

**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**MODELACIÓN DE UN COMPENSADOR ESTÁTICO PARA  
EL CONTROL DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA CON  
ENERGÍAS RENOVABLES**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA**

**CHRISTIAN ALEJANDRO DÍAZ DUARTE**

**PROFESOR GUÍA:  
ALFREDO MUÑOZ RAMOS**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
RODRIGO PALMA BEHNKE  
GUILLERMO JIMENEZ ESTEVEZ**

**SANTIAGO DE CHILE  
JULIO 2009**

RESUMEN DE LA MEMORIA  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA  
POR: CHRISTIAN ALEJANDRO DÍAZ DUARTE  
FECHA: 24 DE JULIO DEL 2009  
PROG. GUÍA: ALFREDO MUÑOZ RAMOS

## **MODELACIÓN DE UN COMPENSADOR ESTÁTICO PARA EL CONTROL DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA CON ENERGÍAS RENOVABLES**

El presente trabajo consiste en la modelación de un compensador estático para el control de generación distribuida con energías renovables. El objetivo es que esta modelación represente una microred básica en la cual se pueda observar el comportamiento de un pequeño medio de generación, como por ejemplo una micro turbina hidráulica, en un ambiente de generación distribuida. El modelo debe ser capaz de simular requerimientos violentos de potencia y, también, el control, como por ejemplo un compensador estático, diseñado para mitigar los efectos negativos que esto trae, como por ejemplo problemas de frecuencia y voltaje. Se busca obtener un modelo sencillo e implementarlo con el software Matlab a través de su herramienta de simulación con entorno gráfico Simulink con la ayuda de las herramientas disponibles en el Toolbox SimPowerSystems.

Con el fin de contextualizar los conceptos de generación distribuida, energías renovables y equipos de compensación estáticos, se hace una revisión del contexto mundial sobre el problema energético y las medidas que se han adoptado en otros países como la liberalización del mercado energético para la integración de generación distribuida. Se presentan las alternativas comunes que se utilizan hoy en día para el control de generación desde las más sencillas hasta las más elaboradas. También se revisan los distintos tipos de equipos de compensación FACTS, en particular los equipos de compensación de potencia activa y los sistemas de almacenamiento de energía, existentes en el mercado.

Para poder introducir el modelo en Matlab-Simulink, se presentan algunos esquemas de control típicos para equipos STATCOM y SVC en los que está basada la modelación y los bloques que conforman el sistema de control simulado.

El modelo diseñado, fue ajustado para trabajar en una microred en presencia de una carga resistiva y una carga inductiva que es conectada a la microred mediante un interruptor trifásico. La carga inductiva fue conectada 0.5 segundos después del inicio de la simulación provocando una baja de tensión en la línea hasta los 0.92[pu] que es restablecida hasta su valor unitario en aproximadamente 0.16[s] por la acción del dispositivo modelado.

Se concluye que el esquema de STATCOM basado en inversores VSI presentan características operativas atractivas para la generación distribuida dada su rapidez de respuesta y la posibilidad de aportar su capacidad nominal en condiciones severas de funcionamiento.

*A mis padres,  
hermanos  
y a la vida*

## *Agradecimientos*

Quiero agradecer en primer lugar a mis Padres, Alejandro y Gladys que han sido pilares fundamentales en mi vida y mi gran apoyo en todos estos años de estudio levantándose una y otra vez cuando caía. Recuerdo cuando mi padre me decía “Puede el que cree que puede” y a mi madre cuando en las mañanas me dejaba en la puerta de la casa y me decía “Una sonrisa para la mamá” cuando las cosas se ponían difíciles. También a mi hermano Alejandro que, con pequeños gestos, siempre estuvo cuando lo necesite.

Al resto de mi familia tíos, tías, primos y primas, en especial Tía Reina, Tío Ale y Jandy, que siempre me preguntaban cómo me iba y cuanto me faltaba para terminar.

Quiero agradecer a mi profesor guía Alfredo Muñoz, primero por aceptarme como su alumno guiado, por su comprensión y apoyo con los problemas que tuve para sacar adelante este trabajo de título. También a los profesores Rodrigo Palma y Guillermo Jiménez por su buena disposición para atender mis consultas. A Alejandro Angúlo que me ayudo en el momento preciso y me mostró como podía seguir con la memoria.

A mis amigos de la Escuela que fueron muchos. En Ingeniería Eléctrica: en especial a Javiera Ketterer que me trataba de mantener enfocado una y otra vez, Mai, Paula, Lucy, Ino, Manu, Nico, Rafa, Diego, Andrés, Francesca, Elena y Titi. En Plan Común: Carloncho, Agustín, Gonzalo, Rubén, Cristián, Héctor, Horacio, Francisco y Fabián.

A mis compañeros y los que pasaron por el Coro Don Bosco: Andrés, Claudia, Felipe, Natalia, Caro, Negro y en especial a Marcos. Agradezco su comprensión cuando no llegaba a los ensayos o los días domingos a Misa.

Gente que fue importante en esta etapa de mi vida y que no puedo dejar de nombrar: Pame y Lore Lara, Jocelyn Vega, Carolina Jofré, Cristina Kujtiuk, Señora Marta, Don Nino, Carlos Castillo, Don Armando, Ricardo Rodríguez, Oscar Cerda, Julio Guzmán, Jaime “Pastor” Henríquez, Pablo Schele, Paula Astudillo. Gracias por estar ahí.

Mis compañeros del colegio: Juan Pablo, Julio César, Armando, Juanito, Joaquín, David, Felipe, Guti, Gomezón, Mapet y Hugonote.

En Tecnet a Priscilla, Hayleyss, Augusto, Fernando y Carlos. Gracias por su comprensión para poder terminar mi memoria y poder seguir trabajando.

Finalmente, agradecer a Bernardita Pezoa, secretaria del DIE y a todas las personas que no pude nombrar pero que tengo presente en mi mente.

# Índice

<i>RESUMEN DE LA MEMORIA</i> .....	<i>ii</i>
<b>Índice</b> .....	<b>1</b>
<b>Índice de figuras</b> .....	<b>5</b>
<b>Índice de Tablas</b> .....	<b>8</b>
<b>1. Introducción</b> .....	<b>9</b>
1.1. Motivación .....	9
1.2. Alcance.....	9
1.3. Objetivos generales .....	9
1.4. Objetivos específicos .....	10
1.5. Estructura general de la memoria.....	10
<b>2. Estado del arte</b> .....	<b>11</b>
2.1. Introducción .....	11
2.2. Esquemas de control para cada DG.....	12
2.3. Introducción al control autónomo híbrido para PCS .....	13
2.4. Algunos conceptos de el modo de control “Switch” .....	14
2.5. Mecanismos de control de potencia .....	16
2.5.1. Control automático de generación (AGC) .....	16
2.5.2. Control de excitación del generador sincrónico.....	16
2.5.3. Transformadores con cambiadores de TAP .....	18
Potencia constante en la carga (CP Load).....	19
Corriente constante en la carga (CI Load) .....	21
Impedancia constante en la carga (CZ Load).....	23
2.6. Equipos de compensación estáticos.....	24
2.6.1. Tipos básicos de controladores FACTS .....	25
Controlador Serie: .....	25
Controlador Shunt: .....	25
Combinación de controladores Serie-Serie: .....	26
Combinación de controladores Serie-Shunt:.....	26
2.6.2. Importancia de los diferentes tipos de controladores .....	27
2.6.3. Descripción y definición de los controladores FACTS.....	29
Conexión serie .....	29
Static Synchronous Compensator (STATCOM): .....	29
Static Synchronous Generator (SSG): .....	30
Static Var Compensator (SVC): .....	31
Thyristor Controlled Reactor (TCR):.....	31

Thyristor Switched Reactor (TSR): .....	31
Thyristor Switched Capacitor (TSC): .....	32
Thyristor Controlled Braking Resistor (TCBR): .....	32
Interconectados serie .....	32
Static Synchronous Compensator (SSSC): .....	32
Interline Power Flow Controller (IPFC): .....	33
Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC): .....	33
Thyristor-Switched Series Capacitor (TSSC): .....	34
Thyristor-Controlled Series Reactor (TCSR): .....	34
Thyristor-Switched Series Reactor (TSSR): .....	34
Combinación shunt y serie de controladores conectados.....	34
Unified Power Flow Controller (UPFC): .....	34
Thyristor-Controlled Phase Shifting Transformer (TCPST): .....	35
Interphase Power Controller (IPC): .....	35
<b>2.7. Formas de almacenar energía .....</b>	<b>36</b>
2.7.1. Las baterías.....	36
Baterías de Plomo-Acido sumergidas (FLA): .....	37
Baterías de Plomo-Acido selladas (SLA): .....	38
Baterías de Níquel Cadmio (NiCad): .....	38
Baterías de Níquel e Hidruro Metálico (NiMH): .....	39
Baterías de Ión de litio o de polímero de litio (Li-Ion): .....	39
2.7.2. Los condensadores .....	40
Dieléctrico de aire.....	41
Dieléctrico de mica .....	41
Dieléctrico de papel.....	41
Dieléctrico electrolítico .....	42
Dieléctrico cerámico .....	42
Los súpercondensadores .....	42
Electrolíticos de interfaz de carbono de doble capa: .....	42
No electrolíticos de interfaz de carbono de doble capa: .....	43
Acuosos de óxido de doble capa con pseudocapacitancia redox: .....	43
Polímeros conductores: .....	43
Aplicaciones de los súpercondensadores.....	43
2.7.3. Discos de inercia .....	44
Discos de inercia de baja velocidad: .....	45
Discos de inercia de alta velocidad: .....	45
<b>3. Diseño del modelo .....</b>	<b>47</b>
<b>3.1. Principio de operación de un STATCOM.....</b>	<b>47</b>
<b>3.2. Control de un STATCOM.....</b>	<b>48</b>
3.2.1. Circuito inversor .....	48
<b>3.3. Características del STATCOM.....</b>	<b>48</b>
<b>3.4. Funcionamiento del STATCOM .....</b>	<b>49</b>
<b>3.5. Fuentes convertidoras de voltaje VSI.....</b>	<b>50</b>

<b>3.6. Diagrama de bloques del STATCOM.....</b>	<b>51</b>
<b>3.7. Eliminación de armónicas mediante el uso de transformadores .....</b>	<b>51</b>
3.7.1. Eliminación de quinta armónica.....	55
3.7.2. Eliminación de séptima armónica .....	56
3.7.3. Eliminación armónicos en un STATCOM .....	56
<b>4. Implementación computacional en Matlab-Simulink.....</b>	<b>59</b>
<b>4.1. Bloques importantes del SimPowerSystems .....</b>	<b>59</b>
4.1.1. Fuente Trifásica (Three-Phase Source).....	59
4.1.2. Sección de línea trifásica de modelo PI (Three-Phase PI Section Line) .....	60
4.1.3. Carga trifásica RLC paralela (Three-Phase Parallel RLC Load) .....	61
4.1.4. Interruptor Trifásico (Three-Phase Breaker) .....	62
4.1.5. Medidor trifásico de voltaje y corriente(Three-Phase V-I Measurement) .....	64
4.1.6. Transformador Zigzag desfasador(Zigzag Phase-Shifting Transformer).....	66
4.1.7. Puente de tres niveles (Three-Level Bridge).....	68
4.1.8. Oscilador enclavado por fase (Phase locked loop).....	70
<b>4.2. Modelo en estudio.....</b>	<b>71</b>
4.2.1. Descripción.....	71
4.2.2. Microred utilizada en la simulación .....	71
4.2.3. Elementos del STATCOM.....	72
4.2.4. Generador de pulsos .....	74
4.2.5. Bloques para gráficos del STATCOM .....	76
<b>5. Análisis .....</b>	<b>77</b>
<b>5.1. Simulaciones .....</b>	<b>77</b>
5.1.1. Simulación N°1 sin perturbaciones .....	77
5.1.2. Simulación N°2 ingreso de carga inductiva. ....	81
<b>6. Conclusiones .....</b>	<b>89</b>
<b>7. Parámetros de los elementos.....</b>	<b>94</b>
<b>7.1. Fuente trifásica.....</b>	<b>94</b>
<b>7.2. Línea de transmisión.....</b>	<b>94</b>
<b>7.3. Carga resistiva .....</b>	<b>94</b>
<b>7.4. Interruptor carga inductiva .....</b>	<b>94</b>
<b>7.5. Carga inductiva.....</b>	<b>95</b>
<b>7.6. Interruptor STATCOM .....</b>	<b>95</b>
<b>7.7. Transformador Zig-Zag.....</b>	<b>95</b>
<b>7.8. Puente de 3 niveles.....</b>	<b>96</b>
<b>7.9. Condensador lado DC.....</b>	<b>96</b>
<b>7.10. Filtro armónico 5.....</b>	<b>96</b>

7.11. Filtro armónico 9.....	96
7.12. Filtro armónico 11.....	96
7.13. Filtro armónico 15.....	97
7.14. Filtro armónico 19.....	97
7.15. Filtro armónico 23.....	97
7.16. Controlador PI – Tensión VT .....	97
7.17. Controlador PI – Potencia Reactiva Q.....	98
7.18. Oscilador enclavado por fase - PLL.....	98
<b>8. Código Matlab para realizar los gráficos.....</b>	<b>99</b>
8.1. Archivo “Graficador.m” .....	99
<b>9. Tabla de datos de las simulación .....</b>	<b>101</b>

# Índice de figuras

Figura 1. Micro red básica. Fuente [1].....	12
Figura 2. Configuración del circuito de la fuente de voltaje tipo PCS. Fuente [1].....	13
Figura 3. Control híbrido autónomo basado en AVR y esquema PQR. Fuente [1].....	14
Figura 4. Característica I-V del inversor. Fuente [1]. ....	15
Figura 5. Esquema del control "Switch" híbrido. Fuente [1]. ....	15
Figura 6. Sistema de excitación de un generador sincrónico. Fuente [3]. ....	17
Figura 7. Sistema de potencia supuesto. Fuente [4].....	19
Figura 8. Efecto del OLTC en la trasferencia de potencia (CP Load). ....	21
Figura 9. Efecto del OLTC en la trasferencia de potencia (CI Load). ....	22
Figura 10. Efecto del OLTC en la trasferencia de potencia (CZ Load). ....	24
Figura 11. Controlador Serie.....	25
Figura 12. Controlador Shunt .....	26
Figura 13. Controlador Serie-Serie.....	26
Figura 14. Controlador Serie-Shunt coordinado. ....	27
Figura 15. Controlador Serie-Shunt con unificación de flujo de potencia.....	27
Figura 16. Controlador combinado Serie-Shunt coordinado. ....	28
Figura 17. Controlador Serie con almacenamiento. ....	28
Figura 18. Controlador Shunt con almacenamiento.....	29
Figura 19. Controlador Serie-Shunt con almacenamiento.....	29
Figura 20. STATCOM basados en convertidores con fuentes de voltaje y corriente. ....	30
Figura 21. Esquema de los elementos de un SSG. ....	30
Figura 22. Esquema de conexión un SVC o SVG con TCR, TSC, TSR y filtro. ....	31
Figura 23. Esquema del TCBR. ....	32
Figura 24. Compensador sincrónico estático serie (SSSC).....	33
Figura 25. SSSC con interfaz y almacenamiento de energía.....	33
Figura 26. Tiristor controlado por condensador serie. ....	33
Figura 27. Controlador unificado de flujo de potencia (UPFC). ....	34
Figura 28. Transformador desfasador controlado por tiristor (TCPST). ....	35
Figura 29. Configuración típica de un sistema de potencia critico. Fuente [6].....	36
Figura 30. Sistema de almacenamiento de baterías en Chino, California. Fuente: EPRI. ....	37
Figura 31. Gabinete con baterías de tipo SLA. Fuente: ESA.....	38
Figura 32. Sistema de baterías de NiMH. Fuente: Mission Critical West Inc. ....	39
Figura 33. Esquema de la estructura interna. Fuente: SAFT America. ....	40
Figura 34. UPS basada en baterías de Li-Ion. Fuente: SAFT America. ....	40
Figura 35. Disco de inercia de baja velocidad. Fuente: Piller Inc. ....	45
Figura 36. Disco de inercia de alta velocidad. Fuente: Vycon.....	46
Figura 37. Forma general de conexión de un STATCOM. Fuente [10]. ....	47
Figura 38. Circuito inversor monofásico y flujo de estados. ....	48
Figura 39. Inversor VSI de 6 pulsos. ....	49
Figura 40. VSI monofásico de puente completo. ....	50
Figura 41. Diagrama de bloques del control del STATCOM.....	51
Figura 42. Conexión D-Y de transformadores trifásicos. Fuente [13]. ....	52
Figura 43. Corrientes secuencia positiva. ....	52
Figura 44. Corrientes secuencia negativa.....	52

Figura 45. Corrientes secuencia cero en conexión D-Y. Fuente [13].	52
Figura 46. Armónicos de 5° orden.	53
Figura 47. Armónicos de 7° orden.	54
Figura 48. Conexión para eliminación de 5 y 7 armónicas. Fuente [13].	54
Figura 49. Conexiones eliminación quinta armónica.	55
Figura 50. Corrientes en primario y secundario de T1.	55
Figura 51. Corrientes en primario y secundario de T2.	55
Figura 52. Conexiones eliminación séptima armónica.	56
Figura 53. Corrientes en primario y secundario de T1.	56
Figura 54. Corrientes en primario y secundario de T2.	56
Figura 55. STATCOM con transformadores desfasadores.	57
Figura 56. Espectro de Fourier del STATCOM.	57
Figura 57. Fuente trifásica.	59
Figura 58. Cuadro de dialogo de la fuente trifásica.	59
Figura 59. Modelo PI de línea de transmisión.	60
Figura 60. Modelo eléctrico de una fase la sección PI.	60
Figura 61. Cuadro de dialogo de la línea de parámetros distribuidos.	61
Figura 62. Bloque carga trifásica RLC serie.	61
Figura 63. Cuadro de dialogo del bloque Carga trifásica RLC paralelo.	62
Figura 64. Interruptor Trifásico.	63
Figura 65. Cuadro de dialogo del bloque interruptor trifásico.	63
Figura 66. Medidor trifásico de voltaje y corriente.	64
Figura 67. Parámetros de medición trifásica de voltaje y corriente.	65
Figura 68. Bloque Transformador desfasador Zigzag.	66
Figura 69. Cuadro de dialogo del Transformador Zigzag.	67
Figura 70. Bloque puente de tres niveles.	68
Figura 71. Esquema eléctrico del puente de tres niveles.	68
Figura 72. Cuadro de dialogo de puente de tres niveles.	69
Figura 73. Bloque PLL Trifásico.	70
Figura 74. Cuadro de dialogo del bloque PLL trifásico.	70
Figura 75. Modelo utilizado para la simulación.	71
Figura 76. Diagrama de la microrred.	71
Figura 77. Diagrama del STATCOM.	72
Figura 78. Bloque inversor.	73
Figura 79. Bloque filtro pasivo de armónicos.	73
Figura 80. Generador de pulsos.	74
Figura 81. Generador de pulsos para una fase.	75
Figura 82. Esquema de generación de pulsos.	75
Figura 83. Elementos para gráficos de voltajes, corrientes y potencias.	76
Figura 84. Cálculo de tensión VT.	76
Figura 85. Voltaje en la carga sin STATCOM.	78
Figura 86. Voltaje en la carga con STATCOM.	78
Figura 87. Armónicos presentes en la tensión de la carga.	78
Figura 88. Potencia activa en la carga sin STATCOM.	79
Figura 89. Potencia activa en la carga con STATCOM.	79
Figura 90. Potencia activa en la carga sin STATCOM, amplificada.	79
Figura 91. Potencia activa en la carga con STATCOM, amplificada.	79

<i>Figura 92. Inyección/Absorción de potencia reactiva del STATCOM.</i>	80
<i>Figura 93. Inyección/Absorción de potencia activa del STATCOM.</i>	80
<i>Figura 94. Voltaje de la línea con y sin STATCOM.</i>	80
<i>Figura 95. Voltaje VT con y sin STATCOM.</i>	80
<i>Figura 96. Voltaje de un condensador.</i>	81
<i>Figura 97. Voltaje en la carga sin STATCOM.</i>	82
<i>Figura 98. Voltaje en la carga con STATCOM.</i>	82
<i>Figura 99. Voltaje en la carga con STATCOM, ampliado.</i>	82
<i>Figura 100. Potencia activa en la carga sin STATCOM.</i>	83
<i>Figura 101. Potencia activa en la carga con STATCOM.</i>	83
<i>Figura 102. Potencia activa en la carga sin STATCOM, amplificada.</i>	84
<i>Figura 103. Potencia activa en la carga con STATCOM, amplificada.</i>	84
<i>Figura 104. Potencia Reactiva en la carga sin STATCOM.</i>	84
<i>Figura 105. Potencia Reactiva en la carga con STATCOM.</i>	84
<i>Figura 106. Potencia Reactiva en la carga sin STATCOM, amplificada 1E-4.</i>	85
<i>Figura 107. Potencia Reactiva en la carga con STATCOM, amplificada 1E-4.</i>	85
<i>Figura 108. Inyección/Absorción de potencia activa del STATCOM.</i>	85
<i>Figura 109. Inyección/Absorción de potencia reactiva del STATCOM.</i>	85
<i>Figura 110. Potencia activa en la carga variable.</i>	86
<i>Figura 111. Potencia reactiva en la carga variable.</i>	86
<i>Figura 112. Voltaje de la línea con y sin STATCOM.</i>	86
<i>Figura 113. Voltaje VT con y sin STATCOM.</i>	86
<i>Figura 114. Voltaje de la línea con y sin STATCOM, superior.</i>	87
<i>Figura 115. Voltaje de la línea con y sin STATCOM, inferior.</i>	87
<i>Figura 116. Sinusoide de voltaje fase A con y sin compensación.</i>	87
<i>Figura 117. Voltaje en los condensadores.</i>	88

# Índice de Tablas

Tabla 1. Eventos simulación N°1. ....	77
Tabla 2. Eventos simulación N°2. ....	81
Tabla 3. Parámetros fuente trifásica. ....	94
Tabla 4. Parámetros línea de transmisión. ....	94
Tabla 5. Parámetros carga resistiva. ....	94
Tabla 6. Parámetros interruptor carga inductiva. ....	94
Tabla 7. Parámetros carga inductiva. ....	95
Tabla 8. Parámetros interruptor STATCOM. ....	95
Tabla 9. Parámetros Transformador Zig - Zag. ....	95
Tabla 10. Parámetros puente de 3 niveles. ....	96
Tabla 11. Parámetros condensador lado DC. ....	96
Tabla 12. Parámetros filtro armónico 5. ....	96
Tabla 13. Parámetros filtro armónico 9. ....	96
Tabla 14. Parámetros filtro armónico 11. ....	97
Tabla 15. Parámetros filtro armónico 15. ....	97
Tabla 16. Parámetros filtro armónico 19. ....	97
Tabla 17. Parámetros filtro armónico 23. ....	97
Tabla 18. Parámetros controlador PI – tensión VT. ....	98
Tabla 19. Parámetros controlador PI – potencia reactiva Q. ....	98
Tabla 20. Parámetros Oscilador enclavado por fase - PLL. ....	98
Tabla 21. Valores entre 0.49 y 1.005 segundos de simulación. ....	101

# Capítulo 1

## 1. Introducción

### 1.1. Motivación

La motivación de este trabajo de título está asociada a dos importantes desafíos que tiene la ingeniería eléctrica en nuestros días. Por una parte, se ha visto un gran interés en países desarrollados por la incorporación de generación distribuida (GD) a sus redes, esto debido a la liberalización del mercado de la potencia eléctrica, la conciencia mundial sobre los problemas medioambientales que trae consigo la generación de energía eléctrica, que se ve reflejada en una mayor demanda social por la utilización de energías renovables. Por otra, la GD tiene algunos inconvenientes para ser implementada como, una eventual inestabilidad de voltaje y frecuencia, sumado a un deterioro en la calidad del suministro de potencia, lo que podría hacer disminuir el interés en este tipo de alternativas de generación. Es así como surge la necesidad de implementar nuevos dispositivos de control para poder conectar pequeños generadores, que constituyen la GD, a la red logrando atenuar los fenómenos de inestabilidad anteriormente mencionados, ya que el sistema de control utilizado en grandes generadores no es posible aplicar en GD por razones económicas, complejidad y sensibilidad. [1]

### 1.2. Alcance

El alcance de este trabajo de título consiste básicamente en diseñar y modelar en forma teórica, mediante el software Matlab y su aplicación Simulink, un compensador estático. También se estudiará su funcionamiento con un modelo de Microred donde se simularán posibles escenarios donde se estudiará el comportamiento del dispositivo modelado. Para esto último se utilizarán las herramientas disponibles en el Toolbox SimPowerSystems de Simulink.

### 1.3. Objetivos generales

El trabajo de título se contextualiza dentro de los que se llama generación distribuida mediante energías renovables. Consistirá en implementar un modelo simulando una generación pequeña que será movida mediante la energía aportada por ríos o el viento, y un compensador estático con electrónica de potencia dotado de un control de potencia con el fin de mejorar la estabilidad del sistema y, en general, mejorar la regulación de voltaje.

## **1.4. Objetivos específicos**

A continuación se describen los objetivos específicos de la memoria:

- Adquirir una visión el estado del arte del control de potencia para aplicarlo a generación distribuida.
- Modelar un dispositivo compensador estático mediante electrónica de potencia que permita el control de potencia.
- Validar, en forma teórica, la funcionalidad del equipo orientado a la generación distribuida mediante la simulación de una Microred.

## **1.5. Estructura general de la memoria**

El presente trabajo de título se encuentra dividido en 6 capítulos principales más anexos. En el Capítulo 1: Introducción, se describe la motivación y alcances como también se identifican los objetivos generales y específicos. Se presenta como se desarrollará la memoria. En el Capítulo 2: Estado del arte, se muestra una breve visión de los mecanismos de control de potencia y equipos de compensación estáticos. Se describen algunas formas de almacenar energía como alternativa para realizar inyección de potencia para el funcionamiento del equipo a diseñar. En el Capítulo 3: Diseño del modelo, se entrega la teoría que sustenta al modelo computacional que será implementado en Matlab Simulink. El Capítulo 4: Implementación computacional en Matlab-Simulink, se presentan los bloques que conforman al modelo, se da una breve descripción de ellos y los parámetros que necesitan para su funcionamiento. Posteriormente se muestran los modelos en estudio y se realizan las simulaciones. En el Capítulo 5: Análisis, como su nombre lo indica se presenta un análisis de los resultados obtenidos en el capítulo anterior. En el Capítulo 6: Discusión y conclusiones, se procede a discutir el análisis anterior para poder sacar las conclusiones finales del trabajo. En los Anexos, se entrega toda la información relevante que no fue entregada en detalle en los capítulos anteriores.

# Capítulo 2

## 2. Estado del arte

### 2.1. Introducción

La instalación de generación distribuida (GD) para satisfacer la demanda de los clientes ha creado un gran interés en estos últimos años. Las principales razones son la liberalización del mercado de la potencia eléctrica, el interés mundial por los problemas medioambientales y la creciente demanda social por fuentes de energías renovables (ER). Sin embargo esta ansiedad por instalar pequeños generadores a la red de distribución ha traído consigo la eventual inestabilidad del voltaje y frecuencia junto con el deterioro de la calidad de suministro de potencia a los clientes.

Para enfrentar estos problemas se propone el concepto de micro red, que integra GD y a los clientes como una unidad de red, la cual es operada independientemente desde la red de potencia. Este concepto se verifica con sistemas de modelación ya que tienen la posibilidad de entregar una potencia eléctrica de alta calidad y bajo costo.

La mayor parte de la GD, como las microturbinas a gas e hidráulicas y celdas de combustible, son interconectadas a la red de corriente alterna (CA) para los clientes a través de sistemas de conversión de potencia (PCS). Sus desempeños básicos son diferentes a los propios de las máquinas rotacionales convencionales (por ejemplo el generador sincrónico), los cuales pueden seguir las fluctuaciones de la carga y las fallas en la red autónomamente mediante regulación automática de voltaje (RAV) y operación de desenganche. En la actualidad la red provee los servicios adicionales necesarios para suprimir las perturbaciones causadas por los clientes y para mantener la calidad de suministro de la potencia de la red. Si los PCS no pueden desempeñarse en un modo similar, el sistema de control y operación integrado e independiente de una micro red se complica. La micro red debiera ser provista desde la red con servicios auxiliares relativamente costosos. Las experiencias y el estudio de un modelo de sistema han mostrado que el esquema convencional de control de la GD no puede enfrentarse con estos problemas causados por la variación de la demanda de potencia, especialmente en los estados transientes.

Se requiere de un esquema de control novedoso de GDs para la micro red de modo de simplificar su operación integrada así como mantener la calidad de la potencia suministrada a la red por sí misma. El objetivo de esta memoria es proponer esquemas de control novedosos para los GDs basados en PCS y máquinas rotatorias para asegurar tanto la estabilidad operacional como la calidad de potencia suministrada de una micro red.

La Figura 1 muestra una Micro Red básica que servirá de ejemplo para realizar la modelación. El concepto de Micro Red es la integración de GDs y cargas locales conectadas en paralelo con otras mediante impedancias de línea ( $L_t$ ) similares a un sistema de distribución convencional. Cada GD tiene su propio sistema de control independiente de la red y coexiste con con el de ella manteniendo su desempeño, regulando el flujo de potencia en el punto de conexión común (PCC) planificado y sin ningún servicio auxiliar de la red. La red es conectada a la Micro Red mediante una impedancia del sistema  $L_s$ .

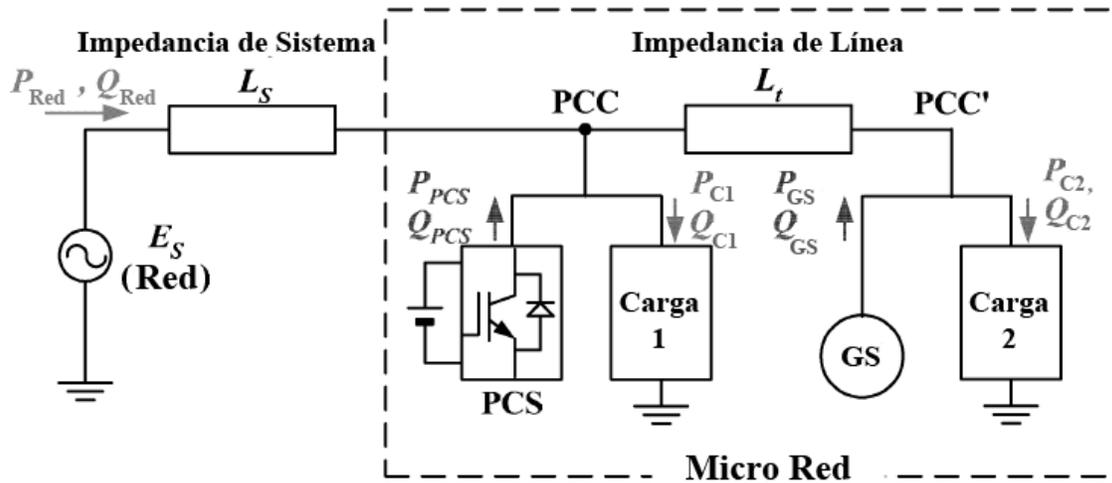


Figura 1. Micro red básica. Fuente [1]

Como ejemplos de GDs con PCS se pueden asumir micro turbinas a gas, celdas de combustibles. Las baterías secundarias son introducidas con el fin de dar estabilidad a la operación en forma independiente de la red de potencia. Otros generadores distribuidos sin PCS como generadores eólicos y co-generadores también pueden ser incluidos en una micro red.

La salida de todos los GDs está estructurada y programada sobre la base de la estimación del consumo diario por la central de control integrada (ICC). Los GDs no controlables basados en fuentes de energía renovable (RES) como generación solar y generación eólica, suministran su potencia generada a la red sin tomar en cuenta el estado de la micro red. En ese caso se asume que se cuenta con un sistema de autoprotección, el cual desconecta su salida de la red en caso de que la tensión en la línea supere el rango permisible.[1]

## 2.2. Esquemas de control para cada DG

La Figura 2 muestra el circuito de fuente de voltaje tipo PCS que es supuesto. El PCS corresponde a un inversor trifásico con inductancia de regulación de corriente  $L_{p1}$ , inductancia de bloqueo de "Ripple"  $L_{sp1}$  y un filtro de salida con condensador  $C_f$  y resistencia  $R_f$  para absorber los armónicos generados por el inversor. El generador

conectado al PCS está representado por una fuente de voltaje DC denominada  $E_d$ , además se supone que el voltaje se supone regulado.

