



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

---

---

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

## ESTABILIDAD TRANSITORIA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA CON LÍNEA DE CD EN ALTA TENSIÓN

### TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN  
CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA  
ELÉCTRICA

P R E S E N T A:  
GUILLERMO FERNANDO BALTAZAR HERNÁNDEZ



MÉXICO, D. F.

JUNIO 2008



# INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

## ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 13:00 horas del día 13 del mes de Junio del 2008 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E.S.I.M.E. ZAC para examinar la tesis de grado titulada:

### ESTABILIDAD TRANSITORIA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA CON LINEA DE CD EN ALTA TENSION

Presentada por el alumno:

**BALTAZAR**

Apellido paterno

**HERNÁNDEZ**

materno

**GUILLERMO FERNANDO**

nombre(s)

Con registro: 

B	0	5	1	6	9	7
---	---	---	---	---	---	---

aspirante al grado de:

### MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

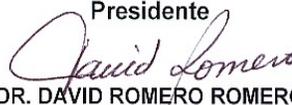
Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

### LA COMISIÓN REVISORA

Director de tesis

  
DR. DANIEL OLGUÍN SALINAS

Presidente

  
DR. DAVID ROMERO ROMERO

Segundo Vocal

  
DR. DANIEL RUIZ VEGA

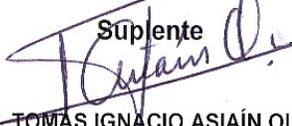
Tercer Vocal

  
DR. JAIME JOSE RODRIGUEZ RIVAS

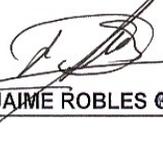
Secretario

  
DR. RICARDO OCTAVIO MOTA PALOMINO

Súplente

  
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  
SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO**

**CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS**

En la Ciudad de México, D. F., el día 13 del mes Junio del año 2008. El que suscribe **Guillermo Fernando Baltazar Hernández**, alumno del programa de maestría en ciencias con especialidad en ingeniería eléctrica con número de registro **B051697** adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la E.S.I.M.E. Unidad Zacatenco, manifiesta que es autor intelectual del presente Trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Daniel Olguín Salinas y cede los derechos del trabajo intitulado: **ESTABILIDAD TRANSITORIA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA CON LÍNEA de CD EN ALTA TENSION** 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: [sepibaltazar@yahoo.com.mx](mailto:sepibaltazar@yahoo.com.mx) Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

---

**GUILLERMO FERNANDO BALTAZAR HERNÁNDEZ**

**EL OBJETIVO FINAL SIEMPRE ES  
ALCANZADO CON PERSEVERANCIA Y  
ENTUSIASMO**

# A MIS PADRES

PABLO BALTAZAR ACEVEDO  
Y  
MARTHA HERNÁNDEZ LAGOS

Durante mi vida he tenido la ayuda incondicional de mis padres en todas mis actividades personales y profesionales. Me han animado constantemente a que persiga una nueva meta después de terminar la anterior. Gracias a su inmenso cariño y porque siempre han estado ahí para apoyarme y guiarme por el buen camino he logrado terminar mis estudios de posgrado. Dedico a ustedes con mucho cariño y agradecimiento esta tesis de maestría que fue un logro especial en mi vida.

# AGRADECIMIENTOS

AL DOCTOR DANIEL OLGUIN SALINAS POR SU DIRECCION Y SOBRE TODO POR SUS CONOCIMIENTOS TRANSMITIDOS PARA PODER LLEVAR ACABO ESTE TRABAJO DE TESIS.

A TODAS AQUELLAS PERSONAS QUE ME BRINDARON SU AYUDA Y ORIENTACION EN ALGUN MOMENTO IMPORTANTE EN EL DESARROLLO DE ESTE TRABAJO LES DOY LAS GRACIAS.

- M. EN C. OSCAR RENE AMAYA ZEPEDA ,CFE
- DR. JOSE ALBERTO GOMEZ HERNANDEZ, CFE
- ING. MARVIN TORRENTERA, CFE
- M. EN C. FRANCISCO JAVIER HERNANDEZ BETANCOURT, ESIME-AZCAPOTZALCO
- M. EN C. PEDRO M. RUBIO OROZCO, IEEE MEMBER
- ING. AARON GARCIA LOPEZ, UACM
- MARIA LOURDES MACEDO ORTEGA, ITESM-CAMPUS EDO.MEX.
- ING. MARIO BERNABE Y DE LA LUZ, SEPI-ZACATENCO

POR SU AMISTAD.

- EDMUNDO MONTOYA MONROY
- IVAN ARCHUNDIA ARANDA
- JOSE ANTONIO CASTILLO JIMENEZ
- GILBERTO SOTO ALBARRAN

# RESUMEN

La transmisión moderna de Alto Voltaje en Corriente Directa (**AVCD**) es relativamente una nueva tecnología que tuvo inicio en **1954**. El advenimiento de las válvulas de tiristores y las mejoras tecnológicas relacionadas durante los años pasados ha sido responsable de la aceleración del crecimiento de los sistemas de **AVCD**. La tecnología de **AVCD** todavía está experimentando muchos cambios debido a las innovaciones dirigidas a mejorar la confiabilidad y la reducción de los costos de las estaciones convertidoras. El último desarrollo es la introducción de la operación de sistemas multi-terminales que aumenta el alcance del uso de estos sistemas.

Con el incremento en el uso de la electrónica de potencia en transmisión y distribución en los sistemas eléctricos de potencia (**SEP'S**), existe una necesidad de entender mejor las interacciones dinámicas entre convertidores de **AVCD** y los sistemas de Corriente Alterna (**CA**). Son necesarios modelos convenientes de estos sistemas ya que facilitarán el diseño del control y permitirán simulaciones dinámicas rápidas y exactas. Sin embargo, el análisis de los sistemas del convertidor de **AVCD** es exigente debido a su naturaleza híbrida.

El trabajo que se presenta en esta tesis muestra que los sistemas de **AVCD** son absolutamente confiables y que el control del convertidor permite flexibilidad en la operación dinámica de los sistemas. Además se puede mencionar que la realización completa de las ventajas potenciales de la transmisión de **AVCD** requiere de estudios detallados durante la etapa de planeación y diseño. La tecnología de **AVCD** ha alcanzado un nivel de madurez y está contribuyendo al funcionamiento dinámico mejorado de los sistemas de **CA** como puede ser corroborado en esta tesis.

En este trabajo la investigación fundamental radica en la incorporación de sistemas de **AVCD** a sistemas convencionales de **CA**, con un énfasis en el comportamiento de los sistemas de transmisión en corriente directa en alta tensión durante condiciones de falla en la red de transmisión de **CA**. El estudio se centra en modelos de los convertidores de **AVCD** que consideran la dinámica de una corriente variable en el tiempo.

Debido a las razones expuestas en el párrafo anterior, es necesario llevar a cabo un estudio en sistemas de diferente escala y complejidad. Para cumplir con esto es necesario contar con una herramienta computacional y en este trabajo se lleva a cabo la mejora del modelo dinámico en **CA/CD** al hacer las implementaciones necesarias en el software **PST** (Power System Toolbox) versión 2.0 de fines didácticos hecho en **MATLAB** (versión 6.5) y su autor es Graham Rogers.

Los resultados obtenidos en las variables de los enlaces de **AVCD**, es decir, las respuestas típicas de un estudio de estabilidad angular ante grandes disturbios con enlaces de **AVCD** en los diferentes sistemas utilizados en este trabajo fueron satisfactorias porque al ser comparadas con lo propuesto y existente en la literatura hay una gran similitud.

# ABSTRACT

The modern transmission of High Voltage in Direct Current (**HVDC**) is relatively a new technology that it had initiated in 1954. The coming of the thyristor valves and the related technological improvements during the last years has been responsible for the acceleration of the growth of the **HVDC** systems. The **HVDC** technology still is experiencing many changes due to the directed innovations to improve the reliability and the reduction of the converter costs stations. The last development is the introduction of the operation of systems multi-terminals that the reach increases of the use of these systems.

With the increasing in the use of the power electronics in transmission and distribution of the electric power systems (**EPS**), a necessity exists to understand better the dynamic interactions between converters of **HVDC** and the alternating current systems (**AC**). There are necessary advisable models of these systems since they will facilitate the design of the control and will allow fast and exact dynamic simulations. Nevertheless, the analysis of the **HVDC** systems converter is demanding due to their hybrid nature.

The work that appears in this thesis shows that the **HVDC** systems are absolutely reliable and that the control of the converter allows flexibility in the dynamic operation of the systems. In addition it is possible to be mentioned that the complete accomplishment of the potential advantages of the **HVDC** transmission requires detailed studies during the stage of planning and design. The **HVDC** technology has reached a maturity level and is contributing to the improved dynamic operation of the **AC** systems as it can be corroborated in this thesis.

In this work the fundamental investigation is in the incorporation of **HVDC** systems to conventional **AC** systems, with an emphasis in the behavior of the transmission systems in high voltage direct current during conditions of fault in the **AC** network. The study is centered in models of the **HVDC** converters that consider the dynamics of a variable current on the time.

Due the reasons exposed in the previous paragraph, it is necessary to take a study in systems of different scale and complexity. In order to fulfill this it is necessary to have a computational tool and in this work it is improved the dynamic model in **AC/DC** of the software **PST** (Power System Toolbox) version 2,0 of didactic aims done in **MATLAB**.

The results obtained in the variables of **HVDC links**, that is to say, the typical answers of a study of angular stability before great disturbances with links of **HVDC** in the different systems used in this compared work were satisfactory because to the being with the existing proposed thing and in Literature there is a great similarity.

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	7
ABSTRACT.....	8
ÍNDICE GENERAL .....	9
LISTA DE TABLAS.....	13
LISTA DE FIGURAS .....	14
NOMENCLATURA .....	18

## CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN.....	21
1.2 OBJETIVO DE LA TESIS.....	22
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	22
1.4 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	23
1.5 APORTACIONES.....	23
1.6 GENERALIDADES.....	24
1.6.1 ¿Qué es la transmisión de AVCD clásica?.....	24
1.6.2 ¿Qué es la transmisión ligera (Light) de AVCD?.....	24
1.6.3 Transmisión PLUS de AVCD.....	25
1.7 ESTADO DEL ARTE .....	26
1.7.1 El enlace de AVCD de Gotland –Suecia.....	28
1.7.2 México en el año de 1962 y la posibilidad para la transmisión de AVCD...28	
1.7.3 Interconexiones entre CFE, ERCOT y WECC .....	29
1.7.4 Interconexión SIN – Baja California Sur .....	31
1.7.5 Antecedentes en la sección de estudios de posgrado.....	31
1.7.6 Antecedentes en instituciones nacionales y extranjeras.....	32
1.7.7 antecedentes relacionados a la estabilidad angular con enlaces de AVCD...33	
1.7.8 sistemas de AVCD existentes.....	34
1.8 LIMITACIONES Y ALCANCES .....	38
1.9 PUBLICACIONES.....	39
1.10 ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	39

## CAPÍTULO 2 ASPECTOS BÁSICOS DE LA TRANSMISIÓN DE AVCD

2.1 INTRODUCCIÓN .....	41
2.2 ARREGLOS PARA TRANSMISIÓN EN CD.....	41
2.2.1 Arreglo monopolar.....	42
2.2.2 Arreglo bipolar.....	42

2.2.3 Arreglo homopolar.....	43
2.3 TIPOS DE INTERCONEXIONES EN CORRIENTE DIRECTA.....	43
2.4 COMPONENTES BÁSICOS DE UN SISTEMA DE AVCD.....	45
2.5 CARACTERÍSTICAS DE LOS TIRISTORES.....	49
2.6 ANÁLISIS DE UN PUENTE CONVERTIDOR TRIFÁSICO.....	50
2.7 MODELADO DEL PUENTE CONVERTIDOR.....	52
2.8 ANÁLISIS DEL PUENTE CONVERTIDOR CONTROLADO SIN TRASLAP DE CONMUTACIÓN.....	52
2.8.1 Voltaje directo promedio.....	53
2.9 ANÁLISIS DEL PUENTE CONVERTIDOR CON TRASLAP DE CONMUTACIÓN .....	54
2.9.1 Caída de voltaje debido al traslape.....	57
2.9.2 Operación de rectificador.....	58
2.9.3 Operación de inversor.....	59
2.10 CONTROL DEL CONVERTIDOR.....	60
2.10.1 Generalidades.....	60
2.10.2 Principios básicos del control.....	61
2.10.3 Control.....	62

## **CAPÍTULO 3**

# **MODELADO DE SISTEMAS DE TRANSMISIÓN DE AVCD DE DOS TERMINALES PARA ESTUDIOS DE ESTABILIDAD ANGULAR ANTE GRANDES DISTURBIOS**

3.1 INTRODUCCIÓN.....	64
3.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	65
3.3 TÉCNICA DE SOLUCIÓN.....	66
3.4 INTERACCIÓN ENTRE SISTEMAS.....	67
3.5 SUBSISTEMAS.....	67
3.6 ESQUEMA BÁSICO PARA REPRESENTAR UN SISTEMA DE AVCD.....	68
3.7 ECUACIONES UTILIZADAS PARA UN ENLACE DE AVCD.....	69
3.8 MODELO DEL CONTROL DEL ENLACE DE AVCD.....	69
3.9 MODELO DE LA LÍNEA DE CD.....	71
3.9.1 Modelo simplificado de una línea de CD.....	71
3.9.2 Representación y modelo dinámico de una línea de CD.....	71
3.9.2.1 Modelos de línea aérea.....	71
3.9.2.2 Modelo del cable .....	72
3.9.3 Modelo pseudo-estacionario.....	73
3.10 MODELOS DE CARGAS.....	73
3.10.1 Clasificación de las cargas estáticas.....	73
3.11 ECUACIONES DE LA RED .....	74
3.12 MODELOS DEL GENERADOR .....	75

3.13 CLASIFICACIÓN DE LOS CONTROLES DEL GENERADOR.....	77
3.14 REPRESENTACIÓN DEL ENLACE DE AVCD EN LA RED DE TRANSMISIÓN.....	78

## **CAPÍTULO 4**

### **APLICACIONES Y RESULTADOS**

4.1 INTRODUCCIÓN .....	80
4.2 RESPUESTAS TÍPICAS DE UN ESTUDIO DE ESTABILIDAD ANGULAR ANTE GRANDES DISTURBIOS CON ENLACES DE AVCD.....	81
4.3 DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE ESTUDIO Y PRUEBAS REALIZADAS .....	82
4.4 ESTUDIO DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE CA DE DOS ÁREAS.....	83
4.5 ESTUDIO DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN CA/CD DE DOS ÁREAS.....	85
4.6 ESTUDIO DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN CA/CD DE DOS ÁREAS MODIFICADO.....	93
4.7 ESTUDIO DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN NUEVA INGLATERRA.....	99
4.8 ESTUDIO DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN CA/CD NUEVA INGLATERRA .....	102

## **CAPÍTULO 5**

### **CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES**

5.1 CONCLUSIONES GENERALES.....	110
5.2 RECOMENDACIONES PARA POSIBLES INVESTIGACIONES FUTURAS.....	111

APÉNDICE A.....	112
-----------------	-----

APÉNDICE B.....	113
-----------------	-----

APÉNDICE C.....	119
-----------------	-----

APÉNDICE D.....	121
-----------------	-----

REFERENCIAS.....	129
------------------	-----

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1-1</b> Lista de sistemas de AVCD.....	<b>34</b>
<b>Tabla 4-1</b> Resultados de flujos de carga del sistema mostrado en la figura 4.1.....	<b>83</b>
<b>Tabla 4-2.</b> Parámetros y valores del enlace de AVCD.....	<b>86</b>
<b>Tabla 4-3.</b> Condiciones iniciales del enlace de AVCD.....	<b>86</b>
<b>Tabla 4-4.</b> Parámetros y valores del enlace de CD.....	<b>93</b>
<b>Tabla 4-5.</b> Condiciones iniciales del enlace de AVCD.....	<b>94</b>
<b>Tabla 4-6.</b> Resultados de flujos de carga del sistema con enlace de CD.....	<b>94</b>
<b>Tabla 4-7.</b> Parámetros y valores del enlace de CD.....	<b>102</b>
<b>Tabla 4-8.</b> Condiciones iniciales del enlace de AVCD.....	<b>103</b>
<b>Tabla 4-9.</b> Resultados de flujos de carga del sistema con enlace de CD.....	<b>103</b>
<b>Tabla A-1</b> Valores del ESCR para clasificar la fuerza de los sistemas de CA.....	<b>112</b>
<b>Tabla B-1</b> Parámetros de las líneas de transmisión.....	<b>113</b>
<b>Tabla B-2</b> Parámetros de los generadores.....	<b>115</b>
<b>Tabla B-3</b> Parámetros de los RAV'S.....	<b>116</b>
<b>Tabla B-4</b> Parámetros de los ESP'S.....	<b>116</b>
<b>Tabla B-5</b> Parámetros del gobernador-turbina.....	<b>117</b>
<b>Tabla B-6</b> Parámetros del control de AVCD.....	<b>117</b>
<b>Tabla B-7</b> Parámetros de las líneas de transmisión.....	<b>118</b>
<b>Tabla B-8</b> Parámetros de los generadores.....	<b>118</b>
<b>Tabla B-9</b> Parámetros del control de AVCD.....	<b>118</b>

<b>Tabla D-1</b>	Formato para la especificación de la matriz bus.....	<b>124</b>
<b>Tabla D-2</b>	Formato para la especificación de la matriz line.....	<b>124</b>
<b>Tabla D-3</b>	Formato para la especificación de la matriz mac_con.....	<b>125</b>
<b>Tabla D-4</b>	Formato para la especificación de la matriz exc_con.....	<b>126</b>
<b>Tabla D-5</b>	Formato para la especificación de la matriz pss_con.....	<b>126</b>
<b>Tabla D-6</b>	Formato para la especificación de la matriz tg_con.....	<b>127</b>
<b>Tabla D-7</b>	Formato para la especificación de la matriz dcsp_con.....	<b>127</b>
<b>Tabla D-8</b>	Formato para la especificación de la matriz dcl_con.....	<b>128</b>
<b>Tabla D-9</b>	Formato para la especificación de la matriz dcc_con.....	<b>128</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b> Interconexiones existentes entre CFE y empresas extranjeras.....	<b>30</b>
<b>Figura 2.1.</b> Arreglo monopolar.....	<b>42</b>
<b>Figura 2.2.</b> Arreglo bipolar.....	<b>42</b>
<b>Figura 2.3.</b> Arreglo homopolar.....	<b>43</b>
<b>Figura 2.4.</b> Interconexión de CD de dos terminales.....	<b>44</b>
<b>Figura 2.5.</b> Interconexión de una planta generadora y un sistema de CA a través de CD... .....	<b>44</b>
<b>Figura 2.6.</b> Interconexión de CD <i>back to back</i> junto con línea de transmisión de CA....	<b>44</b>
<b>Figura 2.7.</b> Interconexión de CD <i>back to back</i> en la frontera.....	<b>44</b>
<b>Figura 2.8.</b> Interconexión multi-terminal serie.....	<b>45</b>
<b>Figura 2.9.</b> Interconexión multi-terminal paralelo.....	<b>45</b>
<b>Figura 2.10.</b> Diagrama esquemático de una estación convertidora típica de AVCD.....	<b>46</b>
<b>Figura 2.11.</b> Diagrama esquemático de una estación convertidora de 12 pulsos.....	<b>47</b>
<b>Figura 2.12.</b> Estructura y símbolo de un tiristor.....	<b>50</b>
<b>Figura 2.13.</b> Paquete típico de tiristores para la aplicación de AVCD.....	<b>50</b>
<b>Figura 2.14.</b> Convertidor trifásico o puente de Graetz.....	<b>51</b>
<b>Figura 2.15.</b> Formas de onda de voltaje y corriente del rectificador controlado.....	<b>52</b>
<b>Figura 2.16.</b> Formas de onda de voltaje y corriente del puente convertidor considerando traslape de conmutación.....	<b>55</b>
<b>Figura 2.17.</b> Circuito equivalente para conducción de 3 válvulas.....	<b>56</b>
<b>Figura 2.18.</b> Circuito equivalente de un puente rectificador.....	<b>59</b>
<b>Figura 2.19.</b> Circuitos equivalentes de un inversor.....	<b>60</b>
<b>Figura 2.20.</b> Circuito equivalente de una línea de CD y las estaciones convertidoras.....	<b>61</b>

<b>Figura 2.21.</b> Características del control de un sistema de AVCD de punto a punto.....	<b>62</b>
<b>Figura 3.1.</b> Representación esquemática que ilustra la interacción entre los sistemas CA/CD.....	<b>67</b>
<b>Figura 3.2.</b> Representación esquemática de un enlace de AVCD con N puentes convertidores conectados en serie.....	<b>68</b>
<b>Figura 3.3.</b> Circuito equivalente (enlace monopolar).....	<b>68</b>
<b>Figura 3.4.</b> Diagrama de bloques del control del rectificador.....	<b>69</b>
<b>Figura 3.5.</b> Diagrama de bloques del control del inversor.....	<b>69</b>
<b>Figura 3.6.</b> Representación de la línea aérea.....	<b>71</b>
<b>Figura 3.7.</b> Representación del cable de la línea de AVCD.....	<b>72</b>
<b>Figura 3.8.</b> Diagrama de bloques del modelo del RAV.....	<b>77</b>
<b>Figura 3.9.</b> Diagrama de bloques del modelo del ESP utilizado en este trabajo.....	<b>77</b>
<b>Figura 3.10.</b> Diagrama de bloques del modelo del gobernador-turbina.....	<b>78</b>
<b>Figura 4.</b> Variables de un sistema de AVCD ( $V, \alpha, \gamma$ ).....	<b>81</b>
<b>Figura 4.1.</b> Sistema de transmisión de dos áreas en CA.....	<b>83</b>
<b>Figura 4.2.</b> Magnitud del voltaje en el nodo 13.....	<b>84</b>
<b>Figura 4.3.</b> Potencia activa del generador 4.....	<b>84</b>
<b>Figura 4.4.</b> Ángulo del rotor del generador 2 (relativo al generador 4).....	<b>85</b>
<b>Figura 4.5.</b> Sistema de dos áreas con CD.....	<b>85</b>
<b>Figura 4.6.</b> Curvas de oscilación en términos de la diferencia angular entre máquinas .....	<b>87</b>
<b>Figura 4.7.</b> Potencia activa del generador 4.....	<b>88</b>
<b>Figura 4.8.</b> Voltaje de CA en la terminal del enlace.....	<b>89</b>

<b>Figura 4.9.</b> Ángulos de disparo de las estaciones convertidoras.....	<b>90</b>
<b>Figura 4.10.</b> Corriente en el enlace de CD.....	<b>91</b>
<b>Figura 4.11.</b> Voltajes de CD en las estaciones convertidoras.....	<b>91</b>
<b>Figura 4.12.</b> Potencia de CD en el enlace.....	<b>92</b>
<b>Figura 4.13.</b> Sistema de dos áreas modificado con CD.....	<b>93</b>
<b>Figura 4.14.</b> Curvas de oscilación en términos de la diferencia angular entre máquinas.....	<b>95</b>
<b>Figura 4.15.</b> Voltaje de CA en la terminal del enlace.....	<b>96</b>
<b>Figura 4.16.</b> Ángulos de disparo de las estaciones convertidoras.....	<b>97</b>
<b>Figura 4.17.</b> Corriente en el enlace de CD.....	<b>98</b>
<b>Figura 4.18.</b> Voltajes de CD en las estaciones convertidoras.....	<b>98</b>
<b>Figura 4.19.</b> Configuración del sistema para el caso de estudio.....	<b>99</b>
<b>Figura 4.20.</b> Magnitud del voltaje en el nodo 16.....	<b>100</b>
<b>Figura 4.21.</b> Curvas de oscilación en términos de la diferencia angular entre máquinas .....	<b>101</b>
<b>Figura 4.22.</b> Potencia activa de los generadores 4 y 5.....	<b>102</b>
<b>Figura 4.23.</b> Curvas de oscilación en términos de la diferencia angular entre máquinas .....	<b>105</b>
<b>Figura 4.24.</b> Potencia activa de los generadores 4 y 5.....	<b>105</b>
<b>Figura 4.25.</b> Voltaje de CA en la terminal del enlace.....	<b>106</b>
<b>Figura 4.26.</b> Ángulos de disparo de las estaciones convertidoras.....	<b>107</b>
<b>Figura 4.27.</b> Corriente en el enlace de CD.....	<b>108</b>
<b>Figura 4.28.</b> Voltajes de CD en las estaciones convertidoras.....	<b>108</b>
<b>Figura 4.29.</b> Potencia de CD en el enlace.....	<b>109</b>

**Figura D.1.** En esta ventana se muestran los valores de la matriz bus del sistema Nueva Inglaterra .....121

**Figura D.2.** Ventana que muestra los valores de la matriz line del sistema Nueva Inglaterra.....122

**Figura D.3.** Ventana que muestra los valores de la matriz mac\_con y exc\_con del sistema Nueva Inglaterra .....122

**Figura D.4.** Ventana que muestra los valores de la matriz pss\_con y tg\_con del sistema Nueva Inglaterra.....123

**Figura D.5.** Ventana que muestra los valores de la matriz dcsp\_con ,dcl\_con y dcc\_con del sistema Nueva Inglaterra.....123

## NOMENCLATURA

- HVDC → High Voltage Direct Current;
- CA → Corriente Alterna;
- CD → Corriente Directa;
- SEP'S → Sistemas Eléctricos de Potencia;
- IGBT → Insulated Gate Bipolar Transistor;
- ASEA → Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget;
- GE → General Electric;
- B\*B → *back to back*;
- CFE → Comisión Federal de Electricidad;
- ERCOT → Electric Reliability Council of Texas;
- WECC → Western Electricity Coordinating Council;
- FACTS → Flexible AC Transmision Systems;
- SCR → Short Circuit Ratio;
- PST → Power System Toolbox;
- PSS/E → Power System Simulator of Engineering;
- HVAC → High Voltage Alternating Current;
- AVR → Automatic Voltage Regulator;
- PSS → Power System Stabiliser;
- STATCOM → Static Compensator;
- UPFC → Unified Power Flow Controller;
- GTO → gate turn off thyristor;

NPCC → Northeast Power Coordinating Council;

$e_a, e_b, e_c$  → Voltajes de línea a neutro de las fuentes de energía trifásica del sistema de CA;

$e_{ac}, e_{ba}, e_{cb}$  → Voltajes de línea a línea de las fuentes trifásicas del sistema de CA;

$i_a, i_b, i_c$  → Corrientes de línea del sistema de CA;

$L_c$  → Inductancia de conmutación del transformador;

$V$  → Voltaje de CD del convertidor;

$I$  → Corriente en la línea de CD;

$E_m$  → Valor pico del voltaje de línea a neutro;

$\alpha$  → Ángulo de retardo de disparo del rectificador;

$\gamma$  → Ángulo de extinción del inversor;

$\mu$  → Ángulo de traslape;

$V_0$  → Voltaje directo ideal sin carga;

$X_c$  → Reactancia de conmutación;

$R_e$  → Resistencia equivalente de conmutación;

$R$  → Resistencia de la línea de CD;

EMTP → Electromagnetic Transients Program;

$N$  → Número de puentes de 6 pulsos conectados en serie en el lado de CD;

$a$  → Relación del transformador;

$L$  → Inductancia de la línea de CD;

$P_r$  → Potencia activa que pasa por el rectificador;

$P_i$  → Potencia activa que pasa por el inversor;

$Q_r$  → Potencia reactiva que pasa por el rectificador;

$Q_i$  → Potencia reactiva que pasa por el inversor;

LVK → ley de voltajes de Kirchhoff;

$K_{pr}$  → Ganancia proporcional del rectificador;

$K_{pi}$  → Ganancia proporcional del inversor;

$K_{ir}$  → Ganancia integral del rectificador;

$K_{ii}$  → Ganancia integral del inversor;

$K_{or}$  → Ganancia de salida del rectificador;

$K_{oi}$  → Ganancia de salida del inversor;

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 MOTIVACIÓN

La historia de la transmisión de la energía eléctrica revela que la transmisión fue desarrollada originalmente con corriente directa (**CD**); además las líneas y cables de **CD** han sido menos costosos que los de transmisión trifásica en corriente alterna (**CA**). Sin embargo, la potencia de **CD** en baja tensión no se podría transmitir sobre largas distancias, y esto condujo al desarrollo de los sistemas eléctricos de **CA**. La disponibilidad de transformadores y la mejora en máquinas de **CA** condujo al mayor uso de la transmisión de **CA**, la cual es más ventajosa que la **CD** en cuanto a su generación, distribución en bajos voltajes y consumo de energía. El advenimiento de la válvula de arco de mercurio demostró ser un adelanto vital para la transmisión de alto voltaje en corriente directa (**AVCD**). Después de que bastantes experimentos fueran conducidos en las válvulas de mercurio, la primera línea de **AVCD** fue construida en **1954** y fue un cable submarino con retorno a tierra entre la isla de Gotland y Suecia continental [1-5].

El desarrollo de tiristores fue otro avance significativo de la tecnología de **AVCD**. Las primeras válvulas semiconductoras de estado sólido fueron puestas en servicio en 1970 y las válvulas de arco de mercurio en los proyectos primitivos fueron substituidas por las válvulas de tiristores [4]. Como resultado de lo anterior, se redujo el tamaño y la complejidad de las estaciones convertidoras de **AVCD**. Los dispositivos semiconductores como **tiristores, IGBTs y GTOs** [6,8] en conjunción con los microprocesadores y procesadores de señales digitales han demostrado ser muy eficaces en comparación con las válvulas más viejas de mercurio. El uso más amplio de la tecnología de los semiconductores en los sistemas actuales de **AVCD** tiene grandes avances en la investigación de la electrónica de potencia. Con la demanda creciente para la energía de alta calidad, el uso de la electrónica de potencia en el campo de los sistemas de distribución y transmisión está atrayendo la atención completamente a través del mundo [7].

Las ventajas que ofrece la transmisión de **AVCD** son por lo cual es de suma importancia y esta tecnología hace uso de los mismos sistemas de **CA** para lograr tales beneficios.

En este capítulo se proporcionará una perspectiva histórica de la corriente directa en alto voltaje (**AVCD**) de los sistemas de transmisión, además se hace una descripción de los sistemas de **AVCD** existentes a nivel mundial desde sus orígenes hasta la actualidad. Un punto de suma importancia que es considerado en este trabajo de tesis son los argumentos que favorecen la opción de un enlace de **AVCD** y que son mencionados posteriormente en este mismo capítulo.

## 1.2 OBJETIVO DE LA TESIS

Realizar estudios vinculados a la estabilidad transitoria en diferentes sistemas eléctricos de potencia en **CA/CD** para investigar su comportamiento y el efecto que produce dicho enlace de **AVCD** en estos. Para cumplir con lo anterior y así poder llevar acabo las simulaciones correspondientes en este trabajo de tesis se utilizo un paquete de software llamado **PST** (Power System Toolbox) cuyo autor es Graham Rogers este programa se puso en funcionamiento y además se llevo acabo el mejoramiento del modelo dinámico en **CA/CD** al hacer las implementaciones necesarias en dicho paquete computacional.

Del paquete computacional utilizado existen funciones que pueden ser agrupadas en general en dos áreas; funciones del grupo estacionario y funciones del grupo dinámico. Utilizando estas últimas para cumplir con nuestro objetivo de estudio estas nos permiten incorporar controles tales como excitadores, estabilizadores del sistema de potencia, gobernadores turbina a los generadores síncronos así también como el de incluir la línea de **AVCD** y sus controles a los sistemas eléctricos de potencia. El método de prueba y error fue utilizado en este trabajo para la modular o sintonizar los controles de los **SEP'S** utilizados en este trabajo.

## 1.3 JUSTIFICACIÓN

Las centrales eléctricas generan la corriente alterna (**CA**) y la energía entregada a los consumidores está en forma de corrientes y voltajes de **CA** ¿Por qué entonces es a veces más conveniente utilizar la corriente directa, **AVCD**, para transmitir energía eléctrica? [16].

La inmensa mayoría de la transmisión de energía eléctrica utiliza corriente alterna trifásica. Las razones detrás de una opción de **AVCD** en lugar de **CA** para transmitir energía en un caso específico, son a menudo numerosas y complejas. Cada proyecto individual de transmisión exhibirá su propio sistema de razones que justifican la opción de **AVCD**, pero los argumentos más comunes que favorecen a la tecnología de **AVCD** son [16]:

- 1.- Bajar el costo de inversión.
- 2.- Distancias grandes a través del mar.
- 3.- Reducir pérdidas.
- 4.- Interconexiones asíncronas.
- 5.- Controlabilidad.
- 6.- Limitar corrientes de corto circuito.
- 7.- Menor impacto ecológico.
- 8.- Ofrece mejor estabilidad.

En términos generales las diversas razones de usar la tecnología de **AVCD** se pueden dividir en dos grupos principales, que son:

1.- La tecnología de **AVCD** es necesaria o deseable desde el punto de vista técnico (es controlable).

2.- La tecnología de **AVCD** da lugar a una inversión más baja (incluyendo pérdidas más bajas) y tiene menor impacto ecológico (menor derecho de vía).

En muchos casos, los proyectos se justifican en una combinación de ventajas de los dos grupos. Los aspectos que tienen menor impacto ecológico también están llegando a ser hoy más importantes. La tecnología de **AVCD** es en ese respecto favorable en muchos casos, pues las consecuencias ecológicas son menores que con **CA**. Esto es debido al hecho de que una línea de transmisión de **AVCD** es mucho más pequeña y necesita menos derecho de vía que las líneas de **CA** para la misma capacidad de potencia.

#### 1.4 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Cuando en un sistema eléctrico de potencia aparecen perturbaciones o disturbios grandes (cambios bruscos del régimen), tales como cortocircuitos, desconexión o conexión de cargas, generadores, transformadores, líneas de transmisión y otros elementos del sistema, surge la necesidad de realizar un estudio frente a un problema dinámico y asumimos que antes de que ocurra cualquier perturbación en el sistema de potencia este funciona en una cierta condición estable (estado estacionario). El interés principal de estos estudios se centra en el análisis del comportamiento del sistema eléctrico de potencia inmediatamente después de que acontezca cualquiera de las perturbaciones a las que puede estar sujeto. Los estudios de esta naturaleza son referidos en la literatura como análisis de la estabilidad transitoria de los **SEP'S**.

#### 1.5 APORTACIONES

Las principales aportaciones de este trabajo son:

- 1) Poner en funcionamiento un paquete de software comercial de fines didácticos conocido como **PST (Power System Toolbox)** para realizar estudios vinculados a la estabilidad transitoria de **SEP'S**.
- 2) Se mejoro el modelo dinámico **CA/CD** del paquete computacional utilizado.
- 3) Se incorporaron controles (**RAV, ESP, GOBERNADOR-TURBINA**) en los generadores síncronos de los **SEP'S** en estudio utilizando las funciones dinámicas con que cuenta este paquete computacional.
- 4) Incorporación de la línea de **CD** a los diferentes **SEP'S** en estudio para mejor su comportamiento dinámico.

## 1.6 GENERALIDADES

### 1.6.1 ¿Qué es la transmisión de AVCD clásica?

La tecnología de **AVCD clásica** [1,2,16] es utilizada para transmitir electricidad sobre largas distancias por líneas aéreas o cables submarinos. También se utiliza para interconectar sistemas de potencia separados, donde las conexiones tradicionales de corriente alterna no pueden ser utilizadas [2].

### 1.6.2 ¿Qué es la transmisión ligera (light) de AVCD?

La tecnología de **AVCD light** [16, 20,21] es el sistema de transmisión de energía más interesante desarrollado por varias décadas.

La tecnología de **AVCD light** es un sistema de potencia avanzado diseñado para transmitir energía subterránea y debajo del agua, también sobre largas distancias. Ofrece ventajas ambientales numerosas incluyendo, campos electromagnéticos neutros, los cables sin aceite y las estaciones del convertidor compactas.

La tecnología de **AVCD light** aumenta la confiabilidad de las redes de suministro de energía y en la actualidad alcanza **1200 MW** y  $\pm 320$  kV.

Es de rápida instalación y proporciona una alternativa a los sistemas convencionales de transmisión de **CA** y a la generación local. Los usos posibles incluyen:

- Conexión de parques eólicos a la red de transmisión.
- Enlaces de redes subterráneas.
- Alimentación de islas y plataformas marinas de extracción de gas/petróleo.
- Conexión de redes de suministro de diferente frecuencia.
- Alimentación de centros de ciudades (gran concentración de carga).
- Cruce de largas distancias de agua.

La **AVCD light** fue introducida en **1997**. Un número de transmisiones subterráneas hasta de **350 MW** están en operación comercial y se están construyendo más.

La **AVCD** es hoy una tecnología bien probada, empleada para la transmisión de energía eléctrica en todo el mundo. En total cerca de **70,000 MW** de capacidad de transmisión de **AVCD** está instalada en más de 90 proyectos.

Típicamente, la transmisión de **AVCD** tiene una potencia nominal de más de **100 MW** hasta una gama de **1000** a **3000 MW**.

### 1.6.3 Transmisión PLUS de AVCD

Su diseño innovador tiene ventajas técnicas y económicas. La tecnología de **AVCD PLUS** es la solución preferida donde el espacio reducido es un criterio. Es ideal para la conexión de plataformas alejadas de la costa y parques eólicos a la red de suministro terrestre así como para áreas de alta densidad. La transmisión de **AVCD PLUS** mejora el funcionamiento de las redes de suministro de transmisión, garantiza alta confiabilidad y sus resultados son bajos para el mantenimiento y montaje.

La tecnología de **AVCD PLUS** es una solución avanzada y universalmente aplicable para la transmisión de energía en la gama de hasta **1000 MW** o aún mas arriba.

Los sistemas de transmisión por cable de **AVCA** tienen una longitud limitada de transmisión, desde ambos puntos de vista técnicos y económicos, mientras que la **AVCD PLUS** no tiene prácticamente ninguna restricción. Por lo tanto, proporciona una solución óptima para distancias más largas de transmisión. La transmisión de **AVCD** es la solución para sistemas de longitudes por cable de 80- 120 **km**.

El concepto de **AVCD PLUS** asegura una amplia gama de usos para los siguientes tipos de transmisión de energía:

- conexión a largas distancias
- conexiones *back to back*
- configuración multi-terminal

Esta nueva tecnología proporciona numerosas ventajas técnicas y económicas comparadas con los enlaces convencionales de **AVDC**. Las características particulares son:

- Las aplicaciones adicionales para la transmisión de Alto Voltaje en Corriente Directa, son la conexión a sistemas débiles o aislados, que abren nuevas oportunidades a la conexión de parques eólicos y plataformas marinas de aceite y gas.
- Dimensiones compactas, atractivas donde el espacio es limitado o en esos lugares donde es muy costosa la tierra (áreas urbanas). El tamaño reducido de la **AVCD PLUS** se alcanza como consecuencia de los requisitos perceptiblemente más pequeños de los filtros.
- El sistema es fácil de ampliarse o expandirse por la conexión de unidades en paralelo.

- Alto funcionamiento dinámico del control.
- Alta confiabilidad y disponibilidad.
- Ningún sistema de retorno a tierra, y por lo tanto, ninguna consecuencia ecológica causada por los electrodos.

### 1.7 ESTADO DEL ARTE

**TOMAS ALVA EDISON**, en **1876** estableció su laboratorio de investigación en Menlo park, New Jersey. Una dínamo comercial (generador de **CD**) apareció en **1879**. Una lámpara incandescente en el mismo año, y en **1882** la estación Pearl Street comenzó a proporcionar energía eléctrica al distrito financiero de Nueva York (vía 100,000 pies de cables subterráneos). La fuente de energía era un grupo de seis dínamos enormes de **100 kW**, cada uno capaz de la iluminación de 1,200 bombillas. La era eléctrica había comenzado, usando **CD** [7,14].

