

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

FACULTAD DE INGENIERIA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA ELÉCTRICA



**“METODOLOGÍA DE ANALISIS SIMPLIFICADO DE LA ESTABILIDAD
PERMANENTE EN CENTRALES DE GENERACIÓN - APLICACIÓN A LA C.H.
CAÑON DEL PATO”**

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL:

INGENIERO ELECTRICISTA

PRESENTADO POR:

MANUEL RUBÉN RAMÍREZ CARBONELL

ASESOR:

ING. MANUEL CASAS SALAZAR

CALLAO – PERU

2007

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**METODOLOGÍA DE ANÁLISIS SIMPLIFICADO DE LA
ESTABILIDAD PERMANENTE EN CENTRALES DE
GENERACIÓN - APLICACIÓN A LA C.H. CAÑÓN DEL PATO**

TESIS DE GRADO PRESENTADO A LA COMISION INTEGRADOS

POR LOS DOCENTES DE LA FACULTAD DE INGENIERIA

ELÉCTRICA Y ELECTRONICA:

ING. HUBER MURILLO MANRIQUE

ING. FERNANDO OYANGUREN RAMÍREZ

ING. ERNESTO RAMOS TORRES

ASESOR DE TESIS:

ING. MANUEL CASAS SALAZAR

**METODOLOGÍA DE ANÁLISIS SIMPLIFICADO DE
LA ESTABILIDAD PERMANENTE EN
CENTRALES DE GENERACIÓN - APLICACIÓN A
LA C.H. CAÑON DEL PATO**

DEDICATORIA

A mis padres, a mi esposa e hijas
Rhaysa y Rachel que son motivos
de mi esfuerzo y a mi abuela
Lucila que en paz descansa.

AGRADECIMIENTOS

A mi padre Roberto Ramírez Arcelles por brindarme el apoyo necesario en mi formación profesional y realización de la tesis.

Un especial agradecimiento a los Ingenieros de la Universidad Nacional del Callao, de la escuela profesional de Ingeniería Eléctrica: Marcelo Damas, Huber Murillo y Fernando Oyanguren por sus enseñanzas y consejos.

Asimismo agradezco a mis amigos: Fredy Barzola, José Caja, José Valle y Nilton Lobo, por sus comentarios sobre el tema.

También a los Ingenieros del Centro de Control de Electroperu: Walter Velásquez, Freddy Sayan, Edy Román, Oscar Miranda, Francisco Aguirre y Roberto Urquieta, por sus enseñanzas en sistemas de potencia.

SUMARIO

En el presente trabajo se desarrolla una metodología para verificar la estabilidad permanente de una central, con la finalidad de identificar eventuales efectos negativos que pueda provocar sobre la dinámica del sistema. En ese sentido el trabajo denominado **“Metodología de Análisis Simplificado de la Estabilidad Permanente en Centrales de Generación - Aplicación a la C.H. Cañón del Pato”**, se distribuye en siete capítulos, seguido de anexos con el detalle de algunas deducciones de importancia requeridas en el trabajo.

En el Capítulo I se presenta una reseña histórica del problema de las oscilaciones de baja frecuencia, la formulación del problema observando la parte estructural del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) y el impacto de este fenómeno sobre el funcionamiento del SEIN.

En el Capítulo II se define los conceptos fundamentales referidos al tema de estabilidad permanente y los conceptos básicos para la representación del sistema dinámico en espacio de estado y los métodos de respuesta transitoria y calculo de eigenvalores de sistemas lineales.

En el Capítulo III, se explica la estructura del sistema simplificado utilizado como patrón y los detalles del análisis para obtener un sistema equivalente. Se elabora el modelo linealizado del generador síncrono, sistema de transmisión y del sistema equivalente para formar el diagrama de bloques linealizado que

define al sistema eléctrico de potencia, dentro de este diagrama se apreciara la incorporación de sus controladores.

En el Capitulo IV se realiza la descripción general de la central en estudio, mostrando los parámetros eléctricos del generador y el diagrama de bloques de sus controladores. Se obtendrán las relaciones para el cálculo de los coeficientes de estabilidad permanente tanto para la influencia de la condición de la central como la del SEIN.

En el Capitulo V se realiza el análisis de la estabilidad permanente de la central en estudio sin considerar el efecto del estabilizador de regulador de tensión (PSS), mostrando los valores de los eigenvalores y la respuesta en el tiempo para los casos de la influencia de las condiciones de la central y del SEIN. Asimismo se repite el análisis pero con la incorporación del PSS que utiliza la señal de Potencia Activa.

En el Capitulo VI se muestra los mismos casos analizados del capitulo anterior, pero incorporando un nuevo PSS, que utiliza la señal de integral de potencia acelerante, observando su efecto y comparándolo con el PSS anterior, asimismo se realiza algunos ajustes necesarios para su optimo desempeño.

En el Capitulo VII se realizan las conclusiones y algunas recomendaciones que se obtienen apartir del analisis del tema de estudio.

CONTENIDO

CAPITULO 1

1. INTRODUCCIÓN.....	17
1.1 Perspectivas Históricas del Problema de las Oscilaciones de Baja Frecuencia.....	17
1.2 Formulación del Problema.....	18
1.2.1 Estructura del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional.....	19
1.2.2 Características Estructurales del SEIN.....	20
1.2.3 Impacto de las oscilaciones sobre el funcionamiento del SEIN...	21
1.3 Objetivo.....	22

CAPITULO 2

2. DEFINICIONES Y CONCEPTOS FUNDAMENTALES.....	23
2.1 Definiciones.....	23
2.1.1 Sistema eléctrico de Potencia.....	23
2.1.2 Punto de operación.....	24
2.1.3 Perturbaciones.....	24
2.2 Estabilidad de Sistemas de Potencia.....	25
2.3 Tipos de estabilidad.....	27

2.3.1	Estabilidad del Ángulo del rotor.....	27
2.3.1.1	Estabilidad Permanente.....	29
2.3.1.2	Estabilidad Transitoria.....	31
2.3.2	Estabilidad de Tensión.....	33
2.3.2.1	Estabilidad de Pequeña Perturbación.....	34
2.3.2.2	Estabilidad de Severa Perturbación.....	34
2.3.3	Estabilidad de Frecuencia.....	34
2.3.3.1	Estabilidad de media y larga duración.....	35
2.4	Oscilaciones Electromecánicas.....	35
2.4.1	Tipos de Oscilaciones Electromecánicas.....	37
2.4.2	Oscilaciones Electromecánicas Locales e Interárea.....	38
2.4.2.1	Oscilaciones Locales.....	39
2.4.2.2	Oscilaciones Interárea.....	40
2.4.3	Modos de Control y Torsión.....	41
2.5	Representación del sistema dinámico en espacio de estado.....	42
2.5.1	Estado de un Sistema Dinámico.....	42
2.5.2	Variables de Estado de un Sistema Dinámico.....	42
2.5.3	Vector de Estado.....	43
2.5.4	Espacio de Estado.....	43
2.5.5	Ecuaciones del Espacio de Estado.....	43
2.6	Respuesta Transitoria de Sistemas Lineales.....	47
2.7	Estabilizador de Sistemas de Potencia.....	50

2.7.1 Estructura Básica del Estabilizador.....	51
2.7.2 Tipos de Estabilizador.....	52

CAPITULO 3

3. SISTEMA SIMPLIFICADO PARA EL ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD PERMANENTE.....	55
3.1 Estructura del Sistema Simplificado.....	55
3.1.1 Ecuaciones del Sistema Simplificado.....	58
3.1.2 Relación $X_{12} - \theta_{12}$	59
3.1.3 Sistema Serie Equivalente.....	60
3.2 Modelo linealizado del Generador Síncrono.....	62
3.2.1 Modelo del Generador Síncrono.....	62
3.2.2 Ecuaciones del Modelo Linealizado del Generador Síncrono.....	65
3.2.3 Sistemas de Coordenadas Generador – Red.....	66
3.3 Modelo linealizado del sistema de Transmisión.....	67
3.4 Modelo linealizado del Sistema Equivalente.....	69
3.4.1 Ecuación del Torque Electromecánico.....	69
3.4.2 Ecuación Diferencial del Rotor.....	69
3.4.3 Ecuación de la Tensión en bornes del Generador.....	70
3.4.4 Ecuación del Transductor de Tensión.....	71
3.4.5 Diagrama de Bloques del Modelo Linealizado.....	72
3.4.6 Incorporación del Estabilizador de Sistemas de Potencia.....	73

CAPITULO 4

4. APLICACIÓN A LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA CAÑÓN DEL PATO.....	74
4.1 Descripción General de la Central.....	74
4.1.1 Parámetros de los Equipos de la Central.....	77
4.1.2 Regulador de Tensión.....	78
4.1.3 Estabilizador de Sistemas de Potencia.....	80
4.2 Relaciones para el Cálculo de los Coeficientes de Estabilidad Permanente.....	81
4.3 Cálculo de los coeficientes de estabilidad permanente.....	83
4.3.1 Influencia de las Condiciones de Operación de la Central.....	84
4.3.2 Influencia de las Condiciones de Operación del SEIN.....	87
4.4 Resumen de Resultados.....	92

CAPITULO 5

5. ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD PERMANENTE DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA CAÑÓN DEL PATO.....	94
5.1 Método de Análisis de la Estabilidad Permanente.....	94
5.2 Análisis de Estabilidad Permanente del Sistema sin PSS.....	95
5.2.1 Calculo de Eigenvalores.....	97
5.2.1.1 Influencia de las Condiciones de Operación de la Central	

5.2.1.2	Influencia de las Condiciones de Operación del SEIN	
5.2.2	Análisis de la Respuesta en el Tiempo.....	102
5.2.2.1	Influencia de las condiciones de operación de la Central	
5.2.2.2	Influencia de las condiciones de operación del SEIN	
5.3	Ecuación de Estado del Sistema con Estabilizador.....	108
5.3.1	Calculo de Eigenvalores.....	113
5.3.1.1	Influencia de las Condiciones de Operación de la Central	
5.3.1.2	Influencia de las condiciones de operación del SEIN	
5.3.2	Análisis de la Respuesta en el Tiempo.....	120
5.3.2.1	Influencia de las Condiciones de Operación de la Central	
5.3.2.2	Influencia de las condiciones de operación del SEIN	
5.4	Resumen de Resultados.....	124

CAPITULO 6

6.	EFFECTO DEL ESTABILIZADOR INTEGRAL DE POTENCIA ACCELERANTE.....	125
6.1	Estructura del PSS Integral de Potencia Acelerante.....	125
6.2	Calculo de Eigenvalores.....	127
6.2.1	Influencia de la Condición de Operación de la Central	
6.2.2	Influencia de la Condición de Operación del SEIN	
6.3	Respuesta en el Tiempo.....	129

6.3.1	Influencia de la Condición de Operación de la Central	
6.3.2	Influencia de la Condición de Operación del SEIN	
6.4	Comparación de Efectos entre el PSS Potencia Activa e Integral de Potencia Acelerante.....	133
6.4.1	Calculo de Eigenvalores.....	133
6.4.1.1	Influencia de la Condición de Operación de la Central	
6.4.1.2	Influencia de la Condición de Operación del SEIN	
6.4.2	Respuesta en el Tiempo.....	135
6.4.2.1	Influencia de la Condición de Operación de la Central	
6.4.2.2	Influencia de la Condición de Operación del SEIN	
6.5	Ajustes Propuestos para el PSS Integral de Potencia Acelerante.....	141
6.5.1	Calculo de Eigenvalores.....	142
6.5.1.1	Influencia de la Condición de Operación de la Central	
6.5.1.2	Influencia de la Condición de Operación del SEIN	
6.5.2	Respuesta en el Tiempo.....	144
6.5.2.1	Influencia de la Condición de Operación de la Central	
6.5.2.2	Influencia de la Condición de Operación del SEIN	
6.6	Resumen de Resultados.....	150

CAPITULO 7

7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	151
-----------	--	------------

ANEXOS.....154

Anexo – A : Efecto del bloque de compensación reactiva del AVR sobre la dinámica del generador..... 155

Anexo – B : Simulaciones de la Respuesta en el Tiempo sin el efecto del Estabilizador de Sistemas de Potencia..... 162

Anexo – C : Señal de Entrada (Potencia Activa) para el Estabilizador de Sistema de Potencia.....182

Anexo – D : Simulaciones de la Respuesta en el Tiempo con el efecto del PSS con señal de Potencia Activa..... 185

Anexo – E : Calculo de la reactancia externa vista por el generador desde sus bornes.....205

Anexo – F : Simulaciones de la respuesta en el tiempo del PSS con nuevos ajustes.....209

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....224

PROLOGO

Cuando una nueva central ingresa al sistema, el propietario debe mostrar que esta central no va a provocar efectos negativos sobre la dinámica del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional. En este escenario de revisión se plantea la necesidad de evaluar la estabilidad permanente de la nueva central verificando la robustez de los reguladores de tensión y estabilizadores de sistemas de potencia, frente a diversas condiciones posibles de operación en el sistema del cual van a formar parte. Para ello, para identificar posibles problemas relacionados con los controladores de la nueva central, sería 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. Estos problemas podrían ser provocados por una inadecuada selección de la lógica y tipo de controladores durante el proyecto de la central o por inapropiados ajustes durante la puesta en servicio. Inclusive en la preparación de los archivos para las simulaciones de análisis modal de todo el sistema eléctrico podría cometerse errores y las simulaciones podrían arrojar resultados incoherentes; asimismo, podría haber otros errores atribuibles a la Base de Datos Dinámicos del sistema.

Como alternativa, 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. Los indicadores del comportamiento dinámico deben poner en evidencia la estabilidad del conjunto G-SERT-PSS

ante todas las posibles condiciones de operación del generador o los posibles cambios topológicos en el resto del sistema. Por lo tanto, la metodología permite verificar los ajustes de los controladores de la nueva central, para lo cual se utiliza un sistema simplificado, que conectado a los bornes del generador permite simular las diversas condiciones de operación requeridas para verificar los ajustes.

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Perspectiva Histórica del Problema de las Oscilaciones de Baja Frecuencia

En el año 1997 luego de ponerse en servicio la línea Tintaya - Santuario, se detectaron oscilaciones con amortiguamiento negativo en la antigua Central Hidroeléctrica Machupicchu, razón por la cual su producción fue restringida. Así quedó operando el área Sur hasta que un derrumbe sepultó a la central. En el 2001, la Central Hidroeléctrica Machupicchu fue rehabilitada y modernizada; aún cuando se había incorporado la línea Moquegua - Puno (L-2030) y ya estaba en operación la central hidroeléctrica San Gabán II, la topología (reactancia externa vista en bornes por los grupos de generación) prácticamente no había variado.

Una situación similar ocurrió con la central hidroeléctrica San Gabán II, sin embargo es importante destacar que esta central fue diseñada y construida para conectarse al sistema existente, cuyas características topológicas constituían la principal restricción en el diseño de los controladores. Por ello a partir de la configuración del Sistema Sur con estas centrales, se explica la aparición de las oscilaciones detectadas cuando se presentan eventos que provocan la pérdida súbita de las líneas de interconexión Tintaya - Callalli (L-

1008), Azángaro - Juliaca (L-1011) o Moquegua - Puno (L-2030), asimismo, cuando son sacadas de servicio por mantenimiento.

El 22/09/2000 se observó un problema de estabilidad electromecánica, que originó la salida de la Central Hidroeléctrica de San Gabán II. Dicha oscilación se presentaba cuando la potencia activa generada por la central superaba los 85 – 90 MW, con un solo circuito de la línea de 138 KV San Gabán – Azángaro, y con una potencia mayor a 100 MW con ambos circuitos. Significó que no era posible la explotación de la central en forma segura hasta su potencia nominal (110 MW).

En el Estudio de Rechazo de Carga/Generación del SEIN del año 2003 [2], la concepción del esquema de rechazo por mínima frecuencia fue condicionada a la existencia de un modo de oscilación interárea que se manifiesta cuando el flujo de potencia en la línea Chimbote - Paramonga (L-2215) supera los 160 MW. En el Estudio de Rechazo de Generación en las Centrales de San Gabán II y Machupicchu ante desconexiones de las líneas L-1008 o L-1011 [3], se puso en evidencia una vez más las inestabilidades en el Sistema Sur y su interrelación con el Centro Norte.

Por lo tanto en el SEIN, por su topología (líneas largas) y porque las centrales de generación están muy alejadas de las cargas, es un sistema de potencia con presencia de oscilaciones electromecánicas.

1.2 Formulación del Problema

El SEIN ha evidenciado problemas de oscilaciones electromecánicas (con poco amortiguamiento o no amortiguadas), particularmente luego de fallas y también en condiciones de operación normal durante la toma de carga por parte de las centrales de generación [1 y 2].

Debe notarse que estos fenómenos están relacionados con la continua evolución y crecimiento de los sistemas interconectados y a su utilización cada vez más intensa y por lo tanto cercanos a condiciones potencialmente críticas. Como consecuencia se requiere siempre la necesidad de verificar la eventual presencia de oscilaciones (electromecánicas) de potencia que pueden causar desconexiones intempestivas de líneas y por lo tanto importantes separaciones de áreas, aun en ausencia de fallas [3].

1.2.1 Estructura del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional

1.2.1.1 Sistema de Transmisión

El SEIN tiene una estructura radial, con un sistema troncal de transmisión, conformado por líneas de 220kV y 138kV que está esparcido en gran parte de la geografía del país. El SEIN esta compuesto por áreas que dividen al sistema en Área Norte, Sur y Centro.

1.2.1.2 Unidades de Generación

Las características básicas que en principio condicionan los problemas de estabilidad permanente son: La ubicación de la central (reactancia externa) y la constante de inercia (turbina – generador).

a. Ubicación de la central

Es fundamental el efecto de la reactancia externa sobre la estabilidad del sistema eléctrico de potencia, ya que con valores grandes de reactancia, la respuesta de la central se vuelve inestable ante una pequeña perturbación.

En la Tabla 1.1 se muestra algunos valores de reactancias externas de algunas centrales del SEIN [1]

Centrales de Generación	Reactancia Externa (p.u)
Malacas (TGN4)	0.40 – 0.56
Cañón del Pato	0.52 – 0.46
Aguaytía	0.79
Ilo2	0.38
San Gabán II	0.5
Machupicchu	0.45

Tabla 1.1 Reactancias externas

b. La constante de inercia

Esta constante de inercia (H), interviene en el proceso de oscilación de las máquinas síncronas, limitando las variaciones de la velocidad del rotor cuando se rompe el equilibrio entre la potencia mecánica y la potencia eléctrica.

$$P_m - P_e = 2H \frac{dw}{dt} \quad 1.1$$

El valor de la constante de inercia del grupo incide sobre la frecuencia del modo de oscilación, para el caso simplificado de una máquina frente a un sistema de gran potencia, se tiene:

$$w_n = \sqrt{\frac{K_S w_o}{2H}} \quad 1.2$$

1.2.2 Características Estructurales del SEIN

Las características estructurales del SEIN que se han convertido en mecanismos de los problemas de estabilidad son:

- Algunas unidades de generación presentan reactancias externas altas y bajas inercias.

- Además de ello, debido al exceso de potencia reactiva en el sistema de transmisión, algunas unidades de generación operan consumiendo potencia reactiva (subexcitación).
- Como consecuencia de la operación subexcitada, algunas presentan elevados ángulos rotóricos de operación, lo que provoca deficientes torques sincronizantes.
- Inadecuada selección de las señales de entrada de los estabilizadores de sistemas de potencia (PSS) de los reguladores de tensión de algunas centrales. Por las características anteriores los PSS deben tener una efectividad en todo el rango de bajas frecuencias.

1.2.3 Impacto de las Oscilaciones sobre el Funcionamiento del SEIN

Debido a las características estructurales del SEIN las oscilaciones de baja frecuencia (OBF) causan grandes problemas en el sistema eléctrico de potencia, restringiendo y limitando su operación. Dependiendo del amortiguamiento total (amortiguamiento del sistema eléctrico, de los generadores y de los sistemas de regulación) estas OBF pueden desaparecer o subsistir como oscilaciones de estado estacionario o bien presentar amplitudes crecientes. La presencia de estas OBF es nociva para el sistema eléctrico por las siguientes razones:

- Si las amplitudes son crecientes existe el peligro de la pérdida de estabilidad de estado estacionario.
- Las amplitudes crecientes pueden conducir a la partición del sistema eléctrico por efecto de la actuación de los sistemas de protección, con lo

cual aumentan las probabilidades de efectuar cortes de carga y que el sistema evolucione hacia el colapso total.

Aparecen oscilaciones en todas las magnitudes eléctricas como potencias activas y reactivas, tensiones, corrientes, las cuales intranquilizan el estado de operación estacionario de la red, produciendo las siguientes restricciones:

- Limitación de la potencia generada de una central cuando existe un modo local inestable.
- Limitación de la potencia transmitida en una línea de interconexión como consecuencia de los modos interárea.
- La activación de relés de frecuencia de los esquemas de rechazo de carga y desconexión de generación.
- La activación de los sistemas de protección de las líneas por pérdida de sincronismo que causan importantes separaciones de áreas provocando así sistemas aislados.
- Limitación de las grandes potencias transferidas entre áreas y al excederse el límite se puede desencadenar oscilaciones interárea.

1.3 Objetivo

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar una metodología básica para verificar la robustez de los controladores de una central utilizando un sistema equivalente, que conectado a los terminales del generador permite simular diversas condiciones de operación requeridas para la determinación de los ajustes de estos controladores.

CAPITULO II

DEFINICIONES Y CONCEPTOS FUNDAMENTALES

2.1 DEFINICIONES

Dentro del marco teórico, que sustenta el presente trabajo, se debe tener en cuenta un conjunto de definiciones y conceptos fundamentales que se explican en este capítulo y que han sido tomadas de las referencias [4, 5].

2.1.1 Sistema Eléctrico de Potencia

Las máquinas e instalaciones que sustentan los procesos tecnológicos de producción, transmisión, distribución y utilización de la energía eléctrica, juntamente con los dispositivos encargados de la regulación y el control de esos procesos constituyen un sistema eléctrico de potencia (SEP). Es decir un SEP esta constituido por el conjunto de unidades de generación con sus respectivos controladores, transformadores de todos los tipos (de las subestaciones de generación, transformación y carga) , líneas de transmisión, cargas, equipos de compensación reactiva (fijos y controlados), equipos de protección y maniobra, etc. En ese sentido, la tarea fundamental del SEP es poner permanentemente la energía eléctrica a disposición de los consumidores en las cantidades y lugares que estos la requieren, al mas bajo costo posible y respetando las exigencias de calidad y confiabilidad, así como aquellas referidas a la preservación del medio ambiente.

2.1.2 Punto de Operación

Punto de operación o condición de operación de un SEP es un conjunto de magnitudes o variables físicas (tensión, corriente, frecuencia, potencia activa y reactiva, etc.) que pueden ser medidas o calculadas. Estas magnitudes permiten describir al SEP o caracterizarlo completamente.

2.1.3 Operación en estado estacionario

La condición de operación de estado estacionario de un SEP, es una condición de operación en la cual todas las magnitudes que caracterizan al sistema pueden ser consideradas constantes solo para propósitos de análisis

2.1.4 Perturbación

Una perturbación en un SEP es un cambio o secuencia de cambios en una o más variables de operación del sistema. Para propósitos de estudio de la estabilidad se identifican dos tipos, pequeñas y grandes perturbaciones:

- **Pequeñas Perturbaciones**

Son eventos de pequeña magnitud, que pueden considerarse como normales dentro la operación de estado estacionario del sistema. Asimismo, puede añadirse que es un evento para el cual es posible linealizar las ecuaciones diferenciales que describen al SEP para propósitos de análisis.

- **Grandes Perturbaciones**

Son eventos de gran envergadura o de severa naturaleza, como por ejemplo: cortocircuitos, la salida intempestiva de una línea o transformador importantes del sistema, la pérdida del campo en un generador de una central, la pérdida de un grupo de generación, la

pérdida de un bloque importante de carga, etc. Son eventos para los cuales las ecuaciones diferenciales que describen al SEP no pueden ser linealizadas para propósitos de análisis.

2.2 ESTABILIDAD DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

La estabilidad de sistemas eléctricos de potencia puede ser definida en términos generales, como la propiedad o habilidad del sistema de operar en un punto de equilibrio estable en condiciones normales de operación y de recuperar otro punto de equilibrio después de haber sido sometido a una perturbación.

El objetivo de los estudios de la estabilidad, es conocer el comportamiento del sistema cuando esta sujeto a pequeñas o grandes perturbaciones. Como se ha mencionado, las pequeñas perturbaciones ocurren continuamente en forma de cambios de carga, generación o ajustes de los controles y las grandes perturbaciones están asociadas a desconexiones de elementos importantes del sistema (líneas de transmisión, transformadores, generadores o grandes bloques de carga), luego de una falla o cortocircuito.

En ese sentido, la respuesta del sistema a una perturbación involucra a muchos equipos. Por ejemplo, si se presentara un cortocircuito en una determinada línea de transmisión, por la actuación de los sistemas de protección se despeja la falla mediante la apertura de los interruptores correspondientes y el elemento es separado del sistema. Lo cual se traduce variaciones en las potencias transferidas, en la velocidad del rotor de las máquinas y en las tensiones de las barras.

- Las variaciones de tensión provocarán la actuación de los reguladores de tensión de los generadores y equipos de compensación reactiva de la transmisión.
- Las variaciones de velocidad provocarán la acción de los gobernadores de las turbinas de las centrales.
- Asimismo las variaciones de frecuencia y tensión afectarán a las cargas del sistema de acuerdo a sus características individuales.
- Adicionalmente, los dispositivos de protección de equipos individuales (motores importantes de plantas mineras) pueden actuar ante las variaciones en las variables del sistema y desconectarlos, pudiendo afectar el comportamiento del sistema.

Como se aprecia el problema es complejo, es por ello que usualmente es necesario hacer supuestos para simplificarlo y de este modo focalizar el interés en los factores que influyen sobre el tipo específico de estabilidad. Por ello el entendimiento de los problemas de estabilidad en sistemas de potencia se ve facilitado mediante la clasificación de la estabilidad en categorías. Estas categorías se han asociado con el sincronismo de los rotores de la máquinas síncronas, la estabilización de la tensión y con los fenómenos del control de la frecuencia.

En la Figura 2.1, se muestra una vista general al problema de la estabilidad, identificando clases y subclases.

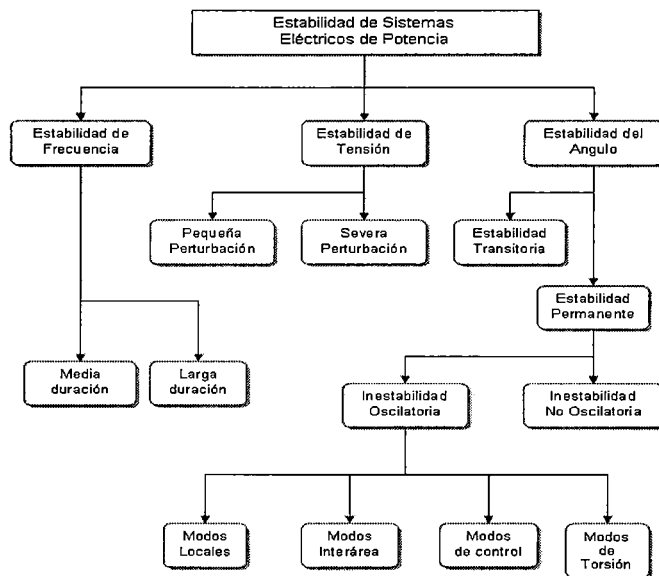


Figura 2.1 Clasificación de la estabilidad en sistemas de potencia

2.3 TIPOS DE ESTABILIDAD

2.3.1 Estabilidad del Ángulo del Rotor

La estabilidad del ángulo del rotor, también conocida como estabilidad angular, se refiere a la capacidad de las máquinas síncronas para mantener el sincronismo después de una perturbación. Esta estabilidad depende de la habilidad del sistema de potencia para mantener o restaurar el equilibrio entre el torque electromagnético y el torque mecánico de cada máquina síncrona.

Este tipo de estabilidad involucra el estudio de las oscilaciones electromecánicas (OE) presentes en los sistemas eléctricos de potencia cuando ocurren perturbaciones. Un factor importante en este problema es la manera como la potencia de salida de las máquinas síncronas varía con las oscilaciones del rotor. Por ello cuando una máquina síncrona pierde el sincronismo con respecto al resto del sistema, su rotor alcanza velocidades más altas ó bajas que la requerida para generar tensiones a la frecuencia

del sistema. Dependiendo del tiempo de duración de estas excursiones, el sistema de protección aislará a la máquina inestable del resto del sistema.

El cambio o la variación del torque eléctrico de una máquina síncrona debido a una perturbación en el sistema de potencia puede ser expresado mediante dos componentes [4]:

$$\Delta T_e = K_S \Delta \delta + K_D \Delta w \quad 2.1$$

Donde:

- $K_S \Delta \delta$: Es la componente de torque conocida como el cambio del torque sincronizante. Esta componente de torque esta en fase con el cambio o variación del ángulo del rotor $\Delta \delta$.
- $K_D \Delta w$: Componente de torque denominada como el cambio del torque de amortiguamiento y que esta en fase con el cambio o variación de la velocidad Δw .
- $\Delta \delta$: Desviación del ángulo del rotor de la máquina síncrona respecto del valor inicial existente en el momento de producirse la perturbación.
- Δw : Desviación de la velocidad del rotor respecto de la velocidad síncrona.
- K_S : Coeficiente del torque sincronizante.
- K_D : Coeficiente del torque de amortiguamiento

En ese sentido la estabilidad de un SEP depende ó esta condicionada por la existencia de ambas componentes de torque en cada una de las máquinas síncronas.

La carencia o el insuficiente torque sincronizante provoca la inestabilidad que se expresa mediante una tendencia periódica en el ángulo del rotor.

Por otro lado, la carencia del torque de amortiguamiento provoca inestabilidad oscilatoria. Para mejor visualización de la naturaleza de los problemas de estabilidad, es usual agrupar el fenómeno de estabilidad del ángulo del rotor en las siguientes dos categorías: estabilidad permanente y estabilidad transitoria.

2.3.1.1 Estabilidad permanente

La estabilidad permanente o de estado estacionario es llamada también estabilidad de pequeña señal o de pequeña perturbación. Es la habilidad del sistema de potencia de mantener el sincronismo frente a pequeñas perturbaciones normales durante su operación, es decir tiene la propiedad de retornar y alcanzar un nuevo punto de equilibrio ante cambios graduales de estado; el nuevo punto de equilibrio esta caracterizado por las siguientes magnitudes: frecuencia, potencia activa y reactiva, tensión en bornes, corriente del generador y corriente de excitación. Estos cambios o perturbaciones ocurren continuamente en el sistema por las variaciones en la carga y generación. Las perturbaciones son consideradas lo suficientemente pequeñas para aceptar la linealización de las ecuaciones del sistema eléctrico de potencia que posibilitan el análisis, utilizando algún método de estudio para la estabilidad de sistemas lineales. Para saber si el punto de operación considerado en el sistema eléctrico de potencia es estable, es necesario realizar en ese punto las siguientes actividades:

- Linealizar las ecuaciones diferenciales de las máquinas sincrónicas y la de sus controladores.
- Linealizar las ecuaciones algebraicas de la red.

- Obtener el sistema de ecuaciones (diferenciales) de estado linealizado.
- Calcular los autovalores o eigenvalores de la matriz de estado del sistema linealizado. Si ningún eigenvalor tiene parte real positiva, entonces el sistema eléctrico es estable en el punto de operación analizado.

Se dice que un sistema eléctrico de potencia es estable durante su operación en estado estacionario, si al ser sometido en todo momento a las pequeñas perturbaciones logra amortiguarlas y mantener un escenario de régimen permanente.

La inestabilidad permanente puede presentarse de dos formas:

1. Con un incremento sostenido en el ángulo del rotor debido al insuficiente torque sincronizante o porque se ha vuelto negativo.
2. Con oscilaciones del ángulo del rotor de amplitud creciente debido a la carencia de torque amortiguante o porque es negativo.

La naturaleza de la respuesta del sistema a los pequeños cambios depende de factores que incluyen el punto de operación inicial del sistema, las impedancias de las líneas de transmisión, los tipos de controles usados en los sistemas de excitación, así como de sus ajustes. Para un generador conectado radialmente a un gran sistema de potencia, con el regulador automático de tensión operando en modo manual (tensión de campo constante) la inestabilidad permanente o de pequeña señal se atribuye a la falta de torque sincronizante. Se explica la inestabilidad a través de un modo no oscilatorio, como se muestra en la Figura 2.2.

Con el regulador de tensión operando en automático, el problema de la inestabilidad permanente se manifiesta con oscilaciones de amplitud creciente, debido a la falta o insuficiente amortiguamiento, como se muestra en la Figura 2.3.

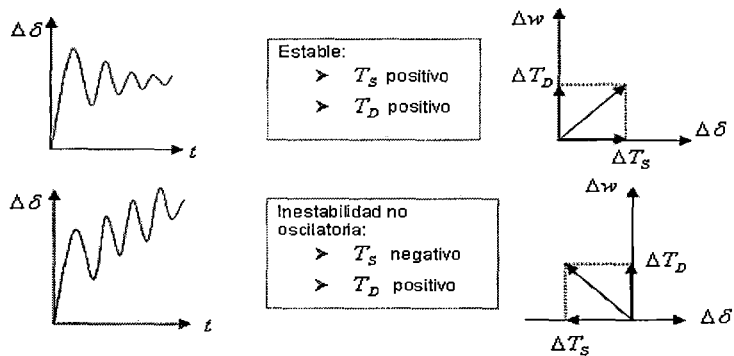


Figura 2.2. Naturaleza de la inestabilidad a pequeñas perturbaciones, con tensión de campo constante

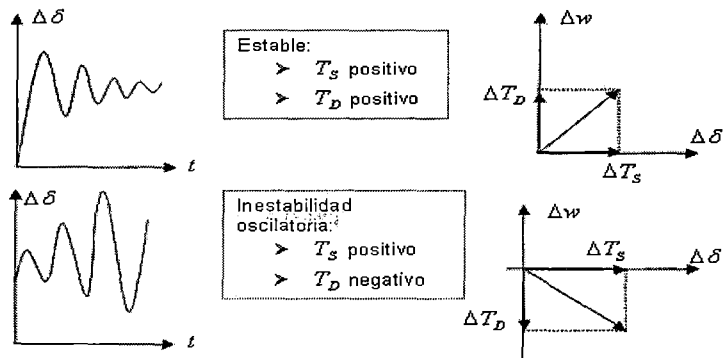


Figura 2.3. Naturaleza de la inestabilidad a pequeñas perturbaciones, con tensión de campo controlado

Se debe remarcar que el problema de estabilidad permanente o de pequeña señal en sistemas eléctricos de potencia, se presenta en la actualidad principalmente por la falta de amortiguamiento para las oscilaciones del sistema.

2.3.1.2 Estabilidad transitoria

Es la habilidad del sistema de potencia de mantener el sincronismo cuando ha sido sometido a grandes o severas perturbaciones. Su origen puede ser un cortocircuito en algún punto del SEP o un cambio severo

en su topología; por ejemplo, la desconexión de líneas de transmisión con cargas considerables (debido a fallas provocadas por fenómenos externos, tales como descargas atmosféricas) o la salida imprevista de unidades de generación o de un bloque importante de carga. Estas perturbaciones hacen que los rotores oscilen unos con respecto a otros, provocando variaciones de tensión que hacen actuar a los reguladores automáticos de tensión y a los estabilizadores de potencia.

El termino transitorio hace referencia al hecho de que en un corto periodo de tiempo (1 a 3 s), se podrá saber si el sistema esta en la capacidad de evolucionar a otro estado de equilibrio. Sin embargo, el sistema esta diseñado y operado para soportar un conjunto de contingencias (cortocircuitos de fase- tierra, bifásico-tierra o trifásicos).

En la Figura 2.4 se muestra el comportamiento del ángulo del rotor (δ) de una máquina síncrona para un caso estable y dos situaciones inestables.

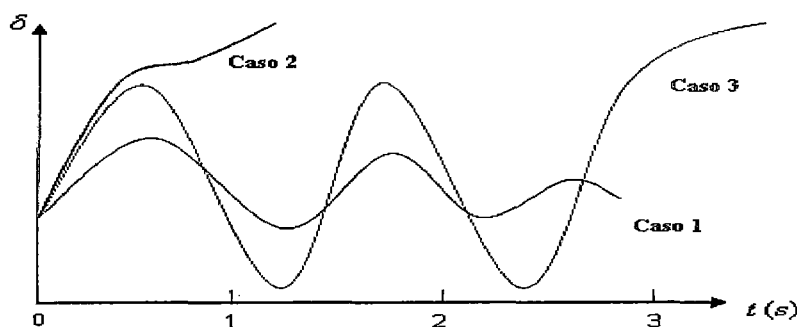


Figura 2.4 Respuesta del ángulo del rotor a una perturbación transitoria

- **Caso 1** (caso estable): El ángulo del rotor aumenta hasta un máximo, luego disminuye y oscila con una amplitud decreciente hasta que alcanza una nueva condición de estado estacionario.

- **Caso 2:** El ángulo del rotor δ continúa aumentando hasta que pierde el sincronismo, esta forma de inestabilidad es conocida como inestabilidad en la primera oscilación y es causado por insuficiente torque sincronizante.
- **Caso 3:** El sistema es estable en la primera oscilación pero se hace inestable como un resultado del crecimiento de las oscilaciones. Esta forma de inestabilidad generalmente ocurre cuando el punto de operación postfalla es inestable y no como resultado de la perturbación transitoria, sino porque el sistema inicia una oscilación no amortiguada que lo hace inestable por falta de amortiguamiento.

2.3.2 Estabilidad de Tensión

La estabilidad de tensión es la habilidad del sistema de potencia de mantener magnitudes de tensión aceptables en todas las barras, en régimen permanente, bajo condiciones normales de operación y después de una perturbación. La inestabilidad de tensión es un proceso caracterizado por la disminución de los niveles de tensión del sistema, lenta al principio y cada vez mas acelerada hasta que se presenta una caída abrupta de la tensión (colapso de tensión), situación en la que el sistema no tiene condiciones para atender a la demanda.

El principal factor que causa la inestabilidad es la falta de capacidad del sistema de potencia para atender o suministrar la demanda de potencia reactiva necesaria para mantener los niveles de tensión apropiados. Un sistema presenta inestabilidad de tensión, si para al menos una barra del sistema, la magnitud de la tensión (V) disminuye cuando la potencia reactiva (Q) inyectada a la barra aumenta. Para propósitos de análisis, la

estabilidad de tensión se clasifica en dos tipos: Estabilidad de tensión a pequeñas perturbaciones y Estabilidad de tensión a severas perturbaciones.

2.3.2.1 Estabilidad de tensión a pequeña perturbación

Esta relacionada con la capacidad del sistema de mantener las tensiones después de pequeñas perturbaciones como cambios de la carga del sistema. Los estudios de este tipo son una herramienta importante para estudiar el colapso de tensión, que esta definido como la caída progresiva del perfil de tensión en una parte significativa del sistema, como resultado de una secuencia de eventos.

2.3.2.2 Estabilidad de tensión de severa perturbación

Esta relacionada con la habilidad del sistema de controlar las tensiones después de una perturbación severa o de gran tamaño, es decir una falla, como la salida de un generador que suministra una magnitud importante de potencia reactiva, un equipo de compensación reactiva, una línea de transmisión importante, etc.

2.3.3 Estabilidad de Frecuencia

Es la habilidad del SEP para mantener frecuencias estacionarias luego de severos eventos que provocan desequilibrio entre la generación y la carga del sistema. Depende de la habilidad para mantener o recobrar el equilibrio entre la generación y la carga, con un mínimo de pérdida de carga no intencional. La inestabilidad se presenta con oscilaciones sostenidas de la frecuencia que provocan la desconexión (disparo) de unidades de generación y/o cargas, provocando la formación de sistemas aislados (islas). Los problemas de inestabilidad de frecuencia están asociados con inadecuadas respuestas de los equipamientos (reguladores de velocidad),

inadecuada coordinación de los equipos de protección o insuficiente reserva de generación en el sistema.

La estabilidad del control de la frecuencia se clasifica en: Estabilidad de media y larga duración.

2.3.3.1 Estabilidad de media y larga duración

Los términos estabilidad de media y larga duración fueron introducidos ante la necesidad de tratar con problemas asociados a la respuesta dinámica del sistema de potencia cuando es sometido a muchas perturbaciones. Estas perturbaciones son asociadas a la acción de procesos lentos, atribuidos a controles y sistemas de protección que no son modelados para los estudios convencionales de estabilidad transitoria, porque su respuesta en el tiempo puede ser de algunos segundos (controles de un generador y protecciones) hasta varios minutos (reguladores de velocidad y transformadores con regulación automática bajo carga). Normalmente estas simulaciones cubren entre 20 a 30 s, para verificar la regulación primaria de frecuencia, de ser necesario los periodos de simulación pueden extenderse a algunos minutos.

2.4 OSCILACIONES ELECTROMECAÑICAS

Los sistemas de potencia en estado estacionario operan a una frecuencia de 60 Hz, algunos en 50Hz. Cuando se dice que el sistema esta oscilando, lo que se quiere denotar es la presencia no deseada de oscilaciones diferentes de 60Hz en las variables físicas del sistema (tensión, corriente, potencia, frecuencia, etc.). Las oscilaciones son iniciadas por cambios en la topología o en las condiciones operativas del sistema.

Las perturbaciones pueden ser pequeñas (cambios constantes en la carga) o severas (una falla determinada en una línea de transmisión). Las oscilaciones provocadas por cambios severos se denominan oscilaciones transitorias y son estudiados por la estabilidad transitoria.

Las oscilaciones provocadas por las pequeñas perturbaciones ocurren constantemente, ya que en todo momento se están haciendo ajustes en la generación, la demanda, en los controles, etc. Estas oscilaciones son de baja frecuencia y se atribuyen al movimiento relativo de los rotores y a la respuesta de los controladores. Están relacionadas directamente con los modos de la estabilidad permanente o de pequeña señal, como se observa en la Figura 2.1 y Figura 2.5.

Es pertinente remarcar que un modo es una resonancia del sistema (frecuencia de oscilación natural del sistema), que es identificada por una combinación de su frecuencia de oscilación y amortiguamiento. De la misma forma que se habla de un modo o una frecuencia de resonancia en un circuito LC, en un sistema de potencia se puede hablar de más de 200 o 300 modos de oscilación diferentes.

Cada modo de oscilación se representa por un número complejo (λ) denominado valor propio o eigenvalor, con la forma:

$$\lambda = \alpha \pm j\beta \quad 2.2$$

La parte real (α) cuantifica el amortiguamiento del modo y la imaginaria (β) la frecuencia de oscilación. La frecuencia de oscilación (f) en Hz se puede calcular así:

$$f = \frac{\beta}{2\pi} \quad 2.3$$

Mientras que el amortiguamiento (ζ) normalizado se calcula a partir de la parte real del eigenvalor, utilizando la siguiente relación:

$$\zeta = \frac{-\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \quad 2.4$$

2.4.1 Tipos de Oscilaciones Electromecánicas

Se puede mencionar que desde la mitad de los años 60 se han observado en redes de transmisión en diferentes países, en particular en líneas que interconectan sistemas eléctricos, oscilaciones de las magnitudes eléctricas de potencia, tensión, corriente y frecuencia. Por el rango de frecuencias (0,1 a 2,5Hz) con que se presentan estas oscilaciones, se les ha llamado también oscilaciones de baja frecuencia (OBF). Estas oscilaciones, que reflejan 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. Las OBF pueden aparecer después de que el sistema eléctrico ha soportado con éxito un proceso transitorio originado por una perturbación.

Las oscilaciones de baja frecuencia se dividen en dos categorías:

- Oscilaciones Locales.
- Oscilaciones Interárea (entre sistemas).

En la Figura 2.5 se muestra las oscilaciones estudiadas por la estabilidad permanente o de pequeña señal.

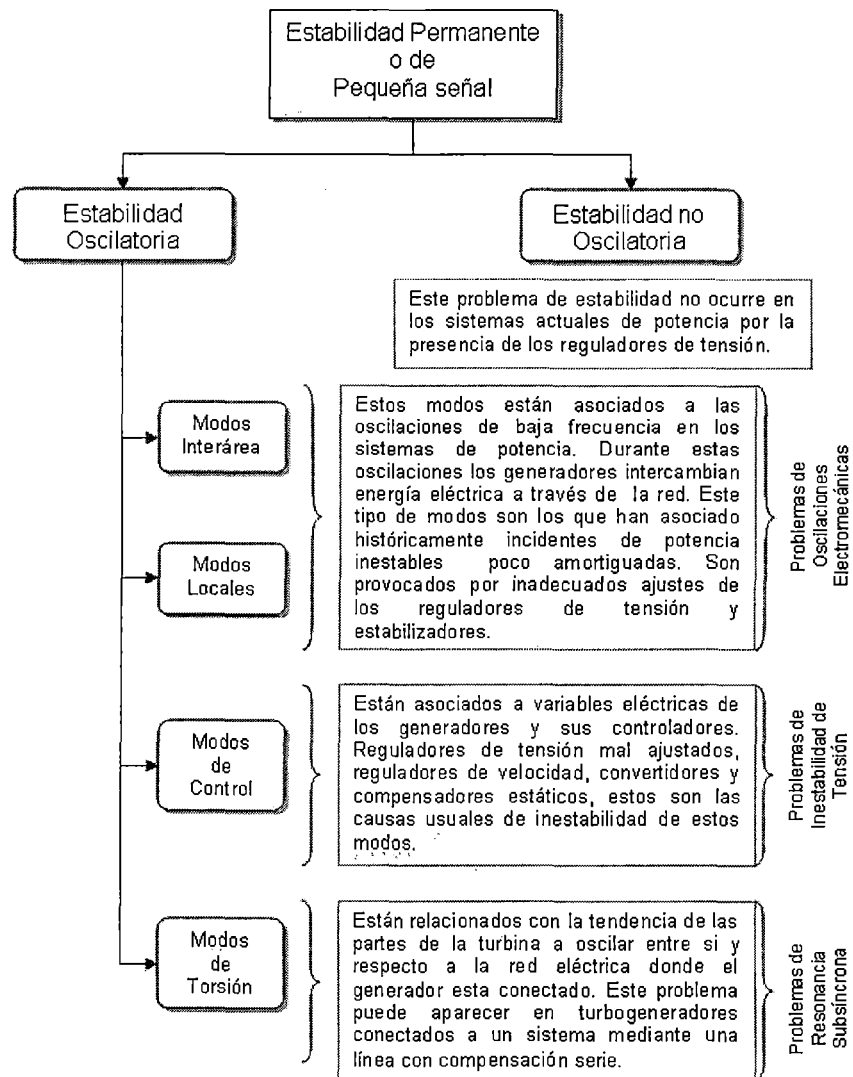


Figura 2.5 Oscilaciones estudiadas por la estabilidad permanente

2.4.2 Oscilaciones Electromecánicas Locales e Interárea

Como se aprecia en la Figura 2.5 la dinámica de las oscilaciones electromecánicas (OE) está determinada por los modos locales e interárea del sistema de potencia. Las OE que se manifiestan mediante oscilaciones de potencia y son imposibles de evitar y siempre están presentes en los sistemas de potencia; estas oscilaciones se originan por cambios pequeños y continuos en los equipos, como por ejemplo los cambios en la generación y carga. Aunque las oscilaciones afectan muchas variables del sistema

(tensión, corriente, frecuencia, etc.), la velocidad de los generadores y la potencia que fluye por la red son las más afectadas. Cuando se presentan estos cambios, los generadores en el intento de encontrar nuevos puntos de operación, responden con oscilaciones que pueden afectar a todo el SEP.

2.4.2.1 Oscilaciones locales

Los modos de oscilación local corresponden al escenario en el cual un generador o un grupo de generación oscilan frente al resto del sistema, al cual están conectados mediante un enlace débil. Esta forma de oscilación es la más común, y presenta un rango de frecuencia de 1,5 a 2,5Hz. Este tipo de oscilaciones son causadas generalmente por sistemas de excitación y reguladores automáticos de tensión, que se agudiza cuando los sistemas de excitación tienen alta velocidad de respuesta. El amortiguamiento de estos modos de oscilación denominados también máquina – sistema, se logra eficazmente con la incorporación de estabilizadores de sistemas de potencia.

También existen los modos de oscilación entre máquinas de una central eléctrica que son denominados modo intraplanta. Usualmente los modos intraplanta presentan rango de frecuencia de 0,8 a 1,5Hz. En la Figura 2.6 y 2.7 se muestra la OE local máquina – sistema e intraplanta respectivamente.

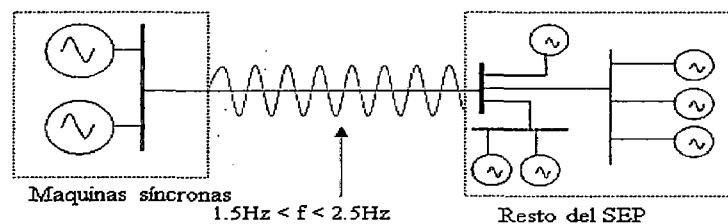


Figura 2.6 Representación esquemática de las OE del tipo local, (Máquina – Sistema)

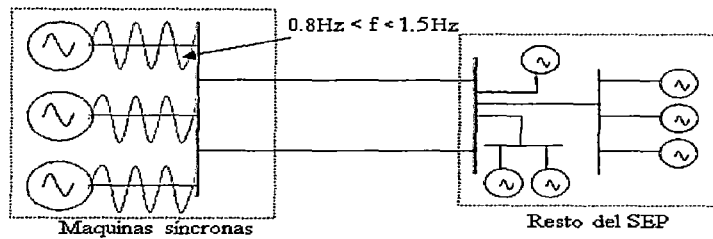


Figura 2.7 Representación esquemática de la OE del tipo local, (Intraplanta)

2.4.2.2 Oscilaciones interárea

Se presentan cuando un grupo de máquinas en una parte de la red funcionando prácticamente a igual frecuencia (comportamiento coherente) oscila con respecto a otro conjunto de máquinas ubicadas en otra parte de la red. Estas oscilaciones se manifiestan cuando dos sistemas eléctricos (áreas) están interconectados por una línea de enlace con una capacidad de transporte inferior al menor valor de potencia que surge de considerar las potencias de generación de cada una de las áreas vinculadas (enlace débil). Dichas oscilaciones se encuentran entre 0,1 a 1,5Hz. Las características de esta forma de oscilación son más complejas y tiene aspectos diferentes a las dos formas anteriores, tal como se observa en la Figura 2.8.

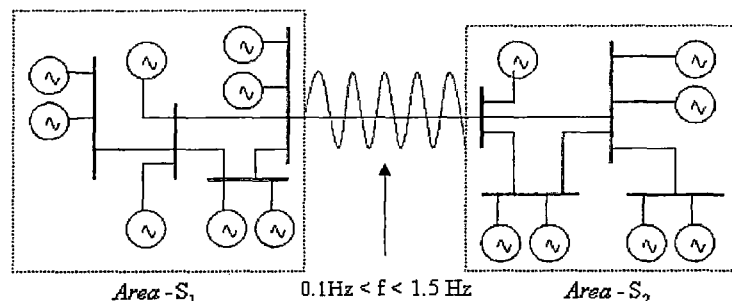


Figura 2.8 Representación esquemática de la OE del tipo Interárea

Las dos primeras formas de oscilación solo involucran una pequeña parte del sistema, lo cual representa un problema local. En los sistemas

de potencia, las oscilaciones de mayor peligro son las asociadas a los modos interáreas, ya que tienen menor amortiguamiento y menor frecuencia, su aparición causa fluctuaciones en las tensiones del sistema y las variaciones de potencia suelen alterar las protecciones de los equipos e incluso causan su disparo. Las oscilaciones interárea, en forma muy general ocurren cuando se involucran generadores de dos sistemas unidos mediante sistemas de transmisión débiles.

Es conveniente mencionar que en literaturas especializadas algunas veces se utiliza el termino "estudio de estabilidad de pequeña señal" para hacer referencia a la estabilidad de los modos locales e interáreas que determinan la estabilidad de las oscilaciones electromecánicas u oscilaciones de potencia.

2.4.3 Modos de Control y Torsión

Se aprecia en la Figura 2.1 y Figura 2.5, que la estabilidad de pequeña señal agrupa otros tipos de estudios (modos de torsión y de control), pero generalmente cuando se utiliza el término permanente o de pequeña señal se esta haciendo solo referencia al estudio de modos interáreas y modos locales.

- **Modos de control**

Son asociados con los controladores del generador. Usualmente son originados por incorrectos ajustes en los sistemas de excitación y reguladores de velocidad. Estos modos tienen altas frecuencias (mayores a 2,5Hz) y alto amortiguamiento.

- **Modos de torsión**

Son asociados con los componentes de torque que se conjugan en el sistema turbina-generador. La inestabilidad de estos modos pueden ser causados por interacción entre los controles del sistema de excitación, regulador de velocidad y compensadores series capacitivos. Estos modos también se denominan modos oscilatorios subsíncronos y tienen frecuencias superiores a 5 Hz.

2.5 REPRESENTACION DEL SISTEMA DINAMICO EN ESPACIO DE ESTADO

El análisis de la estabilidad permanente (o de pequeña perturbación) utilizando técnicas de linealización, provee información valiosa de las características dinámicas del sistema. Esta técnica [4] que se basa en el modelamiento de espacio de estado se describe a continuación.

2.5.1 Estado de un Sistema Dinámico

El estado de un sistema dinámico es el conjunto de variables (variables de estado), tal que el conocimiento de esas variables en $t = t_0$ (condición inicial de operación), juntamente con la entrada (perturbación o excitación) para $t \geq t_0$, determina completamente el comportamiento del sistema para cualquier instante $t \geq t_0$.