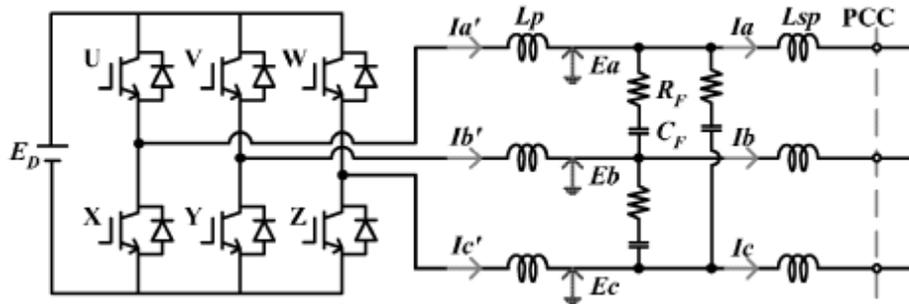


Figura 2. Configuración del circuito de la fuente de voltaje tipo PCS. Fuente [1].

### 2.3. Introducción al control autónomo híbrido para PCS

La Figura 3 muestra la configuración básica de un circuito de control para un PCS. El control autónomo de un PCS está construido con un control híbrido basado en un AVR y la potencia de salida de regulación, tanto potencia activa como reactiva (PQR) del inversor. Tiene dos estructuras jerárquicas compuestas de un control de bajo nivel y uno de alto nivel y allí existen 3 ciclos de control (loops) conectados en cascada. El control de bajo nivel está dado por el control del PWM y el nivel alto de control le indica a la unidad de control que genere la referencia de corriente para el control del PWM.

Los generadores en GD, como micro turbinas de gas combinadas con rectificadores, operan como fuentes de voltaje DC entre el circuito DC y el PCS. Con la señal de voltaje o la orden de potencia a la GD, la salida de corriente de la fuente inversora de voltaje (PCS) es regulada en forma autónoma para estabilizar el suministro de potencia a la micro red. El inversor está controlado con el esquema: modo de seguimiento del error PWM (Error Tracking Mode PWM) y opera básicamente en el modo de corriente constante.

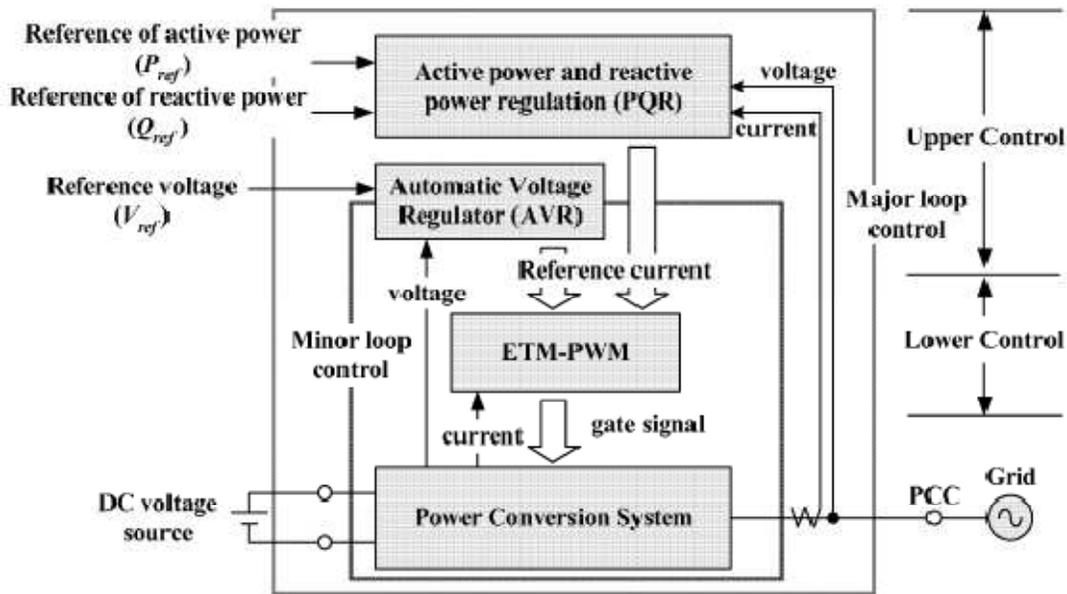


Figura 3. Control híbrido autónomo basado en AVR y esquema PQR. Fuente [1].

En la Figura 3, debido a que el voltaje de línea está determinado por la red en el punto PCC, el sistema de control PQR del inversor regula la amplitud y la fase de la corriente de salida (corriente de referencia del control PWM) y entrega el valor específico de potencia activa y reactiva a la red (Potencia activa  $P_{ref}$ , potencia reactiva  $Q_{ref}$ ). El AVR está ubicado en un nivel más bajo del PQR y regula el voltaje de línea en el punto de interconexión de la GD. El control híbrido cambia de posiciones entre AVR y PQR, dependiendo de las condiciones de operación de los GDs como paralelo, la señal de comando del ICC como cambio en la potencia de salida y la variación del voltaje en el punto de interconexión de la GD.

## 2.4. Algunos conceptos de el modo de control “Switch”

El PCS con el control de corriente ETM-PWM tiene en forma inherente una característica basada en su circuito y parámetros de control. Esto es reflejado en el desempeño de la regulación de voltaje de la GD como fuente de alimentación. Por esto, el voltaje en la red puede ser estabilizado, incluso si 2 PCS basados en GDs son conectados en paralelo sin impedancia de línea, y la operación autónoma del sistema es segura sin ninguna información de los estados de operación de las otras GDs por medio de la red de comunicación entre ICC y las GDs. Esto también permite la rápida eliminación de la variación de voltaje

En la Figura 4 se muestra la característica I-V del inversor. En el modo de control con AVR, el rango del voltaje de regulación de la línea  $\Delta V$  es definido de modo de mantener la calidad de la potencia de salida. Allí existen 2 factores para definir este rango. El  $\alpha$  y el  $j_e$ . El  $\alpha$  es la ganancia de retroalimentación (feedback) de la salida del filtro de

voltaje y  $je$  es una banda controlable de corriente, en el esquema ETM-PWM. La ganancia  $\alpha$  determina la pendiente de la curva y  $je$  determina el rango controlable de la referencia de corriente en el inversor.

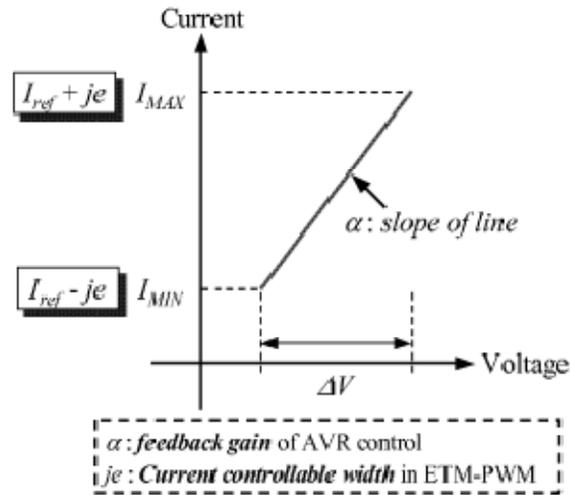


Figura 4. Característica I-V del inversor. Fuente [1].

La Figura 5 muestra el diagrama conceptual del modo de control “Switch” con el control híbrido basado en la característica I-V. En el estado estable, la salida del voltaje es regulada dentro del  $\Delta V$  por medio del AVR en lo posible que permita el modo de operación. En los otros estados, el modo de control es cambiado al esquema PQR en el caso que el PCS esté conectado a la red ( $P_{min}$ ) o si la potencia activa del PCS excede el valor limite ( $P_{max}$ ), en otras palabras, si la capacidad del PCS se satura. Para hacer que el cambio entre un modo y otro no sea tan brusco se ajusta la fase de referencia usando un oscilador enclavado por fase (PLL).

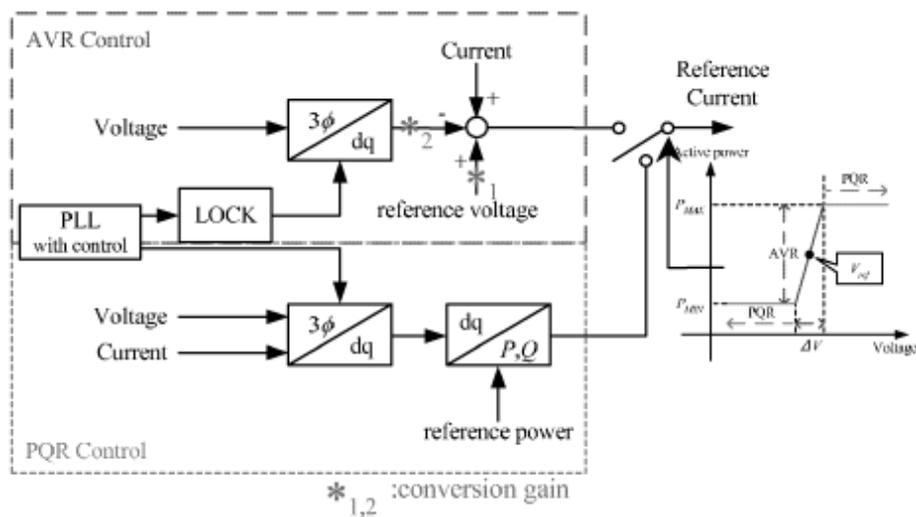


Figura 5. Esquema del control "Switch" híbrido. Fuente [1].

## **2.5. Mecanismos de control de potencia**

A continuación se verán algunos de los mecanismos clásicos de control. En general están determinados por dispositivos de acción limitada y en general tienen una respuesta lenta. A modo de ejemplo, la forma en que se mantiene la tensión en barras dentro de los límites aceptables o controlar la potencia que fluye por alguna línea se utiliza, en la mayoría de los casos, elementos shunt o serie.

### **2.5.1. Control automático de generación (AGC)**

La operación exitosa de los sistemas interconectados de potencia requiere de un equilibrio entre la potencia total generada y la carga demandada con las respectivas pérdidas asociadas. Con el tiempo el punto de operación del sistema de potencia cambia y como resultado los sistemas presentan desviaciones en la frecuencia del sistema y en la potencia programada para despachar a otras áreas, provocando efectos indeseados.

Allí existen 2 variables de interés llamadas frecuencia e intercambio de potencia entre redes. Sus variaciones son ponderadas en conjunto por una combinación lineal a una sola variable llamada ACE (Area Control Error). El problema del AGC ha aumentado debido a los importantes estudios que se hacen, los cuales introducen nuevos parámetros como variaciones/incertezas, características de las cargas, control de excitación y enlaces de transmisión paralelos AC/DC. También han sido presentados el regulador AGC basado en microprocesadores, el regulador auto-ajustable y el regulador AGC adaptable. Los avances más recientes en el área dicen relación con la incorporación de redes neuronales, lógica difusa y algoritmos genéticos. Aparte de estos avances en los conceptos de control, los cambios que se han vivido en las últimas décadas como la desregulación del mercado de la energía eléctrica y la introducción de SMES, aerogeneradores, celdas de combustible y celdas de combustible, han introducido nuevos desafíos. [2]

### **2.5.2. Control de excitación del generador sincrónico**

Este tipo de control modifica la corriente circulante en el campo del generador sincrónico. Con ello se modifica directamente la potencia reactiva entregada o absorbida por la unidad. También el control de excitación permite el control del factor de potencia en industrias donde se utilizan motores sincrónicos.

El sistema de excitación de un generador sincrónico, además de proveer de corriente continua al devanado de campo, contiene varias funciones de control y protección que repercuten sobre el comportamiento dinámico del sistema eléctrico.

Las principales funciones de control del sistema de excitación consisten básicamente en el control de tensión y de potencia reactiva, y en la mejora de la estabilidad del sistema eléctrico. También pueden repercutir sobre el sistema diversas funciones de protección, que aseguran que no se sobrepasen los límites de funcionamiento de la máquina. [3]

La Figura 6 muestra los principales elementos del sistema de excitación de un generador síncrono.

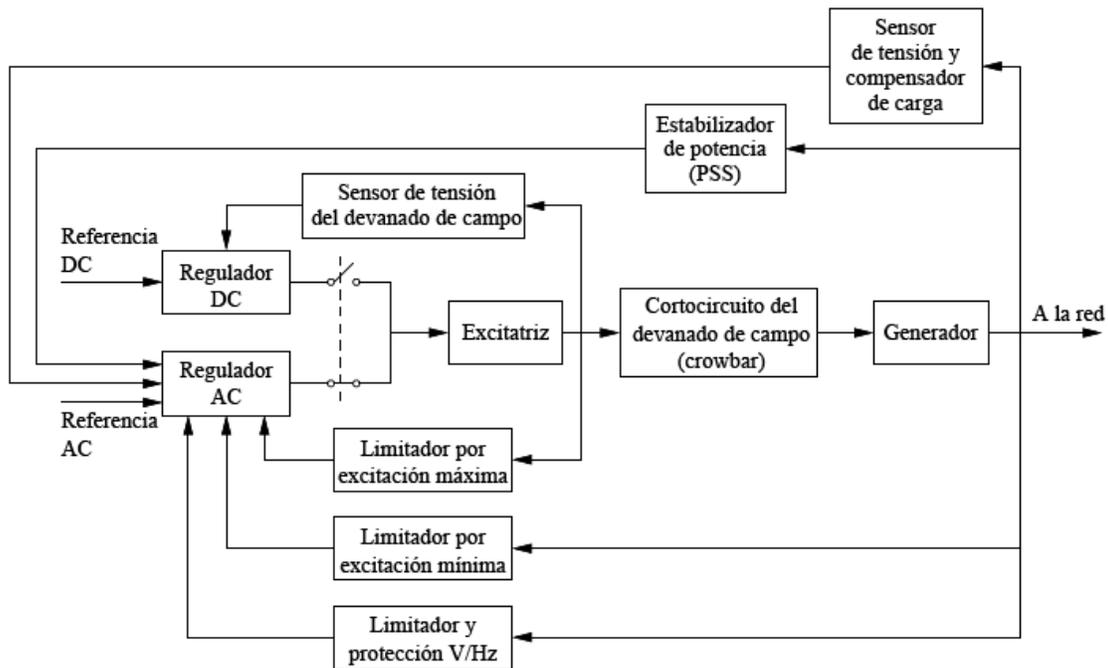


Figura 6. Sistema de excitación de un generador síncrono. Fuente [3].

**Excitatriz:** Elemento que proporciona corriente continua que alimenta al devanado de campo de la máquina síncrona, y constituye la etapa de potencia del sistema de control.

**Regulador AC:** Recibe las entradas de los sensores y las analiza y a partir de ese análisis entrega una señal de control para la excitatriz. El procesamiento de las señales emplea técnicas clásicas de regulación y estabilización.

**Regulador DC:** Ajusta la tensión del devanado de campo a un determinado valor de referencia, y permite el control manual de la excitación. Se usa para controlar la excitación en situaciones especiales como pruebas, fallas del control automático, etc.

**Sensor de tensión del devanado de campo:** Este sensor permite cerrar el bucle del control manual de tensión del devanado de campo.

**Limitador por excitación máxima:** Esta protección evita el sobrecalentamiento del devanado de campo por sobrecorrientes. Típicamente, esta protección registra la corriente por el devanado de campo.

**Limitador por excitación mínima:** Este limitador evita que la excitación descienda por debajo de un nivel que perjudique la estabilidad del generador, o que provoque el calentamiento del borde de la estructura del devanado inducido. La entrada se toma de la tensión y corriente en los terminales del generador. [3]

**Limitador y protección V/Hz:** El objetivo de esta protección es proteger a la instalación contra un flujo magnético elevado, que podría provocar el calentamiento del circuito magnético del generador o del transformador. La relación entre tensión y frecuencia, designada como V/Hz, es proporcional al flujo magnético. [3]

**Cortocircuito del devanado de campo (crowbar):** Esta protección se instala en algunos generadores para evitar, bien una corriente negativa en el devanado de campo, bien una tensión excesiva en el mismo, en algunas circunstancias especiales. El incidente típico que puede producir este tipo de problemas es un cortocircuito en la red. En caso de existir, esta protección proporciona un paso alternativo para la corriente, actuando como un cortocircuito del devanado de campo. Este camino puede abrirse a través de un tiristor que permita el paso de corriente a través de una resistencia de descarga, o también a través de una resistencia no lineal o varistor. [3]

**Sensor de tensión y compensador de carga:** Mide la tensión en los terminales del generador, la rectifica, la filtra, y una vez convertida en una señal de corriente continua la compara con una referencia que representa la tensión deseada. Además puede compensar la caída de tensión en el circuito de salida, con el fin de controlar la tensión en un punto distinto de los bornes del generador. En ocasiones es conveniente controlar la tensión en un punto ficticio situado dentro del generador. Esto es interesante en el caso de dos generadores en paralelo que comparten un mismo transformador. Si los dos generadores controlasen la tensión en su nudo de conexión un generador aportaría toda la potencia reactiva mientras el otro absorbería el máximo de reactiva, dando como resultado un control inestable. El control de tensión en un punto ficticio en el interior de cada generador permite repartir la carga de potencia reactiva entre ambos. En otras ocasiones, es conveniente controlar la tensión en un punto ficticio situado aguas abajo respecto a los bornes del generador. Puede ser interesante, por ejemplo, cuando dos generadores operan en paralelo, cada uno con su propio transformador elevador. De esta forma, es posible controlar la tensión en un punto cercano al punto de conexión común en la red de transporte, por ejemplo compensando entre un 50% y un 80% de la impedancia del transformador. No se debe compensar el 100% de la impedancia, puesto que en tal caso el control de tensión se volvería inestable. [3]

**Estabilizador de potencia (Power System Stabilizer PSS):** Proporciona una señal de control adicional que amortigua las oscilaciones electromecánicas en el sistema eléctrico. Esta señal de control se construye típicamente a partir de la desviación de velocidad, la frecuencia eléctrica y/o la potencia activa.[3]

### **2.5.3. Transformadores con cambiadores de TAP**

Los sistemas de potencia modernos están siendo sobre-exigidos con el constante crecimiento de las cargas. El operador del sistema debe asegurar la calidad y la continuidad del suministro hacia los consumos, manteniendo los voltajes en la barra de los consumos

dentro de los rangos permisibles. La transferencia de potencia desde los generadores a los centros de consumo no es perfecta y esto se refleja en los voltajes de la barra de consumo. Mucha literatura se ha concentrado en la contribución que hacen los transformadores con cambiadores de tap bajo carga (OLTC). La capacidad de transferir potencia es medida desde el caso base del punto de operación hasta el punto cercano que limita la operación a lo largo de la trayectoria en donde van creciendo los consumos. Últimamente ha cobrado importancia la evaluación en-línea de los ajustes óptimos para transformadores OLTC usando redes neuronales artificiales (ANN) con lo que se logra la máxima transferencia de poder a la carga y con ello mejorar los límites de estabilidad. [4]

Supongamos un sistema de potencia simple como el de la Figura 7.

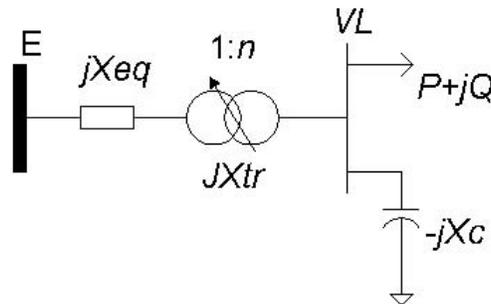


Figura 7. Sistema de potencia supuesto. Fuente [4]

La carga es abastecida desde una barra infinita por medio de un OLTC. El flujo de carga esta dado por la siguiente ecuación:

$$\frac{nE - V_L}{jn^2 X_T} = \frac{P - jQ}{V_L^*} + \frac{V_L}{-jX_c}$$

Ecuación 1

Donde  $E = E + j0$  es el EMF de la fuente equivalente de voltaje,  $V_L = V_r + jV_j$  es el voltaje en la barra del consumo,  $X_T = X_{eq} + X_u$  es la reactancia equivalente del sistema de potencia y el transformador, P y Q son las potencias activa y reactiva en la carga respectivamente y  $X_c$  es la reactancia del condensador shunt de la carga compensada. [4]

### Potencia constante en la carga (CP Load)

Cuando se tiene potencia constante en la carga  $P = c_p$  y  $Q = c_q$  luego se puede establecer una relación entre ambas constantes con una nueva constante K:

$$\frac{Q}{P} = \frac{c_p}{c_q} = K$$

Con esto último podemos reescribir la Ecuación 1 de la siguiente forma:

$$-j \frac{EV_r}{nX_T} - \frac{EV_j}{nX_T} + j(V_r^2 + V_j^2) \frac{X_c - n^2 X_T}{n^2 X_T X_c} = P - jKP$$

**Ecuación 2**

Igualando partes reales en ambos lados:

$$V_j = -\frac{nX_T}{E} P$$

**Ecuación 3**

Igualando partes imaginarias y sustituyendo  $V_j$  de la Ecuación 3 se puede escribir:

$$\frac{n^2 X_T^2}{E^2} P^2 + \frac{n^2 K X_T X_c}{X_c - n^2 X_T} P + \left( V^2 - \frac{nX_c E}{X_c - n^2 X_T} V_r \right) = 0$$

**Ecuación 4**

Resolviendo para P:

$$P = -\frac{KX_T E^2}{2X_T (X_c - n^2 X_T)} + \sqrt{\left( \frac{KX_c E^2}{2X_T (X_c - n^2 X_T)} \right)^2 - \left( \frac{E}{nX_T} \right)^2 \left( V_r^2 - \frac{nX_c E}{X_c - n^2 X_T} \right)}$$

**Ecuación 5**

De la Ecuación 5 se puede ver que la solución está sujeta a que el término dentro de la raíz sea mayor que cero, es decir:

$$\left( \frac{KX_c E^2}{2X_T (X_c - n^2 X_T)} \right)^2 - \left( \frac{E}{nX_T} \right)^2 \left( V_r^2 - \frac{nX_c E}{X_c - n^2 X_T} \right) > 0$$

**Ecuación 6**

Y que el valor de  $n^2 \neq \sqrt{\frac{X_c}{X_T}}$

De la Ecuación 6, se puede concluir que el límite de la transferencia de potencia a la carga depende en el grado de compensación, el ajuste del OLTC y el voltaje en la barra del consumo. En la Figura 8 se puede apreciar el efecto del ajuste de tap del OLTC en la máxima potencia transferida a una carga compensada y no compensada ( $X_c=10$  [pu] y  $X_c=\infty$  respectivamente).

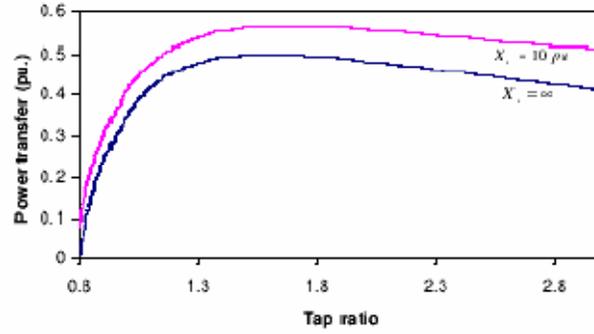


Figura 8. Efecto del OLTC en la transferencia de potencia (CP Load).

Se puede observar que para ambos casos el límite de la máxima potencia transferida es incrementado a medida que se incrementa la razón del tap. También se puede apreciar que se alcanza un máximo de transferencia en los 0.5 [pu] en el caso de carga descompensada y en los 0.56 en el caso de carga compensada, luego si se sigue aumentando la razón de tap la potencia transferida comienza suavemente a decaer. [4]

### Corriente constante en la carga (CI Load)

Para corriente constante en la carga se tiene  $P=c_p/V_L$ ,  $Q=c_q/V_L$   $Q/P=K$  luego la Ecuación 1 se puede reescribir como:

$$-j \frac{EV_r}{nX_T} - \frac{EV_j}{nX_T} + j(V_r^2 + V_j^2) \frac{X_c - n^2 X_T}{n^2 X_T X_c} = c_p |V_L| (1 - jK)$$

Ecuación 7

Igualando la parte real en ambos lados:

$$-\frac{EV_j}{nX_T} = c_p |V_L|$$

Ecuación 8

Luego podemos escribir:

$$\begin{aligned} \Rightarrow E^2 V_j^2 &= (nX_T c_p)^2 (V_r^2 + V_j^2) \\ \Rightarrow V_j &= \pm \frac{nX_T c_p}{\sqrt{E^2 - (nX_T c_p)^2}} V_r \end{aligned}$$

Igualando las partes imaginarias y sustituyendo  $V_j$  se llega a:

$$\Rightarrow V_r = \frac{E^2 - (n^2 X_T c_p)^2}{E(X_c - n^2 X_T)} n X_c - \frac{n^2 X_T X_c K c_p}{E(X_c - n^2 X_T)} \sqrt{E^2 - (n^2 X_T c_p)^2}$$

**Ecuación 9**

$$|V_L|^2 = V_r^2 + V_j^2 = V_r^2 \left( 1 + \frac{(n X_T c_p)^2}{E^2 - (n X_T c_p)^2} \right)$$

**Ecuación 10**

$$\Rightarrow |V_L| = \frac{E V_r}{\sqrt{E^2 - (n X_T c_p)^2}}$$

**Ecuación 11**

$$P = c_p |V_L| = \frac{n c_p X_c}{X_c - n^2 X_T} \sqrt{E^2 - (n X_T c_p)^2} - \frac{n^2 X_c X_T c_p^2 K}{X_c - n^2 X_T}$$

**Ecuación 12**

La solución está sujeta a:

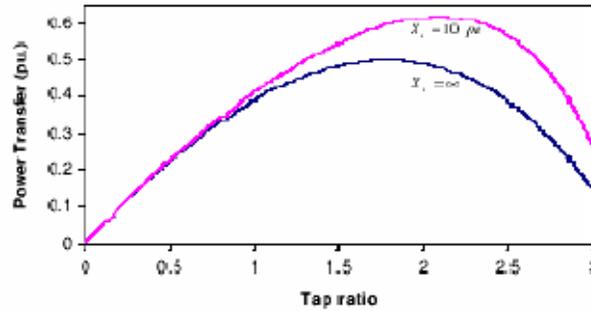
$$E^2 - (n X_T c_p)^2 > 0$$

$$\Rightarrow n < \left| \frac{E}{X_T c_p} \right|$$

Y que:

$$n \neq \sqrt{\frac{X_c}{X_T}}$$

La Figura 9 muestra el efecto de la razón de tap del OLTC en el límite de la transferencia de potencia en el caso de la corriente constante en la carga (CI load).



**Figura 9. Efecto del OLTC en la transferencia de potencia (CI Load).**

Al igual que en el caso anterior se puede apreciar que el límite de la máxima transferencia de poder aumenta a medida que se incrementa la razón de tap. El máximo global se ubica en 0.5[pu] en el caso de una carga no compensada y en 0.62[pu] en el caso compensado. Una vez alcanzado este máximo, la transferencia de potencia comienza a decaer fuertemente. [4]

### Impedancia constante en la carga (CZ Load)

Para impedancia constante en la carga se tiene  $P=c_p/V_L|^2$ ,  $Q=c_q/V_L|^2$   $Q/P=K$  luego la Ecuación 1 se puede reescribir:

$$-j \frac{EV_r}{nX_T} - \frac{EV_j}{nX_T} + j(V_r^2 + V_j^2) \frac{X_c - n^2 X_T}{n^2 X_T X_c} = P(1 - jK)$$

Ecuación 13

Igualando partes reales en ambos lados:

$$V_j = -\frac{nX_T}{E} P$$

Ecuación 14

Igualando partes imaginarias se escribir:

$$V_r = \frac{nX_T}{Ec_p} \left( Kc_p + \frac{X_c - n^2 X_T}{n^2 X_T X_c} \right) P$$

Ecuación 15

$$|V_L|^2 = V_r^2 + V_j^2 = \left( \frac{nX_T}{Ec_p} \right)^2 \left( Kc_p + \frac{X_c - n^2 X_T}{n^2 X_T X_c} \right)^2 P^2 + \left( \frac{nX_T}{E} \right)^2 P^2 = \frac{P}{c_p}$$

Ecuación 16

Resolviendo para P:

$$P = \frac{1/c_p}{\left( \frac{X_c - n^2 X_T}{nc_p X_c E} + \frac{KnX_T}{E} \right)^2 + \left( \frac{nX_T}{E} \right)^2}$$

Ecuación 17

En la Figura 10 se puede observar el comportamiento en este caso:

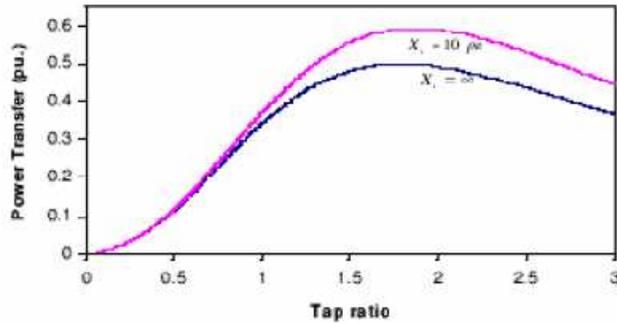


Figura 10. Efecto del OLTC en la transferencia de potencia (CZ Load).

En la Figura 10 se puede observar el efecto de la razón de tap del OLTC en el límite de la transferencia de potencia en el caso de una impedancia constante en la carga. Una vez más se puede ver que el límite de la transferencia de potencia se ve incrementado al aumentar la razón de tap hasta un máximo global, después del cual comienza a decaer. El máximo se alcanza en los 0.5[pu] en el caso de una carga no compensada con una razón de tap de 1.72 y en el caso de una carga compensada el máximo se ubica en los 0.62[pu] que corresponde a una razón de 2.1.

Se puede concluir que en los 3 modelos (CP, CI y CZ) el límite de transferencia de potencia se incrementa si se aumenta el grado de compensación, es decir, decreciendo el valor de  $X_c$ . [4]

## 2.6. Equipos de compensación estáticos

Un equipo de compensación estática o Sistema flexible de transmisión de corriente alterna FACTS es definido por el IEEE Working group como “Un equipo utilizado para la transmisión de corriente alterna incorporando elementos de la electrónica de potencia para permitir el incremento de la capacidad de transmisión de potencia”. La importancia de la electrónica de potencia y otros controladores estáticos es que tienen una gran velocidad de respuesta lo que no limita el número de operaciones. Así como los transistores dan origen a una amplia variedad de procesadores, en el caso de los dispositivos de potencia como Tiristores, GTO e IGBT dan origen a variados controladores FACTS como por ejemplo los convertidores HVDC. Estos controladores pueden realizar, en forma dinámica, el control de la impedancia de línea, voltaje de línea y flujo de potencia activa y reactiva. También pueden absorber o entregar potencia reactiva y en el caso de contar con algún medio de almacenamiento, pueden absorber o entregar potencia activa.

### 2.6.1. Tipos básicos de controladores FACTS

En la literatura investigada[5] se ha encontrado que clásicamente los equipos FACTS se pueden clasificar en cuatro categorías generales:

- Inyección en serie con la línea
- Inyección en shunt
- Inyección combinada serie-serie
- Inyección combinada serie-shunt

**Controlador Serie:** Un controlador serie, como el de la Figura 11, puede ser una impedancia variable, como un condensador o una inductancia o un elemento basado en electrónica de potencia. Como característica general todos los controladores serie inyectan voltaje en serie con la línea. Incluso una impedancia variable multiplicada por el flujo de corriente a través de ella, representa una inyección de voltaje serie con la línea. Siempre que el voltaje se encuentre en cuadratura de fase con la corriente de línea, el controlador serie solo aporta o consume la variación de potencia reactiva. Cualquier otra relación con la fase involucrará también una variación en la potencia activa.

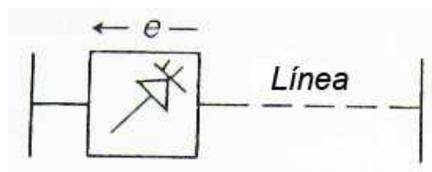


Figura 11. Controlador Serie.

**Controlador Shunt:** Al igual que en el caso de los controladores serie, un controlador Shunt, como el de la Figura 12, puede ser una impedancia variable, una fuente variable o una combinación de ambas. Como característica general todos los controladores Shunt inyectan corriente al sistema en el punto de conexión. Incluso una impedancia variable conectada a la línea de voltaje causa una variación en el flujo de corriente y esto se traduce en la inyección de corriente en la línea. Siempre que la corriente inyectada se encuentre en cuadratura de fase con el voltaje de línea, el controlador Shunt solo aporta o consume la variación de potencia reactiva. Cualquier otra relación con la fase involucrará también una variación en la potencia activa.

