$$

$$K3_VI * (\text{Tpqo} + K3a_VI * \text{Tppqo}) * (\text{KP} * (\text{Ti} * \text{alfa1_RN_VI} + \text{alfa2_RN_VI}) + \text{Ti} * \text{W0} * \text{theta2_RN_VI})$$

$$\begin{aligned} \text{epsilon2_RN_VI} = & K3_VI * (1 - \text{Wos}^2 * \text{Tpqo} * K3a_VI * \text{Tppqo} - \\ & K3a_VI * K10_VI * (\text{XE} + \text{Xppd})) * (\text{KP} * (\text{Ti} * \text{alfa1_RN_VI} + \text{alfa2_RN_VI}) + \text{Ti} * \text{W0} * \text{theta2_RN_VI}) + \\ & K3_VI * (\text{Tpqo} + K3a_VI * \dots \end{aligned}$$

$$\text{Tppqo}) * (\text{KP} * (\text{alfa1_RN_VI} - \text{Wos}^2 * \text{Ti} * \text{alfa2_RN_VI}) - \text{Wos}^2 * \text{Ti} * \text{W0} * \text{theta1_RN_VI})$$

$$\begin{aligned} \text{fi1_RN_VI} = & (-\text{Wos}^2 * \text{Ti} * (K3_VI * \text{Tppdo} * (1 - \text{Wos}^2 * \text{T4} * \text{T2}) + (\text{T4} + \text{T2})) * ((1 - \text{Wos}^2 * \text{T7} * \text{TW4}) - \\ & \text{Wos}^2 * \text{T4} * (\text{T7} + \text{TW4})) - \text{Wos}^2 * \text{Ti} * ((1 - \text{Wos}^2 * \text{T4} * \text{T2}) - \text{Wos}^2 * \dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & K3_VI * \text{Tppdo} * (\text{T4} + \text{T2})) * (\text{T4} * (1 - \text{Wos}^2 * \text{T7} * \text{TW4}) + (\text{T7} + \text{TW4}))) * (((1 - \text{Wos}^2 * \text{T9}^2)^2 - \\ & 4 * \text{Wos}^2 * \text{T9}^2) * ((1 - \text{Wos}^2 * \text{Tpqo} * K3a_VI * \text{Tppqo} - K3a_VI * K10_VI * (\text{XE} + \text{Xppd})) - \text{Wos}^2 * \dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{Tpdo} * (\text{Tpqo} + K3a_VI * \text{Tppqo})) - \text{Wos}^2 * 4 * \text{T9} * (1 - \text{Wos}^2 * \text{T9}^2) * (\text{Tpdo} * (1 - \\ & \text{Wos}^2 * \text{Tpqo} * K3a_VI * \text{Tppqo} - K3a_VI * K10_VI * (\text{XE} + \text{Xppd})) + (\text{Tpqo} + K3a_VI * \text{Tppqo}))) - \\ & \text{Wos}^2 * (\text{Ti} * \dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & ((1 - \text{Wos}^2 * \text{T4} * \text{T2}) - \text{Wos}^2 * K3_VI * \text{Tppdo} * (\text{T4} + \text{T2})) * ((1 - \text{Wos}^2 * \text{T7} * \text{TW4}) - \\ & \text{Wos}^2 * \text{T4} * (\text{T7} + \text{TW4})) - \text{Wos}^2 * \text{Ti} * (K3_VI * \text{Tppdo} * (1 - \text{Wos}^2 * \text{T4} * \text{T2}) + (\text{T4} + \text{T2})) * \dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (\text{T4} * (1 - \text{Wos}^2 * \text{T7} * \text{TW4}) + \text{T7} + \text{TW4})) * (4 * \text{T9} * (1 - \text{Wos}^2 * \text{T9}^2) * ((1 - \\ & \text{Wos}^2 * \text{Tpqo} * K3a_VI * \text{Tppqo} - K3a_VI * K10_VI * (\text{XE} + \text{Xppd})) - \end{aligned}$$

$$\text{Wos}^2 * \text{Tpdo} * (\text{Tpqo} + K3a_VI * \text{Tppqo})) + (\text{Tpdo} * \dots$$

$$\begin{aligned} & (1 - \text{Wos}^2 * \text{Tpqo} * K3a_VI * \text{Tppqo} - \\ & K3a_VI * K10_VI * (\text{XE} + \text{Xppd})) + (\text{Tpqo} + K3a_VI * \text{Tppqo})) * ((1 - \text{Wos}^2 * \text{T9}^2)^2 - \\ & 4 * \text{Wos}^2 * \text{T9}^2)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{fi2_RN_VI} = & (\text{Ti} * ((1 - \text{Wos}^2 * \text{T4} * \text{T2}) - \text{Wos}^2 * K3_VI * \text{Tppdo} * (\text{T4} + \text{T2})) * ((1 - \text{Wos}^2 * \text{T7} * \text{TW4}) - \\ & \text{Wos}^2 * \text{T4} * (\text{T7} + \text{TW4})) - \text{Wos}^2 * \text{Ti} * (K3_VI * \text{Tppdo} * (1 - \text{Wos}^2 * \text{T4} * \text{T2}) + (\text{T4} + \text{T2})) * \dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (\text{T4} * (1 - \text{Wos}^2 * \text{T7} * \text{TW4}) + (\text{T7} + \text{TW4}))) * (((1 - \text{Wos}^2 * \text{T9}^2)^2 - 4 * \text{Wos}^2 * \text{T9}^2) * ((1 - \\ & \text{Wos}^2 * \text{Tpqo} * K3a_VI * \text{Tppqo} - K3a_VI * K10_VI * (\text{XE} + \text{Xppd})) - \text{Wos}^2 * \text{Tpdo} * \dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (\text{Tpqo} + K3a_VI * \text{Tppqo})) - \text{Wos}^2 * 4 * \text{T9} * (1 - \text{Wos}^2 * \text{T9}^2) * (\text{Tpdo} * (1 - \\ & \text{Wos}^2 * \text{Tpqo} * K3a_VI * \text{Tppqo} - \end{aligned}$$

$$K3a_VI * K10_VI * (\text{XE} + \text{Xppd})) + (\text{Tpqo} + K3a_VI * \text{Tppqo}))) + (4 * \text{T9} * (1 - \text{Wos}^2 * \dots$$

$T9^2) * ((1 - Wos^2 * Tpqr * K3a_VI * Tppqr - K3a_VI * K10_VI * (XE + Xppd)) -$
 $Wos^2 * Tpdo * (Tpqr + K3a_VI * Tppqr)) + (Tpdo * (1 - Wos^2 * Tpqr * K3a_VI * Tppqr -$
 $K3a_VI * K10_VI * (XE + ...$
 $Xppd)) + (Tpqr + K3a_VI * Tppqr)) * ((1 - Wos^2 * T9^2)^2 - 4 * Wos^2 * T9^2)) * (-$
 $Wos^2 * Ti * (K3_VI * Tppdo * (1 - Wos^2 * T4 * T2) + (T4 + T2)) * ((1 - Wos^2 * T7 * TW4) ...$
 $- Wos^2 * T4 * (T7 + TW4)) - Wos^2 * Ti * ((1 - Wos^2 * T4 * T2) -$
 $Wos^2 * K3_VI * Tppdo * (T4 + T2)) * (T4 * (1 - Wos^2 * T7 * TW4) + T7 + TW4))$

$ganma1_RN_VI = -Wos^2 * Ti * (((T4 + T2) * (1 - Wos^2 * T7 * TW4) + (1 -$
 $Wos^2 * T4 * T2) * (T7 + TW4)) * ...$

$((K10a_VI * RE + K7_VI) * ((1 - Wos^2 * T9^2)^2 - 4 * Wos^2 * T9^2) -$
 $Wos^2 * 4 * T9 * K7_VI * Tpdo * (1 - Wos^2 * T9^2)) + (4 * T9 * (1 -$
 $Wos^2 * T9^2) * (K10a_VI * RE + K7_VI) ...$
 $+ K7_VI * Tpdo * ((1 - Wos^2 * T9^2)^2 - 4 * Wos^2 * T9^2)) * ((1 - Wos^2 * T4 * T2) * (1 -$
 $Wos^2 * T7 * TW4) - Wos^2 * (T4 + T2) * (T7 + TW4)) ...$
 $+ T4 * (((1 - Wos^2 * T4 * T2) * (1 - Wos^2 * T7 * TW4) -$
 $Wos^2 * (T4 + T2) * (T7 + TW4)) * ((K10a_VI * RE + K7_VI) * ((1 - Wos^2 * T9^2)^2 - 4 * Wos^2 * T9^2) -$
 $Wos^2 * 4 * T9 * K7_VI * Tpdo * ...$
 $(1 - Wos^2 * T9^2)) - Wos^2 * ((T4 + T2) * (1 - Wos^2 * T7 * TW4) + (1 -$
 $Wos^2 * T4 * T2) * (T7 + TW4)) * (4 * T9 * (1 -$
 $Wos^2 * T9^2) * (K10a_VI * RE + K7_VI) + K7_VI * Tpdo * ((1 - Wos^2 * ...$
 $T9^2)^2 - 4 * Wos^2 * T9^2))$

$ganma2_RN_VI = Ti * (((1 - Wos^2 * T4 * T2) * (1 - Wos^2 * T7 * TW4) -$
 $Wos^2 * (T4 + T2) * (T7 + TW4)) * ((K10a_VI * RE + K7_VI) * ((1 - Wos^2 * T9^2)^2 - 4 * Wos^2 * T9^2) -$
 $Wos^2 * 4 * T9 * K7_VI * ...$
 $Tpdo * (1 - Wos^2 * T9^2)) - Wos^2 * ((T4 + T2) * (1 - Wos^2 * T7 * TW4) + (1 -$
 $Wos^2 * T4 * T2) * (T7 + TW4)) * (4 * T9 * (1 -$
 $Wos^2 * T9^2) * (K10a_VI * RE + K7_VI) + K7_VI * Tpdo * ((1 - Wos^2 * ...$
 $T9^2)^2 - 4 * Wos^2 * T9^2)) - Wos^2 * T4 * (((T4 + T2) * (1 - Wos^2 * T7 * TW4) + (1 -$
 $Wos^2 * T4 * T2) * (T7 + TW4)) * ((K10a_VI * RE + K7_VI) * ((1 - Wos^2 * T9^2)^2 - 4 * Wos^2 * T9^2) - ...$
 $Wos^2 * 4 * T9 * K7_VI * Tpdo * (1 - Wos^2 * T9^2)) + (4 * T9 * (1 -$
 $Wos^2 * T9^2) * (K10a_VI * RE + K7_VI) + K7_VI * Tpdo * ((1 - Wos^2 * T9^2)^2 -$
 $4 * Wos^2 * T9^2)) * ((1 - Wos^2 * T4 * T2) * ...$
 $(1 - Wos^2 * T7 * TW4) - Wos^2 * (T4 + T2) * (T7 + TW4))$

$$\begin{aligned}
\text{eta1_RN_VI} = & -K3_VI * (((KP * (\text{beta1_RN_VI} - \text{Wos}^2 * Ti * \text{beta2_RN_VI})) * (1 - \\
& \text{Wos}^2 * \text{Tpqo} * K3a_VI * \text{Tpqqo} - K3a_VI * K10_VI * (XE + Xppd)) - \\
& \text{Wos}^2 * KP * (Ti * \text{beta1_RN_VI} + \dots \\
& \text{beta2_RN_VI}) * (\text{Tpqo} + K3a_VI * \text{Tpqqo})) + K3a_VI * KP * ((ji1_RN_VI - \\
& \text{Wos}^2 * Ti * ji2_RN_VI)) * (K10_VI * RE - \\
& K8_VI) + \text{Wos}^2 * \text{Tpqo} * K8_VI * (Ti * ji1_RN_VI + ji2_RN_VI)) \dots \\
& + \text{Wos}^2 * Ti * K10a_VI * (XE + Xppq) * ((T4 * ((1 - \text{Wos}^2 * T4 * T2)) * (1 - \text{Wos}^2 * T7 * TW4)) - \dots \\
& \text{Wos}^2 * (T4 + T2) * (T7 + TW4)) + ((T4 + T2) * (1 - \text{Wos}^2 * T7 * TW4)) + (1 - \\
& \text{Wos}^2 * T4 * T2) * (T7 + TW4)) * (((1 - \text{Wos}^2 * T9^2)^2 - 4 * \text{Wos}^2 * T9^2) * (1 - \\
& \text{Wos}^2 * \text{Tpqo} * K3a_VI * \text{Tpqqo} - K3a_VI * \dots \\
& K10_VI * (XE + Xppd)) - \text{Wos}^2 * 4 * T9 * (1 - \text{Wos}^2 * T9^2) * (\text{Tpqo} + K3a_VI * \text{Tpqqo})) + (4 * T9 * (1 - \\
& \text{Wos}^2 * T9^2) * (1 - \text{Wos}^2 * \text{Tpqo} * K3a_VI * \text{Tpqqo} - K3a_VI * K10_VI * (XE + Xppd))) + (\text{Tpqo} + \dots \\
& K3a_VI * \text{Tpqqo}) * ((1 - \text{Wos}^2 * T9^2)^2 - 4 * \text{Wos}^2 * T9^2) * (((1 - \text{Wos}^2 * T4 * T2) * (1 - \\
& \text{Wos}^2 * T7 * TW4) - \text{Wos}^2 * (T4 + T2) * (T7 + TW4)) - \text{Wos}^2 * T4 * ((T4 + T2) * (1 - \\
& \text{Wos}^2 * T7 * TW4)) + (1 - \dots \\
& \text{Wos}^2 * T4 * T2) * (T7 + TW4)))) - \text{Wos}^2 * K3a_VI * Ti * ((T4 * ((1 - \text{Wos}^2 * T4 * T2) * (1 - \\
& \text{Wos}^2 * T7 * TW4) - \text{Wos}^2 * (T4 + T2) * (T7 + TW4)) + ((T4 + T2) * (1 - \text{Wos}^2 * T7 * TW4)) + (1 - \\
& \text{Wos}^2 * T4 * \dots \\
& T2) * (T7 + TW4)) * (((1 - \text{Wos}^2 * T9^2)^2 - \\
& 4 * \text{Wos}^2 * T9^2) * ((K10a_VI * RE + K7_VI) * (K10_VI * RE - \\
& K8_VI) + \text{Wos}^2 * K7_VI * \text{Tpdo} * \text{Tpqqo} * K8_VI) - \text{Wos}^2 * 4 * T9 * (1 - \text{Wos}^2 * T9^2) * (\dots \\
& K7_VI * \text{Tpdo} * (K10_VI * RE - K8_VI) - \text{Tpqqo} * K8_VI * (K10a_VI * RE + K7_VI))) + (4 * T9 * (1 - \\
& \text{Wos}^2 * T9^2) * ((K10a_VI * RE + K7_VI) * (K10_VI * RE - K8_VI) + \text{Wos}^2 * K7_VI * \text{Tpdo} * \text{Tpqqo} * \dots \\
& K8_VI) + (K7_VI * \text{Tpdo} * (K10_VI * RE - K8_VI) - \text{Tpqqo} * K8_VI * (K10a_VI * RE + K7_VI))) * ((1 - \\
& \text{Wos}^2 * T9^2)^2 - 4 * \text{Wos}^2 * T9^2) * (((1 - \text{Wos}^2 * T4 * T2) * (1 - \text{Wos}^2 * T7 * TW4) - \text{Wos}^2 * \dots \\
& (T4 + T2) * (T7 + TW4)) - \text{Wos}^2 * T4 * ((T4 + T2) * (1 - \text{Wos}^2 * T7 * TW4)) + (1 - \\
& \text{Wos}^2 * T4 * T2) * (T7 + TW4))))))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{eta2_RN_VI} = & K3_VI * ((KP * (Ti * \text{beta1_RN_VI} + \text{beta2_RN_VI})) * (1 - \\
& \text{Wos}^2 * \text{Tpqo} * K3a_VI * \text{Tpqqo} - K3a_VI * K10_VI * (XE + Xppd)) + KP * (\text{beta1_RN_VI} - \\
& \text{Wos}^2 * Ti * \text{beta2_RN_VI})) * (\text{Tpqo} + \dots \\
& K3a_VI * \text{Tpqqo}) + K3a_VI * KP * ((Ti * ji1_RN_VI + ji2_RN_VI) * (K10_VI * \dots \\
& RE - K8_VI) - \text{Tpqqo} * K8_VI * (ji1_RN_VI - \text{Wos}^2 * Ti * ji2_RN_VI)) - \\
& Ti * K10a_VI * (XE + Xppq) * (((1 - \text{Wos}^2 * T4 * T2) * (1 - \text{Wos}^2 * T7 * TW4) - \\
& \text{Wos}^2 * (T4 + T2) * (T7 + TW4)) - \text{Wos}^2 * T4 * \dots
\end{aligned}$$

