



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

---

---

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**MODELADO DEL COMPENSADOR ESTÁTICO DE  
VARS PARA ESTUDIOS DE FLUJOS DE POTENCIA  
Y DE ESTABILIDAD ANGULAR TRANSITORIA**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS  
EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**PRESENTA:**

**CARLOS URIEL CASTRO SOTELO.**



**MÉXICO, D. F.**

**DICIEMBRE 2007**





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 17:30 horas del día 14 del mes de Diciembre del 2007 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de la E.S.I.M.E.-ZAC para examinar la tesis de grado titulada:

“MODELADO DEL COMPENSADOR ESTATICO DE VARS PARA ESTUDIOS DE FLUJOS DE POTENCIA Y DE ESTABILIDAD ANGULAR TRANSITORIA”

Presentada por el alumno:

CASTRO

SOTELO

CARLOS URIEL

Apellido paterno

Apellido materno

Nombre(s)

Con registro: A 0 5 0 1 3 6

Aspirante al grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron SU APROBACION DE LA TESIS, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Director de tesis

DR. DANIEL RUIZ VEGA

Presidente

DR. DANIEL OLGUIN SALINAS

Segundo Vocal

DR. JAIME ROBLES GARCÍA

Tercer Vocal

M. EN C. GONZALO ARROYO AGUILERA

Secretario

DR. DAVID ROMERO ROMERO

Suplente

M. EN C. TOMAS IGNACIO ASIAIN OLIVARES

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

DR. JAIME ROBLES GARCÍA



SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION





**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS**

En la Ciudad de México D. F., el día 15 del mes de diciembre del año 2007, el que suscribe Carlos Uriel Castro Sotelo, alumno del Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica con número de registro A050136, adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME-Zacatenco del IPN, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Daniel Ruiz Vega y cede los derechos del trabajo intitulado Modelado del Compensador Estático de Vars para Estudios de Flujos de Potencia y de Estabilidad Angular Transitoria, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección curiel\_80@yahoo.com.mx y/o drv\_liege@yahoo.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Carlos Uriel Castro Sotelo



## RESUMEN

Debido a su importante influencia en el comportamiento de los sistemas de potencia, en esta tesis se describen, programan y analizan modelos en estado estacionario y dinámico del Compensador Estático de Vars (CEV).

Aunque el modelo seleccionado para representar al CEV en estudios de flujos de potencia es uno de los que fueron propuestos primero en la literatura, en la tesis se demuestra, por medio de simulaciones, que es el adecuado para este tipo de estudios, ya que modela correctamente la característica de estado estacionario del CEV en todas sus regiones de operación.

El modelo en estado estacionario del CEV fue incluido en un programa de flujos de potencia en FORTRAN, y de esta manera se mostró que, además de ser exacto, no complica innecesariamente el algoritmo de solución del método de flujos de potencia de Newton-Raphson completo al utilizar solamente variables ya definidas en el estudio. Por lo tanto, no es necesario incluir ninguna variable nueva (como el ángulo de disparo o la susceptancia equivalente del CEV) y no aumenta el número de iteraciones del proceso de solución de manera importante.

Siendo el modelo anterior un modelo de equilibrio del CEV, se menciona que puede ser utilizado en estudios de estabilidad de voltaje que empleen modelos estáticos del sistema de potencia.

Se presentan las ecuaciones de estado de dos modelos dinámicos del CEV propuestos por el IEEE para estudios de estabilidad transitoria y se incluyen en un programa de estabilidad transitoria escrito en FORTRAN para comprobar su adecuado funcionamiento. Ambos modelos dinámicos son sintonizados y probados en un sistema de prueba del IEEE.

Los resultados de la tesis muestran que el modelado del CEV puede afectar de manera importante los resultados de las simulaciones, por lo que se deben de utilizar los modelos más cercanos al comportamiento real del equipo.





## ABSTRACT

This work describes, programs and analyzes, steady-state and dynamic Static var Compensator (SVC) models, due to its important effect in power system behavior.

In spite of the fact that the selected steady-state model was one of the first proposed in the technical literature to represent the SVC in the power flow study, in this thesis it is shown, by means of simulations, that this model is the most adequate for this kind of studies, since it correctly models the SVC steady-state characteristic in all the operating regions.

The SVC steady-state model was included in a power flow computer simulation program, written in FORTRAN and, in this way, it was also possible to demonstrate that, besides being an exact model, it does not unnecessarily complicate the Newton-Raphson solution algorithm, since it uses already available standard power flow variables. It is therefore not necessary to include any new variable (like the trigger angle or the device susceptance), and it does not importantly increase the required number of iterations to converge to the solution.

Being an equilibrium model of the SVC, the steady-state model can also be used in voltage stability studies using a static model of the power system.

The state equations of two dynamic SVC models recommended by the IEEE for time-domain simulation programs are also presented, and they were included in a transient stability program written in FORTRAN to test its dynamic performance. Both dynamic models were tuned and tested using the data of one IEEE test power system.

Thesis results showed that SVC modeling can affect in a very important way simulation results, and this is the reason models closer to the actual device should be included in power system simulations.



## DEDICATORIA

DEDICO ESTA TESIS

A mis padres

GUADALUPE SOTELO HERNÁNDEZ  
INOCENCIO CASTRO ALVARADO

Por todo el cariño y el amor que me dan todos los días.  
Por enseñarme a nunca rendirme ante situaciones difíciles.  
Por el apoyo y confianza que tuvieron en mi GRACIAS.

A mis hermanos.

GUADALUPE CASTRO SOTELO.  
JAQUELIN CASTRO SOTELO.  
OSCAR CASTRO SOTELO.

Por todo el apoyo que me brindaron durante mi estancia en la maestría GRACIAS.

A mi novia:

CYNTIA MARISOL MEZA CASTRO.

Por todo su amor, confianza y paciencia GRACIAS.

A mi amigo:

JOSÉ LUÍS ABARCA TORREBLANCA (DISEÑADOR DE MODAS).

Por abrirme las puertas de su hogar.  
Por apoyarme y estar conmigo en todo momento.  
Por darme su amistad, confianza y cariño GRACIAS.

Ala casa del estudiante (RAEG) Residencia Autónoma del Estado de Guerrero

Por haberme cobijado con sus paredes cuando llegue al D.F.  
A todas las personas que habitan en la casa del estudiante los cuales me brindaron su amistad y confianza GRACIAS.



## AGRADECIMIENTOS

Agradezco infinitamente a mi asesor el Dr. Daniel Ruiz Vega por haberme ilustrado con sus conocimientos.

Por su generosidad y entrega a sus alumnos.

Por haberme apoyado en situaciones difíciles de ignorancias y económicos.

Por toda su confianza, consejos y exigencia GRACIAS.

Agradezco al Dr. Daniel Olguín Salinas por su amistad, sencillez y confianza.

Quiero agradecer a mis sinodales Dr. Daniel Olguín Salinas, Dr. Daniel Romero Romero, Dr. Daniel Ruiz Vega, Dr. Jaime Robles García, M en C. Gonzalo Arroyo Aguilera y al M en C. Tomás Ignacio Asiain Olivares.

Quiero agradecer a todos mis maestros de la SEPI y personal no docente, por todos sus conocimientos transmitidos y por su amistad.

Quiero agradecer ala Beca Institucional del IPN y ala Beca PIFI por todo su apoyo durante la estancia en la SEPI - ESIME ZAC.

Quiero agradecer a mis amigos del IPN.

Mario Alberto García Domínguez, Javier Tenorio Huerta, Maria Concepción Ortiz Villa Nueva, Javier Torres Sánchez, Juan Carlos Martínez Jiménez, Manuel Solar Salar, Nicolás Rodríguez Pereyra, Francisco Martines Domínguez, David Villareal Martínez, Samuel Domínguez, Emilio II Carranza Arteaga, Enrique López Luís, Daniel Valladares, Faustino Arce del Pilar, Adrián Visoso Sánchez, Artemio Flores.

Por estar en las buenas y en las malas GRACIAS.

Quiero agradecer a mis amigos de la vida.

A todos y cada uno de la colonia del CUYO (San Jerónimo de Juárez Gro.) perdón por omitir los nombres pero no quisiera dejar de mencionar alguno.

Por su amistad y cariño en esta vida GRACIAS.



# CONTENIDO

Página

<b>RESUMEN</b> .....	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>IX</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>XI</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>XIII</b>
<b>CONTENIDO</b> .....	<b>XV</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>XVII</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	<b>XXIII</b>
<b>CAPÍTULO: 1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.2 OBJETIVO .....	2
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	2
1.4 ANTECEDENTES .....	2
1.4.1 Trabajos desarrollados mas relevantes del Análisis de los (Compensadores Estáticos de Vars) CEV. 2	
1.4.2 Trabajos desarrollados en México utilizando el análisis de los (Compensadores Estáticos de Vars) CEV.....	4
1.5 APORTACIONES.....	5
1.6 LIMITACIONES Y ALCANCES.....	6
1.7 ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	7
<b>CAPÍTULO 2: MODELADO DEL COMPENSADOR ESTÁTICO DE VARS PARA ESTUDIOS DE FLUJOS DE POTENCIA</b> .....	<b>9</b>
2.1 INTRODUCCIÓN .....	9
2.2 OPERACIÓN DEL CEV EN ESTADO ESTACIONARIO .....	10
2.3 MODELO CONVENCIONAL DEL CEV COMO NODO PV.....	12
2.4 MODELO DEL CEV COMO NODO PQ .....	14
2.4.1 Representación del modelo PQ en el estudio de flujos de potencia.....	15
2.5 RESULTADOS .....	16
2.5.1 Introducción.....	16
2.5.2 Sistema de prueba de 2 generadores y 6 nodos de Stagg .....	17
2.5.3 Sistema de prueba de Nueva Inglaterra.....	21
<b>CAPÍTULO 3: MODELOS DEL COMPENSADOR ESTÁTICO DE VARS PARA ESTUDIOS DE ESTABILIDAD TRANSITORIA</b> .....	<b>34</b>
3.1 ESTABILIDAD DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA .....	34
3.1.1 Clasificaciones de la estabilidad .....	35
3.1.2 Estabilidad Transitoria.....	40
3.2 METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN EN EL TIEMPO PARA ESTUDIOS DE ESTABILIDAD TRANSITORIA .....	42
3.3 MODELO COMPLETO DEL SISTEMA PARA ESTUDIOS DE ESTABILIDAD TRANSITORIA.....	43
3.3.1 Modelado de las Cargas Estáticas.....	46
3.3.2 Representación de los Modelos Dinámicos .....	48
3.4 MODELO DEL CEV PARA ESTUDIOS DINÁMICOS.....	50
3.4.1. Interacción del CEV con la Red de Transmisión .....	50
3.5 MODELOS BÁSICOS DEL CEV PARA ESTUDIOS DINÁMICOS.....	51

	Página
3.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	52
3.6.1 Sistema de prueba sin CEV .....	53
3.6.2 Sistema de prueba con un CEV (modelo 1) .....	55
3.6.3 Sistema de prueba con tres CEV (modelo 1) .....	61
3.6.4 Sistema de prueba con un CEV (modelo 2) .....	63
<b>CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES .....</b>	<b>68</b>
4.1 CONCLUSIONES .....	68
4.2 RECOMENDACIONES .....	69
4.3 TRABAJOS FUTUROS .....	69
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>72</b>
<b>APÉNDICE A DATOS Y DIAGRAMAS UNIFILARES DE LOS DE LOS SISTEMA ELÉCTRICOS DE POTENCIA DE PRUEBA.....</b>	<b>76</b>
<b>APÉNDICE B. MODELOS BÁSICOS DEL CEV RECOMENDADOS POR EL IEEE Y SUS ECUACIONES DE ESTADO .....</b>	<b>82</b>
<b>APÉNDICE C. SINTONIZACIÓN DE LOS MODELOS BÁSICOS 1 Y 2 DEL CEV RECOMENDADOS POR EL IEEE .....</b>	<b>90</b>
<b>APÉNDICE D. SUBROUTINAS PARA MODELAR AL CEV EN ESTUDIOS DE FLUJOS Y DE ESTABILIDAD ANGULAR TRANSITORIA .....</b>	<b>906</b>



## LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 2.1. Característica de operación del CEV (Adaptado de [CIGRE, 1986]).	11
Figura 2.2. Interacción entre el CEV y el sistema de potencia (Adaptado de [Kundur, 1994]).	12
Figura 2.3. Modelo del CEV como nodo convencional PV con pendiente para la operación de rango de control (Adaptado de [CIGRE, 1986, IEEE, 1994]).	13
Figura 2.4. Comparación de los 2 CEV como nodo PV y PQ para estudios de flujos de potencia (Adaptado de [CIGRE, 1986]).	13
Figura 2.5. Modelo del CEV como nodo PQ (Adaptado de [CIGRE 1986]).	14
Figura 2.6.- Análisis de 1cev dentro de los límites de la Característica de operación.	19
Figura 2.7.-Sistema del stagg: (a) Comparación de los 2 modelos del CEV como nodo PV y PQ analizados en el nodo 5 con limitadores operando fuera de los límites de la característica de operación. (b) Acercamiento del análisis de los 2 modelos del CEV como nodo PV y PQ en el nodo 5 con limitadores operando fuera de los límites de la característica de operación.	20
Figura 2.8.- Punto de operación final de 1 CEV modelado como nodo PV y PQ operando dentro de los límites de regulación de la característica de operación.	21
Figura 2.9.-Sistema de nueva Inglaterra: (a) Comparación de los 2 modelos como nodo PV y como nodo PQ analizando 1 CEV en el nodo 17 con limitadores operando fuera de los límites de la característica de operación.(b) Acercamiento del análisis de los 2 modelos del CEV como Nodo PV y PQ en el nodo 17 con limitadores operando fuera de los límites de la característica de operación.	27
Figura 2.10.-Sistema de Nueva Inglaterra utilizando 2 CEVs: (a) Análisis de 1 CEV en el nodo 17 en sus 2 formas como nodo PV y como nodo PQ, operando dentro de los límites de la característica de operación.(b) Análisis de 1 CEV en el nodo 18 sus 2 formas como nodo PV y como nodo PQ operando dentro de los límites de la característica de operación.	30
Figura 2.11.- Análisis de 2 CEVs en el sistema de Nueva Inglaterra: (a) comparación de los 2 modelos del CEV como nodo PV y el nodo PQ analizados en el nodo 17, (b) comparación de los 2 modelos PV y PQ en el nodo 18.	30

	Página
Figura 2.12.- Acercamiento del análisis de los 2 modelos del CEV como nodo PV y PQ analizados en el nodo 17 con limitadores operando fuera de los límites de la característica de operación.....	33
Figura. 3.1 Curvas de demanda horaria del área de control central del Sistema Eléctrico Mexicano para dos días diferentes de 1995 [Ruiz, 2002].....	35
Figura 3.2 Clasificación de los problemas de inestabilidad en los sistemas eléctricos de potencia.....	36
(Adaptado de [Ruiz, 2002, IEEE, 2004]). .....	36
Figura 3.3 Ubicación de los problemas de estabilidad en las bandas de frecuencia de los diferentes fenómenos dinámicos del los sistemas eléctricos de potencia [Anderson et, 1990]. .....	39
Figura 3.4 Diagrama de flujo del método implícito simultáneo [Ruiz, 1996].....	43
Figura 3.5 Circuito equivalente de Norton del modelo clásico de la maquina de polos lisos para la inyección de corriente [Arrillaga, 1990, Román, 1993].....	44
Figura.3.6 Diagrama esquemático de las iteraciones de los elementos dinámicos y estáticos interconectados con la red [Ruiz,. 1996].....	45
Figura 3.7 Característica para el ajuste de una impedancia constante [Cañedo, 1980]. .....	47
Figura 3.8 Representación del modelo de las cargas estáticas del equivalente de Norton para la inyección de corriente [Cañedo, 1980].....	47
Figura 3.9 Representación numérica de la regla trapecial de integración. ....	49
Figura 3.10 Representación del análisis del método numérico con diferente pasó de integración. ....	50
Figura. 3.11 Equivalente de Norton de la iteración del CEV-SEP [Messina, 1993].....	51
Figura 3.12 Modelo básico 1 del CEV [IEEE, 1994].....	52
Figura 3.13 Modelo básico 2 del CEV [IEEE, 1994].....	52
Figura 3.14 Sistema de Nueva Inglaterra : comparación de la magnitud del voltaje en los nodos más cercanos a la falla trifásica aplicada en el nodo 36 sin el modelado del CEV.....	54
Figura 3.15 Sistema de Nueva Inglaterra: comparación del voltaje de los generadores que se ubican cerca de la falla trifásica aplicada en el nodo 36 sin el modelado del CEV, b).- considerando el mismo tiempo de falla y un tiempo de liberación de falla de $t = 0.21$ Seg. (6.6 ciclos) considerándose inestable.....	54
Figura 3.16 Sistema de Nueva Inglaterra: comparación de la potencia reactiva de los generadores mas cercanos a la falla trifásica aplicada en el nodo 36, sin el modelado del CEV.....	55

Figura 3.17 Sistema de Nueva Inglaterra: comparación de la velocidad de los generadores que se ubican cerca de falla trifásica aplicada en el nodo 36.....	55
Figura 3.18 Sistema de Nueva Inglaterra: comparación de la magnitud de la corriente de los generadores se ubican cerca de la falla trifásica aplicada en el nodo 36.....	56
Figura 3.19 Sistema de Nueva Inglaterra: comparación del voltaje en el nodo 38 sin y con el CEV con un tiempo de falla de $t = 0.1$ s y un tiempo de liberación de falla $t = 0.20$ seg. (6 ciclos) sin CEV y $t = 0.23$ s. (7.8 ciclos) con CEV.....	57
Figura 3.20 Sistema de Nueva Inglaterra: a).-Comparación de la Magnitud del voltaje en el nodo 38 con y sin el modelado del CEV con un tiempo de falla de $t = 0.1$ seg. y tiempo de liberación de falla de $t = 0.21$ seg. (6.6 ciclos), b).- se presenta un acercamiento del análisis. ....	57
Figura 3.21 Característica dinámica del CEV (modelo Básico 1): variación del voltaje ante cambios de la potencia reactiva para dos tiempos de liberación de la falla. ....	58
Figura 3.22 Modelo Básico1: variación de la susceptancia equivalente del CEV durante el transitorio ante dos tiempos de liberación de la falla. ....	58
Figura 3.23 Modelo Básico1: variación de la corriente en las terminales del CEV durante el transitorio ante dos tiempos de liberación de la falla. ....	58
Figura 3.24 Sistema de Nueva Inglaterra con el modelo básico 1 del CEV: comparación de la variación de la magnitud del voltaje del nodo 38 utilizando $K_p = 50$ [Messina, 1990] comparados con el caso utilizando $K_p = 113.65$ (tabla C.3 del apéndice C). Se aplica una falla en $t = 0.1$ que es liberada en $t = 0.23$ s). ....	59
Figura 3.25. Característica dinámica del CEV (modelo Básico 1) con ( $K_p = 113.65$ ) : variación del voltaje ante cambios de la potencia reactiva para dos tiempos de liberación de la falla.....	60
Figura 3.26 Modelo Básico1: variación de la susceptancia equivalente del CEV con $K_p = 113.65$ , durante el transitorio ante dos tiempos de liberación de la falla. ....	60
Figura 3.27 Modelo Básico1 con $K_p = 113.65$ : variación de la corriente en las terminales del CEV durante el transitorio ante dos tiempos de liberación de la falla. ....	60
Figura 3.28 Análisis del Sistema de Nueva Inglaterra con una compensación múltiple (3 CEVs) .-Comparación de la Magnitud del voltaje de los nodos 36, 37 y 38 con y sin el modelado del CEV con un tiempo de falla de $t = 0.1$ seg. y tiempo de liberación de falla de $t = 0.13$ seg. (7.8 ciclos).....	61

	Página
Figura 3.29 Característica de operación en estado dinámico del CEV en el nodo 38 cuando se tiene compensación múltiple en los nodos 36, 37 y 38.....	62
Figura 3.30 Susceptancia equivalente del modelo básico 1 del CEV en el nodo 38 considerando la aplicación de compensación múltiple en los nodos 36, 37 y 38.....	62
Figura 3.31 Comparación de la magnitud del voltaje de los dos modelos del CEV en el nodo 38.....	63
Figura 3.32 Comparación de la magnitud del voltaje de los dos modelos del CEV en el nodo 38 considerando los parámetros de la tabla C.3 para el modelo básico 1 y los parámetros de la tabla C.5 del apéndice C para el modelo básico 2.....	63
Figura 3.33. Característica dinámica del modelo Básico 2 del CEV: variación del voltaje ante cambios de la potencia reactiva para dos tiempos de liberación de la falla.....	64
Figura 3.34. Característica dinámica del modelo Básico 2 del CEV: variación del voltaje ante cambios de la corriente para dos tiempos de liberación de la falla. ....	64
Figura 3.35 Modelo Básico 2: variación de la susceptancia equivalente del CEV durante el transitorio ante dos tiempos de liberación de la falla. ....	65
Figura 3.36 El comportamiento de la corriente del modelo básico 2 del CEV que considera una retro alimentación de corriente y un regulador de voltaje proporcional e integral.....	65
Figura 3.37 Comportamiento de la magnitud del voltaje en terminales del modelo básico 2 del CEV que considera una retroalimentación de corriente y un regulador de voltaje proporcional e integral.....	66
Figura A.1.-Solución del Sistema de prueba [Stagg et al 1968]. ....	76
Figura A.2.- Sistema de prueba Nueva Inglaterra [Malek et al 1990].....	77
Figura B.1.- Modelo básico 1 del CEV [IEEE 1994].....	82
Figura B.2.-Bloque transductor o de medición [IEEE, 1994]. ....	82
Figura B.3.-Bloque compensador [IEEE 1994].....	83
Figura. B.5.- Bloque del regulador automático de voltaje. [IEEE 1994].....	83
Figura B.6.- Bloque del control de la susceptancia por tiristores [IEEE 1994].....	84
Figura B.7.- Bloque de interfase o adaptación del CEV al sistema p.u. del SEP [IEEE 1994].....	84
Figura B.7: Modelo básico 2 del CEV [IEEE 1994]. ....	85
Figura B.8.- Bloque transductor o de medición [IEEE, 1994]. ....	85
Figura B.9.- Bloque de retroalimentación del CEV [IEEE, 1994]. ....	86
Figura B.10.-Bloque del regulador de voltaje. [IEEE 1994].....	86

	Página
Figura B.11.- Bloque del control de la susceptancia por tiristores [IEEE 1994].....	87
Figura B.12: Bloque de interfase o adaptación del CEV al sistema p.u. del SEP [IEEE 1994].....	87
Figura C.1.- Diagrama a bloque del modelo básico 1 del CEV utilizando el programa de SIMULINK.....	90
Figura C.2.- Comparación de los parámetros del modelo básico 1 del CEV para determinar los parámetros del modelo del CEV modelado en el nodo 37.....	91
Figura C.3.- Comparación de los parámetros del modelo básico 1 del CEV para determinar los parámetros del modelo del CEV modelado en el nodo 37.....	92
Figura C.4.- Comparación de los parámetros del modelo básico 1 del CEV para determinar los parámetros del modelo del CEV modelado en el nodo 38.....	93
Figura C.5.- Diagrama a bloque del modelo básico 2 del CEV utiliza una retroalimentación y un regulador de voltaje proporcional e integral utilizando el programa de SIMULINK.....	94
Figura C.6.- Comparación del modelo básico 2 del CEV considerando diferentes parámetros. ....	95



## LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 2.1: Caso base obtenido del sistema de prueba Stagg (valores en p.u.).....	17
Tabla 2.2.- Resultados del CEV como nodo PV (caso 1). .....	18
Tabla 2.3.- Resultados del CEV como nodo PQ (caso 1). .....	18
Tabla 2.4.- Resultados del CEV como nodo PV con limitadores (caso 2). .....	19
Tabla 2.5.- Resultados del CEV como nodo PQ (caso 2). .....	19
Tabla 2.6.- Caso base resuelto del sistema Nueva Inglaterra (variables p.u.).....	22
Tabla 2.7.-Resultados del sistema de Nueva Inglaterra con un CEV (modelo PV).Caso 1.....	23
Tabla 2.8.- Resultados del sistema de Nueva Inglaterra con un CEV (modelo PQ). Caso 1.....	24
Tabla 2.9.-Resultados del sistema de Nueva Inglaterra con un CEV (modelo PV). Caso 2.....	25
Tabla 2.10.- Resultados del sistema de Nueva Inglaterra con un CEV (modelo PQ). Caso 2.....	26
Tabla 2.11.- Resultados del sistema de Nueva Inglaterra con dos CEV (modelo PV). Caso 1.....	28
Tabla 2.12.- Resultados del sistema de Nueva Inglaterra con dos CEV (modelo PQ). Caso 1.....	29
Tabla 2.13.- Resultados del sistema de Nueva Inglaterra con dos CEV (modelo PV).Caso 2.....	31
Tabla 2.14.- Resultados del sistema de Nueva Inglaterra con dos CEV (modelo PQ). Caso 2.....	32
Tabla 3.1.- Tiempos críticos de liberación de los nodos mas críticos sin el CEV.....	53
Tabla 3.2.- Tiempos críticos de liberación de los nodos mas críticos con un CEV.....	56
Tabla 3.3.- Comparación de tiempos críticos de liberación de la contingencia crítica. ....	61





## GLOSARIO

### Variables del CEV en estado estacionario

$Q_i$	Potencia reactiva del nodo.
$Q_{Gi}$	Potencia reactiva del generador.
$Q_{Di}$	Potencia reactiva de la carga.
$Q_{Ti}$	Potencia Reactiva de transmisión.
$V$	Voltaje en los nodos determinados por el estudio de flujos.
$V_{ref}$	Voltaje de referencia.
$Xsl$	Pendiente de la característica de operación.
$Q_{CEVi}$	Potencia reactiva del CEV.
$\frac{\partial Q}{\partial V}$	Derivada parcial de la potencia reactiva con respecto al voltaje.
$V_{max}$	Voltaje máximo del CEV.
$Q_{max}$	Potencia reactiva máxima del CEV.
$B_{max}$	Susceptancia máxima del CEV (limites de la característica de operación).
$V_{min}$	Voltaje mínimo del CEV.
$Q_{min}$	Potencia reactiva mínima del CEV.
$B_{min}$	Susceptancia mínima del CEV (limites de la característica de operación)..
$Q_{cevlim}$	Limites de operación del CEV.
$\tilde{I}(\tilde{x}, \tilde{y})$	Vector de inyección de corriente.
$Y_{BUS}$	Matriz de admitancia.
$\tilde{V}$	Vector de voltajes nodales del sistema.

### Parámetros de la maquina

$Y_0$	Admitancia equivalente de Norton del Generador.
$r_a$	Resistencia de la armadura.
$x'_d$	Reactancia transitoria en el eje directo.
$I_{total}$	Corriente total.
$E'$	Voltaje detrás de la reactancia transitoria.
$I_{iny}$	Corriente de inyección.

### Parámetros de la carga

$P_c$	Potencia activa constante.
-------	----------------------------

$Q_c$	Potencia reactiva constante.
$P_0, Q_0$	Potencias Iniciales Activas y Reactivas de la Carga.
$V_0$	Voltajes iniciales.
$K_{PC}, K_{PI}, K_{PZ}, K_{QC}, K_{QI}, K_{QZ}$	Coeficientes del modelo polinomial de carga y del modelo estático de carga empleado en el programa que define el por ciento de la carga que tiene una característica de potencia constante (C), corriente constante (I) e impedancia constante (Z).
$p_{vl}$	Sensitividad de la carga con respecto a los cambios de voltaje (modelo exponencial)
$I_{carga}$	Inyección de la corriente del modelo equivalente de Norton.
$Y_Z$	Admitancia equivalente de Norton de la parte de carga que tiene característica de impedancia constante.
$Y_C$	Admitancia equivalente de Norton de la carga que no tiene una característica de impedancia constante.
$\Delta I_C$	Inyección de corriente de ajuste del modelo equivalente de Norton.
$S_{carga}$	Potencia compleja de la carga.
$P_{carga}$	Potencia activa de la carga.
$Q_{carga}$	Potencia reactiva de la carga.
$x$	Vector de variables de estado.
$v$	Vector de voltajes nodales.
$u$	Vector de entrada de los modelos dinámicos.

#### Parámetros del paso de integración.

$t_{n+1}$	Tiempo nuevo.
$t_n$	Tiempo anterior.

#### Parámetros de la inyección del CEV.

$I_{cev}$	Corriente del CEV.
$\Delta I_{cev}$	Incrementos de inyección de corriente.
$Y_{cev}$	Admitancia del CEV representa un capacitor o una admitancia.

# CAPÍTULO: 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 INTRODUCCIÓN

Las transferencias de potencia entre áreas de control actualmente se encuentran limitadas en la mayoría de los sistemas eléctricos de potencia alrededor del mundo. Esta característica de operación de los sistemas actuales se han visto agravada por la reestructuración de las industrias en varios países que ha permitido establecer los mercados mayoristas de la energía eléctrica, que además han aumentado el número de transacciones y la cantidad de potencia que se debe enviar entre las diferentes áreas del sistema.

Se han diseñado muchas soluciones para controlar los flujos en las ramas de la red eléctrica y tratar de utilizar el sistema a su mayor capacidad. Unas de las alternativas más importantes es el desarrollo de los dispositivos que emplean la electrónica de potencia para controlar las variables del sistema a nivel de la red, conocidos como Sistemas flexibles de transmisión en corriente alterna o FACTS (*Sistemas Flexibles de Transmisión en Corriente Alterna*). Estos dispositivos han comenzado a ser desarrollados desde la década de los 70 y actualmente, se han empleado nuevos elementos de electrónica de potencia para crear un gran número de equipos que son capaces de controlar los flujos de potencia y los voltajes de la red en estado estacionario y mejoran el comportamiento dinámico del sistema eléctrico de potencia al permitir amortiguar las oscilaciones o aumentar el límite de estabilidad transitoria, es por esta razón que se considera de interés conocer, desarrollar e implementar los modelos matemáticos del *compensador estático de vars* y anexarlos a dos programas desarrollados en FORTRAN [Ruiz y Olguín, 1997, Ruiz 1996], en estado estacionario y dinámico para estudios de flujos de potencia y de estabilidad transitoria, ya que es uno de los dispositivos mas utilizados en el Sistema Interconectado Nacional de México (alrededor de 15) y a nivel mundial.

## **1.2 OBJETIVO**

El objetivo principal de esta tesis es desarrollar modelos del Compensador Estático de Vars en estado estacionario y dinámico para estudios de flujos de potencia y de estabilidad transitoria, y analizar sus ventajas y desventajas.

## **1.3 JUSTIFICACIÓN**

La importancia de los sistemas flexibles aumenta cada día en la operación de los sistemas eléctricos de potencia, al grado que muchos sistemas no podrían ser operados a su capacidad actual sin la instalación de ellos.

Por esta razón es de interés conocer los conceptos básicos y avanzados del compensador estático de vars para comprender el funcionamiento de una forma adecuada y desarrollar sus modelos de una manera más eficiente.

## **1.4 ANTECEDENTES**

Los primeros sistemas flexibles de transmisión en corriente alterna que se desarrollaron fueron los compensadores estáticos de vars, que utilizan tiristores para anexar componentes como el capacitor o el inductor controlado por tiristores. Los modelos de estos elementos comenzaron a desarrollarse en la década de 1970 y un resumen de ellos se presentó en el reporte CIGRE de la referencia [CIGRE, 1986].

### **1.4.1 Trabajos desarrollados mas relevantes del Análisis de los (Compensadores Estáticos de Vars) CEV.**

Los siguientes trabajos que se describen a continuación son los mas relevantes los cuales brindaron un gran apoyo para la realización del contenido de esta tesis ya que en la actualidad existe una diversidad basta de información muy relevante del modelado del Compensador Estático de Vars (CEV) en estado estacionario y dinámico para estudios de estabilidad transitoria.

Principalmente para el desarrollo de este trabajo se revisó el libro titulado Reactive Power Control in Electric Systems [Miller, 1982] el cual es un gran apoyo para comprender el principio de operación de la compensación de potencia reactiva. Este libro hace una referencia del CEV desde su origen dando a conocer el principio de operación donde primero se utilizaba un reactor saturado y posteriormente se dieron a conocer los CEVs con dispositivos mecánicos que eran muy lentos en cuanto a su respuesta ante una contingencia, en la actualidad se tiene el desarrollo del los

CEVs de una forma mas sofisticada utilizando los dispositivos que emplean la electrónica de potencia, los cuales presenta su operación de una forma sencilla y el principio de su funcionamiento así como la interconexión del CEV con el sistema eléctrico de potencia.

En [CIGRE, 1986] se hace un descripción general de sus partes que componen al CEV, así como el comportamiento que presentan al ser modelados en un sistema de prueba. Para el caso del análisis del CEV en estado estacionario se presenta la característica de operación del CEV utilizando los 2 modelos del CEV representados como nodo PV de generación y como nodo PQ de carga en el cual se hace referencia que el modelo mas adecuado para el análisis en estado estacionario es el modelo del CEV como nodo PQ (carga), ya que este modelo se ubica dentro de la característica de operación, aún estresando al sistema de prueba, ubicándose en la zona de bajo voltaje o en la zona de alto voltaje de la característica de operación. Algunas de las ventajas que presenta esta implementación en particular del modelo PQ del CEV, que es el modelo que opera de manera adecuada en todas sus zonas de operación, su modelado es de forma mas sencilla comparado con el modelo representa al CEV como nodo PV (generación), donde el orden del Jacobiano no es alterado al incluir CEV (uno o más), no se altera tampoco el número de nodos del sistema y el número de iteraciones requeridas para que el método de Newton Raphson converja no aumenta de manera importante.

En [Messina 1990] se identifica los nodos más críticos del sistema de prueba y se analiza el comportamiento con y sin CEV. Los parámetros del CEV fueron determinados por el análisis modal [Messina 1990], se presenta un segundo donde se modelan 3 CEV's básicos en los nodos mas críticos utilizando los mismos parámetros correspondientes de su respectiva sintonización, para este caso se observa la coordinación que presenta la operación de los 3 modelos del CEV cuando se aplica una falla trifásica en uno de los nodos críticos del sistema.

Posteriormente aparece [IEEE 1994] en el cual se presenta el análisis del CEV en estado estacionario de una forma mas concreta y hace referencia al modelo del CEV como nodo PQ (carga) ya que opera de una forma mas adecuada en comparación con el modelo del CEV representado como nodo PV de generación como se menciona en el reporte del CIGRE [CIGRE, 1986].