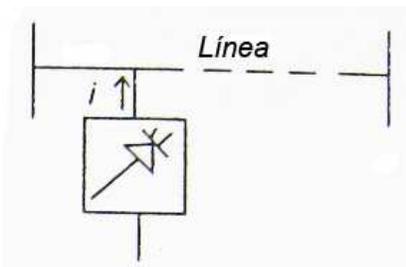


Figura 12. Controlador Shunt

**Combinación de controladores Serie-Serie:** Una combinación de controladores Serie-Serie, como el de la Figura 13, puede estar compuesta de dos controladores Serie separados, pero que funcionan de manera coordinada en un sistema de transmisión multilínea. Otra forma puede ser un control unificado en el cual los controladores serie entregan una compensación reactiva en serie independiente para cada línea pero también transfiere potencia activa entre las líneas a través de un enlace de poder. La capacidad de transferir potencia activa del controlador Serie-Serie unificado hace posible el balance del flujo de potencia activa y reactiva en las líneas, permitiendo la maximización de la utilización del sistema de transmisión. Al decir “unificado” se quiere dar a entender que los terminales de todos los controladores conversores son conectados juntos para realizar la transferencia de potencia activa.

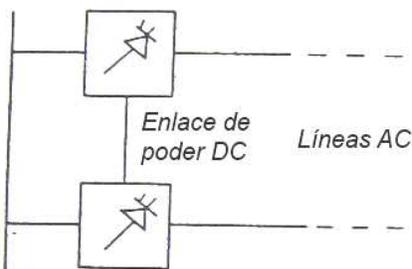


Figura 13. Controlador Serie-Serie

**Combinación de controladores Serie-Shunt:** Una combinación de controladores Serie-Shunt, como la de la Figura 14, puede estar compuesta por controladores Serie y Shunt separados, pero que funcionan de manera coordinada o que funcionan en un control unificado de flujo de potencia con elementos serie y shunt. La característica principal del controlador Serie-Shunt es que inyecta corriente al sistema con la parte Shunt del controlador y voltaje en serie en la línea con la parte Serie del controlador. Sin embargo, cuando los controladores Shunt y Serie se unen existe un intercambio de potencia activa entre el controlador Serie y el Shunt a través del enlace de poder Figura 15.

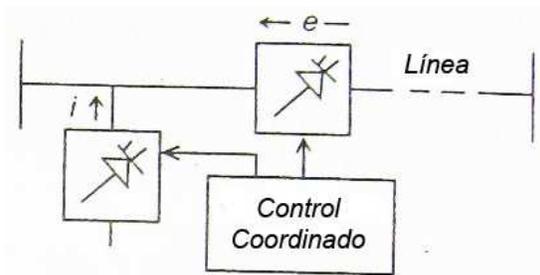


Figura 14. Controlador Serie-Shunt coordinado.

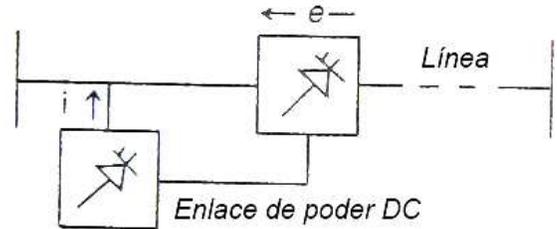


Figura 15. Controlador Serie-Shunt con unificación de flujo de potencia.

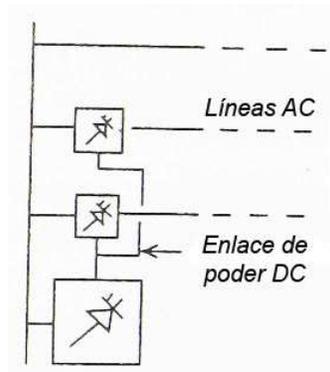
### 2.6.2. Importancia de los diferentes tipos de controladores

Es importante mencionar que el controlador conectado en serie interviene en el manejo del voltaje y como consecuencia en la corriente y el flujo de potencia. Por lo tanto si el propósito de la aplicación es controlar la corriente y/o flujo de potencia y oscilaciones amortiguadas, el controlador Serie, dado cierta cantidad de MVA, es muchas veces más poderoso que el controlador Shunt.

Por otro lado el controlador Shunt se asemeja a una fuente de corriente que absorbe o inyecta corriente en la línea. Por ello el controlador Shunt es un buen método para controlar el voltaje en y en la cercanía del punto de conexión por medio de inyección de corriente reactiva solamente o por medio de la combinación de corriente activa y reactiva para un control más efectivo del voltaje y las oscilaciones amortiguadas del voltaje.

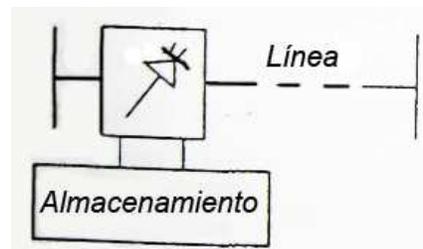
Los controladores Serie-Serie conectados han sido diseñados para manejar contingencias y sobrecargas dinámicas o evitar corrientes de corto circuito. Ellos deben ser protegidos cuando la corriente de falla es demasiado alta, pero deben ser ajustados de modo de poder manejar las contingencias y dinámica de una sobrecarga.

Se desprende de los párrafos anteriores que el controlador combinado Serie-Shunt puede entregar lo mejor de cada uno, es decir, un control efectivo de potencia/flujo de corriente y el control del voltaje de la línea. En este caso el controlador puede ser una sola unidad operando coordinadamente con los controladores individuales de cada línea como se muestra en la Figura 16.



**Figura 16. Controlador combinado Serie-Shunt coordinado.**

Los controladores FACTS pueden estar basados en tiristores sin compuerta de apagado (turn-off gate) o con dispositivos de electrónica de potencia con compuerta de apagado. La mayoría de los controladores con dispositivos con compuerta de apagado son la base de los convertidores DC/AC, los cuales pueden realizar el intercambio de potencia activa y reactiva con el sistema AC. Cuando el intercambio solo involucra potencia reactiva, ella es proporcionada por una mínima capacidad de almacenamiento en el lado DC, sin embargo, si el voltaje o corriente AC que debe ser generado se desvía de los  $90^\circ$  con respecto a la corriente o voltaje, respectivamente, el almacenamiento del convertidor del lado DC debe ser aumentado por sobre el mínimo requerido si es que fuera solo una fuente de potencia reactiva. Esto debe ser hecho en el nivel de convertidor para abastecer el consumo transitorio necesario. Además, otra fuente de almacenamiento como baterías, superconductores magnéticos, o cualquier otra fuente de energía puede ser agregada e paralelo a través de una interface electrónica que complemente el almacenamiento DC del convertidor. Cualquiera de los controladores basados en convertidores, como serie, shunt y combinaciones, puede alojar algún sistema de almacenamiento como condensadores, baterías o superconductores magnéticos dándole al equipo FACTS una nueva cualidad. Ejemplos de ese esquema se pueden ver en Figura 17, Figura 18 y Figura 19.



**Figura 17. Controlador Serie con almacenamiento.**

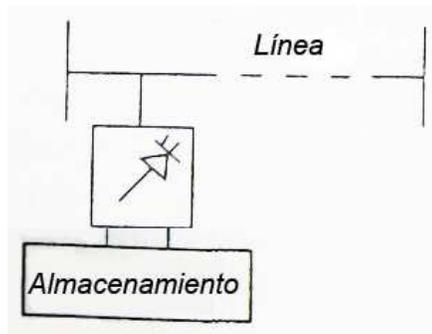


Figura 18. Controlador Shunt con almacenamiento.

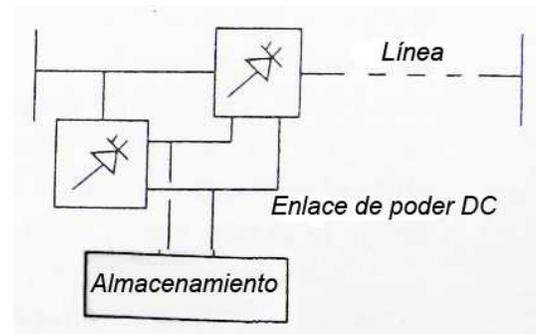


Figura 19. Controlador Serie-Shunt con almacenamiento.

El beneficio de agregar un sistema de almacenamiento es significativo, ya que un controlador dotado de este sistema es mucho más efectivo para el control de la dinámica del sistema que uno sin el sistema. Este hecho ha motivado a los ingenieros a re-pensar el papel que juega el almacenamiento en este tipo de dispositivos, en particular en un dispositivo que pueda entregar o absorber grandes cantidades de potencia activa en periodos cortos de tiempo.

Un controlador basado en convertidores también puede ser diseñado con lo que se conoce como modulación del ancho del pulso (PWM) con la finalidad de reducir las armónicas de bajo orden a un nivel muy bajo. De hecho un convertidor puede ser diseñado de manera tal que genere la correcta forma de onda de modo de actuar como filtro activo. También puede ser controlado y operado para lograr equilibrar los desbalances de voltaje, a través de transferencias de energía entre fases.

### 2.6.3. Descripción y definición de los controladores FACTS

#### Conexión serie

**Static Synchronous Compensator (STATCOM):** Es un generador sincrónico estático operado como un “Static var compensator” cuya corriente de salida capacitiva o inductiva puede ser controlada independiente del sistema AC de voltaje. Los STATCOM son los controladores claves en materia de FACTS. Pueden estar basados en convertidores de corriente o de voltaje. La Figura 20 muestra un diagrama simple de una línea de un STATCOM basado en un convertidor de fuente de voltaje y un convertidor de fuente de corriente.

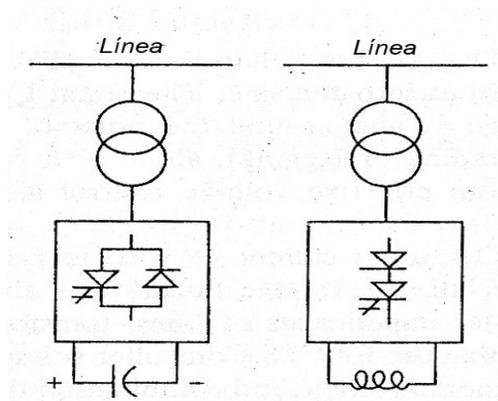


Figura 20. STATCOM basados en convertidores con fuentes de voltaje y corriente.

**Static Synchronous Generator (SSG):** Es un convertor estático switching de potencia auto-conmutado abastecido de una fuente apropiada de energía eléctrica y operado para producir una gama salidas de voltaje multifase ajustables, las cuales pueden ser acopladas a un sistema AC de potencia con el propósito de intercambiar en forma controlada e independiente potencia activa y reactiva. De lo anterior se puede inferir con claridad que un SSG corresponde a la combinación de un STATCOM con cualquier sistema de almacenamiento de energía para entregar o absorber potencia. En general se necesita agregar una interfaz para poder conectar el sistema de almacenamiento y el STATCOM, y el más conocido es el denominado “chopper”. En la Figura 21 se puede apreciar un esquema del SSG.

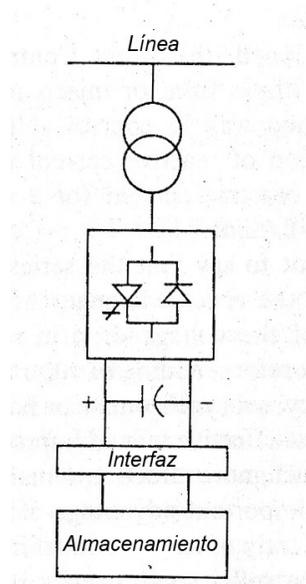


Figura 21. Esquema de los elementos de un SSG.

**Static Var Compensator (SVC):** Es un compensador estático de conexión Shunt capaz de inyectar o absorber ajustando su salida para intercambiar corriente capacitiva o inductiva de modo de mantener ciertos parámetros específicos de un sistema de potencia, típicamente una barra de tensión. El SVC está basado en tiristores sin la capacidad de apagado (turn-off gate). En él se incluyen dispositivos separados para adelantar o retrasar variables, el “Thyristor-controlled reactor” o el “Thyristor-switched reactor” para la absorber la potencia reactiva y el “Thyristor-switched capacitor” para entregar la potencia reactiva. El SVC es considerado como la alternativa a más bajo costo de un STATCOM. En la Figura 22 se puede apreciar al SVC.

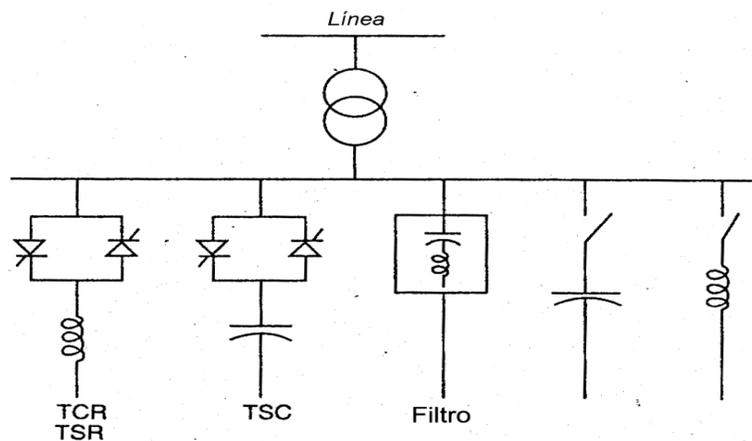


Figura 22. Esquema de conexión un SVC o SVG con TCR, TSC, TSR y filtro.

**Thyristor Controlled Reactor (TCR):** Es un dispositivo de conexión Shunt de tiristor inductivo controlado (Thyristor-controller inductor) cuya reactancia efectiva es variada de forma continua mediante la “conducción parcial” controlada por la válvula del tiristor. El TCR es un subconjunto de los SVC, en los cuales el tiempo de conducción, y por ello la corriente de un reactor Shunt, es controlado por tiristores con control del ángulo de disparo.

**Thyristor Switched Reactor (TSR):** Es un dispositivo de conexión Shunt de tiristor inductivo con interruptor (Thyristor-switched) cuya reactancia efectiva es variada de forma saltos por una conducción completa o nula operada en la válvula del tiristor. El TSR está hecho de varias inductancias conectadas en Shunt las cuales son activadas por tiristores sin ningún control de ángulo de disparo de modo de entregar los saltos o pasos de cambio en la potencia reactiva consumida del sistema. Este sistema resulta de bajo costo y pérdidas, pero sin ningún control continuo.

**Thyristor Switched Capacitor (TSC):** Es un dispositivo de conexión Shunt de tiristor capacitivo con interruptor (Thyristor-switched) cuya reactancia efectiva es variada de forma saltos por una conducción completa o nula operada en la válvula del tiristor. El TSC es también un subconjunto de los SVC y está basado en tiristores que actúan como interruptores AC, que permiten conectar o desconectar los condensadores conectados en Shunt, de modo de realizar el paso que permite realizar el cambio en la potencia reactiva inyectada al sistema.

**Thyristor Controlled Braking Resistor (TCBR):** Es un dispositivo de conexión Shunt de tiristores que activan resistencias, los cuales son controlados para ayudar la estabilización del sistema de potencia o minimizar las aceleraciones de la unidad generadora cuando ocurren perturbaciones. El TCBR involucra un “switchero” ciclo a ciclo de la resistencia por medio de tiristores con algún control de ángulo de disparo. El esquema del TCBR se puede ver en la Figura 23.

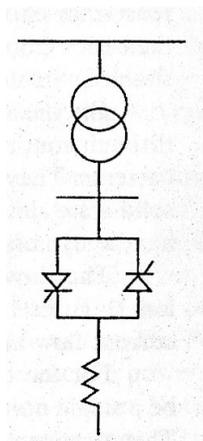


Figura 23. Esquema del TCBR.

### Interconectados serie

**Static Synchronous Compensator (SSSC):** Es un generador sincrónico estático operado sin ninguna fuente de energía externa cuyo voltaje esta en cuadratura con la corriente de línea con el propósito de aumentar o disminuir el voltaje reactivo del conjunto por medio de la línea y con ello controlar la potencia transmitida. El SSSC puede incluir un valor de almacenamiento transitorio de energía o dispositivos de almacenamiento de energía de modo de aumentar el comportamiento dinámico del sistema de potencia por medio de una compensación temporal de potencia activa para aumentar o disminuir momentáneamente la componente real del voltaje (resistiva) a través de la línea. El SSSC es uno de los más importantes equipos FACTS y es similar a un STATCOM excepto por que su voltaje AC de salida está en serie con la línea. En la Figura 24 se puede apreciar el

esquema de un SSSC y en la Figura 25 un SSSC con sistema de baterías o superconductores magnéticos para el almacenamiento de energía.

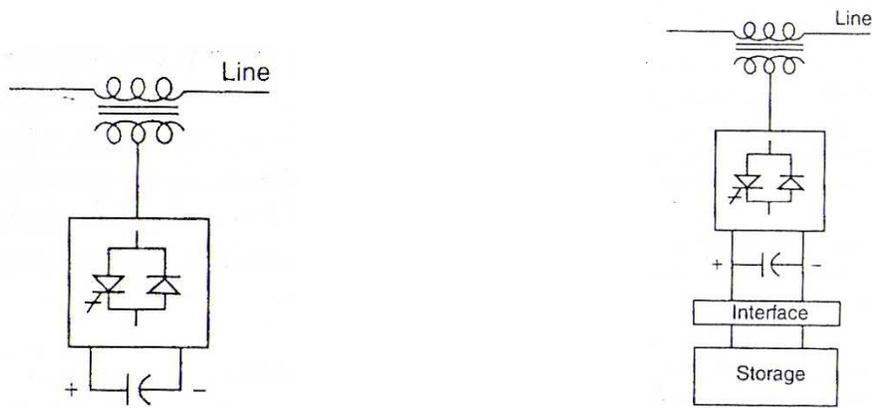


Figura 24. Compensador sincrónico estático serie (SSSC).      Figura 25. SSSC con interfaz y almacenamiento de energía

**Interline Power Flow Controller (IPFC):** Aún no está definido por la IEEE, pero podríamos decir que es la combinación de dos o más SSSC los cuales están acoplados por medio de un enlace DC de modo de facilitar el flujo bi-direccional de potencia activa entre los terminales AC de los SSSCs, y son controlados para proveer en forma independiente la compensación reactiva para ajustar el flujo de potencia activa en cada línea y mantener la cantidad deseada de flujo de potencia reactiva en las líneas. La estructura del IPFC puede incluir un STATCOM para proveer la compensación reactiva shunt e inyectar o absorber el déficit de potencia activa del conjunto de SSSCs.

**Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC):** Es un compensador de reactancia capacitivo que está compuesto por bancos de condensadores en serie conectados en shunt con tiristor reactivo controlado de modo de proveer en forma silenciosa reactancia capacitiva en serie variable. El esquema del TCSC se puede ver en la Figura 26. Está basado en tiristores sin la capacidad de apagado.

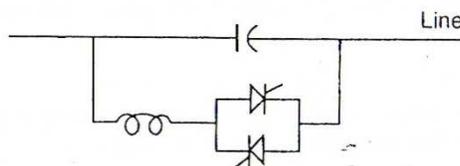


Figura 26. Tiristor controlado por condensador serie.

**Thyristor-Switched Series Capacitor (TSSC):** Es un compensador de reactancia capacitiva que está compuesto por bancos de condensadores en serie conectados en shunt con un tiristor interruptor reactor de modo de proveer en forma de saltos la reactancia capacitiva en serie.

**Thyristor-Controlled Series Reactor (TCSR):** Es un compensador de reactancia inductiva que está compuesto por bancos de inductancias en serie conectados en shunt con tiristor reactivo controlado de modo de proveer en forma silenciosa reactancia capacitiva en serie variable.

**Thyristor-Switched Series Reactor (TSSR):** Es un compensador de reactancia inductiva que está compuesto por bancos de inductancias en serie conectados en shunt con un tiristor interruptor reactor de modo de proveer en forma de saltos la reactancia inductiva en serie.

#### Combinación shunt y serie de controladores conectados

**Unified Power Flow Controller (UPFC):** Es una combinación de un STATCOM y un compensador estático en serie (SSSC) los cuales son acoplados, por medio de un enlace DC común, para permitir el flujo bi-direccional de potencia activa entre los terminales de salida de el SSSC y la salida shunt del STATCOM para ser controlados y proveer la compensación activa y reactiva de la línea sin utilizar fuentes externas de energía eléctrica. El UPFC se puede apreciar en la Figura 27.

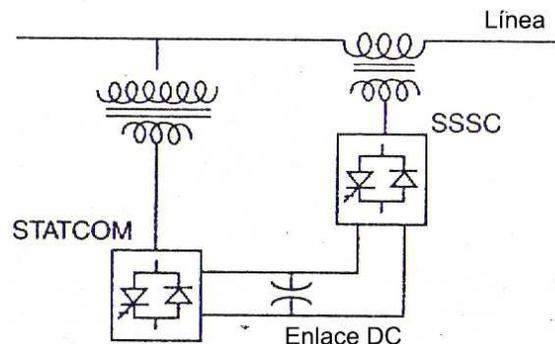


Figura 27. Controlador unificado de flujo de potencia (UPFC).

**Thyristor-Controlled Phase Shifting Transformer (TCPST):** Es un transformador desfasador ajustado por un tiristor interruptor para permitir un rápido cambio de ángulo de fase. En general el cambio de fase es obtenido agregando, en serie, un vector voltaje perpendicular con una fase. Este vector proviene de las otras dos fases por medio de una conexión shunt de los transformadores. El esquema se puede apreciar en la Figura 28.

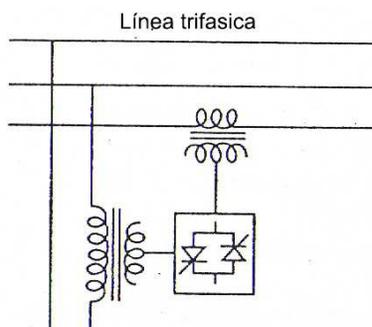


Figura 28. Transformador desfasador controlado por tiristor (TCPST).

**Interphase Power Controller (IPC):** Es un controlador conectado en serie de potencia activa y reactiva constituido en cada fase por ramas capacitivas e inductivas sujetadas separadamente de desfases de voltaje. La potencia activa y reactiva puede ser independientemente asignada ajustando los desfases y/o las impedancias de las ramas usando interruptores mecánicos o electrónicos. En el caso particular de impedancias capacitivas e inductivas formando un par conjugado, cada terminal del IPC es una fuente pasiva de corriente dependiente del voltaje en el otro terminal.

## 2.7. Formas de almacenar energía

La electricidad es una energía secundaria, es decir que es resultado de la transformación de energía primaria<sup>1</sup>. Una característica fundamental es que esta energía no es almacenable: la electricidad producida es instantáneamente consumida o perdida. El problema de almacenar este tipo de energía se soluciona produciéndola rápidamente en sistemas autónomos (no conectados a la red). Ejemplos de ello son las pilas y baterías basadas en las reacciones químicas. Estas tecnologías presentan inconvenientes que limitan su utilización como: el peso, el costo, su baja productividad, y en algunos casos la peligrosidad de sus componentes (ácidos, plomo). A continuación se revisarán algunos métodos de almacenamiento de energía.

### 2.7.1. Las baterías

Se le llama batería o acumulador eléctrico al dispositivo que almacena energía eléctrica usando procedimientos electroquímicos y que posteriormente la devuelve casi en su totalidad; este ciclo puede repetirse por un determinado número de veces y no se puede realizar sin que se le haya suministrado electricidad previamente mediante lo que se denomina proceso de carga. Se pueden conectar en serie y/o paralelo varias de ellas formando lo que se denomina bancos de baterías, en donde dependiendo del tipo de conexión empleado se pueden aumentar el valor del voltaje o corriente que tenía una sola batería.

Los sistemas de fuentes de energía ininterrumpibles (UPS) se han convertido en elementos imprescindibles en el comercio, la industria y servicios de importancia. Mientras en el lado AC de las UPS no ha existido un desarrollo significativo, en el lado DC donde almacenamos la energía se ha observado un avance dinámico y han surgido nuevas y mejoradas tecnologías. ¿Por qué? Porque las fallas en las baterías son mucho más comunes que otros desperfectos atribuibles al funcionamiento del aparato. En la Figura 29 se puede apreciar una configuración típica:

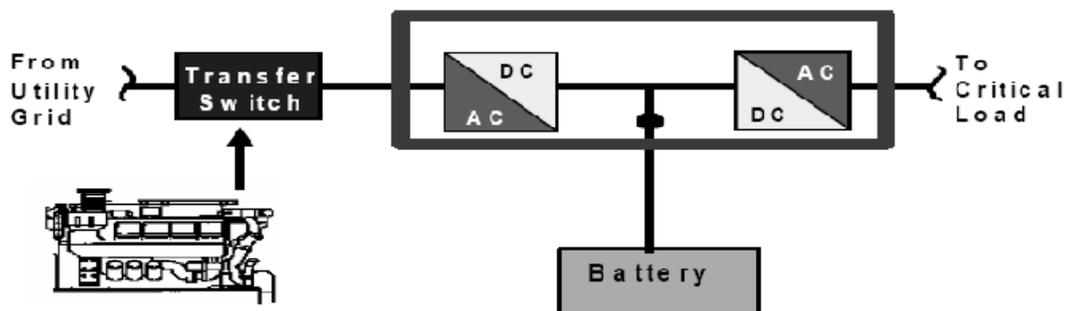


Figura 29. Configuración típica de un sistema de potencia crítica. Fuente [6].

<sup>1</sup> Energía primaria es la energía contenida en los combustibles crudos y otras formas de energía recibidas por un sistema como una entrada al sistema.

Todavía las baterías son en Acido-Plomo (Lead Acid, LA) y se ve lejano, por el momento, dejar de vender este tipo de baterías como medio DC de almacenar energía. A continuación se presenta una breve descripción de los tipos de baterías existentes. [6]

**Baterías de Plomo-Acido sumergidas (FLA):** Las baterías FLA (Flooded Lead Acid) también conocidas como baterías húmedas han sido la primera opción de los diseñadores para aplicaciones de UPS críticas por décadas. Estos sistemas de baterías son normalmente confiables y duran de 2/3 a 3/4 de los 20 años que se garantizan. La falla común que pueden presentar es que se abra una de las celdas, pero para que suceda esto deben ser golpeadas fuertemente y en tal caso se rompen y el electrolito escurre dejando fuera de servicio la batería lo cual es un problema ya que generalmente no se utilizan solas sino que en arreglos de varias baterías, es decir, queda fuera de servicio el arreglo completo. Estas baterías son grandes y muy pesadas por lo cual deben estar en estructuras lo suficientemente fuertes para resistir el peso. Requieren de un estricto mantenimiento. También el lugar en que se encuentren debe ser espacioso, con buena ventilación, refrigeración y dotado del equipo necesario en caso de emergencia como sistemas de detección de hidrogeno, duchas, lava manos, ojos, etc. El costo de la batería instalada es muchas veces comparable a comprar baterías SLA (Sealed Lead Acid) que son selladas, pero las LA son bastante más confiables. El arreglo de baterías con mayor capacidad 40[MWh] se ubica en Chino, California y fue construido en 1988. [6]

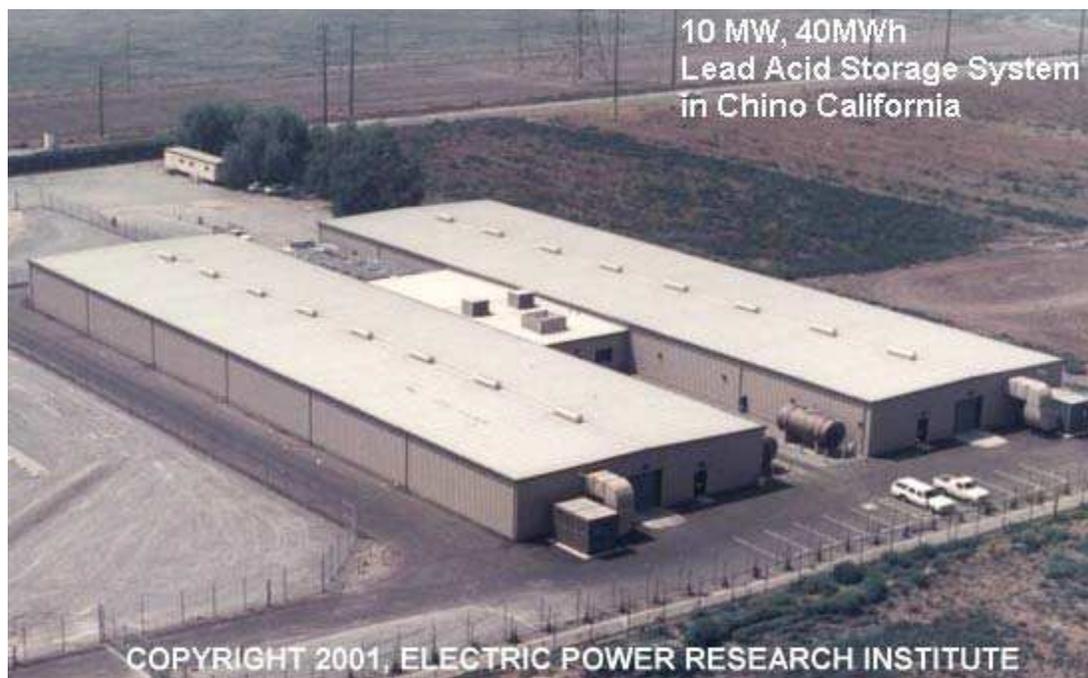


Figura 30. Sistema de almacenamiento de baterías en Chino, California. Fuente: EPRI.

**Baterías de Plomo-Acido selladas (SLA):** Las baterías SLA (Sealed Lead Acid) también conocidas como recombinantes o mal llamadas “Libres de mantenimiento” son fabricadas por docenas de empresas. Para aplicaciones de UPS las más comunes son las VRLA (Valve Regulated LA) las cuales son diseñadas para una vida de 5 años. Estas baterías son generalmente garantizadas por 5 o 10 años de vida útil, pero su funcionamiento comienza a decaer entre el tercer y el quinto año. Las baterías SLA generalmente son utilizadas para UPS pequeñas y para abastecer consumo no tan críticos. Son bastante más baratas, pesan la mitad y su tamaño es la mitad de una FLA. Por su construcción estos productos son sellados, luego no es posible agregarles agua. Durante la electrolisis de carga y descarga, el hidrogeno es generado, atrapado y recombinado con el oxigeno generado para formar el agua necesaria. Este proceso es eficiente pero no un 100%. Algunos de los gases generados son perdidos por sobrepresión y lanzados a través de las válvulas integradas provocando lo que se conoce como “Dryout” que es una circunstancia en que se provoca una condición de circuito abierto causando la pérdida de un arreglo completo debido a una sola celda. [6]



Figura 31. Gabinete con baterías de tipo SLA. Fuente: ESA.

**Baterías de Níquel Cadmio (NiCad):** Las baterías de NiCad han sido producidas por mucho tiempo, hasta hace poco, en ambas versiones: selladas y ventiladas y con una gran variedad de diseños y materiales. Son mucho más caras que las baterías LA, pero es relativamente raro que se utilicen en aplicaciones UPS. Las NiCad's hacen mejor el trabajo que una LA en ciclos, temperatura, densidad de energía, predictividad y confiabilidad. Por todas estas razones son excelentes candidatos para dar la partida a generadores. Sin embargo, presentan problemas medio ambientales debido a la presencia del Cadmio. OHSAS<sup>2</sup> ha etiquetado el Cadmio como extremadamente tóxico causando numerosas muertes en soldadores que inhalaron sus gases en forma involuntaria. Esto impide utilizar este tipo de baterías en ambientes cerrados en los cuales si se produjera fuego existiría

---

<sup>2</sup> OHSAS (*Occupational Health and Safety Management Systems*, Sistemas de Gestión de Salud y Seguridad Laboral) se refiere a una serie de especificaciones sobre la salud y seguridad en el trabajo, materializadas por [BSI \(British Standards Institution\)](#) en la [OHSAS 18001 y OHSAS 18002](#)

peligro de muerte. Otro punto en contra es el llamado “Efecto memoria” que en el caso de las UPS donde la descarga es muy suave y corta, hace que la batería acorte su vida útil. [6]

**Baterías de Níquel e Hidruro Metálico (NiMH):** Las baterías de NiMH han sido muy utilizadas en vehículos eléctricos híbridos durante varios años. Al igual que las de Ión de Litio, NiCad, las baterías de NiMH son mucho más caras que las SLA. A pesar de eso las características de las NiMH las hacen aparecer como una alternativa particularmente buena para una aplicación UPS. Tests han indicado que soportan cientos de miles de ciclos de carga y descarga en los convencionales cortes de servicio de una UPS sin impactar su vida útil. La temperatura, principal causa de pérdida total de una LA, casi no afecta a una NiMH, pueden trabajar confortablemente hasta los 40°C. Pueden almacenar un 30% más de energía que una batería de NiCad equivalente, y por tanto, la carga dura más tiempo. La construcción de este tipo de baterías hace impredecible detectar fallas de circuitos abiertos, sin embargo, una falla de este tipo está proyectada para al menos 10 años y estará precedida de una subida larga de la impedancia que debe ser tomada como advertencia. [6]



Figura 32. Sistema de baterías de NiMH. Fuente: Mission Critical West Inc.