$((T4+T2)*(1-Wos^2*T7*TW4)+(1-Wos^2*T4*T2)*(T7+TW4)))*(((1-Wos^2*T9^2)^2-4*Wos^2*T9^2)*(1-Wos^2*Tpqo*K3a_VI*Pppqo-K3a_VI*K10_VI*(XE+Xppd)))-...$

$Wos^2*4*T9*(1-Wos^2*T9^2)*(Tpqo+K3a_VI*Pppqo))-Wos^2*(T4*((1-Wos^2*T4*T2)*(1-Wos^2*T7*TW4)-Wos^2*(T4+T2)*(T7+TW4)))+((T4+T2)*(1-Wos^2*T7*TW4))+...$

$(1-Wos^2*T4*T2)*(T7+TW4)))*(4*T9*(1-Wos^2*T9^2)*(1-Wos^2*Tpqo*K3a_VI*Pppqo-K3a_VI*K10_VI*(XE+Xppd)))+(Tpqo+K3a_VI*...$

$Pppqo)*(((1-Wos^2*T9^2)^2-4*Wos^2*T9^2)))+K3a_VI*Ti*(((1-Wos^2*T4*T2)*(1-Wos^2*T7*TW4)-Wos^2*(T4+T2)*(T7+TW4))-Wos^2*T4*((T4+T2)*(1-Wos^2*T7*TW4)+(1-Wos^2*T4*T2)*(T7+TW4)))*(((1-Wos^2*T9^2)^2-$

$4*Wos^2*T9^2)*((K10a_VI*RE+K7_VI)*(K10_VI*RE-K8_VI))+Wos^2*K7_VI*Tpdo*Tpqo*K8_VI)-Wos^2*4*T9*...$

$(1-Wos^2*T9^2)*(K7_VI*Tpdo*(K10_VI*RE-K8_VI)-Tpqo*K8_VI*(K10a_VI*RE+K7_VI)))-Wos^2*(T4*((1-Wos^2*T4*T2)*(1-Wos^2*T7*TW4)-Wos^2*...$

$(T4+T2)*(T7+TW4)))+((T4+T2)*(1-Wos^2*T7*TW4)+(1-Wos^2*T4*T2)*(T7+TW4)))*(4*T9*(1-Wos^2*T9^2)*((K10a_VI*RE+K7_VI)*(K10_VI*RE-K8_VI))+Wos^2*K7_VI*...$

$Tpdo*Tpqo*K8_VI)+(K7_VI*Tpdo*(K10_VI*RE-K8_VI)-Tpdo*K8_VI*(K10a_VI*RE+K7_VI))*(((1-Wos^2*T9^2)^2-4*Wos^2*T9^2)))))$

$kappa1_RN_VI=(W0*((fi1_RN_VI+eta1_RN_VI)-Wos^2*TW2*(fi2_RN_VI-eta2_RN_VI))*(epsilon1_RN_VI+W0*(K3_VI*(K3a_VI*(K10_VI*K11_VI-K9_VI))*(delta1_RN_VI+...$

$ganma1_RN_VI))+Wos^2*Tpqo*K9_VI*K3a_VI*(delta2_RN_VI+ganma2_RN_VI))-Wos^2*TW2*K3_VI*(K3a_VI*(K10_VI*K11_VI-K9_VI))*(delta2_RN_VI+ganma2_RN_VI)-...$

$Tpqo*K9_VI*K3a_VI*(delta1_RN_VI+ganma1_RN_VI)))+Wos^2*W0*(TW2*(fi1_RN_VI+eta1_RN_VI)+(fi2_RN_VI-eta2_RN_VI))*(epsilon2_RN_VI+W0*(TW2*K3_VI*(K3a_VI*...$

$(K10_VI*K11_VI-K9_VI))*(delta1_RN_VI+ganma1_RN_VI))+Wos^2*Tpqo*K9_VI*K3a_VI*(delta2_RN_VI+ganma2_RN_VI))+K3_VI*(K3a_VI*(K10_VI*K11_VI-K9_VI))*(...$

$delta2_RN_VI+ganma2_RN_VI)-Tpqo*K9_VI*K3a_VI*(delta1_RN_VI+ganma1_RN_VI)))/((W0*((fi1_RN_VI+eta1_RN_VI)-Wos^2*TW2*(fi2_RN_VI-eta2_RN_VI)))^2+...$

$(Wos*W0*(TW2*(fi1_RN_VI+eta1_RN_VI)+(fi2_RN_VI-eta2_RN_VI)))^2)$

$\kappa_2_{RN_VI} = (W_0 * ((\text{fi}_1_{RN_VI} + \text{eta}_1_{RN_VI}) - W_0^2 * TW_2 * (\text{fi}_2_{RN_VI} - \text{eta}_2_{RN_VI})) * (\epsilon_2_{RN_VI} + W_0 * (TW_2 * K_3_{VI} * (K_3a_{VI} * (K_{10_VI} * K_{11_VI} - K_9_{VI}) * (\delta_1_{RN_VI} + \dots$

$\text{gamma}_1_{RN_VI} + W_0^2 * T_{pqo} * K_9_{VI} * K_3a_{VI} * (\delta_2_{RN_VI} + \text{gamma}_2_{RN_VI})) + K_3_{VI} * (K_3a_{VI} * (K_{10_VI} * K_{11_VI} - K_9_{VI}) * (\delta_2_{RN_VI} + \text{gamma}_2_{RN_VI}) - T_{pqo} * K_9_{VI} * \dots$
 $K_3a_{VI} * (\delta_1_{RN_VI} + \text{gamma}_1_{RN_VI}))) -$
 $W_0 * (TW_2 * (\text{fi}_1_{RN_VI} + \text{eta}_1_{RN_VI}) + (\text{fi}_2_{RN_VI} - \text{eta}_2_{RN_VI})) * (\epsilon_1_{RN_VI} + W_0 * (K_3_{VI} * (K_3a_{VI} * (K_{10_VI} * K_{11_VI} - K_9_{VI}) * \dots$

$(\delta_1_{RN_VI} + \text{gamma}_1_{RN_VI}) + W_0^2 * T_{pqo} * K_9_{VI} * K_3a_{VI} * (\delta_2_{RN_VI} + \text{gamma}_2_{RN_VI}) - W_0^2 * TW_2 * K_3_{VI} * (K_3a_{VI} * (K_{10_VI} * K_{11_VI} - K_9_{VI}) * (\delta_2_{RN_VI} + \dots$
 $\text{gamma}_2_{RN_VI}) -$
 $T_{pqo} * K_9_{VI} * K_3a_{VI} * (\delta_1_{RN_VI} + \text{gamma}_1_{RN_VI}))) / ((W_0 * ((\text{fi}_1_{RN_VI} + \text{eta}_1_{RN_VI}) - W_0^2 * TW_2 * (\text{fi}_2_{RN_VI} - \text{eta}_2_{RN_VI})))^2 + \dots$
 $(W_0 * W_0 * (TW_2 * (\text{fi}_1_{RN_VI} + \text{eta}_1_{RN_VI}) + (\text{fi}_2_{RN_VI} - \text{eta}_2_{RN_VI})))^2)$

$KS = ((K_1_{VI} * (1 - W_0^2 * T_{pqo} * K_3a_{VI} * T_{ppqo} - K_3a_{VI} * K_{10_VI} * (XE + X_{ppd})) + K_2a_{VI} * K_3a_{VI} * (K_{10_VI} * K_{11_VI} - K_9_{VI})) * (1 - W_0^2 * T_{pqo} * K_3a_{VI} * T_{ppqo} - K_3a_{VI} * K_{10_VI} * (XE + \dots$
 $X_{ppd})) + W_0^2 * (K_1_{VI} * (T_{pqo} + K_3a_{VI} * T_{ppqo}) - K_2a_{VI} * K_3a_{VI} * K_9_{VI} * T_{pqo}) * (T_{pqo} + K_3a_{VI} * T_{ppqo}) + (\kappa_1_{RN_VI} * (K_2_{VI} * (1 - W_0^2 * T_{pqo} * K_3a_{VI} * T_{ppqo} - K_3a_{VI} * \dots$
 $K_{10_VI} * (XE + X_{ppd})) + K_2a_{VI} * K_3a_{VI} * (K_{10_VI} * RE - K_8_{VI})) - W_0^2 * \kappa_2_{RN_VI} * (K_2_{VI} * (T_{pqo} + K_3a_{VI} * T_{ppqo}) - K_2a_{VI} * K_3a_{VI} * K_8_{VI} * T_{pqo})) * (1 - W_0^2 * T_{pqo} * \dots$
 $K_3a_{VI} * T_{ppqo} - K_3a_{VI} * K_{10_VI} * (XE + X_{ppd})) + W_0^2 * (\kappa_1_{RN_VI} * (K_2_{VI} * (T_{pqo} + K_3a_{VI} * T_{ppqo}) - K_2a_{VI} * K_3a_{VI} * K_8_{VI} * T_{pqo}) + \kappa_2_{RN_VI} * (K_2_{VI} * (1 - W_0^2 * \dots$
 $T_{pqo} * K_3a_{VI} * T_{ppqo} - K_3a_{VI} * K_{10_VI} * (XE + X_{ppd})) + K_2a_{VI} * K_3a_{VI} * (K_{10_VI} * RE - K_8_{VI}))) * (T_{pqo} + K_3a_{VI} * T_{ppqo}) / ((1 - W_0^2 * T_{pqo} * K_3a_{VI} * T_{ppqo} - K_3a_{VI} * K_{10_VI} * \dots$
 $(XE + X_{ppd}))^2 + W_0^2 * (T_{pqo} + K_3a_{VI} * T_{ppqo})^2)$

$$\begin{aligned}
KD = & W0 * ((K1_VI * (Tpqo + K3a_VI * Tppqo) - K2a_VI * K3a_VI * K9_VI * Tpqo) * (1 - \\
& Wos^2 * Tpqo * K3a_VI * Tppqo - K3a_VI * K10_VI * (XE + Xppd)) - \\
& (Tpqo + K3a_VI * Tppqo) * (K1_VI * (1 - \dots \\
& \quad Wos^2 * Tpqo * K3a_VI * Tppqo - \\
& K3a_VI * K10_VI * (XE + Xppd)) + K2a_VI * K3a_VI * (K10_VI * K11_VI - \\
& K9_VI)) + (kappa1_RN_VI * (K2_VI * (Tpqo + K3a_VI * Tppqo) - K2a_VI * K3a_VI * \dots \\
& \quad K8_VI * Tpqo) + kappa2_RN_VI * (K2_VI * (1 - Wos^2 * Tpqo * K3a_VI * Tppqo - \\
& K3a_VI * K10_VI * (XE + Xppd)) + K2a_VI * K3a_VI * (K10_VI * RE - K8_VI))) * (1 - \\
& Wos^2 * Tpqo * K3a_VI * \dots \\
& \quad Tppqo - K3a_VI * K10_VI * (XE + Xppd)) - (Tpqo + K3a_VI * Tppqo) * (kappa1_RN_VI * (K2_VI * (1 - \\
& Wos^2 * Tpqo * K3a_VI * Tppqo - K3a_VI * K10_VI * (XE + Xppd)) + K2a_VI * K3a_VI * \dots \\
& \quad (K10_VI * RE - K8_VI)) - Wos^2 * kappa2_RN_VI * (K2_VI * (Tpqo + K3a_VI * Tppqo) - \\
& K2a_VI * K3a_VI * K8_VI * Tpqo))) / ((1 - Wos^2 * Tpqo * K3a_VI * Tppqo - K3a_VI * K10_VI * \dots \\
& \quad (XE + Xppd))^2 + Wos^2 * (Tpqo + K3a_VI * Tppqo)^2)
\end{aligned}$$

ANEXO C
INFORMES DE PERTURBACIONES EN LA CENTRAL
CAÑON DEL PATO

 COORDINADOR DEL SEIN-COES	INFORME FINAL DE PERTURBACIONES DEL SEIN	FECHA : 21 Ene 2008 HORA : 12:00 horas
	DPC/CCO- 013 IF- 2008	VERSIÓN: 1.0 PAGINA : 1/10

1. FECHA : Viernes 18 de Enero del 2008
2. HORA INICIO : 12:15:06 horas.
3. EQUIPO : Líneas L-1105 (Chimbote 1– Huallanca) de 138 kV.
4. PROPIETARIO : EGENOR.
5. CAUSA DE LA PERTURBACIÓN: Contacto de ave con la línea L-1105.

6. DESCRIPCIÓN DEL EVENTO:

Desconectó la línea L-1105 (Huallanca – Chimbote1) de 138 kV debido a falla monofásica en la fase "T" a 10.8 Km de la S.E. Chimbote 1 por contacto de ave con la línea L-1105. Como consecuencia, desconectó la línea L-1103 por sobrecarga al encontrarse fuera de servicio la línea L-1104 por mantenimiento programado.

Como consecuencia de la salida de las líneas, desconectó la C.H. Cañón del Pato con 215.44 MW. Asimismo, desconectó el grupo G-3 de la C.H. Carhuaquero con 31.2 MW por actuación de su protección de sobrecorriente y la frecuencia del SEIN disminuyó hasta 59.302 Hz. Se produjo una interrupción de 42.52 MW y una reducción de suministros de 83.08 MW.