**MARCEL DEPREZ** fue un ingeniero eléctrico francés, nació en el sur de Chatillong Loing. El murió en Vincennes. Deprez condujo los primeros experimentos para transmitir energía eléctrica sobre largas distancias. En la exposición internacional de la electricidad, de París en **1881**, Deprez emprendió la tarea de presentar un sistema de distribución de electricidad basado en el transporte de larga distancia de corriente directa. La primera tentativa acertada ocurre en **1882** de Miesbach a Munich, en Alemania con motivo de la exposición de la electricidad en Glaspalast, organizada por Oskar von Miller [3,14].

El 16 de septiembre de **1882**, Miesbach se convirtió en el punto de partida para la primera transmisión de larga distancia de energía eléctrica en el mundo. Una línea de transmisión de energía de 1.343 kV transmitiendo 2 kW de Miesbach sobre una distancia de 35 millas (57 kilómetros) a Munich [1].

Durante años, se hicieron muchos intentos para desarrollar convertidores para la transmisión de alto voltaje en corriente directa (**AVCD**), el desarrollo no era básicamente el ensamblado de interruptores controlados. Un método y el más conocido en la primera etapa de la transmisión de **CD** de alto voltaje fue desarrollado por el ingeniero suizo René Thury en el año de 1889 [1], esto fue la continuación del trabajo de Deprez. Este sistema utilizó motores y generadores de **CD** conectados en serie para incrementar el voltaje. Y fue utilizado en Europa de 1890 a 1937. Un ejemplo de este sistema fue instalado en 1889 en Italia por la compañía de Acquedotto de Ferrari-Galliera, el cual transmitió 630 **kW** en 14 **kV** de **CD** sobre una distancia de 120 km. El sistema Moutiers-Lyon (es el mejor ejemplo de la tecnología de transmisión en **CD**) transmitió 8600 **kW** de energía eléctrica a una distancia de 124 millas, incluyendo 6 millas de cable subterráneo. Este

sistema que utilizó ocho generadores conectados en serie con conmutadores duales para un voltaje total de 150 kV entre los polos y funcionó a partir de 1906 hasta 1936 y, fue probablemente el primer reconocimiento de la existencia de un sistema de CA/CD [3].

Dos tentativas más serias en el desarrollo de un convertidor para la transmisión de CD de Alto Voltaje son el convertidor rotatorio y el convertidor de arco atmosférico de Marx [3].

El convertidor rotatorio, patentado en 1920 por dos ingenieros británicos, W.E.Highfield y J.E.Calverley, consistió esencialmente de transformadores polifásicos conmutados por escobillas rotatorias sincronizadas. Este desempeñaba las tres funciones básicas: de transformación de voltaje, multiplicación de fase y conmutación. Además, podían ser usados ya sea como un rectificador o como inversor. Ya que los conmutadores eran estacionarios y solamente el equipo de escobillas rotaba, el problema de fuerza centrífuga fue mitigado. Varios convertidores rotatorios experimentales fueron construidos, el más grande fue dimensionado en 2 MW, 20 A, 100 kV en el lado de CD, pero ninguno se utilizó comercialmente.

El Convertidor de arco atmosférico, diseñado por E. Marx in 1932, es un dispositivo de conmutación en el cual un arco entre dos electrodos principales enfriados por agua es encendido por una chispa de alta frecuencia entre dos electrodos auxiliares en la trayectoria del arco principal y es extinguido después de que una corriente cero por un soplido de aire o una mezcla de gases que continuamente recorre la ruta del arco. En un tiempo tales convertidores podían manejar más potencia (40 MW) que cualquier otro convertidor entonces disponible. La vida de los electrodos, no obstante, era corta y la caída de tensión entre electrodos era grande (500 V). Las pérdidas en el arco, junto con la potencia requerida para ignición, soplido de aire, y el enfriamiento, ascendieron de 2.5 a 3% de la potencia transmitida en cada terminal. Esto es considerablemente más grande que las correspondientes pérdidas (cerca de 0.3 %) en los convertidores de arco de mercurio.

Otros convertidores basados en interruptores mecánicos se probaron en Inglaterra y Suecia en los años veinte y treinta. Los años treinta fue un período muy activo para la investigación sobre la tecnología del convertidor de AVCD. El desarrollo de la tecnología de AVCD se mejoró extensivamente en esta década en Suecia en ASEA (Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget), fundada en 1883 por Ludving el Fredholm. Pero no solo fue limitado a Suecia. En realidad, la literatura es dominada por ponencias y artículos de autores alemanes aunque los investigadores e ingenieros de Rusia, Suiza, Francia y Estados Unidos de Norteamérica pueden también ser encontrados entre esas de ponencias significativas relacionadas a la conversión de energía de CA/CD y viceversa. En estados unidos de Norteamérica, la General Electric Company construyó convertidores para líneas de CD durante los años treinta. En estos convertidores se usaron válvulas de arco de mercurio con capacidades relativamente bajas y estuvieron en operación de 1937 a 1945 [14].

Los progresos de la tecnología de **AVCD** acelerada en los años 50s se debía probablemente a que parecía ser comercialmente factible. De hecho, la tecnología de **AVCD** en 1954 era tan nueva que nadie podría realmente garantizar su funcionamiento. La introducción de la válvula de mercurio al servicio comercial en 1954 marco el principio de la era moderna de la transmisión de **AVCD**.

### 1.7.1 El enlace de AVCD de Gotland –Suecia

La isla de Gotland era originalmente autosuficiente en lo que concierne a energía eléctrica. Una central térmica en Slite abasteció las necesidades de la isla entera. Sin embargo los costos de producción eran relativamente altos y las tarifas eran el doble de las de Suecia continental. Era por lo tanto costoso operar industrias en Gotland y había problemas con el desempleo y la despoblación.

Para romper esta tendencia el parlamento **Sueco** decidió en **1950** financiar un enlace de transmisión del **continente** a **Gotland**. Este enlace permitiría satisfacer una mayor demanda para la electricidad y al mismo tiempo reducir las tarifas. La transmisión era en **AVCD** debido a la larga distancia (**100 km**) a través del mar [2, 3,7].

Una mejora significativa de la tecnología de **AVCD** vino alrededor de **1970** cuando las válvulas de tiristores fueron introducidas en lugar de las válvulas de arco de mercurio. Esto redujo el tamaño y la complejidad de las estaciones convertidoras de **AVCD** substancialmente. El uso de microordenadores en el equipo del control en las transmisiones de hoy también ha contribuido a hacer que esta tecnología sea la alternativa de gran alcance en la transmisión de energía que es hoy [4,7].

Hacia finales de los años setenta, se llevó la tecnología de los semiconductores de estado sólido a los sistemas de conversión de **AVCD** [4,7]. Los primeros convertidores de tiristores se pusieron en servicio alrededor de **1970** en el esquema **Gotland** como extensión comercial y en Sakuma, Japón, como una instalación experimental “*back to back*”. En **1972**, la General Electric puso en operación el primer sistema de **AVCD** del mundo, con tecnología de estado sólido (válvulas de tiristores), en Eel River en New Brunswick, Canadá.

### 1.7.2 México en el año de 1962 y la posibilidad para la transmisión de AVCD

El panorama en cuanto a la utilización comercial en México de la transmisión de **AVCD**, donde ya en **1962** se consideraban las posibilidades de su uso en los proyectos específicos de las líneas de transmisión Angostura (Chiapas) – México D.F. y la línea de transmisión del sumidero con evacuación total de la energía en el sistema Puebla – Veracruz o su alternativa de evacuación mixta, sobre el sistema central, con enlace en la subestación sur de la red de México D.F. y sobre el sistema Puebla – Veracruz, con enlace en la subestación de la planta de Temascal. Sin embargo cabe hacer mención que las

conclusiones en ese tiempo fueron económicamente desfavorables para las alternativas de la transmisión de **AVCD** frente a las clásicas con alta tensión en corriente alterna [11].

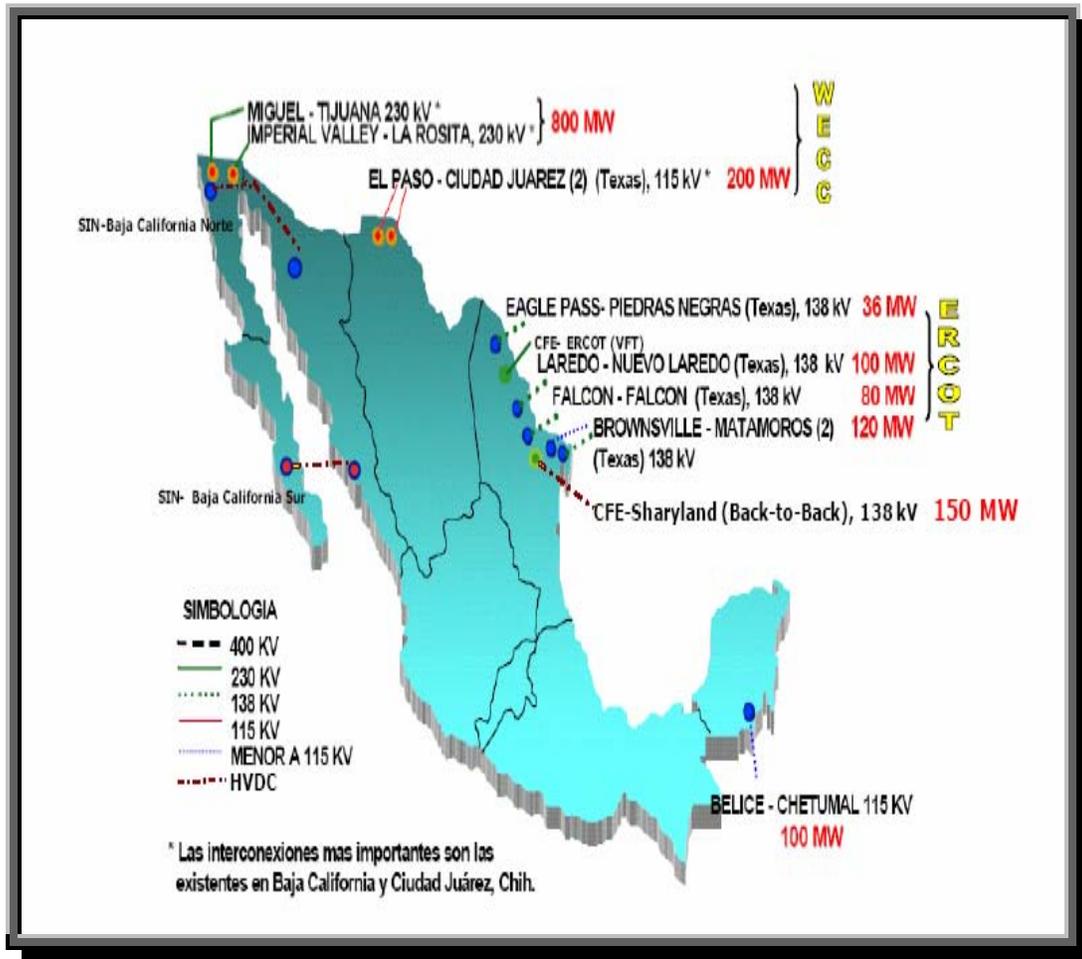
Por otro lado también en **1962** y dentro del mismo estudio de referencia, se presenta como alternativa la posibilidad de interconectar las redes de 50 y 60 Hz del país mediante convertidores estáticos de frecuencia, propuesta que fue finalmente desechada debido a desventajas económicas frente a la unificación de frecuencias a 60 Hz, cambiando para esto la frecuencia del sistema central de 50 a 60 Hz [11].

### 1.7.3 Interconexiones entre CFE, ERCOT y WECC

La Comisión Federal de Electricidad (**CFE**) y el Consejo Eléctrico de Confiabilidad de Texas (**ERCOT**) tienen una historia larga de ayuda de emergencia a través de la frontera **México/Estados Unidos**. Un análisis de los sistemas de dichas empresas para determinar oportunidades a corto y largo plazo para las interconexiones fue realizado en conjunto en el año **2003**. Tales interconexiones producirán capacidad creciente de transmisión a lo largo de la frontera y facilitarán el comercio internacional de electricidad y ayuda de emergencia mutua [15]. Estos sitios potenciales se pueden apreciar en la **figura 1.1** [15].

En ambas oportunidades, las interconexiones de alto voltaje de transmisión síncronas y asíncronas serán consideradas, pero el esfuerzo primario se centra en las interconexiones asíncronas que permiten programar la transferencia de potencia entre las redes de suministro eléctrico. Típicamente estas interconexiones asíncronas se ponen en práctica con enlaces de alto voltaje en corriente directa puesto que producen confiabilidad y flexibilidad significativa en ambas redes eléctricas de suministro [15].

El área del Paso del Águila y de Piedras Negras tiene un enlace *back to back* existente de **AVCD** de **36 MW** situado en la subestación del Paso del Águila de American Electric Power Texas Central Company. Las redes de suministro de **CA** son de **138 kV**. Sharyland es una interconexión asíncrona de gran escala para apoyar el intercambio de energía de emergencia y energía comercial que negocian los Estados Unidos de Norteamérica y México. Un enlace de **CA** podría crear dificultades operacionales severas, tales como flujo de potencia incontrolado y oscilaciones en la potencia que conducen al colapso de la red de suministro [15].



**Figura 1.1. Interconexiones existentes entre CFE y empresas extranjeras.**

El sistema de Comisión Federal de Electricidad (CFE) está conectado en sincronismo y en forma permanente con la red de suministro de transmisión de California del consejo de coordinación eléctrica occidental (WECC) en dos subestaciones: Valle imperial y Miguel vía líneas de **230 kV** con una capacidad combinada de **800 MW**. Este enlace entre estas dos empresas surgió de la necesidad de efectuar intercambios de energía entre estos dos estados fronterizos, y además proporciona respaldo en situaciones de emergencia.

Existe una segunda interconexión entre CFE y WECC en la zona de Juárez del área de control norte, existe un enlace síncrono en **115 kV**. El convenio de compra de energía de CFE con la empresa eléctrica norteamericana El paso Electric Company (EPECO), específica que solo se utiliza bajo condiciones de emergencia de la zona de Juárez. Para realizar la transferencia de energía de la empresa EPECO, es necesario seccionar parte de la red eléctrica, con el objetivo de evitar problemas de estabilidad entre los dos sistemas [15].

#### 1.7.4 Interconexión SIN – Baja California Sur

Actualmente, el proyecto de interconexión entre el SIN y el área Baja California Sur se encuentra en etapa de prefactibilidad considerando las opciones de cable submarino de tecnología de **AVCD** clásica y Light.

Los puntos analizados para llevar a cabo la interconexión han sido las subestaciones El Palmar, ubicada en la zona Los Cabos y Olas Altas en la zona La Paz, para la parte correspondiente a la península de Baja California Sur. En el Área Noroeste, se han estudiado como posibles puntos de interconexión la subestación La Higuera, en la zona Culiacán y Topolobambo, en la zona Los Mochis [15].

Para la interconexión con la zona Los Cabos, se ha considerado una longitud del tramo marino de 220 km, y una longitud del tramo terrestre de 60 km, incluyendo ambos extremos del enlace. Para la interconexión con la zona La Paz, estas distancias son de 190 km y 30 km, respectivamente [15].

#### 1.7.5 Antecedentes en la sección de estudios de posgrado

En el programa de ingeniería eléctrica de la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Politécnico Nacional se ha intentado trabajar con **SEP'S** de **CA** anexando enlaces de **CD**, teniéndose como resultado los 2 trabajos que a continuación se describen brevemente:

- 1) En Junio de 1974 Alfredo Nava Segura realiza un estudio donde presenta el comportamiento de un sistema de transmisión de energía eléctrica en alta tensión con corriente directa durante condiciones de falla. Los diferentes disturbios fueron realizados en un simulador de alta tensión con corriente directa (**ATDC**) del laboratorio de análisis de sistemas de potencia de esta misma sección. El trabajo es extensivo a fallas en las estaciones convertidoras, en la línea de transmisión de **CD** y en los lados de **CA** del sistema [11].
- 2) En Diciembre de 2007 Maria Concepción Ortiz Villanueva mejora un programa de computadora de flujos de potencia en **MATLAB**, para introducir el modelo de la línea de **CD** en diferentes sistemas eléctricos de potencia. Dicho programa realiza estudios en estado estacionario. Este tipo de estudios son usados para determinar las características de operación del sistema de generación/transmisión para un conjunto de cargas, en los nodos. La solución de las ecuaciones de flujos de carga para sistema (**CA-CD**) se puede efectuar por medio de dos métodos: Secuencial y método de eliminación de variables. Utilizando el software de **PSS/E (Power System Simulator of Engineering)** se validaron los resultados, dando un análisis comparativo con los diferentes métodos utilizados [35].

### 1.7.6 Antecedentes en instituciones nacionales y extranjeras

En diferentes programas de estudios institucionales nacionales e internacionales se ha trabajado en la inclusión de enlaces de **AVCD** a **SEP'S** convencionales de **CA**, teniéndose como resultado los siguientes trabajos de tesis que a continuación se describen brevemente:

En el año de 1978 en la universidad de Londres:

- 3) En Mayo de 1978 nuevamente Alfredo Nava Segura en su tesis de doctorado desarrolla una representación matemática generalizada para un convertidor trifásico, además se ocupa de la simulación dinámica de los sistemas de **AVCD** usando una computadora híbrida para estudios de fallas desbalanceadas con sistemas de **CA** débiles [36].

En la universidad Auburn Alabama:

- 4) En Diciembre de 1989 Eric Thomas Smed realiza una tesis donde propone un nuevo método para incluir enlaces de **CD** en cálculos de flujos de potencia, la idea principal del nuevo enfoque es eliminar la ecuación de **CD** esto se puede hacer analíticamente o numéricamente [38].

En el programa de graduados e investigación en ingeniería eléctrica del instituto tecnológico de Morelia se realizó el siguiente trabajo:

- 5) En Enero de 2002 Miguel Ángel Gómez Martínez donde su objetivo de trabajo es incluir los enlaces de corriente directa de alto voltaje en el algoritmo de flujos de potencia basado en el método de Newton-Raphson utilizando el método de eliminación de variables [37].

En el centro de investigación y estudios avanzados del **IPN** unidad Guadalajara se realizó el siguiente trabajo:

- 6) En Julio de 2002 Jaime Arrollo Ledesma en su trabajo de tesis investiga la aplicación de métodos y técnicas de análisis lineal al estudio de estabilidad angular en sistemas híbridos **CA/CD**, con un énfasis en el control de oscilaciones electromecánicas entre áreas o grupos de generadores [10].

### 1.7.7 antecedentes relacionados a la estabilidad angular con enlaces de AVCD

En esta sección del presente trabajo se mencionarán de manera breve algunos de los trabajos encontrados en la literatura que tratan de alguna manera con la estabilidad de los SEP'S anexando enlaces de AVCD.

- 1) EPRI Report EL-3004, año 1983 [33].El propósito de este manual es proporcionar información sobre los sistemas de transmisión de alto voltaje en corriente directa (HVDC) que serán útiles a los planificadores de sistemas de transmisión y generación proporcionando una fuente conveniente de información en el tema.
- 2) M.Klein,G.J.Rogers, P.Kundur año 1991 [18].En este trabajo se presenta un estudio fundamental de naturaleza de oscilaciones interárea en sistemas de potencia. Los efectos de la estructura del sistema, el modelado del generador, tipos de excitación y cargas del sistema se discuten detalladamente. En estudio, ambas análisis de la estabilidad ante pequeños disturbios y estabilidad transitoria se utilizan para determinar las características del sistema.
- 3) Jos Arrillaga and B.Smith, año 1998 [4].El objetivo primario de este libro es la incorporación de los convertidores y sistemas de HVDC en el análisis del sistema de potencia, pero los algoritmos descritos se pueden ampliar a la tecnología de los dispositivos FACTS.
- 4) Dragan Jovic, Nalin Pahalawaththa,Mohamed Zavahir, año 1999[40].Un nuevo modelo analítico HVDC-HVAC es presentado en este trabajo. El modelo comprende tres subsistemas: sistema de CA, PLL y sistema de CD. El modelo se estructura de tal manera que permita el análisis ante pequeños disturbios de las interacciones HVDC-HVAC y de los posibles problemas que se presentan de estas interacciones. El modelo de HVDC Benchmark de CIGRE se utiliza como sistema de prueba. La verificación del modelo, se realizo usando PSCAD/EMTDC para simulaciones
- 5) Dragan Jovic, Nalin Pahalawaththa,Mohamed Zavahir, año 1999[41]En este trabajo se discute la influencia de los lazos de control de la HVDC en la estabilidad dinámica del sistema de HVDC-HVAC. La descomposición del valor propio se utiliza para el análisis de la estabilidad del sistema, en la gama de frecuencia menor que 100 Hz.

- 6) J.Arrollo, A.R. Messina, D. Olguín Salinas.2001 [39].En este trabajo se discuten los resultados de los estudios realizados al sistema interconectado mexicano con la incorporación de un enlace de **HVDC** propuesta. El objetivo principal de este estudio es el evaluar la capacidad de un sistema de **HVDC** para mejorar de manera simultánea la estabilidad de varios modos de oscilación interárea.
- 7) Jaime Arrollo Ledesma, año 2002 [10].En este trabajo de tesis se estudia el problema de la representación de sistemas de **CD** de punto a punto inmersos en sistemas de **CA** y se investiga la extensión de los métodos de estudio propuestos al análisis de sistemas multiterminales operando de manera coordinada con esquemas flexibles de transmisión de corriente alterna. Se aborda el problema de interacción entre controles y se proponen criterios para evaluar la controlabilidad y observabilidad de modos electromecánicos en sistemas **CA-CD**.

### 1.7.8 sistemas de AVCD existentes

Por los argumentos que favorecen a la tecnología de **AVCD**, aunadas al gran incremento que han tenido los costos de los combustibles en los últimos años de la década de **1970** y primeros de la de **1980**, la industria del servicio eléctrico ha tenido un incremento muy importante en el número de sistemas de **AVCD** en estudio y en construcción. En la tabla **1-1** [7,15] se muestra una lista actualizada de los sistemas de **AVCD** existentes a nivel mundial.

**TABLA 1-1** Lista de sistemas de **AVCD**

Nombre	Año de contratación	Capacidad de transmisión, MW	Voltaje de cd, Kv	Longitud de línea y/o de cable, Km	Ubicación
<b>Con válvulas de arco de mercurio</b>					
Elbe-project	1945	60	± 200	100	Alemania
Moscow-Kashira	1951	30	200	100	Rusia
Gotalnd I	1954	20	± 100	96	suecia
HVDC cross-channel	1961	160	± 100	64	Francia
Konti-Skan I	1964	250	250	180	Dinamarca-suecia
HVDC Volgograd	1964	750	400	475	Rusia

Donbass					
HVDC Inter.- Island	1965	1200	+270 -350	570	Nueva Zelanda
Sakuma	1965	300	± 125	<b>B-B*</b>	Japón
Sacoi 1	1965	200	200	118	Italia
HVDC Vancouver Island 1	1968	312	260	33	Columbia Británica
Pacific DC Intertie	1970	3100	± 500	1362	E.U
Nelson River Bípode 1	1971	1620	± 450	895	Canadá
HVDC Kingsnorth	1975	640	± 266	85	Reino Unido

Con válvulas de tiristores					
Gotalnd extension	1970	30	± 150	96	Suecia
Eel River	1972	320	2 x 80	<b>B-B*</b>	Canadá
Skagerrak I y II	1976/77	500	± 150	240	Noruega- Dinamarca
Skagerrak III	1993	440	350	240	Noruega- Dinamarca
Vancouver II	1977	370	-280	74	Canada
Shin - Shinano	1977 1992	300 600	1 x 125 2 x 125	<b>B-B*</b>	Japon
Square Butte	1977	500	± 250	749	E.U
David A.Hamil	1977	100	50	<b>B-B*</b>	E.U
Cahora Bassa	1978	1920	± 533	1414	Mozambique- Sudafrica
Nelson River II	1978 1985	900 1800	± 250 ± 500	930	Canada
Cu	1979	1000	± 400	710	E.U
Hokkaido-Honshu	1979/80 1993	300 600	250 ± 250	168	Japon
Acaray	1981	50	25.6	<b>B-B*</b>	Paraguay
Vyborg	1982	1065	3 x ± 85	<b>B-B*</b>	Rusia
Inga-Shaba	1982	560	± 500	1700	Zaire
Duernrohr	1983	550	145	<b>B-B*</b>	Austria
Gotlland II	1983	130	150	100	Suecia

Eddy country	1983	200	82	<b>B-B*</b>	E.U
Chateauguay	1984	1000	2 x 140	<b>B-B*</b>	Canadá
Oklaunion	1984	200	82	<b>B-B*</b>	E.U
Itaiupu	1984/88	6300	± 600	785	Brasil
Pac Intertie(upgrade)	1984	2000	± 500	1362	E.U
Blackwater	1985	200	57	<b>B-B*</b>	E.U
Highgate	1985	200	± 56	<b>B-B*</b>	E.U
Madagaska	1985	350	140	<b>B-B*</b>	Canada
Miles city	1985	200	82	<b>B-B*</b>	E.U
Broken Hill	1986	40	± 8.33	<b>B-B*</b>	Australia
Inermountain	1986	1920	± 500	784	E.U
Cross-Channel	1986	2000	2 x ± 270	72	Francia/Inglaterra
Des Cantons-Comeford	1986	690	± 450	172	Canada/E.U
SACOI	1986	50	200	385	Derivación de Córcega
	1992	300	200	385	Italia
Uruguaiiana Frequency Converter	1987	53.7	17.9	<b>B-B*</b>	Brasil (enlace con Uruguay)
Gotland III	1987	260	± 150	103	Suecia
Sydney	1988	200	55.5	<b>B-B*</b>	E.U
Konti-Skan II	1988	300	285	150	Suecia-Dinamarca
Vindhyachal	1989	500	2 x 69.7	<b>B-B*</b>	India
Pac Intertie(expantion)	1989	1100	± 500	1362	E.U
Mc Neil	1989	150	42	<b>B-B*</b>	Canada
Fenno-Skan	1989	500	400	200	Finlandia-Suecia
Sileru-Barsoor	1989	400	± 200	196	India
Gezhouba-Shanghai	1989/90	1200	± 500	1000	China
Rihand - Delhi	1991	1500	± 500	915	India
Hydro -Quebec-New England	1991	2000	± 450	1500	Canada/E.U
Wolmirstedt	1992	600	160	<b>B-B*</b>	Alemania
DC hybrid link	1992	560	-350	617	Nueva Zelandia
Etzenricht	1993	600	160	<b>B-B*</b>	Alemania(enlace con

					Checoslovaquia)
Viena Southeast	1993	550	145	<b>B-B*</b>	Austria (enlace con Hungría)
Santo Tome	1993	50	17.3	<b>B-B*</b>	Argentina-Brasil
Baltic-Cable	1993	600	450	12	Alemania-Suecia
HVDC Haenam	1996	300	180	101	Korea
Kontek	1996	600	400	170	Alemania-Dinamarca
Welch-Monticello	1998	600	162	<b>B-B*</b>	E.U
HVDC Visby-Nas	1999	50	80	70	Suecia
Minami-Fukumitsu	1999	300	125	<b>B-B*</b>	Japon
Swe pol	2000	600	450	245	Suecia-Polonia
Kii Channel HVDC system	2000	1400	+500	50	Japon
HVDC Italy-Greece	2001	500	400	110	Italia-Grecia
HVDC Moyle	2001	250	250	63.5	Reino Unido
HVDC Thailand-Malaysia	2002	300	300	110	Tailandia-Malasia
East South-II	2002	2000	500	1450	India
HVDC Three Gorges-Changzhou	2003	3000	+500	890	China
HVDC Three Gorges-Guangdong	2003	3000	+500	940	China
Basslink	2005	600	400	71.8	Australia
Vizag II	2005	500	176	<b>B-B*</b>	India
Sharyland	2007	150	± 21	<b>B-B*</b>	E.U
Imera Power HVDC Wales-Ireland,East West Interconnector	2008	500	± 400	130	Irlanda-País de Gales
NorNed	2008	700	± 450	580	Noruega-Paises Bajos
SAPEI	2008/09	1000	± 500	435	Italia-Cerdena

Con IGBTs					
HVDC Hellsjon-Grangesberg	1997	3	180	10	Suecia
HVDC Tjaereborg	2000	7.2	$\pm 9$	4.3	Dinamarca
Eagle Pass, Texas	2000	36	$\pm 15.9$	<b>B-B*</b>	E.U
Directlink	2000	180	80	59	Australia
Cross Sound Cable	2002	330	$\pm 150$	40	E.U
Murraylink	2002	220	$\pm 150$	177	Australia
HVDC Troll	2005	84	$\pm 60$	70	Noruega
Estlink	2006	350	$\pm 150$	105	Estonia-Finlandia
HVDC Valhall	2009	78	150	292	Noruega

\* ESTACIONES CONVERTIDORAS BACK TO BACK O ESPALDA-ESPALDA

## 1.8 LIMITACIONES Y ALCANCES

Las limitaciones y alcances considerados en el paquete de software utilizado en este trabajo de tesis son las que de una manera breve se mencionan a continuación:

### Limitaciones:

- No se cuenta con un modelo de enlaces de **AVCD** multi-terminales (serie, paralelo) para ser aplicado al análisis de la estabilidad transitoria de los **SEP'S**.
- Las fallas no pueden ser aplicadas a las estaciones convertidoras y línea de **CD**.

### Alcances:

- Incorporación de diferentes modelos del generador (clásico, cuarto orden y sexto orden) a los **SEP'S**.
- Incorporación de controles a los generadores síncronos (**RAV, ESP, G-T**).
- Diferentes modelos de los enlaces de **AVCD** (monopolar, bipolar).
- Modelos de cargas estáticas y dinámicas.

## 1.9 PUBLICACIONES

Este trabajo tuvo como resultado las publicaciones siguientes:

- GUILLERMO BALTAZAR, DANIEL OLGUÍN, "ESTABILIDAD TRANSITORIA DE UN SEP HÍBRIDO CA-CD", ENCUENTRO PIFI 2006, MÉXICO, D.F., DEL 28 AL 30 DE AGOSTO DEL 2006.
- GUILLERMO BALTAZAR, DANIEL OLGUÍN, "ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD TRANSITORIA DE UN SISTEMA MULTIMÁQUINAS CA/CD", ENCUENTRO PIFI 2007, MÉXICO, D.F., DEL 28 AL 30 DE AGOSTO DE 2007.
- GUILLERMO BALTAZAR, DANIEL OLGUÍN, "ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD TRANSITORIA DE UN SISTEMA DE DOS ÁREAS INTERCONECTADO CA/CD" 10 CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA Y DE SISTEMAS. MÉXICO, D.F, DEL 26 AL 30 DE NOVIEMBRE DE 2007.

## 1.10 ESTRUCTURA DE LA TESIS

Los siguientes capítulos que integran esta tesis se organizan y se describen de una manera breve como sigue:

- El **capítulo 1** da una descripción general del desarrollo histórico de la transmisión de **AVCD** a nivel mundial.
- El **capítulo 2** presenta los principales elementos de un sistema de **AVCD**, así como los arreglos y tipos de interconexiones de dichos enlaces de **CD**. Además se hace un análisis del funcionamiento del puente convertidor trifásico tanto para una estación rectificadora como inversora y por último se tratan los principios básicos de control de dichos enlaces de **CD**.
- En el **capítulo 3** se describen los modelos de los cuales esta conformado el sistema **CA/CD**, además se describe como es incorporado el enlace de **AVCD** a la Ybus.
- El **capítulo 4** presenta los resultados obtenidos de 3 casos de estudio en sistemas multimáquinas en los cuales se demuestra de una manera muy clara el impacto de los enlaces de **AVCD** para mejorar el funcionamiento dinámico de los sistemas de **CA**.

- Finalmente en el **capítulo 5** el estudio es terminado dando algunas conclusiones genéricas del trabajo realizado y además se dan algunas sugerencias para trabajos futuros respecto a la tecnología de **AVCD**.

## CAPÍTULO 2

# ASPECTOS BÁSICOS DE LA TRANSMISIÓN DE AVCD

## 2.1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas de alto voltaje en corriente directa (AVCD) se están utilizando comúnmente en los sistemas de potencia modernos [17], con lo cual la CD ha crecido en forma significativa en los últimos años. La transmisión de alto voltaje en corriente directa, basada en nuevos semiconductores que ofrecen ventajas técnicas y económicas tales como: bajos costos de línea, ninguna necesidad del control de la frecuencia, mejora las condiciones dinámicas en los sistemas de CA, debido a que estos sistemas de AVCD tienen la capacidad de controlar rápidamente la potencia transmitida teniendo como resultado un impacto significativo en la estabilidad del sistema. En algunos sistemas, un circuito de doble línea puede hacer uno de los sistemas interconectados inestable en el acontecimiento de una falla trifásica. La inclusión de un enlace de AVCD en paralelo puede proporcionar condiciones de funcionamiento estables; esta aplicación se ve reflejada en una simulación de un sistema con las características mencionadas en el capítulo 4. Por lo tanto es esencial un buen entendimiento de las características de los sistemas de AVCD para el estudio de la estabilidad del sistema de potencia. Un aspecto sobresaliente y que es de gran importancia mencionar es un diseño apropiado de los controles de la CD para proporcionar un funcionamiento satisfactorio del sistema de CA/CD.

Este capítulo proporcionará una introducción general a los principios básicos de la operación y control de los sistemas de AVCD. Haciendo un énfasis en el análisis detallado del sistema del AVCD de dos terminales o también llamado de punto a punto consistiendo en las dos estaciones del convertidor, un rectificador y el inversor, conectados por una línea o cable de transmisión de CD.

## 2.2 ARREGLOS PARA TRANSMISIÓN EN CD

Los enlaces de corriente directa se clasifican según el número de conductores utilizados [1, 2, 5, 7, 10,30,31,34] que puede ser de 3 tipos como a continuación se define.

- arreglos monopolares
- arreglos bipolares
- arreglos homopolares

### 2.1.1.- Arreglo monopolar

La configuración básica de un arreglo monopolar se muestra en la **figura 2.1** utiliza un conductor, generalmente de polaridad negativa. La trayectoria de retorno es proporcionada por tierra o mar y se usa en forma permanente como se muestra en el diagrama. También puede utilizarse un retorno metálico en lugar de un retorno por tierra esto se puede utilizar en situaciones donde es demasiada alta la resistencia de la tierra. El conductor que forma el retorno metálico está en baja tensión. Las consideraciones de costo conducen a menudo al uso de tales sistemas. Este tipo de configuración puede también ser la primera etapa en el desarrollo de un arreglo bipolar. La transmisión monopolar se utiliza en sistemas de capacidad de potencia relativamente baja, principalmente con transmisión por cables.

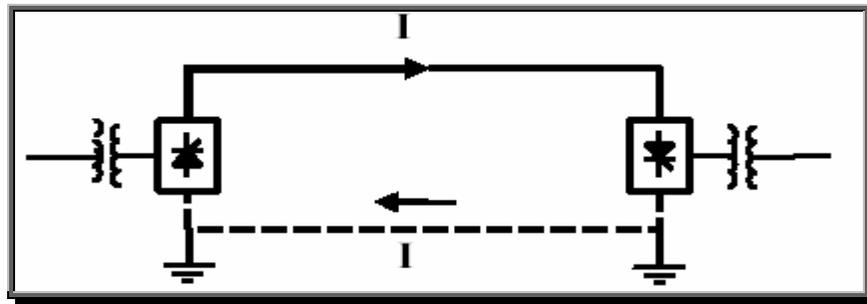


Figura 2.1. Arreglo monopolar.

### 2.2.2.- Arreglo bipolar

Este tipo de configuración se muestra en la **figura 2.2**, tiene dos conductores, uno positivo y otro negativo, cada uno puede ser un conductor doble en líneas de extra alto voltaje. Cada terminal tiene dos sistemas de convertidores de voltajes nominales idénticos, en serie en el lado de CD. La unión entre los dos sistemas de convertidores son los puntos neutros y se aterriza en uno o ambos extremos. Normalmente, ambos polos funcionan con corrientes iguales y por lo tanto hay cero corrientes fluyendo por retorno a tierra bajo estas condiciones. En este tipo de arreglos cuando acontece una falla en un conductor, el otro conductor con retorno a tierra puede llevar hasta la mitad de la carga nominal.

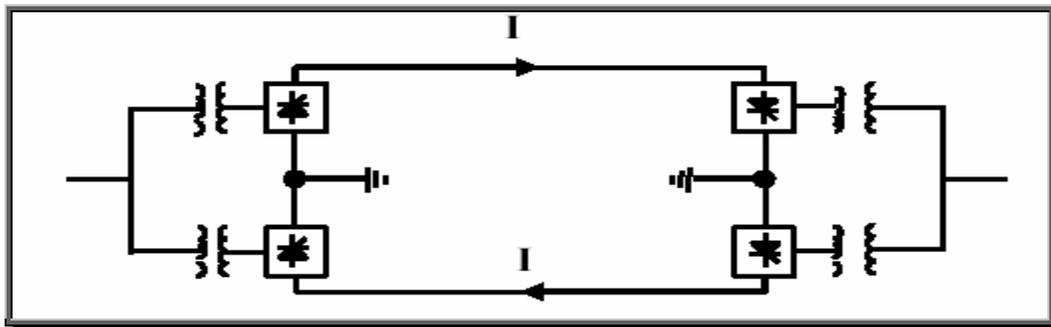


Figura 2.2. Arreglo bipolar.

### 2.2.3.- Arreglo homopolar

Este tipo de configuración se muestra en la **figura 2.3**, tiene dos o más conductores todos tienen la misma polaridad, generalmente negativa, y funciona siempre con retorno a tierra o metálico. En el acontecimiento de una falla en un conductor, el convertidor entero está disponible para la conexión al conductor o los conductores restantes, que, teniendo cierta capacidad de sobrecarga, pueden llevar más que la mitad de la potencia nominal, y tal vez toda la potencia nominal, a expensas del aumento de las pérdidas en la línea.

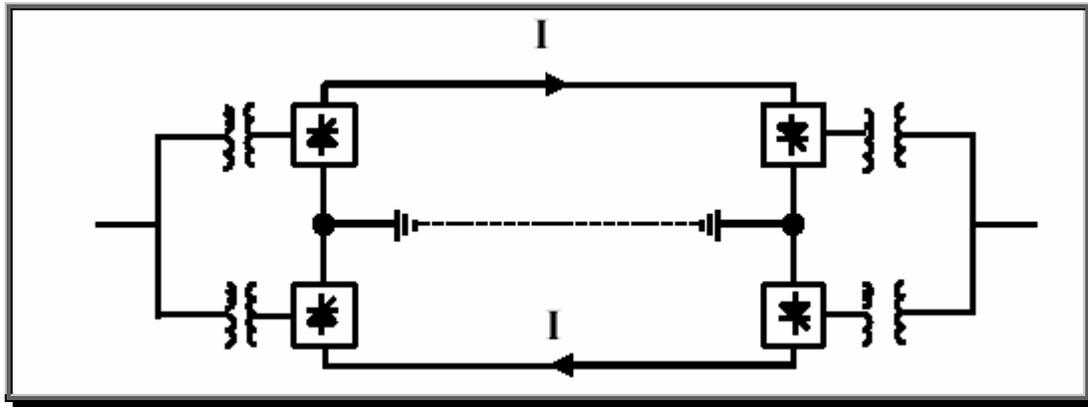


Figura 2.3. Arreglo homopolar.