**Baterías de Ión de litio o de polímero de litio (Li-Ion):** Las baterías de litio están muy cerca de ser “libres de mantenimiento”, capaces de altos ciclos trabajo, no generan hidrogeno y son de la mitad del tamaño de una SLA. Al igual que las NiMH son altamente utilizadas en computadores portátiles, teléfonos celulares y aplicaciones en vehículos eléctricos. El costo es muy parecido al de las NiMH. Una de las preocupaciones ha sido las explosiones que se han presentado con el litio y en particular con algunos tipos de baterías. El litio se vuelve inestable en el aire y en muchos, pero quizás no en todos los diseños de baterías existen riesgos y estos solo pueden ser minimizados con el estudio en el tiempo. Las desventajas que tiene es su vida útil que está entre la mitad y un cuarto de la de NiMH, su alto costo y los estudios de seguridad, que hacen limitar sus aplicaciones. Se espera que en el futuro se puedan revertir estas desventajas. A continuación se muestran algunas figuras asociadas a estas baterías.

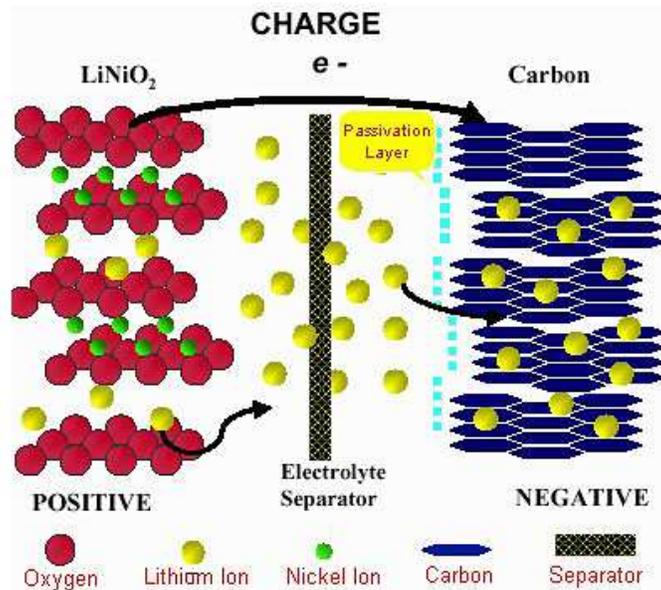


Figura 33. Esquema de la estructura interna. Fuente: SAFT America.



Figura 34. UPS basada en baterías de Li-Ion. Fuente: SAFT America.

### 2.7.2. Los condensadores

Un condensador o un capacitor es un elemento que permite almacenar energía en forma pasiva. Está compuesto por dos superficies conductoras entre las cuales existe un campo eléctrico tal que las líneas de campo eléctrico que salen de una superficie conductora llegan a la otra lo que se denomina como influencia total.

Estas superficies conductoras son en general placas esferas o láminas separadas por un material con propiedades dieléctricas o el vacío, cuya finalidad es disminuir el campo eléctrico. Estas placas están sometidas a una diferencia de potencial (d.d.p.) lo que provoca

que se carguen las placas, una con carga positiva y otra negativa, sin embargo la carga resultante es cero.

La carga almacenada en una de las placas es proporcional a la d.d.p. entre esta placa y la otra, siendo la constante de proporcionalidad la llamada *capacidad* o *capacitancia*. En el Sistema Internacional de unidades se mide en Faradios (F), siendo 1 faradio la capacidad de un condensador en el que, sometidas sus armaduras a una d.d.p. de 1[V], estas adquieren una carga eléctrica de 1 culombio [cb].

El valor de la capacidad de un condensador viene definido por la siguiente fórmula:

$$C = \frac{Q_1}{V_1 - V_2} = \frac{Q_2}{V_2 - V_1}$$

**Ecuación 18**

Donde C es la capacidad,  $Q_1$  es la carga almacenada en la placa 1 y  $V_1 - V_2$  es la diferencia de potencial entre la placa 1 y la 2.

Como materiales con propiedades dieléctricos tenemos: Aire, Mica, Papel Aluminio, Tantalio, Mylar, Styroflex, Cerámico, Policarbonato, Polipropileno, etc. A continuación se describen brevemente algunos de ellos:

**Dieléctrico de aire:** Se trata de condensadores, normalmente de placas paralelas, con dieléctrico de aire y encapsulados en vidrio. Como la permitividad eléctrica relativa es la unidad, sólo permite valores de capacidad muy pequeños. Se utilizó en radio y radar, pues carecen de pérdidas y polarización en el dieléctrico, funcionando bien a frecuencias elevadas.

**Dieléctrico de mica:** La mica posee varias propiedades como bajas pérdidas, exfoliación en láminas finas, soporta altas temperaturas y no se degrada por oxidación o con la humedad. Sobre una cara de la lámina de mica se deposita aluminio, que forma una armadura. Se apilan varias de estas láminas, soldando los extremos alternativamente a cada uno de los terminales. Estos condensadores funcionan bien en altas frecuencias y soportan tensiones elevadas, pero son de costo elevado y se ven gradualmente sustituidos por otros tipos.

**Dieléctrico de papel:** El papel parafinado, bakelizado o sometido a algún otro tratamiento que reduce su higroscopia y aumenta el aislamiento. Se apilan dos cintas de papel, una de aluminio, otras dos de papel y otra de aluminio y se enrollan en espiral. Las cintas de aluminio constituyen las dos armaduras, que se conectan a sendos terminales. Se utilizan dos cintas de papel para evitar los poros que pueden presentar.

**Dieléctrico electrolítico:** El dieléctrico es una disolución electrolítica que ocupa una cuba electrolítica. Con la tensión adecuada, el electrolito deposita una capa aislante muy fina sobre la cuba, que actúa como una armadura y el electrolito como la otra. Se consiguen capacidades muy elevadas, pero tienen una polaridad determinada, por lo que no son adecuados para funcionar con corriente alterna. La polarización inversa destruye el óxido, produciendo una corriente en el electrolito que aumenta la temperatura, pudiendo hacer arder o estallar el condensador.

**Dieléctrico cerámico:** Se utilizan cerámicas de varios tipos para formar el dieléctrico. Existen tipos formados por una sola lámina de dieléctrico, pero también los hay formados por láminas apiladas. Dependiendo del tipo, funcionan a distintas frecuencias, llegando hasta las microondas.

El condensador almacena energía eléctrica, debido a la presencia del campo eléctrico en su interior cuando aumenta la d.d.p. entre sus terminales y devolviéndola cuando ésta d.d.p. disminuye. La energía almacenada se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$W = \int \left( \frac{1}{2} \epsilon E^2 \right) dV = \frac{1}{2} C (V_1 - V_2)^2 = \frac{1}{2} Q_1 (V_1 - V_2) = \frac{Q_1^2}{2C}$$

**Ecuación 19**

Donde E es el módulo del campo eléctrico,  $\epsilon$  es la permitividad del dieléctrico, V es el voltaje, Q la carga, C la capacidad.

La capacidad de 1 farad es mucho más grande que la de la mayoría de los condensadores, por lo que en la práctica se suele indicar la capacidad en micro-  $\mu\text{F} = 10^{-6}$ , nano-  $\text{nF} = 10^{-9}$  o pico-  $\text{pF} = 10^{-12}$  -faradios. Los condensadores obtenidos a partir de supercondensadores (EDLC) son la excepción.

**Los súpercondensadores:** o ultracondensadores eléctricos de doble capa (también conocidos como EDLCs por sus siglas en inglés) son condensadores electroquímicos que tienen una densidad de energía inusualmente alta en comparación con los condensadores comunes, generalmente miles de veces mayor que un condensador electrolítico de alta capacidad. Según la literatura investigada [7], [8], [9] los supercondensadores se pueden clasificar en:

#### **Electrolíticos de interfaz de carbono de doble capa:**

Los principales son los que utilizan hidróxido de sodio y potasio o ácido sulfúrico. En ellos la disolución se disocia en iones positivos de sodio o potasio, que ante la presencia de voltaje por aumento de la atracción entre cargas se acumula una mayor energía eléctrica.

### **No electrolíticos de interfaz de carbono de doble capa:**

Los principales son los que son elaborados como aerogeles, soles, los de nanotubos de carbono y carbón activado. Los soles son dispersiones de partículas sólidas en líquido que se encuentran indefinidamente en movimiento browniano. En cambio un gel es un sólido que posee una gran cantidad de líquido y una estructura que permite que se encuentren ambas fases combinadas. Para la formación de soles para capacitores se forma el óxido de metal elegido en agua, sea a altas temperaturas o con un exceso de base para formar el sol. Posteriormente el sol es gelado por deshidratación o aumento de pH. También se pueden formar soles orgánicos con resorcinol en formaldehído. El resultado de los procesos es la formación de un material homogéneo muy poroso que permite una alta capacitancia. Si el sol es combinado con la interfaz de carbono se calcula que puede alcanzarse una capacitancia de 400 faradios por gramo. [14]

### **Acuosos de óxido de doble capa con pseudocapacitancia redox:**

Los principales son los de óxido de litio, bióxido de rutenio, bióxido de iridio, óxido de cobalto y bióxido de manganeso. Los supercapacitores pueden fabricarse siguiendo la metodología de la sección anterior para elaborar un sol. Otra forma de obtenerlo es por la deposición de un óxido metálico por medio de un procedimiento de electrólisis. Se han hecho investigaciones donde se han alcanzado capacitancias de 400 F/g con óxido de rutenio [15]. Supercapacitores más rentables de alrededor de 50 F/g se han logrado con óxido de níquel [14]. Una forma alternativa para generar la estructura porosa es la adición de óxido de litio a un metal como el platino; este material se le agrega ácido para retirar el litio y mantener la estructura porosa de escala nanométrica. [16]

### **Polímeros conductores:**

Se define como polímero conductor como una sustancia orgánica que conduce la electricidad de manera parecida a la de un metal, buena reversibilidad entre estado conductor y no conductor y flexibilidad mecánica. Los principales son los de politiofeno, polipirrol y polianilina. Tienen una densidad de energía mayor a 500 Watts por kilogramo, y aún se estudian sus propiedades de capacitancia [17].

**Aplicaciones de los súpercondensadores:** El principal impulsor en el desarrollo e investigación en materia de súpercondensadores ha sido que su utilización tiene enormes ventajas para el desarrollo de circuitos eléctricos. Entre ellas podemos nombrar:

- Gran período de operación
- Capacidad de manejar altos valores de corriente
- Valor de carga fácil de monitorear
- Alta eficiencia
- Gran rango de voltaje
- Gran rango de temperatura
- Ciclos de funcionamiento largos

## Facilidad de mantenimiento

La vida útil de un supercapacitor disminuye conforme aumenta su capacitancia, pero actualmente contamos con dispositivos que superan una vida útil de veinte años con pérdidas en el voltaje suministrado de alrededor de un volt.

Existen aplicaciones de estos dispositivos en automóviles híbridos y desde el año 2000 se probó con éxito en los autobuses de transporte de personal de la NASA obteniéndose mínimas pérdidas de energía.

También existen prototipos en elevadores donde se requieren de ciclos en los cuales una etapa se requiere una baja descarga de energía y otros de una alta descarga (como cuando el elevador desciende y asciende). Esta demanda requiere de sistemas que permitan una regulación precisa de la energía suministrada y una alta capacidad de almacenamiento de energía. De esta manera los supercapacitores suministran la energía necesaria para subir el elevador sin necesidad de sobrecargar la red eléctrica.

En el área de energía las propiedades de los supercapacitores son de gran importancia para la transferencia de energía. En los sistemas STATCOM (Compensadores Estáticos) se utilizan para el control de los picos de voltaje en sistemas eléctricos. Cuando se conectan con sistemas de transferencia de potencia a elementos STATCOM, se produce una gran inductancia que produce un incremento en la corriente y picos de voltaje, por lo que es necesario tener capacitores de gran capacitancia para compensar este fenómeno. Su uso permite mantener una corriente constante y menores picos de voltaje para facilitar la transmisión de la energía eléctrica [18].

### 2.7.3. Discos de inercia

Una batería inercial es un acumulador eléctrico que almacena energía, en forma de energía cinética, utilizando para ello un volante o disco giratorio. Con base en este principio se ha diseñado un sistema que:

- Almacena mucha energía utilizando un disco con mucha masa, de gran diámetro o que gira a gran velocidad.
- No pierda su energía con rapidez. Se consigue eliminando los rozamientos. Para reducir la fricción se utilizan cojinetes magnéticos, que evitaba todo contacto, y la cámara que contiene al disco se hace al vacío.

El material más adecuado para fabricar el disco es la fibra de carbono. Aunque tiene menor densidad que el acero, es más resistente y puede girar a mayor velocidad, hasta 100.000 rpm. Sólo falta que un sistema eléctrico acelere el disco para cargarlo de energía y lo decelere para hacerle devolver su energía. Este sistema es muy útil para vehículos, ya que puede suministrar una gran cantidad de potencia en aceleraciones, y absorberla también de manera casi instantánea, en frenadas o retenciones. Tampoco tienen efecto memoria y almacenan mucha más energía en relación a su peso, comparado con las baterías químicas. Un problema de este sistema es el efecto giroscópico que produce un disco girando a altas

revoluciones. Para minimizarlos se suele utilizar dos discos girando uno en sentido contrario al otro. [6]

**Discos de inercia de baja velocidad:** Fueron definidos arbitrariamente así los que poseen una velocidad inferior a las 10000 [RPM]. Necesariamente estos aparatos deben tener una masa grande, de modo de poder proveer la energía y potencia requerida. Todos los modelos que existen en el mercado poseen un disco de acero junto con otros elementos de materiales poco comunes. El diseño puede variar desde lo vertical a lo horizontal, dependiendo de la construcción y necesidades de la máquina. Utilizan suspensiones mecánicas, pero últimamente han salido modelos con suspensiones magnéticas. Son diseñados para proveer de hasta 100[KVA]. [6] En la Figura 35 se puede apreciar uno de estos aparatos:

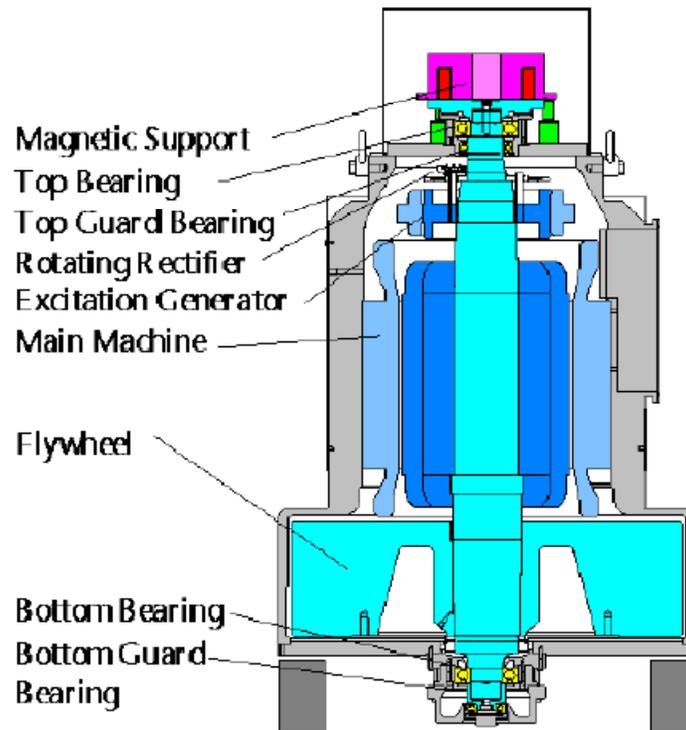


Figura 35. Disco de inercia de baja velocidad. Fuente: Piller Inc.

**Discos de inercia de alta velocidad:** Son relativamente nuevos en el mercado de las UPS. En este caso la potencia y energía asociada es mucho mas proporcional a la velocidad que a la masa. Este hecho posibilita la eliminación de soportes mecánicos y permitiendo la entrada de soportes magnéticos sin contacto. La primera y mínima mantención esta pronosticada para los 20 años de servicio. En general están diseñados para proveer de hasta 750[KVA]. [6] En la Figura 36 se muestran discos de inercia de alta velocidad.



**Figura 36. Disco de inercia de alta velocidad. Fuente: Vycon.**

# Capítulo 3

## 3. Diseño del modelo

### 3.1. Principio de operación de un STATCOM

En su forma más general, el STATCOM puede ser modelado como una fuente de voltaje regulada  $V_s$  conectada a una barra de voltaje  $V_o$  a través de un transformador como puede apreciarse en la Figura 37.

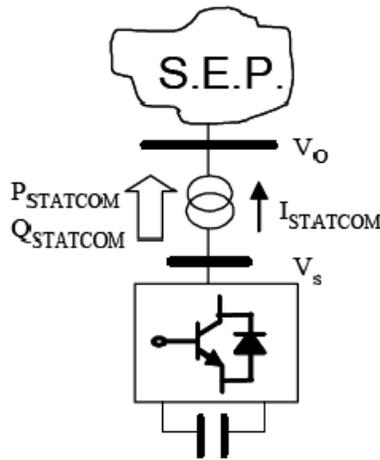


Figura 37. Forma general de conexión de un STATCOM. Fuente [10].

Utilizando las ecuaciones clásicas que describen el flujo de potencia activa y reactiva en una línea corta en términos de los voltajes  $V_o$  y  $V_s$ , la impedancia del transformador (que puede asumirse ideal) y la diferencia angular entre ambas barras ( $\delta$ ), podemos definir  $P_{STATCOM}$  y  $Q_{STATCOM}$ :

$$P_{STATCOM} = \frac{|V_o||V_s|}{X_T} \cdot \sin(\delta)$$

Ecuación 20

$$Q_{STATCOM} = \frac{|V_o||V_s|}{X_T} \cdot \cos(\delta) - \frac{|V_s|^2}{X_T}$$

Ecuación 21

Dónde  $\delta$  es el ángulo de  $V_s$  respecto de  $V_o$  en éste sistema genérico. Cuando el STATCOM opera a  $\delta = 0$  puede verse que la potencia activa enviada del dispositivo al sistema se hace cero mientras que la potencia reactiva dependerá fundamentalmente del módulo de las tensiones. Esta condición operativa implica que la corriente que circula por el transformador ( $I_{STATCOM}$ ) debe tener  $\pm 90^\circ$  de desfase respecto al fasor  $V_s$ . En otras palabras si  $|V_s|$  es mayor a  $|V_o|$ , los reactivos serán enviados del STATCOM al sistema (operación capacitiva), originándose una circulación de corriente en este sentido. En caso

contrario, los reactivos serán absorbidos del sistema por el STATCOM (operación inductiva) y la corriente circulará de manera opuesta. Finalmente si los módulos de  $V_o$  y  $V_s$  son iguales, no habrá circulación de corriente ni de reactivos en el sistema.

De aquí se concluye que, en estado estacionario,  $Q_{\text{STATCOM}}$  depende solamente de la diferencia de los módulos de voltajes  $|V_o|$  y  $|V_s|$ .

### 3.2. Control de un STATCOM

El control primario del inversor es tal que se regula el flujo de corriente reactiva a través del STATCOM. En otras palabras, el controlador se utiliza para operar el inversor de modo que el ángulo de fase entre el voltaje del inversor y el voltaje de línea se ajuste dinámicamente, tal que el STATCOM genere o absorba potencia reactiva en el punto de conexión.

#### 3.2.1. Circuito inversor

La Figura 38 muestra un circuito inversor monofásico, referido como un polo, que consiste de una válvula positiva  $A+$ , y una válvula negativa,  $A-$ . Cuando un polo se conecta a través de una serie de capacitores que se cargan con un voltaje total  $V_{DC}$ , y las válvulas se abren y cierran alternadamente, el voltaje de salida,  $V_{a0}$ , en el punto medio del polo  $A$  con respecto al punto medio,  $0$ , del enlace capacitivo es una onda cuadrada que contiene una componente fundamental y todas las componentes armónicas impares. La amplitud de la componente fundamental es  $(2/\pi) V_{DC}$  y la amplitud de la componente armónica impar ( $n$ ) normalizada respecto a la fundamental es  $(1/n)$  donde  $n = 2k + 1$  para  $k = 1, 2, 3$ , etc.

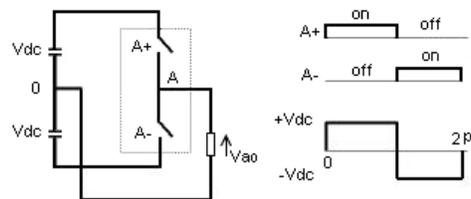


Figura 38. Circuito inversor monofásico y flujo de estados.

### 3.3. Características del STATCOM

El STATCOM a modelar consiste de un inversor de voltaje basado en IGBT's y dos condensadores en el lado de DC. El STATCOM está conectado al sistema a través de un transformador de acoplamiento con sus respectivos parámetros y conexiones. La característica V-I permite al STATCOM poder suministrar tanto compensación capacitiva como inductiva, y es capaz de controlar su corriente de salida en su capacidad máxima, independientemente del voltaje del sistema. Además el STATCOM tiene una capacidad transitoria adicional tanto en la región capacitiva como inductiva. La máxima sobrecorriente transitoria en la región capacitiva está determinada por la máxima capacidad de corriente de encendido-apagado de los inversores. En la región inductiva, los inversores

son naturalmente conmutados y por lo tanto la capacidad de corriente transitoria está limitada por la máxima temperatura permisible en la unión de los conmutadores.

En la práctica, los semiconductores presentan pérdidas, y por lo tanto, la energía almacenada en el capacitor DC eventualmente se utilizaría para proporcionar las pérdidas internas del inversor, disminuyendo el voltaje del capacitor. Sin embargo, cuando el STATCOM se utiliza para generación de potencia reactiva, el inversor mismo puede mantener cargado el capacitor en el nivel requerido de voltaje. Esto se logra haciendo que el voltaje de salida del inversor atrase al voltaje del sistema en un pequeño ángulo (generalmente en el rango de  $0.1^\circ$  a  $0.2^\circ$ ). De ésta manera el inversor absorbe una pequeña cantidad de potencia real del sistema para proporcionar las pérdidas internas, y mantener el voltaje del capacitor en el nivel deseado. El mismo mecanismo puede utilizarse para incrementar o disminuir el voltaje del capacitor, y con eso la amplitud del voltaje de salida del inversor, con el propósito de controlar la generación o absorción de reactivos.

### 3.4. Funcionamiento del STATCOM

El STATCOM es análogo a una máquina síncrona ideal que genera un conjunto de voltajes balanceados a frecuencia fundamental, con amplitud y ángulo controlable. Ésta máquina ideal no tiene inercia y su respuesta es prácticamente instantánea. En la Figura 39 se muestra la estructura básica de un STATCOM (a esta configuración se le denomina VSI de 6 pulsos y es la que se utilizara en la modelación).

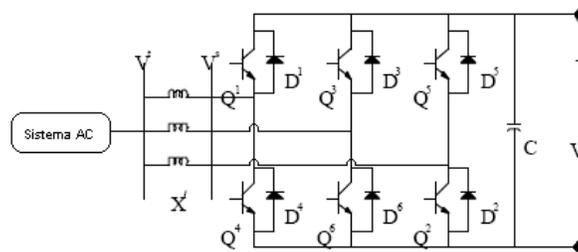


Figura 39. Inversor VSI de 6 pulsos.

El intercambio de potencia reactiva entre el compensador y el sistema de AC se logra variando la amplitud del voltaje del compensador. Si la amplitud del voltaje de compensador es superior al voltaje del nodo de AC entonces la corriente fluirá del compensador al sistema de potencia. En éste caso el compensador se comporta como un capacitor inyectando potencia reactiva al sistema de potencia. Si la amplitud del voltaje en nodo de AC es mayor al voltaje del compensador entonces la corriente fluirá del sistema de potencia al compensador, comportándose así como un inductor, esto es, consumiendo reactivos. Si los niveles de voltaje son iguales entre sí entonces no existe intercambio de potencia reactiva. Similarmente el intercambio de potencia activa entre el compensador y el sistema de AC se logra controlando el ángulo del voltaje del compensador respecto al ángulo del voltaje en el nodo de AC. Si éste ángulo es igual entre ambos no hay intercambio de potencia activa, sólo reactiva.

### 3.5. Fuentes convertidoras de voltaje VSI

La principal función de las VSI es la de generar voltaje de corriente alterna a partir de una fuente de voltaje de corriente continua, además es posible controlar la magnitud, el ángulo de fase y la frecuencia del voltaje de salida. Para entender el funcionamiento considérese el inversor monofásico del puente completo de la Figura 40, que consiste en 4 IGBT, una fuente de voltaje de corriente continua y dos puntos de conexión a, b al nodo del sistema de potencia. El voltaje de corriente continua es convertido a voltaje de AC cuando el transistor apropiado es encendido/apagado secuencialmente.

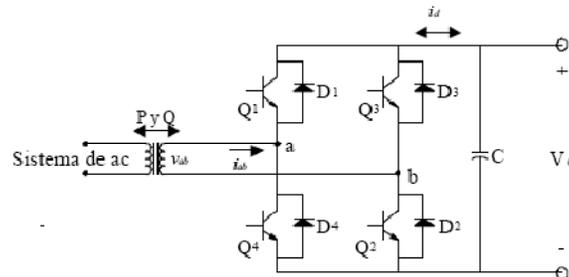


Figura 40. VSI monofásico de puente completo.

Con los IGBTs 1 y 2 encendidos, el voltaje  $V_{ab}$  es  $+V_d$  para medio ciclo, y con 3 y 4 encendidos, y 1 y 2 conmutados, el voltaje  $V_{ab}$  es  $-V_d$  para el siguiente medio ciclo. Este voltaje es independiente de la magnitud, ángulo y forma de onda del voltaje en el nodo de AC.

Del tiempo  $t_1$  a  $t_2$ , con los IGBT's 1 y 2 encendidos y 3 y 4 conmutados,  $V_{ab}$  es positivo e  $I_{ab}$  es negativo. La corriente fluye a través del dispositivo 1 desde el lado de AC, punto a, y retorna por el punto b a través del dispositivo 2, esto es, el flujo es del lado de DC al lado de AC. Esta es una acción inversora. Del instante  $t_2$  a  $t_3$ , la corriente cambia de polaridad y fluye a través de los diodos 1 y 2 fluyendo la potencia del lado de AC al lado de DC. En esta etapa la VSI se comporta como un rectificador. Durante éste período los IGBTs 1 y 2 continúan encendidos, sólo que no conducen corriente en forma inversa, por lo ésta fluye a través de los diodos. Del instante  $t_3$  a  $t_4$ , con los IGBTs 3 y 4 encendidos y 1 y 2 conmutados,  $V_{ab}$  es negativo mientras que  $I_{ab}$  cambia de polaridad respecto al caso anterior. La corriente fluye a través del dispositivo 3 y 2, esto es, el flujo es del lado de DC al lado de AC. Del instante  $t_4$  a  $t_5$  sucede un caso similar al instante  $t_2$  a  $t_3$ , la corriente fluye a través de los diodos 3 y 4 (acción rectificadora).

Con esto podemos observar que una VSI realiza tanto acción inversora debido a la conmutación de los IGBT's, como acción rectificadora por parte de los diodos; esto es posible por el intercambio de corriente que existe entre el convertidor y el sistema de AC.

### 3.6. Diagrama de bloques del STATCOM

En la Figura 41 se muestra el diagrama por bloques del STATCOM que se implementará en Matlab-Simulink.

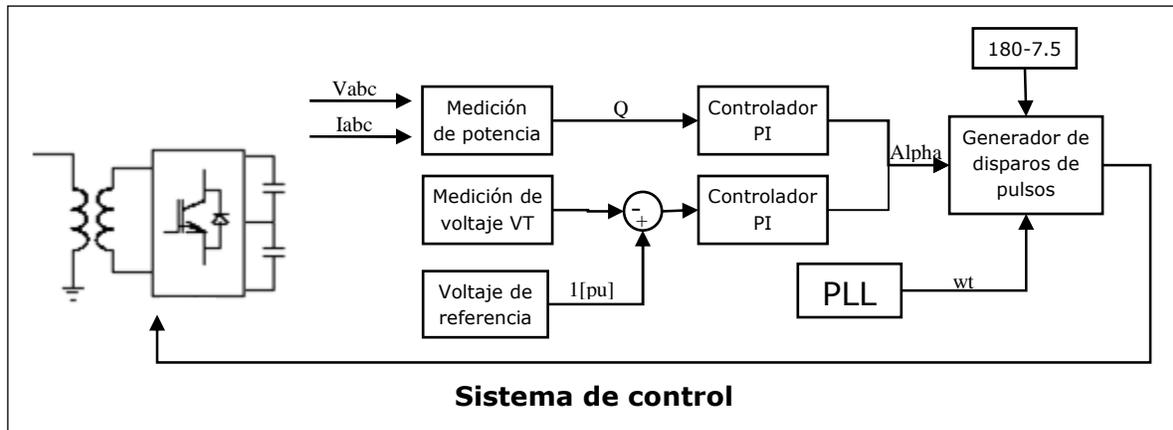


Figura 41. Diagrama de bloques del control del STATCOM.

Se puede observar que el sistema de control recibe las señales de potencia reactiva y voltaje VT como parámetro de entrada de controladores PI que en conjunto generan el valor *alpha*. Posteriormente el desfase *sigma* y el *wt* de el PLL son ingresados al generador de disparos de pulsos para que estos últimos sean ingresados a los IGBT's y permitan la conversión DC/AC.

### 3.7. Eliminación de armónicas mediante el uso de transformadores

El uso de convertidores electrónicos de potencia produce distorsiones en la forma de onda de las corrientes y los voltajes. El grado de distorsión se cuantifica estudiando el contenido armónico de las señales. Entre los efectos negativos que las armónicas producen en el equipo eléctrico, está el sobrecalentamiento del mismo limitando su vida útil.[13]

Existen diferentes técnicas que se utilizan para eliminar y disminuir las armónicas producidas por cargas no lineales. Se analizarán las conexiones de transformadores para la eliminación de armónicos de 3, 5, 7, 11 y 13 orden. En cuanto a las conexiones de transformadores las más comúnmente utilizadas son DY, YY, YD, DD. La conexión D-Y es mostrada en la Figura 42. Si asumimos que los transformadores tiene la misma razón de vueltas *n* entonces existe un desfase de 30° entre las corrientes de línea del primario y secundario. Esto último se muestra en las Figura 43 y Figura 44. En el caso de la secuencia negativa, el desfase es el mismo pero en sentido opuesto al de la secuencia positiva.

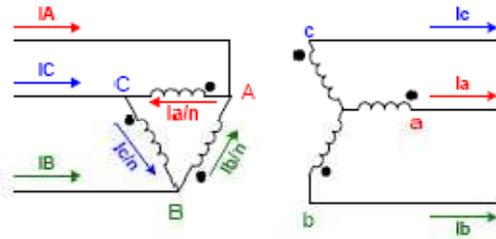


Figura 42. Conexión D-Y de transformadores trifásicos. Fuente [13].

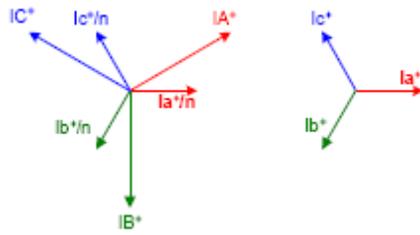


Figura 43. Corrientes secuencia positiva.

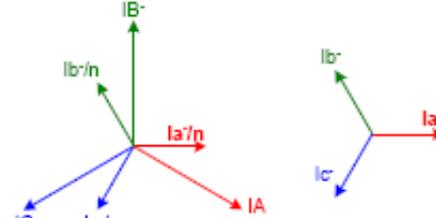


Figura 44. Corrientes secuencia negativa.