En [IEEE 1994] el IEEE recomienda 2 modelos básicos para el estudio dinámico de estabilidad transitoria, el primer modelo básico 1 consta de un transductor, un compensador, un regulador de voltaje proporcional y un bloque de adaptación, y el modelo básico 2 consta de un transductor, un ajuste de la pendiente por medio de una retro alimentación con un regulador de voltaje proporcional e integral y un bloque de adaptación el articulo [IEEE 1994], se analizan 2 casos para la estabilidad transitoria utilizando los modelos recomendados los modelos básicos 1 y 2 son

sintonizados considerando la impedancia en corto circuito ( $Z_{th}$ ), como la interfase del CEV con el SEP, ajustando el sobretiro bajo los criterios los modelos dinámicos describe los parámetros de sintonización de los modelos.

En [Ambrizet al., 2000] se analiza un modelo del CEV basado en una susceptancia variable en derivación que se ajusta en el proceso iterativo para alcanzar la magnitud del voltaje deseado, la inclinación de la pendiente es determinada por los límites de la susceptancia. La particularidad de este modelo es que tiene como variable ángulo de disparo de los tiristores.

#### **1.4.2 Trabajos desarrollados en México utilizando el análisis de los (Compensadores Estáticos de Vars) CEV.**

En México se han desarrollado una gran variedad de tesis de FACTS enfocadas al modelado de los CEVs analizando la estabilidad de voltaje utilizando diferentes modelos y técnicas.

- En [Messina, 1987] presenta la operación de la característica de operación de los distintos tipos de CEVs y su interacción con el sistema eléctrico de potencia, incorporando un modelo del CEVs generalizado que permite el análisis adecuado de las características de interacción del sistema CEV - SEP en sus diferentes estados de operación, estableciendo las características esenciales del control V-Q mediante el modelado del CEV en la red de transmisión; analizando el comportamiento del CEV ante grandes disturbios y su efectividad como elemento dinámico del control de voltaje. Se analiza desde el punto de vista de estabilidad, derivándose un modelo generalizado del CEV para estudios dinámicos, el modelado dinámico del CEV se integra a un programa de estabilidad transitoria del tipo multimaquinas permitiendo la posibilidad de analizar la compensación múltiple en paralelo, el análisis de control dinámico de voltaje se efectúa para el sistema de prueba Nueva Inglaterra el cual es un sistema eléctrico de potencia con características radiales y que presenta necesidades de compensación dinámica.
- En la referencia [Messina, 1993] se presentan los principios básicos de operación del CEV utilizados para el control de voltaje en las redes de transmisión analizando dos esquemas: el reactor controlado por tiristores y capacitores y reactores conmutados por tiristores estos dos esquemas tiene efecto sobre el comportamiento dinámico de un sistema eléctrico de potencia.

- En [López, 1999] se analiza el control de flujo de potencia y el control de voltaje de un sistema de transmisión, aplicando algunos de los sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna (*FACTS*), implementando los modelos de estos controles en un programa desarrollado en FORTRAN para el análisis en estado estacionario que utiliza el método de Newton - Raphson en forma polar [Ruiz y Olguín, 1997]. Se utilizan como sistemas de prueba el sistema del Stagg, considerando los grandes avances de la electrónica de potencia que permiten controlar las variables que definen el flujo de potencia y el control de voltaje de una forma rápida y eficiente proporcionando una mayor flexibilidad al sistema de transmisión. Se modela el control de la reactancia serie de la línea de transmisión mediante la compensación serie variable (CSV), y el ángulo de defasamiento por medio del transformador defasador (TD), para controlar el flujo de potencia activa del sistema. Además se controla el voltaje mediante la inyección y el direccionamiento de la potencia reactiva por medio del compensador estático de vars (CEV) y el transformador con ajuste automático en el cambiador de derivación (TCAD). El CSV se modela teniendo como acción el control la reactancia serie de la línea y el ángulo de disparo de los tiristores, el CEV se modela teniendo como acción de control la susceptancia variable en derivación y el ángulo de disparo los tiristores, la implementación de de estos elementos FACTS en estado estacionario, se realiza modificando la matriz jacobiana.

## 1.5 APORTACIONES

### Modelo de estado estacionario

- Se presentaron los conceptos básicos del modelo.
- Se incluyó el modelo del CEV en un programa desarrollado en FORTRAN [Ruiz y Olguín, 1997] para el análisis en estado estacionario de sistemas de potencia.
- Se comprobó por medio de simulaciones, que el modelo PQ, inicialmente propuesto en [CIGRE, 1986], es el más adecuado para representar al CEV en estudios de flujos de potencia, ya que evita que se incluyan más nodos, como lo requiere el modelo PV y no complica innecesariamente el modelo al requerir añadir renglones y columnas en la matriz jacobiana para calcular el ángulo de disparo, como lo proponen [Ambriz, et al., 2000, López, 1999].

## **Modelos dinámicos**

- Para el análisis del CEV en estado dinámico para el estudio de estabilidad transitoria, se presentan 2 modelos CEVs recomendados por la IEEE: el modelo básico 1 con un regulador de voltaje proporcional y el modelo básico 2 con un regulador proporcional e integral.
- Se presentan en el apéndice B los modelos completos de estado de los dos modelos dinámicos del CEV propuestos por el IEEE en [IEEE, 1994], con condiciones iniciales.
- Se presentaron y aplicaron los conceptos básicos de sintonización del control de los dos modelos dinámicos del CEV indicados en [IEEE, 1994], y los modelos de estado requeridos para cada uno de ellos en MATLAB® en el apéndice C.
- Los 2 modelos del CEV se incluyeron en un programa realizado en FORTRAN [Ruiz, 1996], para realizar estudios de estabilidad transitoria de tipo multimaquinas, permitiendo la posibilidad de anexar compensación múltiple en paralelo.

## **1.6 LIMITACIONES Y ALCANCES**

- Los modelos utilizados en este trabajo son de aplicación general. En particular, el modelo en estado estacionario del CEV puede ser empleado en estudios de estabilidad de voltaje de sistemas eléctricos de potencia que utilicen un modelo similar al de flujos de potencia. En particular, ya que se utilizan (incorrectamente) programas de flujos de potencia) convencionales para trazar las curvas PV, VQ, etc, se deben mejorar (de ser posible) los modelos de los CEVs al modelo PQ utilizado en la presente tesis.
- Los modelos dinámicos son modelos de aplicación general para representar una gran variedad de CEVs, para ser aplicados en estudios de estabilidad multimáquinas en los que se evalúa el comportamiento dinámico general del sistema. En caso de analizar la operación específica del CEV, se deben de utilizar modelos de usuario desarrollados por los fabricantes.
- Los programas de flujos de potencia y de estabilidad transitoria no cuentan con subrutinas para procesar sistemas dispersos, y su uso eficiente está limitado a sistemas con menos de 300 nodos.



## 1.7 ESTRUCTURA DE LA TESIS

El presente trabajo de tesis que se presenta consta de 5 capítulos los cuales se resumen a continuación.

**Capítulo 1.- *Introducción*** en este capítulo hace una descripción general de los aspectos mas importantes que generalizan a este trabajo así como también se da a conocer el objetivo, la justificación y los antecedentes del compensador estático de vars.

**Capítulo 2.- *Modelado del Compensador Estático de Vars para Estudios de Flujos de Potencia***. En este capítulo se presentan el modelo convencional como nodo PV, y el modelo como nodo PQ, y su utilización en el análisis en estado estacionario.

**Capítulo 3.- *Modelado del Compensador Estático de Vars para Estudios de Estabilidad Transitoria***. En este capítulo se describen los modelos dinámicos básicos del IEEE y se incluyen en un programa de estabilidad transitoria.

**Capítulo 4.- *Conclusiones*** en este capítulo se presentan las conclusiones generales del trabajo.

**Apéndice A.** Datos y diagramas unifilares de los sistemas eléctricos de potencia de prueba.

**Apéndice B.** Modelos Básicos del CEV Recomendados por el IEEE y sus Modelos de Estado.

**Apéndice C.** Sintonización de los modelos básicos 1 y 2 del IEEE Recomendados por el IEEE.

**Apéndice D.** Subrutinas para modelar al CEV en estudios de flujos y estabilidad angular transitoria.



## CAPÍTULO 2:

# MODELADO DEL COMPENSADOR ESTÁTICO DE VARS PARA ESTUDIOS DE FLUJOS DE POTENCIA

### 2.1 INTRODUCCIÓN

Un sistema eléctrico de potencia tiene como propósito principal de satisfacer continuamente la demanda de potencia eléctrica de la carga requerida por los consumidores. Existen varias restricciones que deben de cumplirse al proporcionar el servicio, como son mantener los niveles de voltaje y de frecuencia dentro de una cierta tolerancia, y no operar las líneas de transmisión por encima de sus límites térmicos y de estabilidad, con el menor costo posible.

El estudio de flujos de potencia es el estudio básico de análisis de operación en estado estacionario y de seguridad estática de los sistemas eléctricos de potencia. El objetivo del estudio de flujos de potencia es determinar los voltajes de los nodos, los flujos de potencia activa y reactiva en los elementos de la red de transmisión y la potencia reactiva de los generadores para una configuración de la red, la demanda, la generación, y los parámetros de la compensación en paralelo. El estudio de flujos de carga estándar asume que las condiciones en estado estacionario de la red son balanceadas [CIGRE, 1986].

En la planeación de sistemas de potencia el estudio de flujos de potencia es útil, por ejemplo, para evaluar los requisitos de compensación de potencia reactiva necesarios para resolver problemas de calidad de la energía o de estabilidad de voltaje, considerando diversas alternativas de compensación como son la aplicación de capacitores y reactores conectados en serie o en paralelo, condensadores síncronos y compensadores estáticos de vars (CEVs).

Con el objeto de realizar de manera más exacta la evaluación del comportamiento del sistema en estudios de estabilidad de voltaje, es necesario mejorar la representación del CEV en el estudio de flujos de potencia, ya que la mayoría de los programas comerciales de simulación de flujos de potencia no cuentan

con modelos adecuados de este dispositivo, sobre todo cuando opera en sus límites de producción de potencia reactiva.

En general, los modelos en estado estacionario de los diferentes componentes del sistema se deben desarrollar a partir de las condiciones de equilibrio de los modelos dinámicos. Sin embargo el CEV cuenta con una característica de operación en estado estacionario que ha sido tradicionalmente modelada de manera parcial, con una representación que es válida solamente para condiciones en las que puede controlar su voltaje en terminales [CIGRE, 1986, IEEE, 1994].

El análisis de flujos de potencia puede ser descrito por un conjunto de ecuaciones no lineales que resultan del balance de la potencia reactiva y activa de cada nodo del sistema. En este capítulo se describe el modelo convencional del CEV representado como un nodo PV con una potencia activa igual a cero, y un modelo mejorado basado en una inyección de potencia reactiva variable con el voltaje en terminales en un nodo PQ. Este último modelo, propuesto en [CIGRE, 1986], representa correctamente al CEV en todas sus condiciones de operación en estado estacionario, incluso en los casos en las que funciona en sus límites de operación y es escrito en un programa de flujos de potencia escrito en FORTRAN desarrollado en [Ruiz y Olguín, 1997].

Se analiza por lo tanto el desempeño del modelo del CEV como nodo PQ y se compara con el modelo tradicional como nodo PV, validando los resultados por medio de simulaciones de flujos de potencia en el sistema de prueba de Stagg [Stagg and El-Abiad, 1968] y de Nueva Inglaterra [Pai, 1999], con los datos que presentan en el Apéndice A.

## **2.2 OPERACIÓN DEL CEV EN ESTADO ESTACIONARIO**

Para incluir el modelo de un compensador estático de vars en el estudio de flujos de potencia, principalmente se deben identificar los estados de operación del CEV. La operación en estado estacionario del compensador estático de vars puede ser definida en forma total mediante su característica de operación, que se presenta en la figura 3.1.

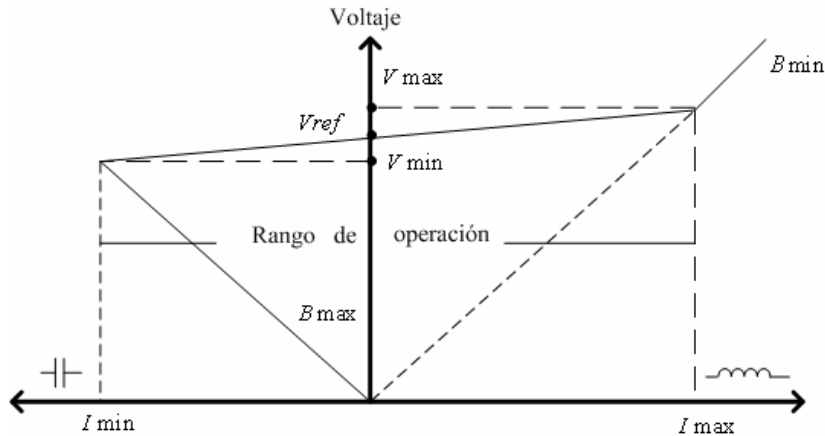


Figura 2.1. Característica de operación del CEV (Adaptado de [CIGRE, 1986]).

La característica de estado estacionario del CEV consta principalmente de 3 regiones o rangos de operación [CIGRE, 1986].

- La primera región es la que describe el rango de valores en los que el CEV puede regular el voltaje, limitada por los puntos  $(I_{min}, V_{min})$  e  $(I_{max}, V_{max})$ . En esta región de operación el CEV regula el voltaje en sus terminales con un control proporcional que tiene un error en estado estacionario modelado por la pendiente de la recta entre los puntos antes mencionados.
- Las otras dos regiones corresponden a las condiciones de operación en las que el CEV rebasa sus límites y se comporta como un capacitor ó un inductor constantes. Para la región de bajo voltaje, limitada por los puntos  $(0, 0)$  e  $(I_{min}, V_{min})$  el CEV puede considerarse como un capacitor constante. Para la región de operación con corrientes y voltaje mayores al punto  $(I_{max}, V_{max})$ , el CEV se comporta como un inductor.

El análisis en estado estacionario del CEV una vez que se conecta al sistema de potencia utiliza las características del CEV y el SEP simultáneamente, como se observa en la figura 2.2. La pendiente de la característica del SEP es el negativo del inverso de la potencia de corto circuito del nodo terminal del CEV. Los cambios realizados por la operación del SEP y los parámetros ajustables del CEV se pueden analizar sobre la combinación de ambas característica determinando el punto de operación [Miller, 1982, Kundur, 1994].

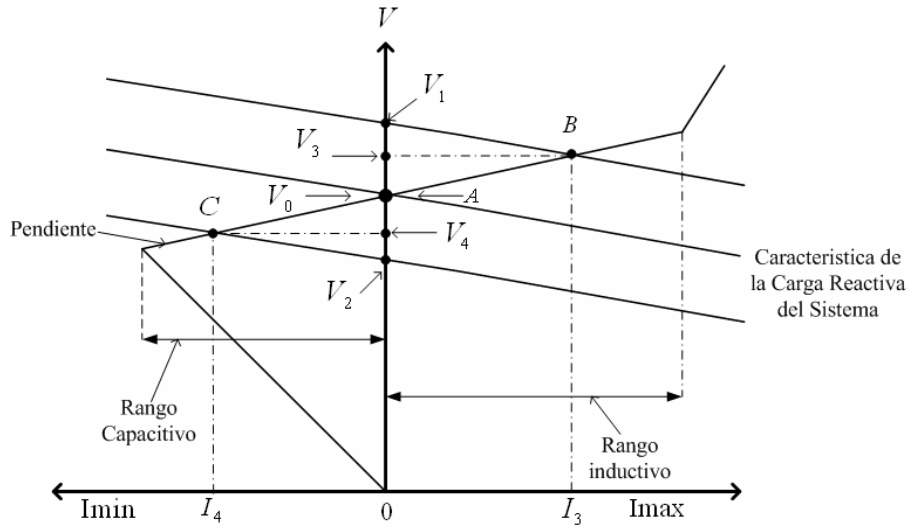


Figura 2.2. Interacción entre el CEV y el sistema de potencia (Adaptado de [Kundur, 1994]).

En la figura 2.2 se presentan 3 características de operación del SEP por variaciones de carga en combinación con la característica de operación del CEV. La característica del punto intermedio representa la condición nominal del sistema que es el punto intersección característico (A), donde  $V=V_0$  e  $I=0$ . Si el voltaje del sistema se incrementa por una disminución en la carga,  $V$  se incrementa a  $V_1$  si no existiera el CEV; si el CEV existe, el punto de operación se mueve a  $B$  por una absorción de corriente inductiva, para mantenerse en el punto  $V_3$ . Similarmente, si el voltaje decae debido a un aumento en el nivel de carga, el CEV mantiene el voltaje en  $V_4$ , en lugar de  $V_2$  si no existe el CEV y el punto de operación del sistema de potencia es dado por la intersección de ambas características de operación CEV y SEP.

### 2.3 MODELO CONVENCIONAL DEL CEV COMO NODO PV

El modelo convencional del CEV para estudios de flujos de potencia está compuesto por un nodo auxiliar (ficticio) tipo PV que está conectado al nodo terminal tipo PQ por medio de una impedancia, que se emplea para modelar la pendiente de la característica del CEV dentro de sus límites de operación, como se presenta en la figura 2.3 [CIGRE 1986, IEEE, 1994].

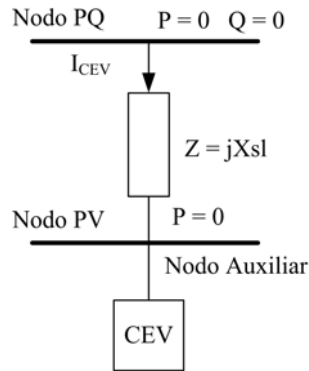


Figura 2.3. Modelo del CEV como nodo convencional PV con pendiente para la operación de rango de control (Adaptado de [CIGRE, 1986, IEEE, 1994]).

El valor de esta impedancia  $X_{sl}$  es ajustado al de la pendiente en p.u de la característica del CEV (por ejemplo, para un CEV con una pendiente de 5%,  $X_{sl} = 0.05$  p.u) [Stevenson 1965, Nan Yu 1983].

El nodo ficticio PV tiene una potencia de generación  $P_G = 0$  y una magnitud de voltaje  $V = V_{ref}$ .

Este modelo del compensador estático de vars es adecuado para la región en la que el CEV regula su voltaje en terminales (limitada por los puntos  $(I_{min}, V_{min})$  e  $(I_{max}, V_{max})$  de la Fig. 2.1). Sin embargo, se ha probado que no representan correctamente al CEV cuando sale de sus límites, como se muestra en la figura 2.4, en la que se puede observar claramente que en las dos regiones en las que el CEV está fuera de sus límites el modelo PV del CEV se sale de la característica de operación que modela al CEV.

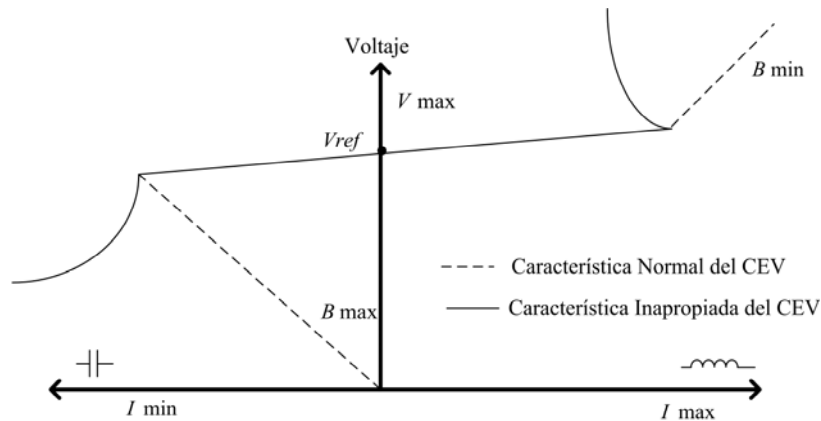


Figura 2.4. Comparación de los 2 CEV como nodo PV y PQ para estudios de flujos de potencia (Adaptado de [CIGRE, 1986]).

Para voltaje en terminales menor que  $V_{min}$  ó mayor que  $V_{max}$  (Fig. 2.1) el CEV se comporta como una susceptancia  $B$  donde (utilizando la convención de carga):

- Si  $V > V_{max}$ ,  $\Rightarrow Q > 0$  y  $B < 0$ : el CEV tiende a comportarse como un inductor.
- Si  $V < V_{min}$ ,  $\Rightarrow Q < 0$  y  $B > 0$  y el CEV tiende a comportarse como un capacitor.

Un modelo del CEV debe representar también de manera correcta estas condiciones de operación. El modelo presentado en la siguiente sección tiene estas características.

## 2.4 MODELO DEL CEV COMO NODO PQ

El modelo del CEV como nodo PQ en este trabajo representa a este equipo como una susceptancia variable en función del voltaje en terminales que cambia su demanda o producción de la potencia reactiva de tal manera de reproducir fielmente su característica de operación en estado estacionario, como se muestra en la figura 3.5.

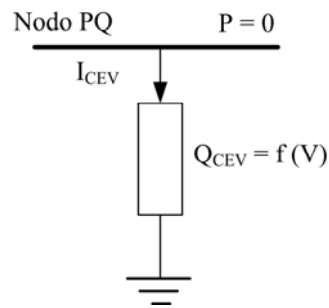


Figura 2.5. Modelo del CEV como nodo PQ (Adaptado de [CIGRE 1986]).

El modelo del CEV se expresa en términos de su potencia reactiva producida, para ser compatible con el programa convencional de flujos de potencia, en el cual las ecuaciones principales del problema analizan los desbalances de las potencias activa y reactiva en cada nodo. De acuerdo a la región de la característica en estado estacionario en la que está operando el CEV, se definen 3 diferentes potencias reactivas producidas por el equipo:

- En la región en la que regula el voltaje el CEV:

$$Q_{CEV} = \frac{(V - V_{ref})V}{X_{sl}} \quad (2.1)$$

- Si  $I_{CEV} < I_{min}$  (región capacitiva fuera de límites):

$$Q_{CEV} = -B_{max} V^2 \quad (2.2)$$

- Si  $I_{CEV} > I_{max}$  (región inductiva fuera de límites):



$$Q_{CEV} = -B_{\min} V^2 \quad (2.3)$$

donde

$$B_{\min} = -\frac{Q_{\max}}{V_{\max}^2} \quad (2.4)$$

$$B_{\max} = -\frac{Q_{\min}}{V_{\min}^2} \quad (2.5)$$

De manera adecuada, el CEV es modelado como una susceptancia constante fuera de sus límites de regulación. El modelo además utiliza la convención de carga, en la que la potencia reactiva absorbida es positiva en la región inductiva.

#### 2.4.1 Representación del modelo PQ en el estudio de flujos de potencia

Para incluir en un estudio de flujos de potencia de Newton-Raphson completo en forma polar el modelo propuesto del CEV, se tiene que incluir la potencia reactiva producida por este equipo en la ecuación de desbalance de la potencia reactiva del nodo en el que está conectado, de la siguiente forma:

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} - Q_{Ti} - Q_{CEV} = 0 \quad (2.6)$$

Donde  $Q_{CEV}$  se representa siempre inicialmente por la ecuación (2.1). Una vez que el sistema de ecuaciones converge, se verifica que el CEV se encuentre dentro de sus límites de operación. Pueden ocurrir dos casos:

- El CEV está dentro de sus límites y el estudio termina.
- El CEV está fuera de sus límites de operación. En este caso, se cambia la representación de  $Q_{CEV}$  por la ecuación (2.2) ó la ecuación (2.3) según corresponda, se calculan nuevamente los desbalances de potencia en los diferentes nodos del sistema y se vuelve a solucionar el sistema de ecuaciones para encontrar la solución final en la que el CEV está restringido a sus límites de operación.

En el programa de flujos de potencia en el que se incluyó el modelo del CEV [Ruiz y Olguín, 1997], el algoritmo de solución se organizó para incluir este equipo de una manera sencilla en la que no se aumenta el orden de la matriz Jacobiana ni se crean nuevas variables en el método de Newton-Raphson: la matriz Jacobiana del sistema se construye considerando solamente los términos correspondientes a las potencias activa y reactiva de transmisión de las ecuaciones de desbalance de todos los nodos (menos el nodo compensador), obteniendo la matriz jacobiana convencional mostrada en la ecuación (2.7).

$$\begin{pmatrix} \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_i \\ \vdots \\ \Delta P_j \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \vdots \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_i \\ \vdots \\ \Delta Q_j \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \left( \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} \right) & \dots & \left( \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} \right) & \left| \right. & \left( \frac{\partial P_2}{\partial V_{ng+1}} \right) & \dots & \left( \frac{\partial P_2}{\partial V_n} \right) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \left( \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} \right) & \dots & \left( \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} \right) & \left| \right. & \left( \frac{\partial P_n}{\partial V_{ng+1}} \right) & \dots & \left( \frac{\partial P_n}{\partial V_n} \right) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \left( \frac{\partial Q_{ng+1}}{\partial \delta_2} \right) & \dots & \left( \frac{\partial Q_{ng+1}}{\partial \delta_n} \right) & \left| \right. & \left( \frac{\partial Q_{ng+1}}{\partial V_{ng+1}} \right) & \dots & \left( \frac{\partial Q_{ng+1}}{\partial V_n} \right) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \left( \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2} \right) & \dots & \left( \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} \right) & \left| \right. & \left( \frac{\partial Q_n}{\partial V_{ng+1}} \right) & \dots & \left( \frac{\partial Q_n}{\partial V_n} \right) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \delta_2 \\ \vdots \\ \Delta \delta_i \\ \vdots \\ \Delta \delta_j \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \\ \vdots \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_i \\ \vdots \\ \Delta V_j \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

Para incluir el CEV en la matriz Jacobiana del sistema simplemente se añade al elemento diagonal de la submatriz IV correspondiente al nodo terminal del CEV el término  $\frac{\partial Q_{CEV}}{\partial V}$ , el cual es diferente para cada región de operación:

- En la región en la que el CEV regula el voltaje:

$$\frac{\partial Q_{CEV}}{\partial V} = \frac{(2V - V_{ref})}{X_{sl}} \quad (2.8)$$

- Si  $ICEV < I_{min}$  (región capacitiva fuera de límites):

$$\frac{\partial Q_{CEV}}{\partial V} = -2B_{max} V \quad (2.9)$$

- Si  $ICEV > I_{max}$  (región inductiva fuera de límites):

$$\frac{\partial Q_{CEV}}{\partial V} = -2B_{min} V \quad (2.10)$$

Como se mostrará en la siguiente sección, incluir el nuevo modelo del CEV no hace que aumenten las iteraciones del método de Newton-Raphson de manera importante y obtiene buenos resultados en todas las regiones de operación.

## 2.5 RESULTADOS

### 2.5.1 Introducción

En esta sección se aplican y se comparan los modelos PV y PQ del CEV en dos sistemas de prueba:

- El sistema de 2 generadores y seis nodos (Fig. A.1 del Apéndice A) [Stagg and El-Abiad, 1968].
- El sistema de Nueva Inglaterra de 10 generadores y 39 nodos (Fig. A.2 del Apéndice A) [Malek et al 1990, Pai, 1999].

En cada uno de los sistemas se consideran dos casos principales de comparación de los modelos PV y PQ:

- Caso 1: cuando el CEV opera dentro de sus límites de potencia reactiva.
- Caso 2: cuando el CEV opera en sus límites de potencia reactiva.

El modelo PQ del CEV fue incluido en el programa de flujos de potencia, escrito en FORTRAN, de [Ruiz y Olguín, 1997]. Para obtener los resultados de los casos de operación del modelo PV fuera de sus límites (caso 2) se utilizó el programa POWERWORLD® Simulator versión 6.0a [POWERWORLD, 1999].

Los resultados de las simulaciones para ambos casos, considerando los dos sistemas de prueba, se muestran en las dos secciones siguientes.

### 2.5.2 Sistema de prueba de 2 generadores y 6 nodos de Stagg

En la Tabla 2.1 se presenta el caso base del análisis del estudio de flujos de potencia en el sistema Stagg, donde se determina que el nodo 5 presenta un bajo voltaje y por lo tanto se considera como el nodo propuesto al cual se anexará el CEV o modelado en sus dos formas como nodo PV y como nodo PQ.

**Tabla 2.1: Caso base obtenido del sistema de prueba Stagg (valores en p.u.).**

Nodo	Voltaje polar		Pg [pu]	Qg [pu]	P <sub>0</sub> [pu]	Q <sub>0</sub> [pu]
1	1.06000	0.0000	1.329519	0.837508	0	0
2	1.00000	-2.0610	0.400000	-1.456972	0.20	0.10
3	0.987253	-4.6364	0	0	0.45	0.15
4	0.984139	-4.9567	0	0	0.40	0.05
<b>5</b>	<b>0.971705</b>	<b>-5.7644</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0.60</b>	<b>0.10</b>

Los parámetros que presentan los modelos del CEV en sus dos formas (como nodo PV y como nodo PQ) se presentan en la Tabla A-3 del apéndice A, los cuales constan de un voltaje de referencia, una pendiente que determina los puntos de operación del CEV, limitadas por valores mínimos y máximos de potencia reactiva [ $Q_{min}$ ,  $Q_{max}$ ].

#### Caso 1 (operación del CEV dentro de sus límites)

Los resultados del estudio de flujos de potencia utilizando el modelo convencional PV del CEV, cuando opera dentro de sus límites (Caso 1), se presentan en la Tabla 2.2, en la cual se observa como el voltaje del nodo 5 se incrementa con los reactivos proporcionados por el CEV. Los resultados obtenidos con el modelo PQ se muestran en la Tabla 2.3 se incrementa el voltaje de la misma forma en el nodo seleccionado.

**Tabla 2.2.- Resultados del CEV como nodo PV (caso 1.).**

Nodo	Voltaje polar [pu]		Pg [pu]	Qg [pu]	PL [pu]	QL [pu]	Qcev [pu]
1	1.0600	0	1.315	0.871	0	0	0
2	1.0000	-2.072	0.400	-1.077	0.20	0.10	0
CEV	1.0200	-6.471	0	0.506	0	0	0
3	0.9956	-4.763	0	0	0.45	0.15	0
4	0.9948	-5.121	0	0	0.40	0.05	0
<b>5</b>	<b>1.0155</b>	<b>-6.471</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0.60</b>	<b>0.10</b>	<b>-0.5038</b>

**Tabla 2.3.- Resultados del CEV como nodo PQ (caso 1.).**

Nodo	Voltaje polar [pu]		Pg [pu]	Qg [pu]	PL [pu]	QL [pu]	Qcev [pu]
1	1.0600	0	1.315	0.871	0	0	0
2	1.0000	-2.072	0.400	-1.07	0.20	0.10	0
3	0.9956	-4.763	0	0	0.45	0.15	0
4	0.9948	-5.121	0	0	0.40	0.05	0
<b>5</b>	<b>1.0155</b>	<b>-6.471</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0.60</b>	<b>0.10</b>	<b>-0.5038</b>

Los 2 modelos proporcionan resultados similares debido a que estos modelos se analizan cuando el sistema se halla intacto (sin la eliminación de enlaces) y el CEV opera dentro de sus límites de producción de potencia reactiva.

Para este primer caso se obtiene el punto de operación del CEV en el estudio de flujos de potencia determinando un voltaje con una correspondiente potencia reactiva que se ubican dentro de los límites de la característica de operación que se ubica dentro de los límites de la característica de operación en estado estacionario como muestra en la figura 2.6.

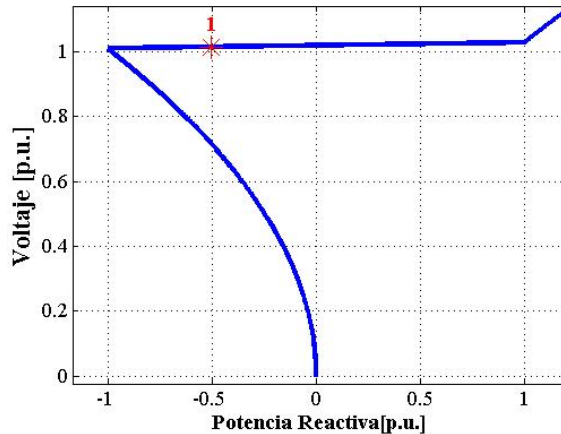


Figura 2.6.- Análisis de 1cev dentro de los límites de la Característica de operación.

### Caso 2 (operación del CEV fuera de sus límites)

Para el segundo caso se utilizan los mismos parámetros del CEV (Tabla A.3 del apéndice A) y el estado de operación del sistema se halla debilitado al desconectar 3 líneas de enlace (entre los nodos 1-3, 2-3 y 2-4) que se hallan coloreadas en rojo en la figura A.1 del Apéndice A. Esta condición hace que el CEV opere fuera de sus límites de potencia reactiva.

Los resultados del modelo convencional PV del CEV se presentan en la Tabla 2.4. Estos resultados se obtuvieron con la ayuda del programa *power world Simulator®* representando los CEVs con el modelo convencional PV con limitadores. Observando en la Tabla 2.4 específicamente el nodo 5, que se encuentra coloreado en amarillo, al comparar sus resultados con los obtenidos por el modelo PQ, que se presentan en la Tabla 2.5, se encuentra que no son similares.

Tabla 2.4.- Resultados del CEV como nodo PV con limitadores (caso 2).

Nodo	Voltaje polar [pu]		Pg [pu]	Qg [pu]	PL [pu]	QL [pu]	Qcev [pu]
1	1.0600	0	1.506	0.572	0	0	0
2	1.0000	-4.233	0.400	-0.54	0.20	0.10	0
CEV	0.9801	-16.38	0	1.000	0	0.10	0
3	0.7906	-31.62	0	0	0.45	0.15	0
4	0.8019	-30.53	0	0	0.40	0.05	0
5	0.9709	-16.38	0	0	0.60	0.10	-0.9906

Tabla 2.5.- Resultados del CEV como nodo PQ (caso 2).

Nodo	Voltaje polar [pu]		Pg [pu]	Qg [pu]	PL [pu]	QL [pu]	Qcev [pu]
1	1.0600	0	1.330	0.5709	0	0	0
2	1.0000	-4.254	0.400	-0.422	0.20	0.10	0
3	0.7691	-32.25	0	0	0.45	0.15	0
4	0.7807	-31.10	0	0	0.40	0.05	0
5	0.9563	-16.34	0	0	0.60	0.10	-0.8948

Para este segundo caso se determinó que los resultados obtenidos se ubican fuera de los límites de operación, como se presenta en la figura 2.7, donde se comparan los resultados de los modelos PV (punto 3') y PQ (punto 3).

En la figura 2.7 se compara la condición de operación del CEV obtenida para el caso 1 (punto 1) con las condiciones que se obtienen al desconectar tres líneas (entre los nodos 1-3, 2-3 y 2-4). El sistema converge en 2 iteraciones para el punto (1), mientras que en el caso 2 ambos modelos (PV y PQ) inicialmente alcanzan el punto 2 sin considerar límites, y al aplicar sus respectivos limitadores de potencia reactiva, el modelo PV llega al punto 3' mientras que el modelo PQ llega al punto 3.