## 2.3 TIPOS DE INTERCONEXIONES EN CORRIENTE DIRECTA

Teniendo un arreglo en el enlace de **CD**, Hay cuatro configuraciones posibles para la interconexión, que son las que a continuación se describen [1, 7,10]:

1. Interconexión de dos terminales o de punto a punto es donde cada terminal del enlace de **CD** está situada en un lugar conveniente en alguna parte dentro de la red y conectada por una línea aérea de **CD** o cable. Esto se ilustra en la **figura 2.4**. También la interconexión puede ser de una planta generadora a un sistema de **CA** a través de un enlace de **CD** y esto se ilustra en la **figura 2.5**.
2. Interconexión espalda a espalda o por sus siglas en inglés *back to back* (también llamada estación acoplada de **AVCD**) situada en alguna parte dentro de una red y una línea de **CA** de la otra red conecta a la estación común. Lo anterior se ilustra en la **figura 2.6**.
3. Interconexión espalda a espalda (*back to back*) situada cerca de la frontera entre los dos sistemas. Esto es un caso especial del anterior. Esto se ilustra en la **figura 2.7**.

4. Interconexión multi-terminal de **CD** tiene mas de dos estaciones convertidoras, algunas de ellas funcionan como rectificadoras y otras como inversoras.

Hay dos posibles tipos de interconexiones en sistemas multi-terminales (**MTC**D)

- 1) serie
- 2) paralelo

Estos esquemas se ilustran en la **figuras 2.8 y 2.9.**



Figura 2.4. Interconexión de CD de dos terminales.

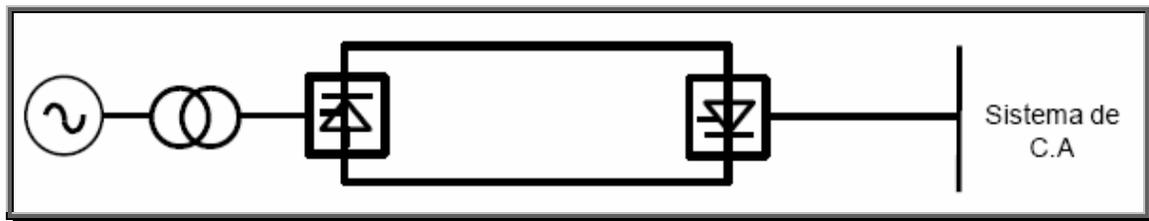


Figura 2.5. Interconexión de una planta generadora y un sistema de CA a través de CD.

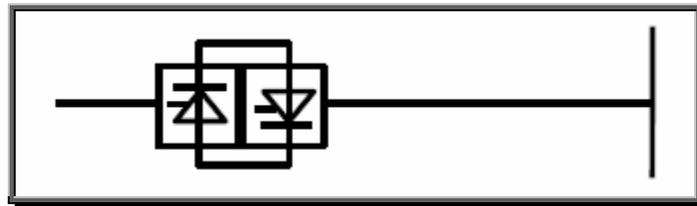


Figura 2.6. Interconexión de CD *back to back* junto con línea de transmisión de CA.

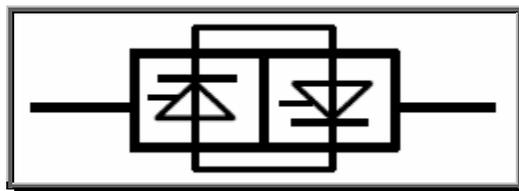


Figura 2.7. Interconexión de CD *back to back* en la frontera.

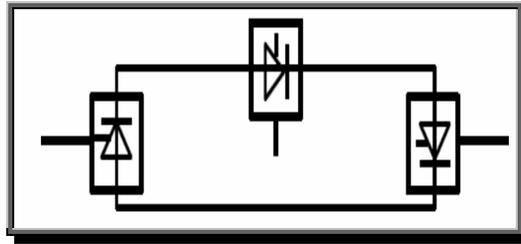


Figura 2.8. Interconexión multi-terminal serie.

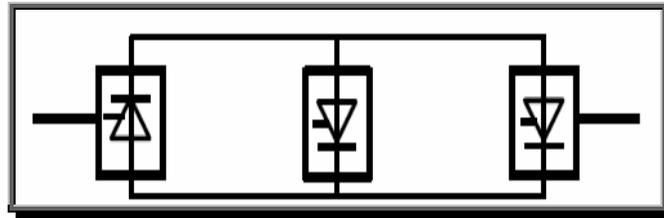


Figura 2.9. Interconexión multi-terminal paralelo.

Las configuraciones entre la primera y segunda opción, debe ser observado que los costos del convertidor son menores para la estación acoplada de **AVCD** y los costos de la línea de **CA** es mayor que los costos de la línea de **CD**. Si las distancias implicadas son menores que **200 kilómetros**, la segunda configuración debe ser la preferida. Si la relación de corto circuito (**SCR descrito en el apéndice A**) [2] es aceptable, entonces la tercera alternativa será la mas económica.

La aplicación exitosa de las interconexiones de **CD** de dos terminales que se han hecho por todo el mundo han demostrado a los planeadores de sistemas de energía que los esquemas de **CD** de tres terminales (**3TCD**) y multiterminales (**MTCD**) pueden ser los vehículos para utilizar plenamente las ventajas económicas y técnicas de la tecnología **AVCD** en el futuro [2].

## 2.4 COMPONENTES BÁSICOS DE UN SISTEMA DE AVCD

Los principales componentes de un sistema de transmisión de **AVCD** [2,33,34], se muestran en la **figura 2.10**.

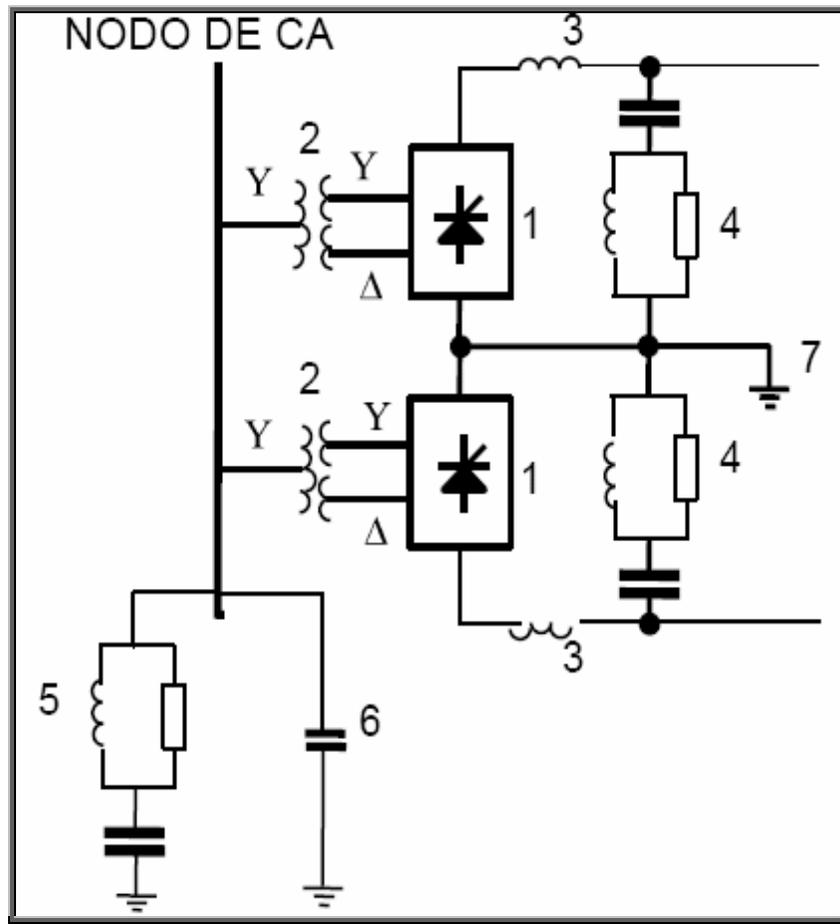


Figura 2.10. Diagrama esquemático de una estación convertidora típica de AVCD.

A continuación se describe de manera breve cada uno de ellos.

### 1.- ESTACIÓN CONVERTIDORA

Es el elemento donde se lleva a cabo el proceso de conversión de **CA** a **CD** (estación rectificadora) y de **CD** a **CA** (estación inversora). Prácticamente las estaciones convertidoras basadas en válvulas de tiristores consiste generalmente de 2 puentes convertidores trifásicos de 6 pulsos conectados en serie para formar una estación convertidora de 12 pulsos y la **figura 2.11** muestra este arreglo esquemático. Además se considera que la suma de las tensiones de los 2 puentes convertidores de 6 pulsos dará la tensión total de la estación convertidora de 12 pulsos. Las válvulas pueden ser empaquetadas como arreglos de una sola válvula, doble válvula o cuatro válvulas. El convertidor es alimentado por los transformadores convertidores conectados en arreglos estrella/estrella y estrella/delta [7].

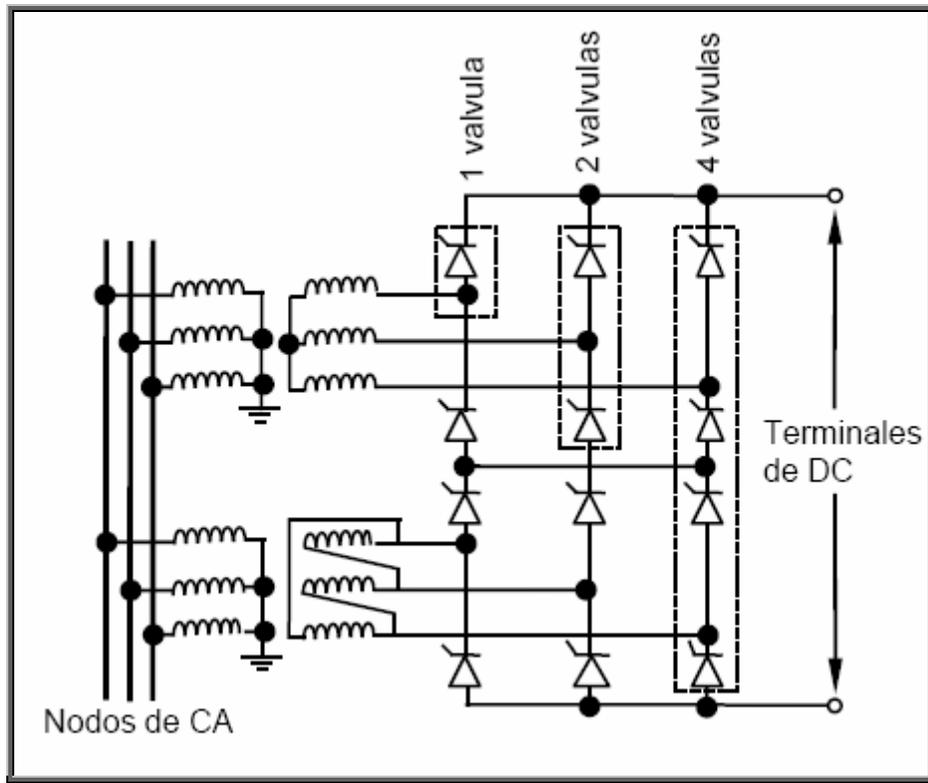


Figura 2.11. Diagrama esquemático de una estación convertidora de 12 pulsos.

Las válvulas son enfriadas por aire, aceite, agua o freón [17]. El líquido refrigerante utilizando agua desionizada es más eficiente y da lugar a la reducción de las pérdidas de la estación.

### REQUISITOS DE LAS VÁLVULAS DE AVCD

Las estaciones convertidoras de **AVCD** son un montaje de válvulas y los requisitos principales de una válvula de **AVCD** para transmisión de energía son:

- a) Existe conducción cuando la polarización es directa (de ánodo a cátodo) [8] ocurre cuando el ánodo es más positivo que el cátodo y el bloqueo inverso cuando el cátodo es más positivo que el ánodo.
- b) Cuando un tiristor está en modo de conducción la caída de voltaje directo es muy pequeña.
- c) Capacidad para soportar altos voltajes negativos y positivos sin interrupción.
- d) Instante de disparo controlable.

Se han usado en instalaciones comerciales diferentes tipos de equipos para llenar estos requisitos. Antes de **1970** se aplicó la tecnología de arco de mercurio con multientrehierros en la construcción de válvulas. En **1972** entró en operación la primera estación convertidora equipada completamente con válvulas de tiristores. Desde **1975**, las nuevas estaciones convertidoras han utilizado únicamente válvulas de tiristores.

## **2.-TRANSFORMADOR CONVERTIDOR**

El transformador convertidor puede tener diferentes configuraciones y a continuación se mencionan:

- a) trifásicos , dos devanados
- b) monofásicos, tres devanados
- c) monofásicos, dos devanados

Los devanados del lado de la válvula están conectados en estrella-delta con punto neutro sin conexión a tierra. En el lado de **CA**, los transformadores están conectados en paralelo con neutro a tierra. La reactancia de dispersión del transformador se elige para limitar las corrientes de corto circuito a través de cualquier válvula.

Los transformadores del convertidor se diseñan para soportar tensiones de voltaje de **CD** y las pérdidas crecientes de la corriente de eddy debido a corrientes armónicas.

## **3.-REACTOR DE ALISAMIENTO**

Con los convertidores de **CD** se pone en servicio un reactor de alisamiento para modular la corriente de rizo de **CD** y reducir los transitorios de corriente durante las contingencias del sistema. Este sirve para el propósito secundario de proteger la válvula del convertidor contra variaciones fuertes del voltaje que provengan de la línea de **CD**.

## **4.-FILTROS DE ARMÓNICAS DE CD**

Se requieren filtros en el lado de **CD** de los convertidores para limitar la interferencia con los circuitos de comunicación que haya en las cercanías de la línea de **CD**.

## **5.-FILTROS DE ARMÓNICAS DE CA**

Los convertidores generan corrientes armónicas y las introducen en el sistema de **CA**. Los filtros armónicos de **CA** reducen el paso de armónicos al sistema de **CA** al proporcionar una baja impedancia de armónicas a tierra. Además, proporcionan parte de la potencia reactiva consumida por el convertidor.

## 6.-FUENTES DE POTENCIA REACTIVA

Las estaciones convertidoras requieren suministro de potencia reactiva que depende sobre la carga de potencia activa (cerca de 50 a 60 % de la potencia activa). Afortunadamente, parte de esta potencia reactiva requerida es proporcionada por filtros de CA. Además, capacitores en derivación y sistemas estáticos de vars se utilizan dependiendo de la velocidad de control deseada.

## 7.-ELÉCTRODOS

Se ha demostrado que es posible usar el terreno como trayectoria de retorno para la corriente directa en las transmisiones de AVCD, y hacer así menores las pérdidas a la vez que los costos de instalación. El retorno a tierra o por el terreno puede usarse en transmisión de un solo polo o como “conductor” extra en el caso de tener una falla en un polo de una transmisión bipolar.

La caída de voltaje en la trayectoria del retorno por tierra se concentra en los electrodos de tierra o de mar porque la corriente directa sigue las capas de buena conducción por varios kilómetros bajo la superficie de la tierra entre los electrodos.

### 2.5 CARACTERÍSTICAS DE LOS TIRISTORES

El tiristor es el elemento que constituye a las válvulas de AVCD, es un dispositivo semiconductor de tres terminales (ánodo, cátodo, compuerta) esto se ilustra en la **figura 2.12**. Funcionalmente es un interruptor de paso de corriente unidireccional. Al paso de los años, las capacidades de voltaje y corriente de los tiristores han aumentado hasta una capacidad de alrededor de 6 kV y una capacidad de corriente en tiristor independiente de alrededor de 3000 A [17,30,31].

El paquete típico de un tiristor consiste en la oblea semiconductor de silicio encapsulada en un paquete de porcelana del tipo de disco. Las características metálicas del paquete están sujetas a presión a disipadores de calor (enfriados por aire o líquido) **figura 2.13**. Las caras metálicas son ánodo y cátodo del tiristor. La disipación mayor de energía de un tiristor ocurre cuando está conduciendo corriente (es funcionalmente un interruptor cerrado). Pero ocurre una pérdida menor cuando el tiristor se comporta funcionalmente como un “interruptor abierto” a causa de las corrientes de fuga que provienen del voltaje que se imprime al tiristor [17].

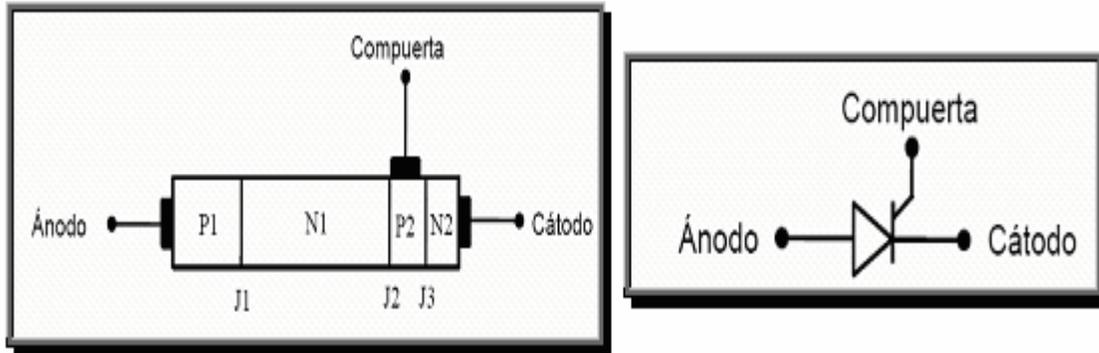


Figura 2.12. Estructura y símbolo de un tiristor.

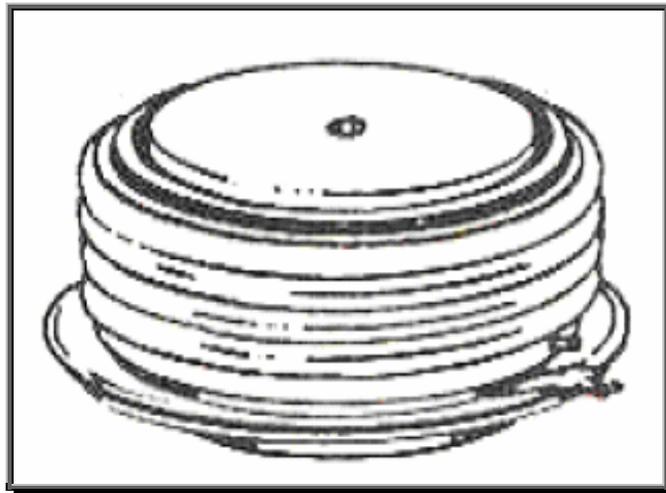


Figura 2.13. Paquete típico de tiristores para la aplicación de AVCD.

## 2.6 ANÁLISIS DE UN PUENTE CONVERTIDOR TRIFÁSICO

En esta sección se analiza el funcionamiento de un circuito de puente trifásico de onda completa, el cual se referirá como el convertidor de puente trifásico de seis pulsos. La configuración del puente también llamada circuito de Graetz [7, 17, 30,31] es como se muestra en la **figura 2.14**.

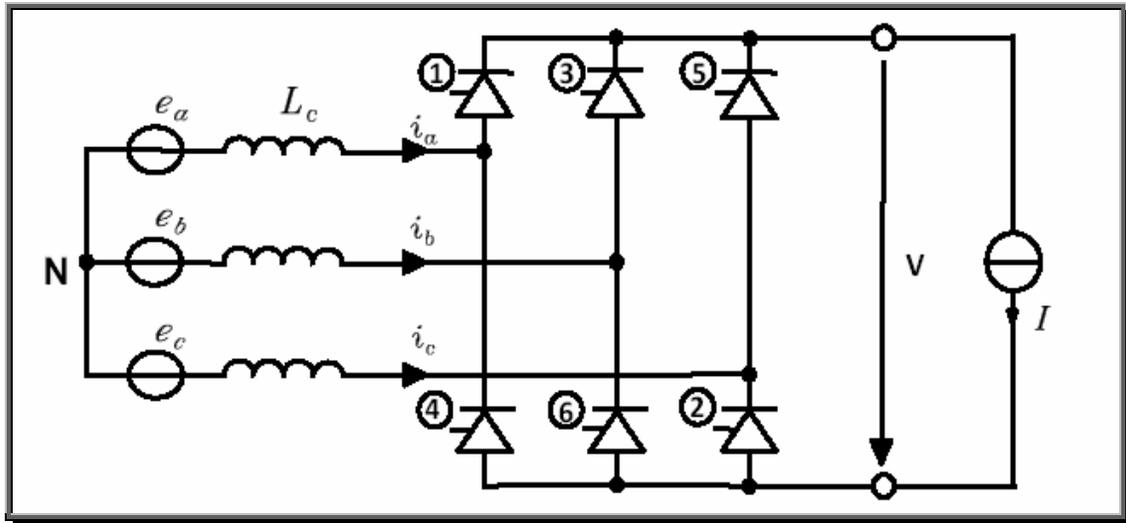


Figura 2.14. Convertidor trifásico o puente de Graetz.

Un número de suposiciones básicas son hechas aquí para el análisis:

- 1.- El sistema de CA se representa como una fuente de voltaje trifásica ideal de frecuencia constante en serie con inductancias ( $L_c$ ) iguales sin pérdidas.
- 2.- La corriente de CD,  $I$  es continua y el rizo es mucho menor que el valor de la corriente nominal debido a la utilización de reactores serie. Como consecuencia, se asume que la corriente es prácticamente constante.
- 3.- Las válvulas son interruptores ideales con resistencia cero cuando conducen y resistencia infinita cuando no conducen.

Se asume la variación siguiente de las fuentes de voltaje con el tiempo:

$$e_a = E_m \cos(\omega t + 60^\circ)$$

$$e_b = E_m \cos(\omega t - 60^\circ) \quad (2.1)$$

$$e_c = E_m \cos(\omega t - 180^\circ)$$

Por lo tanto, los voltajes de línea a línea son:

$$\begin{aligned} e_{ac} &= e_a - e_c = \sqrt{3} E_m \cos(\omega t + 30^\circ) \\ e_{ba} &= e_b - e_a = \sqrt{3} E_m \cos(\omega t - 90^\circ) \\ e_{cb} &= e_c - e_b = \sqrt{3} E_m \cos(\omega t + 150^\circ) \end{aligned} \quad (2.2)$$

Observe de la **figura 2.9**. Las válvulas son enumeradas en el orden de su disparo.

## 2.7 MODELO DEL PUENTE CONVERTIDOR

El desarrollo de las ecuaciones que gobiernan la operación del puente convertidor se describen en la literatura [1, 2, 5, 7,22].

## 2.8 ANÁLISIS DEL PUENTE CONVERTIDOR CONTROLADO SIN TRASLAPE DE CONMUTACIÓN

Las formas de onda típicas del convertidor se muestran en la figura 2.15 lo anterior es considerando que el transformador convertidor es ideal, es decir, la inductancia de dispersión del transformador se desprecia ( $L_c = 0$ ).

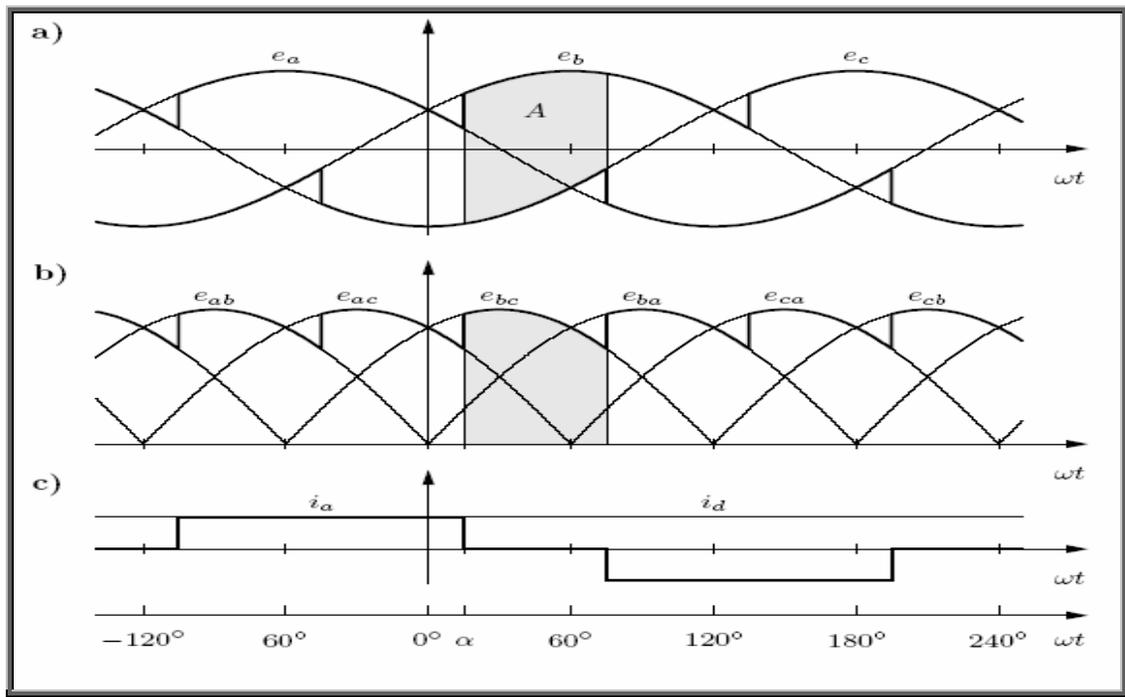


Figura 2.15. Formas de onda de voltaje y corriente del rectificador controlado.

- (a) muestra los voltajes de línea a neutro de **CA** en líneas delgadas y en líneas gruesas se observan los potenciales de las terminales positivas y negativas de **CD** con respecto al neutro de **CA**.
- (b) En línea delgada se muestran los voltajes de línea a línea de **CA**, y en línea gruesa se muestra el voltaje directo instantáneo  $v$ .
- (c) muestra la corriente de **CD** constante en una línea delgada, y en línea gruesa se muestra la corriente de línea de **CA**  $i_a$ .

Debido a que se esta tomando en consideración el control de la compuerta de las válvulas esto hace posible retrazar el tiempo de encendido de conducción de las válvulas. El ángulo de retraso es generalmente llamado alfa y es denota por  $\alpha$  [1,2].

Para el convertidor, hay siempre dos válvulas conduciendo en serie una de la parte superior y otra de la parte inferior. Por lo tanto, el voltaje directo instantáneo iguala en cualquier instante uno de los seis voltajes de línea a línea. Cuando el voltaje directo cambia a otro voltaje de línea a línea este instante es controlado mediante el ángulo de disparo  $\alpha$ .

### 2.8.1 Voltaje directo promedio

Un periodo del voltaje de la fuente de **CA** se puede dividir en 6 intervalos cada uno que corresponde a la conducción de un par de válvulas. Las formas de onda de voltaje de **CD** se repiten para cada intervalo. Así, para el calculo del voltaje promedio de **CD**, es necesario considerar solamente un intervalo. De la **figura 2.15** el área sombreada **A** indica el intervalo, por lo cual el voltaje promedio esta dado por:

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{3}{\pi} A = \frac{3}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+60^{\circ}} (e_b - e_c) d(\omega t) \\
 &= \frac{3}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+60^{\circ}} \sqrt{3} E_m \cos(\omega t - 30^{\circ}) d(\omega t) \\
 &= \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_m \int_{\alpha}^{\alpha+60^{\circ}} \cos(\omega t - 30^{\circ}) d(\omega t) \cos \alpha \\
 &= V_0 \left[ \text{sen}(\omega t - 30^{\circ}) \right]_{\alpha}^{\alpha+60^{\circ}} \\
 &= V_0 \left[ \text{sen}(\alpha + 30^{\circ}) - \text{sen}(\alpha - 30^{\circ}) \right] \\
 &= V_0 2 \text{sen} 30^{\circ} \cos \alpha = V_0 \cos \alpha
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

Donde

$$V_0 = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_m$$

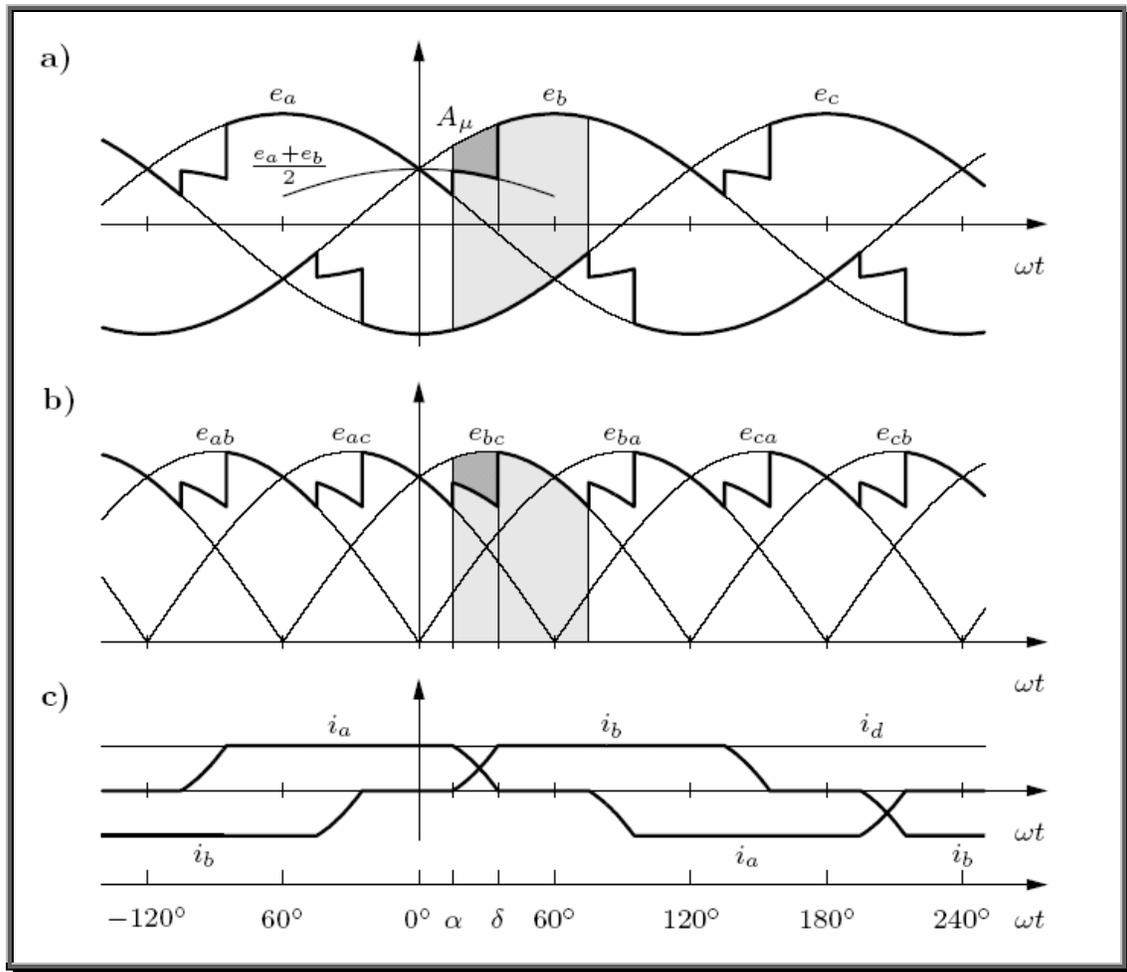
La ecuación (2.3) que para diferentes valores de  $\alpha$  (ángulo de ignición),  $V_0$  es variable. La gama de  $\alpha$  es de  $180^\circ$  (de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ ) y correspondientemente  $V$  puede variar de  $V_0$  a  $-V_0$ .

## 2.9 ANÁLISIS DEL PUENTE CONVERTIDOR CON TRASLAPE DE CONMUTACIÓN

En circuitos físicos, la inductancia de conmutación o inductancia de dispersión  $L_c$  (del transformador) causa un retraso adicional. Este retraso es necesario puesto que no es posible cambiar corrientes en un circuito inductivo instantáneamente. Por lo tanto para que se lleve a cabo la transferencia de corriente entre fases, se requiere un tiempo finito llamado el tiempo de conmutación o conmutación [1,2]. El transformador del convertidor tiene una inductancia inherente que hace este retraso adicional inevitable. El ángulo de este retraso es llamado el ángulo de traslape y es representado aquí por el símbolo  $\mu$ . Por lo tanto, el tiempo de conmutación es  $\mu/\omega$  segundos. En operación normal el ángulo de traslape es menor de  $60^\circ$ , con valores típicos de carga completa estando en la gama de 20 a 25 grados.

Cuando el ángulo de traslape es cero (es decir,  $\mu=0$ ), solo dos válvulas están conduciendo en algún instante. Como el ángulo de traslape incrementa, tres válvulas están conduciendo por breves periodos, pero entre conmutaciones solamente conducen dos válvulas. El intervalo del ángulo o periodo angular durante el cual dos válvulas conducen es  $60^\circ - \mu$ . Cuando el ángulo de traslape aumenta mas allá de 60 grados, cuatro válvulas están conduciendo por periodos breves [1,7], este es un modo de operación anormal que se evita generalmente y en la extensión de este trabajo esta parte no es tratada.

El efecto del traslape de conmutación sobre las formas de onda de voltaje y corriente del puente convertidor se muestran a continuación.



**Figura 2.16.** Formas de onda de voltaje y corriente del puente convertidor considerando traslape de conmutación.

- (a) Muestra los potenciales positivos y negativos de terminal de **CD**.
- (b) Muestra los voltajes directos instantáneos.
- (c) Muestra Corrientes de línea de la fase a y b.

Para el intervalo considerado ( $\mu < 60^\circ$ ), nosotros podemos analizar la operación del circuito de puente trifásico de la **figura 2.14**. Para este análisis se tomara el periodo de conmutación durante el cual las válvulas 1,2 y 3 están conduciendo. Durante este intervalo la corriente directa es transferida de la válvula 1 a la 3. Debido ha este comportamiento se tiene un nuevo circuito el cual se muestra en la **figura 2.17**.

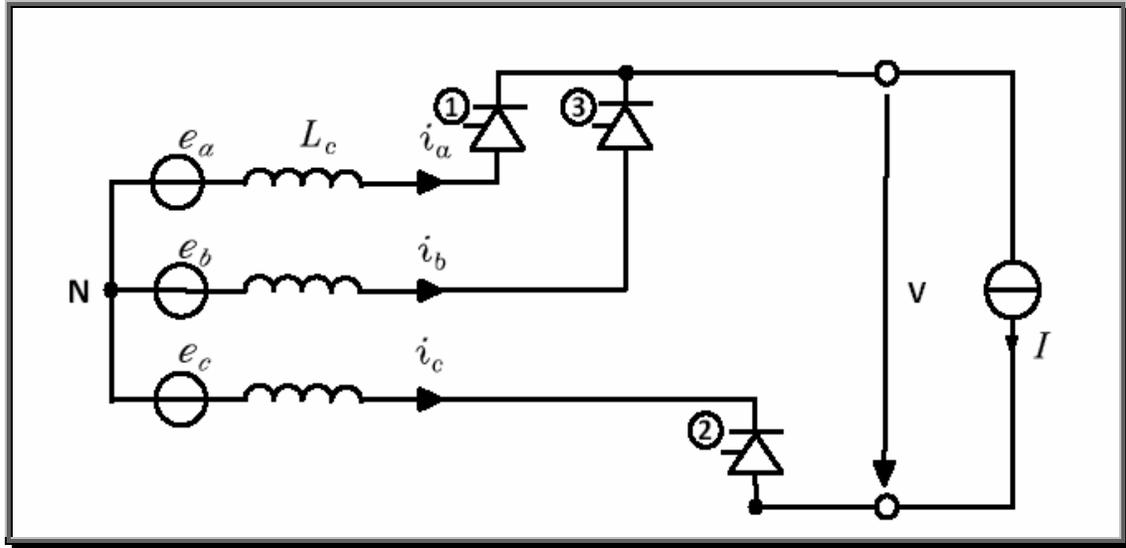


Figura 2.17. Circuito equivalente para conducción de 3 válvulas.

Para el lazo que contiene la válvula 1, válvula 3, escribimos ley de voltajes de Kirchhoff (LVK) como

$$e_b - e_a = L_c \frac{di_b}{dt} - L_c \frac{di_a}{dt} \quad (2.4)$$

Donde  $L_c$  es la inductancia del transformador, teniéndose lo siguiente:

$$I = i_b + i_a \quad (2.5)$$

diferenciando ambos lados de la ecuación (2.5), se obtiene:

$$0 = \frac{di_b}{dt} + \frac{di_a}{dt} \quad (2.6)$$

Además,

$$e_b - e_a = \sqrt{3}E_m \text{sen} \omega t \quad (2.7)$$

La ecuación (2.8) es obtenida por una combinación de las ecuaciones anteriores (2.4) – (2.7). Por lo tanto,

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{\sqrt{3}}{2L_c} E_m \text{sen } \omega t \quad (2.8)$$

Definamos

$$I_{s2} = \frac{\sqrt{3}}{2\omega} \left( \frac{E_m}{L_c} \right) \quad (2.9)$$

Como un resultado, la ecuación (2.8) es rescrita como

$$\frac{di_b}{dt} = \omega I_{s2} \text{sen } \omega t \quad (2.10)$$

Integrando la ecuación (2.10) obtenemos

$$i_b = I_{s2} \cos \omega t (\cos \alpha - \cos \omega t) \quad (2.11)$$

Puesto que  $i_b = I$

Así tenemos de la ecuación (2.11),

$$I = I_{s2} (\cos \alpha - \cos \delta) \quad (2.12)$$

Esto da el valor de la corriente directa en términos de los ángulos de retraso y traslape.

### 2.9.1 Caída de voltaje debido al traslape

El efecto del traslape [1,2] sobre el voltaje es restar un área  $A_\mu$  del área  $A_0$  (como se muestra en la **figura 2.16** cada sexto de ciclo. Consecuentemente tenemos

$$A = \int_{\alpha}^{\delta} \left( e - \frac{e_a + e_b}{2} \right) d\theta = \frac{\sqrt{3}}{2} E_m \int_{\alpha}^{\delta} \text{sen } \theta d\theta$$

$$A = \frac{\sqrt{3}}{2} E_m (\cos \alpha - \cos \delta) \quad (2.13)$$

Por lo tanto la caída de voltaje promedio es:

$$\Delta V = \frac{3}{\pi} A$$

ó

$$\Delta V = \frac{V_0}{2} (\cos \alpha - \cos \delta) \quad (2.14)$$

Así el voltaje directo considerando traslape esta dado por

$$V = \frac{V_0}{2} (\cos \alpha + \cos \delta) \quad (2.15)$$

Cabe mencionar la importancia del análisis anterior, ya que con ello se obtienen las ecuaciones (2.12) y (2.15) que son las ecuaciones de la unidad convertidora. Y a partir de estas expresiones es posible determinar las ecuaciones que rigen a las unidades rectificadoras e inversoras.

### 2.9.2 Operación de rectificador

Comparando (2.14) con la ecuación de corriente (2.12) podemos encontrar una relación entre los voltajes y corrientes, que podemos escribir como

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{I}{2I_{s2}} \quad (2.16)$$

Este resultado se puede utilizar en (2.15) para escribir el voltaje directo promedio como

$$V_r = V_0 \left( \cos \alpha - \frac{I}{2I_{s2}} \right) = V_0 \cos \alpha - R_{er} I \quad (2.17)$$

Donde

$$R_{er} = \frac{3}{\pi} \omega L_c = \frac{3}{\pi} X_{cr} \quad (2.18)$$

Donde  $R_{er}$  Se llama resistencia equivalente de conmutación. Es algo análogo a la reacción de armadura en máquinas de **CD** en el sentido que representan solamente una caída de voltaje y no una pérdida de potencia [7].