2.5.2 Variables de Estado de un Sistema Dinámico

Las variables de estado de un sistema dinámico son aquellas que constituyen el menor conjunto de variables capaz de determinar o caracterizar el estado del sistema dinámico. En ese sentido, si por lo menos n variables $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ son necesarias para describir todo el

comportamiento del sistema dinámico, entonces esas n variables forman un conjunto de variables de estado del sistema.

2.5.3 Vector de Estado

El vector de estado es el vector que tiene como componentes n variables de estado necesarias para describir completamente el comportamiento de un sistema dado. Asimismo un vector de estado es aquel que determina únicamente el estado del sistema $x(t)$ para cualquier instante $t \geq t_0$, una vez dado el sistema en $t = t_0$, y especificada la entrada $u(t)$ para $t \geq t_0$.

2.5.4 Espacio de Estado

El espacio de estado es el espacio n -dimensional, cuyas coordenadas son formadas por los ejes de $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, donde $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ son las variables de estado del sistema.

2.5.5 Ecuaciones del Espacio de Estado

El análisis del espacio de estado envuelve tres tipos de variables que están presentes en el modelamiento del sistema dinámico:

- Variables de entrada " u ".
- Variables de salida " y ".
- Variables de estado " x ".

La presentación de un sistema dado en el espacio de estado no es única, sin embargo el número de variables de estado es el mismo para cualquiera de las diferentes representaciones posibles del mismo sistema, en el espacio de estado.

El sistema dinámico debe contener elementos que memoricen los valores de entrada para $t \geq t_1$. Una vez que los integradores en un sistema de

control de tiempo continuo sirven como dispositivos de memoria, las salidas de esos integradores pueden ser consideradas variables que definen el estado interno del sistema dinámico. Por lo tanto, estas pueden ser escogidas como variables de estado. En ese sentido, el número de variables de estado que define completamente la dinámica de un sistema es igual al número de integradores existentes.

Si se tiene un sistema que incluye n integradores (es decir, n variables de estado $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$), que posee r entradas $u_1, u_2, u_3, \dots, u_r$ y m salidas $y_1, y_2, y_3, \dots, y_m$, entonces el sistema puede ser escrito en la forma:

$$\dot{\underline{x}} = \underline{f}(\underline{x}, \underline{u}) \quad 2.5$$

$$\underline{y} = \underline{g}(\underline{x}, \underline{u}) \quad 2.6$$

Donde:

$$\underline{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ M \\ x_n \end{bmatrix} \quad \underline{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ \vdots \\ M \\ u_n \end{bmatrix} \quad \underline{f} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ M \\ f_n \end{bmatrix} \quad \underline{g} = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ \vdots \\ M \\ g_n \end{bmatrix}$$

Para realizar un análisis ante pequeñas perturbaciones las ecuaciones (2.5) y (2.6) deben ser linealizadas alrededor de un punto de operación o punto de equilibrio (x_0, u_0) . En este punto de operación se cumple que la derivada de todas las variables de estado son simultáneamente iguales a cero, por lo tanto reemplazando en la ecuación (2.5) se obtiene:

$$\dot{\underline{x}}_0 = \underline{f}(\underline{x}_0, \underline{u}_0) = \underline{0} \quad 2.7$$

Si el sistema sufre un pequeño disturbio dado por: $\dot{x}_0 + \Delta \dot{x}_0$ y $u_0 + \Delta u_0$, el nuevo estado deberá satisfacer la expresión (2.5):

$$\dot{\underline{x}} = \dot{x}_0 + \Delta \dot{x} = f \left[(\dot{x}_0 + \Delta \dot{x}, u_0 + \Delta u) \right] \quad 2.8$$

Como se asume una pequeña perturbación, la función no lineal $f(x, u)$ puede ser expresada mediante su expansión en serie de Taylor. Despreciando los términos de orden igual y superior a dos, se obtiene:

$$\dot{x}_i = \dot{x}_i + \Delta \dot{x}_i = f_i \left[(\dot{x}_0 + \Delta \dot{x}, u_0 + \Delta u) \right] \quad 2.9$$

$$\dot{x}_i = f_i \left[(\dot{x}_0, u_0) \right] + \frac{df_i}{dx_1} \Delta x_1 + K + \frac{df_i}{dx_n} \Delta x_n + \frac{df_i}{du_1} \Delta u_1 + K + \frac{df_i}{du_r} \Delta u_r \quad 2.10$$

Como $\dot{x}_{i0} = f_i(\dot{x}_0, u_0)$, entonces se puede simplificar y se obtiene:

$$\Delta \dot{x}_i = \frac{df_i}{dx_1} \Delta x_1 + K + \frac{df_i}{dx_n} \Delta x_n + \frac{df_i}{du_1} \Delta u_1 + K + \frac{df_i}{du_r} \Delta u_r; \text{ para } i = 1, 2, K, n. \quad 2.11$$

Análogamente, para el vector de salidas del sistema dado por la ecuación (2.6), se puede escribir:

$$\Delta y_j = \frac{dg_j}{dx_1} \Delta x_1 + K + \frac{dg_j}{dx_n} \Delta x_n + \frac{dg_j}{du_1} \Delta u_1 + K + \frac{dg_j}{du_r} \Delta u_r; \text{ para } j = 1, 2, K, m. \quad 2.12$$

Por lo tanto, las ecuaciones (2.5) y (2.6) linealizadas alrededor de un punto de operación adoptan la siguiente forma:

$$\Delta \dot{\underline{x}} = \mathbf{A} \Delta \underline{x} + \mathbf{B} \Delta \underline{u} \quad 2.13$$

$$\Delta \underline{y} = \mathbf{C} \Delta \underline{x} + \mathbf{D} \Delta \underline{u} \quad 2.14$$

Donde:

$\Delta \underline{x}$: Vector de estado de orden n

Δy : Vector de salida de orden m

Δu : Vector de entrada de orden r

A : Matriz de estado de orden $n \times n$

B : Matriz de entrada o de control de orden $n \times r$

C : Matriz de salida de orden $m \times n$

D : Matriz de transmisión directa $m \times r$

Las matrices **A** y **B** se calculan con las siguientes expresiones:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \Lambda & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \mathbf{M} & \Lambda & \mathbf{M} \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \Lambda & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \qquad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \Lambda & \frac{\partial f_1}{\partial u_r} \\ \mathbf{M} & \Lambda & \mathbf{M} \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \Lambda & \frac{\partial f_n}{\partial u_r} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \Lambda & \frac{\partial g_1}{\partial x_n} \\ \mathbf{M} & \Lambda & \mathbf{M} \\ \frac{\partial g_m}{\partial x_1} & \Lambda & \frac{\partial g_m}{\partial x_n} \end{bmatrix} \qquad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial u_1} & \Lambda & \frac{\partial g_1}{\partial u_r} \\ \mathbf{M} & \Lambda & \mathbf{M} \\ \frac{\partial g_m}{\partial u_1} & \Lambda & \frac{\partial g_m}{\partial u_r} \end{bmatrix}$$

Aplicando la transformada de Laplace a las ecuaciones (2.13) y (2.14), se obtiene las ecuaciones de estado en el dominio de la frecuencia:

$$s\Delta \underline{X}_{(s)} - \Delta \underline{X}_{(0)} = \mathbf{A} \Delta \underline{X}_{(s)} + \mathbf{B} \Delta \underline{U}_{(s)} \qquad 2.15$$

$$\Delta \underline{Y}_{(s)} = \mathbf{C} \Delta \underline{X}_{(s)} + \mathbf{D} \Delta \underline{U}_{(s)} \qquad 2.16$$

Ordenando los términos de la ecuación (2.15), se obtiene:

$$(s\mathbf{I} - \mathbf{A})\Delta \underline{X}_{(s)} = \Delta \underline{X}_{(0)} + \mathbf{B} \Delta \underline{U}_{(s)} \qquad 2.17$$

Asimismo,

$$\Delta \underline{X}_{(s)} = \frac{\text{adj}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})}{\det(s\mathbf{I} - \mathbf{A})} [\Delta \underline{X}_{(0)} + \mathbf{B} \Delta \underline{U}_{(s)}] \qquad 2.18$$

En forma similar para la ecuación (2.16):

$$\Delta \underline{Y}_{(s)} = \mathbf{C} \frac{\text{adj}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})}{\det(s\mathbf{I} - \mathbf{A})} [\Delta \underline{X}_{(0)} + \mathbf{B} \Delta \underline{U}_{(s)}] + \mathbf{D} \Delta \underline{U}_{(s)} \quad 2.19$$

En las ecuaciones (2.18) y (2.19) \mathbf{I} es la matriz identidad.

Los polos de $\Delta \underline{X}$ y $\Delta \underline{Y}$ son las raíces de la denominada "Ecuación característica de la matriz \mathbf{A} ", definida por:

$$\det(s\mathbf{I} - \mathbf{A}) = 0 \quad 2.20$$

De la expresión (20), su ecuación polinomial es del tipo:

$$a_0 + a_1s + a_2s^2 + \dots + a_ns^n = 0, \quad \text{y sus raíces se denominan valores}$$

característicos (valores propios o eigenvalores) de la matriz de estado \mathbf{A} .

Donde los eigenvalores tienen la forma:

$$\lambda_i = \alpha_i \pm \beta_i \quad 2.21$$

Una condición necesaria y suficiente para que un sistema dinámico sea estable es que todos los valores propios o eigenvalores tengan parte real negativa.

En la Figura 2.9 se observa la ubicación de los eigenvalores en el plano complejo y mostrando la respuesta típica en el tiempo que tendría el sistema de acuerdo a sus eigenvalores dados por el punto de operación, asimismo, se muestra si el modo de oscilación es estable o inestable.

2.6 RESPUESTA TRANSITORIA DE SISTEMAS LINEALES

En el presente trabajo, además de calcular los eigenvalores de la matriz de estado " \mathbf{A} " linealizada alrededor del punto de operación se va a obtener la respuesta transitoria del sistema, ante un escalón, como criterio adicional de verificación de la estabilidad. Al respecto, se ha preparado un resumen teórico tomado de la referencia [6, 7].

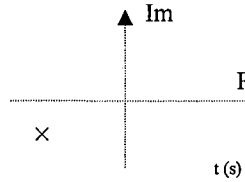
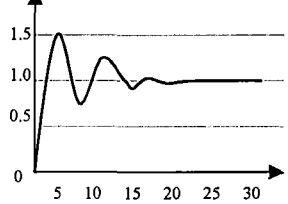
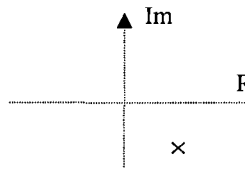
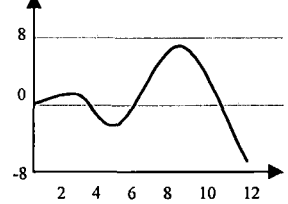
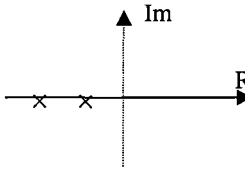
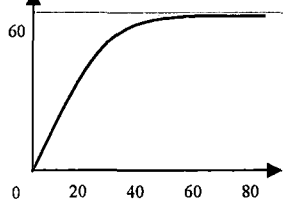
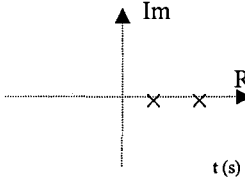
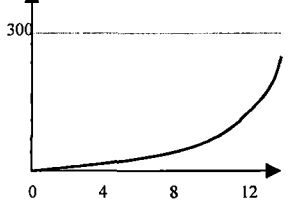
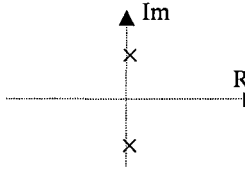
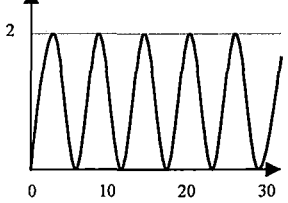
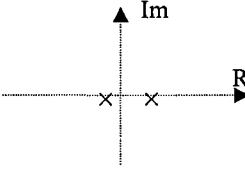
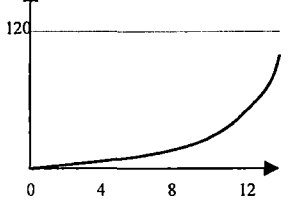
Ubicación de los eigenvalores en el plano	Respuesta típica en el tiempo	Modo de oscilación
		<p>Estable Oscilatorio amortiguado</p>
		<p>Inestable Oscilatorio creciente con el tiempo</p>
		<p>Estable No oscilatorio</p>
		<p>Inestable No oscilatorio creciente con el tiempo</p>
		<p>Estable Oscilatorio de amplitud constante</p>
		<p>Inestable No oscilatorio creciente con el tiempo</p>

Figura 2.9 Respuesta en el tiempo para diferentes eigenvalores

Se puede decir que si un sistema se encuentra en un determinado estado y recibe un estímulo exterior, se produce en el un cambio de estado, que se pone de manifiesto en la respuesta transitoria al estímulo aplicado.

Para verificar la respuesta transitoria es usual aplicar señales de entrada (Δu) conocidas y se obtiene las señales de respuesta o de salida (Δy). Como se requiere probar la respuesta ante pequeñas perturbaciones del sistema linealizado alrededor de un punto de operación, se ha utilizado señales de entrada del tipo escalón. De esa manera se ha examinado indicadores del comportamiento de la respuesta transitoria, como por ejemplo el tiempo requerido para alcanzar otro estado estacionario, la calidad del transitorio y el valor final correspondiente.

Sea un determinado sistema linealizado de segundo orden, con una función de transferencia dada por la siguiente expresión:

$$\frac{\Delta Y(s)}{\Delta U(s)} = \frac{K}{\frac{s^2}{\omega_n^2} + 2\frac{\zeta}{\omega_n}s + 1} \quad 2.21$$

Si se aplicara un escalón unitario al sistema, entonces $\Delta U(s) = 1/s$, por lo tanto la salida queda expresada como:

$$\Delta Y(s) = \frac{1}{s} \frac{K}{\left(\frac{s^2}{\omega_n^2} + 2\frac{\zeta}{\omega_n}s + 1\right)} = \frac{K \omega_n^2}{(s - p_1)(s - p_2)s} \quad 2.22$$

Donde:

- p_1 y p_2 son los polos o raíces de la ecuación característica de (2.22).

Por lo tanto, al resolver la ecuación (2.22) en el dominio del tiempo resulta:

$$\Delta y(t) = K \left(1 + \frac{p_2}{(p_1 - p_2)} e^{p_1 t} - \frac{p_1}{(p_1 - p_2)} e^{p_2 t} \right) \quad 2.23$$

Dependiendo de los polos (o valores característicos) p_1 y p_2 queda definida la naturaleza de la respuesta transitoria del sistema ante una perturbación del tipo escalón, que están graficados en la Figura 2.9.

2.7 ESTABILIZADOR DE SISTEMAS DE POTENCIA

Ante la aparición de fenómenos en los sistemas eléctricos de potencia y las consecuencias que esto trae (por ejemplo: restricción de transporte de potencia en líneas de transmisión), ha conllevado desde muchos años atrás a desarrollar nuevas tecnologías para superar estos inconvenientes de inestabilidad del sistema ante pequeños o grandes eventos. La principal causa, en el caso del sistema peruano, es la carencia o falta de torque amortiguante en los generadores síncronos de un sistema causado por impedancias Generador-Carga demasiado grandes, sistemas de excitación de acción rápida, etc. Es por ello, se ha buscado de alguna forma, adicionar torque eléctrico al generador síncrono, a través del regulador de excitación, a este control adicional se le denomina "Estabilizador de Sistema de Potencia (PSS)".

Se entiende como Estabilizador de Sistemas de Potencia a aquel Sistema de Control que tiene como objetivo añadir amortiguamiento suplementario al control de la excitación modulando la referencia del regulador de tensión con una señal estabilizante.

A lo largo de los años la tecnología de estos Sistemas de Control ha sido mejorada, y se puede diferenciar uno de otros por el tipo de entrada que utilizan para crear la señal de amortiguamiento, éstas son:

- PSS del tipo $\Delta\omega$ (desviación de velocidad),
- PSS del tipo ΔP_e (Potencia Eléctrica),
- PSS del tipo de la combinación de las señales $\Delta\omega$ y ΔP_e .
- PSS del tipo ΔP_{ac} (Potencia acelerante).

Los PSS tienen gran aplicación en el amortiguamiento de las oscilaciones de baja frecuencia, ya sean interáreas o locales con frecuencias características de 0,1 a 0,7 Hz y 0,8 a 2,0 Hz respectivamente. El origen de estas oscilaciones se debe principalmente a las nuevas tecnologías de controladores de excitación con respuesta rápida, a los enlaces débiles de los sistemas de potencia, generación alejada de las cargas, retraso en la construcción de nuevas centrales y líneas de transmisión, etc.

2.7.1 Estructura Básica del PSS

La estructura básica de un estabilizador de sistemas de potencia PSS mostrada en la Figura 2.10 consiste en tres etapas: compensador de fase, filtro pasa alto (Washout) y la etapa de ganancia.

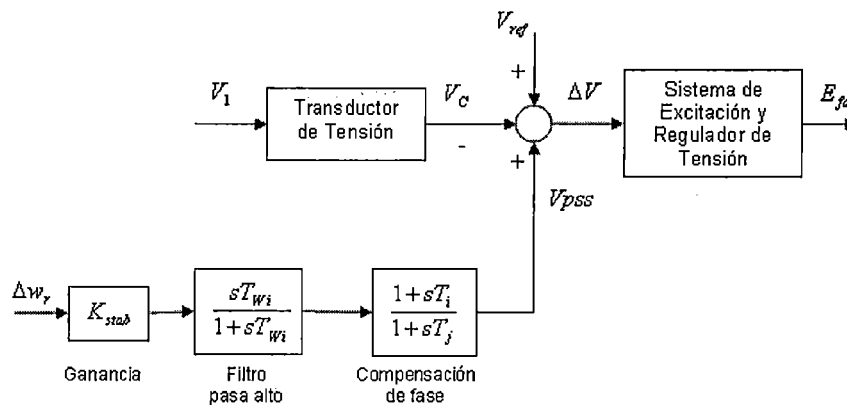


Figura 2.10 Modelo Básico del PSS

Seguidamente se describe un resumen del funcionamiento de cada bloque del PSS:

a. Compensación de fase

Provee una apropiada característica de adelanto de fase para compensar el retraso de fase entre la señal de entrada del excitador y el torque eléctrico del generador. La Figura 2.10 muestra un simple bloque

de primer orden, pero en la práctica dos o mas bloques de primer orden pueden ser utilizadas para lograr la compensación de fase. Los requerimientos de mayor grado de compensación dependen de T'_{do} , generadores hidráulicos con bajos valores de esta constante de tiempo requieren un bloque de primer orden. La característica de fase a ser compensada cambia con las condiciones del sistema, por consiguiente, un compromiso es producir y aceptar una característica para diferentes condiciones de operación del sistema.

b. Filtro pasa alto

Debe tener una constante de tiempo T_w lo suficientemente grande para que las señales asociadas con las oscilaciones de la velocidad del rotor pasen sin sufrir ningún cambio, y sin provocar grandes cambios en la tensión del generador al operar en forma aislada. La constante de tiempo T_w puede asumir valores entre 1 y 20 segundos.

c. Ganancia del estabilizador

La ganancia del estabilizador, tiene un efecto importante sobre el amortiguamiento de las oscilaciones del rotor, ya que determina la cantidad de amortiguamiento introducida por el PSS. El valor se escoge para lograr un alto amortiguamiento de los modos críticos del sistema, sin deteriorar la estabilidad de los modos restantes.

2.7.2 Tipos de PSS

Para cualquier señal de entrada la función de transferencia del estabilizador debe compensar las características de fase y ganancia del sistema de

excitación, del generador y del sistema de potencia, los que colectivamente determinan una función de transferencia (GEPs).

A continuación se presenta los estabilizadores utilizando señales de entrada de: Velocidad, Potencia Eléctrica, combinación de las señales mencionadas anteriormente y Potencia acelerante.

2.7.2.1 PSS con señal de velocidad

La mayor desventaja en el uso de estabilizadores con señal de entrada Δw , es el obtener la señal de variación de velocidad ya que ésta es afectada por modos torsionales, requiriendo filtros para estos modos, lo cual limitan su diseño y por lo tanto restringen su efectividad.

Con el uso de estos PSS se tiene problemas de ruido, frente a los efectos negativos por las vibraciones torsionales, los cuales crecen cuando se compensa en mayor valor el desfase para adelantar, o se usa transductores más sensibles. Para evitar esto se utilizan otros tipos de estabilizadores.

2.7.2.2 PSS con señal de potencia

La principal desventaja de utilizar PSS con señal de entrada ΔP_e , cuando la unidad de generación presenta bruscos cambios de potencia, este tipo de PSS puede originar sobre o subtensiones. Es por ello necesario tener un especial cuidado en el ajuste de este PSS con el fin de evitar este efecto.

2.7.2.3 PSS con señal de la combinación de la velocidad y potencia

El PSS de tipo Δw y ΔP_e , presenta ciertas ventajas frente a los mencionados anteriormente, ya que permite ajustes de sus variables en

un mayor rango sin padecer de resultados negativos. En el ajuste de la ganancia se puede ajustar a la mitad del valor en comparación con otros sin tener problemas de excitación de modos locales.

Este tipo de PSSs no interactúa con modos torsionales, incrementa el amortiguamiento de oscilaciones locales pero tiene un efecto adverso en las oscilaciones interárea.

2.7.2.4 PSS con Señal de potencia acelerante

El uso de la potencia acelerante como una señal de entrada al estabilizador de potencia ha recibido considerable atención debido a bajo nivel de interacción torsional.

CAPITULO III

SISTEMA SIMPLIFICADO PARA EL ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD PERMANENTE

Para realizar el análisis de estabilidad permanente de una determinada central se propone la utilización de un sistema simplificado que conectado a los bornes del generador permite simular las condiciones de carga requeridas para verificar la estabilidad y además refleja las variaciones en la impedancia externa (vista por el generador desde sus bornes), como consecuencia de los cambios topológicos en el sistema de transmisión.

En [8] se ha mostrado que este sistema simplificado o "sistema de prueba" define una cierta carga del generador y una distancia eléctrica entre el generador y el sistema de potencia. Por lo tanto, de modo ficticio, el generador operando a diferentes condiciones de operación, va a estar a diferentes distancias eléctricas del sistema de potencia. De esa manera se probará la estabilidad permanente del sistema de excitación y regulador de tensión (SERT) y el estabilizador de sistemas de potencia (PSS) existentes en una determinada central.

3.1 ESTRUCTURA DEL SISTEMA SIMPLIFICADO

El sistema simplificado considerado se muestra en la Figura 3.1. Esta conformado por dos barras (1 y 2), unidas por una reactancia variable X_{12} ; el generador esta conectado a la barra 1 y entregando una potencia $P_1 + jQ_1$ por

sus bornes. En dicha barra se ha conectado una carga variable que consume una potencia $P_{Sh} + jQ_{Sh}$ y la barra 2 se considera como una barra infinita con tensión $1 \angle 0^\circ$ p.u.

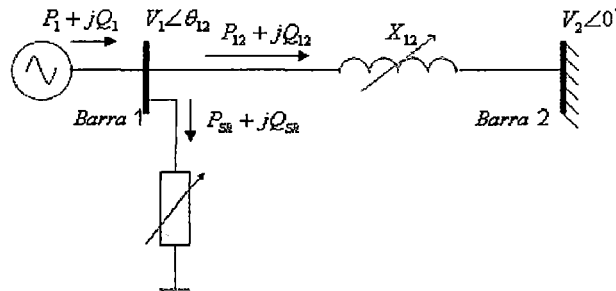


Figura 3.1 Sistema simplificado

Es importante mencionar que de acuerdo a la referencia [4], la frecuencia natural de oscilación (w_n) y el coeficiente de torque sincronizante (K_s) de una máquina sin regulación conectada a una barra infinita mediante una cierta reactancia externa y utilizando el modelo clásico para la máquina síncrona, están dados por las relaciones siguientes:

$$w_n = \sqrt{\frac{K_s w_o}{2H}} \quad 3.1$$

$$K_s = \frac{E'_q V_2}{X_T} \cos \delta_o \quad 3.2$$

Donde:

$w_o = 2\pi f_o$: Frecuencia angular eléctrica nominal de la red.

H : Constante de inercia del generador.

X_T : Reactancia externa vista desde los bornes del generador.

E'_q : Fuerza electromotriz (f.e.m) transitoria.

δ_o : Angulo del rotor.

En estas relaciones, se aprecia que K_s es inversamente proporcional a la reactancia externa X_T y la frecuencia natural de oscilación w_n es proporcional a la raíz cuadrada de K_s . Se puede decir que en el sistema simplificado propuesto, una variación de la reactancia X_{12} va a cambiar la reactancia externa del generador y la frecuencia del modo electromecánico de oscilación entre la central y 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 cubra modos locales e interárea. De esa manera es posible estimar la estabilidad permanente, es decir el desempeño de los controladores del generador en los diferentes puntos de operación posibles.

Por lo mencionado, la central se va a operar a tensión nominal, a potencia activa nominal y con cierto factor de potencia. En ese sentido, 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 la 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 entrega por sus bornes una determinada potencia aparente $P_1 + jQ_1$, frente a diferentes cambios

topológicos producidos en el sistema de potencia, mediante la variación de la reactancia X_{12} . De esta manera se tiene un sistema que puede producir 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} .

3.1.1 Ecuaciones del Sistema Simplificado

Si la máquina esta operando en estado estacionario (Figura 3.1) con una determinada potencia aparente $P_1 + jQ_1$, se establece las siguientes ecuaciones:

$$P_1 = P_{Sh} + P_{12} \quad 3.3$$

$$Q_1 = Q_{Sh} + Q_{12} \quad 3.4$$

Las expresiones de P_{12} y Q_{12} están definidas por:

$$P_{12} = \frac{V_1 V_2}{X_{12}} \text{sen} \theta_{12} \quad 3.5$$

$$Q_{12} = \frac{V_1^2}{X_{12}} - \frac{V_1 V_2}{X_{12}} \text{cos} \theta_{12} \quad 3.6$$

La potencia activa y reactiva consumida por la carga variable se despeja de las ecuaciones (3.3) y (3.4); considerando las ecuaciones (3.5) y (3.6), se obtiene:

$$P_{Sh} = P_1 - \frac{V_1 V_2}{X_{12}} \text{sen} \theta_{12} \quad 3.7$$

$$Q_{Sh} = Q_1 - \left(\frac{V_1^2}{X_{12}} - \frac{V_1 V_2}{X_{12}} \text{cos} \theta_{12} \right) \quad 3.8$$

Se aprecia que las ecuaciones (3.7) y (3.8) 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} . Por esta razón, en el presente trabajo se utiliza una relación práctica entre X_{12} y θ_{12} .

3.1.2 Relación X_{12} - θ_{12}

La función que relaciona X_{12} y el ángulo θ_{12} debe ser escogida de tal modo que para valores muy 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 de saturación entre X_{12} y el ángulo θ_{12} podría utilizarse en forma empírica funciones logarítmicas de la forma $\theta_{12} = a \ln X_{12} + b$ que reproduzcan la forma de la variación mostrada en la Figura 3.2.

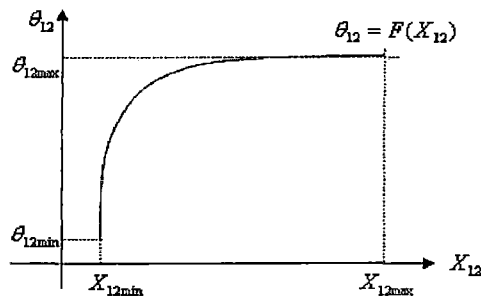


Figura 3.2 Relación X_{12} y θ_{12}

En el presente trabajo, se ha escogido una ecuación del tipo Froelich, muy utilizada para representar características de saturación de núcleos ferromagnéticos [9]:

$$\theta_{12} = \frac{aX_{12}}{b + X_{12}} \quad 3.9$$

Se debe definir un rango de variación de la reactancia X_{12} (Figura 3.2) y el valor máximo del ángulo θ_{12} , entonces se obtiene:

$$\theta_{12 \min} = \arcsen\left(\frac{P_1 X_{12 \min}}{V_1 V_2}\right) \quad 3.10$$

$$a = \left(\frac{\theta_{12 \max}}{X_{12 \max}}\right)(b + X_{12 \max}) \quad 3.11$$

$$b = \frac{X_{12 \max} (\theta_{12 \min} - \theta_{12 \max})}{\left(\theta_{12 \max} - \frac{X_{12 \max}}{X_{12 \min}} \theta_{12 \min}\right)} \quad 3.12$$

En la Figura 3.3 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.

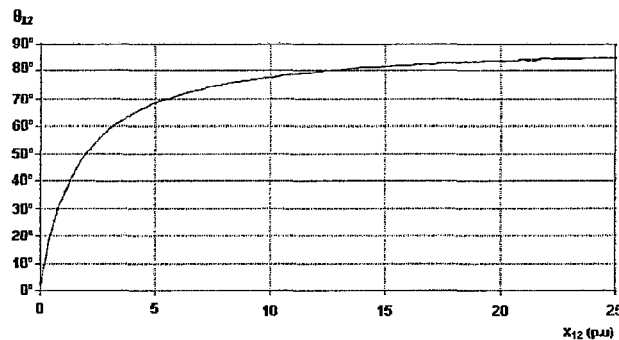


Figura 3.3 Relación $\theta_{12} = f(X_{12})$

3.1.3 Sistema Serie Equivalente

Si el generador en la barra 1 del “sistema simplificado” es operado a tensión nominal y despachado con una potencia de $P_1 + jQ_1$; para luego variar la reactancia X_{12} en un determinado rango, se producen modos de oscilación cuya frecuencia estará comprendida en el rango de las oscilaciones electromecánicas de baja frecuencia. Para reducir el sistema de la Figura 3.1 a un sistema equivalente serie, se tendrá que calcular la impedancia “shunt” Z_{sh} .

$$\bar{Z}_{Sh} = \frac{V_1^2}{(P_{Sh} - jQ_{Sh})} \quad 3.13$$

Donde se obtiene la resistencia y reactancia de la carga variable "shunt":

$$R_{Sh} = \frac{V_1^2 P_{Sh}}{P_{Sh}^2 + Q_{Sh}^2} \quad 3.14$$

$$X_{Sh} = \frac{V_1^2 Q_{Sh}}{P_{Sh}^2 + Q_{Sh}^2} \quad 3.15$$

Luego, la impedancia equivalente (Z_e) vista desde la barra 1 (bornes del generador) resulta:

$$\bar{Z}_e = \frac{\bar{Z}_{12} \bar{Z}_{Sh}}{(\bar{Z}_{12} + \bar{Z}_{Sh})} \quad 3.16$$

Descomponiendo la expresión (3.16) en parte real e imaginaria se obtienen las siguientes expresiones que representan a la resistencia R_e y a la reactancia X_e equivalente.

$$R_e = \frac{R_{Sh} X_{12}^2}{R_{Sh}^2 + (X_{12} + X_{Sh})^2} \quad 3.17$$

$$X_e = \frac{X_{12} R_{Sh}^2 + X_{Sh} (X_{12} + X_{Sh})}{R_{Sh}^2 + (X_{12} + X_{Sh})^2} \quad 3.18$$

Además, la tensión Thevenin vista desde la barra 1 será de la forma siguiente:

$$\bar{V}_S = \frac{\bar{V}_2 \bar{Z}_{Sh}}{(\bar{Z}_{Sh} + \bar{Z}_{12})} \quad 3.19$$

Efectuado el análisis matemático se obtiene de esta manera el sistema equivalente serie simplificado, como se muestra en la Figura 3.4, el cual será sometido a los cambios de la reactancia X_{12} para representar los

diferentes posibles cambios topológicos en el sistema de potencia, vistos por la central desde los bornes del generador.

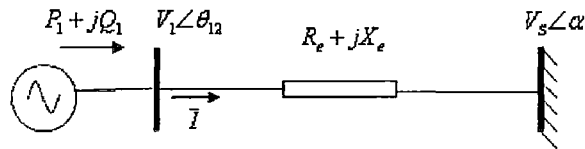


Figura 3.4 Sistema Equivalente

En la Figura 3.4 se observa el generador cuya estabilidad permanente de sus controladores (SERT, PSS) va a ser verificado. La impedancia $R_e + jX_e$ es la impedancia externa (Thevenin) vista por el Generador Síncrono desde sus bornes, que expresa los posibles estados (cambios topológicos) que puede tener el sistema de transmisión, durante la operación de la central.

3.2 MODELO LINEALIZADO DEL GENERADOR SÍNCRONO

El generador síncrono (GS) es un elemento básico en el comportamiento dinámico de un sistema eléctrico. Las oscilaciones de potencia en las líneas de transmisión y los cambios de frecuencia y tensión en condiciones de disturbios dependen de la configuración de la red y de la reacción de los generadores y sus controladores. En los estudios de estabilidad es necesario utilizar una representación adecuada del generador síncrono. Se requiere un modelo comprensible, de fácil implementación en computadoras y que a la vez sea compatible con los controles y elementos en el sistema. Dadas las características del problema de la estabilidad permanente, se requiere que el modelo del generador sea linealizado para una condición de operación.

3.2.1 Modelo del Generador Síncrono

Se ha revisado el modelamiento de los generadores síncronos consignado en referencias bibliográficas tales como [10, 11, 12].

A continuación se resume las ecuaciones del Modelo Transitorio en ambos ejes:

- **Ecuación del Estator:**

$$E'_q - V_q = r_a I_q - X'_d I_d \quad 3.20$$

$$E'_d - V_d = r_a I_d + X'_q I_q \quad 3.21$$

- **Ecuación del Rotor:**

$$T'_{do} pE'_q = E_{fd} - E'_q + (X_d - X'_d) I_d \quad 3.22$$

$$T'_{qo} pE'_d = -E'_d - (X_q - X'_q) I_q \quad 3.23$$

- **Ecuaciones Mecánicas:**

$$p\delta = w_r - w_o \quad 3.24$$

$$P_m = (2H / w_o) p w_r + P_p + P_e \quad 3.25$$

La Potencia electromagnética esta dada por:

$$P_e = E'_d I_d + E'_q I_q - I_d I_q (X'_q - X'_d) \quad 3.26$$

Si la resistencia de armadura fuera despreciable ($r_a = 0$), se cumple que:

$$P_e = V_q I_q + V_d I_d \quad 3.27$$

En el presente trabajo se ha utilizado el Modelo Transitorio en el eje directo, propuesto en la referencia [13], que se obtiene aceptando que el Modelo Transitorio en Ambos Ejes, se puede asumir que $E'_d \approx 0$, con lo cual las ecuaciones se reducen a:

- **Ecuación del Estator:**

$$E'_q - V_q = r_a I_q - X'_d I_d \quad 3.28$$

$$0 - V_d = r_a I_d + X'_q I_q \quad 3.29$$

- **Ecuación del Rotor:**

$$T'_{do} pE'_q = E_{fd} - E'_q + (X'_d - X_d)I_d \quad 3.30$$

- **Ecuaciones Mecánicas:**

$$p\delta = w_r - w_o \quad 3.31$$

$$P_m = (2H/w_o)pw_r + P_p + P_e \quad 3.32$$

En (3.32) la potencia electromagnética esta dada por:

$$P_e = E'_q I_q - I_d I_q (X'_q - X'_d) \quad 3.33$$

Despreciando la resistencia de armadura ($r_a = 0$), se cumple que:

$$P_e = V_q I_q + V_d I_d \quad 3.34$$

En las ecuaciones resumidas, las variables y parámetros tienen la siguiente descripción:

E'_q : f.e.m transitoria en el eje cuadratura

E'_d : f.e.m transitoria en el eje directo

V_q : Tensión en terminales en el eje cuadratura

V_d : Tensión en terminales en el eje directo

I_q : Corriente del GS en el eje cuadratura

I_d : Corriente del GS en el eje directo

r_a : Resistencia de armadura

X'_q : Reactancia subsíncrona en el eje cuadratura

X'_d : Reactancia subsíncrona en el eje directo

X_q : Reactancia síncrona en el eje cuadratura

X_d : Reactancia síncrona en el eje directo

E_{fd} : f.e.m de excitación aplicado al campo del GS controlado por el regulador de tensión

w_r, w_s : Velocidad angular del rotor y Velocidad síncrona.

H : Constante de inercia

P_m : Potencia mecánica de la turbina

P_p : Potencia de pérdidas mecánica por fricción y ventilación

P_e : Potencia electromagnética

T'_{do} : Constante de tiempo transitorio en el eje directo

T'_{qo} : Constante de tiempo transitorio en el eje cuadratura

3.2.2 Ecuaciones del Modelo Linealizado del Generador Síncrono

Las ecuaciones linealizadas del G.S utilizando el modelo transitorio en el eje directo, son:

- **Ecuación del Estator**

Dando la forma matricial a las ecuaciones (3.28) y (3.29) del estator y despreciando la resistencia de armadura se tiene la siguiente expresión linealizada:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_q \\ \Delta V_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & X'_d \\ -X_q & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_q \\ \Delta I_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta E'_q \\ 0 \end{bmatrix} \quad 3.35$$

- **Torque Electromagnético**

Se parte de la ecuación (3.34), en la cual se sustituye V_d y V_q de las ecuaciones del estator (3.28) y (3.29); linealizando resulta la siguiente expresión:

$$\Delta T_e = I_{qo} \Delta E'_q + E'_{qo} \Delta I_q + (X'_d - X_q) I_{do} \Delta I_q + (X'_d - X_q) I_{qo} \Delta I_d \quad 3.36$$

• **Ecuación Diferencial del Rotor**

Se parte de la ecuación (3.30) que al ser linealizada resulta:

$$T'_{do} p \Delta E'_q = \Delta E_{fd} - \Delta E'_q + (X_d - X'_d) \Delta I_d \tag{3.37}$$

• **Ecuaciones Mecánicas**

De la ecuación (3.32), se desprecia (P_p); considerando que en unidades relativas (p.u.) los torques y las potencias son iguales y linealizando resulta la siguiente expresión:

$$\Delta T_m - \Delta T_e = 2Hp \Delta w \tag{3.38}$$

Luego, linealizando la ecuación (3.31) resulta:

$$p \Delta \delta = w_o \Delta w \tag{3.39}$$

3.2.3 Sistemas de Coordenadas Generador - Red

En la Figura 3.5 se muestra los sistemas de coordenadas del generador y la red. Ambos sistemas de coordenadas están desfasados en el ángulo (δ), que depende de la carga del generador y su distancia eléctrica dada por la reactancia externa (X_{12}).

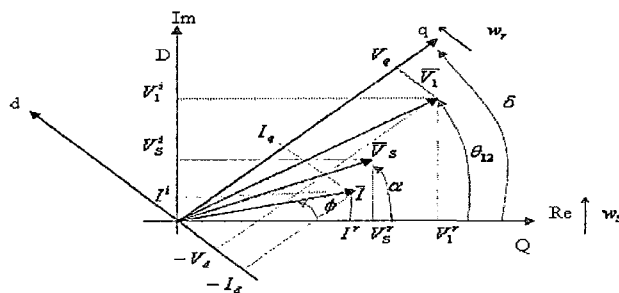


Figura 3.5 Sistema de coordenadas para el generador (d, q) y la red (D, Q)

Se aprecia:

- El Sistema (d - q) rotando a la velocidad angular eléctrica w_r del generador

- El Sistema único (D - Q) (Real, Imaginario) para toda la red, rotando a la velocidad síncrona w_s
- V_1 es la tensión en bornes del generador y V_s es la tensión en el sistema equivalente de la Figura 3.4
- V_d y V_q , proyecciones de la tensión V_1 en los ejes d – q.
- V_s^r y V_s^i , proyecciones de la tensión V_s en los ejes D – Q.
- I_d y I_q , proyecciones de la corriente I del generador en los ejes d – q.
- V_1^r y V_1^i , proyecciones de la tensión V_1 en los ejes D – Q.
- I^r y I^i , proyección de la corriente I de generador en los ejes D – Q.

A partir de la Figura 3.5 se obtienen las siguientes expresiones para la transformación de coordenadas:

$$\begin{bmatrix} V_1^r \\ V_1^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta & -\text{sen}\delta \\ \text{sen}\delta & \cos\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_q \\ V_d \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} V_q \\ V_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta & \text{sen}\delta \\ -\text{sen}\delta & \cos\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^r \\ V_1^i \end{bmatrix} \quad 3.40$$

$$\begin{bmatrix} I^r \\ I^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta & -\text{sen}\delta \\ \text{sen}\delta & \cos\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_q \\ I_d \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} I_q \\ I_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta & \text{sen}\delta \\ -\text{sen}\delta & \cos\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I^r \\ I^i \end{bmatrix} \quad 3.41$$

Asimismo, las proyecciones de la tensión V_s en el sistema (D - Q) de la red son:

$$V_s^r = V_s \cos\alpha \quad 3.42$$

$$V_s^i = V_s \text{sen}\alpha \quad 3.43$$

3.3 MODELO LINEALIZADO DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN

En el sistema serie equivalente de la Figura 3.4, el sistema de transmisión está representado por la impedancia $R_e + jX_e$.

El objetivo de este acápite es incorporar el efecto del sistema de transmisión en las ecuaciones del estator (tensiones y corrientes).

La tensión en bornes del GS expresada utilizando el sistema de referencia (Real, Imaginario) de la red resulta:

$$\bar{V}_1 = (R_e + jX_e)\bar{I} + \bar{V}_S \quad 3.44$$

$$\bar{V}_1 = V_1^r + jV_1^i \quad 3.45$$

$$\bar{I} = I^r + jI^i \quad 3.46$$

$$\bar{V}_S = V_S^r + jV_S^i \quad 3.47$$

Reemplazando las expresiones (3.45), (3.46) y (3.47) en (3.44) se obtiene la ecuación matricial siguiente:

$$\begin{bmatrix} V_1^r \\ V_1^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_e & -X_e \\ X_e & R_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I^r \\ I^i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_S^r \\ V_S^i \end{bmatrix} \quad 3.48$$

Es necesario cambiar la referencia de la ecuación (3.48) a los ejes (d-q), para ello se utiliza las expresiones (3.40) y (3.41), resultando:

$$\begin{bmatrix} V_q \\ V_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_e & -X_e \\ X_e & R_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_q \\ I_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos\delta & \text{sen}\delta \\ -\text{sen}\delta & \cos\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_S^r \\ V_S^i \end{bmatrix} \quad 3.49$$

Asimismo, reemplazando las expresiones (3.42) y (3.43) en (3.49), se obtiene:

$$\begin{bmatrix} V_q \\ V_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_e & -X_e \\ X_e & R_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_q \\ I_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_S \cos(\delta - \alpha) \\ -V_S \text{sen}(\delta - \alpha) \end{bmatrix} \quad 3.50$$

Linealizando la ecuación matricial (3.50):

$$\begin{bmatrix} \Delta V_q \\ \Delta V_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_e & -X_e \\ X_e & R_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_q \\ \Delta I_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -V_S \text{sen}(\delta_o - \alpha)\Delta\delta \\ -V_S \cos(\delta_o - \alpha)\Delta\delta \end{bmatrix} \quad 3.51$$

Igualando las expresiones linealizadas del sistema externo (3.51) y del estator de la maquina síncrona (3.35), se despejan las corrientes obteniendo:

$$\begin{bmatrix} \Delta I_q \\ \Delta I_d \end{bmatrix} = \frac{1}{K} \begin{bmatrix} V_s (R_e \text{sen}(\delta_o - \alpha) + (X'_d + X_e) \text{cos}(\delta_o - \alpha)) & R_e \\ V_s (-(X_q + X_e) \text{sen}(\delta_o - \alpha) + R_e \text{cos}(\delta_o - \alpha)) & -(X_q + X_e) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta E'_q \end{bmatrix} \quad 3.52$$

Donde:

$$K = R_e^2 + (X_e + X_q)(X_e + X'_d) \quad 3.53$$

3.4 MODELO LINEALIZADO DEL SISTEMA EQUIVALENTE

Habiendo elaborado el modelo del GS, en este acápite se incluye el efecto del sistema de transmisión, para obtener el modelo linealizado del sistema equivalente de la Figura 3.4.

Utilizando este modelo se va analizar la estabilidad permanente del sistema, mediante la verificación del comportamiento de sus controladores.

3.4.1 Ecuación del Torque Electromagnético

Sustituyendo las corrientes linealizadas de la expresión (3.52), en el torque electromagnético de la expresión (3.36), se obtiene la ecuación linealizada del torque electromagnético.

$$\Delta T_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta E'_q \quad 3.54$$

Donde:

$$K_1 = (E'_{qo} - I_{do}(X_q - X'_d)) \left[\frac{R_e V_s}{K} \text{sen}(\delta_o - \alpha) + \frac{V_s}{K} (X'_d + X_e) \text{cos}(\delta_o - \alpha) \right] - I_{qo}(X_q - X'_d) \left[\frac{R_e V_s}{K} \text{cos}(\delta_o - \alpha) - \frac{V_s}{K} (X_q + X_e) \text{sen}(\delta_o - \alpha) \right] \quad 3.55$$

$$K_2 = \frac{I_{qo}}{K} (R_e^2 + (X_e + X_q)^2) + \frac{I_{do} R_e}{K} (E'_{qo} - (X_q - X'_d)) \quad 3.56$$

3.4.2 Ecuación Diferencial del Rotor

En la ecuación diferencial del rotor linealizada (3.37), se reemplaza la corriente ΔI_d dada por la ecuación (3.52) y luego se aplica la transformada

de Laplace, se obtiene:

$$\Delta E'_{q(s)} = -\frac{K_3 K_4}{1 + sT'_{do} K_3} \Delta \delta_{(s)} + \frac{K_3}{1 + sT'_{do} K_3} \Delta E_{fd(s)} \quad 3.57$$

Donde:

$$K_3 = \frac{1}{1 + \frac{(X_d - X'_d)(X_q + X_e)}{K}} \quad 3.58$$

$$K_4 = \frac{V_s (X_d - X'_d)}{K} [(X_q + X_e) \text{sen}(\delta_o - \alpha) - R_e \text{cos}(\delta_o - \alpha)] \quad 3.59$$

3.4.3 Ecuación de la Tensión en bornes del Generador

La tensión en bornes del generador esta dada por:

$$V_1^2 = V_d^2 + V_q^2 \quad 3.60$$

Linealizando la ecuación (3.60) alrededor de un punto de operación, se tiene:

$$\Delta V_1 = \frac{V_{do}}{V_{1o}} \Delta V_d + \frac{V_{qo}}{V_{1o}} \Delta V_q \quad 3.61$$

Reemplazando la tensión ΔV_d , ΔV_q de (3.51) y las corrientes ΔI_d , ΔI_q de (3.52), resulta:

$$\Delta V_1 = K_6 \Delta E'_q + K_5 \Delta \delta \quad 3.62$$

Donde:

$$K_5 = -\frac{V_{do}}{V_{1o}} \left(\frac{X_q V_s}{K} \right) [R_e \text{sen}(\delta_o - \alpha) + (X'_d + X_e) \text{cos}(\delta_o - \alpha)] + \quad 3.63$$

$$\frac{V_{qo}}{V_{1o}} \left(\frac{X'_d V_s}{K} \right) [R_e \text{cos}(\delta_o - \alpha) - (X_q + X_e) \text{sen}(\delta_o - \alpha)]$$

$$K_6 = \frac{V_{qo}}{V_{1o}} \left[1 - \frac{X'_d}{K} (X_q + X_e) \right] - \frac{V_{do}}{V_{1o}} \left[\frac{R_e X_q}{K} \right] \quad 3.64$$

3.4.4 Ecuación del Transductor de Tensión

En la Figura 3.6 se esquematiza el diagrama de control de tensión del GS.

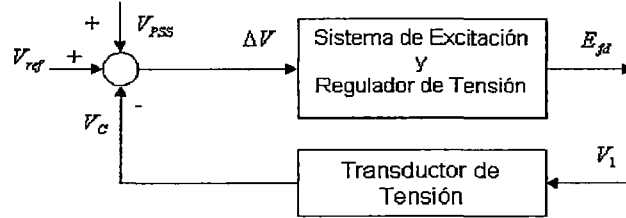


Figura 3.6 Diagrama de control del Transductor de Tensión

La función de transferencia del transductor de tensión puede ser expresada

por $\frac{1}{1+sT_R}$, donde T_R es la constante de tiempo del transductor de tensión.

En el comparador (sumador), omitiendo la señal proveniente del estabilizador (V_{PSS}), se cumple que:

$$V_{ref} - V_C = \Delta V \quad 3.65$$

Donde:

V_{ref} : Tensión de referencia del regulador de tensión

V_C : Señal de salida del transductor de tensión

ΔV : Señal error al regulador de tensión

Por lo tanto la relación entre V_C y la tensión V_1 en bornes del generador es:

$$V_C = V_1 \left(\frac{1}{1+sT_R} \right) \quad 3.66$$

Reemplazando la expresión (3.66) en (3.65) y linealizando, se tiene:

$$\Delta V_{ref} - \frac{\Delta V_1}{1+sT_R} = \Delta V \quad 3.67$$

3.4.5 Diagrama de Bloques del Modelo Linealizado

En la Figura 3.7 se presenta el diagrama de bloques linealizado del generador, conectado a una barra infinita mediante un sistema de transmisión equivalente $R_e + jX_e$ mostrado en la Figura 3.4.

Aplicando la transformada de Laplace a las ecuaciones (3.38), (3.39), (3.54), (3.62), (3.67) y considerando (3.57) resulta:

$$\Delta T_m(s) - \Delta T_e(s) = s2H\Delta w(s) \quad 3.68$$

$$s\delta(s) = w_o\Delta w(s) \quad 3.69$$

$$\Delta T_e(s) = K_1\Delta\delta(s) + K_2\Delta E'_q(s) \quad 3.70$$

$$\Delta V_1(s) = K_6\Delta E'_q(s) + K_5\Delta\delta(s) \quad 3.71$$

$$\Delta V_{ref}(s) - \frac{\Delta V_1(s)}{1+sT_R} = \Delta V(s) \quad 3.72$$

$$\Delta E'_q(s) = -\frac{K_3K_4}{1+sT'_{do}K_3}\Delta\delta(s) + \frac{K_3}{1+sT'_{do}K_3}\Delta E_{fd}(s) \quad 3.73$$

Luego, partir de las ecuaciones (3.68), (3.69), (3.70), (3.71), (3.72) y (3.73) se construye el diagrama de bloques de la Figura 3.7

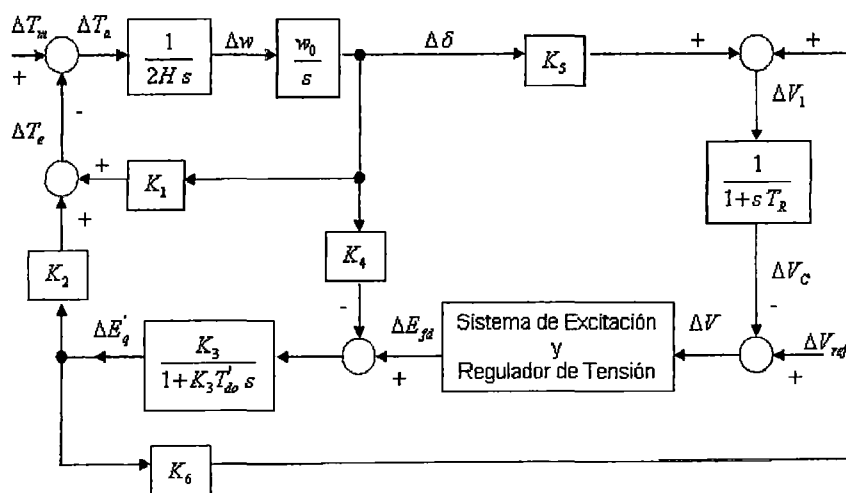


Figura 3.7 Diagrama de bloques linealizado de un generador conectado a una barra infinita

Se aprecia que en el diagrama de bloques linealizado de la Figura 3.7 se ha previsto un bloque para el Sistema de Excitación y Regulación de Tensión (SERT), que tiene la central a ser analizada.

3.4.6 Incorporación del Efecto del Estabilizador de Sistemas de Potencia

En la Figura 3.8 se muestra el diagrama de bloques linealizado incluyendo un bloque genérico corresponde al estabilizador de sistemas de potencia. Se debe mencionar que la señal de entrada al PSS puede ser seleccionada entre las señales de cambio en la velocidad (Δw), cambio en la potencia activa del generador (ΔP), una combinación entre ambas variables (Δw y ΔP) y la integral de potencia acelerante ($\int P_{ac} dt$).