A las 12:26 h entró en servicio la línea L-1105. A las 12:31 h entró en servicio el grupo G1 de la C.H. Cañón del Pato. A las 12:37 h entró en servicio la línea L-1103.

7. CONDICIONES OPERATIVAS PREVIAS:

a) Generación:

N °	CENTRAL	POTENCIA ACTIVA (MW)	POTENCIA REACTIVA (MVar)	N° DE GRUPOS
1	C.H. Cañón del Pato	215.44	31.78	6
2	C.H. Carhuaquero	89	-	3
3	C.H. Gallito Ciego	29	-	2
4	TGN4 C.T. Malacas	86	-	1

b) Flujo de potencia en las principales líneas:

N °	CODIGO	SUBESTACIONES		POTENCIA ACTIVA (MW)	POTENCIA REACTIVA (MVar)
		DE	A		
1	L-1103	Huallanca	Chimbote	89.67	6.72
2	L-1104	Huallanca	Chimbote	(*)	(*)
3	L-1105	Huallanca	Chimbote	90.09	6.47
4	L-2215	Paramonga Nueva	Chimbote	75	-

(*) Fuera de servicio por mantenimiento programado.

8. SECUENCIA CRONOLÓGICA DE EVENTOS:

HORA	DESCRIPCIÓN
12:15:06	Desconectó la línea L-1105 (Chimbote 1 - Huallanca) de 138 kV por falla monofásica en la fase "T" a 10.8 Km de la S.E. Chimbote 1
12:15 (*)	Desconectó el grupo G-3 de la C.H. Carhuaquero con 31.2 MW por actuación de su protección de sobrecorriente.
12:15:17	Desconectó el G2 de la C.H. Cañón del Pato con 43.42 MW.
12:15:17	Desconectó el G4 de la C.H. Cañón del Pato con 42.13 MW.
12:15:17(*)	En la S.E. Chimbote 1, abrieron los interruptores de la línea L-1103 por actuación de su protección de sobrecorriente.
12:15:18	En S.E. Trujillo Norte, abrieron los IN-4054 y IN-4084 del SVC-1
12:15:19	Desconectó el G6 de la C.H. Cañón del Pato con 2.21 MW por sobrefrecuencia.
12:15:19	Desconectó el G3 de la C.H. Cañón del Pato con 42.74 MW por sobrefrecuencia.
12:15:19	Desconectó el G5 de la C.H. Cañón del Pato con 43.17 MW por sobrefrecuencia.
12:15:19	Desconectó el G1 de la C.H. Cañón del Pato con 42.13 MW por sobrefrecuencia.
12:16	Se coordinó arrancar la C.T. Tumbes. El CC-ELP no informó el motivo por el cual no arrancó la central.
12:16	Se coordinó arrancar la C.T. Chiclayo Oeste.
12:16	Se coordinó subir la unidad TV21 de la C.T. Ilo 2 de 88 a 122 MW.
12:16	Se coordinó subir la unidad TG1 de la C.T. Kallpa a plena carga.
12:16	Se coordinó subir a la C.H. Mantaro a plena carga. A las 12:50 h se coordinó normalizar la generación a 640MW.
12:18	Se coordinó poner en servicio el SVC de la S.E. Trujillo Norte.
12:19	Se coordinó arrancar la unidad UTI 6 de la C.T. Santa Rosa. A las 12:32 h informó que se bloqueó la unidad y se canceló su arranque A las 13:12 h disponible
12:19	El CC-Electronorte (ENSA) informó que tienen interrumpidos 5 MW aproximadamente. A las 12:27 h se coordinó recuperar 7.5 MW. A las 12:39 h informó que recuperó carga al 100 %
12:20	El CC-EGN informó que no tiene comunicación con su operador en la S.E. Huallanca para que informe el estado de sus interruptores en la S.E. Huallanca
12:21	El CC-Hidrandina (HID) informó que tienen interrumpidos 15 MW
12:21	Se coordinó arrancar la unidad UTI5 de la C.T. Santa Rosa. En servicio a las 12:29 h. A las 12:43 h se coordinó bajar a mínima carga

12:22	Se coordinó subir a plena carga a la C.H. Yuncan
12:22	Se coordinó subir a plena carga a la C.H. Yaupi
12:23	Se coordinó arrancar la unidad TG de la C.T. Piura. En servicio a las 12:39 h. A las 13:05 h se coordinó parar la unidad. Fuera de servicio a las 13:33 h
12:23	Se coordinó arrancar la unidad TG1 de la C.T. Malacas. En servicio a las 13:09 h. La unidad operó a mínima carga
12:23	Se coordinó arrancar la unidad TG3 de la C.T. Chimbote. En servicio a las 12:56 h. A las 12:58 h se coordinó cancelar el arranque pero la unidad ya había ingresado.
12:23	Se coordinó arrancar la C.T. Piura 2. En servicio a las 12:35 h. A las 13:05 h se coordinó parar la unidad. Fuera de servicio a las 13:21 h
12:23	Se coordinó poner en servicio el grupo G5 de la C.H. Cañón del Pato. En servicio a las 12:44 h
12:23	Se coordinó arrancar la C.T. Sullana. En servicio a las 12:39 h. A las 13:05 h se coordinó parar la central. Fuera de servicio a las 13:19 h
12:23	Se coordinó arrancar la C.T. Paita 1. En servicio a las 12:45 h. A las 13:05 h se coordinó parar la central. Fuera de servicio a las 13:17 h
12:23	Se coordinó arrancar la C.T. Paita 2. En servicio a las 12:43 h. A las 13:05 h se coordinó parar la central. Fuera de servicio a las 13:15 h
12:23:08	En servicio el SVC de la S.E. Trujillo Norte
12:25	Se coordinó con CONENHUA para que no tomen carga en la S.E. Cajamarca Norte por tensiones bajas en las S.E. Trujillo Norte y Chimbote 1
12:25	El CC-EGN informó que el grupo G3 de la C.H. Carhuaquero está fuera de servicio.
12:25:45	Se energizó la línea L-1105 (Chimbote 1 - Huallanca) desde la S.E. Chimbote 1.
12:26	En servicio la C.T. Chiclayo Oeste.
12:26	En servicio la línea L-1105 (Chimbote 1 - Huallanca)
12:26	Se coordinó poner en servicio la línea L-2280 por regulación de tensión. En servicio a las 12:28 h.
12:27	El CC-EDG informó que su cliente Siderperú bajó su carga. Se coordinó no subir carga, quedándose con 15 MW. A las 12:38 h se coordinó normalizar la carga de Siderperú.
12:28	El CC-ENOSA informó que tienen interrumpidos 5 MW aproximadamente. A las 12:40 h se coordinó normalizar la carga de Enosa (5.3 MW)
12:31	En servicio el grupo G-1 de la C.H. Cañón del Pato.
12:30	El CC-EGN informó que el interruptor de la línea L-1103 (Huallanca - Chimbote) en la S.E. Huallanca quedó cerrado y se aperturó en forma manual.
12:35	Se coordinó poner en servicio la línea L-1103 (Huallanca - Chimbote)
12:36:13	Se energizó la línea L-1103 desde la S.E. Chimbote 1.

12:37	En servicio la línea L-1103 (Huallanca - Chimbote)
12:37	Se coordinó con el CC-EGN e HID energizar la línea L-6678 (Huallanca - Caraz) de 66 kV.
12:38	Se coordinó con el CC-EGN e HID energizar la línea L-6682 (Huallanca - La Pampa) de 66 kV.
12:38	Se coordinó normalizar totalmente la carga de la Minera Barrick (S.E. Alto Chicama). Informó que se interrumpió 4 MW y se redujo 8 MW.
12:42	En servicio la línea L-6678 (Huallanca - Caraz) de 66 kV.
12:43	En servicio el grupo G-4 de la C.H. Cañón del Pato.
12:44	En servicio el grupo G-5 de la C.H. Cañón del Pato.
12:46	En servicio la línea L-6682 (Huallanca - La Pampa) de 66 kV.
12:46	Se coordinó con el CC-EGN energizar la barra en 13.8 kV de la S.E. Huallanca.
12:47	En servicio el grupo G-2 de la C.H. Cañón del Pato.
12:48	Se coordinó con el CC-EGN e HID energizar la línea L-1132 (Huallanca - Sihuas) de 138 kV.
12:50	En servicio el grupo G-6 de la C.H. Cañón del Pato.
12:51	Disponible la línea L-1104 (Huallanca - Chimbote)
12:51	En servicio la línea L-1127 (Huallanca - Pierina)
12:53	En servicio la línea L-1132 (Huallanca - Sihuas) y L-1133 (Sihuas - Tayabamba) de 138 kV.
12:54	En servicio el grupo G-3 de la C.H. Cañón del Pato.
12:54	Orden de parada a la unidad TG4 de la C.T. Trujillo. F/S a las 13:08 h.
12:54	Se coordinó bajar a carga mínima a la unidad TG1 de la C.T. Kallpa (120 MW)
12:56	En servicio la C.H. Pariac.
12:56	Se energizó la barra en 13.8 kV de la S.E. Huallanca.
12:57	Se coordinó bajar a la unidad TV21 de la C.T. Ilo 2 a 88 MW (carga mínima). A las 13:12 h se baja a 55 MW.
13:01	En servicio la línea L-1134 (Tayabamba - Llacuabamba) de 138 kV.
13:05	Orden de parada a la C.T. Chiclayo Oeste. Fuera de servicio a las 13:19 h.
13:16	En servicio la línea L-1104.
13:33	Fuera de servicio por operación la unidad TG3 de la C.T. Chimbote.
13:45:35	En servicio el grupo G-3 de la C.H. Carhuaquero.

(* Horas aproximadas

9. ACTUACIONES DE LAS PROTECCIONES

SSEE	EQUIPO	CODIGO	SEÑALIZACIONES	INT	A/C
Chimbote1	L-1105	21P SIEMENS	Arranque fase "T" Disparo general Rx 21/67N Zona 1 Distancia: 10.8 km	IN-4018 IN-4020	A A
	L-1103	DFP100	Arranque fase RST Disparo general	IN-4030 IN-4032	A A
Huallanca	L-1105	Relé Secundario	Trip PUTT SCG 78.4 km		A
	L-1103		Ninguno		C
Carhuaquero	G-3		Sobrecorriente U3T Oscilación de potencia	U3.T- A1-QS	A

10. CONTADORES DE MANIOBRAS DE INTERRUPTORES Y PARARRAYOS

SSEE	CELDA	IN	ANTES			DESPUÉS		
			R	S	T	R	S	T
Chimbote1	L-1105	IN-4018		583		583		
		IN-4020		719		721		
	L-1103	IN-4030		780		781		
		IN-4032		783		784		
Trujillo	SVC	IN-4054		769		770		
		IN-4084		381		388		

11. ANÁLISIS DEL EVENTO:

- 11.1. Se produjo falla monofásica en la fase "T" de la línea L-1105 por contacto de ave con la línea. La falla fue localizada a 10.8 km de la S.E. Chimbote1.
- 11.2. En la S.E. Huallanca, la falla fue despejada por la protección de distancia de la línea aproximadamente a los 65 ms. de iniciado el evento, abriendo las tres fases de los interruptores de la L-1105 e iniciando su secuencia de recierre.
- 11.3. En la S.E. Chimbote 1, la falla fue despejada por la protección de distancia de la línea a los 85 ms. de iniciado el evento, abriendo las tres fases de los interruptores de la L-1105. El relé inició la secuencia de recierre sin llegar a completarlo por causas no informadas, quedando los interruptores de la L-1105 abiertos.
- 11.4. En la S.E. Huallanca, la protección de distancia de la L-1105 canceló el recierre que se había iniciado debido a que los interruptores de la S.E. Chimbote 1 quedaron abiertos, por lo que la línea L-1105 quedó fuera de servicio.
- 11.5. Al quedar la línea L-1105 fuera de servicio y al estar la línea L-1104 fuera de servicio por mantenimiento, la C.H. Cañón del Pato con 215 MW quedó conectado al SEIN sólo a través de la línea L-1103 quedando esta línea sobrecargada.

- 11.6. Aproximadamente, a las 12:15:17 h. abrieron los interruptores de la L-1103 en la S.E. Chimbote 1 por actuación de su protección de sobrecorriente de fases la cual se encuentra calibrada en 720 A.
- 11.7. La desconexión de la L-1103 provocó la salida de la C.H. Cañón del Pato originando la fuerte disminución de tensión en las barras del área Norte lo que provocó que disminuciones de carga por oscilación de tensión.
- 11.8. El déficit de potencia originado por la salida de la C.H. Cañón del Pato provocó la disminución de la frecuencia del SEIN hasta 59.302 Hz originando la activación de los relés de mínima frecuencia por derivada, en los suministros de Electronoroeste (ENOSA) y Electronorte (ENSA)

12. CONSECUENCIAS:

12.1. ENERGIA NO SUMINISTRADA

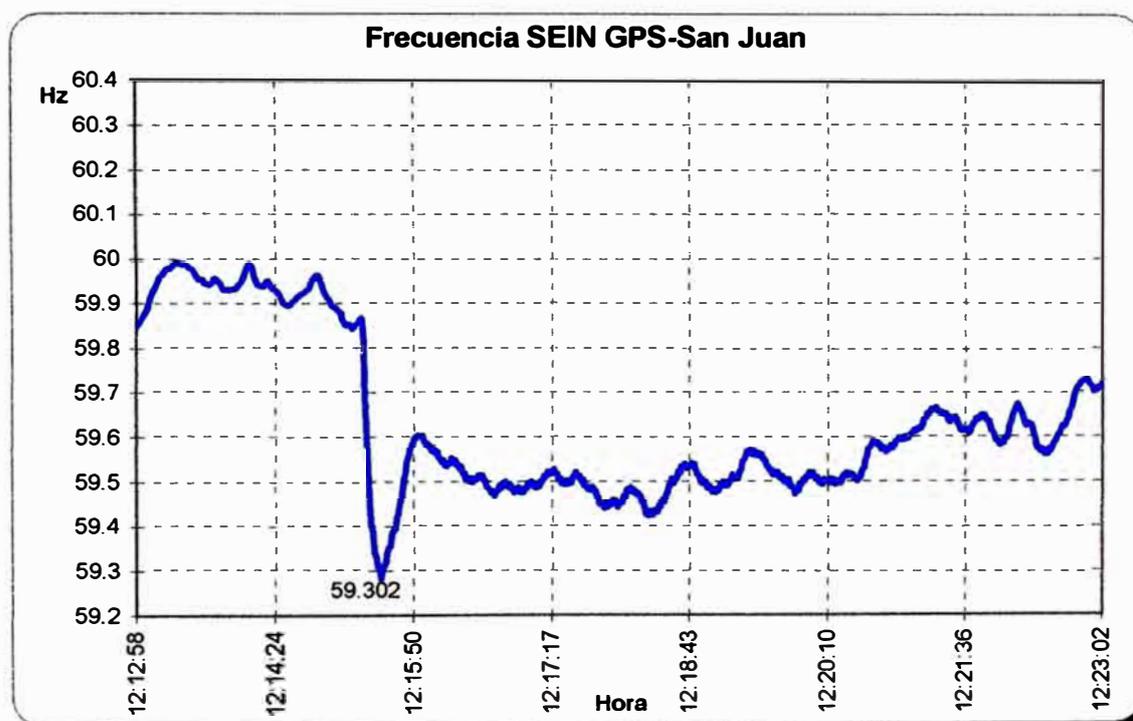
Nº	SUBESTACIÓN	CLIENTE	POTENCIA (MW)	DURACIÓN (min)
1	Huallanca	Mina Pierina	7.86	36
2	Tuman	ENSA	1.325	23
3	Cayalti		0.98	23
4	S.E. CHNOR		1.26	24
5	Lambayeque		2.715	24
6	Illimo		1.257	24
7	Castilla		ENOSA	5.37
8	Arenal			
9	Tierra colorada			
10	Tayabamba	Hidrandina	1.306	42:35
11	Huaraz		4.67	28:38
12	Ticapampa		0.83	28:38
13	Caraz		1.06	26:50
14	Carhuaz		0.95	29:02
15	La Pampa		0.10	30:35
16	Pomabamba		0.28	55:35
17	Barra 13.8 kV S.E. Huallanca		0.45	40:35
18	Pallasca		4.61	30:35
19	Llacuabamba, Mineras Marsa y Horizonte		7.5	45:25
TOTAL			42.52	