Un circuito equivalente del puente rectificador, funcionando con voltaje de **CA** constante y ángulo de ignición constante basados en el análisis anterior, esta dado en la **figura 2.18**. Los voltajes directos y corriente en este circuito son valores promedio. El ángulo de

traslape no aparece explícitamente en el circuito equivalente; el efecto del traslape de conmutación es representado por  $R_{er}$ .

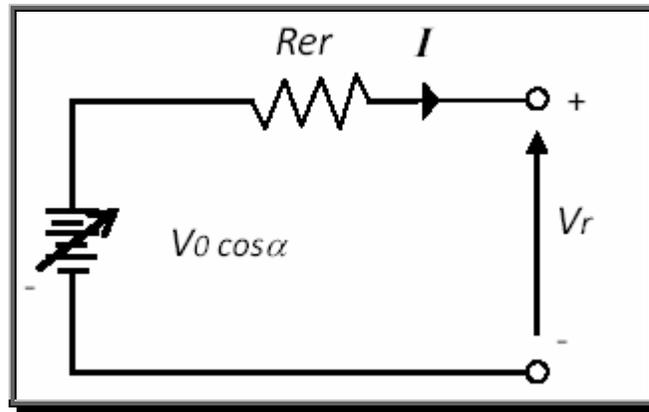


Figura 2.18. Circuito equivalente de un puente rectificador.

### 2.9.3 Operación de inversor

Se parte de las ecuaciones generales del convertidor y tomando las consideraciones siguientes:

- 1)  $\cos \alpha = \cos \beta$
- 2)  $\cos \delta = -\cos \gamma$

Por lo tanto, obtenemos las ecuaciones de la estación inversora que a continuación se muestran.

En el caso de operación con ángulo de avance de ignición constante  $\beta$  se tiene:

$$V_i = V_0 (\cos \beta) + R_{ei} I \quad (2.19)$$

Para el modo más comúnmente utilizado es con ángulo de extinción constante  $\gamma$  teniéndose:

$$V_i = V_0 (\cos \gamma) - R_{ei} I \quad (2.20)$$

Las dos ecuaciones antedichas, dan lugar a dos circuitos posibles para la operación del inversor como se muestra en la figura 2.19.

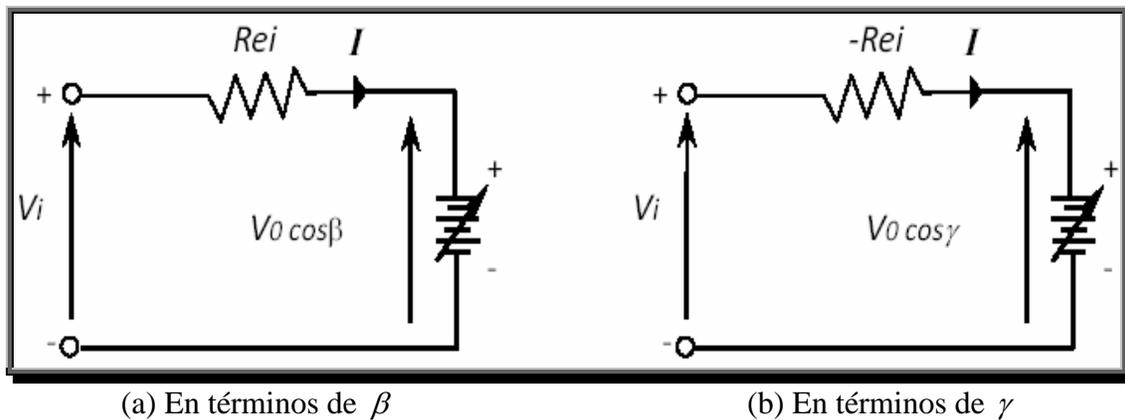


Figura 2.19. Circuitos equivalentes de un inversor.

## 2.10 CONTROL DEL CONVERTIDOR

### 2.10.1 Generalidades

Un sistema de control de **AVCD** debe cumplir objetivos fundamentales, como el controlar una cantidad del sistema, la cual puede ser: corriente en la línea de **CD**, la frecuencia en un sistema de **CA** con suficiente exactitud y velocidad de respuesta, el voltaje y la potencia transmitida.

Una de las principales ventajas de un enlace de **AVCD** es la rápida controlabilidad de la potencia transmitida por medio del control de los ángulos de disparo de los convertidores. Controles de convertidores modernos no son solamente rápidos, si no también confiables y son utilizados para protección contra fallas en la línea de **CD** y en el convertidor.

Asegurar la operación estable, con conmutación confiable en presencia de fallas en el sistema.

Se debe cumplir con los objetivos anteriores a un consumo mínimo de potencia reactiva.

Adicionalmente a estos conceptos, el sistema de control debe, en caso de ser posible asegurar la operación correcta ante grandes perturbaciones (fallas o pérdidas de

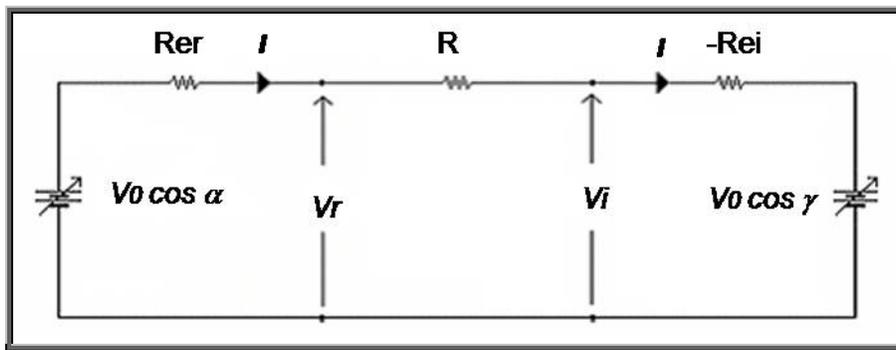
generación) o por lo menos reducir al mínimo las consecuencias cuando se libera la falla, durante la operación normal.

El control del sistema en un enlace de **AVCD** tiende a ser absolutamente complejo con una jerarquía [2,7,22] de controles. Microprocesadores de alta velocidad se están utilizando para muchas funciones de control incluyendo control de supervisión.

En el siguiente apartado se describirán los principios básicos de operación de estos controles.

### 2.10.2 Principios básicos del control

El concepto básico de control de **AVCD** es establecer la corriente deseada en la línea del rectificador al inversor variando el voltaje de CD en los convertidores. Esto puede ser visualizado ampliando los circuitos equivalentes desarrollados para el rectificador y el inversor en el circuito equivalente mostrado en la **figura 2.20** los subíndices r e i se refieren a rectificador e inversor respectivamente.



**Figura 2.20.** Circuito equivalente de una línea de CD y las estaciones convertidoras.

Refiriéndose a la **figura 2.20**, la corriente de CD fluyendo en la línea de transmisión de rectificador a inversor esta dada por la ley de Ohm por:

$$I = \frac{V_0 \cos \alpha - V_0 \cos \gamma}{R_{er} + R - R_{ei}} \quad (2.19)$$

Es de interés mencionar que en la práctica  $R$  es la resistencia de **CD** de la línea de transmisión y su valor es pequeño al igual que las resistencias de los convertidores y como consecuencia un cambio pequeño en los voltajes internos causa un cambio grande en  $I$ .

La corriente directa y el voltaje directo se pueden controlar por cualquiera de los 2 métodos diferentes que a continuación se mencionan [2].

- 1) control de la compuerta ( $\alpha$ ,  $\beta$  o  $\gamma$ ) es rápido de 1 a 10 ms.
- 2) control de los voltajes del bus de **CA** a través del cambiador de taps (5 segundos por paso).

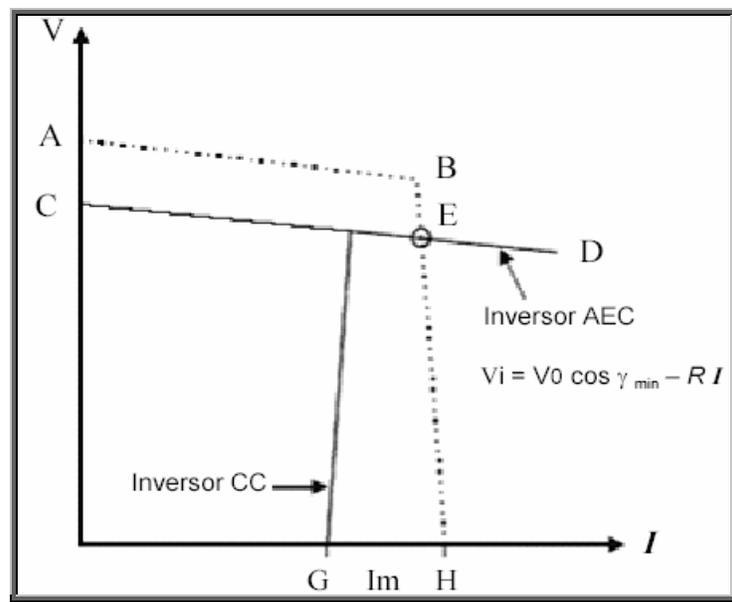
Por lo tanto, las responsabilidades para la regulación de voltaje y regulación de corriente son distintas y se asignan a las estaciones por separado.

Considerando que  $V_r = V_i$  e iguales corrientes en las estaciones, las características **tensión-corriente (V-I)** se interceptan en un punto común el cual se llama punto de operación y este punto esta en función de la estrategia de control utilizada.

### 2.10.3 Control

La manera tradicional de controlar la transmisión de **CD** [22,30,31], es de la siguiente forma, el rectificador controla la corriente y el inversor funciona con el margen constante de la conmutación, obteniéndose así el punto de operación indicado por E en la **figura 2.21**. Como el inversor esta dado como una orden de corriente mas bajo que el rectificador por el valor de margen de corriente, es forzado en control mínimo del margen de conmutación.

Esta estrategia es llamada el control de margen de corriente constante. El margen de corriente [2,10] se define como la diferencia entre el orden de la corriente del rectificador y el orden de la corriente del inversor y se denota por  $I_m$  como se aprecia en la **figura 2.21**, además es generalmente el 10 o 15 % de la corriente nominal.



**Figura 2.21.** Características del control de un sistema de AVCD de punto a punto.



Tomando como consideración que el ángulo de retraso del rectificador tiene un límite mínimo cuyo valor es de cerca de  $5^\circ$ , esto es para cumplir con un voltaje adecuado a través de la válvula antes de que sea disparada, si se tiene un valor menor al establecido no ocurrirá el disparo. Y por lo tanto el rectificador funciona normalmente en un valor de  $\alpha$  dentro del rango de  $15^\circ$  a  $20^\circ$  [7].

## CAPÍTULO 3

# MODELADO DE SISTEMAS DE TRANSMISIÓN DE AVCD DE DOS TERMINALES PARA ESTUDIOS DE ESTABILIDAD ANGULAR ANTE GRANDES DISTURBIOS

### 3.1 INTRODUCCIÓN

El diseño y la operación óptimos del sistema de AVCD [1,2,22] requieren una comprensión detallada de los diferentes fenómenos que resultan de las interacciones entre el sistema de CD y el sistema de CA en los cuales se anexa el enlace de AVCD [18]. Con el diseño apropiado del sistema de control [22], la seguridad del sistema se mejora considerablemente, los controles inadecuados pueden dar lugar a problemas tales como inestabilidad armónica y oscilaciones subsincronas [2].

La predicción del funcionamiento del sistema bajo varias condiciones ayuda en la determinación de las tensiones en los diferentes componentes del sistema y a la preparación de las especificaciones del equipo. La evaluación poco realista e inadecuada de los requisitos puede dar lugar a un diseño poco rentable o técnico inferior. La predicción del funcionamiento del sistema es realizada generalmente por el análisis y la simulación usando técnicas digitales. El análisis de flujos de carga, estabilidad transitoria, corto circuito etc., en EMTP,PSS/E y algunos otros programas de fines didácticos [12,13,24] son algunos de los programas de computadora digital que están en uso para el análisis y la simulación del sistema de CA y se pueden extender para incluir sistemas de AVCD.

El análisis de la estabilidad transitoria se utiliza para investigar la estabilidad de un sistema de potencia bajo disturbios repentinos y grandes tales como fallas (monofasicas,bifasicas y trifásicas) seguidas por cambios de configuración de la red [2-5].

Como fue mencionado anteriormente varios programas de computadora digital están disponibles en la actualidad para el estudio de sistemas de gran escala que consisten de cientos de generadores, miles de buses y líneas de transmisión. Los programas actuales tienen muchas características y algunas de ellas son las que a continuación se mencionan:

- Modelos detallados del generador incluyendo la representación exacta de circuitos de amortiguamiento, excitación y sistemas gobernador turbina.
- Modelos de carga no lineales dependientes del voltaje y frecuencia.
- Representación del sistema de protección para simular la conmutación de líneas bajo la acción de relevadores protectores.

En este capítulo, el modelado de varios componentes del sistema de **CA/CD** se describe los cuales son aplicables al análisis y simulación dinámica. El énfasis aquí está en el análisis de la estabilidad de los sistemas de **CA/CD**. En tal análisis, es adecuado modelar el convertidor en una manera simplificada ignorando los armónicos de **CA** y **CD**. Se reconoce que un enlace de **CD** correctamente controlado mejora la estabilidad característica del sistema de **CA** en el cual se anexa. Por lo tanto es necesario modelar el enlace de **CD** en el análisis de la estabilidad. Los programas de estabilidad transitoria escritos para los sistemas de **CA** se pueden modificar para incluir la representación del enlace de **CD**. En este capítulo, la metodología de la inclusión del enlace de **CD** en el análisis de la estabilidad se presenta.

### 3.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El primer paso al realizar un estudio de estabilidad es determinar las condiciones iniciales por medio de una solución en estado estacionario de flujos de potencia [3-5,19, 25,26]. Después de eso el sistema de **CA/CD** forma dos conjuntos de ecuaciones que se deben solucionar simultáneamente en función del tiempo, a saber un sistema de ecuaciones en estado estacionario (**ecuaciones algebraicas**) [2].

$$p_1(x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_m, z_1, \dots, z_0) = 0$$

.....

(3.1)

$$p_n(x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_m, z_1, \dots, z_0) = 0$$

.....

(3.2)

Y el sistema de ecuaciones diferenciales [2].

$$\dot{m}_1 = f_1(x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_m, z_1, \dots, z_0, t)$$

.....

(3.2)

$$\dot{m}_m = f_m(x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_m, z_1, \dots, z_0, t)$$

Las expresiones anteriores pueden también ser expresadas de la siguiente forma:

$$p(x, y, z)=0 \quad (3.3)$$

$$\frac{dm}{dt} = f(x, y, z) \quad (3.4)$$

Donde:

**x** : Es el vector de las variables de estado de las ecuaciones diferenciales.

**y**: Es el vector de variables de interfaz (voltajes, potencias, etc.)

**p**: es la expresión de la relación algebraica entre todas las variables.

**f**: Es la expresión de las ecuaciones diferenciales que definen las variables de estado.

**z**: Es el vector de otras variables restantes.

La estructura de la ecuación (3.1) cambiara en ciertos momentos debido a la inicialización de la falla, y desconexión de la falla [27].

### 3.3 TÉCNICA DE SOLUCIÓN

El programa de estabilidad transitoria presentado en esta tesis utiliza un procedimiento implícito simultáneo para la resolución de las ecuaciones. Ecuaciones algebraicas y diferenciales se solucionan simultáneamente. Se integran las ecuaciones diferenciales usando el algoritmo implícito de integración [2] (regla trapezoidal en este caso) que da lugar a una buena estabilidad numérica.

A continuación se mencionan algunas de las características importantes de estos métodos:

- 1) No presentan problemas de defase en tiempo, entre las variables de la red y las de los generadores.
- 2) Permiten el uso de pasos de integración mayores que los usados en métodos explícitos.
- 3) Son fáciles de implementar y son muy flexibles para incluir nuevos modelos de elementos.

- 4) Se pueden emplear para el estudio de gran cantidad de fenómenos dinámicos, sin necesidad de cambios en la estructura del modelado.
- 5) Son eficientes computacionalmente, ya que solo requieren de un método iterativo para resolver la ecuación ( $I=YE$ ).
- 6) Se pueden emplear técnicas de dispersidad.

### 3.4 INTERACCIÓN ENTRE SISTEMAS

Esto se muestra en la figura 3.1.

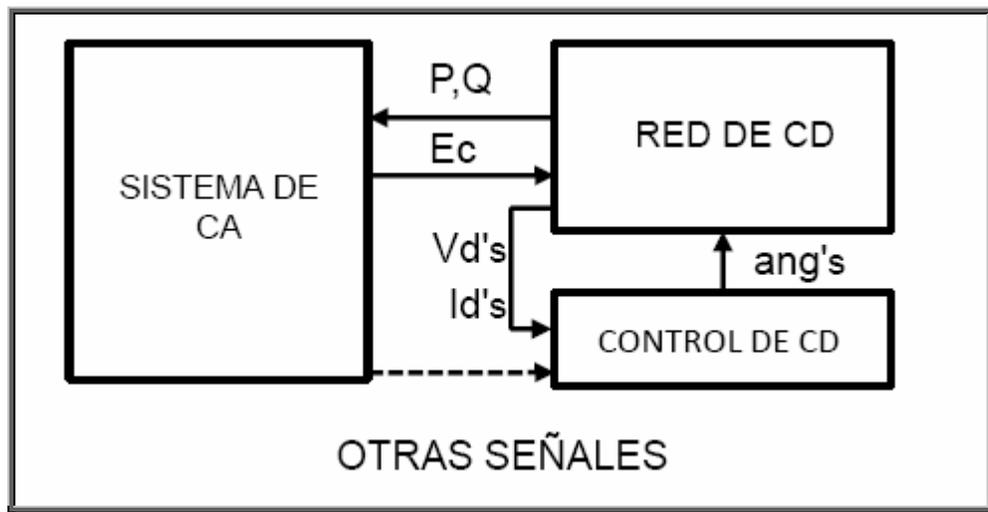


Figura 3.1. Representación esquemática que ilustra la interacción entre los sistemas CA/CD.

### 3.5 SUBSISTEMAS

El modelo de un enlace de **AVCD** está conformado por tres conjuntos o subsistemas simples que interactúan [10,11]. Teniendo a su vez cada uno un modelo individual, y estos son:

#### 1.- Subsistema de la línea de CD.

Éste se asocia a la representación dinámica de la línea de transmisión como un circuito R-L o R-L-C [1], donde R es la resistencia, L la inductancia y C es la capacitancia de la línea.

## 2.- Subsistemas del rectificador e inversor.

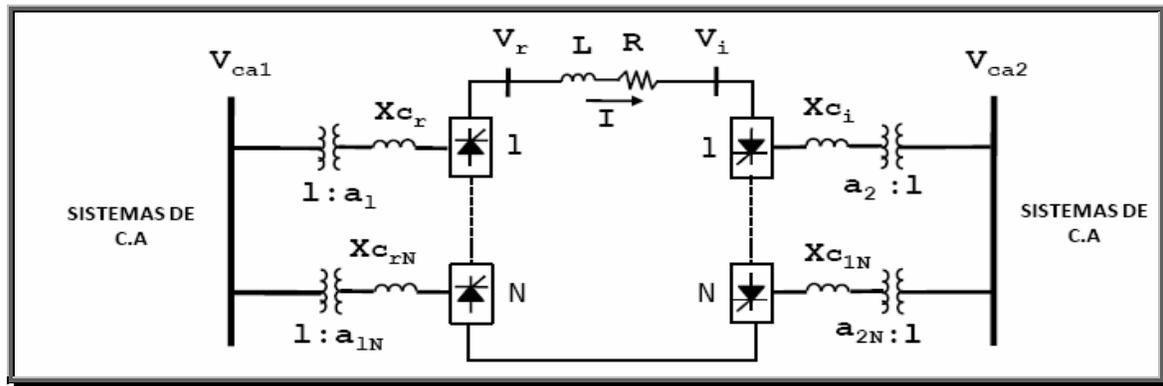
Estos subsistemas permiten acoplar el modelo dinámico de la línea de **CD** con los sistemas adyacentes de **CA** [2].

## 3.- Subsistema del control del enlace de AVCD.

En este se muestra el modelo que asocia el ángulo de disparo de cada estación convertidora.

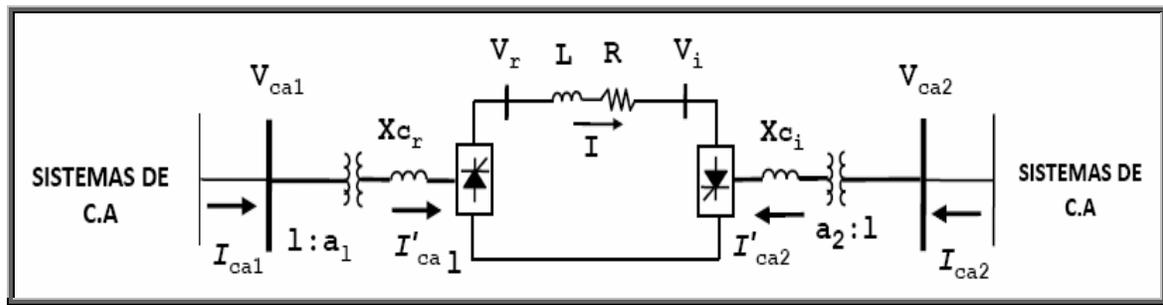
### 3.6 ESQUEMA BÁSICO PARA REPRESENTAR UN SISTEMA DE AVCD

El modelo propuesto para un convertidor de **AVCD** que contiene varios puentes convertidores de 6 pulsos conectados en serie [10], se muestra en la **figura 3.2**.



**Figura 3.2. Representación esquemática de un enlace de AVCD con N puentes convertidores conectados en serie.**

La transmisión de energía de **AVCD** en su mayoría es con enlaces de punto a punto y en este trabajo no es la excepción [1,2]. A continuación en la **figura 3.3** se muestra un enlace monopolar, que se deriva del circuito de la **figura 3.2**, es decir, es una simplificación del mismo. Donde para este caso sería  $N=1$ , es decir,  $N$  representa el número de puentes en serie.



**Figura 3.3 Circuito equivalente (enlace monopolar).**

### 3.7 ECUACIONES UTILIZADAS PARA UN ENLACE DE AVCD

Tomando las consideraciones hechas en la sección 2.6 y que además estas también pueden ser encontradas en la literatura [1,2]. El enlace de AVCD puede ser modelado por el siguiente conjunto de ecuaciones [1,3,10,]:

$$V_r = \frac{3N}{\pi} \left( \sqrt{2} a_1 v_{ca1} \cos \alpha - X_{cr} I \right) \quad (3.5)$$

$$V_i = \frac{3N}{\pi} \left( \sqrt{2} a_2 v_{ca2} \cos \gamma - X_{ci} I \right) \quad (3.6)$$

$$P_r = \frac{3N}{\pi} \left( \sqrt{2} a_1 I V_{cr1} \cos \alpha - X_{cr} I^2 \right) \quad (3.7)$$

$$P_i = \frac{3N}{\pi} \left( \sqrt{2} a_2 I V_{ca2} \cos \gamma - X_{ci} I^2 \right) \quad (3.8)$$

$$Q_r = \sqrt{S_r^2 - P_r^2} \quad (3.9)$$

$$Q_i = \sqrt{S_i^2 - P_i^2} \quad (3.10)$$

### 3.8 MODELO DEL CONTROL DEL ENLACE DE AVCD

Las figuras 3.4 y 3.5 muestran los modelos utilizados para representar los controles del enlace utilizados en este trabajo [10,13,29].

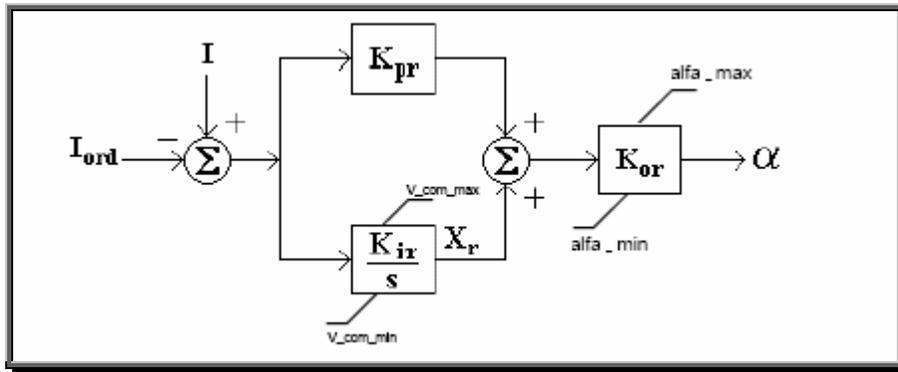


Figura 3. 4. Diagrama de bloques del control del rectificador.

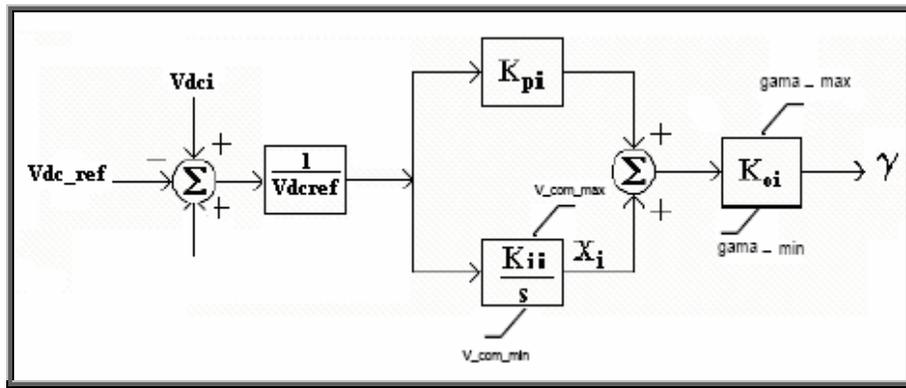


Figura 3. 5. Diagrama de bloques del control del inversor.

Considerando asimismo, que no se utilizan señales suplementarias, el comportamiento dinámico de las estaciones convertidoras puede expresarse por las relaciones siguientes [10]:

#### Para el rectificador

$$\frac{d}{dt} X_r = K_{ir} (I - I_{ord}) \quad (3.11)$$

$$\alpha = K_{or} K_{pr} (I - I_{ord}) + K_{or} X_r \quad (3.12)$$

#### Para el inversor

$$\frac{d}{dt} X_i = \left( \frac{k_{ii}}{Vdcref} \right) [(Vdci - Vdc\_ref)] \quad (3.13)$$

$$\gamma = K_{0i} \left[ X_i + \left( \frac{(V_{dci} - V_{dc\_ref})}{V_{dcref}} \right) K_{pi} \right] \quad (3.14)$$

### 3.9 MODELO DE LA LÍNEA DE CD

#### 3.9.1 Modelo simplificado de una línea de CD

El modelo más simple de una línea de **CD** se obtiene al asumir que ante un disturbio la corriente en el enlace  $I$  no varía de manera apreciable respecto a su nivel de predisturbio [10]. De lo anterior se deduce que la corriente  $I$  es siempre igual a su valor de referencia o valor deseado; en consecuencia, la inductancia y capacitancia de la línea no necesitan ser representadas permitiendo así simplificar el proceso de solución.

Sin embargo la utilización de este modelo, puede conducir a errores significativos en el análisis de fenómenos dinámicos, debido a las siguientes razones:

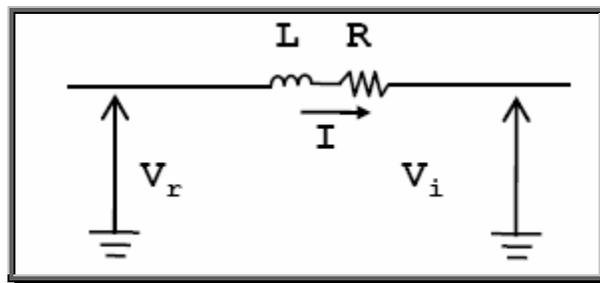
- 1) las inyecciones de corriente del sistema de **AVCD** no son función de la corriente en el enlace  $I$ , por lo tanto, no presenta alguna interacción entre esta y el sistema adyacente de **CA**.
- 2) El comportamiento dinámico de la corriente en el enlace y sus voltajes asociados pueden tener un impacto significativo en el comportamiento del sistema.

Este tipo de modelos se consideraron en diferentes programas de estabilidad en la década de los 70's.

#### 3.9.2 Representación y Modelo dinámico de una línea de CD

Para este caso la línea de **AVCD** puede ser modelada de dos formas diferentes y a continuación se muestra cada una de ellas [1, 10,13,].

##### 3.9.2.1 Modelo de línea aérea

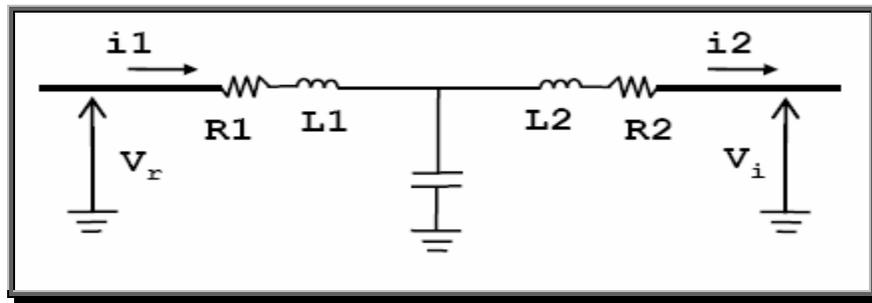


**Figura 3.6. Representación de la línea aérea.**

El modelo de línea aérea se muestra en la **figura 3.6** haciendo caso omiso de la capacitancia de la línea de **AVCD**. La línea de **AVCD** es modelada utilizando una ecuación diferencial según lo dado en la ecuación (3.15).

$$\frac{d}{dt} I = \frac{1}{L} V_r - \frac{1}{L} V_i - \frac{R}{L} I \quad (3.15)$$

### 3.9.2.2 Modelo del cable



**Figura 3.7. Representación del cable de la línea de AVCD.**

El modelo del cable se muestra en la **figura 3.7** representa la capacitancia de la línea de **AVCD** como un capacitor localizado en el centro del cable para formar un modelo de línea en "T". La línea de **CD** es modelada utilizando tres ecuaciones diferenciales: Una para representar la capacitancia ecuación (3.16), y las dos ecuaciones restantes, (3.17) y (3.18) para representar las inductancias de cualquier lado de la capacitancia [1].

$$\frac{d}{dt} i_1 = \frac{1}{L_1} (V_r - V_c - R_1 i_1) \quad (3.16)$$

$$\frac{d}{dt} i_2 = \frac{1}{L_1} (-V_i + V_c - R_2 i_2) \quad (3.17)$$

$$\frac{d}{dt} V_c = \frac{1}{C} (i_{cap}) \quad (3.18)$$

### 3.9.3 Modelo Pseudo-estacionario

La suposición de este modelo esta basada en que la constante de tiempo de la línea de transmisión es muy rápida comparada con el periodo de estudio del fenómeno de interés [10]. Haciendo cero la ecuación diferencial (3.15) se obtiene la relación siguiente:

$$I = \frac{V_r - V_i}{R} \quad (3.19)$$

En donde los voltajes  $V_r$ ,  $V_i$  están dados por las ecuaciones (3.5) y (3.6) substituyendo estas expresiones en (3.19) obtenemos la siguiente expresión:

$$I = \frac{\frac{3\sqrt{2}N}{\pi} (a_1 V_{ca1} \cos \alpha - a_2 V_{ca2} \cos \delta)}{R + \frac{3N}{\pi} (X_T)} \quad (3.20)$$

De los modelos de línea de **AVCD** descritos anteriormente, en este trabajo el modelo utilizado para llevar a cabo las simulaciones correspondientes, fue el modelo de línea aérea (circuito R-L) el cual se muestra en la **figura 3.6**.

## 3.10 MODELOS DE CARGAS

Estos se pueden clasificar en dos categorías que tradicionalmente son las siguientes [2]:

- 1) Modelos de cargas estáticas.
- 2) Modelos de cargas dinámicas.

### 3.10.1 Clasificación de las cargas estáticas

En este trabajo, solamente el modelo de carga estática de impedancia constante es considerara, para efectos de estudio y la clasificación de estas cargas estáticas es la siguiente:

- 1) Modelo de carga de impedancia constante (Z constante).
- 2) Modelo de carga de corriente constante (I constante).
- 3) Modelo de carga de potencia constante (P constante).
- 4) Modelo de carga exponencial.
- 5) Modelos de carga polinomial.

### 3.11 ECUACIONES DE LA RED

Todas las redes eléctricas consisten de líneas de transmisión y transformadores ligados, cada uno de los cuales se puede modelar por circuitos equivalentes  $\pi$  [2,3-5, 27,28]. Estos modelos individuales son combinados para modelar la red entera formando la ecuación nodal de la red.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & \cdots & Y_{1N} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & \cdots & Y_{2N} \\ Y_{33} & Y_{32} & \cdots & \cdots & Y_{3N} \\ Y_{41} & Y_{42} & \cdots & \cdots & Y_{4N} \\ \vdots & \vdots & & & \vdots \\ Y_{N1} & Y_{N2} & \cdots & \cdots & Y_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \\ \vdots \\ E_N \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

En forma compacta tenemos la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{BUS} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Por lo tanto de las ecuaciones (3.21) o (3.22) se tiene que:

$$I_N = Y_{N1}E_1 + Y_{N2}E_2 \dots Y_{NN} = \sum_{K=1}^N Y_{NK} E_K \quad (3.23)$$

Por otra parte se tiene que,

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} Y_A & Y_B \\ Y_C & Y_D \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

**Donde:**

$Y_A, Y_B, Y_C$ , y  $Y_D$  son submatrices de dimensiones  $(a \times a)$ ,  $(a \times b)$ ,  $(b \times a)$ ,  $(b \times b)$ , respectivamente [27].

Además  $Y_{BUS}$  tiene elementos en la diagonal  $Y_{ii}$  y elementos fuera de la diagonal  $Y_{ij}$  por definición se tiene:

$$Y_{ii} = Y_{ii} \angle \theta_{ii} = G_{ii} + jB_{ii} \quad (3.25)$$

$$Y_{ij} = Y_{ij} \angle \theta_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (3.26)$$

$$[I] = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

$$[E] = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

De la ecuación (3.27)  $[I]$  es el vector de las inyecciones de corriente en la red y el vector  $[E]$  de la ecuación (3.28) es el vector de voltajes nodales.

$Y_{BUS}$  Es calculada para condiciones de falla y posfalla correctamente tomando en cuenta los cambios correspondientes de la red.

### 3.12 MODELOS DEL GENERADOR

La representación del generador (máquina sincronía o también llamado generador sincrónico) en estudios de estabilidad debe incluir dos tipos de ecuaciones [2,3-5]:

- 1) ecuación de equilibrio mecánico.

Esta ecuación (ecuación de oscilación) es de segundo orden y esta generalmente se descompone en dos ecuaciones de primer orden.

## 2) ecuaciones de equilibrio eléctrico.

Estas son dos ecuaciones de primer orden que representan los transitorios eléctricos de la máquina síncrona [2,4,13].

La representación matemática de los generadores es un conjunto mixto de ecuaciones diferenciales y algebraicas [2-5].

Un número de modelos diferentes existe y son utilizados para estudios dinámicos, donde el generador es modelado por cualquiera de sus fuerzas magnetomotrices transitoria o subtransitoria que actúan detrás de reactancias apropiadas, estos modelos se describen de manera breve y son los siguientes:

### 1) Modelo clásico

El modelo clásico del generador se refiere como modelo electromecánico. Y el generador es modelado como un voltaje constante detrás de una reactancia transitoria [27].

### 2) Modelo de cuarto orden

El modelo de cuarto orden designado como modelo transitorio. En el cual la máquina síncrona es modelada con el voltaje detrás de la reactancia transitoria. El modelo de cuarto orden se extiende sobre el modelo clásico incluyendo los efectos del devanado de campo y un devanado amortiguador en el eje **d** [2]. Este modelo fue utilizado en este trabajo para llevar a cabo las simulaciones correspondientes.

De acuerdo al modelo utilizado en este trabajo se tienen las siguientes ecuaciones [2,4] de interés.

$$M \dot{\omega}_m = P_m - P_e \quad (3.29)$$

$$\frac{d\delta_m}{dt} = \omega_m \quad (3.30)$$

$$\frac{d}{dt} E'_q = \frac{1}{T_{d0}} \left[ (E_f - E'_q) + I_d (X_d - X'_d) \right] \quad (3.31)$$

$$\frac{d}{dt} E'_d = \frac{1}{T_{q0}} [(-E'_d) + I_q (X_q - X'_q)] \quad (3.32)$$

### 3.13 CLASIFICACIÓN DE LOS CONTROLES DEL GENERADOR

Hay dos tipos de controles para el generador y son los que a continuación se mencionan:

#### a) Controles eléctricos

Estos controles corresponden al **RAV** (regulador automático de voltaje) o también conocido como **AVR** [2,4] por sus siglas en inglés. La función de este es la regulación del voltaje terminal del generador. Además, este incluye limitadores que funcionan ya sea para proteger al **RAV** y generador contra voltajes y corrientes excesivas. El modelo utilizado en este trabajo se muestra en la figura 3.8 [13,29] y en el apéndice B, se dan los parámetros y valores correspondiente a cada uno de ellos.

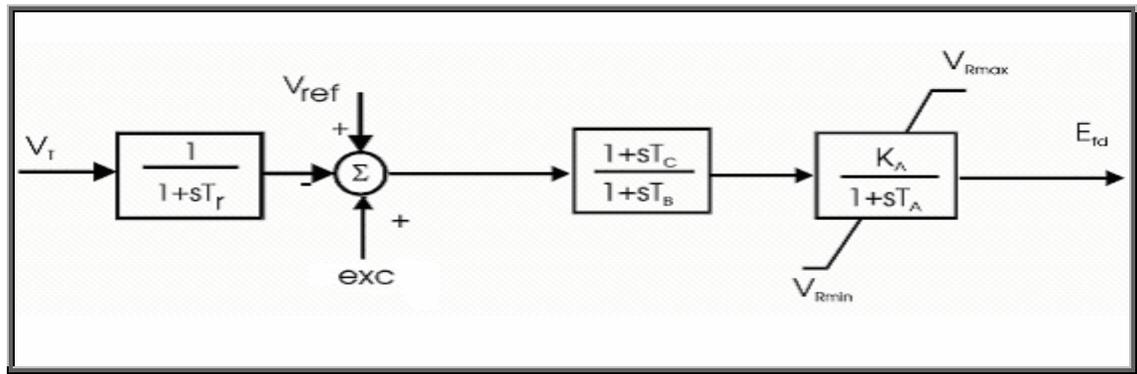


Figura 3.8. Diagrama de bloques del modelo del RAV.

El estabilizador del sistema de potencia (**ESP**) o mejor conocido por sus siglas en inglés como **PSS** (power system stabiliser) [2,4], se anexa en ocasiones al subsistema del **RAV** esto es con la finalidad de ayudar en el amortiguamiento de las oscilaciones de la potencia en el sistema. El modelo utilizado en este trabajo se muestra en la **figura 3.9** [13,29] y Además en el apéndice B se dan los parámetros y valores utilizados en este trabajo.