La conexión D-Y elimina el flujo de corrientes de secuencia cero en las líneas de la delta y se limitan a circular dentro de la delta. Si la estrella del secundario no está aterrizada no existe posible trayectoria para estas corrientes en el secundario. Lo mismo sucede cuando se deja sin aterrizar alguno de los lados de un transformador Y-Y. Este se puede ver gráficamente en la Figura 45:

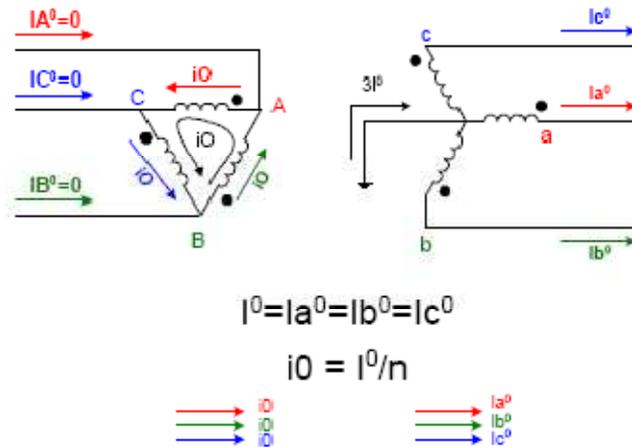


Figura 45. Corrientes secuencia cero en conexión D-Y. Fuente [13].

La distorsión de las corrientes o voltajes se puede representar matemáticamente en una serie de Fourier, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$f(t) = h_0 + h_1 + \sum_{\substack{i=2 \\ i \text{ par}}}^{\infty} h_i + \sum_{\substack{j=3 \\ j \text{ impar}}}^{\infty} h_j$$

Ecuación 22

Donde:

$h_0$ : Valor promedio (componente DC)

$h_1$ : Componente fundamental (frecuencia fundamental  $w$ )

$h_i$ : Armónicas pares (frecuencia  $iw$ )

$h_j$ : Armónicas impares (frecuencia  $jw$ )

El valor promedio en circuitos de CA debe ser cero. En caso contrario se produce la saturación de los transformadores de alimentación. En la mayoría de las cargas no se presentan armónicas pares en operación de estado estable. Quedan entonces, sólo las armónicas impares y la componente fundamental.

Las terceras armónicas y los múltiplos de éstas se comportan de una manera similar a las componentes de secuencia cero y son, por lo tanto, filtradas por las conexiones D o eliminándose al no aterrizar los neutros de los secundarios conectados en Y. Esto se aprecia en las siguientes ecuaciones:

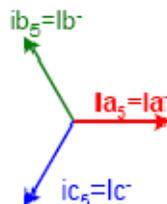
$$\begin{aligned} i_{a3} &= I_3 \sin(3wt) \\ i_{b3} &= I_3 \sin(3wt - 3 \cdot 120^\circ) = I_3 \sin(3wt - 360^\circ) = I_3 \sin(3wt) \\ i_{c3} &= I_3 \sin(3wt - 3 \cdot 240^\circ) = I_3 \sin(3wt - 720^\circ) = I_3 \sin(3wt) \\ \therefore i_{a3} &= i_{b3} = i_{c3} \end{aligned}$$

**Ecuación 23.**

Las quintas armónicas se comportan como componentes de secuencia negativa:

$$\begin{aligned} i_{a5} &= I_5 \sin(5wt) \\ i_{b5} &= I_5 \sin(5wt - 5 \cdot 120^\circ) = I_5 \sin(5wt - 600^\circ) = I_5 \sin(5wt + 120^\circ) \\ i_{c5} &= I_5 \sin(5wt - 5 \cdot 240^\circ) = I_5 \sin(5wt - 1200^\circ) = I_5 \sin(5wt - 120^\circ) \end{aligned}$$

**Ecuación 24**



**Figura 46. Armónicos de 5° orden.**

Las séptimas armónicas se comportan similarmente a las de secuencia positiva:

$$i_{a7} = I_7 \sin(7\omega t)$$

$$i_{b7} = I_7 \sin(7\omega t - 7 \cdot 120^\circ) = I_7 \sin(7\omega t - 840^\circ) = I_7 \sin(7\omega t - 120^\circ)$$

$$i_{c7} = I_7 \sin(7\omega t - 7 \cdot 240^\circ) = I_7 \sin(7\omega t - 1680^\circ) = I_7 \sin(7\omega t + 120^\circ)$$

Ecuación 25

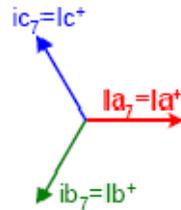


Figura 47. Armónicos de 7º orden.

Cabe señalar que la comparación efectuada para las armónicas 5a y 7a se puede efectuar para las armónicas de orden 11 y 13 para encontrar que las de orden 11 se comportan como componentes de secuencia negativa y las de orden 13 se comportan como componentes de secuencia positiva.

La comparación entre las componentes de secuencia positiva y las armónicas de orden 7, así como las componentes de secuencia negativa y las armónicas de orden 5 será utilizada más adelante para entender cómo se eliminan estas armónicas al utilizar dos o más transformadores con conexiones apropiadas.

A continuación en la Figura 48 se muestra un ejemplo encontrado en la literatura investigada [13] donde se muestra un transformador T1 en conexión Y-Y y un transformador T2 en conexión D-Y cuyos primarios están en paralelo. Los secundarios alimentan a cargas no lineales iguales. También se asume que sólo existe distorsión de corrientes y que sólo existen armónicas impares, además de la componente fundamental. El transformador T2 puede, alternativamente, conectarse en Y-D.

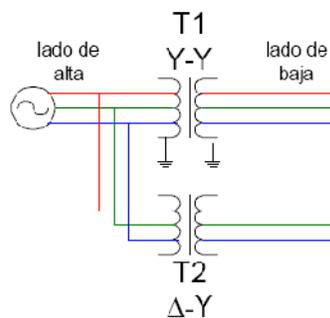


Figura 48. Conexión para eliminación de 5 y 7 armónicas. Fuente [13].

Debido a que el secundario del transformador T1 no se encuentra aterrizado y el transformador T2 tiene una conexión D en el primario. No existe posibilidad de que las corrientes de 3as armónicas y sus múltiplos fluyan hacia la fuente.

### 3.7.1. Eliminación de quinta armónica

Debido al desfase de  $-30^\circ$  que introduce el transformador T2, las corrientes del secundario correspondientes a la 5a armónica están desfasadas:

$$-30^\circ \times 5 = -150^\circ$$

con respecto a las del transformador T1.

Mientras que, debido a que las 5as armónicas se comportan como componentes de secuencia negativa, existen  $-30^\circ$  de desfase, por tanto las corrientes en el primario de T2 están desfasadas:

$$-150^\circ - 30^\circ = -180^\circ = 180^\circ$$

con respecto a las del transformador T1.

Si las magnitudes de las corrientes en los primarios de T1 y T2 son iguales, entonces las 5as armónicas se cancelan y no fluyen a la fuente. Este análisis se aprecia mejor en la Figura 49, Figura 50 y Figura 51 donde se han incluido las corrientes de 5a armónica de las 3 fases de ambos transformadores.

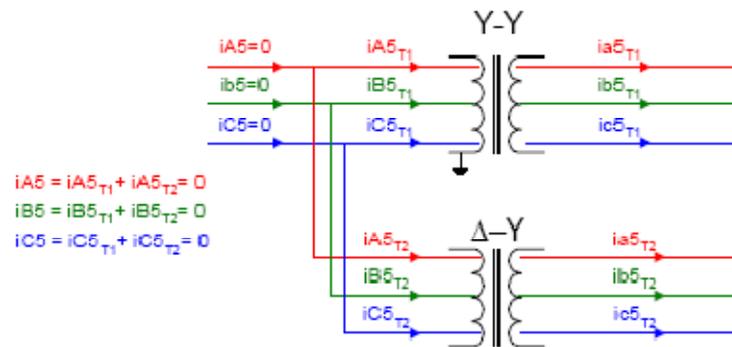


Figura 49. Conexiones eliminación quinta armónica.

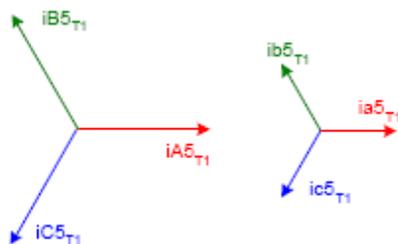


Figura 50. Corrientes en primario y secundario de T1.

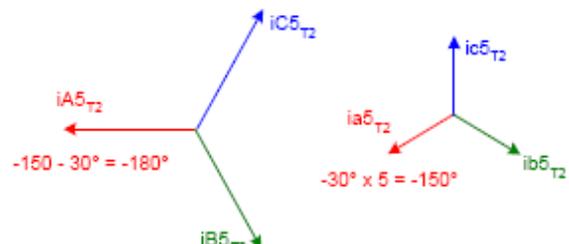


Figura 51. Corrientes en primario y secundario de T2.

### 3.7.2. Eliminación de séptima armónica

Debido al desfase de  $-30^\circ$  que introduce el transformador T2, las corrientes del secundario correspondientes a la 7a armónica están desfasadas:

$$-30^\circ \times 7 = -210^\circ = 150^\circ$$

con respecto a las del transformador T1.

Mientras que, debido a que las 7as armónicas se comportan como componentes de secuencia positiva, existen  $30^\circ$  de desfase, por tanto las corrientes en el primario de T2 están desfasadas:

$$150^\circ + 30^\circ = 180^\circ$$

con respecto a las del transformador T1.

Si las magnitudes de las corrientes en los primarios de T1 y T2 son iguales, entonces las 7as armónicas se cancelan y no fluyen a la fuente. Este análisis se aprecia mejor en la Figura 52, Figura 53 y Figura 54, donde se han incluido las corrientes de 7a armónica de las 3 fases de ambos transformadores.

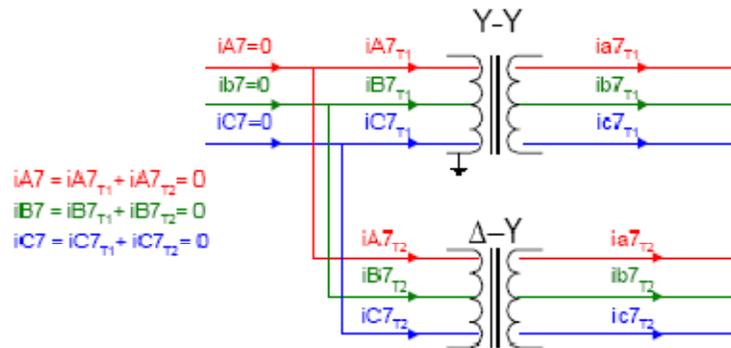


Figura 52. Conexiones eliminación séptima armónica.

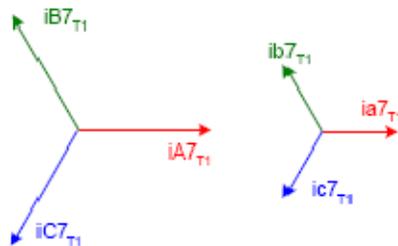


Figura 53. Corrientes en primario y secundario de T1.

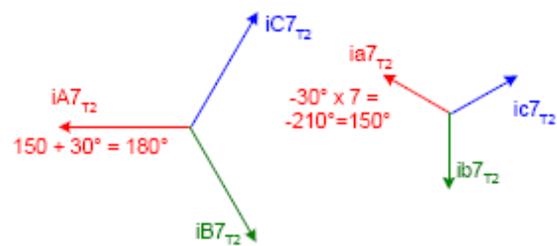


Figura 54. Corrientes en primario y secundario de T2.

### 3.7.3. Eliminación armónicos en un STATCOM

En la Figura 55, se presenta un STATCOM, el cual se utiliza para generar o absorber potencia reactiva en un sistema eléctrico en una manera similar a la operación de

una máquina síncrona operando como condensador síncrono, pero con un capacitor y un convertidor electrónico a base de tiristores con apagado por compuerta GTO.

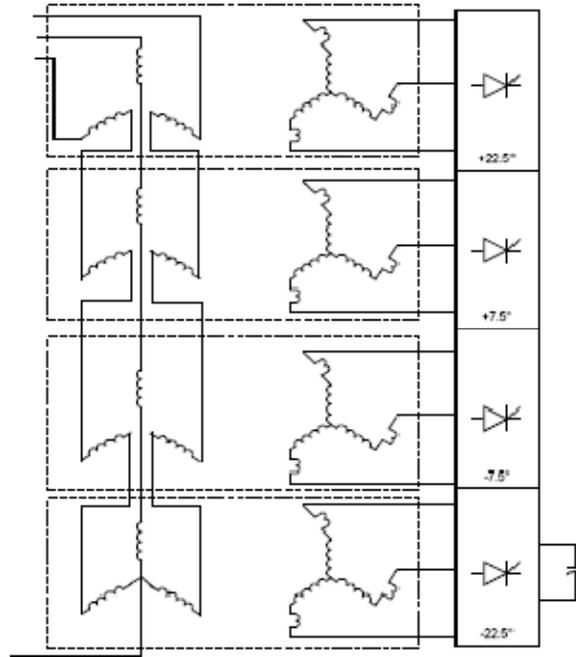


Figura 55. STATCOM con transformadores desfasadores.

El uso de 4 transformadores especiales que proporcionan desfases de  $15^\circ$  entre secundarios, permite que existan pares de transformadores desfasados  $30^\circ$ , con los cuales se cancelan las 5as y 7as armónicas. Además, los desfases de  $15^\circ$  se utilizan para cancelar las armónicas de orden 11 y 13. El análisis se puede realizar en una manera similar a los análisis de cancelación de armónicas de orden 5 y 7 presentados en la sección anterior. El nuevo espectro de Fourier donde se aprecia la reducción de armónicas se presenta en la Figura 56.

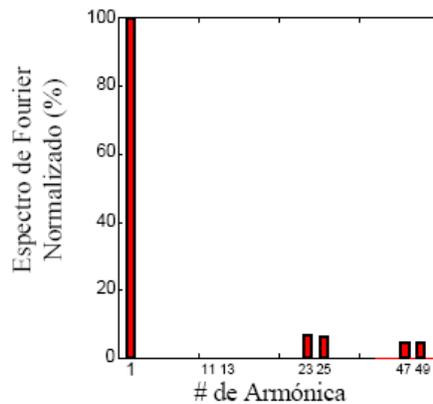


Figura 56. Espectro de Fourier del STATCOM.

La configuración presentada en la Figura 55 utiliza conexiones zig-zag especiales que proveen los desfasamientos señalados. Esta conexión es la que se requiere para eliminar armónicas en voltajes, ya que en este circuito, los puentes de 6 GTOs funcionan como inversores de voltaje. Los devanados de los primarios están conectados en serie para cancelar armónicas de voltaje. Una configuración similar, pero con conexiones en paralelo se podría utilizar para cancelar armónicas de corriente. Esta conexión, sin embargo, no es muy utilizada por su poca factibilidad económica, debido al diseño especial de devanados.

# Capítulo 4

## 4. Implementación computacional en Matlab-Simulink

A continuación se presenta una breve descripción de los elementos que se utilizarán en la modelación de la red y el compensador estático. Para la modelación se utilizó la versión de Matlab 7.0.4.365 (R14) Service Pack 2 y la versión 6.2 (R14SP2) de Simulink con su caja de herramientas “SimPowerSystems” versión 4.0.1. La información que sigue fue extraída y traducida al español desde la ayuda del programa y también puede ser consultada en [10].

### 4.1. Bloques importantes del SimPowerSystems

#### 4.1.1. Fuente Trifásica (Three-Phase Source)

El bloque “*Three-Phase Source*” implementa una fuente de voltaje trifásica balanceada con una impedancia interna R-L. Se encuentra disponible en la librería “Electrical Sources”. Está compuesta por tres fuentes de voltaje conectadas en estrella con un neutro aterrizado internamente el cual también se puede hacer accesible. Puede ajustarse directamente los valores de R y L o en forma indirecta ajustando el nivel de corto circuito y la razón X/R. La Figura 57 muestra el icono que la representa:

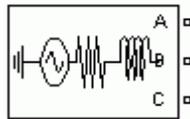


Figura 57. Fuente trifásica.

La Figura 58 muestra el cuadro de diálogo de este elemento:

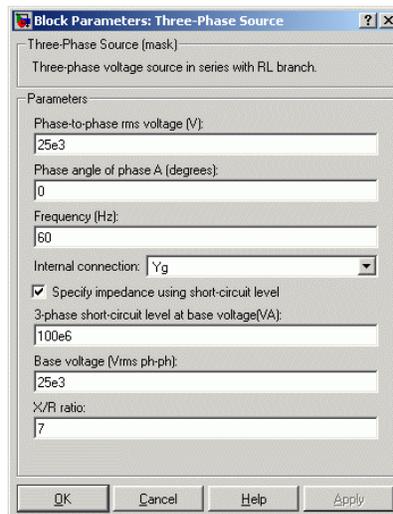


Figura 58. Cuadro de diálogo de la fuente trifásica.

**Phase-to-phase rms voltage:** El voltaje fase-fase interno en RMS (Vrms).

**Phase angle of phase A:** La fase del ángulo de la fuente interna de voltaje generado por la fase A, en grados. Los tres voltajes son generados en secuencia positiva y con un desfase de  $120^\circ$  a partir de la fase A.

**Frequency:** La frecuencia en Hertz (Hz) de la fuente de voltaje.

**Internal connection:** La conexión interna de las fuentes de voltaje. El icono del bloque se actualiza automáticamente dependiendo del tipo de conexión. Estas pueden ser Y, Yn, Yg.

#### 4.1.2. Sección de línea trifásica de modelo PI (Three-Phase PI Section Line)

El bloque “*Three-Phase PI Section Line*” implementa el modelo PI de una línea de transmisión trifásica con pérdidas concentradas. Se encuentra disponible en la librería “Elements”. En la Figura 59 se puede apreciar el icono que lo representa:

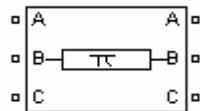


Figura 59. Modelo PI de línea de transmisión.

Al contrario del modelo de línea de parámetros distribuidos donde la resistencia, inductancia y capacitancia están uniformemente distribuidas a lo largo de la línea, el modelo de línea PI concentra los parámetros de la línea en una sección PI como se muestra en la Figura 60, donde solo se represento una fase de la línea.

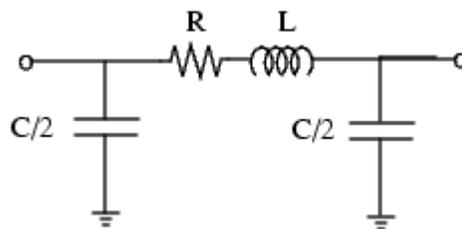


Figura 60. Modelo eléctrico de una fase la sección PI.

Los parámetros de línea R, L y C son especificados como parámetros de secuencia positiva y cero que toman en cuenta la inductancia y el par de condensadores en los conductores trifásicos como la conexión a tierra de los condensadores. Este método de especificar los parámetros de la línea asume que las tres fases se encuentran balanceadas.

Usando una sola sección PI es apropiado para modelar líneas de transmisión cortas o cuando el rango de interés está limitado alrededor de la frecuencia fundamental. Se pueden obtener modelos más aproximados utilizando en cascada varios bloques de estos.

La Figura 61 muestra el cuadro de dialogo de este elemento:

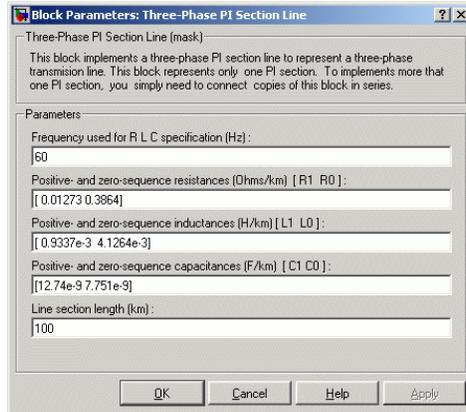


Figura 61. Cuadro de dialogo de la línea de parámetros distribuidos.

**Frequency used for RLC specifications:** Especifica la frecuencia que se utilizará para computar las matrices de resistencia R, inductancia L y capacitancia C del modelo de la línea. Usualmente se utiliza 50 o 60 Hertz.

**Positive and zero sequence resistances:** La secuencia positiva y cero de la resistencia R en Ohms/kilómetros [ $\Omega$ /km].

**Positive and zero sequence inductance:** La secuencia positiva y cero de la inductancia L en henries/kilómetros [H/km].

**Positive and zero sequence capacitance:** La secuencia positiva y cero de la capacitancia C en farads/kilómetros [F/km].

**Line section length:** El largo de la sección de línea en [km].

#### 4.1.3. Carga trifásica RLC paralela (Three-Phase Parallel RLC Load)

El bloque “*Three-Phase Parallel RLC Load*” implementa una carga trifásica balanceada como la combinación de elementos RLC en serie. A la frecuencia especificada la carga presenta una impedancia constante. Se encuentra disponible en la librería “*Elements*”. En la Figura 62 se puede apreciar el icono que representa al elemento:

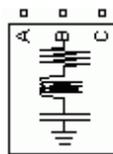


Figura 62. Bloque carga trifásica RLC serie.

La potencia activa y reactiva consumida es proporcional al cuadrado del voltaje aplicado. Solo son mostrados los elementos RLC que tienen un valor distinto de cero, de acuerdo a esto, el icono se actualiza en forma automática.

La Figura 61 muestra el cuadro de dialogo de este elemento:

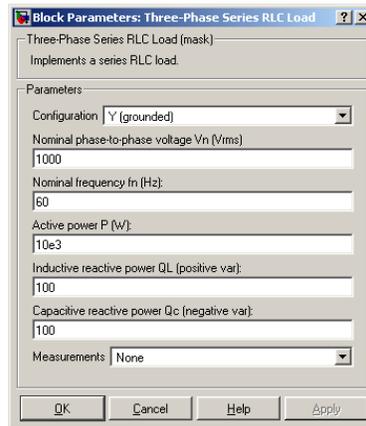


Figura 63. Cuadro de dialogo del bloque Carga trifásica RLC paralelo.

**Configuration:** Configura la conexión de las 3 fases. Puede elegir entre: Y aterrizada, Y flotante, Y con neutro y Delta.

**Nominal phase-to-phase voltage  $V_n$ :** El voltaje nominal fase-fase de la carga en volts RMS [ $V_{rms}$ ].

**Nominal frequency  $f_n$ :** La frecuencia nominal en hertz [Hz].

**Active power  $P$ :** La potencia activa trifásica en la carga medida en watts [W].

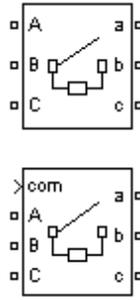
**Inductive reactive power  $Q_l$ :** La potencia inductiva reactiva trifásica  $Q_l$  en [vars].

**Capacitive reactive power  $Q_c$ :** La potencia capacitiva reactiva trifásica  $Q_c$  en [vars].

**Measurements:** Puede seleccionar distintos modos para medir voltajes y corrientes según el tipo de conexión que desee. Debe colocar el elemento “*Multimeter*” para poder desplegar los valores medidos durante la simulación.

#### 4.1.4. Interruptor Trifásico (Three-Phase Breaker)

El bloque “*Three-Phase Breaker*” implementa un interruptor trifásico abriendo en el cruce por cero de la corriente. Los tiempos de aperturas y cierres pueden ser controlados en forma externa a través de una señal Simulink o en forma interna a través de un vector de tiempos. Se encuentra disponible en la librería “*Elements*”. En la Figura 64 se puede apreciar el icono que representa al elemento:

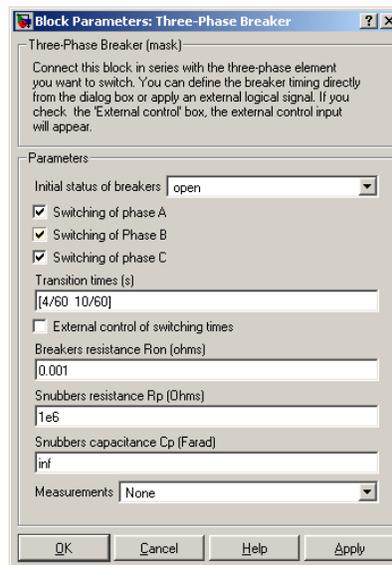


**Figura 64. Interruptor Trifásico.**

El bloque de interruptor trifásico utiliza en forma interna 3 interruptores por fase conectados entre las entradas y las salidas. Se puede utilizar en serie junto a elementos trifásicos que se deseen conectar y desconectar. En el modo externo de control se debe ingresar una señal simulink con un 0 para abrir el interruptor y un 1 para cerrarlo.

Se ha incluido en el modelo Rs – Cs circuito de amortiguadores en serie. Ellos pueden ser conectados en forma opcional al interruptor. Si el bloque interruptor trifásico aparece conectado con un circuito inductivo, circuito abierto o una fuente de corriente, se deben utilizar estos parámetros.

La Figura 65 muestra el cuadro de dialogo de este elemento:



**Figura 65. Cuadro de dialogo del bloque interruptor trifásico.**

**Initial status of brakers:** Indica el estado inicial del interruptor, es decir, si está abierto o cerrado.

**Switching of phase A, B, C:** Indica las fases que serán afectadas producto de la acción del interruptor.

**Transition times:** Este parámetro sólo es visible si la opción de control externo esta deshabilitada. Especifica mediante un vector de tiempos los instantes en que el interruptor se abrirá o cerrará.

**External control of switching times:** Indica si la apertura y cierre se controlarán mediante un vector de tiempos o una señal Simulink externa.

**Breakers resistance Ron:** Indica la resistencia interna del interruptor en Ohms [ $\Omega$ ]. Debe ser distinto de 0.

**Snubbers resistance Rp:** La resistencia de amortiguación en Ohms [ $\Omega$ ]. Si selecciona *inf* elimina la amortiguación del modelo.

**Snubbers capacitance Cp:** La capacitancia de amortiguación en Farads [F]. Si selecciona 0 elimina la amortiguación del modelo.

**Measurements:** Puede seleccionar medir corriente, voltaje o ambos. Debe colocar el elemento “*Multimeter*” para poder desplegar los valores medidos durante la simulación.

#### 4.1.5. Medidor trifásico de voltaje y corriente(Three-Phase V-I Measurement)

El bloque “*Three-Phase Measurement*” es usado para medir voltajes y corrientes trifásicas en un circuito. Cuando es conectado en serie con elementos trifásicos, retorna los tres voltajes fase-neutro o fase-fase y las tres corrientes de línea. Se encuentra disponible en la librería “*Mesurements*”. En la Figura 66 se puede apreciar el icono que representa al elemento:

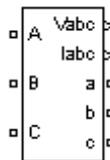


Figura 66. Medidor trifásico de voltaje y corriente.

El bloque medidor trifásico de voltaje y corriente puede entregar los valores en por unidad [pu] o en volts y amperes respectivamente. En el caso de elegir valores en [pu] el bloque realiza las siguientes conversiones:

$$V_{abc}(p.u.) = \frac{V_{abc}(volts)}{\left( \frac{V_{baseLL}}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} \right)}$$

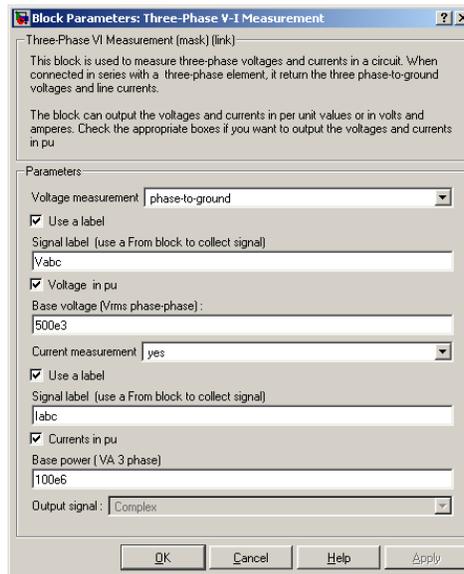
Ecuación 26

$$I_{abc}(p.u.) = \frac{I_{abc}(amp)}{\left( \frac{P_{base}}{V_{baseLL} \cdot \sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} \right)}$$

**Ecuación 27**

Donde  $V_{baseLL}$  es el voltaje base de la línea en volts RMS y  $P_{base}$  es la potencia trifásica en volts-amperes. Ambos valores deben ser especificados en el menú de parámetros del bloque.

La Figura 67 muestra el cuadro de dialogo de este elemento:



**Figura 67. Parámetros de medición trifásica de voltaje y corriente.**

**Voltage measurement:** Indica si la medición de voltaje será fase-fase o fase-neutro.

**Use a label:** Indica si se utilizará una etiqueta para identificar el valor medido.

**Signal label:** Este es el nombre de la etiqueta del valor medido.

**Voltages in p.u.:** Indica si se utilizará una medición en volts o en por unidad [p.u.].

**Base voltage (Vrms phase-phase):** Indica el voltaje base que será usado para la conversión a p.u. Este parámetro solo es visible si se escogió la opción de medición en p.u.

**Current measurement:** Indica si la medición de corriente será necesaria.

**Use a label:** Indica si se utilizará una etiqueta para identificar el valor medido.

**Signal label:** Este es el nombre de la etiqueta del valor medido.

**Currents in p.u.:** Indica si se utilizará una medición en amperes o en por unidad [p.u.].

**Base power (VA 3 phase):** Indica la potencia base que será usada para la conversión a p.u. Este parámetro solo es visible si se escogió la opción de medición en p.u.

#### 4.1.6. Transformador Zigzag desfasador(Zigzag Phase-Shifting Transformer)

El bloque “*Zigzag Phase-Shifting Transformer*” implementa un transformador Zigzag desfasador con un enrollado secundario configurable. Se encuentra disponible en la librería “*Elements*”. En la Figura 68 se puede apreciar el icono que representa al elemento:

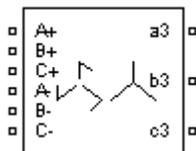


Figura 68. Bloque Transformador desfasador Zigzag.

El modelo usa tres transformadores monofásicos de tres enrollados. El primario conecta los enrollados 1 y 2 de los transformadores monofásicos en una configuración Zigzag. El secundario usa el enrollado 3 de los transformadores monofásicos y estos pueden ser conectados en las siguientes formas:

- Y
- Y con neutro accesible
- Y aterrizada
- Delta (D1)
- Delta (D11)

Si el enrollado secundario está conectado en Y, los voltajes de fase del secundario estarán adelantados o atrasados con respecto a los voltajes del primario de acuerdo al ángulo Phi especificado en los parámetros del bloque. Si el secundario es conectado en delta (D11), existirá un desfase adicional de  $+30^\circ$ . Si el secundario está conectado en delta (D1), existirá un desfase adicional de  $-30^\circ$ .

El tipo de conexión que se está utilizando se muestra inmediatamente en el icono del bloque. Si seleccionó una conexión Y con neutro accesible aparecerá un puerto adicional etiquetado como N. Al igual que en el caso del transformador convencional se puede seleccionar la característica de saturación.

La Figura 69 muestra el cuadro de dialogo de este elemento:

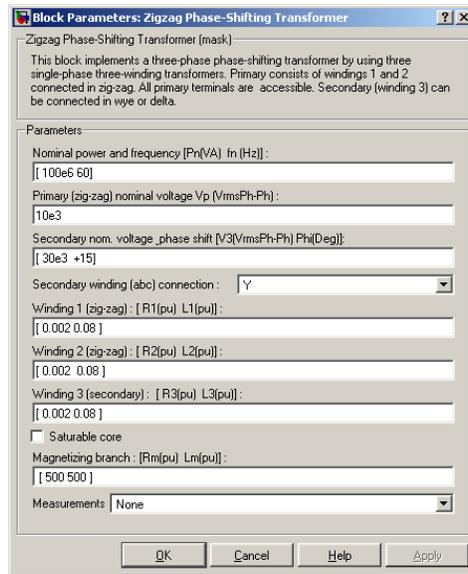


Figura 69. Cuadro de dialogo del Transformador Zigzag.

**Nominal power and frequency:** Indica la potencia nominal en volt-ampere [VA] y la frecuencia nominal en hertz [Hz] del transformador.

**Primary (zigzag) nominal voltage  $V_p$ :** Indica el voltaje nominal fase-fase en volts RMS para el primario del transformador.

**Secondary nominal voltage and phase shift:** Indica el voltaje nominal fase-fase en volts RMS para el secundario del transformador y el desfase aplicado.

**Secondary winding (abc) connection:** Indica el tipo de conexión aplicado al enrollado secundario.

**Winding 1, 2 (zigzag) [R1 L1] [R2 L2]:** Indica la resistencia e inductancia de fuga de los enrollados 1 y 2 de los transformadores monofásicos usados para implementar el primario.

**Winding 3 (secondary) [R3 L3]:** Indica la resistencia e inductancia de fuga del enrollado 3 de los transformadores monofásicos usados para implementar el secundario.