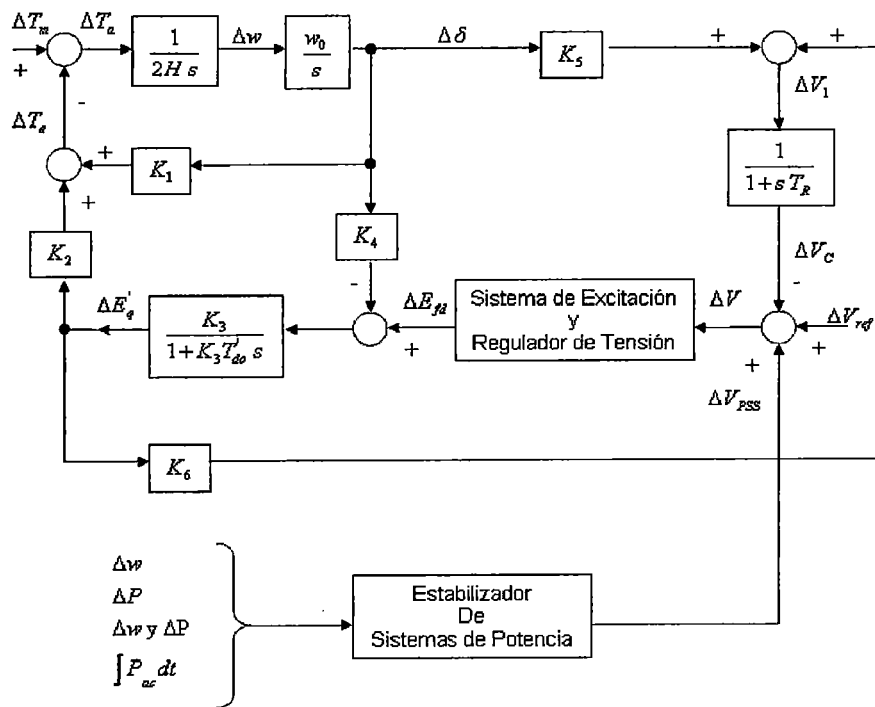


Figura 3.8 Diagrama de bloques linealizado incorporando el PSS

CAPITULO IV

APLICACIÓN A LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA CAÑÓN DEL PATO

4.1 DESCRIPCION GENERAL DE LA 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. 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 Figura 4.1.

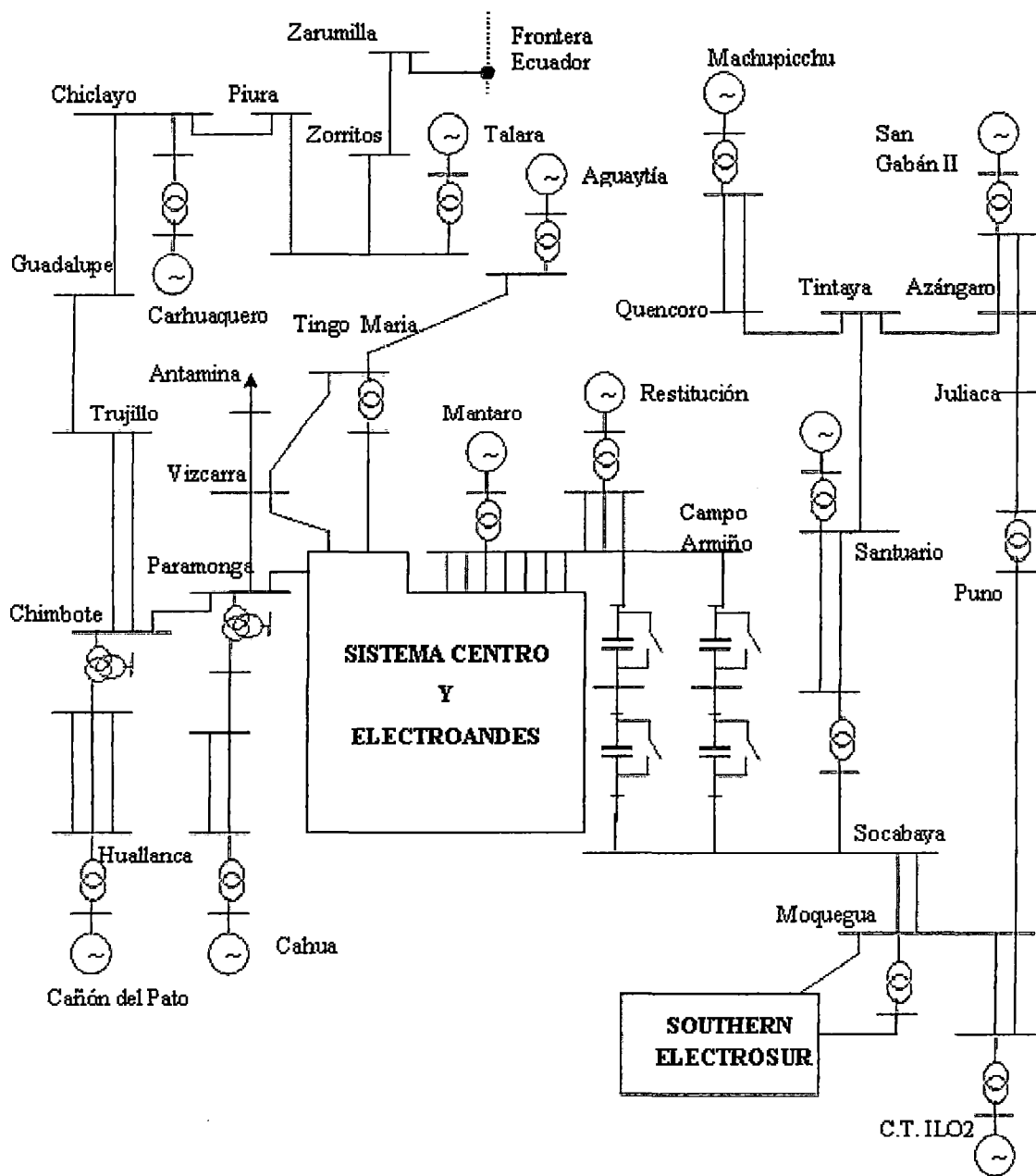


Figura 4.1 Esquema simplificado del SEIN con la C.H. Cañón del Pato

4.1.1 Parámetros de los Equipos de la C.H Cañón del Pato

Las principales características y parámetros de los equipos de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato tales como los generadores, transformadores y sistema de excitación son los siguientes [14]:

- **Generador Síncrono:**

Grupos Generadores			
Tipo	Hidroeléctrico – 20 polos (W325/150/20)		
Potencia nominal	A_N	49,260	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.
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}	4,279	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 4.1 Parámetros del Generador

- **Transformador elevador:**

Transformador			
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 4.2 Características del Transformador

• **Sistema de Excitación:**

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_{II}	0,45	MVA
Tensión secundaria del transformador de excitación	V_S	325	V
Tensión máxima de excitación	V_{CP}	410	V
Tensión mínima de excitación	V_{CII}		V

Tabla 4.3 Características del Sistema de excitación

4.1.2 Regulador de Tensión

El diagrama de bloques del sistema de excitación y regulación de tensión (SERT), [14] se muestra en la Figura 4.2.

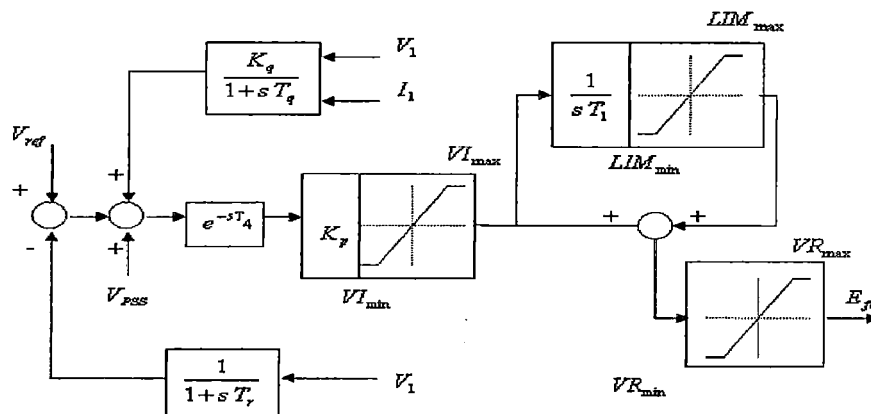


Figura 4.2 Diagrama de bloques del SERT de la C.H. Cañón del Pato.

Para el presente trabajo se ha realizado las simulaciones sin considerar el bloque de compensación reactiva del AVR (Cuyas señales de entrada son V_1 e I_1), ya que con su inclusión no se aprecia modificaciones en el cálculo de los eigenvalores para la estabilidad permanente. Las simulaciones que verifican lo mencionado se han consignado en el Anexo A.

Hasta antes de las pruebas de la referencia [14], el SERT de los grupos de la C.H. Cañón del Pato tenía los parámetros que se muestran en Tabla 4.4.

T_1 (s)	T_4 (s)	T_r (s)	K_p (*)	VI_{\max}	VI_{\min}	LIM_{\max}	LIM_{\min}	$V_{R\max}$	$V_{R\min}$
1,72	0,02	0,005	11,67	+10	-10	+4	-1	+10	-10

Tabla 4.4 Parámetros del AVR

(*) Valor promedio representativo, ya que la ganancia K_p era 10,0 en las unidades 1, 2, 3 y 5; en las unidades 4 y 6 estaba ajustada en 15,0.

Los parámetros de la Figura 4.2 y cuyos ajustes se muestran en la Tabla 4.4 tienen la siguiente denominación:

- T_1 : Constante de tiempo de integración.
- T_4 : Constante de tiempo de amortiguación del AVR.
- T_r : Constante de tiempo del traductor de potencia reactiva.
- T_q : Constante de tiempo del bloque compensador de potencia reactiva.
- K_q : Ganancia del bloque compensador de potencia reactiva.
- K_p : Ganancia proporcional del AVR.
- VI_{\max} : Limite interno máximo del error del integrador.
- VI_{\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_{Rmax} : Tensión máxima del puente de tiristores.

V_{Rmin} : Tensión mínima del puente de tiristores.

4.1.3 Estabilizador de Sistemas de Potencia

El estabilizador de sistemas de potencia (PSS) del regulador de tensión de los grupos estaba inicialmente provisto de un canal de potencia activa [15], tal como se muestra en el diagrama de bloques de la Figura 4.3.

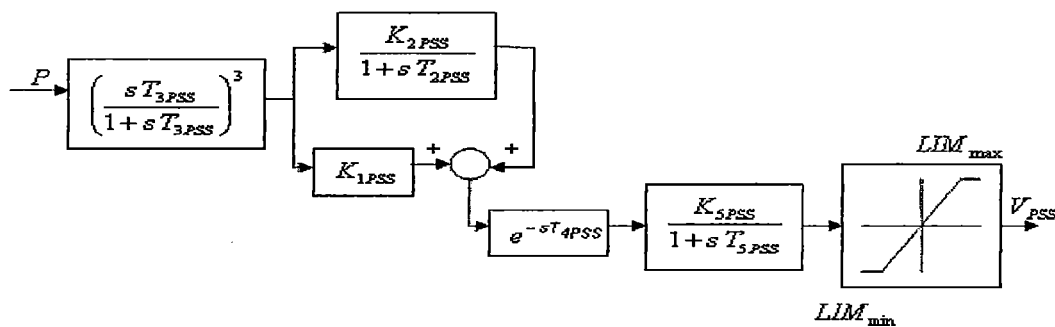


Figura 4.3 Diagrama de bloques del PSS de la C.H. Cañón del Pato.

Los principales parámetros y valores límites de este PSS, que procesa la señal de potencia, son:

K_{1PSS}	K_{2PSS}	K_{5PSS}	T_{2PSS} (s)	T_{3PSS} (s)	T_{4PSS} (s)	T_{5PSS} (s)	LIM_{max}	LIM_{min}
0,3	0,075	1,49	2,0	4,4	0,01	0,011	+0,05	-0,05

Tabla 4.5 Parámetros del PSS

Donde:

K_{1PSS} , K_{2PSS} y K_{5PSS} : Ganancias de compensación del PSS.

T_{2PSS} , T_{3PSS} y T_{4PSS} : Constantes de tiempo.

LIM_{max} y LIM_{min} : Limite máximo y mínimo de operación del integrador.

4.2 RELACIONES PARA EL CALCULO DE LOS COEFICIENTES DE ESTABILIDAD PERMANENTE

Los valores de las variables del generador en estado estacionario dependen de sus condiciones de operación caracterizadas por la tensión en bornes y por las potencias activa y reactiva P_1 , Q_1 entregadas por sus bornes a la red. La Figura 4.4 muestra una cierta condición de operación.

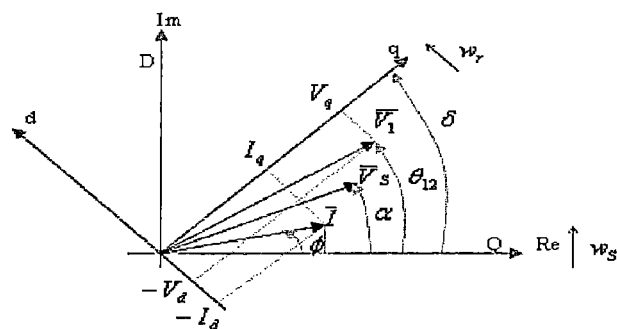


Figura 4.4 Condiciones iniciales

Asumiendo que todas las magnitudes de la Figura 4.4 están expresadas en p.u, los valores de las variables del sistema en la condición de operación dada se obtienen utilizando el siguiente procedimiento:

- 1) La tensión en bornes y corriente del generador

$$\bar{V}_1 = V_1 \angle \theta_{12} \quad 4.1$$

$$\bar{I} = \frac{P_1 - jQ_1}{\bar{V}_1^*} \quad 4.2$$

- 2) Expresión para calcular el ángulo (δ)

$$\bar{E} = \bar{V}_1 + (r_a + jX_q)\bar{I} \quad 4.3$$

- 3) La tensión V_s

$$\bar{V}_s = \frac{V_2 Z_{sh}}{(Z_{sh} + Z_{12})} \quad 4.4$$

4) De acuerdo a la Figura 4.4

$$I_q = I \cos(\delta - \phi) \quad 4.5$$

$$I_d = -I \sin(\delta - \phi) \quad 4.6$$

$$V_q = V_1 \cos(\delta - \theta_{12}) \quad 4.7$$

$$V_d = -V_1 \sin(\delta - \theta_{12}) \quad 4.8$$

5) Según la ecuación del estator

$$E'_q = r_a I_q - X'_d I_d + V_q \quad 4.9$$

6) La impedancia equivalente Z_e

$$X_e = \frac{X_{12}(R_{Sh}^2 + X_{Sh}(X_{12} + X_{Sh}))}{R_{Sh}^2 + (X_{12} + X_{Sh})^2} \quad 4.10$$

$$R_e = \frac{R_{Sh} X_{12}^2}{R_{Sh}^2 + (X_{12} + X_{Sh})^2} \quad 4.11$$

Una vez obtenidas las variables para la condición de operación del sistema se calcula los coeficientes de estabilidad permanente (K_i), cuyas ecuaciones son:

$$\bullet \quad K_1 = (E'_{q0} - I_{d0}(X_q - X'_d)) \left[\frac{R_e V_s}{K} \sin(\delta_o - \alpha) + \frac{V_s}{K} (X'_d + X_e) \cos(\delta_o - \alpha) \right] - I_{q0}(X_q - X'_d) \left[\frac{R_e V_s}{K} \cos(\delta_o - \alpha) - \frac{V_s}{K} (X_q + X_e) \sin(\delta_o - \alpha) \right] \quad 4.12$$

$$\bullet \quad K_2 = \frac{I_{q0}}{K} (R_e^2 + (X_e + X_q)^2) + \frac{I_{d0} R_e}{K} (E'_{q0} - (X_q - X'_d)) \quad 4.13$$

$$\bullet \quad K_3 = \frac{1}{1 + \frac{(X_d - X'_d)(X_q + X_e)}{K}} \quad 4.14$$

$$\bullet \quad K_4 = \frac{V_s (X_d - X'_d)}{K} \left[(X_q + X_e) \sin(\delta_o - \alpha) - R_e \cos(\delta_o - \alpha) \right] \quad 4.15$$

$$K_5 = -\frac{V_{do}}{V_{1o}} \left(\frac{X_q V_S}{K} \right) \left[R_e \text{sen}(\delta_o - \alpha) + (X'_d + X_e) \cos(\delta_o - \alpha) \right] + \quad 4.16$$

$$\frac{V_{qo}}{V_{1o}} \left(\frac{X'_d V_S}{K} \right) \left[R_e \cos(\delta_o - \alpha) - (X_q + X'_e) \text{sen}(\delta_o - \alpha) \right]$$

$$K_6 = \frac{V_{qo}}{V_{1o}} \left[1 - \frac{X'_d}{K} (X_q + X_e) \right] - \frac{V_{do}}{V_{1o}} \left[\frac{R_e X_q}{K} \right] \quad 4.17$$

$$K = R_e^2 + (X_e + X_q)(X_e + X'_d) \quad 4.18$$

Para determinar los signos que pueden adoptar los coeficientes, se ha analizado las expresiones utilizadas para el cálculo. Luego del análisis es posible enunciar los siguientes comentarios:

- Independiente de las condiciones de operación, los coeficientes K_1 , K_2 , K_3 , K_4 y K_6 siempre resultarán positivos y sus magnitudes muestran cierta dependencia de la impedancia $R_e + jX'_e$.
- El coeficiente K_5 puede ser negativo para ciertos valores del ángulo δ_o , ya que el segundo término de la expresión (4.16) se vuelve negativo y se suma al primer término que siempre es pequeño y positivo.

4.3 CALCULO DE LOS COEFICIENTES DE ESTABILIDAD PERMANENTE DE LA C.H. CAÑÓN DEL PATO

El cálculo de los coeficientes (K_i) de estabilidad permanente se realiza en dos escenarios. En el primero, se considera una determinada topología para el SEIN y se analiza el efecto de las condiciones de operación de la central sobre los coeficientes de estabilidad permanente.

Luego, en el segundo escenario, para una condición de operación dada de la central, se analiza el efecto de los cambios en las condiciones del operación

del SEIN sobre los K_i . Estos cambios topológicos están representados por cambios en la impedancia externa vista por la central.

Para determinar la naturaleza de los coeficientes de estabilidad permanente se ha elaborado el programa CALCULO DE COEFICIENTES DE ESTABILIDAD PERMANENTE utilizando el software Matlab Versión 7.2, con el cual se ha simulado diversas condiciones de operación y cuyos resultados muestran el comportamiento de los coeficientes.

4.3.1 Efecto de las Condiciones de Operación de la Central

Para evaluar el efecto de las condiciones de operación de la central hidroeléctrica Cañón del Pato sobre la estabilidad permanente se ha definido diversas condiciones de operación considerando un valor constante de X_{12} igual a 0,42 p.u. Esta magnitud es un valor representativo de la reactancia equivalente del SEIN vista desde los bornes de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato, en condiciones normales, es decir, evacuando su producción mediante la operación de tres líneas de transmisión. Se debe añadir que cuando la central evacua toda su producción mediante dos líneas de transmisión el valor representativo de X_{12} es aproximadamente 0,52 p.u.

Para las simulaciones se ha seleccionado escenarios de operación con despachos de generación de 100%, 75% y 50% del valor nominal, que representan potencias activas de 0,95 p.u., 0,713 p.u. y 0,475 p.u.

Asimismo, para cada escenario se ha variado la potencia reactiva en los rangos mostrados en la Tabla 4.6

1 ^{er} caso		2 ^{do} caso		3 ^{er} caso	
P ₁	X ₁₂	P ₁	X ₁₂	P ₁	X ₁₂
0,95	0,42	0,712	0,42	0,475	0,42
- 0,156 < Q ₁ < 0,312		- 0,351 < Q ₁ < 0,702		- 0,440 < Q ₁ < 0,879	

Tabla 4.6 Escenarios de simulación

- Los resultados de las simulaciones del 1^{er} caso se muestran en la Figura 4.5.

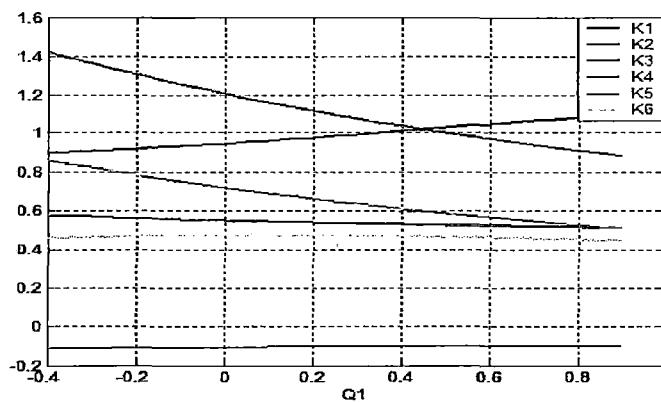


Figura 4.5 Coeficientes de Estabilidad Permanente con: P₁= 0,95, X₁₂= 0,42 y Q₁ variable

Se aprecia que a excepción de K₅ todos los coeficientes de estabilidad permanente son positivos. Los rangos de variación de los coeficientes de estabilidad permanente para la C.H. Cañón del Pato se muestran en la Tabla 4.7.

K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	K ₆
0,89 – 1,09	1,42 – 0,88	0,57 – 0,50	0,85 – 0,50	-0,11 – -0,10	0,45 – 0,44

Tabla 4.7 Variación de los coeficientes

- Las simulaciones del 2^{do} caso se muestra en la Figura 4.6.

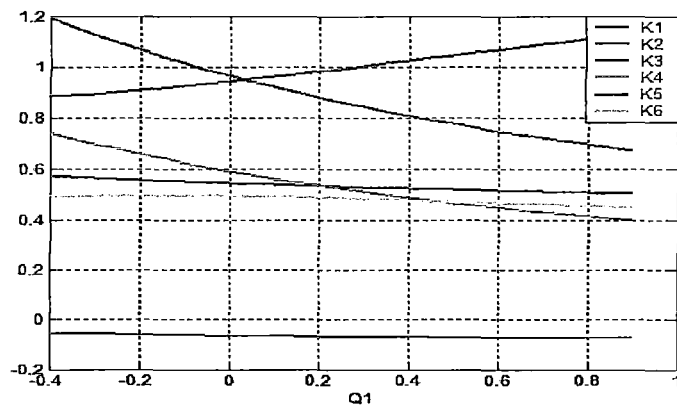


Figura 4.6 Coeficientes de Estabilidad Permanente con: $P_1= 0,712$, $X_{12}= 0,42$ y Q_1 variable

Para este caso se aprecia que se mantiene las características de los signos de los coeficientes. Los rangos de variación de los coeficientes de estabilidad permanente se muestran en la Tabla 4.8.

K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6
0,88 – 1,13	1,19 – 0,67	0,57 – 0,50	0,74 – 0,40	-0,05 – -0,07	0,49 – 0,45

Tabla 4.8 Variación de los coeficientes

- Las simulaciones del 3^{er} caso se muestran en la Figura 4.7.

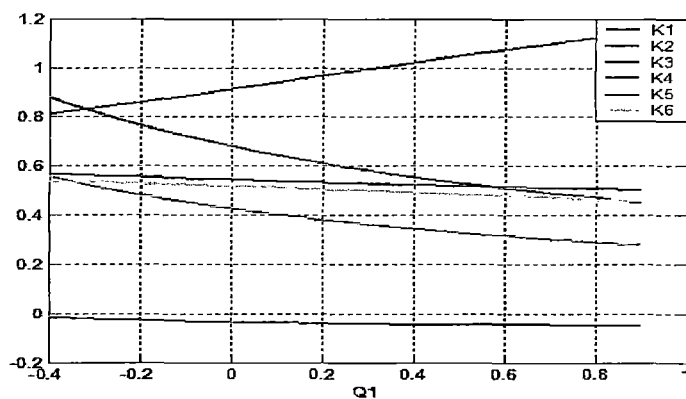


Figura 4.7 Coeficientes de Estabilidad Permanente con $P_1= 0,475$, $X_{12}= 0,42$ y Q_1 variable

En este último caso se observa que también se mantiene la naturaleza de los signos de los coeficientes. Los rangos de variación de los coeficientes de la estabilidad permanente se muestran en la Tabla 4.9.

K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6
0,81 – 1,14	0,88 – 0,45	0,57 – 0,50	0,56 – 0,28	-0,01 – -0,04	0,53 – 0,45

Tabla 4.9 Variación de los coeficientes

Se observa en las Figuras 4.5, 4.6 y 4.7, que con una reactancia X_{12} igual a 0,42 p.u y en todos los escenarios de potencia activa (0,95 p.u, 0,713 p.u y 0,475 p.u respectivamente), los coeficientes de estabilidad permanente K_1 , K_2 , K_3 , K_4 y K_6 son positivos en ambas zonas de operación (sobrecitada y subexcitada). Sin embargo el coeficiente K_5 resulta negativo en todos los casos.

4.3.2 Influencia de las Condiciones de Operación del SEIN

En estos casos para cada condición de operación del generador (sobrecitado o subexcitado), se ha variado la reactancia X_{12} desde un valor mínimo de 0,025 p.u. hasta un máximo de 1,0 p.u, para representar cambios topológicos importantes en el SEIN que alejan eléctricamente a la C.H. Cañón del Pato. En las Tablas 4.10 y 4.11 se resumen los diferentes casos de operación de la central en estudio, para la condición de sobrecitación y subexcitación del generador.

Reactancia	1 ^{er} caso		2 ^{do} caso		3 ^{er} caso	
	P_1	Q_1	P_1	Q_1	P_1	Q_1
$0,025 < X_{12} < 1$	0,95	0,312	0,712	0,702	0,475	0,879

Tabla 4.10 Casos de operación sobrecitado

Reactancia	1 ^{er} caso		2 ^{do} caso		3 ^{er} caso	
	P_1	Q_1	P_1	Q_1	P_1	Q_1
$0,025 < X_{12} < 1$	0,95	-0,187	0,712	-0,281	0,475	-0,352

Tabla 4.11 Casos de operación subexcitado

Con la información de las Tablas 4.10 y 4.11 se procesa el programa para obtener las características de los coeficientes de estabilidad permanente cuando varían las condiciones de operación en el resto del SEIN y el generador de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato se aleja eléctricamente.

- Los resultados de las simulaciones cuando el **Generador opera Sobrexcitado** se muestran en las Figuras 4.8, 4.9 y 4.10.

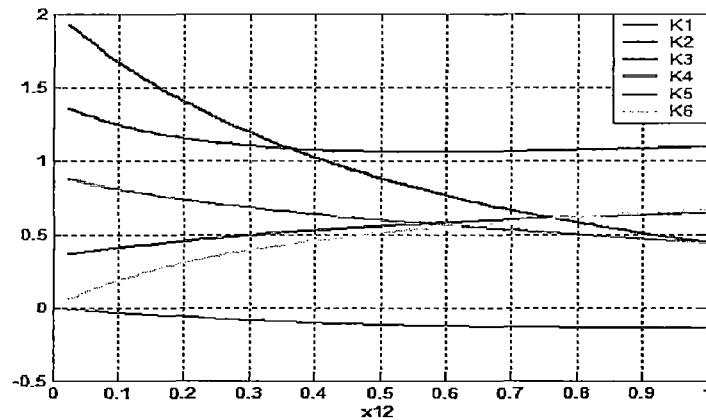
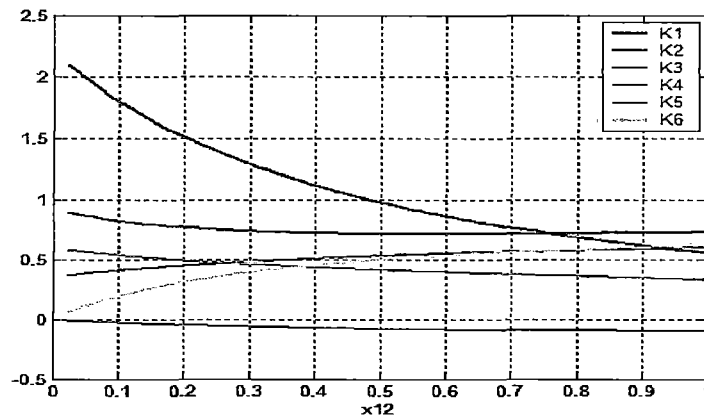


Figura 4.8 Coeficientes de Estabilidad Permanente con: $P_1= 0,950$, $Q_1= 0,31$ y X_{12} variable

Se observa que todos los coeficientes de estabilidad permanente son positivos a excepción de K_5 . Los rangos de variación se muestran en la Tabla 4.12.

K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6
1,93 – 0,44	1,36 – 1,09	0,36 – 0,64	0,88 – 0,44	-0,007 – -0,13	0,05 – 0,66

Tabla 4.12 Variación de los coeficientes

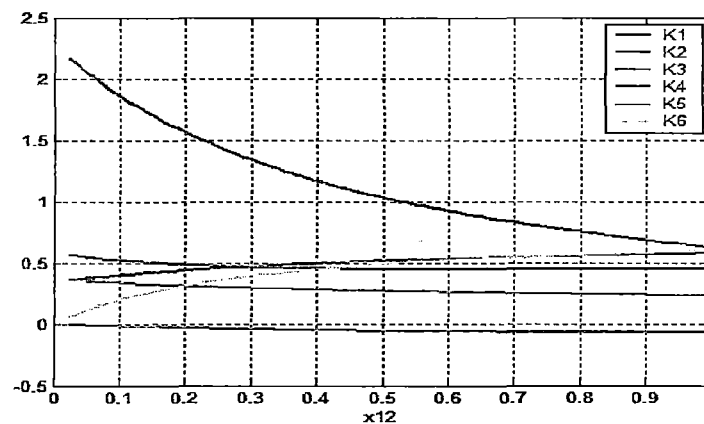


**Figura 4.9 Coeficientes de Estabilidad Permanente con:
 $P_1= 0,712$, $Q_1= 0,702$ y X_{12} variable**

Se aprecia en la Figura 4.9 que los coeficientes mantienen su naturaleza conservando los signos que los caracterizan. Los rangos de variación de los coeficientes de estabilidad permanente se muestran en la Tabla 4.13.

K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6
2,10 – 0,55	0,89 – 0,73	0,36 – 0,60	0,58 – 0,32	-0,006 – -0,09	0,06 – 0,62

Tabla 4.13 Variación de los coeficientes



**Figura 4.10 Coeficientes de Estabilidad Permanente con:
 $P_1= 0,475$, $Q_1= 0,879$ y X_{12} variable**

Para la condición de operación que muestra la Figura 4.10, se observan que los coeficientes mantienen su naturaleza de los signos. Los rangos de variación de los coeficientes de estabilidad permanente se muestran en la Tabla 4.14.

K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6
2,17 – 0,63	0,57 – 0,45	0,36 – 0,58	0,37 – 0,22	-0,004 – -0,06	0,06 – 0,60

Tabla 4.14 Variación de los coeficientes

En las Figuras 4.8, 4.9 y 4.10 (Generador operando sobreexcitado) se observa que para las diferentes condiciones de potencia activa y reactiva despachadas por el generador, los coeficientes de estabilidad permanente K_1 , K_2 , K_3 , K_4 y K_6 son positivos, mientras que K_5 es negativo para todo valor de la reactancia X_{12} . Se puede decir que K_5 se vuelve más negativo al incrementarse el valor X_{12} respecto de los valores que asume en condiciones normales.

- Los resultados de las simulaciones cuando el **Generador opera Subexcitado** se muestran en las Figuras 4.11, 4.12 y 4.13.

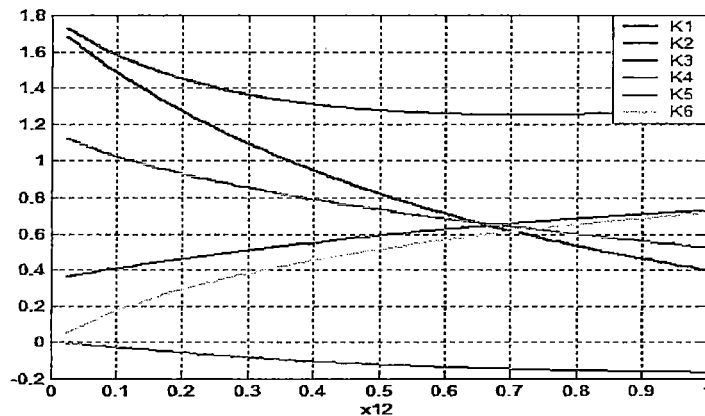


Figura 4.11 Coeficientes de Estabilidad Permanente con: $P_1=0,950$, $Q_1=-0,187$ y X_{12} variable

Se aprecia que a excepción de K_5 todos los coeficientes son positivos manteniendo sus características para esta condición de operación.

Los rangos de variación de los coeficientes para esta condición de operación se muestran en la Tabla 4.15.

K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6
1,68 - 0,40	1,73 - 1,27	0,36 - 0,72	1,112 - 0,52	-0,006 - -0,16	0,05 - 0,71

Tabla 4.15 Variación de los coeficientes

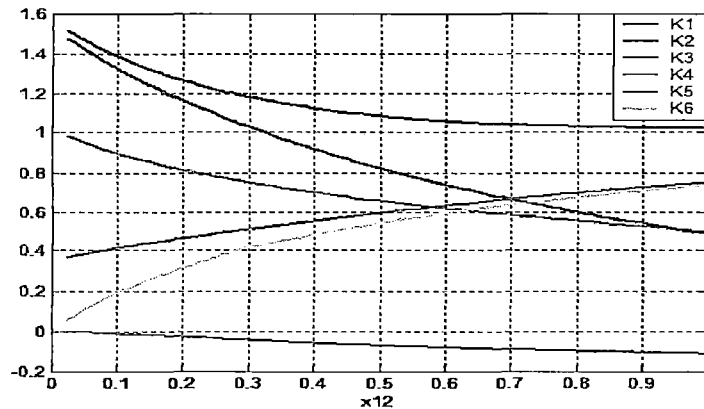


Figura 4.12 Coeficientes de Estabilidad Permanente con: $P_1=0,712$, $Q_1=-0,281$ y X_{12} variable

Para esta condición de operación se aprecia que las características naturales de los signos de los coeficientes de estabilidad permanente se mantienen. Los rangos de variación de los coeficientes se muestran en la Tabla 4.16.

K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6
1,47 - 0,49	1,51 - 1,02	0,36 - 0,75	0,98 - 0,50	-0,001 - -0,11	0,05 - 0,73

Tabla 4.16 Variación de los coeficientes

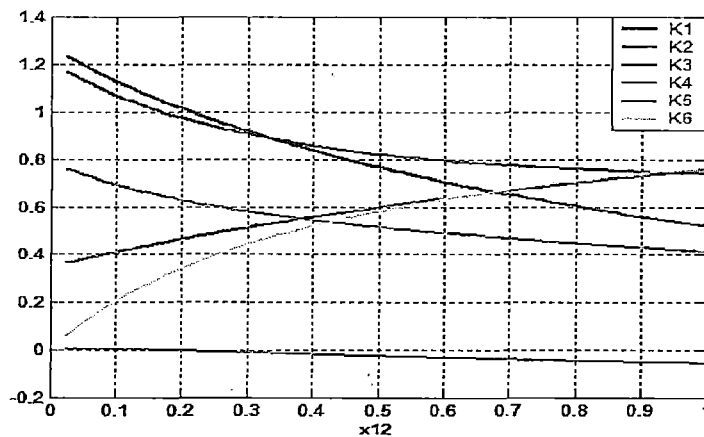


Figura 4.13 Coeficientes de Estabilidad Permanente con: $P_1=0,475$, $Q_1=-0,352$ y X_{12} variable

Se aprecia que se mantienen las características de los signos de los coeficientes de estabilidad permanente. Los rangos de variación de los coeficientes para esta condición de operación según la Figura 4.13, se muestran en la Tabla 4.17.

K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6
1,23 – 0,52	1,17 – 0,74	0,36 – 0,76	0,76 – 0,41	0,002 – -0,05	0,06 – 0,77

Tabla 4.17 Variación de los coeficientes

En las Figuras 4.11, 4.12 y 4.13 (Generador operando subexcitado), se observan que los coeficientes de estabilidad permanente K_1 , K_2 , K_3 , K_4 y K_6 siguen siendo positivos y K_5 es más negativo cuando se incrementa la reactancia X_{12} .

4.4 RESUMEN DE RESULTADOS

De los diferentes escenarios simulados en los acápites 4.3.1 y 4.3.2, para el cálculo de los coeficientes de estabilidad permanente para la C.H en estudio, se puede concluir:

- Que los coeficientes de estabilidad permanente dependen de la condición de operación que presente el sistema de potencia.
- Todos los coeficientes son positivos a excepción de K_5 , que en todo instante tiene signo negativo.
- El valor negativo del coeficiente K_5 se presenta cuando se opera al generador con un valor constante de reactancia equivalente (X_{12}) de condiciones normales (0,42 p.u.) o cuando, para una cierta condición de operación del generador, se incrementa la reactancia (X_{12}) desde 0,025

hasta 1,0 p.u, indicando de ese modo que dicha condición de operación es inestable y que esta central requiere de mecanismos de estabilización.

CAPITULO V

ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD PERMANENTE DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA CAÑÓN DEL PATO

5.1 METODO DE ANALISIS DE LA ESTABILIDAD PERMANENTE

A partir del diagrama de bloques del sistema linealizado alrededor de un punto de operación se ha obtenido la Ecuación Matricial de Espacio correspondiente. En principio se ha analizado la estabilidad permanente de la central hidroeléctrica Cañón del Pato sin considerar el efecto del estabilizador de sistemas de potencia del regulador automático de tensión. Para ello se ha seguido el siguiente procedimiento:

- a) Se identifica la matriz de estado A del sistema linealizado alrededor de un determinado punto de operación y se calcula los eigenvalores o autovalores. A partir de los eigenvalores se determina la estabilidad permanente para el punto de operación dado, obteniendo el amortiguamiento y la frecuencia de oscilación de los modos de interés.
- b) Adicionalmente, para mostrar las características de estabilidad, se calcula la respuesta en el tiempo del sistema. Para ello se aplica un escalón en las entradas del sistema que son las señales ΔT_m o ΔV_{ref} .

5.2 ANALISIS DE ESTABILIDAD PERMANENTE DEL SISTEMA SIN PSS

En principio se ha analizado la estabilidad permanente o de pequeña perturbación considerando que el AVR de la C.H. Cañón del Pato esta fuera de servicio.

A partir del diagrama de bloques que rige el comportamiento dinámico del sistema seleccionado, linealizado alrededor de un punto de operación para el estudio de la estabilidad permanente mostrado en la Figura 3.7, se obtiene las ecuaciones diferenciales siguientes:

$$\Delta \dot{\delta} = w_o \Delta w \quad 5.1$$

$$\Delta \dot{w} = \frac{1}{2H} \Delta T_m - \frac{K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{K_2}{2H} \Delta E'_q \quad 5.2$$

$$\Delta \dot{E}'_q = -\frac{K_4}{T'_{do}} \Delta \delta + \frac{1}{T'_{do}} \Delta E_{fd} - \frac{1}{K_3 T'_{do}} \Delta E'_q \quad 5.3$$

$$\Delta \dot{E}_{fd} = -\frac{K_p}{T_4} \Delta V_C + \frac{K_p}{T_4} \Delta V_{ref} + \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_4}\right) \Delta V_1 \quad 5.4$$

$$\Delta \dot{V}_C = \frac{K_5}{T_R} \Delta \delta + \frac{K_6}{T_R} \Delta E'_q - \frac{1}{T_R} \Delta V_C \quad 5.5$$

$$\Delta \dot{V}_1 = -\frac{K_p}{T_4} \Delta V_C + \frac{K_p}{T_4} \Delta V_{ref} - \frac{1}{T_4} \Delta V_1 \quad 5.6$$

A partir del diagrama de bloques de la Figura 3.7 e incorporando el bloque linealizado correspondiente al SERT de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato se obtiene el diagrama de bloques del sistema linealizado alrededor de un punto de operación sin el efecto del PSS, el cual se muestra en la Figura 5.1.

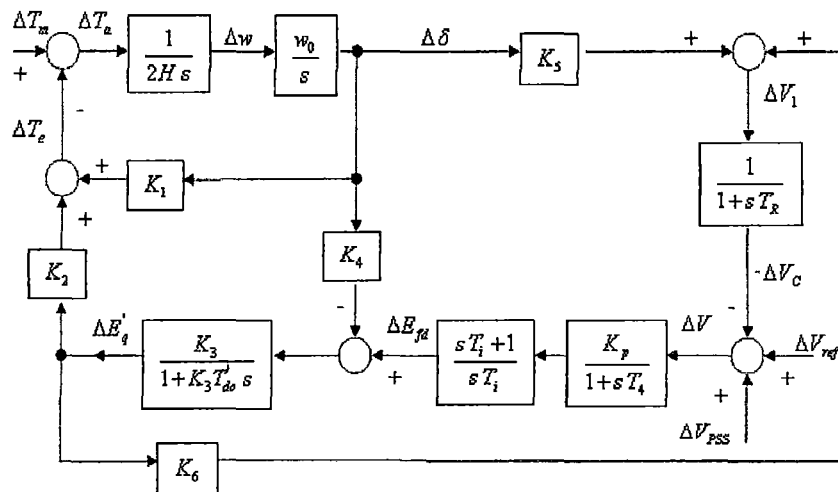


Figura 5.1 Diagrama de bloques linealizado con la incorporación del SERT

Las ecuaciones diferenciales expresadas en forma matricial adoptan la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta \delta} \\ \dot{\Delta w} \\ \dot{\Delta E'_q} \\ \dot{\Delta E_{fd}} \\ \dot{\Delta V_C} \\ \dot{\Delta V_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & w_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -K_1 & 0 & -K_2 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{2H} & 0 & \frac{1}{2H} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_4}{T'_{do}} & 0 & \frac{-1}{K_3 T'_{do}} & \frac{1}{T'_{do}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_p}{T_4} & \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_4} \right) \\ \frac{K_5}{T_R} & 0 & \frac{K_6}{T_R} & 0 & \frac{-1}{T_R} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-K_p}{T_4} & \frac{-1}{T_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta w \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_{fd} \\ \Delta V_C \\ \Delta V_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{2H} & 0 \\ 0 & \frac{K_p}{T_4} \\ 0 & \frac{0}{T_4} \\ 0 & \frac{0}{T_4} \\ 0 & \frac{K_p}{T_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_m \\ \Delta V_{ref} \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

En estas ecuaciones, el vector de estado Δx es de sexto orden y esta conformado por las variables de estado $\Delta \delta$, Δw , $\Delta E'_q$, ΔE_{fd} , ΔV_C y ΔV_1 .

Asimismo se cumple que la matriz de estado **A** es de 6×6 , que la matriz de coeficientes de entrada **B** es de 6×2 y que estas matrices están dadas por:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & w_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_1}{2H} & 0 & -\frac{K_2}{2H} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-K_4}{T_{do}} & 0 & \frac{-1}{K_3 T_{do}} & \frac{1}{T_{do}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-K_p}{T_4} & \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_4} \right) \\ \frac{K_5}{T_R} & 0 & \frac{K_6}{T_R} & 0 & \frac{-1}{T_R} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-K_p}{T_4} & \frac{-1}{T_4} \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 2H & 0 \\ 0 & \frac{K_p}{T_4} \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_p}{T_4} \end{bmatrix}$$

El vector de entrada o de excitación del sistema es de 2×1 y consta de las entradas ΔT_m , que simboliza cambios de topología del sistema que provocan cambios en el torque acelerante del sistema y ΔV_{ref} , que es un cambio en la tensión de referencia del sistema de excitación y regulación de tensión.

Si se va a inspeccionar las variables de estado $\Delta \delta$, Δw , $\Delta E'_q$, entonces el vector de salida esta dado por la ecuación (5.8).

$$\begin{bmatrix} \Delta y_1 \\ \Delta y_2 \\ \Delta y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta w \\ \Delta E'_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_m \\ \Delta V_{ref} \end{bmatrix} \quad 5.8$$

5.2.1 Cálculo de Eigenvalores

5.2.1.1 Influencia de las condiciones de operación de la central

Para los tres escenarios de potencia activa (0.95, 0.712 y 0.475 p.u.) mostrados en la Tabla 4.6 y considerando una reactancia normal de operación de $X_{12} = 0.42$ p.u. se ha elaborado diferentes puntos de operación variando la potencia reactiva en los rangos indicados en la Tabla 4.6.

Para cada punto de operación conformado se ha calculado los eigenvalores, el amortiguamiento y la frecuencia de oscilación (Hz) tal como se muestra en la Tabla 5.1.

Caso	P ₁ (p.u)	Q ₁ (p.u)	Eigenvalores	Amortiguamiento (p.u)	Frecuencia (Hz)
1	0.95	-0.156	0.069±9.72i	-0.007	1.54
		-0.006	0.068±9.83i	-0.006	1.56
		0.194	0.067±10.0i	-0.006	1.59
		0.294	0.066±11.0i	-0.006	1.75
2	0.712	-0.351	-0.012±9.56i	0.001	1.52
		-0.001	0.015±9.85i	-0.001	1.56
		0.349	0.027±10.2i	-0.002	1.62
		0.699	0.029±10.6i	-0.002	1.68
3	0.475	-0.44	-0.0589±9.12i	0.006	1.45
		0.06	-0.0007±9.8i	0.0001	1.56
		0.51	0.010±10.4i	-0.001	1.65
		0.86	0.011±10.9i	-0.001	1.73

Tabla 5.1 Eigenvalores referidos a las condiciones de operación de la central con una reactancia $X_{12} = 0.42$ p.u.

(*)Nota: Los eigenvalores en negritas de la Tablas son condiciones de operación que han sido sometidas a la respuesta en el tiempo.

En la Tabla 5.1 se observa que algunos eigenvalores tienen parte real positiva, indicando que estos puntos de operación de estado estacionario son inestables y se explican debido al carácter negativo de la constante k_5 , por lo tanto su amortiguamiento necesariamente es negativo. Este resultado indica que la respuesta transitoria del sistema operando en tales condiciones ante una pequeña perturbación tendrá un comportamiento oscilatorio no amortiguado. En general se puede decir que la frecuencia de oscilación de los modos obtenidos varía entre 1,45 Hz y 1,75 Hz. Mientras que el amortiguamiento resulta normalmente pequeño, puede ser positivo y comprendido entre 0,0001 y 0,006 o negativo, entre -0,001 y -0,007.

En la Figura 5.2 se muestra el comportamiento de los eigenvalores correspondientes a los puntos de operación de la Tabla 4.6 con la central conectada al SEIN mediante una reactancia $X_{12} = 0.42$ p.u.

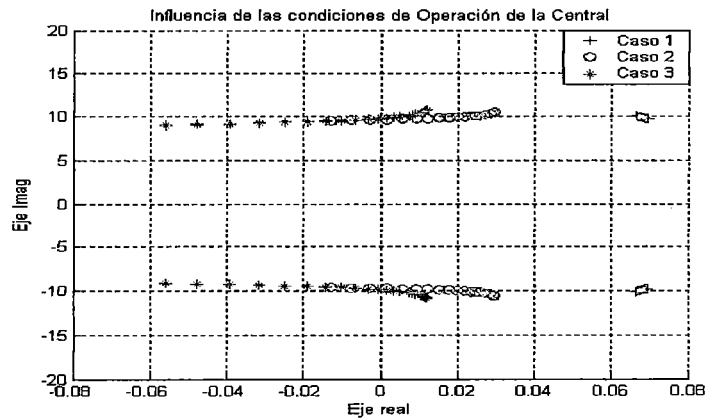


Figura 5.2 Eigenvalores para diversas condiciones de operación de la central con $X_{12} = 0.42$ p.u.

En la Figura 5.2 se aprecia que para el primer caso propuesto cualquier punto de operación resulta inestable. Para el segundo y tercer caso se observa como la posición de los eigenvalores va cambiando de acuerdo a la condición de operación, pasando de condiciones iniciales inestables a otras estables.

5.2.1.2 Influencia de las condiciones de operación del SEIN

Los eigenvalores han sido calculados para cada caso de acuerdo a las Tablas 4.10 (generador operando sobreexcitado) y 4.11 (generador operando subexcitado). Con el barrido de X_{12} en el rango de 0.025 a 1.0 p.u, se obtiene un gran numero de puntos de operación. Se muestran los eigenvalores, el amortiguamiento y la frecuencia de oscilación de 3 puntos de operación de cada escenario.

a.- Generador operando sobreexcitado

Caso	P ₁ (p.u)	Q ₁ (p.u)	X ₁₂ (p.u)	Eigenvalores	Amortiguamiento (p.u)	Frecuencia (Hz)
1	0.95	0.312	0.025	-0.066±14.1i	0.004	2.24
			0.400	0.058±10.3i	-0.005	1.64
			0.900	0.294±7.2i	-0.04	1.14
2	0.712	0.702	0.025	-0.026±14.7i	0.001	2.34
			0.400	0.026±10.71i	-0.002	1.70
			0.900	0.110±7.96i	-0.013	1.26
3	0.475	0.879	0.025	-0.010±15.0i	0.0006	2.38
			0.400	0.011±11.0i	-0.001	1.75
			0.900	0.041±8.44i	-0.004	1.34

Tabla 5.2 Eigenvalores para cada punto de operación del generador sobreexcitado cuando la reactancia X₁₂ varía en un amplio rango

Se observa en la Tabla 5.2 que el primer eigenvalor en los tres casos, correspondiente a un X₁₂ muy pequeño, tiene parte real negativa. Este resultado indica que este punto de operación es estable, por ello su amortiguamiento es positivo pero muy pequeño, con lo cual la respuesta ante una pequeña perturbación es oscilatoria. En el resto de los casos los puntos de operación resultan inestables.

En la Figura 5.3 se muestra la influencia de los cambios de las condiciones de operación del SEIN sobre la central cuyo generador esta operando sobreexcitado. El cambio en las condiciones de operación del SEIN esta representada por variaciones en la reactancia X₁₂.

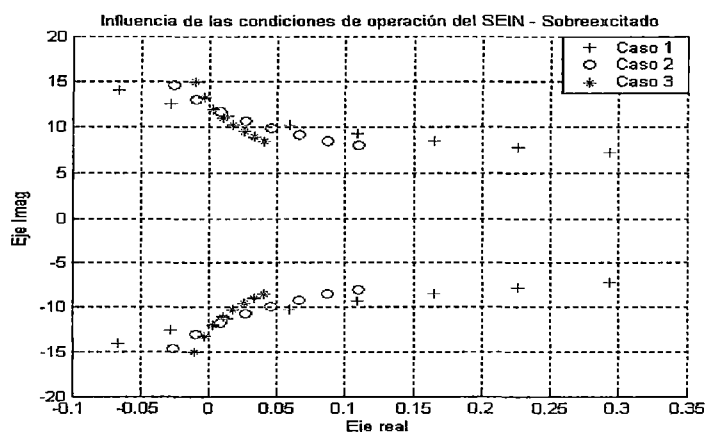


Figura 5.3 Eigenvalores de la condición de operación del SEIN: Caso generador Sobreexcitado

Se aprecia en la Figura 5.3 que el eigenvalor cambia de posición según como varía la condición de operación del SEIN, es decir la posición del eigenvalor se mueve desde el segundo cuadrante al primero conforme se incrementa la reactancia X_{12} (la cual ha sido variada desde 0.025 a 1.0 p.u.), pasando de una condición inicial de operación estable a otra inestable.

b.- Generador operando subexcitado

Caso	P_1 (p.u)	Q_1 (p.u)	X_{12} (p.u)	Eigenvalores	Amortiguamiento (p.u)	Frecuencia (Hz)
1	0.95	-0.187	0.025	-0.129±13.2i	0.009	2.10
			0.400	0.058±9.84i	-0.005	1.56
			0.900	0.433±6.89i	-0.062	1.09
2	0.712	-0.281	0.025	-0.118±12.4i	0.009	1.97
			0.400	-0.011±9.72i	0.001	1.54
			0.900	0.165±7.44i	-0.022	1.18
3	0.475	-0.352	0.025	-0.087±11.3i	0.007	1.79
			0.400	-0.043±9.3i	0.004	1.48
			0.900	0.028±7.6i	-0.003	1.21

Tabla 5.3 Eigenvalores de cada punto de operación del generador subexcitado cuando la reactancia X_{12} varía en un amplio rango.

En la Tabla 5.3 se observa que para una reactancia X_{12} muy pequeña algunos eigenvalores tienen parte real negativa. Esto indica que dicho punto de operación es estable, por ello su amortiguamiento es positivo

pero muy pequeño, con lo cual la respuesta ante una pequeña perturbación resulta oscilatoria. En el resto de casos los puntos de operación son inestables.

En la Figura 5.4 se muestra el comportamiento de los eigenvalores, cuando el generador esta subexcitado, influenciado por los cambios en las condiciones de operación del SEIN, que han sido expresadas mediante la variación de la reactancia X_{12} .

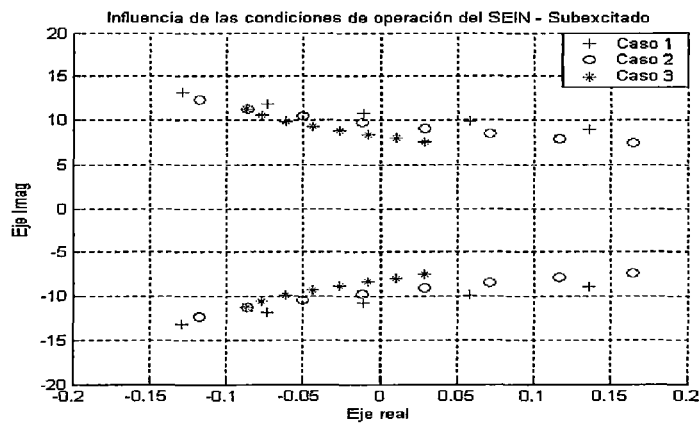


Figura 5.4 Eigenvalores de la condición de operación del SEIN: Caso Generador Subexcitado

La Figura 5.4 muestra como cambia la posición de los eigenvalores de acuerdo a la variación de la reactancia de 0,025 a 1,0 p.u para la condición subexcitada del generador.

5.2.2 Análisis de la Respuesta en el Tiempo

Estas simulaciones son realizadas con el fin de verificar los resultados encontrados en el cálculo de los eigenvalores para los casos de la influencia de la condición de operación de la central y del SEIN, sin considerar el efecto del PSS en el SERT.