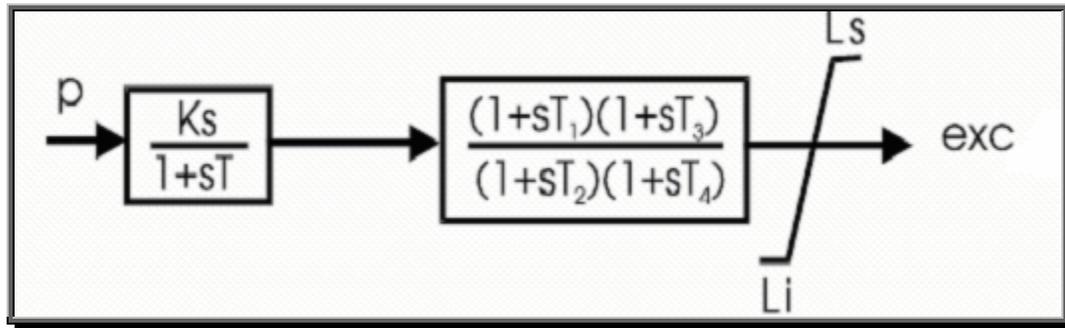


Figura 3.9. Diagrama de bloques del modelo del ESP utilizado en este trabajo.

### b) Control mecánico

Este control corresponde al gobernador-turbina. En un sistema de potencia, los generadores sincros son conducidos normalmente por turbinas de vapor-gas o hidraulicas. Cada turbina es equipada de un sistema que gobierna o regula para proporcionar medios por el cual la turbina puede ser arrancada y funcionar bajo carga con la salida de potencia requerida. El modelo utilizado en este trabajo se muestra en la **figura 3.10** [13,29] y en el apéndice B, se dan los parámetros y valores correspondiente a cada uno de ellos.

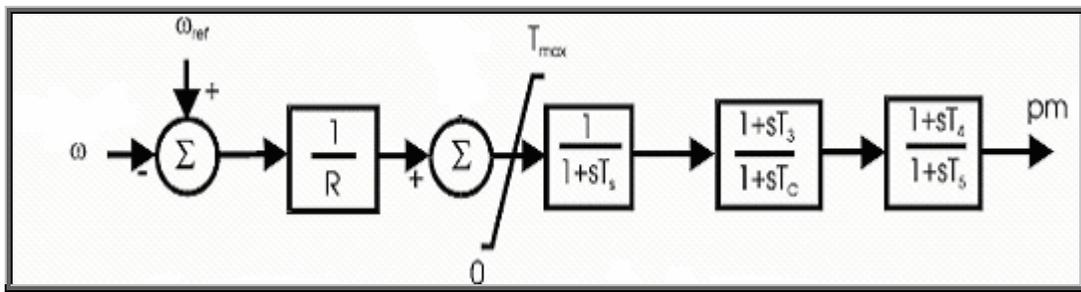


Figura 3.10. Diagrama de bloques del modelo del gobernador-turbina.

### 3.14 REPRESENTACIÓN DEL ENLACE DE AVCD EN LA RED DE TRANSMISIÓN

El efecto del enlace de **AVCD** puede representarse conceptualmente de una manera similar a la de las cargas [10]. Por consecuencia este es incluido directamente en la matriz de admitancias de la red. La inclusión del enlace de **AVCD** en los cálculos del sistema de **CA** no cambia la estructura de la ecuación (3.21).

En el método de representación del sistema, la red de transmisión se modela mediante las ecuaciones de balance de corriente nodal.

$$[I'] = [Y'_{BUS}] [E']$$

**Donde:**

$[I']$  Es el vector de las inyecciones de corriente en la red.

$[E']$  es el vector de voltajes nodales.

$[Y'_{BUS}]$  Matriz de admitancias conteniendo el enlace de **AVCD**.

**Por lo tanto se tiene que:**

$$I = \frac{S^*}{V} \tag{3.33}$$

Recordando que las potencias reales y reactivas para el enlace de **AVCD** fueron establecidas en la sección 3.7.

## APLICACIONES Y RESULTADOS

### CAPÍTULO 4

#### 4.1 INTRODUCCIÓN

El estudio de la **estabilidad** [2] de sistemas eléctricos de potencia es una de las disciplinas más interesantes y complejas de la ingeniería. Involucra desde el diseño de las redes, hasta sus protecciones y sistemas de control.

Mantener en sincronismo estos sistemas ante variaciones súbitas de la carga o la generación, o ante cortocircuitos en la red, ha sido un problema a manejar desde que la transmisión de energía eléctrica comenzó a funcionar con **corriente alterna**. Esto se ha complicado cada vez más conforme crecieron las distancias, aumentó el mallado de las redes, y se necesitó cada vez más potencia.

Ante estos requerimientos, nuevos generadores fueron desarrollados, y sus sistemas de excitación junto a los interruptores de líneas fueron perfeccionándose aumentando su velocidad de respuesta.

Sin embargo, la demanda de energía siguió creciendo, y la operación de los generadores al borde de sus límites obligó a ingenieros y matemáticos a desarrollar o adaptar teorías sobre **estabilidad**, y a proyectar y ejecutar diversos mecanismos para simular la operación de los sistemas, en pos de prevenir los resultados catastróficos de eventuales fallas.

Es de suma importancia mencionar que el amortiguamiento satisfactorio de las oscilaciones de potencia es un importante tema tratado al ocuparse de la estabilidad del ángulo del rotor de los sistemas de potencia. Este fenómeno es conocido y observable especialmente cuando ocurre una falla.

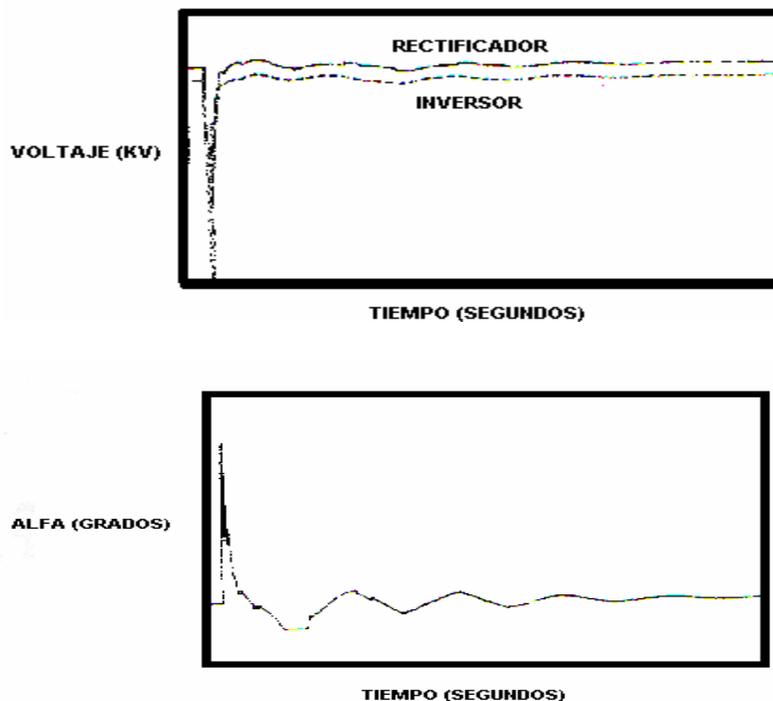
La capacidad de una red de **CA** se podría aumentar con la adición de líneas aéreas de **AVCD** o de cables de **CD** o por la conversión de líneas de **CA** a la operación de **CD**.

El objetivo de este capítulo consiste en realizar estudios vinculados a la **estabilidad transitoria** [2] para analizar el comportamiento de redes eléctricas anexando enlaces de **AVCD**, y para así mostrar el impacto benéfico en las redes de **CA**. Lo anterior se realizará mediante la implementación de un paquete de **software** [12,13] de fines didácticos hecho en **MATLAB**, del cual se da una breve descripción en el **apéndice C**.

Cabe destacar que la importancia fundamental de la respuesta rápida de los enlaces de **AVCD** en este trabajo radica en un amortiguamiento alto de oscilaciones y además mejora los tiempos críticos de liberación de la falla en los sistemas.

#### 4.2 RESPUESTAS TÍPICAS DE UN ESTUDIO DE ESTABILIDAD ANGULAR ANTE GRANDES DISTURBIOS CON ENLACES DE AVCD

La respuesta de los sistemas con enlace de **AVCD** que aquí se presentan, deben tener una respuesta similar a las gráficas que a continuación se muestran en la **figura 4**. [4,10,].



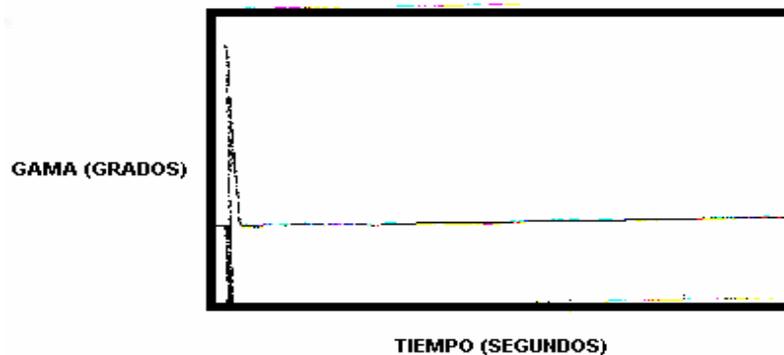


Figura 4. Variables de un sistema de AVCD ( $v, \alpha, \gamma$ ).

### 4.3 DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE ESTUDIO Y PRUEBAS REALIZADAS

En la siguiente sección se mostrarán los resultados obtenidos de las simulaciones correspondientes a cada sistema **CA/CD**, considerados en este trabajo y enseguida se menciona cada uno de ellos:

- 1) Sistema dos áreas [12,13,18,23].
- 1) Sistema dos áreas modificado [18].
- 2) Sistema nueva Inglaterra [9].

Cada uno de los sistemas incluye AVR, turbina gobernador y PSS en todos los generadores. Además se llevó a cabo, un análisis en estado estacionario **CA/CD** [3-5,12,19,] para obtener el punto de operación del sistema y por otro lado se hizo el análisis en estado dinámico **CA/CD** graficando las siguientes variables de interés:

- 1) Ángulos relativos de las máquinas.
- 2) Magnitudes de los voltajes de **CA** en los nodos del convertidor.
- 3) Ángulos de las estaciones convertidoras.
- 4) Corriente en la línea de **CD**.
- 5) Voltaje en las estaciones convertidoras.
- 6) Potencia en el enlace de **CD**.

Es de interés mencionar que la falla aplicada a cada sistema es de tipo trifásica, seguida por la desconexión de una de las líneas del **SEP**, con la finalidad de que la falla sea más severa. Para el sistema de dos áreas y Nueva Inglaterra antes de anexas el enlace de **AVCD** se lleva a cabo un análisis dinámico en **CA** con el propósito de que este estudio

muestre la inestabilidad de los sistemas. Para posteriormente llevar a cabo un análisis dinámico CA/CD para mostrar el efecto del enlace de AVCD en los SEP'S.

Los modos de control para el enlace de AVCD son de la siguiente manera:

- 1) estación rectificadora: control de corriente constante.
- 2) estación inversora: control de ángulo de extinción constante.

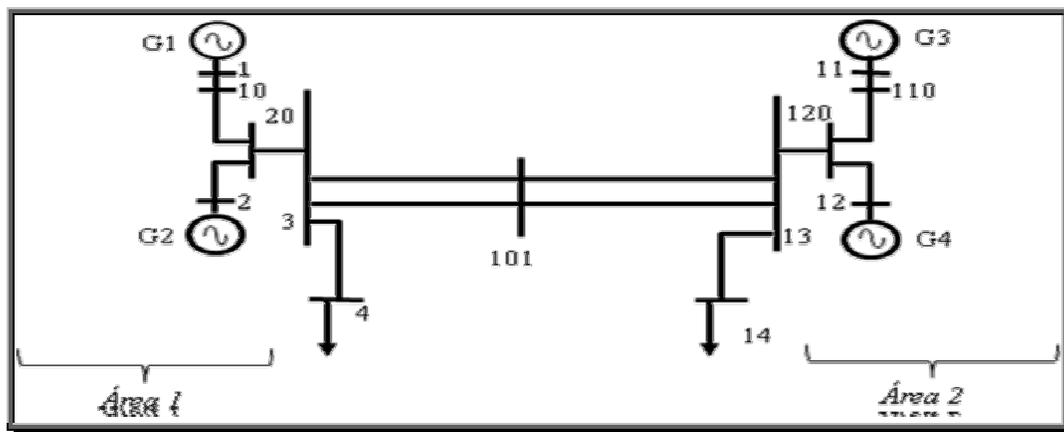
Las variables de interés para el análisis dinámico en CA son las que a continuación se mencionan:

- 1) Voltajes en los nodos.
- 2) Ángulos relativos de las máquinas.
- 3) Potencias activas en los generadores.

En cada simulación dinámica se muestra el tiempo crítico de liberación de la falla.

#### 4.4 ESTUDIO DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE CA DE DOS ÁREAS

En esta sección se presenta un estudio donde se analiza la estabilidad transitoria de un sistema simple de dos áreas en CA, el cual se muestra en la **figura 4.1 [18]**. Este consta de **4** generadores y **13** nodos. Este sistema es similar en estructura a uno utilizado en las referencias [12,18].



**Figura 4.1.** Sistema de transmisión de dos áreas en CA.

Como se observa de la figura anterior el sistema está conformado por dos áreas, las cuales son semejantes. Estas áreas se encuentran conectadas por dos líneas de CA, cada área consiste de dos unidades generadoras. Los parámetros de las líneas de transmisión, transformadores y generadores se muestran en el **apéndice B**.

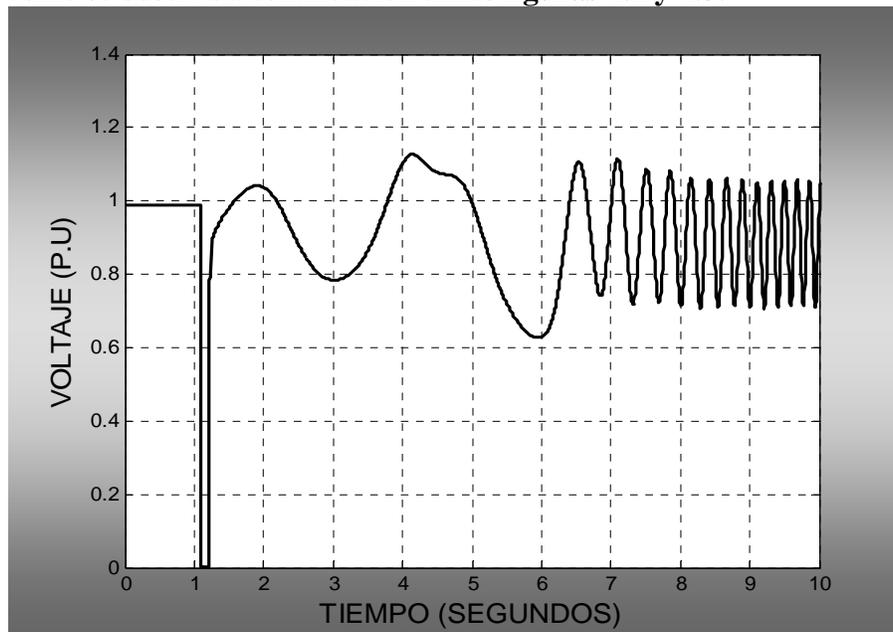
Las condiciones iniciales en estado estacionario del sistema se muestran en la **tabla 4-1**.

**Tabla 4-1. Resultados de flujos de carga del sistema mostrado en la figura 4.1.**

BUS	VOLTS [p.u]	ANGULO [grados]	P [p.u]	Q [p.u]	P [p.u]	Q [p.u]
1	1.0300	10.020	6.8189	1.5912	0.0000	0.0000
2	1.0100	20.5746	5.0000	2.0819	0.0000	0.0000
3	1.0300	-4.7470	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	1.0100	13.7795	0.0000	0.0000	10.0000	1.0000
10	1.0105	3.8477	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
20	0.9881	-4.3538	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
101	0.9788	-17.3791	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
11	1.0013	-29.7672	7.910	1.1444	0.0000	0.0000
12	0.9902	-21.5509	7.0000	2.5446	0.0000	0.0000
13	0.9939	-11.3585	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
14	1.0125	-6.8273	0.0000	0.0000	6.0000	0.6000
110	1.0286	17.0077	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
120	1.03	-23.6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

El funcionamiento del sistema es transmitir 100 MW del área 1 al área 2. A través de las dos líneas de corriente alterna y considerando como referencia el **generador 4** para los estudios en estado estacionario.

Se muestran en las **figuras 4.2 a 4.4** la respuesta del sistema a una falla trifásica en el nodo **13** y se asume que la falla es liberada en **1.035 segundos**. Como podemos observar de los resultados del sistema que este llega a ser inestable con oscilaciones cada vez mayores, como se observa a continuación en las **figuras 4.2 y 4.3**.



**Figura 4.2. Magnitud del voltaje en el nodo 13.**

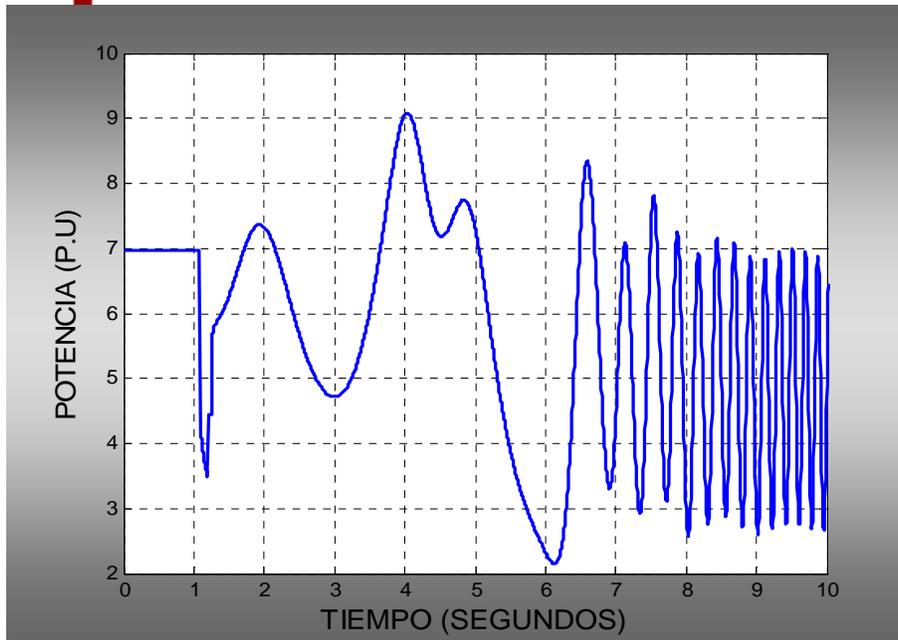


Figura 4.3. Potencia activa del generador 4.

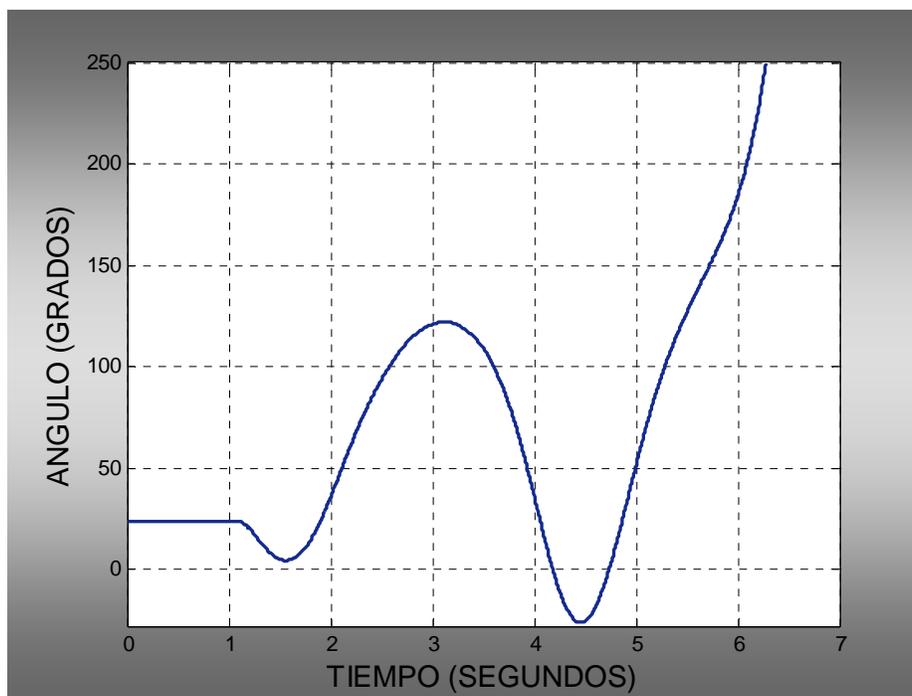
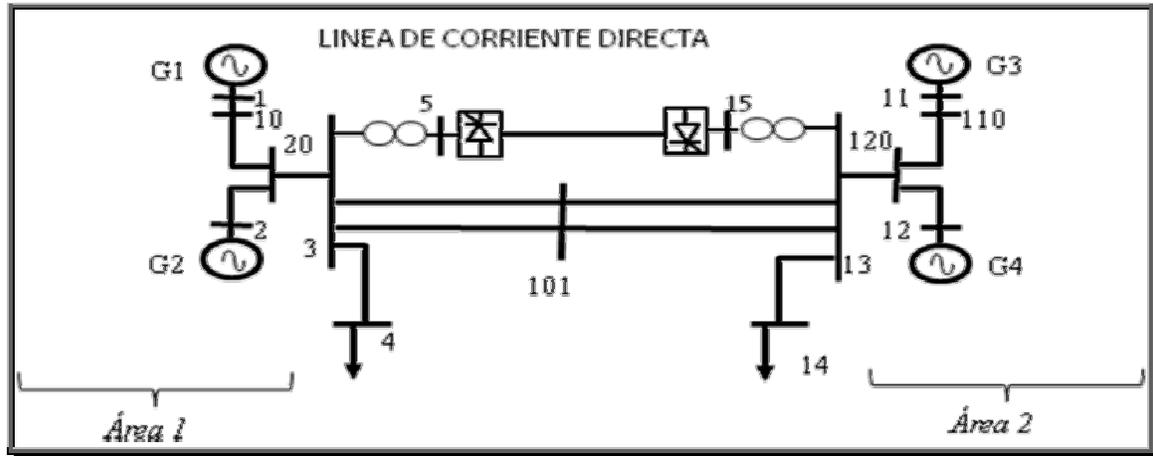


Figura 4.4. Ángulo del rotor del generador 2 (relativo al generador 4).

De la **figura 4.4** observamos que la diferencia del ángulo del rotor aumenta indefinidamente, y por consecuencia esto define al sistema como inestable, además se puede considerar que por lo menos una máquina del sistema perderá sincronismo.

#### 4.5 ESTUDIO DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN CA/CD DE DOS ÁREAS

El sistema utilizado para ilustrar el uso de un enlace de AVCD se muestra la **figura 4.5**. [18].



**Figura 4.5.** Sistema de dos áreas con CD.

Este se basa en el sistema simple de dos áreas considerado en la **figura 4.1**. Ahora se anexará un enlace de CD de 100 MW entre los nodos 3 y 13. La representación considerada para el enlace de CD es del tipo bipolar [2]. En la **tabla 4.2** se mencionan los parámetros del enlace de AVCD y en la **tabla 4-3** se muestran sus condiciones iniciales.

**Tabla 4-2.** Parámetros y valores del enlace de AVCD

Parámetros del enlace de CD	Valores de los parámetros del enlace de CD
Voltaje nominal	650 Kv
Corriente nominal	2500 A
Resistencia de la línea	6.5 $\Omega$
Inductancia	185 mH
Reactancia de conmutación	2.0 $\Omega$
Reactor de alisamiento	155 mH

**Tabla 4-3.** Condiciones iniciales del enlace de AVCD

RECTIFICADOR	INVERSOR
v = 650 kV	v = 615 kV
P= 100 MW	
I= 2.5 kA	

Considerando el nodo **3** como la estación rectificadora y el nodo **13** como la estación inversora.

Los resultados del análisis en estado estacionario del sistema **CA/CD** pueden ser encontrados en [12]. Además los parámetros de los controles del enlace de **AVCD** se muestran en el **apéndice B**.

Los resultados típicos de un estudio de estabilidad transitoria se muestran en **las figuras 4.6 a 4.12** para un lapso de tiempo de estudio de **10 segundos**. El disturbio es una falla trifásica en el nodo **13** y se asume que la falla es liberada en **1.035 segundos**. Se observa de las gráficas obtenidas que las oscilaciones que se presentaban en el sistema de **CA** anterior sin enlace de **CD**, se amortiguan de manera significativa con el enlace de **CD**, teniendo como consecuencia la estabilidad del sistema. La **figura 4.6** muestra los ángulos relativos de los generadores del sistema, teniendo como resultado oscilaciones bien

amortiguadas, es decir, el nivel de amortiguamiento de dichas oscilaciones es alto. Si los ángulos del rotor (o las diferencias del ángulo) alcanzan valores máximos y después disminuyen, el sistema es estable; como se puede apreciar en la **figura 4.6** la respuesta cubre esta característica.

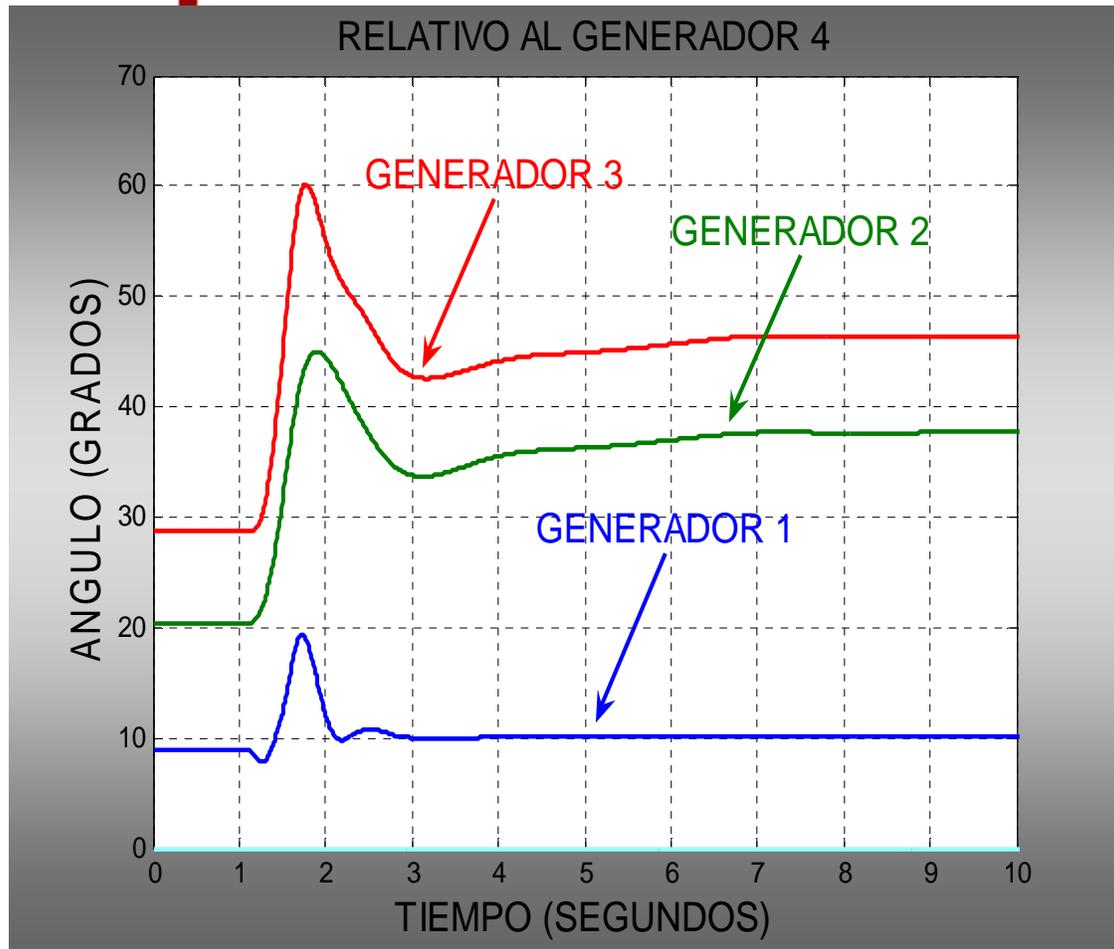
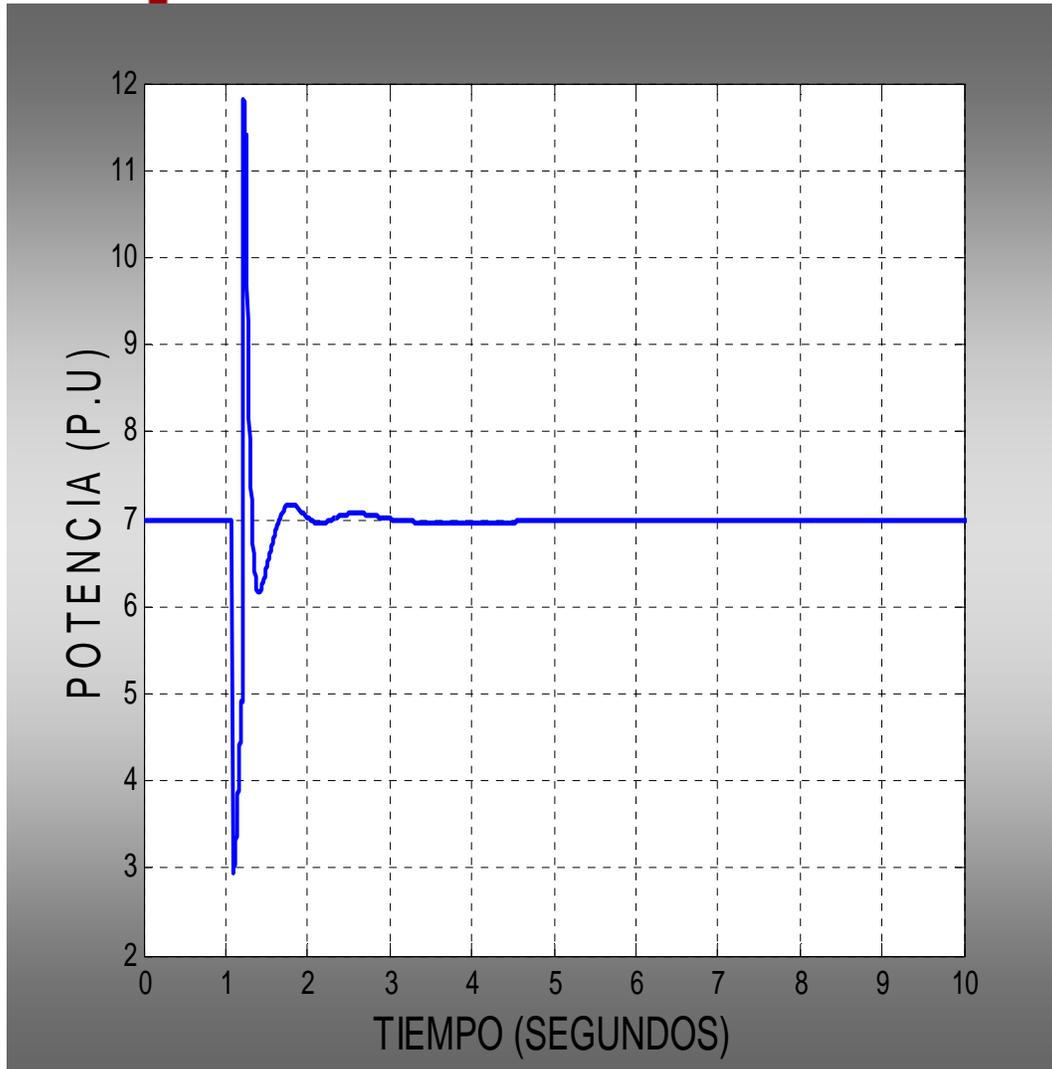


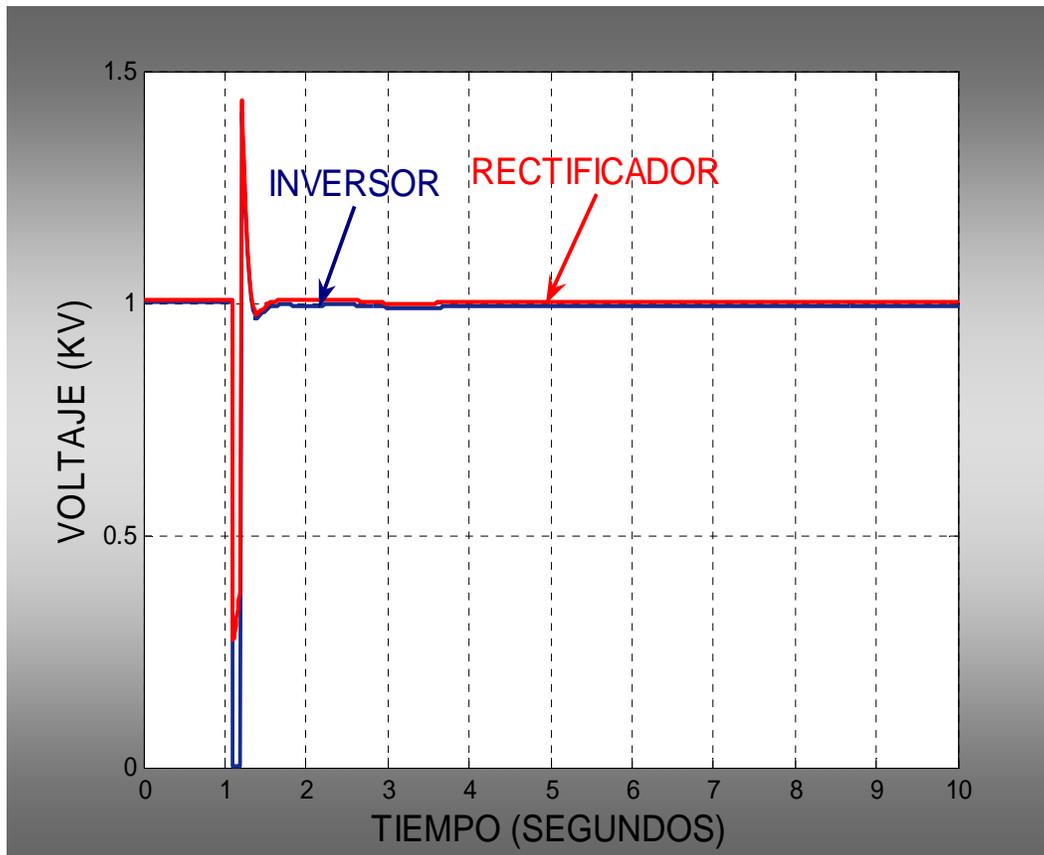
Figura 4.6. Curvas de oscilación en términos de la diferencia angular entre máquinas.

Se puede apreciar de la **figura 4.7** que las oscilaciones de la potencia del **generador 4** son muy bien amortiguadas, es decir, el nivel de amortiguamiento para las oscilaciones es alto y además como se observa la respuesta de esta variable después de la liberación de la falla esta regresa a su valor inicial el cual era 7 p.u de la potencia nominal del generador.



**Figura 4.7. Potencia activa del generador 4.**

Los voltajes de conmutación del sistema de corriente alterna de las estaciones convertidoras se muestran en la **figura 4.8**. Como se puede apreciar de la gráfica, antes del disturbio las tensiones de las estaciones convertidoras se encontraban en un valor entre **1.0 – 1.008** por unidad del voltaje nominal. Durante el periodo cuando ocurre el disturbio el voltaje del inversor cae a cero y además se tiene una sobre tensión (debido al rechazo de carga) en el sistema del rectificador el cual es menor que **1.1** por unidad, Después que se libera la falla el voltaje de **CA** del inversor comienza a incrementarse hasta llegar aproximadamente a su valor inicial. El reanudamiento del enlace de **CD** es muy rápido.



**Figura 4.8. Voltaje de CA en la terminal del enlace.**

En la **figura 4.9** se muestran los ángulos de disparo de los convertidores. Puede ser visto que el ángulo normal de disparo del rectificador (**pre-disturbio**) está en la gama de  $15^\circ$  a  $20^\circ$ . Después de liberar la falla el rectificador cae a su valor mínimo y este recupera nuevamente un valor semejante al inicial. Entonces tomando como consideración que el rectificador controlara la corriente.

Durante el disturbio el ángulo de la estación inversora disminuye a su valor mínimo el cual es aproximadamente  $15.0^\circ$ , seguido a la liberación de la falla el ángulo de disparo del inversor aumenta a un valor máximo de  $25.2^\circ$ , para que posteriormente este recupere nuevamente un valor semejante al inicial. Por ultimo asumimos un ángulo de extinción constante.