**Saturable Core:** Indica si tendrá un núcleo saturable o no.

**Magnetization resistance  $R_m$ :** Indica la resistencia de magnetización. Sólo es visible cuando esta activada la opción de núcleo saturable.

**Magnetizing branch [Rm(p.u.) Lm(p.u.)]:** Indica los parámetros de la rama de magnetización. Sólo es visible si está activada la opción de núcleo saturable.

**Saturation characteristic:** Indica los pares de corriente/flujo que dan origen a la característica de saturación. Sólo es visible si está activada la opción de núcleo saturable.

**Measurements:** Indica si se van a utilizar los valores de voltajes, corrientes y flujos.

#### 4.1.7. Puente de tres niveles (Three-Level Bridge)

Implementa un puente de tres niveles con punto neutro, topologías y dispositivos de encendido y apagado de potencia. Se encuentra disponible en la librería “*Power Electronics*”. En la Figura 70 se puede apreciar el icono que representa al elemento:

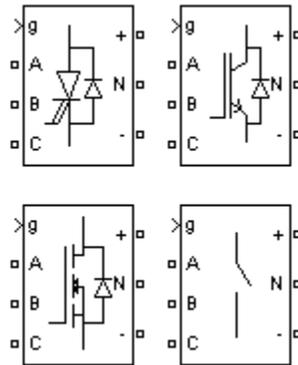


Figura 70. Bloque puente de tres niveles.

Este bloque un convertor de potencia de tres niveles que consiste en uno dos o tres brazos de dispositivos de encendido/apagado de potencia. Cada brazo está constituido por 4 dispositivos de encendido/apagado con sus respectivos diodos en antiparalelo y dos diodos de bloqueo en el neutro como se muestra en la Figura 71.

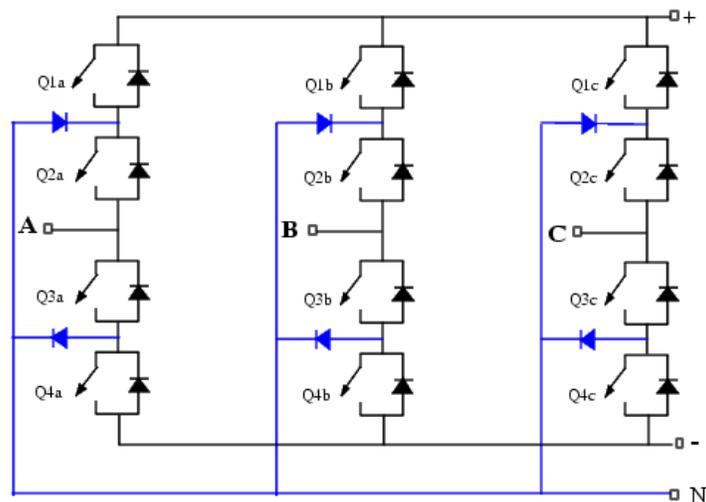


Figura 71. Esquema eléctrico del puente de tres niveles.

La Figura 72 muestra el cuadro de dialogo de este elemento:

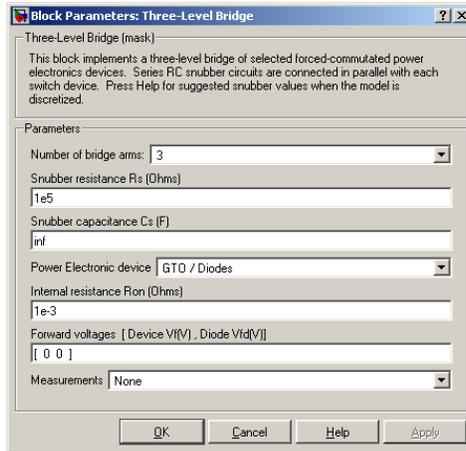


Figura 72. Cuadro de dialogo de puente de tres niveles.

**Numero of bridge arms:** Indica la topología del puente: uno dos o tres brazos.

**Snubber resistance  $R_s$ :** Indica la resistencia de amortiguación en ohms [ $\Omega$ ]. Colocar este parámetro en *inf* para eliminar la amortiguación del modelo.

**Snubbers capacitance  $C_p$ :** La capacitancia de amortiguación en Farads [F]. Si selecciona 0 elimina la amortiguación del modelo. Para dispositivos de conmutación forzada (GTO, IGBT o MOSFET) el bloque opera satisfactoriamente con amortiguaciones resistivas mientras los pulsos sean enviados a los dispositivos de encendido/apagado. Si los pulsos para forzar la conmutación son bloqueados, el puente opera como un diodo rectificador. En esta condición, se deben elegir apropiadamente los valores de  $R_s$  y  $C_s$ . Además si el modelo esta discretizado, se debe seguir el siguiente criterio para los valores aproximados de  $R_s$  y  $C_s$ :

$$R_s > 2 \cdot \frac{T_s}{C_s}$$

Ecuación 28

$$C_s < \frac{P_n}{1000(2\pi f)V_n^2}$$

Ecuación 29

En donde,  $P_n$  es la potencia nominal del conversor en [VA],  $V_n$  el voltaje de fase-fase en [ $V_{rms}$ ],  $f$  es la frecuencia fundamental en [Hz] y  $T_s$  es el tiempo de muestreo en [s].

**Power electronic device:** Indica el tipo de dispositivo que se utilizará en el puente.

**Internal resistance  $R_{on}$ :** Indica la resistencia interna del dispositivo y los diodos en ohms [ $\Omega$ ].

**Forward voltages [Device  $V_f$ , Diode  $V_{fd}$ ]:** Indica el voltaje en sentido directo del dispositivo seleccionado (sólo para GTO e IGBT) y de los diodos de retención y antiparalelos, en Volts.

**Measurements:** Indica si se van a utilizar los valores de voltajes y corrientes de todos los dispositivos.

#### 4.1.8. Oscilador enclavado por fase (Phase locked loop)

El bloque “*Phase Locked Loop*” implementa un oscilador enclavado por fase trifásico. Se encuentra disponible en la librería “*Extra Library/Control Blocks*”. En la Figura 73 se puede apreciar el icono que representa al elemento:

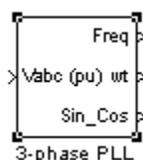


Figura 73. Bloque PLL Trifásico.

Este bloque es utilizado para sincronizar en un conjunto de frecuencias variables, señales trifásicas. Recibe como parámetros un vector con las señales de voltaje trifásico  $V_a$ ,  $V_b$  y  $V_c$ . Entrega como salida la frecuencia medida en [Hz], el valor de el producto  $\omega t$  variando entre 0 y  $2\pi$  sincronizado con los cruces por cero de la fase A y un vector indicando el *seno* y *coseno* de  $\omega t$ .

La Figura 74 muestra el cuadro de dialogo de este elemento:

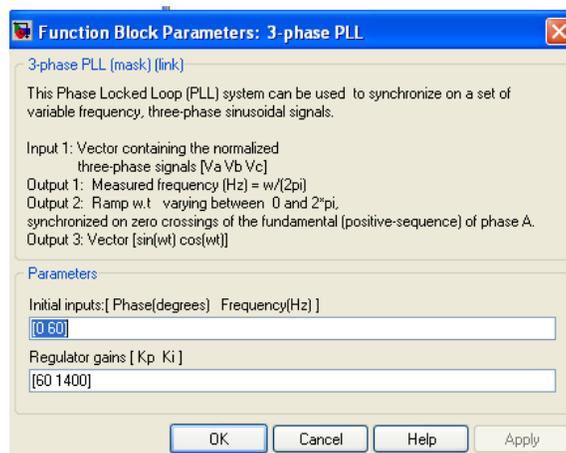


Figura 74. Cuadro de dialogo del bloque PLL trifásico.

**Initial inputs:** Indica los valores iniciales de Fase y Frecuencia para el oscilador enclavado por fase. La fase se indica en grados [°], mientras que la frecuencia en Hertz [Hz].

**Regulator gains:** Indica el vector de valores de las ganancias del controlador PI del PLL.

## 4.2. Modelo en estudio

### 4.2.1. Descripción

A continuación en la Figura 75 se muestra el modelo Matlab-Simulink que se utilizó para el estudio del comportamiento del STATCOM. Posteriormente se describirán los bloques principales del STATCOM.

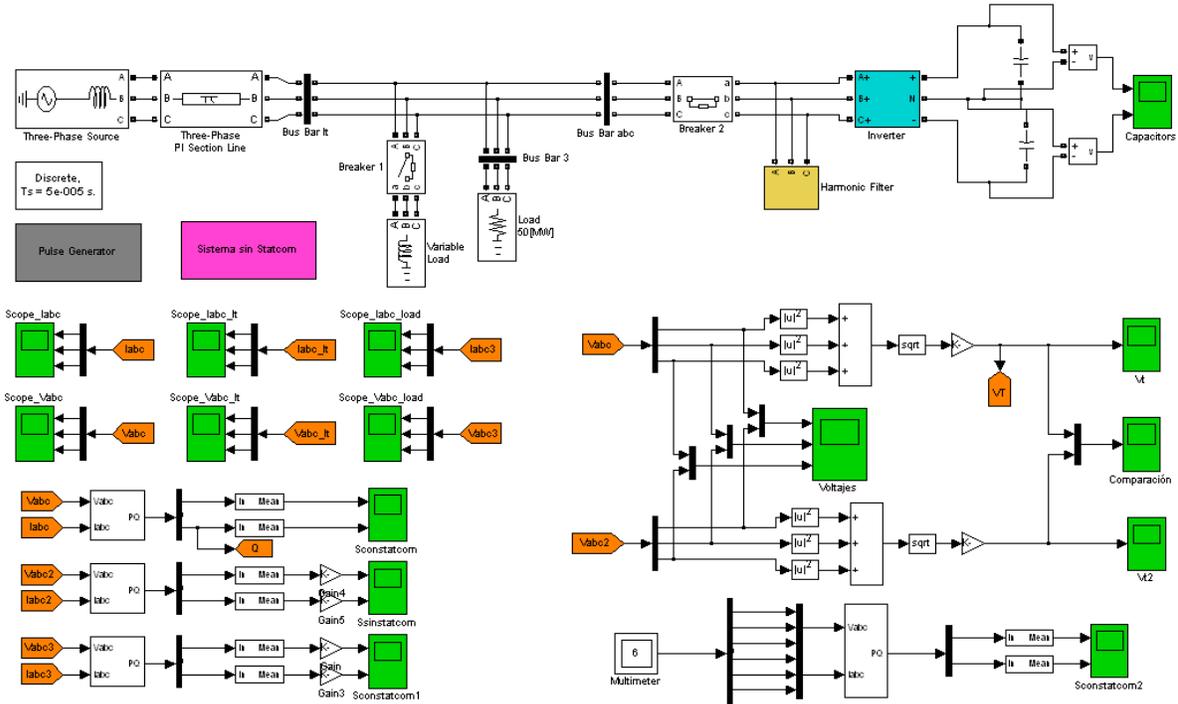


Figura 75. Modelo utilizado para la simulación.

### 4.2.2. Microred utilizada en la simulación

En la Figura 76 se muestra la microred que se utilizó para realizar las simulaciones.

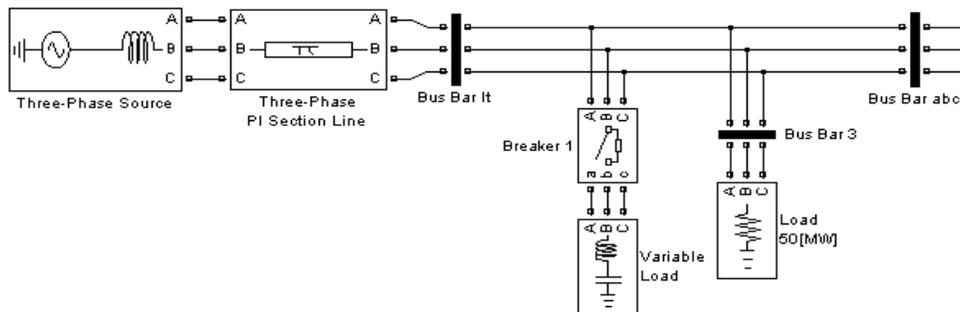


Figura 76. Diagrama de la microred.

Como se puede observar la microred consta de una fuente trifásica de voltaje, una sección de línea de transmisión según modelo PI, una carga resistiva y una carga inductiva o capacitiva trifásica controlada por un interruptor trifásico.

La carga conectada al interruptor trifásico funciona como una carga variable, ya que el interruptor controla su conexión y desconexión de la microred dado cierto vector de tiempos. La idea de esto es simular un consumo variable que afecte a la potencia reactiva consumida y esto impacte directamente en la tensión de la microred.

Se utilizó una fuente trifásica de voltaje y no un generador sincrónico debido a que al colocar ese bloque necesariamente debía incluir un controlador para dicho generador el cual también trataría de compensar las variaciones de tensión en la microred provocando que los resultados obtenidos por la acción del equipo de compensación modelado no fueran reales.

Para la línea de transmisión se eligió una sección de línea modelo PI debido a que se quiso representar un tramo corto de línea y no era necesario distribuir los parámetros.

También se puede observar el bloque que realiza las mediciones trifásicas de voltaje y corriente en la microred, estos valores son utilizados para realizar el control de tensión y despliegue de las gráficas.

Se observa el bloque “POWERGUI” que muestra el tipo de simulación y el tiempo de discretización. En este caso se utilizó una simulación en discreto y con un tiempo de  $5E-5$  segundos.

En la sección de anexos se pueden revisar las tablas con los parámetros utilizados para cada bloque.

### 4.2.3. Elementos del STATCOM

En la Figura 77 se muestra el conjunto de elementos que conforma el STATCOM que se diseñó y modeló para realizar las simulaciones.

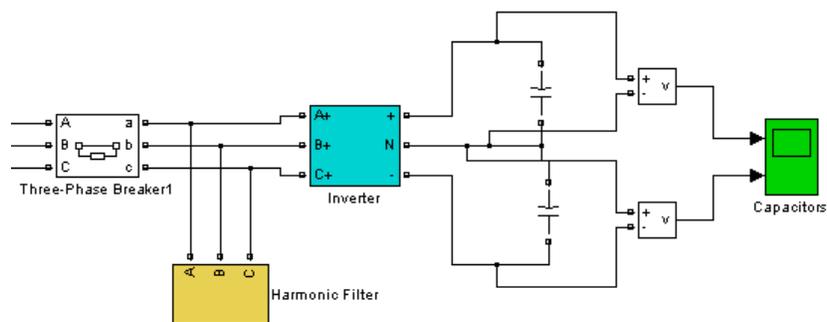


Figura 77. Diagrama del STATCOM.

El STATCOM está constituido por un bloque inversor, 2 condensadores, filtros pasivos de armónicos y un interruptor normalmente cerrado.

El bloque inversor se muestra en detalle en la siguiente figura:

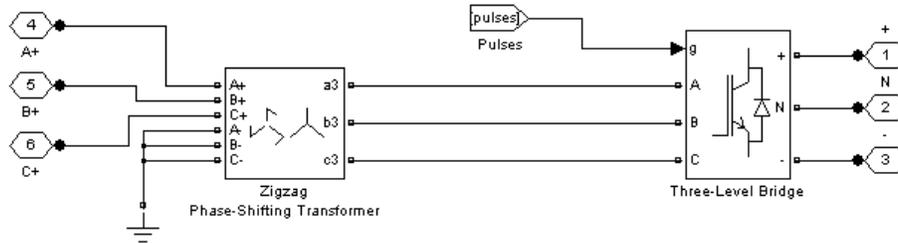


Figura 78. Bloque inversor.

Como se observa se utiliza el bloque “Puentes de tres niveles” compuesto por IGBT y Diodos que es activado por los pulsos que son ingresados a través de la compuerta “g”. Estos pulsos son generados por otro bloque denominado “Pulse Generator” que se retroalimenta de información de la tensión y de la potencia reactiva.

El puente de tres niveles se encuentra conectado, por un lado a dos condensadores con el punto neutro común y por el otro a un transformador Zigzag que implementa un desfase de +7.5 grados con el fin de reducir el contenido armónico.

Como medida adicional de mitigación de armónicos se incluyó un bloque de filtros pasivos. El detalle se muestra en la Figura 79:

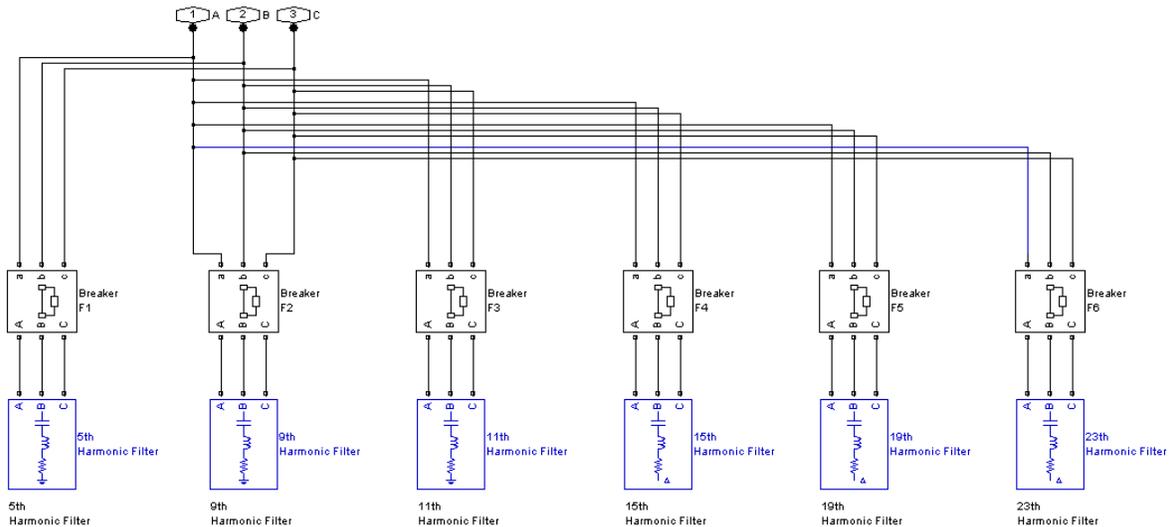


Figura 79. Bloque filtro pasivo de armónicos.

Todo el conjunto está conectado a la microrred a través de un interruptor trifásico que es utilizado solo para el control del aporte del STATCOM. Este interruptor trifásico,

como se dijo anteriormente, se encuentra normalmente cerrado y podría ser eliminado sin que afecte al funcionamiento.

Los parámetros de los elementos se encuentran disponibles en la sección anexos.

#### 4.2.4. Generador de pulsos

En la Figura 80 se muestra el interior del subsistema “Generador de pulsos”. Se puede observar que básicamente está compuesto por dos controladores PI ajustados en forma manual, esto es, variando los valores de las ganancias proporcionales e integrales hasta obtener la respuesta deseada, un generador de disparos de pulsos y un PLL.

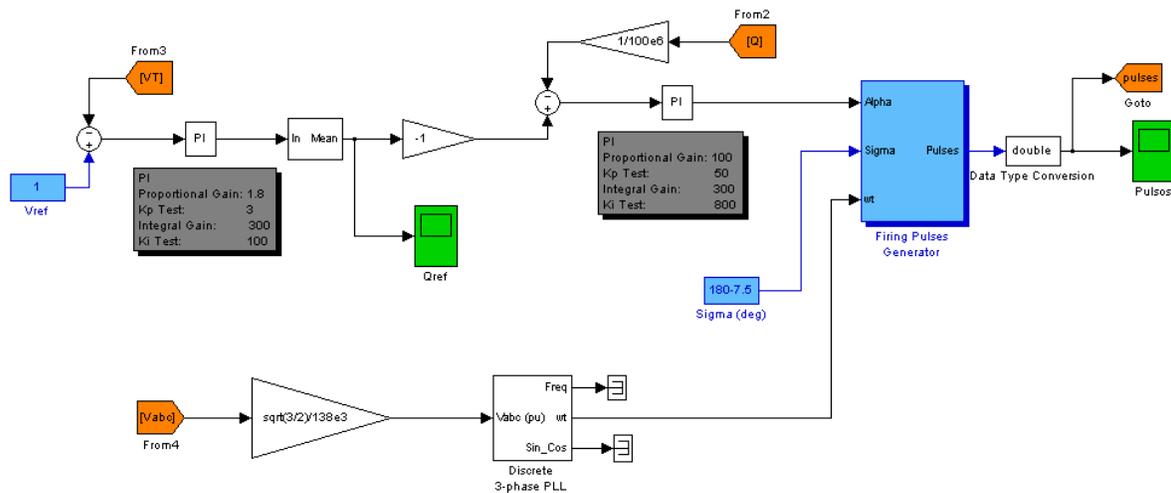


Figura 80. Generador de pulsos.

Este sistema esta realimentado de las señales de voltaje VT, que su cálculo será explicado en detalle más adelante, y la de potencia reactiva Q. Estas señales generan el valor “Alpha” que junto con el valor “Sigma” ajustado por el desfase introducido por el transformador Zig-zag y el valor de “wt” generado por el PLL ingresan al “Firing Pulses Generator”. Este bloque fue adaptado del trabajo hecho en [12]. Como resultado se obtienen los pulsos para controlar el encendido y apagado sincronizado de los IGBT’s.

En la Figura 81 se puede apreciar el modelo Simulink que genera los pulsos para una fase, en este caso la fase A y en la Figura 82 se puede apreciar un esquema de cuáles son las condiciones para generar Q1, Q2, Q3 y Q4.

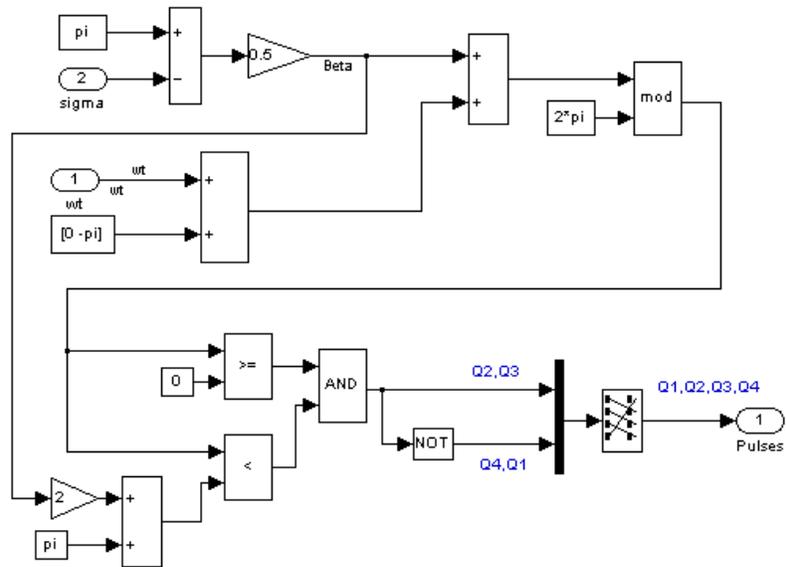


Figura 81. Generador de pulsos para una fase.

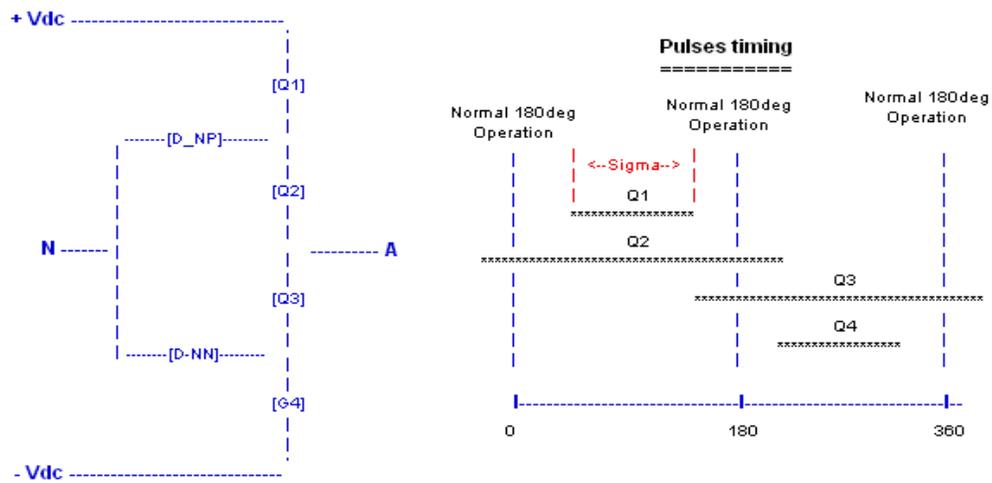


Figura 82. Esquema de generación de pulsos.

#### 4.2.5. Bloques para gráficos del STATCOM

En la Figura 83 se muestran los elementos que permiten graficar y capturar los datos de las tensiones, corrientes y potencias de las barras y elementos de la red simulada.

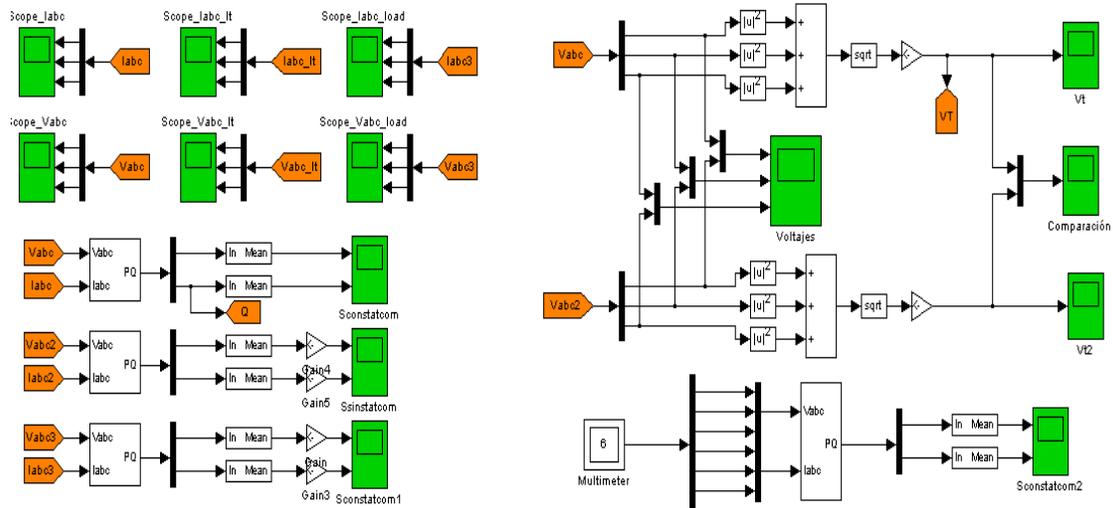


Figura 83. Elementos para gráficos de voltajes, corrientes y potencias.

A continuación se muestra la ecuación con la cual se calcula el valor de la tensión VT y en la Figura 84 se muestra la misma ecuación transformada a elementos de Simulink.

$$VT = \frac{\sqrt{|V_a|^2 + |V_b|^2 + |V_c|^2}}{138e3}$$

Ecuación 30

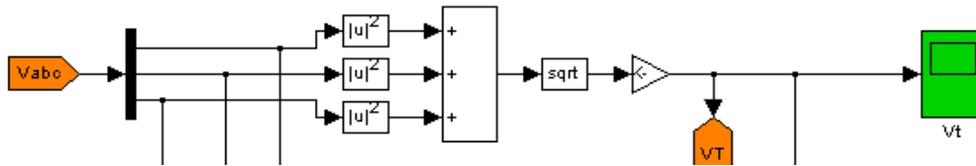


Figura 84. Cálculo de tensión VT.

# Capítulo 5

## 5. Análisis

A continuación se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones efectuadas bajo el Software Matlab 7.0.4.365 (R14) Service Pack 2 y la versión 6.2 (R14SP2) de Simulink con su caja de herramientas “SimPowerSystems” versión 4.0.1. para mostrar el comportamiento del dispositivo modelado.

### 5.1. Simulaciones

La microred a la cual se encuentra conectado el STATCOM se encuentra conformada por una fuente trifásica que opera a 138[kV] y 60[Hz] la cual alimenta una carga trifásica equilibrada de 50[MVA] puramente resistiva a través de una línea de transmisión según modelo PI de 100[km]. El STATCOM de seis pulsos es conectado al sistema a través de un transformador trifásico de una potencia nominal de 25[MVA], relación 138[kV] - 60[kV] en configuración Zig-Zag, con un desfase de  $+7,5^\circ$ . Este transformador es conectado a la red a través de un interruptor trifásico normalmente cerrado.

Los condensadores en el lado DC del circuito inversor tienen un valor de 500[ $\mu$ F] y los dispositivos utilizados en el circuito inversor son IGBTs con una red de amortiguamiento de 1[M $\Omega$ ] y 0.05[ $\mu$ F].

Para probar el sistema bajo condiciones de operación distintas a la de régimen permanente se simula el ingreso violento de una carga puramente inductiva la cual hace evidente la necesidad de compensar reactivos y de soporte en la regulación de tensión. Este requerimiento se realiza mediante el cierre programado de un interruptor que conecta una carga inductiva de 50[MVA].

Con el fin de no recargar con la información completa de los parámetros de los elementos, en este capítulo sólo se mencionan los más importantes. La lista detallada se puede encontrar en la sección de anexos.

#### 5.1.1. Simulación N°1 sin perturbaciones

La siguiente tabla muestra la secuencia de eventos realizados durante la simulación.

Tiempo [s]	Evento
0.0	Inicio de la simulación
1.5	Fin de la simulación

Tabla 1. Eventos simulación N°1.

En las siguientes figuras se pueden ver las curvas características de los principales parámetros en consideración, como son el voltaje de en la carga, la potencia activa y la potencia reactiva durante la simulación sin introducir perturbación alguna durante 1.5 segundos.

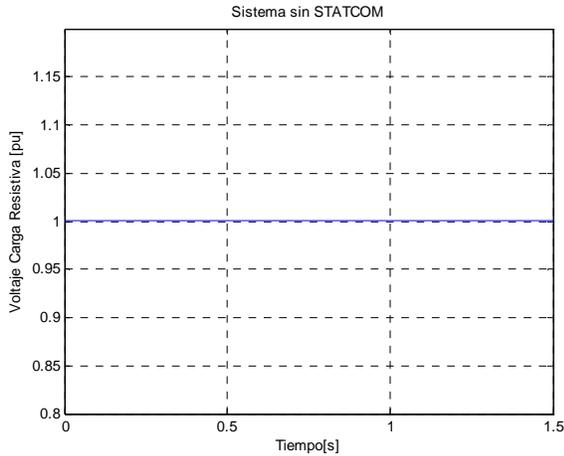


Figura 85. Voltaje en la carga sin STATCOM.

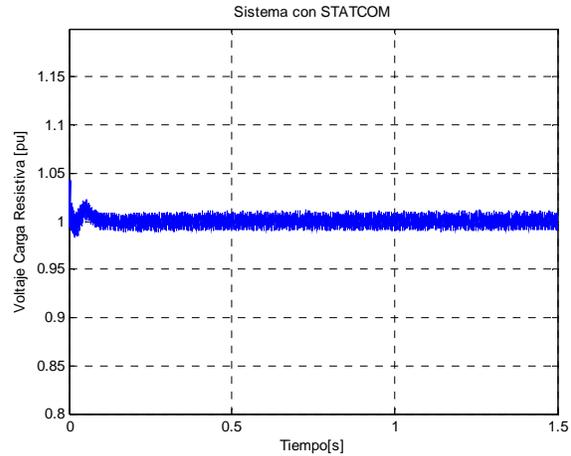


Figura 86. Voltaje en la carga con STATCOM.

En la Figura 85 se puede observar el voltaje en la carga resistiva en el sistema sin STATCOM conectado. Como anteriormente se dijo se supone un consumo fijo puramente resistivo. Como durante la simulación no se introduce ninguna perturbación el voltaje permanece constante en un valor muy cercano a 1 en “por unidad”. En la Figura 86 se observa la misma situación, pero en el sistema con STATCOM. Se puede ver que existe una perturbación introducida por la presencia de armónicos generadas por el inversor de 6 pulsos. Esta perturbación fue reducida hasta el 1% del valor en p.u. gracias a la conexión de filtros pasivos. En la Figura 87 se muestra el gráfico del análisis de Fourier del nivel de armónicos presente en la tensión de la carga.