Para el análisis de la respuesta en el tiempo del sistema linealizado alrededor de un punto de operación, representado en la Figura 5.1 se ha aplicado un escalón unitario de torque mecánico (ΔT_m) o un escalón en la referencia de tensión (ΔV_{ref}). Para realizar estas simulaciones, tanto para los casos de influencia de las condiciones de operación de la central como para los casos de cambios en las condiciones topológicas del resto del SEIN, se ha elaborado un programa utilizando el software Matlab Versión 7.2. Como resultados se muestra la evolución en el tiempo de las variables de estado siguientes: Ángulo del rotor ($\Delta\delta$), Velocidad del rotor ($\Delta\omega$) y la Fuerza electromotriz transitoria en el eje de cuadratura ($\Delta E'_q$).

5.2.2.1 Influencia de las condiciones de operación de la central

Los resultados de todas las simulaciones de la respuesta en el tiempo considerando los casos de la Tabla 5.1 se muestran en el Anexo B.

A continuación se muestran los resultados de las simulaciones de los casos de la Tabla 5.1 ($X_{12}= 0.42$ p.u) y que corresponden a las siguientes situaciones:

1. Mayor amortiguamiento negativo con $P_1 = 0.95$ p.u.
2. Mayor amortiguamiento negativo con $P_1 = 0.712$ p.u.
3. Amortiguamiento positivo pequeño con $P_1 = 0.475$ p.u.

Los resultados de las simulaciones de la respuesta en el tiempo son:

- 1^{er} caso: De la Tabla 5.1, se tiene $P_1=0.95$ p.u y $X_{12}=0.42$ p.u, las respuestas en el tiempo se muestran en las Figuras 5.5 y 5.6.

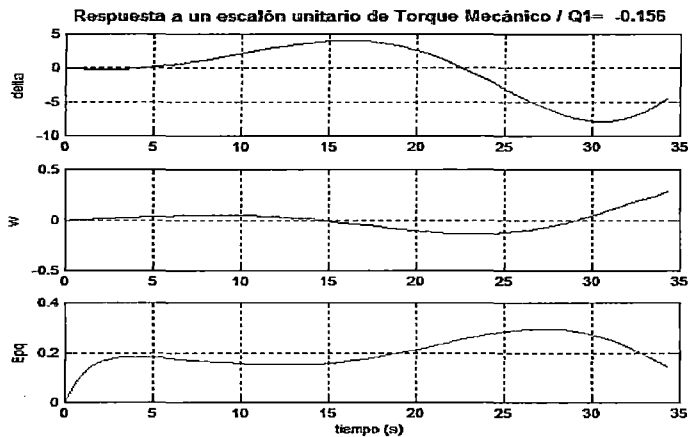


Figura 5.5 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1= 0.95$, $X_{12}= 0.42$ y $Q_1 = - 0.156$

Se observa en la Figura 5.5 que las variables de estado ($\Delta\delta$, Δw y $\Delta E_q'$) presentan oscilaciones que se amplifican cuando se aplica un escalón unitario de torque mecánico, dicha amplificación se da por falta de amortiguamiento. Este resultado confirma que dicho punto de operación es inestable.

Cuando se aplica un escalón unitario en la referencia de la tensión, se obtiene también un comportamiento inestable en las variables de estado, tal como se muestra en la Figura 5.6.

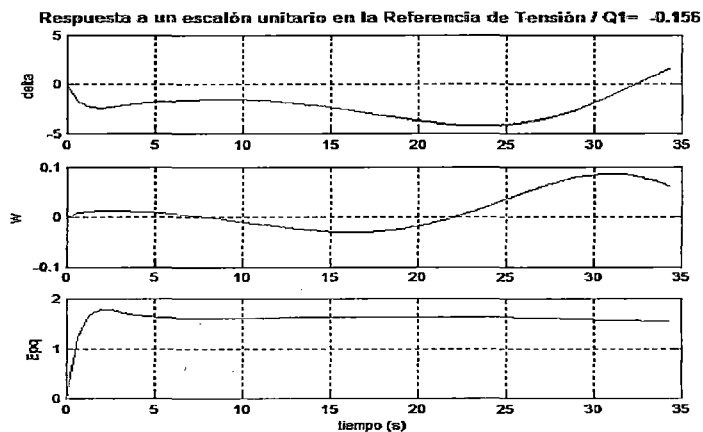


Figura 5.6 Respuesta a un Escalón Unitario en la Referencia de Tensión con $P_1= 0.95$, $X_{12}= 0.42$ y $Q_1 = - 0.156$

- 2^{do} caso: De la Tabla 5.1, se tiene $P_1 = 0.712$ p.u y $X_{12} = 0.42$ p.u. La respuesta en el tiempo frente a un escalón de torque mecánico se muestra en la Figura 5.7.

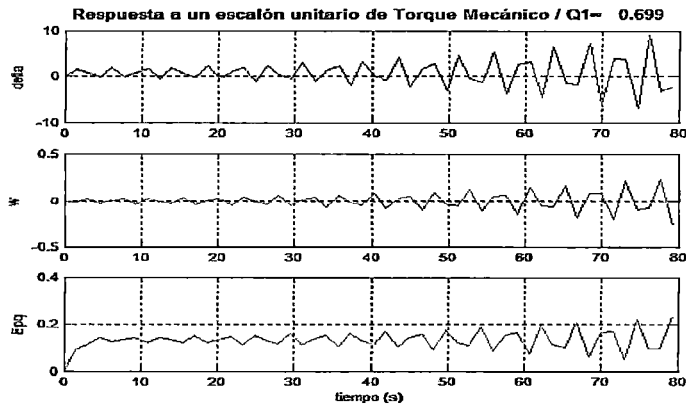


Figura 5.7 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.712$, $X_{12} = 0.42$ y $Q_1 = 0.699$

Se observa en la Figura 5.7 el comportamiento transitorio oscilatorio no amortiguado, confirmando el comportamiento inestable del sistema ante una pequeña perturbación detectado en el eigenvalor con parte real positiva de la Tabla 5.1.

- 3^{er} caso: De la Tabla 5.1, se tiene $P_1 = 0.475$ p.u y $X_{12} = 0.42$ p.u, la respuesta en el tiempo se muestra en la Figura 5.8.

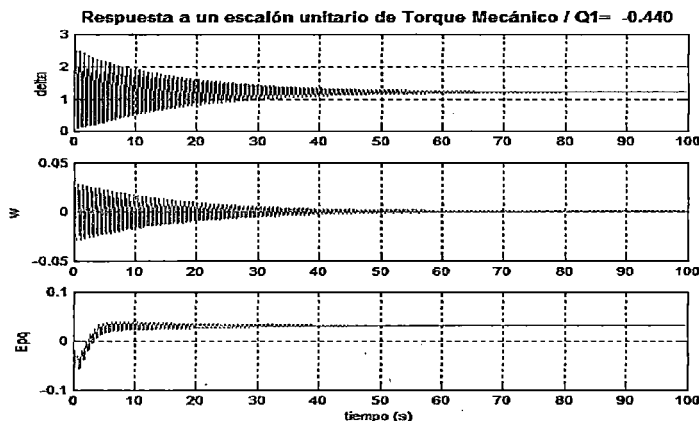


Figura 5.8 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.475$, $X_{12} = 0.42$ y $Q_1 = -0.440$

En la Figura 5.8 se aprecia que el comportamiento transitorio es estable, sin embargo alcanza un valor final más allá de los 70 s de simulación.

Esta característica confirma el bajo amortiguamiento (0.006) que presenta el eigenvalor para esta condición de operación, según la Tabla 5.1.

5.2.2.2 Influencia de las condiciones de operación del SEIN

Los resultados de todas las simulaciones de respuesta en el tiempo considerando los casos de las Tablas 5.2 (generador sobreexcitado) y 5.3 (generador subexcitado) se muestran en el Anexo B. Como las reactancias externas de operación normal de la central son superiores a 0.42 p.u. a continuación se resumen las respuestas en el tiempo para la situación de mayor amortiguamiento negativo cuando la reactancia X_{12} es 0.90 p.u y en los escenarios sobre y subexcitado.

a.- Generador operando sobreexcitado

- 1^{er} caso: De la Tabla 5.2, con $P_1 = 0.95$ p.u y $Q_1 = 0.312$ p.u, la respuesta en el tiempo se muestra en la Figura 5.9.

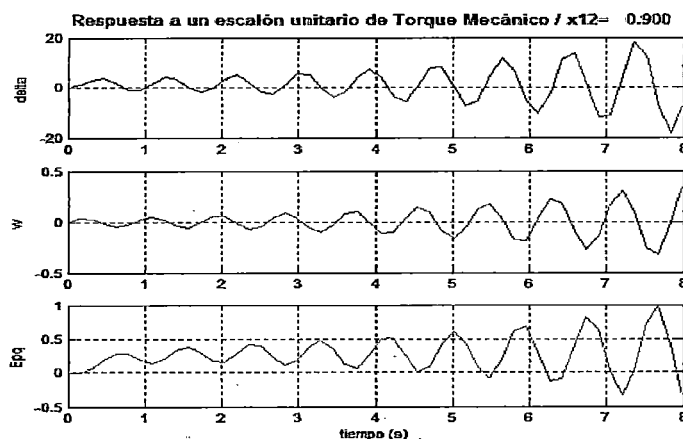


Figura 5.9 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.95$, $Q_1 = 0.312$ y $X_{12} = 0.90$

La respuesta transitoria inestable confirma la situación de mayor amortiguamiento negativa (-0.04), alcanzada en este caso.

b.- Generador Operando Subexcitado

- 2^{do} caso: De la Tabla 5.3, se tiene $P_1 = 0.712$ p.u y $Q_1 = -0.281$ p.u, la respuesta en el tiempo se muestra en la Figura 5.10.

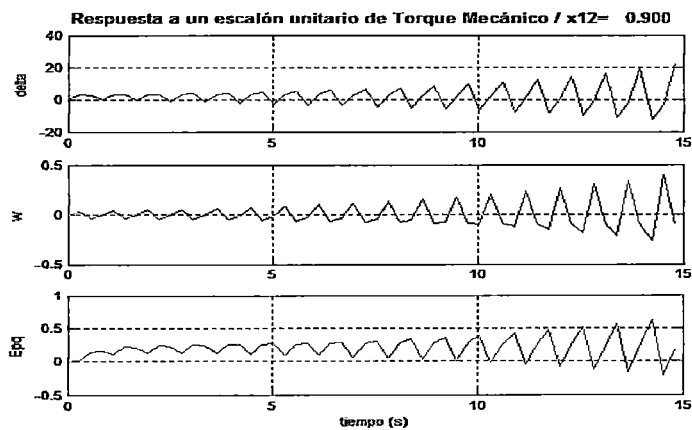


Figura 5.10 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.712$, $Q_1 = -0.281$ y $X_{12} = 0.90$

Se observa en las Figuras 5.9 y 5.10, que la respuesta en el tiempo, para cada caso, estando el generador operando ya sea sobreexcitado como subexcitado el comportamiento es inestable para cualquier valor de reactancia X_{12} mayor al valor de operación nominal (0.42 p.u).

A continuación se incluye el efecto del estabilizador de sistemas de potencia para dar solución a los problemas de amortiguamiento, detectados cuando el PSS esta desactivado.

5.3 ANALISIS DE ESTABILIDAD PERMANENTE DEL SISTEMA CON PSS

Al incorporar el estabilizador de sistemas de potencia, el número de ecuaciones diferenciales del sistema aumenta, dando lugar a una nueva ecuación matricial de estado de un orden superior. La señal de entrada para el estabilizador es la potencia activa y resulta de una combinación de las variables de salida ($\Delta\delta$ y $\Delta E'_q$) cuya deducción se muestra en el Anexo C. Se obtiene el diagrama de bloques de la Figura 5.11.

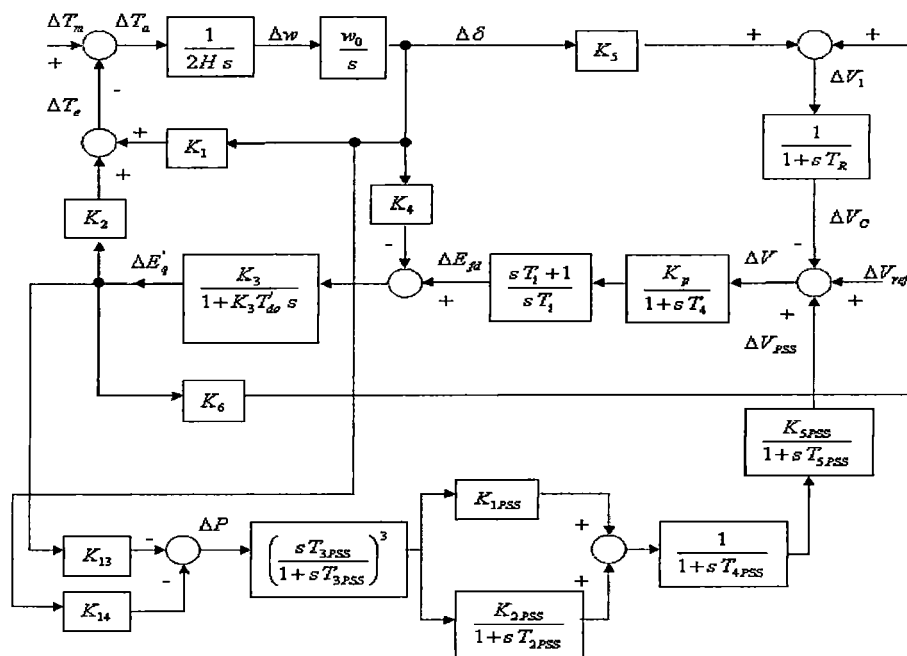


Figura 5.11 Diagrama de bloques incorporando el PSS señal de Potencia Activa

Del diagrama de bloques del sistema linealizado alrededor de un punto de operación de la Figura 5.11 se obtiene las ecuaciones diferenciales siguientes:

$$\dot{\Delta\delta} = w_0 \Delta w \quad 5.9$$

$$\dot{\Delta w} = -\frac{K_1}{2H} \Delta\delta - \frac{K_2}{2H} \Delta E'_q - \frac{K_d}{2H} \Delta w + \frac{1}{2H} \Delta T_m \quad 5.10$$

$$\dot{\Delta E}'_q = -\frac{K_4}{T'_{do}} \Delta\delta + \frac{1}{T'_{do}} \Delta E_{fd} - \frac{1}{K_3 T'_{do}} \Delta E'_q \quad 5.11$$

$$\dot{\Delta E}_{fd} = -\frac{K_p}{T_4} \Delta V_C + \frac{K_p}{T_4} \Delta V_{ref} + \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_4}\right) \Delta V + \frac{K_p}{T_4} \Delta V_{PSS} \quad 5.12$$

$$\dot{\Delta V}_C = \frac{K_5}{T_R} \Delta \delta + \frac{K_6}{T_R} \Delta E'_q - \frac{1}{T_R} \Delta V_C \quad 5.13$$

$$\dot{\Delta V}_1 = -\frac{K_p}{T_4} \Delta V_C + \frac{K_p}{T_4} \Delta V_{ref} - \frac{1}{T_4} \Delta V_1 + \frac{K_p}{T_4} \Delta V_{PSS} \quad 5.14$$

$$\dot{\Delta V}_2 = \frac{K_4 K_{13}}{T'_{do}} \Delta \delta - \frac{K_{13}}{T'_{do}} \Delta E_{fd} + \frac{K_{13}}{K_3 T'_{do}} \Delta E'_q - K_{14} w_o \Delta w - \frac{1}{T_{3PSS}} \Delta V_2 \quad 5.15$$

$$\dot{\Delta V}_3 = \frac{K_4 K_{13}}{T'_{do}} \Delta \delta - \frac{K_{13}}{T'_{do}} \Delta E_{fd} + \frac{K_{13}}{K_3 T'_{do}} \Delta E'_q - K_{14} w_o \Delta w - \frac{1}{T_{3PSS}} \Delta V_2 - \frac{1}{T_{3PSS}} \Delta V_3 \quad 5.16$$

$$\dot{\Delta V}_4 = \frac{K_4 K_{13}}{T'_{do}} \Delta \delta - \frac{K_{13}}{T'_{do}} \Delta E_{fd} + \frac{K_{13}}{K_3 T'_{do}} \Delta E'_q - K_{14} w_o \Delta w - \frac{1}{T_{3PSS}} \Delta V_2 - \frac{1}{T_{3PSS}} \Delta V_3 - \frac{1}{T_{3PSS}} \Delta V_4 \quad 5.17$$

$$\dot{\Delta V}_5 = \frac{K_4 K_{13} K_{1PSS}}{T'_{do}} \Delta \delta - \frac{K_{13} K_{1PSS}}{T'_{do}} \Delta E_{fd} + \frac{K_{13} K_{1PSS}}{K_3 T'_{do}} \Delta E'_q - K_{14} w_o K_{1PSS} \Delta w - \frac{K_{1PSS}}{T_{3PSS}} \Delta V_2 - \frac{K_{1PSS}}{T_{3PSS}} \Delta V_3 + \left[\frac{K_{1PSS}}{T_{2PSS}} + \frac{K_{2PSS}}{T_{2PSS}} - \frac{K_{1PSS}}{T_{3PSS}} \right] \Delta V_4 - \frac{1}{T_{2PSS}} \Delta V_5 \quad 5.18$$

$$\dot{\Delta V}_6 = \frac{1}{T_{4PSS}} \Delta V_5 - \frac{1}{T_{4PSS}} \Delta V_6 \quad 5.19$$

$$\dot{\Delta V}_{PSS} = \frac{K_{5PSS}}{T_{5PSS}} \Delta V_6 - \frac{1}{T_{5PSS}} \Delta V_{PSS} \quad 5.20$$

La ecuación de estado expresada en forma matricial esta dada por:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{w} \\ \Delta \dot{E}'_q \\ \Delta \dot{E}'_{fd} \\ \Delta \dot{V}_C \\ \Delta \dot{V}_1 \\ \Delta \dot{V}_2 \\ \Delta \dot{V}_3 \\ \Delta \dot{V}_4 \\ \Delta \dot{V}_5 \\ \Delta \dot{V}_6 \\ \Delta \dot{V}_{PSS} \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta w \\ \Delta E'_q \\ \Delta E'_{fd} \\ \Delta V_C \\ \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \\ \Delta V_4 \\ \Delta V_5 \\ \Delta V_6 \\ \Delta V_{PSS} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{2H} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_p}{T_4} \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_p}{T_4} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_m \\ \Delta V_{ref} \end{bmatrix} \tag{5.21}$$

De igual manera se va a inspeccionar las variables de estado $\Delta\delta$, Δw , $\Delta E'_q$,

entonces el vector de salida esta dado por:

$$\begin{bmatrix} \Delta y_1 \\ \Delta y_2 \\ \Delta y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta w \\ \Delta E'_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_m \\ \Delta V_{ref} \end{bmatrix} \tag{5.22}$$

Donde la matriz de estado del sistema (A) es una matriz cuadrada de orden 12×12 y de modo similar que el acápite 5.2 se va a inspeccionar el comportamiento de las variables de estado $\Delta\delta$, Δw y $\Delta E'_q$.

5.3.1 Cálculo de Eigenvalores

A continuación se muestran los resultados del cálculo de los eigenvalores para los casos del acápite 5.2.1.1 y 5.2.1.2, pero considerando el efecto del estabilizador de sistemas de potencia.

5.3.1.1 Influencia de las condiciones de operación de la central

- 1^{er} caso: $P_1 = 0.95$ p.u y $X_{12} = 0.42$ p.u se varía la potencia reactiva Q_1 de -0.156 a 0.312 p.u, obteniéndose los resultados en la Tabla 5.4.

Caso 1	P_1 (p.u)	Q_1 (p.u)	Eigenvalores	Amortiguamiento (p.u)	Frecuencia (Hz)
	0.95	-0.156		-0.235±0.020i	0.996
-0.756±9.88i				0.076	1.57
-1.0±0.31i				0.956	0.04
-97.7±11.1i				0.994	1.76
-0.006			-0.235±0.019i	0.996	0.003
			-0.704±9.99i	0.07	1.59
			-1.01±0.252i	0.97	0.04
			-97.6±10.8i	0.994	1.71
0.194			-0.235±0.019i	0.997	0.003
			-0.641±10.2i	0.063	1.62
			-1.0±0.183i	0.984	0.02
			-97.5±10.4i	0.994	1.65
0.294			-0.235±0.019i	0.997	0.003
			-0.613±10.2i	0.059	1.62
			-0.998±0.152i	0.989	0.02
			-97.4±10.2i	0.995	1.62

Tabla 5.4 Eigenvalores del 1^{er} caso con una reactancia $X_{12} = 0.42$ p.u.

- 2^{do} caso: $P_1 = 0.712$ p.u y $X_{12} = 0.42$ p.u se varía la potencia reactiva Q_1 de -0.351 a 0.702 p.u, obteniéndose los resultados en la Tabla 5.5.

Caso 2	P ₁ (p.u)	Q ₁ (p.u)	Eigenvalores	Amortiguamiento (p.u)	Frecuencia (p.u)	
	0.712	-0.351		-0.235±0.020i	0.996	0.003
-0.761±9.7i				0.078	1.54	
-0.935±0.361i				0.933	0.05	
-97.5±10.6i				0.994	1.68	
-0.001				-0.235±0.019i	0.997	0.003
				-0.597±9.98i	0.059	1.58
				-0.972±0.198i	0.98	0.03
				-97.2±9.59i	0.995	1.52
0.349				-0.235±0.017i	0.997	0.002
				-0.487±10.3i	0.047	1.64
				-97±8.77i	0.996	1.39
0.699				-0.234±0.017i	0.997	0.002
	-0.412±10.7i			0.038	1.7	
	-96.8±8.09i			0.997	1.28	

Tabla 5.5 Eigenvalores del 2^{do} caso con una reactancia X₁₂ = 0.42 p.u.

- 3^{er} caso: Con P₁ = 0.475 p.u y X₁₂ = 0.42 p.u se varía la potencia reactiva Q₁ de -0.440 a 0.879 p.u, obteniéndose los resultados en la Tabla 5.6.

Caso 3	P ₁ (p.u)	Q ₁ (p.u)	Eigenvalores	Amortiguamiento (p.u)	Frecuencia (p.u)	
	0.475	-0.44		-0.235±0.019i	0.997	0.003
-0.646±9.21i				0.07	1.46	
-0.938±0.29i				0.955	0.04	
-97.2±9.27i				0.995	1.47	
0.06				-0.234±0.017i	0.997	0.002
				-0.413±9.89i	0.042	1.57
				-96.7±7.66i	0.997	1.21
0.51				-0.234±0.015i	0.998	0.002
				-0.313±10.5i	0.029	1.67
				-96.5±6.64i	0.998	1.05
0.86				-0.234±0.014i	0.998	0.002
				-0.265±10.9i	0.024	1.73
	-96.4±6.0i			0.998	0.95	

Tabla 5.6 Eigenvalores del 3^{er} caso con una reactancia X₁₂ = 0.42 p.u.

A continuación se observa en la Figura 5.12 el comportamiento de los eigenvalores del 1^{er}, 2^{do} y 3^{er} caso de las Tablas 5.4, 5.5 y 5.6

respectivamente para la influencia de las condiciones de operación de la central con la incorporación del PSS de señal de potencia activa.

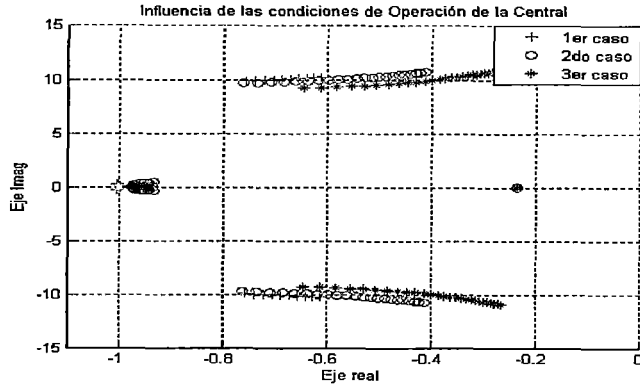


Figura 5.12 Eigenvalores de la condición de operación de la central

En la Figura 5.12 muestra que para los tres casos propuestos los puntos de operación resultan estables. También se observa que los eigenvalores cambian de posición dentro de la región estable, de acuerdo a la condición de operación de la central, debido a su pequeño amortiguamiento que posee.

5.3.1.2 Influencia de las condiciones de operación del SEIN

a.- Generador operando sobreexcitado

- 1^{er} caso: $P_1 = 0.95$ p.u y $Q_1 = 0.312$ p.u se varía la reactancia X_{12} de 0.025 a 1.0 p.u, obteniéndose los resultados en la Tabla 5.7.

Caso 1	P_1	Q_1	X_{12}	Eigenvalores	Amortiguamiento	Frecuencia
	(p.u)	(p.u)	(p.u)		(p.u)	(Hz)
Caso 1	0.95	0.312	0.025	-0.210±0.052i	0.971	0.008
				-0.778±14.6i	0.053	2.32
				-97.8±11.4i	0.993	1.81
			0.4	-0.235±0.019i	0.997	0.002
				-0.615±10.4i	0.058	1.65
				-97.3±10.1i	0.995	1.6
			0.9	-0.235±0.020i	0.996	0.003
				-0.397±7.13i	0.055	1.13
				-97.5±10.2i	0.995	1.62

Tabla 5.7 Eigenvalores del 1^{er} caso con una reactancia X_{12} variable

- 2^{do} caso: $P_1 = 0.712$ p.u y $Q_1 = 0.702$ p.u se varía la reactancia X_{12} de 0.025 a 1.0 p.u, obteniéndose los resultados en la Tabla 5.8.

Caso 2	P_1 (p.u)	Q_1 (p.u)	X_{12} (p.u)	Eigenvalores	Amortiguamiento (p.u)	Frecuencia (Hz)
	0.712	0.702	0.025		-0.207±0.035i	0.986
				-0.480±15.0i	0.031	2.38
				-97.1±9.11i	0.996	1.45
0.4				-0.234±0.017i	0.997	0.002
				-0.413±10.9i	0.038	1.73
				-96.8±8.09i	0.997	1.28
0.9				-0.235±0.018	0.997	0.002
				-0.356±7.98i	0.044	1.27
				-96.9±8.14i	0.996	1.29

Tabla 5.8 Eigenvalores del 2^{do} caso con una reactancia X_{12} variable

- 3^{er} caso: $P_1 = 0.475$ p.u y $Q_1 = 0.879$ p.u se varía la reactancia X_{12} de 0.025 a 1.0 p.u, obteniéndose los resultados en la Tabla 5.9.

Caso 3	P_1 (p.u)	Q_1 (p.u)	X_{12} (p.u)	Eigenvalores	Amortiguamiento (p.u)	Frecuencia (Hz)
	0.475	0.879	0.025		-0.210±0.026i	0.992
				-0.293±15.2	0.019	2.42
				-96.5±6.87i	0.997	1.09
0.4				-0.234±0.014i	0.998	0.002
				-0.263±11.1i	0.023	1.76
				-96.4±5.98i	0.998	0.95
0.9				-0.234±0.015i	0.998	0.002
				-0.244±8.46i	0.028	1.34
				-96.4±5.91i	0.998	0.94

Tabla 5.9 Eigenvalores del 3^{er} caso con una reactancia X_{12} variable

En la Figura 5.13 muestra la grafica de los eigenvalores de las Tablas 5.7, 5.8 y 5.9 de la Influencia de las condiciones de operación del SEIN, cuando el generador esta sobrecargado y con el efecto de haber incorporado el PSS de señal de potencia activa.

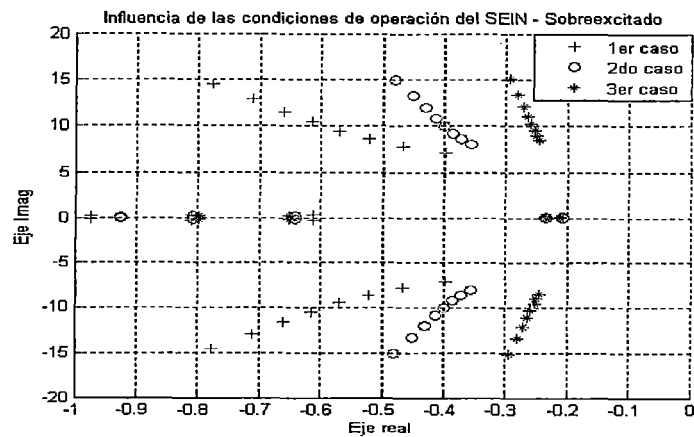


Figura 5.13 Eigenvalores de la condición de operación del SEIN: Generador Sobreexcitado

Se aprecia en la Figura 5.13 que todos los eigenvalores de los tres casos analizados (Generador Sobreexcitado) son estables y van cambiando su posición dentro de la misma región o cuadrante de acuerdo como varía la condición de operación del SEIN (reactancia externa).

b.- Generador operando subexcitado

- 1^{er} caso: Con $P_1 = 0.95$ p.u y $Q_1 = -0.187$ p.u se varía la reactancia X_{12} de 0.025 a 1.0 p.u, obteniéndose los resultados en la Tabla 5.10.

Caso 1	P_1 (p.u)	Q_1 (p.u)	X_{12} (p.u)	Eigenvalores	Amortiguamiento (p.u)	Frecuencia (Hz)	
	0.95	-0.187	0.025		-0.231±0.061i	0.966	0.009
				-1.08±13.7i	0.074	2.18	
				-98.3±12.8i	0.992	2.03	
		0.4			-0.235±0.02i	0.996	0.003
					-0.781±10.0i	0.077	1.59
					-97.8±11.2i	0.993	1.78
		0.9			-0.235±0.021i	0.996	0.003
					-0.347±6.75i	0.051	1.07
					-97.7±11.1i	0.994	1.76

Tabla 5.10 Eigenvalores del 1^{er} caso con una reactancia X_{12} variable

- 2^{do} caso: Con $P_1 = 0.712$ p.u y $Q_1 = -0.281$ p.u se varía la reactancia X_{12} de 0.025 a 1.0 p.u, obteniéndose los resultados en la Tabla 5.11.

Caso 2	P_1 (p.u)	Q_1 (p.u)	X_{12} (p.u)	Eigenvalores	Amortiguamiento (p.u)	Frecuencia (Hz)
	0.712	-0.281	0.025		-0.221±0.065i	0.959
				-0.968±12.8i	0.076	2.03
				-98±12.1i	0.993	1.92
0.4				-0.235±0.02i	0.996	0.003
				-0.733±9.87i	0.074	1.57
				-97.5±10.4i	0.994	1.65
0.9				-0.235±0.019i	0.997	0.0019
				-0.506±7.40i	0.068	1.17
				-97.4±9.94i	0.995	1.58

Tabla 5.11 Eigenvalores del 2^{do} caso con una reactancia X_{12} variable

- 3^{er} caso: Con $P_1 = 0.475$ p.u y $Q_1 = -0.352$ p.u se varía la reactancia X_{12} de 0.025 a 1.0 p.u, obteniéndose los resultados en la Tabla 5.12.

Caso 3	P_1 (p.u)	Q_1 (p.u)	X_{12} (p.u)	Eigenvalores	Amortiguamiento (p.u)	Frecuencia (Hz)
	0.475	-0.352	0.025		-0.207±0.057i	0.964
				-0.758±11.6i	0.065	1.84
				-97.5±10.6i	0.994	1.68
0.4				-0.235±0.019i	0.997	0.003
				-0.596±9.4i	0.062	1.49
				-97.1±8.97i	0.996	1.42
0.9				-0.235±0.018i	0.997	0.002
				-0.465±7.58i	0.061	1.21
				-96.9±8.33i	0.996	1.32

Tabla 5.12 Eigenvalores del 3^{er} caso con una reactancia X_{12} variable

En la Figura 5.14 muestra la grafica de los eigenvalores de las Tablas 5.10, 5.11 y 5.12 de la Influencia de las condiciones de operación del SEIN, cuando el generador esta subexcitado y con el efecto de haber incorporado el PSS de señal de potencia activa.

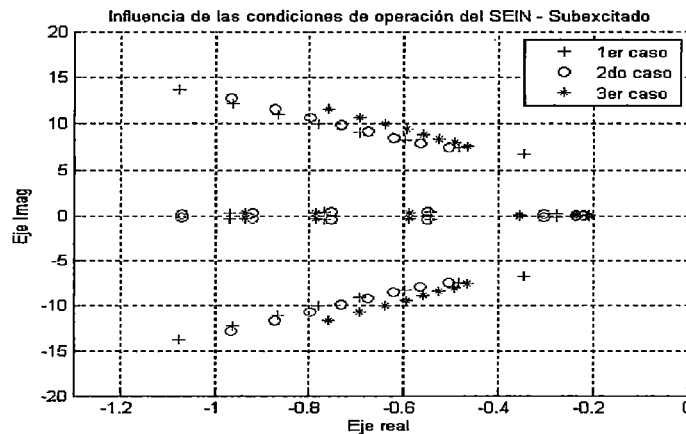


Figura 5.14 Eigenvalores de la condición de operación del SEIN: Generador Subexcitado

Se aprecia en la Figura 5.14 que todos los eigenvalores de los tres casos analizados (Generador Subexcitado) son estables y van cambiando su posición dentro del mismo cuadrante de acuerdo como varía la condición de operación del SEIN (reactancia externa).

5.3.2 Análisis de la Respuesta en el Tiempo

Para el análisis de la respuesta en el tiempo del sistema con el efecto del PSS, linealizado alrededor de un punto de operación, representado en la Figura 5.11, se ha aplicado un escalón unitario de torque mecánico (ΔT_m). Como resultados se muestra la evolución en el tiempo de las variables de estado: ángulo del rotor ($\Delta\delta$), velocidad del rotor ($\Delta\omega$) y la fuerza electromotriz transitoria en el eje de cuadratura ($\Delta E_q'$).

5.3.2.1 Influencia de las condiciones de operación de la central

Los resultados de todas las simulaciones de la respuesta en el tiempo considerando los casos de las Tablas 5.4, 5.5 y 5.6 se muestran en el Anexo D. Las simulaciones a analizar son los casos observados en el acápite 5.2.2.1.

- 1^{er} caso: De la Tabla 5.4, se tiene $P_1 = 0.95$ p.u y X_{12} de 0.42 p.u, la respuesta en el tiempo se muestra en la Figura 5.15.

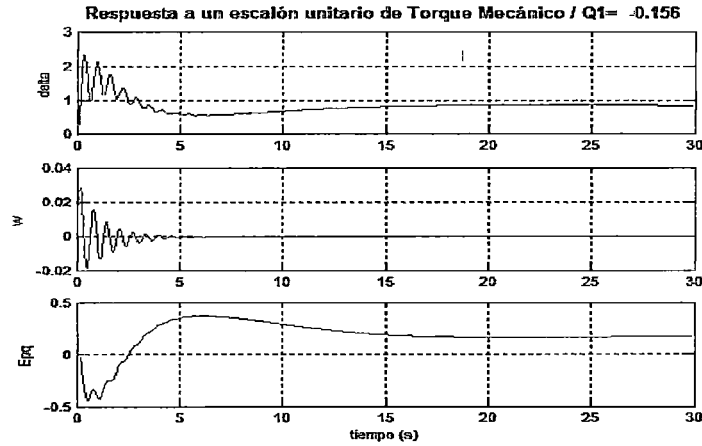


Figura 5.15 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.95$, $X_{12} = 0.42$ y $Q_1 = -0.156$

Se observa en la Figura 5.15 que luego de aplicar un escalón unitario de torque mecánico, las variables ($\Delta\delta$, ΔW y $\Delta E_q'$) presentan oscilaciones que se amortiguan, debido al efecto del PSS, que aporta una señal que adiciona amortiguamiento a las oscilaciones de potencia para el sistema dado.

- 2^{do} caso: De la Tabla 5.5, se tiene $P_1 = 0.712$ p.u y $X_{12} = 0.42$ p.u, las respuestas en el tiempo se muestra en la Figura 5.16.

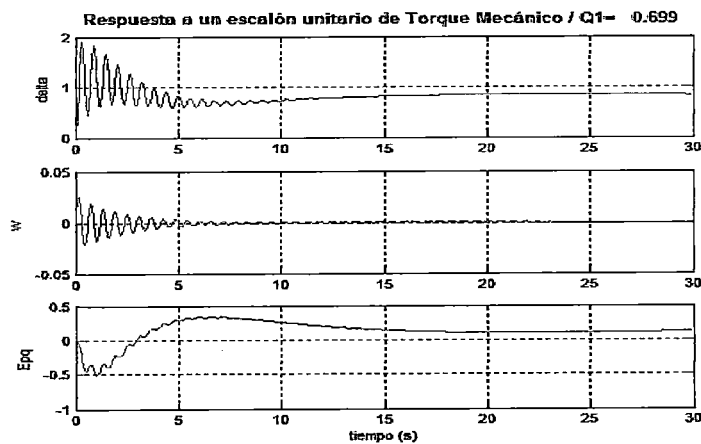


Figura 5.16 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.712$, $X_{12} = 0.42$ y $Q_1 = 0.699$

- 3^{er} caso: De la Tabla 5.6, se tiene $P_1 = 0.475$ p.u y $X_{12} = 0.42$ p.u, las respuestas en el tiempo se muestra en la Figura 5.17.

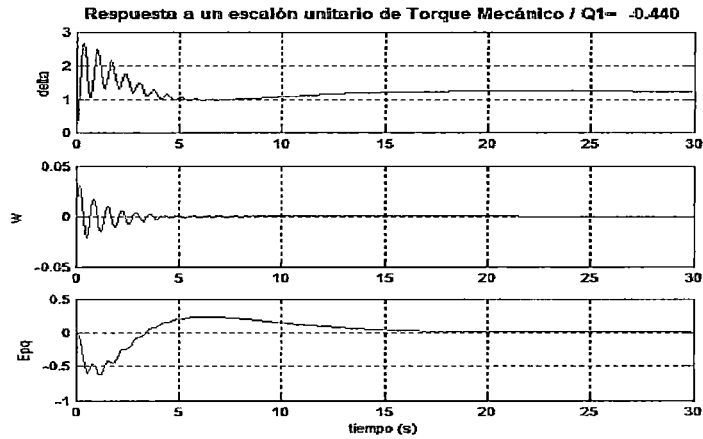


Figura 5.17 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1=0.475$, $X_{12}=0.42$ y $Q_1=-0.440$

En las Figuras 5.16 y 5.17, se observa que las oscilaciones provocadas por el escalón, se amortiguan en un tiempo aproximado a 6 s.

Mediante estas respuestas en el tiempo se confirma los resultados de los eigenvalores obtenidos en las Tabla 5.5 y 5.6 correspondientes al caso analizado.

5.3.2.2 Influencia de las condiciones de operación del SEIN

Los resultados de todas las simulaciones de respuesta en el tiempo considerando los casos de las Tablas 5.7, 5.8 y 5.9 (generador sobreexcitado) y 5.10, 5.11 y 5.12 (generador subexcitado) se muestran en el Anexo D. Las simulaciones a analizar son los casos observados en el acápite 5.2.2.2.

a.- Generador operando sobreexcitado

- 1^{er} caso: De la Tabla 5.7, se tiene $P_1 = 0.95$ p.u y $Q_1 = 0.312$ p.u, la respuesta en el tiempo se muestra en la Figura 5.18.

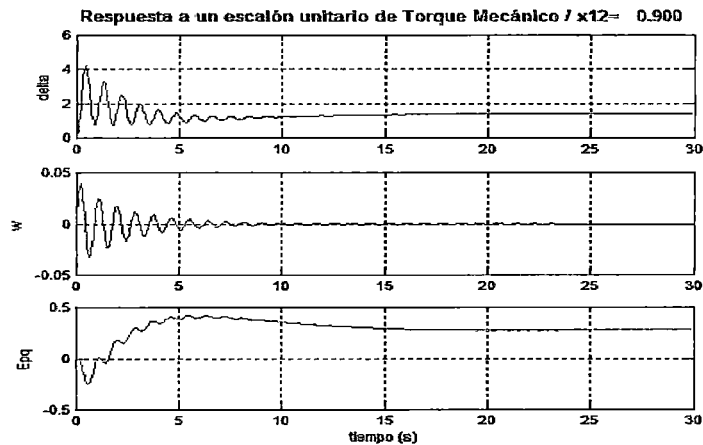


Figura 5.18 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.95$, $Q_1 = 0.312$ y $X_{12} = 0.90$

b.- Generador operando subexcitado

- 2^{do} caso: De la Tabla 5.11, se tiene $P_1 = 0.712$ p.u y $Q_1 = -0.281$ p.u, la respuesta en el tiempo se da en la Figura 5.19.

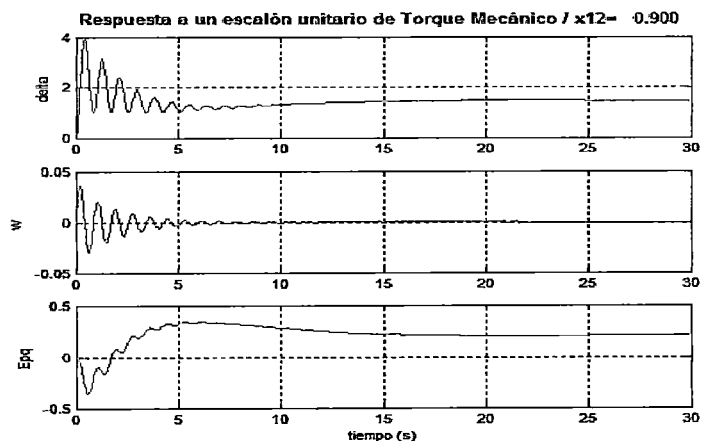


Figura 5.19 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.712$, $Q_1 = -0.281$ y $X_{12} = 0.90$

Se puede apreciar en la Figura 5.18, que la respuesta en el tiempo, ante pequeñas perturbaciones, identifica una condición de operación estable en el sistema de potencia dada cuando el generador esta operando sobrecitado, y la oscilación es amortiguada en un tiempo aproximado de 10 s. Después del evento se observa que adopta una posición de operación diferente o aproximada a la inicial.

En la Figura 5.19, muestra la respuesta en el tiempo para la condición subexcitada de operación del generador frente a una distancia eléctrica de 0.90 p.u; observándose que el sistema dado esta operando en estado estacionario, y ante una pequeña perturbación, la oscilación es amortiguada en un tiempo aproximado de 6 s, confirmando de esta manera que dicha condición de operación es estable.

5.4 RESUMEN DE RESULTADOS

Con la incorporación del estabilizador se logra aumentar la estabilidad permanente y mejorar la respuesta dinámica de un sistema que opera en diferentes condiciones de operación. Los resultados obtenidos mediante simulación del sistema dado con el generador conectado a una barra infinita reflejan que el estabilizador incorporado incrementa la robustez del esquema de control estudiado, con este se obtiene un considerable aumento en la amortiguación, lo cual puede considerarse como satisfactorio.

CAPITULO VI

EFFECTO DEL ESTABILIZADOR DE INTEGRAL DE POTENCIA ACELERANTE

En el presente capítulo se compara los indicadores de la estabilidad permanente de la C.H. Cañón del Pato con el estabilizador que utiliza la señal de potencia activa (antiguo PSS) con sus correspondientes ajustes, frente a los resultados que se obtiene con el PSS que procesa la señal de la integral de potencia acelerante (nuevo PSS), con los ajustes definidos en la referencia [14].

Luego del análisis de los resultados del comportamiento dinámico, para mejorar la robustez de los controladores de excitación de las unidades, se propone un nuevo juego de ajustes para el nuevo PSS.

6.1 ESTRUCTURA DEL PSS DE INTEGRAL DE POTENCIA ACCELERANTE

De la referencia [14], se ha tomado la estructura del estabilizador integral de potencia acelerante tal como se muestra en la Figura 6.1.

Se aprecia que las señales de entrada son el cambio en el ángulo del rotor y el cambio de la potencia activa ($\Delta\delta$, ΔP) y en Tablas 6.1 y 6.2 se muestran los ajustes definidos luego de los ensayos de campo [14].

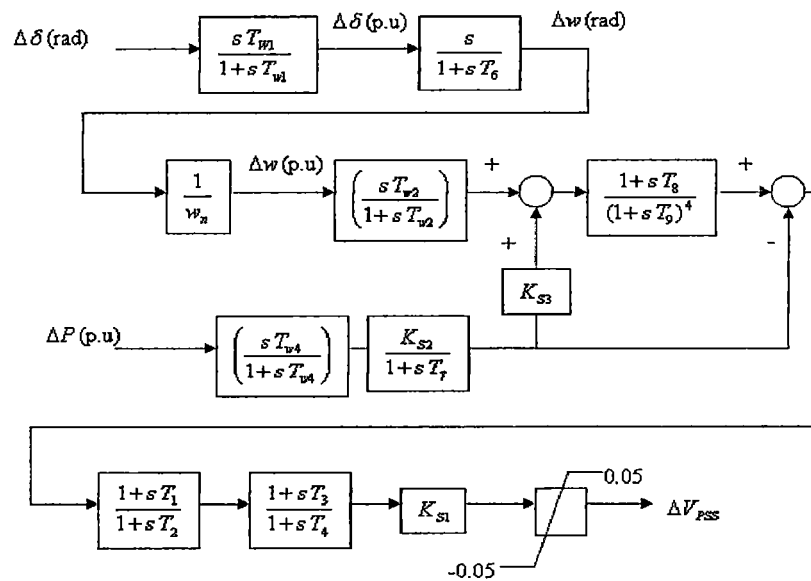


Figura 6.1 Diagrama de bloques del PSS de integral de potencia acelerante

T ₁	T ₂	T ₄	T ₄	T ₆	T ₇	T ₈	T ₉
0,03	0,02	0,03	0,02	0,064	4,0	0,32	0,08

Tabla 6.1 Ajustes del PSS

T _{w1}	T _{w2}	T _{w4}	w _n	K _{s1}	K _{s2}	K _{s3}
4,0	4,0	4,0	376,99	12	1,10	1,0

Tabla 6.2 Ajustes del PSS

Se debe añadir que en las simulaciones de este capítulo, con el nuevo PSS, se ha utilizado en el regulador de tensión, la ganancia y constante de tiempo tal como fueron ajustadas en las pruebas de campo de la referencia [14]. Estas magnitudes se muestran en la Tabla 6.3.

Parámetros	K _p	T _i
Dejado	30	1,30

Tabla 6.3 Ajustes del AVR

En la Figura 6.2 se muestra el diagrama de bloques del sistema linealizado alrededor de un punto de operación con la incorporación del PSS de integral de potencia acelerante.

Caso	P_1 (p.u)	Q_1 (p.u)	Eigenvalores	Amortiguamiento (p.u)	Frecuencia (Hz)
			-15.36±2.54i	0.987	0.40
Caso 1	0.95	-0.156	-9.65±3.31i	0.946	0.53
			-0.10±11.18i	0.009	1.78
			-14.96±2.22i	0.989	0.35
Caso 2	0.712	0.699	-10.04±2.78i	0.964	0.44
			-0.098±11.39i	0.009	1.81
			-15.20±2.41i	0.988	0.38
Caso 3	0.475	-0.440	-9.80±3.12i	0.837	0.50
			-0.432±10.25i	0.042	1.63

Tabla 6.4 Eigenvalor para una condición de operación con una reactancia $X_{12} = 0.42$ p.u.

En la Figura 6.3 se muestra los eigenvalores de la influencia de la condición de operación de la central solo para los puntos de operación correspondiente a la Tabla 6.4.

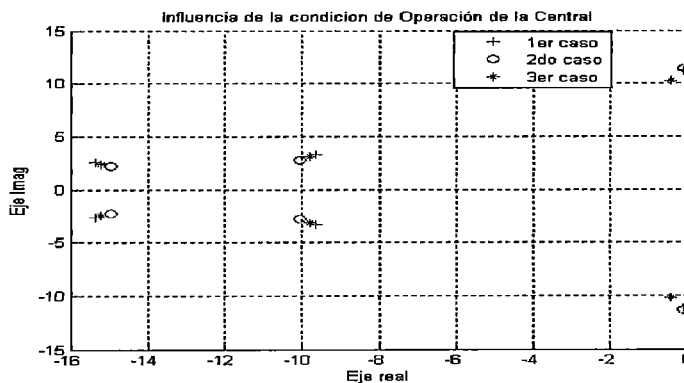


Figura 6.3 Eigenvalores de la condición de operación de la Central

En la Figura 6.3 se observa que los eigenvalores tienen la parte real negativa, indicando el carácter estable del sistema operando en estado estacionario.

El valor del amortiguamiento es pequeño, pero estable para las condiciones de operación de la central.

6.2.2 Influencia de la Condición de Operación del SEIN

Para cada condición de operación del SEIN se obtiene los eigenvalores, el amortiguamiento (p.u) y la frecuencia de oscilación (Hz), tal como se muestra en la Tabla 6.5.

Sobre	Caso	P ₁ (p.u)	Q ₁ (p.u)	X ₁₂ (p.u)	Eigenvalores	Amortiguamiento (p.u)	Frecuencia (Hz)
	1	0.95	0.312	0.90	-15.58±2.67i -9.61±3.86i -0.086±8.74i	0.986 0.932 0.022	0.42 0.61 1.39
Sub	2	0.712	-0.281	0.90	-15.61±2.71i	0.985	0.43
					-9.59±3.90i	0.926	0.62
					-0.319±8.84i	0.036	1.41

Tabla 6.5 Eigenvalor para una condición de operación del generador sobreexcitado y subexcitado

En la Figura 6.4 se muestra los eigenvalores de los casos de influencia de la condición de operación del SEIN solo para los puntos de operación correspondiente a los dos casos de la Tabla 6.5.

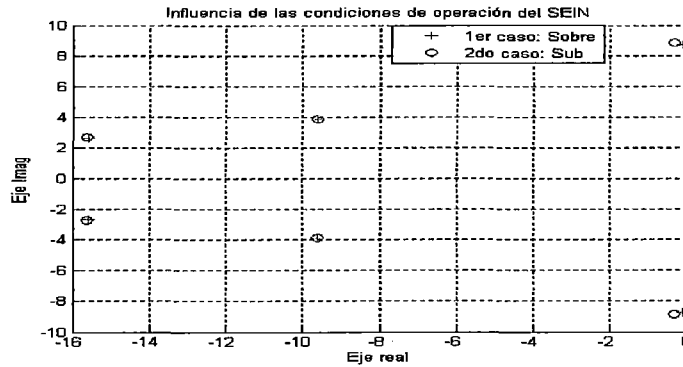


Figura 6.4 Eigenvalores de la condición de operación del SEIN: Caso Generador sobreexcitado y subexcitado

Se observa en la Figura 6.4 que los eigenvalores están ubicados en la región estable, para las condiciones de operación de sobre y subexcitación del generador.

6.3 RESPUESTA EN EL TIEMPO

Se ha graficado la respuesta en el tiempo para una condición de operación de acuerdo a la Tabla 6.4 (Influencia de la condición de operación de la central) y la Tabla 6.5 (Influencia de la condición de operación del SEIN) con la finalidad de verificar los resultados de los eigenvalores obtenidos en los acápites 6.2.1 y 6.2.2 respectivamente. Las simulaciones realizadas tienen como variables de salida Δw , $\Delta \delta$, $\Delta E'_q$.

6.3.1 Influencia de la condición de operación de la central

Las gráficas obtenidas a continuación corresponden a la condición de operación de acuerdo al acápite 6.2.1.

- 1^{er} caso: El punto de operación de acuerdo a la Tabla 6.4: $P_1=0.95$, $X_{12}=0.42$ y $Q_1=-0.156$, la respuesta en el tiempo se observa en la Figura 6.5.

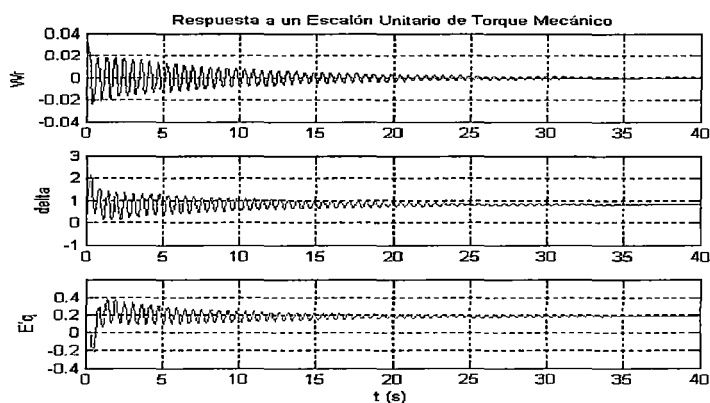


Figura 6.5 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.95$, $X_{12} = 0.42$ y $Q_1 = -0.156$

- 2^{do} caso: Para el punto de operación de acuerdo a la Tabla 6.4: $P_1=0.712$, $X_{12}=0.42$ y $Q_1=0.699$, la respuesta en el tiempo se observa en la Figura 6.6.