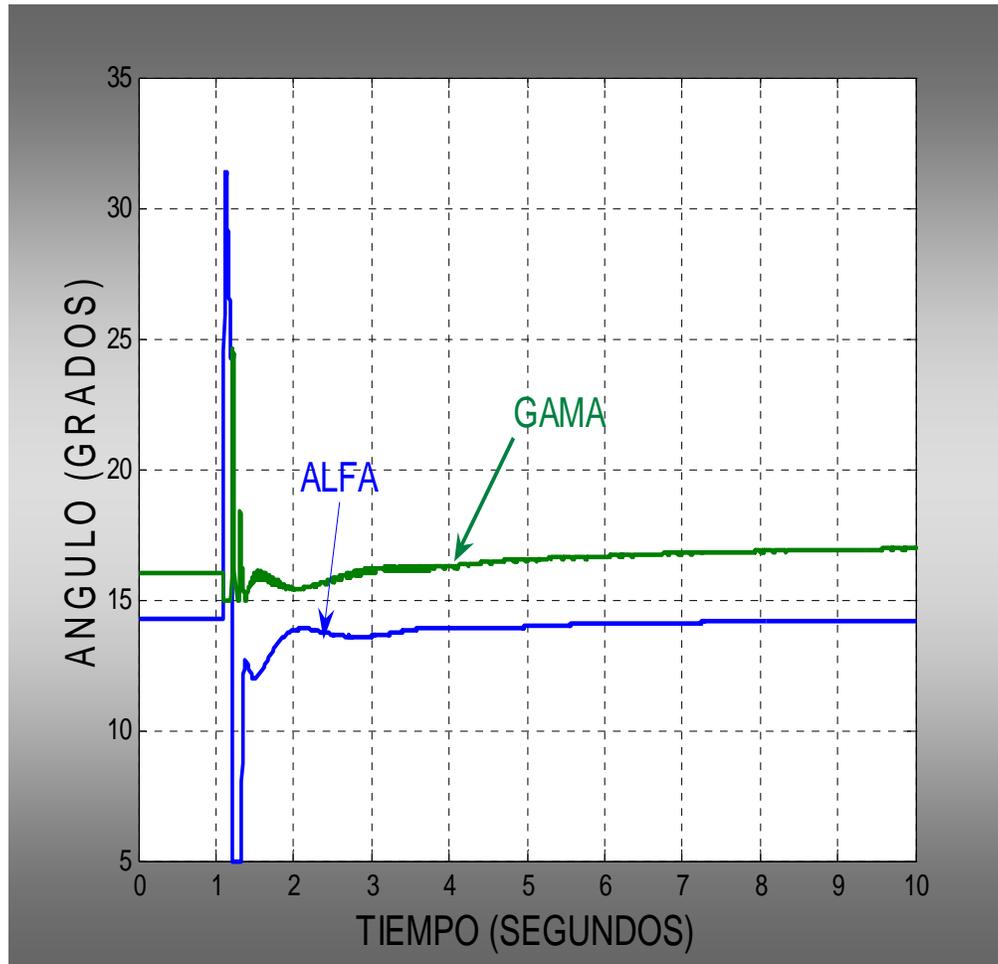
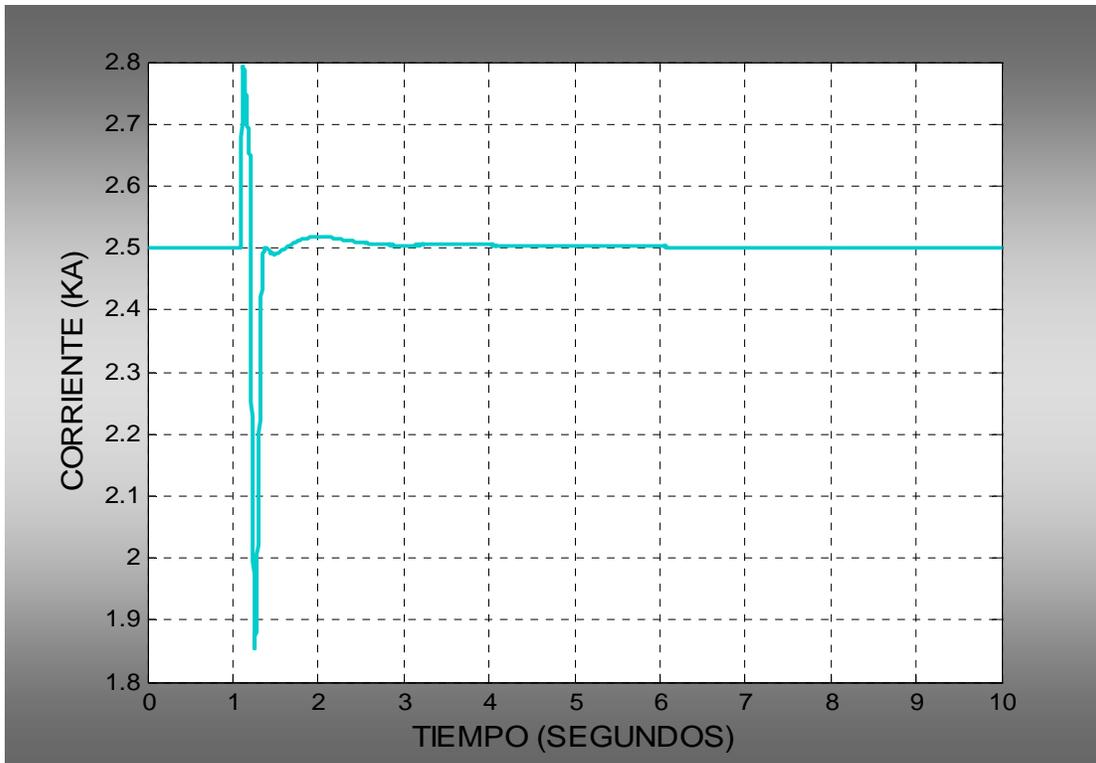
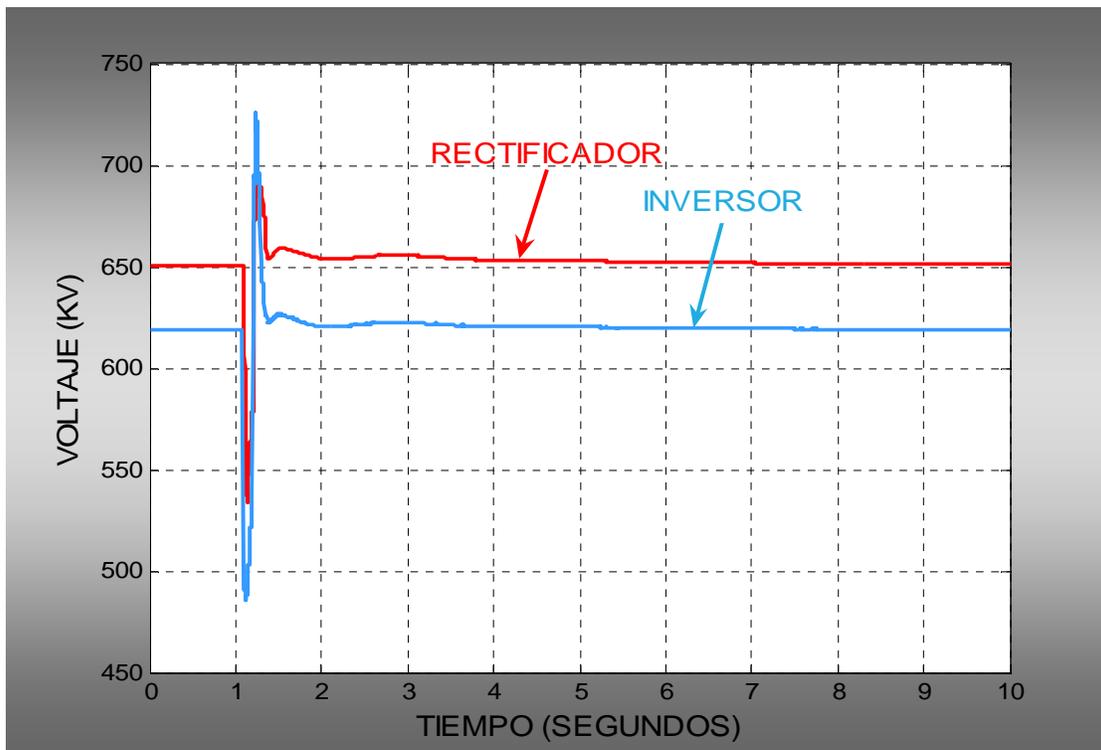


Figura 4.9. Ángulos de disparo de las estaciones convertidoras.

La **figura 4.10** muestra la corriente en el enlace de **CD**. En este trabajo el control del enlace de **AVCD** es modelado bajo corriente constante. Y en esta simulación se han modelado los controles de corriente típicos de modo de que haya un retraso y alguna oscilación amortiguada antes de que la corriente de **CD** alcance realmente su nivel deseado. Después de eso es esencialmente mantenida constante, como se observa en la **figura 4.10** y en la **figura 4.11** se muestran los voltajes de las estaciones convertidoras.



**Figura 4.10. Corriente en el enlace de CD.**



**Figura 4.11. Voltajes de CD en las estaciones convertidoras.**

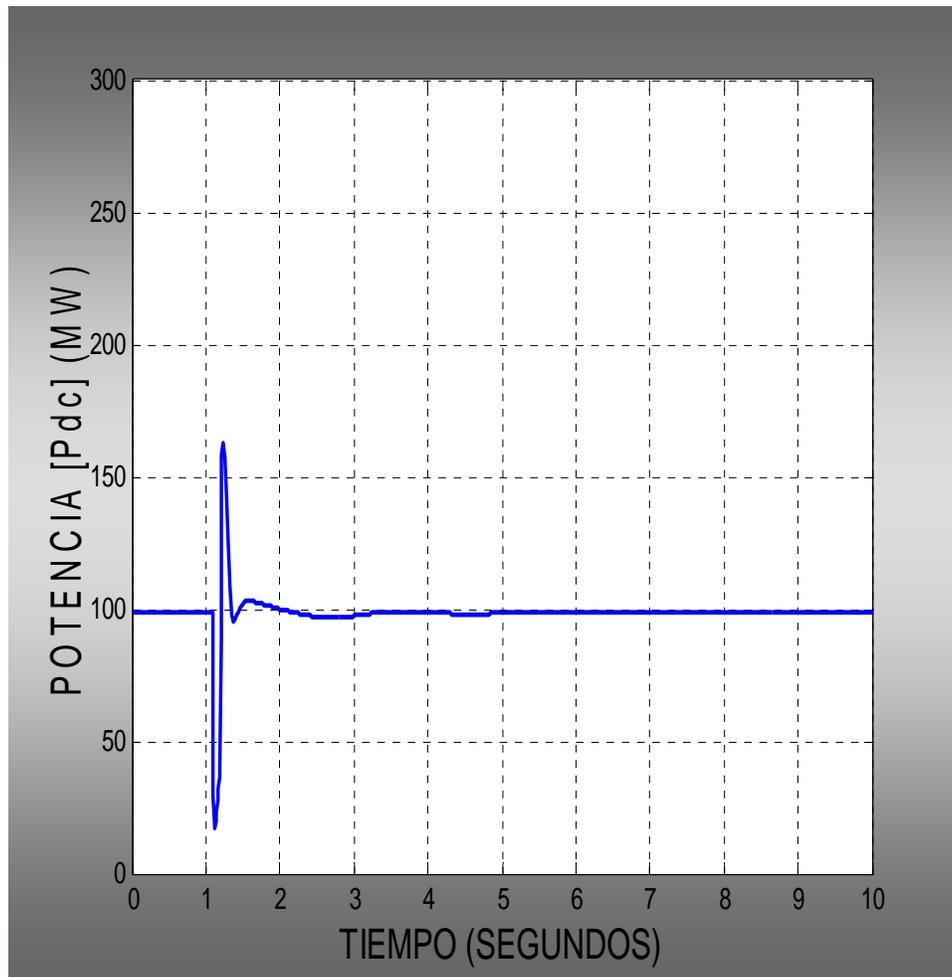
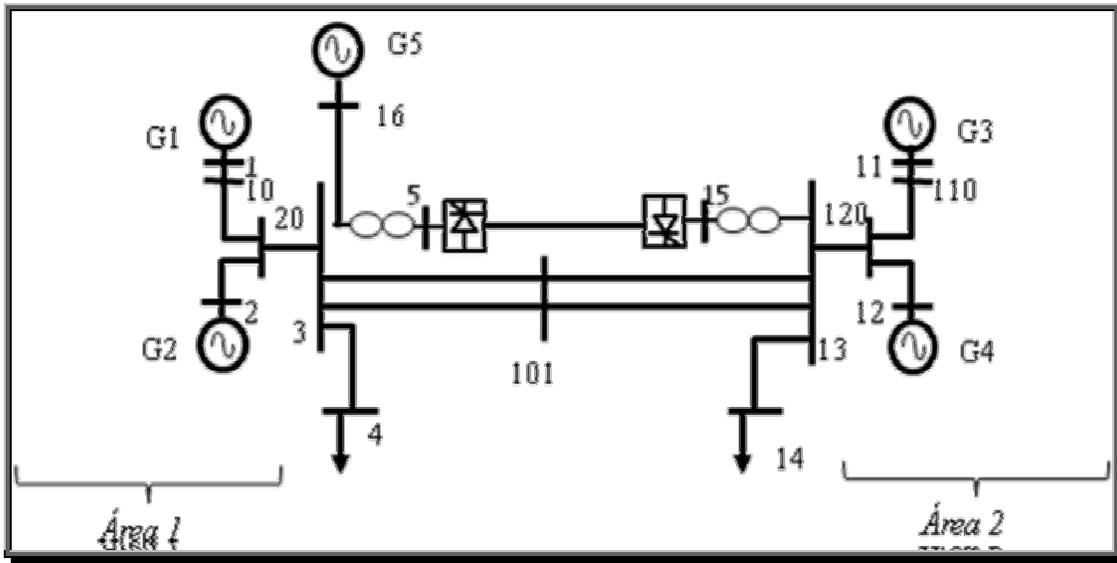


Figura 4.12. Potencia de CD en el enlace.

La **figura 4.12** muestra la potencia en el enlace de **CD**. Como podemos observar el resultado es satisfactorio ya que el amortiguamiento de las oscilaciones es alto, este punto es de suma importancia al tratar la estabilidad angular de los **SEP'S** puesto que tal fenómeno es observable cuando ocurre un disturbio, teniéndose oscilaciones en este parámetro, como se aprecia de la gráfica hay una pequeña oscilación amortiguada antes de que la potencia de **CD** alcance realmente su valor nominal fijado.

#### 4.6 ESTUDIO DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN CA/CD DE DOS ÁREAS MODIFICADO

El sistema utilizado para ilustrar la interconexión de una planta generadora a un sistema de CA a través de un enlace de AVCD se muestra en la **figura 4.13** [18].



**Figura 4.13.** Sistema de dos áreas modificado con CD.

Este se basa en el sistema simple de dos áreas considerado en la **figura 4.1**. Ahora se anexará un enlace de CD de 100 MW entre los nodos 13 y 16 anexando un generador más a este nodo. La representación considerada para el enlace de CD es del tipo bipolar. En la **tabla 4-4** se mencionan los parámetros del enlace de AVCD y en la **tabla 4-5** se muestran sus condiciones iniciales.

**Tabla 4-4.** Parámetros y valores del enlace de CD

Parámetros del enlace de CD	Valores de los parámetros del enlace de CD
Voltaje nominal	540 Kv
Corriente nominal	1900 A
Resistencia de la línea	5.5 $\Omega$
Inductancia	195 mH
Reactancia de conmutación	2.1 $\Omega$
Reactor de alisamiento	150 mH

**Tabla 4-5. Condiciones iniciales del enlace de AVCD**

RECTIFICADOR	INVERSOR
$\alpha = 22^\circ$	$\gamma = 18^\circ$
$v = 540 \text{ kV}$	$v = 500 \text{ kV}$
P= 100 MW	
I= 2 kA	

Considerando el nodo **16** como la estación rectificadora y el nodo **13** como la estación inversora.

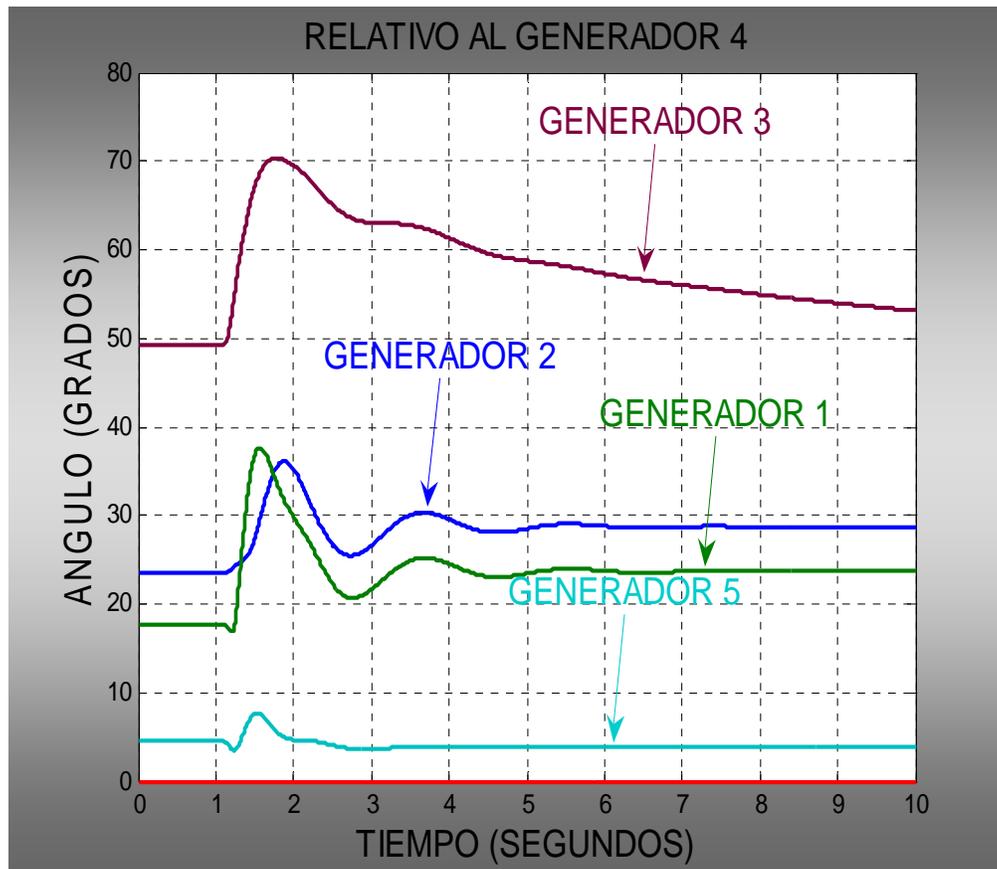
En la **tabla 4-6** se muestran los resultados del análisis en estado estacionario del sistema CA/CD.

**Tabla 4-6. Resultados de flujos de carga del sistema con enlace de CD**

BUS	VOLTS [p.u]	ANGULO [grados]	GENERACION		CARGA	
			P [p.u]	Q [p.u]	P [p.u]	Q [p.u]
1	1.0300	15.820	6.8189	1.5912	0.0000	0.0000
2	1.0100	16.4321	5.0000	2.0819	0.0000	0.0000
3	1.0000	2.9394	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.9937	13.7795	0.0000	0.0000	10.000	1.0000
5	0.9991	-10.4262	0.0000	0.0000	1.0052	0.7740
10	1.0273	18.1536	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
11	1.0013	20.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
12	0.9902	28.3366	7.910	1.1444	0.0000	0.0000
13	1.0000	-5.1022	7.0000	2.5446	0.0000	0.0000
14	0.9965	12.1882	0.0000	0.0000	6.0000	0.6000
15	1.0125	-5.0067	0.0000	0.0000	1.0052	0.7741
16	1.0286	11.0077	2.8967	2.3012	0.0000	0.0000
20	1.0620	8.9491	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
101	1.0068	10.0283	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
110	1.0102	20.1556	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
120	1.0286	23.6162	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Los resultados típicos de un estudio de estabilidad transitoria se muestran en las figuras **4.14** a **4.18** para un lapso de tiempo de estudio de **10 segundos**. El disturbio es una falla trifásica en el nodo **13** y se asume que la falla es liberada en **1.035 segundos**. La **figura 4.14** muestra los ángulos relativos de los generadores del sistema, teniendo como

resultado oscilaciones bien amortiguadas. Si los ángulos del rotor (o las diferencias del ángulo) alcanzan valores máximos y después disminuyen, el sistema es estable.



**Figura 4.14. Curvas de oscilación en términos de la diferencia angular entre máquinas.**

Los voltajes de conmutación del sistema de corriente alterna de las estaciones convertidoras se muestran en la **figura 4.15**. Como se puede apreciar de la gráfica, antes del disturbio las tensiones de las estaciones convertidoras se encontraban en un valor entre **1.0 – 1.05** por unidad del voltaje nominal. Durante el periodo cuando ocurre el disturbio el voltaje del inversor cae a cero y además se tiene una sobre tensión (debido al rechazó de carga) en el sistema del rectificador el cual es menor que **1.1** por unidad, Después que se libera la falla el voltaje de **CA** del inversor comienza a incrementarse hasta llegar aproximadamente a su valor inicial. El reanudamiento del enlace de **CD** es muy rápido.

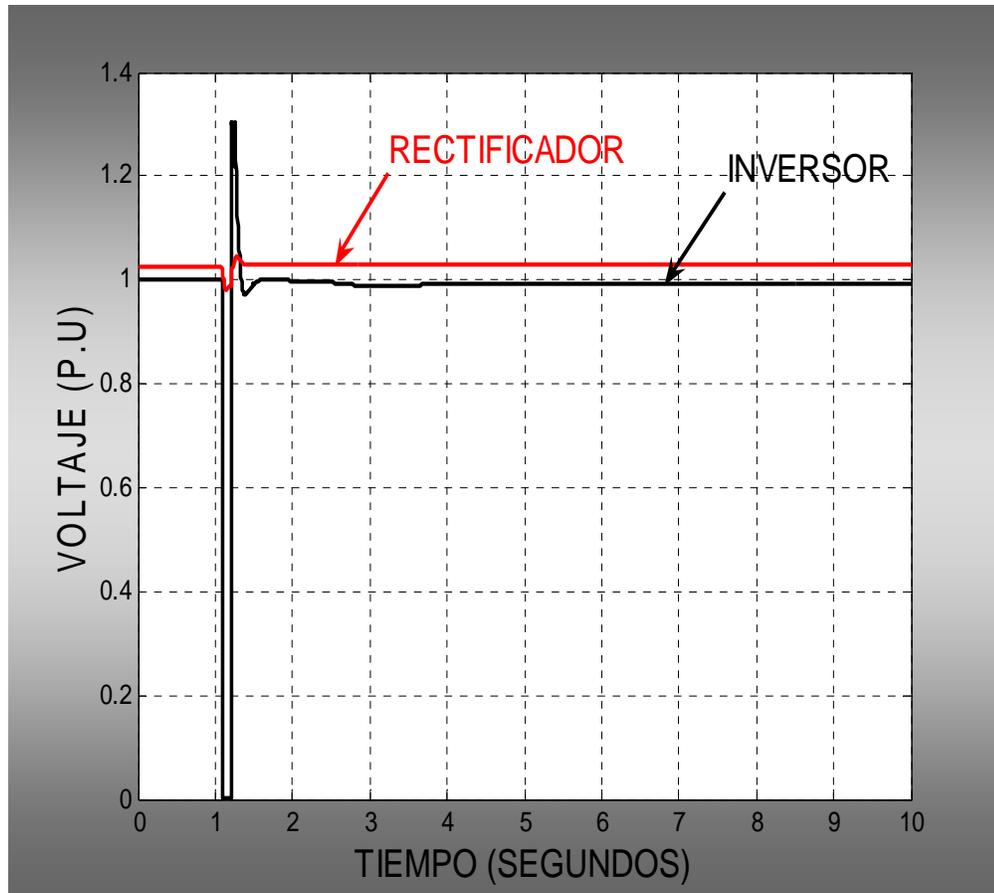


Figura 4.15. Voltaje de CA en la terminal del enlace.

En la **figura 4.16** se muestran los ángulos de disparo de los convertidores. Después de liberar la falla el rectificador cae a su valor mínimo y este recupera nuevamente un valor aproximadamente semejante al inicial. Entonces tomando como consideración que el rectificador controlara la corriente.

Durante el disturbio el ángulo de la estación inversora disminuye a su valor mínimo, seguido a la liberación de la falla el ángulo de disparo del inversor aumenta a un valor máximo, para que posteriormente este recupere nuevamente un valor semejante al inicial. Por ultimo asumimos un ángulo de extinción constante.

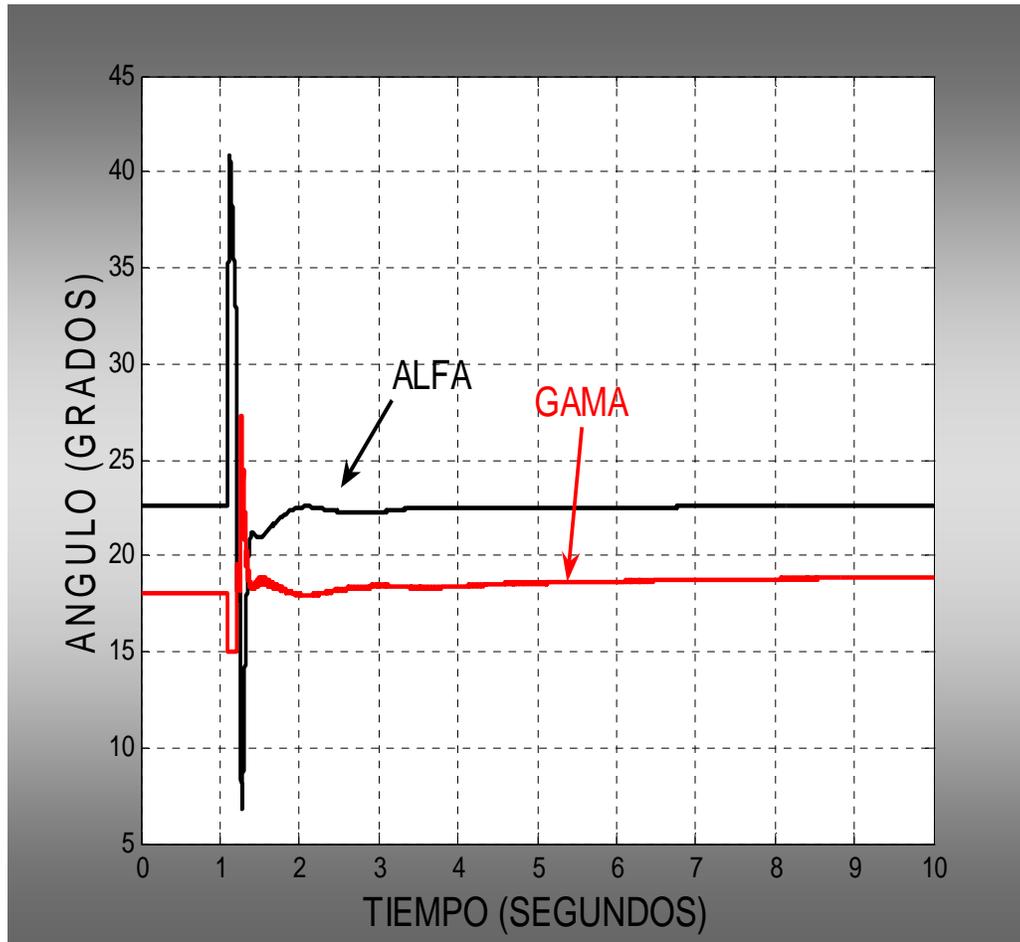


Figura 4.16. Ángulos de disparo de las estaciones convertidoras.

La **figura 4.17** muestra la corriente en el enlace de **CD**. En este trabajo el control del enlace de **AVCD** es modelado bajo corriente constante. Y en esta simulación se han modelado los controles de corriente típicos de modo de que haya un retraso y alguna oscilación amortiguada antes de que la corriente de **CD** alcance realmente su nivel deseado. Después de eso es esencialmente mantenida constante, como se observa en la **figura 4.17** y en la **figura 4.18** se muestran los voltajes de las estaciones convertidoras.

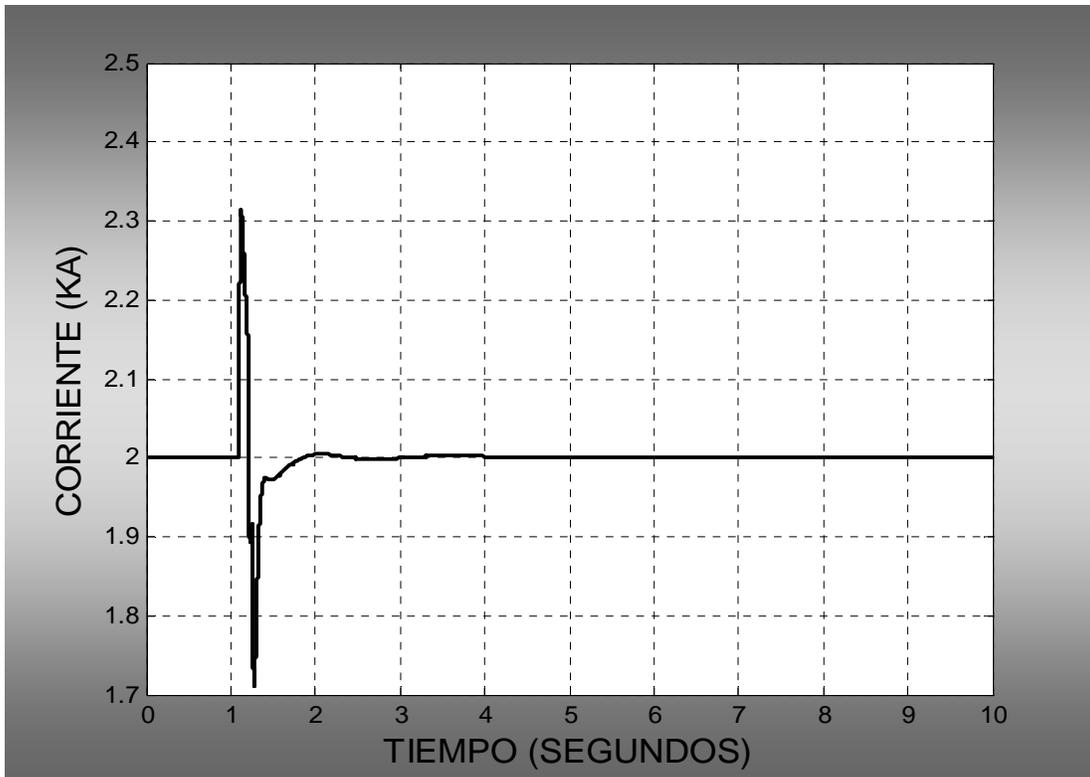


Figura 4.17. Corriente en el enlace de CD.

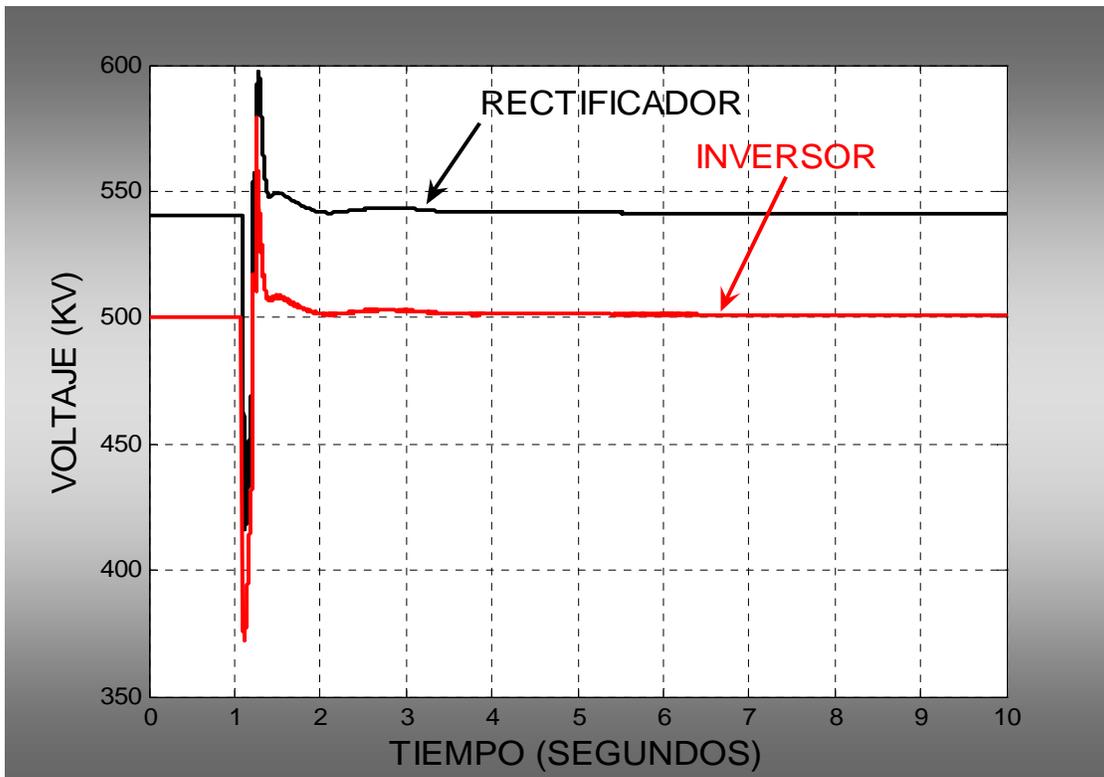


Figura 4.18. Voltajes de CD en las estaciones convertidoras.

#### 4.7 ESTUDIO DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN NUEVA INGLATERRA

En esta parte del presente trabajo la investigación se extiende a un **SEP** mas grande, que al igual que en el caso anterior se analizará la estabilidad transitoria pero ahora del sistema Nueva Inglaterra o también conocido como el sistema **NPCC (Northeast Power Coordinating Council)** del cual se muestra su diagrama unifilar en la **figura 4.19 [9]** El sistema consta de **10 unidades generadoras, 39 nodos y 46 líneas.** El sistema representa la red de transmisión de **Nueva Inglaterra** de 245 kV de la década de los sesenta.

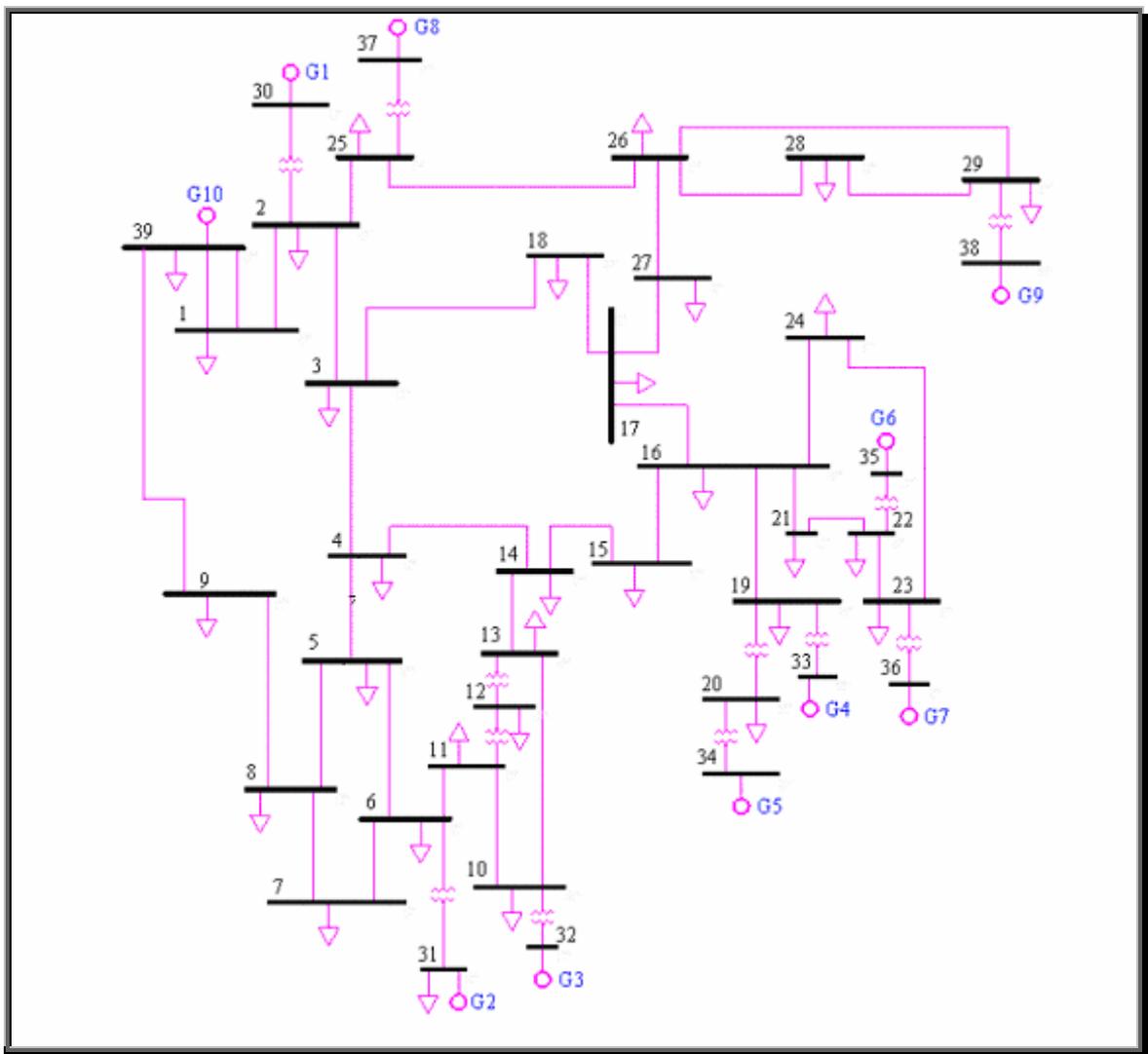
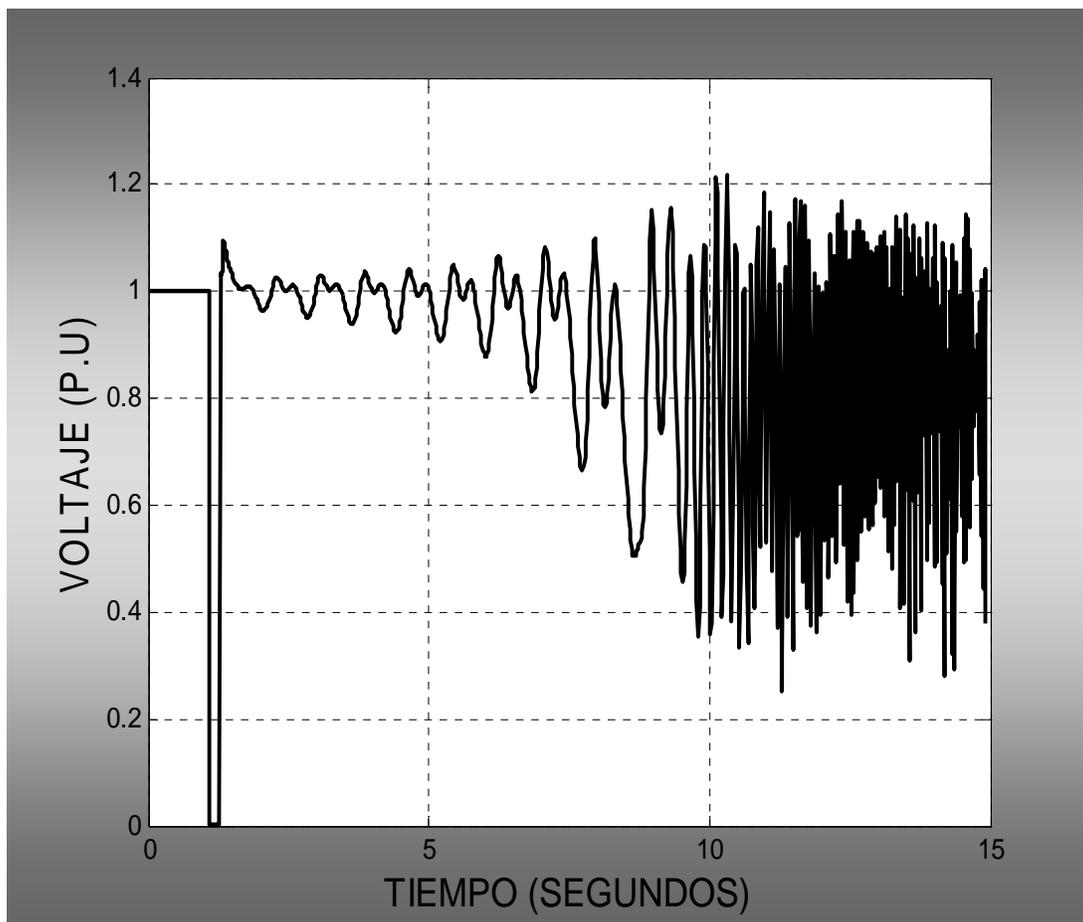


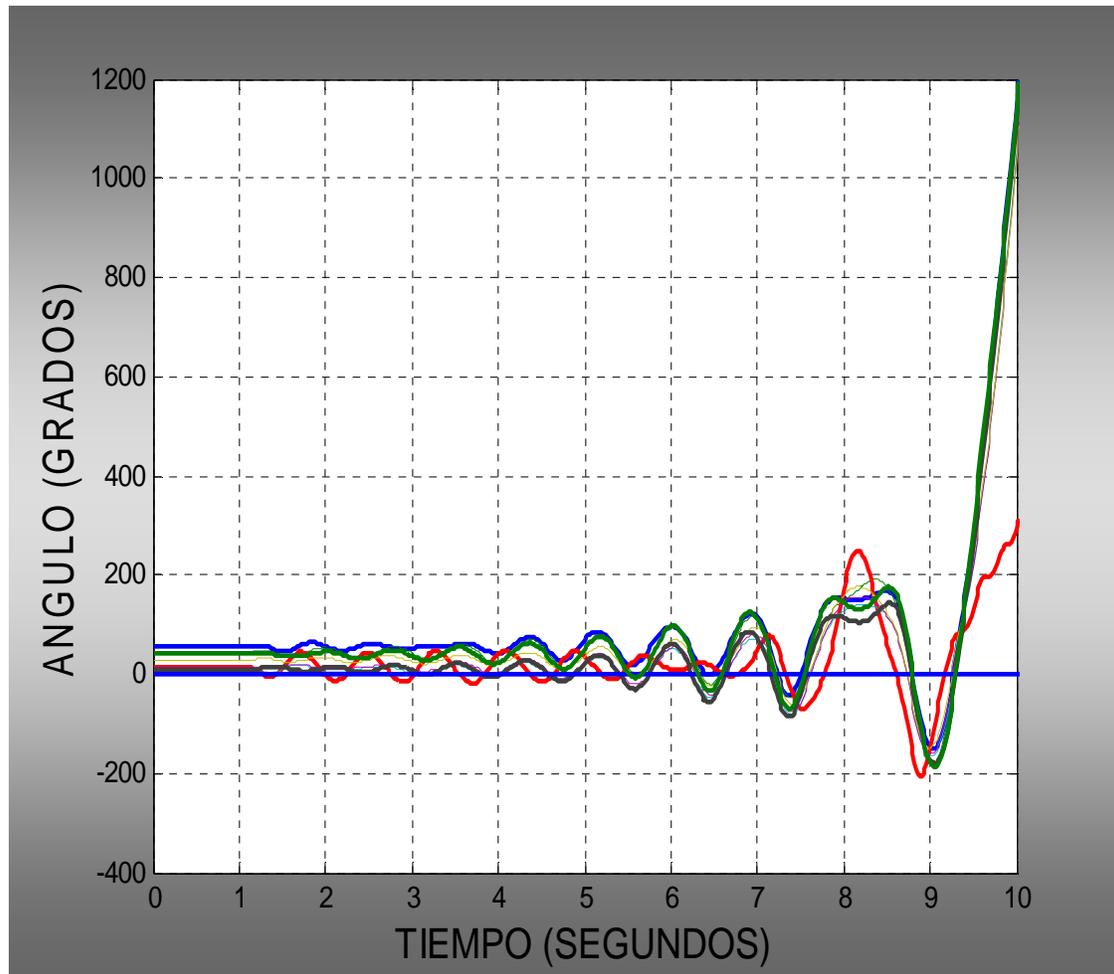
Figura 4.19. Configuración del sistema para el caso de estudio.