12.2. REDUCCIÓN DE SUMINISTROS.

N°	SUBESTACIÓN	CLIENTE	POTENCIA (MW)	DURACIÓN (min)
1	S.E. Trujillo	Minera Barrick	4	(*)
2	Chimbote2 138 kV	Sider Peru	39	22
3	La Pajuela	Minera Yanacocha	40.08	5
TOTAL			83.08	

(*): Sin dato

12.3. VARIACIÓN DE LA FRECUENCIA.



13. CONCLUSIONES.

- 13.1. La desconexión de la línea L-1105 fue debido a falla monofásica fase "T" por contacto de ave con la línea.
- 13.2. La desconexión de la línea L-1103 fue debido a la sobrecarga originada por la salida de la L-1105.

14. RECOMENDACIONES Y OBSERVACIONES.

- **A REP.** Revisar la protección de la línea L-1105 en la S.E. Chimbote 1 debido a que en este evento, la protección de distancia de la línea no completó su ciclo de recierre.

- **A EGENOR.** Revisar la calibración de la protección de sobrecorriente del grupo G-3 de la C.H. Carhuaquero.
- **A EGENOR.** Consolidar todos sus informes finales de falla en uno sólo ya que solamente enviaron el informe final de falla referente a la C.H. Cañón del Pato.

15. REFERENCIAS.

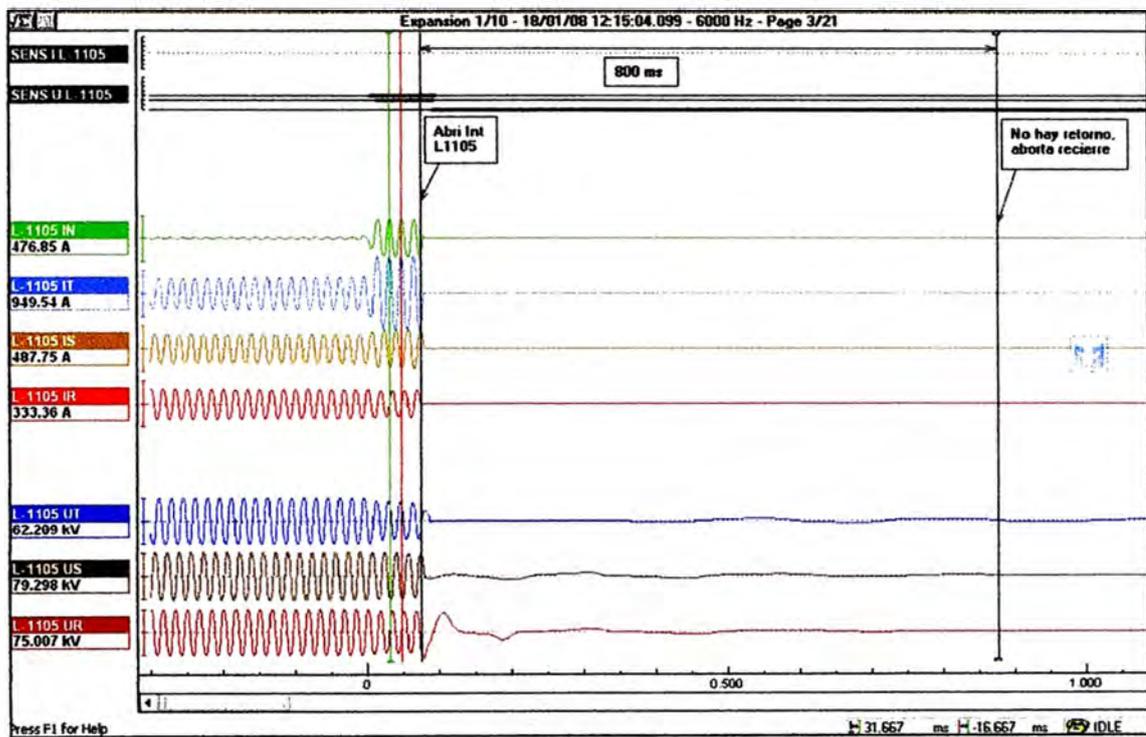
- Informe preliminar de perturbaciones del SEIN, DPC/CCO- 13 IP- 2008.
- Informe final de perturbaciones de Egenor – Cañón del Pato.
- Reporte de Interrupción de suministros de ENSA.
- Reporte de Interrupción de suministros de Minera Yanacocha.
- Reporte de Interrupción de suministros de ENOSA.
- Reporte de Interrupción de suministros de HIDRANDINA.
- Reporte de Interrupción de suministros de EDEGEL.
- Informe preliminar de perturbaciones de REP.

Elaborado por: Ing. Juan Carlos Huaman.

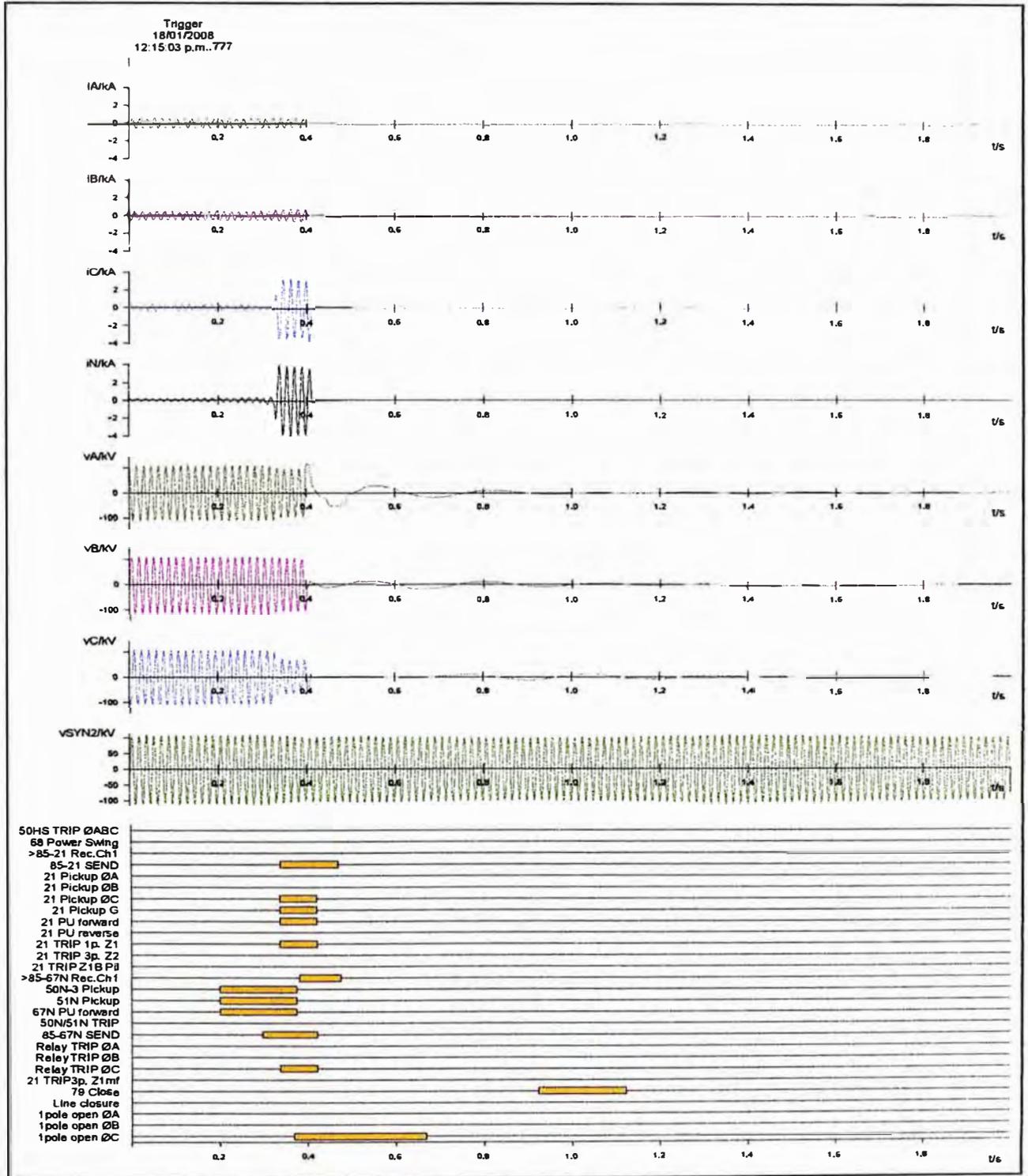
Revisado por Ing. Alex León.

V° B°. Ing. Jim Chuquisana.

Oscilografía de la L-1105 en la S.E. Huallanca



Oscilografía de la L-1105 en la S.E. Huallanca



Huallanca, 01 de Marzo del 2009

PPO-ST-06-2009

PARA : Jefatura Operaciones C.H. Cañón del Pato

ASUNTO : Informe Final Colapso de la Central

1. FECHA Y HORA: Viernes 27 de Febrero del 2009 12:16

2. DESCRIPCIÓN:

La Central Cañón del Pato se encontraba en operación normal con las Unidades 1, 2, 3, 4, 5, 6, sus líneas L-1103, L-1104 y L-1105 conectadas en la barra "B".

En el momento de la falla, la generación total en Cañón del Pato era de 237.53 MW + j 23.81 MVAR.

A las 12:16:43.884, abre automáticamente el interruptor 52-6 de la U6.

A las 12:16:43.886, abre automáticamente el interruptor 52-5 de la U5.

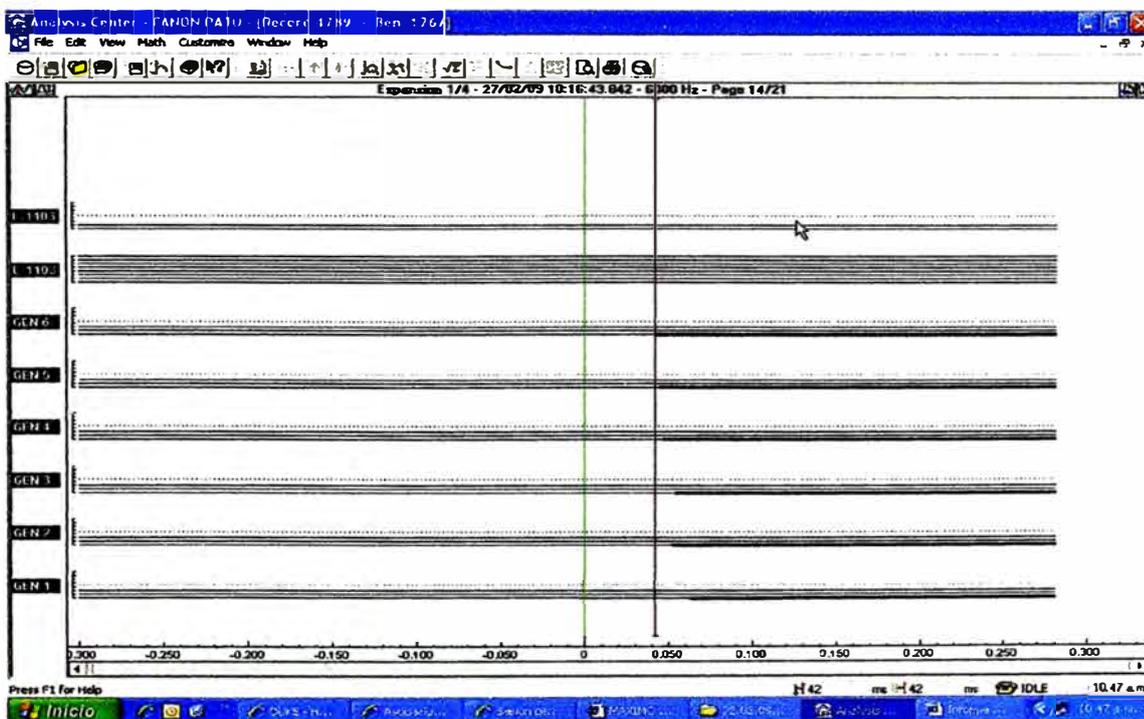
A las 12:16:43.888, abre automáticamente el interruptor 52-4 de la U4.

A las 12:16:43.894, abre automáticamente el interruptor 52-2 de la U2.

A las 12:16:43.895, abre automáticamente el interruptor 52-3 de la U3.

A las 12:16:43.905, abre automáticamente el interruptor 52-1 de la U1.

Los interruptores de las L-1103, L-1104 y L-1105 se quedan conectadas.



3.- PROTECCION Y SEÑALIZACIÓN

Unidad 6: Bloqueo Eléctrico (86E), Secuencia Negativa (46G), Diferencial Total (87T: A y B), Falla relé de disparo, Generador Excitación alta/baja y Bloqueo Eléctrico Disparo.

Unidad 5: Bloqueo Eléctrico (86E), Secuencia Negativa (46G), Diferencial Total (87T: A y B), Falla relé de disparo, Generador Excitación alta/baja y Bloqueo Eléctrico Disparo.

Unidad 4: Bloqueo Eléctrico (86E), Secuencia Negativa (46G), Diferencial Total (87T: A, B y C), Balanceo de Voltaje (60G), Falla relé de disparo, Generador Excitación alta/baja y Bloqueo Eléctrico Disparo.

Unidad 2: Bloqueo Eléctrico (86E), Secuencia Negativa (46G), Diferencial Total (87T: A, B y C), Falla relé de disparo, Generador Excitación alta/baja y Bloqueo Eléctrico Disparo.