Se puede observar en la figura 2.7 por lo tanto que el modelo del CEV como nodo PV es inadecuado cuando opera fuera de sus límites, ya que el punto final encontrado por medio de este modelo (punto 3') cae fuera de la característica de estado estacionario del CEV. En comparación, el punto final de operación (punto 3) que se obtiene con el modelo PQ del CEV permanece dentro de la característica.

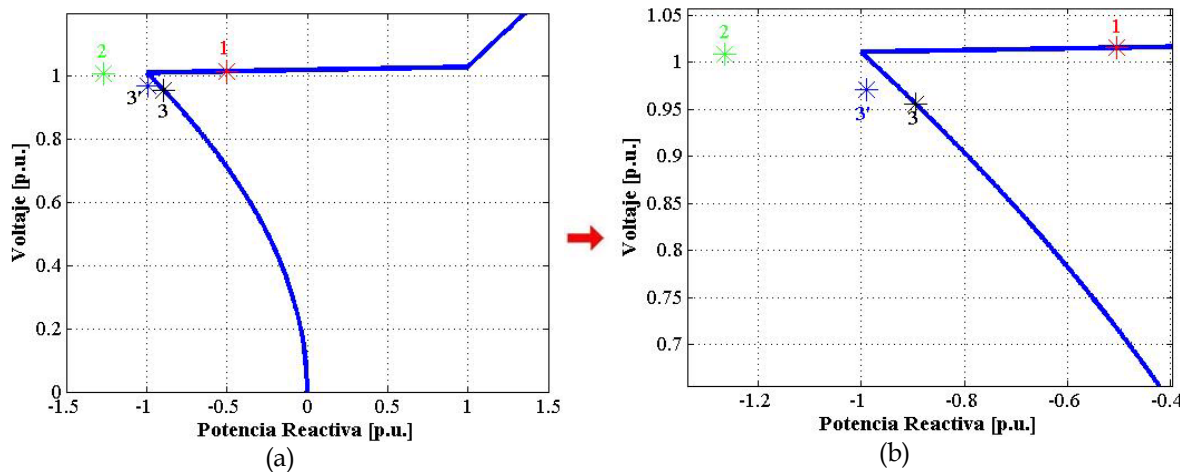


Figura 2.7.-Sistema del stagg: (a) Comparación de los 2 modelos del CEV como nodo PV y PQ analizados en el nodo 5 con limitadores operando fuera de los límites de la característica de operación. (b) Acercamiento del análisis de los 2 modelos del CEV como nodo PV y PQ en el nodo 5 con limitadores operando fuera de los límites de la característica de operación.

### 2.5.3 Sistema de prueba de Nueva Inglaterra

El segundo análisis se realiza utilizando del SEP del *Nueva Inglaterra* [Malek et al 1990] que se presenta en la figura A.2 del apéndice A. Los casos de operación 1 y 2 (operación dentro de los límites y fuera de los límites respectivamente) se estudian en dos configuraciones principales:

- Cuando se incluye un CEV en el sistema.
- Cuando se incluyen dos CEVs en el sistema.

#### Resultados del sistema de Nueva Inglaterra incluyendo un CEV

##### Caso 1 (operación del CEV dentro de sus límites)

En la Tabla 2.6 se presenta el caso base del sistema de Nueva Inglaterra [Malek et al 1990] donde se observa que los voltajes mas bajos se localizan en los nodos 17 y 18. Para este primer caso se incluye el CEV en el nodo 17, el nodo de menor voltaje determinado por el caso base del estudio de flujos de potencia, en sus dos formas, como nodo convencional PV y como nodo PQ.

Los resultados obtenidos utilizando el modelo convencional PV se presentan en la Tabla 2.7, mientras que los resultados utilizando el modelo PQ se muestran en la Tabla 2.8. En ambos casos se observa que el voltaje del nodo 17 se incrementa con la proporción de reactivos del CEV, que opera dentro de sus límites (Caso 1), como se presenta en la figura 2.8.

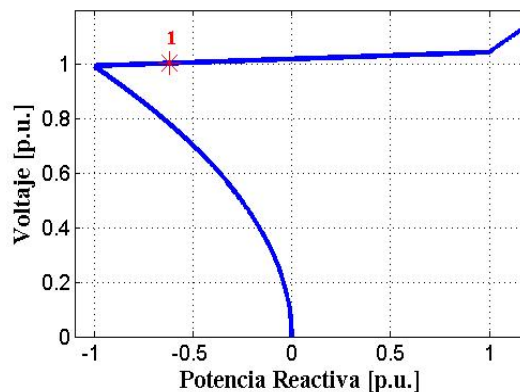


Figura 2.8.- Punto de operación final de 1 CEV modelado como nodo PV y PQ operando dentro de los límites de regulación de la característica de operación.

Los 2 modelos del CEV (como nodo PV y como nodo PQ) llegan a la misma condición de operación (punto 1), operando dentro de los límites de la característica de operación como se presenta en la figura 2.8.

**Tabla 2.6.- Caso base resuelto del sistema Nueva Inglaterra (variables p.u).**

<b>Nodo</b>	<b>Voltaje polar</b>		<b>Pg [pu]</b>	<b>Qg [pu]</b>	<b>PL [pu]</b>	<b>QL [pu]</b>	<b>Pshunt</b>	<b>Qshunt</b>
1	1.03000	0.0000	10.0048	0.94591	11.040	2.5000	0	0
2	1.04803	6.5350	2.5000	1.64736	0.0000	0.0000	0	0
3	0.98196	11.1280	5.7320	2.11623	0.0920	0.0460	0	0
4	0.98303	12.7421	6.5000	2.11257	0	0	0	0
5	0.99702	13.2044	6.3200	1.16800	0	0	0	0
6	1.01196	11.7619	5.0800	1.70105	0	0	0	0
7	1.04897	15.1904	6.5000	2.18288	0	0	0	0
8	1.06398	17.8780	5.6000	1.07256	0	0	0	0
9	1.02806	12.3561	5.4000	0.21324	0	0	0	0
10	1.02703	17.7524	8.3000	0.61830	0	0	0	0
11	1.04641	01.5381	0	0	0	0	0	0
12	1.04601	04.1102	0	0	0	0	0	0
13	1.02617	01.2499	0	0	3.2200	0.0240	0	0
14	1.00171	00.4494	0	0	5.0000	1.8400	0	0
15	1.00364	01.6403	0	0	0	0	0	0
16	1.00610	02.3440	0	0	0	0	0	0
<b>17</b>	<b>0.99545</b>	<b>00.1351</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2.3380</b>	<b>0.8400</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
18	0.99449	-00.372	0	0	5.2200	1.7600	0	0
19	1.02758	-00.193	0	0	0	0	0	0
20	1.01564	04.7345	0	0	0	0	0	0
21	1.01126	03.9191	0	0	0	0	0	0
22	0.99859	03.9038	0	0	0.0850	0.8800	0	0
23	1.0127	04.0191	0	0	0	0	0	0
24	1.00974	02.3465	0	0	0	0	0	0
25	1.01280	01.9320	0	0	3.2000	1.5300	0	0
26	1.02890	03.3465	0	0	3.2940	0.3230	0	0
27	1.02831	02.3515	0	0	0	0	0	0
28	1.02645	01.4991	0	0	1.5800	0.3000	0	0
29	1.04862	07.9827	0	0	0	0	0	0
30	0.99005	06.5668	0	0	6.8000	1.0300	0	0
31	1.02970	05.7620	0	0	2.7400	1.1500	0	0
32	1.04863	10.2216	0	0	0	0	0	0
33	1.04373	10.0223	0	0	2.4750	0.8460	0	0
34	1.03470	03.4661	0	0	3.0860	-0.922	0	0
35	1.05299	05.5504	0	0	2.2400	0.4720	0	0
36	1.03546	04.3299	0	0	1.3900	0.1700	0	0
37	1.02619	02.2340	0	0	2.8100	0.7550	0	0
38	1.04181	07.8892	0	0	2.0600	0.2760	0	0
39	1.04442	10.6724	0	0	2.8350	0.2690	0	0



**Tabla 2.7.-Resultados del sistema de Nueva Inglaterra con un CEV (modelo PV).Caso 1**

Nodo	Voltaje polar [pu]		Pg [pu]	Qg [pu]	PL [pu]	QL [pu]	Qcev [pu]
1	1.03000	0	10.002	0.79834	11.0400	2.5000	0
2	1.04803	06.5214	02.500	1.60032	0	0	0
3	0.98303	11.0382	5.7320	1.89532	00.092	0.4600	0
4	0.98303	12.6652	6.5000	1.93762	0	0	0
5	0.99702	13.1865	6.3200	1.13716	0	0	0
6	1.01196	11.7460	5.0800	1.68677	0	0	0
7	1.04897	15.1669	6.5000	2.14822	0	0	0
8	1.06398	17.8537	5.6000	1.05291	0	0	0
9	1.02803	12.3467	5.4000	0.18580	0	0	0
10	1.02703	17.7400	8.3000	0.60066	0	0	0
CEVs_1	1.02000	0.11530	0	0	0	0	0
12	1.04684	04.0965	0	0	0	0	0
13	1.02890	01.2407	0	0	03.220	0.0240	0
14	1.00590	0.4376	0	0	05.000	1.8400	0
15	1.00966	01.6109	0	0	0	0	0
16	1.01205	02.3062	0	0	0	0	0
<b>17</b>	<b>1.00462</b>	<b>00.1153</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2.3380</b>	<b>0.8400</b>	<b>-0.6178</b>
18	1.00240	-0.3789	0	0	5.2200	1.7600	0
19	1.03084	-0.1943	0	0	0	0	0
20	1.01953	04.6874	0	0	0	0	0
21	1.01576	03.8740	0	0	0	0	0
22	1.00282	03.8614	0	0	0.0850	0.8800	0
23	1.01646	03.9783	0	0	0	0	0
24	1.01329	02.3211	0	0	0	0	0
25	1.01479	01.9189	0	0	3.2000	1.5300	0
26	1.03018	03.3337	0	0	3.2940	0.3230	0
27	1.02969	02.3416	0	0	0	0	0
28	1.02807	01.4907	0	0	1.5800	0.3000	0
29	1.04909	07.9658	0	0	0	0	0
30	0.99030	06.5515	0	0	6.8000	1.0300	0
31	1.03060	05.7454	0	0	2.7400	1.1500	0
32	1.04911	10.2004	0	0	0	0	0
33	1.04423	10.0013	0	0	2.4750	0.8460	0
34	1.03587	03.4533	0	0	3.0860	-0.922	0
35	1.05362	05.5442	0	0	2.2400	0.4720	0
36	1.03623	04.3221	0	0	1.3900	0.1700	0
37	1.02725	02.2272	0	0	2.8100	0.7550	0
38	1.04221	7.8791	0	0	2.0600	0.2760	0
39	1.04469	10.6611	0	0	2.8350	0.2690	0
40	1.04739	01.5367	0	0	0	0	0

**Tabla 2.8.- Resultados del sistema de Nueva Inglaterra con un CEV (modelo PQ). Caso 1**

Nodo	Voltaje polar [pu]		Pg [pu]	Qg [pu]	PL [pu]	QL [pu]	Qcev [pu]
1	1.03000	0	10.002	0.79834	11.0400	2.5000	0
2	1.04803	06.5214	02.500	1.60032	0	0	0
3	0.981960	11.0382	5.7320	1.89532	00.092	0.4600	0
4	0.98303	12.6652	6.5000	1.93762	0	0	0
5	0.99702	13.1865	6.3200	1.13716	0	0	0
6	1.01196	11.7348	5.0800	1.68677	0	0	0
7	1.04897	15.1669	6.5000	2.14822	0	0	0
8	1.06398	17.8537	5.6000	1.05291	0	0	0
9	1.02803	12.3467	5.4000	0.18580	0	0	0
10	1.02703	17.7400	8.3000	0.60066	0	0	0
11	1.04739	01.5367	0	0	0	0	0
12	1.04684	04.0965	0	0	0	0	0
13	1.02890	01.2407	0	0	03.220	0.0240	0
14	1.00590	0.4376	0	0	05.000	1.8400	0
15	1.00966	01.6109	0	0	0	0	0
16	1.01205	02.3062	0	0	0	0	0
<b>17</b>	<b>1.00462</b>	<b>00.1153</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2.3380</b>	<b>0.8400</b>	<b>-0.6178</b>
18	1.00240	-0.3789	0	0	5.2200	1.7600	0
19	1.03084	-0.1943	0	0	0	0	0
20	1.01953	04.6874	0	0	0	0	0
21	1.01576	03.8740	0	0	0	0	0
22	1.00282	03.8614	0	0	0.0850	0.8800	0
23	1.01646	03.9783	0	0	0	0	0
24	1.01329	02.3211	0	0	0	0	0
25	1.01479	01.9189	0	0	3.2000	1.5300	0
26	1.03018	03.3337	0	0	3.2940	0.3230	0
27	1.02969	02.3416	0	0	0	0	0
28	1.02807	01.4907	0	0	1.5800	0.3000	0
29	1.04909	07.9658	0	0	0	0	0
30	0.99030	06.5515	0	0	6.8000	1.0300	0
31	1.03060	05.7454	0	0	2.7400	1.1500	0
32	1.04911	10.2004	0	0	0	0	0
33	1.04423	10.0013	0	0	2.4750	0.8460	0
34	1.03587	03.4533	0	0	3.0860	-0.922	0
35	1.05362	05.5442	0	0	2.2400	0.4720	0
36	1.03623	04.3221	0	0	1.3900	0.1700	0
37	1.02725	02.2272	0	0	2.8100	0.7550	0
38	1.04221	7.8791	0	0	2.0600	0.2760	0
39	1.04469	10.6611	0	0	2.8350	0.2690	0

### Caso 2 (operación del CEV fuera de sus límites)

Para el segundo caso, utilizando los parámetros del CEV de la Tabla A-3, se debilita el sistema de prueba desconectando líneas de enlace (entre los nodos 1-19, y 18-15) indicadas en rojo en la figura A.2 del apéndice A. Los resultados del modelo PV, obtenidos con el programa *Power World* se muestran en la Tabla 2.9.

**Tabla 2.9.-Resultados del sistema de Nueva Inglaterra con un CEV (modelo PV). Caso 2**

Nodo	Voltaje polar [pu]		Pg [pu]	Qg [pu]	PL [pu]	QL [pu]	Qcev [pu]
1	1.03000	0	10.0468	1.47840	11.0400	2.5000	0
2	1.04804	05.881	02.5008	1.7013	0	0	0
3	0.98196	10.564	5.732	2.2734	00.092	0.4600	0
4	0.98304	12.071	6.500	2.2594	0	0	0
5	0.99702	12.414	6.320	1.2036	0	0	0
6	1.01196	10.969	5.080	1.7175	0	0	0
7	1.04897	14.406	6.500	2.2227	0	0	0
8	1.06399	17.095	5.600	1.0954	0	0	0
9	1.02804	11.681	5.400	2.505	0	0	0
10	1.02703	11.681	8.3000	0.6411	0	0	0
CEVs_1	0.99747	-5.186	0	1.00000	0	0	0
12	1.04506	03.454	0	0	0	0	0
13	1.02442	0.461	0	0	03.220	0.0240	0
14	0.99655	-0.531	0	0	05.000	1.8400	0
15	0.99578	0.431	0	0	0	0	0
16	1.00187	1.743	0	0	0	0	0
<b>17</b>	<b>0.97241</b>	<b>-5.186</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2.3380</b>	<b>0.8400</b>	<b>-0.97490</b>
18	0.97241	-4.530	0	0	5.2200	1.7600	0
19	0.97938	-4.556	0	0	0	0	0
20	1.01260	04.038	0	0	0	0	0
21	1.00775	03.254	0	0	0	0	0
22	0.99505	03.203	0	0	0.0850	0.8800	0
23	1.00932	03.284	0	0	0	0	0
24	1.00590	01.513	0	0	0	0	0
25	1.01058	01.120	0	0	3.2000	1.5300	0
26	1.02743	02.550	0	0	3.2940	0.3230	0
27	1.02665	01.566	0	0	0	0	0
28	1.02447	0.711	0	0	1.5800	0.3000	0
29	1.04807	7.191	0	0	0	0	0
30	0.98975	5.773	0	0	6.8000	1.0300	0
31	1.02866	4.9700	0	0	2.7400	1.1500	0
32	1.04808	9.4350	0	0	0	0	0
33	1.04315	9.2350	0	0	2.4750	0.8460	0
34	1.03334	2.667	0	0	3.0860	-0.922	0
35	1.05214	4.871	0	0	2.2400	0.4720	0
36	1.03446	3.597	0	0	1.3900	0.1700	0
37	1.02486	1.475	0	0	2.8100	0.7550	0
38	1.04129	7.160	0	0	2.0600	0.2760	0
39	1.04406	9.945	0	0	2.8350	0.2690	0
40	1.04637	1.287	0	0	0	0	0

Los resultados del caso 2 considerando un CEV con el modelo PQ se presentan en la Tabla 2.10. Comparando los valores finales del nodo 17 para el modelo PV (Tabla 2.9) y para el modelo PQ (Tabla 2.10) Se puede comprobar que los valores de potencia reactiva finales de los modelos son diferentes.

**Tabla 2.10.- Resultados del sistema de Nueva Inglaterra con un CEV (modelo PQ). Caso 2**

Nodo	Voltaje polar [pu]		Pg [pu]	Qg [pu]	PL [pu]	QL [pu]	Qcev [pu]
1	1.03000	0	10.046	1.47908	11.040	2.5000	0
2	1.04803	5.8810	2.5000	1.70355	0	0	0
3	0.98196	10.566	5.7320	2.28323	00.092	0.4600	0
4	0.98303	12.413	6.5000	2.26728	0	0	0
5	0.99702	12.413	6.3200	1.20513	0	0	0
6	1.01196	10.968	5.0800	1.71826	0	0	0
7	1.04897	14.4059	6.5000	2.22456	0	0	0
8	1.06398	17.0946	5.6000	1.09621	0	0	0
9	1.02803	11.6805	5.4000	0.25177	0	0	0
10	1.02703	17.0255	8.3000	0.64206	0	0	0
11	1.04635	01.2868	0	0	0	0	0
12	1.04501	3.4539	0	0	0	0	0
13	1.02431	0.4601	0	0	0	0	0
14	0.99634	-0.5320	0	0	05.000	1.8400	0
15	0.99547	0.4307	0	0	0	0	0
16	1.00160	1.7431	0	0	0	0	0
<b>17</b>	<b>0.97173</b>	<b>-5.1899</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2.3380</b>	<b>0.8400</b>	<b>-0.9537</b>
18	0.97205	-4.5339	0	0	5.2200	1.7600	0
19	0.97880	-4.5591	0	0	0	0	0
20	1.01242	4.0387	0	0	0	0	0
21	1.00754	3.2543	0	0	0	0	0
22	0.99485	3.2039	0	0	0.0850	0.8800	0
23	1.00914	3.2850	0	0	0	0	0
24	1.00572	1.5124	0	0	0	0	0
25	1.01048	1.1195	0	0	3.2000	1.5300	0
26	1.02736	2.5492	0	0	3.2940	0.3230	0
27	1.029330	03.6323	0	0	0	0	0
28	1.02438	0.7099	0	0	1.5800	0.3000	0
29	1.04805	7.1903	0	0	0	0	0
30	0.98974	5.7726	0	0	6.8000	1.0300	0
31	1.02862	4.9692	0	0	2.7400	1.1500	0
32	1.04805	9.4344	0	0	0	0	0
33	1.04313	9.2350	0	0	2.4750	0.8460	0
34	1.03330	2.6688	0	0	3.0860	-0.922	0
35	1.05210	4.8703	0	0	2.2400	0.4720	0
36	1.03442	3.5967	0	0	1.3900	0.1700	0
37	1.02481	3.4567	0	0	2.8100	0.7550	0
38	1.04127	7.1592	0	0	2.0600	0.2760	0
39	1.04405	9.9441	0	0	2.8350	0.2690	0

En la figura 2.9 se comparan los resultados del caso 1 (punto 1), con los resultados finales del caso 2 para los modelos PV (punto 3') y PQ (punto 3) del CEV. Se puede observar en esta figura que el modelo como nodo PV es inadecuado cuando el equipo sale de sus límites, ya que la condición de operación que simula no está en la curva característica del CEV. Por el contrario, el modelo del CEV como nodo PQ se ubica dentro de la característica de operación aún cuando el equipo opera fuera de

sus límites. El punto 2 es el punto al que ambos modelos llegan sin considerar a los límites.

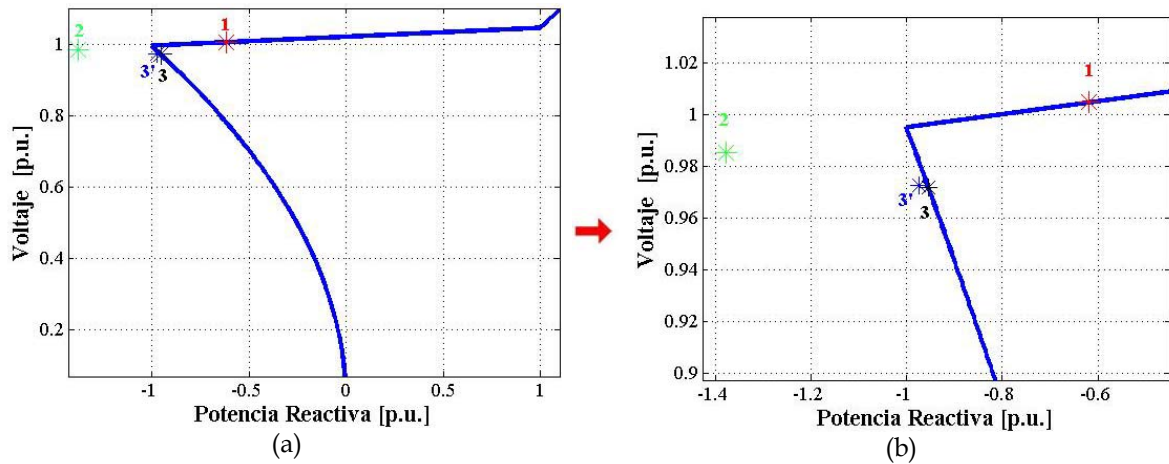


Figura 2.9.-Sistema de nueva Inglaterra: (a) Comparación de los 2 modelos como nodo PV y como nodo PQ analizando 1 CEV en el nodo 17 con limitadores operando fuera de los límites de la característica de operación.(b) Acercamiento del análisis de los 2 modelos del CEV como Nodo PV y PQ en el nodo 17 con limitadores operando fuera de los límites de la característica de operación.

## Resultados del sistema de Nueva Inglaterra incluyendo dos CEVs

### Caso 1 (operación del CEV dentro de sus límites)

En esta sección se modelan 2 CEVs en 2 nodos diferentes del sistema de prueba *Nueva Inglaterra* [Malek et al 1990] utilizando los parámetros de los modelos del CEV que se presentan en la Tabla A-4 del apéndice A. Los nodos seleccionados para conectar los dos CEV son el 17 y 18, que presentan los menores voltajes determinados por el caso base del estudio de flujos de potencia, (Tabla 2.6).

Los resultados en estas condiciones del estudio de flujos de potencia que se obtienen utilizando el modelo convencional PV del CEV se presentan en la Tabla 2.11. Los resultados del modelo PQ se muestran en la Tabla 2.12. Como ocurrió antes, en ambos casos se incrementa el voltaje en los nodos 17 y 18 de la misma manera con ambos modelos.

**Tabla 2.11.- Resultados del sistema de Nueva Inglaterra con dos CEV (modelo PV). Caso 1**

Nodo	Voltaje polar [pu]		Pg [pu]	Qg [pu]	PL [pu]	QL [pu]	Qcev [pu]
1	1.03000	0	9.9999	0.642338	11.040	2.5000	0
2	1.04803	6.5083	2.5000	1.554298	0	0	0
3	0.98196	10.9533	5.7320	1.683262	00.092	0.4600	0
4	0.98303	12.5920	6.5000	1.768924	0	0	0
5	0.997025	13.1692	6.3200	1.107103	0	0	0
6	1.01196	11.7307	5.0800	1.71826	0	0	0
7	1.04897	15.1443	6.5000	2.114526	0	0	0
8	1.06398	17.8303	5.6000	1.033767	0	0	0
9	1.02803	12.3377	5.4000	0.158967	0	0	0
10	1.02703	17.7280	8.3000	0.583432	0	0	0
CEV-1	1.020000	0.0000	0	0	0	0	0
CEV-2	1.02000	0.0000	0	0	0	0	0
13	1.03085	1.2319	0	0	3.220	0.0240	0
14	1.01001	0.4263	0	0	5.000	1.8400	0
15	1.01559	1.5824	0	0	0	0	0
16	1.01776	2.2707	0	0	0	0	0
<b>17</b>	<b>1.01290</b>	<b>0.0988</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2.3380</b>	<b>0.8400</b>	<b>-0.99363</b>
<b>18</b>	<b>1.01082</b>	<b>-0.3888</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>5.2200</b>	<b>1.7600</b>	<b>-0.33030</b>
19	1.03431	-0.1963	0	0	0	0	0
20	1.02317	4.6428	0	0	0	0	0
21	1.02009	3.8314	0	0	0	0	0
22	1.00690	3.8213	0	0	0.0850	0.8800	0
23	1.02007	3.9396	0	0	0	0	0
24	1.01674	2.2969	0	0	0	0	0
25	1.01673	1.9064	0	0	3.2000	1.5300	0
26	1.03143	3.3215	0	0	3.2940	0.3230	0
27	1.03103	2.3322	0	0	0	0	0
28	1.02965	1.4826	0	0	1.5800	0.3000	0
29	1.04954	7.9496	0	0	0	0	0
30	0.99055	6.5369	0	0	6.8000	1.0300	0
31	1.03148	5.7295	0	0	2.7400	1.1500	0
32	1.04958	10.180	0	0	0	0	0
33	1.04471	9.9811	0	0	2.4750	0.8460	0
34	1.03700	3.4411	0	0	3.0860	-0.922	0
35	1.05424	5.5383	0	0	2.2400	0.4720	0
36	1.03699	4.3147	0	0	1.3900	0.1700	0
37	1.02829	2.2208	0	0	2.8100	0.7550	0
38	1.04260	7.8694	0	0	2.0600	0.2760	0
39	1.04496	10.650	0	0	2.8350	0.2690	0
40	1.04705	1.5318	0	0	0	0	0
41	1.04765	4.0872	0	0	0	0	0

Como se observa en las Tablas 2.11 y 2.12, los resultados que se obtuvieron en el sistema con 2 CEVs, en el Caso 1, son idénticos para los dos modelos, como nodo PV y como nodo PQ.

**Tabla 2.12.- Resultados del sistema de Nueva Inglaterra con dos CEV (modelo PQ). Caso 1**

Nodo	Voltaje polar [pu]		Pg [pu]	Qg [pu]	PL [pu]	QL [pu]	Qcev [pu]
1	1.03000	0	9.9999	0.642338	11.040	2.5000	0
2	1.04803	06.5083	2.5000	1.554298	0	0	0
3	0.98196	10.9533	5.7320	1.683262	00.092	0.4600	0
4	0.98303	12.5920	6.5000	1.768924	0	0	0
5	0.99702	13.1692	6.3200	1.107103	0	0	0
6	1.01196	11.7307	5.0800	1.672842	0	0	0
7	1.04897	15.1443	6.5000	2.114526	0	0	0
8	1.06398	17.8303	5.6000	1.033767	0	0	0
9	1.02803	12.3377	5.4000	0.158967	0	0	0
10	1.02703	17.7280	8.3000	0.583432	0	0	0
11	1.04705	1.5318	0	0	0	0	0
12	1.04765	4.0872	0	0	0	0	0
13	1.03113	1.2304	0	0	3.220	0.0240	0
14	1.01001	0.4263	0	0	5.000	1.8400	0
15	1.01559	1.5824	0	0	0	0	0
16	1.01776	2.2707	0	0	0	0	0
17	<b>1.01290</b>	<b>0.0988</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2.3380</b>	<b>0.8400</b>	<b>-0.99363</b>
18	<b>1.01082</b>	<b>-0.3888</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>5.2200</b>	<b>1.7600</b>	<b>-0.33030</b>
19	1.03434	-0.1963	0	0	0	0	0
20	1.02317	4.6428	0	0	0	0	0
21	1.02009	3.8314	0	0	0	0	0
22	1.00690	3.8213	0	0	0.0850	0.8800	0
23	1.02007	3.9396	0	0	0	0	0
24	1.01674	2.2969	0	0	0	0	0
25	1.01673	1.9044	0	0	3.2000	1.5300	0
26	1.03103	3.3215	0	0	3.2940	0.3230	0
27	1.03103	2.3322	0	0	0	0	0
28	1.02965	1.4826	0	0	1.5800	0.3000	0
29	1.04954	7.9496	0	0	0	0	0
30	0.99055	6.5369	0	0	6.8000	1.0300	0
31	1.03748	5.7295	0	0	2.7400	1.1500	0
32	1.04958	10.1800	0	0	0	0	0
33	1.04471	9.9811	0	0	2.4750	0.8460	0
34	1.03700	3.4411	0	0	3.0860	-0.922	0
35	1.05424	5.5383	0	0	2.2400	0.4720	0
36	1.03699	4.3147	0	0	1.3900	0.1700	0
37	1.02829	2.2208	0	0	2.8100	0.7550	0
38	1.04260	7.8694	0	0	2.0600	0.2760	0
39	1.04496	10.650	0	0	2.8350	0.2690	0

La condición de operación final de cada los dos CEV se presenta en la figura 2.10. La figura 2.10 a) representa la característica de operación del CEV en el nodo 17, mientras la figura 2.10 b) corresponde al CEV instalado en el nodo 18.

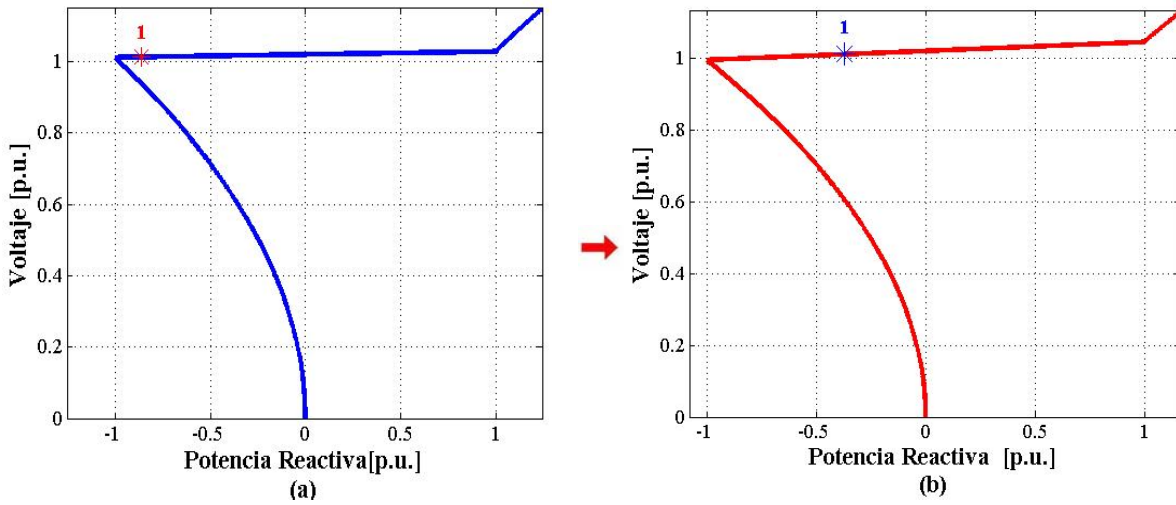


Figura 2.10.-Sistema de Nueva Inglaterra utilizando 2 CEVs: (a) Análisis de 1 CEV en el nodo 17 en sus 2 formas como nodo PV y como nodo PQ, operando dentro de los límites de la característica de operación.(b) Análisis de 1 CEV en el nodo 18 sus 2 formas como nodo PV y como nodo PQ operando dentro de los límites de la característica de operación.

### Caso 2 (operación del CEV fuera de sus límites)

Para este último caso se analizan los nodos 17, 18 considerando los parámetros presentados en la Tabla A-4, donde el sistema de prueba *Nueva Inglaterra* [Malek et al 1990] se debilita al desconectar 2 líneas de enlace (entre los nodos, 18-15 y 18-19) que se hallan coloreadas con rojo en la figura A.2 localizada en el apéndice A.

En la Tabla 2.13 se presentan los resultados obtenidos representando los 2 CEV como nodo PV en los nodos 17 y 18. Los resultados de las mismas condiciones de simulación con el nodo PQ se muestran en la Tabla 2.14. Los resultados gráficos se presentan en la figura 2.11.

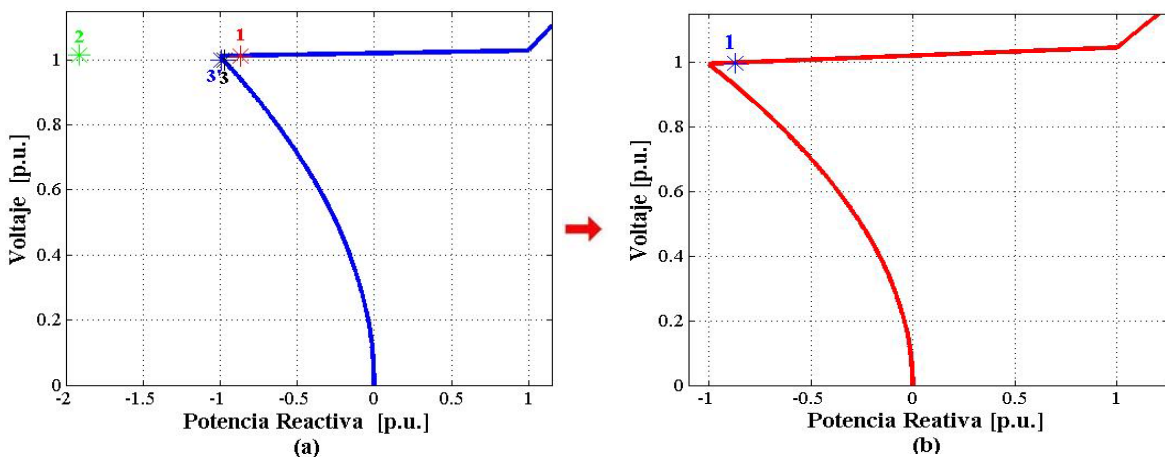


Figura 2.11.- Análisis de 2 CEVs en el sistema de Nueva Inglaterra: (a) comparación de los 2 modelos del CEV como nodo PV y el nodo PQ analizados en el nodo 17, (b) comparación de los 2 modelos PV y PQ en el nodo 18.