Los datos del flujo de potencia para este sistema en CA pueden ser encontrados en [9]. Además Los parámetros de las líneas de transmisión, transformadores y generadores así como el de sus controles se muestran en el **apéndice B**.

En las **figuras 4.20 a 4.22** se muestran las respuestas del sistema a una falla trifásica en el nodo **16** y se asume que la falla es liberada en **1.2 segundos**. Se tienen oscilaciones cada vez mayores como puede observar en **la figura 4.20 y 4.22**, y por consecuencia el resultado es la inestabilidad del sistema.



**Figura 4.20. Magnitud del voltaje en el nodo 16.**



**Figura 4.21. Curvas de oscilación en términos de la diferencia angular entre máquinas.**

De la **figura 4.21** observamos que las diferencias de los ángulos aumentan indefinidamente, y por consecuencia esto define al sistema como inestable, además como se puede observar de la gráfica que las máquinas del sistema pierden sincronismo.

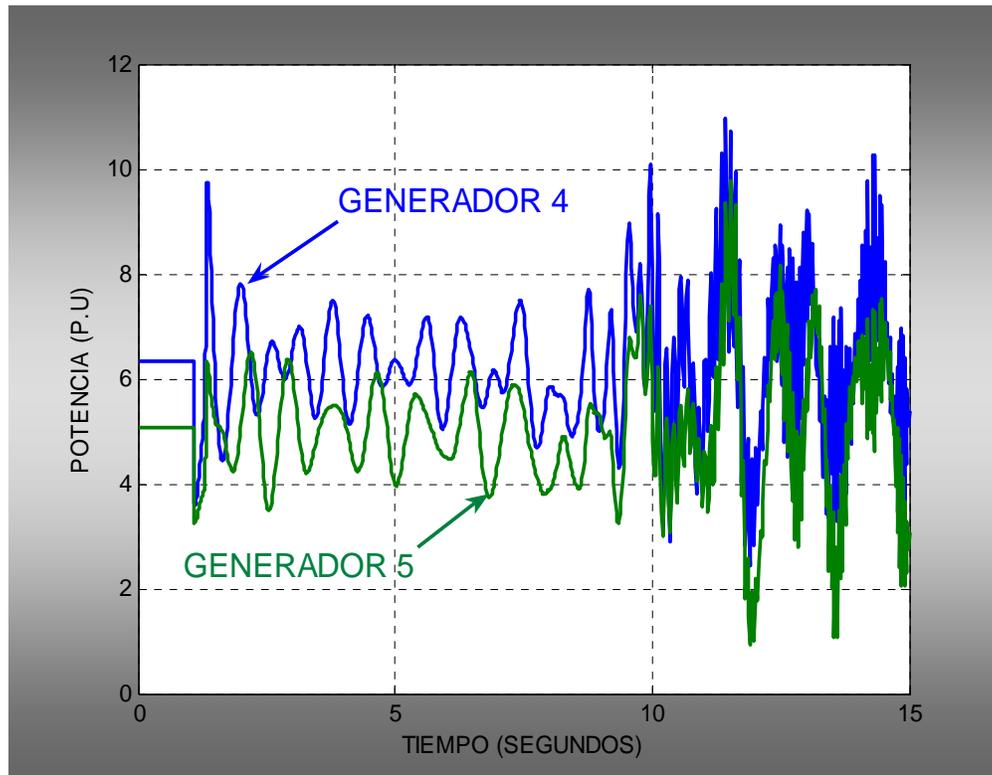


Figura 4.22. Potencia activa de los generadores 4 y 5.

#### 4.8 ESTUDIO DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN CA/CD NUEVA INGLATERRA

El sistema utilizado para ilustrar el uso de un enlace de AVCD se muestra la figura 4.19. Ahora se procederá a anexas un enlace de CD de 1000 MW entre los nodos 16 y 17 en paralelo con la línea de CA. La representación considerada para el enlace de CD es del tipo bipolar. En la tabla 4-7 se mencionan los parámetros del enlace de AVCD y en la tabla 4-8 se muestran sus condiciones iniciales.

Tabla 4-7. Parámetros y valores del enlace de CD

Parámetros del enlace de CD	Valores de los parámetros del enlace de CD
Voltaje nominal	550 Kv
Corriente nominal	1800 A
Resistencia de la línea	7.5 $\Omega$
Inductancia	200 mH
Reactancia de conmutación	3.0 $\Omega$
Reactor de alisamiento	180 mH

**Tabla 4-8. Condiciones iniciales del enlace de AVCD**

RECTIFICADOR	INVERSOR
$\alpha = 20.5^\circ$	$\gamma = 18^\circ$
$v = 550 \text{ kV}$	$v = 510 \text{ kV}$
P= 1000 MW	
I= 1.98 kA	

Considerando el nodo **17** como la estación rectificadora y nodo **16** como la estación inversora.

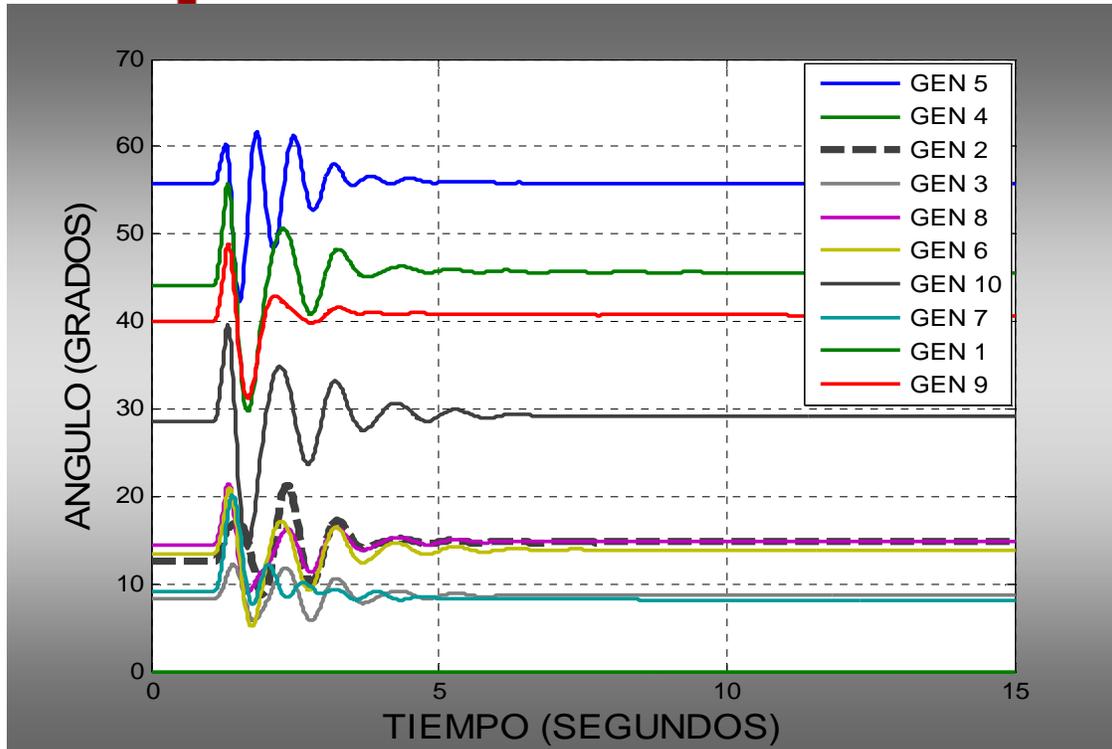
En la **tabla 4-9** se muestran los resultados del análisis en estado estacionario del sistema CA/CD. Además los parámetros de los controles del enlace de AVCD se muestran en el **apéndice B**.

**Tabla 4-9. Resultados de flujos de carga del sistema con enlace de CD**

NODO	VOLTS [p.u]	ANGULO [grados]	GENERACION		CARGA	
			P [MW]	Q [MVAR]	P [MW]	Q [MVAR]
1	1.0474	-8.44	0.00	0.00	0.00	-0.00
2	1.0487	-5.75	0.00	0.00	0.00	-0.00
3	1.0302	-8.60	0.00	0.00	-322.00	-2.40
4	1.0039	-9.61	0.00	0.00	-500.00	-184.00
5	1.0053	-8.61	0.00	0.00	0.00	-0.00
51	1.0150	2.851	0.00	0.00	1000.267	110.91
6	1.0077	-7.95	0.00	0.00	0.00	-0.00
7	0.9970	-10.12	0.00	0.00	-233.80	-84.00
8	0.9960	-10.62	0.00	0.00	-522.00	-176.00
9	1.0282	-10.32	0.00	0.00	0.00	0.00
10	1.0172	-5.43	0.00	0.00	0.00	-0.00
11	1.0127	-6.28	0.00	0.00	-0.00	-0.00
12	1.0002	-6.24	0.00	0.00	-7.50	-88.00
13	1.0143	-6.10	0.00	0.00	0.00	0.00
14	1.0117	-7.66	0.00	0.00	0.00	-0.00
15	1.0154	-7.74	0.00	0.00	-320.00	-153.00
52	0.99980	-5.006	0.00	0.00	1000.267	110.91
16	1.0318	-6.19	0.00	0.00	-329.00	-32.30
17	1.0317	-7.30	0.00	0.00	-0.00	0.00
18	1.0309	-8.22	0.00	0.00	-158.00	-30.00

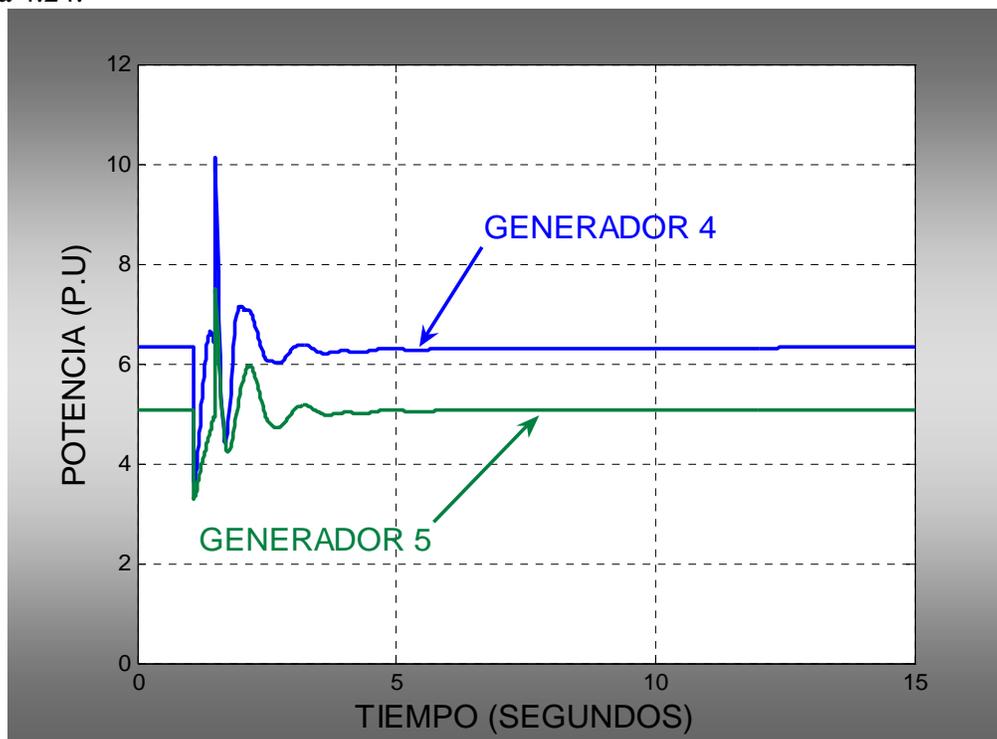
19	1.0499	-1.02	0.00	0.00	0.00	0.00
20	0.9912	-2.01	0.00	0.00	-628.00	-103.00
21	1.0318	-3.78	0.00	0.00	-274.00	-115.00
22	1.0498	0.67	0.00	0.00	0.00	-0.00
23	1.0448	0.47	0.00	0.00	-247.50	-84.60
24	1.0373	-6.07	0.00	0.00	-308.60	92.20
25	1.0576	-4.36	0.00	0.00	-224.00	-47.20
26	1.0521	-5.53	0.00	0.00	-139.00	-17.00
27	1.0377	-7.50	0.00	0.00	-281.00	-75.50
28	1.0501	-2.01	0.00	0.00	-206.00	-27.60
29	1.0499	0.74	0.00	0.00	-283.50	-26.90
30	1.0475	-3.33	250.00	146.16	0.00	0.00
31	0.9820	-0.00	511.61	198.25	-9.20	-4.60
32	0.9831	2.57	650.00	205.14	0.00	0.00
33	0.9972	4.19	632.00	109.91	0.00	0.00
34	1.0123	3.17	508.00	165.76	0.00	0.00
35	1.0493	5.63	650.00	212.41	0.00	0.00
36	1.0635	8.32	560.00	101.17	0.00	0.00
37	1.0278	2.42	540.00	0.44	0.00	0.00
38	1.0265	7.81	830.00	22.84	0.00	0.00
39	1.0300	-10.05	-104.00	88.28	-1104.00	-250.00

Los resultados típicos del estudio de estabilidad transitoria se muestran en las figuras **4.23** a **4.29** para un lapso de tiempo de estudio de **15 segundos**. El disturbio es una falla trifásica en el nodo **16** y se asume que la falla es liberada en **1.68 segundos**. Se observa de las graficas obtenidas que las oscilaciones que se presentaban en el sistema de **CA**, se amortiguan de manera significativa con el enlace de **CD**, teniendo como consecuencia la estabilidad del sistema. La **figura 4.23** muestra los ángulos relativos de los generadores del sistema, teniendo como resultado oscilaciones bien amortiguadas, es decir, el nivel de amortiguamiento de dichas oscilaciones es alto. Por otra parte si los ángulos de los rotores (o las diferencias de los ángulos) alcanzan valores máximos y después disminuyen, el sistema es estable, como es el caso y esto se ve reflejado en la siguiente figura.



**Figura 4.23. Curvas de oscilación en términos de la diferencia angular entre máquinas.**

Las respuestas de las potencias activas de dos generadores del sistema se muestran en la figura 4.24.



**Figura 4.24. Potencia activa de los generadores 4 y 5.**

Se puede verificar de la **figura 4.24** que el amortiguamiento de las oscilaciones de la potencia de los **generadores 4 y 5** es alto, agregando el enlace de **AVCD**.



**Figura 4.25. Voltaje de CA en la terminal del enlace.**

Los voltajes de conmutación del sistema de corriente alterna de las estaciones convertidoras del **SEP** en estudio se muestran en la **figura 4.25**. Durante el periodo cuando ocurre el disturbio el voltaje del inversor cae a cero y además se tiene una sobre tensión (debido al rechazó de carga) en el sistema del rectificador, Después que se libera la falla el voltaje de **CA** del inversor comienza a incrementarse hasta llegar aproximadamente a su valor inicial.

En la **figura 4.26** se muestran los ángulos de disparo de los convertidores. Durante el disturbio el ángulo alfa de la estación rectificadora, se incrementa substancialmente y después de liberar la falla el rectificador cae a su valor mínimo y este recupera nuevamente un valor aproximadamente semejante al inicial. Entonces tomando como consideración que el rectificador controlara la corriente.

Durante el disturbio el ángulo de la estación inversora disminuye a su valor mínimo, seguido a la liberación de la falla el ángulo de disparo del inversor aumenta a un valor máximo, para que posteriormente este recupere nuevamente un valor semejante al inicial. Por ultimo asumimos un ángulo de extinción constante.

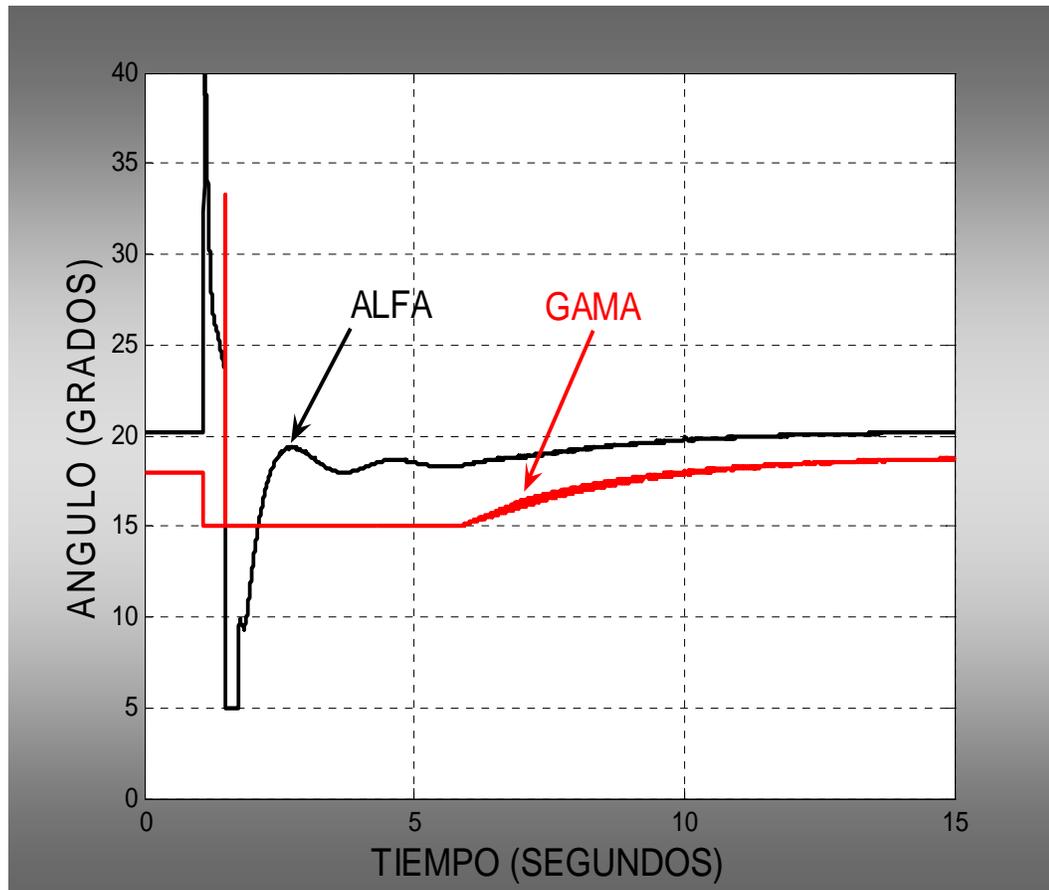


Figura 4.26. Ángulos de disparo de las estaciones convertidoras.

La **figura 4.27** muestra la corriente en el enlace de **CD**. En este trabajo el control del enlace de **AVCD** es modelado bajo corriente constante y en esta simulación se han modelado los controles de corriente típicos de modo de que haya un retraso y alguna oscilación amortiguada antes de que la corriente de **CD** alcance realmente su nivel deseado. Después de eso es esencialmente mantenida constante, como se observa en la **figura 4.27** y en la **figura 4.28** se muestran los voltajes de las estaciones convertidoras.



Figura 4.27. Corriente en el enlace de CD.

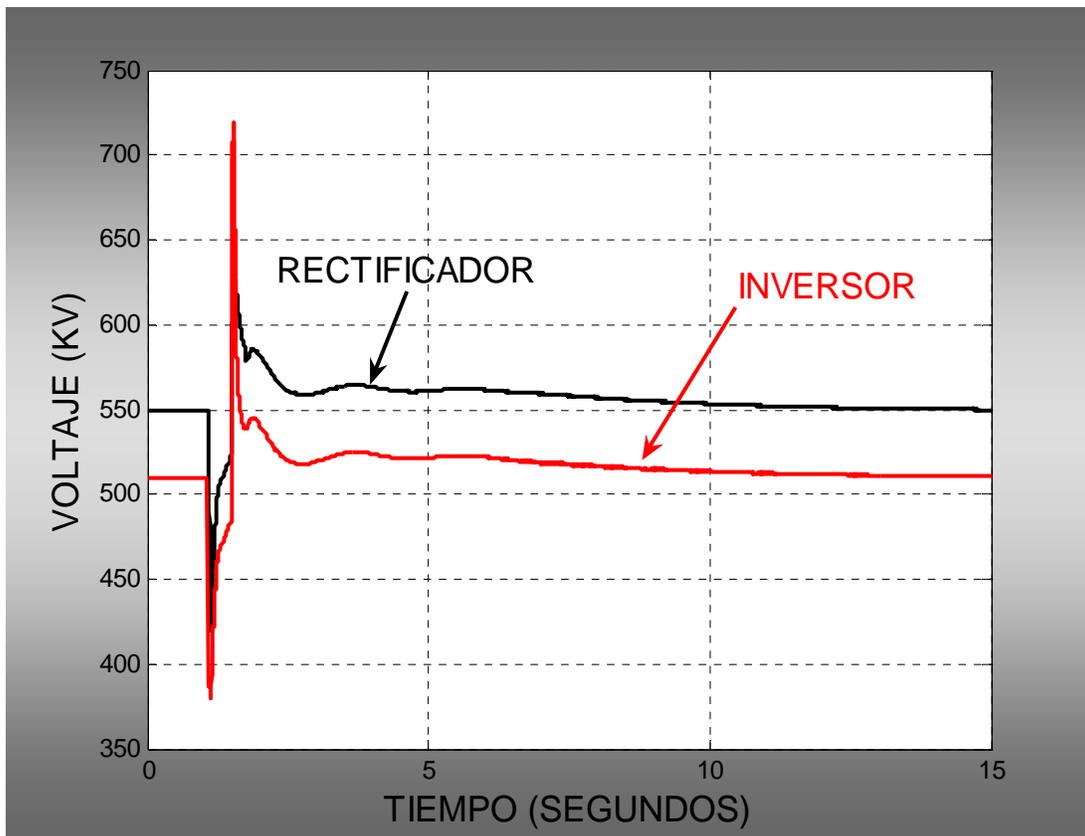
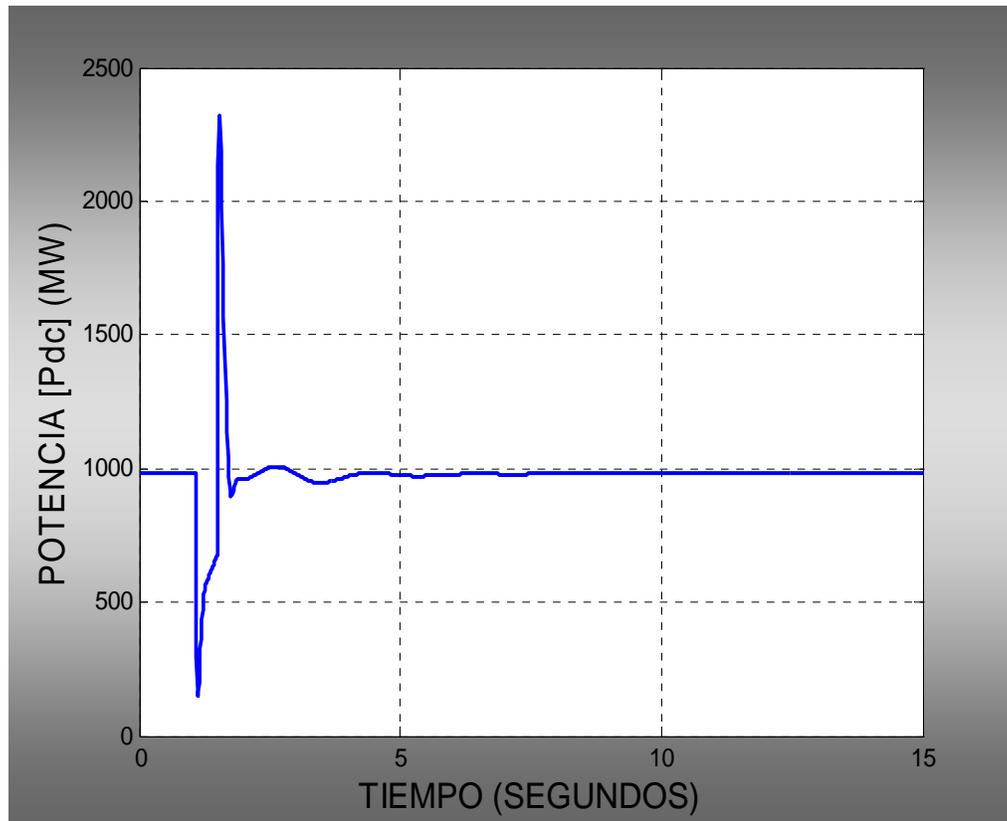


Figura 4.28. Voltajes de CD en las estaciones convertidoras.



**Figura 4.29.** Potencia de CD en el enlace.

La **figura 4.29** muestra la potencia en el enlace de **CD**. Como podemos observar el resultado es satisfactorio ya que el amortiguamiento de las oscilaciones es alto, este punto es de suma importancia al tratar la estabilidad angular de los **SEP'S** puesto que tal fenómeno es observable cuando ocurre un disturbio, teniéndose oscilaciones en este parámetro, como se aprecia de la gráfica hay una pequeña oscilación amortiguada antes de que la potencia de **CD** alcance realmente su valor nominal fijado.

## CAPÍTULO 5

# CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES

## 5.1 CONCLUSIONES GENERALES

Es de suma importancia comprender el desarrollo histórico de la tecnología de **AVCD**, así como los tipos de convertidores desarrollados desde su inicio hasta la fecha y las ventajas que esta ofrece para la justificación de ser utilizada en proyectos a nivel mundial, desarrollándose así un contexto teórico en una parte de este trabajo, para una buena comprensión de los motivos expuestos.

El enfoque desarrollado a lo largo de este trabajo y su finalidad se centra en el análisis y modelado de la estabilidad angular ante grandes disturbios anexando enlaces de **AVCD**. Como consecuencia se hace hincapié en comprender el funcionamiento de las estaciones convertidoras así como el de la propia línea de **CD**, y como estos se pueden relacionar con los sistemas de **CA**.

El estudio es aplicado a diferentes sistemas de prueba multimáquinas **CA/CD** de diferentes dimensiones, complejidad y además que se caracterizan por la utilización de diversos dispositivos de control, teniéndose siempre como objetivo primordial el mejoramiento de la estabilidad transitoria de los **SEP'S**, es decir, tener como resultado oscilaciones muy bien amortiguadas ante disturbios en este caso fallas trifásicas.

Se muestra así la importancia y confiabilidad de un enlace de **AVCD** en este tipo de estudios dinámicos, además de que un enlace de **AVCD** nos proporciona la transferencia de potencia de un punto a otro, también nos sirve para proporcionar estabilidad a los **SEP'S**.

Un punto muy importante que debe ser mencionado es que en el transcurso del desarrollo de este trabajo y que se presento en la parte de las simulaciones de los sistemas, revela que un ajuste inadecuado de los parámetros del enlace de **AVCD** conlleva a la inestabilidad de los sistemas **CA/CD**.

En este trabajo se muestra la característica más importante y sobresaliente de los enlaces de **AVCD** la cual esta relacionada con la posibilidad para controlar exactamente la potencia activa que se transmitirá en una línea de **AVCD** lo anterior esta en oposición con las líneas de **CA**, donde el flujo de potencia no puede ser controlado y este depende de la generación y carga del **SEP**.

La tecnología utilizada en este trabajo corresponde a la transmisión de **AVCD** clásica, y como puede ser observado de manera gráfica las respuestas de las variables que caracterizan a los enlaces de **AVCD** son satisfactorias en los diferentes sistemas utilizados en este trabajo, es decir, Las formas de las respuestas típicas de los estudios de estabilidad angular ante grandes disturbios con enlaces de **AVCD** obtenidas en las diferentes simulaciones de los **SEP'S** son similares a las respuestas dinámicas propuestas con lo cual se valida este trabajo.

Este trabajo no se cubre cada aspecto de la tecnología de **AVCD**, ni el de sus aplicaciones así también como cada tecnología diferente de **AVCD**. Sin embargo, se hace el esfuerzo de dar una cobertura comprensiva y actualizada de los temas presentados. Además se debe tener en cuenta que se hace frente a una tecnología que cambia con rapidez.

## **5.2 RECOMENDACIONES PARA POSIBLES INVESTIGACIONES FUTURAS**

Las posibles investigaciones futuras relacionadas a la estabilidad angular ante grandes disturbios anexando enlaces de **AVCD** a **SEP'S** convencionales de **CA**, utilizando el software de **MATLAB (PST)** son las que a continuación se describen:

- 1.- Desarrollo de modelos **FACTS** [32], tales como **TCSC**, **STATCOM**, **SSSC**, **UPFC** para ser incorporados a dicho paquete computacional y para así poder llevar a cabo una aplicación coordinada entre enlaces de **AVCD** y dichos dispositivos para analizar el comportamiento de estos en los **SEP'S**.
- 2.- Un análisis a los mismos sistemas de potencia utilizados en el desarrollo de este trabajo con un modelo de cargas dinámicas, ya que las características de estas han demostrado tener un impacto significativo en la estabilidad transitoria y de voltaje de los **SEP'S**.
- 3.- Desarrollar implementaciones necesarias al programa en el área dinámica del sistema de **AVCD**, para que se puedan llevar a cabo simulaciones correspondientes con diferentes tipos de fallas en los elementos como lo son el convertidor y la línea de **AVCD**.
- 4.- Desarrollo de modelos multiterminales (serie, paralelo) para ser aplicado a dicho estudio y para así poder analizar el impacto benéfico de estos en los **SEP'S**.
- 5.- Utilizar técnicas de control inteligente en las estaciones convertidoras.
- 6.- Desarrollar modelos para estaciones convertidoras *back to back* e incorporarlas al **PST**.
- 7.- Incorporación de sistemas de protección para ambos sistemas **CA** y **CD**.
- 8.- Utilización de otras tecnologías de **AVCD**.

# APÉNDICE A

Con el desarrollo de la tecnología de **AVCD**, ha habido una tendencia de aumento de emplear convertidores de **AVCD** en sistemas débiles de **CA**, es decir, sistemas con un cociente de corto circuito (**SCR**), menor de 2.5. Los problemas principales de funcionamiento con los sistemas de **AVCD** conectados a sistemas débiles de **CA** son: (inestabilidad del voltaje) altas oscilaciones en la magnitud del voltaje de **CA** y una difícil recuperación ante disturbios [2-5]. Las fluctuaciones del voltaje de **CA** son altamente indeseables y pueden ser dañosas para el equipo de **CA** y la calidad de la fuente de alimentación, mientras que en el lado de **CD** aumentara la probabilidad de falta de conmutación, además una mala calidad de la recuperación de la potencia de **CD** después de la liberación de la falla de **CA**. Las inestabilidades dinámicas causadas por los sistemas de recepción débiles de **CA** se describen en [2,4]. La alta magnitud de las oscilaciones del voltaje de **CA** es una consecuencia de la alta impedancia del sistema de **CA**. Si el sistema de **CA** tiene alta impedancia equivalente, entonces perturbaciones pequeñas en la corriente de **CA** causaran desviaciones grandes del voltaje.

El convertidor consume siempre potencia reactiva, que se debe proveer por la red y por los condensadores y filtros combinados en derivación. Si el sistema de **CA** conectado no es suficientemente fuerte la interacción entre el esquema de **AVCD** y el sistema de **CA** pueden ser críticos. La naturaleza de las interacciones del sistema de **CA/CD** y los problemas asociados son muy dependientes en la fuerza del sistema de **CA** concerniente a la capacidad del enlace de **CD**. Debido a esto es útil tener medios simples de medir y comparar fuerzas relativas de los sistemas de **CA**. Por lo tanto la fuerza de los sistemas de **CA** conectados a las terminales de un enlace de **CD** es medido en términos de la relación de cortocircuito que se define como:

$$SCR = \frac{S_{MVA}}{P_{cdN}} \quad (A.1)$$

Donde **SMVA** es la capacidad de corto circuito del sistema conectado de **CA**., **PcdN** es el nominal de la terminal del convertidor en **MW**. La relación eficaz de corto circuito (**ESCR**) incluye los efectos del equipo del lado de **CA** asociado al enlace de **CD**: filtros, capacitores en derivación, condensadores síncronos, etc., que reducirán la capacidad de corto circuito de la red [2].

Tradicionalmente, se ha clasificado la fuerza del sistema de **CA** como sigue:

**Tabla A-1 Valores del ESCR para clasificar la fuerza de los sistemas de CA**

Indicador	ESCR
Alto	Es mayor de 3
Bajo	Esta entre 2 y 3
Muy bajo	Es menor de 2

# APÉNDICE B

El propósito de este apéndice es proporcionar los valores de los parámetros de las líneas de transmisión, transformadores y generadores [9] así también como el de los controles de generadores y el enlace de AVCD. Correspondientes a los diferentes SEP'S utilizados en esta tesis.