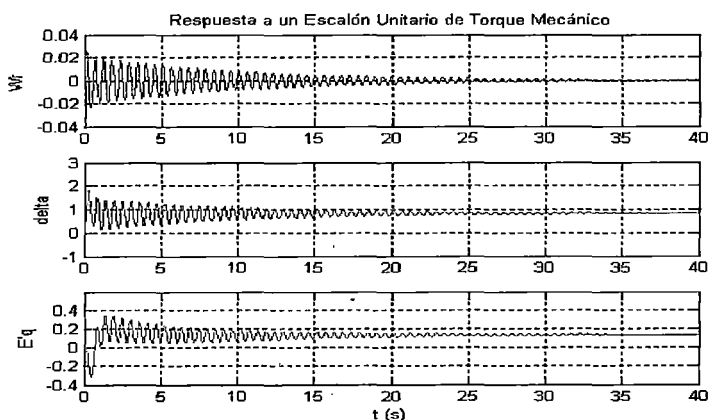


Figura 6.6 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.712$, $X_{12} = 0.42$ y $Q_1 = 0.699$

- 3er caso: El punto de operación de acuerdo a la Tabla 6.4: $P_1=0.475$, $X_{12}=0.42$ y $Q_1=-0.440$, la respuesta en el tiempo se observa en la Figura 6.7

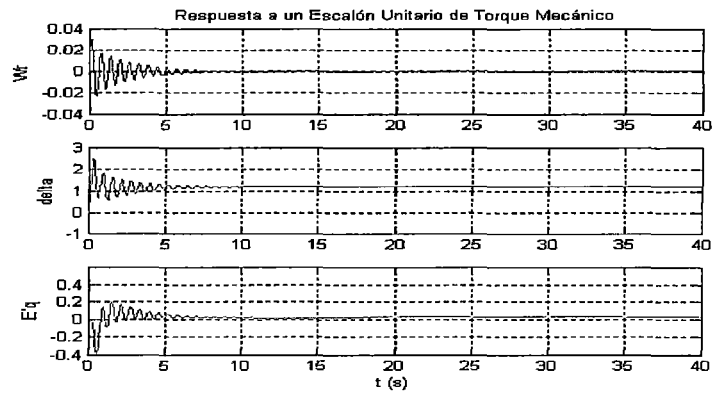


Figura 6.7 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.475$, $X_{12} = 0.42$ y $Q_1 = -0.440$

6.3.2 Influencia de la condición de operación del SEIN

Las gráficas obtenidas a continuación corresponden a la condición de operación de acuerdo las Tabla 6.5 (Generador sobrexcitado y Generador subexcitado) que se encuentra en el acápite 6.2.2.

- Sobrexcitado: Para el punto de operación del 1^{er} caso de la Tabla 6.5: $P_1=0.95$, $Q_1=0.312$ y $X_{12}=0.90$, la respuesta en el tiempo se observa en la Figura 6.8.

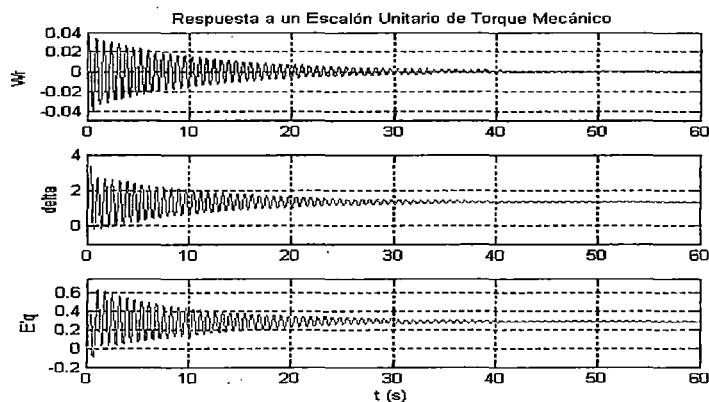


Figura 6.8 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.95$, $Q_1 = 0.312$ y $X_{12} = 0.90$

- **Subexcitado:** Para el punto de operación del 2^{do} caso de la Tabla 6.5: $P_1=0.712$, $Q_1=0.281$ y $X_{12}=0.90$, la respuesta en el tiempo se observa en la Figura 6.9

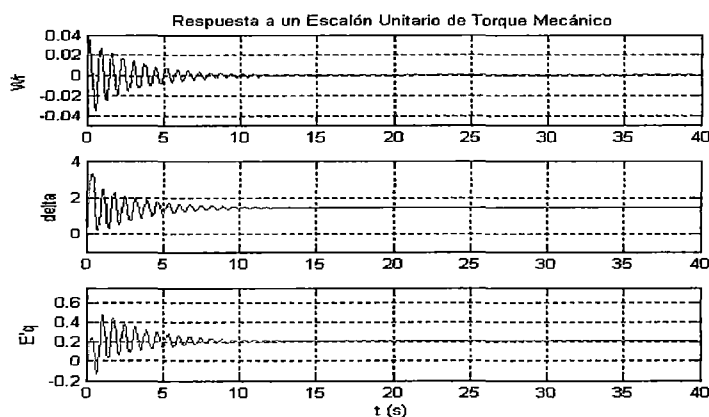


Figura 6.9 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1= 0.712$, $Q_1=- 0.281$ y $X_{12}= 0.90$

Se observa que en las Figuras 6.5, 6.6 (influencia de la condición de operación de la central) el tiempo de amortiguación de las oscilaciones es aproximadamente 30 s y en la Figura 6.7 es alrededor de los 10 s.

En las Figura 6.8 (influencia de la condición de operación del SEIN) se observa que la falta de amortiguamiento es más notoria, con un tiempo aproximado de amortiguación de 40 s, debido a la alta reactancia que tiene para esta condición de operación y en la Figura 6.9 se obtiene un tiempo de amortiguación de 10s.

Se puede concluir que el poco amortiguamiento que proporciona el PSS de señal integral de potencia acelerante, indica que es necesario modificar el ajuste de la ganancia del PSS. Para ello es conveniente realizar los ajustes considerando las condiciones mas criticas que pueda presentarse durante su operación en estado estacionario.

A continuación se realiza la comparación del PSS de señal de potencia activa y de integral de potencia acelerante, para poder observar con claridad el desempeño de los dos PSS en operación estacionaria.

6.4 COMPARACIÓN DE EFECTOS ENTRE EL PSS DE SEÑAL DE POTENCIA ACTIVA Y EL DE INTEGRAL DE POTENCIA ACELERANTE

En el siguiente acápite se realiza la comparación de las respuestas de los estabilizadores de señal de potencia activa y el que utiliza la integral de la potencia acelerante. Para comparar los efectos que proporciona la incorporación de los dos PSS mencionados, se muestra los eigenvalores y la respuesta en el tiempo para la condición de operación de la central y del SEIN.

6.4.1 Calculo de Eigenvalores

Se muestra en una sola Figura la comparación de los eigenvalores para los dos PSS mencionados líneas arriba.

6.4.1.1 Influencia de la condición de operación de la central

- 1er caso: Para el punto de operación: $P_1=0.95$, $X_{12}=0.42$ y $Q_1= -0.156$, la posición de los eigenvalores se observa en la Figura 6.10.

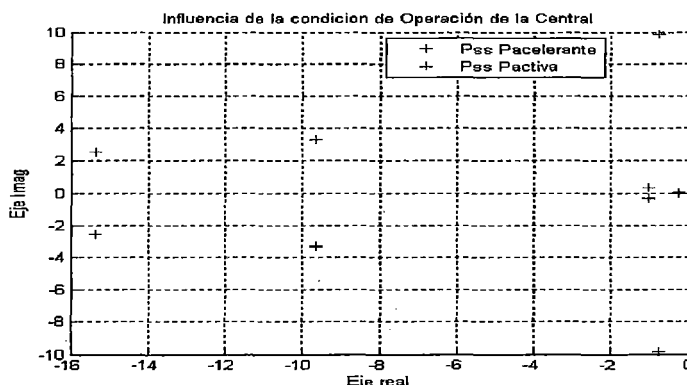


Figura 6.10 Eigenvalores para la condición de operación de la central

- 2do caso: Para el punto de operación: $P_1=0.712$, $X_{12}=0.42$ y $Q_1=0.699$, la posición de los eigenvalores se observa en la Figura 6.11.

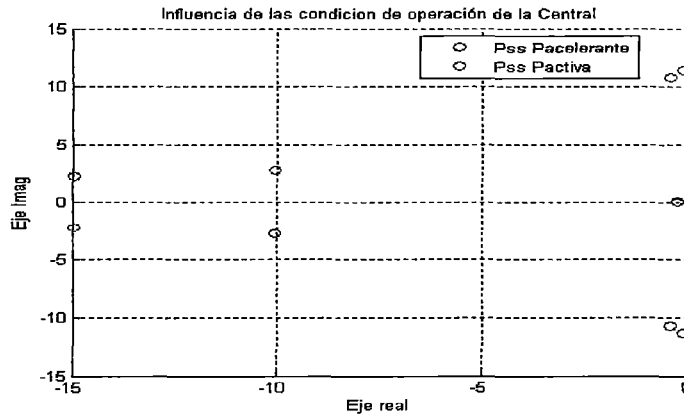


Figura 6.11 Eigenvalores para la condición de operación de la central

- 3er caso: Para el punto de operación: $P_1= 0.475$, $X_{12}=0.42$ y $Q_1=-0.440$, la posición de los eigenvalores se observa en la Figura 6.12.

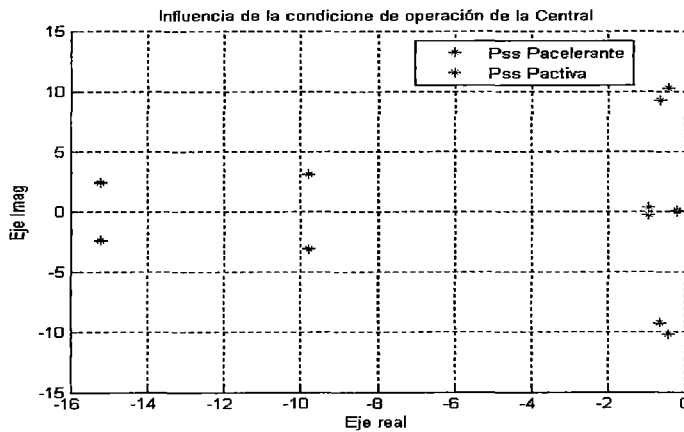


Figura 6.12 Eigenvalores para la condición de operación de la central

6.4.1.2 Influencia de la condición de operación del SEIN

- Sobrexcitado: Del 1^{er} caso, para el punto de operación: $P_1=0.95$, $Q_1=0.312$ y $X_{12}=0.90$, los eigenvalores se muestra en la Figura 6.13.

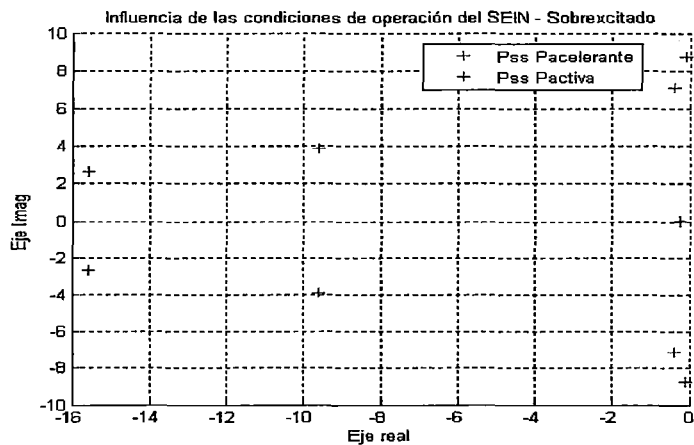


Figura 6.13 Eigenvalores para condición de operación del SEIN

- **Subexcitado:** Del 2^{do} caso, el punto de operación: $P_1=0.713$, $Q_1=-0.281$ y $X_{12}=0.90$, los eigenvalores se muestra en la Figura 6.14.

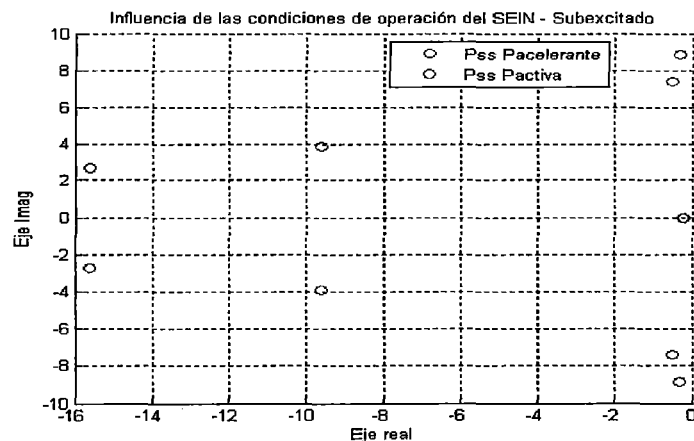


Figura 6.14 Eigenvalores para la condición de operación del SEIN

6.4.2 Respuesta en el tiempo

Se muestra en una sola Figura la respuesta en el tiempo dada por los dos PSS (Potencia activa e Integral de potencia acelerante).

6.4.2.1 Influencia de la condición de operación de la central

- **1^{er} caso:** Para la condición de operación: $P_1=0.95$, $X_{12}=0.42$ y $Q_1=-0.156$, las respuestas en el tiempo se observan en las Figuras 6.15, 6.16 y 6.17.

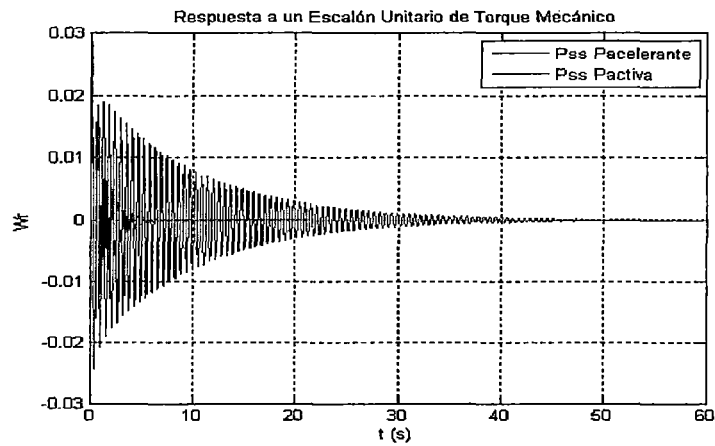


Figura 6.15 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1= 0.95$, $X_{12}= 0.42$ y $Q_1=- 0.156$

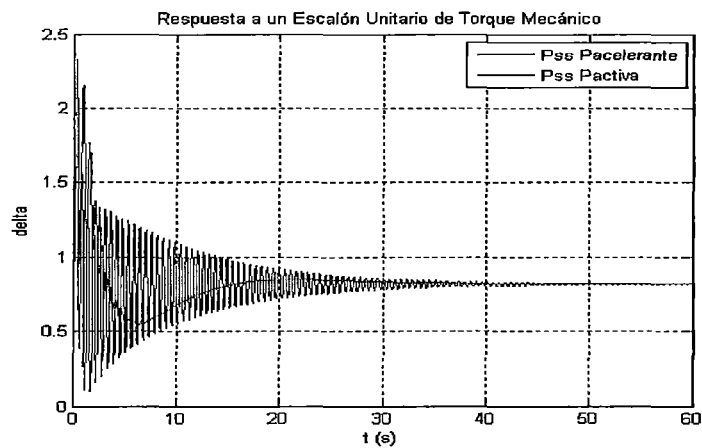


Figura 6.16 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1= 0.95$, $X_{12}= 0.42$ y $Q_1=- 0.156$

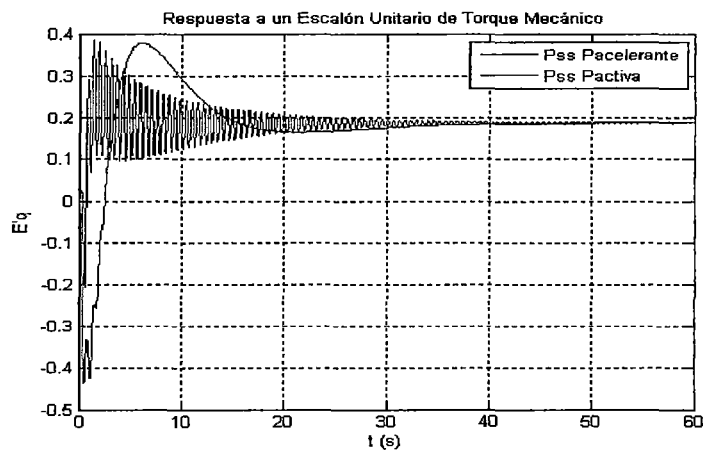


Figura 6.17 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1= 0.95$, $X_{12}= 0.42$ y $Q_1=- 0.156$

- 2^{do} caso: Para la condición de operación: $P_1=0.712$, $X_{12}=0.42$ y $Q_1=0.699$, las respuestas en el tiempo se observan en las Figuras 6.18, 6.19 y 6.20.

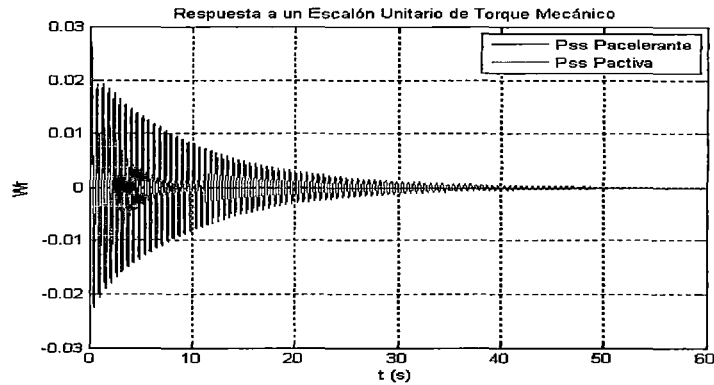


Figura 6.18 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1=0.712$, $X_{12}=0.42$ y $Q_1=-0.699$

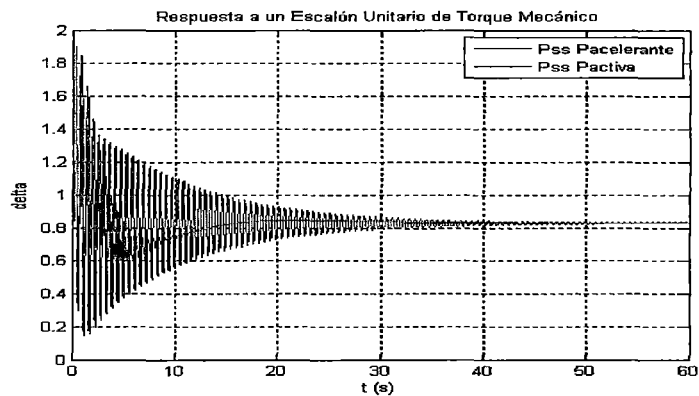


Figura 6.19 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1=0.712$, $X_{12}=0.42$ y $Q_1=-0.699$

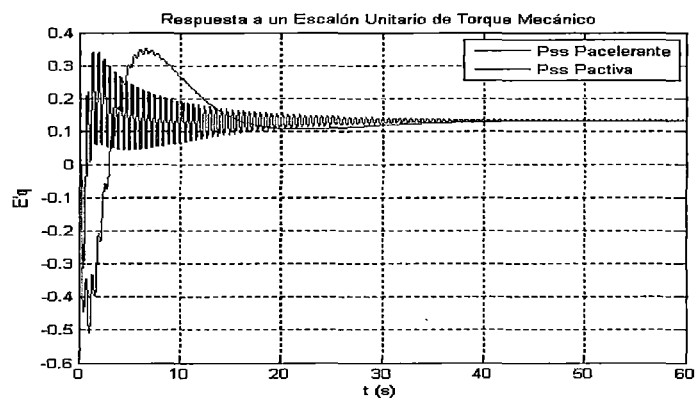


Figura 6.20 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1=0.712$, $X_{12}=0.42$ y $Q_1=-0.699$

- 3er caso: Para la condición de operación: $P_1=0.475$, $X_{12}=0.42$ y $Q_1=-0.440$, las respuestas en el tiempo se observan en las Figuras 6.21, 6.22 y 6.23.

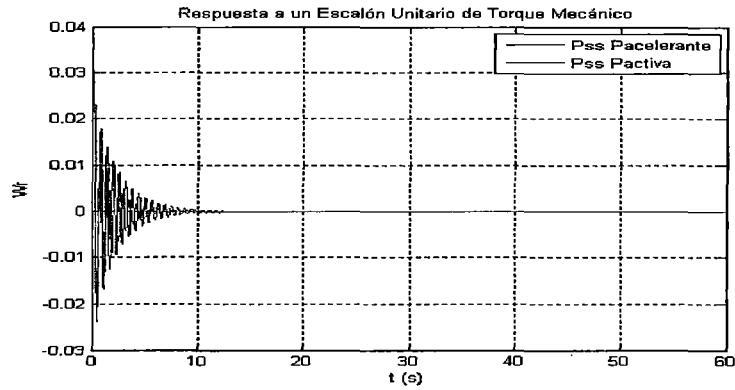


Figura 6.21 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1=0.475$, $X_{12}=0.42$ y $Q_1=-0.440$

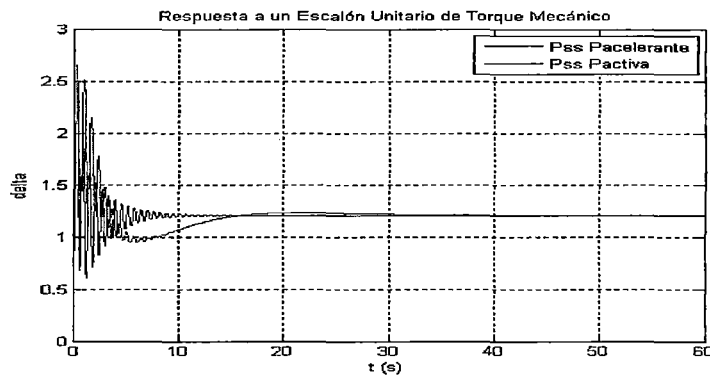


Figura 6.22 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1=0.475$, $X_{12}=0.42$ y $Q_1=-0.440$

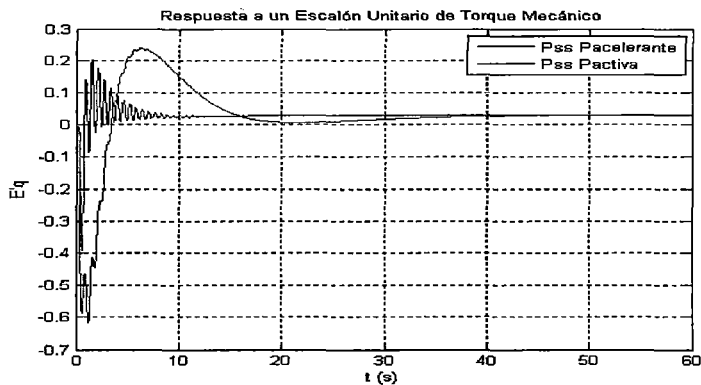


Figura 6.23 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1=0.475$, $X_{12}=0.42$ y $Q_1=-0.440$

6.4.2.2 Influencia de la condición de operación del SEIN

- Sobreexcitado: Del 1er caso, para el punto de operación: $P_1=0.95$, $Q_1=0.312$ y $X_{12}=0.90$, las respuestas en el tiempo se observan en las Figuras 6.24, 6.25 y 6.26.

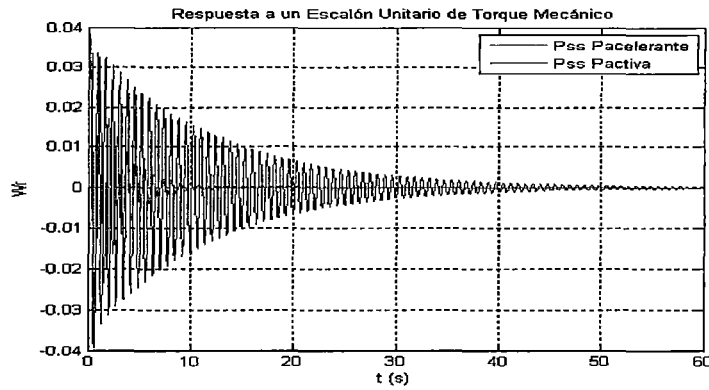


Figura 6.24 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1=0.95$, $Q_1=0.312$ y $X_{12}=0.90$

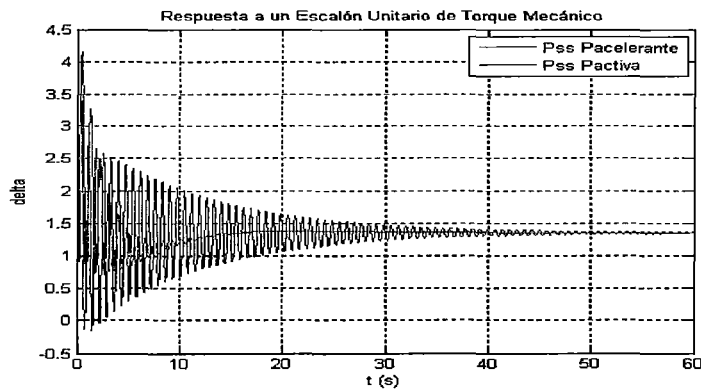


Figura 6.25 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1=0.95$, $Q_1=0.312$ y $X_{12}=0.90$

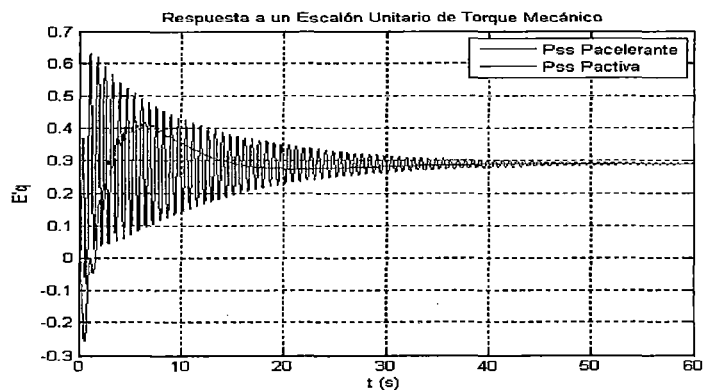


Figura 6.26 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1=0.95$, $Q_1=0.312$ y $X_{12}=0.90$

- **Subexcitado:** Del 2^{do} caso, para la condición de operación: $P_1=0.712$, $Q_1=-0.281$ y $X_{12}=0.90$, las respuestas en el tiempo se observan en las Figuras 6.27, 6.28 y 6.29.

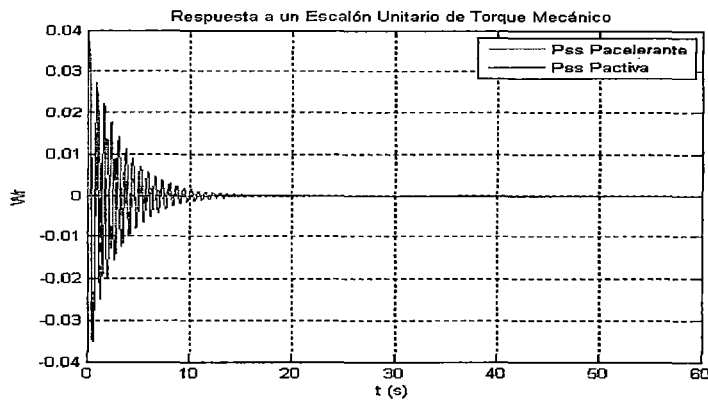


Figura 6.27 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1=0.712$, $Q_1=-0.281$ y $X_{12}=0.90$

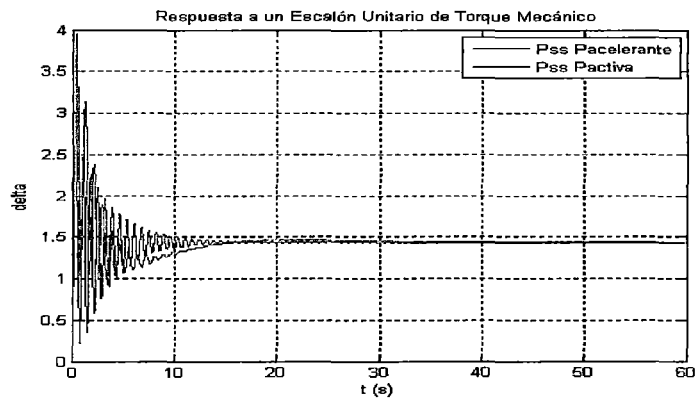


Figura 6.28 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1=0.712$, $Q_1=-0.281$ y $X_{12}=0.90$

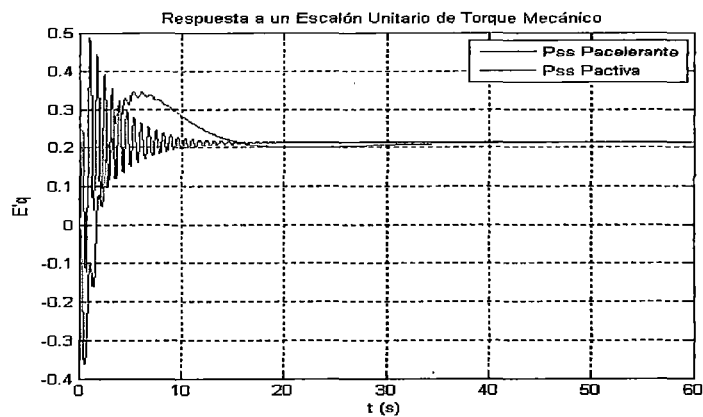


Figura 6.29 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1=0.712$, $Q_1=-0.281$ y $X_{12}=0.90$

En las Figuras 6.15 al 6.29 (condición de operación de la central y del SEIN), se pone en evidencia que es necesario modificar el ajuste de las ganancias del PSS integral de potencia acelerante, ya que se observa en las Figuras mencionadas que el PSS potencia activa tiene un menor tiempo de amortiguación frente a los pequeños cambios que presenta el sistema, reflejadas en las variables de estado. Estos resultados verifican lo observado en las graficas de los eigenvalores en las Figuras 6.10, 6.11 y 6.12 (condición de operación de la central) y en las Figuras 6.13 y 6.14 (condición de operación del SEIN - sobreexcitado y subexcitado). Por ello se tiene que ajustar las ganancias de PSS de integral de potencia acelerante de tal modo que su operación en estado estacionario sea estable para cualquier condición de operación.

En el siguiente ítem se muestra las simulaciones para las condiciones de operación analizadas con los nuevos ajustes propuestos para el PSS de integral de potencia acelerante.

6.5 AJUSTES PROPUESTOS PARA EL PSS DE INTEGRAL DE POTENCIA ACELERANTE

El ajuste para el PSS de integral de potencia acelerante se ha realizado mediante un proceso de prueba y error, obteniéndose los valores de ganancia $K_{s1} = 18$ y $K_{s2} = 1.5$. Estos valores de ganancia son los propuestos y se encuentran dentro del rango típico recomendado en la referencia [16] para los parámetros de este tipo de PSS.

Con los nuevos ajustes propuestos para el PSS de potencia acelerante se realiza la comparación del PSS potencia acelerante que actualmente posee la

C.H Cañón del Pato (sin modificaciones) y el PSS de potencia activa, en la comparación se muestran las graficas de los eigenvalores y se verifica con la simulación respuesta en el tiempo.

6.5.1 Calculo de Eigenvalores

6.5.1.1 Influencia de la condición de operación de la central

- 1er caso: $P_1=0.95$, $X_{12}=0.42$ y $Q_1= -0.156$, los eigenvalores se muestra en la Figura 6.30.

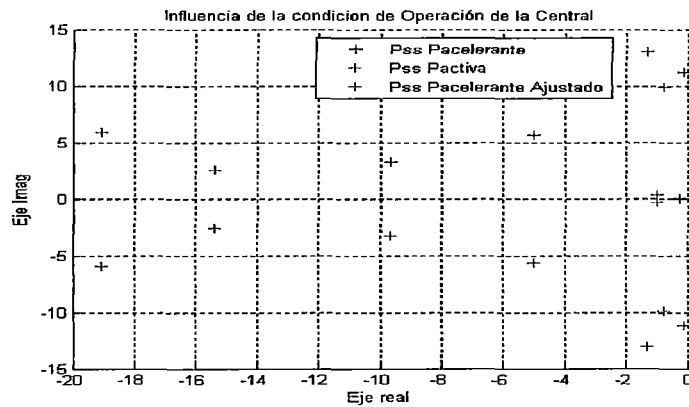


Figura 6.30 Eigenvalores para la condición de operación de la central

- 2do caso: Para el punto de operación: $P_1=0.713$, $X_{12}=0.42$ y $Q_1=0.699$, los eigenvalores se muestra en la Figura 6.31.

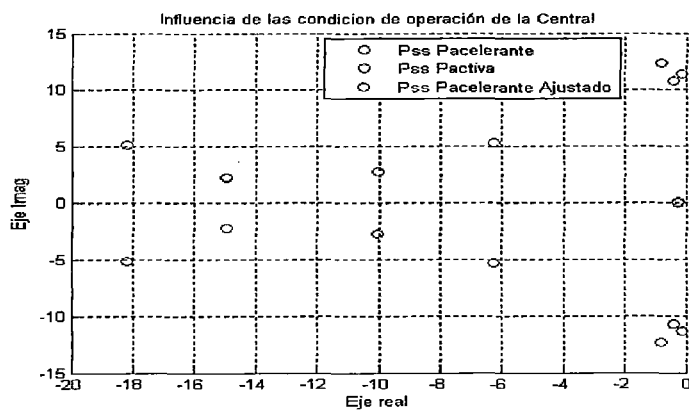


Figura 6.31 Eigenvalores para la condición de operación de la central

- **3er caso:** Para el punto de operación: $P_1 = -0.475$, $X_{12} = 0.42$ y $Q_1 = -0.44$, la posición de los eigenvalores se observa en la Figura 6.32.

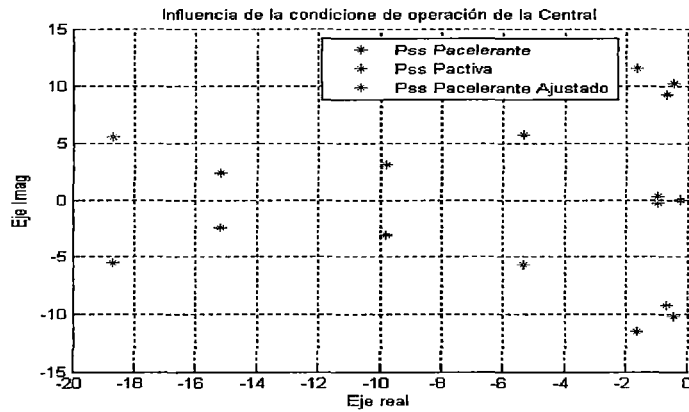


Figura 6.32 Eigenvalores para la condición de operación de la central

6.5.1.2 Influencia de la condición de operación del SEIN

- **Sobrexcitado:** Del 1^{er} caso, para el punto de operación: $P_1 = 0.95$, $Q_1 = 0.312$ y $X_{12} = 0.90$, la posición de los eigenvalores se obtiene en la Figura 6.33.

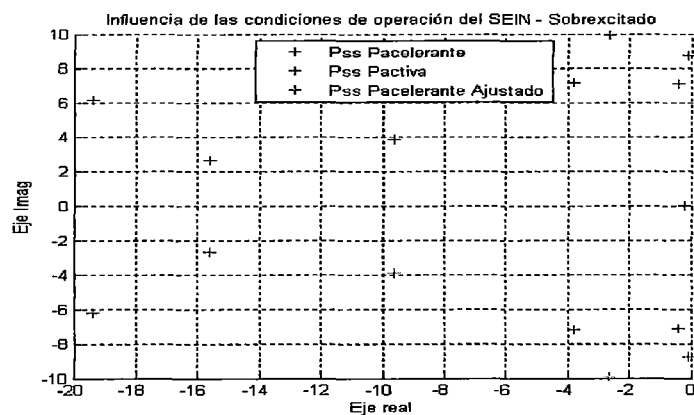


Figura 6.33 Eigenvalores para la condición de operación del SEIN

- **Subexcitado:** Del 2^{do} caso, el punto de operación: $P_1 = 0.713$, $Q_1 = -0.281$ y $X_{12} = 0.90$, la posición de los eigenvalores se obtiene en la Figura 6.34.

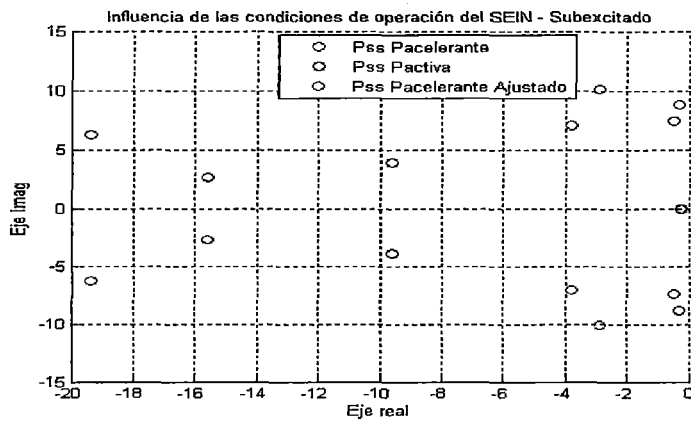


Figura 6.34 Eigenvalores para la condición de operación del SEIN

6.5.2 Respuesta en el tiempo

Los resultados de todas las simulaciones de la respuesta en el tiempo para los casos de las condiciones de operación propuestas para el análisis se muestran en el Anexo F, que incluye las graficas de las variables de salida de la Tensión, Potencia reactiva y Potencia Activa en bornes del generador síncrono.

A continuación se muestran los resultados de las simulaciones de los casos analizados en el presente estudio.

6.5.2.1 Influencia de la condición de operación de la central

- 1er caso: Para la condición de operación: $P_1=0.95$, $X_{12}=0.42$ y $Q_1=0.156$, las respuestas en el tiempo se observan en las Figuras 6.35 al 6.37.

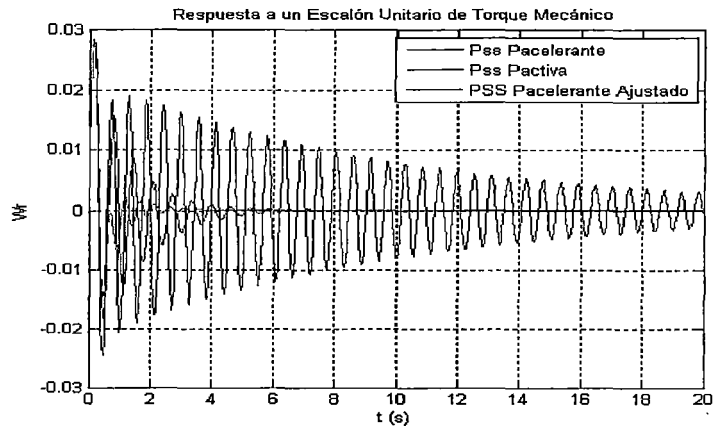


Figura 6.35 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1= 0.95$, $X_{12}= 0.42$ y $Q_1=- 0.156$

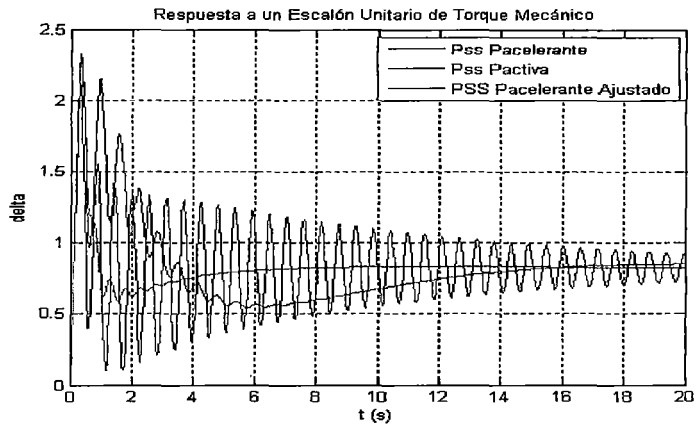


Figura 6.36 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1= 0.95$, $X_{12}= 0.42$ y $Q_1=- 0.156$

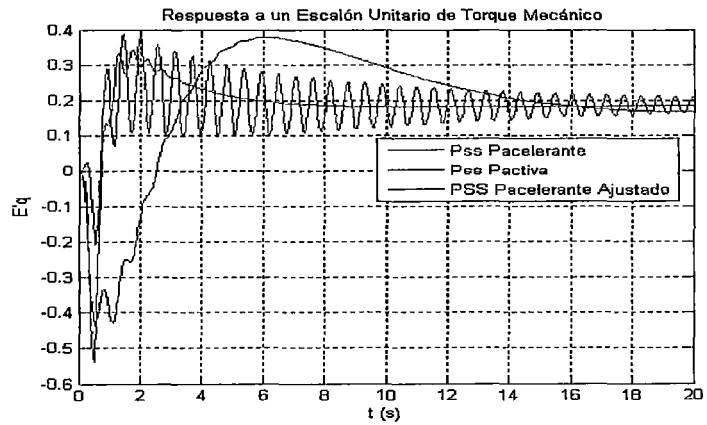


Figura 6.37 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1= 0.95$, $X_{12}= 0.42$ y $Q_1=- 0.156$

- 2do caso: Para la condición de operación: $P_1=0.712$, $X_{12}=0.42$ y $Q_1=0.699$, las respuestas en el tiempo se observan en las Figuras 6.38 al 6.40.

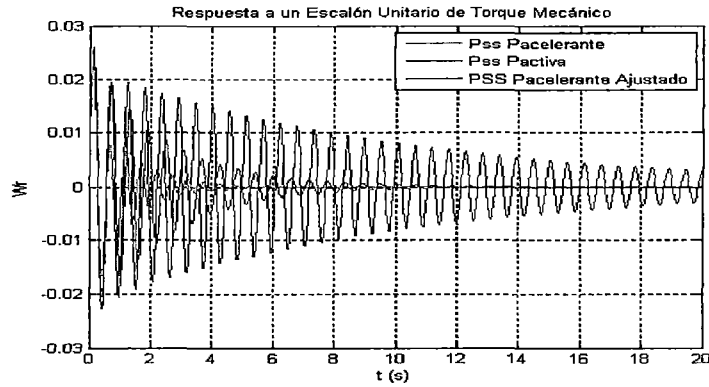


Figura 6.38 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1=0.712$, $X_{12}=0.42$ y $Q_1=-0.699$

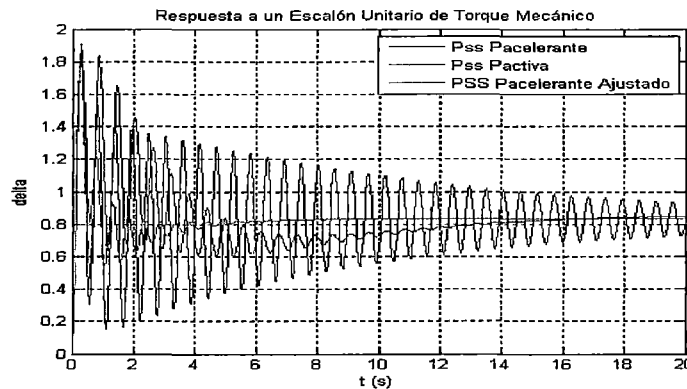


Figura 6.39 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1=0.712$, $X_{12}=0.42$ y $Q_1=-0.699$

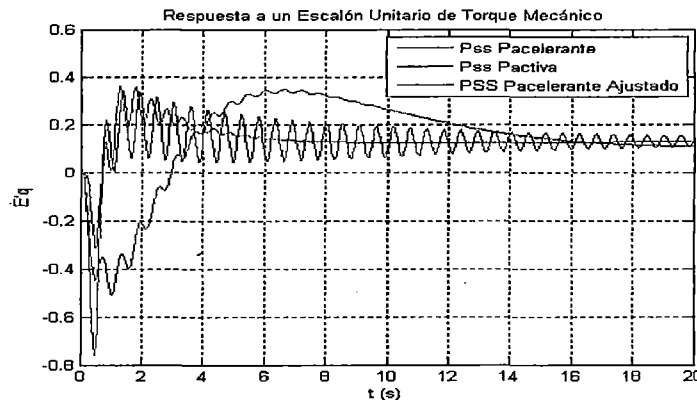


Figura 6.40 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1=0.712$, $X_{12}=0.42$ y $Q_1=-0.699$

- **3er caso:** Para la condición de operación: $P_1=-0.475$, $X_{12}=0.42$ y $Q_1=-0.44$, las respuestas en el tiempo se observan en las Figuras 6.41 al 6.43.

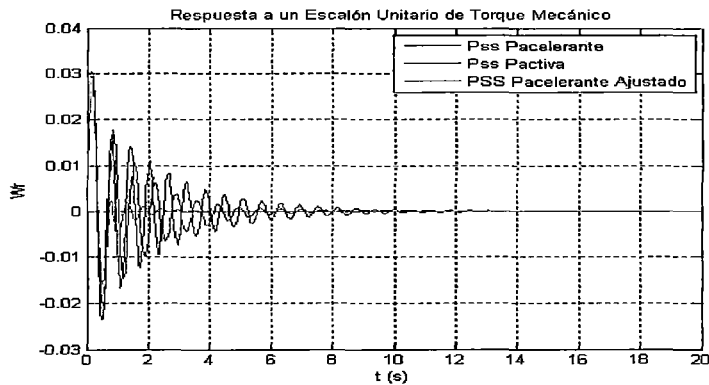


Figura 6.41 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1= 0.475$, $X_{12}= 0.42$ y $Q_1=-0.440$

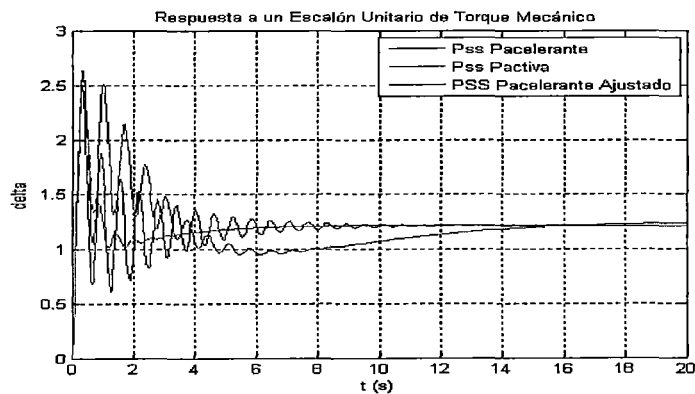


Figura 6.42 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1= 0.475$, $X_{12}= 0.42$ y $Q_1=-0.440$

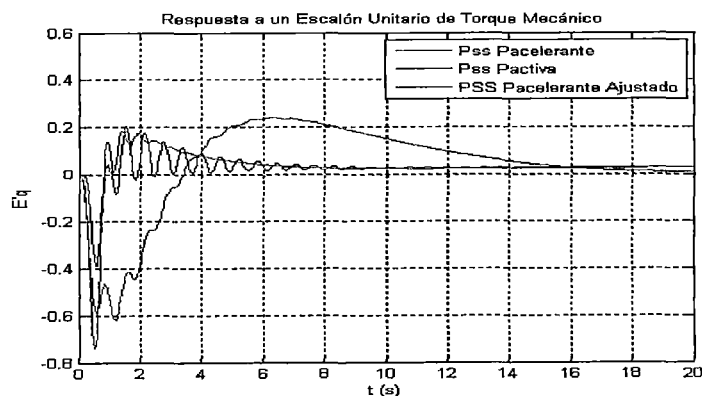


Figura 6.43 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1= 0.475$, $X_{12}= 0.42$ y $Q_1=-0.440$

6.5.2.2 Influencia de la condición de operación del SEIN

- **Sobreexcitado:** Del 1er caso, para el punto de operación: $P_1=0.95$, $Q_1= 0.312$ y $X_{12}=0.90$, las respuestas en el tiempo se observan en las Figuras 6.44 al 6.46.

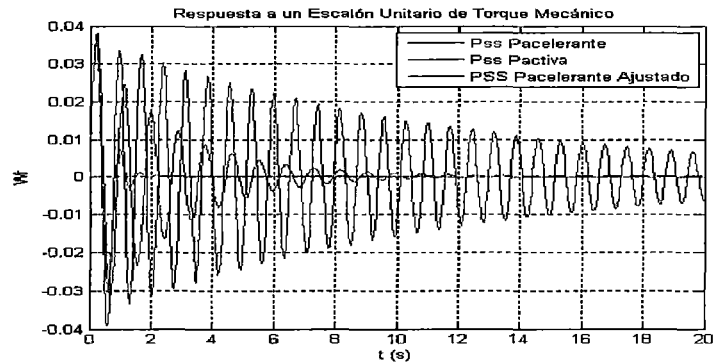


Figura 6.44 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1= 0.95$, $Q_1=0.312$ y $X_{12}= 0.90$

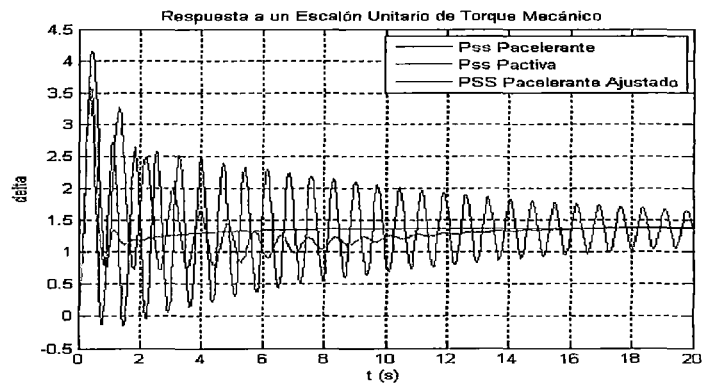


Figura 6.45 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1= 0.95$, $Q_1=0.312$ y $X_{12}= 0.90$

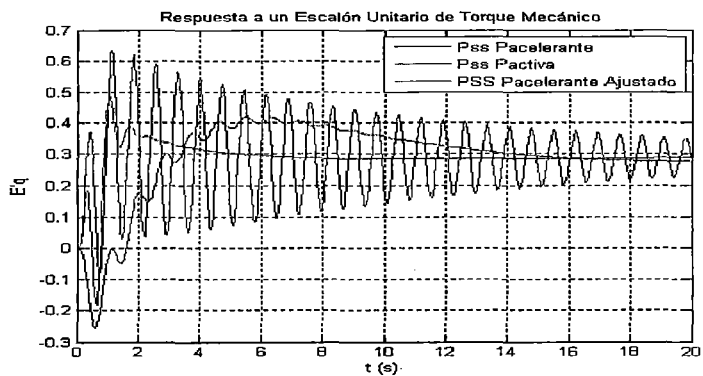


Figura 6.46 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1= 0.95$, $Q_1=0.312$ y $X_{12}= 0.90$

- **Subexcitado:** Del 2^{do} caso, para la condición de operación: $P_1=0.712$, $Q_1=-0.281$ y $X_{12}=0.90$, las respuestas en el tiempo se observan en las Figuras 6.47 al 6.49.

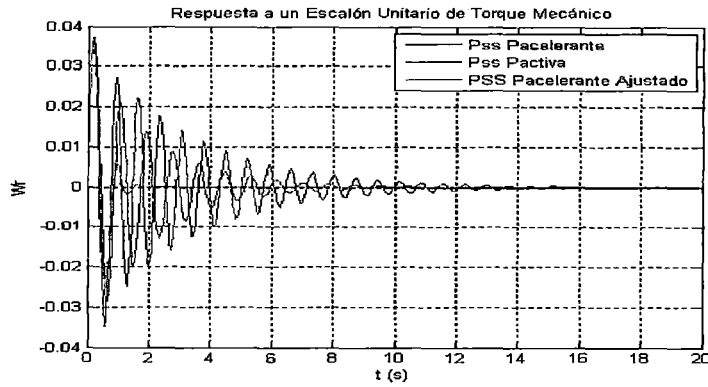


Figura 6.47 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1=0.712$, $Q_1=-0.281$ y $X_{12}=0.90$

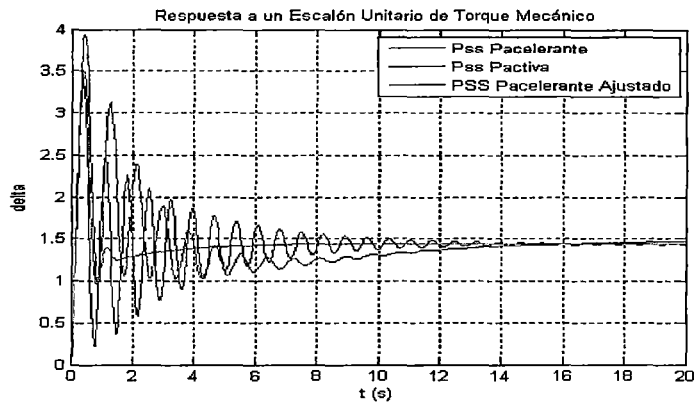


Figura 6.48 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1=0.712$, $Q_1=-0.281$ y $X_{12}=0.90$

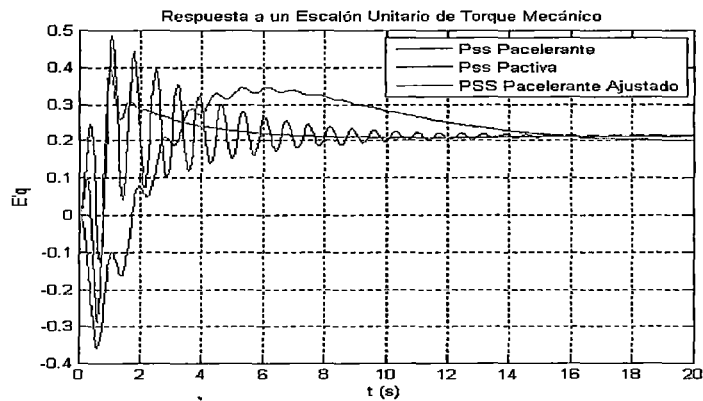


Figura 6.49 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1=0.712$, $Q_1=-0.281$ y $X_{12}=0.90$

6.6 RESUMEN DE RESULTADOS

Con la incorporación del PSS integral de potencia acelerante con los ajustes propuestos se muestran una mejora notable en los eigenvalores y en la respuesta en el tiempo. Se puede observar que el tiempo de amortiguamiento es mucho menor (2 – 3 s) comparado con el tiempo de los otros dos casos simulados (PSS de Potencia activa y PSS de integral de Potencia acelerante sin modificaciones).