**Tabla 2.13.- Resultados del sistema de Nueva Inglaterra con dos CEV (modelo PV).Caso 2**

Nodo	Voltaje polar [pu]		Pg [pu]	Qg [pu]	PL [pu]	QL [pu]	Qcev [pu]
1	1.03000	0	10.0195	0.15938	11.040	2.5000	0
2	1.04804	5.9548	2.5000	1.55905	0	0	0
3	0.98196	9.8114	5.7320	1.76531	00.092	0.4600	0
4	0.98303	11.5876	6.5000	1.82526	0	0	0
5	0.99702	12.4391	6.3200	1.11407	0	0	0
6	1.01196	11.0002	5.0800	1.67607	0	0	0
7	1.04897	14.4154	6.5000	2.12235	0	0	0
8	1.06398	17.1016	5.6000	1.03820	0	0	0
9	1.02803	11.7655	5.4000	0.16844	0	0	0
10	1.02703	17.0948	8.3000	0.58895	0	0	0
Cev_1	1.02000	-2.7886	0	1.61844	0	0	0
Cev_2	1.02000	-4.1337	0	0.80806	0	0	0
13	1.03044	0.5780	0	0	3.220	0.0240	0
14	1.00923	-0.3295	0	0	5.000	1.8400	0
15	1.01458	0.8678	0	0	0	0	0
16	1.01555	1.1098	0	0	0	0	0
<b>17</b>	<b>1.00683</b>	<b>-2.7886</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2.3380</b>	<b>0.8400</b>	<b>-0.8400</b>
<b>18</b>	<b>1.00019</b>	<b>-4.1337</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>5.2200</b>	<b>1.7600</b>	<b>-0.1760</b>
19	1.04568	0.0349	0	0	0	0	0
20	1.02195	3.6288	0	0	0	0	0
21	1.01852	2.7706	0	0	0	0	0
22	1.00553	2.8058	0	0	0.0850	0.8800	0
23	1.01899	2.9699	0	0	0	0	0
24	1.01596	1.4426	0	0	0	0	0
25	1.01627	1.1375	0	0	3.2000	1.5300	0
26	1.03114	2.5902	0	0	3.2940	0.3230	0
27	1.03073	1.7050	0	0	0	0	0
28	1.02930	1.6354	0	0	1.5800	0.3000	0
29	1.04944	7.2193	0	0	0	0	0
30	0.99050	5.8062	0	0	6.8000	1.0300	0
31	1.03127	4.9991	0	0	2.7400	1.1500	0
32	1.04948	9.4506	0	0	0	0	0
33	1.04460	9.2517	0	0	2.4750	0.8460	0
34	1.03674	2.7098	0	0	3.0860	-0.922	0
35	1.05402	4.9650	0	0	2.2400	0.4720	0
36	1.03675	3.6730	0	0	1.3900	0.1700	0
37	1.02800	1.5810	0	0	2.8100	0.7550	0
38	1.04248	7.2354	0	0	2.0600	0.2760	0
39	1.04487	10.016	0	0	0	0	0
40	1.04728	1.3207	0	0	0	0	0
41	1.04757	3.5336	0	0	0	0	0

**Tabla 2.14.- Resultados del sistema de Nueva Inglaterra con dos CEV (modelo PQ). Caso 2**

Nodo	Voltaje polar		Pg [pu]	Qg [pu]	PL [pu]	QL [pu]	Qcev [pu]
	[pu]						
1	1.03000	0	10.0181	0.171451	11.040	2.5000	0
2	1.04803	5.9539	2.5000	1.603158	0	0	0
3	0.98196	9.8726	5.7320	1.984616	00.092	0.4600	0
4	0.98303	11.6382	6.5000	1.996738	0	0	0
5	0.99702	12.4382	6.3200	1.143381	0	0	0
6	1.01196	10.9973	5.0800	1.689650	0	0	0
7	1.04897	14.4197	6.5000	2.155243	0	0	0
8	1.06398	17.1067	5.6000	1.056875	0	0	0
9	1.02803	11.7602	5.4000	0.194341	0	0	0
10	1.02703	17.0910	8.3000	0.605648	0	0	0
11	1.04699	1.3185	0	0	0	0	0
12	1.04679	3.5309	0	0	0	0	0
13	1.02857	0.5703	0	0	3.220	0.0240	0
14	1.01005	-0.3382	0	0	5.000	1.8400	0
15	1.00901	0.8739	0	0	0	0	0
16	1.01736	1.1196	0	0	0	0	0
17	<b>0.99628</b>	<b>-2.826</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2.3380</b>	<b>0.8400</b>	<b>-0.99629</b>
18	<b>0.99034</b>	<b>-4.203</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>5.2200</b>	<b>1.7600</b>	<b>-0.54824</b>
19	1.04568	-0.0349	0	0	0	0	0
20	1.01826	3.6504	0	0	0	0	0
21	1.01408	2.7895	0	0	0	0	0
22	1.00139	2.8229	0	0	0.0850	0.8800	0
23	1.01535	2.9861	0	0	0	0	0
24	1.01256	1.4458	0	0	0	0	0
25	1.01437	1.1311	0	0	3.2000	1.5300	0
26	1.02992	2.5844	0	0	3.2940	0.3230	0
27	1.02942	1.6275	0	0	0	0	0
28	1.02778	0.7930	0	0	1.5800	0.3000	0
29	1.04899	7.2173	0	0	0	0	0
30	0.99025	5.8027	0	0	6.8000	1.0300	0
31	1.03042	4.9968	0	0	2.7400	1.1500	0
32	1.04902	9.4527	0	0	0	0	0
33	1.04413	9.2536	0	0	2.4750	0.8460	0
34	1.03563	2.7040	0	0	3.0860	-0.922	0
35	1.05342	4.9568	0	0	2.2400	0.4720	0
36	1.03602	3.6717	0	0	1.3900	0.1700	0
37	1.02699	1.5472	0	0	2.8100	0.7550	0
38	1.04210	7.2294	0	0	2.0600	0.2760	0
39	1.04461	10.0118	0	0	2.8350	0.2690	0

Los resultados de las Tablas 2.13 y 2.14 y de la figura 2.11 muestran que el CEV en el nodo 17 se sale de sus límites de operación, mientras que el CEV en el nodo 18 permanece operando dentro de sus límites. Comparando el funcionamiento de los modelos PV y PQ se puede observar en la figura 2.11 a) que el punto de operación final obtenido con el modelo PV no está en la característica de operación del CEV (punto 3') por lo que este modelo no es adecuado para representar al CEV en la operación fuera de límites. El modelo PQ, por el contrario, representa correctamente al CEV cuando sale de sus límites de operación (punto 3).

En la figura 2.12 se presenta un acercamiento de los puntos determinados por el estudio de flujos utilizando los modelos del CEV limitados en el nodo 17, donde se observa prácticamente como el voltaje tiende a salirse de los límites de la característica de operación (punto 2) y los modelos PV y PQ obtienen puntos que se ubican fuera de límites (punto 3') y dentro de la característica de operación (punto 3) respectivamente.

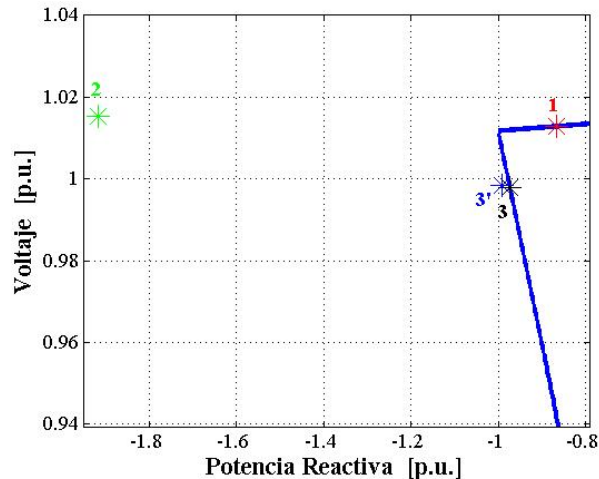


Figura 2.12.- Acercamiento del análisis de los 2 modelos del CEV como nodo PV y PQ analizados en el nodo 17 con limitadores operando fuera de los límites de la característica de operación.

## CAPÍTULO 3:

# MODELOS DEL COMPENSADOR ESTÁTICO DE VARS PARA ESTUDIOS DE ESTABILIDAD TRANSITORIA

### 3.1 ESTABILIDAD DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

El sistema eléctrico de potencia es un sistema muy dinámico que varía en el tiempo tanto para los valores de sus parámetros (impedancias, etc.) como de sus variables principales (voltajes, corrientes, potencia activa, reactiva y frecuencia), que en cierto instante de tiempo por condiciones propias o ajenas del sistema eléctrico de potencia pueden llegar a generar alguna clase de disturbio.

La mayor parte de los disturbios que ocurren en el sistema de potencia se deben a cambios causados por variaciones normales de cargas y acciones programadas por los ingenieros encargados de la operación del sistema para realizar el mantenimiento de los elementos de la red de transmisión y las plantas generadoras. La variación de la carga con respecto al tiempo se muestra en la figura 3.1, para el área de control central del sistema eléctrico mexicano en dos días diferentes de 1995.

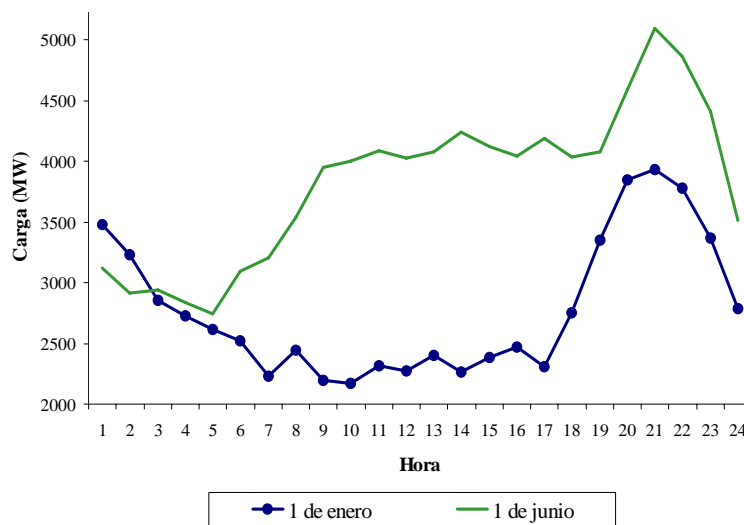


Figura. 3.1 Curvas de demanda horaria del área de control central del Sistema Eléctrico Mexicano para dos días diferentes de 1995 [Ruiz, 2002].

En la Figura 3.1 se puede observar claramente que la variación de la carga no solamente es horaria si no también varia estacionariamente y a demás depende del calendario de días laborales (el primero de enero es feriado, mientras que el primero de junio es laboral), aunque siempre están ocurriendo cambios en el sistema eléctrico de potencia, es conveniente considerar que en ciertos periodos de tiempos funcionen en estado estacionario; esto es que para propósitos de análisis, tanto los parámetros como las variables del sistema son considerados constantes.

El sistema de potencia también esta sujeto usualmente a disturbios repentinos e impredecibles debidos a fallas en el sistema que pueden ser provocadas por descargas atmosféricas en las líneas de transmisión, subestaciones o cortocircuitos causados por el roce de las ramas de un árbol con las líneas de transmisión, vandalismo, una mala operación humana y fenómenos catastróficos como los terremotos y otras causas.

***La estabilidad del sistema de potencia es su habilidad de permanecer en estado de operación aceptable después de estar sujeto a disturbios repentinos, programados o normales.***

En esta definición de estabilidad se asume que en el periodo transitorio, entre los estados estacionarios iniciales (antes del disturbio) y al final (después del disturbio), el amortiguamiento y las variables principales del sistema permanecen limitadas por sus valores admisibles y tienen un impacto pequeño en la calidad del servicio eléctrico. En el estado de operación aceptable al que finalmente llega el sistema eléctrico de potencia, los valores de voltaje y frecuencia permanecen dentro de sus límites normales de operación donde todos los generadores que se encuentren conectados en el sistema eléctrico de potencia operan en sincronismo [Ruiz, 2005].

### 3.1.1 Clasificaciones de la estabilidad

Aunque la estabilidad del sistema de potencia es un problema único, es conveniente clasificarla, utilizando diferentes criterios, para facilitar el diseño de medidas de control adecuadas para resolver los diferentes tipos de inestabilidad que pueden ocurrir, la gran dimensión del sistema eléctrico de potencia y su complejidad hacen que el sistema falle y sea posible que más de una forma de inestabilidad se presenta y que a veces sea difícil distinguir entre los tipos de inestabilidad. Sin embargo, la inestabilidad del sistema de potencia ante un evento se debe clasificar basándose principalmente en el fenómeno dominante que inicia la inestabilidad incluyendo en algunas de las categorías principales en el fenómeno dominante que

inicia la inestabilidad incluyendo en algunas de las categorías principales como un problema de inestabilidad angular, frecuencia o voltaje [Kundur and Morison, 1997].

La figura 3.2 presenta los diferentes tipos de clasificación de la estabilidad de los sistemas de eléctricos de potencia de acuerdo a los diferentes criterios como son:

- La naturaleza física del problema y el parámetro principal en el que se puede observar la inestabilidad.
- El tamaño del disturbio que inicia el problema de inestabilidad.
- El periodo de tiempo en el que se desarrolla la inestabilidad del sistema.

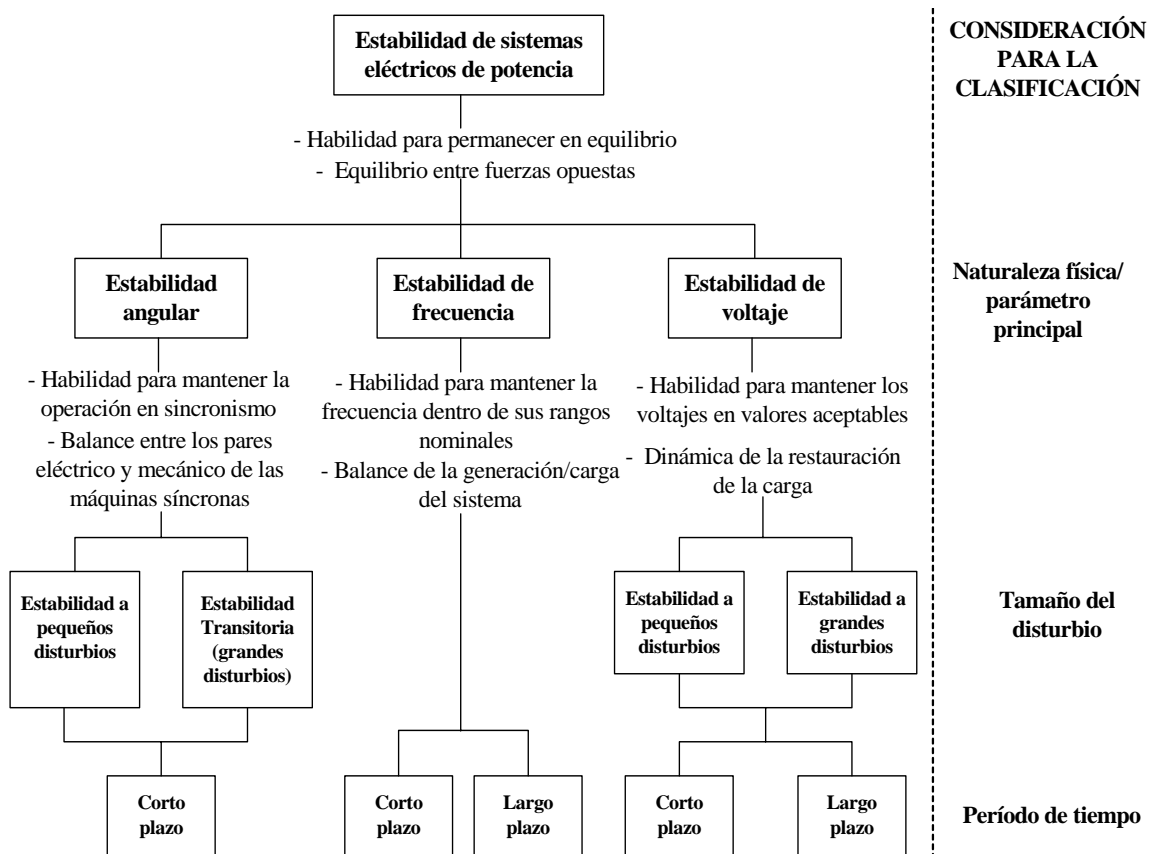


Figura 3.2 Clasificación de los problemas de inestabilidad en los sistemas eléctricos de potencia (Adaptado de [Ruiz, 2002, IEEE, 2004]).

La clasificación de los diferentes problemas de inestabilidad es por lo tanto una tarea esencial en el diseño de medidas de control adecuadas para resolver los diferentes problemas de inestabilidad. Esta clasificación está justificada teóricamente por el concepto de estabilidad.

Algunas de las definiciones de los sistemas de estabilidad mostrados en la figura 3.2 de acuerdo a la naturaleza física del problema se explican a continuación:

**Estabilidad de voltaje:** es la habilidad de los subsistemas de generación y transmisión para restaurar las potencias de las cargas y alcanzar valores aceptables de los voltajes en los nodos del sistema después de un disturbio, la inestabilidad de voltaje es causada por el intento de restaurar las cargas de consumo de energía eléctrica a un valor mucho mayor que el de la capacidad combinada de los sistemas de generación y transmisión [Van Cutsem and Vournas, 1998].

**Estabilidad de frecuencia:** es la habilidad del sistema eléctrico de potencia de mantener el valor de la frecuencia dentro de un rango normal, después de estar sometido aun disturbio que puede o no haber resultado en la separación del sistema potencia interconectado en los subsistemas aislados. Depende de la habilidad de restaurar el balance entre las potencias totales de generación y carga de los diferentes subsistemas con un mínimo de pérdida de cargas [Kundur and Morison 1997].

**Estabilidad angular:** es la habilidad del sistema de potencia de permanecer la operación en sincronismo después de estar sujeto a un disturbio. Depende de la habilidad de restaurar o mantenerse en equilibrio entre los pares mecánicos y electromagnético de todas las maquinas síncronas del sistema eléctrico de potencia [Kundur and Morison, 1997].

El segundo criterio de clasificación se refiere al tamaño del disturbio que inicia el problema de estabilidad. Como se puede apreciar a continuación, la definición del tamaño de un disturbio es aparentemente confusa [IEEE, 1982].

Un disturbio es clasificado como pequeño si es posible analizar sus consecuencias utilizando un modelo lineal del sistema, en caso contrario se clasifica como un gran disturbio, sin embargo cumple muy bien su función ya que define al tamaño de un disturbio con los resultados de un análisis utilizando el modelo lineal del sistema. Esto se debe a que no es posible clasificar por siempre la prioridad del evento del sistema en particular como un gran o pequeño disturbio.

En el caso de un cortocircuito en algunas de las líneas de transmisión del sistema, por ejemplo depende solamente del estado inicial de operación y de la robustez del sistema de potencia en particular ante este evento, el corto circuito puede ser considerado como un disturbio pequeño o grande. En ciertas ocasiones, para ciertos sistemas puede ser posible que un corto circuito sea considerado como un disturbio pequeño y por lo tanto se puede utilizar un modelo lineal del sistema para analizar las consecuencias de este evento en particular, mientras que para otros sistemas un corto circuito es un gran disturbio, la única manera de comprobar que para un sistema en particular un disturbio es pequeño o no es comprobar los

resultados del análisis de las consecuencias del evento utilizando un modelo no lineal completo del sistema.

Las técnicas del análisis utilizando los modelos lineal y no lineal son complementarias, y la comprensión de las causas e identificación de las posibles soluciones a la mayoría de los problemas de estabilidad requieren de una utilización coordinada de ambas. Las técnicas que emplean los modelos lineales son muy atractivas, ya que presentan muchas ventajas, entre las que podemos citar la disponibilidad de técnicas de sensibilidad que son capaces de identificar a los elementos que causan el problema de estabilidad y a los que son capaces de influenciar el fenómeno de resolver las inestabilidades. Son técnicas en las que además se tiene una experiencia amplia; sin embargo como se menciona en la definición del tamaño del disturbio, sus resultados no siempre son validos cuando se analiza la respuesta del sistema de potencia ante un disturbio dado [Ruiz, 2005].

Una rama importante de la línea investigación actual consiste en desarrollar métodos no lineales de análisis de la estabilidad que provean medidas de sensibilidad útiles en el diseño de controles adecuados para resolver problemas de estabilidad.

El periodo de tiempo de interés en el que se desarrollan los problemas de inestabilidad se muestran en la figura 3.3, con respecto a las bandas de frecuencia de los diferentes fenómenos dinámicos presentes en los sistemas eléctricos de potencia. Los fenómenos rápidos (estabilidad de corto plazo) requiere analizar periodos de tiempo desde algunos milisegundos hasta 15 ó 20 segundos, mientras que los fenómenos mas lentos (estabilidad de largo plazo) pueden requerir que el periodo de análisis se amplíe hasta 15 minutos o un poco mas.

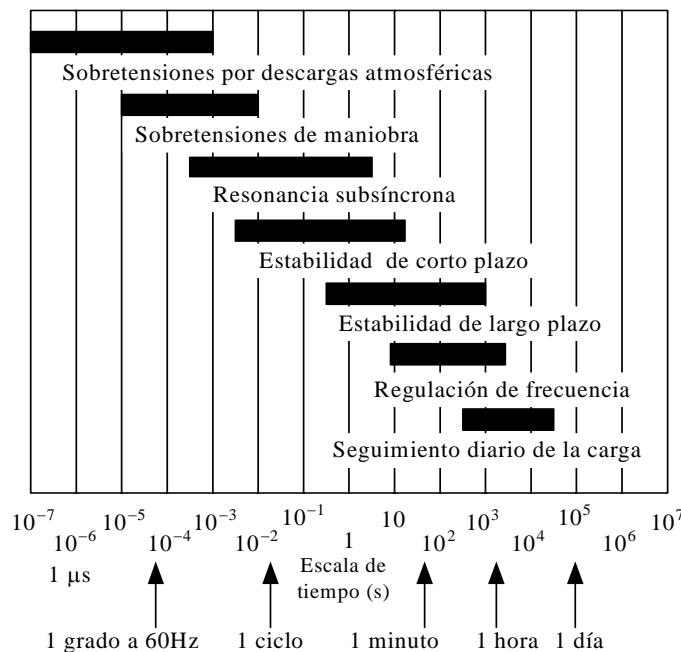




Figura 3.3 Ubicación de los problemas de estabilidad en las bandas de frecuencia de los diferentes fenómenos dinámicos de los sistemas eléctricos de potencia [Anderson et, 1990].

Es importante observar que los diferentes tipos de inestabilidades se desarrollan en periodos de tiempo específico. Por ejemplo, en la figura 3.4 se muestra que las inestabilidades angulares se desarrollan siempre en el corto plazo (periodos de tiempo de hasta 20 segundos) mientras que los problemas de estabilidad de frecuencia y de voltaje pueden desarrollarse tanto en el corto como en el largo plazo, independiente del tamaño del disturbio.

De manera muy rigorista, se podría especificar que para estudiar los problemas dinámicos de los sistemas de potencia se tiene que utilizar un modelo en el que los elementos (líneas de transmisión, generadores y cargas) estuvieran representados por ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales (debido a que todos los elementos se presentan con sus parámetros concentrados).

Sin embargo, la diferencia entre los periodos de tiempo en los que se desarrollan los fenómenos dinámicos permite hacer una descomposición en el tiempo del fenómeno complejo de la estabilidad (utilizando un razonamiento del tipo de perturbaciones singulares [IEEE, 2004] en el que algunas variables que han alcanzado el estado estacionario para el periodo de tiempo del fenómeno de interés puedan ser representadas utilizando las ecuaciones algebraicas. Con esto se disminuye la complejidad del modelo del sistema de potencia, su dimensión y se logra un aumento importante en la velocidad de soluciones del modelo, que por su no - linealidad es resuelto utilizando métodos numéricos [Ruiz - Vega 2005].

En el caso del estudio de problemas de estabilidad se puede observar en la figura 3.3 que los transitorios ultrarrápidos y rápidos que acontecen en las variables de la red de transmisión debidos a sobre voltajes ocasionadas por descargas atmosféricas y por mala maniobra alcanzan sus valores de estados estacionario antes de que el estudio de los fenómenos de estabilidad sea de interés.

Esta característica dinámica del sistema de transmisión ha permitido que en la mayoría de los modelos de estabilidad representen a los elementos de la red de transmisión por ecuaciones algebraicas (la matriz de admitancias de los nodos o la matriz Jacobiana del sistema de potencia) con lo que se reduce la matriz del modelo de la estabilidad y por lo tanto, disminuyen los problemas de inestabilidad numérica.

Un razonamiento de este tipo se ha propuesto recientemente para el análisis de los problemas de estabilidad de voltaje de largo plazo (hasta 15 minutos). Se han desarrollado "simulaciones Quasi-estacionarias" en la que se considera que la mayoría de los elementos dinámicos importantes en los problemas de corto plazo (como las máquinas eléctricas y la mayoría de sus controles) han alcanzado condiciones de estado estacionario y pueden ser representados en el modelo del

sistema para estudios de estabilidad de largo plazo por ecuaciones algebraicas [Van Cutsem and Vournas, 1998].

Esta representación simplificada permite utilizar pasos de integración muy grandes (10 segundos ó más) que hacen que en la mayoría de las ocasiones de las simulaciones de fenómenos de largo plazo se hagan en un tiempo mucho menor que las de corto plazo. Comparando un programa de este tipo con uno de simulación en el tiempo (del tipo de estabilidad transitoria) en el que se modelen en detalle todos los elementos del sistema, el nuevo programa es 1000 veces mas rápido que los programas anteriores [Van Cutsem y Vournas, 1998].

Uno de los problemas que se ha encontrado al aplicar este tipo de simplificaciones, por ejemplo la "Simulación Quasi-estacionaria" es posible encontrar casos en los que el sistema experimenta una inestabilidad de corto plazo durante el inicio de la simulación que la Simulación Quasi-estacionaria no pueden detectar. Aunque es posible encontrar algunos indicadores que no señalen este tipo de problemas ya que no siempre funcionan, por lo que una rama importante de la investigación actual consiste en resolver este problema, ya que la simulación Quasi-estacionaria es muy atractiva debido a su velocidad de solución y una buena exactitud que presenta en la mayoría de los casos.

Hasta a hora se han comentado las diferentes clasificaciones de la estabilidad del sistema de potencia. Se ha observado en general que las consideraciones para la clasificación se hacen de tal manera de mejorar la comprensión de la naturaleza física del fenómeno dinámico.

La siguiente sección hace la caracterización del problema de estabilidad desde un punto de vista matemático, que por la complejidad del sistema y el fenómeno que presenta, es muy difícil de hacer formalmente.

### **3.1.2 Estabilidad Transitoria**

La estabilidad transitoria de un sistema de potencia en su habilidad de mantener la operación en sincronismo cuando este sujeto a un disturbio grande.

La estabilidad transitoria ha sido siempre uno de los problemas dinámicos más importantes del sistema de potencia, desde el inicio la industria eléctrica cuando se comenzaron a operar máquinas síncronas en paralelo, hasta mediados de la década 1950, donde la mayoría de los problemas de estabilidad encontrados en los contextos de planeación y operación estaban relacionados principalmente con inestabilidades de transitorios, después del desarrollo de grandes sistemas interconectados en la década de 1960, las nuevas formas de inestabilidad como las inestabilidades por

oscilaciones probablemente amortiguadas, las inestabilidades de frecuencia y más recientemente las inestabilidades de voltaje comenzaron a ser consideradas como problemas dinámicos importantes para la planificación y operación de los sistemas eléctricos de potencia, siendo históricamente la inestabilidad la forma dominante en la mayoría de los sistemas eléctricos de potencia.

La estabilidad transitoria es uno de los problemas dinámicos más estudiados, los métodos de evolución de la estabilidad transitoria, que han evolucionado a lo largo de los años de la misma manera que la complejidad y el tamaño del sistema eléctrico de potencia de acuerdo con la teoría de estabilidad de los sistemas dinámicos y los desarrollos del arte de la computación. Sin embargo como fue mencionado en 1970 hasta hoy en día.

***“No importa que tan rápido las computadoras crecieron en capacidad y velocidad, nunca han sido lo suficientemente grandes como para cumplir los requisitos impuestos por los estudios de estabilidad”*** [Kimbark, 1970].

En los estados iniciales de los sistemas de potencia, la mayoría de ellos fueron representados por sistemas tipo maquina – bus infinito o sistemas equivalentes de dos maquinas se utilizaban para evaluar la estabilidad, métodos gráficos como el criterio de áreas iguales, los diagramas circulares o la integración manual de las ecuaciones diferenciales de las máquinas síncronas.

A medida que el tamaño de los sistemas de potencia aumenta se diseñaron nuevos métodos de evolución de la estabilidad transitoria para los años de 1930 la invención del analizador de red permitió el estudio de sistemas eléctricos de potencia más grandes, donde la capacidad de los tableros del cálculo de corriente alterna iban desde redes que inicialmente tenían 6 máquinas hasta redes de 42 máquinas [Kimbark, 1970].

Estos analizadores de red eran básicamente modelos eléctricos a escalas reducidas de los sistemas eléctricos de potencia en los que se podían ajustar los voltajes aplicados a los nodos con sus magnitudes, ángulos deseados y se podía leer la potencia producida por los generadores en un wattmetro, este desarrollo permitió realizar estudios de flujos de potencia de sistemas multi-maquinas, pero la ecuación de oscilación tenía que ser resuelta todavía manualmente por el método de “paso a paso” con el objeto de calcular las curvas de oscilación de las maquinas, es decir la evolución del ángulo del rotor con el tiempo dado que era una tarea muy tediosa y repetitiva la integración manual de las curvas de oscilación ya estaban limitados a sistemas pequeños se tuvieron que desarrollar nuevos métodos como se describe a continuación[Ruiz – Vega, 2002].

### 3.2 METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN EN EL TIEMPO PARA ESTUDIOS DE ESTABILIDAD TRANSITORIA

En general el modelo del sistema de potencia multimáquinas para estudios de estabilidad transitoria se encuentra integrado por dos sistemas de ecuaciones no lineales principales [Dommel, 1972]:

$$\dot{x} = f(x, y) \quad (3.1)$$

$$0 = g(x, y) \quad (3.2)$$

La ecuación 3.1 consta de ecuaciones diferenciales para las máquinas eléctricas y sus controles, y para todo los elementos dinámicos del sistema. La ecuación (3.2) es un sistema no lineal de ecuaciones algebraicas que modela los elementos de la red de transmisión, las cargas, y las ecuaciones de conexión de los elementos dinámicos y los estatores de las máquinas eléctricas con la red [Dommel, 1972].

El valor  $x$  esta compuesto por variables de estado (por ejemplo, de posiciones angulares y velocidades de los rotores de las máquinas síncronas), el vector  $y$  consta de variables algebraicas (voltajes en los nodos de la red).

La dimensión del vector  $x$  depende del detalle del modelo, El límite bajo es dos veces el numero de maquinas del sistema, Este es una de las magnitudes más grandes [Dommel, 1972].

Los enfoques para la solución combinada de los sistemas de ecuaciones (3.1) y (3.2) se clasifican de acuerdo al tipo del método de integración y a la manera en la que se combina la solución de ambos sistemas de ecuaciones. En general, el método principal que se utiliza para realizar el análisis de estabilidad transitoria en la mayoría de los programas comerciales de simulación es descrito a continuación.

**Método Implícito Simultáneo:** para este método se transforman las ecuaciones diferenciales del sistema de ecuaciones (3.1) en ecuaciones algebraicas no lineales que se resuelven simultáneamente con las ecuaciones algebraicas de la red descritas por las ecuaciones del sistema (3.2).

El uso de métodos implícitos de solución requirió la solución simultanea de los dos sistemas de ecuaciones y finalmente el método implícito simultaneo es el que se emplea en todos los programas de simulación actuales en el tiempo para estudio de estabilidad se ha propuesto recientemente en la década de los 80' el uso de métodos implícitos de mayor orden que la regla trapecial de integración (2do Orden) conocidos como "métodos de Gear".

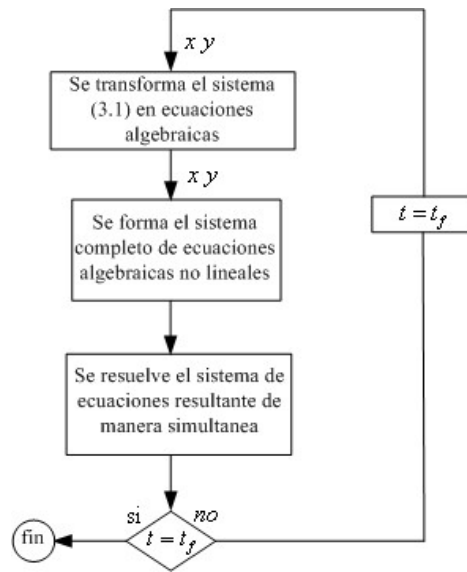


Figura 3.4 Diagrama de flujo del método implícito simultáneo [Ruiz, 1996].

### 3.3 MODELO COMPLETO DEL SISTEMA PARA ESTUDIOS DE ESTABILIDAD TRANSITORIA.

A partir de la ecuación (3.2), se define la representación de la red de la siguiente manera:

$$\tilde{I}(\tilde{x}, \tilde{y}) = Y_{BUS} \tilde{V} \quad (3.3)$$

Donde:

- $\tilde{I}(\tilde{x}, \tilde{v})$  Es un vector de inyecciones de corriente debidas a generadores, cargas motores, Facts, etc.
- $Y_{BUS}$  Es la Matriz de admitancias del nodo del sistema.
- $\tilde{V}$  Vector de voltajes nodales del sistema.

El efecto de todos los componentes conectados a la red de transmisión se modela como una inyección de corriente que pueden depender del voltaje en las terminales del componente  $V_i$  y/o de diferentes variables de estado asociadas al equipo en cuestión [Arrillaga and Arnold 1990, Dommel, 1972], el vector de inyecciones de corriente está formado por elementos iguales a cero menos los nodos en los que se conecta un generador o una carga. La inyección del generador será positiva y la de la carga será negativa diferente de cero.

Los modelos de todos los elementos dinámicos del sistema y las cargas estáticas con características diferentes a la de la impedancia constante, están formados por dos elementos principales.

- Ecuaciones diferenciales (dinámica del elemento).
- Ecuaciones algebraicas (conexión con la red).

Las ecuaciones algebraicas son la interfase del modelo dinámico con la red, al utilizarse como modelo de la red a la matriz  $Y_{BUS}$  el efecto de los modelos dinámicos se representan por inyecciones de corriente, por lo que todas las ecuaciones algebraicas de conexión de los elementos con la red se expresan como equivalentes de Norton.