Unidad 3: Bloqueo Eléctrico (86E), Secuencia Negativa (46G), Diferencial Total (87T: A, B y C), Balanceo de Voltaje (60G), Falla relé de disparo, Generador Excitación alta/baja, HPU Sistema Hidráulico y Bloqueo Eléctrico Disparo.

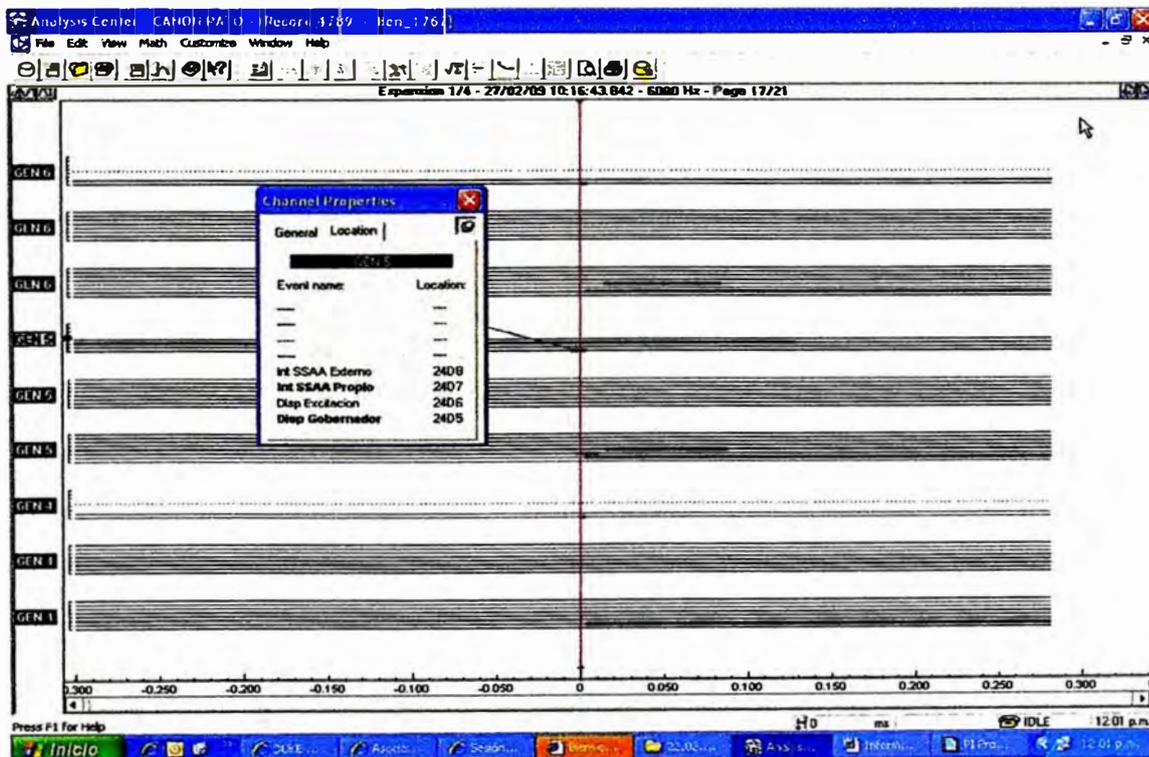
Unidad 1: Bloqueo Eléctrico (86E), Secuencia Negativa (46G), Diferencial Total (87T: A, B y C), Falla relé de disparo, Generador Excitación alta/baja y Bloqueo Eléctrico Disparo.

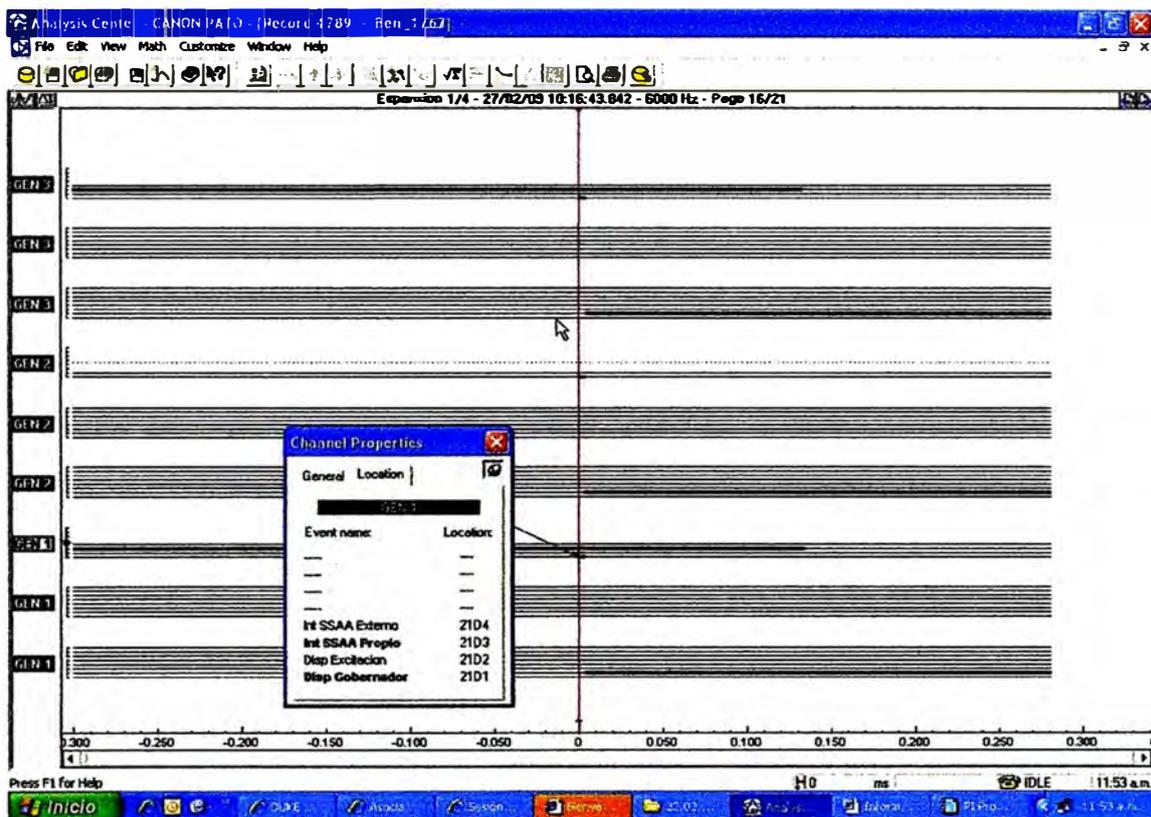
Nota: La señalización Falla relé de disparo, corresponde a la apertura del IN de Grupo en 138 kV.

4.- ANÁLISIS:

A las 12:16:43.842 se produce el disparo simultáneo de todas las unidades por acción del relé de bloqueo eléctrico 86E ordenando su detenimiento.

La actuación del relé 86E se activa por: Disparo del Gobernador, Protección Eléctrica del Generador, Parada de Emergencia, Falla del Transformador, Pérdida de energía del Sistema de Control, Disparo de Excitación o Falla en la Turbina; por tanto, al encontrarse activa los relés 87T y 46G en todas las unidades es correcto el disparo de las unidades.





Personal de OyM inician una verificación local de las condiciones operativas del equipamiento principal de generación y transformación no encontrando desperfecto alguno.

Asimismo, visto el registro de eventos del Scada de la Casa de Fuerza, que se adjunta, se observa que previo a la activación del 86E se produce un arranque de la bomba DC de circulación de aceite de cojinetes de la U3.

2009-Feb-27 10:18:50:329	G3AG2-P74-PI	Bom DC ref coj serv	Activado
2009-Feb-27 10:18:50:340	G3AG1-Q1-U-F	Int Perd 250VDC	Alarma Activado
2009-Feb-27 10:18:50:345	G5A51-QSD-PTR	86QSD Quick shutdown	Disparo Activado
2009-Feb-27 10:18:50:353	G5A51-86E-PTR	U5 Electr lockout	Disparo
2009-Feb-27 10:18:50:353	G2A51-86E-PTR	U2 Electr lockout	Disparo
2009-Feb-27 10:18:50:353	G6A51-86E-PTR	U6 Electr lockout	Disparo
2009-Feb-27 10:18:50:353	G4A51-86E-PTR	U4 Electr lockout	Disparo
2009-Feb-27 10:18:50:354	G1A51-86E-PTR	U1 Electr lockout	Disparo
2009-Feb-27 10:18:50:355	G3A51-86E-PTR	U3 Electr lockout	Disparo
2009-Feb-27 10:18:50:356	G5A51-QSD-PTR	86QSD Quick shutdown	Disparo Desactivado CLEARED
2009-Feb-27 10:18:50:360	G5AG2-P74-PI	Bom DC ref coj serv	Activado
2009-Feb-27 10:18:50:360	G1AG2-P74-PI	Bom DC ref coj serv	Activado
2009-Feb-27 10:18:50:361	G5A51-ZAG-Z	U5 Volt/Hz	Disparo
2009-Feb-27 10:18:50:361	G6A51-ZAG-Z	U6 Volt/Hz	Disparo
2009-Feb-27 10:18:50:361	G6AG2-P74-PI	Bom DC ref coj serv	Activado
2009-Feb-27 10:18:50:361	G2AG2-P74-PI	Bom DC ref coj serv	Activado
2009-Feb-27 10:18:50:362	G4AG2-P74-PI	Bom DC ref coj serv	Activado
2009-Feb-27 10:18:50:364	G5AG1-Q1-U-F	Int Perd 250VDC	Alarma Activado
2009-Feb-27 10:18:50:371	G1AG1-Q1-U-F	Int Perd 250VDC	Alarma Activado
2009-Feb-27 10:18:50:374	G6AG1-Q1-U-F	Int Perd 250VDC	Alarma Activado

2009-Feb-27 10:18:50:375	G2AG1-Q1-U-F	Int Perd 250VDC	Alarma Activado	
2009-Feb-27 10:18:50:375	G4AG1-Q1-U-F	Int Perd 250VDC	Alarma Activado	
2009-Feb-27 10:18:50:410	G2AM6-VB-PI	Shutdown solenoid B	Cerrado	
2009-Feb-27 10:18:50:418	G1AM6-VB-PI	Shutdown solenoid B	Cerrado	
2009-Feb-27 10:18:50:425	G3AM6-VA-PI	Shutdown solenoid A	Cerrado	
2009-Feb-27 10:18:50:426	G1AM6-VA-PI	Shutdown solenoid A	Cerrado	
2009-Feb-27 10:18:50:429	G3AM6-VB-PI	Shutdown solenoid B	Cerrado	
2009-Feb-27 10:18:50:430	G6A51-ZAG-Z	U6 Volt/Hz		CLEARED
2009-Feb-27 10:18:50:431	G2AM6-VA-PI	Shutdown solenoid A	Cerrado	
2009-Feb-27 10:18:50:434	G5A51-ZAG-Z	U5 Volt/Hz		CLEARED
2009-Feb-27 10:18:50:441	G3AG1-Q1-PIX	Int G3		
2009-Feb-27 10:18:50:444	G6AM6-VA-PI	Shutdown solenoid A	Cerrado	
2009-Feb-27 10:18:50:447	G5AM6-VA-PI	Shutdown solenoid A	Cerrado	
2009-Feb-27 10:18:50:447	G5AM6-VB-PI	Shutdown solenoid B	Cerrado	
2009-Feb-27 10:18:50:448	G3AG1-Q1-POX	Int G3	Abierto	
2009-Feb-27 10:18:50:450	G6AM6-VB-PI	Shutdown solenoid B	Cerrado	
2009-Feb-27 10:18:50:451	G4AM6-VA-PI	Shutdown solenoid A	Cerrado	
2009-Feb-27 10:18:50:453	G4AM6-VB-PI	Shutdown solenoid B	Cerrado	
2009-Feb-27 10:18:50:458	G2AG1-Q1-PIX	Int G2		
2009-Feb-27 10:18:50:461	G5AG1-Q1-PIX	Int G5		
2009-Feb-27 10:18:50:461	G6AG1-Q1-PIX	Int G6		
2009-Feb-27 10:18:50:465	G2AG1-Q1-POX	Int G2	Abierto	
2009-Feb-27 10:18:50:465	G2AG2-P1-PI	Bomba refrig P1	Desactivado	
2009-Feb-27 10:18:50:466	G1AG1-Q1-PIX	Int G1		
2009-Feb-27 10:18:50:467	G1AG2-P1-PI	Bomba refrig P1	Desactivado	
2009-Feb-27 10:18:50:468	G6AG1-Q1-POX	Int G6	Abierto	
2009-Feb-27 10:18:50:469	G5AG1-Q1-POX	Int G5	Abierto	
2009-Feb-27 10:18:50:471	G4AG1-Q1-PIX	Int G4		
2009-Feb-27 10:18:50:473	G1AG1-Q1-POX	Int G1	Abierto	
2009-Feb-27 10:18:50:476	G1AG2-F-PI	Vent refrig en serv	Desactivado	
2009-Feb-27 10:18:50:479	G4AG1-Q1-POX	Int G4	Abierto	

Nota: Las horas de los eventos son referenciales ya que no están sincronizados con el GPS, no así el osciloperturbógrafo.

La corriente de inserción del motor DC (3.7 kW, 250 VDC) provoca un desequilibrio transitorio en los Rectificador/Cargador de Baterías (BC's) del Sistema 250 VDC afectando la tensión de entrada a los Inversores INV's (250 VDC/120 VAC) y que se refleja en 120 VAC.

Esta última tensión alimenta las fuentes 120 VAC/48VDC de los tableros de control de cada unidad de generación (UCB's) ocasionando el funcionamiento indebido de la protección 87T y 46G; esta misma tensión, alimenta al Sistema de Control de las unidades de generación.

Por tanto, confirmada la estabilidad de las tensiones en los BC's e INV's, se rearman los circuitos bloqueados y se dispone el lanzamiento de las unidades.

5.- SECUENCIA DE RESTABLECIMIENTO

10:43 Unidad 2 en paralelo con el SEIN

10:52 Unidad 3 en paralelo con el SEIN

11:01 Unidad 4 en paralelo con el SEIN

11:07 Unidad 5 en paralelo con el SEIN

11:15 Unidad 6 en paralelo con el SEIN

11:21 Unidad 1 en paralelo con el SEIN

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. La falla en el circuito Rectificador/Cargador e Inversor, 250VDC reflejada en 120 VAC y 48 VDC ocasionó la actuación indebida simultánea de todas las protecciones 46G y 87T: A, B, C (excepto la fase C de la U5 y U6); los que a su vez activan el relé de Bloqueo Eléctrico Disparo 86E.
2. La actuación del 86E actuó correctamente mandando a parar todas las unidades.
3. Se recomienda revisar los ajustes de los rectificadores/cargadores BC's ante posibles cambios en las tensiones del Banco 250 VDC o cargas acopladas; las variaciones de tensión en los Rectificadores Cargadores BC's originan un mal funcionamiento del Inversor.
4. Debe revisarse el circuito de lubricación de cojinetes de la U3, ya que la operación de la bomba accionada por DC obedece a dos razones: Ausencia de 440 VAC en el MCC (descartado) y falta de presión o caudal de bomba similar accionada por motor AC.
5. Debe conectarse las señales de 120 VAC del inversor y 250 VDC (Casa de Fuerza) al Osciloperturbógrafo con la finalidad de monitorear sus comportamientos en caso de falla.