## Sistema Nueva Inglaterra

**Tabla B-1 Parámetros de las líneas de transmisión**

LINEA		NODO		Resistencia [p.u]	Reactancia [p.u]	Susceptancia [p.u]	Relación de transformación
Número	Nombre						
1	Línea 1	1	2	0.0035	0.0411	0.3494	0.0000
2	Línea 2	1	39	0.0010	0.0250	0.3750	0.0000
3	Línea 3	2	3	0.0013	0.0151	0.1286	0.0000
4	Línea 4	2	25	0.0070	0.0086	0.0730	0.0000
5	Línea 5	3	4	0.0013	0.0213	0.1107	0.0000
6	Línea 6	3	18	0.0011	0.0133	0.1069	0.0000
7	Línea 7	4	5	0.0008	0.0128	0.0671	0.0000
8	Línea 8	4	14	0.0008	0.0129	0.0691	0.0000
9	Línea 9	5	6	0.0002	0.0026	0.0217	0.0000
10	Línea 10	5	8	0.0008	0.0112	0.0738	0.0000
11	Línea 11	6	7	0.0006	0.0092	0.0565	0.0000
12	Línea 12	6	11	0.0007	0.0082	0.0695	0.0000
13	Línea 13	7	8	0.0004	0.0046	0.0390	0.0000
14	Línea 14	8	9	0.0023	0.0363	0.1902	0.0000
15	Línea 15	9	39	0.0010	0.0250	0.6000	0.0000
16	Línea 16	10	11	0.0004	0.0043	0.0365	0.0000
17	Línea 17	10	13	0.0004	0.0043	0.0365	0.0000
18	Línea 18	13	14	0.0009	0.0101	0.0862	0.0000
19	Línea 19	14	15	0.0018	0.0217	0.1830	0.0000
20	Línea 20	15	16	0.0009	0.0094	0.0855	0.0000
21	Línea 21	16	17	0.0007	0.0089	0.0671	0.0000

23	Línea 23	16	21	0.0008	0.0135	0.1274	0.0000
24	Línea 24	16	24	0.0003	0.0059	0.0340	0.0000
25	Línea 25	17	18	0.0007	0.0082	0.0660	0.0000
26	Línea 26	17	27	0.0013	0.0173	0.1608	0.0000
27	Línea 27	21	22	0.0008	0.0140	0.1283	0.0000
28	Línea 28	22	23	0.0006	0.0096	0.0923	0.0000
29	Línea 29	23	24	0.0022	0.0350	0.1805	0.0000
30	Línea 30	25	26	0.0032	0.0323	0.2565	0.0000
31	Línea 31	26	27	0.0014	0.0147	0.1198	0.0000
32	Línea 32	26	28	0.0043	0.0474	0.3901	0.0000
33	Línea 33	26	29	0.0057	0.0625	0.5145	0.0000
34	Línea 34	28	29	0.0014	0.0151	0.1245	0.0000
35	Transformador 1	2	30	0.0000	0.0181	0.0000	1.0250
36	Transformador 2	6	31	0.0000	0.0250	0.0000	1.0700
37	Transformador 3	10	32	0.0000	0.0200	0.0000	1.0700
38	Transformador 4	12	11	0.0016	0.0435	0.0000	1.0060
39	Transformador 5	12	13	0.0016	0.0435	0.0000	1.0060
40	Transformador 6	19	33	0.0007	0.0142	0.0000	1.0700

40	Transformador 6	19	33	0.0007	0.0142	0.0000	1.0700
41	Transformador 7	19	20	0.0007	0.0138	0.0000	1.0600
42	Transformador 8	20	34	0.0009	0.0180	0.0000	1.0090
43	Transformador 9	22	35	0.0000	0.0143	0.0000	1.0250
44	Transformador 10	23	36	0.0005	0.0272	0.0000	1.0000
45	Transformador 11	25	37	0.0006	0.0232	0.0000	1.0250
46	Transformador 12	29	38	0.0008	0.0156	0.0000	1.0250

Tabla B-2 Parámetros de los generadores

Número de la Unidad generadora	$H$ [p.u]	$T'_{d0}$ [s]	$X_d$ [p.u]	$T'_{q0}$ [s]	$X_q$ [p.u]	$X_l$ [p.u]	$X'_d$ [p.u]	$X'_q$ [p.u]
1	42.0	10.2	0.1	0.1	0.019	0.125	0.0310	0.008
2	30.3	6.56	0.295	1.5	0.282	0.035	0.0697	0.170
3	35.8	5.7	0.2495	1.5	0.237	0.0304	0.0531	0.0876
4	38.6	5.69	0.262	1.5	0.258	0.0295	0.0436	0.166
5	26.0	5.4	0.67	0.44	0.62	0.054	0.1320	0.166
6	34.8	7.3	0.254	0.4	0.241	0.0224	0.0500	0.0814
7	26.4	5.66	0.295	1.5	0.292	0.0322	0.0490	0.186
8	24.3	6.7	0.290	0.41	0.280	0.028	0.0570	0.0911
9	34.5	4.79	0.2106	1.96	0.205	0.0298	0.0570	0.0587
10	500.0	7.0	0.02	0.7	0.069	0.003	0.0060	0.008

Tabla B-3 Parámetros de los RAV'S

Número de RAV	$T_r$ [s]	$K_A$ [p.u]	$T_A$ [s]	$T_b$ [s]	$T_C$ [s]	$V_{Rmax}$ [p.u]	$V_{Rmin}$ [p.u]
1	0.02	250	0.013	11.0	1.0	5.5	-5.0
2	0.02	250	0.013	11.0	1.0	5.5	-5.0
3	0.02	250	0.013	11.0	1.0	5.5	-5.0
4	0.02	250	0.013	11.0	1.0	5.5	-5.0
5	0.02	250	0.013	11.0	1.0	5.5	-5.0
6	0.02	250	0.013	11.0	1.0	5.5	-5.0
7	0.02	250	0.013	11.0	1.0	5.5	-5.0
8	0.02	250	0.013	11.0	1.0	5.5	-5.0
9	0.02	250	0.013	11.0	1.0	5.5	-5.0
10	0.02	250	0.013	11.0	1.0	5.5	-5.0

Tabla B-4 Parámetros de los ESP'S

Número de RAV	$T$ [s]	$T_1$ [s]	$T_2$ [s]	$T_3$ [s]	$T_4$ [s]	$L_s$ [p.u]	$L_i$ [p.u]
1	60	4.0	0.63	3.0	0.6	0.3	-0.3
2	60	4.0	0.42	1.0	0.12	0.3	-0.3
3	60	3.0	0.21	2.0	0.20	0.3	-0.3
4	60	1.0	0.12	1.0	0.35	0.3	-0.3
5	60	1.5	0.22	1.0	0.11	0.3	-0.3
6	60	0.6	0.13	0.5	0.5	0.3	-0.3
7	60	1.0	0.024	0.5	0.11	0.3	-0.3
8	60	0.9	0.20	1.0	0.11	0.3	-0.3
9	60	1.2	0.51	2.0	0.11	0.3	-0.3
10	60	1.6	0.054	3.0	0.6	0.3	-0.3

Tabla B-5 Parámetros del gobernador-turbina

Número de gobernador-turbina	$\frac{1}{R}$ [p.u]	$T_{\max}$ [s]	$T_s$ [s]	$T_c$ [s]	$T_3$ [s]	$T_4$ [s]	$T_5$ [s]
1	18	1.4	0.9	0.8	0.1	1.0	3.0
2	18	1.4	0.9	0.8	0.1	1.0	3.0
3	18	1.4	0.9	0.8	0.1	1.0	3.0
4	18	1.4	0.9	0.8	0.1	1.0	3.0
5	18	1.4	0.9	0.8	0.1	1.0	3.0
6	18	1.4	0.9	0.8	0.1	1.0	3.0
7	18	1.4	0.9	0.8	0.1	1.0	3.0
8	18	1.4	0.9	0.8	0.1	1.0	3.0
9	18	1.4	0.9	0.8	0.1	1.0	3.0
10	18	1.4	0.9	0.8	0.1	1.0	3.0

Tabla B-6 Parámetros del control de AVCD

Tipo	$K_p$	$K_i$	$K_o$	Limite integral
Rectificador	0.4	0.5	1.2	$\pm 1.8$
Inversor	0.4	0.5	1.2	$\pm 1.8$

**Sistema dos áreas****Tabla B-7 Parámetros de las líneas de transmisión**

LINEA		NODO		Resistencia [p.u]	Reactancia [p.u]	Susceptancia [p.u]	Relación de transfor mación
Número	Nombre						
1	Línea 1	10	20	0.005	0.05	0.075	0.0
2	Línea 2	20	3	0.002	0.02	0.030	0.0
3	Línea 3	3	101	0.022	0.22	0.33	0.0
4	Línea 4	3	101	0.022	0.22	0.33	0.0
5	Línea 5	110	120	0.005	0.05	0.075	0.0
6	Línea 6	13	120	0.002	0.02	0.030	0.0
7	Línea 7	13	101	0.022	0.22	0.33	0.0
8	Línea 8	13	101	0.022	0.22	0.33	0.0
9	Transformador 1	1	10	0.0000	0.0126	0.0000	1.0
10	Transformador 2	2	20	0.0000	0.0126	0.0000	1.0
11	Transformador 3	11	110	0.0000	0.0126	0.0000	1.0
12	Transformador 4	12	120	0.0000	0.0126	0.000	1.0

**Tabla B-8 Parámetros de los generadores**

Número de la Unidad generadora	$H$ [p.u]	$T'_{d0}$ [s]	$X_d$ [p.u]	$T_{q0}$ [s]	$X_q$ [p.u]	$X_l$ [p.u]	$X'_d$ [p.u]	$X'_q$ [p.u]
1	6.0	5.5	0.299	0.43	0.16	0.020	0.108	0.063
2	6.0	5.5	0.299	0.43	0.16	0.020	0.108	0.063
3	6.0	5.5	0.299	0.43	0.16	0.020	0.108	0.063
4	6.0	5.5	0.299	0.43	0.16	0.020	0.108	0.063

**Tabla B-9 Parámetros del control de AVCD**

Tipo	$K_p$	$K_i$	$K_o$	Limite integral
Rectificador	0.1	0.3	1.6	$\pm 1.8$
Inversor	0.1	0.3	1.6	$\pm 1.8$

# APÉNDICE C

Estudios de planeación y operación son realizados usando programas especiales de simulación del sistema de potencia, tales como **PSS/E** de **PTI** y **PSAPAC** de **EPRI**. Debido a la complejidad de los modelos de sistemas de potencia grandes, estos programas son utilizados generalmente por los ingenieros como cajas negras. El modelo detallado en los programas es entendido por pocos. En épocas recientes, la inestabilidad ha ocurrido repentinamente y sin advertencia. Las universidades deben asegurarse de que sus graduados de ingeniería en sistemas de potencia estén familiarizados con los principios básicos de estabilidad de sistemas de potencia y modelado.

La dinámica del sistema de potencia no es fácil conforme a enseñanza. El conocimiento de la dinámica del sistema de potencia es esencial para cualquier ingeniero que deba diseñar u operar un sistema de potencia interconectado moderno. La inestabilidad del sistema, y en el extremo el colapso del sistema son muy costosos a las utilidades de energía y a sus consumidores. Se requiere de modelos realistas del sistema. En este trabajo se utilizó un **software** para el análisis del sistema de potencia **CA/CD** llamado **PST (Power System Toolbox)** y el propósito del **PST** es proporcionar los modelos de máquinas, sistemas de control y modelos de líneas de **AVCD** para realizar simulaciones de estabilidad de sistemas de potencia, y para construir los modelos de variables de estado en análisis de pequeña señal. Estos modelos son codificados como funciones de **MATLAB**, un lenguaje científico de alto nivel. Aunque este lenguaje se ha utilizado solamente en pocas aplicaciones de la ingeniería de sistemas de potencia. Es uno de los lenguajes científicos de alto nivel que ha ganado la aceptación en muchas disciplinas de la ingeniería tales como el procesamiento de señales y diseño del sistema de control. Muchas universidades, incluyendo el instituto politécnico de Rensselaer, tiene disponible **MATLAB** en sitios de trabajo. Muchas funciones matemáticas están incorporadas, el uso del **MATLAB** reduce de una manera significativa el esfuerzo de codificación. Por ejemplo, la solución de la red usando descomposición **LU** requiere una sola línea de código en **MATLAB**. La capacidad de los gráficos permite que el usuario exhiba la respuesta del tiempo en 2 y 3 dimensiones. Además, el **PST** fue diseñado para investigación y desarrollo de ideas para estudiantes graduados.

El **PST** fue desarrollado para dar a los ingenieros de sistemas de potencia un conjunto ya programado de rutinas para utilizarse con **MATLAB**. Las funciones pueden ser agrupadas en general en dos áreas:

- 1) flujos de carga
- 2) dinámica

- 
- a) Calculo de los incrementos.
  - b) Realizar un flujos de carga por medio del método de Newton Raphson.

En el grupo dinámico hay funciones que modelan:

- generadores y sus controles: excitadores, estabilizadores del sistema de potencia, gobernadores.

# APÉNDICE D

El propósito de este apéndice es ilustrar de manera grafica la estructura de un archivo de datos para el análisis dinámico de **SEP'S CA/CD**, en el programa **PST**, el cual esta conformado por las siguientes matrices:

- 1) bus=[]
- 2) line=[]
- 3) mac\_con=[]
- 4) exc\_con=[]
- 5) pss\_con=[]
- 6) tg\_con=[]
- 7) dcsp\_con=[]
- 8) dcl\_con=[]
- 9) dcc\_con=[]

Y estas son mostradas enseguida en el orden correspondiente.

```

4
5 %data for New England Test case
6
7 disp('New England data')
8 %(bus#) ( volt ) ( ang ) ( pgen ) ( qgen ) ( pload ) ( qload ) (gshunt) (bshunt) (bus type)
9 bus=
10 1 1.0000 0.00 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 1 99 -99 1.0 0 0;
11 2 1.0000 0.00 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 3 99 -99 1.0 0 0;
12 3 1.0000 0.00 0.0000 0.0000 3.2200 0.0240 0.0000 0.0000 3 99 -99 1.0 0 0;
13 4 1.0000 0.00 0.0000 0.0000 5.0000 1.8400 0.0000 1.0000 3 99 -99 1.0 0 0;
14 5 1.0000 0.00 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 2.0000 3 99 -99 1.0 0 0;
15 6 1.0000 0.00 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 3 99 -99 1.0 0 0;
16 7 1.0000 0.00 0.0000 0.0000 2.3380 8.4000 0.0000 0.0000 3 99 -99 1.0 0 0;
17 8 1.0000 0.00 0.0000 0.0000 5.2200 1.7600 0.0000 0.0000 3 99 -99 1.0 0 0;
18 9 1.0000 0.00 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 3 99 -99 1.0 0 0;
19 10 1.0000 0.00 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 3 99 -99 1.0 0 0;
20 11 1.0000 0.00 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 3 99 -99 1.0 0 0;
21 12 1.0000 0.00 0.0000 0.0000 0.0850 0.8800 0.0000 0.0000 3 99 -99 1.0 0 0;
22 13 1.0000 0.00 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 3 99 -99 1.0 0 0;
23 14 1.0000 0.00 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 3 99 -99 1.0 0 0;
24 15 1.0000 0.00 0.0000 0.0000 3.2000 1.5300 0.0000 0.0000 3 99 -99 1.0 0 0;
25 16 1.0000 0.00 0.0000 0.0000 3.2940 3.2300 0.0000 0.0000 3 99 -99 1.0 0 0;
26 17 1.0000 0.00 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 3 99 -99 1.0 0 0;
27 18 1.0000 0.00 0.0000 0.0000 1.5800 0.3000 0.0000 0.0000 3 99 -99 1.0 0 0;
28 19 1.0000 0.00 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 3 99 -99 1.0 0 0;
29 20 1.0000 0.00 0.0000 0.0000 6.8000 1.0300 0.0000 0.0000 3 99 -99 1.0 0 0;
30 21 1.0000 0.00 0.0000 0.0000 2.7400 1.1500 0.0000 0.0000 3 99 -99 1.0 0 0;
31 22 1.0000 0.00 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 3 99 -99 1.0 0 0;
32 23 1.0000 0.00 0.0000 0.0000 2.4750 0.8460 0.0000 0.0000 3 99 -99 1.0 0 0;
33 24 1.0000 0.00 0.0000 0.0000 3.0860 -0.922 0.0000 0.0000 3 99 -99 1.0 0 0;
34 25 1.0000 0.00 0.0000 0.0000 2.2400 0.4720 0.0000 0.0000 3 99 -99 1.0 0 0;
35 26 1.0000 0.00 0.0000 0.0000 1.3900 0.1700 0.0000 0.0000 3 99 -99 1.0 0 0;
36 27 1.0000 0.00 0.0000 0.0000 2.8100 0.7550 0.0000 0.0000 3 99 -99 1.0 0 0;
37 28 1.0000 0.00 0.0000 0.0000 2.0600 0.2760 0.0000 0.0000 3 99 -99 1.0 0 0;
38 29 1.0000 0.00 0.0000 0.0000 2.8350 1.2690 0.0000 0.0000 3 99 -99 1.0 0 0;
39 30 1.0475 0.00 2.5000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 2 8 -5 1.0 0 0;

```

**Figura D.1.** En esta ventana se muestran los valores de la matriz bus del sistema Nueva Inglaterra.

```

51 line = [
52     1 2 0.00350 0.04110 0.69870 0.0000 0 0 0 0;
53     1 39 0.00100 0.02500 0.75000 0.0000 0 0 0 0;
54     2 3 0.00130 0.01510 0.25720 0.0000 0 0 0 0;
55     2 25 0.00700 0.00860 0.14600 0.0000 0 0 0 0;
56     2 30 0.00000 0.01810 0.00000 1.0250 0 0 0 0;
57     3 4 0.00130 0.02130 0.22140 0.0000 0 0 0 0;
58     3 18 0.00110 0.01330 0.21380 0.0000 0 0 0 0;
59     4 5 0.00080 0.01280 0.13420 0.0000 0 0 0 0;
60     4 14 0.00080 0.01290 0.13820 0.0000 0 0 0 0;
61     5 8 0.00080 0.01120 0.14760 0.0000 0 0 0 0;
62     6 5 0.00020 0.00260 0.04340 0.0000 0 0 0 0;
63     6 7 0.00060 0.00920 0.11300 0.0000 0 0 0 0;
64     6 11 0.00070 0.00820 0.13890 0.0000 0 0 0 0;
65     7 8 0.00040 0.00460 0.07800 0.0000 0 0 0 0;
66     8 9 0.00230 0.03630 0.38040 0.0000 0 0 0 0;
67     9 39 0.00100 0.02500 1.20000 0.0000 0 0 0 0;
68     10 11 0.00040 0.00430 0.07290 0.0000 0 0 0 0;
69     10 13 0.00040 0.00430 0.07290 0.0000 0 0 0 0;
70     10 32 0.00000 0.02000 0.00000 1.0700 0 0 0 0;
71     12 11 0.00160 0.04350 0.00000 1.0060 0 0 0 0;
72     12 13 0.00160 0.04350 0.00000 1.0060 0 0 0 0;
73     13 14 0.00090 0.01010 0.17230 0.0000 0 0 0 0;
74     14 15 0.00180 0.02170 0.36600 0.0000 0 0 0 0;
75     15 16 0.00090 0.00940 0.17100 0.0000 0 0 0 0;
76     16 17 0.00070 0.00890 0.13420 0.0000 0 0 0 0;
77     16 19 0.00160 0.01950 0.30400 0.0000 0 0 0 0;
78     16 21 0.00080 0.01350 0.25480 0.0000 0 0 0 0;
79     16 24 0.00030 0.00590 0.06800 0.0000 0 0 0 0;
80     17 18 0.00070 0.00820 0.13190 0.0000 0 0 0 0;
81     17 27 0.00130 0.01730 0.32160 0.0000 0 0 0 0;
82     19 33 0.00070 0.01420 0.00000 1.0700 0 0 0 0;
83     19 20 0.00070 0.01380 0.00000 1.0600 0 0 0 0;
84     20 34 0.00090 0.01800 0.00000 1.0090 0 0 0 0;
85     21 22 0.00080 0.01400 0.25650 0.0000 0 0 0 0;
86     22 23 0.00060 0.00960 0.18460 0.0000 0 0 0 0;

```

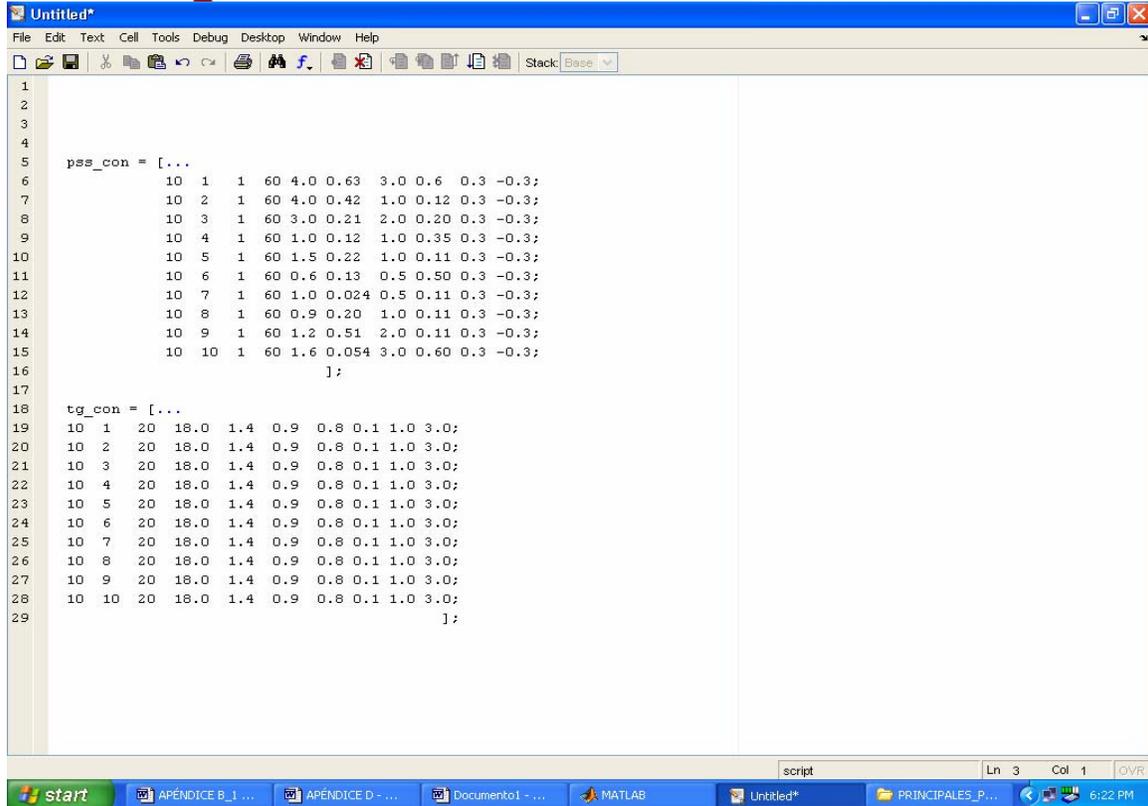
Figura D.2. Ventana que muestra los valores de la matriz line del sistema Nueva Inglaterra.

```

99
100
101
102
103
104
105
106 mac_con = [
107     1 30 0.0 0.0 0.1000 0.0310 0.310 0 10.20 0 0.690 0.008 0 0.1 0 4.200 0.000 0.00 30 0 0;
108     2 31 0.0 0.0 0.2950 0.0697 0.697 0 6.560 0 0.282 0.170 0 1.5 0 3.030 0.000 0.00 31 0 0;
109     3 32 0.0 0.0 0.2495 0.0531 0.531 0 5.700 0 0.237 0.087 0 1.5 0 3.580 0.000 0.00 32 0 0;
110     4 33 0.0 0.0 0.2620 0.0436 0.436 0 5.690 0 0.258 0.166 0 1.5 0 2.860 0.000 0.00 33 0 0;
111     5 34 0.0 0.0 0.6700 0.1320 1.320 0 5.400 0 0.620 0.081 0 0.4 0 2.600 0.000 0.00 34 0 0;
112     6 35 0.0 0.0 0.2540 0.0500 0.500 0 7.300 0 0.241 0.186 0 0.4 0 3.480 0.000 0.00 35 0 0;
113     7 36 0.0 0.0 0.2950 0.0490 0.490 0 5.660 0 0.292 0.091 0 1.5 0 2.640 0.000 0.00 36 0 0;
114     8 37 0.0 0.0 0.2900 0.0570 0.570 0 6.700 0 0.280 0.058 0 0.41 0 2.430 0.000 0.00 37 0 0;
115     9 38 0.0 0.0 0.2106 0.0570 0.570 0 4.790 0 0.205 0.008 0 1.96 0 3.450 0.000 0.00 38 0 0;
116     10 39 0.0 0.0 0.0200 0.0060 0.060 0 7.000 0 0.190 0.060 0 0.7 0 50.00 0.000 0.00 39 0 0];
117
118
119 exc_con = [
120     1 0.02 250.0 0.013 11.000 1.000 5 -5.5 0.0 11.0 0.0 0.0 0 0.0 0 0.00 0.000
121     2 0.02 250.0 0.013 11.000 1.000 5 -5.5 0.0 11.0 0.0 0.0 0 4.8 0 0.00 0.000
122     3 0.02 250.0 0.013 11.000 1.000 5 -5.5 0.0 11.0 0.0 0.0 0 4.4 0 0.00 0.000
123     4 0.02 250.0 0.013 11.000 1.000 5 -5.5 0.0 11.0 0.0 0.0 0 4.1 0 0.00 0.000
124     5 0.02 250.0 0.013 11.000 1.000 5 -5.5 0.0 11.0 0.0 0.0 0 4.1 0 0.00 0.000
125     6 0.02 250.0 0.013 11.000 1.000 5 -5.5 0.0 11.0 0.0 0.0 0 4.5 0 0.00 0.000
126     7 0.02 250.0 0.013 11.000 1.000 5 -5.5 0.0 11.0 0.0 0.0 0 4.5 0 0.00 0.000
127     8 0.02 250.0 0.013 11.000 1.000 5 -5.5 0.0 11.0 0.0 0.0 0 4.8 0 0.00 0.000
128     9 0.02 250.0 0.013 11.000 1.000 5 -5.5 0.0 11.0 0.0 0.0 0 4.5 0 0.00 0.000 ];
129
130
131
132
133
134

```

Figura D.3. Ventana que muestra los valores de la matriz mac\_con y exc\_con del sistema Nueva Inglaterra.

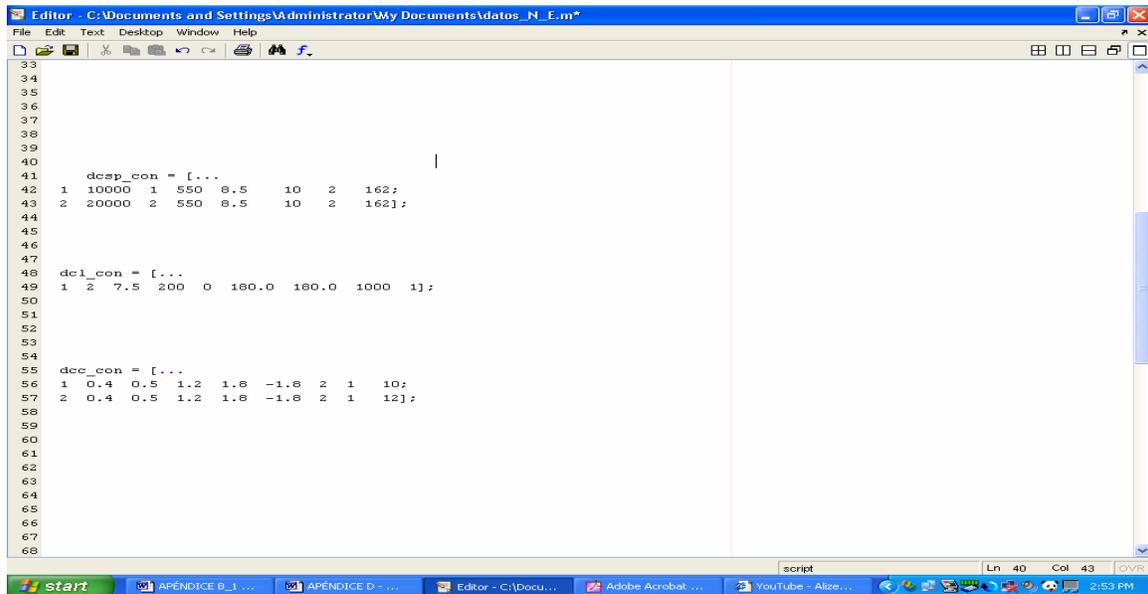


```

1
2
3
4
5 pss_con = [...
6     10 1 1 60 4.0 0.63 3.0 0.6 0.3 -0.3;
7     10 2 1 60 4.0 0.42 1.0 0.12 0.3 -0.3;
8     10 3 1 60 3.0 0.21 2.0 0.20 0.3 -0.3;
9     10 4 1 60 1.0 0.12 1.0 0.35 0.3 -0.3;
10    10 5 1 60 1.5 0.22 1.0 0.11 0.3 -0.3;
11    10 6 1 60 0.6 0.13 0.5 0.50 0.3 -0.3;
12    10 7 1 60 1.0 0.024 0.5 0.11 0.3 -0.3;
13    10 8 1 60 0.9 0.20 1.0 0.11 0.3 -0.3;
14    10 9 1 60 1.2 0.51 2.0 0.11 0.3 -0.3;
15    10 10 1 60 1.6 0.054 3.0 0.60 0.3 -0.3;
16    ];
17
18 tg_con = [...
19    10 1 20 18.0 1.4 0.9 0.8 0.1 1.0 3.0;
20    10 2 20 18.0 1.4 0.9 0.8 0.1 1.0 3.0;
21    10 3 20 18.0 1.4 0.9 0.8 0.1 1.0 3.0;
22    10 4 20 18.0 1.4 0.9 0.8 0.1 1.0 3.0;
23    10 5 20 18.0 1.4 0.9 0.8 0.1 1.0 3.0;
24    10 6 20 18.0 1.4 0.9 0.8 0.1 1.0 3.0;
25    10 7 20 18.0 1.4 0.9 0.8 0.1 1.0 3.0;
26    10 8 20 18.0 1.4 0.9 0.8 0.1 1.0 3.0;
27    10 9 20 18.0 1.4 0.9 0.8 0.1 1.0 3.0;
28    10 10 20 18.0 1.4 0.9 0.8 0.1 1.0 3.0;
29    ];

```

Figura D.4. Ventana que muestra los valores de la matriz `pss_con` y `tg_con` del sistema Nueva Inglaterra.



```

33
34
35
36
37
38
39
40
41 dssp_con = [...
42    1 10000 1 550 8.5 10 2 162;
43    2 20000 2 550 8.5 10 2 162];
44
45
46
47
48 dcl_con = [...
49    1 2 -7.5 200 0 180.0 180.0 1000 1];
50
51
52
53
54
55 dcc_con = [...
56    1 0.4 0.5 1.2 1.8 -1.8 2 1 10;
57    2 0.4 0.5 1.2 1.8 -1.8 2 1 12];
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68

```

Figura D.5. Ventana que muestra los valores de la matriz `dssp_con`, `dcl_con` y `dcc_con` del sistema Nueva Inglaterra.

A continuación se presenta en forma de tabla una descripción más detallada de como esta conformada cada matriz:

**Tabla D-1.Formato para la especificación de la matriz bus**

COLUMNA	VARIABLE	UNIDAD
1	Número de bus	
2	Voltaje	pu
3	Ángulo	pu
4	P generación	pu a la base del sistema
5	Q generación	pu a la base del sistema
6	P carga	pu a la base del sistema
7	Q carga	pu a la base del sistema
8	G shunt	pu a la base del sistema
9	B shunt	pu a la base del sistema
10	Tipo de bus	
11	Q generación máxima	pu a la base del sistema
12	Q generación mínima	pu a la base del sistema
13	Voltaje nominal del bus	kV
14	Voltaje máximo del bus	pu
15	Voltaje mínimo del bus	pu

**Tabla D-2.Formato para la especificación de la matriz line**

COLUMNA	VARIABLE	UNIDAD
1	Del bus	
2	Al bus	
3	Resistencia	pu
4	Reactancia	pu
5	Relación del tap	
6	Angulo desplazador de fase	
7	Relación máxima del tap	
8	Relación mínima del tap	
9	Paso del tap	

Tabla D-3.Formato para la especificación de la matriz mac\_con

COLUMNA	VARIABLE	UNIDAD
1	Número de máquina	
2	Número de bus	
3	Base en MVA	MVA
4	Reactancia de dispersión $x_l$	pu
5	Resistencia $r_a$	pu
6	Reactancia sincrone eje-d $x_d$	pu
7	Reactancia transitoria eje-d $x'_d$	pu
8	Reactancia subtransitoria eje-d $x''_d$	pu
9	Constante de tiempo a circuito abierto eje-d $T'_{do}$	s
10	Constante subtransitoria de tiempo a circuito abierto eje-d $T''_{do}$	s
11	Reactancia sincrone eje-q $x_q$	pu
12	Reactancia transitoria eje-q $x'_q$	pu
13	Reactancia subtransitoria eje-q $x''_q$	pu
14	Constante de tiempo a circuito abierto eje-q $T'_{qo}$	s
15	Constante subtransitoria de tiempo a circuito abierto eje-q $T''_{qo}$	s
16	Constante de inercia H	s
17	Coefficiente local de amortiguamiento $d_o$	pu

18	Coefficiente de amortiguamiento $d_1$	pu
19	Número de bus	
20	Factor de saturación S(1.0)	
21	Factor de saturación S(1.2)	
22	Fracción de potencia activa	
23	Fracción de potencia reactiva	

**Tabla D-4.Formato para la especificación de la matriz exc\_con**

COLUMNA	VARIABLE	UNIDAD
1	Tipo de excitador	
2	Número de generador	
3	Constante de tiempo del filtro del transductor $T_r$	s
4	Ganancia de voltaje del regulador $K_A$	pu
5	Constante de tiempo del regulador de voltaje $T_A$	s
6	Constante de tiempo $T_b$	s
7	Constante de tiempo $T_C$	s
8	Salida máxima del regulador de voltaje $V_{Rmax}$	pu
9	Salida mínima del regulador de voltaje $V_{Rmin}$	pu

**Tabla D-5.Formato para la especificación de la matriz pss\_con**

COLUMNA	VARIABLE	UNIDAD
1	Tipo	
2	Número de máquina	
3	Ganancia K	
4	Constante de tiempo de avance $T_1$	s
5	Constante de tiempo de retraso $T_2$	s

**Tabla D-6.Formato para la especificación de la matriz tg\_con**

COLUMNA	VARIABLE	UNIDAD
1	Número del modelo de turbina	
2	Número de máquina	
3	Ganancia en estado estacionario $\frac{1}{R}$	pu
4	Rango máximo de potencia $T_{max}$	pu a la base del sistema
5	Constante de tiempo del servomecanismo $T_s$	s
6	Constante de tiempo de la turbina $T_c$	s
7	Constante transitoria de tiempo $T_3$	s
8	Constante de tiempo $T_4$	s
9	Constante de tiempo del recalentador $T_5$	s

**Tabla D-7.Formato para la especificación de la matriz dcp\_con**

COLUMNA	VARIABLE	UNIDAD
1	Número del convertidor de AVCD	
2		
3	Tipo de convertidor 1- rectificador 2- inversor	
4	Voltaje nominal de CD	kV
5	Reactancia de conmutación ( $X_c$ )	Ohms por puente
6	Número de puentes en serie	
7	Rectificador $\alpha_{min}$ Inversor $\gamma_{min}$	Grados
8	Rectificador $\alpha_{max}$ Inversor $\gamma_{max}$	Grados

Tabla D-8.Formato para la especificación de la matriz dcl\_con

COLUMNA	VARIABLE	UNIDAD
1	Número del rectificador	
2	Número del inversor	
3	Resistencia de la línea de CD	Ohms
4	Inductancia de la línea de CD	mH
5	Capacitancia de la línea de CD	$\mu F$
6	Inductancia de alisamiento del rectificador	mH
7	Inductancia de alisamiento del inversor	mH
8	Potencia nominal de la línea de CD	MW
9	Margen de corriente para el inversor	%

Tabla D-9.Formato para la especificación de la matriz dcc\_con

COLUMNA	VARIABLE
1	Número del convertidor
2	Ganancia proporcional
3	Ganancia integral
4	Ganancia de la salida
5	Limite integral máximo
6	Limite integral mínimo
7	Limite máximo de la salida
8	Limite mínimo de la salida
9	Tipo de control

## REFERENCIAS

### LIBROS

- [1] E.W. Kimbark, "Direct Current Transmission, Volume I", John & Sons Wiley-Interscience, 1971.
- [2] P. Kundur "*Power System Stability and Control*". Mc. Graw-Hill, New York, 1994.
- [3] J. Arrillaga "*High Voltage Direct Current Transmission*". Peter Short Run Press, England, 1983.
- [4] J. Arrillaga and B. Smith "*AC-DC Power System Analysis*". Short Run Press, England, 1988.
- [5] J. Arrillaga and N. R. Watson "*Computer Modelling of Electrical Power Systems*". Short Run Press, Second Edition, England, 2001.
- [6] N. Mohan "*Power Electronics*". John Wiley & Sons, United States of America, 2003.
- [7] B. J. Cory "*High Voltage Direct Current Convertors and Systems*". Macdonald Trends and Developments in Engineering Series, London
- [8] M. H. Rashid "*Electrónica de Potencia*". Prentice Hall, Tercera Edición, México, 2004.

### TESIS

- [9] G. Geronimo Hernández, Métodos para mejorar estabilidad en sistemas eléctricos de potencia, tesis de maestría, IPN-SEPI-ESIME, 1989.
- [10] J. A. Ledesma, *Modelado de Sistemas Híbridos de CA/CD y su Aplicación al Control de los Sistemas Eléctricos de Potencia*, Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias, Centro de Investigación y Estudio Avanzados del IPN, Guadalajara, Julio 2002.
- [11] Alfredo Nava Segura. "SIMULACION DE FALLAS EN UN SISTEMA DE TRANSMISION DE ENERGIA ELECTRICA EN ALTA TENSION CON CORRIEMIENTE DIRECTA" Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias, Sección de estudios de posgrado e investigación del IPN, México, D.F, Junio 1974.

## MANUALES

[12] G. Rogers “Load Flow Tutorial and Functions” Version 2.0, Power System Toolbox, Canada, 1997.

[13] G. Rogers “Dynamic Tutorial and Functions” Version 2.0, Power System Toolbox, Canada, 1997.

## REVISTA

[14] W. Long and S. Nilsson. “*The Beginning of a New Day Delving into HVDC*” IEEE Power & Energy Magazine, Vol. 5, No. 2 pp. 23-69, March/April 2007.

## OTROS

[15] <http://www.cfe.gob.mx/es/NegociosConCFE/inversionistas/>

[16] R. Rudelvall and J. Johnsson. “*Interconexión de Sistemas Eléctricos con HVDC*”. Seminario Internacional de Interconexiones Regionales CIGRÉ, Santiago de Chile, November 2003.

[17] T.Hammon,D.Wood,B.Lought, E. Chama, J. Donaho, “ HVDC transmission”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 5, No. 4, March 2001 pp.914-921.

[18] M.Klein,G.J.Rogers,P.Kundur, “A fundamental study of inter-area oscillations in power systems”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 6, No. 3, August 1991, pp.914-921.

[19] Braunagel D.A.,Kraft L.A. and Whysong J.L. “Inclusion of DC converter and Transmission Equation Directly in a Newton Power Flow ”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol-PAS. 95, No. 1, January/February 1976, pp.76-88.

[20] L.Weimers, “HVDC Light: A new Technology for a Better Environment”, IEEE Power Engineering Review. Vol 18 Issue 7, July 1998, pp.19-20.

[21] K.Eriksson, “operational experience of HVDC light”, Seventh international conference on AC-DC Power Transmissio, Conference Publication No.485, London, England, November 2001, pp.205-210.

- [22] P.G.Engstrom,"operation and control of HVDC Transmission," IEEE Trans.,Vol.PAS-83,pp.71-77, January 1964.
- [23] A.Ekstrom, I.E Juhlin , and G.L, "Parallel connection of converters for HVDC Transmission," IEEE Trans.,Vol.PAS-97, pp714-724,May 1978.
- [24] G.D.Breuer,J.F.Luini, and C.C Young , "studies of large AC/DC Systems on the digital computer," IEEE transactions on power Apparatus and Systems, Vol.PAS-86,pp1107-1116,Nov.1996.
- [25] Reeve.J."Versatile load flow method for integrated AC-DC System",IEEE Trans.On power Apparatus and system, Vol..PAS-96, PP.925-933.No.3,May/Jun 1977.
- [26] Smed T, Andersson G.,Sheble G.B. and Grigsby L.L. "A new approach to ac/dc power flow", Trans. On Power Systems,Vol.6,No.3,pp1238-1244,August 1991.
- [27] P.M.Anderson and A.A.Fouad "Power System Control and Stability".Science Press,Second Edition,Mexico, 2001.
- [28]Edward Wilson Kimbark"Power System Stability".IEEE PRESS,VOLUME I,NY,1995.
- [29] Graham Rogers,"POWER SYSTEM OSCILLATIONS",Kluwer's power electronics and power series, series editor M.A.Pai,Boston/London/Dordrecht, 2000.
- [30] Karl-Wener Kanngiesser,Dr.Hatrtmut Huang, Hans Peter Lips, "HVDC Systems Their planning",Part I. Publisher:EV HA 7T.Rev.4.Siemens AG.
- [31] Karl-Wener Kanngiesser,Dr.Hatrtmut Huang, Hans Peter Lips, "HVDC Systems Their planning",Part II. Publisher:EV HA 7T.Rev.4.Siemens AG.
- [32] Mr.Dr.Sadek, "System and Design Studies for HVDC Schemes,Reactive Power Compensation and FACTS Devices",Part II. Publisher:EV HA 2.Germany.Siemens AG.
- [33] EPRI Report EL-3004,"Methodology for Integration of HVDC Links in Large AC Systems –Phase 1: Reference Manual," Prepared by Ebasco Services Inc., March 1983.

- [34] EPRI Report EL-4365,"Methodology for the Integration of HVDC Links in Large AC Systems – Phase 2: Advance Concepts,"Prepared by Institut de Recherche d'Hydro-Quebec, April 1987.
- [35] Maria Concepción Ortiz Villanueva, "SIMULACION DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA DE CA-CD EN ESTADO ESTACIONARIO", Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación del IPN, México D.F, Diciembre de 2007.
- [36] Alfredo Nava Segura."HYBRID COMPUTERSIMULATION OF HVDC SYSTEMS", Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias, Universidad de Londres , instituto imperial de ciencia y tecnología, Londres, Mayo de 1978.
- [37] Miguel Ángel Gómez Martínez,"INCLUSION DE ENLACES DE CORRIENTE DIRECTA DE ALTO VOLTAJE EN LA FORMULACION DEL PROBLEMA DE FLUJOS DE POTENCIA, POR EL METODO DE ELIMINACION DE VARIABLES", Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias, Instituto Tecnológico de Morelia, Morelia Michoacán, Enero de 2002.
- [38] Eric Thomas Smed,"A NEW APPROACH AC/DC POWER FLOW', Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias, La facultad de graduados de la Universidad Auburn, Auburn Alabama, 8 de Diciembre de 1989.
- [39] J.Arrollo,A.R.Messina,J.H.Lopez,D.Olguin S., "Damping of low-frequency oscillations in longitudinal power systems using HVDC modulation and static VAR compensators", ENewsletter,Francia,No.13,July 2001,pp.4-7
- [40] Dragan Jovic, Nalin Pahalawaththa,Mohamed Zavahir,"Analytical Modelling of HVDC-HVAC systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.14, No. 2, April 1999,pp.506-511.
- [41] Dragan Jovic, Nalin Pahalawaththa,Mohamed Zavahir,"STABILITY ANALYSIS OF HVDC CONTROL LOOPS", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.14, No. 2, April 1999,pp.525-530.