Para mejorar el condicionamiento del sistema es conveniente que el equivalente de Norton incluya una admitancia que se añade al elemento diagonal de  $Y_{BUS}$  correspondiente [Arrillaga and Arnold 1990, Dommel, 1972].

Por ejemplo, considere el modelo clásico de la máquina síncrona de la figura 3.5:

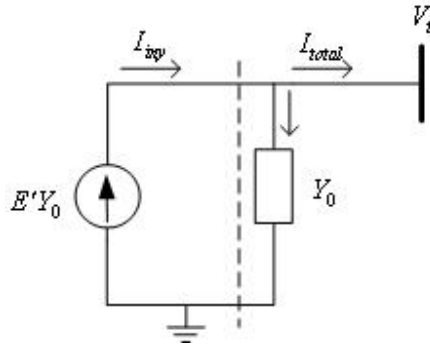


Figura 3.5 Circuito equivalente de Norton del modelo clásico de la máquina de polos lisos para la inyección de corriente [Arrillaga, 1990, Román, 1993]

$$Y_0 = \frac{r_a - jx'_d}{r_a^2 + x_d'^2} \quad (3.4)$$

$$I_{total} = Y_0 (E' - V_t) \quad Y_0 E' - Y_0 \tilde{V} = I_{iny} - Y_0 \tilde{V} \quad (3.5)$$

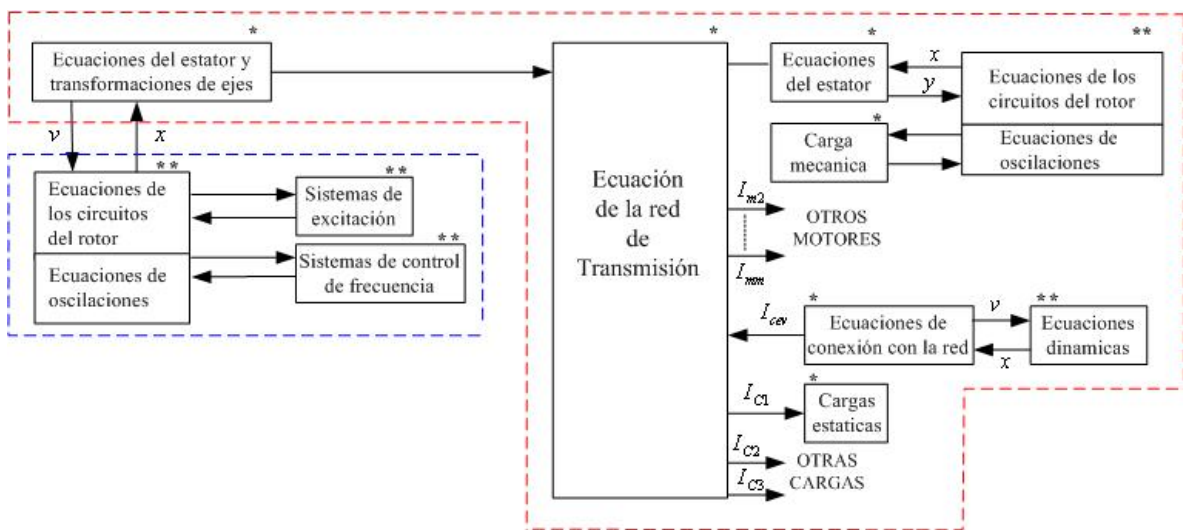
$$I_{iny} = Y_0 E' \quad (3.6)$$

En este modelo equivalente de Norton del generador se suman a la red las admitancias  $Y_0$  al elemento diagonal correspondiente al nodo terminal de la máquina

mientras que en el elemento correspondiente a este nodo del vector de inyecciones de corriente se le suma la inyección de corriente  $I_{iny}$ ; esta inyección de corriente se considera fija por 2 razones.

La primera es que no depende de la variable principal del sistema de ecuaciones (3.4), que es el voltaje en terminales  $V_t$ , la segunda razón es que en el modelo clásico de la maquina síncrona la magnitud de  $E'$  es constante.

En el siguiente diagrama muestra de manera esquemática la interacción de los elementos dinámicos y estáticos interconectados por medio de la red.



\* Ecuaciones algebraicas.

\*\*Ecuaciones diferenciales.

Figura.3.6 Diagrama esquemático de las iteraciones de los elementos dinámicos y estáticos interconectados con la red [Ruiz, 1996].

Todas las ecuaciones de los modelos que se conectan con la red son algebraicas y están en el marco de referencia de la red. Las admitancias de los equivalentes de Norton de todos estos modelos se incluyen en  $Y_{BUS}$

Las ecuaciones diferenciales de las motores de inducción están también referidos al marco de la red, mientras que en el caso de las maquinas sincronas, las ecuaciones diferenciales del rotor están en un marco de referencia fijo al rotor de la maquina [Ruiz, 1996].

### 3.3.1 Modelado de las Cargas Estáticas

Para este caso son todos las cargas estáticas que no incluyen motores es decir que tenga una corriente constante que dependa del voltaje si el voltaje es cero la corriente es cero, se propone utilizar un modelo general que permite representar en cada nodo una combinación de cargas con diferentes características.

$$P_c = P_0 \left[ K_{PC} + K_{PI} * \left( \frac{V}{V_0} \right)^1 + K_{PZ} * \left( \frac{V}{V_0} \right)^2 + K_{PI} * \left( \frac{V}{V_0} \right)^{pv1} (1 + n_{pf1} \Delta f) + K_{P2} * \left( \frac{V}{V_0} \right)^{pv2} * \left( \frac{f}{f_0} \right)^{pf2} \right] \quad (3.7)$$

$$Q_c = Q_0 \left[ K_{qC} + K_{qI} * \left( \frac{V}{V_0} \right)^{1.0} + K_{qZ} * \left( \frac{V}{V_0} \right)^{2.0} + K_{qI} * \left( \frac{V}{V_0} \right)^{qv1} (1 + n_{qf1} \Delta f) + K_{q2} * \left( \frac{V}{V_0} \right)^{qv2} * \left( \frac{f}{f_0} \right)^{qf2} \right] \quad (3.8)$$

Se define un valor de “bajo voltaje” (por ejemplo de 0.6 a 0.7pu) por debajo de lo cual la característica de carga se cambia a una característica de impedancia constante. La interacción de la carga con la red se representa por un modelo equivalente de Norton que esta compuesto por admitancias y una inyección de corriente, el modelo de carga se divide primero en dos componentes [Cañedo, 1980].

La parte con característica de impedancia constante y el resto de la inyección de corriente total de la carga se representa de la siguiente manera:

$$I_{carga} = Y_{PZ} * V_t - I_C \quad (3.9)$$

$$Y_z = \frac{K_{pz} P_0 - jK_{pz} Q_0}{V_0 V_0^*} \quad (3.10)$$

La parte de la carga con característica de Z constante. Se transforma en una admitancia  $Y_z$  que se incluye en  $Y_{BUS}$  con la longitud del nodo que se conecta a la carga, Se calcula con los valores iniciales de  $V_0$ ,  $P_0$  y  $Q_0$ .

$$Y_z = \frac{K_{PZ} P_0 - jK_{PZ} Q_0}{V_0 V_0^*} \quad (3.11)$$

Para mejorar la condición de la matriz de admitancia del nodo  $Y_{BUS}$  la parte de la carga no tiene una característica de Z constante, se transforma en una admitancia con los valores iniciales  $V_0$ ,  $P_0$  y  $Q_0$ . [Cañedo, 1980]. Para las condiciones iniciales la carga se transforma en una impedancia constante.



$$Y_c = \frac{(1 - K_{pz})P_0 - j(1 - K_{pz})Q_0}{V_0 V_0^*} \quad (3.12)$$

Al modelar la parte de la carga que no tiene característica de impedancia constante con una admitancia es necesario introducir una inyección de corriente de ajuste  $\Delta I_c$  que represente la desviación de la característica de esa carga con respecto a una característica de impedancia constante como se observa en la siguiente figura.

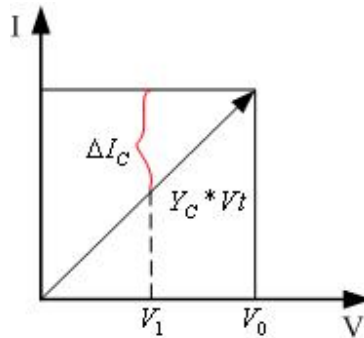


Figura 3.7 Característica para el ajuste de una impedancia constante [Cañedo, 1980].

El modelo equivalente de Norton de la carga estática sería:

$$I_{carga} = Y_z V_t + Y_c * V_t + \Delta I_c \quad (3.13)$$

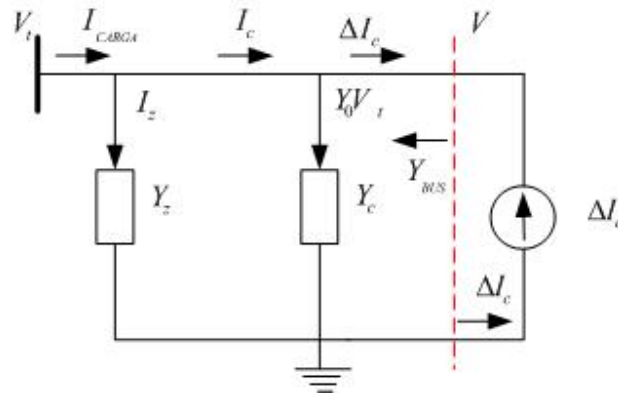


Figura 3.8 Representación del modelo de las cargas estáticas del equivalente de Norton para la inyección de corriente [Cañedo, 1980].

$$I = Y_{BUS} V \quad (3.14)$$

La corriente  $I_c$  para diferentes valores de  $V$  durante la simulación esta dada por:

$$P_C = P_0 \left[ K_{p1} \left( \frac{V}{V_0} \right) + K_{pC} + K_{p1} \left( \frac{V}{V_0} \right)^{pv1} (1 + npf_1 \Delta f) + K_{p2} \left( \frac{V}{V_0} \right)^{pv2} * \left( \frac{f}{f_0} \right)^{fv2} \right] \quad (3.15)$$

$$Q_C = Q_0 \left[ K_{q1} \left( \frac{V}{V_0} \right) + K_{qC} + K_{q1} * \left( \frac{V}{V_0} \right)^{qv1} (1 + nqf_1 \Delta f) + K_{q2} \left( \frac{V}{V_0} \right)^{qv2} * \left( \frac{f}{f_0} \right)^{fv2} \right] \quad (3.16)$$

$$\Delta I_C = I_C - Y_C V_t \quad (3.17)$$

Finalmente dado que las admitancias  $Y_Z$  y  $Y_C$  son incluidas en el elemento diagonal correspondiente al nodo en el que esta conectado la carga, la inyección de corriente que se suma al elemento relacionado con el nodo terminal de la carga en el vector de inyección de corriente del sistema es  $\Delta I_C$ , el cual es negativo debido a que la corriente sale de la red [Cañedo, 1980].

Las potencias totales consumidas por la carga para cada valor de  $V$  se calculan finalmente como:

$$S_{carga} = VI_{carga}^* \quad (3.18)$$

$$P_{carga} = \text{Re} [ S_{carga} ] \quad (3.19)$$

$$Q_{carga} = \text{Im} [ S_{carga} ] \quad (3.20)$$

### 3.3.2 Representación de los Modelos Dinámicos

Los elementos dinámicos del sistema de potencia son las máquinas eléctricas rotatorias, Facts y sus controles, y son representados por una parte algebraica que modela la conexión del elemento dinámico con la red y un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales de la forma:

$$\dot{x} = f(x, v, u) \quad (3.21)$$

Donde:

- $x$  es el vector de variables de estado.
- $v$  es el vector de voltajes nodales.
- $u$  es el vector de entradas.

Este sistema de ecuaciones diferenciales representa la dinámica del rotor de las maquinas eléctricas rotatorias, los transitorios mecánicos y eléctricos, así como los sistemas de control [Dommel, 1972].

El método de integración mas utilizado es la regla trapezoidal de integración. En este algoritmo la solución al final del paso de integración  $n+1$  esta dado por:

$$x_{n+1} = x_n + \frac{h}{2} [f(x_{n+1}, t_{n+1}) + f(x_n, t_n)] \quad (3.22)$$

El algoritmo trapezoidal es conocido como una fórmula de dos puntos debido a que se necesitan los valores de  $\dot{x}(t)$  en dos instantes de tiempo  $t_{n+1}$  y  $t_n$ . También es un método implícito ya que la variable desconocida  $x_{n+1}$  está en ambos lados de la ecuación 3.22 [Chua and Lin, 1975]. La regla trapezoidal tiene una exactitud de segundo orden, siendo el primer término el error de truncamiento igual  $-\frac{1}{2}h^3$  [Arrillaga y Arnold 1990].

La principal razón para la elección de la regla trapezoidal de integración es que es un método A-estable [Dommel, 1972] incondicionalmente estable [Arrillaga y Arnold 1990], esto indica que la rigidez del sistema que es analizado afecta su exactitud, pero no su estabilidad numérica, con pasos de integración mayores se filtran los métodos de alta frecuencia y los transitorios rápidos, y la solución para modos mas lentos es mas cercana a la exacta [Kundur 1994], esta propiedad permite utilizar pasos de integración mayores que los usados en los métodos explícitos [Dommel, 1972, Cañedo, 1980].

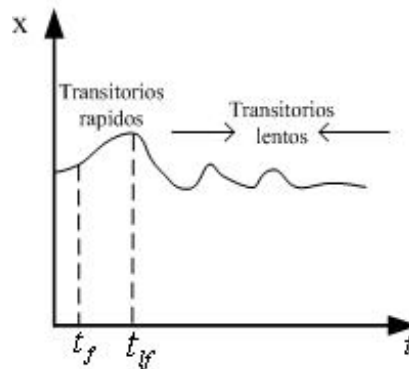


Figura 3.9 Representación numérica de la regla trapezoidal de integración.

El ejemplo anterior se presenta a continuación con la misma falla y con el mismo tiempo de duración de la falla pero con diferente paso de integración.

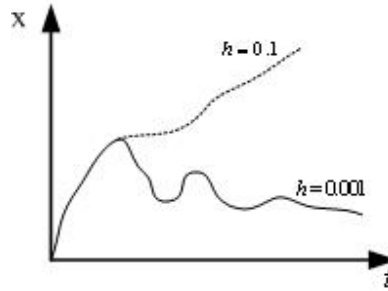


Figura 3.10 Representación del análisis del método numérico con diferente pasó de integración.

Han sido propuesto métodos implícitos de mayor orden en la literatura de métodos numéricos, pero no han sido empleados ampliamente en aplicaciones de sistemas de potencia [Kundur 1994], esto se debe a que son mas difíciles de programar y son menos estable que la regla trapezoidal, ya que se a demostrado que un método lineal multipaso A-estable ( $x_{t_{n+1}}$  y  $t_n$ ) no puede tener un orden mayor de 2, y por lo tanto la regla trapezoidal es el método de diferencias finitas A-estable mas exacto posible [Arrillaga and Arnold, 1990, Chua and Lin, 1975].

### 3.4 MODELO DEL CEV PARA ESTUDIOS DINÁMICOS

Varios aspectos son de importancia en la representación de CEV en estudios dinámicos, entre los que se pueden mencionar:

- La representación de la interacción del compensador con el sistema de potencia.
- La representación del sistema de control incluyendo sus limitadores y otras no linealidades.
- La determinación de las condiciones iniciales del modelo del CEV.
- La representación apropiada del compensador en el sistema en p.u. del sistema de potencia.

#### 3.4.1. Interacción del CEV con la Red de Transmisión

La mayoría de los programas de simulación utilizados en la actualidad incorpora métodos de solución del tipo implícito simultáneo. En estos programas de simulación que utilizan la regla trapezoidal de integración, la interacción del compensador con la red debe representarse por un equivalente de Norton formado por una fuente variable de corriente en paralelo con una admitancia fija opcional [Enrimez 1986 , Gerin-Lajoie 1990] (Figura. 3.11).

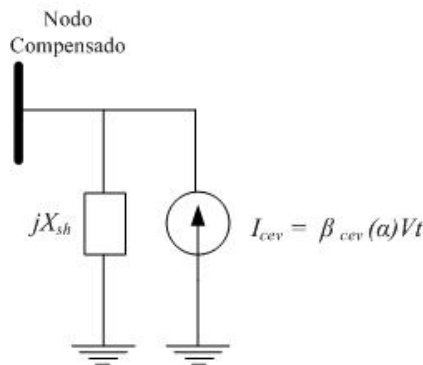


Figura. 3.11 Equivalente de Norton de la iteración del CEV-SEP [Messina, 1993].

La fuente de corriente esta en función de la susceptancia del CEV y su magnitud esta dada por la relación:

$$I_{cev} = \Delta I_{cev} \quad (\text{sin admitancia}) \quad (3.23)$$

$$I_{cev} = \Delta I_{cev} - Y_{cev} V_t \quad (\text{con admitancia}) \quad (3.24)$$

La admitancia en paralelo permite representar por separado capacitores fijos en paralelo (o reactores) que formen parte del esquema de compensación. Los modelos presentados en la siguiente sección no incluyen la admitancia en paralelo.

### 3.5 MODELOS BÁSICOS DEL CEV PARA ESTUDIOS DINÁMICOS

Para modelar las características dinámicas del compensador estático de vars, se presentan dos modelos para programas de estabilidad propuestos por el IEEE [IEEE 1994]. Los modelos básicos del CEV son detallados en el apéndice B.

La estructura del modelo básico 1 y el modelo básico 2 son similares excepto por el método de representación de la pendiente [IEEE 1994], en la figura 3.12 se presenta el modelo básico 1, del CEV el cual consta de un transductor, un compensador, un regulador de voltaje, un disparo de tiristores y por último un bloque de adaptación. Estos bloques son descritos en la figura B.1 del apéndice B.

En la figura 3.13 se presenta el modelo básico 2 del CEV, el cual consta de un transductor, un ajuste de la pendiente diferente al del bloque 1, un regulador de voltaje, un bloque de control de susceptancia por tiristores, una retroalimentación de corriente y por último un bloque de adaptación. Estos bloques son descritos posteriormente en la figura B.7 del apéndice B.

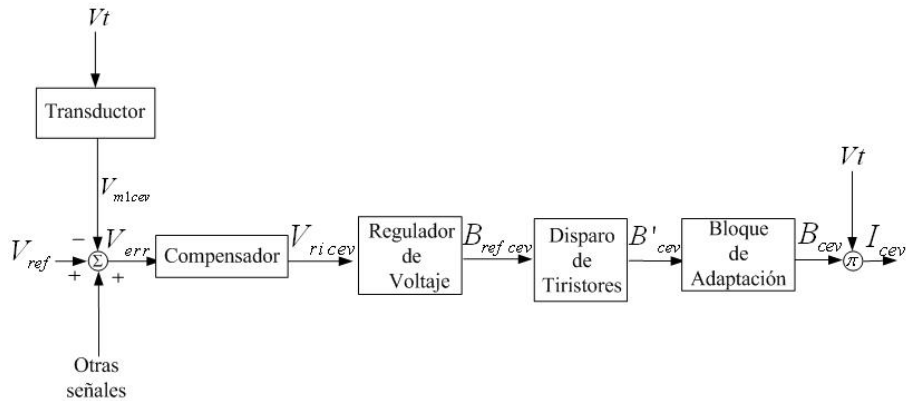


Figura 3.12 Modelo básico 1 del CEV [IEEE, 1994].

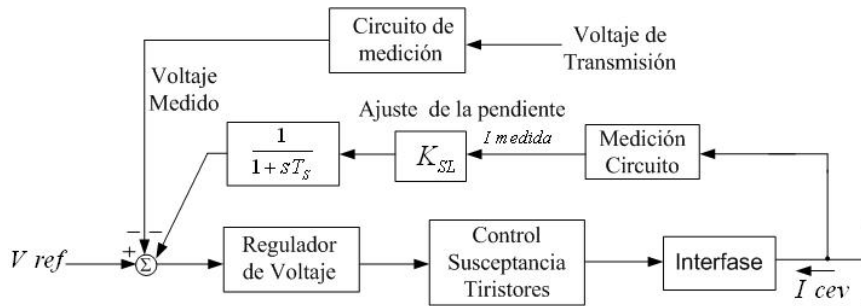


Figura 3.13 Modelo básico 2 del CEV [IEEE, 1994].

Básicamente la diferencia entre estos dos modelos es la forma en la cual se ajusta la pendiente. El modelo 1 de la figura 4.15 tiene una relación lineal entre voltaje y la susceptancia. El modelo 2 de la figura 3.13 utiliza una retroalimentación de la corriente, que produce una relación lineal entre el voltaje y la corriente [IEEE 1994]. En el apéndice B se presenta una descripción general de los 2 modelos del CEV obteniendo se las ecuaciones de estados de los modelos mencionados anteriormente.

### 3.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos del análisis de la estabilidad transitoria utilizando los 2 modelos básicos 1 y 2 recomendados por la IEEE, evaluando el comportamiento que presentan al ser modelados en los nodos mas críticos del sistema de prueba.

En esta sección se analizan tres casos principales:

- El primer caso analiza el modelo básico 1 utilizando dos diferentes conjuntos de parámetros: los primeros parámetros son tomados de [Messina 1990] y los resultados de éstos se comparan con los resultados obtenidos con los parámetros sintonizados del apéndice C.

- Para el segundo caso se analizan 3 CEV's representados por el modelo básico 1 en los nodos más críticos del sistema de prueba, desde el punto de vista de estabilidad transitoria. Se observa el comportamiento que presenta la múltiple compensación. Para el primer análisis se consideran los parámetros de la tabla A.10 de la tesis del Dr. Messina [Messina 1990] y sus resultados se comparan con los obtenidos utilizando los parámetros de la sintonización presentados en la tabla C.4 del apéndice C.
- Para el tercer caso se presenta el análisis de la estabilidad transitoria utilizando el modelo básico 2 del CEV con retroalimentación descrito en el apéndice B sus parámetros son obtenidos por medio de la sintonización utilizando el lenguaje de MATLAB - SIMULINK.

Principalmente para determinar la ubicación de los modelos del CEV se analiza el sistema de prueba Nueva Inglaterra [Malek et al 1990]. Las simulaciones se realizan por medio de un programa desarrollado en FORTRAN (estudio de estabilidad transitoria) [Ruiz, 1996] al cual se le han incluido los modelos dinámicos del CEV.

Se simulan contingencias que consisten en aplicar fallas trifásicas a todos los nodos que forman al sistema de prueba Nueva Inglaterra [Malek et al 1990], las cuales son liberadas desconectando una línea a la vez (criterio N-1). Se aplican las contingencias procurando no eliminar líneas que ocasionen que el sistema se separe en islas eléctricas.

### 3.6.1 Sistema de prueba sin CEV

La tabla A-8 del apéndice A presentan los tiempos críticos de todo el sistema de prueba. En la Tabla 3.1 se presentan un resumen de los nodos más críticos del sistema de prueba (los nodos que tiende a inestabilizarse en un tiempo mas corto), los cuales son propuestos para modelar al CEV y comparar el comportamiento que presenta el sistema de potencia de prueba con y sin el modelado del CEV.

**Tabla 3.1.- Tiempos críticos de liberación de los nodos mas críticos sin el CEV.**

Nodo Fallado	Líneas Desconectadas	Tiempo Crítico (s)	Tiempo Inestable
36	36 - 37	0.10 .- (6.0 Ciclos)	0.11 Seg. (6.6 Ciclos)
26	26 - 27	0.10 Seg.- (6.0 Ciclos)	0.11 Seg. (6.6 Ciclos)
36	36 - 38	0.10 Seg.- (6.0 Ciclos)	0.11 Seg. (6.6 Ciclos)
31	31 - 32	0.11 Seg.-(6.6 Ciclos)	0.12 Seg. (7.2 Ciclos)

En la figura 3.14 se presenta el comportamiento de la magnitud del voltaje en e los nodos más cercanos a la falla, aplicada específicamente en el nodo 36. La figura 3.14 a) representa el comportamiento de la magnitud del voltaje en los nodos para el

tiempo crítico y la figura 3.14 b) presenta el comportamiento de la magnitud del voltaje en los nodos con un tiempo inestable. Se puede observar que la falla afecta de manera importante a los voltajes en los nodos cercanos, que siguen de manera importante la tendencia del nodo fallado.

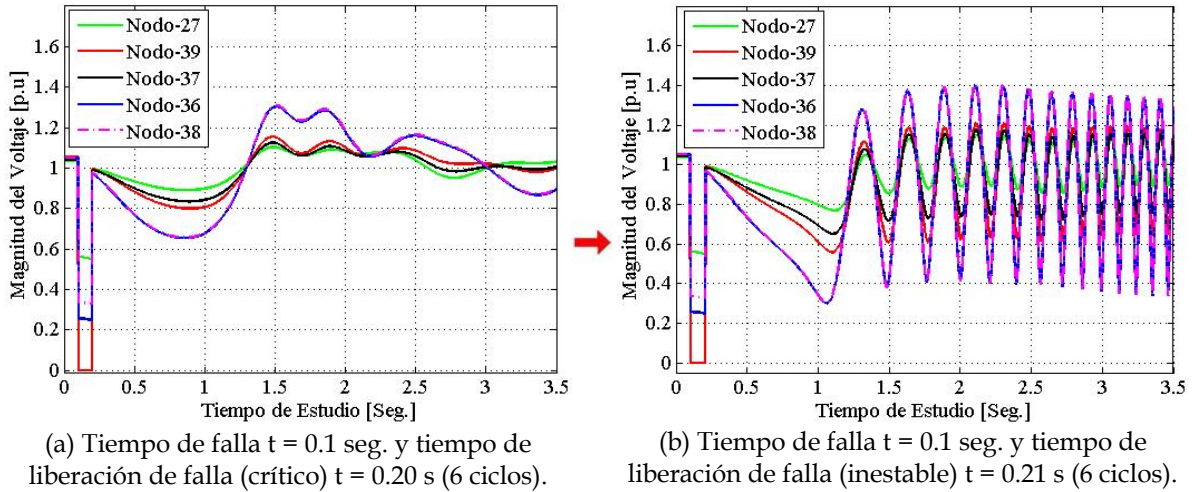


Figura 3.14 Sistema de Nueva Inglaterra : comparación de la magnitud del voltaje en los nodos más cercanos a la falla trifásica aplicada en el nodo 36 sin el modelado del CEV.

La falla trifásica tiende a afectar a los generadores del sistema de prueba y en específico a los que se ubican cerca de la falla trifásica, los cuales tienden a inestabilizarse. En las figuras 3.15 a 3.18 se presenta el comportamiento de las magnitudes de voltaje, las corrientes en las terminales, las potencias reactivas y la velocidades de los generadores síncronos cercanos a la falla trifásica.

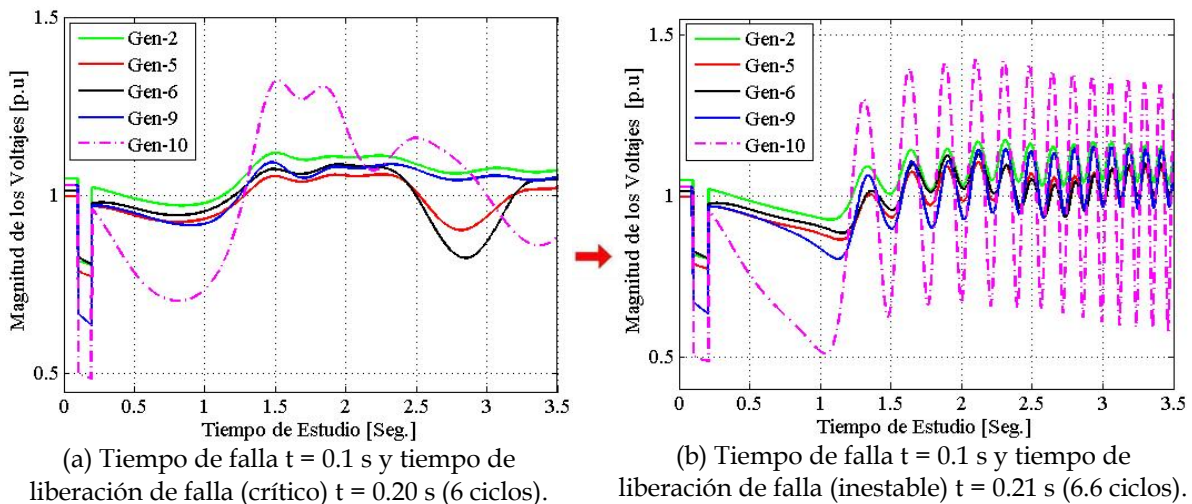


Figura 3.15 Sistema de Nueva Inglaterra: comparación del voltaje de los generadores que se ubican cerca de la falla trifásica aplicada en el nodo 36 sin el modelado del CEV, b).- considerando el mismo tiempo de falla y un tiempo de liberación de falla de  $t = 0.21$  Seg. (6.6 ciclos) considerándose inestable.



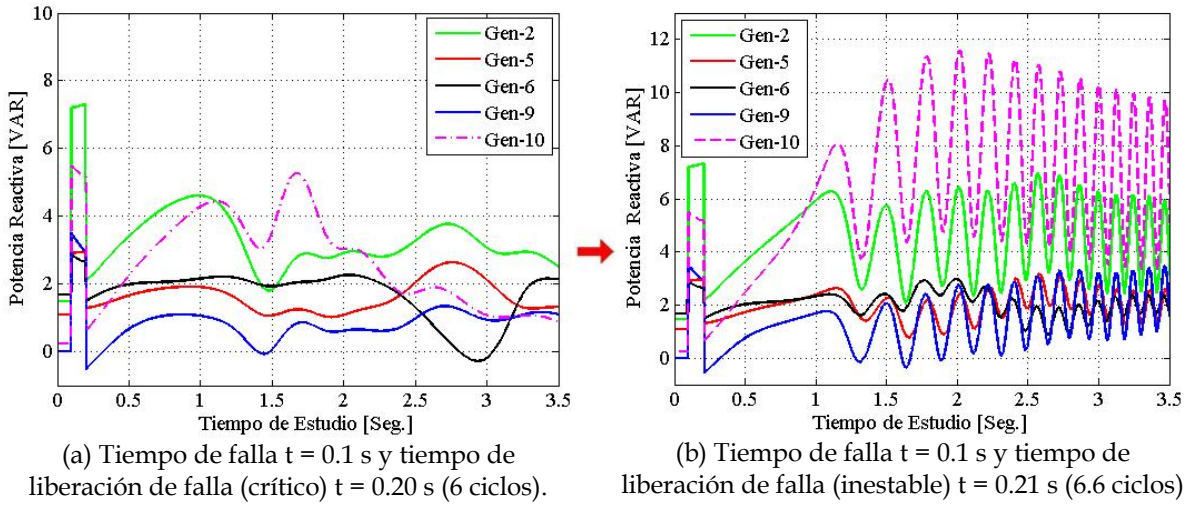


Figura 3.16 Sistema de Nueva Inglaterra: comparación de la potencia reactiva de los generadores mas cercanos a la falla trifásica aplicada en el nodo 36, sin el modelado del CEV.

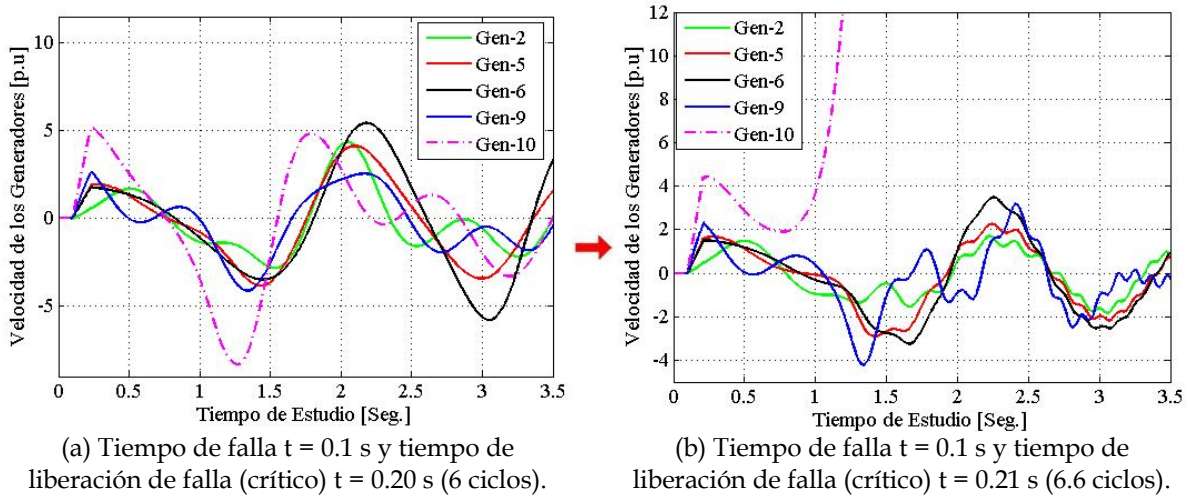


Figura 3.17 Sistema de Nueva Inglaterra: comparación de la velocidad de los generadores que se ubican cerca de falla trifásica aplicada en el nodo 36.

### 3.6.2 Sistema de prueba con un CEV (modelo 1)

El primer caso que se presenta considera representar en el nodo 38 al modelo básico 1 del CEV. Se analiza la estabilidad del sistema bajo las mismas condiciones de simulación presentadas anteriormente en § 3.6.1.

El comportamiento que presentan los nodos más críticos presentados en la Tabla 3.1 se analiza ahora considerando el efecto del CEV con el modelo básico 1, utilizando los parámetros de la tabla A-9 del apéndice A. Los resultados se presentan en la Tabla 3.2.