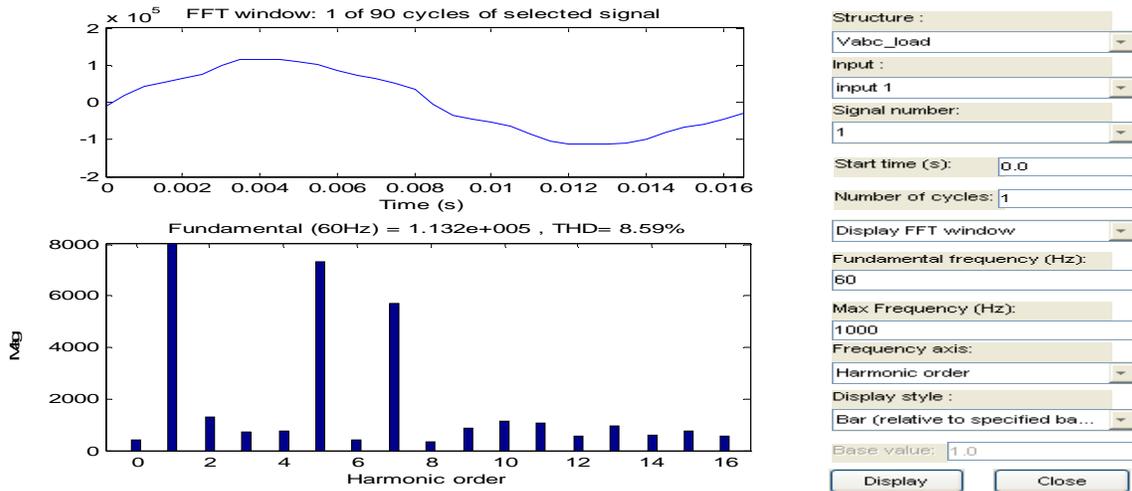
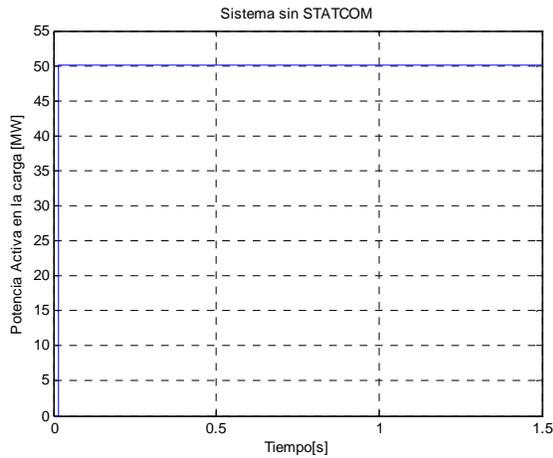
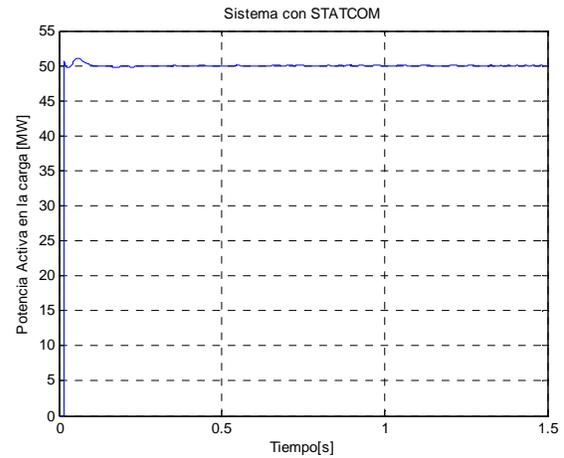


Figura 87. Armónicos presentes en la tensión de la carga.

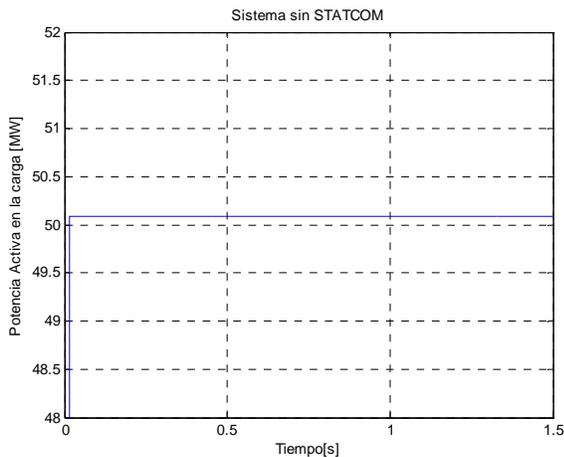
En la Figura 88 se observa el requerimiento de potencia activa de la carga, que según parámetros son 50[MW], luego el gráfico es consecuente con lo solicitado. En el caso de el sistema con STATCOM, Figura 89, se ve una situación similar, salvo algunas perturbaciones que se ven ampliadas en la Figura 91 y que se deben a los consumos nominales de los IGBT's del puente de 3 niveles y otros dispositivos del STATCOM.



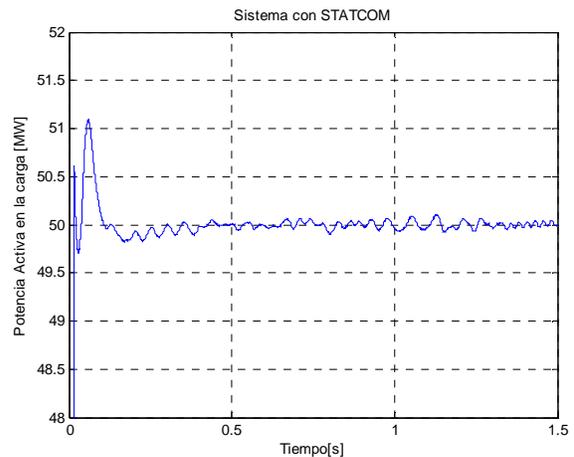
**Figura 88. Potencia activa en la carga sin STATCOM.**



**Figura 89. Potencia activa en la carga con STATCOM.**

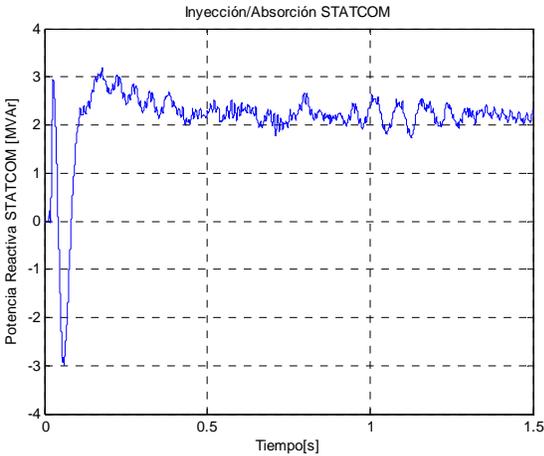


**Figura 90. Potencia activa en la carga sin STATCOM, amplificada.**

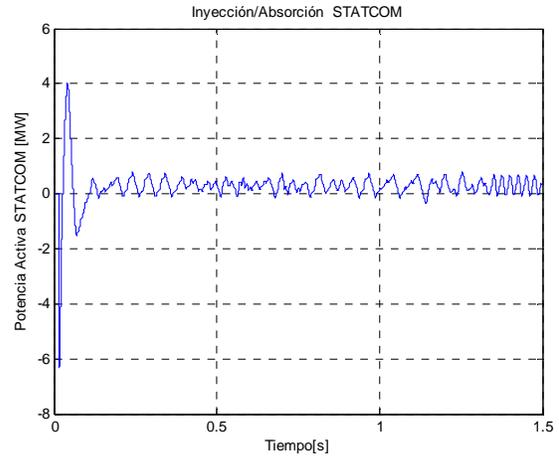


**Figura 91. Potencia activa en la carga con STATCOM, amplificada.**

A continuación se muestra el comportamiento del STATCOM en lo que se refiere a la inyección/absorción de potencia activa y reactiva al sistema. Como el sistema no recibe perturbaciones, es esperable que no exista una participación del STATCOM, sin embargo, y a causa de la presencia de los condensadores en el lado DC del sistema, se produce un fenómeno de inyección/absorción de potencia activa y reactiva al sistema. Esto también se debe al consumo que tienen el resto de los dispositivos que conforman el STATCOM.

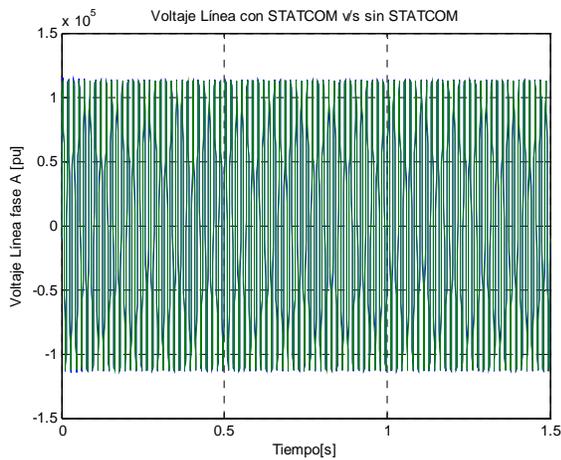


**Figura 92. Inyección/Absorción de potencia reactiva del STATCOM.**

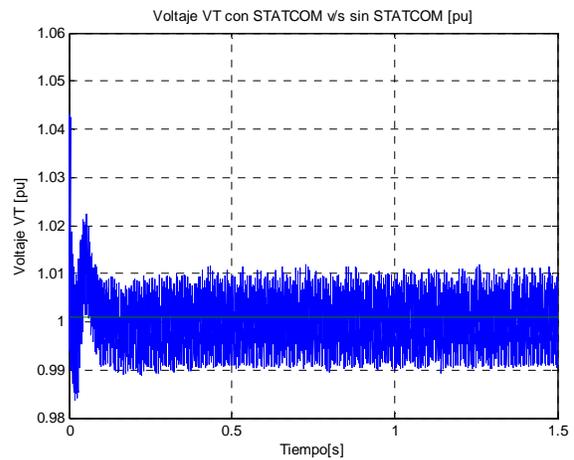


**Figura 93. Inyección/Absorción de potencia activa del STATCOM.**

Finalmente la parte más importante de nuestro análisis es ver el comportamiento de las tensiones en la línea ya que ello nos permitirá concluir si la aplicación del dispositivo diseñado nos permite cumplir con el objetivo de estabilizar la tensión ante perturbaciones. En la Figura 94 se han superpuesto las gráficas de las tensiones en la fase A en el caso del sistema con y sin la presencia del STATCOM en colores azul y verde respectivamente. Como en este caso no se introdujo perturbaciones no existen diferencias entre ambas curvas. En la Figura 95 se puede apreciar la tensión VT, nuevamente en azul con el STATCOM y en verde sin el STATCOM. Notar que al comienzo de la simulación existe una oscilación en la tensión y el origen radica en el voltaje inicial de los condensadores del lado DC.

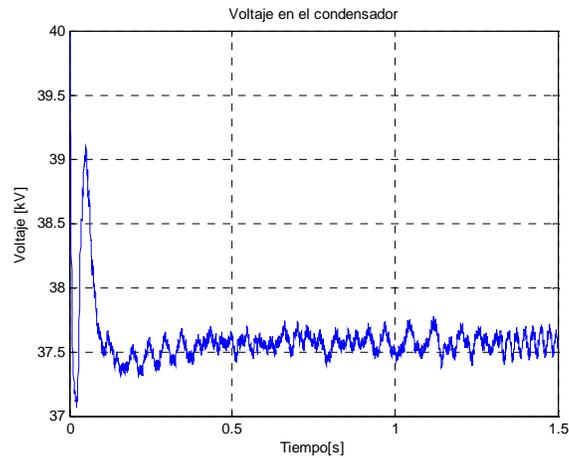


**Figura 94. Voltaje de la línea con y sin STATCOM.**



**Figura 95. Voltaje VT con y sin STATCOM.**

En la Figura 96 se puede apreciar el voltaje de uno de los condensadores del STATCOM cuya tensión inicial fue fijada en 40 [kV] pero que se estabiliza en los 37.5 [kV] aproximadamente.



**Figura 96. Voltaje de un condensador.**

### 5.1.2. Simulación N°2 ingreso de carga inductiva.

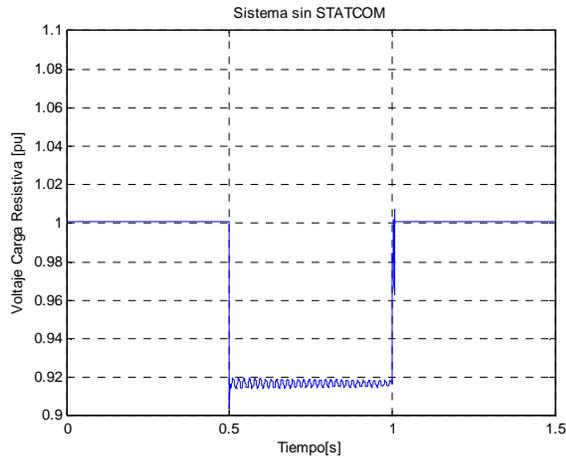
La siguiente tabla muestra la secuencia de eventos realizados durante la segunda simulación.

Tiempo [s]	Evento
0.0	Inicio de la simulación
0.5	Conexión de carga inductiva mediante interruptor
1.0	Desconexión de carga inductiva mediante interruptor
1.5	Fin de la simulación

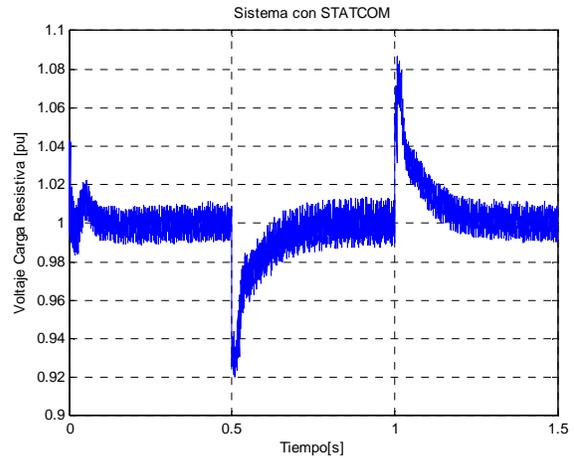
**Tabla 2. Eventos simulación N°2.**

Al igual que en la sección anterior, en las siguientes figuras se pueden observar las curvas características de los principales parámetros en consideración. En esta segunda simulación a los 0.5 segundos se introduce violentamente una carga inductiva. Esto se logra cerrando el interruptor trifásico de la carga inductiva. Posteriormente a esto y transcurridos 0.5 segundos, es decir, al segundo de simulación se vuelve a abrir el interruptor desconectando de la red la carga inductiva antes señalada. A los 1.5 segundos finaliza la simulación.

En la Figura 97 se puede ver el voltaje en la carga resistiva en el caso sin STATCOM. Se puede apreciar que la tensión cae hasta los 0.92[p.u.] por efecto de esta carga inductiva, es decir, la tensión baja hasta los 127[kV]. Se desea estabilizar el voltaje ante este tipo de perturbaciones mediante la utilización de un STATCOM. El efecto producido por este elemento se puede apreciar en la Figura 98 donde rápidamente la tensión vuelve a alcanzar la unidad. Cuando el interruptor se abre la tensión vuelve a su valor unitario y el STATCOM debe reducir rápidamente su aporte al sistema.

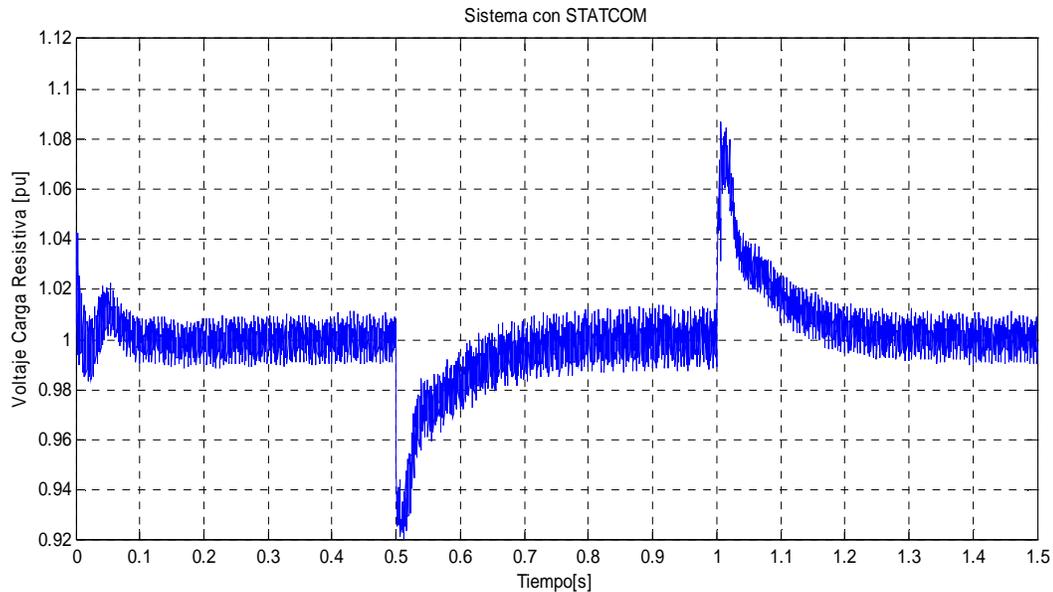


**Figura 97. Voltaje en la carga sin STATCOM.**



**Figura 98. Voltaje en la carga con STATCOM.**

En la Figura 99 se puede ver en forma extendida y con más detalle el comportamiento de la tensión en la carga con el aporte del STATCOM.



**Figura 99. Voltaje en la carga con STATCOM, ampliado.**

En el Anexo 3 se puede observar una tabla con los datos numéricos de la simulación N°2 desde los 0.49 a los 1.005 segundos. En ella se puede apreciar que a partir de los 0.635 segundos la tensión comienza a estabilizarse en un valor cercano a la unidad. Se ha marcado el valor 0.66 segundos ya que a partir de ese tiempo no se registran valores de tensión menores a 0.98[pu]. Luego podemos decir que el tiempo que tarda el STATCOM en estabilizar la tensión, aceptablemente, frente a una perturbación inductiva de 50[MVAR] es de aproximadamente 0.16 segundos.

En la Figura 100 se puede ver el comportamiento de la potencia activa sin la compensación del STATCOM, donde hay una disminución apreciable de la potencia activa, desde los 50,048[MW] hasta los 42,38[MW]. Esto se debe al requerimiento de potencia reactiva de la perturbación que, como anteriormente se dijo, hace disminuir la tensión hasta los 127[kV] y como en la sección 4.1.3 se explico que la potencia consumida por la carga era proporcional al cuadrado del voltaje se explica el fenómeno. A continuación se realiza brevemente este cálculo:

$$P_2 = \frac{(V_2)^2 \cdot P_1}{(V_1)^2}$$

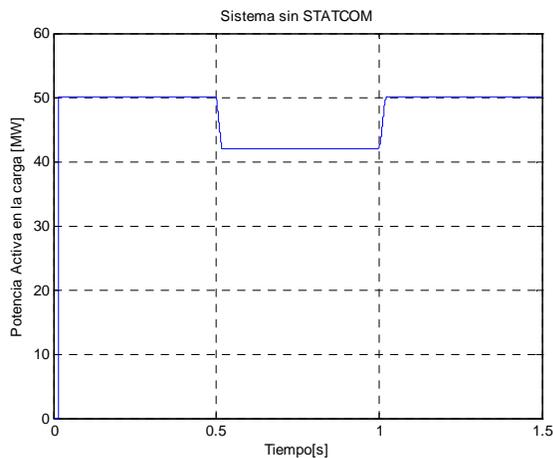
$$P_2 = \frac{16129 \cdot 50.048}{19044}$$

$$P_2 = 42.38[MW]$$

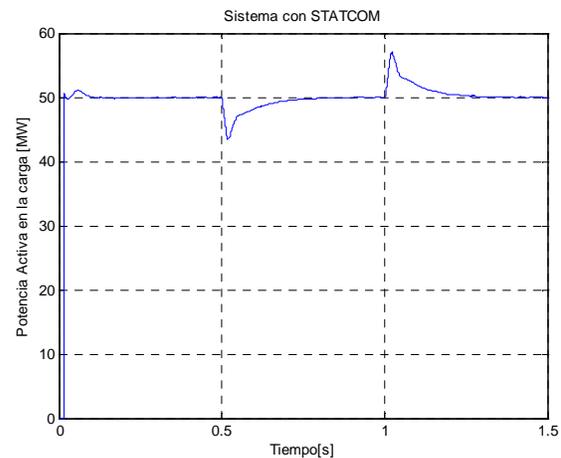
**Ecuación 31**

Donde  $P_1$  corresponde a la potencia activa antes de introducir la perturbación y  $P_2$  la potencia activa después de la perturbación.  $V_1$  y  $V_2$  son los voltajes antes y después de la perturbación respectivamente. Se observa que los valores obtenidos son muy aproximados a los obtenidos a través del gráfico de la simulación de Matlab.

En la Figura 101 se puede ver el comportamiento en el caso con STATCOM. Como se está inyectando potencia reactiva al sistema en forma externa, a través la energía almacenada en los condensadores del lado DC, el sistema puede volver a estabilizar la potencia activa al cabo de 0.25 segundos de operación del STATCOM.

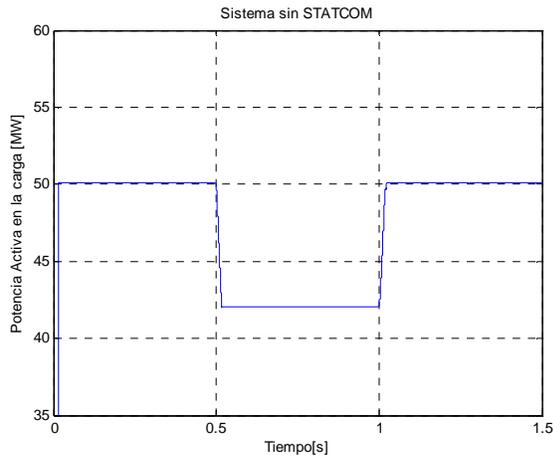


**Figura 100. Potencia activa en la carga sin STATCOM.**

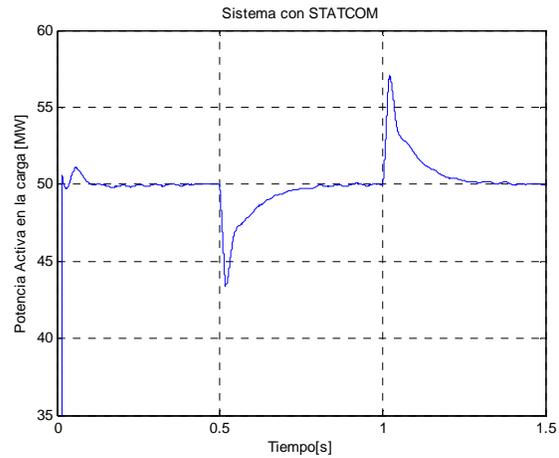


**Figura 101. Potencia activa en la carga con STATCOM.**

El fenómeno descrito anteriormente se puede ver con más claridad en la Figura 102 y Figura 103 donde aparecen los gráficos ampliados y con las potencias aportadas.

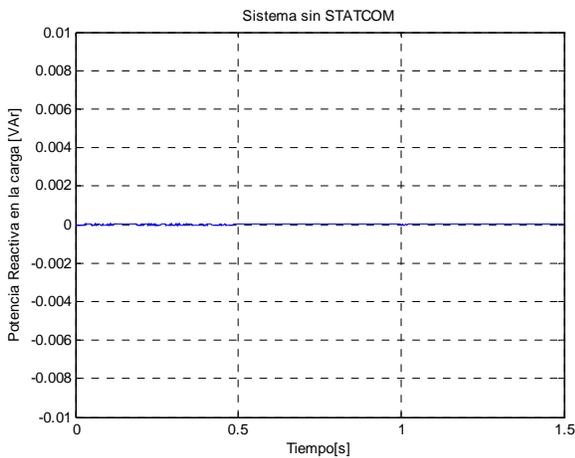


**Figura 102. Potencia activa en la carga sin STATCOM, ampliada.**

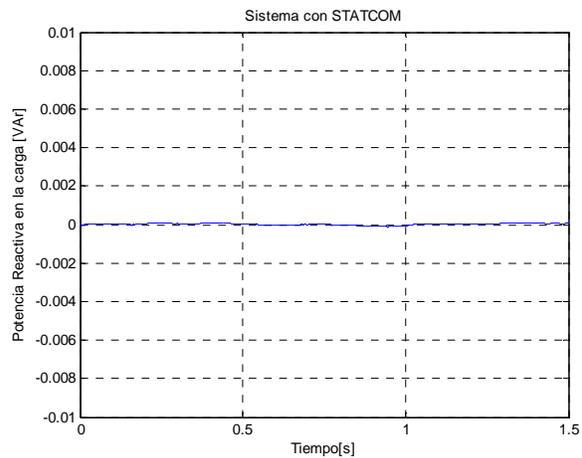


**Figura 103. Potencia activa en la carga con STATCOM, ampliada.**

En la Figura 104 y Figura 105 se puede ver el comportamiento de la potencia reactiva en la carga, que como era esperable no presenta variaciones en ambas condiciones, ya que estamos en presencia de un consumo que fue definido por los parámetros como puramente resistivo.

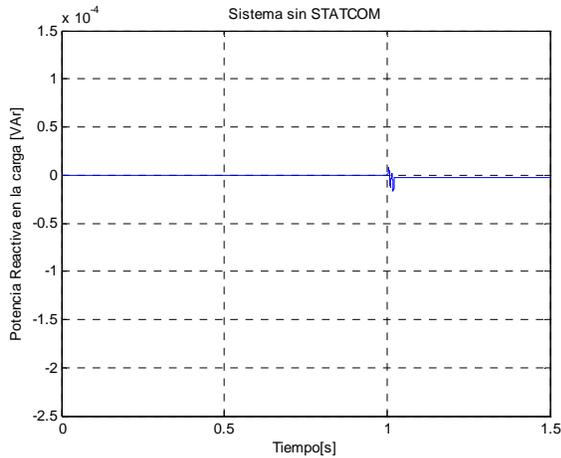


**Figura 104. Potencia Reactiva en la carga sin STATCOM.**

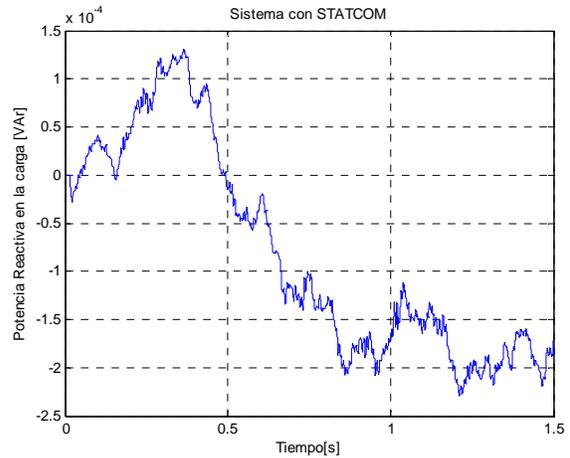


**Figura 105. Potencia Reactiva en la carga con STATCOM.**

En una escala con mayor resolución de  $1E-4$  podemos ver algunas variaciones pequeñas que pueden ser atribuidas a los dispositivos de conexión y desconexión de las cargas que podrían interferir con las mediciones, al contenido armónico aportado por el inversor y al modelo de carga que utiliza Matlab.

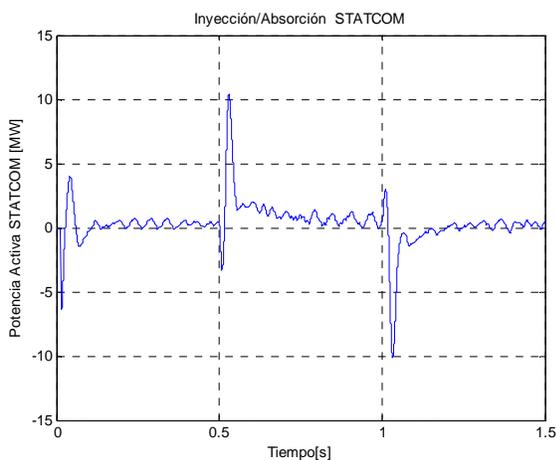


**Figura 106. Potencia Reactiva en la carga sin STATCOM, amplificada 1E-4.**

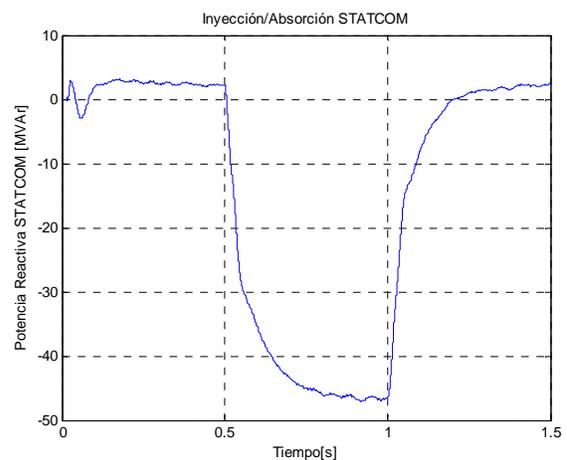


**Figura 107. Potencia Reactiva en la carga con STATCOM, amplificada 1E-4.**

El STATCOM por medio de sus condensadores permite la inyección de potencia activa y reactiva. Esto se puede apreciar en las siguientes figuras donde se muestra el aporte en cuanto a potencias del STATCOM.



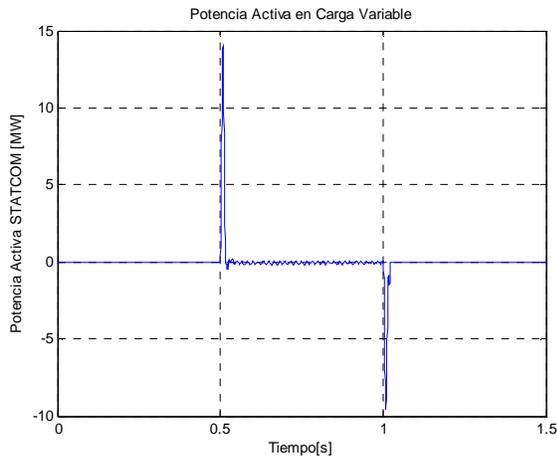
**Figura 108. Inyección/Absorción de potencia activa del STATCOM.**



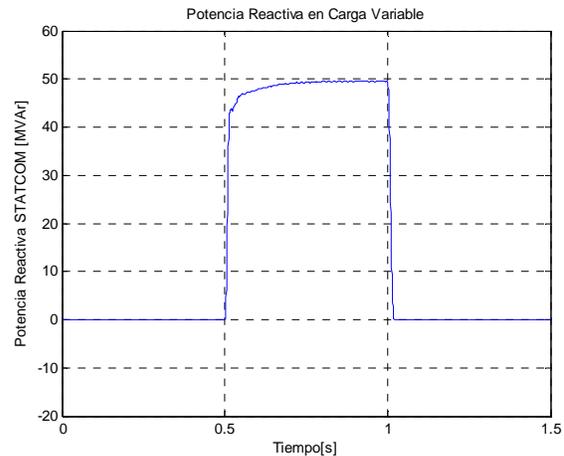
**Figura 109. Inyección/Absorción de potencia reactiva del STATCOM.**

En la figura 105 se puede ver que la potencia activa aportada por el STATCOM aumenta bruscamente a partir de los 0.5[s] de simulación que coincide con el ingreso de la carga inductiva, 0.1[s] después la inyección potencia activa comienza a disminuir. Este aporte de potencia activa se explica con la estabilización de la potencia activa de la carga resistiva en torno a los 50[MW] como se vio en la Figura 103. En la Figura 109 se puede ver la potencia reactiva absorbida por el STATCOM con el fin de estabilizar la tensión. Para ver de mejor manera el efecto de intercambio de potencia sería conveniente ver lo que sucede con la potencia en la carga inductiva que se ingresa a la red. Los gráficos de este comportamiento se pueden ver en la Figura 110 y Figura 111.

El pico que se produce en la potencia activa se debe a la presencia del interruptor trifásico que realiza la conexión al sistema. Este dispositivo tiene un consumo de potencia activa debido a su circuito de amortiguación y a su impedancia interna, que se manifiesta en tanto en la conexión como en la desconexión del sistema. En la Figura 111 se puede ver la potencia reactiva consumida por la carga variable y se observa que su forma es muy similar a la de la Figura 109 pero en forma invertida, en otras palabras, se ve gráficamente que se está produciendo la compensación de potencia.