Con los resultados obtenidos se muestra que se ha logrado aumentar la estabilidad permanente mejorando la respuesta dinámica del sistema en estudio, es decir que el estabilizador de integral de potencia acelerante (con los nuevos ajustes) incrementa notablemente la robustez de los controladores ya que se obtiene un óptimo aumento en la amortiguación de las oscilaciones.

CAPITULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Con esta metodología es posible estudiar la estabilidad permanente de un sistema generador-línea-sistema eléctrico de potencia (G-L-SEP), verificando la robustez de los ajustes del sistema de excitación y regulación de tensión (conformado por la excitatriz, el regulador de tensión y el estabilizador de sistemas de potencia), considerando diversas condiciones de operación en estado estacionario.
- Como parte del análisis de la estabilidad permanente del sistema G-L-SEP, se ha identificado un conjunto de coeficientes de estabilidad permanente, que a partir del análisis de sus valores y del signo que asumen, que depende de las condiciones de operación del SEP, es posible diagnosticar la estabilidad permanente del sistema. Utilizando los datos y características del sistema de transmisión asociado a la C.H. Cañón del Pato, se muestra que, independientemente de las condiciones de operación, los coeficientes de estabilidad permanente (K_1 , K_2 , K_3 , K_4 y K_6) resultan siempre positivos. Sin embargo, el coeficiente K_5 puede asumir valores negativos y en el caso de la C.H. Cañón del Pato es negativo para todas las condiciones de operación y su magnitud muestra cierta dependencia con la reactancia externa vista desde los terminales de la central.

- Es importante destacar que los coeficientes de estabilidad se expresan en función de las condiciones iniciales de operación, los parámetros del generador y las características de la impedancia de externa de conexión al sistema (vista desde los bornes del generador), por lo tanto estos coeficientes representan las características naturales de la dinámica del generador y el sistema y no dependen del efecto del Sistema de Excitación y Regulación de Tensión ni del Estabilizador de Sistemas de Potencia.
- Mediante el cálculo de los eigenvalores del sistema G-L-SEP utilizado para expresar a la C.H. Cañón del Pato para diferentes condiciones de operación o de reactancia externa se muestra si el comportamiento del sistema en estado estacionario va a ser estable o inestable. Asimismo con la ayuda de las simulaciones de la respuesta en el tiempo se confirma la estabilidad permanente asociada a cada punto de operación.
- Se muestra que con la incorporación del PSS (Potencia Activa), todas las variables de estado presentan oscilaciones amortiguadas, ya que por el aporte de la señal del PSS se adiciona amortiguamiento positivo a las oscilaciones de potencia.
- El efecto del PSS se traduce en el desplazamiento de los eigenvalores en el plano complejo, con lo cual se asegura que su parte real sea negativa y con ello dotar al sistema de un amortiguamiento positivo, que garantiza una operación estable del sistema ante pequeñas perturbaciones.

- Los resultados de las simulaciones con la metodología propuesta, han mostrado la robustez de los controladores de la C.H. Cañón del Pato frente a diversas condiciones de operación de la central y frente a diversas reactancias externas, que expresan eventuales cambios topológicos en el SEIN. Y obviamente se ha justificado la presencia del PSS (Potencia Activa) en esta central.
- Los resultados de las simulaciones con la metodología propuesta, muestran que los ajustes del PSS actual que utiliza la señal de integral de potencia acelerante, debe ser modificados para dotar al sistema de un mejor amortiguamiento y aprovechar de mejor manera las ventajas de un PSS que procesa la señal de integral de potencia acelerante.
- Con las nuevas ganancias utilizadas en el PSS de Integral de Potencia Acelerante, se puede observar que responde con una mayor rapidez ante las oscilaciones y se mejora notablemente el amortiguamiento, por ello se recomienda utilizar los ajustes encontrados para las ganancias del PSS (Integral de Potencia Acelerante), ya que con los ajustes actuales no se está utilizando de modo eficiente a este PSS. Los nuevos ajustes han sido obtenidos a partir de la operación permanente con reactancias externas críticas.
- Se recomienda la realización del estudio de estabilidad permanente para todas las centrales del SEIN, para verificar la robustez de sus controladores y si fuera el caso, ajustarlos para condiciones críticas de operación.

ANEXOS

ANEXO A

EFECTO DEL BLOQUE DE COMPENSACIÓN REACTIVA DEL AVR SOBRE LA DINÁMICA DEL GENERADOR

1. Objetivo

Mostrar que el efecto del bloque de compensación reactiva del AVR de la C.H. Cañón del Pato, mostrado en la Figura 1, puede ser dejado de lado en los análisis de estabilidad permanente. El diagrama de bloques del AVR se ha tomado del informe de pruebas de REIVAX en los PSS de la C.H. Cañón del Pato.

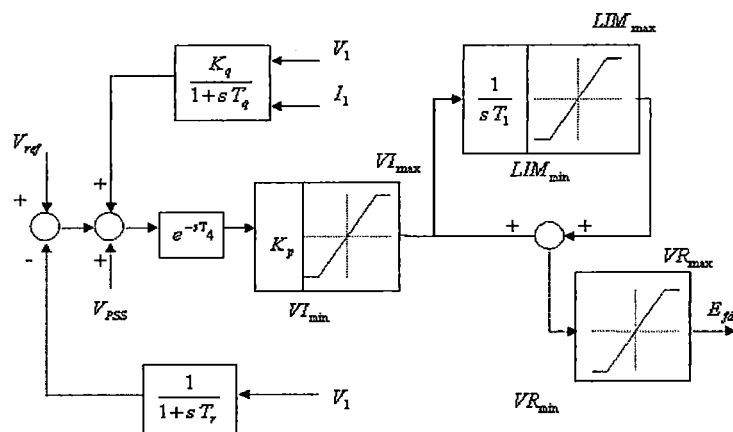


Figura 1 Diagrama de bloque del AVR

2. Condición de operación del sistema equivalente

Las simulaciones y cálculos se han realizado para la condición de operación siguiente: Utilizando como base 259,56 MVA (6*43,26MVA), el generador equivalente que representa a los 6 grupos en operación, está despachado con una potencia activa y reactiva de $0,95 + j 0,312$ p.u. por sus bornes a una tensión de 1,0 p.u. La reactancia externa, que conecta al generador con el sistema es igual a 0,46 p.u. (expresada en una base de 259,56 MVA) y la tensión V_s del sistema equivalente de 0,912 p.u.

3. Simulaciones Realizadas

Primeramente, para la condición de operación en estado estacionario explicada se ha calculado los eigenvalores para dos situaciones, con y sin el bloque de compensación reactiva del AVR. Para ello se ha calculado la ecuación de estado en cada caso y la función de transferencia correspondiente.

Finalmente, con la finalidad de verificar se ha calculado la respuesta en el tiempo aplicando un escalón de cambio en el torque mecánico (ΔT_m), de 0.05 p.u. recomendado por la IEEE Std 421.5 1992, que indica un escalón de 0.05 p.u. para provocar una pequeña oscilación y 0.10 p.u. para una gran perturbación.

Se ha graficado las siguientes magnitudes:

- (a) Cambio en la velocidad del rotor.
- (b) Cambio en el ángulo delta.
- (c) Cambio en la f.e.m transitoria en el eje cuadratura.

4. Análisis de los resultados

4.1 Calculo de los eigenvalores

Los resultados de las simulaciones con y sin el bloque de compensación reactiva del AVR (eigenvalores, amortiguamiento y frecuencia de oscilación), se muestran en la Tabla 3.

Caso	Eigenvalores	Amortiguamiento	Frecuencia
Con Bloque	-97.43±9.852i	0.995	1.56
	-0.556±9.539i	0.058	1.51
	-0.242±0.051i	0.979	0.008
Sin Bloque	-97.327±9.856i	0.995	1.56
	-0.539±9.551i	0.056	1.52
	-0.242±0.053i	0.977	0.008

Tabla 3 Resultados de las Simulaciones

En la Tabla 3 se puede observar que los valores de los eigenvalores son prácticamente los mismos tanto con o sin el bloque de compensación reactiva del AVR. Se aprecia que el amortiguamiento y la frecuencia son muy similares en ambos casos. Asimismo en la Figura 4 se muestra los eigenvalores con y sin bloque de compensación reactiva. Los eigenvalores para la condición de operación en estado estacionario indicada que el sistema es estable frente a una pequeña perturbación.

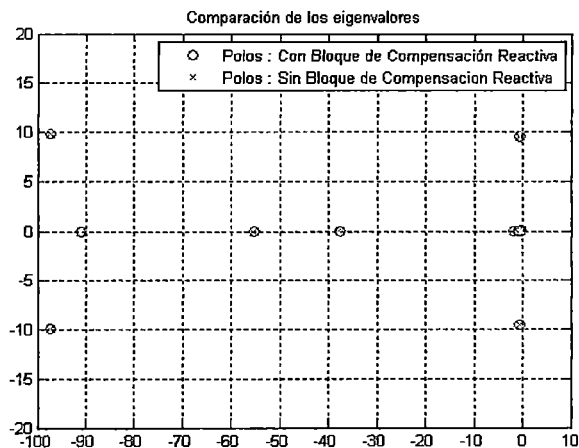


Figura 4

Estos resultados muestran que el efecto del bloque de compensación reactiva se puede despreciar para análisis de estabilidad permanente.

4.2 Respuesta en el tiempo

Los resultados de las simulaciones de la respuesta en el tiempo se muestran en las Figuras 5, 6 y 7.

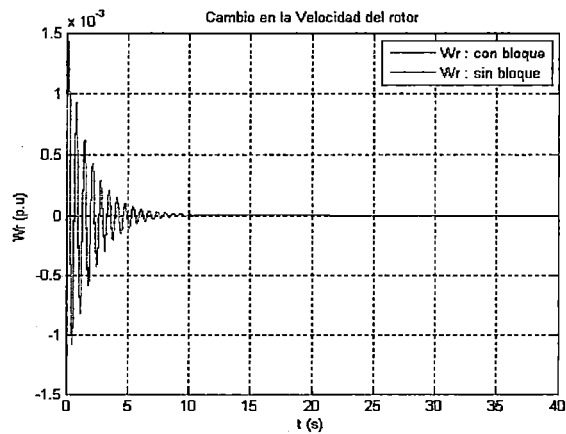


Figura 5

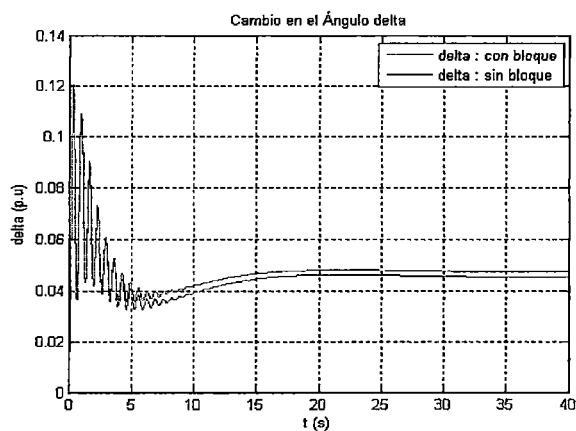


Figura 6

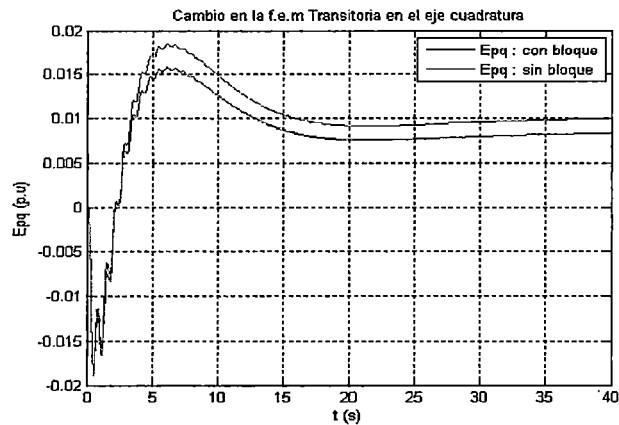


Figura 7

En la Figura 5 y 6 se muestran las graficas de respuestas en el tiempo superpuestas con y sin el bloque de compensación reactiva del AVR.

En la Figura 7 muestra dos gráficas aparentemente diferentes, sin embargo tienen la particularidad de que ambas tienen el mismo amortiguamiento y

frecuencia de oscilación correspondiente a la estructura de los eigenvalores mostrados en la Tabla 3.

Los resultados de las simulaciones (Figura 5, 6 y 7) muestran que el bloque de compensación de la potencia reactiva tiene un efecto poco apreciable sobre los modos de oscilación electromecánica del sistema analizado (frecuencia de oscilación y amortiguamiento), ya que la estructura de las respuestas en el tiempo prácticamente no cambia. Sin embargo tiene efecto sobre la tensión de generación porque su función es compensar la sobre elevación (Overshoot) de esta tensión, tal como lo muestra la Figura 8.

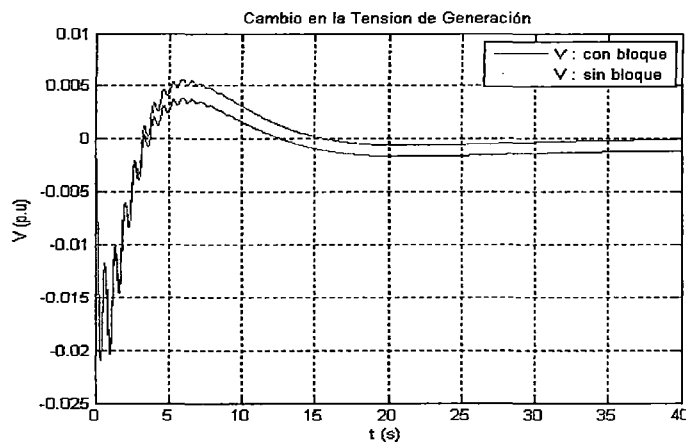


Figura 8

Por lo tanto este bloque (ganancia $K_q = 0.06$ y constante de tiempo $T_q = 0.011s$) puede ser dejado de lado en el análisis de estabilidad permanente a ser presentado en la tesis. Se debe remarcar que en un análisis de estabilidad transitoria este bloque no debe despreciarse, debido a que como los eventos son de mayor envergadura y su inclusión va a ejercer control sobre la tensión. El efecto de este bloque se traduce en aplanar ligeramente el pico de la tensión de generación que para una pequeña perturbación es casi despreciable, ya que este bloque tiene la función de compensar la

tensión. Asimismo se observa ligeros cambios en la potencia reactiva de generación como se observa en la Figura 9, mientras que las respuestas de la potencia activa están superpuestas sin tener ningún cambio considerable, como se muestra en la Figura 10.

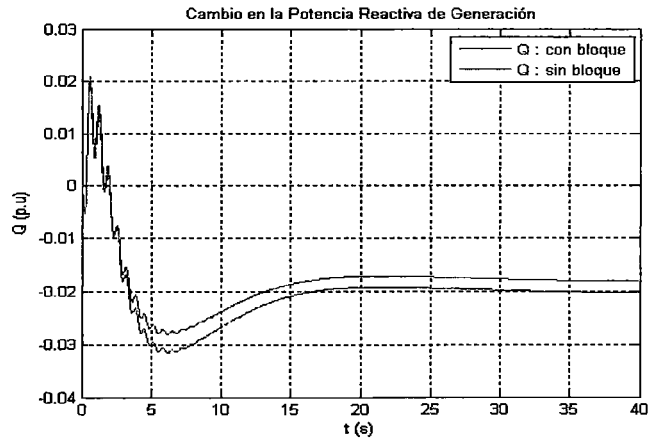


Figura 9

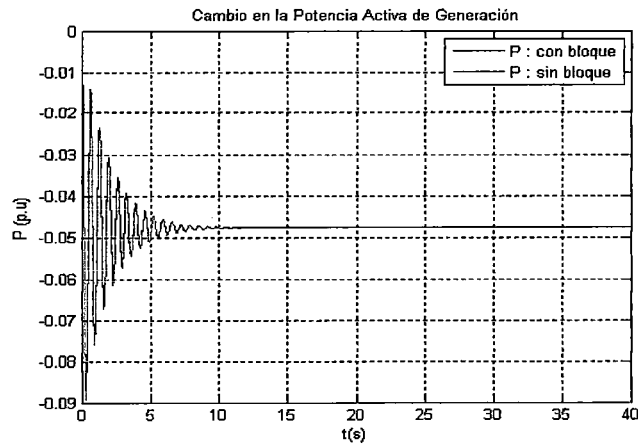


Figura 10

ANEXO B

SIMULACIONES DE LA RESPUESTA EN EL TIEMPO SIN EL EFECTO DEL ESTABILIZADOR

1.- Influencia de las Condiciones de Operación de la Central

- El 1^{er} caso: Se observa en la Tabla 5.1, una potencia activa $P_1 = 0.95$ p.u y una reactancia $X_{12} = 0.42$ p.u, obteniendo las siguientes respuestas en el tiempo para cada punto de operación:
 - ✓ Primer punto de operación, con una potencia reactiva de -0.156 p.u, se obtiene la Figura 1.

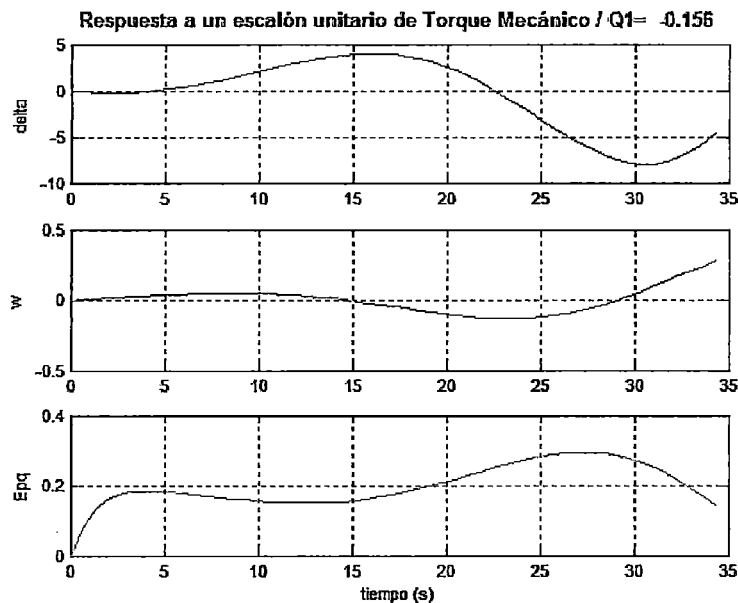


Figura 1 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.95$, $X_{12} = 0.42$ y $Q_1 = -0.156$

Análogamente se tiene la respuesta en el tiempo para un escalón unitario en la tensión de referencia, representado en la Figura 2.

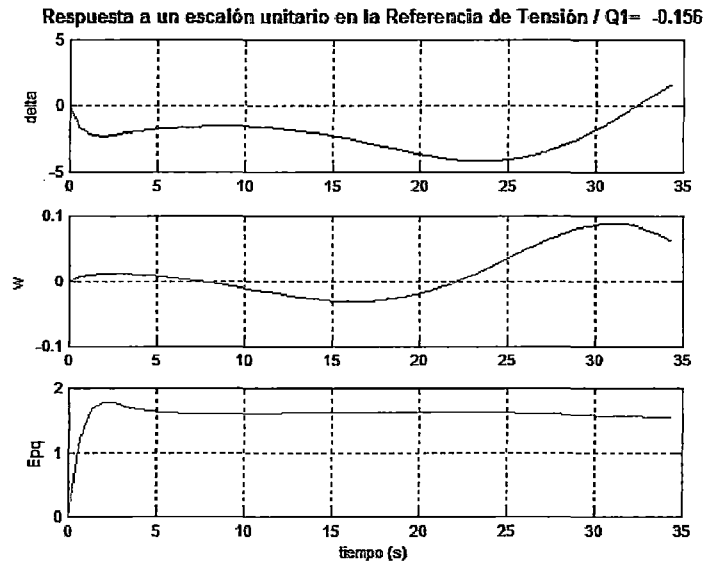


Figura 2 Resposta a un Escalón Unitario en la Referencia de Tensión con $P_1 = 0.95$, $X_{12} = 0.42$ y $Q_1 = -0.156$

- ✓ Segundo punto de operación, con una potencia reactiva de -0.006 p.u, se obtiene la Figura 3.

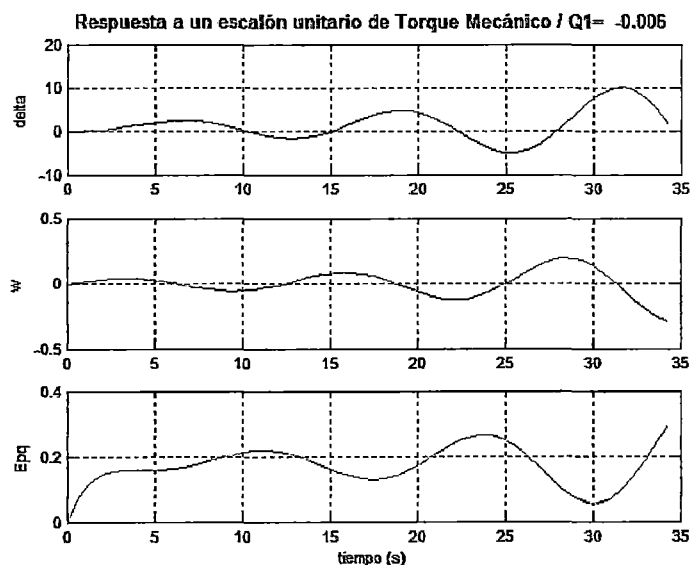


Figura 3 Resposta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.95$, $X_{12} = 0.42$ y $Q_1 = -0.006$

- ✓ Tercer punto de operación, con una potencia reactiva de 0.194 p.u, se obtiene la Figura 4.

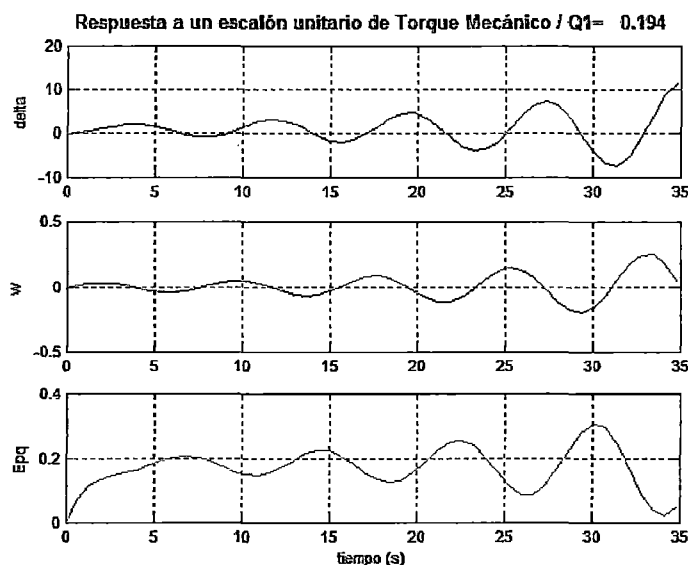


Figura 4 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.95$, $X_{12} = 0.42$ y $Q_1 = 0.194$

- ✓ Cuarto punto de operación, con una potencia reactiva de 0.344 p.u, se obtiene la Figura 5.

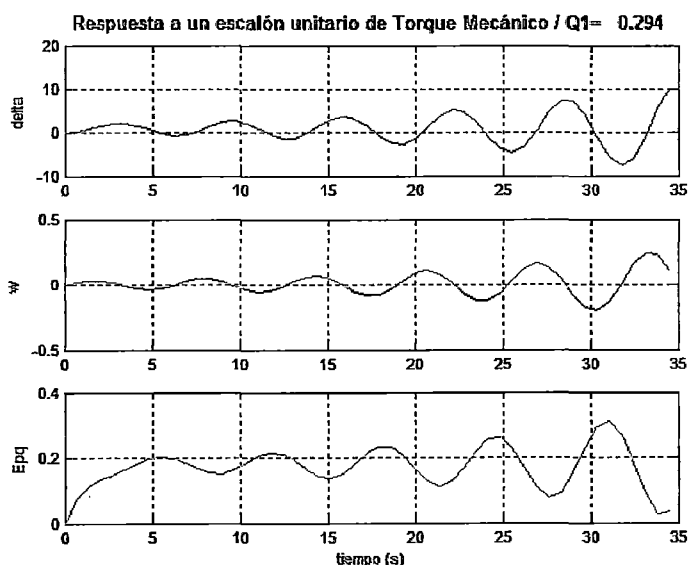


Figura 5 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.95$, $X_{12} = 0.42$ y $Q_1 = 0.294$

- El 2^{do} caso: De la Tabla 5.2, se observa un $P_1 = 0.712$ y $X_{12} = 0.42$, obteniendo las siguientes respuestas en el tiempo para cada punto de operación:

- ✓ El primer punto de operación, con una potencia reactiva de -0.351 p.u., se obtiene la Figura 6.

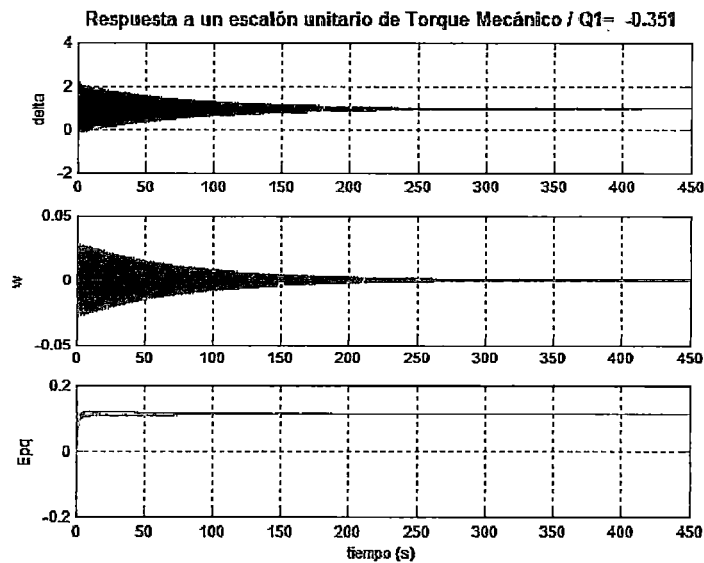


Figura 6 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.712$, $X_{12} = 0.42$ y $Q_1 = -0.351$

- ✓ Segundo punto de operación, con una potencia reactiva de -0.001 p.u., se obtiene la Figura 7.

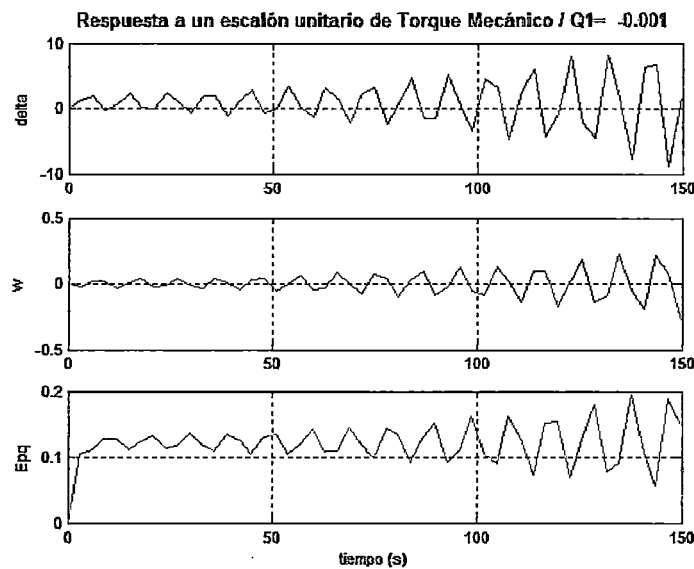


Figura 7 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.712$, $X_{12} = 0.42$ y $Q_1 = -0.001$

- ✓ Tercer punto de operación, con una potencia reactiva de 0.349 p.u, se obtiene la Figura 8.

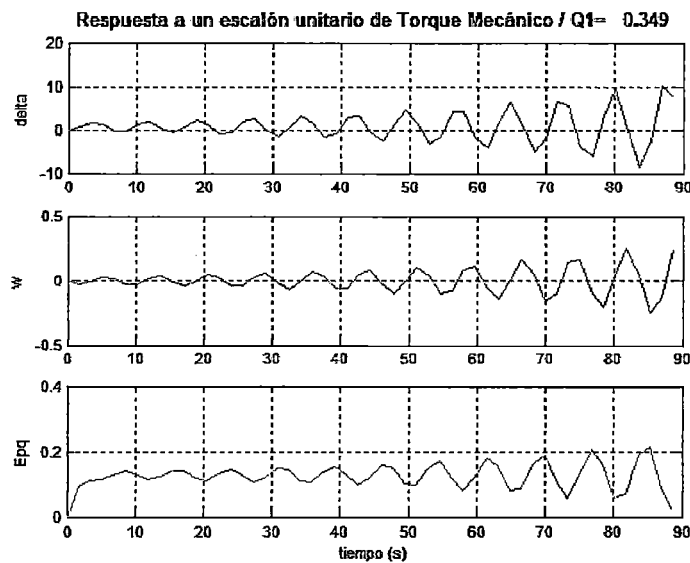


Figura 8 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.712$, $X_{12} = 0.42$ y $Q_1 = 0.349$

- ✓ Cuarto punto de operación, con una potencia reactiva de 0.699 p.u, se obtiene la Figura 9.

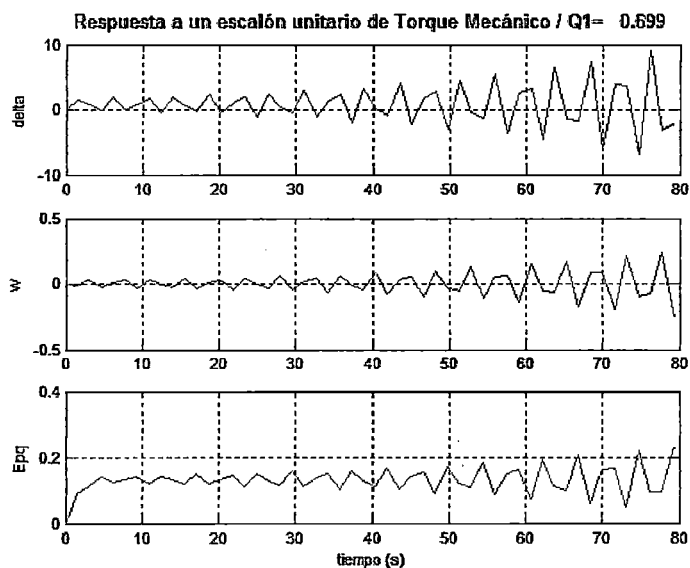


Figura 9 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.712$, $X_{12} = 0.42$ y $Q_1 = 0.699$

- El 3^{er} caso: De la tabla 5.3, se observa un $P_1 = 0.475$ y $X_{12} = 0.42$, obteniendo las siguientes respuestas en el tiempo para cada punto de operación:
 - ✓ Primer punto de operación, con una potencia reactiva de -0.440 p.u, se obtiene la Figura 10.

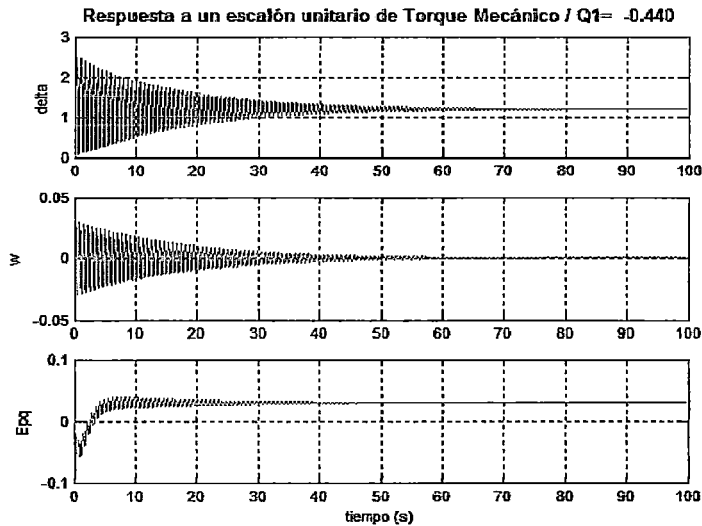


Figura 10 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.475$, $X_{12} = 0.42$ y $Q_1 = -0.440$

- ✓ Segundo punto de operación, con una potencia reactiva de 0.06 p.u, se obtiene la Figura 11.

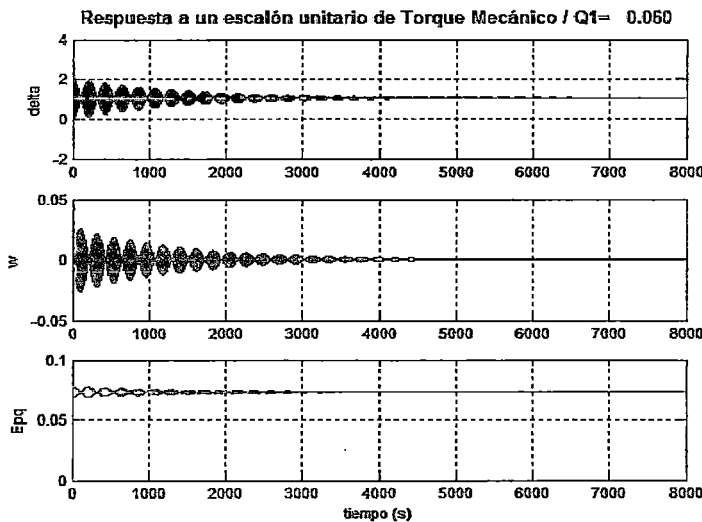


Figura 11 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.475$, $X_{12} = 0.42$ y $Q_1 = 0.060$

- ✓ Tercer punto de operación, con una potencia reactiva de 0.510 p.u, se obtiene la Figura 12.

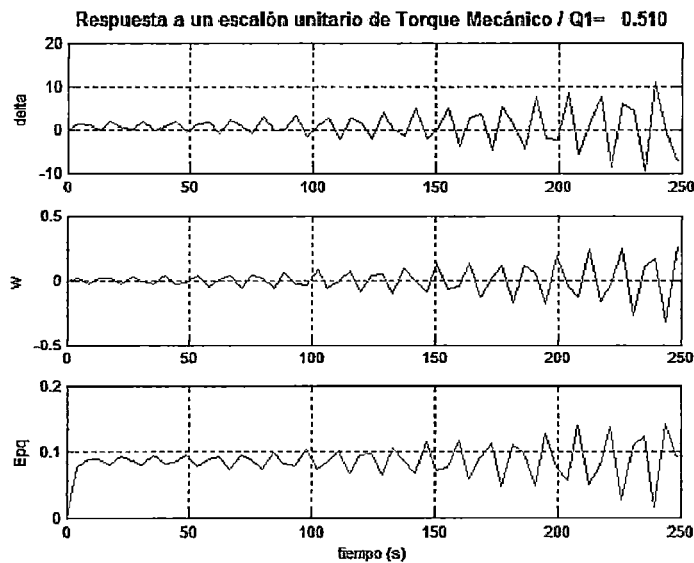


Figura 12 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.475$, $X_{12} = 0.42$ y $Q_1 = 0.510$

- ✓ Cuarto punto de operación, con una potencia reactiva de 0.860 p.u, se obtiene la Figura 13.

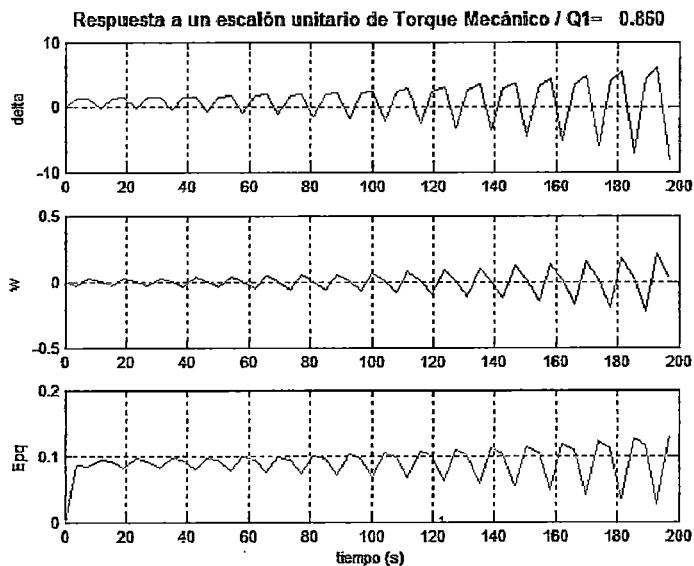


Figura 13 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.475$, $X_{12} = 0.42$ y $Q_1 = 0.860$

C.2.- Influencia de las condiciones de operación del SEIN

a.- Generador Operando Sobreexcitado

- El 1^{er} caso: De la Tabla 5.4, con $P_1 = 0.95$ y $Q_1 = 0.312$ p.u., se obtiene las respuestas en el tiempo para cada punto de operación:
 - ✓ Primer punto de operación, con una reactancia X_{12} de 0.025 p.u., se obtiene la Figura 14.

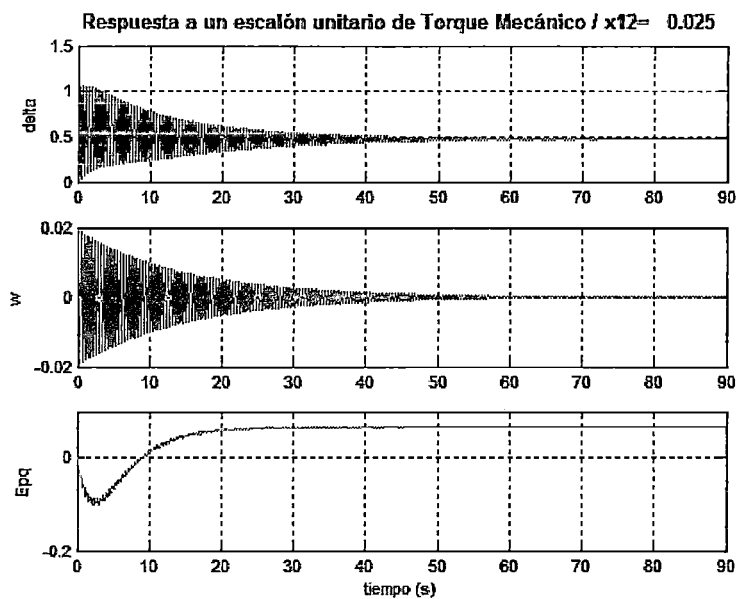


Figura 14 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.95$, $Q_1 = 0.312$ y $X_{12} = 0.025$

Análogamente se tiene la respuesta a un escalón en la referencia de la tensión, como se muestra en la Figura 15.

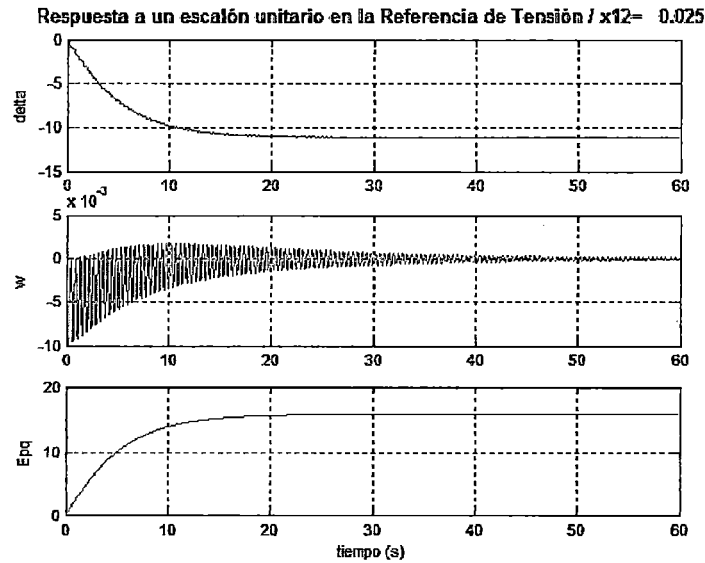


Figura 15 Respuesta a un Escalón Unitario en la Referencia de Tensión con $P_1 = 0.95$, $Q_1 = 0.312$ y $X_{12} = 0.025$

- ✓ Segundo punto de operación, con una reactancia X_{12} de 0.40 p.u, se obtiene la Figura 16.

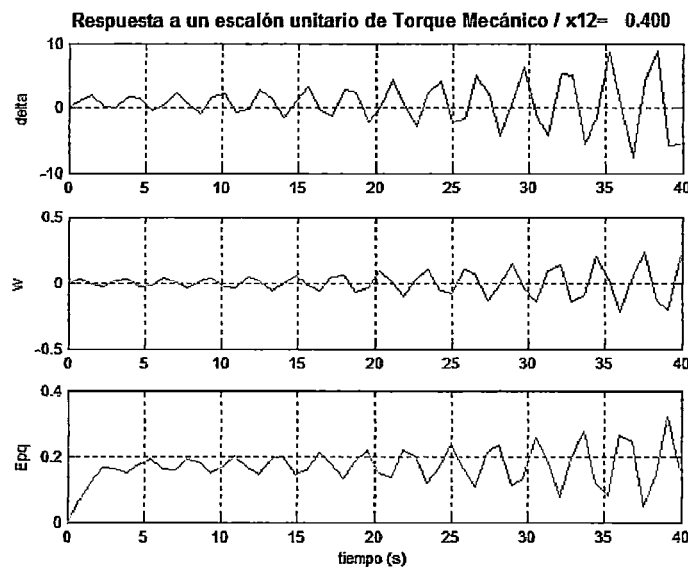


Figura 16 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.95$, $Q_1 = 0.312$ y $X_{12} = 0.40$

- ✓ Tercer punto de operación, con una reactancia X_{12} de 0.90 p.u, se obtiene la Figura 17.

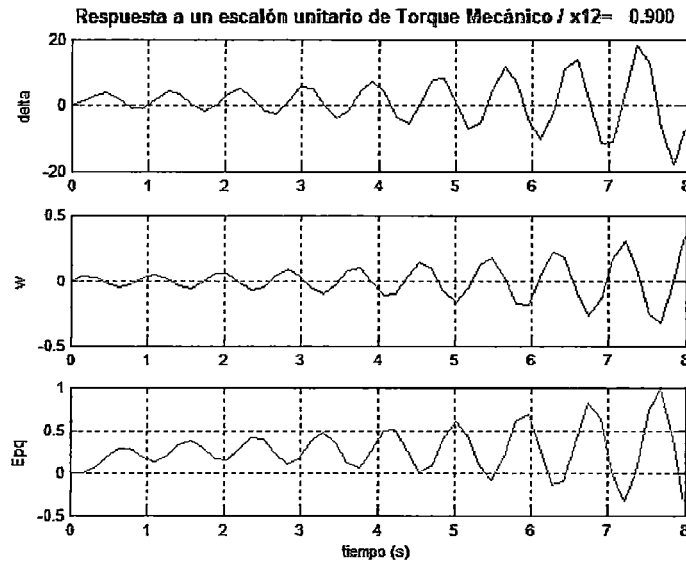


Figura 17 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.95$, $Q_1 = 0.312$ y $X_{12} = 0.90$

- El 2^{do} caso: De la tabla 5.5, con $P_1 = 0.712$ y $Q_1 = 0.702$ p.u., se obtiene las siguientes respuestas en el tiempo para cada punto de operación:
 - ✓ Primer punto de operación, con una reactancia X_{12} de 0.025 p.u., se obtiene la Figura 18.

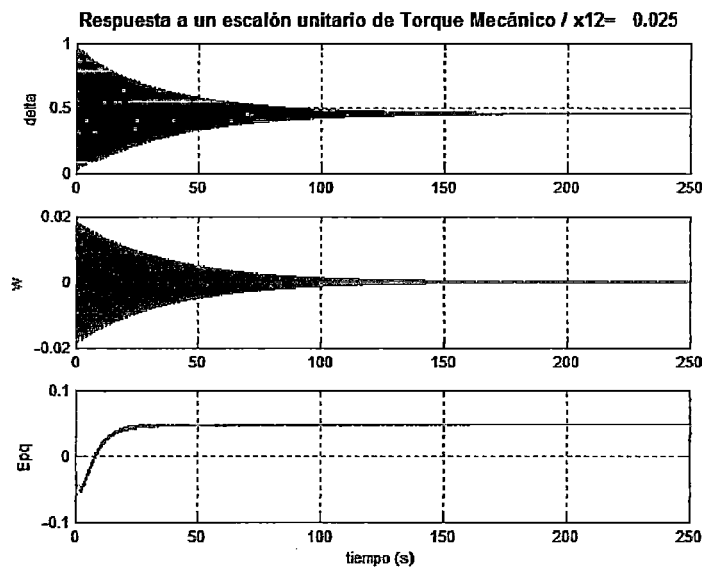


Figura 18 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.712$, $Q_1 = 0.702$ y $X_{12} = 0.025$

- ✓ Segundo punto de operación, con una reactancia X_{12} de 0.40 p.u, se obtiene la Figura 19.

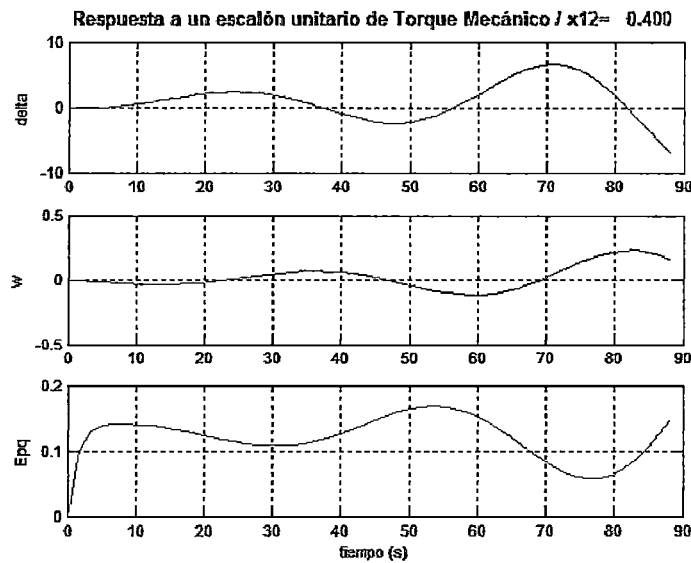


Figura 19 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.712$, $Q_1 = 0.702$ y $X_{12} = 0.40$

- ✓ Tercer punto de operación, con una reactancia X_{12} de 0.90 p.u, se obtiene la Figura 20.

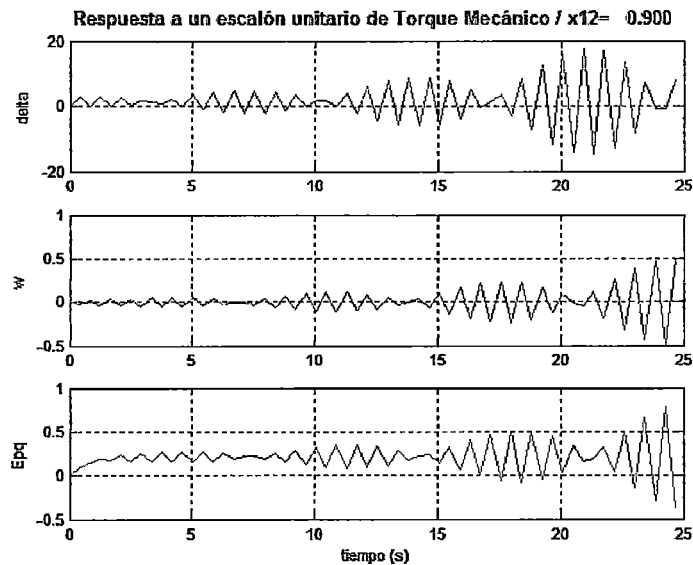


Figura 20 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.712$, $Q_1 = 0.702$ y $X_{12} = 0.90$

- El 3^{er} caso: De la tabla 5.6, con $P_1 = 0.475$ y $Q_1 = 0.879$ p.u, se obtiene las siguientes respuestas en el tiempo para cada punto de operación:
 - ✓ Primer punto de operación, con una reactancia X_{12} de 0.025 p.u, se obtiene la Figura 21.

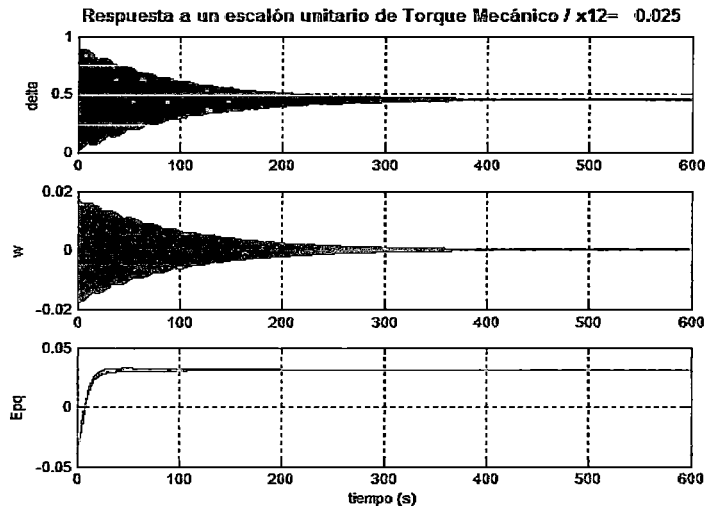


Figura 21 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.475$, $Q_1 = 0.879$ y $X_{12} = 0.025$

- ✓ Segundo punto de operación, con una reactancia X_{12} de 0.40 p.u, se obtiene la Figura 22.

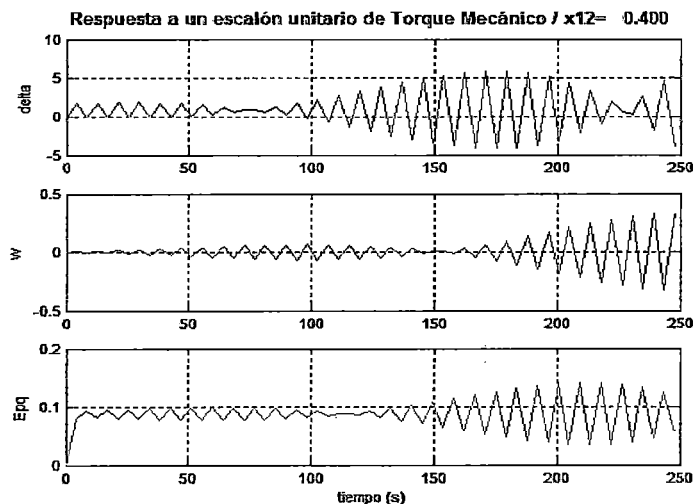


Figura 22 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.475$, $Q_1 = 0.879$ y $X_{12} = 0.40$

- ✓ Tercer punto de operación, con una reactancia X_{12} de 0.90 p.u, se obtiene la Figura 23.

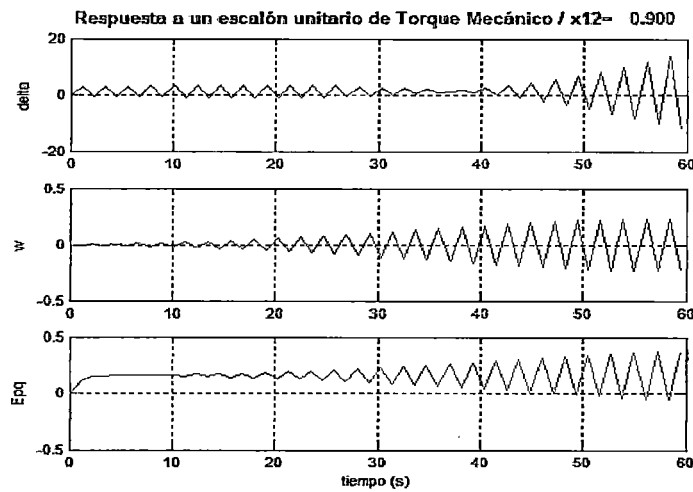


Figura 23 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.475$, $Q_1 = 0.879$ y $X_{12} = 0.90$

b.- Generador operando subexcitado

- El 1^{er} caso: De la tabla 5.7, con $P_1 = 0.95$ y $Q_1 = - 0.187$ p.u, se obtiene las respuestas en el tiempo de cada punto de operación:

- ✓ Primer punto de operación, con una reactancia X_{12} de 0.025 p.u, se obtiene la Figura 24.

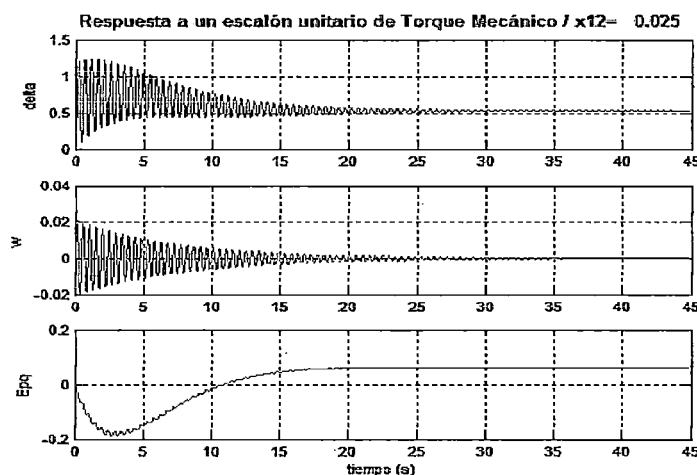


Figura 24 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.95$, $Q_1 = - 0.187$ y $X_{12} = 0.025$

Análogamente se observa la respuesta a un escalón en la referencia de la tensión, como se muestra en la Figura 25.