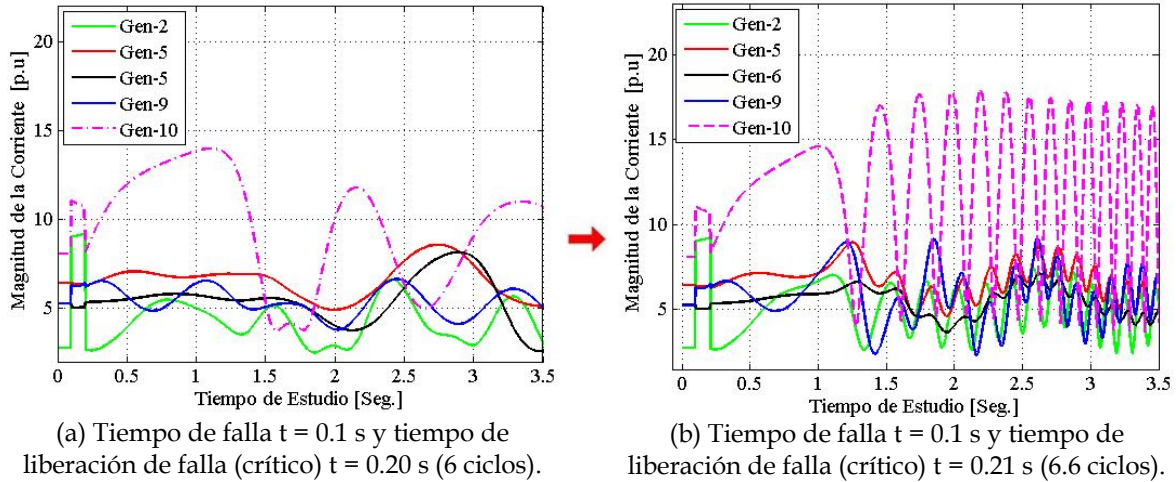


Figura 3.18 Sistema de Nueva Inglaterra: comparación de la magnitud de la corriente de los generadores se ubican cerca de la falla trifásica aplicada en el nodo 36.

**Tabla 3.2.- Tiempos críticos de liberación de los nodos mas críticos con un CEV.**

Nodo Fallado	Líneas Desconectadas	Tiempo Critico	Tiempo Inestable
36	36 - 37	0.13 Seg. (7.8 ciclos)	0.14 Seg. (8.4 ciclos)
26	26 - 27	0.10 Seg. (6.0 ciclos)	0.11 Seg. (6.6 ciclos)
36	36 - 38	0.13 Seg. (7.8 ciclos)	0.14 Seg. (8.4 ciclos)
31	31 - 32	0.11 Seg. (6.6 ciclos)	0.12 Seg. (7.2 ciclos)

Los nodos mas críticos del sistema de prueba tiende a incrementar su tiempo en  $t = 0.03$  Seg. (0.6 ciclos) ante una falla trifásica cuando se incluye el CEV en el nodo 38.

El comportamiento dinámico que presentan los elementos que se ubican cerca de la falla trifásica (nodos y generadores) considerando el CEV son similares a los obtenidos cuando el sistema no incluía ningún CEV. La mayor diferencia es que el sistema obtuvo tiempos críticos de liberación mayores a los resultados obtenidos sin el modelado del CEV.

En la figura 3.19 se presenta el comportamiento de la magnitud del voltaje en el nodo 38 con y sin el modelado del CEV, aplicando la falla trifásica en  $t = 0.1$  s en el nodo 36 y liberando la falla en el tiempo crítico de liberación de casa caso ( $t = 0.20$  s y  $t = 0.23$  s respectivamente).

La figura 3.20 compara la magnitud del voltaje del nodo 38 considerándose el tiempo de liberación de la falla  $t = 0.21$  s (6.6 ciclos) sin el modelado del CEV (caso inestable), y con el CEV (estable).

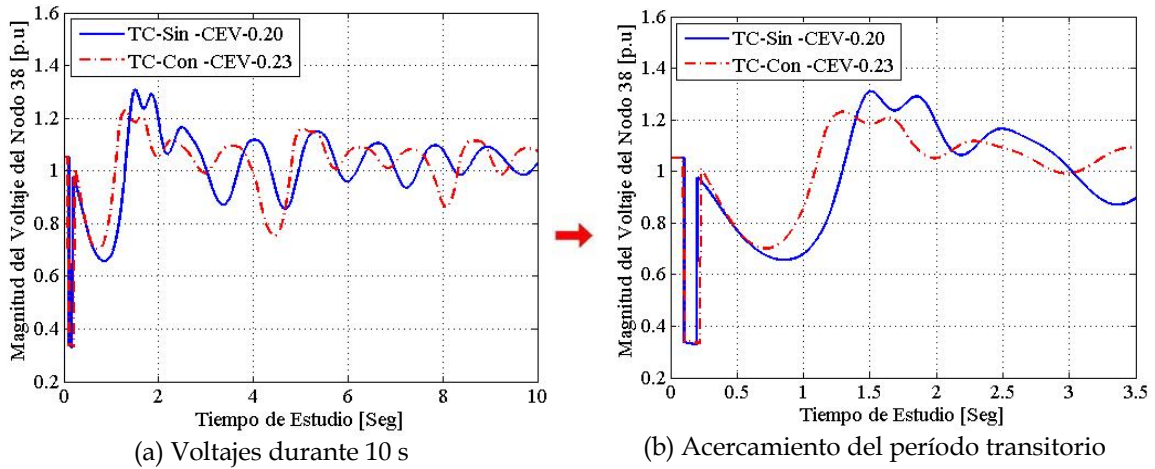


Figura 3.19 Sistema de Nueva Inglaterra: comparación del voltaje en el nodo 38 sin y con el CEV con un tiempo de falla de  $t = 0.1$  s y un tiempo de liberación de falla  $t = 0.20$  seg. (6 ciclos) sin CEV y  $t = 0.23$  s. (7.8 ciclos) con CEV

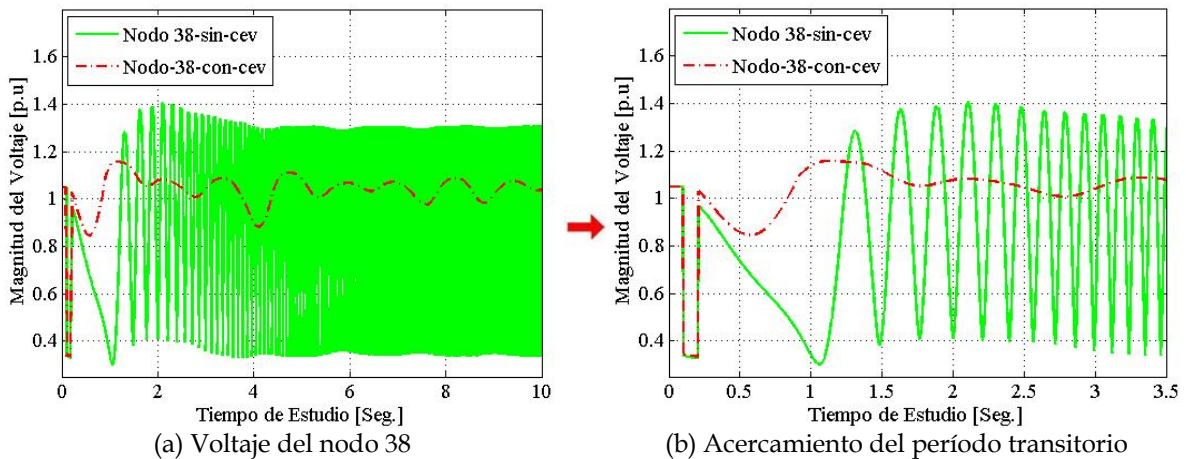
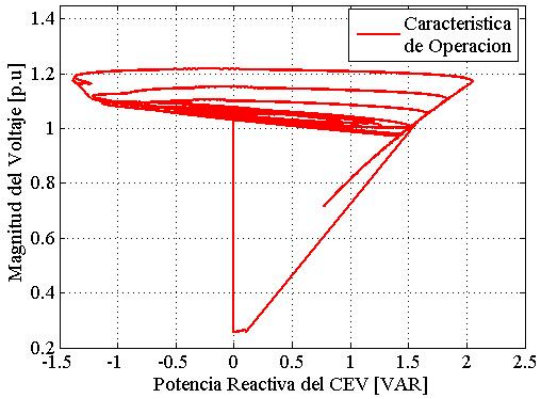


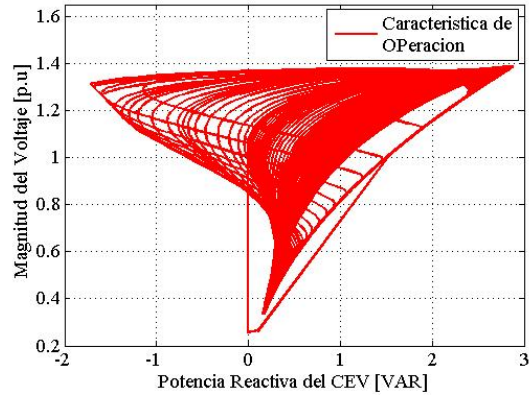
Figura 3.20 Sistema de Nueva Inglaterra: a).-Comparación de la Magnitud del voltaje en el nodo 38 con y sin el modelado del CEV con un tiempo de falla de  $t = 0.1$  seg. y tiempo de liberación de falla de  $t = 0.21$  seg. (6.6 ciclos), b).- se presenta un acercamiento del análisis.

Las figuras 3.21 a 3.23 muestran la evolución de las variables del CEV durante el transitorio considerando que se aplica una falla en  $t = 0.10$  s y que se libera la falla en el tiempo (crítico)  $t = 0.23$  s y en el primer tiempo inestable,  $t = 0.24$ s.

Se puede observar en la figura 3.21 que la característica dinámica del CEV varía con la misma tendencia pero no sigue exactamente la característica estática. Las figuras 3.22 y 3.23 muestran la evolución de la susceptancia y la corriente del CEV en el tiempo durante las simulaciones para el tiempo crítico de liberación y el primer tiempo inestable.

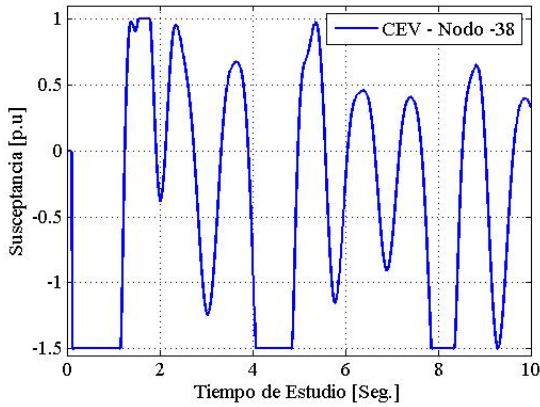


(a) Tiempo de falla  $t = 0.1$  s y tiempo de liberación de falla (crítico)  $t = 0.23$  s (7.8 ciclos).

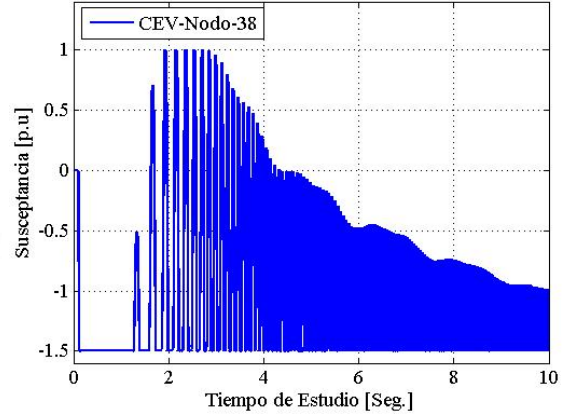


(b) Tiempo de falla  $t = 0.1$  s y tiempo de liberación de falla (inestable)  $t = 0.24$  s (8.4 ciclos).

Figura 3.21 Característica dinámica del CEV (modelo Básico 1): variación del voltaje ante cambios de la potencia reactiva para dos tiempos de liberación de la falla.

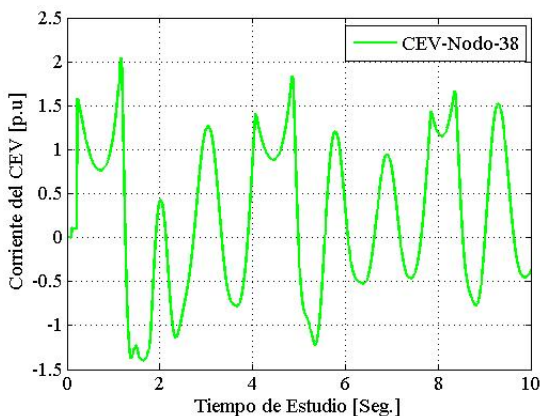


(a) Tiempo de falla  $t = 0.1$  s y tiempo de liberación de falla (crítico)  $t = 0.23$  s (7.8 ciclos).

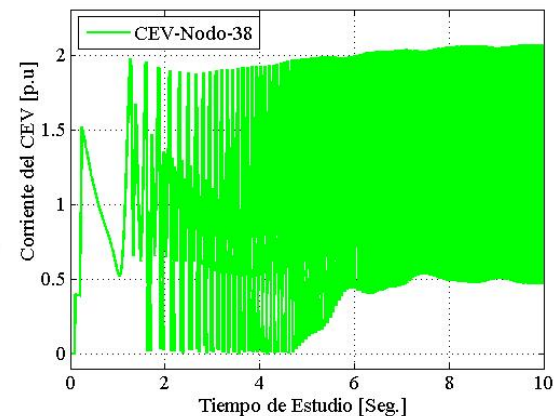


(b) Tiempo de falla  $t = 0.1$  s y tiempo de liberación de falla (inestable)  $t = 0.24$  s (8.4 ciclos).

Figura 3.22 Modelo Básico1: variación de la susceptancia equivalente del CEV durante el transitorio ante dos tiempos de liberación de la falla.



(a) Tiempo de falla  $t = 0.1$  s y tiempo de liberación de falla (crítico)  $t = 0.23$  s (7.8 ciclos).



(b) Tiempo de falla  $t = 0.1$  s y tiempo de liberación de falla (inestable)  $t = 0.24$  s (8.4 ciclos).

Figura 3.23 Modelo Básico1: variación de la corriente en las terminales del CEV durante el transitorio ante dos tiempos de liberación de la falla.

En la figura 3.24 se presenta una comparación del comportamiento dinámico del modelo básico 1 del CEV utilizando los parámetros tomados de la tabla A-7 del apéndice A de [Messina, 1990] ( $K_P = 50$ ) con los parámetros obtenidos en la sintonización que se presenta en la tabla C.3 del apéndice C de este trabajo ( $K_P = 113.65$ ).

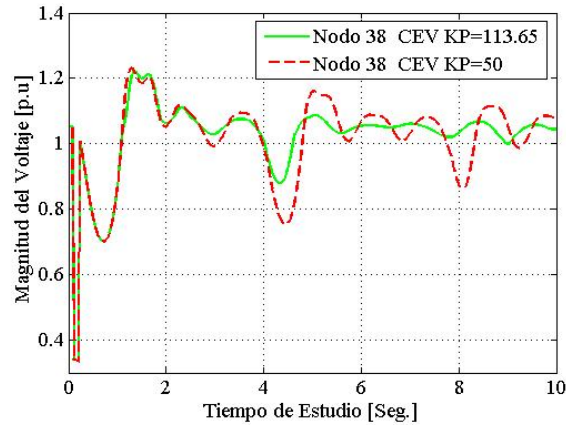
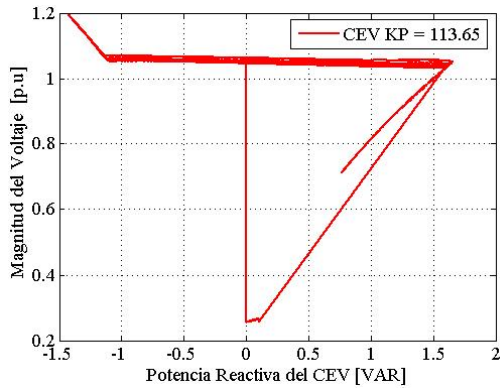


Figura 3.24 Sistema de Nueva Inglaterra con el modelo básico 1 del CEV: comparación de la variación de la magnitud del voltaje del nodo 38 utilizando  $K_P = 50$  [Messina, 1990] comparados con el caso utilizando  $K_P = 113.65$  (tabla C.3 del apéndice C). Se aplica una falla en  $t = 0.1$  que es liberada en  $t = 0.23$  s).

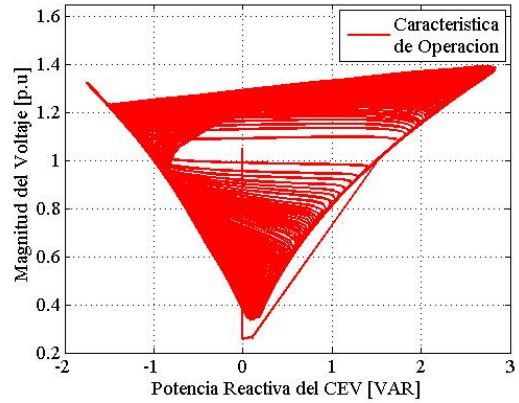
Se puede observar en la figura 3.24 que la diferencia principal en los ajustes se da después de las primeras oscilaciones, observándose que ambos casos tienen el mismo tiempo crítico de liberación, pero el caso sintonizado en el Apéndice C tiene un mejor amortiguamiento.

En las figuras 3.25 a 3.27 se presentan los cambios en las variables del modelo básico 1 del CEV con los parámetros sintonizados en el Apéndice C ( $K_P = 113.65$ ). Se presentan en las figuras 3.25, 3.26 y 3.27 la característica dinámica del CEV, la susceptancia equivalente y la corriente en terminales, respectivamente, cuando se aplica una falla trifásica en el nodo 36 en  $t = 0.1$  s que se libera en dos tiempos al desconectar la línea 36-38:  $t = 0.23$  s (caso crítico) y  $t = 0.24$  s (primer caso inestable).

En la figura 3.25 se puede observar que utilizando una ganancia mayor, la característica dinámica del CEV se acerca más a la característica estática. Esta puede ser la razón de que se tengan menos variaciones en el estado de postfalla, ya que los límites de potencia reactiva de los modelos considerando los ajustes ( $K_P = 50$ ) [Messina, 1990] y del apéndice C ( $K_P = 113.65$ ) son los mismos.

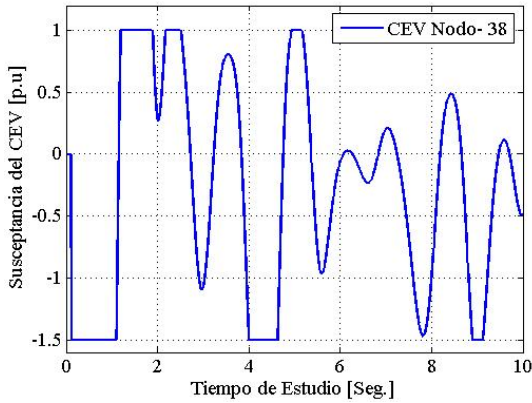


(a) Tiempo de falla  $t = 0.1$  s y tiempo de liberación de falla (crítico)  $t = 0.23$  s (7.8 ciclos).

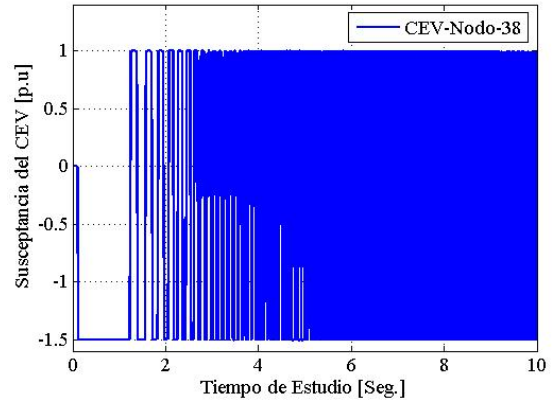


(b) Tiempo de falla  $t = 0.1$  s y tiempo de liberación de falla (inestable)  $t = 0.24$  s (8.4 ciclos).

Figura 3.25. Característica dinámica del CEV (modelo Básico 1) con  $(K_p = 113.65)$  : variación del voltaje ante cambios de la potencia reactiva para dos tiempos de liberación de la falla.

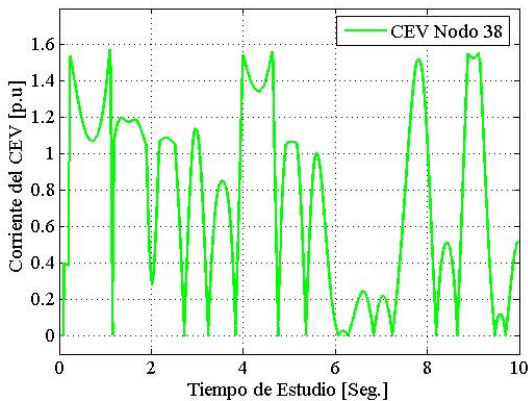


(a) Tiempo de falla  $t = 0.1$  s y tiempo de liberación de falla (crítico)  $t = 0.23$  s (7.8 ciclos).

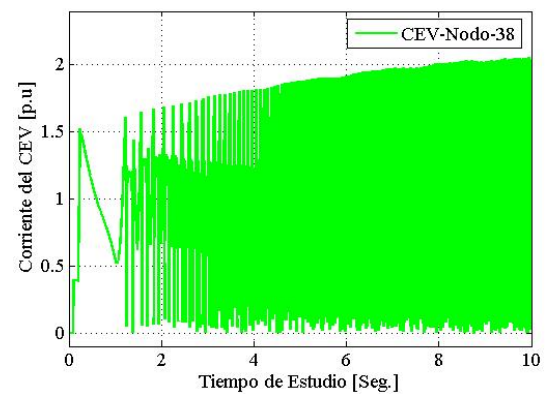


(b) Tiempo de falla  $t = 0.1$  s y tiempo de liberación de falla (inestable)  $t = 0.24$  s (8.4 ciclos).

Figura 3.26 Modelo Básico1: variación de la susceptancia equivalente del CEV con  $K_p = 113.65$ , durante el transitorio ante dos tiempos de liberación de la falla.



(a) Tiempo de falla  $t = 0.1$  s y tiempo de liberación de falla (crítico)  $t = 0.23$  s (7.8 ciclos).



(b) Tiempo de falla  $t = 0.1$  s y tiempo de liberación de falla (inestable)  $t = 0.24$  s (8.4 ciclos).

Figura 3.27 Modelo Básico1 con  $K_p = 113.65$ : variación de la corriente en las terminales del CEV durante el transitorio ante dos tiempos de liberación de la falla.

### 3.6.3 Sistema de prueba con tres CEV (modelo 1)

El segundo caso que se presenta considera al modelo básico 1 del CEV para una compensación múltiple instalando CEVs en los nodos 36, 37 y 38 del sistema de prueba, por ser los nodos críticos del sistema sin CEV. Se considera una falla trifásica en el nodo 36 y se observa el comportamiento que presenta el sistema con el modelado del CEV. En este análisis se consideran los parámetros de la tabla A.10 del apéndice A.

Se consideran las mismas condiciones de simulación utilizadas anteriormente en § 3.6.1 y 3.6.2. En la tabla 3.3 se presenta la comparación de los tiempos críticos de la liberación de la contingencia más severa considerando al sistema sin CEV ( $t_{cr} = 0.13$  s) y con 3 CEV ( $t_{cr} = 0.17$  s).

**Tabla 3.3.- Comparación de tiempos críticos de liberación de la contingencia crítica.**

Caso	Nodo Fallado	Nodos Estudios	Líneas Desconectadas	Tiempo Crítico	Tiempo Inestable
Sin CEV	36	36, 37 y 38	36 - 38	0.13 s (7.8 ciclos)	0.14 s (8.4 ciclos)
Con 3 CEV	36	36, 37 y 38	36 - 38	0.17 s (10.2 ciclos)	0.18 s(10.8ciclos)

La figura 3.28 muestra gráficamente la evolución en el tiempo de las magnitudes de voltaje de los nodos cercanos a la falla. Se puede observar que los voltajes en los nodos 36, 37 y 38 son controlados de manera adecuada por los CEV instalados, mientras que el caso sin CEV es inestable.

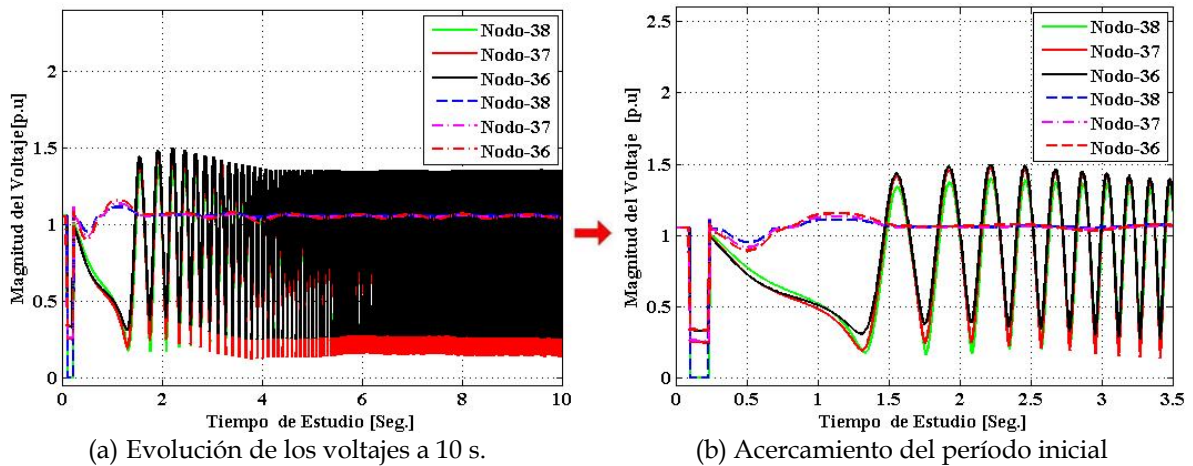
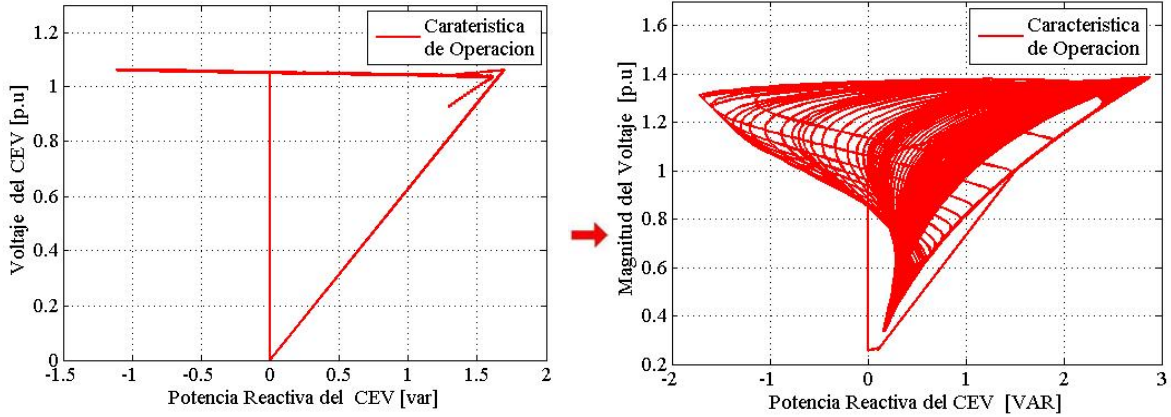


Figura 3.28 Análisis del Sistema de Nueva Inglaterra con una compensación múltiple (3 CEVs) .- Comparación de la Magnitud del voltaje de los nodos 36, 37 y 38 con y sin el modelado del CEV con un tiempo de falla de  $t = 0.1$  seg. y tiempo de liberación de falla de  $t = 0.13$  seg. (7.8 ciclos).

En la figura 3.29 se presenta la característica dinámica de operación del modelo del CEV que se conecta al nodo 38 considerando una múltiple compensación donde

la magnitud del voltaje que presenta el nodo de conexión con respecto a la potencia reactiva varían para mantener estable al sistema eléctrico de potencia.

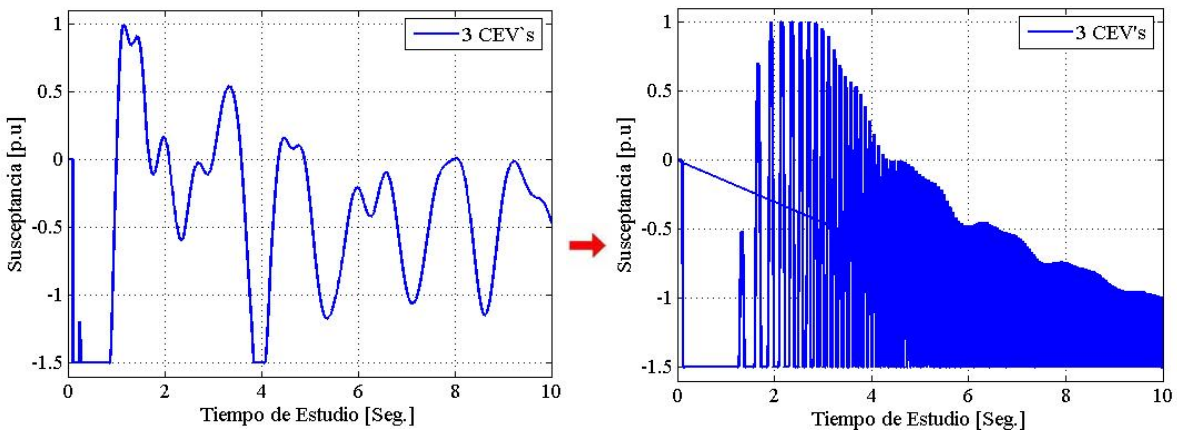


(a) Tiempo de falla  $t = 0.1$  s y tiempo de liberación de falla (crítico)  $t = 0.27$  s (10.2 ciclos).

(b) Tiempo de falla  $t = 0.1$  s y tiempo de liberación de falla (crítico)  $t = 0.28$  s (10.8 ciclos).

Figura 3.29 Característica de operación en estado dinámico del CEV en el nodo 38 cuando se tiene compensación múltiple en los nodos 36, 37 y 38.

En la figura 3.30 se presenta el comportamiento de la susceptancia del CEV.



(a) Tiempo de falla  $t = 0.1$  s y tiempo de liberación de falla (crítico)  $t = 0.27$  s (10.2 ciclos).

(b) Tiempo de falla  $t = 0.1$  s y tiempo de liberación de falla (crítico)  $t = 0.28$  s (10.8 ciclos).

Figura 3.30 Susceptancia equivalente del modelo básico 1 del CEV en el nodo 38 considerando la aplicación de compensación múltiple en los nodos 36, 37 y 38.

Los resultados de la figura 3.29 muestran que, en el caso en que se tiene compensación múltiple, la característica dinámica del CEV en el nodo 38 se desvía menos de su característica en estado estacionario que en el caso de aplicar un solo CEV. Esto se debe principalmente a que cuando se tiene un solo CEV este debe controlar el voltaje sin ayuda externa, por lo que trabaja mucho más que en el caso de la compensación múltiple.



### 3.6.4 Sistema de prueba con un CEV (modelo 2)

El tercer caso que se presenta en esta tesis aplica el modelo básico 2 del CEV, el cual considera una retroalimentación de corriente, en el nodo 38. Se emplean las mismas condiciones de falla que se utilizaron anteriormente para el modelo básico 1 (§ 3.6.2). Principalmente en este tercer caso se presenta una comparación de la magnitud del voltaje utilizando los 2 modelos básicos del CEV, utilizando los parámetros del modelo básico 1 del CEV de la tabla A.9 del apéndice A y los del modelo básico 2 determinados por la sintonización de la tabla C.5 del apéndice C.

En la figura 3.31 se presenta la comparación de la magnitud del voltaje de los dos modelos básicos recomendados por la IEEE para la contingencia que aplica una falla en el nodo 36, en  $t = 0.1$  s, liberada en  $t = 0.23$  s, desconectando la línea 36-38. La figura 3.32 presenta una comparación de los dos modelos básicos del CEV considerando los parámetros del modelo básico 1 del CEV de la tabla C.2 del apéndice C y del modelo básico 2 utilizando los parámetros determinados por la sintonización de la tabla C.5 del apéndice C.

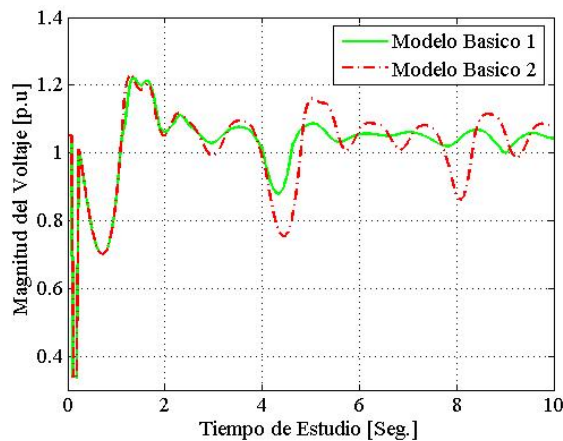


Figura 3.31 Comparación de la magnitud del voltaje de los dos modelos del CEV en el nodo 38.

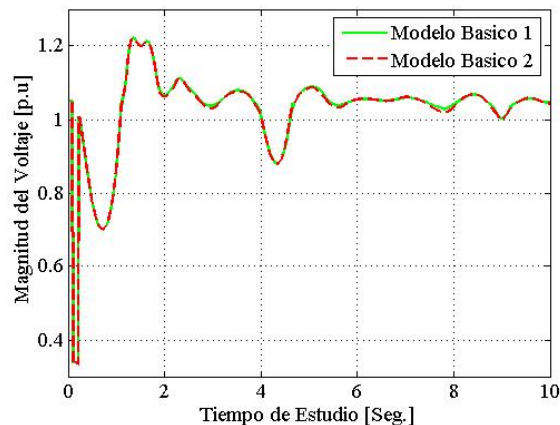
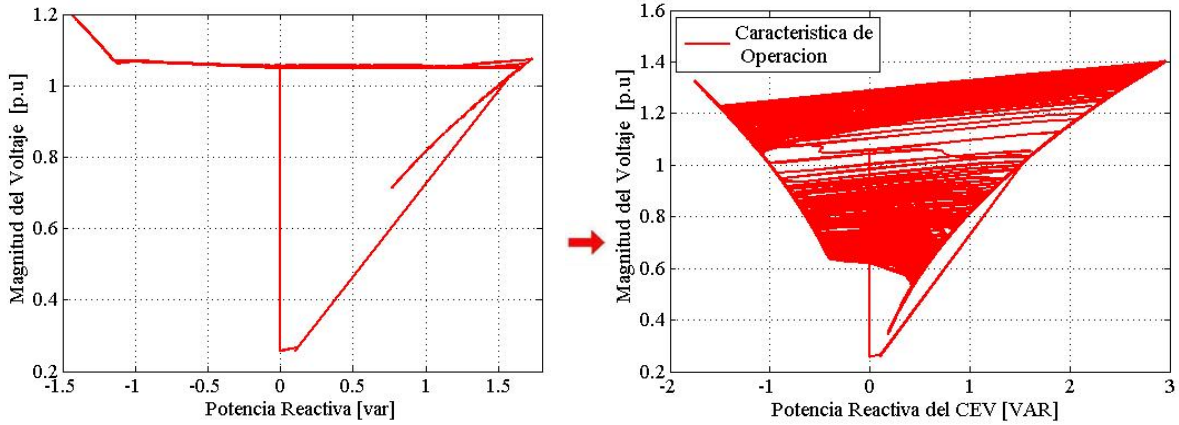


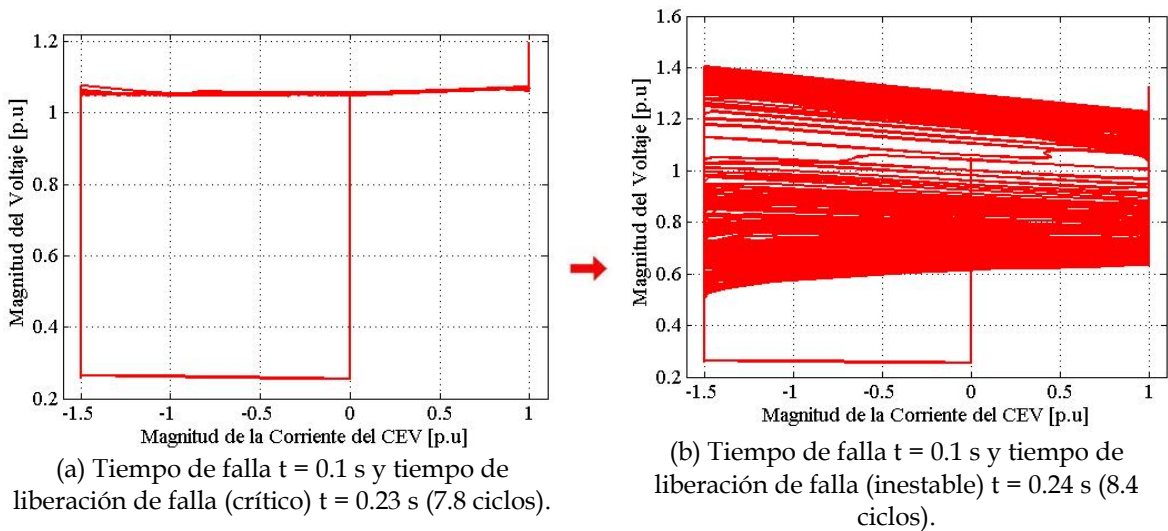
Figura 3.32 Comparación de la magnitud del voltaje de los dos modelos del CEV en el nodo 38 considerando los parámetros de la tabla C.3 para el modelo básico 1 y los parámetros de la tabla C.5 del apéndice C para el modelo básico 2.