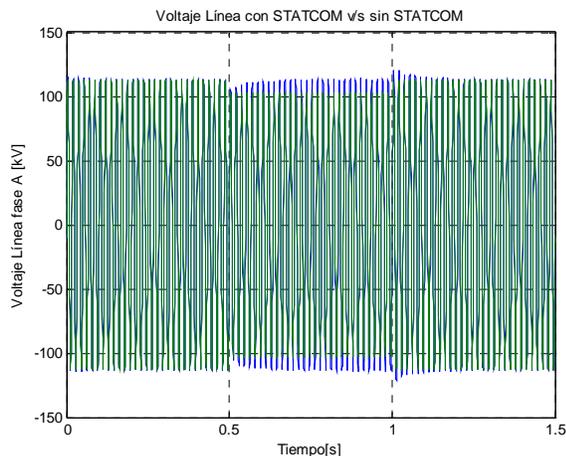


**Figura 110. Potencia activa en la carga variable.**

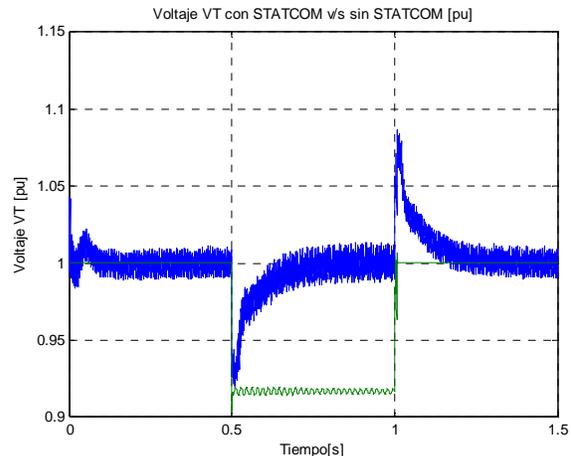


**Figura 111. Potencia reactiva en la carga variable.**

Finalmente vemos en la Figura 112 el voltaje en la línea de la fase A superponiendo los casos sin (verde) y con (azul) STATCOM, donde claramente se ve la compensación que permite la estabilización de la tensión según la referencia dada.



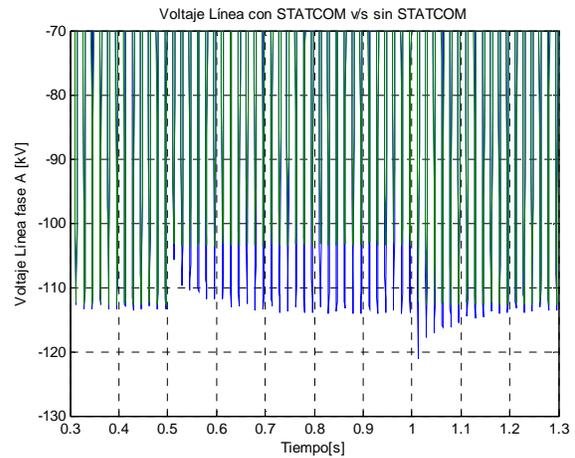
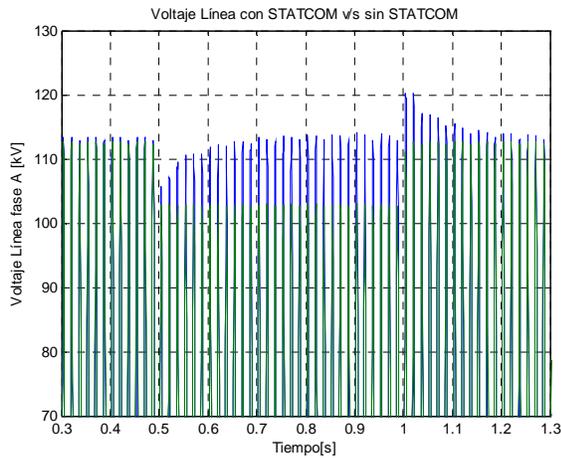
**Figura 112. Voltaje de la línea con y sin STATCOM.**



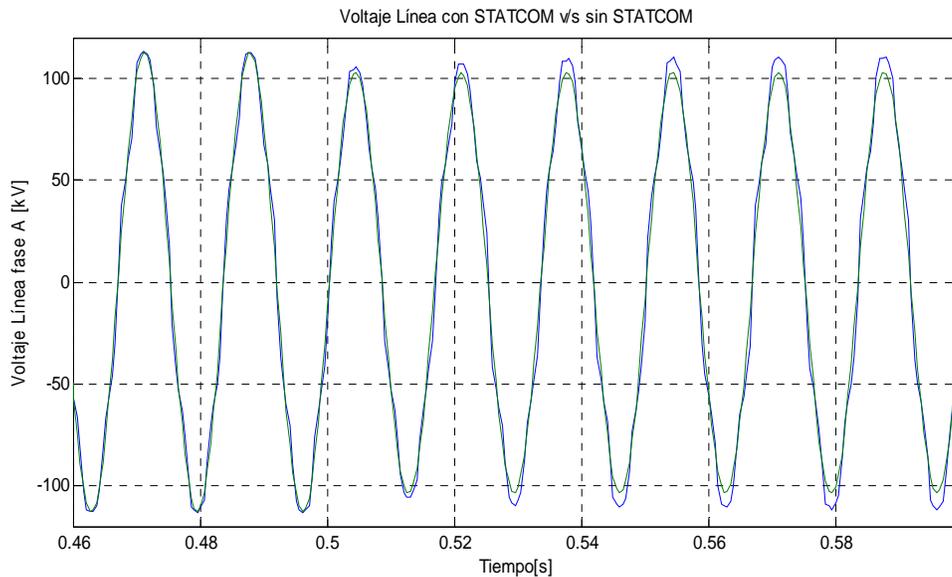
**Figura 113. Voltaje VT con y sin STATCOM.**

En la Figura 113 se pueden ver superpuestos los voltajes VT en ambas situaciones. En color verde el caso sin STATCOM y en azul el caso con STATCOM. Se puede ver claramente la estabilización de la tensión en tono a la unidad.

En la Figura 114 y Figura 115 se puede ver un acercamiento del gráfico del voltaje de la línea con y sin STATCOM en la zona de interés tanto en la parte positiva como en la negativa de la sinusoide.



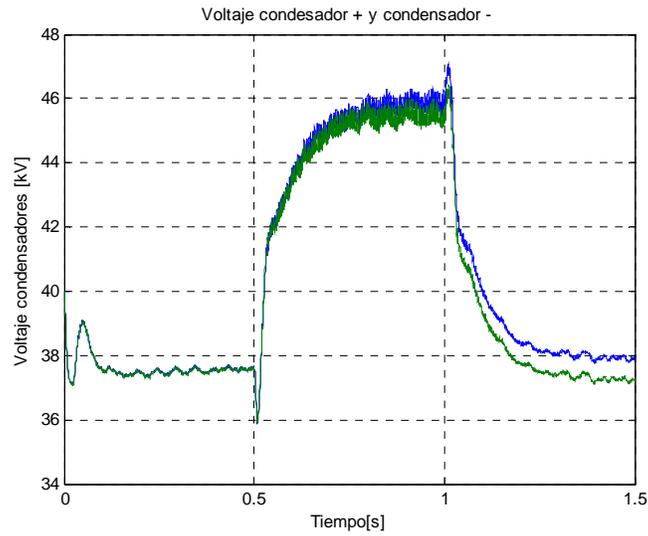
**Figura 114. Voltaje de la línea con y sin STATCOM, superior. Figura 115. Voltaje de la línea con y sin STATCOM, inferior.**



**Figura 116. Sinusoide de voltaje fase A con y sin compensación.**

El gráfico de la Figura 116 se colocó para mostrar varios periodos de sinusoide antes de introducir la perturbación. Se puede ver como la sinusoide comienza a aumentar su amplitud para igualar a la sinusoide que existía antes de la perturbación. La sinusoide no se ve completamente suave debido a que se utilizó una simulación en tiempo discreto y para realizar la simulación en modo continuo o reducir el tiempo de muestreo se requería de un computador con mayor cantidad de memoria RAM ya que el utilizado se detenía en medio de la simulación por falta de recursos.

Finalmente se muestra el gráfico de voltaje en bornes de uno de los condensadores del lado DC del inversor.



**Figura 117. Voltaje en los condensadores.**

En la Figura 117 se puede ver como el voltaje de los condensadores se encuentra oscilando en torno a los 37[kV] hasta que en los 0.5[s] comienza a subir su voltaje hasta los 46[kV] donde se estabiliza para comenzar a decaer a partir del segundo de simulación, momento en el cual, recordemos que se vuelve a desconectar la carga inductiva.

# Capítulo 6

## 6. Conclusiones

En este trabajo se ha mostrado el desarrollo de un modelo de un medio de generación sin control externo, como parte de un sistema de generación distribuida y, además, se ha diseñado y modelado compensador estático con electrónica de potencia (IGBT's) para estabilizar tensiones en la micro red señalada.

Se revisó bibliográficamente el contexto que existe a nivel mundial en relación con la generación distribuida. Como parte de lo anterior, se describe el concepto de microred, la disposición de cada uno de sus elementos y las complicaciones que tiene implementarlas. La mayoría de las publicaciones estudiadas en ese contexto datan de la última década y coinciden con la aparición y desarrollo de los problemas asociados a la implementación de estas microredes.

Como solución a parte de estos problemas se vieron algunas técnicas ampliamente utilizadas para el control de potencia como el control automático de generación (AGC), el control por excitación del generador sincrónico, transformadores con cambiadores de TAP's, equipos de compensación estáticos. Sobre estos últimos se realizó una descripción de la mayoría de los tipos existentes ya que en ellos se basó el presente trabajo de título, en específico en el diseño de un STATCOM para aplicarlo a generación distribuida.

Como en nuestro diseño se utilizó el almacenamiento de energía como una opción de control automático de microredes, se mostraron algunas tecnologías disponibles, principales características, materiales constituyentes y aplicaciones. Algunas de ellas son baterías, condensadores, supercondensadores o ultracondensadores y discos de inercia.

Para realizar el diseño del STATCOM se revisaron algunos conceptos de la operación y control, para posteriormente mostrar el diagrama de bloques del STATCOM sugerido para el diseño. Entre los elementos que se utilizaron para el diseño del STATCOM se mencionó la utilización de un inversor de 6 pulsos, que como consecuencia trajo contaminación en la red con armónicos. Por esta razón, se revisó la teoría relacionada con la eliminación de armónicos mediante el uso de transformadores bajo distintas conexiones y se modeló una de ellas, la conexión Zigzag. Como medida adicional a la mitigación de armónicos se utilizaron filtros pasivos.

Para dar a conocer las herramientas más importantes del diseño y funcionamiento del compensador se muestran los elementos disponibles en SimPowerSystems, describiendo la forma en que se utilizan y sus parámetros más importantes.

Se realizó una descripción del modelo implementado en Matlab-Simulink mostrando cada uno de sus bloques y explicando la funcionalidad de ellos. Por ello se

definió la microred utilizada para el estudio: una fuente trifásica sin control externo, una línea de transmisión modelo PI una carga fija resistiva y una carga inductiva conectada a través de un interruptor trifásico lo que le daba su condición de carga variable ya que su entrada y salida estaba coordinada por tiempos definidos antes de simular. Se utilizaron valores reales para los parámetros de los elementos, algunos proporcionados por ejemplos de Matlab-Simulink y otros de las revisiones bibliográficas. En el caso de los controladores PI se debió hacer pruebas de ensayo y error para ajustar sus valores de modo de encontrar la respuesta deseada.

Una pieza fundamental para el análisis fueron los resultados gráficos de las simulaciones, para lo cual se implementaron varias barras de medición de tensión y corriente con el fin de recibir información desde varios puntos de importancia. Estos valores se muestran gráficamente a través de los “*Scopes*” que además permiten guardar las tablas con los valores.

Se simuló el sistema sin introducir la carga variable y se analizaron las curvas de voltaje y potencia obtenidas para analizar las diferencias y similitudes con el caso aplicando la carga inductiva. Se observó que existía un alto contenido armónico por lo cual resultó necesario implementar un sistema de filtros pasivos. Al realizar este ajuste se llegó a obtener una variación del 1% en la tensión lo cual es aceptable dado el nivel de tensión y la normativa vigente. También se observó que los consumos parametrizados en los cuadros de diálogos de las cargas eran consecuentes con los gráficos obtenidos.

En una segunda simulación, esta vez con la carga inductiva de 50[MVAr], se encontró el mismo problema de contaminación armónica. Por efecto de la conexión de la carga inductiva se vio una disminución de la tensión hasta los 92[pu], es decir, cerca de un 8% de variación en la tensión y, por tanto, se requirió estabilizar rápidamente la tensión, motivo central de este trabajo. Como resultado de la acción del STATCOM diseñado se logró estabilizar la tensión, aceptablemente, en un tiempo cercano a los 0.16 segundos.

Como parte del análisis de la estabilización de la tensión se explicó el intercambio de potencias entre el sistema (cargas) y el STATCOM, a partir del comportamiento de las cargas frente a variaciones de tensión, llegando a resultados teóricos de potencia activa muy cercanos a los obtenidos en la simulación. Algo parecido se pudo apreciar en el caso de la potencia reactiva, pero con un análisis gráfico.

Finalmente se hizo una comparación entre las tensiones de la fase A, recordemos que el sistema simulado está equilibrado, en el caso sin y con STATCOM y se pudo observar gráficamente el efecto de compensación y estabilización de la tensión, por lo cual se hace necesario contar con algún equipo de estas características en generación distribuida.

El esquema de STATCOM basado en inversores VSI presentan características operativas atractivas para la generación distribuida dada su rapidez de respuesta y la posibilidad de aportar su capacidad nominal en condiciones severas de funcionamiento.

En cuanto a los trabajos futuros se puede mencionar varios puntos:

- Cambio de versión de MATLAB. El modelo simulado fue realizado con la versión 7 y esta no es compatible con las últimas versiones del producto, por lo que se sugiere una nueva implementación del modelo.
- Implementación con PWM. El modelo no cuenta con una modulación por ancho de pulso, la cual nos entrega varias ventajas, entre ellas un ajuste más fino e inteligente de la tensión, en lugar de control solo proporcional e integral. Se sugiere compatibilizar el modelo con el bloque PWM de MATLAB.
- Aumentar el rango de acción. Este compensador fue probado con cargas inductivas de hasta 100[MVAr] obteniéndose resultados aceptables. Se sugiere mejorar el rango de operación y permitir tanto la inyección como la absorción de reactivos.
- Respuesta ante fallas. Durante las simulaciones el compensador se sometió a una falla trifásica a tierra y no pudo soportar esta perturbación y seguir la referencia. Sería de gran utilidad poder responder a fallas pequeñas.
- Niveles de tensión y frecuencia. El sistema trabaja a 138[kV] y 60[Hz], sería útil poder llevar todos los parámetros en p.u. y la frecuencia a 50[Hz], para hacerlo mucho más generalizado.

# Bibliografía

- [1] Shinichi Kusagawa, Jumpei Baba, Maski Ohshimat, Eisuke Masada. “*Supply Power Quality of a Micro Grid based on Distributed Generations in Relation with Power Converter Control*” *Power Electronics and Applications, 2005 European Conference. EPE 2005 – Dresden.*
- [2] Ibraheem, Prabhat Kumar, and Dwarka P. Kothari. “*Recent Philosophies of Automatic Generation Control Strategies in Power Systems*” *IEEE Transactions on power systems Vol 20, N° 1 February 2005.*
- [3] Ledesma Pablo. “*Control de tensión*” *Departamento de Ingeniería Eléctrica Universidad Carlos III Madrid – España, Septiembre 2008.*
- [4] A. Abu-Siada, S. Islam, E.A. Mohamed. “*Adaptive Setting of OLTC to Improve Power Transfer Capability of Power Systems*” *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, China, April 21-24, 2008.*
- [5] Hingorani Narain G., Gyugyi Laszlo. “*Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems*” ISBN 0-7803-3455-8 IEEE Press 2000.
- [6] DeCoster Dennis. “*A state of the art review of energy storage alternatives for mission critical UPS & CPS power systems*” *Proceeding of 2005 – Power Quality Conference. October 2005.*
- [7] Zhou C. “*Carbon nanotube based electrochemical supercondensadors*”. *Georgia Institute of Techonology – 2006*
- [8] Dinh – Nguyen B. “*Performance of supercondensadors as energy storage alternatives*” *California State University Long Beach.*
- [9] Wikipedia. “*Condensador de alta capacidad*”  
<http://es.wikipedia.org/wiki/Supercondensador>
- [10] José H. Vivas N., José G. Suárez P., Jonathan Expósito L. “*Simulación en ATP del compensador estático de potencia reactiva (STATCOM) utilizando técnicas de modulación SPWM*” *Universidad Simón Bolívar – CVIE 2004.*
- [11] Mathworks. “*SimPowerSystems – Documentation*”  
[http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf\\_doc/phymod/powersys/powersys\\_ref.pdf](http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf_doc/phymod/powersys/powersys_ref.pdf)
- [12] Pierre Giroux, Gilbert Sybille. “*Modeling and simulation of a distribution STATCOM using Simulink’s Power Systems Blockset*” *IECON 2001.*

- [13] Salvador Acevedo P. “*Conexiones de Transformadores para Eliminar Armónicas*” *Departamento de Ingeniería Eléctrica. ITESM, Campus Monterrey*
- [14] Lin C “*Sol gel derived electrode materials for supercondensador application*”. *University of South Carolina. 1998*
- [15] Lin Y, Hwang HS, LeeWJ “*Effect of Surface Treatment of Graphite Particles on the Composite Supercondensador of Hydrous Ruthenium Oxides Coatings by Cathodic Deposition Method*”. *Microsc Microanal 2006.*
- [16] Hu YS. “*Electrochemical lithiation synthesis of nanoporous materials with superior catalytic and capacitive activity*”. *Nature Materials 2006.*
- [17] Herbert JJ “*Electrochemistry and structure of the conducting polymer Poli 3 – ( 4 Fluorophenil) Tiophene used in electrochemical supercondensadors*” *Los Ángeles: University of California – 2000.*
- [18] Srithorn “*The control of a STATCOM with supercondensador energy storage for improved power quality cired*” *Seminar 2008: SmartGrids for Distribution.*

# Anexo 1

## 7. Parámetros de los elementos

### 7.1. Fuente trifásica

Parámetro	Valor
Voltaje Fase – Fase RMS [V]	138e3
Ángulo de fase A [grados]	0
Frecuencia [Hz]	60
Conexión Interna	Yg
Resistencia interna [ $\Omega$ ]	0
Inductancia Interna [H]	6.63e-6

Tabla 3. Parámetros fuente trifásica.

### 7.2. Línea de transmisión

Parámetro	Valor
Frecuencia [Hz]	60
Resistencia secuencia cero [ $\Omega$ /km]	0.01273
Resistencia secuencia positiva [ $\Omega$ /km]	0.3864
Inductancia secuencia cero [H/km]	0.9337e-3
Inductancia secuencia positiva [H/km]	4.1264e-3
Capacitancia secuencia cero [F/km]	12.74e-9
Capacitancia secuencia positiva [F/km]	7.751e-9
Largo [km]	100

Tabla 4. Parámetros línea de transmisión.

### 7.3. Carga resistiva

Parámetro	Valor
Configuración	Y (aterrizada)
Voltaje fase – fase nominal RMS [V]	138e3
Frecuencia Nominal [Hz]	60
Potencia Activa [W]	50e6
Potencia Inductiva QL [var] positivo	0
Potencia Capacitiva QC [var] negativo	0

Tabla 5. Parámetros carga resistiva.

### 7.4. Interruptor carga inductiva

Parámetro	Valor
Estado inicial	Abierto
Acción en las 3 fases simultáneamente	SI
Tiempos de transición	“Tra”
Resistencia de interna [ $\Omega$ ]	0.001
Resistencia snubber [ $\Omega$ ]	1e6
Capacitancia snubber [F]	inf

Tabla 6. Parámetros interruptor carga inductiva.

Observación: los tiempos de transición son asignados mediante la variable de inicialización “Tra” la cual puede ser modificada desde “File” > “Model Properties” > “Callbacks” > “InitFcn”.

## 7.5. Carga inductiva

Parámetro	Valor
Configuración	Y (aterrizada)
Voltaje fase – fase nominal RMS [V]	138e3
Frecuencia Nominal [Hz]	60
Potencia Activa [W]	0
Potencia Inductiva QL [var] positivo	Vload_l
Potencia Capacitiva QC [var] negativo	Vload_c

Tabla 7. Parámetros carga inductiva.

Observación: tanto la potencia inductiva como la capacitiva son asignadas mediante las variables de inicialización “Vload\_l” y “Vload\_c” respectivamente, las cuales pueden ser modificadas desde “File” > “Model Properties” > “Callbacks” > “InitFcn”.

## 7.6. Interruptor STATCOM

Parámetro	Valor
Estado inicial	Cerrado
Acción en las 3 fases simultáneamente	SI
Tiempos de transición	4
Resistencia de interna [ $\Omega$ ]	0.001
Resistencia snubber [ $\Omega$ ]	1e6
Capacitancia snubber [F]	inf

Tabla 8. Parámetros interruptor STATCOM.

## 7.7. Transformador Zig-Zag

Parámetro	Valor
Potencia Nominal [VA]	25e6
Frecuencia Nominal [Hz]	60
Voltaje primario nominal fase-fase RMS [V]	138e3
Voltaje secundario nominal fase-fase RMS [V]	60e3
Desfase [grados]	+7.5
Conexión secundario	Y
Resistencia enrollado 1 (zig-zag) [pu]	0.00125
Inductancia enrollado 1 (zig-zag) [pu]	0.05
Resistencia enrollado 2 (zig-zag) [pu]	0.00125
Inductancia enrollado 2 (zig-zag) [pu]	0.05
Resistencia enrollado 3 (secundario) [pu]	0.00125
Inductancia enrollado 3 (secundario) [pu]	0.05
Resistencia de magnetización [pu]	500
Inductancia de magnetización [pu]	500

Tabla 9. Parámetros Transformador Zig - Zag.

## 7.8. Puente de 3 niveles

Parámetro	Valor
Número de ramas	3
Resistencia de snubber $R_s$ [ $\Omega$ ]	1e6
Capacitancia snubber $C_s$ [F]	0.05e-6
Dispositivo de electrónica de potencia	IGBT/DIODOS
Resistencia interna [ $\Omega$ ]	1e-3
Voltaje IGBT modo directo [V]	0
Voltaje DIODO modo directo [V]	0

Tabla 10. Parámetros puente de 3 niveles.

## 7.9. Condensador lado DC

Parámetro	Valor
Resistencia [ $\Omega$ ]	0
Inductancia [H]	0
Capacitancia [F]	"Cc"
Voltaje inicial del condensador [V]	"Vc"
Corriente inicial de la inductancia [A]	0

Tabla 11. Parámetros condensador lado DC.

## 7.10. Filtro armónico 5

Parámetro	Valor
Tipo de filtro	Single-tuned
Conexión del filtro	Y(Aterrizada)
Voltaje nominal fase-fase RMS [V]	138e3
Frecuencia nominal [Hz]	60
Potencia reactiva nominal [var]	500e3
Frecuencia del filtro [Hz]	5*60
Factor de calidad	20

Tabla 12. Parámetros filtro armónico 5.

## 7.11. Filtro armónico 9

Parámetro	Valor
Tipo de filtro	Single-tuned
Conexión del filtro	Y(Aterrizada)
Voltaje nominal fase-fase RMS [V]	138e3
Frecuencia nominal [Hz]	60
Potencia reactiva nominal [var]	500e3
Frecuencia del filtro [Hz]	9*60
Factor de calidad	5

Tabla 13. Parámetros filtro armónico 9.

## 7.12. Filtro armónico 11

Parámetro	Valor
Tipo de filtro	Single-tuned
Conexión del filtro	Y(Aterrizada)

Voltaje nominal fase-fase RMS [V]	138e3
Frecuencia nominal [Hz]	60
Potencia reactiva nominal [var]	500e3
Frecuencia del filtro [Hz]	11*60
Factor de calidad	20

**Tabla 14. Parámetros filtro armónico 11.**

### 7.13. Filtro armónico 15

Parámetro	Valor
Tipo de filtro	Single-tuned
Conexión del filtro	Delta
Voltaje nominal fase-fase RMS [V]	138e3
Frecuencia nominal [Hz]	60
Potencia reactiva nominal [var]	500e3
Frecuencia del filtro [Hz]	15*60
Factor de calidad	2

**Tabla 15. Parámetros filtro armónico 15.**

### 7.14. Filtro armónico 19

Parámetro	Valor
Tipo de filtro	Single-tuned
Conexión del filtro	Delta
Voltaje nominal fase-fase RMS [V]	138e3
Frecuencia nominal [Hz]	60
Potencia reactiva nominal [var]	500e3
Frecuencia del filtro [Hz]	19*60
Factor de calidad	40

**Tabla 16. Parámetros filtro armónico 19.**

### 7.15. Filtro armónico 23

Parámetro	Valor
Tipo de filtro	Single-tuned
Conexión del filtro	Delta
Voltaje nominal fase-fase RMS [V]	138e3
Frecuencia nominal [Hz]	60
Potencia reactiva nominal [var]	500e3
Frecuencia del filtro [Hz]	23*60
Factor de calidad	40

**Tabla 17. Parámetros filtro armónico 23.**

### 7.16. Controlador PI – Tensión VT

Parámetro	Valor
Ganancia proporcional Kp	3
Ganancia integral Ki	100
Límite superior de la salida	1e6
Límite inferior de la salida	-1e6

Valor inicial de la salida	0
Tiempo de muestreo	50e-6

**Tabla 18. Parámetros controlador PI – tensión VT.**

### 7.17. Controlador PI – Potencia Reactiva Q

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Ganancia proporcional Kp	50
Ganancia integral Ki	800
Límite superior de la salida	1e6
Límite inferior de la salida	-1e6
Valor inicial de la salida	0
Tiempo de muestreo	50e-6

**Tabla 19. Parámetros controlador PI – potencia reactiva Q.**

### 7.18. Oscilador enclavado por fase - PLL

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Frecuencia mínima [Hz]	50
Fase inicial [grados]	0
Frecuencia inicial [Hz]	60
Ganancia proporcional Kp	50
Ganancia Integral Ki	100
Tiempo de muestreo	50e-6

**Tabla 20. Parámetros Oscilador enclavado por fase - PLL.**

# Anexo 2

## 8. Código Matlab para realizar los gráficos

### 8.1. Archivo “Graficador.m”

```
%Código graficador de las respuestas de las simulaciones
%
%Autor:           Christian Díaz Duarte
%Ultima Rev:      11-Julio-2009
%E-mail:          chdiaz@ing.uchile.cl

clc
disp(' ')
disp(' ')
disp('           Graficando respuestas de las simulaciones')
disp('           (Última revisión 11-Julio-2009)')
disp(' ')
disp(' ')

disp(['Host:       Matlab ',version])
disp(['Session:    ', datestr(now,0)])
disp(['Path:       ',pwd])
disp(' ')

plot (vt(1:3001,1),vt(1:3001,2)),
grid on,
xlabel 'Tiempo[s]',
ylabel 'Voltaje Carga Resistiva [pu]',
title 'Sistema con STATCOM'

figure
plot (vt2(1:3001,1),vt2(1:3001,2)),
grid on,
xlabel 'Tiempo[s]',
ylabel 'Voltaje Carga Resistiva [pu]',
title 'Sistema sin STATCOM'

figure
plot (Sconstatcom1.time(1:30001,1),Sconstatcom1.signals(1,1).values(1:30001,1)),
grid on,
xlabel 'Tiempo[s]',
ylabel 'Potencia Activa en la carga [MW]',
title 'Sistema con STATCOM'

figure
plot (Ssinstatcom.time(1:30001,1),Ssinstatcom.signals(1,1).values(1:30001,1)),
grid on,
xlabel 'Tiempo[s]',
ylabel 'Potencia Activa en la carga [MW]',
title 'Sistema sin STATCOM'

figure
plot (Sconstatcom1.time(1:30001,1),Sconstatcom1.signals(1,2).values(1:30001,1)),
grid on,
xlabel 'Tiempo[s]',
ylabel 'Potencia Reactiva en la carga [VAr]',
title 'Sistema con STATCOM'
```

```

figure
plot (Ssinstatcom.time(1:30001,1),Ssinstatcom.signals(1,2).values(1:30001,1)),
grid on,
xlabel 'Tiempo[s]',
ylabel 'Potencia Reactiva en la carga [VAr]',
title 'Sistema sin STATCOM'

figure
plot
(Sconstatcom.time(1:30001,1),Sconstatcom.signals(1,2).values(1:30001,1)*(1/(1e6))
),
grid on,
xlabel 'Tiempo[s]',
ylabel 'Potencia Reactiva STATCOM [MVar]',
title 'Inyección/Absorción STATCOM'

figure
plot
(Sconstatcom.time(1:30001,1),Sconstatcom.signals(1,1).values(1:30001,1)*(1/(1e6))
),
grid on,
xlabel 'Tiempo[s]',
ylabel 'Potencia Activa STATCOM [MW]',
title 'Inyección/Absorción STATCOM'

figure
plot (voltajes3.time(1:3001,1),voltajes3.signals(1,1).values(1:3001,1:2)),
grid on,
xlabel 'Tiempo[s]',
ylabel 'Voltaje Línea fase A [pu]',
title 'Voltaje Línea con STATCOM v/s sin STATCOM'

figure
plot (vtvt2.time(1:3001,1),vtvt2.signals.values(1:3001,1:2)),
grid on,
xlabel 'Tiempo[s]',
ylabel 'Voltaje VT [pu]',
title 'Voltaje VT con STATCOM v/s sin STATCOM [pu]'

figure
plot
(capacitor.time(1:3001,1),capacitor.signals(1,2).values(1:3001,1)*(1/(1e3))),
grid on,
xlabel 'Tiempo[s]',
ylabel 'Voltaje [kV]',
title 'Voltaje en el condensador'

```

# Anexo 3

## 9. Tabla de datos de las simulación

A continuación se muestra una tabla reducida de datos entre 0.49 y 1.005 segundos de simulación.

	Tiempo	Voltaje VT		Tiempo	Voltaje VT		Tiempo	Voltaje VT		Tiempo	Voltaje VT
1	0,49	0,99659	27	0,62	0,99015	53	0,75	0,99164	79	0,88	0,99047
2	0,495	1,0062	28	0,625	0,98006	54	0,755	0,98502	80	0,885	1,0124
3	0,5	0,99762	29	0,63	0,97999	55	0,76	1,01	81	0,89	0,99436
4	0,505	0,92132	30	0,635	1,0002	56	0,765	0,9955	82	0,895	1,0058
5	0,51	0,93514	31	0,64	0,98418	57	0,77	1,0009	83	0,9	0,9947
6	0,515	0,9394	32	0,645	0,99692	58	0,775	0,9933	84	0,905	0,98873
7	0,52	0,93396	33	0,65	0,98472	59	0,78	0,98913	85	0,91	1,0139
8	0,525	0,94056	34	0,655	0,97982	60	0,785	1,0099	86	0,915	0,99794
9	0,53	0,95762	<b>35</b>	<b>0,66</b>	<b>1,0064</b>	61	0,79	0,99585	87	0,92	1,0041
10	0,535	0,9728	36	0,665	0,99079	62	0,795	1,006	88	0,925	0,99649
11	0,54	0,96846	37	0,67	0,99905	63	0,8	0,99324	89	0,93	0,99139
12	0,545	0,98329	38	0,675	0,98969	64	0,805	0,98744	90	0,935	1,012
13	0,55	0,96691	39	0,68	0,98506	65	0,81	1,0117	91	0,94	0,99311
14	0,555	0,95937	40	0,685	1,0066	66	0,815	0,99592	92	0,945	1,0041
15	0,56	0,98617	41	0,69	0,98934	67	0,82	1,002	93	0,95	0,99303
16	0,565	0,9763	42	0,695	1,0013	68	0,825	0,99472	94	0,955	0,98739
17	0,57	0,9828	43	0,7	0,99003	69	0,83	0,98994	95	0,96	1,0134
18	0,575	0,9708	44	0,705	0,98347	70	0,835	1,0122	96	0,965	0,99939
19	0,58	0,97048	45	0,71	1,0091	71	0,84	0,99568	97	0,97	1,007
20	0,585	0,98964	46	0,715	0,99408	72	0,845	1,0074	98	0,975	0,99702
21	0,59	0,97809	47	0,72	1,002	73	0,85	0,99399	99	0,98	0,99103
22	0,595	0,99187	48	0,725	0,99313	74	0,855	0,98724	100	0,985	1,0125
23	0,6	0,97837	49	0,73	0,98792	75	0,86	1,0122	101	0,99	0,99193
24	0,605	0,97253	50	0,735	1,0098	76	0,865	0,99638	102	0,995	1,0045
25	0,61	0,99894	51	0,74	0,99238	77	0,87	1,0023	103	1	0,9933
26	0,615	0,98438	52	0,745	1,0038	78	0,875	0,99501	104	1,005	1,0435

Tabla 21. Valores entre 0.49 y 1.005 segundos de simulación.