Atentamente,

Ing. Armando E. Solís Barrientos.
Supervisor de Turno (e).

 COORDINADOR DEL SEIN-COES	INFORME FINAL DE PERTURBACIONES DEL SEIN	FECHA : 7-Dic-2009
	SCO - 240 IF – 2009	VERSIÓN: 2.0 PAGINA : 1/10

1. **Fecha** : Domingo 22 de noviembre de 2009
2. **Hora de inicio** : 18:58 horas
3. **Equipo** : CH Cañón del Pato
4. **Propietario** : Egenor
5. **Causa de la perturbación:** En investigación
6. **Descripción**

Desconectaron las unidades G1, G3, G4, G5 y G6 de la CH Cañón del Pato y la CT Chiclayo por actuación de su protección del sistema de excitación. A las 19:06 h desconectó la unidad G2 por actuación de su protección del sistema de excitación.

Como consecuencia, la frecuencia del SEIN disminuyó hasta 59,19 Hz. Asimismo los niveles de tensión disminuyeron en las subestaciones de Trujillo Norte y Chimbote 1, lo que ocasionó una interrupción de 15,07 MW y una disminución de 119,50 MW por actuación de su protección de mínima tensión.

A las 19:20 y 19:23 h, se coordinó rechazar un total de 20 MW de carga del Oro en la SE Machala del sistema Ecuatoriano para mejorar las tensiones en el Área Norte.

A las 19:24 h en servicio la CT Trujillo Norte. A las 19:26 h se inicio la normalización de los suministros del Área Norte.

A las 19:29 h en servicio la unidad G1 de la CH Cañón del Pato, las siguientes unidades entraron en servicio en forma progresiva; la última unidad (G3) en servicio a las 20:02 h.

7. Condiciones Operativas Previas

7.1 Generación

7.2 Generación

N°	Central	Unidades	Potencia Activa (MW)	Potencia Reactiva (MVar)
1	CH Cañón del Pato	6	237,56	104,64 ⁽¹⁾
2	CT Chiclayo	Slz1 y GMT2	6,97	6,58

(1) Dato informado por Egenor después de la falla

(2) Las señales del Scada indican un valor de 41 Mvar en la CH Cañón de Pato y de 3 Mvar en la CT Chiclayo Oeste

 COORDINADOR DEL SEIN-COES	INFORME FINAL DE PERTURBACIONES DEL SEIN	FECHA : 7-Dic-2009
	SCO - 240 IF - 2009	VERSIÓN: 2.0 PAGINA : 2/10

7.3 Transmisión

N°	Línea	Desde	A	Potencia Activa (MW)	Potencia Reactiva (MVar)
1	L-1103	Huallanca	Chimbote 1	-62,10	-16,39
2	L-1104	Huallanca	Chimbote 1	-63,36	-15,88
3	L-1105	Huallanca	Chimbote 1	-62,27	-15,63
4	L-2280	Zorritos	Machala	55,02	-9,20
5	L-2215	Paramonga Nueva	Chimbote1	-115,87	5,76
6	L-2216	Paramonga Nueva	Chimbote1	-116,48	5,47
7	L-2232	Chimbote1	Trujillo Norte	-157,27	20,9
8	L-2233	Chimbote1	Trujillo Norte	-149,87	11,99

8. Secuencia de eventos para normalizar el SEIN

Hora (hh:mm)	Descripción
18:57	Se realizó la sincronización y transferencia de carga con el sistema eléctrico Ecuatoriano en la SE Machala. El SEIN asumió una carga promedio de 52 MW correspondiente a El ORO2.
18:58	Desconectaron las unidades G1, G3, G4, G5 y G6 de la CH Cañón del Pato y la CT Chiclayo Oeste por actuación de su protección de sistema de excitación. Nota: El CCO-COES no tuvo información de este evento y el Sistema Scada indicaba en la CH Cañón del Pato una potencia de 236 MW y 41 MVar; y en la CT Chiclayo Oeste 7 MW y 3 MVar.
18:58	Se presentó en el SEIN una disminución de frecuencia hasta 59.2 Hz y una disminución de los niveles de tensión en las SSEE Trujillo Norte y Chimbote 1.
18:58	Se subió la TG3 de la CT Chilca de 144 MW a plena carga por regulación de frecuencia.
18:58	Se subió la TG2 de la CT Chilca de 144 MW a plena carga por regulación de frecuencia.
18:58	Desconectaron la CCHH Santa Cruz con 4 MW y la CH Pariac con 2,8 MW.
18:58	Fuera de servicio el reactor R-10 de la SE Talara por regulación de tensión en la SE Talara.

	INFORME FINAL DE PERTURBACIONES DEL SEIN	FECHA : 7-Dic-2009
	SCO - 240 IF – 2009	VERSIÓN: 2.0 PAGINA : 3/10

Hora (hh:mm)	Descripción
18:59	Se coordinó poner en servicio el BC-1 de la SE Chimbote 1. En servicio a las 19:00 h.
19:00	Se subió la TV21 de la CT Ilo 2 de 105 MW a 135 MW por regulación de frecuencia.
19:00	Se coordinó poner en servicio el BC-2 de la SE Chimbote 1. En servicio a las 19:01 h
19:01	Se desconectó el reactor R-7 de la SE Piura Oeste por regulación de tensión.
19:03	Orden de arranque a la CT Trujillo Norte por regulación de tensión. A las 19:15 h no pudo sincronizar al presentarse bajo nivel de tensión en el SEIN (180 kV en la SE Trujillo Norte). A las 19:24 h, luego de mejorar los niveles de tensión (210 kV en la SE Trujillo Norte), en servicio la CT Trujillo Norte.
19:05	Se subió la TG1 de la CT Kallpa de 135 MW a 170 MW por regulación de frecuencia.
19:06	Salió de servicio el BC-15 de la SE Trujillo Norte. A las 19:21 h en servicio.
19:06	Desconectó la unidad G2 de la CH Cañón del Pato por actuación de su protección de sistema de excitación.
19:06	CC-EGN informó la salida de servicio de la CH Cañón del Pato y de la CT Chiclayo Oeste.
19:07	Orden de arranque de la TG1 de la CT Chimbote. A las 19:27 h en servicio. A las 19:44 h se le indica operar como compensador síncrono.
19:07	Orden de arranque de la TG3 de la CT Chimbote. A las 19:17 h en servicio. A las 19:44 h se le indica operar como compensador síncrono.
19:10	Desconectó la línea L-2261 (Cajamarca Norte – Gold Mill) de 220 kV, por mínima tensión.
19:11	Orden de arranque de la CT Paita 2. En servicio a las 19:26 h.
19:16	Orden de arranque de la TG4 de la CT Trujillo como compensador síncrono por regulación de tensión. A las 19:48 h se canceló el arranque.
19:20	Se coordinó con CENACE rechazar 10 MW a la carga en la SE Machala por bajo perfiles de tensión en el área norte.
19:23	Se coordinó con CENACE rechazar 10 MW adicionales en la SE Machala por bajo perfiles de tensión en el área norte.

Hora (hh:mm)	Descripción
19:25	Se coordinó con CENACE recuperar 5 MW.
19:26	Se normalizó la carga restringida en la minera Yanacocha.
19:27	Se normalizó la carga restringida del usuario Sider Peru.
19:27	En servicio la línea L-2261
19:28	Se normalizó la carga restringida de la Minera Gold Field.
19:29	Se normalizó la carga restringida en la minera Barrick.
19:29	En servicio la unidad G1 de la CH Cañón del Pato.
19:34	Se coordinó con CENACE recuperar 7 MW adicionales.
19:36	Se coordinó con CENACE recuperar 8 MW adicionales.
19:37	Se inició la normalización de la carga de la SE Cerro Corona (Gold Fields La Cima)
19:41	En servicio la unidad G5 de la CH Cañón del Pato.
19:41	En servicio el GMT2 de la CT Chiclayo Oeste.
19:43	En servicio el SLZ1 de la CT Chiclayo Oeste.
19:43	En servicio la unidad G6 de la CH Cañón del Pato.
19:44	En servicio la unidad G2 de la CH Cañón del Pato.
19:53	En servicio la unidad G4 de la CH Cañón del Pato.
20:02	En servicio la unidad G3 de la CH Cañón del Pato.

 COORDINADOR DEL SEIN-COES	INFORME FINAL DE PERTURBACIONES DEL SEIN	FECHA : 7-Dic-2009
	SCO - 240 IF - 2009	VERSIÓN: 2.0 PAGINA : 5/10

9. Actuación de las protecciones

Subestación	Equipo	Código	Señalizaciones	Interruptor	A/C
CH Cañón del Pato	G1 y G2	-	Generador Falla Excitación Bloqueo eléctrico disparo	52-1 52-2	A A
	G3 y G4	-	Generador Falla Excitación Bloqueo eléctrico disparo	52-3 52-4	A A
	G5	Relé 27/59	Generador Falla Excitación, bajo voltaje Disparo 86QSD	52-5	A
	G6	-	Generador Falla Excitación Bloqueo eléctrico disparo	52-6	A

10. Análisis del evento

- 10.1. A las 18:58 h, desconectaron las unidades G1, G3, G4, G5 y G6 de la CH Cañón del Pato por actuación de su protección del sistema de excitación, la central se encontraba con una potencia reactiva de 104,64 MVAR. Asimismo desconectó la CT Chiclayo Oeste por actuación de su protección del sistema de excitación, la central se encontraba con una potencia reactiva de 6,58 MVAR; las centrales hidráulicas de Santa Cruz y Pariac desconectaron por causa no informada.
- 10.2. A las 19:06 h, desconectó el G2 de la CH Cañón del Pato por actuación su protección del sistema de excitación, la unidad se encontraba con una potencia de 15,99 MVAR.
- 10.3. En todo momento antes y luego del evento, en el aplicativo TR-COES que cuenta el CCO-COES, se observó que la generación de la CH Cañón del Pato era de 236 MW y 41 MVAR. Sin embargo, la generación real antes del evento de la CH Cañón del Pato era de 237,56 MW y 104,64 MVAR; la central se encontraba sobre-excitada, operando cerca al límite de su curva de capacidad, lo cual no fue informado oportunamente por el CC-EGENOR al Coordinador del SEIN.
- 10.4. Como consecuencia, la frecuencia del SEIN disminuyó hasta 59,19 Hz y disminuyeron las tensiones en la SE Guadalupe hasta 178 kV, SE Trujillo Norte hasta 185 kV, en la SE Chimbote 1 hasta 192 kV, lo que ocasionó la interrupción de suministros de 13,67 MW y una disminución carga de 101,9 MW por actuación de su protección de mínima tensión en las subestaciones de Guadalupe, Trujillo Norte y Chimbote 1.

 COORDINADOR DEL SEIN-COES	INFORME FINAL DE PERTURBACIONES DEL SEIN	FECHA : 7-Dic-2009
	SCO - 240 IF - 2009	VERSIÓN: 2.0 PAGINA : 6/10

- 10.5.** Con el fin de mejorar los niveles de tensión en el área norte, se coordinó la desconexión de los reactores y conexión de los bancos capacitores de la SE Chimbote y el arranque de las centrales térmicas de Trujillo Norte y Chimbote por regulación de tensión. Asimismo se coordinó subir la generación de la CT Ilo2 y TG1 de CT Kallpa para normalizar la frecuencia en el SEIN.
- 10.6.** A las 19:10 desconectó la línea L-2261 (Cajamarca Norte – Gold Mill) de 220 kV por actuación de su protección de mínima tensión. A las 19:27 h se conectó la línea normalizando el suministro.
- 10.7.** Se coordinó con CENACE desconectar 20 MW de carga de la SE Machala para mejorar los niveles de tensión del área norte.
- 10.8.** Con el ingreso de la CT Trujillo Norte se mejoró los niveles de tensión, con lo cual se inició la normalización de los suministros del área norte.

11. Consecuencias

11.1. Interrupción de Suministros

A las 18:58 h

Empresa	Subestación	Suministro	MW	Tiempo (hh:mm)
Mina Poderosa	La Morena	Mina Poderosa	1,00	00:30
Hidrandina	09 de Octubre	Minera Antamina	1,20	00:36
Hidrandina	Pallasca	AMT PAL002 - Minera San Simon	1,30	01:30
Hidrandina	Nepeña	Transformador	0,83	02:29
Hidrandina	Trapezio	AMT TRA001 (Pescadores)	1,54	00:19
Hidrandina	Trapezio	AMT TRA002 (Lacramarca)	0,29	00:19
Hidrandina	Trapezio	AMT TRA003 (La Libertad)	2,25	00:19
Hidrandina	Trapezio	AMT TRA004 (Huascarán)	1,30	00:19
Hidrandina	Trapezio	AMT TRA005 (San Juan)	2,30	00:19
Hidrandina	Trapezio	AMT TRA006 (Meigss)	0,66	00:19

 COES SINAC COORDINADOR DEL SEIN-COES	INFORME FINAL DE PERTURBACIONES DEL SEIN	FECHA : 7-Dic-2009
	SCO - 240 IF - 2009	VERSIÓN: 2.0 PAGINA : 7/10

Empresa	Subestación	Suministro	MW	Tiempo (hh:mm)
Total Interrumpido			12,67	

A las 19:10 h

Empresa	Subestación	Suministro	MW	Tiempo (hh:mm)
Gold Mill	Gold Mill	Minera Gold Mill	2,4	00:17
Total Interrumpido			2,4	