Para esta falla el sistema de potencia tiene el mismo tiempo crítico de liberación al utilizar ambos modelos sintonizados del CEV.

Las figuras 3.33 y 3.34 presentan las características dinámicas de operación del modelo básico 2 del CEV para el caso crítico y el primer caso inestable de la contingencia considerada.



(a) Tiempo de falla  $t = 0.1$  s y tiempo de liberación de falla (crítico)  $t = 0.23$  s (7.8 ciclos). (b) Tiempo de falla  $t = 0.1$  s y tiempo de liberación de falla (inestable)  $t = 0.24$  s (8.4 ciclos).  
 Figura 3.33. Característica dinámica del modelo Básico 2 del CEV: variación del voltaje ante cambios de la potencia reactiva para dos tiempos de liberación de la falla.



(a) Tiempo de falla  $t = 0.1$  s y tiempo de liberación de falla (crítico)  $t = 0.23$  s (7.8 ciclos). (b) Tiempo de falla  $t = 0.1$  s y tiempo de liberación de falla (inestable)  $t = 0.24$  s (8.4 ciclos).  
 Figura 3.34. Característica dinámica del modelo Básico 2 del CEV: variación del voltaje ante cambios de la corriente para dos tiempos de liberación de la falla.

En la figura 3.35 se presenta el comportamiento de la susceptancia que presenta el modelo básico 2 que utiliza una retroalimentación de corriente y un regulador de voltaje proporcional e integral del CEV.

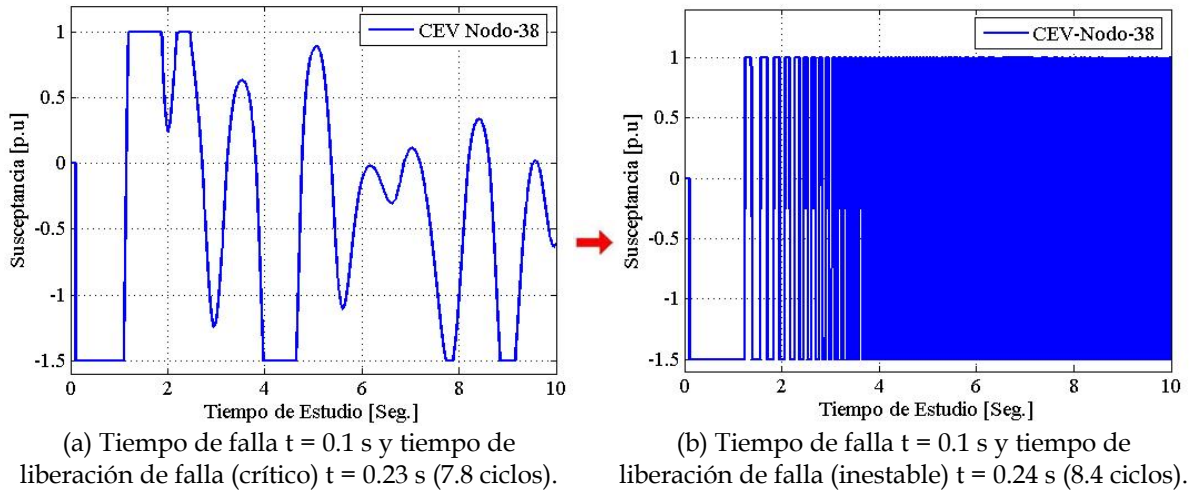


Figura 3.35 Modelo Básico 2: variación de la susceptancia equivalente del CEV durante el transitorio ante dos tiempos de liberación de la falla.

En la figura 3.36 se presenta el comportamiento de la corriente del modelo básico 2 del CEV considerando una retro alimentación de corriente con un regulador de voltaje proporcional e integral.

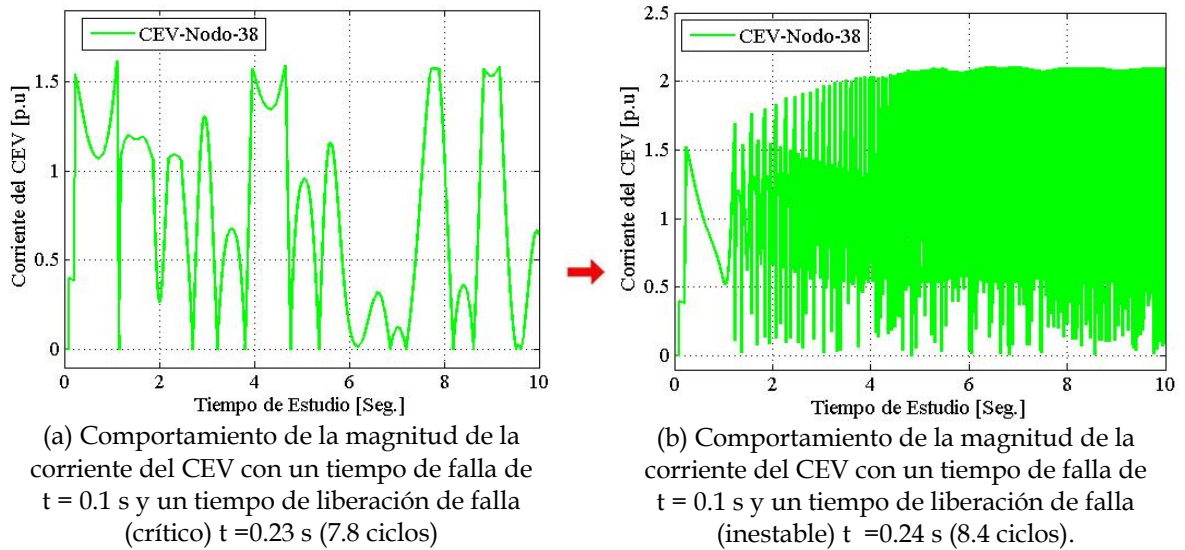
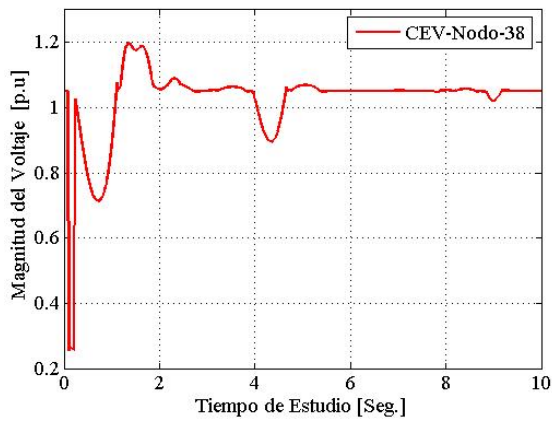
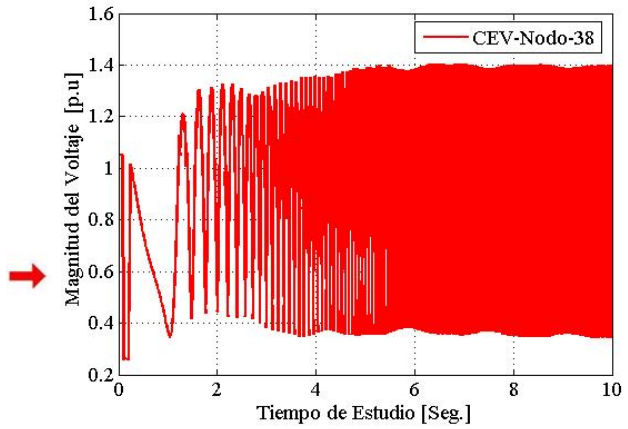


Figura 3.36 El comportamiento de la corriente del modelo básico 2 del CEV que considera una retro alimentación de corriente y un regulador de voltaje proporcional e integral.

En la figura 3.37 se presenta el comportamiento de la magnitud del voltaje del modelo básico 2 del CEV.



(a).-Comportamiento de la magnitud del voltaje del CEV con un tiempo de falla de  $t = 0.1$  s y tiempo de liberación de falla (crítico)  $t = 0.23$  s (7.8 ciclos).



(b).- Comportamiento de la magnitud del voltaje del CEV con un tiempo de falla de  $t = 0.1$  y un tiempo de liberación de falla (inestable)  $t = 0.24$  Seg. (8.4 ciclos).

Figura 3.37 Comportamiento de la magnitud del voltaje en terminales del modelo básico 2 del CEV que considera una retroalimentación de corriente y un regulador de voltaje proporcional e integral.



# CAPÍTULO 4:

## CONCLUSIONES

### 4.1 CONCLUSIONES

#### Modelo de flujos de potencia

De acuerdo con los resultados presentados del estudio de flujos de potencia utilizando los dos sistemas de prueba, *Stagg* y *Nueva Inglaterra*, el modelo PQ del CEV, que fue presentado inicialmente hace algún tiempo en [CIGRE 1986] modela de manera correcta el comportamiento del CEV en estado estacionario al mantener la condición de operación del mismo dentro de su curva característica, representado asimismo de manera correcta la pendiente de regulación del CEV.

El modelo PQ es una alternativa para la representación del comportamiento en estado estacionario del CEV similar a las mostradas en [Ambriz et al., 2000], solamente que este modelo en vez de estar en función de la susceptancia o del ángulo de disparo del CEV, está en función de la potencia reactiva generada por este dispositivo. Con esto se simplifica el modelo ya que en todas las regiones de operación la potencia reactiva del CEV depende solamente de su voltaje en terminales (ver ecuaciones (2.1), (2.2) y (2.3)), con lo que no es necesario que incluir ninguna variable nueva en el método.

Algunas de las ventajas que presenta esta implementación en particular del modelo de CEV como nodo PQ (carga) son que es más sencilla en cuanto a su expresión y modelado en el lenguaje de FORTRAN comparado con los modelos mencionados en [Ambriz et al 2000], el orden del Jacobiano no es alterado al incluir CEV (uno o más), no se altera tampoco el número de nodos del sistema y que el número de iteraciones requeridas para que el método de Newton Raphson converja no aumenta de manera importante.

Al modelar correctamente la pendiente de la característica de regulación del CEV la principal aplicación de este modelo de equilibrio es en estudios de coordinación de la potencia reactiva o de cargabilidad de sistemas eléctricos de potencia considerando los límites de la estabilidad de voltaje.

## Modelo de estabilidad transitoria

De acuerdo a los resultados obtenidos del estudio de estabilidad transitoria considerando a los modelos recomendados por el IEEE representan una buena opción para utilizar un modelo genérico de estos dispositivos que se pueda adaptar a diferentes tipos de CEVs. Para el caso del análisis de la estabilidad transitoria se pudo observar la dinámica de los voltajes de los nodos que simularon una falla trifásica, mejorando notablemente con el modelado del CEV así como también mejorando los voltajes de los nodos mas cercanos a la falla.

Se compararon los comportamientos dinámicos de los dos modelos básicos del CEV propuestos por el IEEE y se aplicó una técnica de sintonización que funcionó adecuadamente.

## 4.2 RECOMENDACIONES

La validez de los parámetros del CEV en sus distintos estados de operación debe ser verificada en base a modelos más realistas del compensador y el sistema eléctrico de potencia, se deben considerar para esta tarea simulaciones en modelos a escala, comparación con mediciones reales y la utilización de técnicas de simulación tales como analizadores de transitorios. La conjunción de las diferentes alternativas debe ser utilizada para sintetizar los parámetros del control del CEV.

## 4.3 TRABAJOS FUTUROS

- Incluir el modelo PQ del CEV en programas de estabilidad de voltaje que analicen el comportamiento dinámico del sistema de potencia utilizando un modelo estático con una estructura similar a la de flujos de potencia como es el caso del programa de flujos de potencia de continuación.
- Incluir el modelo del CEV en programas de simulación rápida en el tiempo para estudios de estabilidad de voltaje, como es el caso de los programas de simulación cuasi-estacionaria en el tiempo.
- Trabajar en estudios que determinen una coordinación y localización óptima de compensadores de potencia reactiva para diferentes problemas del sistema eléctrico de potencia como son la optimización de la reserva de potencia reactiva, la solución de problemas dinámicos, el control de voltaje, etc., evitando interacciones adversas entre los CEVs

- Estudiar el comportamiento del efecto de la generación y la propagación de corrientes armónicas producidas por los compensadores estáticos de vars y su interacción con otros elementos del sistema eléctrico de potencia.





## REFERENCIAS

- [Ambriz et al., 2000] H. Ambriz-Pérez, E. Acha and C. Fuerte-Esquivel. Advanced SVC Models for Newton - Raphson Load Flow and Newton Optimal Power Flow Studies". *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 15, No. 1, pp. 129-136, February 2000.
- [Anderson et al., 1990] P. M. Anderson, B. L. Agrawal and J. E. Van Ness. *Sub synchronous Resonance in Power Systems*. IEEE. Press, New York, USA, 1990.
- [Arrillaga and Arnold, 1990] J. Arrillaga and C. P. Arnold. *Computer Analysis of Power Systems*. John Wiley sons, New York.1990.
- [Byerly et al., 1981] R. T. Byerly, R. J. Bennon, E. R. Taylor, D. T. Poznaniak. *A Study of Static Reactive Power Compensator for High Voltage Power Systems*. Westinghouse Electric Corporation, Contract 4- L60-6964P, 1981.
- [Cañedo, 1980]. José. M. Cañedo Castañeda. *Formulación Eficiente del Problema de Estabilidad Generalizado en Sistemas Eléctricos de Potencia*. Tesis de Maestría S.G.I.-E-.S.I.M.E Instituto Politécnico Nacional, Mexico, D. F, 1980.
- [CEA, 1984] Canadian Electric Association. *Static Reactive Compensator for Reactive Power Control*. Canadian Electric Association (CEA) 1984.
- [Chua y Lin, 1975] L. A. Chua and P.M. Lin. *Computer Aided Análisis of Electronic Circuits: Algorithms & Computation Technques*. Prentice Hall inc. Eglewood Cliffs, Nueva Jersey, E.U.A.
- [CIGRE, 1986] A Erinmez (Editor). *Static Var Compensators*. CIGRE Reference Working Group 38-01 Task Force No. 2 on SVC. 1986.
- [Dickmander et al., 1992] D. Dickmander, B. Thorvaldsson, G. Stromberg, D. Osborn, A. Piotras, and D. Fisher. "Control System Design and Performance Verification for the Chester, Maine Static Var Compensator". *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.7, No. 3, pp. 1492–1503, July 1992.
- [Dommel, 1972] H. W. Dommel. "Fast Transient Stability Solutions", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. IEEE *Transactions on Power Apparatus and Systems*. Vol. PAS – 91, Paginas 1643-1650, E.U. A. Julio/Agosto 1972.
- [Fuerte, 1997] C. Fuerte Esquivel. *Steady State Modelling and Analysis of Flexible AC Transmission Systems*. University of Glasgow for the Degree of Doctor of Philosophy .press, 1997.
- [Gerin-Lajoie, et al., 1990] L. Gerin-Lajoie, G. Scout, S. Breaul, E. V. Larsen, D. H. Baker, and A.F.I, "Hydro-Quebec Multiple SVC Application Control Stability Study", *IEEE Transactions on PowerDelivery*, Vol.5, No.3, pp.1543–1552, juy1990.
- [Hammad and El-Sadek, 1984] A. E. Hammad, M. El-Sadek. "Application of a Thyristor Controlled VAR Compensator for Damping Subsynchronous Oscillation in Power Systems", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, No.1. Enero 1984.

- [IEEE, 1982] IEEE Task Force on terms & Definitions, Power System Dynamic Performance. Subcommittee. "Proposed Terms and Definition for de Power System Stability", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, No 7, pp. 1894-1898, July, 1982.
- [IEEE, 1994] IEEE Special Stability Controls Working Group. "Static var Compensator Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation". *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, No. 1, February, 1994.
- [IEEE, 2004] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Anderson, A. Bose, Cañizares, N. Hatziargytiu, D. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, T. Van Cutsem, V. Vittal. "Definition and Classification of Power System Stability", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.19, NO.2, May 2004.
- [Kimbark, 1948] E. W. Kimbark. *Power System Stability Vol.1 Element of Stability Calculations*. John Wiley & Sons, New York, N. Y. EUA. 1994.
- [Knight, 2001] U. G. Knight. *Power Systems in Emergencies, From Contingency Planning to Crisis Management*. John Wiley & Sons, UK, 2001.
- [Kundur, 1994] P. Kundur. *Power System Stability and Control*. Mc Graw- Hill, New York, N.Y. EUA. 1994
- [Kundur and Morison, 1997] P. Kundur and G. K. Morison. "A Review of Definitions and Classification of Stability Problems in Today's Power Systems". Paper presented at the panel Session on Stability Terms and Definition. Proceedings of the IEEE PES Winter Meeting, New York, NY, USA, February 2-6, 1997.
- [Lee et al., 1991]. S. Y. Lee, S. Bhattacharya, T. Lejonberg, A. Hammad, and S. Lefevre, Detailed Modeling of Static Vars Compensator Using the electromagnetic Transients Program (EMTP). 1991 *Proc. IEEE Transmission and Distribution Conference*, IEEE publication 91 CH 3070-0 PP.941-951.
- [López, 1999] S. López LLaven. *Modelado y Análisis de los Sistemas Flexibles de Transmisión de Corriente Alterna en Estado estacionario* Tesis para obtener el grado de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, SEPI ESIME, México, D. F, Enero, 1999.
- [Malek et al., 1990] A. Malek, J. Meisel. B, J, Cory. "Transient Stability Assessment Using Dynamic Equivalent for Undisturbed Generators" *Proc. of the 10th Power Systems Computation Conference*. Graz, Australia, 1990. pp.501-508.
- [Messina, 1990] A. R. Messina. *Coordination of Static var Compensators to Damp Power and Voltage Oscillations*. Ph.D. Thesis, Imperial College, 1990.
- [Messina, 1987] A. R. Messina. *Control de Voltaje y Potencia Reactiva Mediante Compensadores Estáticos de Vars en Sistemas Eléctricos de Potencia*. Tesis para obtener el grado de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, SEPI ESIME, México, D. F, Enero, 1987.
- [Messina, 1993] A. R. Messina. *Aplicación de los Compensadores Estáticos de vars para Mejorar el Comportamiento Dinámico de los Sistemas de Potencia*. Curso impartido en el Instituto Tecnológico de Morelia 1993.
- [Miller 1982] T. J. E. Miller, *Reactive Power Reactive Control in Electric Systems*. Wiley Interscience, 1982.
- [Yu, 1983] Y. Nan Yu. *Electric Power System Dynamics*. Academic Press, New York 1983.
- [Olwegard 1976] A. Olwegard, L. Algren, H. Frank. "Thyristor Controlled Shunt Capacitor for Improving System Stability", 32-20 *CIGRE Paris*, Fr. Ago/1976.
- [Ruiz, 2005] Daniel Ruiz Vega. *Estabilidad de Sistema Eléctrico de Potencia 2005*.

- [Ruiz, 1996] Daniel Ruiz Vega. *Efecto de los Modelos de Motores de Inducción en Sistemas Eléctricos de Potencia*. Tesis para obtener el grado de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, SEPI ESIME, México, D. F, Enero, 1996.
- [Ruiz, 2002] Daniel Ruiz Vega. Dynamic Security Assessment and Control: Transient and Small Signal Stability. Dépôt légal. D/2002/0480/19, ISSN 0075-9333. Collection des Publications de la faculté des Sciences Appliquées No. 213. Instute de mécanique et génie civil, University of Liège, Liège BELGIQUE, Juin 2002.
- [Ruiz y Olguín, 1997] Ruiz Vega Daniel, Olguín Salinas Daniel (1997). “Programa de computadora digital para estudios de flujos de potencia: Estudio básico empleando el método de Newton-Raphson en forma polar”. Reporte interno No. SEPI-IE97-03 Sección de Estudios de Posgrado e Investigación ESIME - IPN. México D.F.
- [Stagg and El-Abiad, 1968] G. W. Stagg. A. H. El-Abiad. *Computer Methods in Power System Analysis*. McGraw Hill, 1a. Edition, 1968.
- [Stevenson 1986] W. D. Stevenson, *Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia*. Ediciones del Castillo, Madrid 1965.
- [Van Cutsem and Vournas, 1998] T. Van Cutsem and C Vournas. *Voltage Stability of Electric Power Systems*. Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [Willems, 1999] “Path Integrals and Stability”, in J. Baillieul, J.C Willems (eds), *Mathematical Control Theory*, Springer, 1999.



## APÉNDICE A

### DATOS Y DIAGRAMAS UNIFILARES DE LOS DE LOS SISTEMA ELÉCTRICOS DE POTENCIA DE PRUEBA

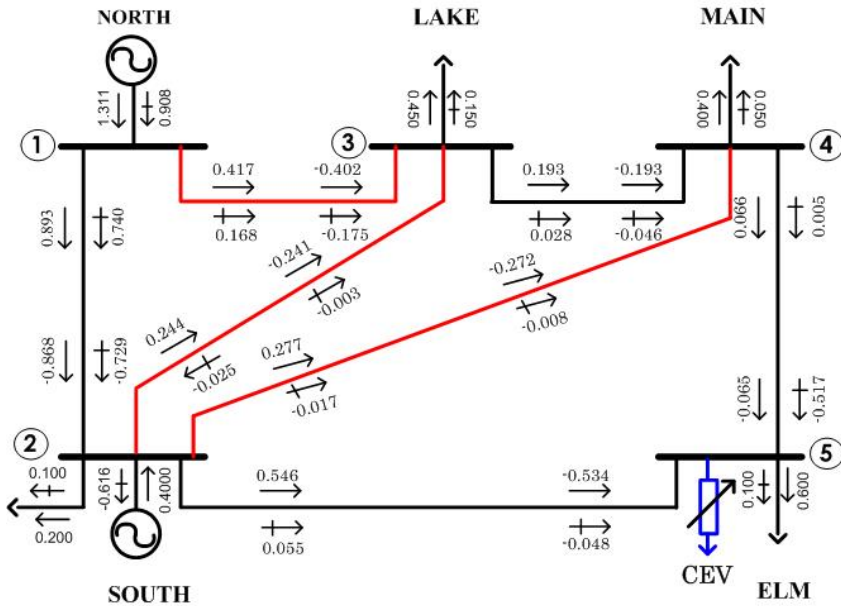


Figura A.1.-Solución del Sistema de prueba [Stagg et al 1968].

**Tabla A.1- Datos de los voltajes y potencias programadas**

Nodo	Voltaje polar [pu]		Pg [pu]	Qg [pu]	Po [pu]	Qo [pu]	Ps [pu]	Qs [pu]
1	1.0600	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0
2	1.0000	0.0	0.400	-1.077	0.20	0.10	0.0	0.0
3	1.0000	0.0	0.0	0.0	0.45	0.15	0.0	0.0
4	1.0000	0.0	0.0	0.0	0.40	0.05	0.0	0.0
5	1.0155	0.0	0.0	0.0	0.60	0.10	0.0	0.0

**Tabla A.2- Parámetros de las líneas del sistema de prueba (stagg)**

Nodo i	Nodo j	Cto	Impedancia Serie		B/2	TAP	Elemento
1	2	1	0.02000	0.06000	0.0300	0	1
1	3	1	0.08000	0.24000	0.0250	0	2
2	3	1	0.06000	0.18000	0.0200	0	3
2	4	1	0.06000	0.18000	0.0200	0	4
2	5	1	0.04000	0.12000	0.0150	0	5
3	4	1	0.01000	0.03000	0.0100	0	6
4	5	1	0.08000	0.24000	0.0250	0	7

Tabla A.3- Parámetros del CEV.

Nodo con CEV	V <sub>REF</sub> [p.u]	X <sub>s1</sub>	Q <sub>max</sub> [p.u]	Q <sub>min</sub> [p.u]
5	1.02	0.009	-100	100

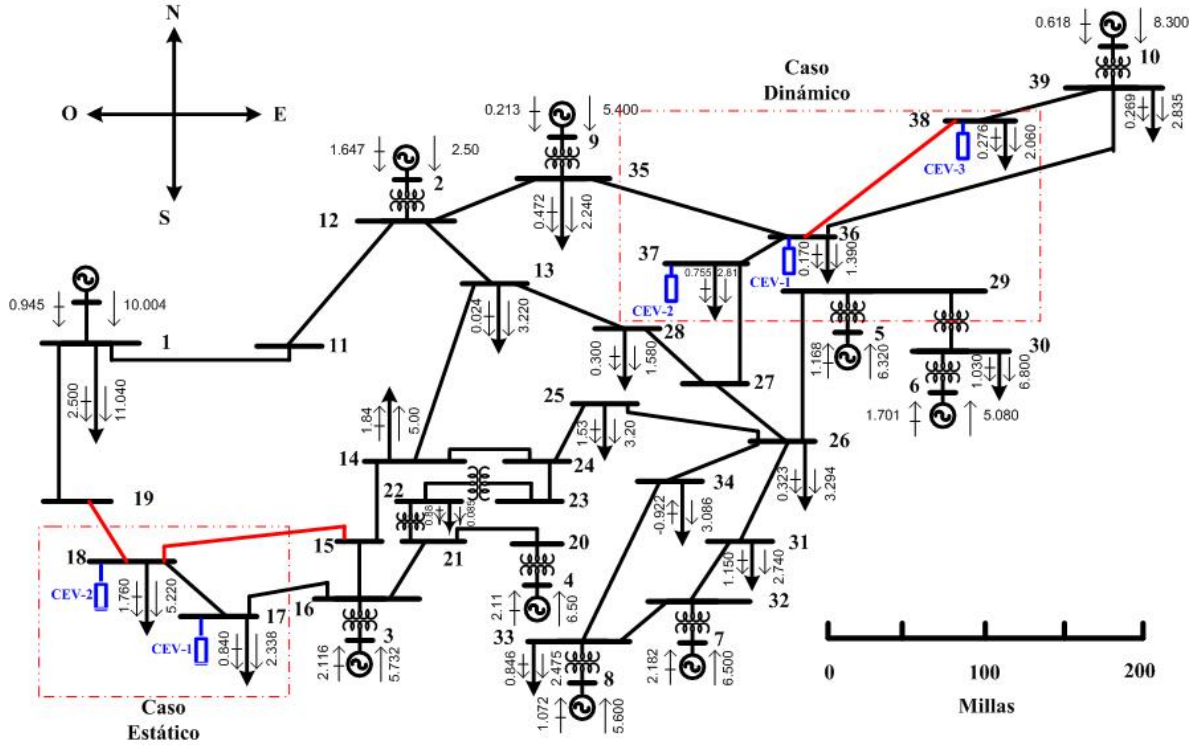


Figura A.2.- Sistema de prueba Nueva Inglaterra [Malek et al 1990].

**Tabla A.4- Datos de los voltajes y potencias programadas**

Nodo	Voltaje polar [p.u]		Pg [p.u]	Qg [p.u]	P <sub>0</sub> [p.u]	Q <sub>0</sub> [p.u]	Ps [p.u]	Qs [p.u]
1	1.03000	0.00000	10.0002	0.8807	11.040	2.5000	0	0
2	1.04139	0.11784	2.5000	1.4639	0.0000	0.0000	0	0
3	0.96360	0.18900	5.7320	2.0644	0.0920	0.0460	0	0
4	0.95910	0.21561	6.5000	2.0529	0	0	0	0
5	0.97101	0.22627	6.3200	1.0863	0	0	0	0
6	0.99101	0.20487	5.0800	1.6632	0	0	0	0
7	1.01281	0.27306	6.5000	2.0913	0	0	0	0
8	1.01320	0.32480	5.6000	1.0206	0	0	0	0
9	1.00489	0.21692	5.4000	0.0043	0	0	0	0
10	1.97969	0.30823	8.3000	0.2300	0	0	0	0
11	1.04726	0.02710	0	0	0	0	0	0
12	1.04601	0.1102	0	0	0	0	0	0
13	1.03040	0.02147	0	0	3.2200	0.0240	0	0
14	1.00391	0.00699	0	0	5.0000	1.8400	0	0
15	1.00466	0.02782	0	0	0	0	0	0
16	1.00657	0.04023	0	0	0	0	0	0
17	0.9967	0.00148	0	0	2.3380	0.8400	0	0
18	0.9957	-0.0073	0	0	5.2200	1.7600	0	0
19	1.0280	-0.0044	0	0	0	0	0	0
20	1.0136	0.0828	0	0	0	0	0	0
21	1.0112	0.39191	0	0	0	0	0	0
22	0.9977	0.06703	0	0	0.0850	0.8800	0	0
23	1.01182	0.06703	0	0	0	0	0	0
24	1.01102	0.04040	0	0	0	0	0	0
25	1.01530	0.03315	0	0	3.2000	1.5300	0	0
26	1.03061	0.05894	0	0	3.2940	0.3230	0	0
27	1.03326	0.04105	0	0	0	0	0	0
28	1.03113	0.02584	0	0	1.5800	0.3000	0	0
29	1.03990	0.14427	0	0	0	0	0	0
30	0.98438	0.11192	0	0	6.8000	1.0300	0	0
31	1.02970	0.10212	0	0	2.7400	1.1500	0	0
32	1.03356	0.18459	0	0	0	0	0	0
33	1.04373	0.18016	0	0	2.4750	0.8460	0	0
34	1.03470	0.06141	0	0	3.0860	-0.922	0	0
35	1.05312	0.09955	0	0	2.2400	0.4720	0	0
36	1.04972	0.07604	0	0	1.3900	0.1700	0	0
37	1.03746	0.2340	0	0	2.8100	0.7550	0	0
38	1.04126	0.13989	0	0	2.0600	0.2760	0	0
39	1.03317	0.18978	0	0	2.8350	0.2690	0	0

**Tabla A.5- Parámetros del CEV.**

Nodo con CEV	V <sub>REF</sub> [p.u]	X <sub>sl</sub>	Q <sub>max</sub> [p.u]	Q <sub>min</sub> [p.u]
17	1.02	0.0083	-100	100
18	1.02	0.0250	-100	100



**Tabla A.6- Datos de las líneas de enlaces**

Nodo i	Nodo j	Cto	Impedancia Serie		B/2	TAP	Elemento
11	12	1	0.00350	0.04110	0.3494	0	1
11	40	1	0.00100	0.02500	0.3750	0	2
12	13	1	0.00130	0.01510	0.1286	0	3
12	35	1	0.00700	0.00860	0.0730	0	4
13	14	1	0.00130	0.02130	0.1107	0	5
13	28	1	0.00110	0.01330	0.1069	0	6
14	15	1	0.00080	0.01280	0.0691	0	7
14	24	1	0.00080	0.01290	0.0738	0	8
15	16	1	0.00020	0.00260	0.0217	0	9
15	18	1	0.00080	0.01120	0.0738	0	10
16	17	1	0.00060	0.00920	0.0565	0	11
16	21	1	0.00070	0.00820	0.0695	0	12
17	18	1	0.00040	0.00460	0.0390	0	13
18	19	1	0.00230	0.03630	0.1902	0	14
19	40	1	0.00100	0.02500	0.6000	0	15
20	21	1	0.00040	0.00430	0.0365	0	16
20	23	1	0.00040	0.00430	0.0365	0	17
23	24	1	0.00090	0.01010	0.0862	0	18
24	25	1	0.00180	0.02170	0.1830	0	19
25	26	1	0.00090	0.00940	0.0855	0	20
26	27	1	0.00070	0.00890	0.0671	0	21
26	29	1	0.00160	0.01950	0.1520	0	22
26	31	1	0.00080	0.01350	0.1274	0	23
26	34	1	0.00030	0.00590	0.0340	0	24
26	28	1	0.00070	0.00820	0.0660	0	25
27	37	1	0.00130	0.01730	0.1608	0	26
31	32	1	0.00080	0.01400	0.1283	0	27
32	33	1	0.00060	0.00960	0.0923	0	28
33	34	1	0.00220	0.03500	0.1805	0	29
35	36	1	0.00320	0.03230	0.2565	0	30
36	37	1	0.00140	0.01470	0.1198	0	31
36	38	1	0.00430	0.04740	0.3901	0	32
36	39	1	0.00570	0.06250	0.5145	0	33
38	39	1	0.00140	0.01510	0.1245	0	34
12	2	1	0.00000	0.01810	0.0000	1.025	35
20	4	1	0.00000	0.02000	0.0000	1.070	36
22	21	1	0.00160	0.04350	0.0000	1.006	37
22	23	1	0.00160	0.04350	0.0000	1.006	38
29	5	1	0.00070	0.01420	0.0000	1.070	39
29	30	1	0.00070	0.01380	0.0000	1.060	40
30	6	1	0.00090	0.01800	0.0000	1.009	41
32	7	1	0.00000	0.01430	0.0000	1.025	42
33	8	1	0.00050	0.02720	0.0000	1.000	43
35	9	1	0.0006000	0.0232000	0.0000	1.025	44
39	10	1	0.0008000	0.0156000	0.0000	1.025	45

**Tabla A.7.- Parámetros de las maquinas sincronas**

N	Modelo	H	Ra	Xd	Xq	X'd	T'd0	X'q	T'q0
1	Clasc 1	500	0.0	0.0200	0.0190	0.0060	7.000	0.0080	0.70
2	Maqlis4	042	0.0	0.1000	0.0690	0.0310	10.20	0.0690	0.0
3	Maqlis4	30.3	0.0	0.2950	0.2820	0.0697	6.560	0.1700	1.50
4	Maqlis4	35.8	0.0	0.2500	0.2370	0.0530	5.700	0.0876	1.50
5	Maqlis4	28.6	0.0	0.2620	0.2580	0.0440	5.690	0.1660	1.50
6	Maqlis4	26.0	0.0	0.6700	0.6200	0.1320	5.400	0.1660	0.44
7	Maqlis4	34.8	0.0	0.2540	0.2410	0.0500	7.300	0.0814	0.40
8	Maqlis4	26.4	0.0	0.2950	0.2920	0.0490	5.660	0.1860	1.50
9	Maqlis4	24.3	0.0	0.2900	0.2800	0.570	6.700	0.911	0.41
10	Maqlis4	34.4	0.0	0.2110	0.2050	0.570	4.790	0.0587	1.96

**Tabla A.8.-Comportamiento del Sistema**

Nodo Fallado	Líneas Desconectadas	Tiempo Crítico	Tiempo Inestable
38	38 - 39	0.06	0.07
36	36 - 37	0.10	0.11
26	26 - 27	0.10	0.11
36	36 - 38	0.10	0.11
31	31 - 32	0.11	0.12
26	26 - 31	0.12	0.13
39	39 - 38	0.12	0.13
39	39 - 36	0.12	0.13
26	26 - 25	0.14	0.15
26	26 - 34	0.14	0.15
27	27 - 28	0.15	0.16
36	36 - 35	0.15	0.16
38	38 - 36	0.15	0.16
35	35 - 36	0.15	0.16
27	27 - 37	0.16	0.17
16	16 - 17	0.17	0.18
25	25 - 26	0.17	0.18
27	27 - 26	0.17	0.18
34	34 - 33	0.17	0.18
25	25 - 24	0.18	0.19
31	31 - 26	0.18	0.19
35	35 - 02	0.18	0.19
16	16 - 21	0.18	0.19
13	13 - 14	0.19	0.20
13	13 - 28	0.19	0.20
15	15- 16	0.19	0.20
15	15 - 18	0.19	0.20
16	16 - 15	0.19	0.20
18	18 - 19	0.19	0.20
24	24 - 25	0.19	0.20
34	34 - 26	0.19	0.20
37	37 - 27	0.19	0.20

**Tabla A.8.-Comportamiento del Sistema (continuación)**

37	37 - 36	0.19	0.20
20	20 - 23	0.19	0.20
20	20 - 21	0.19	0.20
11	11 - 12	0.20	0.21
13	13 - 12	0.20	0.21
14	14 - 13	0.20	0.21
14	14 - 15	0.20	0.21
14	14 - 24	0.20	0.21
15	15 - 14	0.20	0.21
23	23 - 24	0.20	0.21
28	28 - 13	0.20	0.21
28	28 - 27	0.20	0.21
21	21 - 03	0.21	0.22
21	21 - 22	0.21	0.22
21	21 - 20	0.21	0.22
23	23 - 20	0.21	0.22
24	24 - 14	0.21	0.22
24	24 - 23	0.21	0.22
17	17 - 18	0.22	0.23
18	18 - 15	0.22	0.23
17	17 - 16	0.23	0.24
18	18 - 17	0.23	0.24
01	01- 11	0.29	0.30
01	01- 19	0.44	0.45
22	22 - 23	0.44	0.45
19	19 - 01	0.45	0.46
19	19 - 18	0.45	0.46
11	11 - 01	0.53	0.54

**Tabla A.9.- Parámetros del Modelo 1 del CEV (Messina)**

CEV	Nodos	Capacidad	Ka	Ta	T1	T2	Tb	Tm
1	38	RCT/(150/100) MVAR	50	0.05	0.500	1	0.001	0.005

**Tabla A.10.- Parámetros del Modelo 1 del CEV (Messina)**

CEV	Nodos	Capacidad	Ka	Ta	T1	T2
1	36	RCT/(150/100) MVAR	100	0.03	0.700	0.700
1	37	RCT/(150/100) MVAR	40	0.03	0.700	0.700
1	38	RCT/(150/100) MVAR	120	0.03	0.700	0.700

## APÉNDICE B.

### MODELOS BÁSICOS DEL CEV RECOMENDADOS POR EL IEEE Y SUS ECUACIONES DE ESTADO

Se presentan los modelos básicos del CEV recomendados por la IEEE, que son utilizados para el estudio dinámico, se presenta en la figura B.1 el modelo básico 1 del CEV. Se describe las partes principales que componen al modelo básico 1 con sus respectivas ecuaciones de estado de cada bloque considerando sus condiciones iniciales.

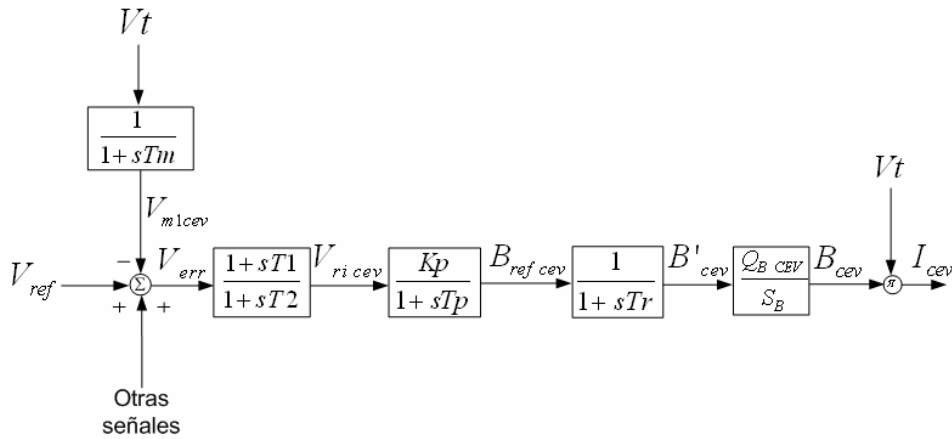


Figura B.1.- Modelo básico 1 del CEV [IEEE 1994]

El bloque transductor ó circuito de medición que se presenta en la figura B.2 tiene la función de realizar la medición del voltaje del nodo donde se conecta el CEV.

En este módulo se encuentra conectado el CEV con el nodo de transmisión donde este bloque simplemente toma la lectura de los voltajes y corrientes del sistema, las cuales la convierte de una señal de corriente alterna a directa por medio de un transformador y un rectificador, la señal es enviada a evaluación con el voltaje de referencia para obtener la señal de error, este módulo es representado como filtro con tiempos constantes de atraso de 1 - 8 milisegundos [IEEE, 1994].

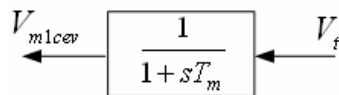


Figura B.2.-Bloque transductor o de medición [IEEE, 1994].

El bloque de medición de la Figura B.2 se representa por la ecuación de estado (B.1) que relaciona la variable de entrada  $V_t$  con la variable de salida  $V_{m1cev}$ :

$$\frac{d}{dt}(V_{mcev}) = \frac{1}{T_m}(V_t - V_{mcev}) \quad (\text{B.1})$$

La señal de error se calcula de la siguiente manera:

$$V_{err} = V_{refcev} - V_{m1cev} \quad (\text{B.2})$$

El bloque compensador de la figura B.3 se utilizan para estabilizar el regulador automático de voltaje y su modelo es representado en la figura B.3.

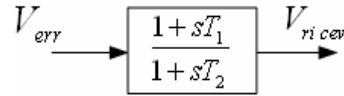


Figura B.3.-Bloque compensador [IEEE 1994]

El modelo de este bloque es representado por la siguiente ecuación de estado:

$$\frac{d}{dt}(x_{1cev}) = \frac{1}{T_2}[(\frac{T_2 - T_1}{T_2})V_{err} - x_{1cev}] \quad (\text{B.3})$$

Donde  $x_{1cev}$  es una variable intermedia que se define para obtener el modelo de estado de la siguiente manera:

$$x_{1cev} = V_{ricev} - \frac{T_1}{T_2}V_{err} \quad (\text{B.4})$$

Para el bloque del regulador automático de voltaje (figura B.5), la ganancia  $K_P$  es el recíproco de la pendiente, la constante de tiempo  $T_P$  está entre 20 y 150 milisegundos.

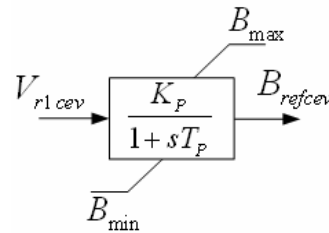


Figura. B.5.- Bloque del regulador automático de voltaje. [IEEE 1994].

El modelo de estado de este bloque es representado por la siguiente ecuación:

$$\frac{d}{dt}(B_{refcev}) = \frac{1}{T_p}(K_p V_{r1cev} - B_{refcev}) \quad (\text{B.5})$$

El bloque control de los tiristores figura B.6 modela el puente de tiristores que varía la susceptancia del CEV. En este modelo se utiliza una representación básica que modela únicamente el retraso asociado con el disparo de los tiristores.  $Tr$  representa el efecto de disparo de los tiristores en secuencia evaluada entre tres y seis milisegundos.

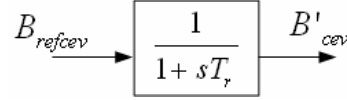


Figura B.6.- Bloque del control de la susceptancia por tiristores [IEEE 1994].

El modelo de este bloque es representado por la siguiente ecuación:

$$\frac{d}{dt}(B'_{cev}) = \frac{1}{Tr}(B_{ref\ cev} - B'_{cev}) \quad (B.6)$$

El bloque de la interfase o bloque de adaptación del CEV al sistema se muestra en la figura B.7, Este bloque se adapta a la susceptancia de salida del CEV desde su base en p.u (normalmente la capacidad del CEV) a la base en p.u del sistema de potencia, esto es necesario si los parámetros y variables del CEV están referidos a la capacidad del CEV.

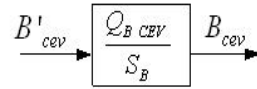


Figura B.7.- Bloque de interfase o adaptación del CEV al sistema p.u. del SEP [IEEE 1994].

Las condiciones iniciales de los 2 modelos son las siguientes, par el modelo básico 1 del CEV presenta sus condiciones iniciales.

Para el bloque de la figura B.2 del transductor o de medición se obtiene la condición inicial en la ecuación B.7.

$$V_{m1cev_0} = V_{t_0} \quad (B.7)$$

Para el bloque de la figura B.3 del compensador se obtiene la condición inicial en la ecuación B.8.

$$X_{1cev_0} = \left( \frac{T_2 - T_1}{T_2} \right) \frac{B'_{cev_0}}{Kp} \quad (B.8)$$

Para el bloque de la figura B.4 del regulador de voltaje se obtiene la condición inicial en la ecuación B.9.

$$V_{R1cev_0} = \left( \frac{B'_{cev_0}}{K_p} \right) \quad (B.9)$$

Para el bloque de la figura B.5 del disparo de los tiristores se obtiene la condición inicial en la ecuación B.10.

$$B_{refcev_0} = B'_{cev_0} \quad (B.10)$$

Para el bloque de la figura B.6 bloque de adaptación del CEV con el sistema eléctrico de potencia se obtiene la condición inicial en la ecuación B.11.

$$B'_{cev_0} = \frac{SB}{QB_{cev}} B_{cev_0} \quad (B.11)$$

De la misma manera se presenta el modelo básico 2 del CEV que se muestra en la figura B.7 con un regulador de voltaje proporcional-integral, donde la pendiente  $K_{SL}$  es ajustada por retroalimentación de la corriente, y el incremento y el rango son independientes. [Dickmander, 1992, Lee et al., 1991]. Este tipo de modelo representa una estructura física adicional lo cual lo hace un control más robusto en comparación con el modelo básico 1 del CEV presentado anteriormente en la figura B.1.

La constante tiempo  $T_s$  (1- 5 milisegundos) modela el retraso de tiempo de la medición de corriente del CEV.

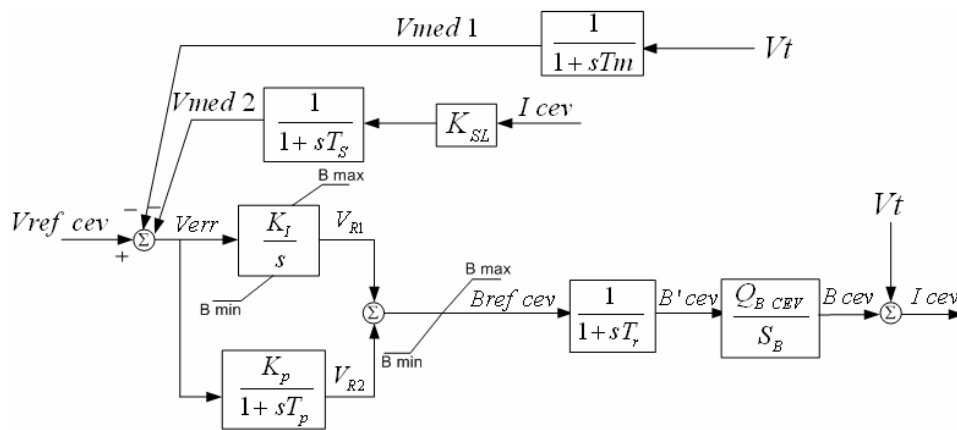


Figura B.7: Modelo básico 2 del CEV [IEEE 1994].

El modelo básico 2 del CEV representa al bloque del transductor o medición del circuito de la misma forma que el del modelo basico1, como se muestra en la figura B.8.

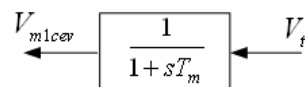


Figura B.8.- Bloque transductor o de medición [IEEE, 1994].

El modelo de este bloque es representado por la siguiente ecuación de estado:

$$\frac{d}{dt}(V_{med1}) = \frac{1}{T_m}(V_t - V_{med1}) \quad (B.12)$$

El modelo básico 2 presenta un bloque de retroalimentación de corriente del circuito que tiene como función rectificar la corriente inyectada al sistema es presentado en la figura B.9.

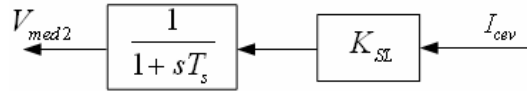


Figura B.9.- Bloque de retroalimentación del CEV [IEEE, 1994].

El modelo de este bloque es representado por la ecuación:

$$\frac{d}{dt}(V_{med2}) = \frac{1}{T_s}(K_{SL}I_{cev} - V_{med2}) \quad (B.13)$$

La señal de error para el modelo básico 2 se presenta a continuación:

$$V_{err} = V_{ref\ cev} - (V_{med1} + V_{med2}) \quad (B.14)$$

El bloque del regulador automático de voltaje se muestra en la figura B.10, Este regulador tiene un control proporcional-integral, el primer bloque del regulador de voltaje tiene la ecuación de estado (control integral):

$$\frac{d}{dt}(V_{R1}) = K_I V_{err} \quad (B.15)$$

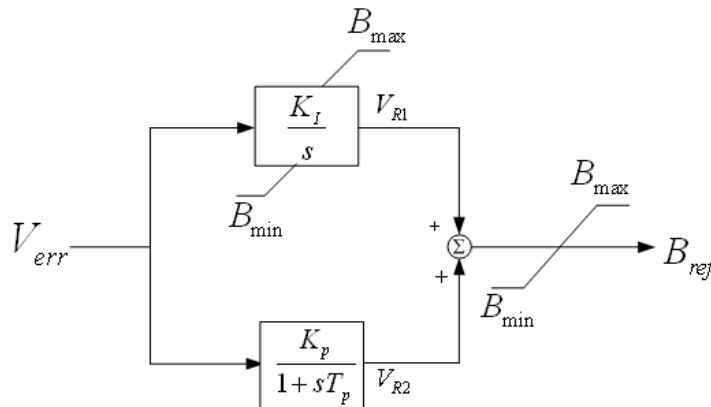


Figura B.10.-Bloque del regulador de voltaje. [IEEE 1994].

Para el segundo bloque del regulador de voltaje (control proporcional e integral) se presenta su ecuación de estado en la ecuación B.16.



$$\frac{d}{dt}(V_{R2}) = \frac{1}{T_p}(K_p V_{err} - V_{R2}) \quad (B.16)$$

El bloque control de los tiristores (figura B.11) modela el puente de tiristores que varía la susceptancia del CEV. En este modelo se utiliza una representación básica que modela únicamente el retraso asociado con el disparo de los tiristores.  $T_r$  representa el efecto de disparo de los tiristores en secuencia evaluada entre 3-6 milisegundos.

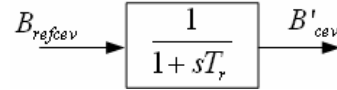


Figura B.11.- Bloque del control de la susceptancia por tiristores [IEEE 1994].

El modelo de este bloque es representado por la siguiente ecuación:

$$\frac{d}{dt}(B'_{cev}) = \frac{1}{T_r}(B_{ref_{cev}} - B'_{cev}) \quad (B.17)$$

El bloque de la interfase o bloque de adaptación del CEV al sistema se muestra en la figura B.12. Este bloque adapta la susceptancia de salida del CEV desde su base en p.u (normalmente la capacidad del CEV) a la base en p.u del sistema de potencia, esto es necesario si los parámetros y variables del CEV están referidos a la capacidad del CEV.

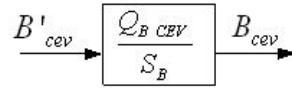


Figura B.12: Bloque de interfase o adaptación del CEV al sistema p.u. del SEP [IEEE 1994].

Para el modelo básico 2 del CEV con retroalimentación se obtiene las siguientes condiciones iniciales del modelo con retroalimentación.

Para el bloque de la figura B.8 del transductor o de medición se obtiene la condición inicial en la ecuación B.18.

$$V_{med1cev_0} = V_{t_0} \quad (B.18)$$

Para el bloque de la figura B.9 de la retroalimentación se obtiene la condición inicial en la ecuación B.19.

$$V_{med2cev_0} = K_{sl} I_{cev_0} \quad (B.19)$$

De la señal de error se obtiene la condición inicial en la ecuación B.20.

$$V_{err_0} = 0.0 \quad (B.20)$$

Para el bloque de la figura B.10 del regulador de voltaje proporcional e integral se obtiene la condición inicial de los dos bloques internos para la parte integral se obtiene su condición inicial en la ecuación B.21.

$$V_{R1_0} = B'_{cev_0} \quad (B.21)$$

Y para el segundo bloque interno del regulador de voltaje proporcional se obtiene su condición inicial en la ecuación B.22.

$$V_{R2_0} = 0.0 \quad (B.22)$$

Para el bloque de la figura B.12 que representa la interfase o adaptación del CEV con el sistema se obtiene la condición inicial de este bloque en la ecuación B.23.

$$B'_{cev_0} = \left( \frac{SB}{QB_{cev}} \right) B_{cev_0} \quad (B.23)$$



## APÉNDICE C.

### SINTONIZACIÓN DE LOS MODELOS BÁSICOS 1 Y 2 DEL CEV RECOMENDADOS POR EL IEEE

Se sintonizan los parámetros de los modelos básicos 1 y 2 del CEV determinando los parámetros que cumplan los principios de la sintonización. En la figura C.1 se presenta el diagrama a bloques representado y simulado en el programa de MATLAB.

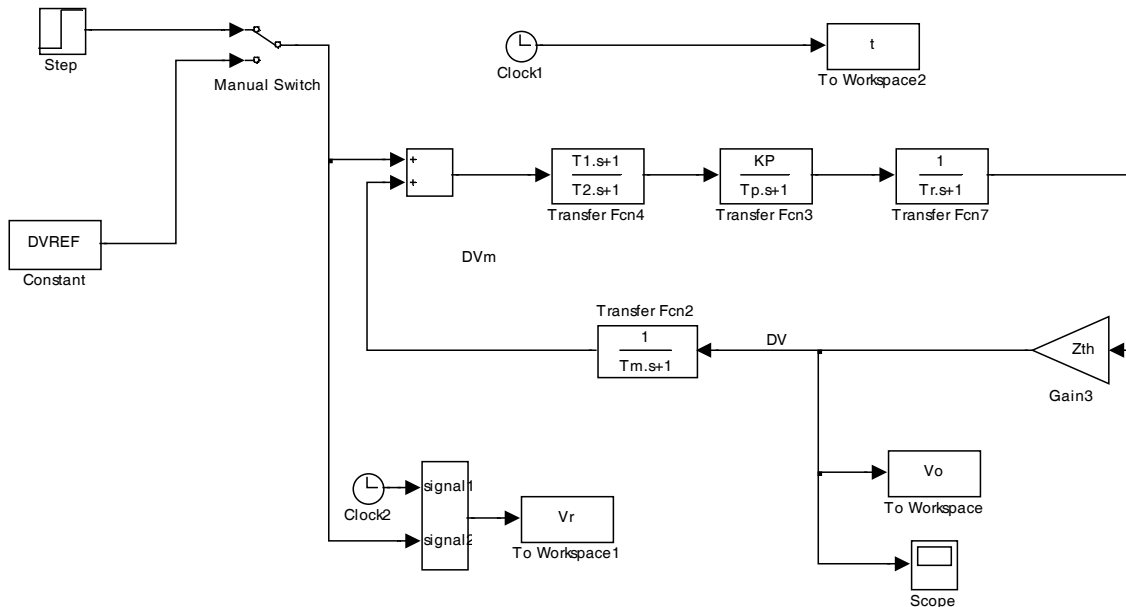


Figura C.1.- Diagrama a bloque del modelo básico 1 del CEV utilizando el programa de SIMULINK.

La figura C1 se presenta el modelo básico 1 del CEV, se analizan por medio del programa SIMULINK para determinar los parámetros del modelo básico 1 del CEV, en este diagrama de bloque de la figura C.1 se determinaron los parámetros a prueba y error, determinando los más adecuados, utilizando una subrutina hecha en MATLAB que compara los resultados que proporcionan los diferentes parámetros, los bloque principales son descritos en el apéndice B, únicamente se adiciona el bloque que representa la interfase del modelo del CEV con el sistema eléctrico de potencia en este caso se representa como  $Z_{th}$  (impedancia de Thevenin) o la inversa de la matriz de admitancia.

Por medio del diagrama a bloque del modelo básico 1 de la figura C.1 se sintoniza el CEV modelándolo e instalándolo en los 3 nodos mas críticos del sistema de prueba

(36, 37 y 38), considerando la  $Z_{th}$  (impedancia de Thevenin) para cada nodo.  $Z_{th}$  se considera como la representación del sistema eléctrico de potencia.

Para el análisis de la sintonización se varia la variable  $K_p$  del regulador de voltaje se consideran 3 diferentes casos con diferentes valores en la tabla C.1 se presenta los diferentes parámetros. Considerando los parámetros remarcados con negrita como el más adecuado como se ilustra en la figura C.2 se presenta de color negro la señal que se considera adecuado.

**Tabla C.1.- Modelado del CEV en el Nodo 36 (Sintonizados)**

Nodo	$K_p$	$T_p$	$Z_{th}$	$T_m$	$T_1$	$T_2$	$T_r$
36	18	0.05	0.0256	0.005	1	1	0.001
<b>36</b>	<b>19.53</b>	<b>0.05</b>	<b>0.0256</b>	<b>0.005</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0.001</b>
36	20	0.05	0.0256	0.005	1	1	0.001

Considerando la señal adecuada de color negro que se iguala con el escalón unitario que se utiliza como referencia ilustrado de color rojo (escalón unitario) como se ilustra en la figura C.2.

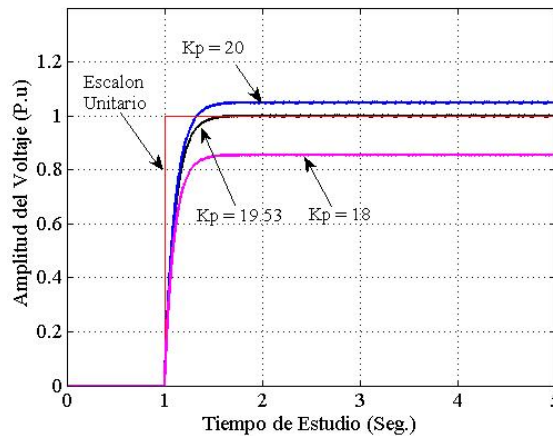


Figura C.2.- Comparación de los parámetros del modelo básico 1 del CEV para determinar los parámetros del modelo del CEV modelado en el nodo 37.

De la misma manera se presenta el análisis modelando al CEV en el nodo 37, variando la  $K_p$  del regulador de voltaje y determinando la impedancia de thevenin  $Z_{th}$  para este caso, se realiza un análisis considerando los 3 diferentes valores, seleccionando los parámetros mas adecuado para este segundo caso se consideran los parámetros que se encuentra en negrita ubicados en la tabla C.2.

**Tabla C.2.- Modelado del CEV en el Nodo 37 (Sintonizados)**

Nodo	$K_p$	$T_p$	$Z_{th}$	$T_m$	$T_1$	$T_2$	$T_r$
37	18	0.05	0.0255	0.005	1	1	0.001
<b>37</b>	<b>19.61</b>	<b>0.05</b>	<b>0.0255</b>	<b>0.005</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0.001</b>
37	20	0.05	0.0255	0.005	1	1	0.001

De la misma manera que se presento anteriormente se presenta gráficamente en la figura C3 la comparación de los 3 casos, que determinan los valores adecuados de los parámetros del modelo básico 1 del CEV instalado en el nodo 37.

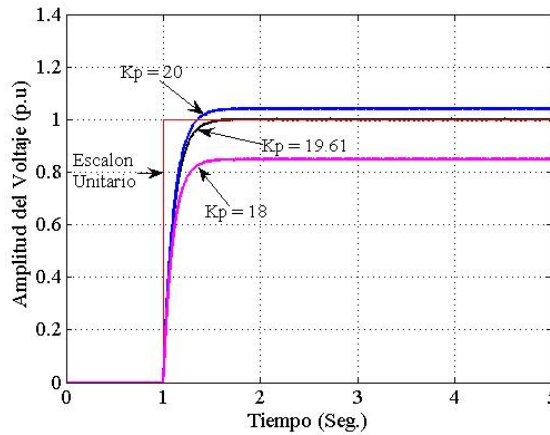


Figura C.3.- Comparación de los parámetros del modelo básico 1 del CEV para determinar los parámetros del modelo del CEV modelado en el nodo 37.

De la misma manera se presenta el análisis para el nodo 38, variando la  $K_p$  del regulador de voltaje y determinando su impedancia de thevenin  $Z_{th}$  para este caso, se realiza un análisis considerando los 3 diferentes valores, seleccionando los parámetros mas adecuado para este caso se consideran los parámetros que se encuentra en negrita ubicados en la tabla C.3.

**Tabla C.3.- Modelado del CEV en el Nodo 38 (Sintonizados)**

Nodo	$K_p$	$T_p$	$Z_{th}$	$T_m$	$T_1$	$T_2$	$T_r$
38	100	0.05	0.0044	0.005	1	1	0.001
<b>38</b>	<b>113.65</b>	<b>0.05</b>	<b>0.0044</b>	<b>0.005</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0.001</b>
38	120	0.05	0.0044	0.005	1	1	0.001

De la misma manera que se presentó anteriormente se presenta gráficamente en la figura C.4 la comparación de los 3 casos que se presenta en la tabla C.3, determinando los valores adecuados de los parámetros del modelo básico 1 del CEV instalado en el nodo 38.

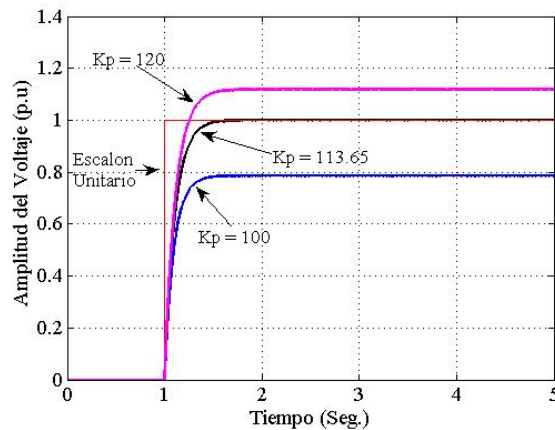


Figura C.4.- Comparación de los parámetros del modelo básico 1 del CEV para determinar los parámetros del modelo del CEV modelado en el nodo 38.

Una vez determinado los valores de los parámetros de los 3 CEV’s modelado en los nodos mas críticos del sistema de prueba, se realizar el análisis de una múltiple compensación consideran los parámetros de los 3 CEV’s determinados en las tablas C.1, C.2 y C.3 considerando el modelo básico 1 utilizan los valores determinados en la tabla C.4.

**Tabla C.4.- Modela del CEV para una Múltiple Compensación (Sintonizados).**

Nodo	Kp	Tp	Zth	Tm	T1	T2	Tr
36	19.53	0.05	0.0256	0.005	1	1	0.001
37	19.61	0.05	0.0255	0.005	1	1	0.001
38	113.65	0.05	0.0044	0.005	1	1	0.001

La figura C.5 se presenta el modelo básico 2 del CEV, el cual utiliza un regulador de voltaje proporcional e integral, con una retroalimentación, se analiza de la misma manera que el modelo básico 1 presentado en la figura B.1, utilizando el programa SIMULINK considerando los parámetros de la tabla C.5 utilizando una subrutina hecha en MATLAB, los bloque principales son descritos en el apéndice B, considerando la retroalimentación de la corriente a diferencia del modelo básico 1 al cual se adiciona de la misma manera el bloque que representa la interfase del modelo del CEV con el sistema eléctrico de potencia representado como  $Z_{th}$  (impedancia de Thevenin) o la inversa de la matriz de admitancia.

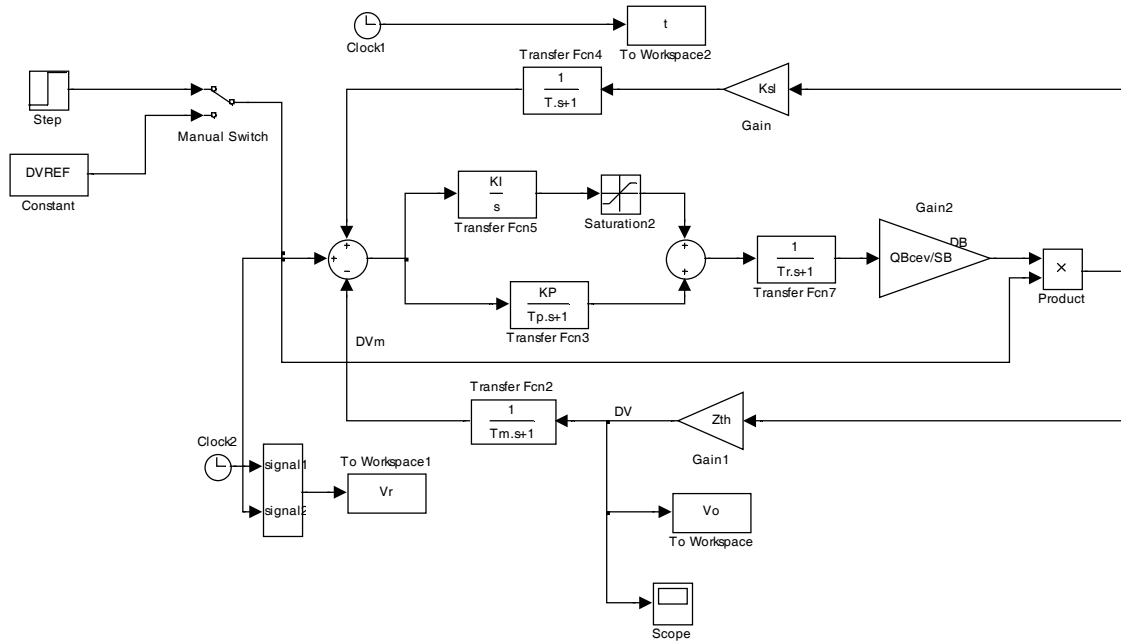


Figura C.5.- Diagrama a bloque del modelo básico 2 del CEV utiliza una retroalimentación y un regulador de voltaje proporcional e integral utilizando el programa de SIMULINK.

Para el análisis de la sintonización del modelo básico 2 del CEV se varia la variable  $K_p$  del regulador de voltaje para el sobre tiro y  $K_i$  para el ajuste de la velocidad en la que se estabiliza la señal. Se consideran 3 diferentes casos con diferentes valores del regulador de voltaje tipo proporcional e integral, considerando que los parámetros mas adecuados son los remarcados con negrita como se ilustra en la tabla C.5, comparado los parámetros en la figura C.6.

Tabla C.5.- Modelado del CEV con retroalimentación en el Nodo 38 (Sintonizados)

Nodo	$K_i$	$K_p$	$T_p$	$Z_{th}$	$T_m$	$T_r$
38	<b>0.001</b>	<b>100</b>	<b>0.01</b>	0.0044	0.003	0.001
38	0.001	120	0.01	0.0044	0.003	0.001
38	0.001	70	0.01	0.0044	0.003	0.001

Se presenta gráficamente en la figura C.6 el comportamiento o la comparación de los 3 casos, utilizando los tres diferentes parámetros, considerando el modelo básico 2 del CEV con retroalimentación, la señal mas adecuada es la que se presenta de color negro es la señal que se ubica en la misma posición de la señal referencia (escalón unitario).



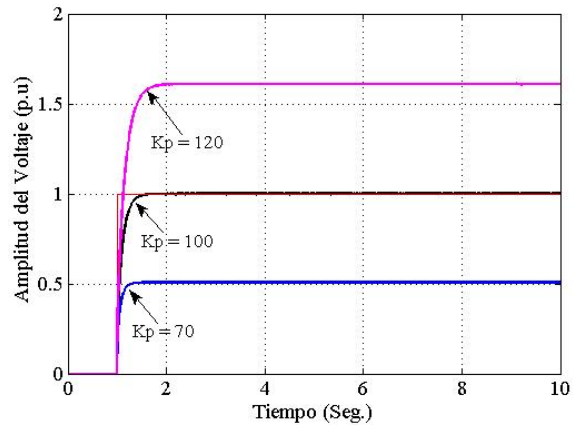


Figura C.6.- Comparación del modelo básico 2 del CEV considerando diferentes parámetros.