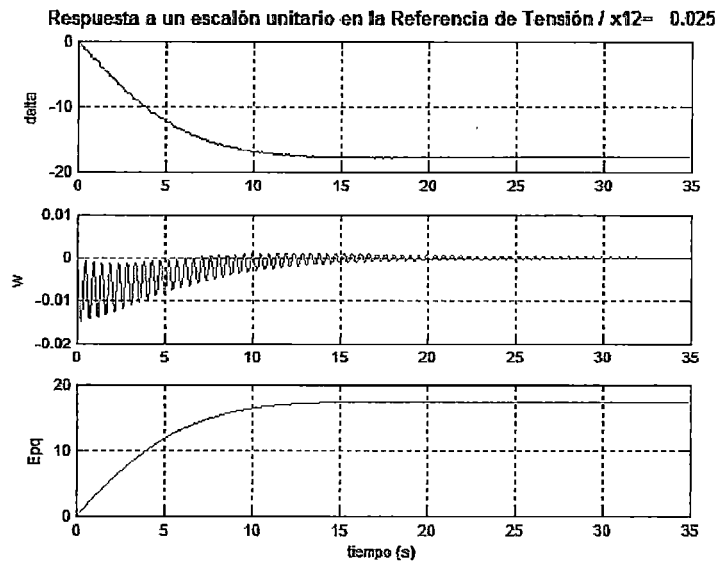


Figura 25 Respuesta a un Escalón Unitario en la Referencia de Tensión con $P_1 = 0.95$, $Q_1 = -0.187$ y $X_{12} = 0.025$

✓ Segundo punto de operación, con una reactancia X_{12} de 0.40 p.u., se obtiene la Figura 26.

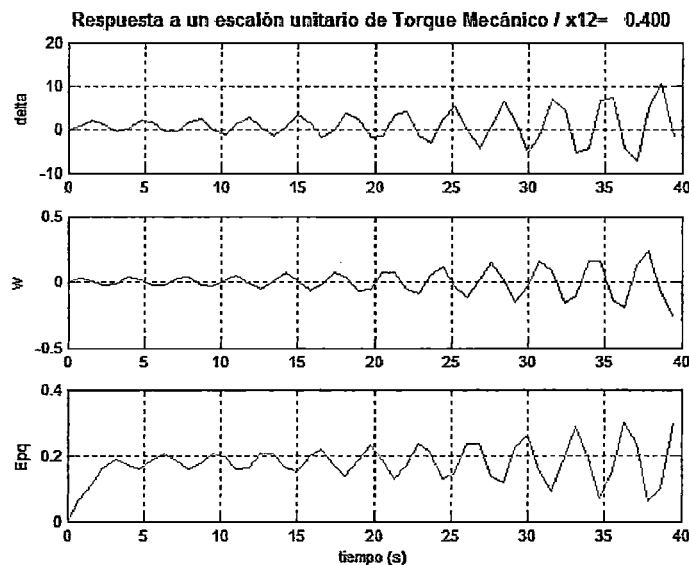


Figura 26 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.95$, $Q_1 = -0.187$ y $X_{12} = 0.40$

- ✓ Tercer punto de operación, con una reactancia X_{12} de 0.90 p.u, se obtiene la Figura 27.

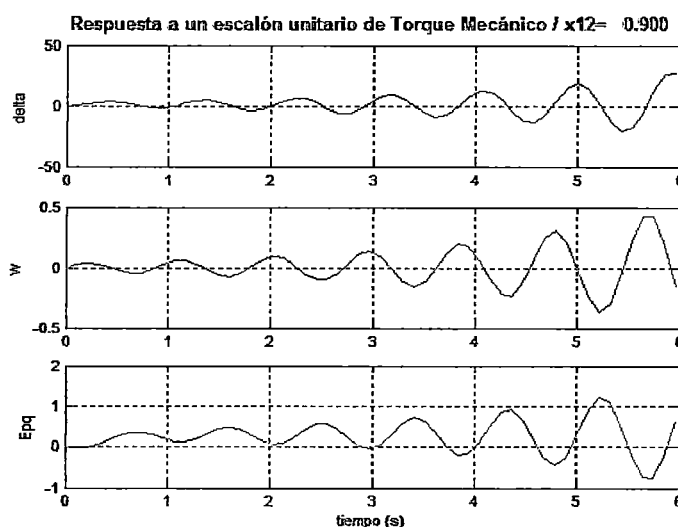


Figura 27 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.95$, $Q_1 = -0.187$ y $X_{12} = 0.90$

- El 2^{do} caso: De la tabla 5.8, con $P_1 = 0.712$ y $Q_1 = -0.281$ p.u, se obtiene las siguientes respuestas en el tiempo para cada punto de operación:

- ✓ Primer punto de operación, con una reactancia X_{12} de 0.025 p.u, se obtiene la Figura 28.

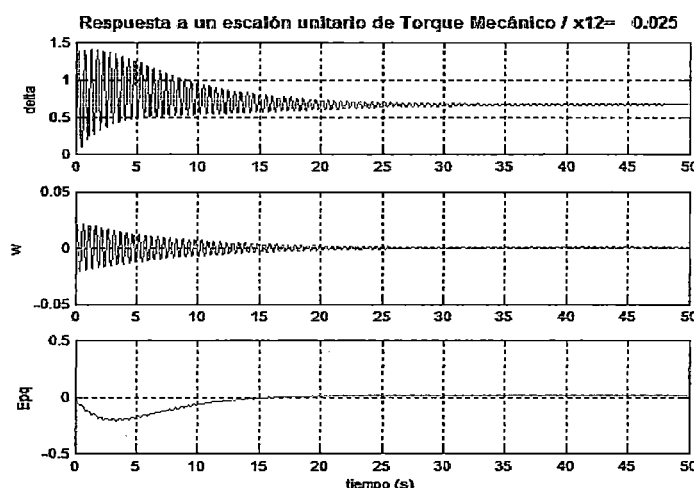


Figura 28 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.712$, $Q_1 = -0.281$ y $X_{12} = 0.025$

- ✓ Segundo punto de operación, con una reactancia X_{12} de 0.40 p.u, se obtiene la Figura 29.

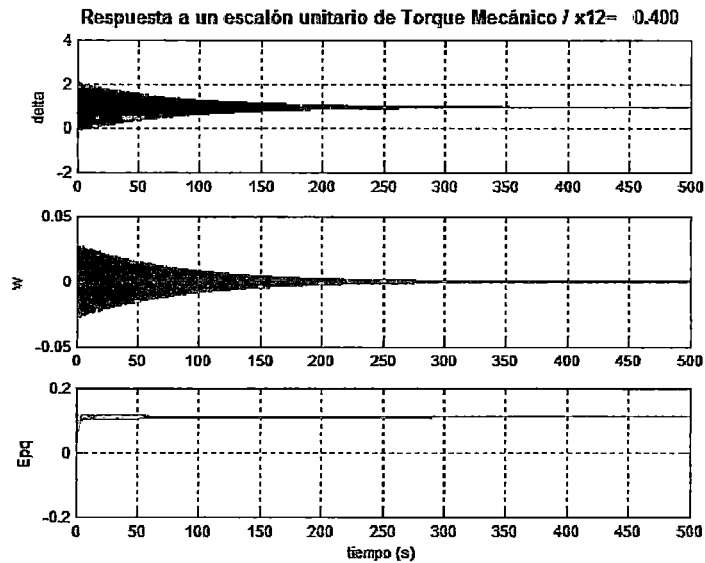


Figura 29 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.712$, $Q_1 = -0.281$ y $X_{12} = 0.40$

✓ Tercer punto de operación, con una reactancia X_{12} de 0.90 p.u, se obtiene la Figura 30.

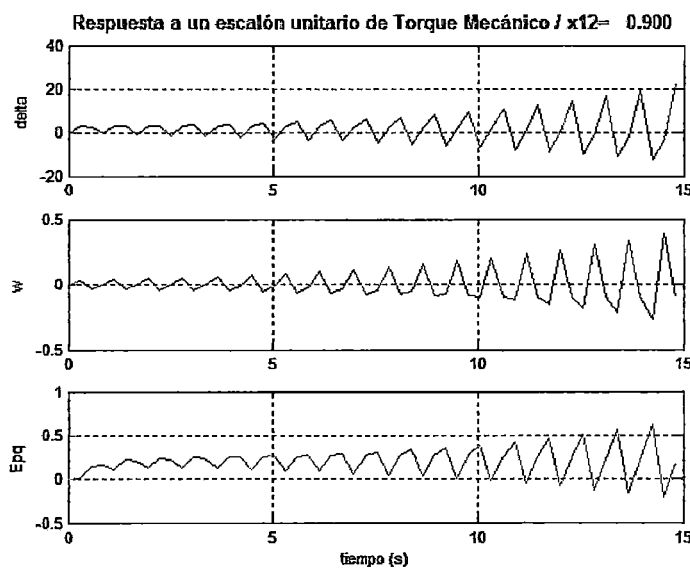


Figura 30 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.712$, $Q_1 = -0.281$ y $X_{12} = 0.90$

- El 3^{er} caso: De la Tabla 5.9, con $P_1 = 0.475$ y $Q_1 = -0.352$ p.u, se obtiene las siguientes respuestas en el tiempo para cada punto de operación:

- ✓ Primer punto de operación, con una reactancia X_{12} de 0.025 p.u, se obtiene la Figura 31.

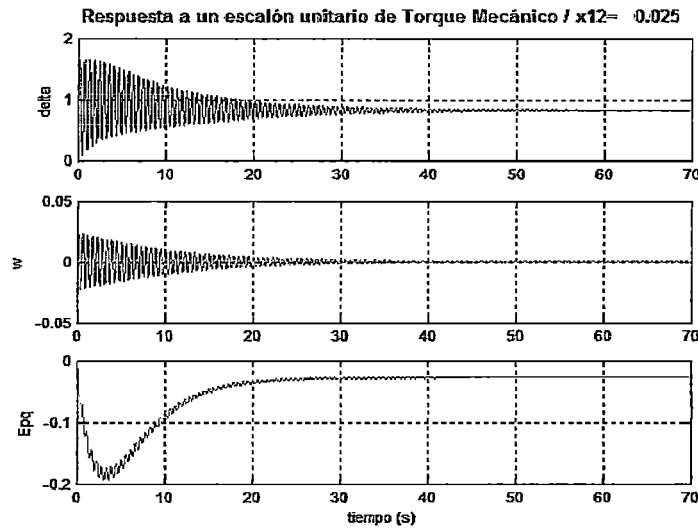


Figura 31 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.475$, $Q_1 = -0.352$ y $X_{12} = 0.025$

- ✓ Segundo punto de operación, con una reactancia X_{12} de 0.40 p.u, se obtiene la Figura 32.

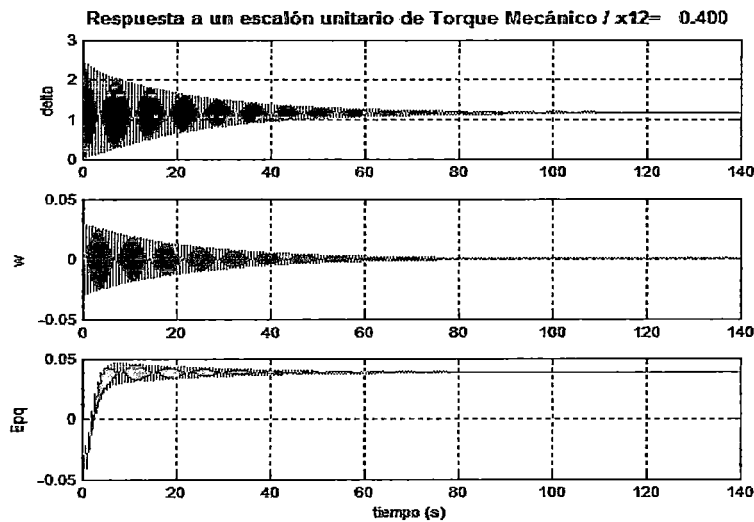


Figura 32 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.475$, $Q_1 = -0.352$ y $X_{12} = 0.40$

- ✓ Tercer punto de operación, con una reactancia X_{12} de 0.90 p.u, se obtiene la Figura 33.

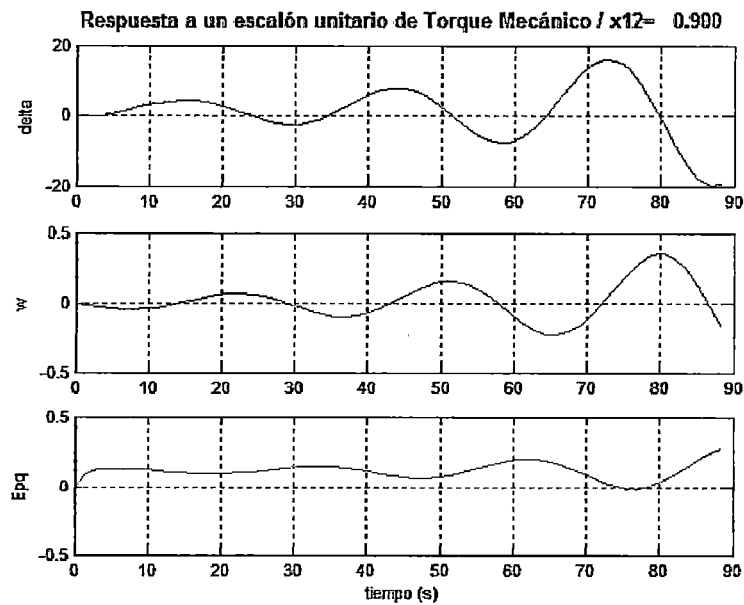


Figura 33 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.475$, $Q_1 = -0.352$ y $X_{12} = 0.90$

ANEXO C

DERIVACIÓN DE LA SEÑAL DE ENTRADA (POTENCIA ACTIVA) PARA EL ESTABILIZADOR DE SISTEMA DE POTENCIA

Para obtener la señal de entrada del estabilizador de sistemas de potencia, se forman las ecuaciones necesarias que logren el enlace con las variables que forman parte del diagrama de bloques. Mediante las siguientes deducciones matemáticas partiendo de la ecuación (3.34), vista en el acápite 3.2.1 se logra formar la estructura requerida para la señal del estabilizador. Además con la elaboración de esta señal aparecen nuevas constantes que forman parte del nuevo diagrama de bloques.

Linealizando la ecuación (3.34) se tiene:

$$\Delta P = V_{do} \Delta I_d + I_{do} \Delta V_d + V_{qo} \Delta I_q + I_{qo} \Delta V_q \quad C.1$$

Luego de la ecuación (3.52), se da la forma siguiente:

$$\Delta I_q = K_7 \Delta E'_q + K_8 \Delta \delta \quad C.2$$

$$\Delta I_d = K_9 \Delta E'_q + K_{10} \Delta \delta \quad C.3$$

Donde:

$$K_7 = \frac{R_e}{K} \quad C.4$$

$$K_8 = \frac{V_s}{K} [R_e \text{sen}(\delta_o - \alpha) + (X'_d + X_e) \cos(\delta_o - \alpha)] \quad C.5$$

$$K_9 = -\frac{(X_q + X_e)}{K} \quad C.6$$

$$K_{10} = \frac{V_s}{K} [R_e \cos(\delta_o - \alpha) - (X_q + X_e) \text{sen}(\delta_o - \alpha)] \quad C.7$$

También de la ecuación (3.51), se da la forma siguiente:

$$\Delta V_q = R_e \Delta I_q - X_e \Delta I_d - K_{11} \Delta \delta \quad \text{C.8}$$

$$\Delta V_d = X_e \Delta I_q + R_e \Delta I_d - K_{12} \Delta \delta \quad \text{C.9}$$

Donde:

$$K_{11} = V_s [\text{sen}(\delta_o - \alpha)] \quad \text{C.10}$$

$$K_{12} = V_s [\text{cos}(\delta_o - \alpha)] \quad \text{C.11}$$

Reemplmando las expresiones (C.2), (C.3), (C.8) y (C.9) en (C.1), se obtiene en forma compacta la siguiente expresión:

$$\Delta P = K_{13} \Delta E'_q + K_{14} \Delta \delta \quad \text{C.12}$$

Donde:

$$K_{13} = K_7 (R_e I_{qo} + V_{qo} + X_e I_{do}) + K_9 (R_e I_{do} + V_{do} - X_e I_{qo}) \quad \text{C.13}$$

$$K_{14} = K_8 (R_e I_{qo} + V_{qo} + X_e I_{do}) + K_{10} (R_e I_{do} + V_{do} - X_e I_{qo}) - (K_{11} I_{qo} + K_{12} I_{do}) \quad \text{C.14}$$

ANEXO D

SIMULACIONES DE LA RESPUESTA EN EL TIEMPO CON EL EFECTO DEL PSS CON SEÑAL DE POTENCIA ACTIVA

1.- Influencia de las condiciones de operación de la Central

- El 1^{er} caso, Se observa en la Tabla 5.10, una potencia activa P_1 igual a 0.95 p.u y una reactancia X_{12} de 0.42 p.u, obteniendo las siguientes respuestas en el tiempo para los 4 puntos de operación:
 - ✓ Primer punto de operación, tiene una potencia reactiva Q_1 de -0.156 p.u.

Se obtiene la Figura 1.

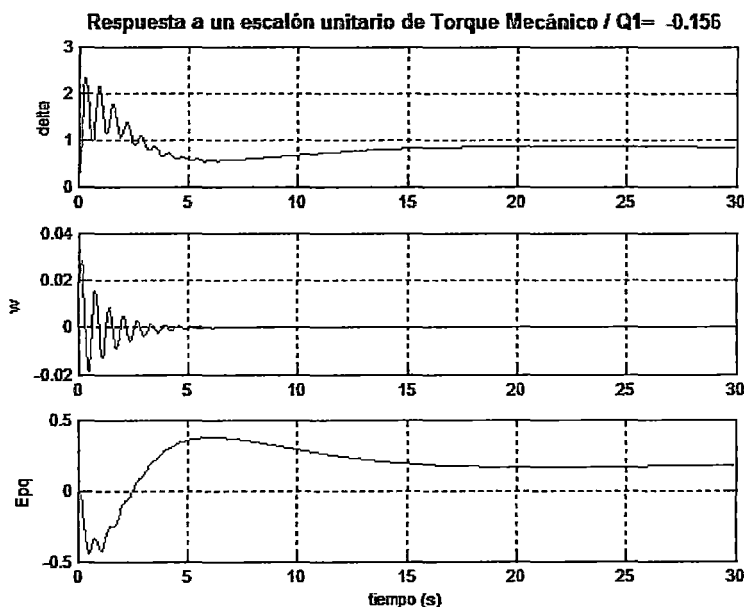


Figura 1 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.95$, $X_{12} = 0.42$ y $Q_1 = -0.156$

Análogamente se muestra en la Figura C2 la respuesta en el tiempo a un escalón unitario en la referencia de tensión.

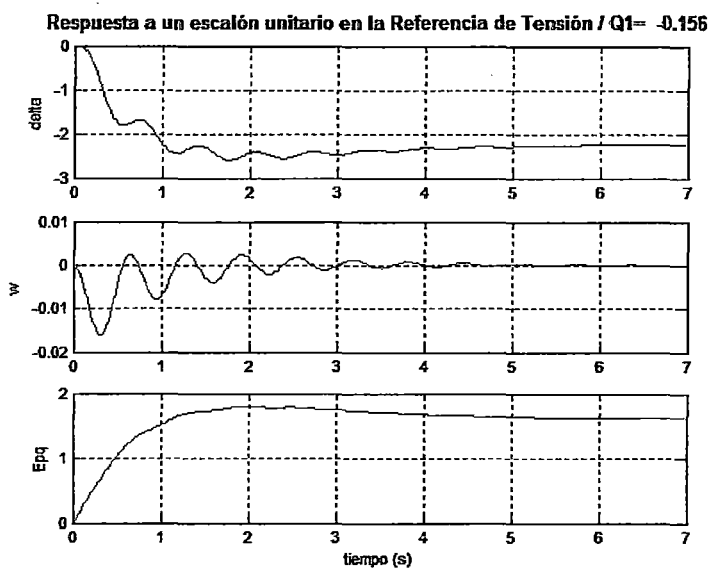


Figura 2 Respuesta a un Escalón Unitario en la Referencia de Tensión con $P_1 = 0.95$, $X_{12} = 0.42$ y $Q_1 = -0.156$

- ✓ Segundo punto de operación, tiene una potencia reactiva Q_1 de -0.006 p.u. Se obtiene la Figura 3.

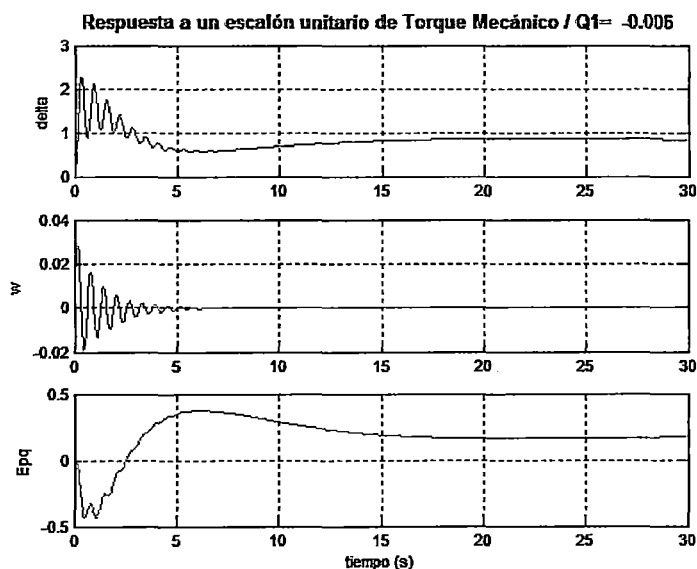


Figura 3 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.95$, $X_{12} = 0.42$ y $Q_1 = -0.006$

- ✓ Tercer punto de operación, tiene una potencia reactiva Q_1 de 0.194 p.u. Se obtiene la Figura 4.

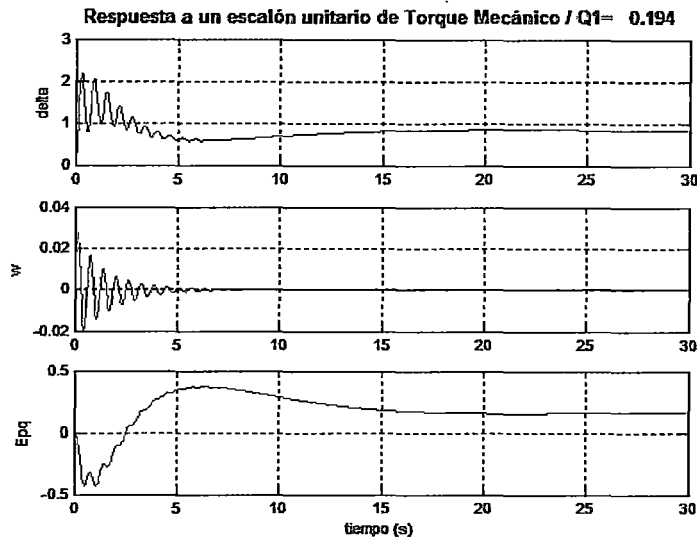


Figura 4 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.95$, $X_{12} = 0.42$ y $Q_1 = 0.194$

✓ Cuarto punto de operación, tiene una potencia reactiva Q_1 de 0.294 p.u.

Se obtiene la Figura 5.

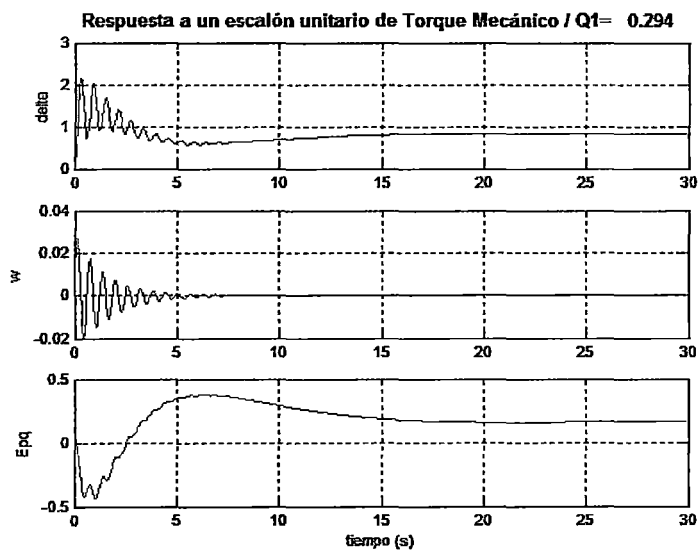


Figura 5 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.95$, $X_{12} = 0.42$ y $Q_1 = 0.294$

- El 2^{do} caso: En la Tabla 5.11, se tiene una potencia activa P_1 igual a 0.712 p.u y una reactancia X_{12} de 0.42 p.u, obteniendo las siguientes respuestas en el tiempo para los 4 puntos de operación.

- ✓ Primer punto de operación, con una potencia reactiva Q_1 de -0.351 p.u, se obtiene la Figura 6.

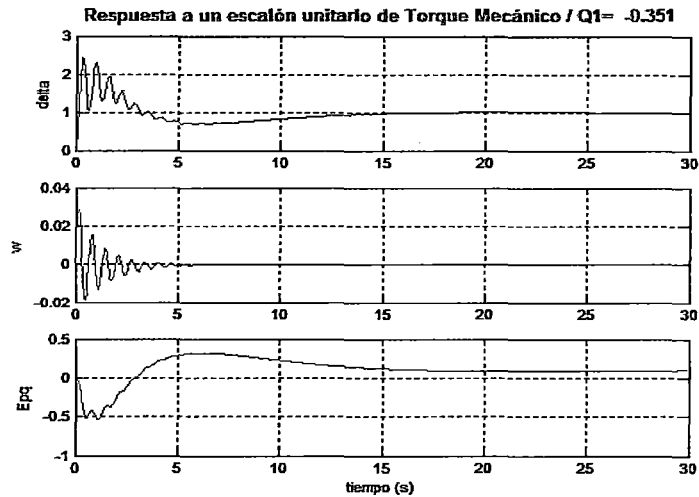


Figura 6 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.712$, $X_{12} = 0.42$ y $Q_1 = -0.351$

- ✓ Segundo punto de operación, con una potencia reactiva Q_1 de -0.001 p.u, se obtiene la Figura 7.

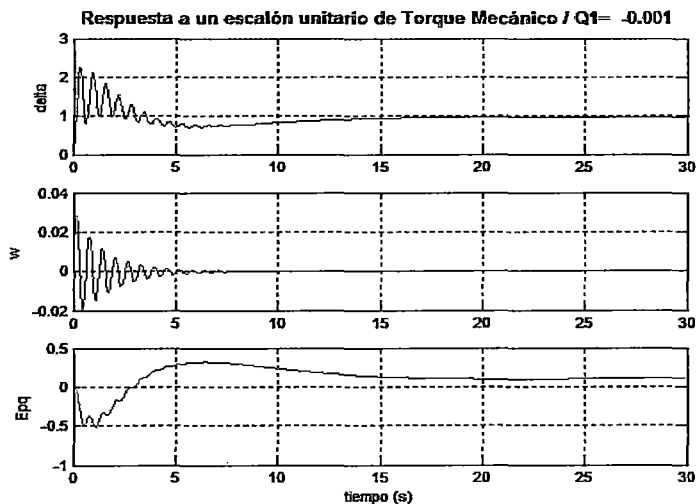


Figura 7 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.712$, $X_{12} = 0.42$ y $Q_1 = -0.001$

- ✓ Tercer punto de operación, con una potencia reactiva Q_1 de 0.349 p.u, se obtiene la Figura 8.

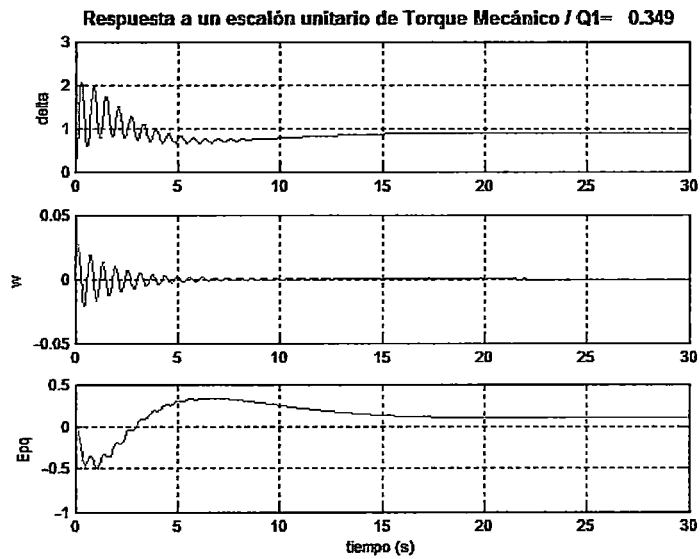


Figura 8 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.712$, $X_{12} = 0.42$ y $Q_1 = 0.349$

- ✓ Cuarto punto de operación, con una potencia reactiva Q_1 de 0.699 p.u, se obtiene la Figura 9.

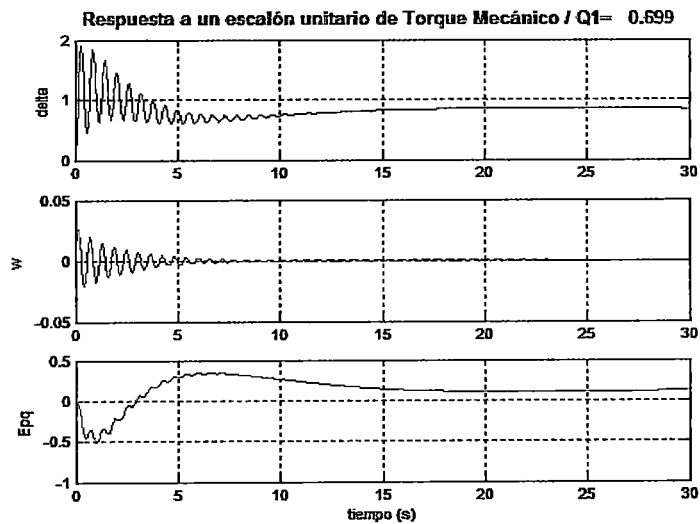


Figura 9 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.712$, $X_{12} = 0.42$ y $Q_1 = 0.699$

- El 3^{er} caso: En la tabla 5.12 se tiene una potencia activa P_1 de 0.475 p.u y una reactancia X_{12} de 0.42 p.u, obteniendo las siguientes respuestas para los 4 puntos de operación.

- ✓ Primer punto de operación, con una potencia reactiva Q_1 de -0.440 p.u., se obtiene la Figura 10.

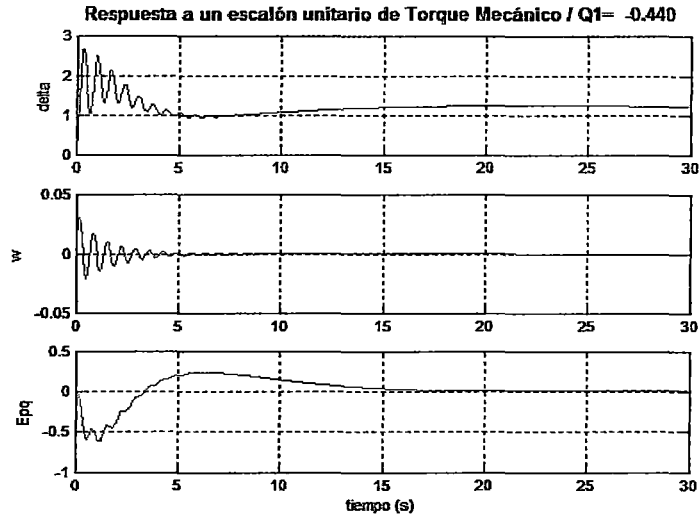


Figura 10 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.475$, $X_{12} = 0.42$ y $Q_1 = -0.440$

- ✓ Segundo punto de operación, con una potencia reactiva Q_1 de 0.060 p.u., se obtiene la Figura 11.

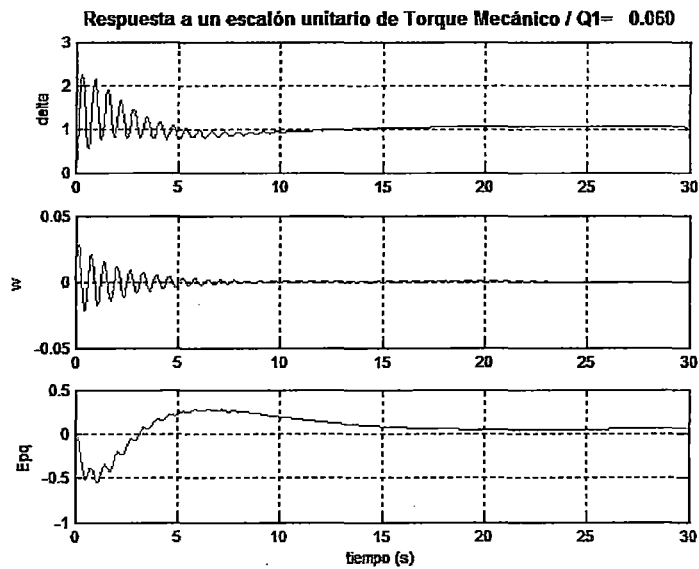


Figura 11 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.475$, $X_{12} = 0.42$ y $Q_1 = 0.060$

- ✓ Tercer punto de operación, con una potencia reactiva Q_1 de 0.510 p.u, se obtiene la Figura 12.

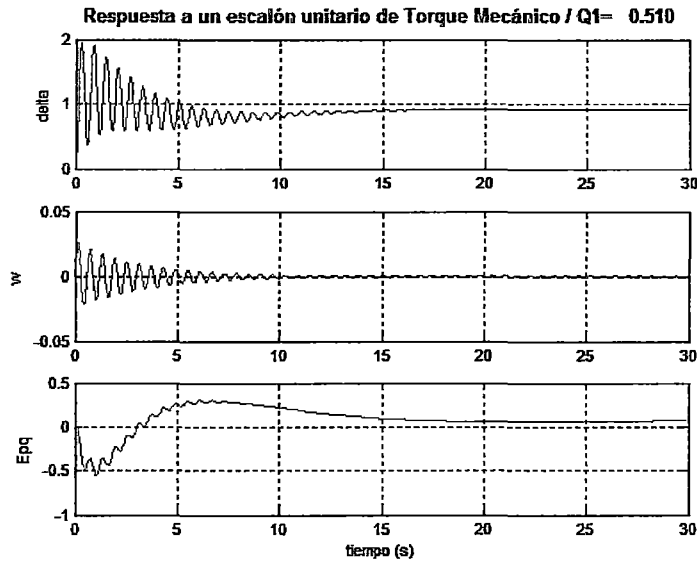


Figura 12 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.475$, $X_{12} = 0.42$ y $Q_1 = 0.510$

- ✓ Cuarto punto de operación, con una potencia reactiva Q_1 de 0.860 p.u, se obtiene la Figura 13.

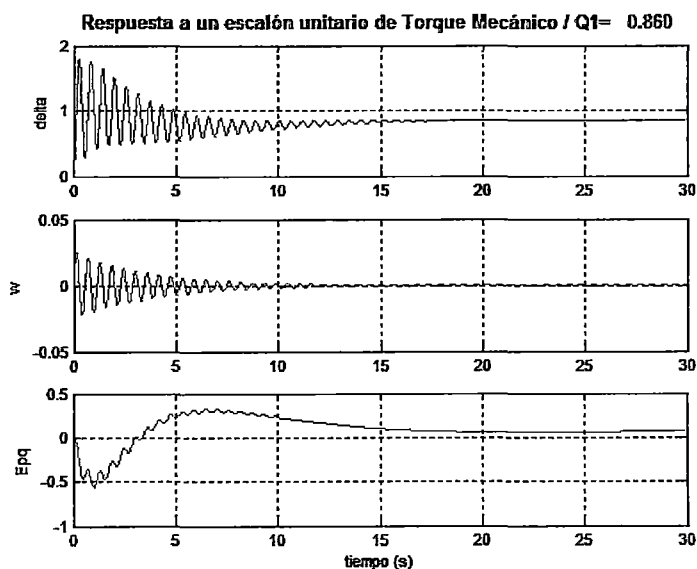


Figura 13 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.475$, $X_{12} = 0.42$ y $Q_1 = 0.860$

2.- Influencia de las condiciones de operación del SEIN

a.- Generador Operando Sobreexcitado

- El 1^{er} caso: De la Tabla 5.13, se observa una potencia activa P_1 de 0.95 p.u y potencia reactiva de 0.312 p.u, obteniendo las siguientes respuestas para los 3 puntos de operación.
- ✓ Para el primer punto de operación, con una reactancia X_{12} de 0.025 p.u, se obtiene la Figura 14.

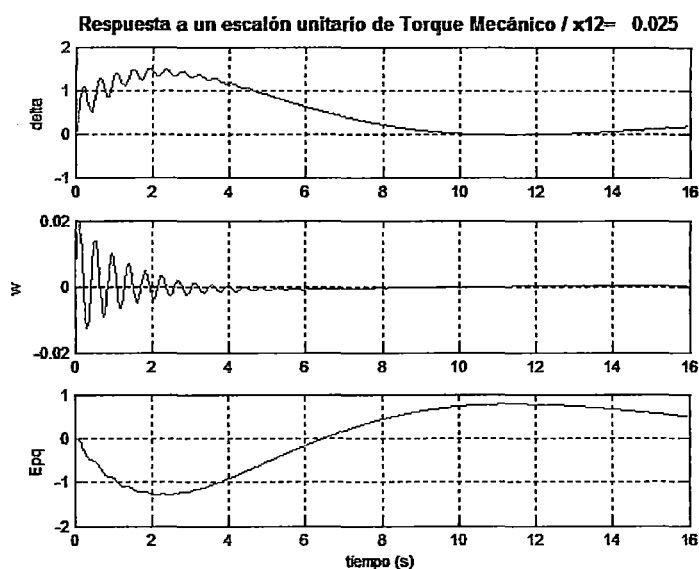


Figura 14 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.95$, $Q_1 = 0.312$ y $X_{12} = 0.025$

- ✓ El segundo punto de operación, con una reactancia X_{12} de 0.40 p.u, se obtiene la Figura 15.

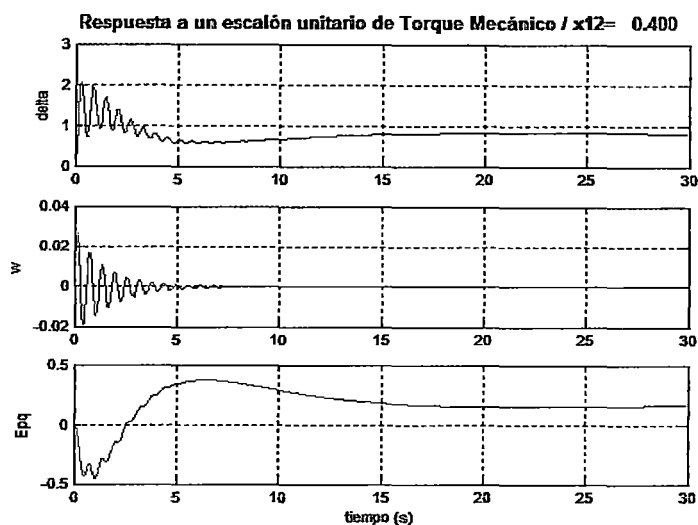


Figura 15 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.95$, $Q_1 = 0.312$ y $X_{12} = 0.40$

- ✓ Tercer punto de operación, con una reactancia X_{12} de 0.90 p.u, se obtiene la Figura 16.

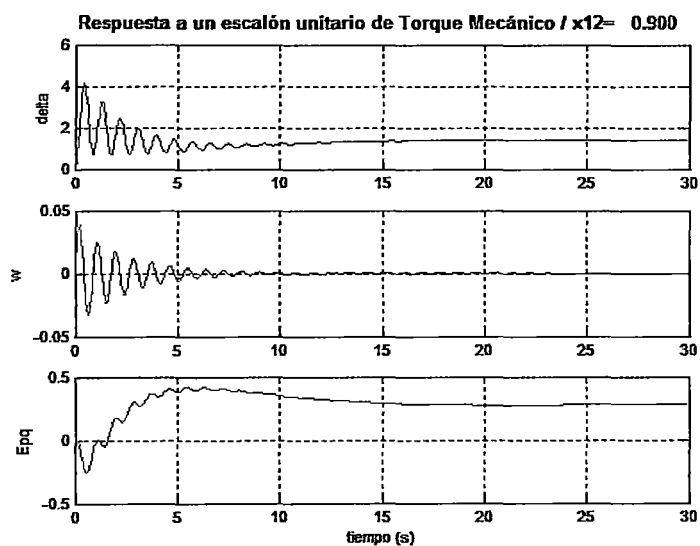


Figura 16 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.95$, $Q_1 = 0.312$ y $X_{12} = 0.90$

- El 2^{do} caso: De la Tabla 5.14, se observa una potencia activa P_1 de 0.713 p.u y potencia reactiva Q_1 de 0.702 p.u, obteniendo las respuestas para los 3 puntos de operación.

- ✓ Primer punto de operación, con una reactancia X_{12} de 0.025 p.u, se obtiene la Figura 17.

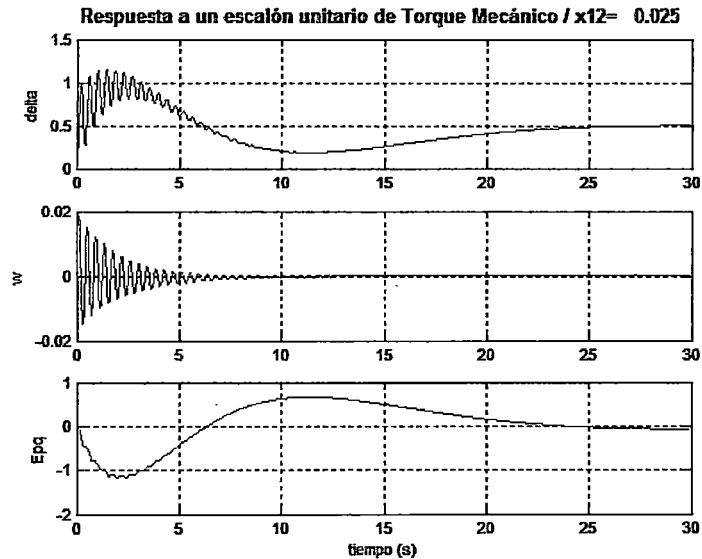


Figura 17 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.713$, $Q_1 = 0.702$ y $X_{12} = 0.025$

- ✓ Segundo punto de operación, con una reactancia X_{12} de 0.40 p.u, se obtiene la Figura 18.

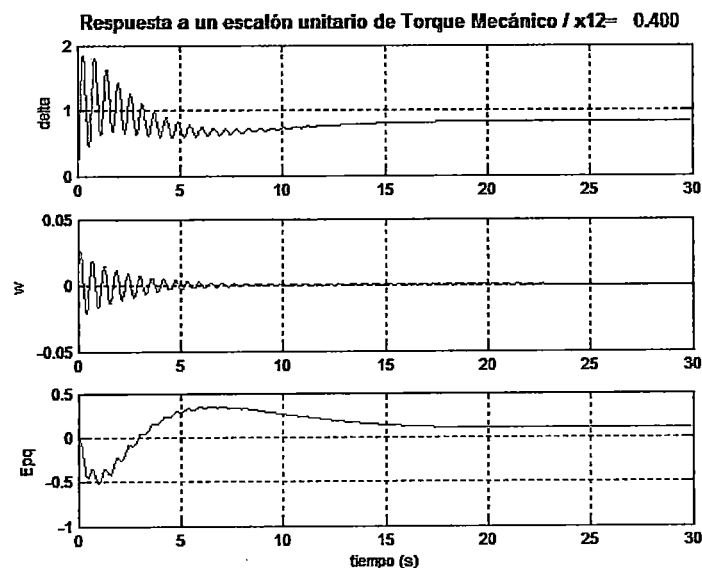


Figura 18 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.713$, $Q_1 = 0.702$ y $X_{12} = 0.40$

- ✓ Tercer punto de operación, con una reactancia X_{12} de 0.90 p.u, se obtiene la Figura 19.

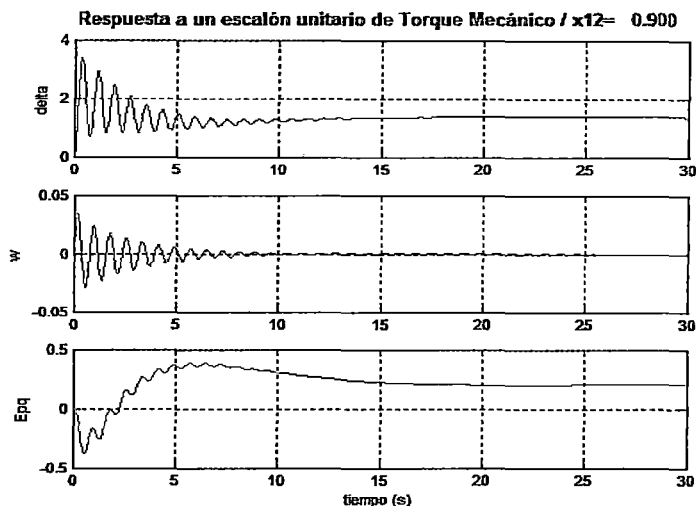


Figura 19 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.712$, $Q_1 = 0.702$ y $X_{12} = 0.90$

- El 3^{er} caso: De la tabla 5.15, se observa un P_1 de 0.475 p.u y Q_1 de 0.879 p.u, obteniendo las respuestas para los 3 puntos de operación.
- ✓ Primer punto de operación, con una reactancia X_{12} de 0.025 p.u, se obtiene la Figura 20.

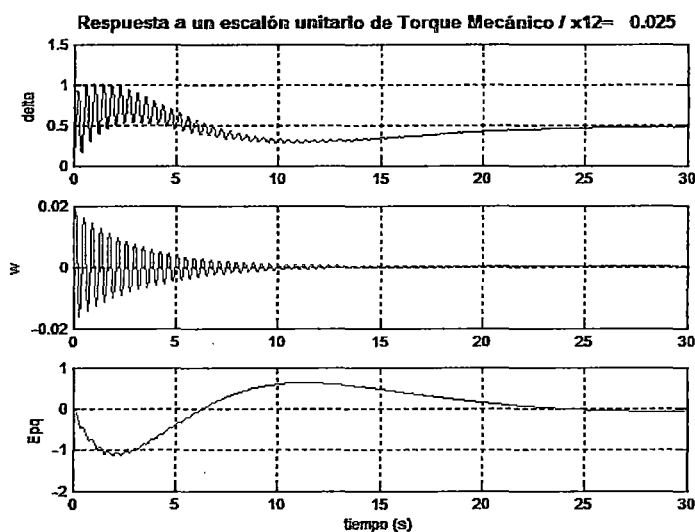


Figura 20 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.475$, $Q_1 = 0.879$ y $X_{12} = 0.025$

- ✓ Segundo punto de operación, con una reactancia X_{12} de 0.40 p.u, se obtiene la Figura 21.

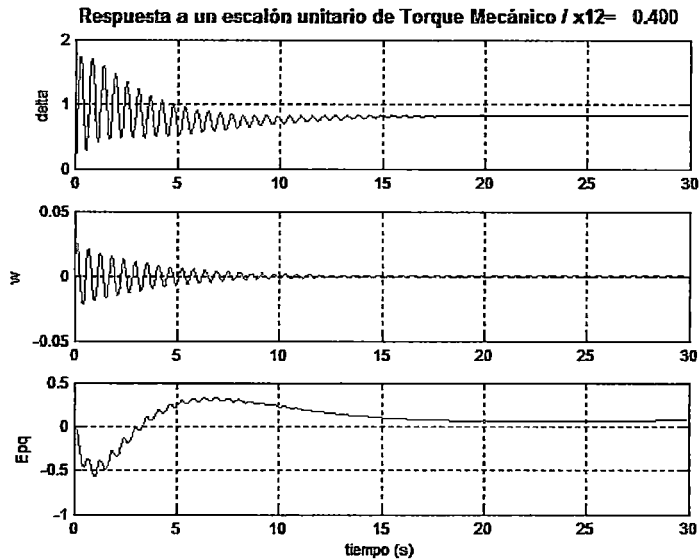


Figura 21 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.475$, $Q_1 = 0.879$ y $X_{12} = 0.40$

- ✓ Tercer punto de operación, con una reactancia X_{12} de 0.90 p.u, se obtiene la Figura 22.

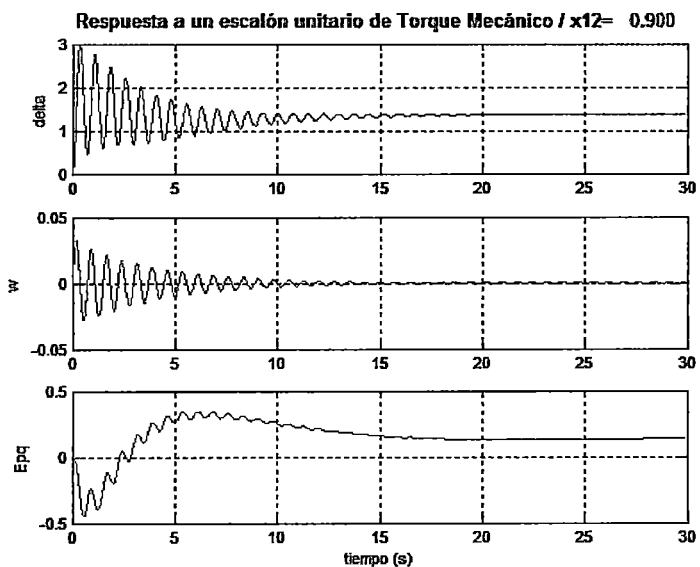


Figura 22 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.475$, $Q_1 = 0.879$ y $X_{12} = 0.90$

b.- Generador operando subexcitado

- El 1^{er} caso: De la tabla 5.16, se observa una potencia activa P_1 igual a 0.95 p.u y potencia reactiva Q_1 de -0.187 p.u, obteniendo las respuestas en el tiempo para los 3 puntos de operación.
- ✓ Primer punto de operación: Con una reactancia X_{12} de 0.025 p.u, se obtiene la Figura 23.

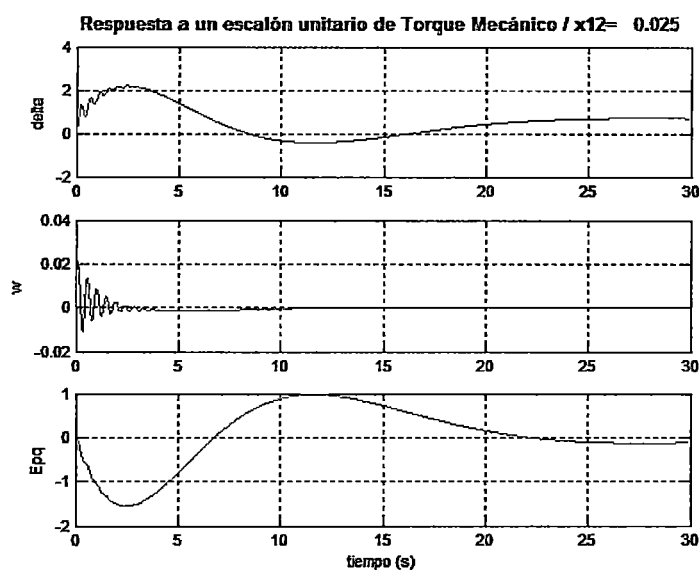


Figura 23 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.95$, $Q_1 = -0.187$ y $X_{12} = 0.025$

- ✓ Segundo punto de operación, con una reactancia X_{12} de 0.40 p.u, se obtiene la Figura 24.

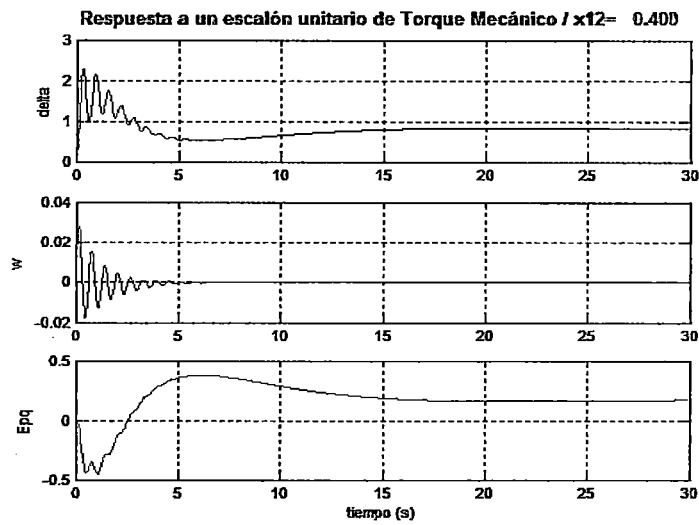


Figura 24 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.95$, $Q_1 = -0.187$ y $X_{12} = 0.40$

- ✓ Tercer punto de operación, con una reactancia X_{12} de 0.90 p.u, se obtiene la Figura 25.

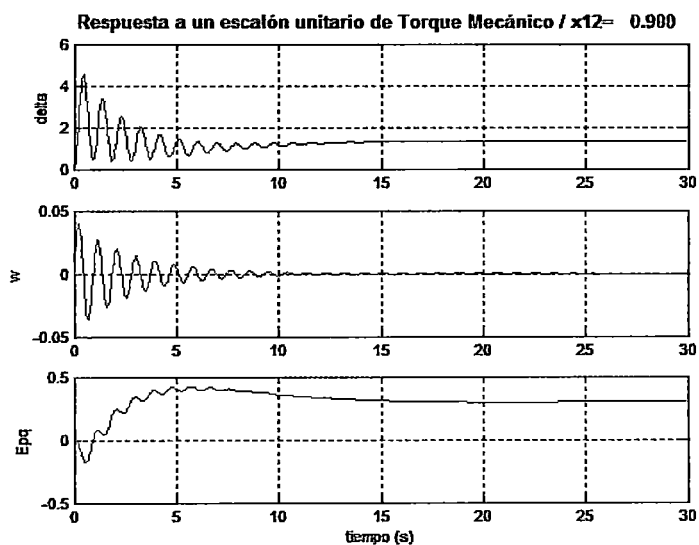


Figura 25 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.95$, $Q_1 = -0.187$ y $X_{12} = 0.90$

- El 2^{do} caso: De la Tabla 5.17, se observa una potencia activa de 0.712 p.u y potencia reactiva de -0.281 p.u, obteniendo las respuestas para los 3 puntos de operación.

- ✓ Primer punto de operación, con una reactancia X_{12} de 0.025 p.u, se obtiene la Figura 26.

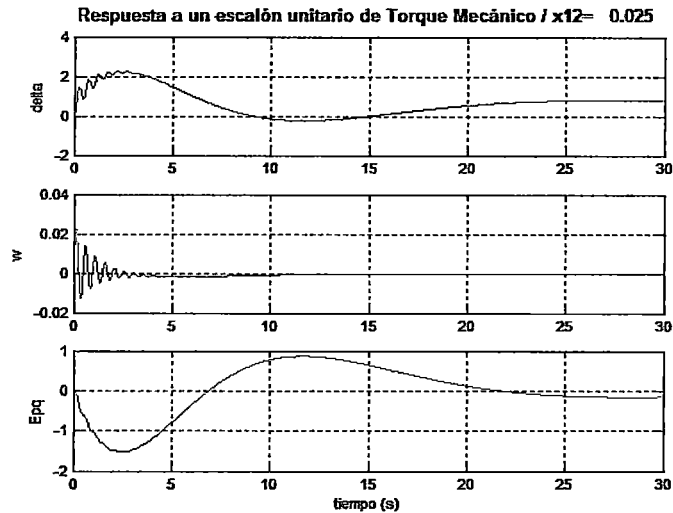


Figura 26 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.712$, $Q_1 = -0.281$ y $X_{12} = 0.025$

- ✓ Segundo punto de operación, con una reactancia X_{12} de 0.40 p.u, se obtiene la Figura 27.

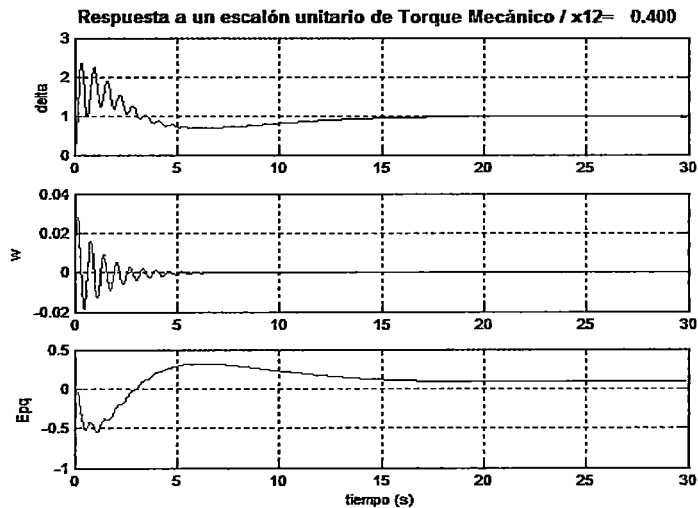


Figura 27 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.712$, $Q_1 = -0.281$ y $X_{12} = 0.40$

- ✓ Para el tercer punto de operación: Con una reactancia X_{12} de 0.90 p.u, se obtiene la Figura 28.

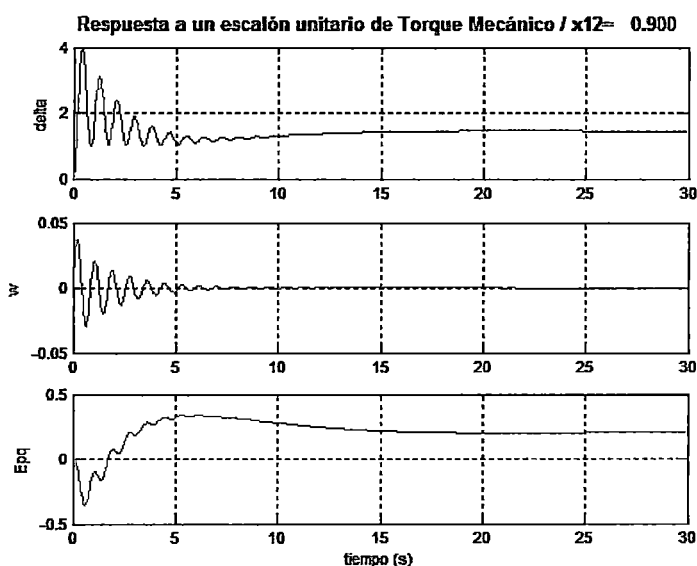


Figura 28 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1= 0.712$, $Q_1=- 0.281$ y $X_{12}= 0.90$

- El 3^{er} caso: De la Tabla 5.18, se tiene un P_1 de 0.475 p.u y Q_1 de -0.352 p.u, obteniendo las respuestas para los 3 puntos de operación.
- ✓ Primer punto de operación: Con una reactancia X_{12} de 0.025 p.u, se obtiene la Figura 29.

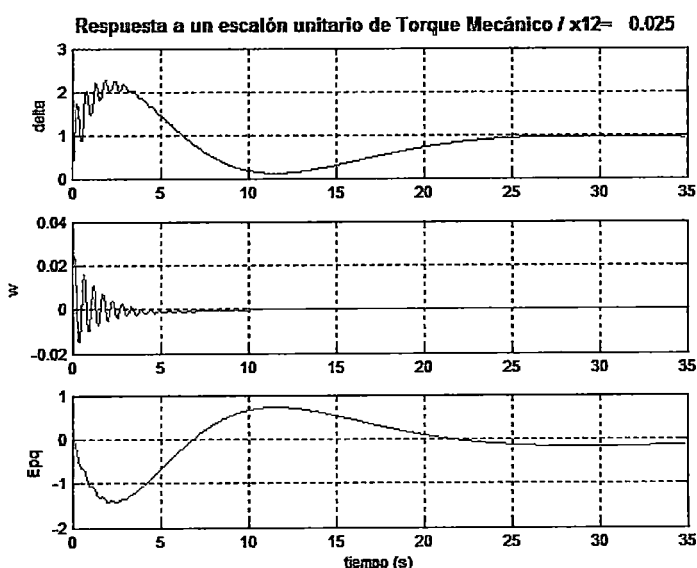


Figura 29 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1= 0.475$, $Q_1= - 0.352$ y $X_{12}= 0.025$

- ✓ Segundo punto de operación, con una reactancia X_{12} de 0.40 p.u, se obtiene la Figura 30.

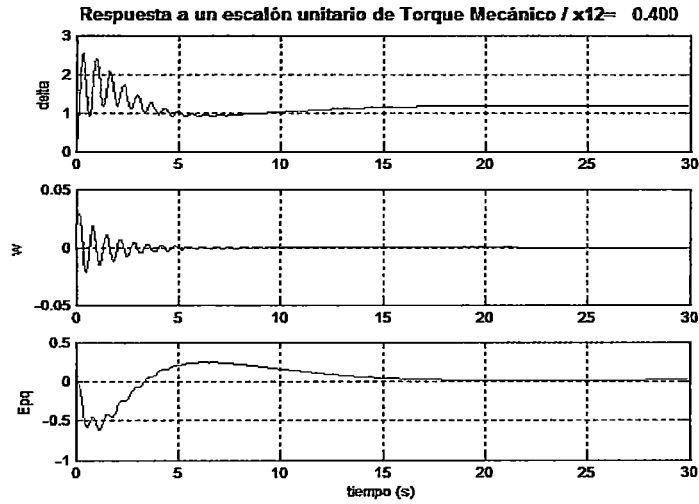


Figura 30 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.475$, $Q_1 = - 0.352$ y $X_{12} = 0.40$

- ✓ Tercer punto de operación, con una reactancia X_{12} de 0.90 p.u, se obtiene la Figura 31.

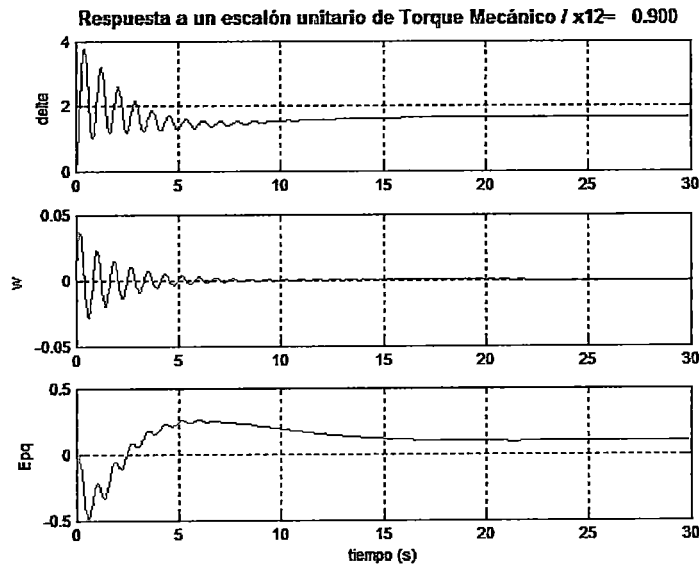


Figura 31 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.475$, $Q_1 = - 0.352$ y $X_{12} = 0.90$

ANEXO E

CALCULO DE LA REACTANCIA EXTERNA VISTA POR EL GENERADOR DESDE SUS BORNES

Se ha utilizado el Software Winflu 2.3px para poder identificar reactancias externa grandes para condiciones críticas de operación.

a) Con la línea Paramonga - Huacho en servicio (E/S)

- L -1103, L -1104 y L -1105 E/S: Se obtiene una reactancia thevenin de 0.45 p.u vista por los bornes del generador. Siendo la reactancia externa de 0.53 p.u.
- L -1103 y L -1104 E/S: Se obtiene una reactancia thevenin de 0.52 p.u vista por los bornes del generador. Siendo la reactancia externa de 0.59 p.u.
- L -1103 E/S: Se obtiene una reactancia thevenin de 0.71 p.u vista por los bornes del generador. Siendo la reactancia externa de 0.78 p.u.

b) Con la línea Paramonga - Huacho fuera de servicio (F/S) :

- L -1103, L -1104 y L -1105 E/S: Se obtiene una reactancia thevenin de 0.87 p.u vista por los bornes del generador. Siendo la reactancia externa de 0.94 p.u.
- L -1103 y L -1104 E/S: Se obtiene una reactancia thevenin de 0.90 p.u vista por los bornes del generador. Siendo la reactancia externa de 0.98 p.u.
- L -1103 E/S: Se obtiene una reactancia thevenin de 0.87 p.u vista por los bornes del generador. Siendo la reactancia externa de 0.94 p.u.

Se muestra Tablas 1 y 2 que corresponden a la Línea Paramonga - Huacho E/S y Paramonga - Huacho F/S, con sus respectivas reactancias externas vistas por los bornes de la C.H Cañón del Pato.

Líneas (E/S)	L-1103		L-1103
	L-1104	L-1105	L-1104
Xthe	0.45		0.52
Xe	0.53		0.59

Tabla 1 Paramonga - Huacho E/S

Líneas (E/S)	L-1103		L-1103
	L-1104	L-1105	L-1104
Xthe	0.87		0.90
Xe	0.94		0.98

Tabla 2 Paramonga - Huacho F/S

ANEXO F

SIMULACIONES DE LA RESPUESTA EN EL TIEMPO CON EL EFECTO DEL PSS CON SEÑAL DE POTENCIA ACELERANTE CON NUEVOS AJUSTES

Se muestra las simulaciones de la respuesta en el tiempo de las condiciones de operación analizadas en el trabajo con la incorporación del PSS de integral de potencia acelerante con los ajustes propuestos.

1. Influencia de la condición de operación de la central

- 1er caso: Para la condición de operación: $P_1=0.95$, $X_{12}=0.42$ y $Q_1=0.156$, las respuestas en el tiempo se observan en las Figuras 6.35 al 6.40.

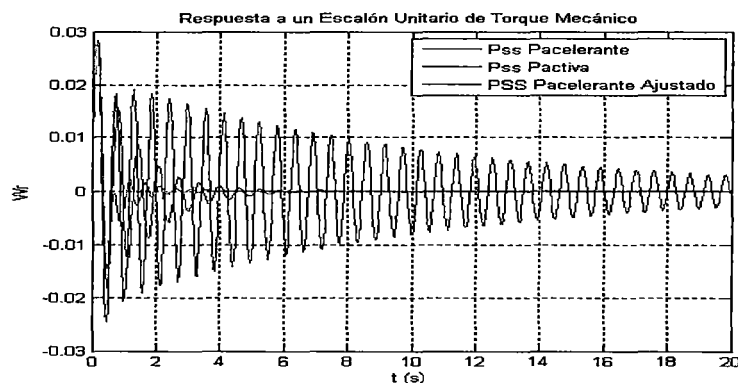


Figura 6.35 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1=0.95$, $X_{12}=0.42$ y $Q_1=-0.156$

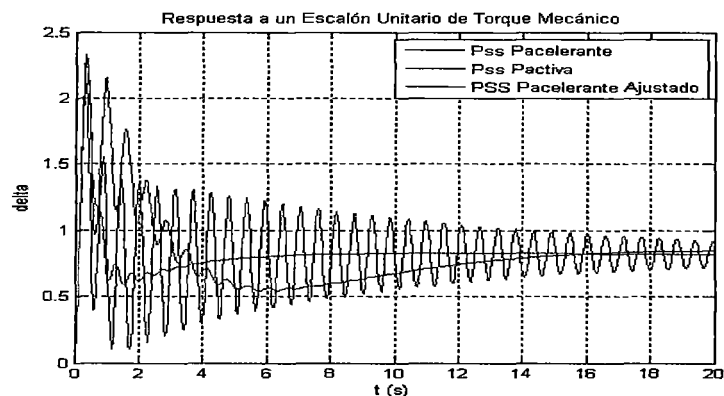


Figura 6.36 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1=0.95$, $X_{12}=0.42$ y $Q_1=-0.156$

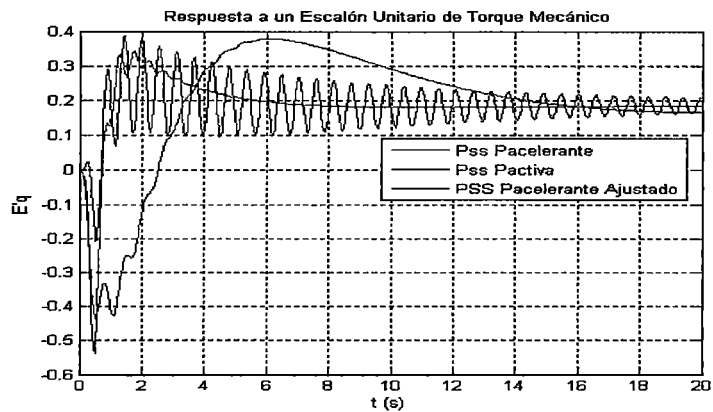


Figura 6.37 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1= 0.95$, $X_{12}= 0.42$ y $Q_1=- 0.156$

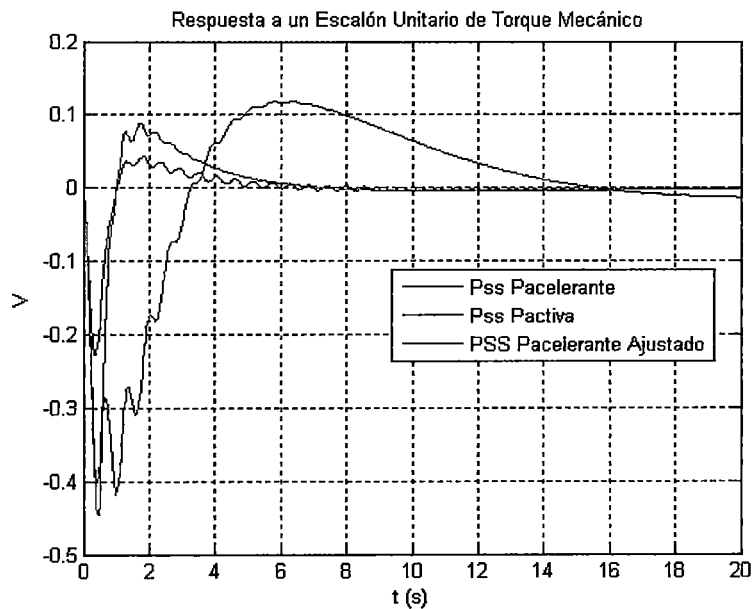


Figura 6.38 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1= 0.95$, $X_{12}= 0.42$ y $Q_1=- 0.156$

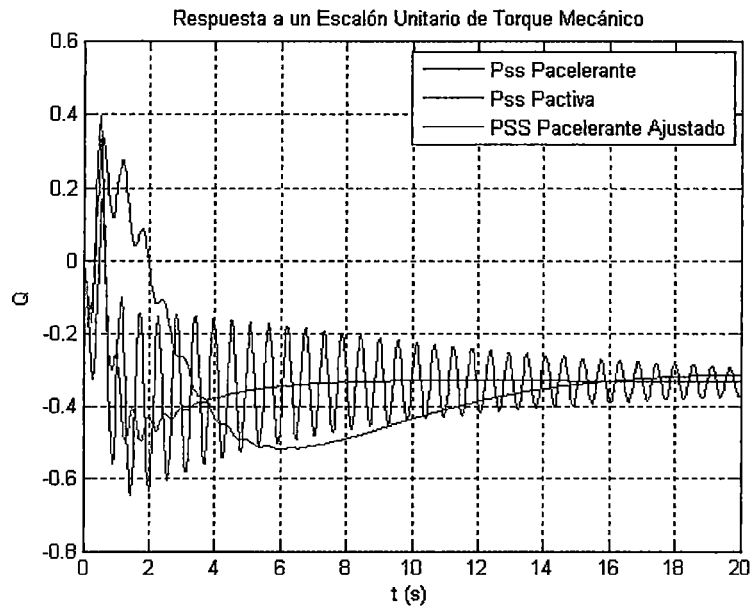


Figura 6.39 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1= 0.95$, $X_{12}= 0.42$ y $Q_1=- 0.156$

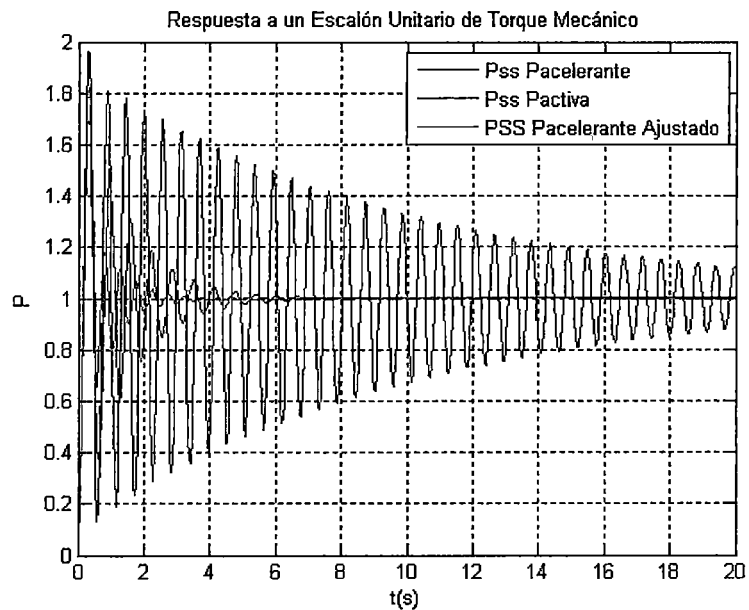


Figura 6.40 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1= 0.95$, $X_{12}= 0.42$ y $Q_1=- 0.156$

- 2do caso: Para la condición de operación: $P_1=0.712$, $X_{12}=0.42$ y $Q_1=0.699$, las respuestas en el tiempo se observan en las Figuras 6.41 al 6.46,

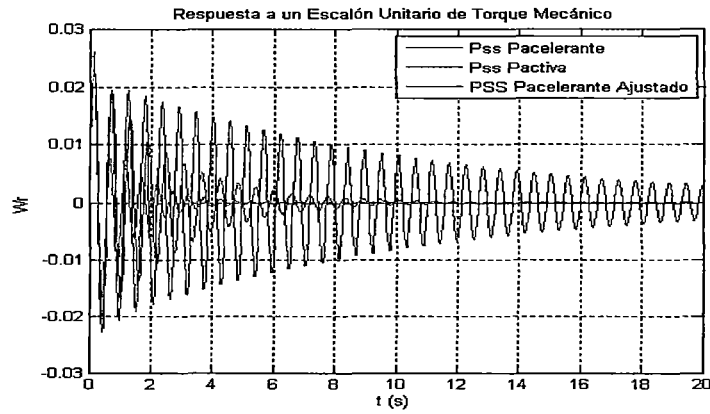


Figura 6.41 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1=0.712$, $X_{12}=0.42$ y $Q_1=-0.699$

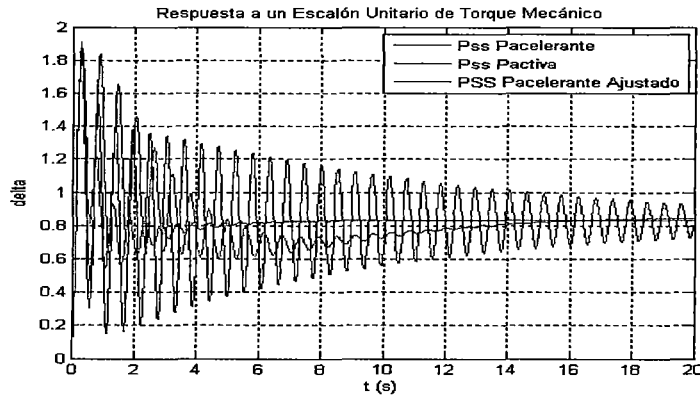


Figura 6.42 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1=0.712$, $X_{12}=0.42$ y $Q_1=-0.699$

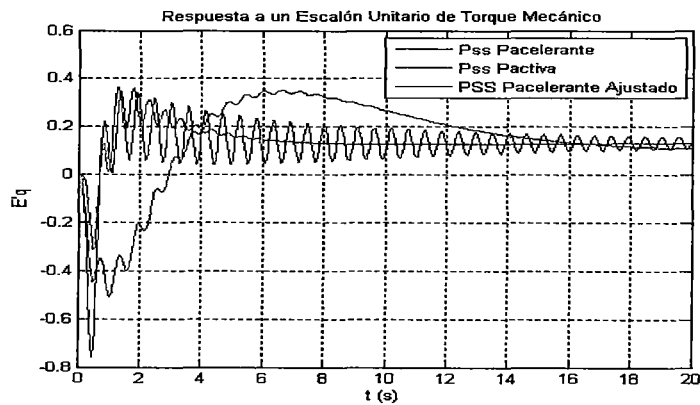


Figura 6.43 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1=0.712$, $X_{12}=0.42$ y $Q_1=-0.699$

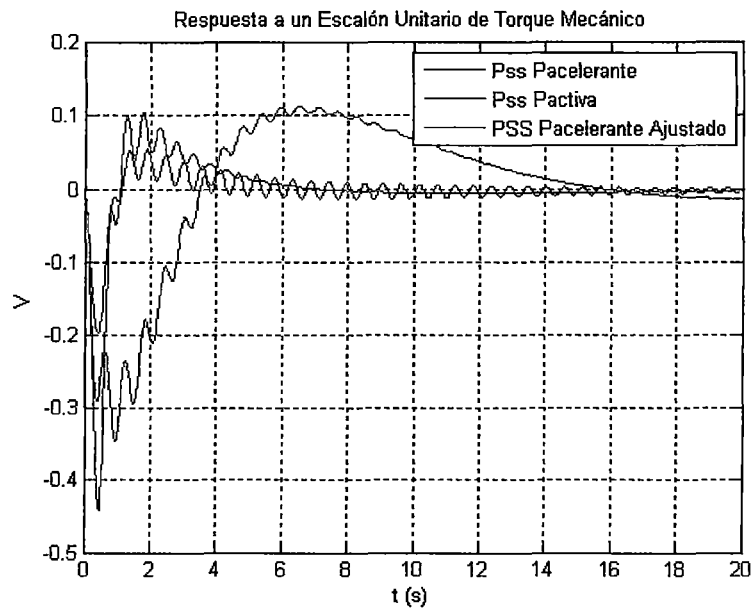


Figura 6.44 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1=0.712$, $X_{12}=0.42$ y $Q_1=-0.699$

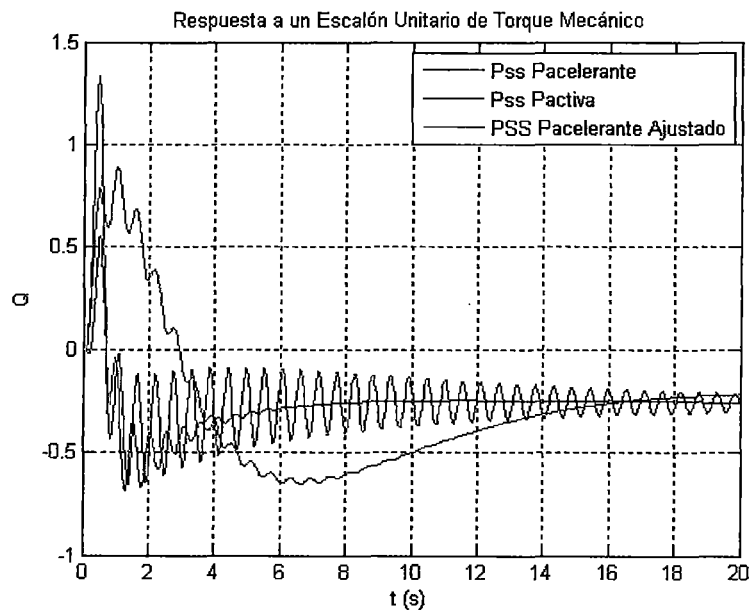


Figura 6.45 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1=0.712$, $X_{12}=0.42$ y $Q_1=-0.699$

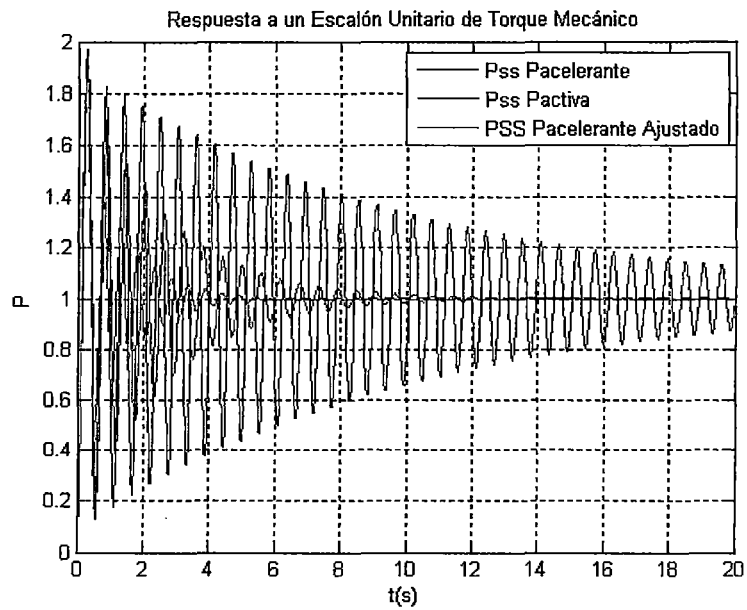


Figura 6.46 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1=0.712$, $X_{12}=0.42$ y $Q_1=-0.699$

- 3er caso: Para la condición de operación: $P_1=-0.475$, $X_{12}=0.42$ y $Q_1=-0.44$, las respuestas en el tiempo se observan en las Figuras 6.47 al 6.52.

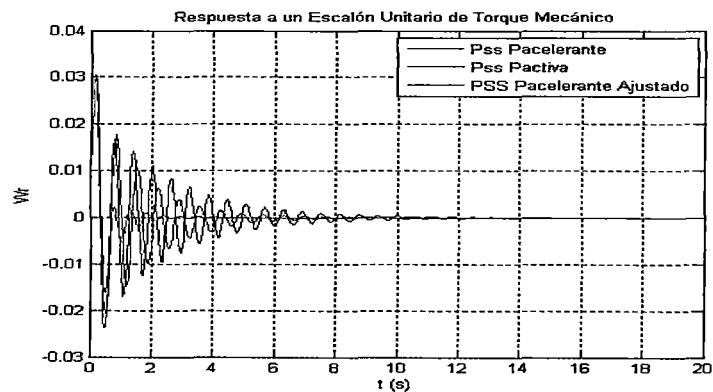


Figura 6.47 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1=0.475$, $X_{12}=0.42$ y $Q_1=-0.440$

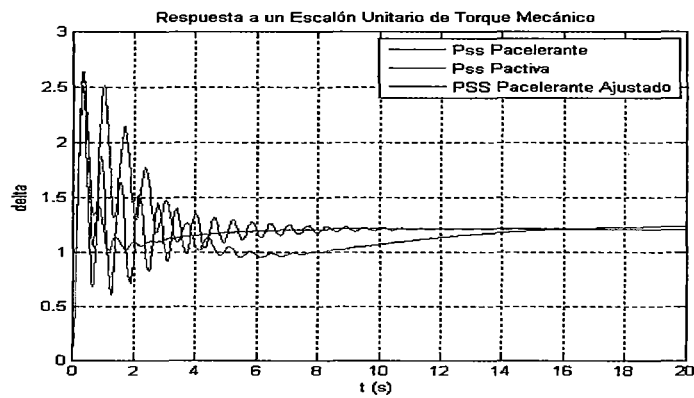


Figura 6.48 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1=0.475$, $X_{12}=0.42$ y $Q_1=-0.440$

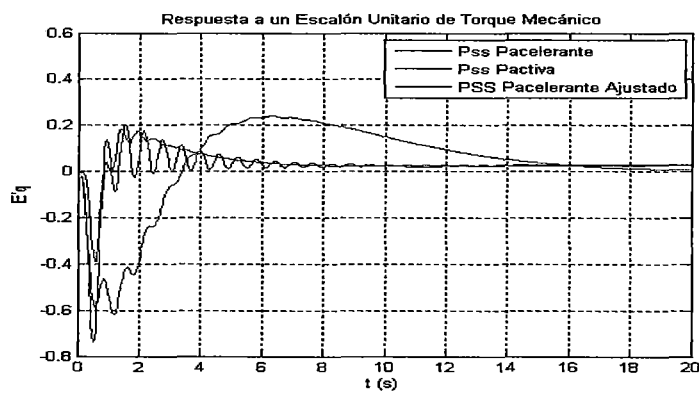


Figura 6.49 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1=0.475$, $X_{12}=0.42$ y $Q_1=-0.440$

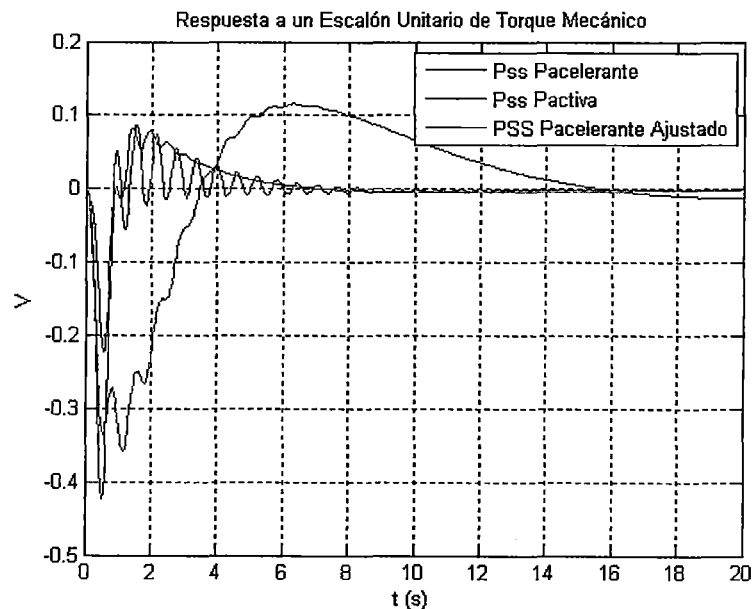


Figura 6.50 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1=0.475$, $X_{12}=0.42$ y $Q_1=-0.440$

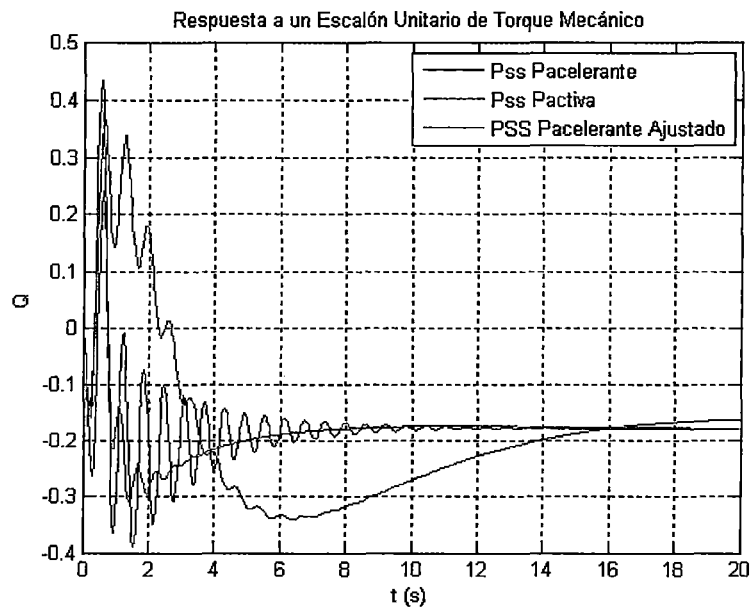


Figura 6.51 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1=0.475$, $X_{12}=0.42$ y $Q_1=-0.440$

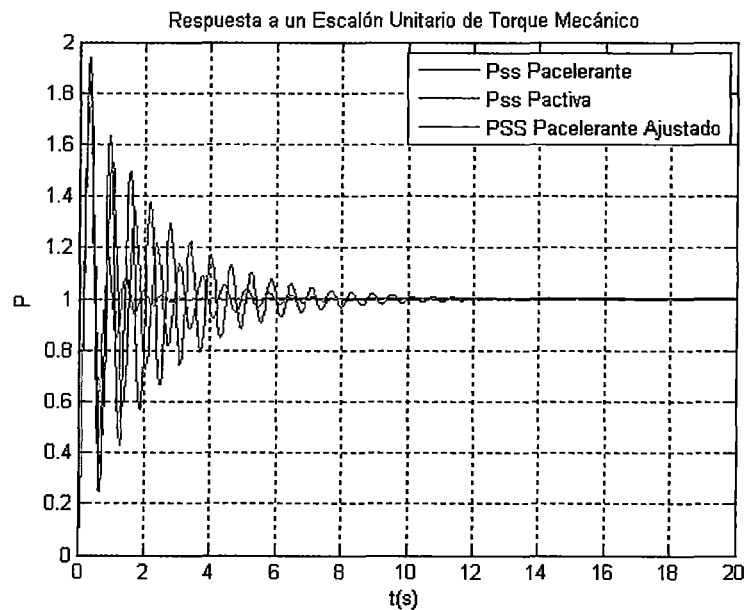


Figura 6.52 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1=0.475$, $X_{12}=0.42$ y $Q_1=-0.440$

6.5.2.2 Influencia de la condición de operación del SEIN

- **Sobrexcitado:** Del 1er caso, para el punto de operación: $P_1=0.95$, $Q_1= 0.312$ y $X_{12}=0.90$, las respuestas en el tiempo se observan en las Figuras 6.53 al 6.58.

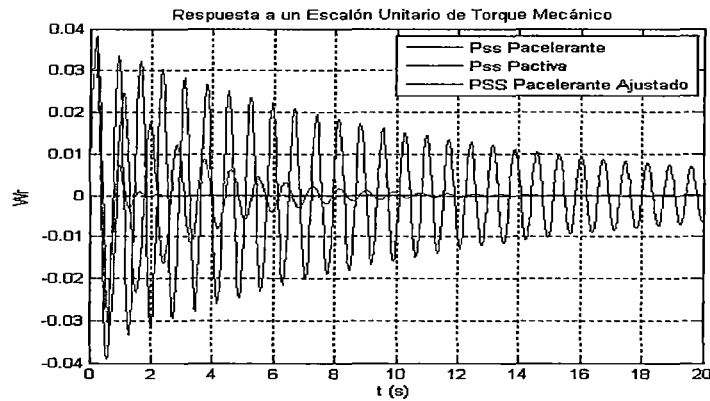


Figura 6.53 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1= 0.95$, $Q_1=0.312$ y $X_{12}= 0.90$

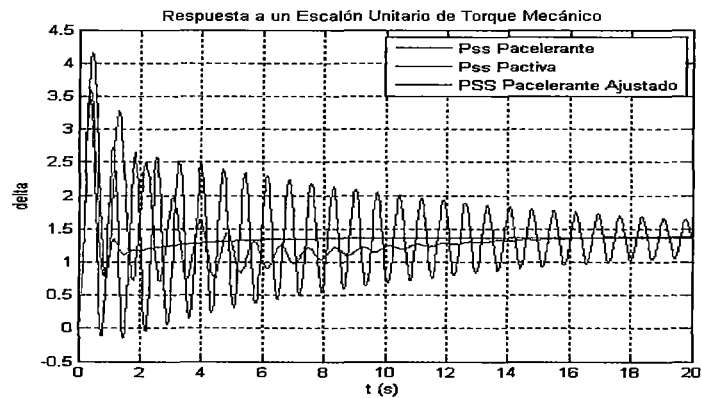


Figura 6.54 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1= 0.95$, $Q_1=0.312$ y $X_{12}= 0.90$

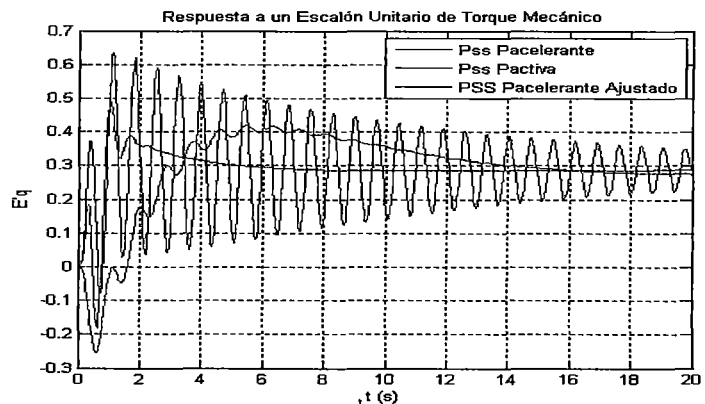


Figura 6.55 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1= 0.95$, $Q_1=0.312$ y $X_{12}= 0.90$

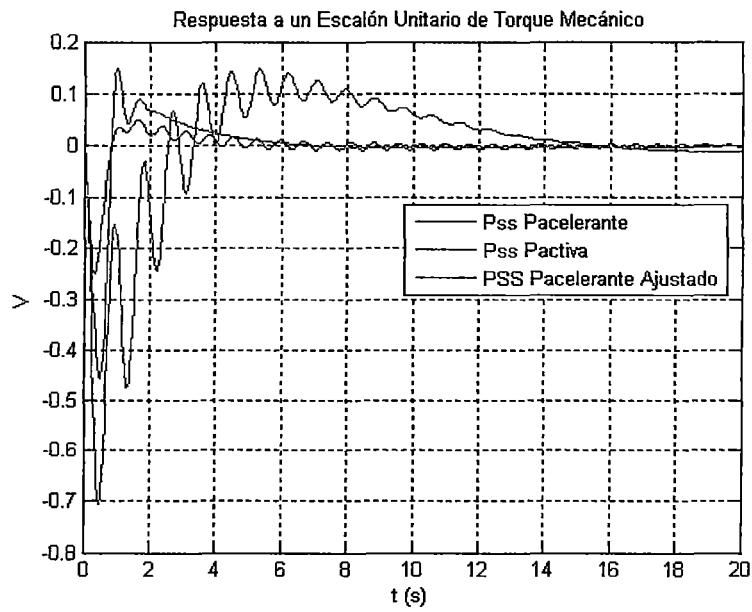


Figura 6.56 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1= 0.95$, $Q_1=0.312$ y $X_{12}= 0.90$

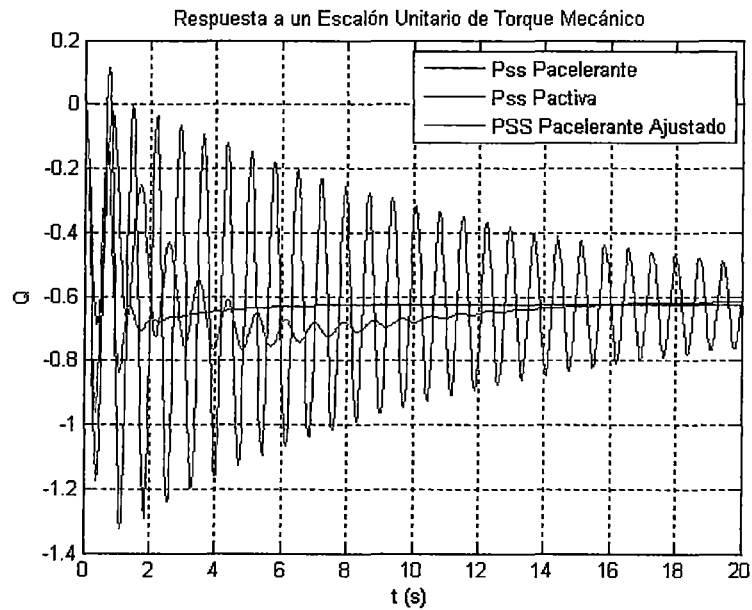


Figura 6.57 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1= 0.95$, $Q_1=0.312$ y $X_{12}= 0.90$

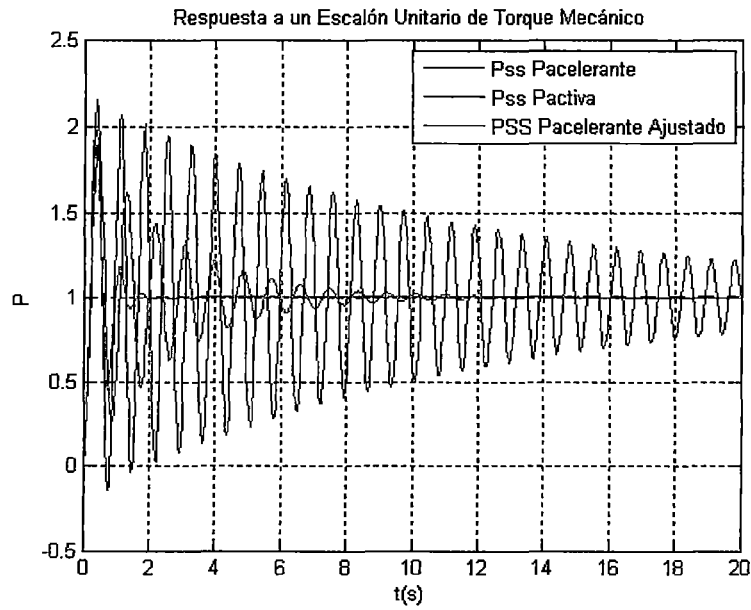


Figura 6.58 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1= 0.95$, $Q_1=0.312$ y $X_{12}= 0.90$

- Subexcitado: Del 2^{do} caso, para la condición de operación: $P_1=0.712$, $Q_1=-0.281$ y $X_{12}=0.90$, las respuestas en el tiempo se observan en las Figuras 6.59 al 6.64.

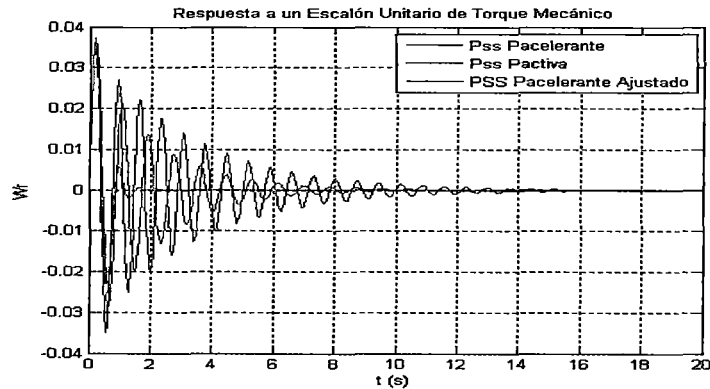


Figura 6.59 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1= 0.712$, $Q_1=-0.281$ y $X_{12}= 0.90$

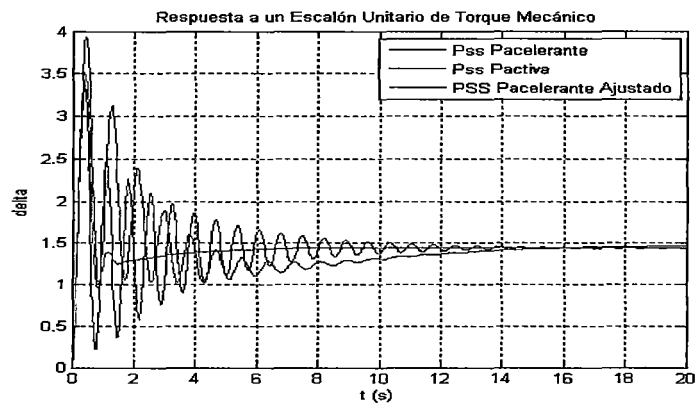


Figura 6.60 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1=0.712$, $Q_1=-0.281$ y $X_{12}=0.90$

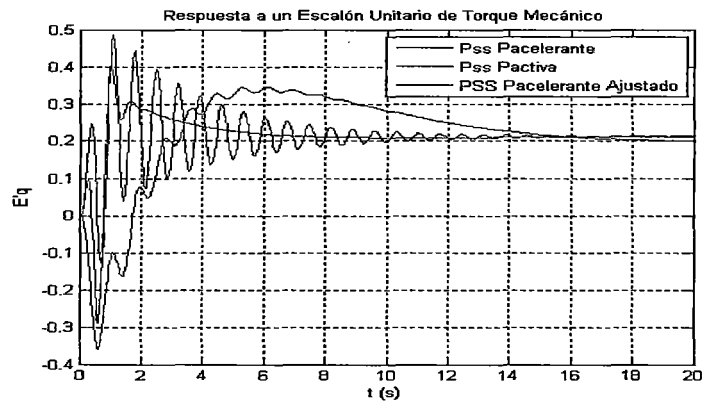


Figura 6.61 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1=0.712$, $Q_1=-0.281$ y $X_{12}=0.90$

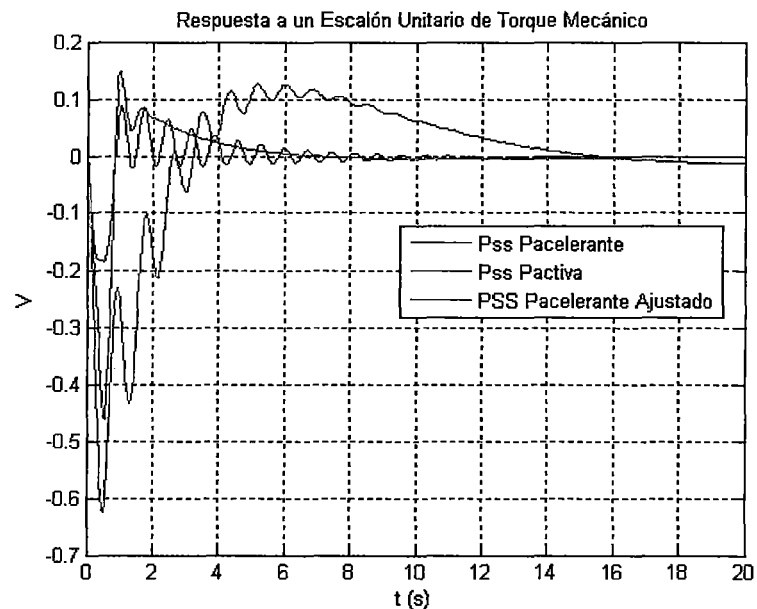


Figura 6.62 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1=0.712$, $Q_1=-0.281$ y $X_{12}=0.90$

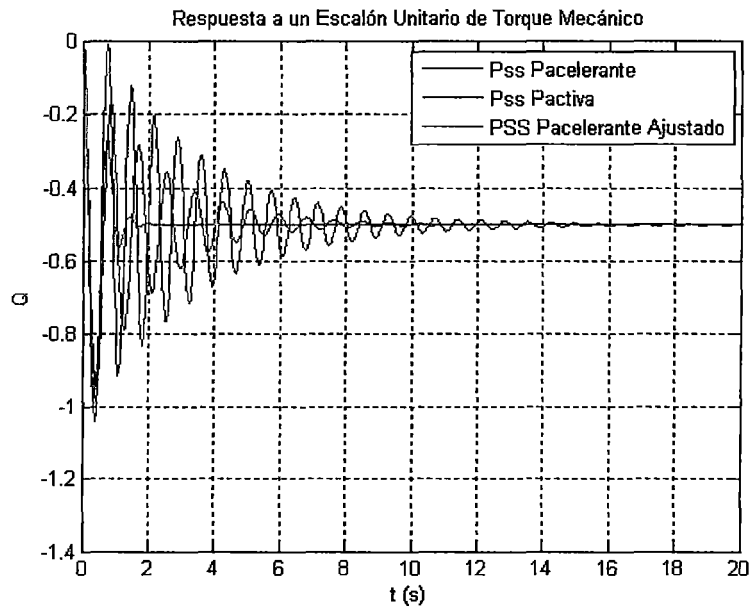


Figura 6.63 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.712$, $Q_1 = -0.281$ y $X_{12} = 0.90$

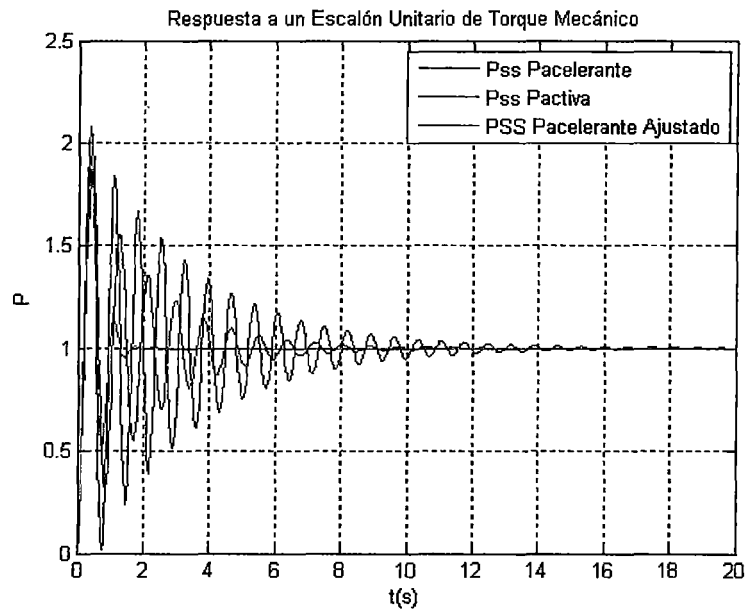


Figura 6.64 Respuesta a un Escalón Unitario de Torque Mecánico con $P_1 = 0.712$, $Q_1 = -0.281$ y $X_{12} = 0.90$

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Central Hidroeléctrica Cañón del Pato y Centrales Termoeléctricas Malacas y Aguaytía, "Pruebas de Estabilidad Permanente", Informes CESI N° A2/040660, A2/041092 y A2/041068 Diciembre 2002.
- [2] Estudio de Rechazo de Carga/Generación del SEIN-Año 2003, CESI, Agosto 2002-Marzo 2003
- [3] Estudio de Rechazo de Generación en las Centrales de San Gabán II y Machupicchu ante desconexiones de las líneas L-1008 o L-1011, CESI, Julio, 2003.
- [4] Prahba Kundur, " Power System Stability and Control ",EPRI, 1998
- [5] Definition classification of Power System Stability IEEE – CIGRE Joint task force on Stability terms and definition, 2004.
- [6] Katsuhiko Ogata, "Ingeniería de Control Moderna", Prentice Hall, 1980.
- [7] Carlos Rider, "Sistemas de Control Automático", Departamento de Electricidad y Electrónica, Universidad Nacional de Ingeniería, 1980.
- [8] Ing. Roberto Rubén Ramírez Arcelles; Bachiller Manuel Rubén Ramírez Carbonell; "Sistema de Prueba para la Simulación de Oscilaciones Electromecánicas de baja frecuencia. Parte I Conceptualización", Revista Especializada en Electricidad - Red Eléctrica, N° 4, Octubre - Noviembre, 2005.
- [9] Leander W. Match, "Maquinas Eléctricas y Electromecánicas", Universidad de Arizona, México, 1974.

- [10] Dr. Florencio Aboytes García, "Estabilidad Dinámica en Sistemas Eléctricos de Potencia, Monterrey – México, Octubre 1991"
- [11] Anderson, P. M. And Fouad, A. A., "Power System Control and Stability", Iowa University Press, 1977.
- [12] Arrillaga, J. A. And Harker, B.J., "Computer Modelling in Electrical Power Systems", John Wiley & Sons, 1984.
- [13] 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.
- [14] Informe de pruebas de REIVAX en los PSS de la C.H. Cañón del Pato, junio 2006.
- [15] Pruebas de Estabilidad Permanente de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato (PERÚ), COES/CESI, Diciembre 2002.
- [16] Mitsubishi Electric, Integral of Accelerating Power Type PSS (Power System Stabilizer), New Publication. Effective September 2001.