11.2. Reducción de Carga

A las 18:58 horas

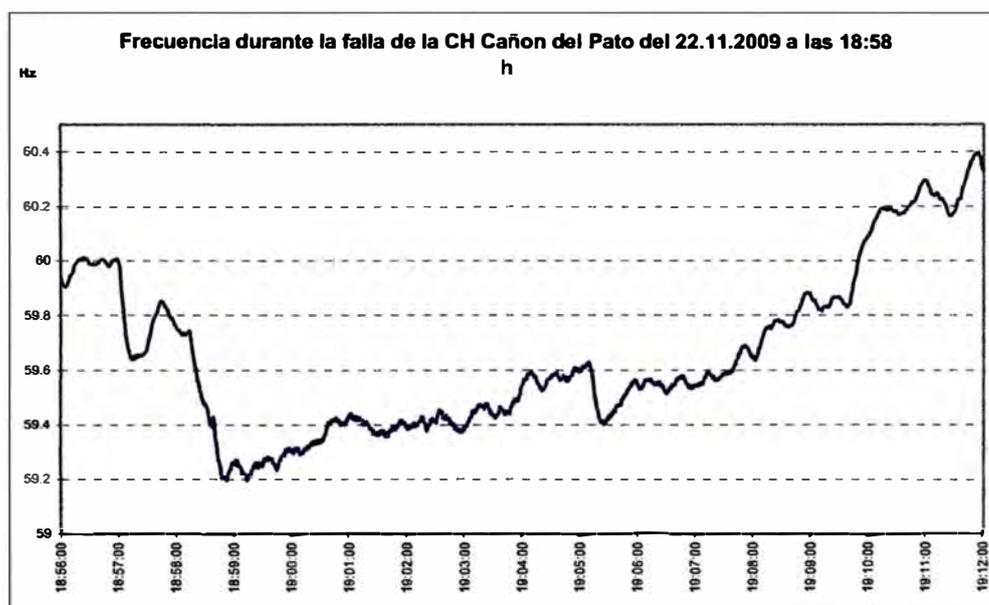
Empresa	Subestación	Suministro	De (MW)	A (MW)	Reducción (MW)	Tiempo (hh:mm)
Minera Yanacocha SRL	La Quinua (YGM)	La Quinua	S/D	S/D	16,44	02:18
Minera Yanacocha SRL	La Pajuela	La Pajuela	44,3	17,9	26,40	00:18
Mina Cerro Corona	Cerro Corona	Cerro Corona	17,36	5,5	11,86	00:39
Minera Gold Mill	Gold Mill	Gold Mill	18,00	2,4	15,60	00:29
SiderPeru	Chimbote2	SiderPeru	31,1	4,02	27,08	00:42
Cementos Pacasmayo	Cementos Pacasmayo	Cementos Pacasmayo	13,2	2,68	10,52	00:01
Mina Barrick	Pierina	Pierina	4,2	1,1	3,10	S/D
Mina Alto Chicama	Mina Alto Chicama	Mina Alto Chicama	7,5	1,0	6,50	S/D
Total interrumpido					117,50	

A las 19:10 horas

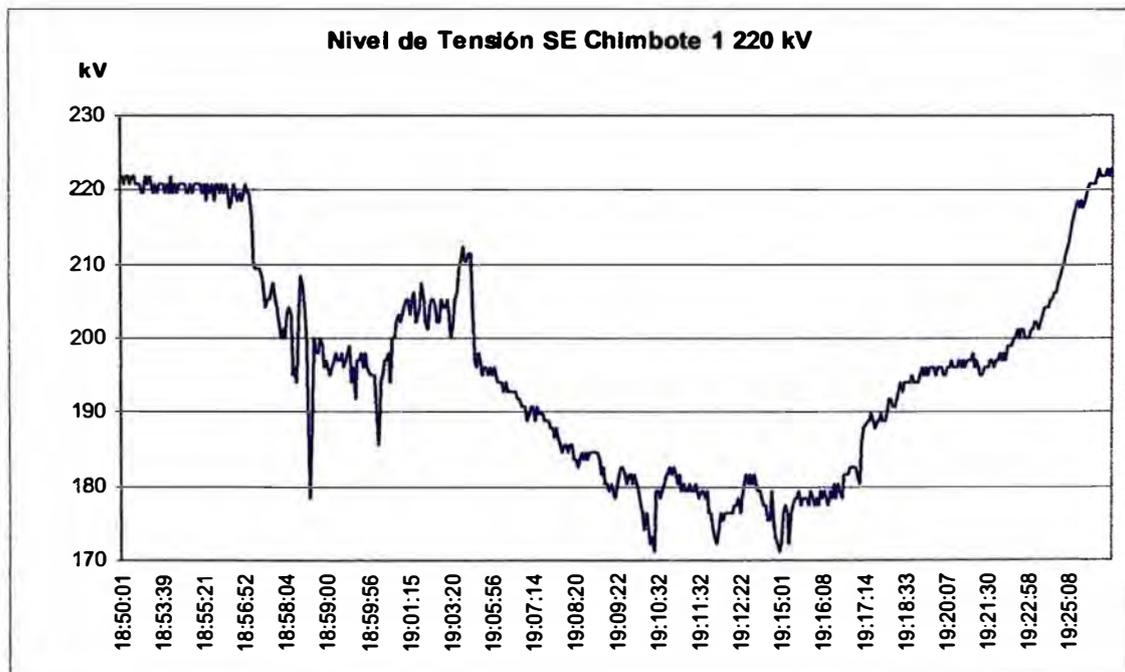
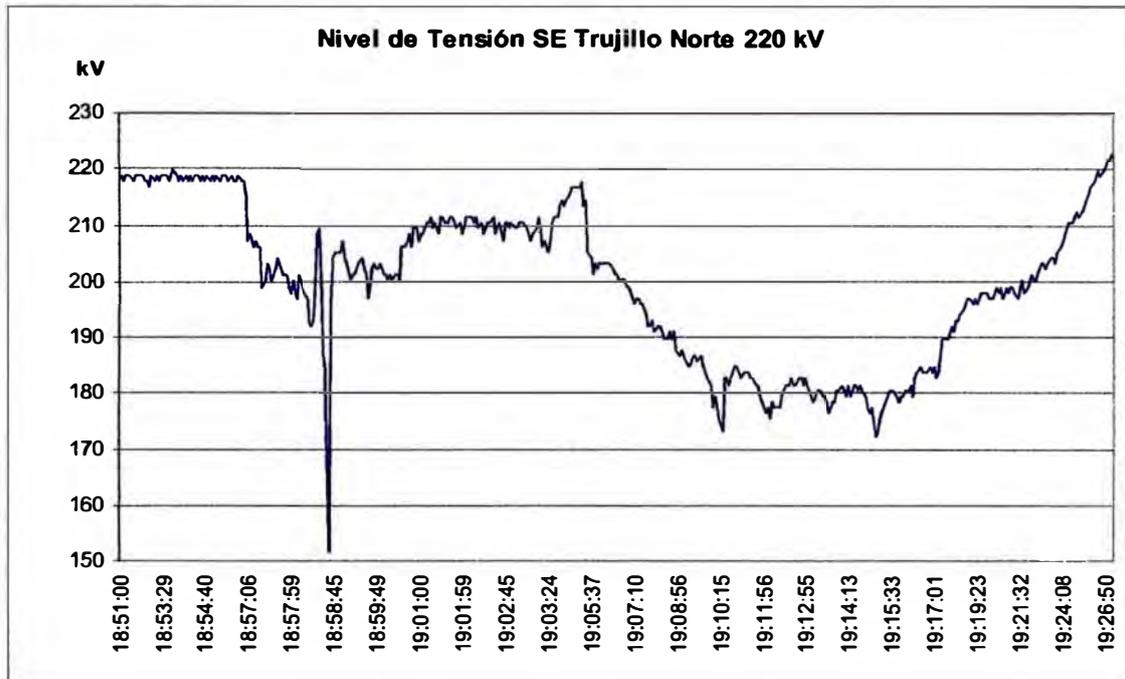
 COORDINADOR DEL SEIN-COES	INFORME FINAL DE PERTURBACIONES DEL SEIN	FECHA : 7-Dic-2009
	SCO - 240 IF - 2009	VERSIÓN: 2.0 PAGINA : 8/10

Empresa	Subestación	Suministro	De (MW)	A (MW)	Reducción (MW)	Tiempo (hh:mm)
Minera Yanacocha SRL	La Quinua (YGM)	SE La Quinua	S/D	S/D	2,0	0:34
Total interrumpido					2,0	

11.3. Variación de la frecuencia



11.4 Variación de la Tensión



 COORDINADOR DEL SEIN-COES	INFORME FINAL DE PERTURBACIONES DEL SEIN	FECHA : 7-Dic-2009
	SCO - 240 IF - 2009	VERSIÓN: 2.0 PAGINA : 10/10

12. Conclusiones

- 12.1 La desconexión de la CH Cañón del Pato fue por actuación de su protección del sistema de excitación.

13. Observaciones

- 13.1 El CC-EGN no informó que los reactivos de la CH Cañón del Pato eran 104,64 Mvar antes de su desconexión.
- 13.2 Las señales en tiempo real (SCADA) que envió EGENOR, de la CH Cañón del Pato y CT Chiclayo Oeste, no se actualizaron de acuerdo al evento ocurrido.
- 13.3 El CC-EGN informó de la salida de servicio de la CH Cañón del Pato recién a las 19:06 horas.

14. Referencias

- 14.1 Informe Preliminar de Perturbaciones del Coordinador SCO-240-IP-2009.
- 14.2 Informe Ampliatorio de Perturbaciones de Egenor: CCI-146-2009

Elaborado por Ing. Ángel Ticona/ Juan Flores
Revisado por Ing. Juan Natividad

FECHA : Sábado 08 de Mayo de 2010.
HORA : 07:38 horas.
PERTURBACIÓN : Colapso Central Cañon del Pato.

1. DESCRIPCIÓN:

La Central Cañon del Pato se encontraba en operación normal con las Unidades 1, 2, 3, 4, 5 y 6 y las líneas L-1103, L-1104, L-1127 y L-1132, conectadas en la barra "B". La L-1105 se encontraba en mantenimiento.

En el momento de la falla, la generación total en Cañon del Pato era de 221.46 MW + j 33.09 MVAR.

A las 07:38:30.1771 hrs se abre el interruptor de la línea L-1104 por actuación de su protección de distancia.

A las 07:38:43.4917 hrs. se abre el interruptor de la Unidad 2, por actuación de su protección de sobrefrecuencia y sobrevelocidad, con señal de parada total, rechazando 37.97 MW.

A las 07:38:43.5234 hrs. se abre el interruptor de la Unidad 4, por actuación de su protección de sobrefrecuencia y sobrevelocidad, con señal de parada total, rechazando 38.40 MW.

A las 07:38:44.9259 hrs. se abre el interruptor de la Unidad 6, por actuación de su protección de sobrefrecuencia, quedando a tensión y velocidad nominal, rechazando 37.20 MW.

A las 07:38:44.9323 hrs. se abre el interruptor de la Unidad 1, por actuación de su protección de sobrefrecuencia, quedando a tensión y velocidad nominal, rechazando 35.01 MW.

A las 07:38:44.9336 hrs. se abre el interruptor de la Unidad 5, por actuación de su protección de sobrefrecuencia y sobrevelocidad, con señal de parada total, rechazando 36.26 MW.

A las 07:38:44.9411 hrs. se abre el interruptor de la Unidad 3, por actuación de su protección de sobrefrecuencia, quedando a tensión y velocidad nominal, rechazando 37.16 MW.

2.- PROTECCION Y SEÑALIZACIÓN

Grupo 1

Disparo 86QSD
Disparo Rele 81 O

Grupo 2

Generador Excitación Alta/Baja (Alarma)
Bloqueo Electrico Disparo
Generador Sobrevelocidad
Disparo Rele de Sobre frecuencia

Grupo 3

Disparo 86QSD
Disparo Rele 81 O

Grupo 4

Bloqueo Electrico Disparo
Generador Sobrevelocidad
Disparo Rele de Sobre frecuencia

Grupo 5

HPU Sistema Hidraulico Alarma
Bloqueo Electrico Disparo
Generador Sobrevelocidad
Disparo 86QSD
Disparo Rele 81 O

Grupo 6

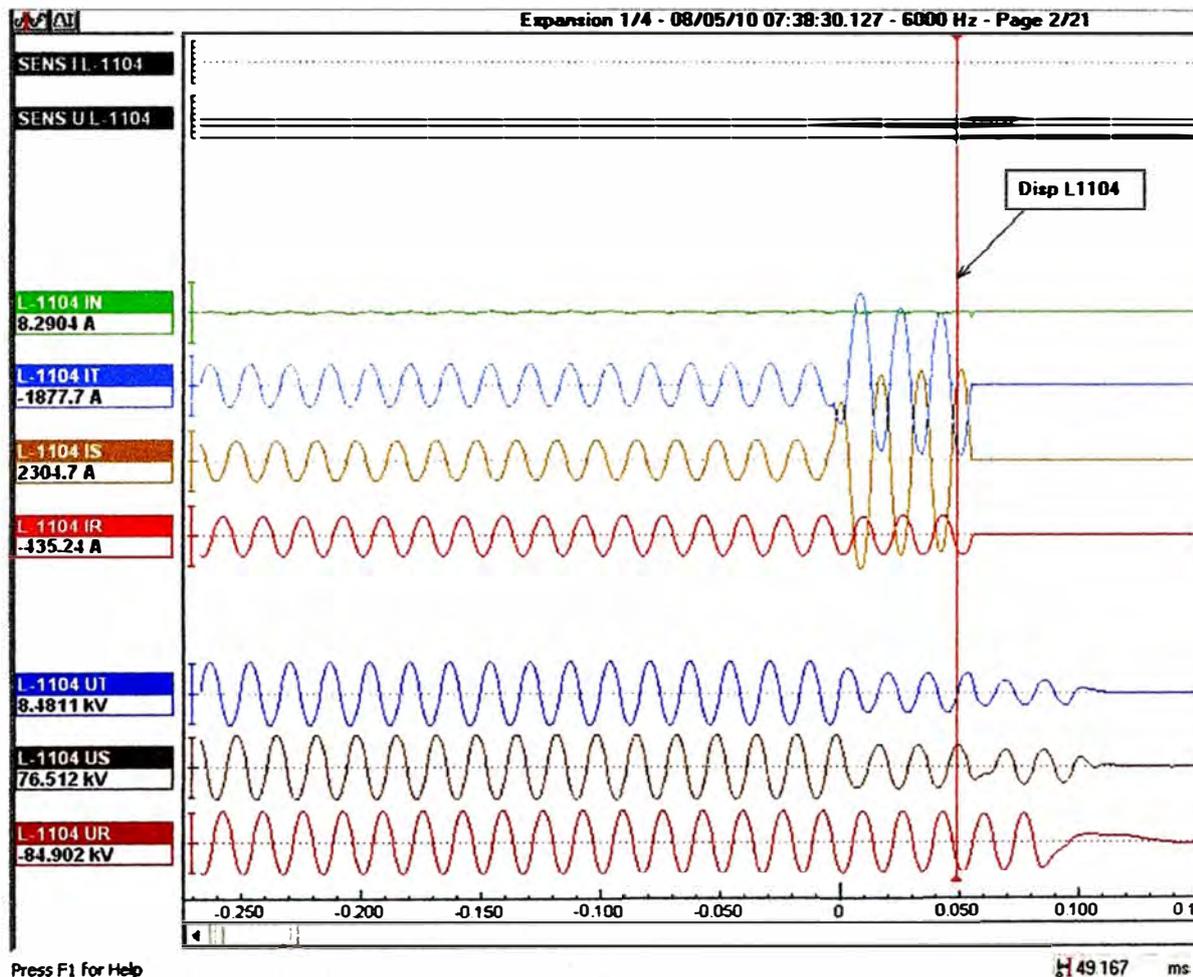
Disparo 86QSD
Disparo Rele 81 O

L-1104

Rele Principal: Zona 1, Fase BC, 42.2km
Rele Secundario: Zona 1, Fase BC, 42.5 km

3.- ANÁLISIS:

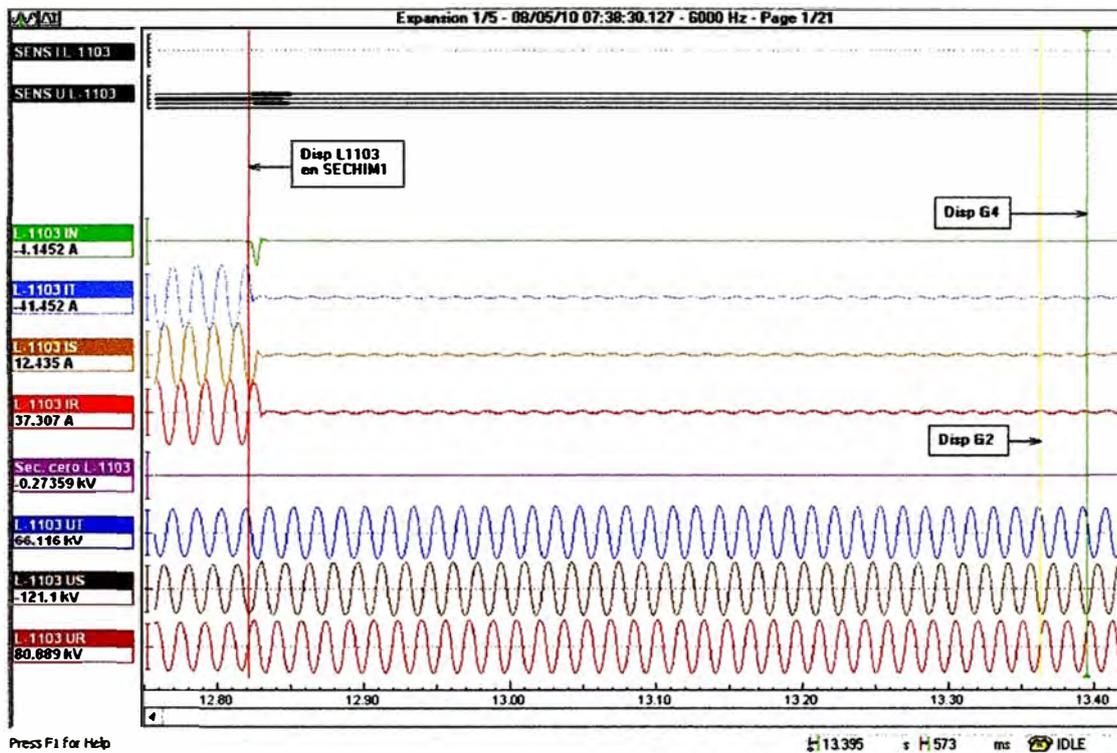
A las 07:38 dispara la línea L-1104 por actuación de su protección de distancia, debido a las condiciones atmosféricas de la zona.



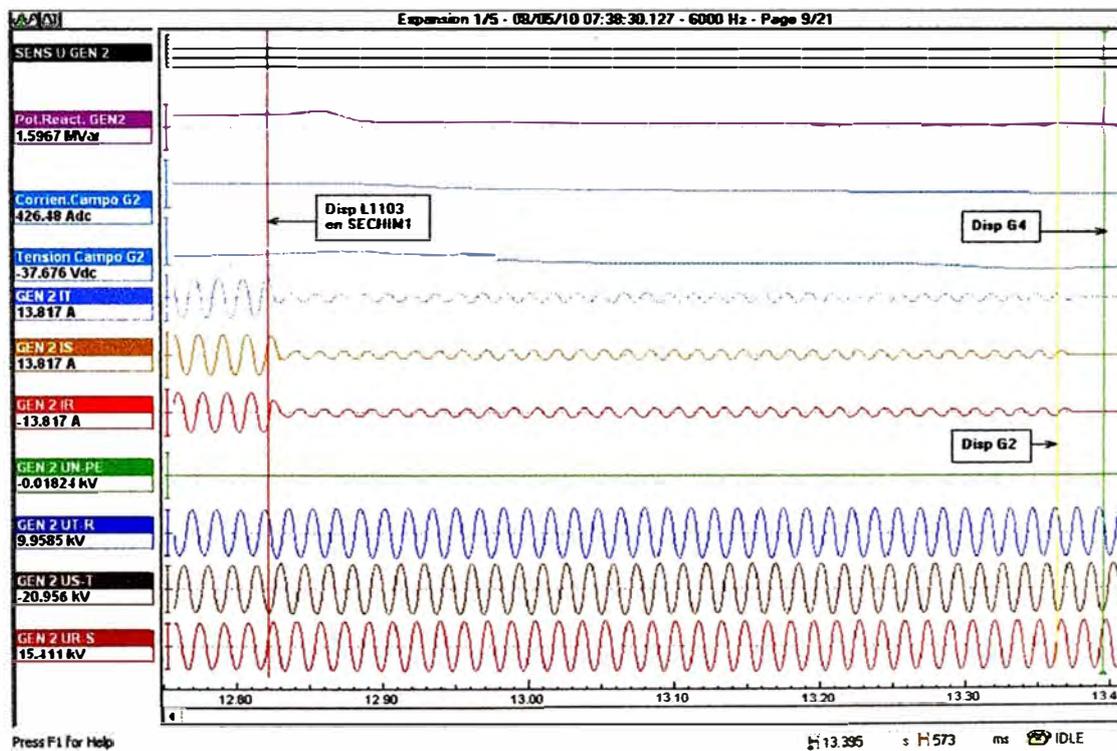
Press F1 for Help

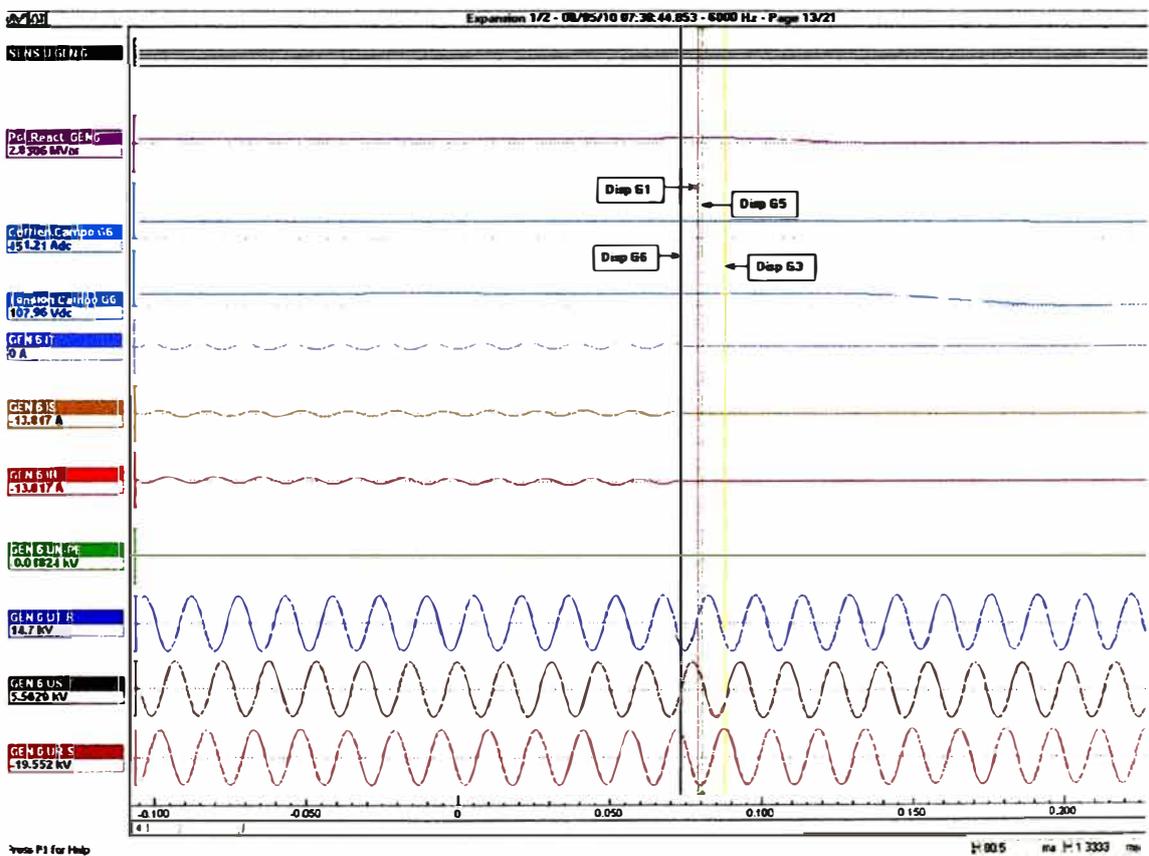
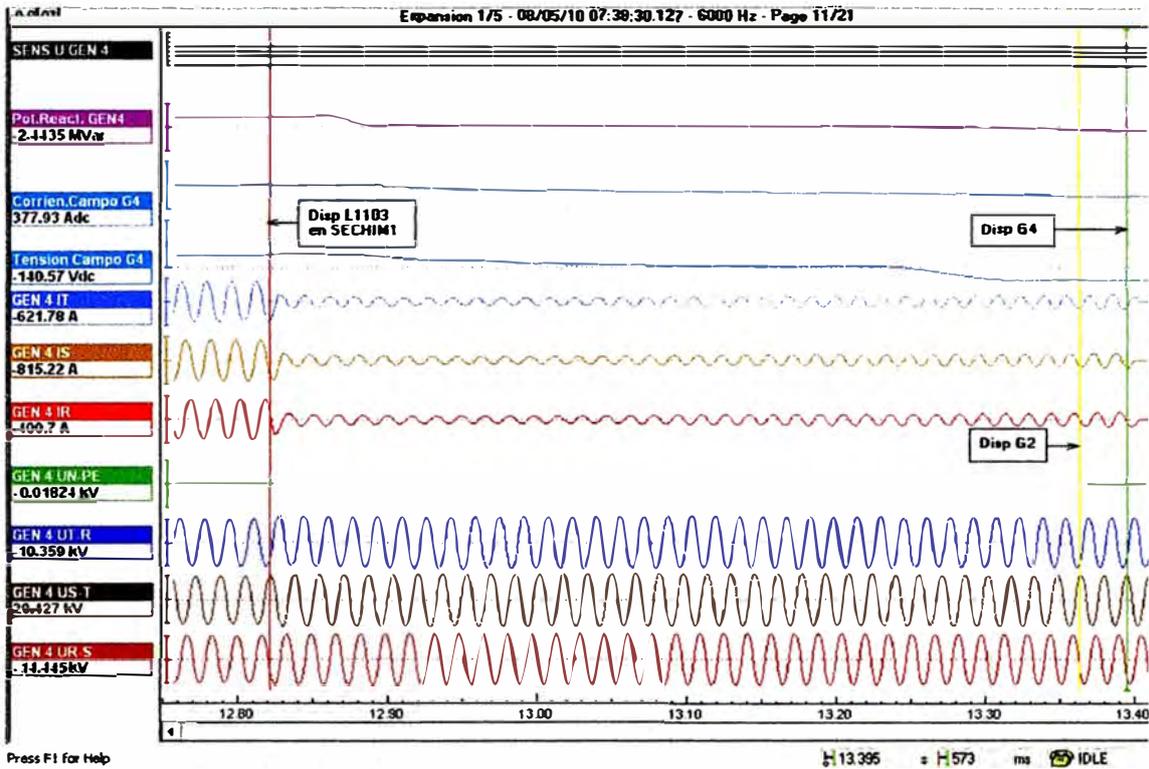
49.167 ms

Después de 13 seg aproximadamente se abre el interruptor de la línea L1103 por motivos no informados en el extremo Chimbote, quedando cerrado en el extremo Huallanca.



Al no tener ninguna de las líneas hacia chimbote conectadas, los grupos comienzan a embalsarse y empiezan a disparar por sus protecciones de sobrefrecuencia y sobrevelocidad.





Inmediatamente en coordinación con el centro de control se empieza el restablecimiento de la Central. Primero se pone en servicio la línea L.-1103, que permaneció cerrada en el extremo Huallanca, luego se sincronizó el Grupo 6 y luego se dio orden de cierre a la L-1104, entrando en servicio normalmente debido a que la falla fue transitoria.

4.- SECUENCIA DE RESTABLECIMIENTO:

07:59 SECHIM1 Tensiona la L-1103
08:11 Unidad 6 en paralelo con el SINAC
08:14 Se energiza la línea L-1104
08:16 Línea L-1132 en servicio
08:17 Línea L-1127 en servicio
08:24 Unidad 5 en paralelo con el SINAC
08:27 Transformador T11 y Línea L-6678 en servicio
08:28 Línea L-6682 en servicio
08:29 Unidad 4 en paralelo con el SINAC
08:32 Unidad 2 en paralelo con el SINAC
08:52 Unidad 1 en paralelo con el SINAC
09:08 Unidad 3 en paralelo con el SINAC

5.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIÓN:

1. El disparo de la línea L-1104 fue debido a una falla transitoria.
2. Cuando se abre la línea L-1103 en el extremo Chimbote, la central se queda sin ninguna línea conectada al SINAC, esto ocasiona que exista un a sobregeneración y los grupos empiezan a embalsarse.
3. Todos los grupos disparan por su protección de sobrefrecuencia.
4. Las unidades 2, 4 y 5 también disparan por sobrevelocidad, ocasionando que paren totalmente. Debe revisarse la calibración de los deflectores para evitar que esto suceda.

ELABORADO POR Eduardo Inca Arévalo.	REVISADO POR Ing. Fernando Oyanguren
--	---

BIBLIOGRAFIA

1. Riaz, M., "Hybrid-Parameter Models of Synchronous Machines", IEEE Trans. Vol. PAS-93, May 1974 pp. 849 – 858
2. M. Pavella and P.G. Murthy, "Transient Stability of Power Systems", John Wiley & Sons Ltd., 1994.
3. IEEE Std 1110™-2002 "IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Applications in Power System Stability Analyses", (Revision of IEEE Std 1110-1991).
4. Prabha Kundur, "Power System Stability and Control ",EPRI, 1998.
5. Central Hidroeléctrica Cañón del Pato, "Pruebas de Estabilidad Permanente", Informes CESI N° A2/040660, Diciembre 2002.
6. Ramírez Carbonell Manuel Rubén, "Metodología de Análisis Simplificado de la Estabilidad Permanente en Centrales de Generación – Aplicación a la C.H. Cañón del Pato", Tesis para optar por el título profesional de ingeniero electricista, Universidad Nacional del Callao, 2007.
7. Prabha Kundur and others, "Power System Stability and Control" Leonard L. Grigsby, 2006.
8. F.P. Demello and Ch. Concordia, "Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control ", IEEE Trans. pas., vol. 88, no. 4. pp 316-327, april 1969.
9. P.M. Anderson and A.A. Fouad "Power System Control and Stability", IEEE Press 445 Hoes Lane Piscataway.
10. Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional (COES-SINAC), Informes de Perturbaciones de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato.