

**MITIGACIÓN DE SAGS Y SWELLS DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN IEEE
DE 30 NODOS MEDIANTE LA UBICACIÓN DE FACTS (SVC Y DSTATCOM).**

Jenny Elizabeth Roa Barragán

Juan Camilo Caicedo Ulloa

Grupo de Investigación:

GCEM

Línea de Investigación:

Calidad de Energía



Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Facultad de Ingeniería

Proyecto Curricular Ingeniería Eléctrica

Bogotá D.C.

2016

**MITIGACIÓN DE SAGS Y SWELLS DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN IEEE
DE 30 NODOS MEDIANTE LA UBICACIÓN DE FACTS (SVC Y DSTATCOM).**

Jenny Elizabeth Roa Barragán

Juan Camilo Caicedo Ulloa

Proyecto de grado para optar por el título de
Ingeniero Eléctrico

Dirigido por:

Edwin Rivas Trujillo. I.E., MSc., PhD.



Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Facultad de Ingeniería

Proyecto Curricular Ingeniería Eléctrica

Bogotá D.C.

2016

RESUMEN

Las redes de distribución se han visto afectadas debido al uso de cargas no lineales generando variaciones de tensión tales como disminuciones de tensión (*sags*) o elevaciones de tensión (*swells*) las cuales afectan la calidad de energía en términos de tensión. Se han realizado estudios para la mitigación de estos problemas mediante la implementación de compensadores de reactivos tales como el *SVC* (Static Var Compensator) y *DSTATCOM* (Distribution Static Synchronous, Compensator) los cuales ayudan a mejorar los perfiles de tensión previniendo daños en los equipos de los usuarios y de la propia red. Teniendo en cuenta estos efectos de mejora, en este proyecto de grado se evalúa el comportamiento de una red de distribución en presencia de variaciones de tensión de corta duración, específicamente *sags* y *swells*, antes y después de la implementación de los compensadores *SVC* y *DSTATCOM* tomando como caso de estudio la red IEEE de 30 nodos.

Para el desarrollo de este proyecto se hace uso de los programas DlgSILENT y MATLAB. Por medio de una función objetivo y criterios planteados se seleccionan los puntos o nodos en los cuales se incluyen las variaciones de tensión y los compensadores *SVC* y *DSTATCOM*. Se analiza el comportamiento de la red en presencia de *Sags* y *Swells* con magnitudes y duraciones que son seleccionadas con base en lo especificado en el estándar IEEE 1159:2009 y la norma NTC 5000:2013. Posteriormente se implementa un algoritmo en MATLAB para la solución de flujos de carga en el cual se incluyen los compensadores *SVC* y *DSTATCOM* con el que se obtiene un valor aproximado de la potencia que se espera los compensadores entreguen o absorban, según sea el caso, y el comportamiento que tiene la red con la inclusión de estos, lo cual sirve como punto de referencia y comparación al hacer el análisis final. Finalmente se incluyen los compensadores en la red simulada, y mediante índices referentes a niveles de tensión, soportados en la normatividad Colombiana NTC 5000:2013 y el estándar IEEE 1159:2009, se evalúa el comportamiento de la red verificando si luego de la compensación, los niveles de tensión se encuentran dentro de los rangos aceptables que no afecten la calidad de energía. En los resultados se obtuvo que al incluir los compensadores *SVC* y *DSTATCOM* para la mitigación de *Sags* y *Swells* en la red IEEE 30 nodos específicamente en los nodos 10 y 12, los perfiles de tensión se mantienen dentro de los rangos esperados, a excepción de la mitigación para *Swells* con magnitud de 1.3 debido a que la red cuenta con 2 condensadores síncronos los cuales dificultan que el compensador cumpla con su función. Adicional a esto se presentaron unos transitorios al inicio y fin de la compensación con mayor magnitud para el *SVC* los cuales estuvieron por fuera de los rangos aceptables (0.9 y 1.1 p.u.).

Con el desarrollo de este proyecto se concluye que el compensador que presenta un mejor comportamiento es el *DSTATCOM*, ya que en un 95.89% de simulaciones se obtuvo perfiles de tensión dentro del rango esperado (0.9 a 1.1 p.u.) y la respuesta fue en el orden de 10 milisegundos, más rápida que la del *SVC* que fue de aproximadamente 1 segundo. El análisis aquí realizado sirve como punto de referencia y comparación para estudios posteriores tal como evaluar el comportamiento de la red con otros tipos de compensadores.

Estructura del trabajo de grado

Este documento se encuentra organizado en 5 capítulos cuyo contenido se describe a continuación:

En el capítulo 1 se presenta una descripción del planteamiento del problema, justificación, alcance y limitaciones de este proyecto, así como los objetivos planteados, entre los que se encuentran tres objetivos específicos los cuales se desarrollan del capítulo 3 al capítulo 5 y que son de gran importancia para dar cumplimiento al objetivo principal.

El capítulo 2 se divide en dos subcapítulos, uno referente al marco teórico el cual es una recopilación breve de conceptos aplicables que se requieren para comprender el proyecto y otro referente al marco referencial concerniente a las investigaciones que se han formulado y desarrollado en la literatura científica y que permiten determinar quiénes, cómo, cuándo y dónde se ha tratado de resolver el problema de investigación planteado o cuáles avances se tienen sobre la temática tratada.

En el capítulo 3 se desarrolla el primer objetivo el cual consiste en analizar el comportamiento de la red IEEE 30 nodos ante la presencia de variaciones de tensión de corta duración, específicamente *sags* y *swells*.

En el capítulo 4 se desarrolla el segundo objetivo planteado, el cual consiste en la implementación de un algoritmo de flujo de carga que incluye los compensadores *SVC* y *DSTATCOM*.

Finalmente en el capítulo 5 se da cumplimiento al tercer objetivo al evaluar la influencia de los compensadores *SVC* y *DSTATCOM* mediante índices referentes a niveles de tensión, soportados en la normatividad Colombiana NTC 5000:2013 y el estándar IEEE 1159:2009, cuando se presentan las variaciones de tensión (*sags* y *swells*) en la red IEEE 30.

Adicionalmente se presentan 6 anexos del A al F, los cuales contienen información relacionada con las ecuaciones necesarias para la solución de flujos de carga incluyendo los compensadores *SVC* y *DSTATCOM*, el procedimiento para modelar la red en DigSILENT, el procedimiento y resultados para la selección de nodos críticos y una guía de uso del algoritmo implementado en MATLAB.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	13
1.1.	Planteamiento del problema	13
1.2.	Justificación.....	13
1.3.	Objetivos	14
1.3.1.	Objetivo General	14
1.3.2.	Objetivos Específicos.....	14
1.4.	Alcance y limitaciones.....	14
2.	MARCO TEÓRICO Y MARCO REFERENCIAL.....	17
2.1.	Marco teórico.....	17
2.1.1.	Calidad de energía.....	17
2.1.2.	Variaciones de tensión de corta duración	17
2.1.3.	Compensadores de reactivos.....	21
2.2.	Marco referencial.....	25
2.2.1.	Estándares referentes a calidad de energía.....	25
2.2.2.	Mitigación de <i>sags</i> y <i>swells</i> usando compensadores de reactivos	29
3.	SAGS Y SWELLS EN RED IEEE 30 NODOS	35
3.1.	Magnitud y duración de los <i>sags</i> y <i>swells</i> a analizar	35
3.2.	Modelamiento de la red en DlgSILENT	36
3.3.	Selección de nodos críticos	37
3.4.	Carga para la generación de <i>Sags</i> y <i>Swells</i> en DlgSILENT	38
3.5.	Resultados.....	38
3.5.1.	<i>Sags</i> y <i>Swells</i> en Nodo 10.....	39
3.5.2.	<i>Sags</i> y <i>Swells</i> en Nodo 12.....	41
3.6.	Análisis de resultados.....	43
3.7.	Conclusiones	43
4.	ALGORITMO PARA COMPENSACION DE REACTIVOS A TRAVES DE SVC Y DSTATCOM.....	45
4.1.	Implementación algoritmo	45
4.2.	Validación del algoritmo	55
4.2.1.	Discusión de resultados	58
4.3.	Resultados caso de estudio red IEEE 30 nodos.....	59

4.3.1.	Carga para la generación de <i>Sags</i> y <i>Swells</i> en el algoritmo	59
4.3.2.	Flujo de carga sin compensación	60
4.3.3.	Flujo de carga con <i>DSTATCOM</i>	62
4.3.4.	Flujo de carga con <i>SVC</i>	63
4.3.5.	Gráficas.....	65
4.4.	Análisis de resultados.....	72
4.5.	Conclusiones	72
5.	MITIGACIÓN DE <i>SAGS</i> Y <i>SWELLS</i> EN RED IEEE 30 NODOS CON <i>SVC</i> Y <i>DSTATCOM</i>	73
5.1.	Inclusión del <i>SVC</i> y <i>DSTATCOM</i> en DigSILENT.....	73
5.1.1.	<i>SVC</i>	73
5.1.2.	<i>DSTATCOM</i>	74
5.2.	Resultados.....	74
5.2.1.	Potencias entregadas y absorbidas por los compensadores	74
5.2.2.	<i>SVC</i> y <i>DSTATCOM</i> en Nodo 10.....	76
5.2.3.	<i>SVC</i> Y <i>DSTATCOM</i> en nodo 12	80
5.3.	Comparación de resultados obtenidos entre MATLAB y DigSILENT.....	83
5.3.1.	Resultados de compensación para mitigación de <i>SAGs</i> en los nodos 10 y 12.....	84
5.3.2.	Resultados de compensación para mitigación de <i>SWELLS</i> en los nodos 10 y 12.	85
5.4.	Análisis de resultados.....	86
5.5.	Discusión de resultados	87
5.6.	Conclusiones	91
	CONCLUSIONES	93
	APORTES.....	95
	TRABAJOS FUTUROS.....	97
	BIBLIOGRAFÍA.....	99
	ANEXO A. Ecuaciones <i>SVC</i> en flujos de carga por el método de Newton Raphson.....	106
	ANEXO B. Ecuaciones <i>DSTATCOM</i> en flujos de carga por el método de Newton Raphson.....	107
	ANEXO C. Modelamiento del sistema IEEE 30 Nodos en DigSILENT.....	109
	ANEXO D. Determinación de nodos críticos	122
	ANEXO E. Ecuaciones para flujo de carga por el método de Newton Raphson.....	127
	ANEXO F. Algoritmo implementado en MATLAB – Guía de Uso.....	130

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Perfil de tensión típico de un sag	18
Figura 2. Estándares donde se define sag	18
Figura 3. Perfil de tensión típico de un swell	20
Figura 4. Estándares donde se define Swell.....	20
Figura 5. (a) Configuración SVC y (b) modelo de la susceptancia variable para inclusión en flujos de carga.....	23
Figura 6. (a) Configuración DSTATCOM y (b) circuito equivalente para inclusión en flujos de carga	24
Figura 7. Modos de control del DSTATCOM.....	25
Figura 8. Estándares referentes a calidad de energía.....	26
Figura 9. Curva ITIC (CBEMA)	26
Figura 10. Mapa conceptual NTC 5001 – 2008	27
Figura 11. Mapa conceptual CREG 065 – 2012	28
Figura 12. Mapa conceptual CREG 032 – 2013	28
Figura 13. Mapa conceptual NTC 5000 – 2013	29
Figura 14. Mitigación de sags y swells usando compensadores de reactivos.....	30
Figura 15. Diagrama unifilar red IEEE 30 nodos	36
Figura 16. Nodos críticos del sistema.....	37
Figura 17. Sag – Magnitud 0.5 y duración de 1, 5 y 10s en Nodo 10	39
Figura 18. Sag – Magnitud 0.8 y duración de 1, 5 y 10s en Nodo 10	39
Figura 19. Swell – Magnitud 1.1 y duración de 1, 5 y 10s en Nodo 10	40
Figura 20. Swell – Magnitud 1.3 y duración de 1, 2 y 3s en Nodo 10	40
Figura 21. Sag – Magnitud 0.5 y duración de 1, 5 y 10s en Nodo 12	41
Figura 22. Sag – Magnitud 0.8 y duración de 1, 5 y 10s en Nodo 12	41
Figura 23. Swell – Magnitud 1.1 y duración de 1, 5 y 10s en Nodo 12	42
Figura 24. Swell – Magnitud 1.3 y duración de 1, 2 y 3s en Nodo 12	42
Figura 25. Diagrama de flujo empleado en el programa Ybarra30.m.....	46
Figura 26. Diagrama de flujo para el programa FlujoCargaNR.m	48
Figura 27. Diagrama de flujo para el programa DSTATCOM.m.....	51
Figura 28. Diagrama de flujo para el programa SVC.m	54
Figura 29. Red de prueba 5 Nodos.....	55
Figura 30. Comparación niveles de tensión. Validación algoritmo flujo de carga	56
Figura 31. Comparación ángulo. Validación algoritmo flujo de carga	56
Figura 32. Comparación niveles de tensión. Validación algoritmo flujo de carga con SVC	57
Figura 33. Comparación ángulo. Validación algoritmo flujo de carga con SVC	57
Figura 34. Comparación niveles de tensión. Validación algoritmo con DSTATCOM.....	58
Figura 35. Comparación ángulo. Validación algoritmo flujo de carga con DSTATCOM.....	58
Figura 36. Comprobación % diferencia algoritmo MATLAB - Referencia	58
Figura 37. Datos DisSILENT vs datos obtenidos en MATLAB.....	61
Figura 38. Porcentaje de diferencia entre DigSILENT vs datos obtenidos en MATLAB	61

Figura 39. Sags – Magnitud 0.5 a 0.9 p.u en el nodo 10	65
Figura 40. Sags – Magnitud 0.5 a 0.9 p.u en el nodo 12	65
Figura 41. Swells – Magnitud 1.1 a 1.3 p.u en el nodo 10	65
Figura 42. Swells – Magnitud 1.1 a 1.3 p.u en el nodo 12	65
Figura 43. DSTATCOM. Mitigación de Sags. Magnitud de 0.5 a 0.9 (Nodo 10).....	66
Figura 44. DSTATCOM. Mitigación de Swells. Magnitud de 1.1 a 1.3 (Nodo 10).....	66
Figura 45. SVC. Mitigación de Sags. Magnitud de 0.5 a 0.9 (Nodo 10)	66
Figura 46. SVC. Mitigación de Swells. Magnitud de 1.1 a 1.3 (Nodo 10)	66
Figura 47. Sag – Magnitud 0.5 p.u. sin y con DSTATCOM y SVC en el nodo 10	66
Figura 48. Sag – Magnitud 0.5 p.u. sin y con DSTATCOM y SVC en el nodo 12	66
Figura 49. Compensación para Sag – Magnitud 0.5 en el nodo 10.....	67
Figura 50. Compensación para Sag – Magnitud 0.5 en el nodo 12.....	67
Figura 51. Sag – Magnitud 0.6 p.u. sin y con DSTATCOM y SVC en el nodo 10	67
Figura 52. Sag – Magnitud 0.6 p.u. sin y con DSTATCOM y SVC en el nodo 12	67
Figura 53. Compensación para Sag – Magnitud 0.6 en el nodo 10.....	67
Figura 54. Compensación para Sag – Magnitud 0.6 en el nodo 12.....	67
Figura 55. Sag – Magnitud 0.7 p.u. sin y con DSTATCOM y SVC en el nodo 10	68
Figura 56. Sag – Magnitud 0.7 p.u. sin y con DSTATCOM y SVC en el nodo 12	68
Figura 57. Compensación para Sag – Magnitud 0.7 en el nodo 10.....	68
Figura 58. Compensación para Sag – Magnitud 0.7 en el nodo 12.....	68
Figura 59. Sag – Magnitud 0.8 p.u. sin y con DSTATCOM y SVC en el nodo 10	68
Figura 60. Sag – Magnitud 0.8 p.u. sin y con DSTATCOM y SVC en el nodo 12	68
Figura 61. Compensación para Sag – Magnitud 0.8 en el nodo 10.....	69
Figura 62. Compensación para Sag – Magnitud 0.8 en el nodo 12.....	69
Figura 63. Sag – Magnitud 0.9 p.u. sin y con DSTATCOM y SVC en el nodo 10	69
Figura 64. Sag – Magnitud 0.9 p.u. sin y con DSTATCOM y SVC en el nodo 10	69
Figura 65. Compensación para Sag – Magnitud 0.9 en el nodo 10.....	69
Figura 66. Compensación para Sag – Magnitud 0.9 en el nodo 10.....	69
Figura 67. Swell – Magnitud 1.1 p.u. sin y con DSTATCOM y SVC en el nodo 10	70
Figura 68. Swell – Magnitud 1.1 p.u. sin y con DSTATCOM y SVC en el nodo 12	70
Figura 69. Compensación para Swell – Magnitud 1.1 en el nodo 10.....	70
Figura 70. Compensación para Swell – Magnitud 1.1 en el nodo 12.....	70
Figura 71. Swell – Magnitud 1.2 p.u. sin y con DSTATCOM y SVC en el nodo 10	70
Figura 72. Swell – Magnitud 1.2 p.u. sin y con DSTATCOM y SVC en el nodo 12	70
Figura 73. Compensación para Swell – Magnitud 1.2 en el nodo 10.....	71
Figura 74. Compensación para Swell – Magnitud 1.2 en el nodo 12.....	71
Figura 75. Swell – Magnitud 1.3 p.u. sin y con DSTATCOM y SVC en el nodo 10	71
Figura 76. Swell – Magnitud 1.3 p.u. sin y con DSTATCOM y SVC en el nodo 12	71
Figura 77. Compensación para Swell – Magnitud 1.3 en el nodo 10.....	71
Figura 78. Compensación para Swell – Magnitud 1.3 en el nodo 12.....	71
Figura 79. Dispositivo SVC en DigSILENT.....	73
Figura 80. Dispositivo DSTATCOM en DigSILENT	74

Figura 81. DSTATCOM en presencia de sag - Magnitud 0.5, duración de 1, 5 y 10 s en N10	76
Figura 82. SVC en presencia de sag - Magnitud 0.5, duración de 1, 5 y 10 s en N10.....	76
Figura 83. DSTATCOM en presencia de sag - Magnitud 0.8, duración de 1, 5 y 10 s en N10	77
Figura 84. SVC en presencia de sag - Magnitud 0.8, duración de 1, 5 y 10 s en N10.....	77
Figura 85. DSTATCOM en presencia de swell - Magnitud 1.1, duración de 1, 5 y 10 s en N10 ..	78
Figura 86. SVC en presencia de swell - Magnitud 1.1, duración de 1, 5 y 10 s en N10.....	78
Figura 87. DSTATCOM en presencia de swell – Magnitud 1.3, duración de 1, 2 y 3 s en N10....	79
Figura 88. SVC en presencia de swell - Magnitud 1.3, duración de 1, 2 y 3 s en N10.....	79
Figura 89. DSTATCOM en presencia de sag - Magnitud 0.5, duración de 1, 5 y 10 s en N12	80
Figura 90. SVC en presencia de sag - Magnitud 0.5, duración de 1, 5 y 10 s en N12.....	80
Figura 91. DSTATCOM en presencia de sag - Magnitud 0.8, duración de 1, 5 y 10 s en N12	81
Figura 92. SVC en presencia de sag - Magnitud 0.8, duración de 1, 5 y 10 s en N12.....	81
Figura 93. DSTATCOM en presencia de swell - Magnitud 1.1, duración de 1, 5 y 10 s en N12 ..	82
Figura 94. SVC en presencia de swell - Magnitud 1.1, duración de 1, 5 y 10 s en N12.....	82
Figura 95. DSTATCOM en presencia de swell – Magnitud 1.3, duración de 1, 2 y 3 s en N12....	83
Figura 96. SVC en presencia de swel - Magnitud 1.3, duración de 1, 2 y 3 s en N12.....	83
Figura 97. Resultados obtenidos para DSTATCOM en MATLAB y DIgSILENT para Sags. N10	84
Figura 98. Resultados obtenidos para SVC en MATLAB y DIgSILENT para Sags. N10	84
Figura 99. Resultados obtenidos para DSTATCOM en MATLAB y DIgSILENT. Sags. N12	84
Figura 100. Resultados obtenidos para SVC en MATLAB y DIgSILENT. Sags. N12.....	84
Figura 101. Resultados obtenidos para DSTATCOM en MATLAB y DIgSILENT. Swells. N10	85
Figura 102. Resultados obtenidos para SVC en MATLAB y DIgSILENT. Swells. N10.....	85
Figura 103. Resultados obtenidos para DSTATCOM en MATLAB y DIgSILENT. Swells. N12	85
Figura 104. Resultados obtenidos para SVC en MATLAB y DIgSILENT. Swells. N12.....	85
Figura 105. Índices niveles de tensión IEEE 1159:2009 y NTC 5000:2013	86
Figura 106. Niveles de tensión entre 0.9 y 1.1 p.u. luego de compensación.....	86
Figura 107. Niveles de tensión > 1.1 luego de compensación	87
Figura 108. Resultado obtenido de inestabilidad con DSTATCOM	88
Figura 109. Resultado obtenido de inestabilidad con SVC.....	88
Figura 110. Resultado obtenido con DSTATCOM y condensadores síncronos apagado	89
Figura 111. Resultado obtenido con SVC y condensadores síncronos apagados	89
Figura 112. Perfiles de tensión con DSTATCOM y condensadores síncronos apagados para mitigación de Swell (magnitud 1.3) en el nodo 10	90
Figura 113. Perfiles de tensión con SVC y condensadores síncronos apagados para mitigación de Swell (magnitud 1.3) en el nodo 10	90
Figura 114. Transitorios durante compensación con SVC para sag de 0.5 en el nodo 10.	91
Figura 115. Configuración de los parámetros de una barra (nodo).....	109
Figura 116. Configuración de los parámetros de una línea. Datos básicos	110
Figura 117. Configuración de los parámetros de una línea. Susceptancia	110
Figura 118. Configuración de los parámetros de un transformador	111
Figura 119. Configuración de los parámetros básicos de un generador.....	112
Figura 120. Configuración de los parámetros de despacho de un generador.....	113

Figura 121. Configuración de los parámetros de una carga	114
Figura 122. Configuración de los parámetros básicos del SVC	115
Figura 123. Configuración de los parámetros del control del SVC.....	115
Figura 124. Configuración del modelo compuesto	116
Figura 125. Modelo dinámico del control de tensión del SVC en DigSILENT	116
Figura 126. Configuración de la interfaz del SVC	117
Figura 127. Configuración de los parámetros de la impedancia Shunt	118
Figura 128. Configuración de los parámetros del convertidor	119
Figura 129. Configuración de los parámetros del medidor de tensión.....	119
Figura 130. Configuración de los parámetros del medidor de potencia.....	120
Figura 131. Configuración de los parámetros del control del DSTATCOM	120
Figura 132. Configuración de los parámetros del modelo compuesto del DSTATCOM	121
Figura 133. Modelo dinámico del control de tensión del DSTATCOM en DigSILENT.....	121
Figura 134. Diagrama de flujo de carga para la selección de nodos críticos.	123
Figura 135. Diagrama de caso de uso para algoritmo sin compensación	130
Figura 136. Diagrama de caso de uso para algoritmo con compensación SVC	131
Figura 137. Diagrama de caso de uso para algoritmo con compensación DSTATCOM	131
Figura 138. Diagrama de clase de algoritmo sin compensación	132
Figura 139. Diagrama de clase de algoritmo con compensación SVC.....	133
Figura 140. Diagrama de clase de algoritmo con compensación DSTATCOM	133
Figura 141. Apertura de archivos en MATLAB	135
Figura 142. Apertura archivo "DatosNodos30"	136
Figura 143. Datos obtenidos al ejecutar la función DatosNodos30.....	136
Figura 144. Borrar datos de "command window"	137
Figura 145. Configuración de Qg y Qd para generación de SAGS y SWELLS en MATLAB	137
Figura 146. Compilación algoritmo FlujoCargaNR.m (resultados red y gráfica)	138
Figura 147. Configuración de datos en DatosDSTATCOM30.m	138
Figura 148. Compilación algoritmo DSTATCOM.m (resultados red y gráfica)	139
Figura 149. Compilación algoritmo DSTATCOM.m (resultados DSTATCOM).....	139
Figura 150. Configuración de datos en DatosSVC.m.....	140
Figura 151. Compilación algoritmo SVC.m (resultados red y gráfica).....	140
Figura 152. Compilación algoritmo DSTATCOM.m (resultados SVC)	141
Figura 153. Selección de magnitud y evento para la generación de gráficas	142
Figura 154. Configuración de código para obtener la gráfica sin y con compensación.....	142
Figura 155. Configuración de código para obtener la gráfica con DSTATCOM y SVC.....	143

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variaciones de tensión de corta duración.....	17
Tabla 2. Clasificación de huecos según el tipo de conexión de cargas	19
Tabla 3. Comparación compensadores.....	22
Tabla 4. Límites de desviación estacionaria de tensión	28
Tabla 5. Magnitud y duración de los sags y swell a analizar por nodo	36
Tabla 6. Carga para generar sags en nodo 10 en DigSILENT	38
Tabla 7. Carga para generar sags en nodo 12 en DigSILENT	38
Tabla 8. Carga para generar swells en nodo 10 en DigSILENT	38
Tabla 9. Carga para generar swells en nodo 12 en DigSILENT	38
Tabla 10. Datos Nodos. Red 5 Nodos.....	55
Tabla 11. Datos Líneas. Red 5 Nodos	55
Tabla 12. Validación algoritmo flujo de carga.....	56
Tabla 13. Validación algoritmo flujo de carga con SVC.....	57
Tabla 14. Validación algoritmo flujo de carga con DSTATCOM	57
Tabla 15. Carga para generar sags en nodo 10 en algoritmo en MATLAB.....	59
Tabla 16. Carga para generar sags en nodo 12 en algoritmo en MATLAB.....	59
Tabla 17. Carga para generar swells en nodo 10 en algoritmo en MATLAB.....	60
Tabla 18. Carga para generar swells en nodo 12 en algoritmo en MATLAB.....	60
Tabla 19. Comparación resultados simulados vs algoritmo MATLAB.....	60
Tabla 20. Tensión, ángulo y potencia del DSTATCOM en presencia de sags en el nodo 10	62
Tabla 21. Tensión, ángulo y potencia del DSTATCOM en presencia de sags en el nodo 12	63
Tabla 22. Tensión, ángulo y potencia del DSTATCOM en presencia de swells en el nodo 10	63
Tabla 23. Tensión, ángulo y potencia del DSTATCOM en presencia de swells en el nodo 12	63
Tabla 24. Bsvc y potencia del SVC en presencia de sags en el nodo 10.....	64
Tabla 25. Bsvc y potencia del SVC en presencia de sags en el nodo 12.....	64
Tabla 26. Bsvc y potencia del SVC en presencia de swells en el nodo 10.....	64
Tabla 27. Bsvc y potencia del SVC en presencia de swells en el nodo 12.....	64
Tabla 28. Potencia entregada por el DSTATCOM y el SVC para Sags en nodo 10.....	75
Tabla 29. Potencia entregada por el DSTATCOM y SVC para Sags en nodo 12	75
Tabla 30. Potencia absorbida por el DSTATCOM y SVC para Swells en nodo 10.....	75
Tabla 31. Comparación potencia absorbida entre DSTATCOM y SVC para Swells en nodo 12 ...	75
Tabla 32. (%) Diferencia potencia reactiva obtenida entre MATLAB y DigSILENT para Sags	84
Tabla 33. (%) Diferencia potencia reactiva obtenida entre MATLAB y DigSILENT para Swells ...	85
Tabla 34. Parámetros línea 2-6	110
Tabla 35. Parámetros del transformador entro nodo 6 y 10	111
Tabla 36. Parámetros del generador 1.....	112
Tabla 37. Datos de la carga 29 de la red	113
Tabla 38. Tensión de prefalla	124
Tabla 39. Valores de tensión para una falla trifásica en el nodo 15	124
Tabla 40. Resultados de la función objetivo en todos los nodos.....	125

Tabla 41. Resultado selección de nodos críticos.....	126
--	-----

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

En el marco Colombiano el sistema de distribución de energía eléctrica se divide en dos: STR (Sistemas de transmisión regional) y SDL (Sistemas de distribución local), donde los parámetros de calidad se encuentran cuantificados en términos de tensión, corriente, o de la desviación de la frecuencia. Si estos parámetros se salen de los rangos permitidos por la normatividad Colombiana, se pueden generar incrementos en las pérdidas de energía, daños a la producción e inestabilidad en el sistema.

La red de distribución comercial e industrial cuenta con un gran número de cargas sensibles (a manera de ejemplo: horno de arco, motores de inducción y equipos electrónicos) las cuales afectan la calidad de energía perturbando la forma de onda de tensión en el sistema, tales fenómenos de perturbación son: *Sags* (disminución de la tensión), *Swells* (aumento de tensión) y fluctuaciones de corta duración (variaciones de tensión).

En la literatura científica autores como [1], [2] y [3] han realizado estudios sobre la presencia de variaciones de tensión de corta duración en redes de distribución y la mitigación de estos problemas de calidad de energía mediante la implementación de compensadores de reactivos tales como el *SVC (Static Var Compensator)*, *DSTATCOM (Distribution Static Synchronous Compensator)*, los cuales ayudan a mejorar el factor de potencia y los perfiles de tensión previniendo daños en los equipos de los usuarios y de la propia red.

Teniendo en cuenta estos efectos de mejora que tiene la implementación de los compensadores en la red, surge la siguiente pregunta ¿Cuál será el comportamiento del sistema de distribución IEEE 30 nodos en presencia de variaciones de tensión de corta duración específicamente *sags* y *swells* antes y después de la implementación del *SVC* y *DSTATCOM*?

1.2. Justificación

La calidad de energía eléctrica tiene un amplio campo de estudio en ingeniería eléctrica debido al aumento de la demanda energética y uso de equipos (cargas no lineales) que degradan la forma de onda de tensión. En la última década autores como [4], [5], [6] y [7] han propuesto la utilización de dispositivos (FACTS) que reducen el impacto de los problemas de calidad de energía producidos en la red de distribución. Sin embargo, en la literatura científica se encuentran pocos trabajos que involucran las dos variaciones de tensión (*sag* y *swell*) así como el comportamiento que puede presentar cada uno de los compensadores de reactivos (*SVC* Y *DSTATCOM*) en las redes de distribución.

Por lo tanto se pretende realizar un estudio del comportamiento de la red de distribución tomando como caso de estudio un sistema IEEE de 30 nodos cuando se presentan variaciones de tensión de corta duración (*sags* y *swells*), antes y después de la implementación de los compensadores *SVC* y *DSTATCOM*. El sistema IEEE de 30 nodos escogido presenta niveles de tensión similares a las redes de distribución industrial y residencial Colombiana.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Evaluar el comportamiento de una red de distribución en presencia de variaciones de tensión de corta duración antes y después de la implementación de compensadores de reactivos *SVC* y *DSTATCOM*, tomando como caso de estudio el sistema IEEE de 30 nodos

1.3.2. Objetivos Específicos

- ✓ Analizar el comportamiento de un sistema de IEEE 30 nodos ante la presencia de *sags* y *swells*.
- ✓ Implementar un algoritmo de flujo de carga en MATLAB que incluya compensación de reactivos a través de *SVC* y *DSTATCOM*
- ✓ Evaluar mediante índices soportados en la normatividad Colombiana y estándares IEEE el sistema IEEE de 30 nodos al introducir *Sags* y *Swells* y compensación de reactivos

1.4. Alcance y limitaciones

Dentro del alcance de este proyecto está evaluar el comportamiento de la red IEEE 30 nodos ante la presencia de variaciones de corta duración, específicamente *sags* y *swells*, no se tendrán en cuenta las interrupciones. El rango de tiempo seleccionado es desde 1 a 10 segundos en saltos de 1 segundo para ambos casos, por lo que no se tendrán en cuenta variaciones instantáneas que corresponden a aquellas que van de 0.5 a 30 ciclos (8.33 ms a 0.5 segundos). Esta selección se hizo a criterio propio, debido a que no se encontró ningún dato estadístico o un criterio para la selección de estos. El rango seleccionado es representativo para el análisis planteado en el primer objetivo.

Otro aspecto que limita el estudio para las variaciones de tensión es la magnitud. De acuerdo con el estándar IEEE 1159 de 2009 [8] y la norma NTC 5000:2009 [9], la magnitud típica para los *sags*, independientemente de la duración va de 0.1 a 0.9 p.u, siendo p.u los valores de tensión dados en por unidad, sin embargo la red IEEE 30 nodos solo permite caídas hasta 0.5 debido a que para caídas con magnitud menor, la red no converge, por lo que el rango a analizar será de 0.5 a 0.9 p.u. En el caso de los *swells* esta magnitud varía de acuerdo con la duración siendo de 1.1 a 1.4 p.u para duraciones de 30 ciclos a 3 segundos y de 1.1 a 1.2 para duraciones mayores a 3 segundos hasta 1 minuto. Sin embargo por ajustes en la simulación, la tensión solo pudo aumentar hasta 1.3, por lo que para este proyecto se tendrán magnitudes hasta 1.3 y 1.2 p.u según sea el caso. Tanto para *sags* como para *swells* las magnitudes se toman en saltos de 0.1.

En este proyecto se trabaja solo con los compensadores *SVC* y *DSTATCOM*, sin embargo se aclara que no son los únicos compensadores existentes. Para el compensador *SVC* se modela con el modelo de la susceptancia variable y para el *DSTATCOM* se modela con el modo de control de tensión.

Los *sags* y *swell* seleccionados y la mitigación de estos con los compensadores SVC y DSTATCOM serán incluidos solamente en dos nodos (los más críticos del sistema) debido a la cantidad de simulaciones que se deben realizar. Por nodo se realizan un total de 219 simulaciones siendo: 73 simulaciones sin compensación, 73 simulaciones con SVC y 73 con DSTATCOM, es decir para este proyecto se realizan un total de 438 simulaciones.

2. MARCO TEÓRICO Y MARCO REFERENCIAL

2.1. Marco teórico

2.1.1. Calidad de energía

El término calidad de energía eléctrica se utiliza generalmente para evaluar y mantener los niveles adecuados de la energía durante las etapas de generación, transmisión, distribución y su utilización en sistemas eléctricos de corriente alterna AC. En la NTC 5001 este término es definido como “un conjunto de características de la electricidad en un punto dado de un sistema de potencia en un momento determinado, que permiten satisfacer las necesidades requeridas por el usuario de la electricidad” [10].

2.1.2. Variaciones de tensión de corta duración

Las variaciones de tensión de corta duración se definen como la variación en magnitud de la tensión nominal que pueden estar entre en un rango de tiempo de medio ciclo a 1 minuto, y casi siempre son causadas por condiciones de falla, la energización de grandes cargas que requieren corrientes de arranque altas. Dependiendo de la ubicación de la falla y las condiciones del sistema, el fallo puede causar aumentos temporales de tensión (*swells*), huecos de tensión (*sags*), o una pérdida completa de la tensión (interrupciones), estas variaciones son clasificadas en [8], [9]. En la Tabla 1 se presenta la clasificación en función de tiempo y magnitud de tensión.

Fuente: [8], [9]

Tabla 1. Variaciones de tensión de corta duración.

CATEGORIA		DURACION TIPICA	MAGNITUD TIPICA DE LA TENSION
Instantáneas	<i>Sag</i>	0.5 - 30 ciclos	0.1 - 0.9 p.u.
	<i>Swell</i>	0.5 - 30 ciclos	1.1 - 1.8 p.u.
Momentáneas	Interrupción	0.5 ciclos - 3 seg	< 0.1 p.u.
	<i>Sag</i>	30 ciclos - 3 seg	0.1 - 0.9 p.u.
	<i>Swell</i>	30 ciclos - 3 seg	1.1 - 1.4 p.u.
Temporales	Interrupción	>3 seg - 1 min	< 0.1 p.u.
	<i>Sag</i>	>3 seg - 1 min	0.1 - 0.9 p.u.
	<i>Swell</i>	>3 seg - 1 min	1.1 - 1.2 p.u.

En los numerales 2.1.2.1 y 2.1.2.2 se da una breve descripción de los *sags* y *swells*, para las interrupciones no se entrará en detalle ya que están por fuera del alcance de este proyecto.

2.1.2.1. Sag o hueco de tensión

Los huecos de tensión (*sags*) son uno de los problemas más presentes en la red y de mayor impacto en la calidad de energía eléctrica, causando serios problemas en equipos de telecomunicaciones, procesos de control, variadores de velocidad de motores utilizados en procesos de automatización industrial y sobre todo en equipos basados en electrónica que son sensibles a cambios mínimos de tensión, el comportamiento de estos son asumidos en su mayoría de tipo perfectamente rectangular (ideal), pero si se tiene en cuenta todas las variables que se pueden presentar en un sistema como la actuación de las cargas después de un despeje de falla y los accionamientos de los interruptores tendría un comportamiento que no tiene una forma definida en su profundidad [11]. En la Figura 1 se observa el comportamiento típico de un *sag* real.

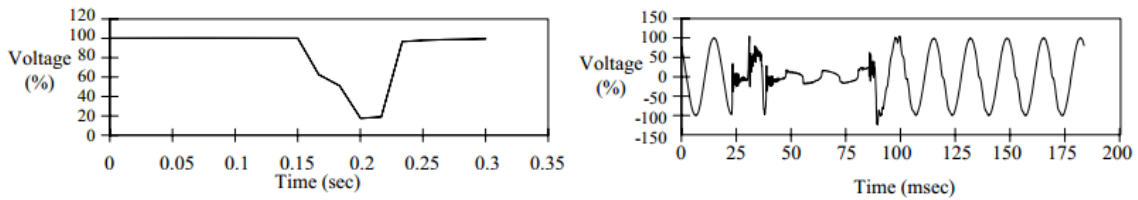


Figura 1. Perfil de tensión típico de un *sag*
Fuente: [8]

Las normas [8], [12] y [13] definen los huecos de tensión tal como se observa en la Figura 2.

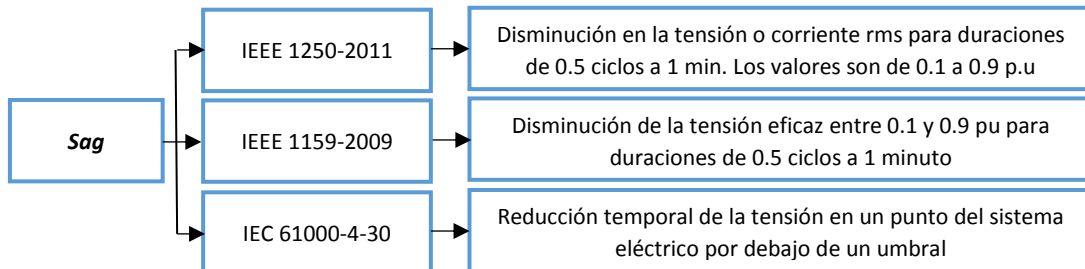


Figura 2. Estándares donde se define *sag*

Los huecos de tensión de corta duración son clasificados según en el lugar donde se origine el evento del sistemas eléctrico de potencia (transmisión y distribución). En la parte de transmisión el origen de estos eventos son asociados a fallas eléctricas, mientras que en distribución están asociados a la conexión de cargas pesadas que requieren una corriente alta de arranque. La clasificación de los huecos o *sags* se ha definido por Bollen y es citado en [11] para el estudio del comportamiento de motores de inducción sometidos a huecos de tensión. La definición de cada uno de los tipos de huecos está asociada en un contexto trifásico de la respuesta fasorial (simétricos o asimétricos) y se clasifican en 7 tipos (tipo A a tipo G), los cuales son explicados a continuación:

Tipo A: Se denominan huecos simétricos debido a la reducción en las 3 fases, y en el cual su ángulo de desfase permanece igual. Este tipo de hueco está asociado más que todo a fallas trifásicas y es uno de los más severos y menos comunes en el sistema eléctrico.

Tipo B : Este es un hueco de tensión tipo asimétrico producido por una falla monofásica, donde solo se ve afectada una de las fases mientras que las otras dos no presentan disminuciones dentro de los límites para que sean consideradas huecos de tensión, generalmente se produce en transformadores con conexión Δ/Y .

Tipo C: Se caracteriza por la disminución de la tensión rms en dos fases, y que debido al cambio de ángulo de fases la magnitud de las dos no son iguales. Este tipo de hueco se produce por fallas bifásicas o de la influencia del tipo de conexión de la carga conectada a un transformador.

Tipo D: Es también producido por una falla bifásica, pero en este tipo de hueco hay disminución de la tensión rms, en donde una de las fases se verá más afectada que las otras.

Tipo E: Esta es producida por una falla bifásica a tierra donde hay un considerable aumento de la corriente de secuencia cero, produciendo una severa disminución de dos fases, mientras que en la otra fase no existe una disminución importante, y no se produce un desfase entre los ángulos.

Tipo F: Este tipo de hueco es similar al tipo D, la diferencia radica en que la profundidad del hueco de tensión es menor en la de tipo F de la fase con mayor severidad de afectación.

Tipo G: Este tipo de hueco es producido por fallas fase-fase a tierra y es similar a la de tipo C de falla bifásica, la diferencia está en que los niveles de profundidad son mayores en los de Tipo G que los de C, también viéndose afectada la tercera fase.

Para la parte de distribución del sistema, teniendo en cuenta el tipo de hueco y el tipo de conexión de las cargas, se presenta un resumen en la Tabla 2. El (*) indica que la magnitud de las fases afectadas es diferente a la magnitud del tipo C normal.

Fuente [11], [14]

Tabla 2. Clasificación de huecos según el tipo de conexión de cargas

Tipo Falla	Carga conectada en Estrella	Carga conectada en delta
Trifásica	Hueco A	Hueco A
Bifásica a tierra	Hueco E	Hueco F
Bifásica	Hueco C	Hueco D
Monofásica	Hueco B	Hueco C*

2.1.2.2. Swell o elevación de tensión

La norma NTC 5001 define un *Swell* como “el aumento brusco de la tensión de alimentación a un valor situado, por encima del 110 % de la tensión RMS seguida del restablecimiento de la tensión después de un corto lapso de tiempo”. Por convenio, esta variación de corta duración dura entre medio ciclo a 1 min. Al igual que los huecos de tensión, los *swell* son producidos normalmente por fallos en la red, pero que también pueden ser causados por la eliminación de cargas, o conexión de un banco de condensadores de gran tamaño [15]. En la Figura 3 se observa el comportamiento típico de un *swell* real.

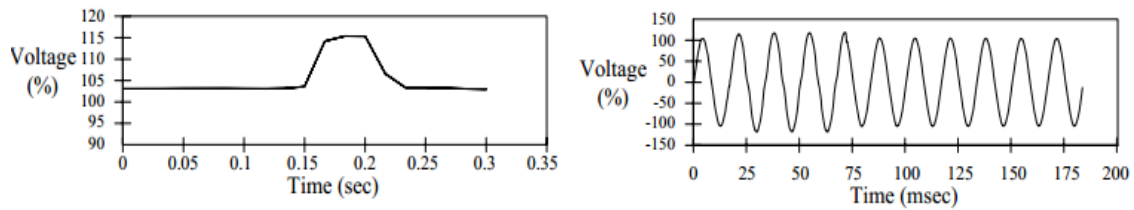


Figura 3. Perfil de tensión típico de un swell
Fuente: IEEE Std 1159™-2009 [8]

Las normas [8], [12] y [13] también definen al *Swell* de manera similar a la NTC 5001 como se muestra en la Figura 4, sin embargo esta es una definición general, ya que como se mencionó anteriormente, la magnitud típica no llega hasta 1.8 para todos los casos, esta varía de acuerdo a la duración de la elevación de tensión tal como se indica en la tabla 1 de este documento.

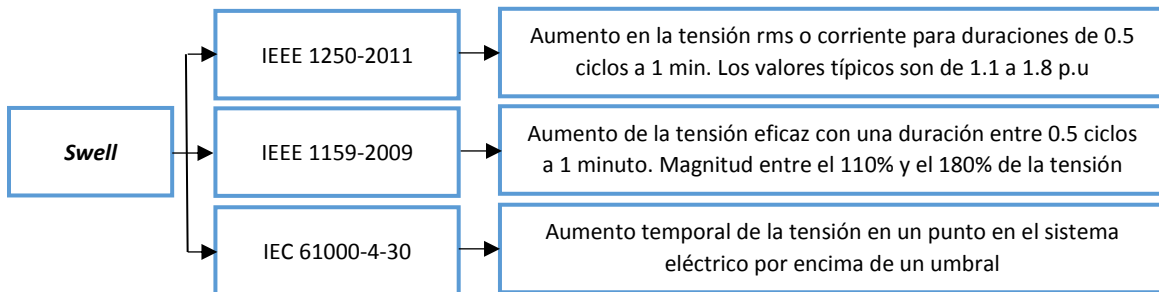


Figura 4. Estándares donde se define Swell

La clasificación de los *swells* se denota con la letra H e I, que al igual que los huecos de tensión, su definición y tipo está asociada a un comportamiento fasorial [16] tal como se explica a continuación:

Tipo H: Es visto por el sistema como una falla monofásica a tierra, que según la IEEE1159-2009, en un sistema las tensiones de las fases sin falla serán de 1,73 p.u durante una condición de falla de línea a tierra [8], mientras la otra fase disminuirá su tensión.

Tipo I: Es una elevación de tensión que es vista por el sistema como una falla bifásica a tierra, donde las magnitudes de las tres fases aumentan y existe un desfase entre dos de las fases [16].

2.1.3. Compensadores de reactivos

Los sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna (*FACTS* – Flexible AC Transmission System) tienen como función principal aumentar la capacidad de control y transferencia de potencia en sistemas de corriente alterna. La tecnología *FACTS* usa la conmutación mediante electrónica de potencia para controlar el flujo de potencia [17].

Existe gran variedad de controladores *FACTS*, estos se clasifican de acuerdo al tipo de conexión que tengan con la red y al tipo de compensación que realizan [18] [19], sin embargo algunos autores los clasifican de acuerdo a la tecnología de electrónica de potencia utilizada [20]. En este documento se hará referencia a la clasificación de acuerdo al tipo de conexión que tengan con la red y al tipo de compensación que realizan, los cuales se clasifican en:

- Compensadores serie: se emplean para disminuir la reactancia de transferencia de una línea. Permiten entregar la compensación serie reactiva requerida por cada línea, pero también permite el flujo de potencia activa entre las líneas involucradas. Esto se conoce como Controlador de flujo de potencia interlíneas que hace posible balancear el flujo de las potencias activas y reactivas en las líneas de transmisión. Por ejemplo el *SSSC* (*Static Synchronous Series Compensator*) [21].
- Compensadores paralelo (o derivación): Se inyectan señales de corriente al sistema en el punto de conexión. Suministran potencia reactiva, manteniendo los niveles de tensión dentro de los rangos aceptables. Por ejemplo el *STATCOM* (*Static Synchronous Compensator*) [22]
- Compensadores combinados serie-serie: La función es igual que los compensadores serie, solo que esta se hace de manera coordinada entre múltiples líneas
- Compensadores combinados serie-paralelo: es una combinación de los controladores serie y paralelo controlados coordinadamente como el *UPFC* (*Unified Power Flow Controller*) [23].

Los compensadores *SSSC*, *STATCOM*, y *UPFC* aquí mencionados son solamente un ejemplo de los diferentes compensadores que se tienen por cada grupo.

Una variante de esta tecnología de *FACTS*, es la aplicación de estos dispositivos en redes de distribución a la cual se le ha llamado *D-FACTS* (*Distributed Flexible AC- Transmission System*). Estos son esencialmente una mejora de los dispositivos *FACTS* en cuanto a tamaño y simplicidad en la instalación [24], sin embargo en este proyecto no se hará referencia a temas constructivos o de instalación ya que esto implicaría un conocimiento a fondo de electrónica de potencia, sino que se centrará en los aspectos relacionados con la implementación de estos sistemas en el análisis de flujos de potencia.

En la Tabla 3 se hace una descripción y comparación de algunos compensadores de acuerdo al tipo de conexión que tengan con la red y al nivel de compensación que presentan: (✓)Bajo, (✓✓) Medio, (✓✓✓) Alto

Fuente: adaptado de [18]

Tabla 3. Comparación compensadores

Compensador	Conexión	Control de flujo de carga	Control de tensión	Estabilidad transitoria	Estabilidad dinámica
<i>TCSC</i>	Serie	✓✓	✓	✓✓✓	✓✓
<i>SSSC</i>	Serie	✓✓	✓	✓✓	✓✓
<i>SVC</i>	Paralelo	✓	✓✓✓	✓	✓✓
<i>DSTATCOM</i>	Paralelo	✓	✓✓✓	✓✓	✓✓
<i>UPFC</i>	Serie-Paralelo	✓✓✓	✓✓✓	✓✓	✓✓

Al existir una gran variedad de compensadores, y teniendo en cuenta que para este proyecto se quiere evaluar el comportamiento de la red cuando se incluyen compensadores de reactivos para la mitigación de variaciones de tensión (*sags* y *swell*) lo cual se encuentra más relacionado con el control de tensión, y teniendo en cuenta la comparación dada en la Tabla 3, los compensadores *SVC*, *DSTATCOM* y *UPFC* serían los más apropiados, sin embargo, en la bibliografía consultada la aplicación del compensador *UPFC* se ha enfocado más a la parte de transmisión de los sistemas de potencia, por tal razón se ha decidido estudiar solamente la influencia de los compensadores en paralelo, específicamente los compensadores *SVC* y *DSTATCOM* el cual es el mismo *STATCOM*, solo que por ser incluido en sistemas de distribución se agrega a su nomenclatura la letra “D” [25].

2.1.3.1. *SVC (Static Var Compensator)*

Con sus siglas en inglés (*Static Var Compensator*). Es un compensador estático de potencia reactiva cuya salida se ajusta para intercambiar corriente capacitiva o inductiva o controlar parámetros específicos del sistema de energía eléctrica, es decir la acción básica de un *SVC* es generar o absorber potencia reactiva rápidamente en respuesta a una señal de control. En la mayoría de las aplicaciones, la acción es para controlar la tensión de los barrajes y contribuir directamente al equilibrio de potencia reactiva en un punto particular en un sistema eléctrico, por lo tanto el *SVC* puede mejorar diversos aspectos de la calidad del sistema de potencia por acción de un control adecuado [26].

2.1.3.1.1. *SVC en flujos de carga*

Existen varios modelos del compensador para su inclusión en los flujos de carga, entre los modelos existentes están el modelo de la susceptancia variable en derivación, el modelo de disparo por ángulo y disparo por ángulo con transformador integrado [27].

Debido a la simplicidad y facilidad para la inclusión del *SVC* en el estudio de flujos de carga se ha seleccionado el modelo de susceptancia variable. Este modelo también ha sido seleccionado por varios autores [28], [29].

2.1.3.1.1.1. Modelo de la susceptancia variable en derivación

El SVC se puede modelar como una susceptancia variable en derivación que puede tomar valores negativos (inductancia) y positivos (capacitancia), para absorber o generar potencia reactiva con el fin de regular la magnitud en el punto de conexión. El circuito equivalente se muestra en la Figura 5. El cual permite derivar las ecuaciones necesarias para la inclusión del compensador en el flujo de carga. [27]

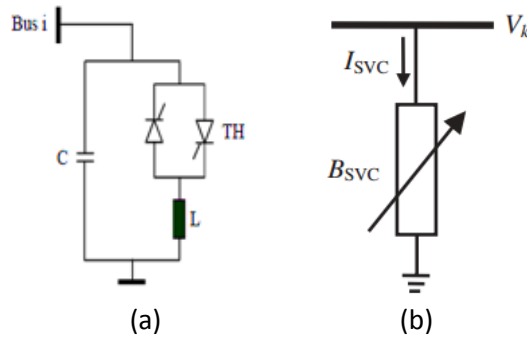


Figura 5. (a) Configuración SVC y (b) modelo de la susceptancia variable para inclusión en flujos de carga
Fuente: [2]

Las ecuaciones se encuentran en el Anexo A, las cuales se tienen en cuenta para la implementación del algoritmo en MATLAB

2.1.3.2. DSTATCOM – (Distribution Static Compensator)

El *DSTATCOM* (*Distribution Static Compensator*) es un dispositivo *D-FACTS* que realiza el control de la red conectado en paralelo a un nodo de ésta, al ser similar al compensador *STATCOM* difiriendo de este en cuanto a construcción e instalación, el *DSTATCOM* es modelado igual que un *STATCOM* para la inclusión en flujos de carga [25]. El nodo al cual se conecta el compensador es representado como un nodo PV (nodo de generación) el cual puede cambiar a nodo PQ (nodo de carga), es decir que puede absorber o generar potencia reactiva. A diferencia del SVC el *DSTATCOM* es representado como una fuente de tensión [2].

2.1.3.2.1. DSTATCOM en flujos de carga

Para la inclusión del compensador *DSTATCOM* en el estudio de flujos de carga se tiene en cuenta el modelo eléctrico y el modo de control [30], [31].

2.1.3.2.1.1. Modelo eléctrico.

El modelo del *DSTATCOM* para el flujo de carga sea tomado el de un generador síncrono. El circuito equivalente se muestra en la Figura 6, el cual es empleado para derivar el modelo matemático del controlador para la inclusión en el algoritmo de flujo de potencia.

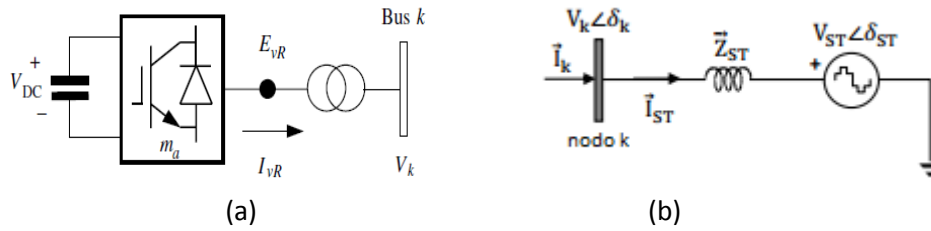


Figura 6. (a) Configuración DSTATCOM y (b) circuito equivalente para inclusión en flujos de carga
Fuente: [32]

Debido a que el DSTATCOM se encuentra conectado en paralelo con un nodo k de la red, la corriente I_{ST} se puede representar según (Ecuación 1). Desarrollando la expresión para la potencia aparente (Ecuación 2) se obtienen las expresiones de la potencia activa (Ecuación 3) y reactiva (Ecuación 4) que circulan del nodo al DSTATCOM. [31], [32].

$$I_{st} = \frac{V_k - V_{ST}}{Z_{ST}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$S_{ST} = V_k (V_k^* - V_{ST}^*) Y_{ST}^* \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$P_{ST} = V_k^2 G_{ST} - V_k V_{ST} (G_{ST} \cos(\delta_k - \delta_{ST}) + B_{ST} \sin(\delta_k - \delta_{ST})) \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$Q_{ST} = -V_k^2 B_{ST} - V_k V_{ST} (G_{ST} \sin(\delta_k - \delta_{ST}) - B_{ST} \cos(\delta_k - \delta_{ST})) \quad (\text{Ecuación 4})$$

El flujo de potencia activa es nulo por lo que para la resolución del flujo de carga será necesario especificarlo. Por otra parte Q_{ST} , la potencia reactiva absorbida por el DSTATCOM, podrá tomar tanto valores positivos como negativos. Cuando Q_{ST} tome valores positivos el DSTATCOM se comportará como una inductancia, mientras que si los valores son negativos, lo hará como un condensador [32].

Las ecuaciones necesarias para la inclusión de este compensador en el estudio de flujos de carga se encuentran en el anexo B, las cuales se tienen en cuenta para la implementación del algoritmo en MATLAB.

2.1.3.2.1.2. Modos de control

En su interacción con la red, el DSTATCOM modificará la tensión del nodo en el cual se encuentra, inyectando o absorbiendo potencia reactiva, lo que hará que cambien los flujos de potencia de toda la red respecto a la situación sin DSTATCOM. Este cambio en los flujos de potencia da lugar a los diferentes modos de control. Se podrán controlar las tensiones de diferentes nodos, así como la potencia transmitida por una línea o el tipo de compensación que se desea realizar. Los modos de control que aparecen en la Figura 7 no son todos los posibles ya que se podrá controlar casi cualquier variable del sistema [31], [32]:

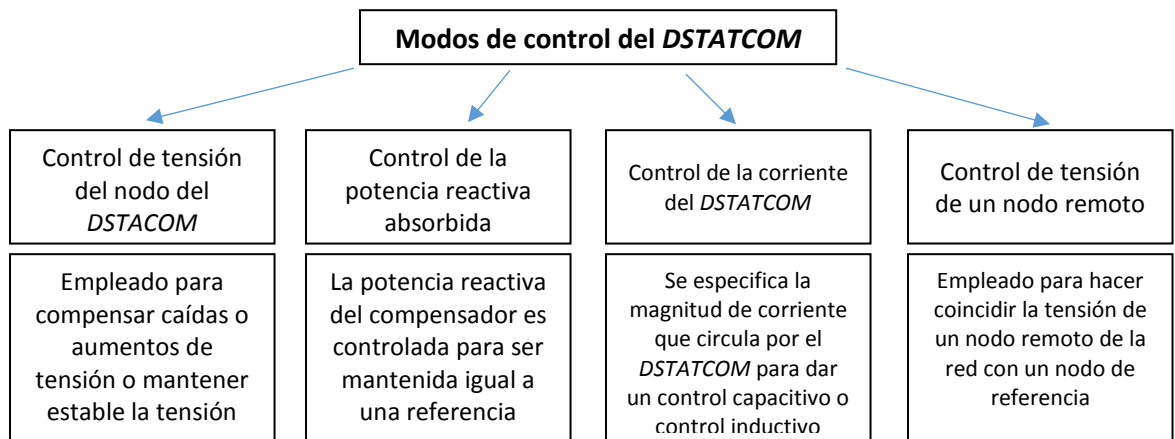


Figura 7. Modos de control del *DSTATCOM*

En este trabajo se quiere analizar el comportamiento del compensador cuando se tiene una caída (*sag*) o una elevación de tensión (*swell*), el modo de control seleccionado es el del control de tensión del nodo del *DSTATCOM*. La condición que se debe cumplir para la solución del flujo de carga con el modo de control es que la tensión del nodo sera la especifica por la referencia [32].

2.2. Marco referencial

2.2.1. Estándares referentes a calidad de energía

En el marco regulatorio existen muchas normas de referencia que tratan sobre la evaluación de calidad de energía. Para este trabajo solo se citan las más relevantes en la industria y la investigación. En la Figura 8 se presenta una lista de estándares seleccionados por orden cronológico.

Esta recopilación se hace con el fin de tener conocimiento de cómo ha transcurrido el tema de calidad de energía en cuanto a normatividad y cuáles son los estándares actuales, así como la información contenida en cada uno.

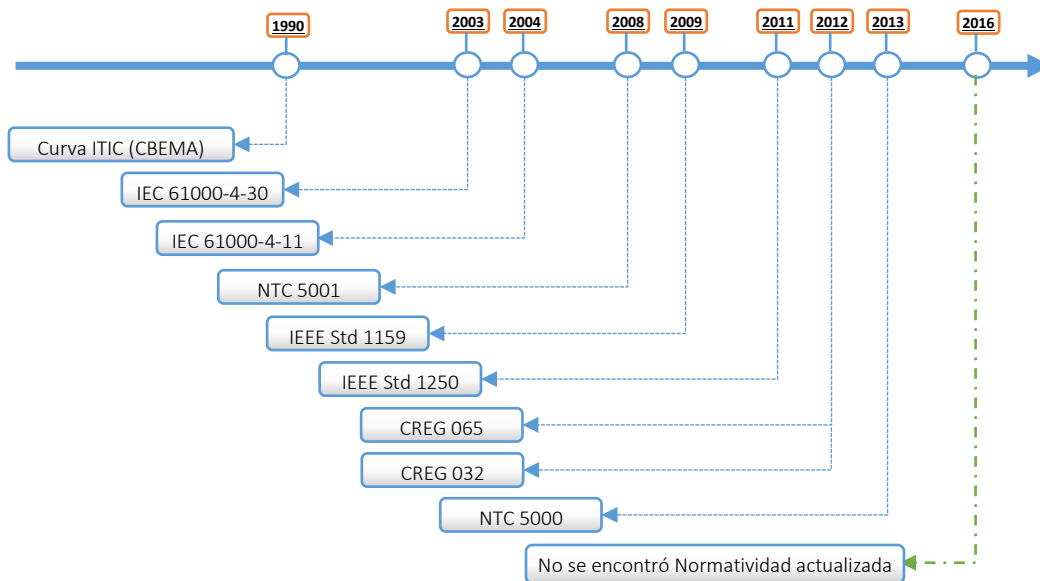


Figura 8. Estándares referentes a calidad de energía.

La curva **ITIC** es la sustitución de la curva **CBEMA** (*Computer Business Equipment Manufacturers Association*), que representa la evaluación de tolerancia y rendimiento de los equipos frente a diferentes condiciones de magnitud de tensión y duración. En un principio esta curva fue desarrollada para evaluar el comportamiento de computadores, pero debido al desempeño que ha tenido en la actualidad se ha convertido en un objetivo de diseño estándar para equipos sensibles y que se aplica también en el sistema de potencia y un formato común para presentar los datos de variación de calidad de energía [33]. En la Figura 9 se presenta la curva **ITIC (CBEMA)** para evaluación de equipos sensibles.

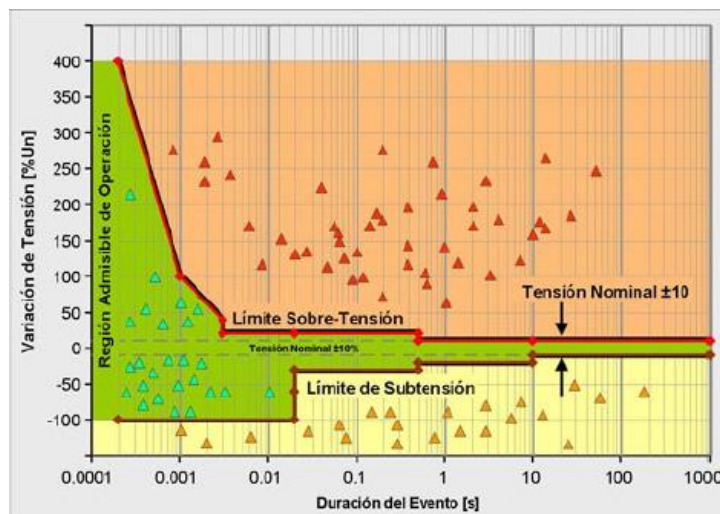


Figura 9. Curva ITIC (CBEMA)

Fuente: [33]

La norma **IEC 61000-4-30** “Técnicas de ensayo y medición”, define los procedimientos de medidas de cada uno de los parámetros eléctricos que determinan la calidad de energía eléctrica como son: frecuencia, magnitud de la tensión, *flicker* (parpadeo de tensión), armónicos, fluctuaciones, interrupciones y desequilibrios en la tensión de alimentación [13].

La **IEC 61000-4-11** “Técnicas de ensayo y de medida. Ensayos de inmunidad a los huecos de tensión, interrupciones breves y variaciones de tensión” propone un método para determinar la tolerancia de equipos eléctricos y electrónicos a las variaciones de tensión de corta duración como son los *sags* y los *swells* [34].

La norma **NTC 5001** tiene aspectos similares a la norma IEEE 1159. El propósito de esta norma es establecer las metodologías de evaluación y los valores de referencia de los parámetros asociados a la calidad de potencia eléctrica en el punto común de conexión (*PCC*) entre el operador de red y el usuario para todos los niveles de tensión, bajo condiciones normales de operación. En la Figura 10 se presenta los ítems de interés para evaluar la red [10].

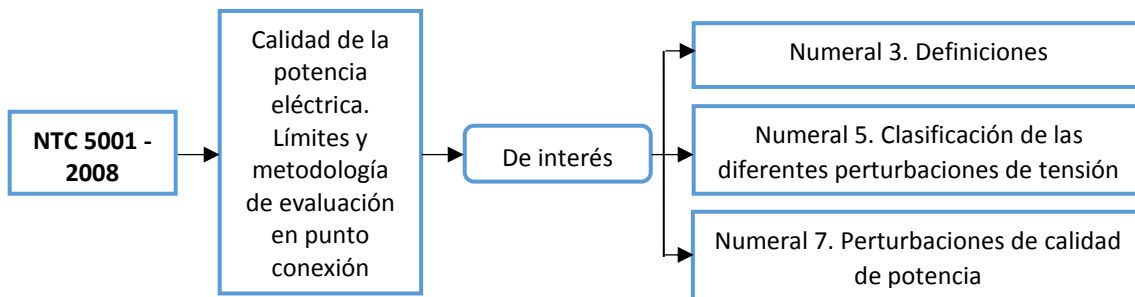


Figura 10. Mapa conceptual NTC 5001 – 2008

La **IEEE Std 1159** “Prácticas recomendadas para la supervisión de calidad de energía”, define la evaluación técnica de los parámetros eléctricos y presenta los fundamentos para determinar los distintos problemas de calidad de energía que se pueden observar en un sistema de potencia. Entre esos problemas de calidad están las variaciones de corta duración como *sags*, *swells* y *fluctuaciones* [8].

La **IEEE Std 1250** “Guía para la identificación y mejora de calidad de tensión en sistemas de potencia”, establece parámetros para la identificación y definiciones para problemas de calidad así como la definición de equipos para la mitigación de las perturbaciones que se pueden presentar en los sistemas de potencia [12].

La **CREG 065**, es una resolución colombiana que pretende establecer las normas de calidad de la potencia eléctrica aplicables en el Sistema Interconectado Nacional” [35], tiene por objetivo presentar claramente las políticas de calidad de potencia y ajustarlas para que sean similares a la norma NTC 5001.

Esta resolución tiene en cuenta indicadores como desviaciones de frecuencia, desviaciones de tensión, *flicker*, desbalances, distorsión total de demanda (*TDD*) y distorsión armónica de tensión

(*THDV*) y corriente (*THDI*). Además establece los límites de los indicadores respectivos y cómo se deben medir dichos fenómenos.

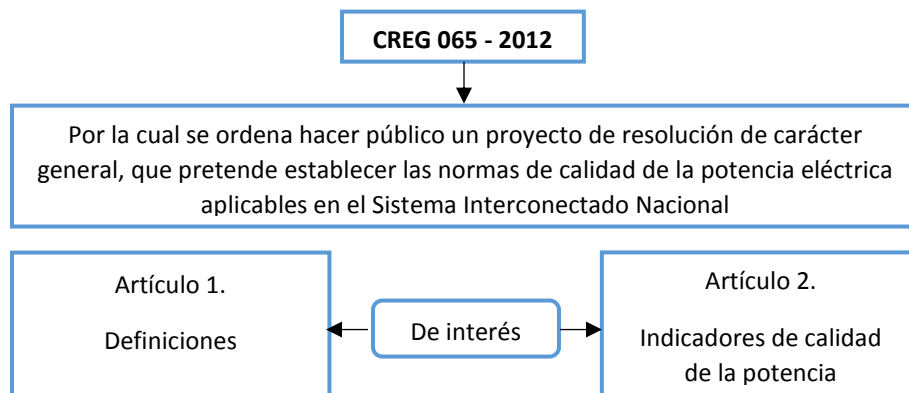


Figura 11. Mapa conceptual CREG 065 – 2012

La **CREG 032**, es un documento cuyo objetivo es “presentar la propuesta de regulación de la calidad de la potencia eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional (SIN) con base en estudios desarrollados por la comisión sobre este tema”. Están contenidos todos los análisis que soportan la propuesta dada en la resolución CREG 065-2012. En la Figura 12 se especifica el item de interes del documento y en la en la Tabla 4 se encuentran los límites de desviación estacionaria de tensión que se establecieron para el SIN [36].

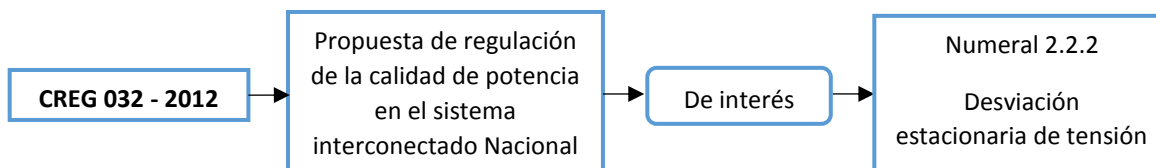


Figura 12. Mapa conceptual CREG 032 – 2013

Fuente: [36]

Tabla 4. Límites de desviación estacionaria de tensión

Nivel de tensión	Valor máximo	Valor mínimo
Nivel 1	110%	90%
Nivel 2	110%	90%
Nivel 3	110%	90%
Nivel 4	110%	90%
STN – menor 500 kV	110%	90%
STN – mayor o igual a 500 kV	105%	90%

Siendo:

- Nivel 1: sistemas con tensión nominal menor a 1 kV
- Nivel 2: sistemas con tensión nominal mayor o igual a 1 kV y menor a 30 kV
- Nivel 3: sistemas con tensión nominal mayor o igual a 30 kV y menor a 57.5 kV
- Nivel 4: sistemas con tensión nominal mayor o igual a 57.5 kV y menor a 220 kV

La norma **NTC 5000**, tiene por objeto definir los términos fundamentales utilizados en el tema de calidad de potencia eléctrica, así como los valores típicos de variaciones de tensión en cuanto a duración y magnitud que afectan la calidad de potencia. [9].

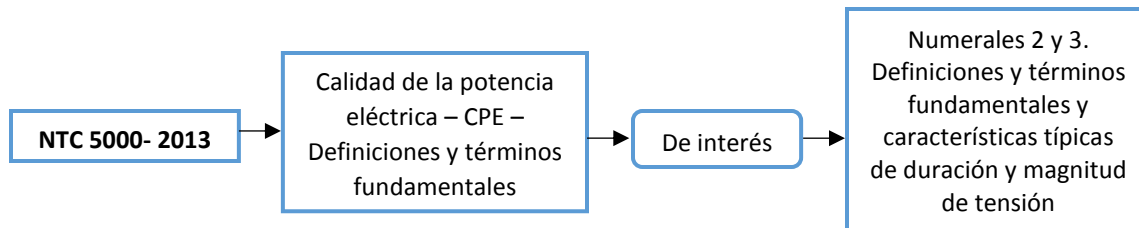


Figura 13. Mapa conceptual NTC 5000 – 2013

Como conclusión, los estándares están enfocados en definir las condiciones normalizadas para evaluar la calidad de energía (CPE) en un sistema de potencia más exactamente entre los operadores de red y los equipos de los usuarios finales.

Con base en la información encontrada, actualmente no se ha creado o actualizado alguna normatividad Colombiana (NTC) o un estándar internacional IEEE que sustituya a los mencionados en la figura 8. Razón por la cual, para dar cumplimiento a uno de los objetivos específicos planteados el cual es de gran importancia para dar cumplimiento al objetivo principal, y teniendo en cuenta la temática tratada y la información contenida en cada una de las normas y estándares, para el análisis de este proyecto se tendrá en cuenta lo especificado en el estándar IEEE 1159:2009 y en la norma NTC 5000:2013.

2.2.2. Mitigación de *sags* y *swells* usando compensadores de reactivos

Los problemas de calidad de energía han llevado a desarrollar tecnologías que tienen como objetivo principal mejorar y flexibilizar la operación de un sistema eléctrico y mitigar los impactos de variaciones de tensión como son las elevaciones y disminuciones de tensión. En la Figura 14 se observa una línea de tiempo que relaciona algunas publicaciones que utilizan distintos dispositivos para mitigar estos problemas, en la cual se presenta una revisión bibliográfica de artículos académicos y trabajos de grado para hacer un análisis más completo en la evolución de estudios de mitigación de variaciones de corta duración, con un mayor enfoque a las disminuciones (*Sags*) y elevaciones (*Swells*) por ser el objetivo principal de este trabajo.

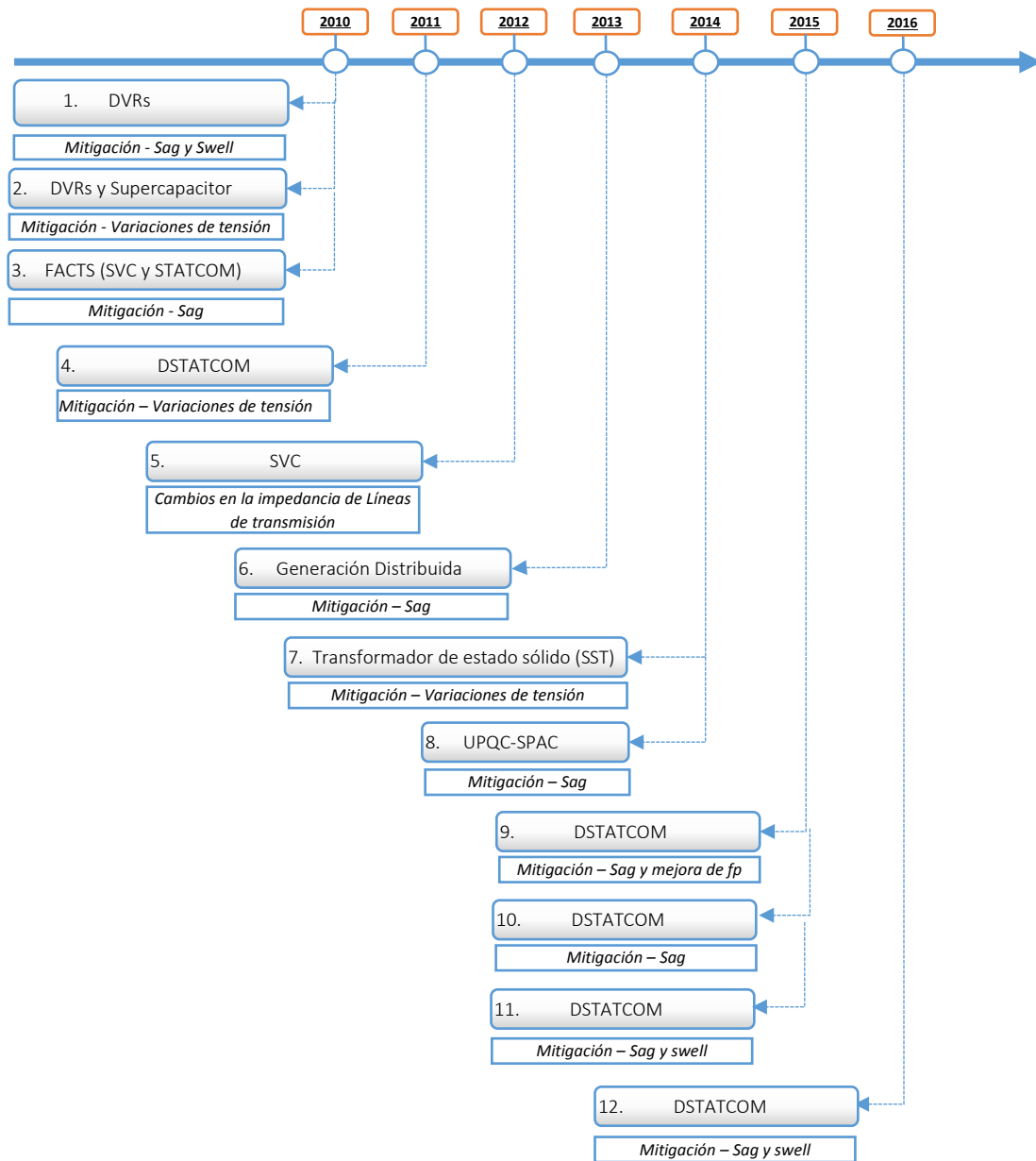


Figura 14. Mitigación de sags y swells usando compensadores de reactivos

- 2010. Ebrahim Babaei, Mohammad Farhadi y Mehran Sabahi**, en su artículo “*Mitigation of Voltage Disturbances Using Dynamic Voltage Restorer Based on Direct Converters*”, proponen dos nuevas topologías de Restaurador dinámico de tensión trifásico (DVRs), cuya tecnología se basa en convertidores directos. Como resultado de las topologías propuestas, obtiene convertidores con menos volumen, peso, costo y que pueden compensar de una manera eficiente cualquiera de las fases afectadas con elevaciones de tensión (*sags*) o disminuciones de tensión (*swells*) [37].

2. **2010. R. Omar y N.A. Rahim**, en su artículo "*Voltage unbalanced compensation using dynamic voltage restorer based on supercapacitor*", presentan un análisis y diseño de un Restaurador dinámico (DVR) basado en un supecondensador como almacenamiento de energía para la mejora de la calidad de energía de los sistemas de distribución eléctrica y capaz de mitigar las perturbaciones que se pueden presentar en baja tensión [38].
3. **2010. Zhang, Yan y Milanovic, Jovica V.** En el artículo titulado "*Global Voltage Sag Mitigation With FACTS- Based Devices*", explican la utilización de un algoritmo genético llamado "niching", el cual se evalúa con diferentes magnitudes de sags según la IEC 61000-4-11, los cuales para este artículo son generados con la falla que provoca mayor severidad que es la trifásica. El estudio se divide en tres secciones como lo es la descripción del problema, la explicación del algoritmo y por último el caso de estudio. Como resultado final, se estableció una comparación de los algoritmos "GA" y "NGA", en el cual los parámetros a evaluar fueron tipos de FACTS utilizados SVC y STATCOM, nodo de ubicación y el impacto para la mitigación de sags presentados en el año. Entre el cual el algoritmo GA fue más eficiente que el NGA [39].
4. **2011. Jazebi, Saeed, Hosseinian, Seyyed Hossein y Vahidi, Behrouz.** "*DSTATCOM allocation in distribution networks considering reconfiguration using differential evolution algorithm*" [40]. En este trabajo tienen un sistema nodal donde existen problemas de estabilidad ocasionados por el accionamiento inadecuado por interruptores de protección, con lo cual, el algoritmo descrito en el artículo selecciona la mejor ubicación del DSTATCOM para mitigar los impactos ocasionados, y por último es comparado con el algoritmo Optimización por enjambre de partículas (PSO). Hay que destacar que en este artículo también se busca reconfigurar la red de distribución, mediante la ubicación de los interruptores de protección, buscando una función objetivo que será la de disminuir la perdidas de potencia. El algoritmo diferencial evolutivo utilizado en el artículo es eficiente y reconfigura el sistema de distribución y da solución a los problemas presentados, también en la presencia del dispositivo DSTATCOM establece la mejor ubicación de este en la red y logra disminuir las perdidas y mejora el perfil de tensión llegando a un valor cercano de 1 p.u.
5. **2012. Amir Ghorbani, Mojtaba Khederzadeh y Babak Mozafari.** "*Impact of SVC on the protection of transmission lines*". En este artículo los autores estudian el impacto que tiene los compensadores estáticos de VAR sobre la impedancia aparente de las líneas de transmisión vista por los relés de distancia, cuando ocurren fallas simétricas y asimétricas [41].
6. **2013. O. Ipinnimo y J.Mitra,** "A review of voltage dip mitigation techniques with distributed generation in electricity networks" [42]. Este artículo hace un análisis de las distintas técnicas para utilizar generación distribuida con el fin de mitigar huecos de tensión en redes de distribución de media y baja tensión. Como conclusión final, los autores establecen que la generación distribuida podría ser una buena alternativa para mitigar huecos de tensión, pero que necesitan de protecciones, controles y algoritmos más robustos para no afectar la red al momento de operar.

7. **2014. M.R. Banaei y, E. Salary,** “*Mitigation of voltage sag, swell and power factor correction using solid-state transformer based matrix converter in output stage*”. En este trabajo los autores presentan una nueva topología de transformadores de estado sólido, que se basa en la integración de tres convertidores AC / DC, DC / AC y AC / AC para lograr una mayor eficiencia en el momento de corregir el factor de potencia y mitigar variaciones de corta duración como huecos de tensión, *flicker*, fluctuaciones y eliminaciones de sobretensiones en el nodo en falla [43]
8. **2014. Ganguly, Sanjib.** “*Impact of Unified Power-Quality Conditioner Allocation on Line Loading, Losses, and Voltage Stability of Radial Distribution Systems*” [44]. El estudio realizado se divide en tres secciones: Modelamiento matemático del UPQC-SPAC; ubicación y la potencia reactiva que el compensador debe tener en una red de distribución tipo radial ante diferentes niveles de huecos de tensión. En este estudio se utilizó el algoritmo flujo de carga donde se obtuvo que el compensador situado en un nodo en particular puede proteger las cargas atrás del alimentador de la tensión y por consiguiente se produce *sags* aguas arriba. Por lo tanto, la mejor ubicación para el UPQC-SPAC se supone que es en el nodo más cercano a la subestación. Pero esto aumenta la capacidad de MVA en el UPQC-SPAC porque tiene que manejar una corriente de carga superior. Por lo tanto, se requiere una mayor inversión. Debido a la ubicación del compensador en un nodo concreto, los clientes de los otros nodos también se benefician.
9. **2015. Gutiérrez, David y Orjuela, Oscar.** “*Análisis del comportamiento eléctrico del sistema de distribución IEEE de 34 nodos usando un compensador estático de distribución (DSTATCOM) diseñado en ATP/EMTP para la mitigación de sags en la mejora del factor de potencia*” [3]. En este trabajo de grado se realiza un estudio que permite analizar los elementos y equipos que componen el sistema IEEE de 34 nodos de manera que se modela con ayuda de una herramienta de simulación (ATP/EMTP) y se analiza la respuesta del sistema de distribución bajo estudio antes y después de la implementación del DSTATCOM en presencia de *sags* [3].
10. **2015. H. E. Rojas Cubides, A. S. Cruz Bernal y H. D. Rojas Cubides.** Con el artículo titulado “*Analysis of voltage sag compensation in distribution systems using a multilevel DSTATCOM in ATP/EMTP*”, los autores realizan un análisis mediante la generación aleatoria de perturbaciones usando una rutina de MATLAB para la identificación de nodos críticos, tomando como caso de estudio la red IEEE 13 nodos, la cual fue modificada y en la que se muestra la influencia del compensador DSTATCOM de 12 pulsos cuando se presentan variaciones de tensión, específicamente *sags*. Con la implementación de este compensador no solo se mejoró el nivel de tensión del nodo afectado, sino que se vio mejoría en todos los nodos de la red [45].

11. 2015. M. Hameed Ali y R. Narende. “*Mitigation of Voltage SAG and Voltage Swells By Controlling the DSTATCOM*”. En este artículo se describe el problema de los *sags* y *swells* y el rendimiento en términos de calidad de un sistema de distribución pequeño cuando se incluye el compensador *DSTATCOM* el cual se modela utilizando el software SIMULINK de MATLAB. Finalmente se concluye que con los resultados obtenidos se muestra que además de mejorar los niveles de tensión, también se tienen una respuesta dinámica rápida [46].

12. 2016. R. Burungale y L. C. R. “*DSTATCOM Performance for Voltage Sag, Swell Mitigation*”. En este artículo se presenta el análisis y mejora de la calidad de energía ante la presencia de *sags* y *swells* cuando un *DSTATCOM* es conectado en una red de distribución que fue diseñada usando MATLAB simulink. Con los resultados obtenidos se observó que la tensión de la carga es muy cercana al valor de referencia (1.0 p.u) [47].

De acuerdo con los estudios adelantados hasta la fecha, la mitigación para el problema de calidad de energía referente a las variaciones de tensión, específicamente *sags* y *swells*, ha sido estudiada y analizada por varios autores teniendo en cuenta diferentes tipos de compensadores tales como el *DVR*, *SST*, hasta incluso por medio de generación distribuida. No obstante, se encontraron pocos estudios realizados con el compensador *SVC*. Para el compensador *DSTATCOM* su interés ha crecido en los últimos dos años, sin embargo, entre la información encontrada, no se evidencia que haya sido estudiada la red IEEE 30 nodos para este tipo de problemas.

3. SAGS Y SWELLS EN RED IEEE 30 NODOS

En este capítulo se analiza el comportamiento del sistema IEEE 30 nodos ante la presencia de *sags* y *swells* utilizando el programa DlgSILENT.

El sistema IEEE 30 nodos es la representación de una porción pequeña del sistema eléctrico americano (medio oeste de Estados Unidos), datos que fueron suministrados en 1993 para ser parte de la base de datos de la IEEE [48]. La razón principal de seleccionar esta red, es porque posee valores de tensión de 132kV, 33kV y 11kV, que son similares a los valores definidos en Colombia para redes de distribución de tipo industrial y residencial, asimismo podría ayudar a comprender los efectos que producen las variaciones de tensión.

3.1. Magnitud y duración de los *sags* y *swells* a analizar

Teniendo en cuenta que para cada variación de tensión hay diferentes tipos de *sags* y *swells* (simétricos y asimétricos) con un rango típico tanto de magnitud como de tiempo tal como se indica en la Tabla 1 de este documento, evaluar todas las posibles combinaciones sería algo complejo y extenso. Por esta razón se decidió seleccionar variaciones de tensión simétricas con magnitudes y tiempos específicos teniendo en cuenta lo establecido en el estándar IEEE 1159 de 2009 [8] y la norma NTC 5000:2013 [9].

- ✓ Duración: en el alcance de este proyecto solo se tienen en cuenta las variaciones momentáneas y temporales, es decir aquellas que van de 30 ciclos a 3 segundos y desde más de 3 segundos hasta un minuto respectivamente. Con el fin de analizar ambos casos, se decidió tomar un rango desde 1 hasta 10 segundos en saltos de 1 segundo tanto para *sags*, como para *swells*, es decir (momentáneas : 1s – 2s – 3s y temporales: 4s – 5s – 6s – 7s – 8s – 9s – 10s).
- ✓ Magnitud para *sags*: de acuerdo con lo especificado en el estándar IEEE 1159 y la norma NTC 5000 , la caída de tensión sin importar la duración puede ir de 0.1 a 0.9 p.u., sin embargo la red solo permite caídas hasta 0.5 p.u, debido a los límites de carga que pueden entregar los generadores, razón por la cual el rango será de 0.5 a 0.9 p.u y se toman en saltos de 0.1, es decir (0.5 – 0.6 – 0.7 – 0.8 – 0.9)
- ✓ Magnitud para *swells*: a diferencia de los *sags*, la magnitud típica cambia de acuerdo con la duración. Para las variaciones momentáneas esta va de 1.1 a 1.4 p.u. y para las temporales va de 1.1 a 1.2 [8], sin embargo por algunos ajustes en la simulación esta solo permitió aumentar la tensión hasta 1.3. Por esta razón se analizará en un rango de 1.1 a 1.2 p.u y de 1.1 a 1.3 según sea el caso y se tomarán en saltos de 0.1, es decir (momentáneas: 1.1 – 1.2 – 1.3. y temporales: 1.1 – 1.2).

Con base en lo anterior, se determina el número de simulaciones iniciales (sin compensación) a realizar por cada nodo siendo en total 73 simulaciones. Esto se resume en la tabla 5.

- ✓ Para *sags* momentáneos (3 tiempos x 5 magnitudes = 15 simulaciones)

- ✓ Para *sags* temporales (7 tiempos x 5 magnitudes = 35 simulaciones)
- ✓ Para *swells* momentáneos (3 tiempos x 3 magnitudes = 9 simulaciones)
- ✓ Para *swells* temporales (7 tiempos x 2 magnitudes = 14 simulaciones)

Tabla 5. Magnitud y duración de los sags y swell a analizar por nodo

CATEGORIA VARIACIONES		DURACION	MAGNITUD	SIMULACIONES
Momentáneas	Sag	1s, 2s, 3s	0.5, 0.6, 0.7, 0.8 y 0.9 p.u.	15
	Swell	1s, 2s, 3s	1.1, 1.2 y 1.3 p.u.	9
Temporales	Sag	4s, 5s, 6s, 7s, 8s, 9s, 10s	0.5, 0.6, 0.7, 0.8 y 0.9 p.u.	35
	Swell	4s, 5s, 6s, 7s, 8s, 9s, 10s	1.1 y 1.2 p.u.	14
Total simulaciones =				73

3.2. Modelamiento de la red en DigSILENT

Los datos proporcionados por la IEEE fueron transformados a valores reales para ser introducidos en el programa DigSILENT y poder modelar todos los elementos que componen la red (generadores, transformadores, líneas, cargas, banco de compensadores y buses). La red IEEE 30 nodos se muestra en la Figura 15 y los procedimientos necesarios para modelar cada uno de los elementos que conforman la red que se encuentran en el anexo C.

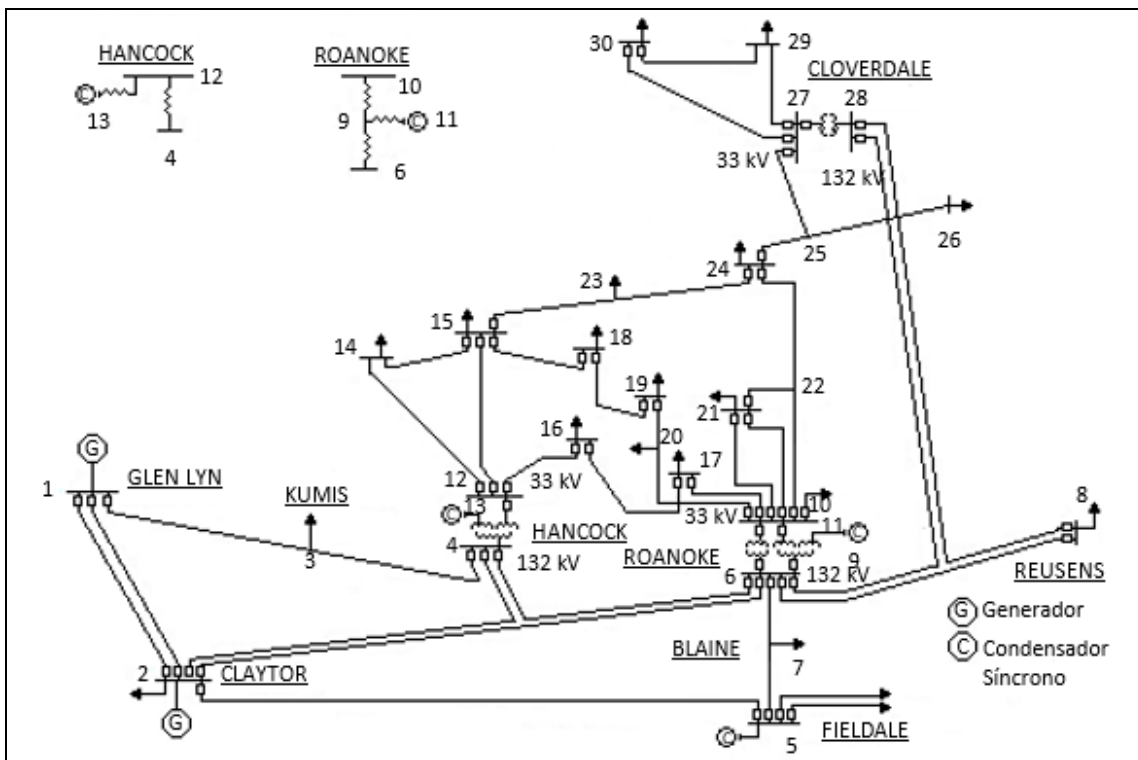


Figura 15. Diagrama unifilar red IEEE 30 nodos
Fuente [49]

3.3. Selección de nodos críticos

La selección de los nodos críticos puede realizarse a través de funciones objetivos, que evalúen los cambios de tensión en los nodos del sistema con estudios de flujos óptimos de carga que en la mayoría de trabajos encontrados, es usada para ubicación de generación distribuida con menores pérdidas de potencia [50]. Existen también funciones objetivos que evalúan los cambios de tensiones antes y durante una falla (simétrica o asimétrica) para evaluar un sistema de potencia y el grado de influencia de algunos nodos que son denominados nodos críticos [3].

En este proyecto se empleó la función objetivo que evalúa los cambios de tensión en los nodos del sistema antes y después de una falla trifásica sólidamente aterrizada y permite identificar en cuales nodos afecta en mayor grado el sistema [3]. Se seleccionan dos que serán aquellos en los que posteriormente se simularán diferentes escenarios en presencia de variaciones de tensión de corta duración con el fin de analizar el comportamiento de la red y en los que se determinará la necesidad de compensación y se evaluará la implementación de los compensadores SVC y DSTATCOM.

El proceso para la selección de los nodos críticos se muestra en el anexo D, en el cual da como resultado que los nodos objeto de estudio de este proyecto serán los nodos 10 y 12. En la Figura 16 esto se ve gráficamente donde las zonas en rojo corresponden a los puntos más críticos y el color azul a los menos críticos.

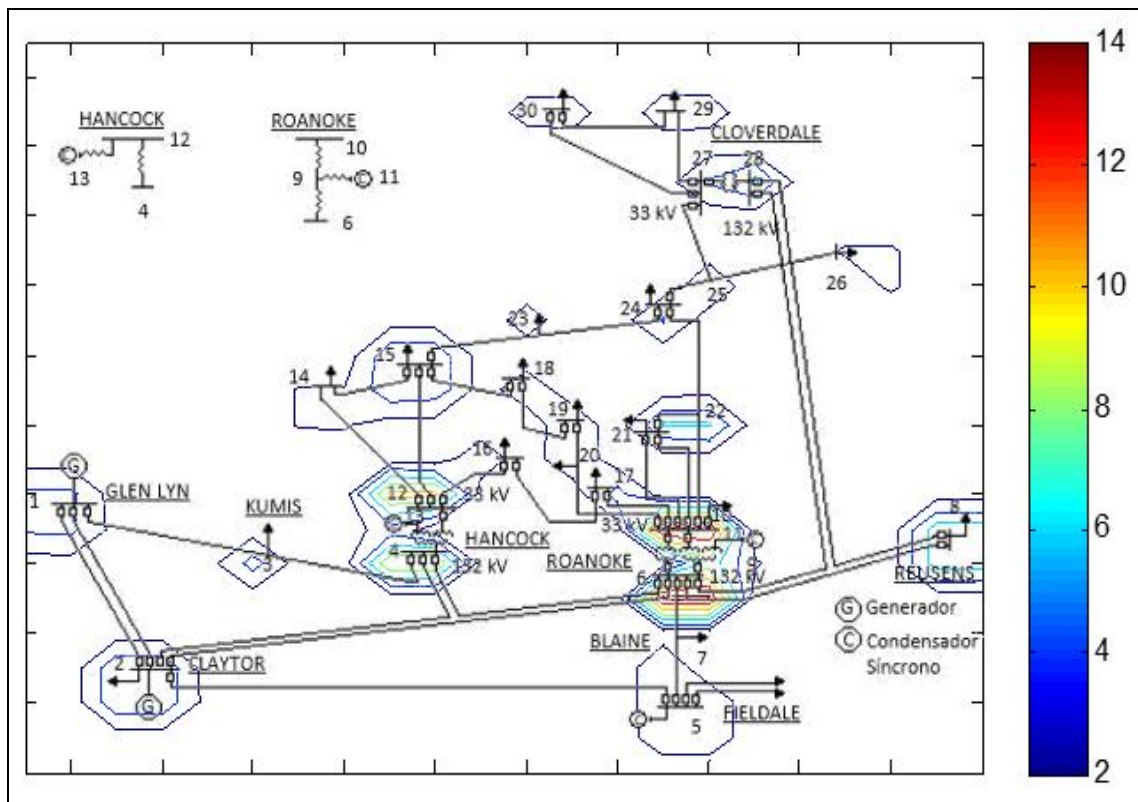


Figura 16. Nodos críticos del sistema

3.4. Carga para la generación de *Sags* y *Swells* en DigSILENT

Para generar un *sag* o *swell* en DigSILENT, se incluye en la simulación (en los nodos 10 y 12) una carga adicional la cual hará que la tensión aumente o disminuya, según sea el caso. La inclusión de esta nueva carga se realiza de la misma manera que se hizo para el modelamiento de la red (Anexo C).

En las tablas 6 y 7 se indican los valores de carga necesaria para generar los *sags*, y en las tablas 8 y 9 los valores de carga necesaria para generar los *swells*.

Tabla 6. Carga para generar *sags* en nodo 10 en DigSILENT

Carga para generar SAGs en el nodo 10		
Magnitud Sag (p.u.)	Carga MVAR	Caída Real p.u.
0,5	339	0,5641
0,6	275	0,6223
0,7	175	0,7321
0,8	123	0,8004
0,9	68	0,8823

Tabla 7. Carga para generar *sags* en nodo 12 en DigSILENT

Carga para generar SAGs en el nodo 12		
Magnitud Sag (p.u.)	Carga MVAR	Caída Real p.u.
0,5	329	0,5438
0,6	321	0,6041
0,7	287	0,6973
0,8	227	0,8037
0,9	147	0,8974

Tabla 8. Carga para generar *swells* en nodo 10 en DigSILENT

Carga para generar SWELLS en el nodo 10		
Magnitud Swell (p.u.)	Carga MVAR	Aumento Real p.u.
1,1	100	1,1000
1,2	200	1,1800
1,3	330	1,2800

Tabla 9. Carga para generar *swells* en nodo 12 en DigSILENT

Carga para generar SWELLS en el nodo 12		
Magnitud Swell (p.u.)	Carga MVAR	Aumento Real p.u.
1,1	100	1,0969
1,2	230	1,1778
1,3	455	1,2980

3.5. Resultados

Al ser un gran número de simulaciones, en este documento solo se muestran algunas gráficas y resultados obtenidos, los cuales son representativos para analizar el comportamiento de la red.

Las gráficas muestran los cambios de perfiles de tensión de cada uno de los nodos del sistema cuando se presentan variaciones en profundidad y tiempo de un *sag*, o variaciones de elevación y tiempo de un *swell* en los nodos seleccionados como nodos críticos.

3.5.1. Sags y Swells en Nodo 10

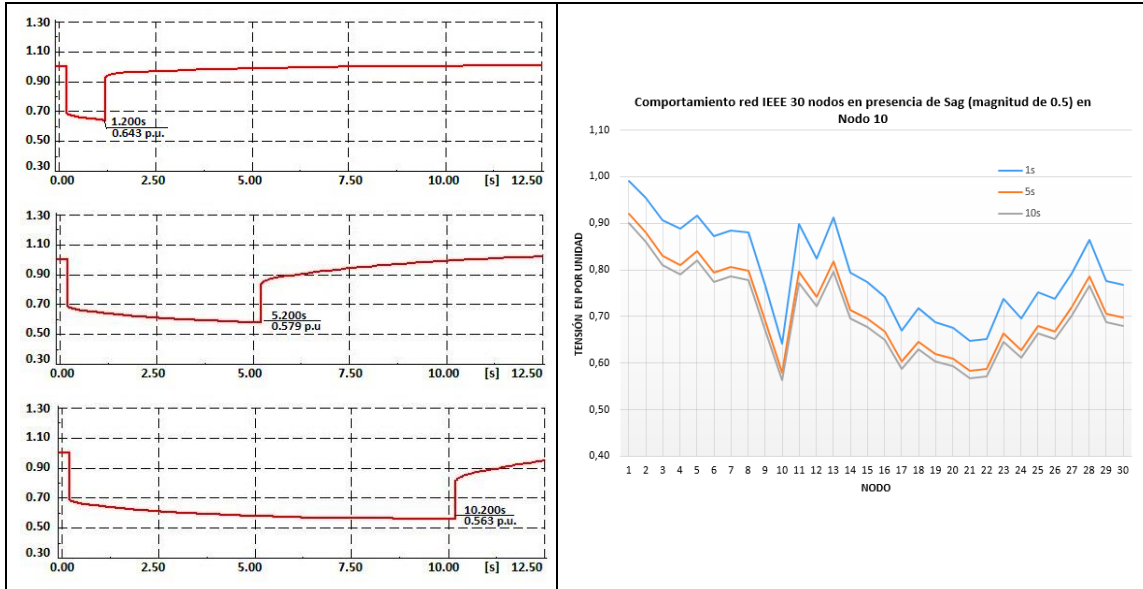


Figura 17. Sag – Magnitud 0.5 y duración de 1, 5 y 10s en Nodo 10

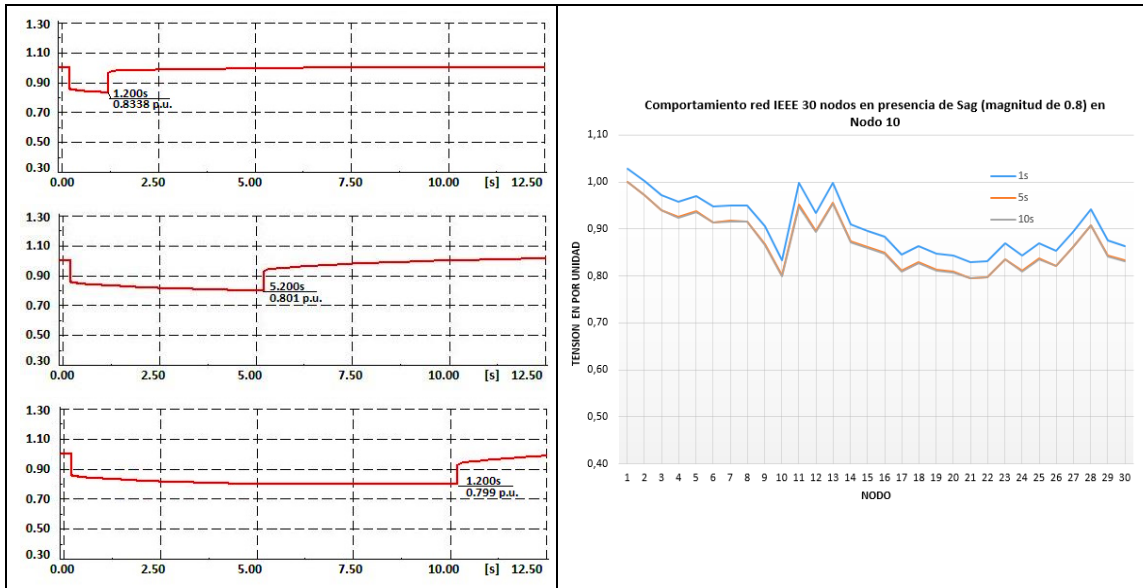


Figura 18. Sag – Magnitud 0.8 y duración de 1, 5 y 10s en Nodo 10

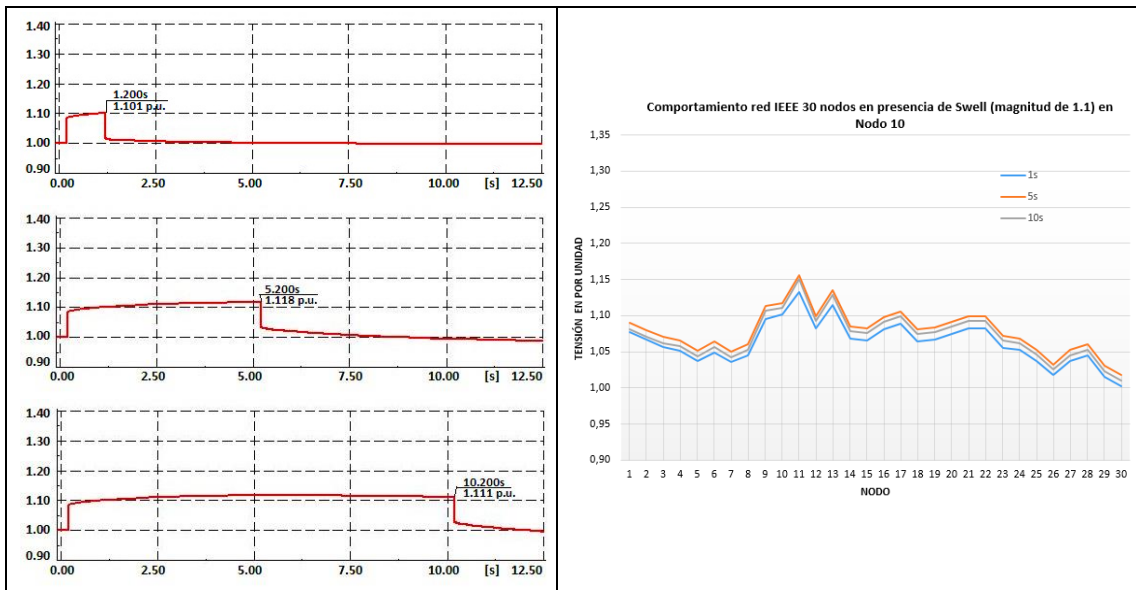


Figura 19. Swell – Magnitud 1.1 y duración de 1, 5 y 10s en Nodo 10

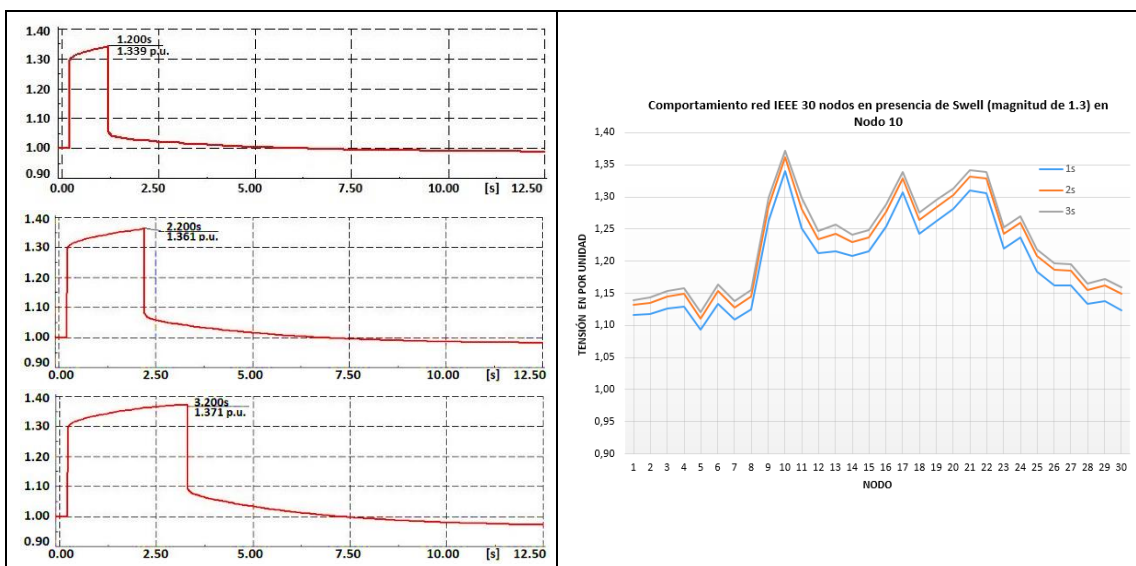


Figura 20. Swell – Magnitud 1.3 y duración de 1, 2 y 3s en Nodo 10

En las figuras 17 y 18 se observa que los nodos 11 y 13 el nivel de tensión no disminuye en gran magnitud cuando se presenta un *sag*, esto se debe a que en estos nodos se encuentran conectados unos condensadores síncronos tal como se muestra en la figura 15, los cuales tienen como función entregar potencia reactiva y buscan mantener los niveles de tensión cerca de 1 p.u. Sin embargo, en las figuras 19 y 20 no sucede lo mismo, ya que en este caso los condensadores no absorben potencia reactiva, pues no está entre sus funciones, es por ello que para el caso de un *swell*, el nivel de tensión en estos dos nodos está por encima de ese valor ya que los condensadores continúan entregando potencia reactiva

3.5.2. Sags y Swells en Nodo 12

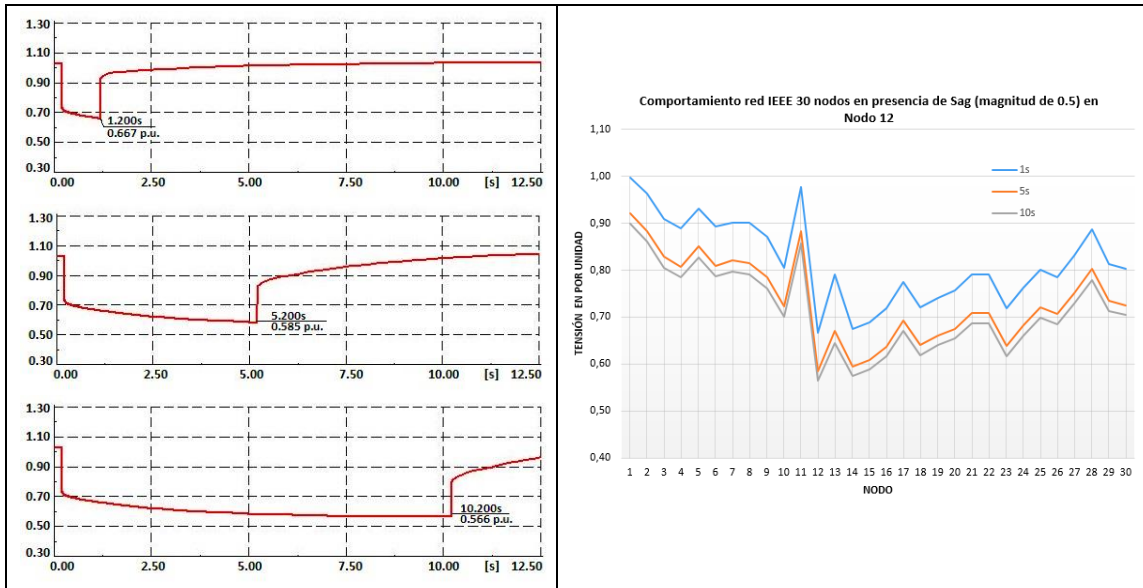


Figura 21. Sag – Magnitud 0.5 y duración de 1, 5 y 10s en Nodo 12

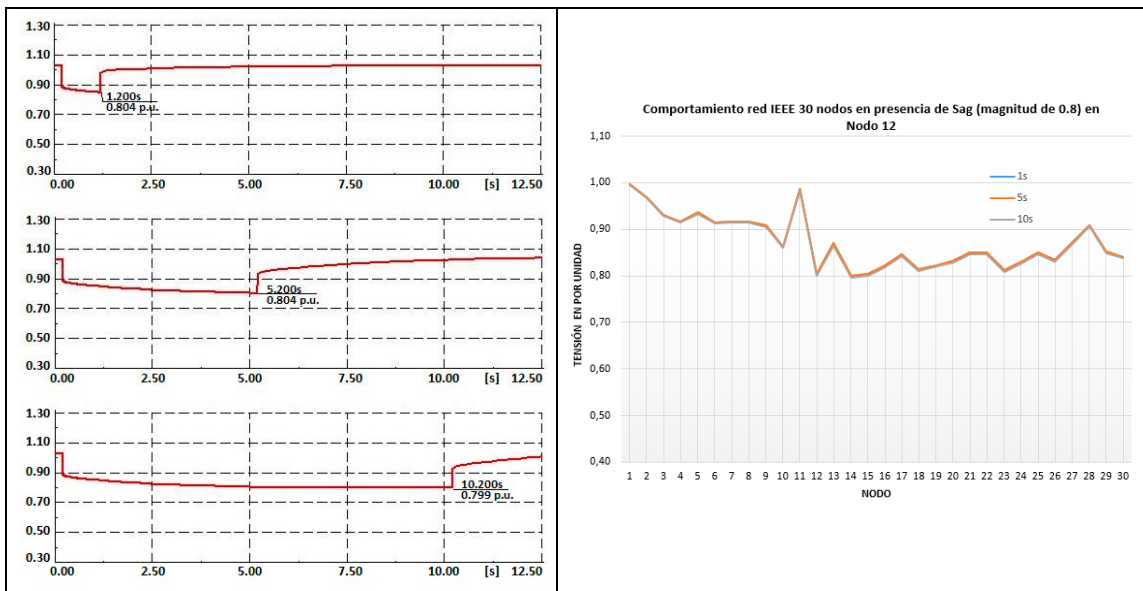


Figura 22. Sag – Magnitud 0.8 y duración de 1, 5 y 10s en Nodo 12

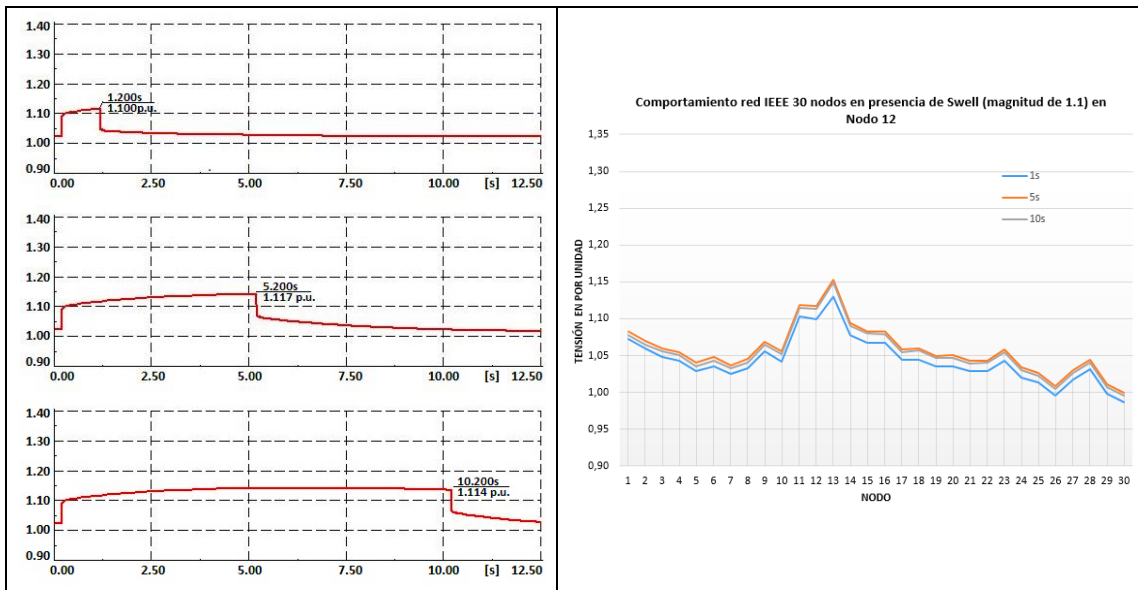


Figura 23. Swell – Magnitud 1.1 y duración de 1, 5 y 10s en Nodo 12

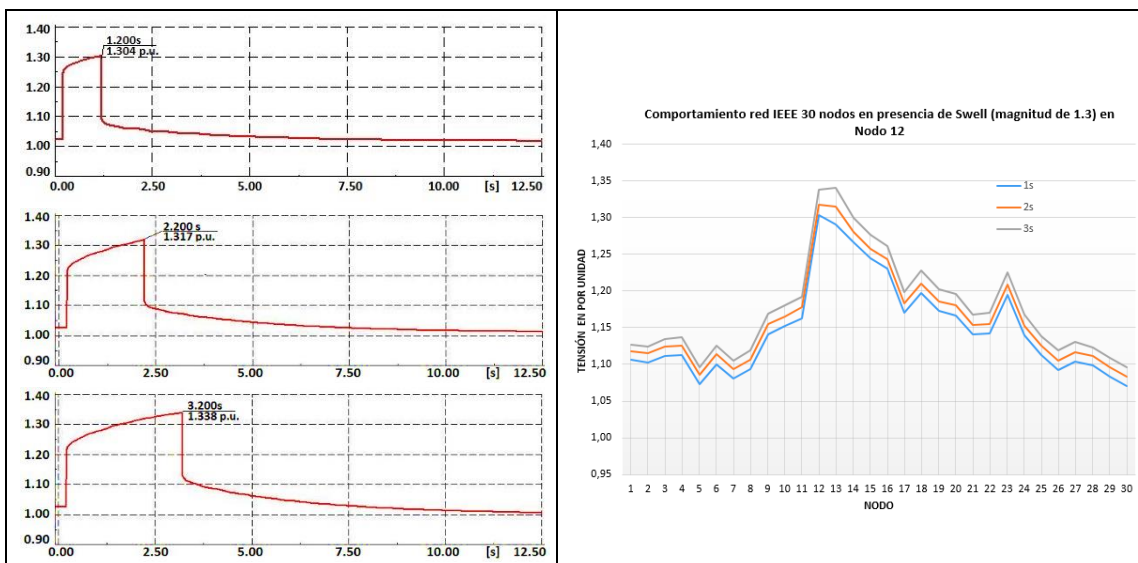


Figura 24. Swell – Magnitud 1.3 y duración de 1, 2 y 3s en Nodo 12

Al igual que como se presentó en el nodo 10, los condensadores conectados en los nodos 11 y 13 influyen en el comportamiento de la red cuando se presenta un *sag* o un *swell*. En este caso, el valor más crítico se presentó en el nodo 13 donde este alcanzó una magnitud de 1.34 p.u para un swell de 1.3 y duración de 3 s, tal como se ve en la figura 24.

3.6. Análisis de resultados

De acuerdo con los datos obtenidos para la generación de los diferentes *sags* y *swells*, la carga requerida no es igual para los dos nodos, tal como se indica en las Tablas 6, 7, 8 y 9, donde se puede observar que para el nodo 10 estos valores son menores comparados con los obtenidos para el nodo 12.

Con los valores de carga, la caída mínima permitida por el sistema es de 0.54, ya que para valores más grandes de carga el sistema no converge.

Cuando se presenta un *sag* o *swell* en la red, en la mayoría de los nodos, los valores de tensión quedan por debajo de 0.9 (en presencia de un *sag*) o son mayores de 1.1 p.u (en presencia de un *swell*). Estas variaciones de tensión tienden a propagarse más hacia aguas abajo que aguas arriba de los nodos seleccionados. Sin embargo para los *sags* con duración de 1 seg los valores de tensión en los nodos 11 y 13 estuvieron entre 0.9 y 1.1 p.u.

De acuerdo con las gráficas y resultados obtenidos se puede observar que la caída o elevación de tensión varía de acuerdo al tiempo, sin embargo esta variación es mayor a medida que se aleja del rango de nivel de tensión ideal (1.0 p.u.), es decir, para los *sags* de 0.5 esta variación es mayor comparada con una caída de 0.8, y para los *swells* la variación es mayor para magnitudes de 1.3 comparado con una elevación cercana al 1.1.

3.7. Conclusiones

- Con el desarrollo de este capítulo se da cumplimiento al primer objetivo: “Analizar el comportamiento de un sistema de IEEE 30 nodos ante la presencia de *sags* y *swells*”. Donde se utilizó una metodología para cuantificar el efecto que tienen algunos nodos sobre el sistema cuando se presenta una falla trifásica. Esto se hizo con el fin de seleccionar los nodos críticos para la ubicación de las variaciones de tensión *sag* y *swell*.
- Con la función objetivo y la metodología propuesta (Anexo D) para la selección de nodos críticos, se pudo establecer que los nodos 10 y 12 son los que tienen mayor influencia sobre la red.
- Al momento de seleccionar las cargas para la generación de *sags* y *swells* en los nodos 10 y 12, el nodo 10 necesitó valores más pequeños de carga para producir las variaciones de tensión, por lo que se comprueba que este es el nodo más crítico del sistema debido a la facilidad que tiene para reproducir un *sag* o un *swell* con menor proporción de carga. Lo cual estaría acorde con lo obtenido con la función objetivo.
- Cuando se presenta una caída o una elevación de tensión en la red, no solo se ven afectados el nodo en el cual ocurre el evento, sino que la mayoría de los nodos se ven afectados. Sin embargo los nodos 11 y 13 mantienen los niveles de tensión entre 0.9 y 1.1 p.u cuando se presentan *sags* con duración de 1 seg, debido a que en estos nodos están conectados unos condensadores síncronos los cuales inyectan potencia reactiva para mantener los niveles de tensión en los nodos.

4. ALGORITMO PARA COMPENSACION DE REACTIVOS A TRAVES DE SVC Y DSTATCOM

Se implementó un algoritmo en MATLAB para la solución de flujos de potencia por el método de Newton Raphson, el cual incluye los compensadores SVC y DSTATCOM. Con el fin de tener mayor facilidad y orden en el manejo de los datos y resultados obtenidos se crearon tres programas, uno para el flujo de carga sin compensación (FlujoCargaNR.m), otro para el flujo de carga con DSTATCOM (DSTATCOM.m) y otro para el flujo de carga con SVC (SVC.m). Así mismo para facilitar el análisis, se grafican los perfiles de tensión obtenidos.

4.1. Implementación algoritmo

El software MATLAB permite crear diferentes archivos con la posibilidad que interactúen entre ellos. Se crearon en total 8 archivos: DatosNodos30.m, DatosLinea30.m, Ybarra30.m, FlujoCargaNR.m, DatosDSTATCOM30.m, DSTATCOM.m, DatosSVC.m y SVC.m, los cuales se describen a continuación y de cada uno se muestra una parte del código implementado en donde se indica la información inicial contenida:

1. DatosNodos30.m

Se especifica por nodo el tipo de nodo, las tensiones en valores en por unidad, ángulos en radianes y los valores de las potencias activas y reactivas generadas y demandadas en VA así como los límites de potencia reactiva para los nodos PV (nodos de generación).

```
function DatosNodos = DatosNodos30()
% Nodo (de 1 a 30)
% Tipo (1=slack; 2=PV; 3=PQ)
% Pg,Qg (Potencia activa y reactiva generada)
% Pd,Qd (Potencia activa y reactiva demandada)
% Qmin y Qmax (Límites de potencia reactiva)
%
% |Nodo |Tipo | Vpu | Angulo| Pg | Qg | Pd | Qd | Qmin | Qmax |
DatosNodos = [ 1 1 1.06 0 0 0 0 0 0 0;
               2 2 1.043 0 40 50.0 21.7 12.7 -40 50;
               3 3 1.0 0 0 0 2.4 1.2 0 0;
```

2. DatosLinea30.m

Contiene información respecto a las líneas en el cual se indican los valores de resistencia (R), reactancia (X) y susceptancia (B/2). Los valores allí especificados están en por unidad (p.u.)

```
function DatosLinea = DatosLinea30()
% Desde el nodo i (Ni) hasta el nodo k (Nk)
% R (Resistencia en p.u)
% X (Reactancia en p.u)
% B/2 (Susceptancia en p.u)
%
% | Desde Ni | Hasta Nk | R pu | X pu | B/2 pu |
DatosLinea = [ 1 2 0.0192 0.0575 0.0264
               1 3 0.0452 0.1652 0.0204
               2 4 0.0570 0.1737 0.0184
```

3. Ybarra30.m

Se implementa una función para la elaboración de la matriz de admitancias o matriz Ybarra en la cual se tiene en cuenta los datos especificados en el archivo DatosLinea30.m. La función para la matriz de impedancias se hace como paso previo a la implementación del algoritmo. El proceso para esta función es el mostrado en la Figura 25., donde i y k hacen referencia a los nodos, siendo estos de 1 a 30.

```
function Ybarra = Ybarra30() % Función para crear la matriz Ybarra

DatosLinea = DatosLinea30(); % Llama los datos de la función DatosLinea30
Ni = DatosLinea(:,1);      % Desde el nodo i
Nk = DatosLinea(:,2);      % Hasta el nodo k
R = DatosLinea(:,3);       % Resistencia en p.u. en real
X = i*DatosLinea(:,4);     % Reactancia en p.u. en imaginario
B = i*DatosLinea(:,5);     % Suceptancia en p.u. en imaginario
Y = 1./(R + X);           % Inversa de la impedancia
Nodos = max(max(Ni),max(Nk)); % Número total de nodos
Lineas = length(Ni);      % Número de líneas
Ybarra = zeros(Nodos,Nodos); % Dimensión de la matriz Ybarra
```

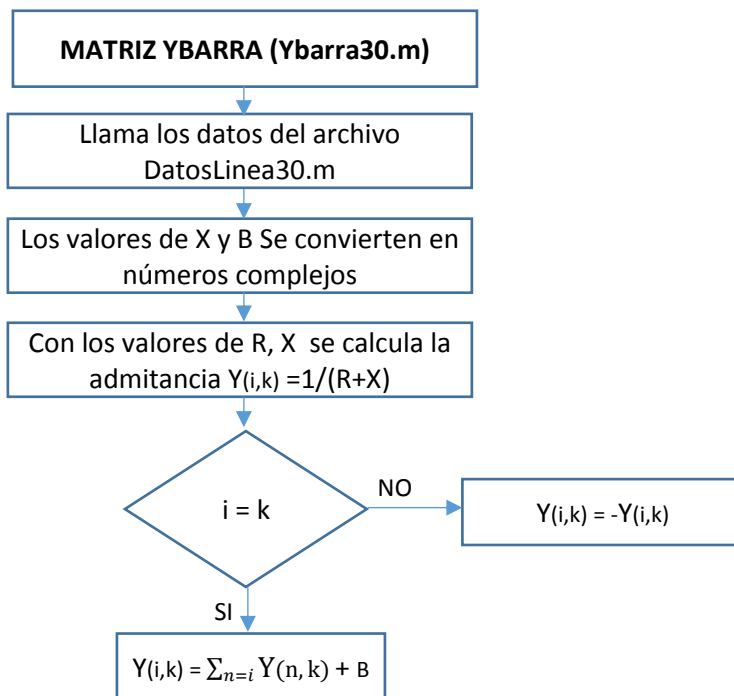


Figura 25. Diagrama de flujo empleado en el programa Ybarra30.m

Cuando $i=k$, hace referencia a los elementos de la diagonal, en los cuales se tienen en cuenta todas las admitancias asociadas al nodo y la susceptancia en derivación que este tenga.

4. FlujoCargaNR.m

Se implementa un algoritmo para la solución de flujos de carga por el método de Newton Raphson en el cual la información que se obtiene principalmente son los valores de tensión y ángulo de los nodos. El archivo FlujoCargaNR.m tiene en cuenta la información contenida en los archivos DatosNodos30.m y Ybarra30.m.

```
% Flujo de carga por el método de Newton-Raphson

Ybarra = Ybarra30();           % Llama la función Ybarra30
DatosNodos = DatosNodos30(); % Llama la función DatosNodos30
Base = 100;                    % Valor base en MVA
Nodo = DatosNodos(:,1);       % Toma columna Nodos de "DatosNodos30"
Tipo = DatosNodos(:,2);       % Toma columna Tipo de "DatosNodos30"
Vpu = DatosNodos(:,3);        % Toma columna Vpu de "DatosNodos30"
Angulo = DatosNodos(:,4);     % Toma columna Angulo de "DatosNodos30"
Pg = DatosNodos(:,5);         % Toma columna Pg de "DatosNodos30"
Qg = DatosNodos(:,6);         % Toma columna Qg de "DatosNodos30"
Pd = DatosNodos(:,7);         % Toma columna Pd de "DatosNodos30"
Qd = DatosNodos(:,8);         % Toma columna Qd de "DatosNodos30"
Qmin = DatosNodos(:,9);       % Toma columna Qmin de "DatosNodos30"
Qmax = DatosNodos(:,10);      % Toma columna Qmax de "DatosNodos30"
Nnodos = max(Nodo);           % Número total de nodos
P = (Pg - Pd)/Base;           % Potencia neta activa en p.u.
Q = (Qg - Qd)/Base;           % Potencia neta reactiva en pu.
Qmin = Qmin/Base;             % Convertir Qmin en valores a p.u.
Qmax = Qmax/Base;             % Convertir Qmáx en valores a p.u.
Tolerancia = 10;              % Tolerancia
Iteraciones = 1;              % Iteración inicial
Pinicial = P;                 % Potencia activa inicial
Qinicial = Q;                 % Potencia reactiva inicial
G = real(Ybarra);             % Conductancia (valor real de Ybarra)
B = imag(Ybarra);             % Susceptancia (valor imaginario de Ybarra)
```

En la Figura 26 se muestra el diagrama de flujo para la solución de flujos de carga por el método de Newton Raphson el cual se tuvo en cuenta para el desarrollo del algoritmo. Las operaciones allí mencionadas para el cálculo de las potencias netas, deltas de potencia y determinación de la matriz funcional o Jacobiano se describen a detalle en el Anexo E. El diagrama de flujo comprende los siguientes pasos:

1. Tomar los datos iniciales mencionados al inicio de este capítulo los cuales se encuentran en los archivos DatosNodos30.m y Ybarra30.m
2. Calcular las potencias netas conocidas (P_{Ni} , Q_{Ni}) que corresponden a la diferencia entre la potencia generada y la potencia demandada. (**Anexo E.1**)
3. Calcular las potencias netas teniendo en cuenta los datos de Ybarra, tensión y ángulo de los nodos. ($P_{Ni}(V_k, \theta_k)$, $Q_{Ni}(V_k, \theta_k)$). (**Anexo E.2**)
4. Calcular los delta de potencia activa y reactiva (ΔP , ΔQ) que corresponden a la diferencia entre la potencia neta conocida y la potencia neta calculada. (**Anexo E.3**)
5. Se determina si el error es inferior al especificado, en este caso especifica un error de $1e-5$. Si el error es menor, los datos de tensión y ángulo obtenidos hasta el ese momento serian la respuesta, de lo contrario es necesario seguir con el proceso iterativo

6. Cálculo de la matriz funcional ($J = \text{Jacobiano}$). (**Anexo E.4**)
7. Calcular los valores de delta de ángulo y delta de tensión ($\Delta\theta, \Delta V$) los cuales se obtienen al multiplicar el vector de delta de potencia calculados en el numeral 4 por la inversa de la matriz funcional calculada en el numeral 6.
8. Calcular los nuevos valores de tensión y ángulo que serán utilizados para la siguiente iteración

El algoritmo implementado en MATLAB se encarga de hacer este proceso iterativo hasta que se cumpla la condición de que el error sea menor al valor especificado.

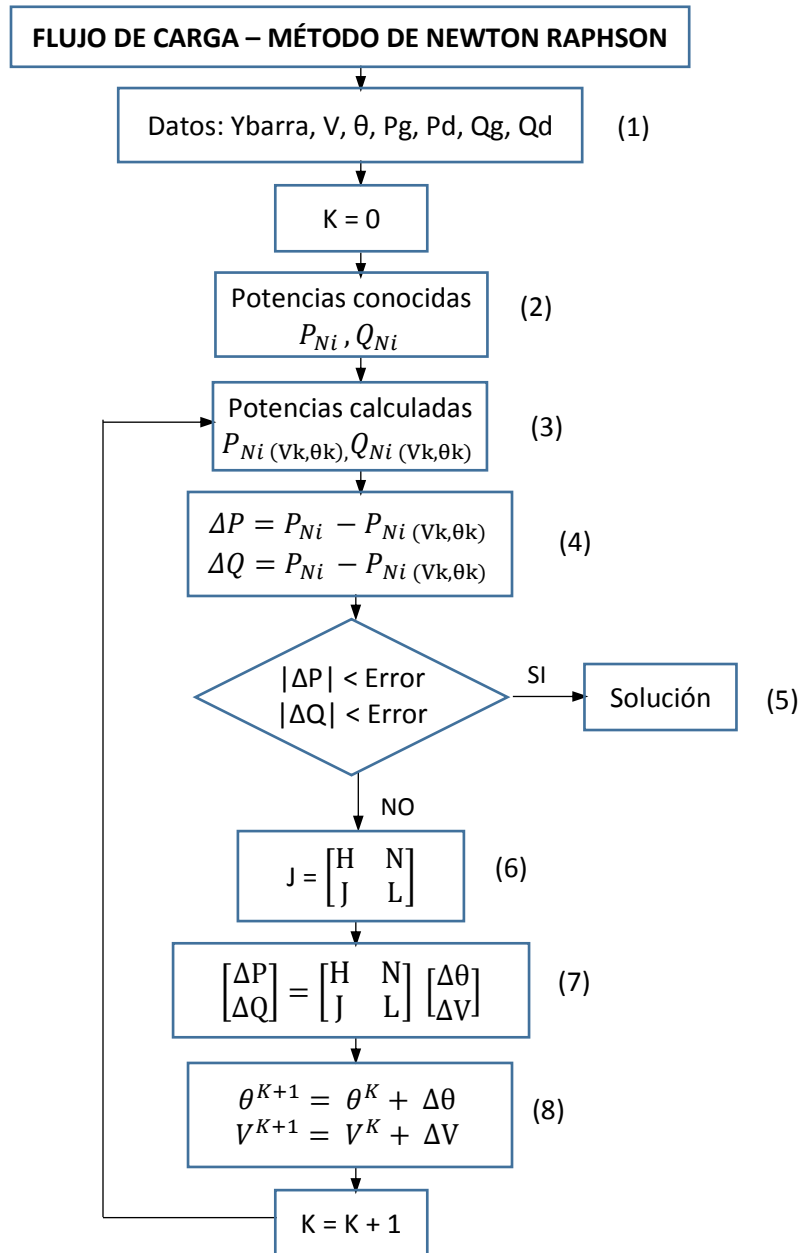


Figura 26. Diagrama de flujo para el programa FlujoCargaNR.m

5. DatosDSTATCOM30.m

En este archivo se especifica el nodo en el cual será conectado el compensador DSTATCOM y el nivel de tensión de referencia al cual se quiere que este llegue

```
function DatosDSTATCOM = DatosDSTATCOM30()

% Nodo (Nodo donde se ubica el DSTATCOM)
%      |Nodo | Vpu | Angulo |
DatosDSTATCOM = [ 12     1     0 ];
```

6. DSTATCOM30.m

Se implementa un algoritmo para la solución de flujos de carga en el que se incluye el compensador *DSTATCOM*. Este archivo tiene en cuenta la información contenida en DatosNodos30.m, Ybarra30.m y DatosDSTATCOM30.m.

```
% Flujo de carga por el método de Newton-Raphson con DSTATCOM

Ybarra = Ybarra30();           % Llama la función Ybarra30
DatosNodos = DatosNodos30();   % Llama la función DatosNodos30
DatosDSTATCOM = DatosDSTATCOM30(); % Llama la función DatosDSTATCOM30
Base = 100;                    % Base MVA
Nodo = DatosNodos(:,1);        % Toma columna Nodos de "DatosNodos30"
Tipo = DatosNodos(:,2);        % Toma columna Tipo de "DatosNodos30"
Vpu = DatosNodos(:,3);         % Toma columna Vpu de "DatosNodos30"
Angulo = DatosNodos(:,4);      % Toma columna Angulo de "DatosNodos30"
Pg = DatosNodos(:,5);          % Toma columna Pg de "DatosNodos30"
Qg = DatosNodos(:,6);          % Toma columna Qg de "DatosNodos30"
Pd = DatosNodos(:,7);          % Toma columna Pd de "DatosNodos30"
Qd = DatosNodos(:,8);          % Toma columna Qd de "DatosNodos30"
Qmin = DatosNodos(:,9);        % Toma columna Qmin de "DatosNodos30"
Qmax = DatosNodos(:,10);       % Toma columna Qmax de "DatosNodos30"
Nnodos = max(Nodo);            % Número total de nodos
P = (Pg - Pd)/Base;            % Potencia neta activa en p.u.
Q = (Qg - Qd)/Base;            % Potencia neta reactiva en pu.
Qmin = Qmin/Base;              % Convertir Qmin en valores a p.u.
Qmax = Qmax/Base;              % Convertir Qmáx en valores a p.u.
Tolerancia = 1;                % Tolerancia
Iteraciones = 1;               % Iteración inicial
Pinicial = P;                  % Potencia activa inicial
Qinicial = Q;                  % Potencia reactiva inicial
Vinicial = Vpu;                % Tensión inicial
G = real(Ybarra);              % Conductancia (valor real de Ybarra)
B = imag(Ybarra);              % Susceptancia (valor imaginario de Ybarra)
NodoDSTATCOM = DatosDSTATCOM(:,1); % Nodo(s) donde se ubica el DSTATCOM
Vnodo = DatosDSTATCOM(:,2);     % Tensión que se quiere en el nodo
Deltanodo = DatosDSTATCOM(:,3); % Ángulo nodo a compensar
Gdstatc = 1;                   % Conductancia DSTATCOM
Bdstatc = -10;                 % Susceptancia DSTATCOM
```

Para la implementación de este algoritmo se tuvo en cuenta el nodo al cual estaría conectado o instalado el compensador, así como el modelo eléctrico y el modo de control. El proceso para resolver el flujo de potencia o flujo de carga es similar al proceso para el flujo de carga sin

compensación. Sin embargo, al incluir el *DSTATCOM* se adiciona un grado de complejidad ya que se añaden dos nuevas condiciones una relativa a la potencia activa y otra impuesta por el modo de control, que para este caso es el control de tensión. La inclusión de estas dos nuevas condiciones, hace que se incluyan también dos nuevas variables de estado siendo la tensión del *DSTATCOM* y su ángulo (V_{dst} y δ). Estas variables son las mismas sin importar el modo de control con el que se trabaje ya que son necesarias para conocer la potencia reactiva inyectada o absorbida del *DSTATCOM* e influirán en el cálculo de los flujos de potencia.

Adicional a esto también se aumenta la dimensión de la matriz funcional. Por cada *DSTATCOM* se aumentan dos columnas, una por cada variable de estado y se aumentan dos filas, una por cada condición, lo que hace que no solo se tengan las cuatro submatrices (H, N, J, L), sino que en total se tengan 16 submatrices (H, N, J, L, A, B, C, D, E, F, G, I, K, M, O, P) las cuales se describen en el Anexo B. En las submatrices H, N, J, L se tienen unos pequeños cambios ya que no solo se tienen en cuenta las potencias de las líneas, sino que también se deben tener en cuenta las potencias dadas o absorbidas por el *DSTATCOM*.

Otra diferencia que se deriva al incluir el compensador es que además de los datos iniciales que se mencionaron al inicio de este capítulo, se deben tener también en cuenta aquellos dados por el compensador, tales como el nivel de tensión de referencia ($V_{control}$), ángulo (δ), y un valor de conductancia y susceptancia (G_{dst} , B_{dst}), valores que son asumidos ya que son solo valores iniciales desconocidos.

En la Figura 27 se muestra el diagrama de flujo para la inclusión del compensador *DSTATCOM* en la solución de flujos de potencia por el método de Newton Raphson. Las operaciones allí mencionadas para el cálculo de las potencias netas, deltas de potencia y determinación de la matriz funcional o Jacobiano se describen a detalle en el Anexo B. El proceso es similar al descrito para el flujo de carga sin compensación, sin embargo se tienen las siguientes diferencias:

1. Luego del cálculo de las potencias ($P_{Ni}(V_k, \theta_k), Q_{Ni}(V_k, \theta_k)$) no se calcula inmediatamente el valor de $\Delta P, \Delta Q$, sino que se debe hacer una verificación si en ese nodo hay algún compensador, en caso tal que sea así, se debe calcular una nueva potencia que tendrá en cuenta los parámetros del *DSTATCOM* ($P_{Ndst}(V_{dst}, \delta_{dst}), Q_{Ni}(V_{dst}, \delta_{dst})$) (**Anexo B.1**), la cual se sumara al valor calculado.
2. Como se tienen dos nuevas condiciones, se debe hacer el cálculo de estas siendo ($\Delta P_{dst}, \Delta V_{control}$). (**Anexo B.2**)
3. En el error no solo se tienen en cuenta $\Delta P, \Delta Q$, sino que también se tienen en cuenta $\Delta P_{dst}, \Delta V_{control}$.
4. Aumenta la matriz Jacobiana. (**Anexo B.3**)
5. Se calculan los valores de delta de Angulo y delta de tensión ($\Delta \theta, \Delta V$) y adicional los valores de ($\Delta \delta, \Delta V_{dst}$) para las nuevas variables de estado.
6. Se calculan los nuevos valores de tensiones y ángulos que serán utilizados para la siguiente iteración

Al igual que en el algoritmo para flujo de carga sin compensación, el programa implementado en MATLAB para la solución de flujo de carga con *DSTATCOM* se encarga de hacer este proceso iterativo hasta que se cumpla la condición de que el error sea menor al valor especificado.

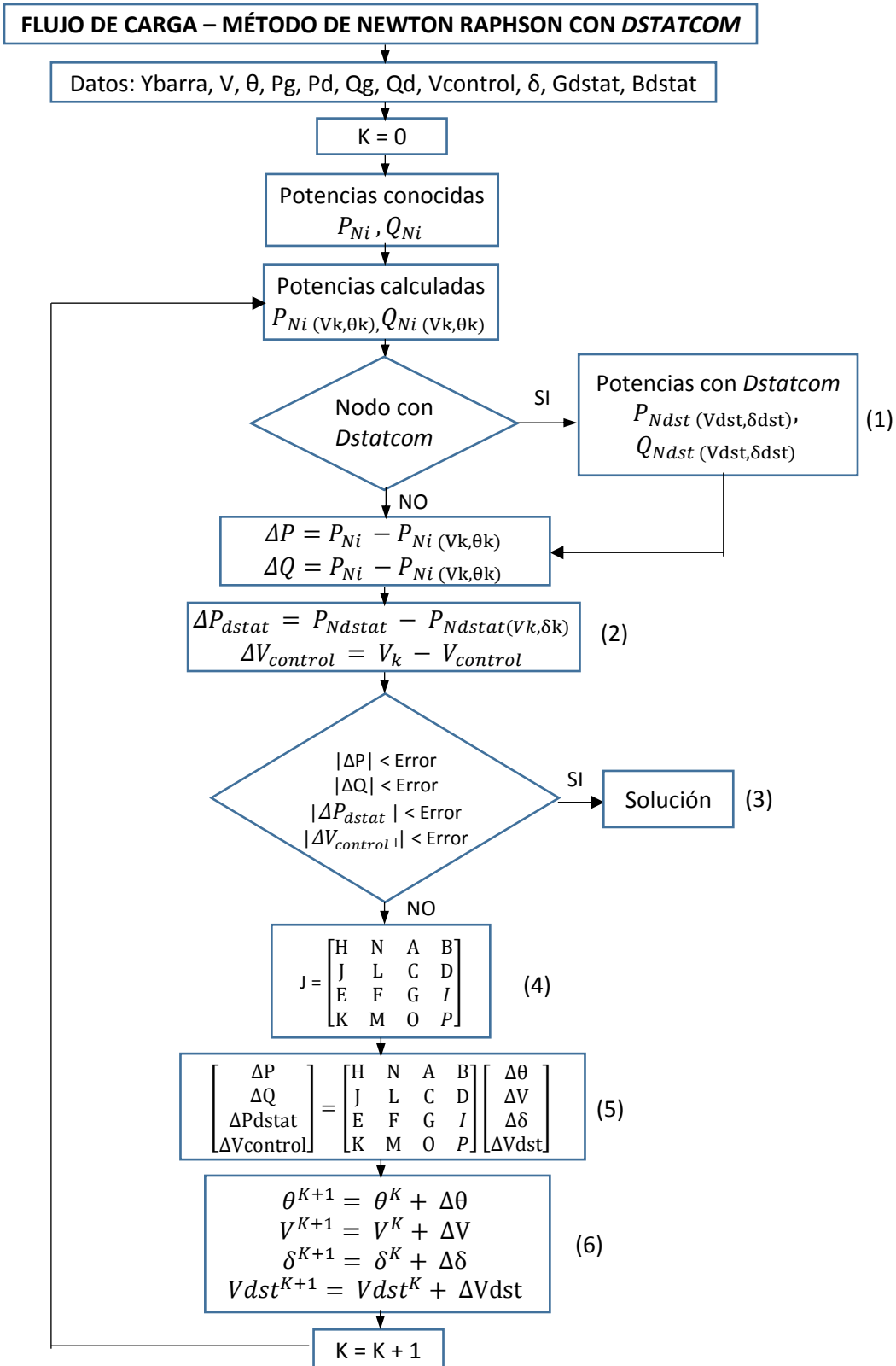


Figura 27. Diagrama de flujo para el programa *DSTATCOM.m*

7. DatosSVC.m

En este archivo se especifica el nodo en el cual será conectado el compensador SVC y el nivel de tensión de referencia al cual se quiere que este llegue

```
function DatosSVC= DatosSVC()

% Nodo (Nodo donde se ubica el SVC)

%      |Nodo | Vpu | Angulo |
DatosSVC = [ 12     1     0   ];
```

8. SVC.m

Se desarrolla un algoritmo para la solución de flujos de carga en el que se incluye el compensador SVC. Tiene en cuenta la información contenida en DatosNodos30.m, Ybarra30.m y DatosSVC30.m.

```
% Flujo de carga por el método de Newton-Raphson con SVC

Ybarra = Ybarra30();           % Llama la función Ybarra30
DatosNodos = DatosNodos30();  % Llama la función DatosNodos30
DatosSVC = DatosSVC();
Base = 100;                    % Base MVA
Nodo = DatosNodos(:,1);       % Toma columna Nodos de "DatosNodos30"
Tipo = DatosNodos(:,2);      % Toma columna Tipo de "DatosNodos30"
Vpu = DatosNodos(:,3);       % Toma columna Vpu de "DatosNodos30"
Vinicial=DatosNodos(:,3);
Angulo = DatosNodos(:,4);    % Toma columna Angulo de "DatosNodos30"
Pg = DatosNodos(:,5);        % Toma columna Pg de "DatosNodos30"
Qg = DatosNodos(:,6);        % Toma columna Qg de "DatosNodos30"
Pd = DatosNodos(:,7);        % Toma columna Pd de "DatosNodos30"
Qd = DatosNodos(:,8);        % Toma columna Qd de "DatosNodos30"
Qmin = DatosNodos(:,9);      % Toma columna Qmin de "DatosNodos30"
Qmax = DatosNodos(:,10);     % Toma columna Qmax de "DatosNodos30"
Nnodos = max(Nodo);          % Número total de nodos
P = (Pg - Pd)/Base;          % Potencia neta activa en p.u.
Q = (Qg - Qd)/Base;          % Potencia neta reactiva en pu.
Qmin = Qmin/Base;            % Convertir Qmin en valores a p.u.
Qmax = Qmax/Base;            % Convertir Qmáx en valores a p.u.
Tolerancia = 1;              % Tolerancia
Iteraciones = 1;             % Iteración inicial
Pinicial = P;                 % Potencia activa inicial
Qinicial = Q;                 % Potencia reactiva inicial
G = real(Ybarra);            % Conductancia (valor real de Ybarra)
B = imag(Ybarra);            % Susceptancia (valor imaginario de Ybarra)
nodoSVC= DatosSVC(:,1);
Vnodo = DatosSVC(:,2);
Deltanodo = DatosSVC(:,3);
Bsvc = 0.001;
```

El proceso para resolver el flujo de carga incluyendo el SVC es similar al proceso para el flujo de carga sin compensación. Sin embargo, al incluir el SVC como una susceptancia en derivación, se ve afectado el cálculo de la potencia neta, por lo cual se tiene las siguientes diferencias:

1. Además de los valores iniciales que se tienen en cuenta para la solución del flujo de carga sin compensación, se debe asumir un valor inicial de B_{svc} (susceptancia en derivación), en este caso se asumió un valor de 0.001 (un valor cercano a 0 asumiendo que la red inicialmente no necesita compensación)
2. Así como en el *DSTATCOM*, luego del cálculo de las potencias $P_{Ni}(V_k, \theta_k), Q_{Ni}(V_k, \theta_k)$ no se calcula inmediatamente el valor de $\Delta P, \Delta Q$, sino que se debe hacer una verificación si en ese nodo hay algún compensador, en caso tal que sea así, se debe calcular una nueva potencia que tendrá en cuenta los parámetros del SVC. (Anexo A.2), la cual se sumara al valor calculado.
3. Si con el valor de B_{svc} asumido no se cumple la condición que el error sea menor al especificado, se debe calcular un nuevo valor, para ello se tiene en cuenta la ecuación linealizada (Anexo A.3) donde calcula un valor de delta de B_{svc}
4. Con el valor de delta de B_{svc} y el valor conocido (que inicialmente es 0.001), se puede calcular un nuevo valor que será utilizado en la siguiente iteración.

Este proceso se puede observar en la Figura 28.

Para los tres programas implementados en MATLAB se tienen en común los siguientes datos iniciales, los cuales son importantes para el desarrollo del algoritmo: tensión y ángulo de cada nodo (V, θ), valores de potencias generadas (P_g, Q_g) y potencias demandadas (P_d, Q_d), datos contenidos en el archivo (DatosNodos30.m) y los valores de resistencia, reactancia y susceptancia, datos contenidos en el archivo (DatosLinea30.m), estos últimos son necesarios para el desarrollo de la matriz de impedancias, función creada en el archivo (Ybarra30.m).

En el anexo F se encuentra una guía de uso del algoritmo implementado.

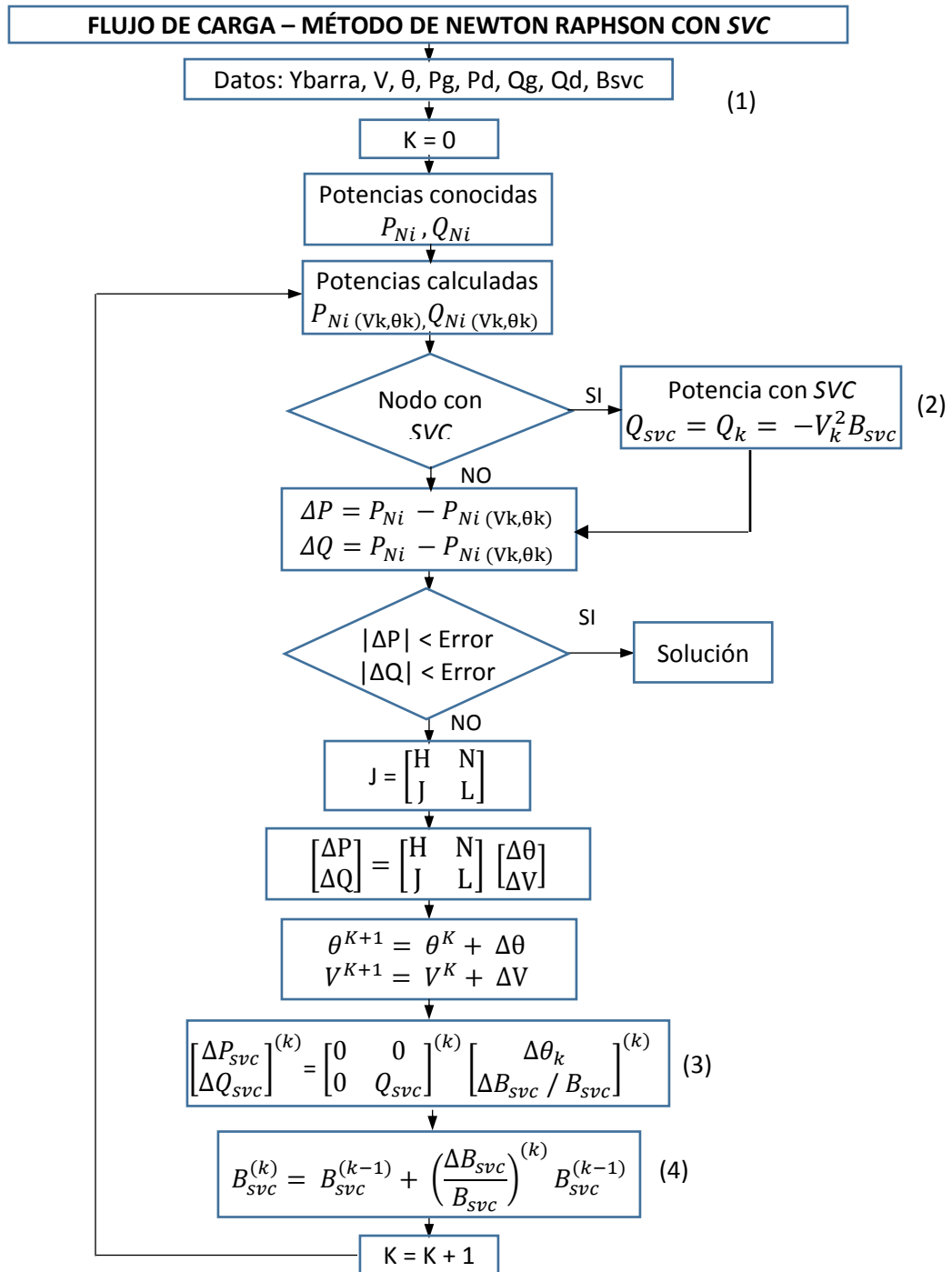


Figura 28. Diagrama de flujo para el programa SVC.m

4.2. Validación del algoritmo

Para verificar el correcto funcionamiento del algoritmo implementado se llevó a cabo una prueba para una red de 5 nodos (ver figura 29), extraída del libro “FACTS. Modelling and simulation in power networks” [27] en la cual los resultados para los flujos de carga son conocidos, así como el valor de la potencia reactiva dada por el SVC y *DSTATCOM* y los niveles de tensión resultantes en cada nodo luego de la implementación de estos compensadores en el nodo 3 “Lake”. En las Tablas 10 y 11 se muestran los datos iniciales de esta red, los cuales se incluyeron en los archivos “DatosNodos30.m” y “DatosLinea30.m”

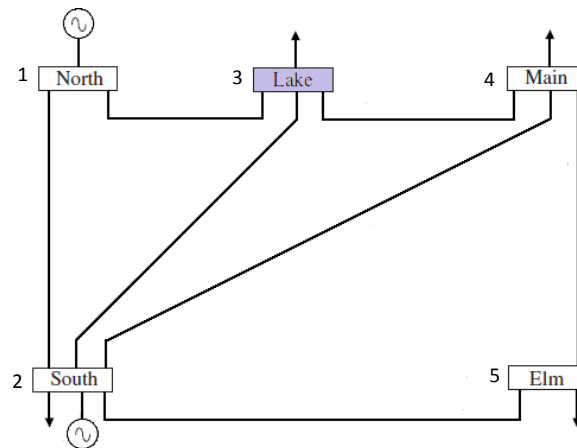


Figura 29. Red de prueba 5 Nodos
Fuente [27]

Tabla 10. Datos Nodos. Red 5 Nodos

Datos Nodos. Red 5 Nodos									
Nodo	Tipo	Vpu	Angulo	Pg	Qg	Pd	Qd	Qmin	Qmax
1	1	1.06	0	0	0	20	10	-500	500
2	2	1.0	0	40	0	20	10	-300	300
3	3	1.0	0	0	0	45	15	0	0
4	3	1.0	0	0	0	40	5	0	0
5	3	1.0	0	0	0	60	10	0	0

Tabla 11. Datos Líneas. Red 5 Nodos

Datos Línea. Red 5 Nodos				
Desde Ni	Hasta Nk	R pu	X pu	B/2 pu
1	2	0.020	0.060	0.060/2
1	3	0.080	0.240	0.050/2
2	3	0.060	0.180	0.040/2
2	4	0.060	0.180	0.040/2
2	5	0.040	0.120	0.030/2
3	4	0.010	0.030	0.020/2
4	5	0.080	0.240	0.050/2

Luego de incluir los valores iniciales en los archivos “DatosNodos30.m” y “DatosLinea30.m”, se comprobó la validez de los resultados obtenidos con el algoritmo para flujo de carga sin compensación “FlujoCargaNR.m”. Como se indica en la Tabla 12 y se puede ver en las Figuras 30 y 31, los resultados fueron casi iguales. El mayor porcentaje de diferencia se presentó en el nodo 5 con un valor del 0.03% para tensión y 0.09% para ángulo, lo que corresponde a una diferencia de 0.0003 p.u y 0.0051 grados respectivamente. El signo negativo en “% Diferencia” hace referencia a que los valores especificados en el libro de referencia, están por debajo de los valores obtenidos con el algoritmo.

Tabla 12. Validación algoritmo flujo de carga

Validación algoritmo flujo de carga						
Nodo	REFERENCIA		ALGORITMO		% DIFERENCIA	
	Tensión p.u.	Angulo Grados	Tensión p.u.	Angulo Grados	Tensión %	Angulo %
1	1,06	0,00	1,0600	0,0000	0,00%	0,00%
2	1,00	-2,06	1,0000	-2,0612	0,00%	-0,06%
3	0,987	-4,64	0,9872	-4,6367	-0,02%	0,07%
4	0,984	-4,96	0,9841	-4,9570	-0,01%	0,06%
5	0,972	-5,77	0,9717	-5,7649	0,03%	0,09%

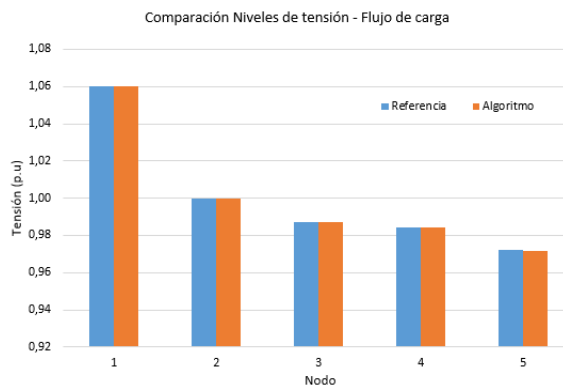


Figura 30. Comparación niveles de tensión. Validación algoritmo flujo de carga

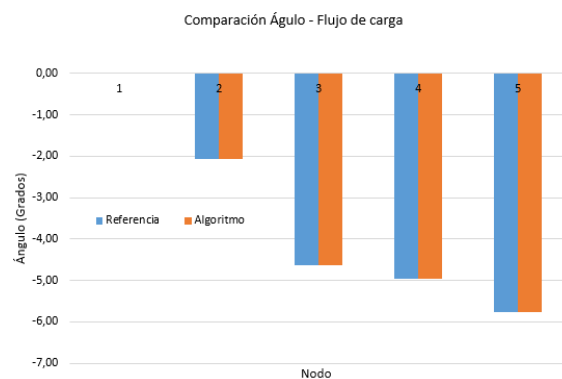


Figura 31. Comparación ángulo. Validación algoritmo flujo de carga

Para el algoritmo “SVC.m” también se hizo una comparación de resultados obtenidos con los datos dados en el libro de referencia. Estos resultados se muestran en la Tabla 13 y en las Figuras 32 y 33. En este caso el mayor porcentaje de diferencia se presentó en el nodo 3 para tensión con un porcentaje del 0.04% (equivalente a 0.0004 p.u) y en el nodo 4 para ángulo con un porcentaje del 0.14% (equivalente a 0.007 grados). En el caso de la potencia se obtuvo una diferencia del 2.98% equivalente a 0.61 MVAR.

Tabla 13. Validación algoritmo flujo de carga con SVC

Validación algoritmo flujo de carga con SVC									
Nodo	REFERENCIA			ALGORITMO			% DIFERENCIA		
	Tensión p.u.	Angulo Grados	Qsvc MVAR	Tensión p.u.	Angulo Grados	Qsvc MVAR	Tensión %	Angulo %	Qsvc %
1	1,06	0,00	-	1,0600	0,0000	-	0,00%	0,00%	-
2	1,00	-2,05	-	1,0000	-2,0535	-	0,00%	-0,17%	-
3	1,00	-4,83	20,5	0,9996	-4,8322	19,89	0,04%	-0,05%	2.98%
4	0,994	-5,11	-	0,9941	-5,1030	-	-0,01%	0,14%	-
5	0,975	-5,80	-	0,9751	-5,7965	-	-0,01%	0,06%	-

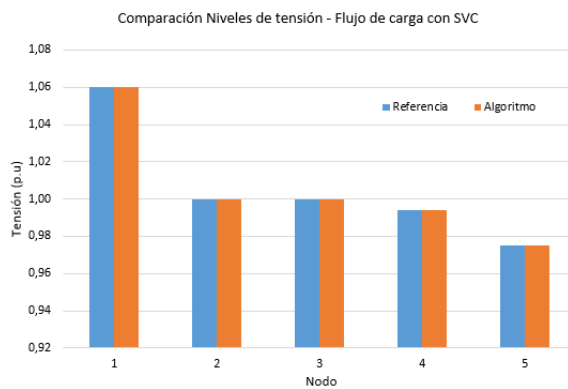


Figura 32. Comparación niveles de tensión. Validación algoritmo flujo de carga con SVC

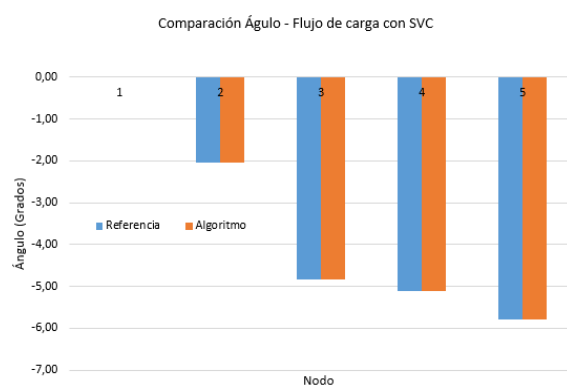


Figura 33. Comparación ángulo. Validación algoritmo flujo de carga con SVC

Finalmente se comprobaron los resultados obtenidos con el algoritmo para flujo de carga con *DSTATCOM* "Dstatcom.m". La mayor diferencia se presentó en el nodo 4 para tensión con un porcentaje del 0.040% (equivalente a 0.0004 p.u) y en el nodo 5 para ángulo con un porcentaje de diferencia del 0.021% (equivalente a 0.0012 grados). En el caso de la potencia se obtuvo una diferencia del 0.05% equivalente a 0.01 MVAR. Estos resultados se muestran en la Tabla 14 y en las Figuras 34 y 35.

Tabla 14. Validación algoritmo flujo de carga con DSTATCOM

Validación algoritmo flujo de carga con DSTATCOM									
Nodo	REFERENCIA			ALGORITMO			% DIFERENCIA		
	Tensión p.u.	Angulo Grados	Qdstat MVAR	Tensión p.u.	Angulo Grados	Qdstat MVAR	Tensión %	Angulo %	Qdstat %
1	1,06	0,00	-	1,0600	0,0000	-	0,000%	0,000%	-
2	1,00	-2,05	-	1,0000	-2,0543	-	0,000%	-0,210%	-
3	1,00	-4,83	20,5	1,0000	-4,8303	20,4900	0,000%	-0,006%	0,05%
4	0,994	-5,11	-	0,9944	-5,1093	-	-0,040%	0,014%	-
5	0,975	-5,80	-	0,9752	-5,7988	-	-0,021%	0,021%	-

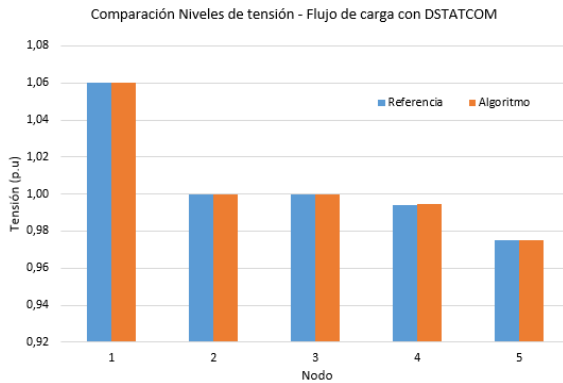


Figura 34. Comparación niveles de tensión. Validación algoritmo con DSTATCOM

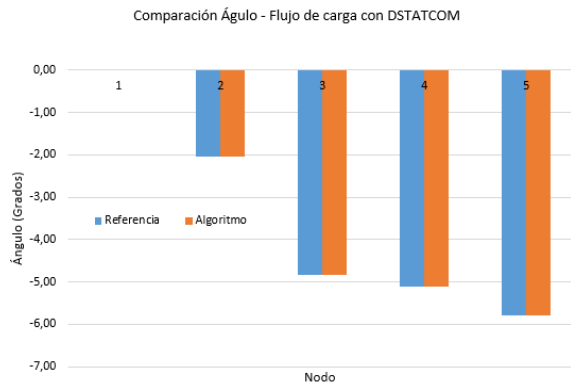


Figura 35. Comparación ángulo. Validación algoritmo flujo de carga con DSTATCOM

4.2.1. Discusión de resultados

La diferencia de resultados obtenida para tensión y ángulo en los tres casos dio menor del 0.14%, al igual que el valor de la potencia reactiva entregada por el *DSTATCOM*. Esta diferencia se debe a que en el libro solo muestran 3 decimales para magnitud, 2 para ángulo, y 1 para potencia, mientras que en el algoritmo se muestran 4 decimales para todos los casos. Para comprobar esto, se modificó en el algoritmo el número de decimales a mostrar de manera que fuera la misma cantidad que los datos en la referencia. En la Figura 36 se muestra a manera de ejemplo, la comprobación realizada para el caso del algoritmo de flujo de carga sin compensación, con lo que ya no se obtuvo ningún porcentaje de diferencia, a excepción del ángulo en el nodo 5 en el que la aproximación que hizo MATLAB del valor de -5.7649 la hizo a -5.76 y no a -5.77, lo cual es mínimo, por lo que se puede asumir que todos los valores dieron iguales.

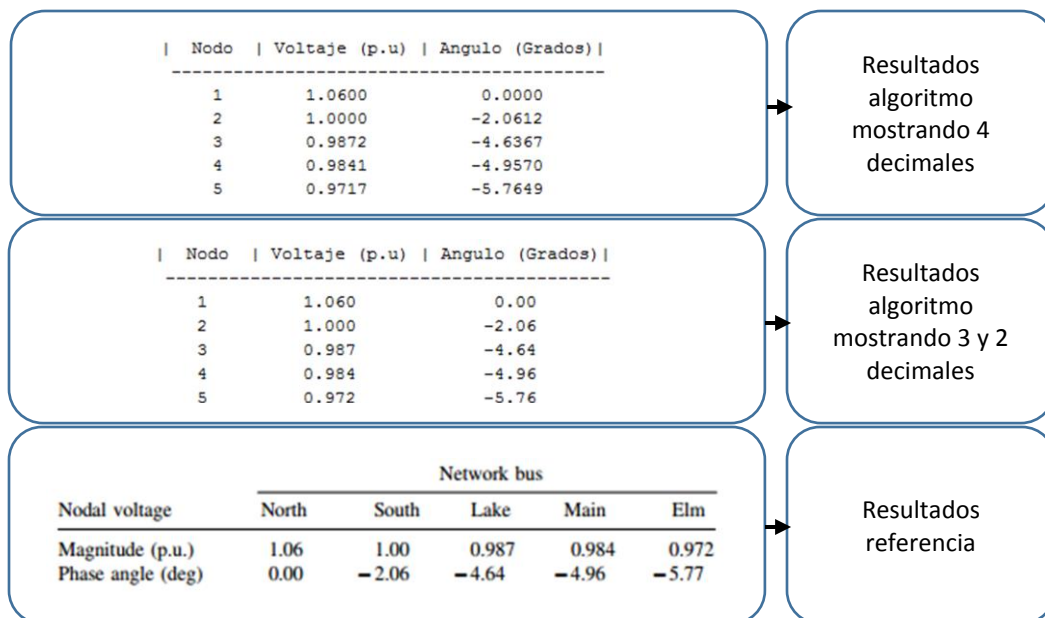


Figura 36. Comprobación % diferencia algoritmo MATLAB - Referencia

Con SVC se tuvo resultados diferentes en cuanto al valor de compensación con un error del 2.98%, equivalente a 0.61MVAR, esto se debe a la forma como se calcula la susceptancia entre los dos algoritmos; en el algoritmo de referencia se afecta el jacobiano para obtener un valor de tensión de 1p.u. del nodo a compensar y así calcular el valor de potencia del SVC para que se cumpla esta condición, mientras que en el algoritmo implementado no se hace cambios en el jacobiano, sino que se establecen condiciones (rangos) de las tensiones del nodo a compensar dentro de las cuales se calculan los valores del SVC.

Se concluye que teniendo en cuenta los resultados obtenidos, los cuales fueron comparados con los datos de referencia y entendiendo porqué se presentaron diferencias, se considera válido el algoritmo implementado.

4.3. Resultados caso de estudio red IEEE 30 nodos

4.3.1. Carga para la generación de Sags y Swells en el algoritmo

Así como en DigSILENT, en MATLAB el valor de la carga debe ser modificado en el archivo "DatosNodos30.m" para la generación de sags y swells. Esta modificación se realiza cambiando los valores de Qd (para generar un sag) o Qg (para generar un swell), en el nodo donde se quiere que ocurra el evento.

En las Tablas 15, 16, 17 y 18 se indican los valores de carga necesarios que se deben sumar a la carga ya existente en el nodo, con el fin de generar los sags y swells. Es decir, los valores aquí especificados no incluyen el valor de carga que ya está por defecto en la red.

Tabla 15. Carga para generar sags en nodo 10 en algoritmo en MATLAB

Carga para generar SAGs en el nodo 10		
Magnitud Sag (p.u.)	Carga MVAR	Caída Real p.u.
0,5	203	0,5454
0,6	195	0,6031
0,7	168	0,7037
0,8	123	0,8039
0,9	68	0,8924

Tabla 16. Carga para generar sags en nodo 12 en algoritmo en MATLAB

Carga para generar SAGs en el nodo 12		
Magnitud Sag (p.u.)	Carga MVAR	Caída Real p.u.
0,5	297,5	0,5425
0,6	285,5	0,6027
0,7	253,5	0,6947
0,8	188,5	0,8019
0,9	106,5	0,8972

Tabla 17. Carga para generar swells en nodo 10 en algoritmo en MATLAB

Carga para generar SWELLS en el nodo 10		
Magnitud Swell (p.u.)	Carga MVAR	Aumento Real p.u.
1,1	100	1,1015
1,2	200	1,2066
1,3	330	1,3078

Tabla 18. Carga para generar swells en nodo 12 en algoritmo en MATLAB

Carga para generar SWELLS en el nodo 12		
Magnitud Swell (p.u.)	Carga MVAR	Aumento Real p.u.
1,1	90	1,1092
1,2	219	1,2042
1,3	392	1,3006

4.3.2. Flujo de carga sin compensación

Los resultados calculados se comparan con los valores simulados en DigSILENT. Esto se hace con el fin de verificar cual porcentaje de diferencia se tiene en los resultados ya que este es el programa base con el cual posteriormente se hacen algunas modificaciones para incluir los compensadores *DSTATCOM* y *SVC*.

En la Tabla 19 se muestra el porcentaje de diferencia que se obtuvo al comparar los valores de tensión obtenidos en la simulación con los valores obtenidos en el programa implementado en MATLAB. Estos resultados se pueden ver gráficamente en las Figuras 37 y 38.

Tabla 19. Comparación resultados simulados vs algoritmo MATLAB

Nodo	Vpu	Vpu	%	Nodo	Vpu	Vpu	%
N	Simulación	MATLAB	Diferencia	N	Simulación	MATLAB	Diferencia
1	1,0600	1,0600	0,0%	16	1,0076	0,9954	1,2%
2	1,0430	1,0430	0,0%	17	0,9977	0,9878	1,0%
3	1,0248	1,0262	-0,1%	18	0,9890	0,9775	1,2%
4	1,0168	1,0185	-0,2%	19	0,9845	0,9740	1,1%
5	1,0100	1,0100	0,0%	20	0,9878	0,9778	1,0%
6	1,0111	1,0164	-0,5%	21	0,9876	0,9773	1,0%
7	1,0029	1,0060	-0,3%	22	0,9880	0,9824	0,6%
8	1,0100	1,0200	-1,0%	23	0,9864	0,9772	0,9%
9	1,0237	1,0159	0,8%	24	0,9743	0,9688	0,6%
10	1,0009	0,9925	0,8%	25	0,9745	0,9743	0,0%
11	1,0820	1,0620	1,8%	26	0,9560	0,9558	0,0%
12	1,0261	1,0106	1,5%	27	0,9836	0,9866	-0,3%
13	1,0710	1,0410	2,8%	28	1,0067	1,0152	-0,8%
14	1,0086	0,9943	1,4%	29	0,9629	0,9660	-0,3%
15	1,0021	0,9891	1,3%	30	0,9509	0,9540	-0,3%

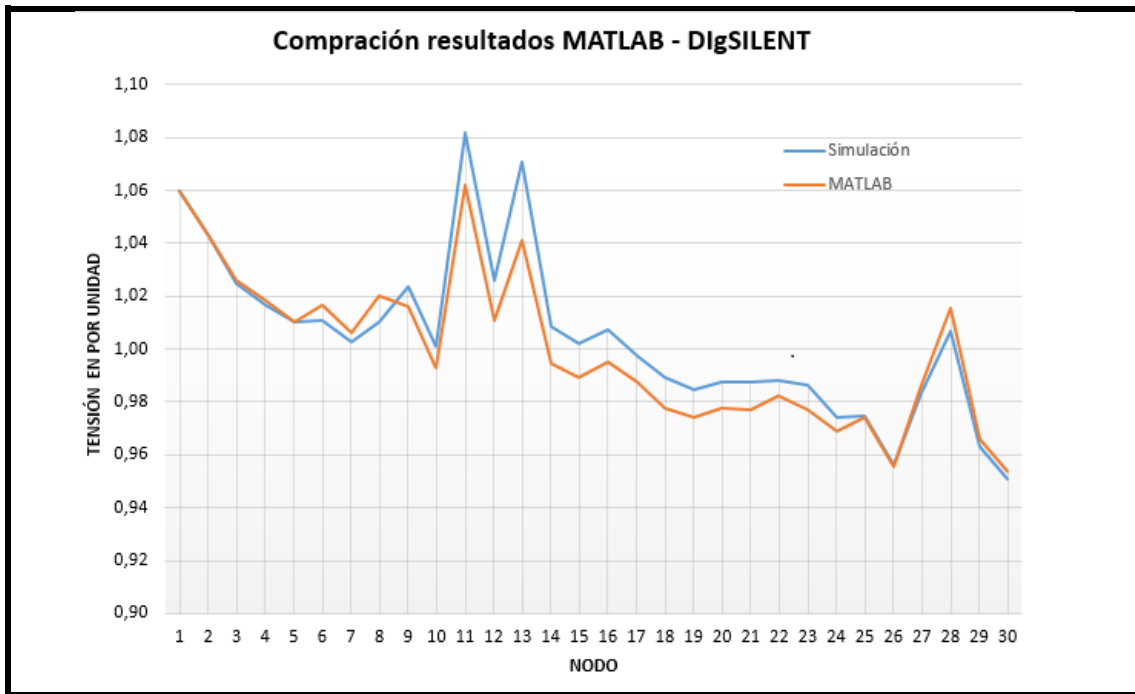


Figura 37. Datos DigSILENT vs datos obtenidos en MATLAB

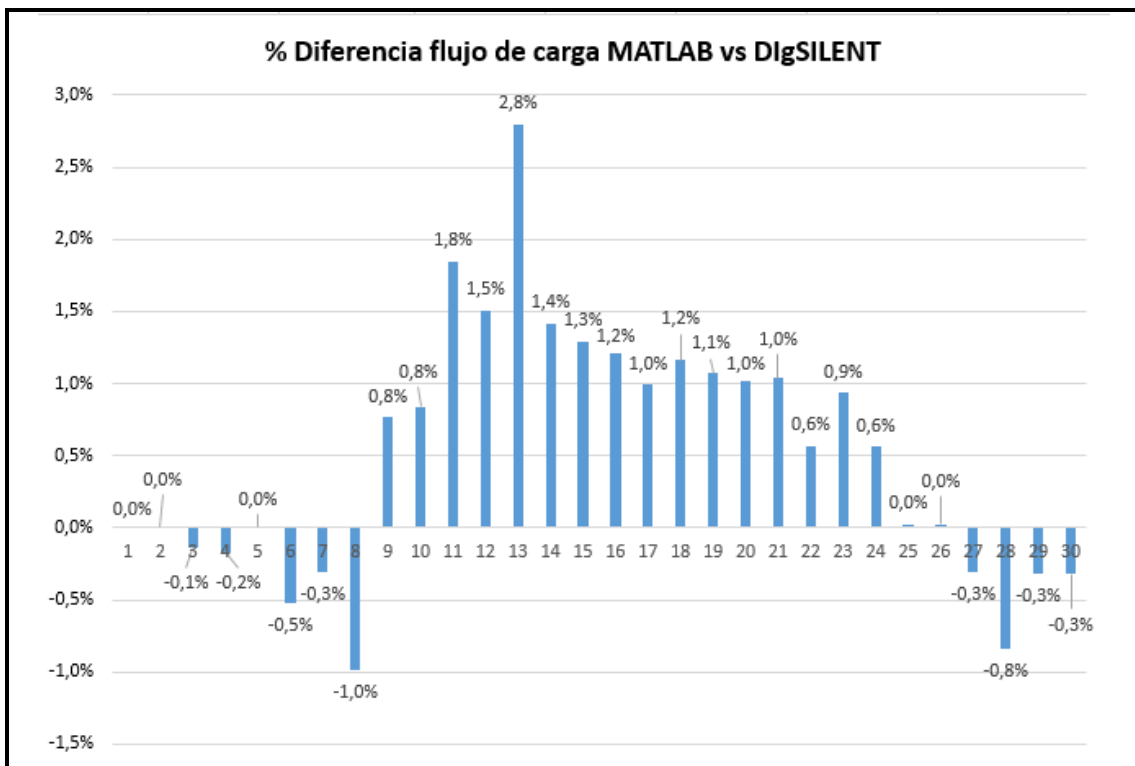


Figura 38. Porcentaje de diferencia entre DigSILENT vs datos obtenidos en MATLAB

Con los datos dados en la Tabla 19, y las Figuras 37 y 38, se puede observar que:

- Al comparar los datos obtenidos del algoritmo implementado en MATLAB con los datos simulados en DigSILENT se presentan unas diferencias en cuanto a magnitud de tensión, en las que los valores entre ellos, están por encima, por debajo o iguales
- Para los nodos 1, 2 y 5, la diferencia fue 0%, es decir los valores tanto en MATLAB como en DigSILENT dan iguales
- Para los nodos 25 y 26 la diferencia fue muy pequeña casi del 0%
- El mayor porcentaje obtenido fue del 2.8% dado en el nodo 13, seguido del nodo 11 el cual presentó una diferencia del 1.8%. Estos valores indican que los valores en la simulación dan por encima de los valores obtenidos en MATLAB que tomándolos en valores en p.u. equivalen a 0.03 y 0.02 p.u. respectivamente

4.3.3. Flujo de carga con *DSTATCOM*

En las tablas 20, 21, 22 y 23 se muestran los valores obtenidos para la tensión, ángulo y potencia reactiva absorbida o suministrada por el *DSTATCOM* cuando se presentan los *sags* y *swells* en los nodos seleccionados y con las magnitudes definidas anteriormente.

De acuerdo con lo indicado en el numeral 2.1.3.2.1.1 de este documento, la potencia reactiva absorbida por el *DSTATCOM*, podrá tomar tanto valores positivos como negativos. Cuando toma valores positivos el *DSTATCOM* se comportará como una inductancia (absorbe reactivos), mientras que si los valores son negativos, lo hará como un condensador (inyecta reactivos).

Tabla 20. Tensión, ángulo y potencia del *DSTATCOM* en presencia de *sags* en el nodo 10

<i>DSTATCOM</i> en el nodo 10 para <i>SAGs</i> de 0.5 a 0.9 p.u - MATLAB				
Magnitud <i>Sag</i> p.u.	V <i>Dstatcom</i> p.u	Ángulo Grados	Q <i>Dstatcom</i> p.u.	Q <i>Dstatcom</i> MVAR
0,5	1,2091	-17,9510	-2,1132	-211,32
0,6	1,2011	-17,8636	-2,0340	-203,40
0,7	1,1741	-17,5808	-1,7599	-175,99
0,8	1,1293	-17,1514	-1,3066	-130,66
0,9	1,0746	-16,6969	-0,7539	-75,39

Tabla 21. Tensión, ángulo y potencia del DSTATCOM en presencia de sags en el nodo 12

DSTATCOM en el nodo 12 para SAGs de 0.5 a 0.9 p.u - MATLAB				
Magnitud Sag p.u.	V Dstatcom p.u	Ángulo Grados	Q Dstatcom p.u.	Q Dstatcom MVAR
0,5	1,2935	-18,4064	-2,9673	-296,7300
0,6	1,2814	-18,2410	-2,8454	-284,5400
0,7	1,2494	-17,8204	-2,5210	-252,1000
0,8	1,1844	-17,0569	-1,8638	-186,3800
0,9	1,1027	-16,2643	-1,0379	-103,7900

Tabla 22. Tensión, ángulo y potencia del DSTATCOM en presencia de swells en el nodo 10

DSTATCOM en el nodo 10 para SWELLS de 1.1 a 1.3 p.u - MATLAB				
Magnitud Swell p.u.	V Dstatcom p.u	Ángulo Grados	Q Dstatcom p.u.	Q Dstatcom MVAR
1,1	0,9083	-15,7798	0,9254	92,54
1,2	0,8098	-15,5659	1,9186	191,86
1,3	0,6823	-15,6537	3,2025	320,25

Tabla 23. Tensión, ángulo y potencia del DSTATCOM en presencia de swells en el nodo 12

DSTATCOM en el nodo 12 para SWELLS de 1.1 a 1.3 p.u - MATLAB				
Magnitud Swell p.u.	V Dstatcom p.u	Ángulo Grados	Q Dstatcom p.u.	Q Dstatcom MVAR
1,1	0,9081	-15,1199	0,9276	92,76
1,2	0,7811	-14,9361	2,2077	220,77
1,3	0,6118	-15,3857	3,9106	391,06

4.3.4. Flujo de carga con SVC

En las Tablas 24, 25, 26 y 27 se muestran los valores obtenidos para el valor de la susceptancia del SVC (B_{svc}) y potencia reactiva absorbida o suministrada por el compensador cuando se presentan los *sags* y *swells* en los nodos seleccionados y con las magnitudes definidas.

Tabla 24. Bsvc y potencia del SVC en presencia de sags en el nodo 10

Resultados SVC en el nodo 10 para SAGs de 0.5 a 0.9 p.u - MATLAB			
Magnitud Sag p.u.	Bsvc p.u.	Qsvc p.u.	Qsvc MVAR
0,5	1,9990	-2,0146	-201,46
0,6	1,8990	-1,9036	-190,36
0,7	1,5990	-1,6277	-162,77
0,8	1,1990	-1,2180	-121,80
0,9	0,5990	-0,6025	-60,25

Tabla 25. Bsvc y potencia del SVC en presencia de sags en el nodo 12

Resultados SVC en el nodo 12 para SAGs de 0.5 a 0.9 p.u - MATLAB			
Magnitud Sag p.u.	Bsvc p.u.	Qsvc p.u.	Qsvc MVAR
0,5	2,5990	-2,6046	-260,46
0,6	2,4990	-2,5202	-252,02
0,7	2,1990	-2,2330	-223,30
0,8	1,4990	-1,5098	-150,98
0,9	0,6990	-0,7081	-70,81

Tabla 26. Bsvc y potencia del SVC en presencia de swells en el nodo 10

Resultados SVC en el nodo 10 para SWELLS de 1.1 a 1.3 p.u - MATLAB			
Magnitud Swell p.u.	Bsvc p.u.	Qsvc p.u.	Qsvc MVAR
1,1	-1,0010	1,0190	101,90
1,2	-2,0010	2,0279	202,79
1,3	-3,3010	3,3340	333,40

Tabla 27. Bsvc y potencia del SVC en presencia de swells en el nodo 12

Resultados SVC en el nodo 12 para SWELLS de 1.1 a 1.3 p.u - MATLAB			
Magnitud Swell p.u.	Bsvc p.u.	Qsvc p.u.	Qsvc MVAR
1,1	-1,2010	1,2228	122,28
1,2	-2,5010	2,5332	253,32
1,3	-4,2010	4,2535	425,35

4.3.5. Gráficas

De la figura 39 a 42 se muestran los resultados obtenidos de los sags y swells generados en los nodos 10 y 12. A manera de ejemplo, en las figuras 43 y 44, se muestran los resultados obtenidos con compensación con DSTATCOM para mitigación de sags de 0.5 a 0.9 p.u., y en las figuras 45 y 46 los resultados obtenidos con SVC para mitigación de swells de 1.1 a 1.3 p.u.

En los numerales 4.3.5.1 y 4.3.5.2 se muestra específicamente el comportamiento de la red para cada magnitud de sag y swell, en donde se comparan los perfiles de tensión sin compensación y cómo cambian al incluir el compensador DSTATCOM y el compensador SVC.

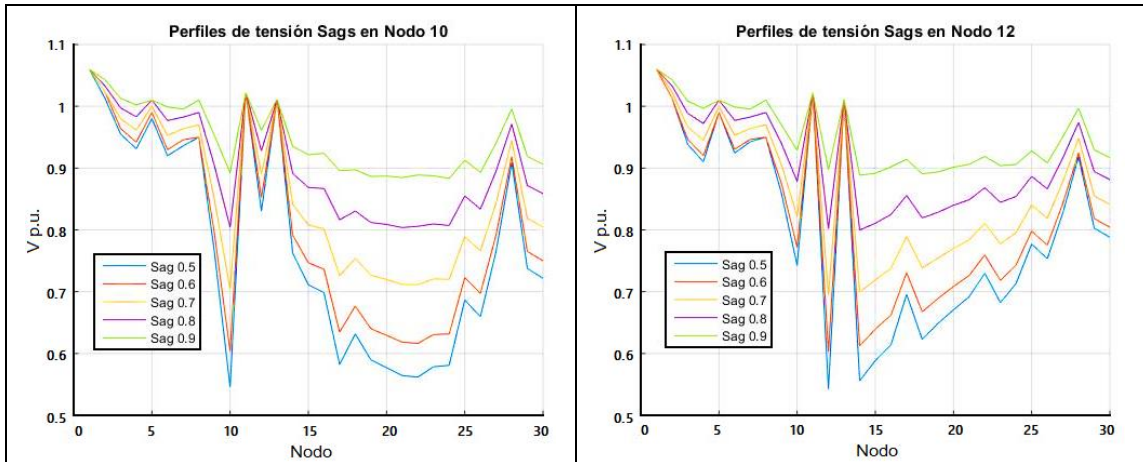


Figura 39. Sags – Magnitud 0.5 a 0.9 p.u en el nodo 10

Figura 40. Sags – Magnitud 0.5 a 0.9 p.u en el nodo 12

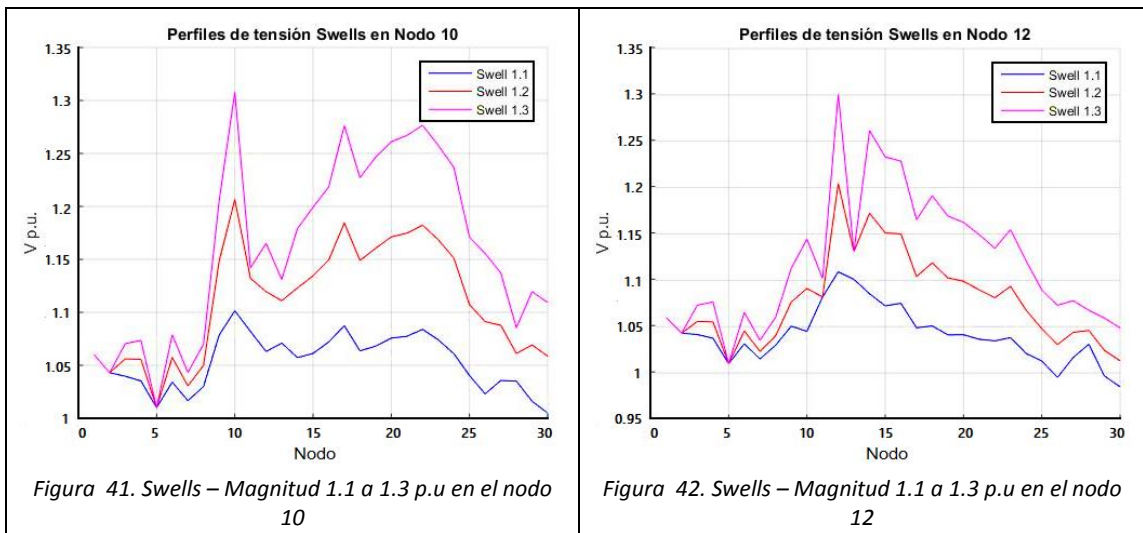
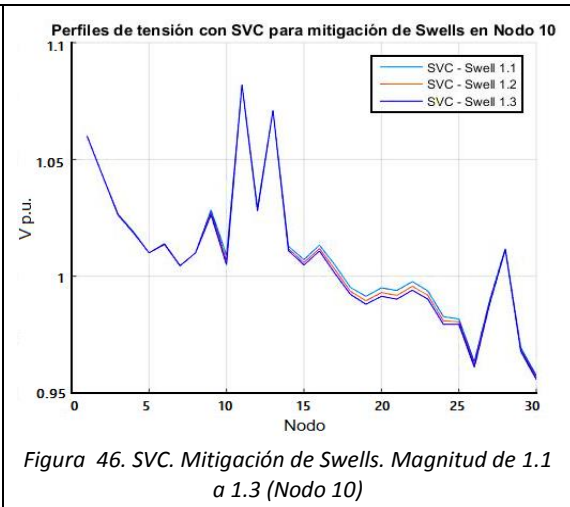
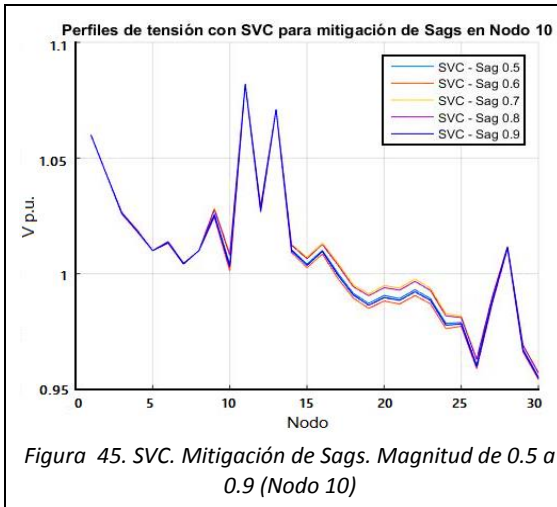
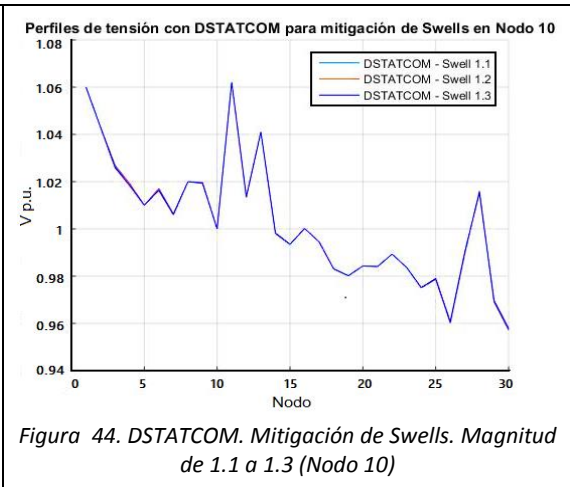
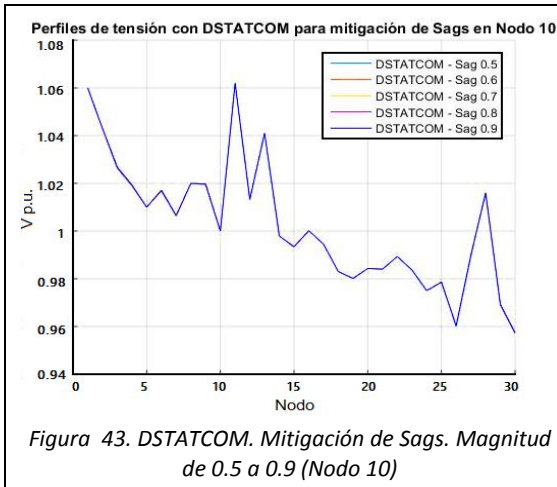
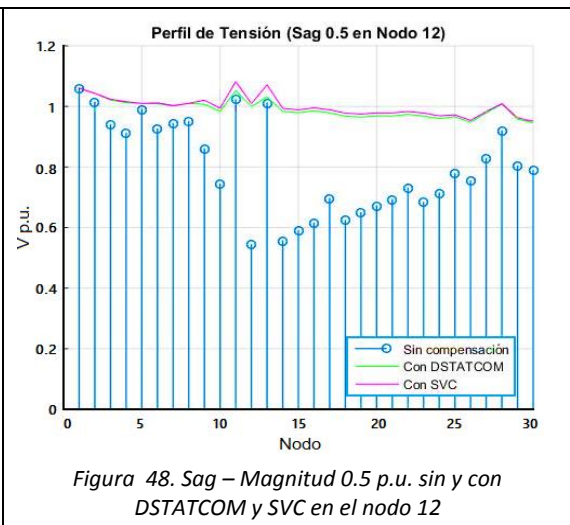
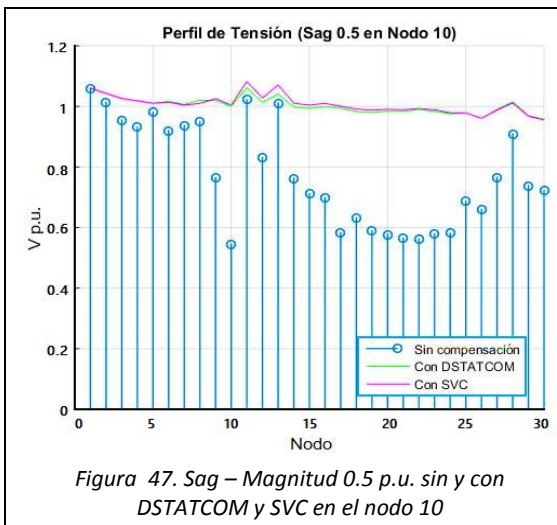


Figura 41. Swells – Magnitud 1.1 a 1.3 p.u en el nodo 10

Figura 42. Swells – Magnitud 1.1 a 1.3 p.u en el nodo 12



4.3.5.1. Sags sin y con compensación en Nodo 10 y 12



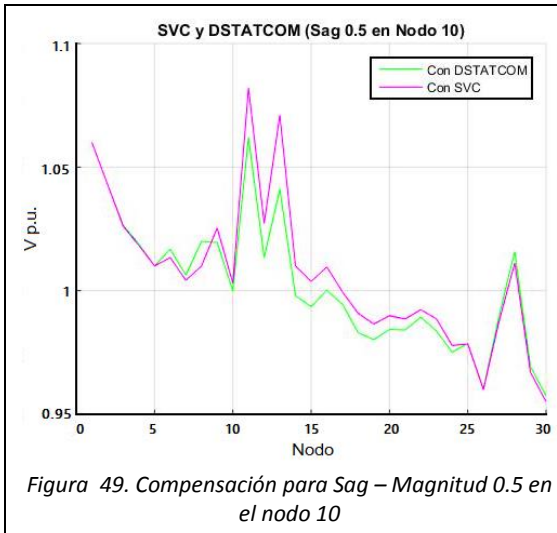


Figura 49. Compensación para Sag – Magnitud 0.5 en el nodo 10

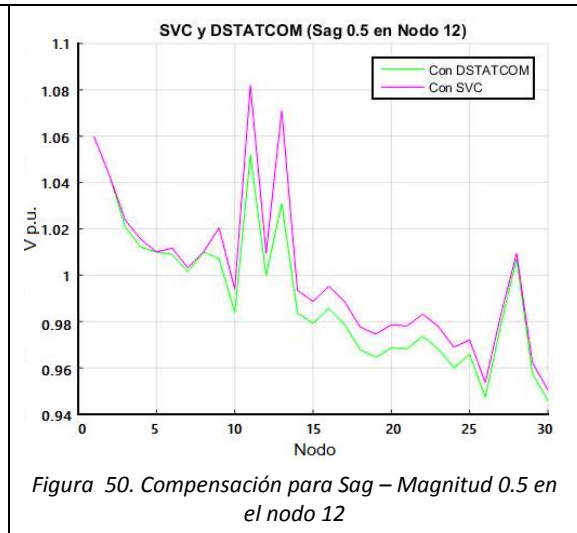


Figura 50. Compensación para Sag – Magnitud 0.5 en el nodo 12

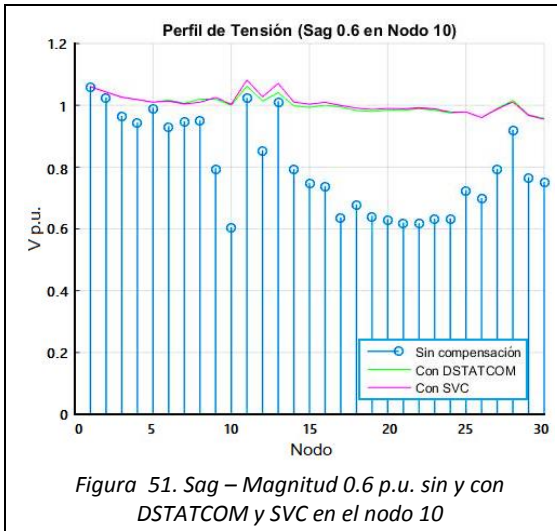


Figura 51. Sag – Magnitud 0.6 p.u. sin y con DSTATCOM y SVC en el nodo 10

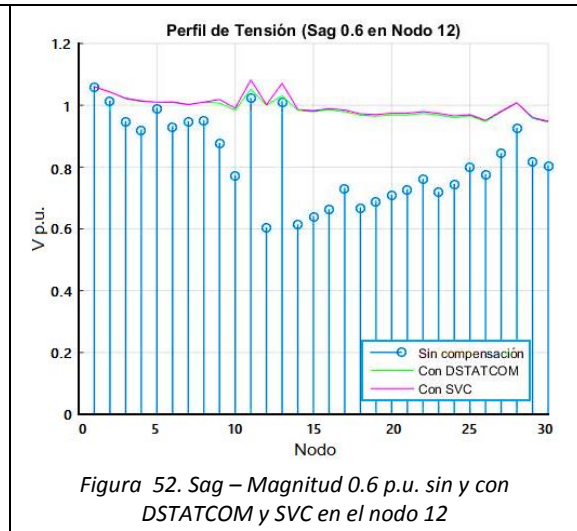


Figura 52. Sag – Magnitud 0.6 p.u. sin y con DSTATCOM y SVC en el nodo 12

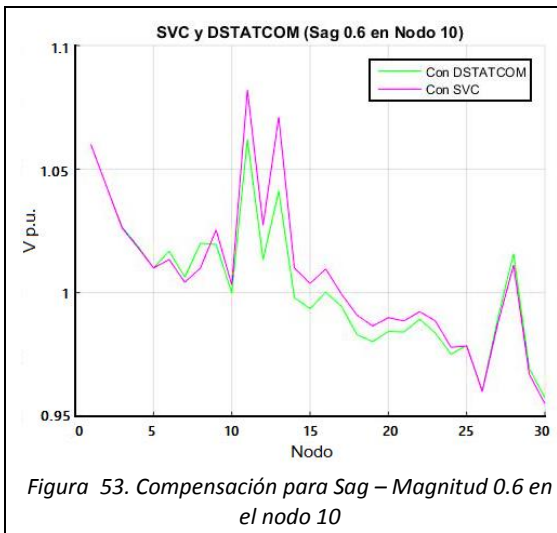


Figura 53. Compensación para Sag – Magnitud 0.6 en el nodo 10

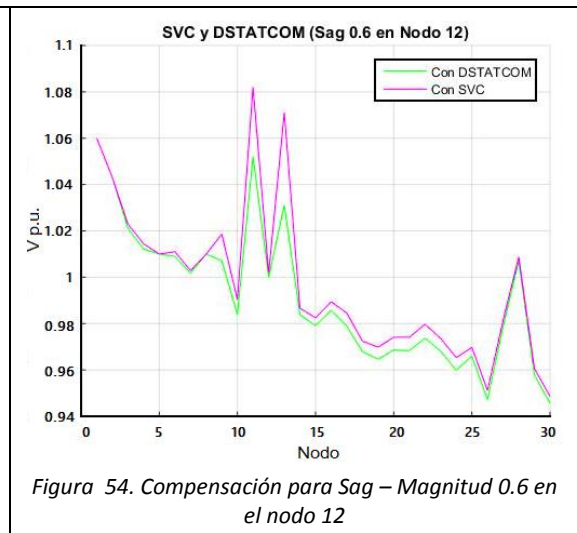


Figura 54. Compensación para Sag – Magnitud 0.6 en el nodo 12

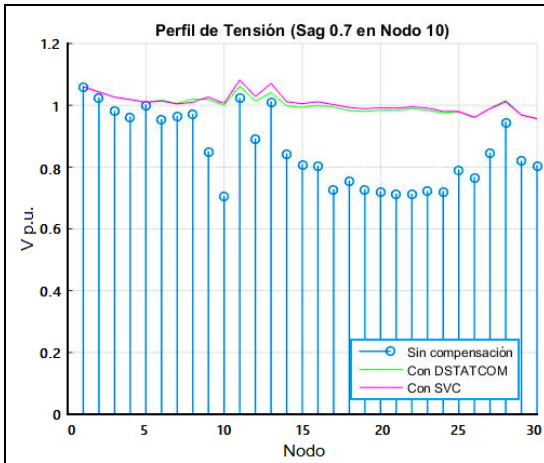


Figura 55. Sag – Magnitud 0.7 p.u. sin y con DSTATCOM y SVC en el nodo 10

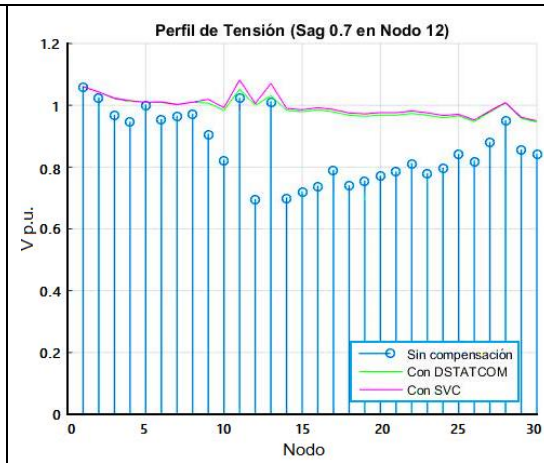


Figura 56. Sag – Magnitud 0.7 p.u. sin y con DSTATCOM y SVC en el nodo 12

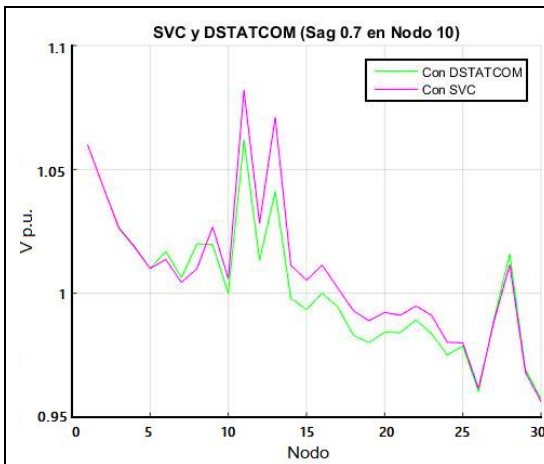


Figura 57. Compensación para Sag – Magnitud 0.7 en el nodo 10

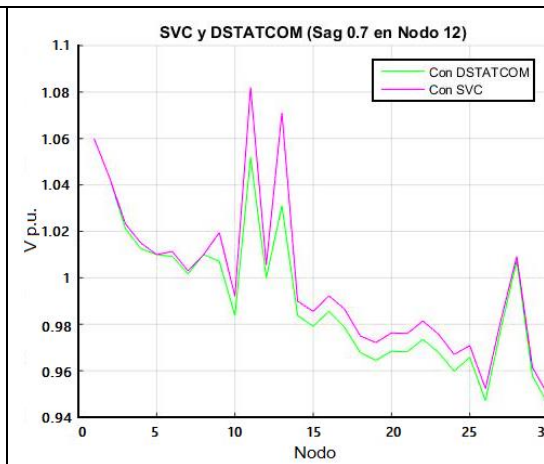


Figura 58. Compensación para Sag – Magnitud 0.7 en el nodo 12

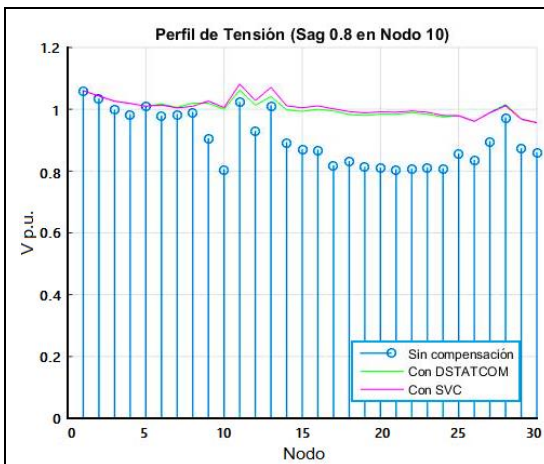


Figura 59. Sag – Magnitud 0.8 p.u. sin y con DSTATCOM y SVC en el nodo 10

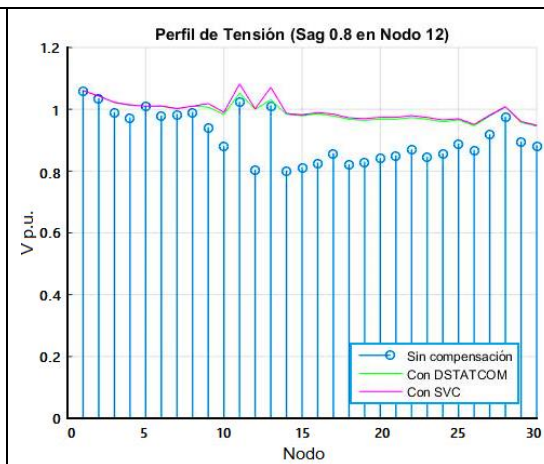


Figura 60. Sag – Magnitud 0.8 p.u. sin y con DSTATCOM y SVC en el nodo 12

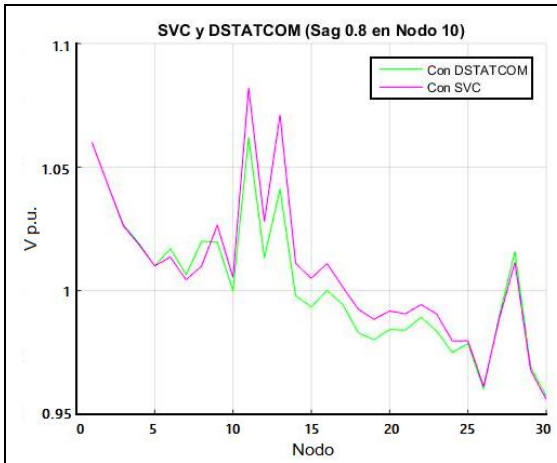


Figura 61. Compensación para Sag – Magnitud 0.8 en el nodo 10

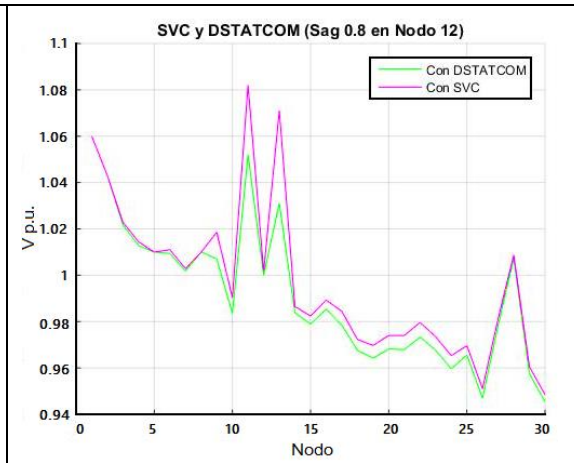


Figura 62. Compensación para Sag – Magnitud 0.8 en el nodo 12

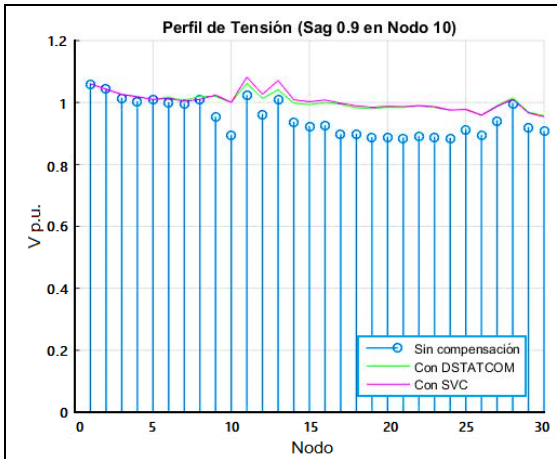


Figura 63. Sag – Magnitud 0.9 p.u. sin y con DSTATCOM y SVC en el nodo 10

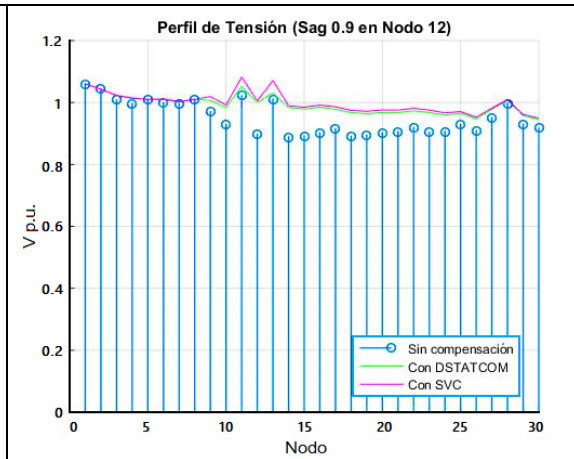


Figura 64. Sag – Magnitud 0.9 p.u. sin y con DSTATCOM y SVC en el nodo 10

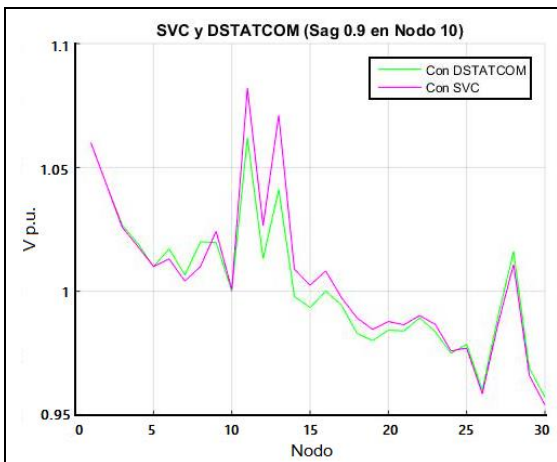


Figura 65. Compensación para Sag – Magnitud 0.9 en el nodo 10

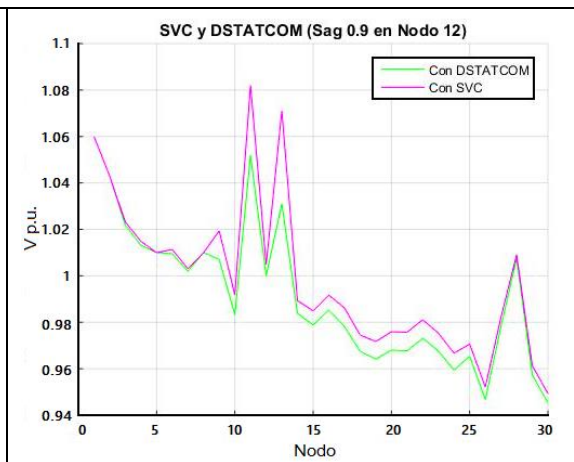


Figura 66. Compensación para Sag – Magnitud 0.9 en el nodo 10

4.3.5.2. Swells sin y con compensación en Nodo 10 y 12

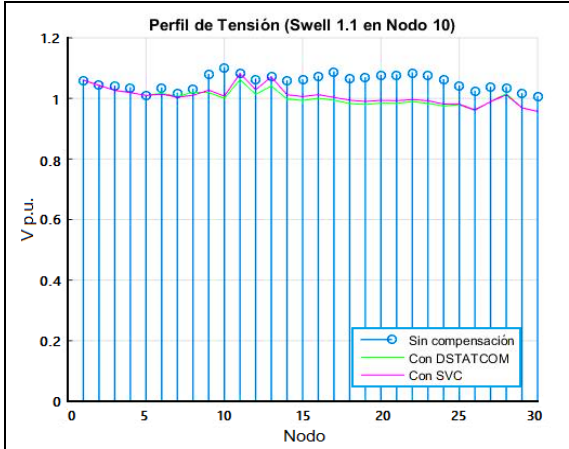


Figura 67. Swell – Magnitud 1.1 p.u. sin y con DSTATCOM y SVC en el nodo 10

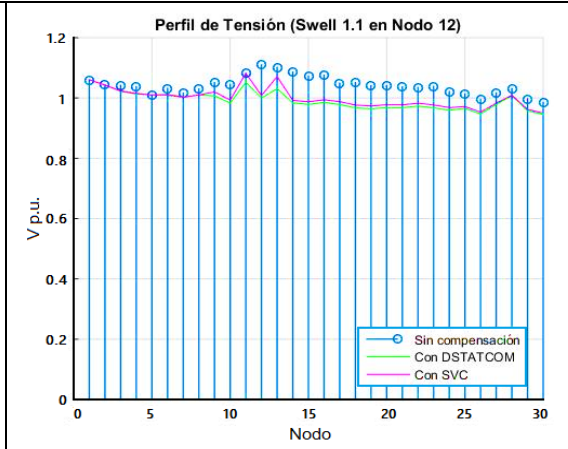


Figura 68. Swell – Magnitud 1.1 p.u. sin y con DSTATCOM y SVC en el nodo 12

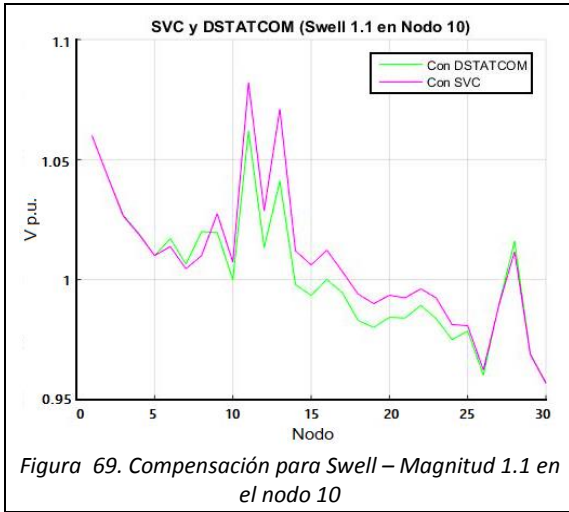


Figura 69. Compensación para Swell – Magnitud 1.1 en el nodo 10

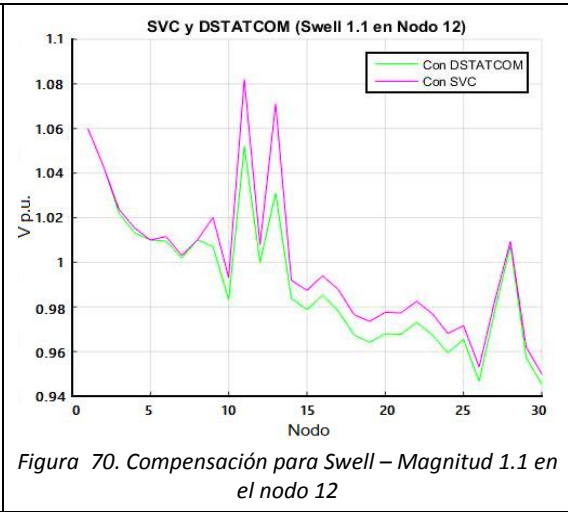


Figura 70. Compensación para Swell – Magnitud 1.1 en el nodo 12

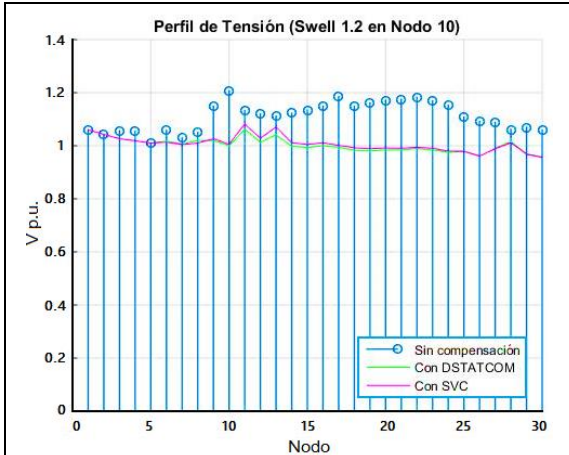


Figura 71. Swell – Magnitud 1.2 p.u. sin y con DSTATCOM y SVC en el nodo 10

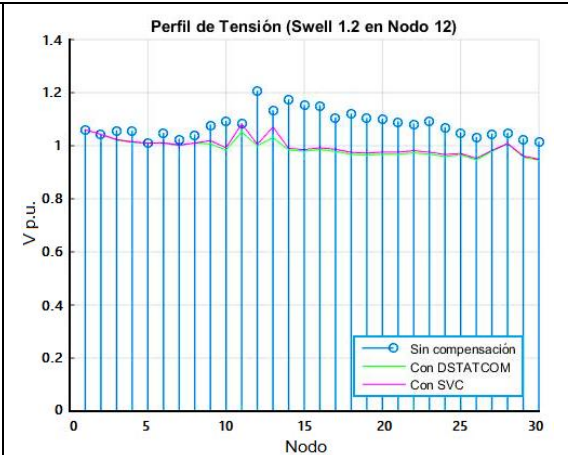


Figura 72. Swell – Magnitud 1.2 p.u. sin y con DSTATCOM y SVC en el nodo 12

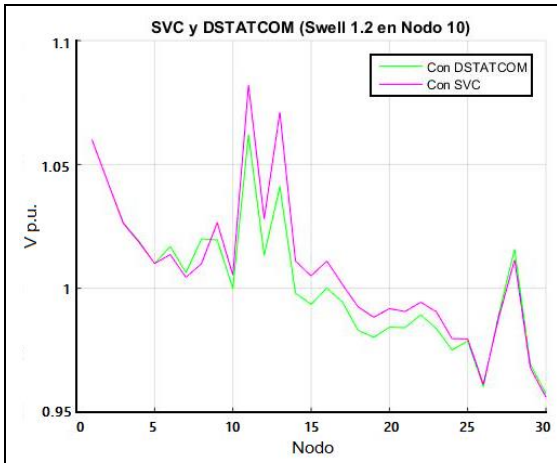


Figura 73. Compensación para Swell – Magnitud 1.2 en el nodo 10

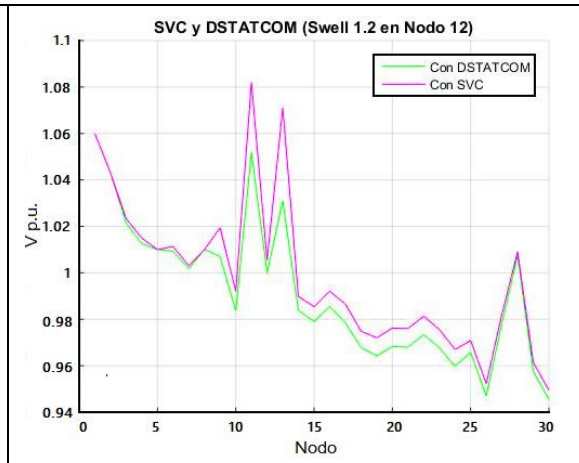


Figura 74. Compensación para Swell – Magnitud 1.2 en el nodo 12

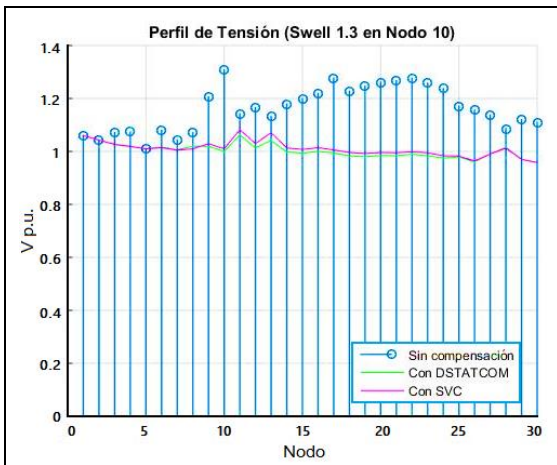


Figura 75. Swell – Magnitud 1.3 p.u. sin y con DSTATCOM y SVC en el nodo 10

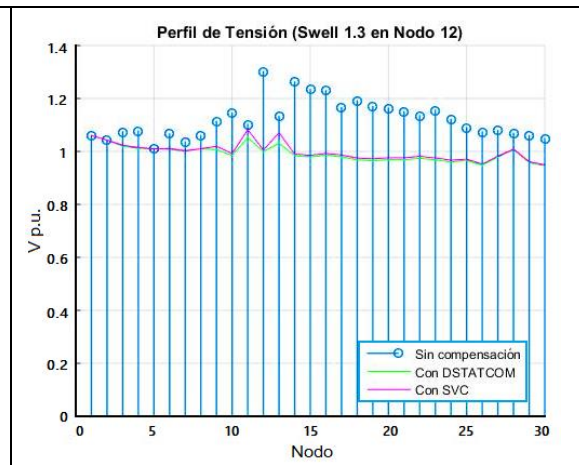


Figura 76. Swell – Magnitud 1.3 p.u. sin y con DSTATCOM y SVC en el nodo 12

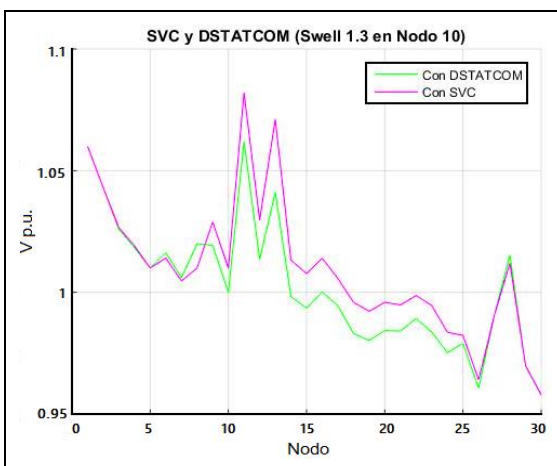


Figura 77. Compensación para Swell – Magnitud 1.3 en el nodo 10

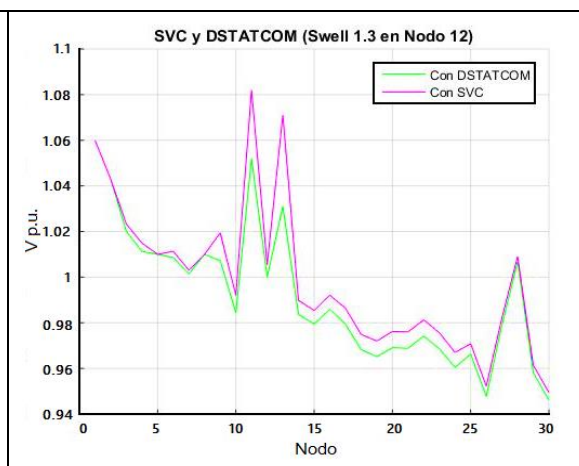


Figura 78. Compensación para Swell – Magnitud 1.3 en el nodo 12

4.4. Análisis de resultados

La carga requerida para la generación de *sags* o *swells* en el algoritmo implementado no es igual para los dos nodos, tal como se indica en las Tablas 15, 16, 17 y 18, donde se puede ver que para el nodo 10 estos valores son menores comparados con los obtenidos para el nodo 12.

Para un *sag* de igual magnitud o un *swell* de igual magnitud, analizado en los dos nodos, el que mayor afectación trae a la red, es cuando alguna de estas variaciones se presenta en el nodo 10.

Los valores de potencia entregada o absorbida por los compensadores para un mismo evento son diferentes, sin embargo, al incluir estos compensadores, todos los nodos de la red quedan con un nivel de tensión entre 0.9 y 1.1 p.u.

4.5. Conclusiones

- Con el desarrollo de este capítulo se da cumplimiento al segundo objetivo: “Implementar un algoritmo de flujo de carga en MATLAB que incluya compensación de reactivos a través de SVC y DSTATCOM”, con el cual es posible obtener un valor aproximado de las potencias reactivas que se espera que los compensadores entreguen o absorban para cada variación de tensión, además permite conocer el comportamiento de la red ante la presencia de estos, antes y después de la compensación, lo cual servirá como punto de referencia y comparación con el último objetivo de este proyecto.
- Con los resultados obtenidos con el algoritmo sin compensación, se reitera que el nodo que más afectación trae a la red cuando se presenta un *sag* o un *swell* es el nodo 10, lo que estaría acorde con lo concluido en el primer capítulo.
- Aunque las potencias que entregan o absorben los dos compensadores son diferentes para un mismo evento, tanto el SVC como el DSTATCOM, cumplen su objetivo de nivelar o mantener los niveles de tensión entre 0.9 y 1.1 p.u.

5. MITIGACIÓN DE SAGS Y SWELLS EN RED IEEE 30 NODOS CON SVC Y DSTATCOM

En este capítulo se incluyen los compensadores *DSTATCOM* y *SVC* en la red IEEE 30 nodos, simulada en DigSILENT, de tal manera que se pueda ver y analizar el comportamiento que esta tiene para el estudio de la mitigación de variaciones de tensión.

A diferencia del comportamiento analizado con el algoritmo implementado en MATLAB en el cual solo se tenía en cuenta la magnitud del *sag* o *swell*, en este capítulo se hará un análisis teniendo en cuenta magnitud y duración.

5.1. Inclusión del *SVC* y *DSTATCOM* en DigSILENT

Para el desarrollo de este capítulo se hace uso de la herramienta de simulación DSL de DigSILENT [51], la cual en su librería contiene los modelos dinámicos de los compensadores, lo cual permite hacer un análisis de estabilidad de los perfiles de tensión. A continuación se hace una breve descripción de la implementación de estos dispositivos en el sistema de potencia:

5.1.1. SVC

La implementación del *SVC* es sencilla, debido a que ya se encuentra en la librería de dispositivos de DigSILENT [52], sin embargo para el estudio de estabilidad, se debe tener en cuenta que se debe insertar en el dispositivo un modelo compuesto ("*Composite Model*") que contiene otros elementos como la interfaz del *SVC* (donde se configuran algunos parámetros de tiempos de los tiristores) y el modelo dinámico del control de tensión del dispositivo. La configuración de los parámetros del *SVC* y el modelo dinámico, se pueden observar en el anexo C. A manera de ejemplo, en la Figura 79, se muestra la inclusión del dispositivo *SVC* de DigSILENT en el nodo 10.

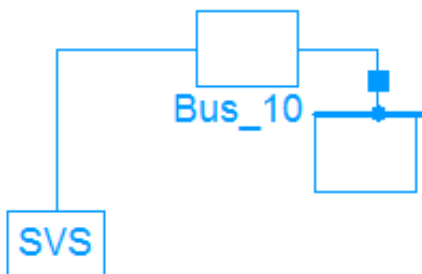


Figura 79. Dispositivo *SVC* en DigSILENT

5.1.2. DSTATCOM

Para incluir este dispositivo en el programa DigSILENT, se requiere la conexión del control dinámico y de medidores de tensión y de fase que se hace de manera interna y la conexión externa de tres dispositivos como son: la impedancia tipo shunt, el inversor y transformador del *DSTATCOM*. En el anexo C se puede ver la configuración de los parámetros de los elementos externos junto con la configuración de los dispositivos internos del *DSTATCOM*. En la Figura 80, se puede ver a manera de ejemplo, la inclusión de este en el nodo 10.

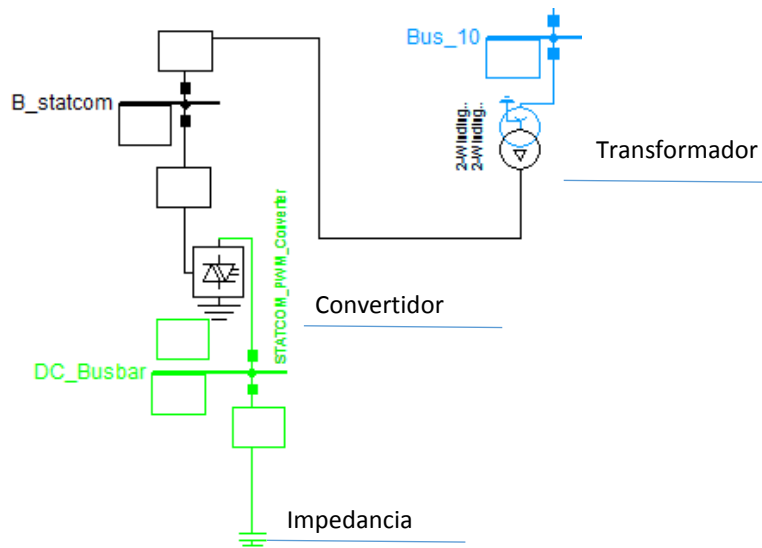


Figura 80. Dispositivo DSTATCOM en DigSILENT

5.2. Resultados

5.2.1. Potencias entregadas y absorbidas por los compensadores

Al incluir los compensadores de reactivos en los nodos 10 y 12 de la red IEEE 30 nodos para cada una de las variaciones de tensión seleccionadas, fue posible obtener los valores de potencia entregada o absorbida tanto del *SVC* como del *DSTATCOM*. Los valores obtenidos se muestran en las Tablas 28, 29, 30 y 31.

Tabla 28. Potencia entregada por el DSTATCOM y el SVC para Sags en nodo 10

Potencia entregada por el DSTATCOM y SVC para SAGs en nodo 10 - DigSILENT		
Magnitud Sag p.u.	Qdstatcom MVAR	Qsvc MVAR
0,5	-277,10	-248,50
0,6	-232,50	-230,50
0,7	-157,60	-167,70
0,8	-116,00	-106,70
0,9	-70,00	-80,00

Tabla 29. Potencia entregada por el DSTATCOM y SVC para Sags en nodo 12

Potencia entregada por el DSTATCOM y SVC para SAGs en nodo 12 - DigSILENT		
Magnitud Sag p.u.	Qdstatcom MVAR	Qsvc MVAR
0,5	-278,40	-242,71
0,6	-272,70	-229,80
0,7	-248,20	-197,30
0,8	-203,20	-181,90
0,9	-139,40	-103,00

Tabla 30. Potencia absorbida por el DSTATCOM y SVC para Swells en nodo 10

Potencia absorbida por el DSTATCOM y SVC para SWELLS en nodo 10 - DigSILENT		
Magnitud Swell p.u.	Qdstatcom MVAR	Qsvc MVAR
1,1	83,80	77,90
1,2	182,70	180,90
1,3	319,80	342,80

Tabla 31. Comparación potencia absorbida entre DSTATCOM y SVC para Swells en nodo 12

Potencia absorbida por el DSTATCOM y SVC para SWELLS en nodo 12 - DigSILENT		
Magnitud Swell p.u.	Qdstatcom MVAR	Qsvc MVAR
1,1	78,7	115,90
1,2	193,8	229,00
1,3	384,8	363,70

5.2.2. SVC y DSTATCOM en Nodo 10

De la Figura 81 a la Figura 88 se muestra el comportamiento tanto del SVC como del DSTATCOM al incluirlo en el nodo 10 para la mitigación de sags y swells.

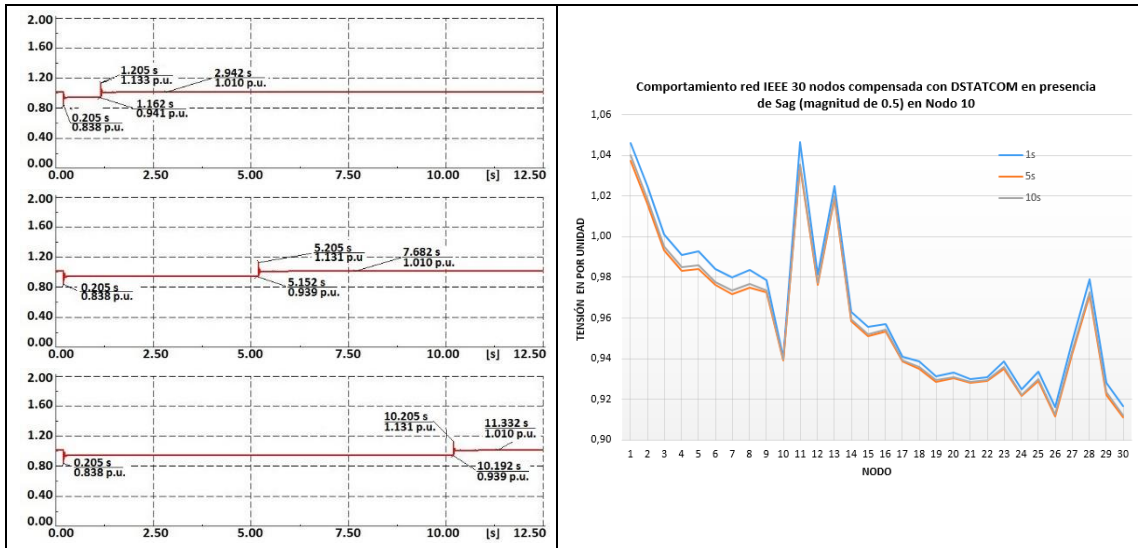


Figura 81. DSTATCOM en presencia de sag - Magnitud 0.5, duración de 1, 5 y 10 s en N10

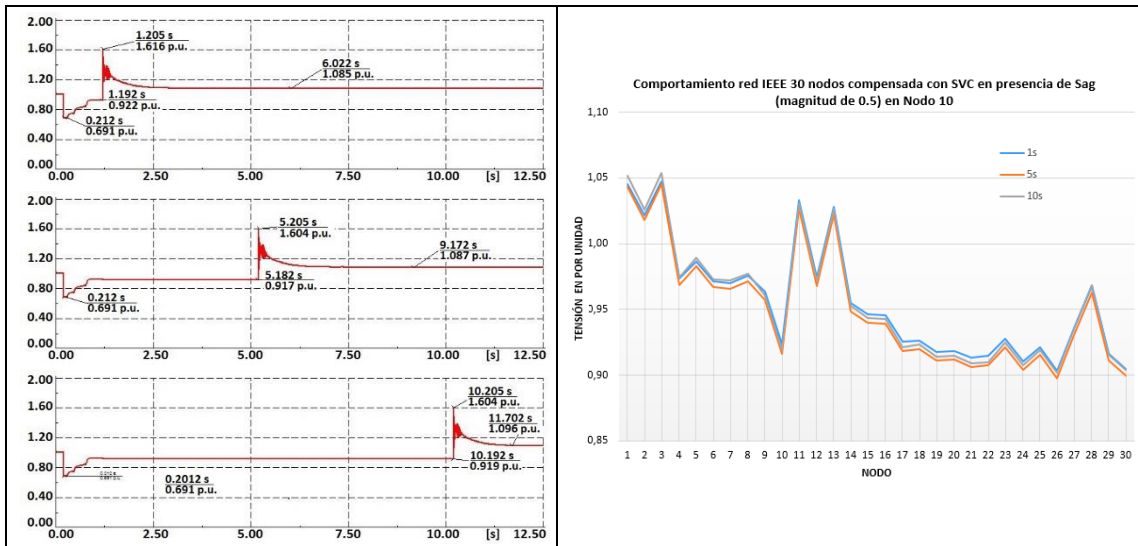


Figura 82. SVC en presencia de sag - Magnitud 0.5, duración de 1, 5 y 10 s en N10

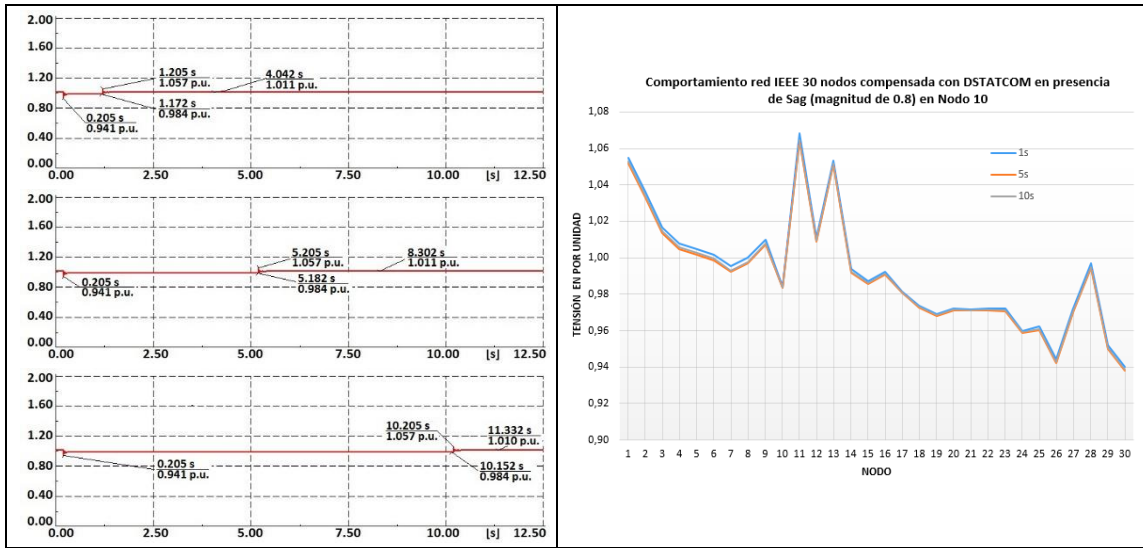


Figura 83. DSTATCOM en presencia de sag - Magnitud 0.8, duración de 1, 5 y 10 s en N10

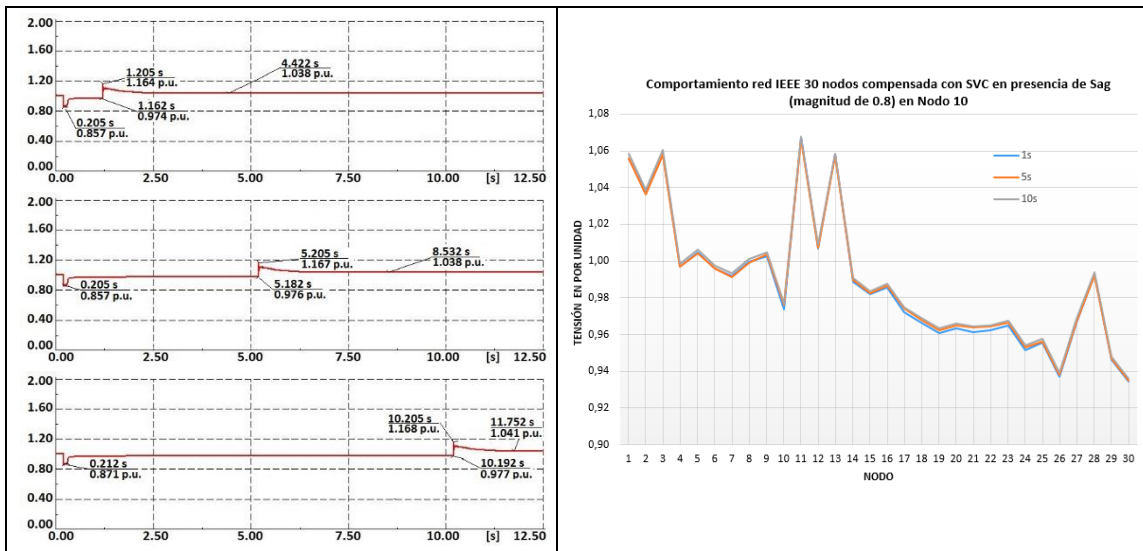


Figura 84. SVC en presencia de sag - Magnitud 0.8, duración de 1, 5 y 10 s en N10

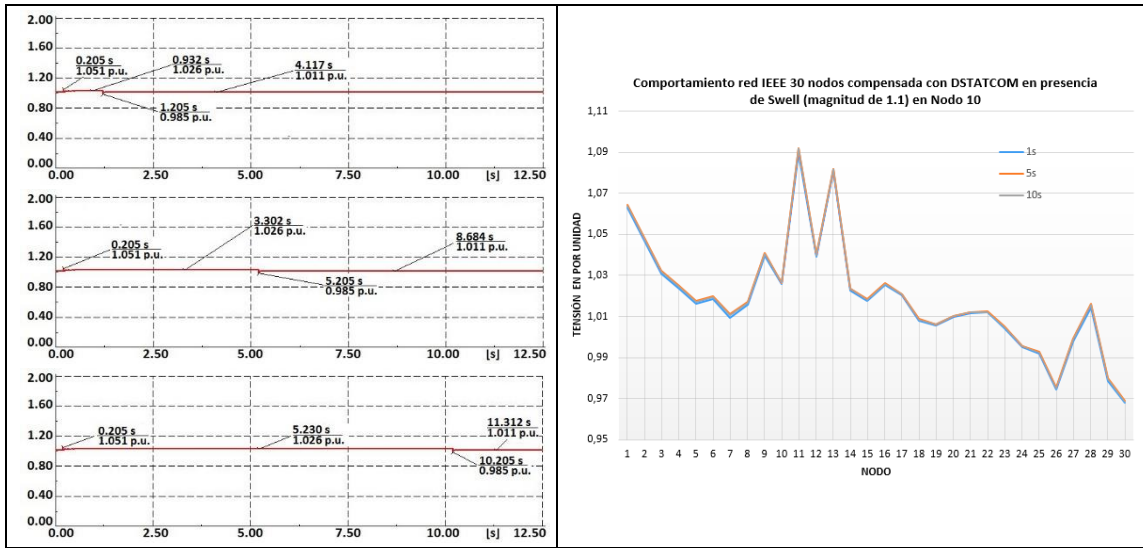


Figura 85. DSTATCOM en presencia de swell - Magnitud 1.1, duración de 1, 5 y 10 s en N10

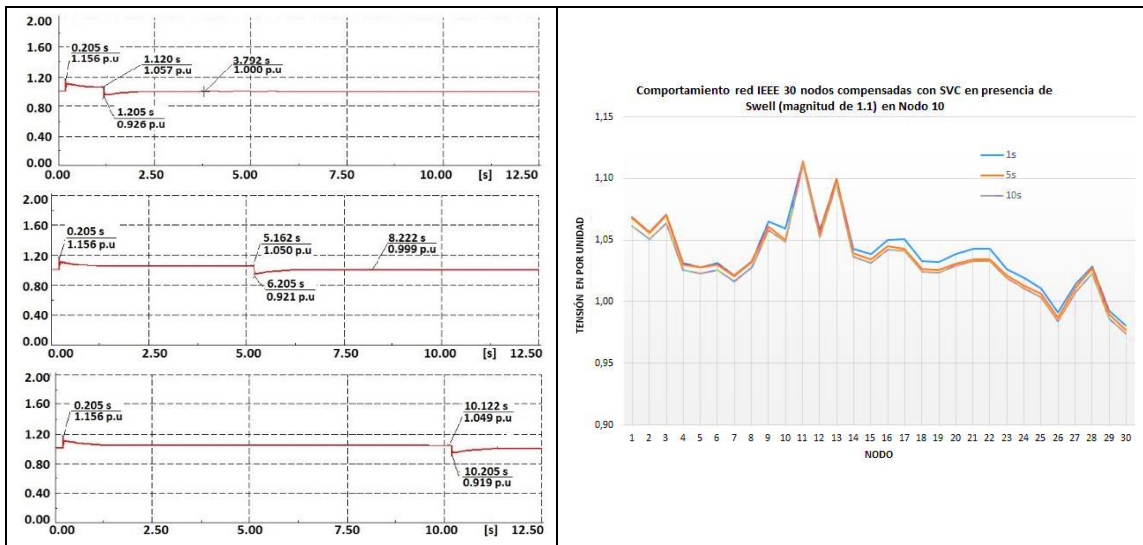


Figura 86. SVC en presencia de swell - Magnitud 1.1, duración de 1, 5 y 10 s en N10

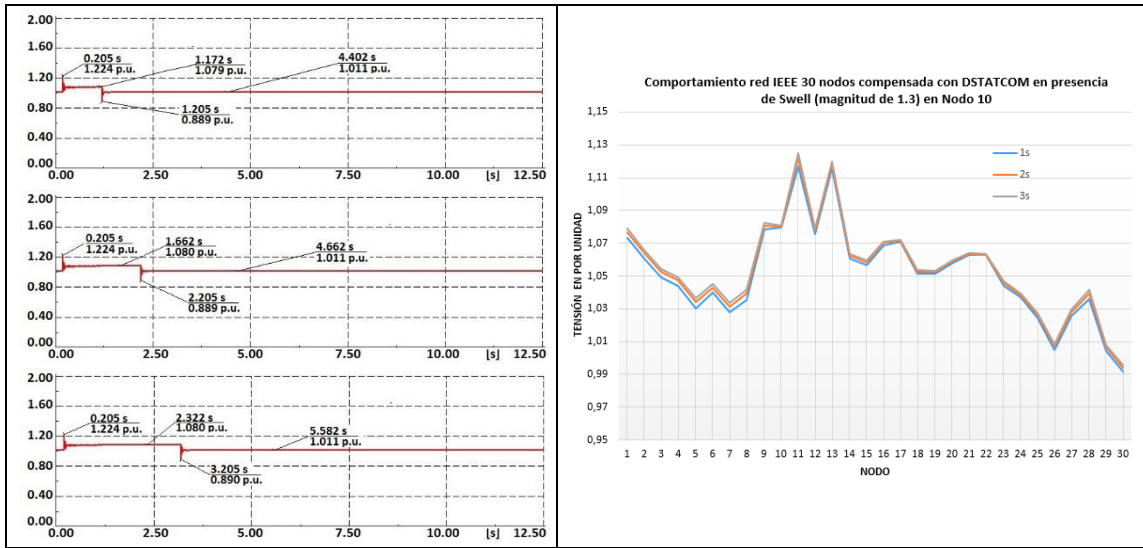


Figura 87. DSTATCOM en presencia de swell – Magnitud 1.3, duración de 1, 2 y 3 s en N10

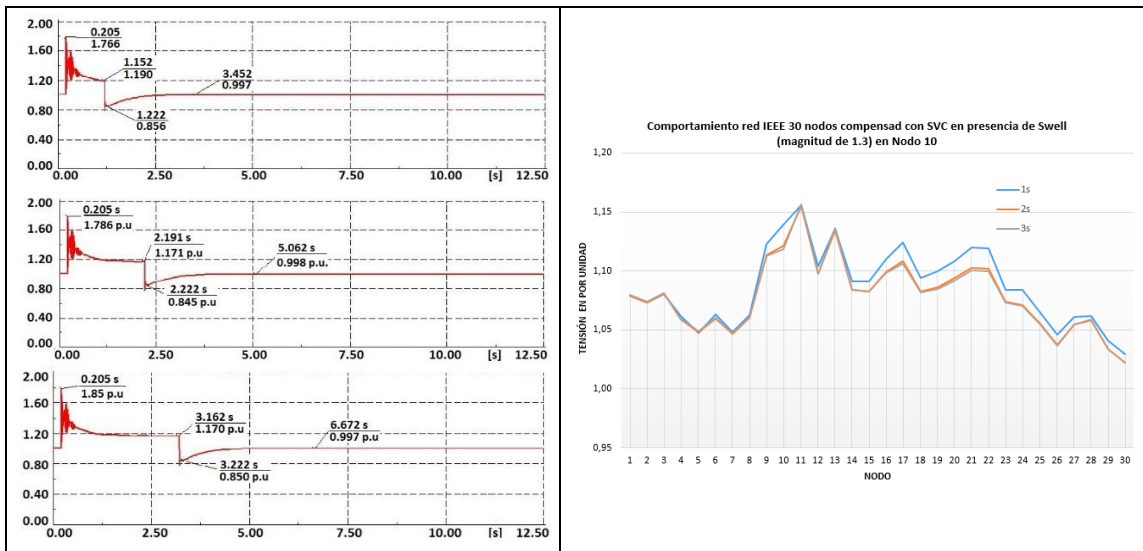


Figura 88. SVC en presencia de swell - Magnitud 1.3, duración de 1, 2 y 3 s en N10

5.2.3. SVC Y DSTATCOM en nodo 12

De la Figura 89 a la Figura 96 se muestra el comportamiento tanto del SVC como del *DSTATCOM* al incluirlo en el nodo 12 para la mitigación de *sags* y *swells*.

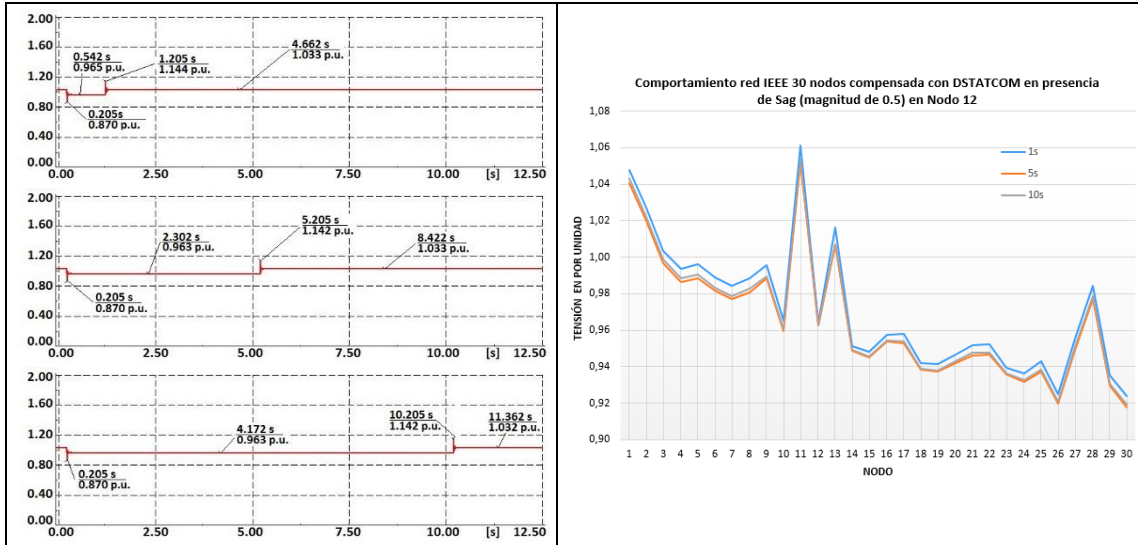


Figura 89. *DSTATCOM* en presencia de sag - Magnitud 0.5, duración de 1, 5 y 10 s en N12

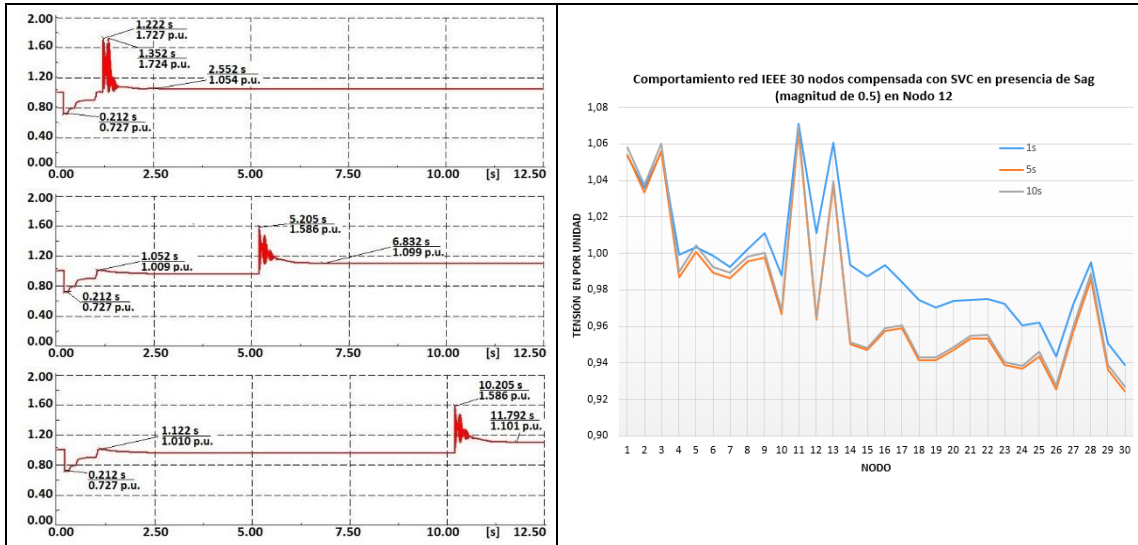


Figura 90. *SVC* en presencia de sag - Magnitud 0.5, duración de 1, 5 y 10 s en N12

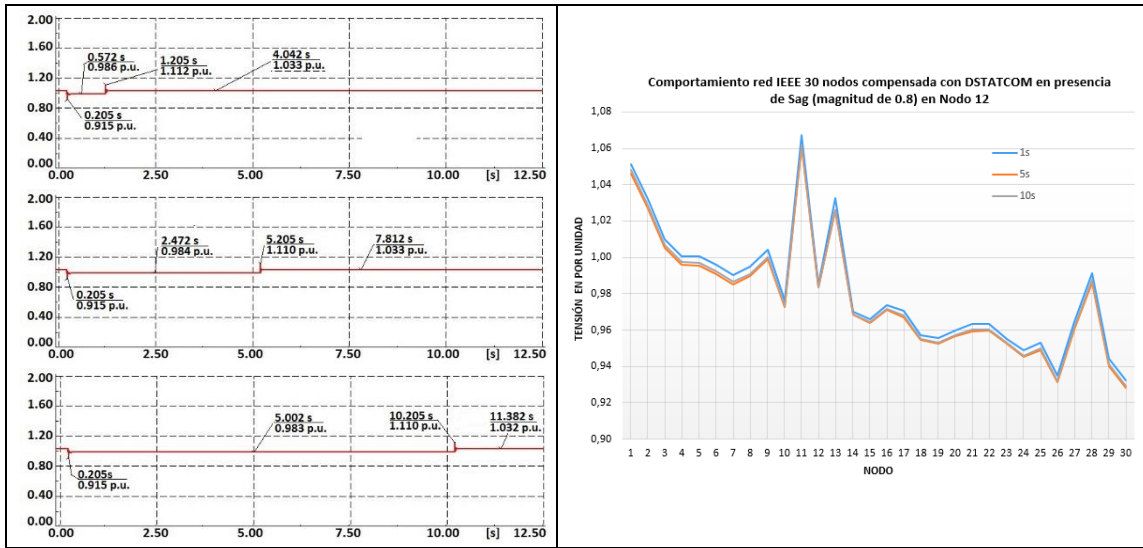


Figura 91. DSTATCOM en presencia de sag - Magnitud 0.8, duración de 1, 5 y 10 s en N12

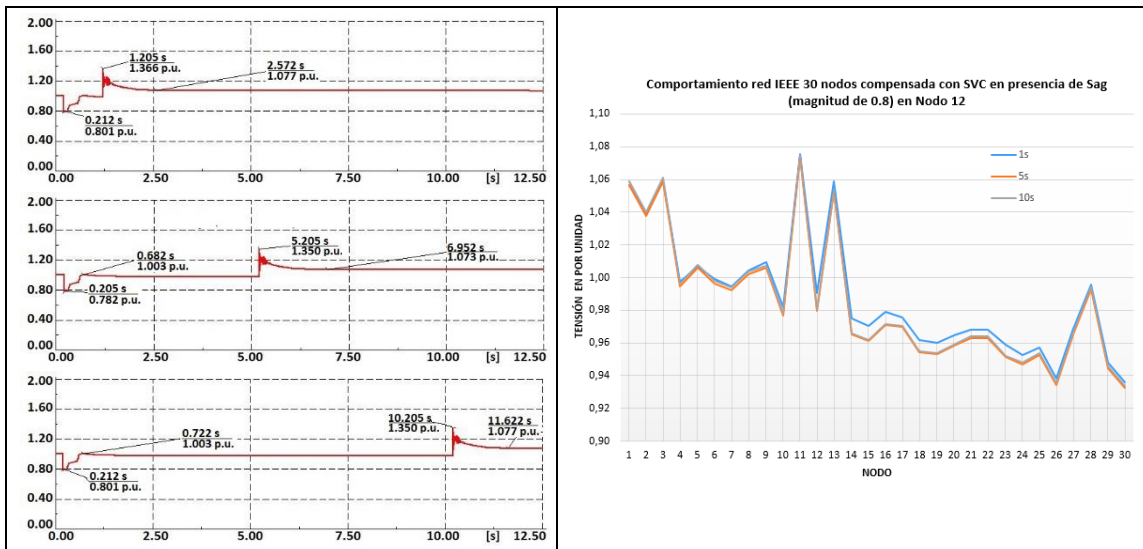


Figura 92. SVC en presencia de sag - Magnitud 0.8, duración de 1, 5 y 10 s en N12

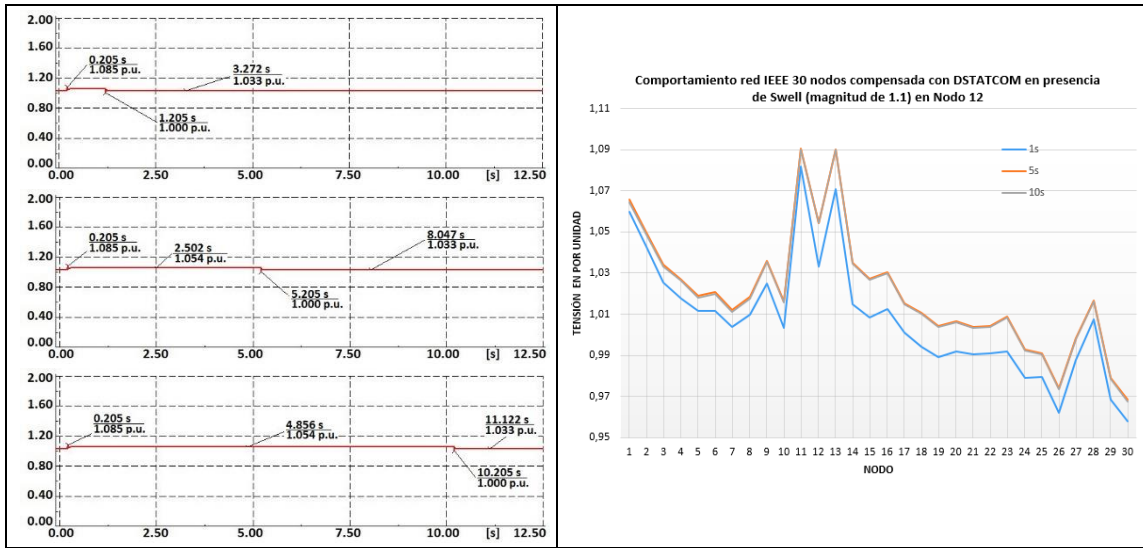


Figura 93. DSTATCOM en presencia de swell - Magnitud 1.1, duración de 1, 5 y 10 s en N12

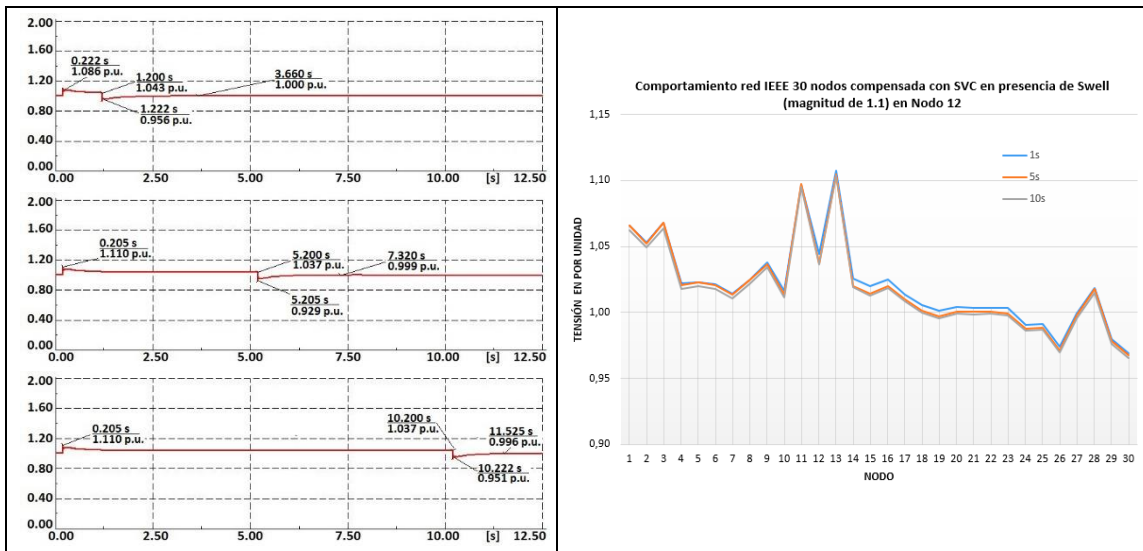


Figura 94. SVC en presencia de swell - Magnitud 1.1, duración de 1, 5 y 10 s en N12

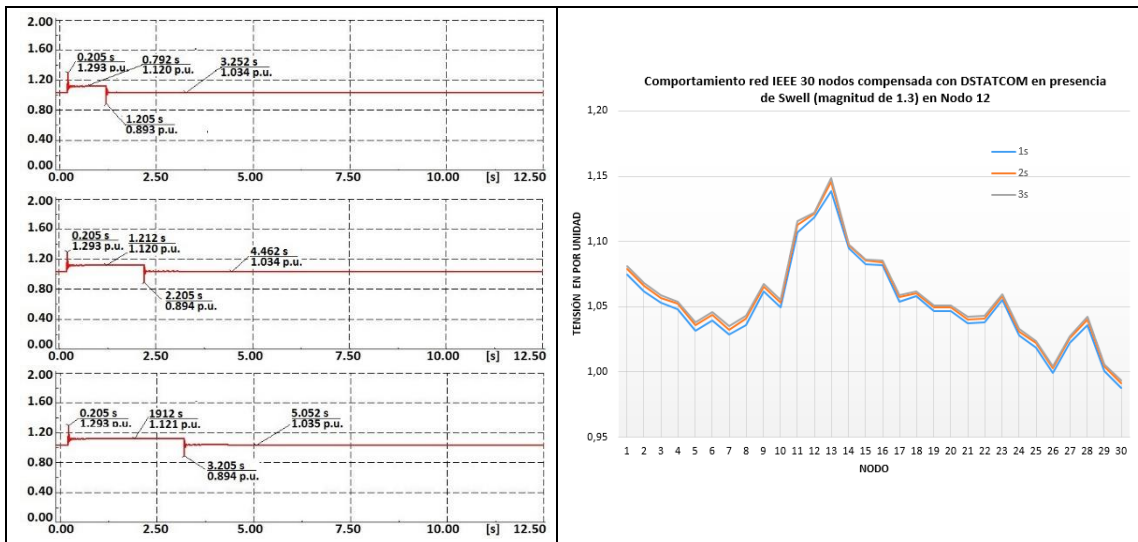


Figura 95. DSTATCOM en presencia de swell – Magnitud 1.3, duración de 1, 2 y 3 s en N12

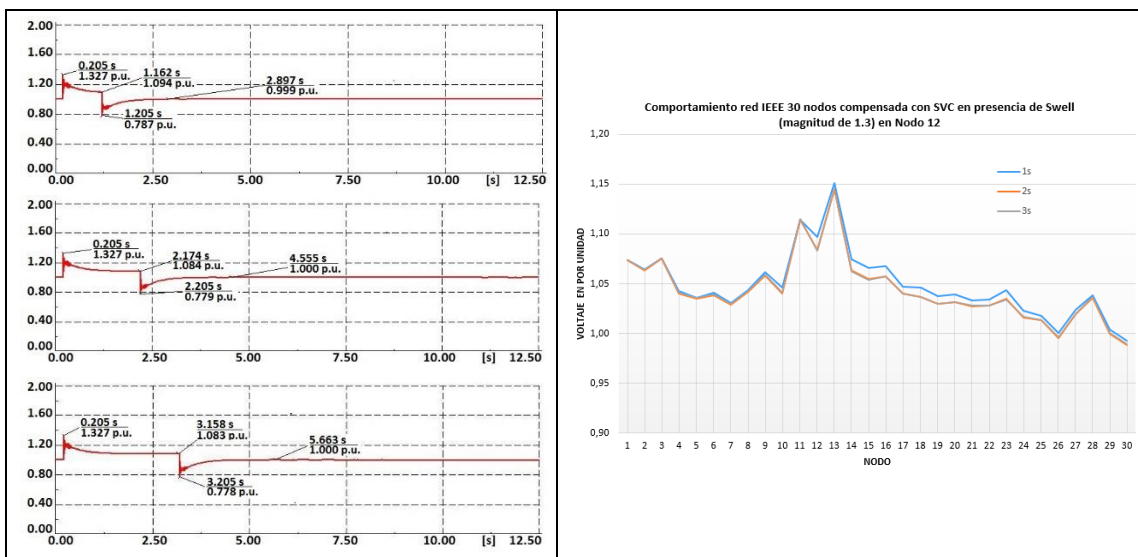


Figura 96. SVC en presencia de swell - Magnitud 1.3, duración de 1, 2 y 3 s en N12

5.3. Comparación de resultados obtenidos entre MATLAB y DigSILENT

En este numeral se comparan los resultados de la potencia entregada o absorbida por los compensadores obtenida con el algoritmo implementado en MATLAB con los valores obtenidos en DigSILENT, para mitigar las variaciones de tensión en los nodos 10 y 12, con el fin de validar los algoritmos implementados y observar que tan cercanos son estos valores. Para ello se calculó un porcentaje de diferencia, como se puede observar en las Tablas 32 y 33.

5.3.1. Resultados de compensación para mitigación de SAGs en los nodos 10 y 12

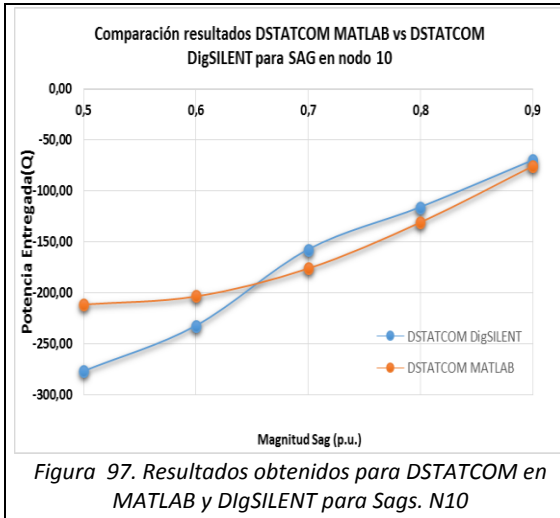


Figura 97. Resultados obtenidos para DSTATCOM en MATLAB y DigSILENT para Sags. N10

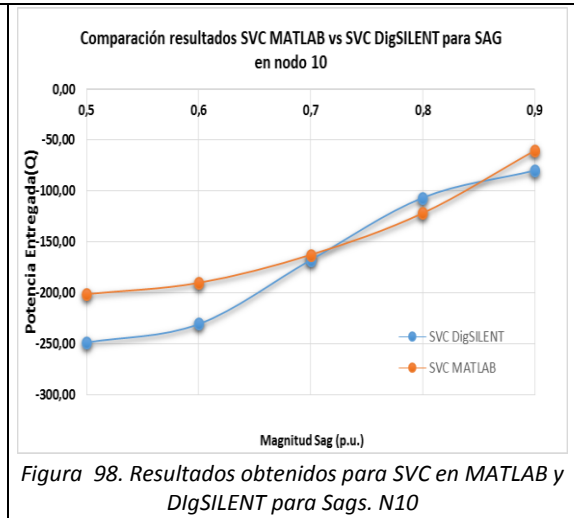


Figura 98. Resultados obtenidos para SVC en MATLAB y DigSILENT para Sags. N10

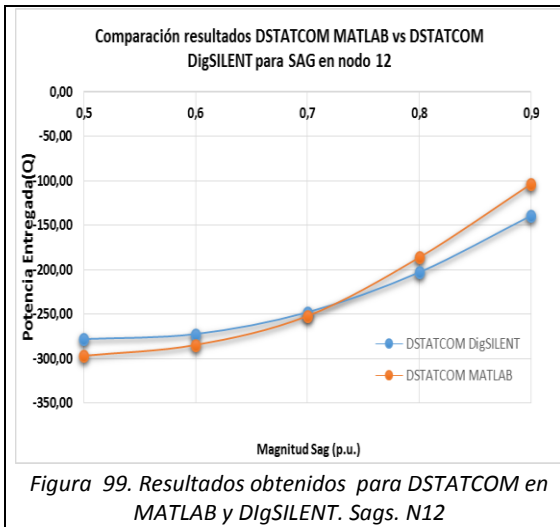


Figura 99. Resultados obtenidos para DSTATCOM en MATLAB y DigSILENT. Sags. N12

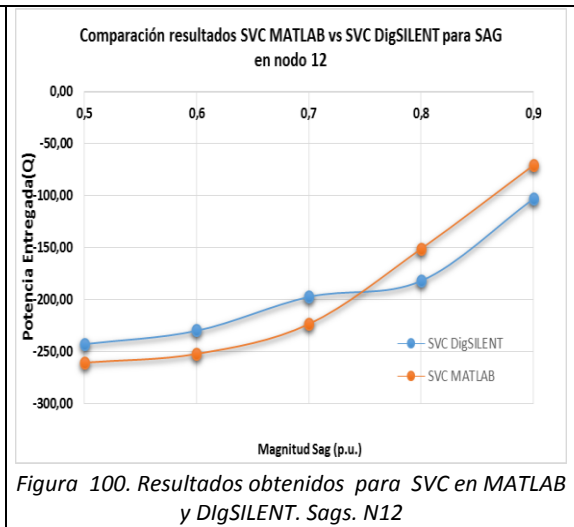


Figura 100. Resultados obtenidos para SVC en MATLAB y DigSILENT. Sags. N12

Tabla 32. (%) Diferencia potencia reactiva obtenida entre MATLAB y DigSILENT para Sags

Diferencia de valores obtenidos de compensación entre MATLAB y DigSILENT para SAGs				
Magnitud p.u.	Nodo 10		Nodo 12	
	Qdstatcom %	Qsvc %	Qdstatcom %	Qsvc %
0,5	23,74	18,93	6,58	7,31
0,6	12,52	17,41	4,34	9,67
0,7	11,67	2,94	1,57	13,18
0,8	12,64	14,15	8,28	17,00
0,9	7,70	24,69	25,55	31,25

5.3.2. Resultados de compensación para mitigación de SWELLS en los nodos 10 y 12

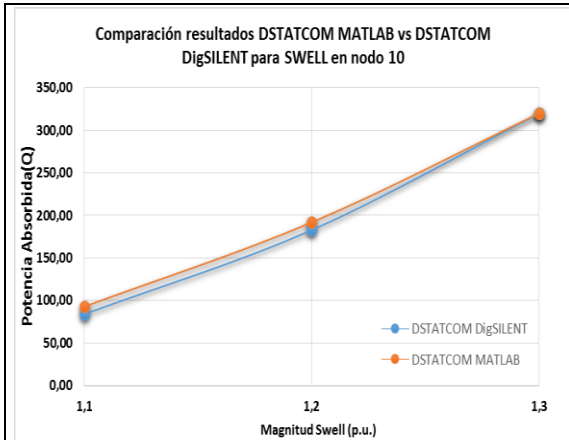


Figura 101. Resultados obtenidos para DSTATCOM en MATLAB y DigSILENT. Swells. N10

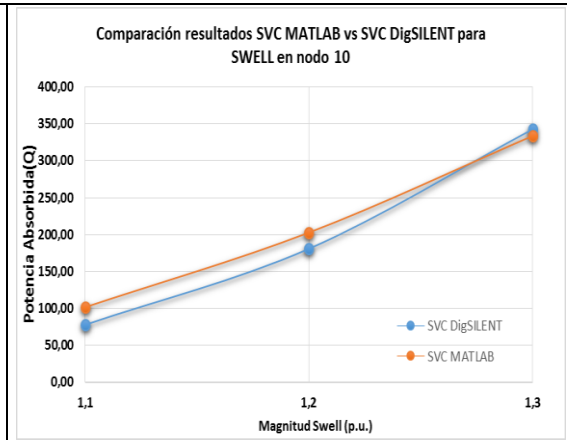


Figura 102. Resultados obtenidos para SVC en MATLAB y DigSILENT. Swells. N10

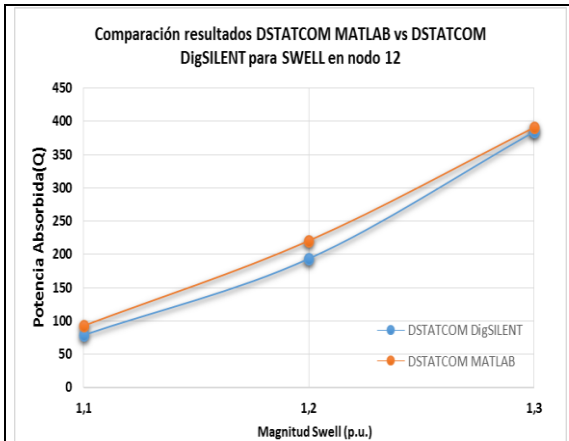


Figura 103. Resultados obtenidos para DSTATCOM en MATLAB y DigSILENT. Swells. N12

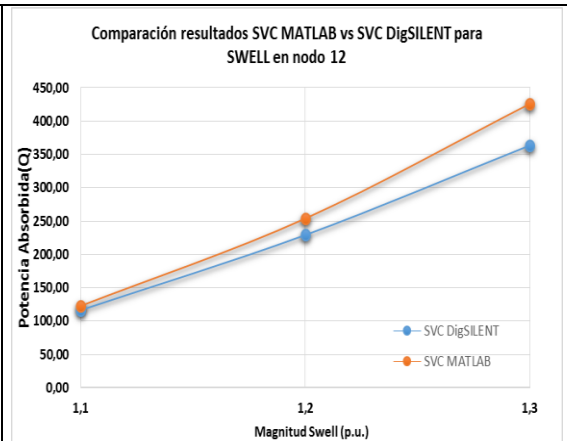
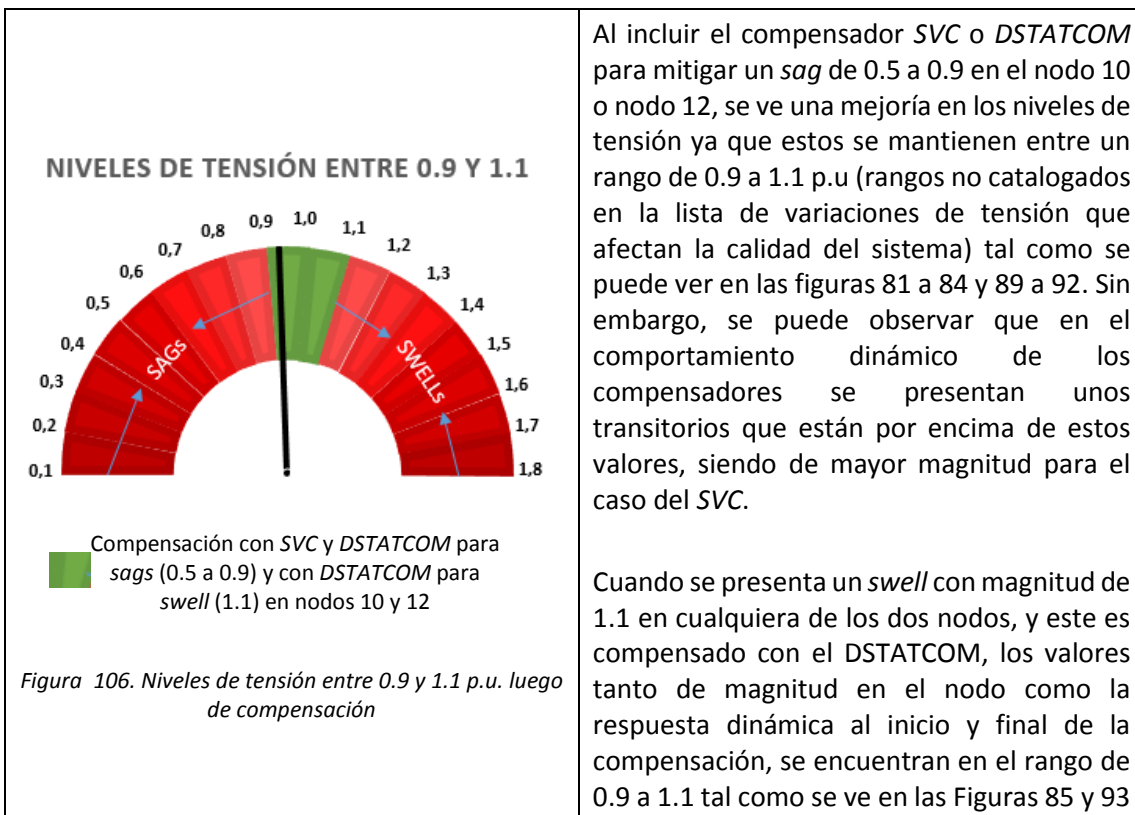
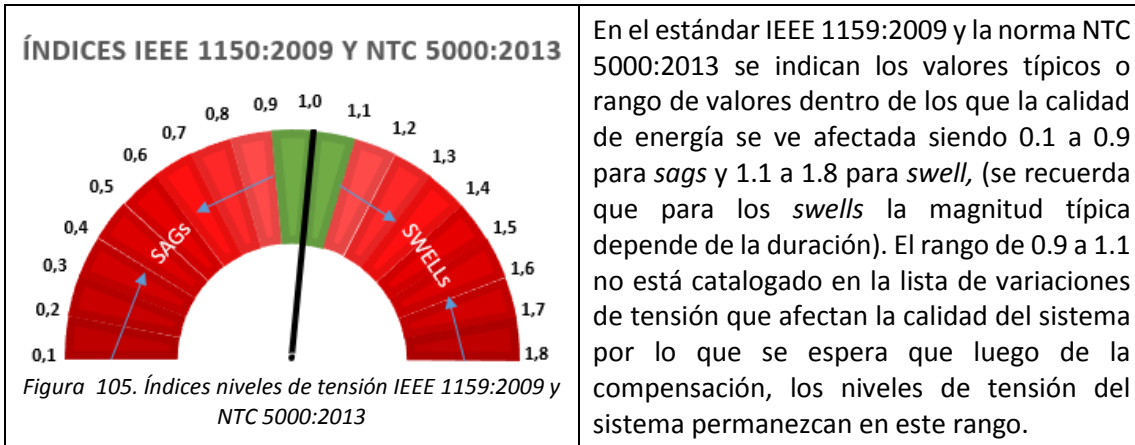


Figura 104. Resultados obtenidos para SVC en MATLAB y DigSILENT. Swells. N12

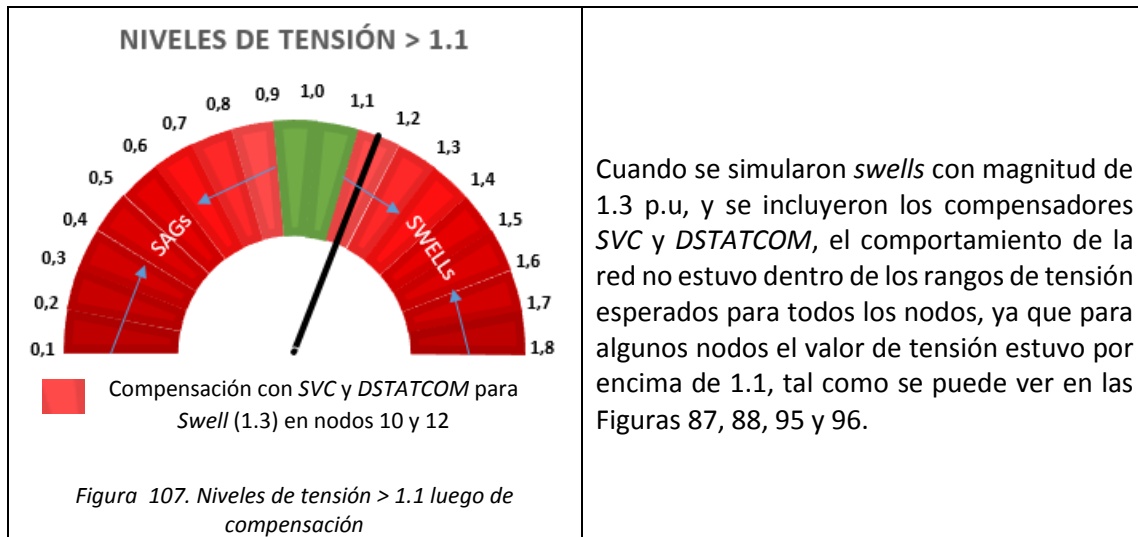
Tabla 33. (%) Diferencia potencia reactiva obtenida entre MATLAB y DigSILENT para Swells

Diferencia de valores obtenidos de compensación entre MATLAB y DigSILENT para SWELLS				
Magnitud p.u.	Nodo 10		Nodo 12	
	Qdstatcom %	Qsvc %	Qdstatcom %	Qsvc %
1,1	9,44	23,55	15,16	5,22
1,2	4,77	10,79	12,22	9,60
1,3	0,14	2,82	1,60	14,49

5.4. Análisis de resultados

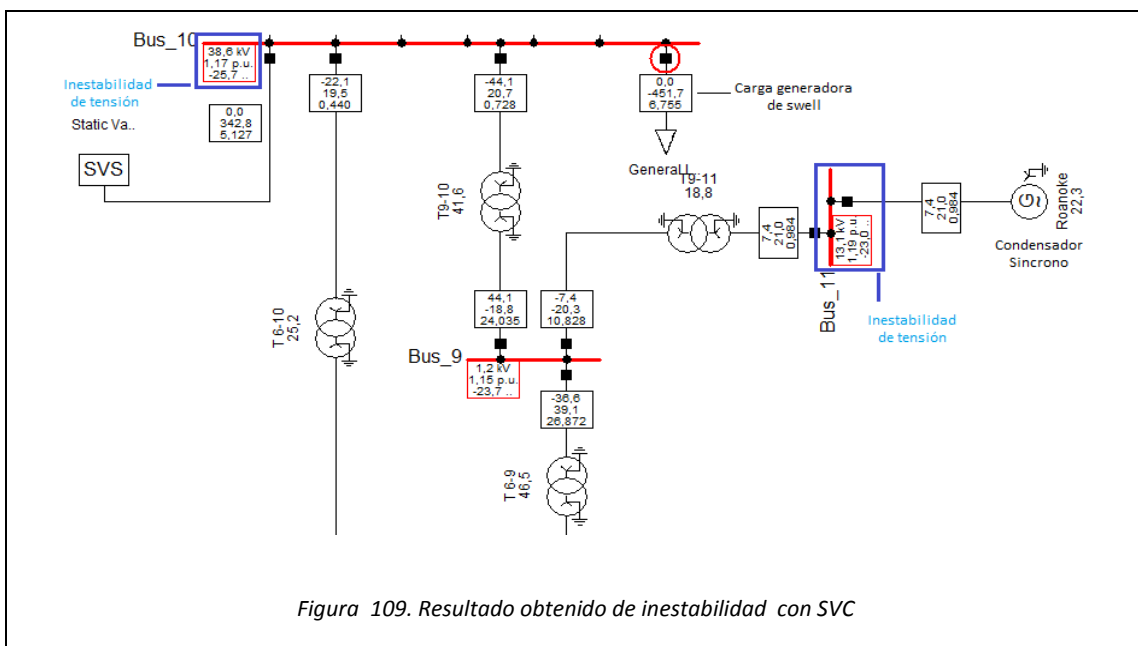
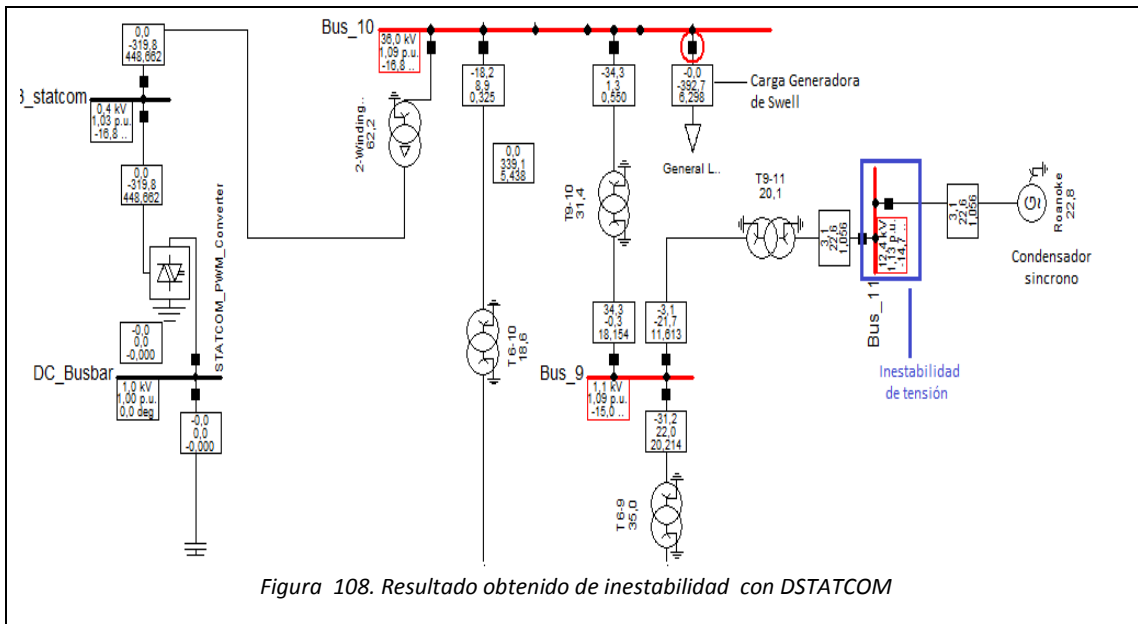


* Para el caso de un *swell* con magnitud de 1.1 en cualquiera de los dos nodos y este es compensados por el *SVC*, se ve una pequeña diferencia entre 0.01 y 0.02 por encima del valor esperado tal como se puede ver en las Figuras 86 y 94.

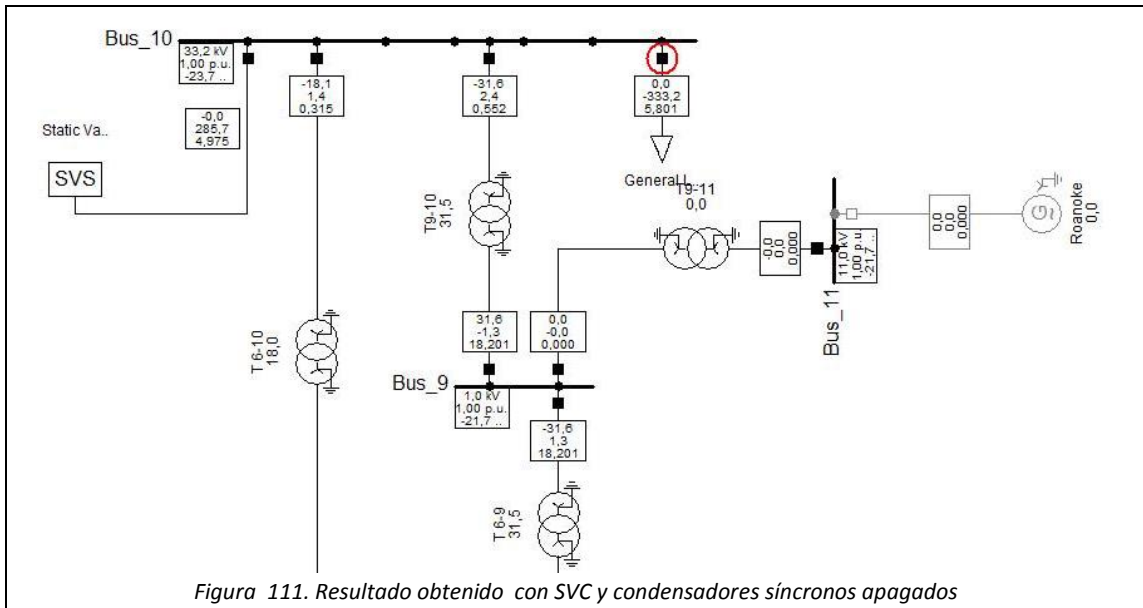
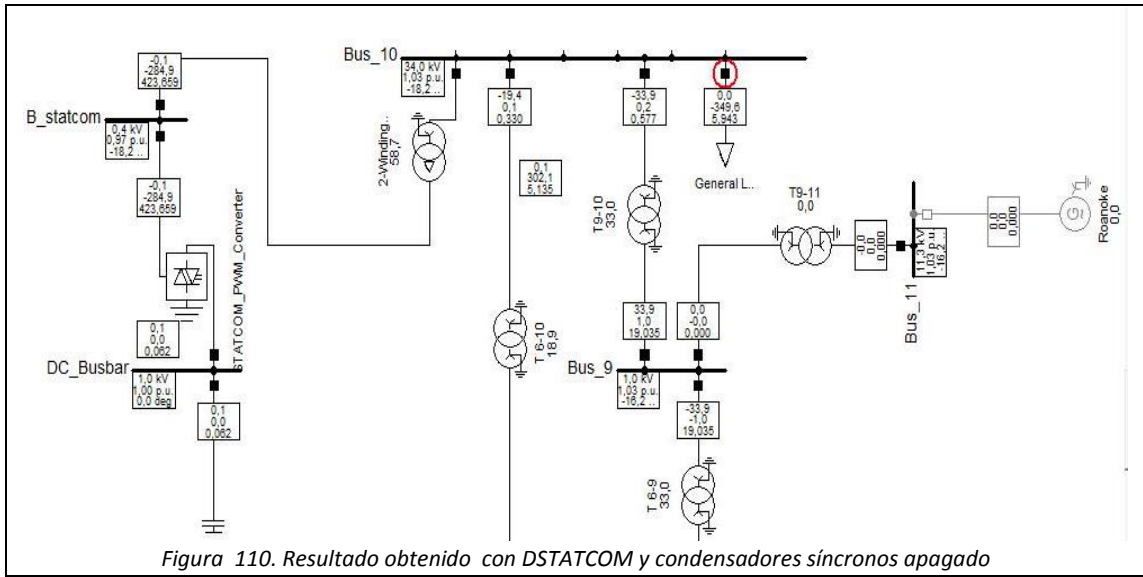


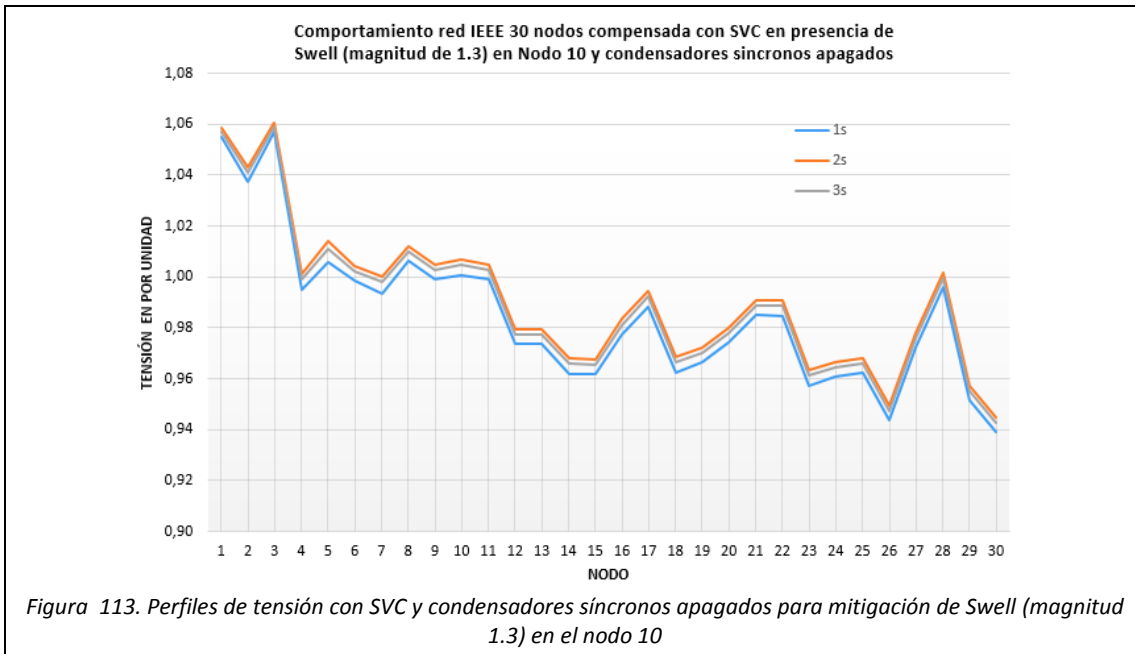
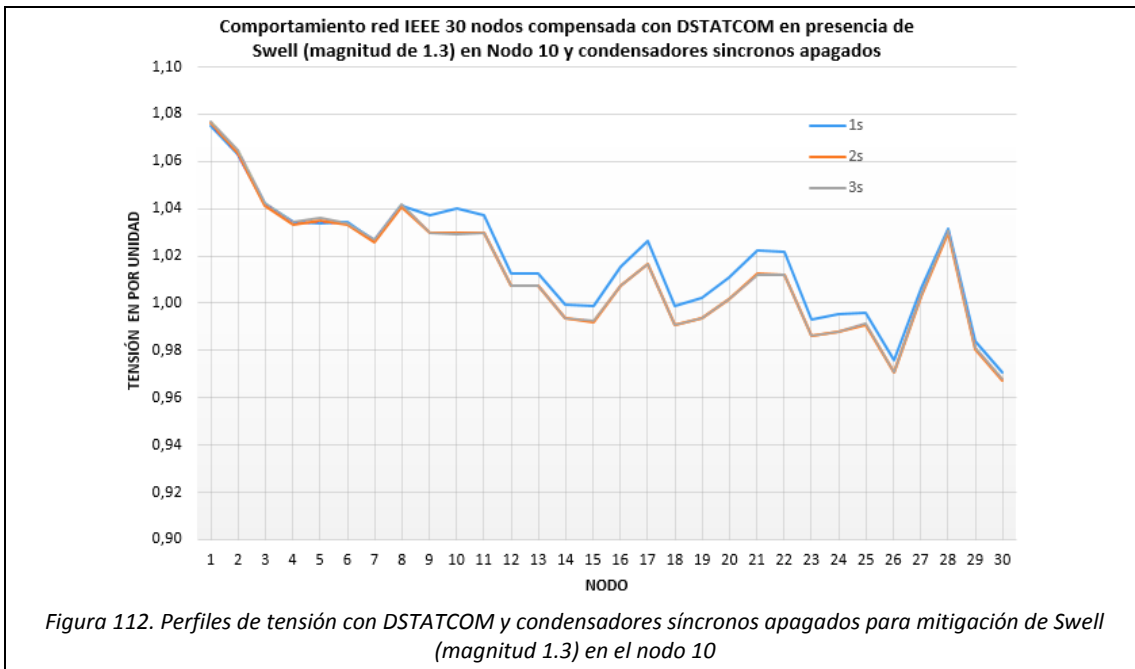
5.5. Discusión de resultados

Al evaluar la red para el caso de un *swell* con magnitud de 1.3 e intentar entender los resultados, ya que se tuvo valores similares de compensación en DigSILENT y MATLAB para el SVC y el DSTATCOM, pero con tensiones por fuera de los rangos esperados, se identificó un problema de inestabilidad de tensión durante la simulación en los condensadores síncronos ubicados en los nodos 11 y 13, lo cual hace que se incremente el valor de tensión y los compensadores no cumplan su objetivo. A manera de ejemplo, en las Figuras 108 y 109 se muestran los resultados de las simulaciones para la mitigación de un *swell* de 1.3 p.u y duración de 3s con SVC y DSTATCOM y la inestabilidad de tensión generada por el condensador síncrono en el nodo 11.



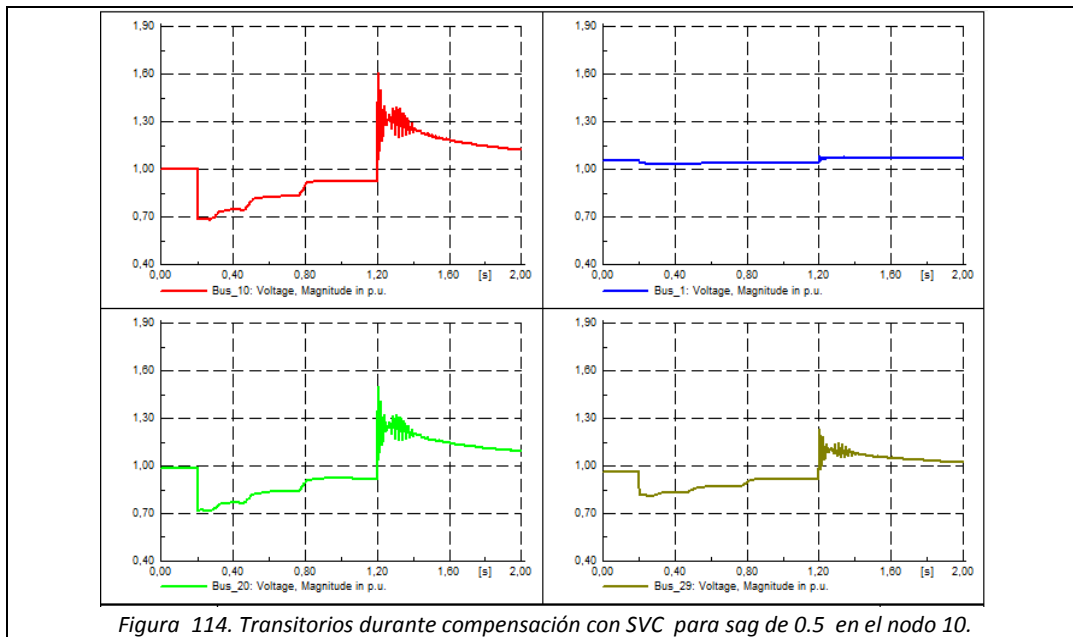
Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, el condensador síncrono es un tipo de generador que se utiliza con el propósito de inyectar reactivos al sistema para controlar la tensión en los nodos, por lo cual se entiende que para elevaciones de tensión (*swells*) no serviría como compensador, ya que lo que se necesita es absorber potencia reactiva y no inyectarla. Para verificar esto, se decidió apagar los condensadores síncronos de los nodos 11 y 13 y se observó que la inestabilidad de tensión desapareció. Los resultados obtenidos de la simulación y los perfiles de tensión al apagar los condensadores se muestran de las figuras 110 a 113.





Otro aspecto que se observó en las simulaciones, fue la presencia de algunos transitorios que sobrepasan los rangos normales de tensión de 0.9 p.u y 1.1 p.u para la mitigación de *sags* en el nodo 10 y 12 con el SVC. En La Figura 114 se muestra el caso mas critico que es el del nodo 10 para la mitigación de un *sag* con magnitud de 0.5 p.u, donde tambien se puede observar el comportamiento de la tensión de otros nodos durante el proceso de compensación con SVC

tales como: Bus_1 (Nodo de generación, Bus_20 (Nodo de Carga, cercano a al nodo compensador) y Bus_29 ((Nodo de Carga, lejano a al nodo compensador)).



5.6. Conclusiones

- Con el desarrollo de este capítulo se da cumplimiento al tercer objetivo: “Evaluar mediante índices soportados en la normatividad colombiana y estándares IEEE el sistema IEEE de 30 nodos al introducir *Sags* y *Swells* y compensación de reactivos”, por lo que se tuvo en cuenta las características de magnitud y duración típicas de huecos de tensión (*sags*) y elevaciones de tensión (*swells*) establecidas en el estándar IEEE 11159:2009 y la norma NTC 5000:2013, así como el rango de tensión en los que se espera que se mantenga la red al incluir la compensación con el *DSTATCOM* y el *SVC* de tal manera que se mejore la calidad de energía de la red.
- Los valores de compensación en DigSILENT fueron similares a los obtenidos en los algoritmos implementados en MATLAB, sin embargo, se presentaron algunas diferencias debido a que los valores de carga introducidos para la generación tanto de los *sags* como de los *swells* en DigSILENT no fueron los mismos que se introdujeron en MATLAB. Estos valores no fueron iguales ya que DigSILENT hace un estudio de estabilidad en el que tiene en cuenta otro aspecto, tal como el comportamiento de los generadores, aspecto que en el estudio de flujo de carga no se tiene en cuenta. Es por ello que los valores de carga fueron ajustados en MATLAB con el fin de generar una caída o una elevación de tensión de igual magnitud a la obtenida en DigSILENT.

- Los niveles de tensión luego de la compensación con *SVC* y *DSTATCOM* para mitigar un *swell* con magnitud de 1.3, no estuvieron dentro de los rangos esperados debido a la que la red cuenta con dos condensadores síncronos ubicados en los nodos 11 y 13 que inestabilizan el sistema e impide que los compensadores cumplan con el objetivo.
- Con el *SVC* se presentaron algunos transitorios al inicio y final de la compensación que sobrepasan los valores o límites típicos de desviación de tensión establecidos en el estándar IEEE 1159 y la norma NTC 5000, lo cuales pueden dispersarse a los nodos afectando la calidad de potencia de la red, pero afectando más a los nodos de carga que a los nodos de generación tal como se pudo observar en la Figura 112.
- La respuesta dinámica del *SVC* es muy lenta comparada con la del *DSTATCOM* para mitigar las variaciones de tensión seleccionadas, a manera de ejemplo para el caso de un *sag* de profundidad de 0.5 p.u. se observó que se demoró en estabilizarse en 1 seg.

CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos y el análisis realizado en los capítulos 3, 4 y 5, dan cumplimiento a los tres objetivos específicos planteados, los cuales a su vez dan cumplimiento al objetivo general el cual es “Evaluar el comportamiento de una red de distribución en presencia de variaciones de tensión de corta duración antes y después de la implementación de compensadores de reactivos *SVC* y *DSTATCOM*, tomando como caso de estudio el sistema IEEE de 30 nodos”.
- Con la función objetivo y la metodología propuesta (Anexo D) para la selección de nodos críticos, se pudo establecer que los nodos 10 y 12 son los que tienen mayor influencia sobre la red.
- Al momento de seleccionar las cargas para la generación de sags y swells en los nodos 10 y 12, el nodo 10 necesitó valores más pequeños de carga para producir las variaciones de tensión, por lo que se comprueba que este es el nodo más crítico del sistema debido a la facilidad que tiene para reproducir un *sag* o un *swell* con menor proporción de carga. Lo cual estaría acorde con lo obtenido con la función objetivo.
- Por medio a una función objetivo que permitió ver las variaciones de los perfiles de tensión durante la falla y algunos criterios de selección como por ejemplo: El nodo no debía ser de generación, no debía ser un nodo con compensación y los niveles de tensión debían estar entre el rango de 11kV y 33 kV fue posible seleccionar los nodos objeto de estudio (Nodo 10 y nodo 12)
- Se tuvo algunos problemas con la generación de los *swells* en DigSILENT, ya que el valor de la carga introducida para la creación de este evento aumentaba drásticamente y esto hacía que afectara el valor de compensación de ambos dispositivos. Sin embargo leyendo el manual se encontró una solución en la configuración del elemento y fue ampliar el rango de tensión para que la carga se comportara de manera constante y así no afectara los resultados esperados, sin embargo, haciendo esta modificación, el mayor valor posible que se pudo obtener fue 1.3 p.u.
- El sistema presentó mejoras en los niveles de tensión en todos los nodos con la implementación de los compensadores *SVC* y *DSTATCOM* para la mitigación de variaciones de tensión seleccionadas en cada uno de los nodos críticos. Sin embargo, para variaciones de tensión con magnitudes de 1.3 p.u. el resultado no estuvo dentro de los rangos de tensión esperados (0.9 p.u. y 1.1 p.u.), en algunos casos se obtuvo valores hasta de 1.13 p.u, debido a la que la red cuenta con dos condensadores síncronos ubicados en los nodos 11 y 13 que inestabiliza el sistema e impide que los compensadores cumplan con el objetivo.

- Cuando se presenta alguna variación de tensión, ya sea un *sag* o un *swell* en alguno de los nodos críticos seleccionados, se ve afectada la calidad del sistema en general en términos de tensión, ya que estas variaciones también se propagan en los demás nodos.
- Para la inclusión de los compensadores *SVC* y *DSTATCOM* en el estudio de flujo de carga por el método de Newton Raphson, fue necesario hacer algunas modificaciones del método básico, tales como un proceso iterativo adicional para el cálculo de la susceptancia variable para el caso del *SVC* o el aumento de la matriz jacobina, como en el caso del *DSTATCOM*.
- Con el algoritmo implementado en MATLAB además de obtener el comportamiento de la red antes y después de la compensación, también se logró obtener un valor aproximado de potencia reactiva que está entregando o absorbiendo el compensador *SVC* y *DSTATCOM*
- La severidad de los *sags* y *swells* puede provocar transitorios al inicio y final de la compensación, tal como se pudo observar en la mitigación de *sags* de 0.5 p.u. y *swells* de 1.3 p.u., lo cual puede afectar la calidad de potencia de la red.
- Los resultados obtenidos de potencia entregada o absorbida por los compensadores en MATLAB fueron cercanos a los valores obtenidos en la simulación en DigSILENT con una diferencia mínima del 0.14% (equivalente a 0.45 MVAR) y máximo del 31.25% (equivalente a 35.61 MVAR). Estas diferencias se presentaron debido a que los valores de carga para generar un *sag* o un *swell* son diferentes en MATLAB y DigSILENT.
- El compensador que presenta el mejor comportamiento para la mitigación de *sags* y *swells* en la red IEEE de 30 nodos tomada como caso de estudio fue el *DSTATCOM*, ya que en un 95.89% de simulaciones se obtuvo perfiles de tensión dentro del rango esperado (0.9 a 1.1 p.u.) y la respuesta fue en el orden de 10 milisegundos, más rápida que la del *SVC* que fue de aproximadamente 1 segundo.

APORTES

Los aportes de este trabajo son los siguientes:

- Se identificaron nodos críticos del sistema a partir de una función objetivo los cuales permiten ver los cambios de tensión en los nodos antes y durante una falla trifásica sólidamente aterrizada, esto con el fin de introducir las variaciones de tensión y los compensadores de reactivos.
- Se simuló la red IEEE 30 nodos en DIgSILENT en la que fue posible generar los *Sags* y *Swells* con las magnitudes y tiempos seleccionados de acuerdo a lo establecido en el estándar IEEE 1159:2009 y la norma NTC 5000:2013, lo que ayudó a entender y analizar el comportamiento de la red en presencia de estas variaciones de tensión.
- Se implementó un algoritmo en MATLAB para la solución de flujos de carga incluyendo los compensadores *SVC* y *DSTATCOM*, el cual permite hacer un dimensionamiento del valor de la potencia entregada o absorbida para mitigar las variaciones de corta duración (*Sags*, *Swells*).
- Se evaluó la red al incluir los compensadores *SVC* y *DSTATCOM* para la mitigación de *Sags* y *Swells* mediante índices soportados en el estándar IEEE 1159:2009 y la norma NTC 5000:2013.

TRABAJOS FUTUROS

Se identifican algunos estudios que pueden ser realizados posteriormente:

- Evaluar el comportamiento para la red IEEE 30 nodos con la inclusión de otros compensadores como el *UPFC*, o con el *SVC* y *DSTATCOM*, pero teniendo en cuenta el modelo de disparo por ángulo y disparo por ángulo con transformador integrado para el caso del *SVC* o el modo de control de la potencia reactiva absorbida y el control de la corriente para el caso del *DSTATCOM*
- Adecuar la red IEEE 30 nodos y los compensadores *SVC* y *DSTATCOM* para evaluar el comportamiento del sistema ante la presencia de fallas asimétricas y otros problemas de calidad de energía tales como fluctuaciones, armónicos, entre otros.
- Evaluar la viabilidad para el diseño e implementación en la vida real, de un compensador *SVC* o *DSTATCOM* con los valores de potencia obtenidos

BIBLIOGRAFÍA

- [1] T. Sutradhar, J. Rudra pal y C. Nandi, «Voltage Sag Mitigation by using SVC,» *International Journal of Computer Applications* , vol. 71, nº 12, pp. 16-20, 2013.
- [2] B. K. Enrique Acha, «A New STATCOM Model for Power Flows Using the Newton–Raphson Method,» *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, vol. 28, pp. 2455 - 2465, 2013.
- [3] D. A. Gutiérrez Casas y O. F. Orjuela Sastoque, Análisis del comportamiento eléctrico del sistema de distribución IEEE de 34 nodos usando un compensador estático de distribución (DSTATCOM) diseñado en ATP/EMTP para la mitigación de sags en la mejora del factor de potencia, Bogotá: Universidad Distrital FJC, 2015.
- [4] E. A. Behzad Kazemtabrizi, «An Advanced STATCOM Model for Optimal Power Flows Using Newton’s Method,» *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, vol. 29, nº 2, pp. 514-525, 2014.
- [5] G. A.K., G. C.P. y G. Singh, «Minimization of voltage sag induced financial losses in distribution systems,» *ELSEVIER-Electric Power Systems Research*, nº 81, pp. 767-774, 2010.
- [6] P. Jyotishi, «Mitigate Voltage Sag/Swell Condition and Power Quality Improvement in Distribution Line Using D-STATCOM,» *International Journal of Engineering Research and Applications*, vol. 3, nº 6, pp. 667-674, 2013.
- [7] A. D.V.N. y N. K. G.V. , «Mitigation of voltage dip and power system oscillations damping using dual STATCOM for grid connected DFIG,» *ELSEVIER-Ain Shams Engineering Journal*, pp. 1-12, 2015.
- [8] IEEE, IEEE Std 1159™-2009.Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, New York: IEEE Power & Energy Society, 2009, p. 91.
- [9] ICONTEC, NTC 5000. Calidad de la potencia eléctrica - CPE. Definciones y terminos fundamentales, Bogotá: ICONTEC, 2013.
- [10] ICONTEC, NTC 5001. Calidad de la potencia eléctrica. Límites y metodología de evaluación en punto de conexión común, Bogotá, 2008.
- [11] J. C. Urrego García y W. C. Molina Gómez , Comportamiento del motor de inducción ante huecos de tensión reales e ideales, Bogota D.C: Universidad Distrital, 2015.
- [12] IEEE Std 1250™-2011. Guide for Identifying and Improving Voltage Quality in Power Systems, New York, 2011.

- [13] IEC, EC 61000-4-30 -2003. Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods, 2003.
- [14] S. Deshmukh, B. Dewani y G. , «A review of Power Quality Problems-Voltage Sags for Different Faults,» *International Journal of Scientific Engineering and Technology*, vol. 2, nº 5, pp. 392-398, 2013.
- [15] V. Ignatova, S. Bacha y P. Granjon, «Space Vector Method for Voltage Dips and Swells Analysis,» *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, vol. 24, nº 4, pp. 2054-2061, 2009.
- [16] M. .. H. .. J. Bollen, «Voltage Sags Characterization Understanding,» de *Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*, Wiley-IEEE Press., 2000, pp. 139 - 251.
- [17] R. Muhammad H. , «ELECTRONICA DE POTENCIA,» 3 ed., PEARSON, 2004, pp. 570-600.
- [18] S. Varma, «FACTS Devices for Stability Enhancements,» *IEEE. International Conference on Green Computing and Internet of Things (ICGCIoT)*, pp. 69-74, 2015.
- [19] F. Pérez A., «Sistemas de transmisión flexible en corriente alterna,» *Actualidad tecnológica*, vol. 4, nº 1, pp. 25-28, 2013.
- [20] B. K. Johnson, «Applications of FACTS,» *IEEE*, pp. 1-2, 2011.
- [21] S. R. Gaigowal y M. M. R. , «Some studies of Distributed Series FACTS Controller to control active power flow through Transmission Line,» *IEEE. International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC)*, pp. 124-128, 2013.
- [22] P. G. . D. I. P. R. y . P. S. H. , «Shunt FACTS Devices for First-Swing Stability Enhancement in Inter-area Power System,» *Third International Conference on Sustainable Energy and Intelligent System*, 2012.
- [23] A. Lashkar, Nabavi Niaki y Kazemi, «Multiobjective Optimal Location of FACTS Shunt-Series Controllers for Power System Operation Planning,» *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, vol. 2, nº 27, pp. 481-490, 2012.
- [24] L. Santander-Hernández y C. Angeles-Camacho, «Implementation of distributed compensation in the transmission lines design (D-FACTS),» *IEEE THIRTY FIFTH CENTRAL AMERICAN AND PANAMA CONVENTION*, 2015.
- [25] E. Naderi, M. Tarafdar Hagh y K. Zare, «Determination of the performance of the Distribution Static Compensator (D-STATCOM) in Distribution Network,» *CIREN*, 2013.
- [26] IEEE Std 1031™-2011. - Guide for the functional specification of transmission Static Var Compensators, New York, 2011.

- [27] E. Acha, C. R. Fuerte Esquivel, H. Ambriz Perez y C. Angeles Camacho, FACTS. Modelling and simulation in power networks, England: John Wiley & Sons Ltd, 2004, p. 421.
- [28] R. Venkateswara y K. Nagesh, «Sensitivity Analysis based Optimal Location and Tuning of Static VAR Compensator using Firefly Algorithm,» *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 7(8), pp. 1201-12010, 2014.
- [29] A. Debnath, J. Rante y C. Nandi, «Stability Enhancement with SVC,» *International Journal of Computer Applications*, vol. 72, nº 5, pp. 19-25, 2013.
- [30] Adepoju, G. A. y Komolafe, O.A, «Analysis and Modelling of Static Synchronous Compensator (STATCOM): A comparison of Power Injection and Current Injection Models in Power Flow Study,» *International Journal of Advanced Science and Technology*, vol. 36, pp. 65-76, 2011.
- [31] R. Zhang, «Flexible AC transmission Systems. Modelling and Control,» Springer, 2006, pp. 27-58.
- [32] D. P. Morán Río, Incorporación de diferentes modos de control de un STATCOM en el análisis de flujos de carga de un Sistema Eléctrico, Valladolid, 2014.
- [33] ECAMEC, «ECAMEC TECNOLOGIA,» 2010. [En línea]. Available: <http://www.ecamec.com/newsletter/notaa0610.html>. [Último acceso: Julio 2016].
- [34] IEC 61000-4-11. Testing and measurement techniques Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests –, 2 ed., 2004, p. 7.
- [35] CREG, «Resolución CREG 065 de 2012. "Por la cual se ordena hacer público un proyecto de resolución de carácter general, que pretende establecer las normas de calidad de la potencia eléctrica aplicables en el Sistema Interconectado Nacional",» Ministerio de Minas y Energía, Bogotá, 2012.
- [36] CREG, «Documento CREG 032 de 2012. "Propuesta de regulación de la calidad de la potencia eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional",» Ministerios de Minas y Energía, 2012.
- [37] B. Ebrahim , F. K. Mohammad y S. Mehran , «Mitigation of Voltage Disturbances Using Dynamic Voltage Restorer Based on Direct Converters,» *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, vol. 24, nº 4, pp. 2676-2683, 2010.
- [38] . O. R. y R. N.A. , «Voltage unbalanced compensation using dynamic voltage restorer based on supercapacitor,» *ELSEVIER. Electrical Power and Energy Systems*, 2010.
- [39] Y. Zhang y J. V. Milanovic, «Global Voltage Sag Mitigation With FACTS- Based Devices,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, nº 4, pp. 2842-2850, 2010.

- [40] S. Jazebi, S. H. Hosseinian y B. Vahidi, «DSTATCOM allocation in distribution networks considering reconfiguration using differential evolution algorithm,» *Energy Conversion and Management*, vol. 52, nº 7, pp. 2777-2783, 2011.
- [41] A. Ghorbani , M. Khederzadeh y . B. Mozafari, «Impact of SVC on the protection of transmission lines,» *ELSEVIER. Electrical Power and Energy Systems*, vol. 42, nº 1, pp. 702-709, 2012.
- [42] O. I. S. C. S. C. y J. M. , «A review of voltage dip mitigation techniques with distributed generation in electricity networks,» *ELSEVIER. Electric Power Systems Researc.*, vol. 103, pp. 28-36, 2013.
- [43] M. Banaei y E. S. , «Mitigation of voltage sag, swell and power factor correction using solid-state transformer based matrix converter in output stage,» *ELSEVIER.*, vol. 53, nº 3, pp. 1-10, 2014.
- [44] S. Ganguly, «Impact of Unified Power-Quality Conditioner Allocation on Line Loading, Losses, and Voltage Stability of Radial Distribution Systems,» *Power Delivery, IEEE Transactions*, vol. 29, nº 4, pp. 1859-1867, 2014.
- [45] H. E. Rojas Cubides, A. S. Cruz Bernal y H. D. Rojas Cubides, «Analysis of voltage sag compensation in distribution systems using a multilevel DSTATCOM in ATP/EMTP,» *DYNA*, vol. 82, pp. 26-36, 2015.
- [46] M. Hameed Ali y R. Narende, «Mitigation of Voltage SAG and Voltage Swells By Controlling the DSTATCOM,» *IJEE - International Journal of Ethics in Engineering & Management Education*, vol. 2, nº 1, pp. 20-24, 2015.
- [47] R. Burungale y L. C. R, «DSTATCOM Performance for Voltage Sag, Swell Mitigation,» *IJRSET- International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, vol. 5, nº 6, pp. 11818-11826, 2016.
- [48] R. Christie, «Power Systems Test Case Archive - 30 Bus Power Flow Test Case,» 1993. [En línea]. Available: https://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf30/pg_tca30bus.htm. [Último acceso: 10 02 2016].
- [49] D. F. Gonzales-Longatt, «IEEE 30 bus Test - fglongatt.org. Creating the future energy systems,» [En línea]. Available: http://fglongatt.org/OLD/Test_Case_IEEE_30.html. [Último acceso: 10 02 2016].
- [50] L. F. Ochoa y . G. P. Harris, «Minimizing Energy Losses: Optimal Accommodation and Smart Operation of Renewable Distributed Generation,» *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, vol. 26, pp. 198-205, 2011.

[51] DigSILENT Power Factory , User Manual DigSILENT, 2014.

[52] DigSILENT Power Factory , SVS - Static Var System, Power Factory , 2014.

ANEXOS

ANEXO A. Ecuaciones SVC en flujos de carga por el método de Newton Raphson

En este anexo se definen las formulas o ecuaciones empleadas para la solución del flujo de carga por el método de Newton Raphson incluyendo el compensador SVC, las cuales se tuvo en cuenta para el desarrollo del algoritmo implementado en MATLAB (SVC.m)

A.1. Con referencia en la Figura 5, la corriente consumida por el SVC es:

$$I_{SVC} = jB_{SVC}V_k \quad (1)$$

A.2. La potencia reactiva consumida por el SVC, que es también potencia reactiva inyectada es:

$$Q_{SVC} = Q_k = -V_k^2 B_{SVC} \quad (2)$$

A.3. La ecuación linealizada está dada por la ecuación (3) donde la susceptancia variable Bsvc es equivalente:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{SVC} \\ \Delta Q_{SVC} \end{bmatrix}^{(k)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & Q_{SVC} \end{bmatrix}^{(k)} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta B_{SVC} / B_{SVC} \end{bmatrix}^{(k)} \quad (3)$$

A.4. Al final de la iteración (i), la derivación variable de susceptancia Bsvc es actualiza de acuerdo con:

$$B_{SVC}^{(k)} = B_{SVC}^{(k-1)} + \left(\frac{\Delta B_{SVC}}{B_{SVC}} \right)^{(k)} B_{SVC}^{(k-1)} \quad (4)$$

Una vez que el nivel de compensación se ha calculado entonces el ángulo de disparo del tiristor se puede calcular. Sin embargo, el cálculo adicional requiere una solución iterativa porque la susceptancia SVC y ángulo de disparo del tiristor son no linealmente relacionadas, este nuevo cálculo corresponde a otro modelo matemático "Modelo del ángulo de disparo" el cual está por fuera del alcance de este trabajo.

ANEXO B. Ecuaciones *DSTATCOM* en flujos de carga por el método de Newton Raphson

En este anexo se definen las formulas o ecuaciones empleadas para la solución del flujo de carga por el método de Newton Raphson incluyendo el compensador de reactivos *DSTATCOM*, las cuales se tuvieron en cuenta para el desarrollo del algoritmo implementado en MATLAB (*DSTATCOM.m*)

B.1 Ecuación potencias netas calculadas con *DSTATCOM*

$$P_{Ndst}(V_{dst}, \delta_{dst}) = V_k^2 G_{dst} - V_k V_{dst} (G_{dst} \cos(\theta_k - \delta_{dst}) + B_{dst} \sin(\theta_k - \delta_{dst}))$$

$$Q_{Ndst}(V_{dst}, \delta_{dst}) = -V_k^2 B_{dst} - V_k V_{dst} (G_{dst} \sin(\theta_k - \delta_{dst}) - B_{dst} \cos(\theta_k - \delta_{dst}))$$

B.2 Ecuación deltas de potencia y tensión para *DSTATCOM*

$$\Delta P_{dst} = P_{Ndst} - P_{Ndst}(V_{dst}, \delta_{dst})$$

$$\Delta V_{control} = V_k - V_{control}$$

B.3. Elementos de la matriz funcional (Jacobiano)

Las ecuaciones de las submatrices H, N, J, L están modificadas cuando se incluye el compensador se ubica en el nodo i (solo se modifica la diagonal). Las submatrices no definidas aquí, son cero.

B.3.1. Submatriz H

$$H_{idst} = \frac{\partial P_{Ni}}{\partial \theta_k} = V_k V_{dst} (G_{dst} \sin(\theta_k - \delta_{dst}) - B_{dst} \cos(\theta_k - \delta_{dst}))$$

B.3.2. Submatriz N

$$N_{idst} = \frac{\partial P_{Ni}}{\partial V_k} V_k = 2V_k G_{dst} - V_{dst} (G_{dst} \cos(\theta_k - \delta_{dst}) + B_{dst} \sin(\theta_k - \delta_{dst}))$$

B.3.3. Submatriz J

$$J_{idst} = \frac{\partial Q_{Ni}}{\partial \theta_k} = -V_k V_{dst} (G_{dst} \cos(\theta_k - \delta_{dst}) + B_{dst} \sin(\theta_k - \delta_{dst}))$$

B.3.4. Submatriz L

$$L_{idst} = \frac{\partial Q_{Ni}}{\partial V_k} V_k = -2V_k B_{dst} - V_{dst} (G_{dst} \sin(\theta_k - \delta_{dst}) - B_{dst} \cos(\theta_k - \delta_{dst}))$$

B.3.5. Submatriz A

$$A_{idst} = \frac{\partial P_{Ni}}{\partial \delta_{dst}} = -V_k V_{dst} [G_{dst} \text{Sen}(\theta_k - \delta_{dst}) - B_{dst} \text{Cos}(\theta_k - \delta_{dst})]$$

B.3.6. Submatriz B

$$B_{idst} = \frac{\partial P_{Ni}}{\partial V_{dst}} V_{dst} = -V_k V_{dst} [G_{dst} \text{Cos}(\theta_k - \delta_{dst}) + B_{dst} \text{Sen}(\theta_k - \delta_{dst})]$$

B.3.7. Submatriz C

$$C_{idst} = \frac{\partial Q_{Ni}}{\partial \delta_{dst}} = V_k V_{dst} [G_{dst} \text{Cos}(\theta_k - \delta_{dst}) + B_{dst} \text{Sen}(\theta_k - \delta_{dst})]$$

B.3.8. Submatriz D

$$D_{idst} = \frac{\partial Q_{Ni}}{\partial V_{dst}} V_{dst} = -V_k V_{dst} [G_{dst} \text{Sen}(\theta_k - \delta_{dst}) - B_{dst} \text{Cos}(\theta_k - \delta_{dst})]$$

B.3.9. Submatriz E

$$E_{idst} = \frac{\partial P_{dst}}{\partial \theta_k} = V_k V_{dst} [G_{dst} \text{Sen}(\theta_k - \delta_{dst}) + B_{dst} \text{Cos}(\theta_k - \delta_{dst})]$$

B.3.10. Submatriz F

$$F_{idst} = \frac{\partial P_{dst}}{\partial V_k} V_k = -V_k V_{dst} [G_{dst} \text{Cos}(\theta_k - \delta_{dst}) - B_{dst} \text{Sen}(\theta_k - \delta_{dst})]$$

B.3.11. Submatriz G

$$G_{idst} = \frac{\partial P_{dst}}{\partial \delta_{dst}} = -V_k V_{dst} [G_{dst} \text{Sen}(\theta_k - \delta_{dst}) + B_{dst} \text{Cos}(\theta_k - \delta_{dst})]$$

B.3.12. Submatriz I

$$I_{idst} = \frac{\partial P_{dst}}{\partial V_{dst}} = 2V_{dst} G_{dst} - V_k (G_{dst} \text{Cos}(\theta_i - \delta_{dst}) - B_{dst} \text{Sen}(\theta_i - \delta_{dst}))$$

B.3.13. Submatriz M

$$M_{idst} = \frac{\partial V_{control}}{\partial V_k} V_k = 1$$

ANEXO C. Modelamiento del sistema IEEE 30 Nodos en DigSILENT

En este anexo se hace una breve descripción de cómo se modela en el programa DigSILENT cada uno de los elementos que conforman la red.

C.1. Barras (nodos)

Lo primero que se debe insertar para construir la red en DigSILENT son las barras, que son la representación física de lo que viene siendo los nodos en los sistemas eléctricos de potencia. Los datos que pide el programa para la configuración de este elemento son muy básicos como por ejemplo tensiones de línea y que tipo de sistema es (DC o AC). A partir de esta información se configura cada una de las barras tal como se muestra en la Figura 115 que es la edición del nodo 1, cuyo valor de tensión es de 132 kV.

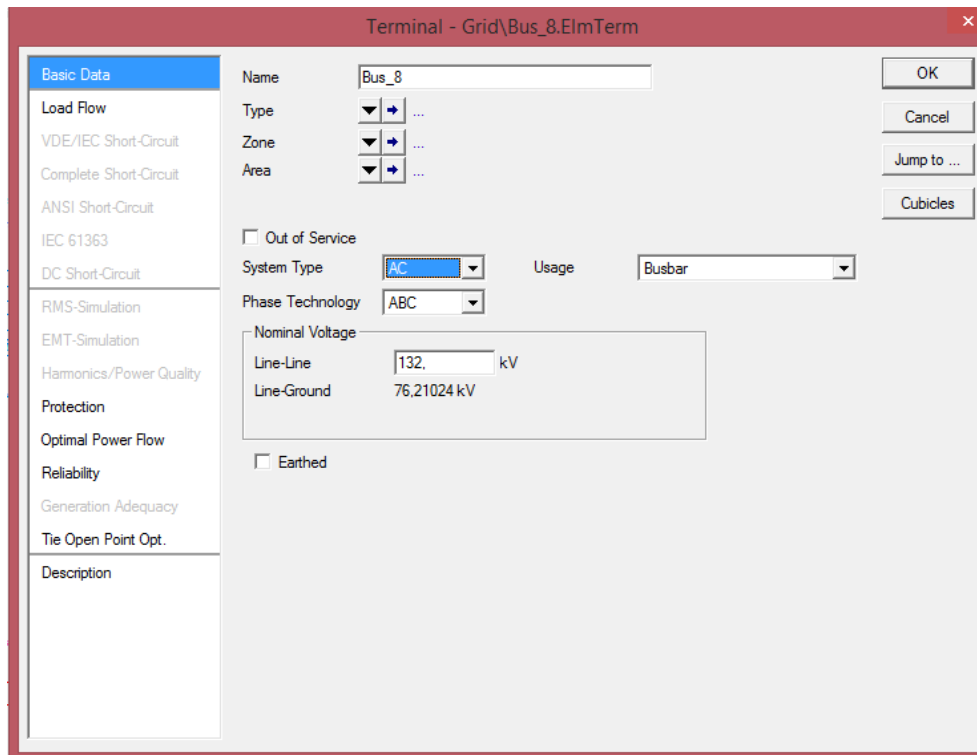


Figura 115. Configuración de los parámetros de una barra (nodo)

C.2. Líneas

Para el modelado de las líneas, el programa permite implementar dos modelos (modelo PI y modelo de líneas cortas para distribución), y del cual se selecciona el modelo PI. Luego de esto se introducen los valores de impedancias reales de la línea por kilómetro (inductancia, resistencia y susceptancia si aplica), que a manera de ejemplo se muestra la configuración de la línea que va desde el nodo 2 al 6 tal como se puede observar en las Figuras 116 y 117 y cuyos valores reales se encuentran en la Tabla 34.

Tabla 34. Parámetros línea 2-6

Nodo S	Nodo L	R [p.u]	X [p.u]	B [p.u]	R [Ω]	X [Ω]	B [Ω]	V Base	S Base	Z Base
2	6	0,0581	0,1763	0,0374	10,12334	30,71851	214,64647	132	100	174,24

The screenshot shows the 'Line Type - Equipment Type Library\L132(2-6).TypLne' dialog box. The 'Basic Data' tab is selected. The parameters are as follows:

- Name: L132(2-6)
- Rated Voltage: 132 kV
- Rated Current: 1 kA
- Nominal Frequency: 60 Hz
- Cable / OHL: Overhead Line
- System Type: AC
- Phases: 3
- Number of Neutrals: 0
- Parameters per Length 1,2-Sequence:
 - AC-Resistance R(20°C): 10,12334 Ohm/km
 - Reactance X': 30,71885 Ohm/km
- Parameters per Length Zero Sequence:
 - AC-Resistance R0': 10,12334 Ohm/km
 - Reactance X0': 30,71885 Ohm/km

Figura 116. Configuración de los parámetros de una línea. Datos básicos

The screenshot shows the 'Line Type - Equipment Type Library\L132(2-6).TypLne' dialog box with the 'Load Flow' tab selected. The parameters are as follows:

- Max. Operational Temperature: 80 degC
- AC-Resistance R(20°C): 10,12334 Ohm/km
- Conductor Material: Aluminium
- Parameters per Length 1,2-Sequence:
 - Susceptance B': 214,64 uS/km
 - Ins. Factor: 0
- Parameters per Length Zero Sequence:
 - Susceptance B0': 214,64 uS/km
 - Ins. Factor: 0

Figura 117. Configuración de los parámetros de una línea. Susceptancia

C.3. Transformadores

La configuración de los transformadores en DigSILENT es más compleja, es decir requiere la mayoría de las componentes que describen el comportamiento del transformador (Tensión del devanado primario y secundario, reactancias, tipo de conexión de los dos devanados, potencia base, entre otros).

Algunas de las variables que no se encuentran en la información suministrada por la IEEE son variables que por defecto se encuentran en el programa (tipo de saturación y factor de clasificación), por lo cual se toma la decisión de dejar esos valores ya que no aportan cambios significativos al momento de hacer un estudio de flujo de carga o cortocircuito. A manera de ejemplo los datos del transformador entre el nodo 6 y 10 se encuentran en la Tabla 35 y que son necesarias para modelar el transformador en el programa, asimismo la configuración en DigILENT se puede observar en la Figura 118.

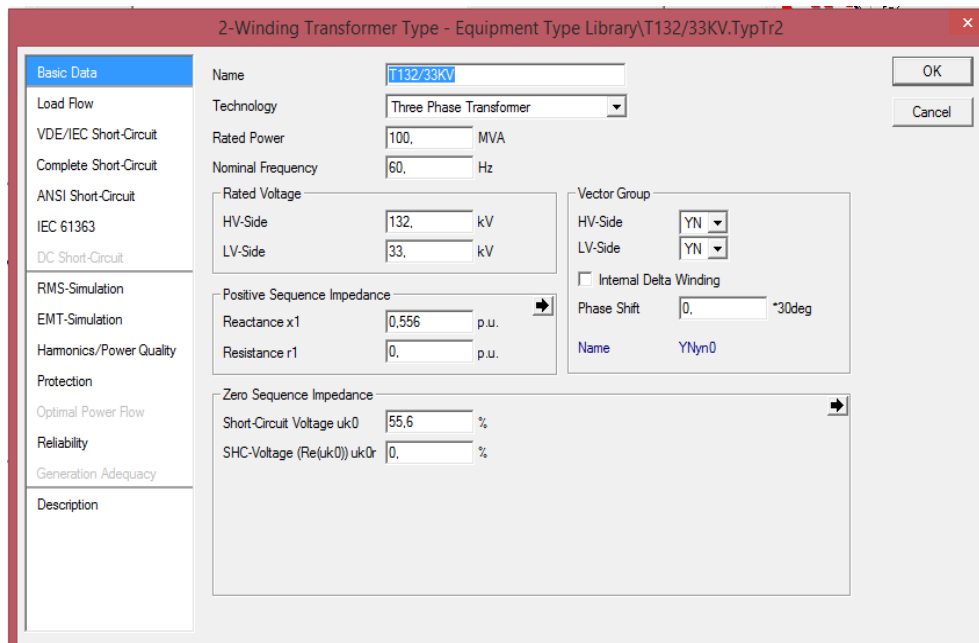


Figura 118. Configuración de los parámetros de un transformador

Tabla 35. Parámetros del transformador entro nodo 6 y 10

Nombre Bus	Nodos	V AT nominal [kV]	V BT nominal [kV]	V [p.u.]	Pnominal [MVA]	X1 [p.u.]	R1'' [p.u.]	Pg [MW]	Tipo de Conexión
Glen Lyn	6-10	132	33	1,060	100	0.556	0	260,2	Yn-Yn

C.4. Generadores

DigSILENT tiene la opción de seleccionar una maquina sincrónica, el cual tiene dos opciones de funcionamiento (motor síncrono y generador síncrono), esta opción se encuentran en la venta principal de edición del elemento. Luego de haber seleccionado la opción de generador, se procede a configurar los parámetros representativos del funcionamiento de este, donde hay dos formas: uno es seleccionar los generadores que se encuentran en la librería que sería de tipo global y los parámetros ya quedan establecidos por defecto y la otra configuración se hace por definición del usuario.

Los parámetros que se deben editar para los generadores que están en el modelo de IEEE son: Potencia nominal, tensión nominal, factor de potencia, tipo de conexión Y o Δ , reactancias propias de la maquina x_d' y x_d'' , potencia activa y reactiva entregada por la maquina (Potencia de despacho), tensión en valores p.u, modelo de control (tensión o potencia), configuración de maquina como de referencia (slack)

Para modelar cada uno de los generadores se deben digitar los datos mencionados anteriormente en la ventana de configuración de la maquina sincrónica del programa, que a manera de ejemplo se hace la configuración del generador del bus 1, cuyos datos configuración se pueden observar en la Tabla 36 y las configuración en las Figuras 119 y 120.

Tabla 36. Parámetros del generador 1

Nombre Bus	Bus	Tipo	V nominal [kV]	V [p.u.]	θ	Pnominal [MW]	FP	x_d' [p.u.]	x_d'' [p.u.]	Pg [MW]	Qg [Mvar]
Glen Lyn	1	Slack	132	1,060	0,00	400,0	0,8	0.2	0.2	260,2	-16,1

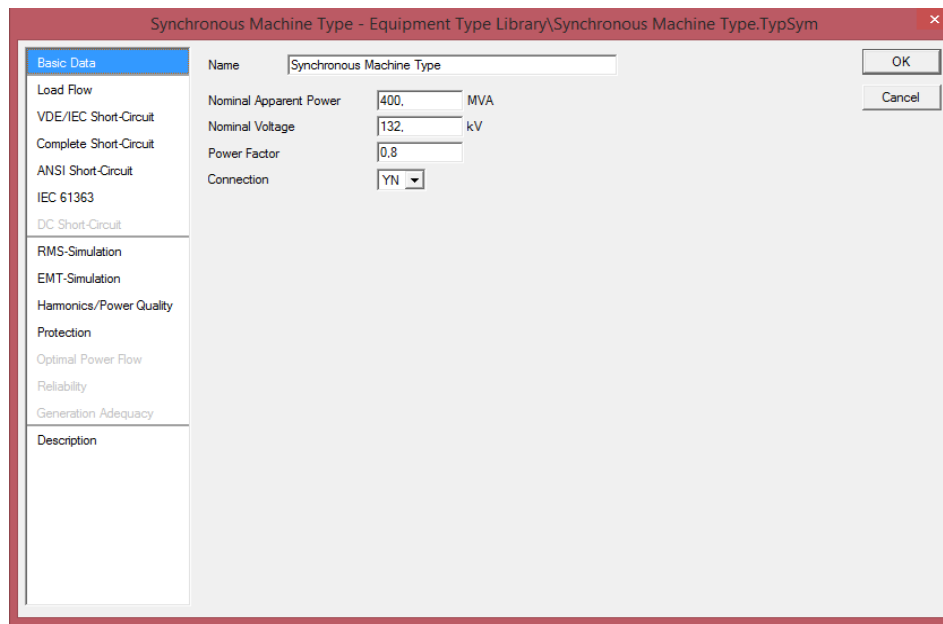


Figura 119. Configuración de los parámetros básicos de un generador

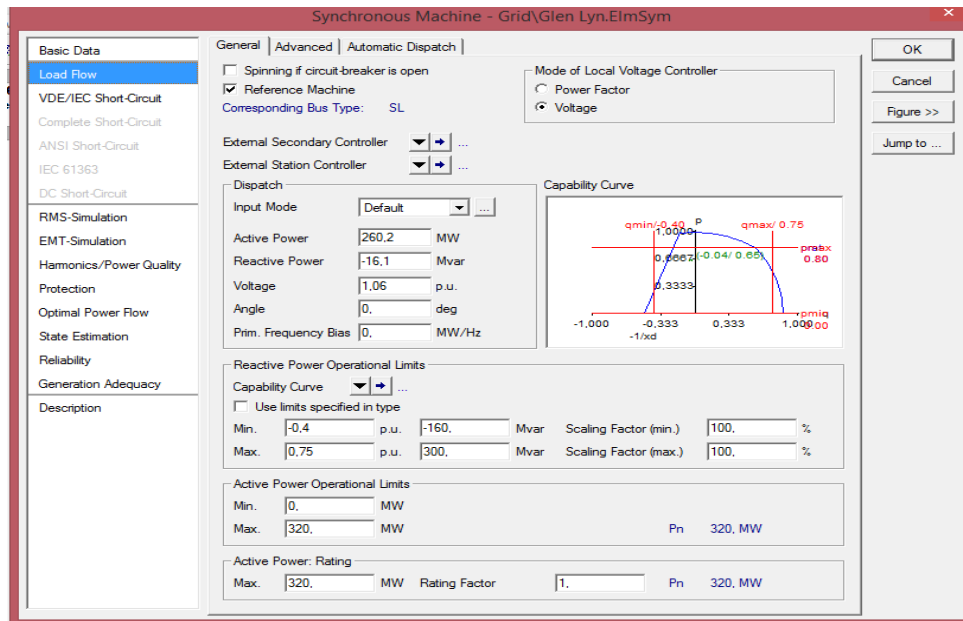


Figura 120. Configuración de los parámetros de despacho de un generador.

C.5. Cargas

La configuración de las cargas en el simulador es más sencilla que en los anteriores elementos, debido a que solo se debe introducir que tipo de carga es (balanceada o desbalanceada), la potencia activa y reactiva. En la Tabla 37 y la figura 121 se pueden observar los datos y configuración de la carga 29 en DigSILENT.

Tabla 37. Datos de la carga 29 de la red

Nombre Bus	Bus	Tipo de Bus	Pd [MW]	Qd [Mvar]
Bus 29	29	PQ	2,4	0,9

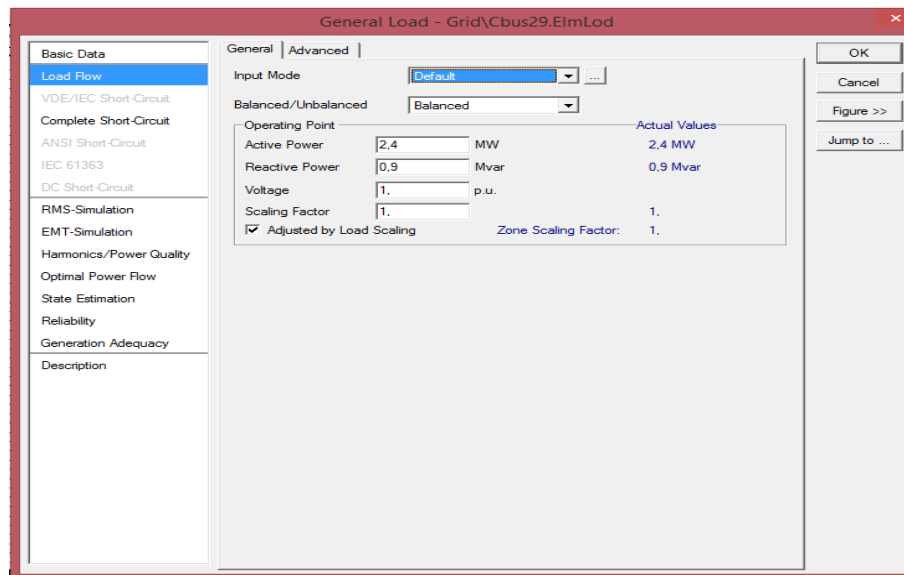


Figura 121. Configuración de los parámetros de una carga

C.6. Banco de condensadores

Debido a que el banco de condensadores siempre entrega una potencia reactiva constante, se decide configurar un generador síncrono que inyecte esta potencia a la red, por lo tanto la configuración de los parámetros es igual que el que se explicó anteriormente en el ítem de generadores, pero que para que se comporte como un condensador se configura solamente para que el despacho del generador sea potencia reactiva.

C.7. SVC

La configuración completa se puede ver en el manual de DigSILENT [51], en la librería del simulador ya se encuentra este dispositivo. Los parámetros a configurar principalmente son: los valores de reactancia, la capacidad máxima de reactancia, la capacidad de los capacitores y el número total de capacitores, estos parámetros se pueden observar con más detalle en [52]. Para el estudio de la red, a manera de ejemplo, los parámetros del nodo 10 se incluyeron tal como se muestra en la figura 122.

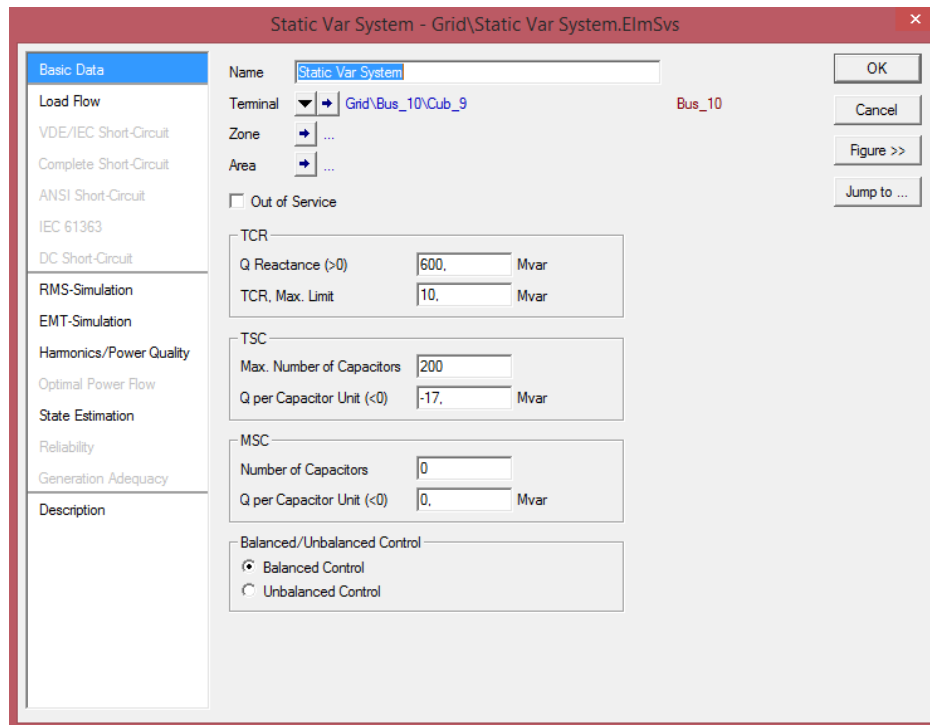


Figura 122. Configuración de los parámetros básicos del SVC

La configuración adicional es la del modelo compuesto, que ayudará a comprender el comportamiento del dispositivo en el transcurso del tiempo cuando es sometido a una variación de tensión, por lo tanto se selecciona el modelo dinámico del control de tensión del SVC **svcSVCGN4** que está en la librería de macros de modelos (*model frame*) de DigSILENT.

Name		svcCSVGN4
Model Definition		...ned Models\Models\svc_CSvGN4
<input type="checkbox"/> Out of Service		<input type="checkbox"/> A-stable integration algorithm
		Parameter
▶Vov	Override Voltage [p.u.]	1,4
K	Controller Gain [p.u.]	5,
T4	Filter 2 Delay Time Constant [s]	0,03
T2	Filter 2th Derivative Time Constant [s]	0,09
T3	Filter 1 Delay Time Constant [s]	1,1
T1	Filter 1th Derivative Time Constant [s]	0,09
T5	Output Filter Time Constant [s]	0,0001
Rmin	Reactor Minimum [MVA]	0,1
Vmin	Controller Minimum Limit [p.u.]	-70,
Vmax	Controller Maximum Limit [p.u.]	70,

Figura 123. Configuración de los parámetros del control del SVC

Luego de haber configurado el control, se procede a editar el modelo compuesto como por ejemplo el nodo que va a controlar, el modelo dinámico del control de tensión, el elemento que de SVC que esta en la red y la interfaz del SVC donde se configuran algunos parametros de tiempo de los tiristores. Esta configuración se pude observar en la Figura 124 y el modelo dinámico en la Figura 125.

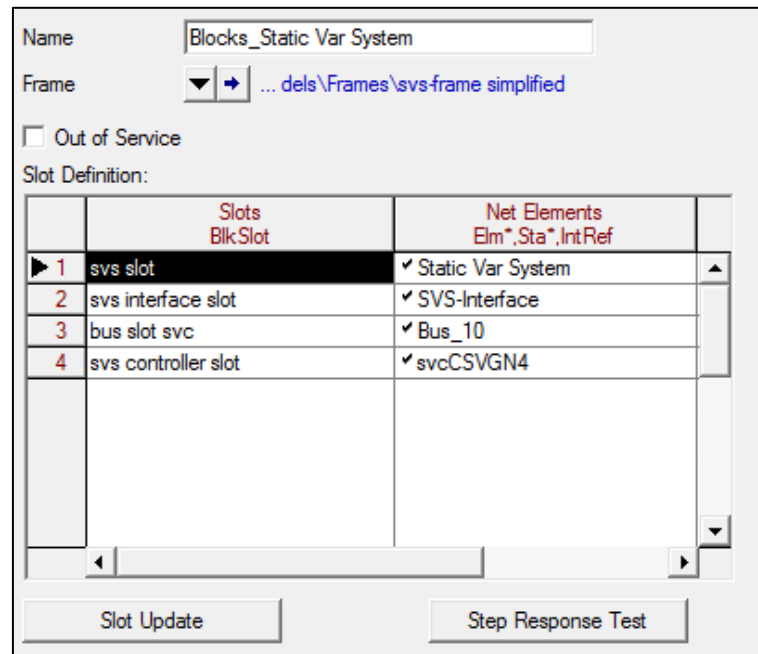


Figura 124. Configuración del modelo compuesto

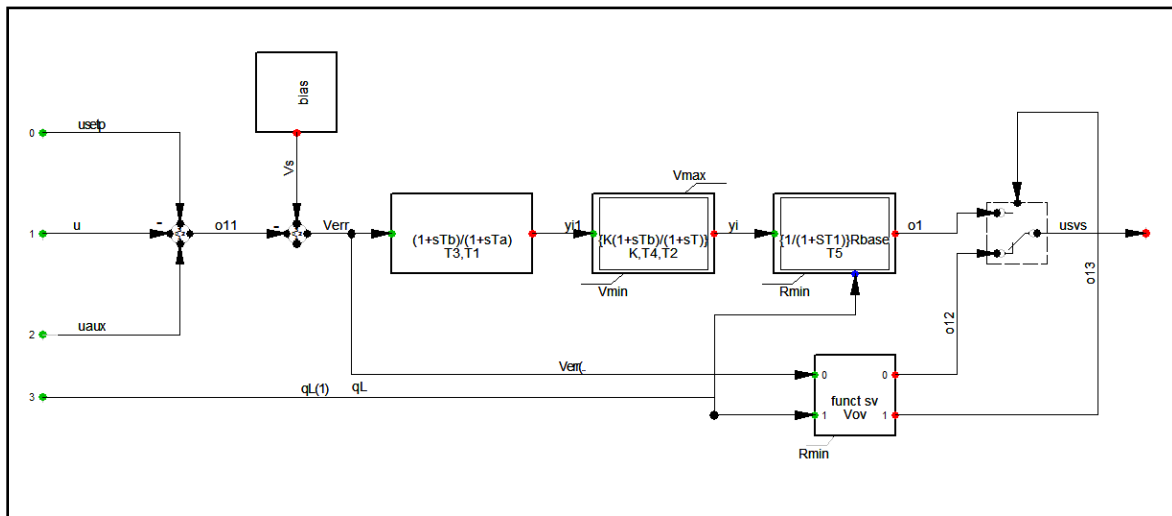


Figura 125. Modelo dinámico del control de tensión del SVC en DigSILENT

Finalmente se configuran los tiempos en que actúan los tiristores para el control de tensión en la interfaz del SVC como se puede observar en la Figura 126.

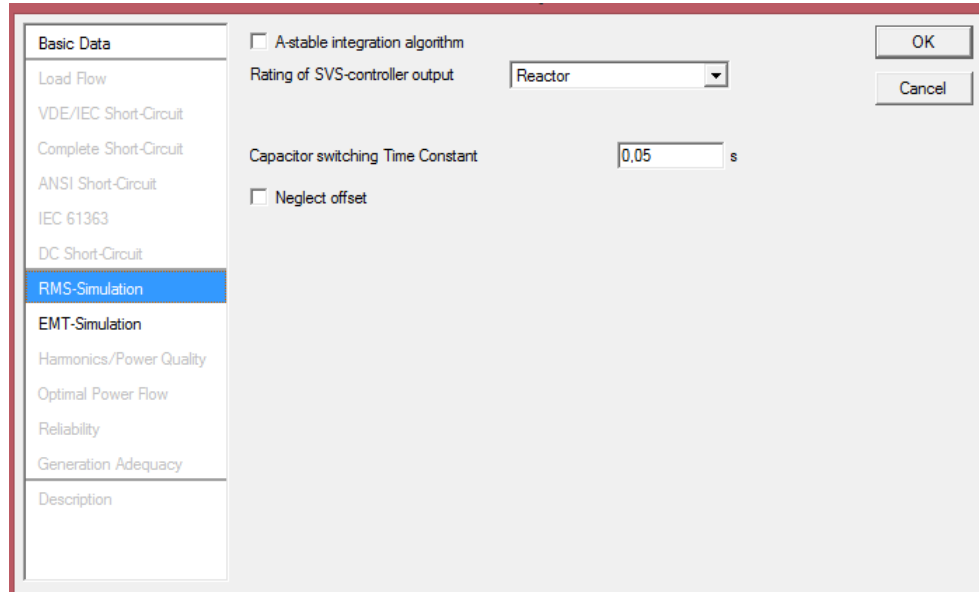


Figura 126. Configuración de la interfaz del SVC

C.8. *DSTATCOM*

Para el *DSTATCOM*, la configuración se hace uniendo todos los elementos que lo conforman como el transformador, el convertidor, la impedancia shunt y elementos internos que determinan el comportamiento del dispositivo. A continuación se hace una breve descripción de la configuración de los diferentes elementos del *DSTATCOM*.

C.8.1. Impedancia Shunt

Para este elemento solo se debe configurar la potencia reactiva, la cual se pone un valor de 500 Mvar debido a que para la generación de huecos tensión en los nodos se obtuvo un valor de 339 Mvar, esto se hace con el fin de que el compensador logre entregar o consumir este valor y mitigue los efectos que produce la carga.

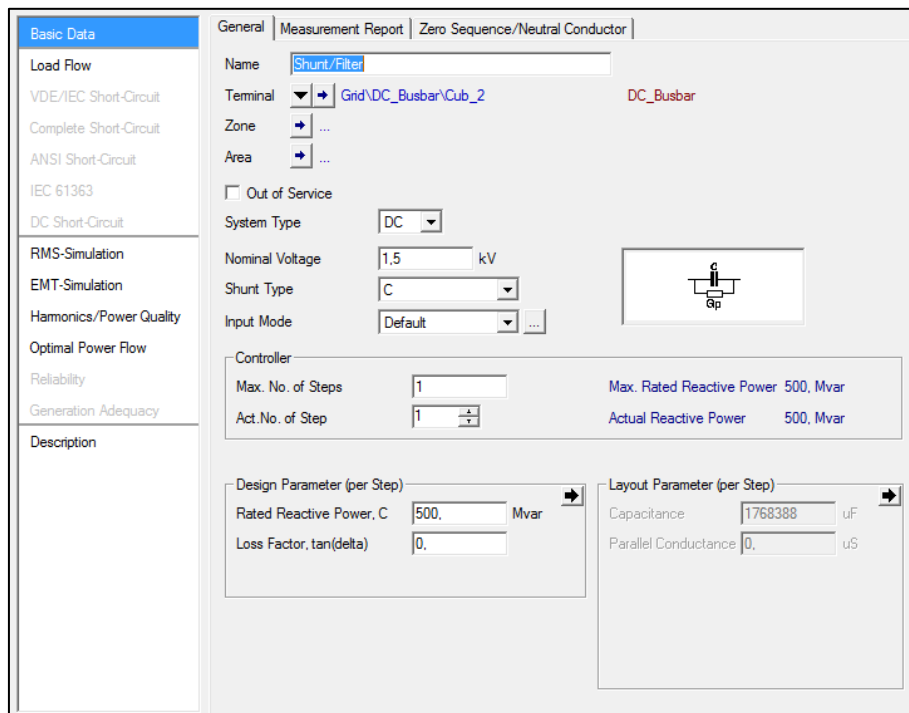


Figura 127. Configuración de los parámetros de la impedancia Shunt

C.8.2. Convertidor DC/AC

Para este elemento se deben configurar los terminales que están definidos como tensiones DC o AC (AC para la conexión con el transformador y DC para la barra que contiene la impedancia Shunt) así como los valores de tensión a los que opera en cada terminal. Luego se configura la potencia máxima de operación del convertidor, que va a ser la misma de la impedancia Shunt y por último se debe poner el tipo de modulación (sinusoidal o rectangular) o si no tiene modulación. Para el sistema de potencia se configuró como se muestra en la figura 128.

C.8.3. Transformador *DSTATCOM*

Anteriormente se explicó la configuración de este dispositivo (anexo D.3.), lo único que cambia son los niveles de tensión de operación los cuales serán de 33kV para conexión con la red y 0,4kV que conecta con el convertidor.

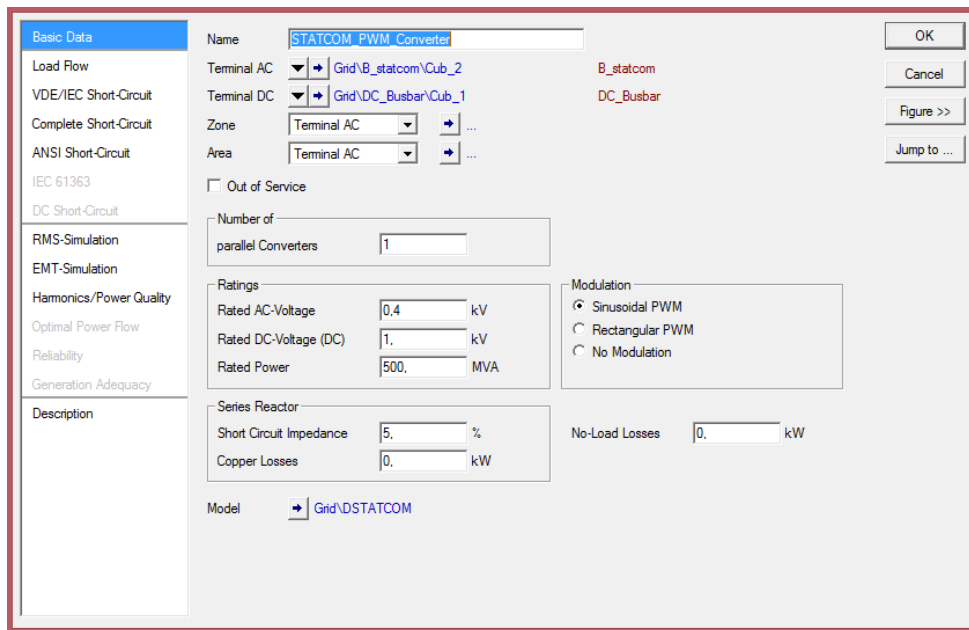


Figura 128. Configuración de los parámetros del convertidor

C.8.4. Medidores de tensión y de potencia

Es necesario implementar estos dispositivos en los terminales que conforman el *DSTATCOM* para que el control tenga un correcto funcionamiento. Estos medidores miden la tensión que hay entre el lado AC del convertidor y el DC y el medidor de potencia mide la potencia reactiva que hay en el lado de baja tensión (0,4 kV) del transformador, estas variables son utilizadas por el control. En las Figuras 129 y 130 se muestra la configuración de estos dos dispositivos para el *DSTATCOM* implementado en la red.

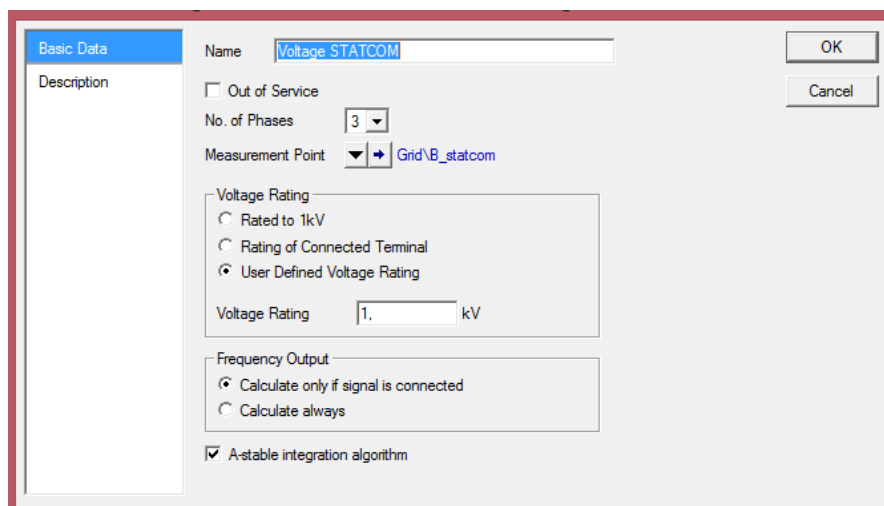


Figura 129. Configuración de los parámetros del medidor de tensión

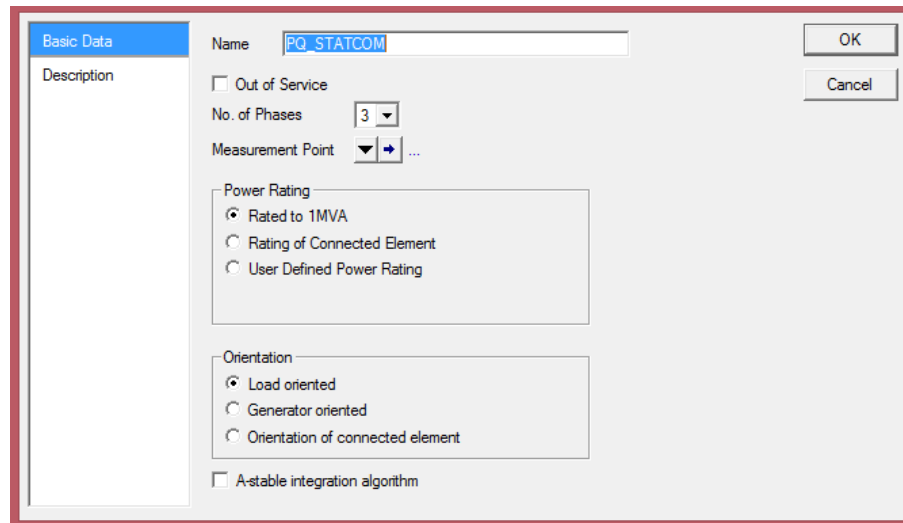


Figura 130. Configuración de los parámetros del medidor de potencia

C.8.5. Control de tensión del *DSTATCOM*

Al igual que el SVC la configuración de los parámetros del control son iguales para el nodo 10 y el 12 con la finalidad de tener un punto de comparación entre los dos análisis. En la figura 131 se muestran los datos que se configuraron para el control.

	Parameter	
▶ Kp	Active Power Control Gain [p.u.]	15
▶ Tp	Active Power Control Time Constant [s]	0,002
▶ Kv	Voltage Control Gain [p.u.]	5
▶ Tv	Voltage Power Control Time Constant [s]	0,002
▶ droop		0,01
▶ Trdc		0,001
▶ Trac		0,01
▶ i_min		-2,67
▶ i_max		2,67

Figura 131. Configuración de los parámetros del control del *DSTATCOM*

En la conexión interna para el *DSTATCOM* al igual que el SVC, se debe hacer uso de una interfaz que es denominada modelos compuestos (“*Composite Model*”), que contiene los medidores de tensión DC y AC, medidor de fase, medidor potencia activa y reactiva, el convertidor que va a controlar y el modelo dinámico del control tensión del *DSTATCOM*. La configuración de los

parámetros del modelo compuesto del *DSTATCOM* se observa en la Figura 132 y el modelo dinámico en la Figura 133.

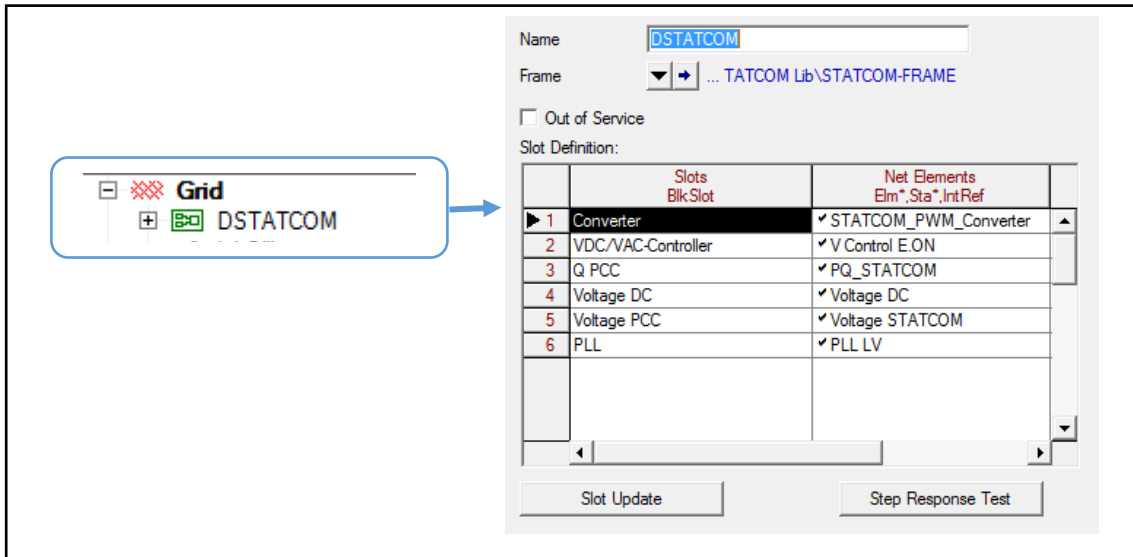


Figura 132. Configuración de los parámetros del modelo compuesto del *DSTATCOM*

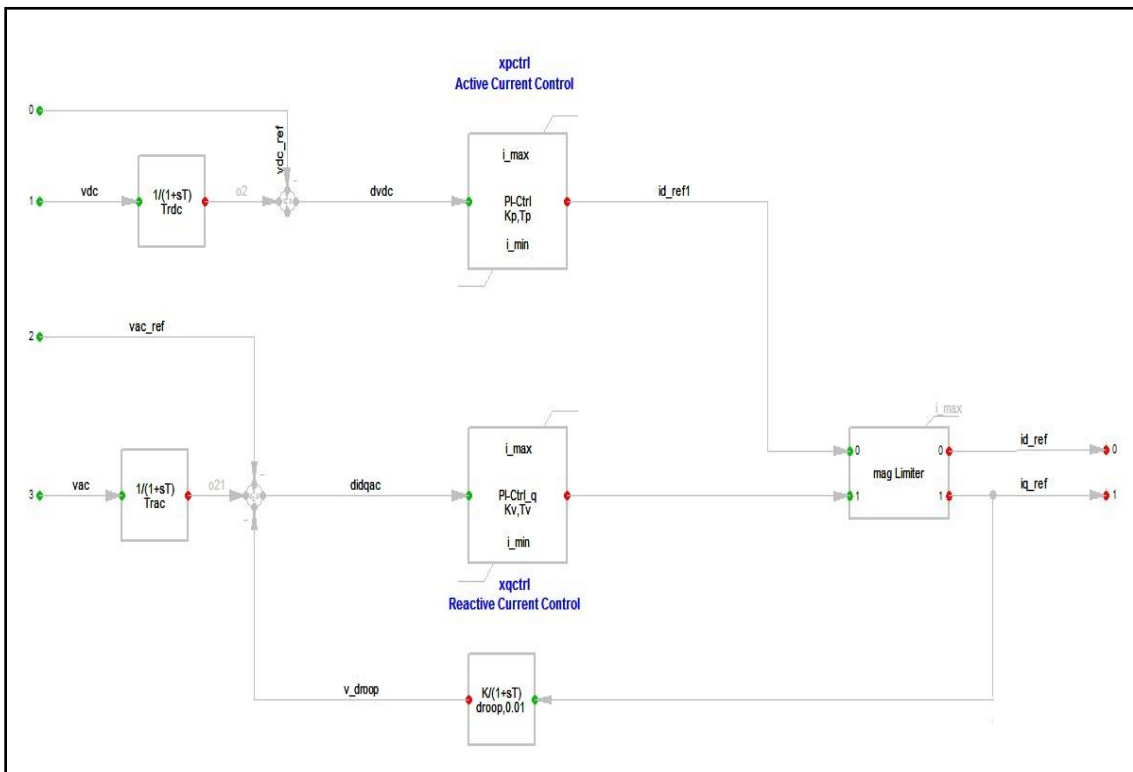


Figura 133. Modelo dinámico del control de tensión del *DSTATCOM* en DigSILENT

ANEXO D. Determinación de nodos críticos

Para cuantificar el efecto que tiene una caída de tensión o *sag* en el sistema, se simula una falla trifásica siendo está una de las más severas que se pueden presentar [3].

En la Figura 134 se muestra el diagrama de flujo empleado para el proceso de selección de nodos críticos. El proceso es el siguiente:

- A. Se simula el flujo de carga de la red en DigSILENT para obtener los valores de prefalla los cuales se muestran en la Tabla 38, tanto en kV, como en valores en por unidad.
- B. Se simula una falla trifásica en cada uno de los nodos de la red, se realizaron 30 simulaciones para obtener los datos de tensión. Los datos obtenidos son en kV y valores en por unidad. La Tabla 39 muestra un ejemplo de los valores de tensión que fueron obtenidos al simular una falla trifásica sólidamente aterrizada en el nodo 15. Para exportar los datos obtenidos de las simulaciones, se hace uso de una interfaz que viene predeterminada en el programa de simulación DigSILENT y la cual permite copiar los resultados y pegarlos en una hoja de cálculo en Excel, lo que facilita el manejo de estos para el cálculo de la función objetivo.
- C. Se calcula la función objetivo en cada uno de los nodos. La expresión matemática es la siguiente [3].

$$FO_N = \sum_{k=1}^{30} (V_{prefalla_k} - V_{falla_k})^2$$

Donde:

N = nodo donde se presentó la falla

K = total de tensiones medidas en el sistema

V_{prefalla} = valor de la tensión de referencia en p.u. antes de la falla

V_{falla} = valor de p.u cuando se presenta la falla

En la Tabla 40 se muestran los valores obtenidos de la función objetivo para cada uno de los nodos.

- D. Para seleccionar y definir los nodos críticos del sistema que serán objeto de análisis de este proyecto, se decidió hacer un proceso de selección teniendo en cuenta los siguientes criterios:
 - ✓ No sea nodo de generación (Nodo = PV)
 - ✓ No sea nodo con compensación (Nodo = Comp)
 - ✓ Niveles de tensión entre los valores de 11kV y 33kV ($11kV < V_n < 33V$)

En la Tabla 41 se muestra el resultado de la selección de nodos críticos.

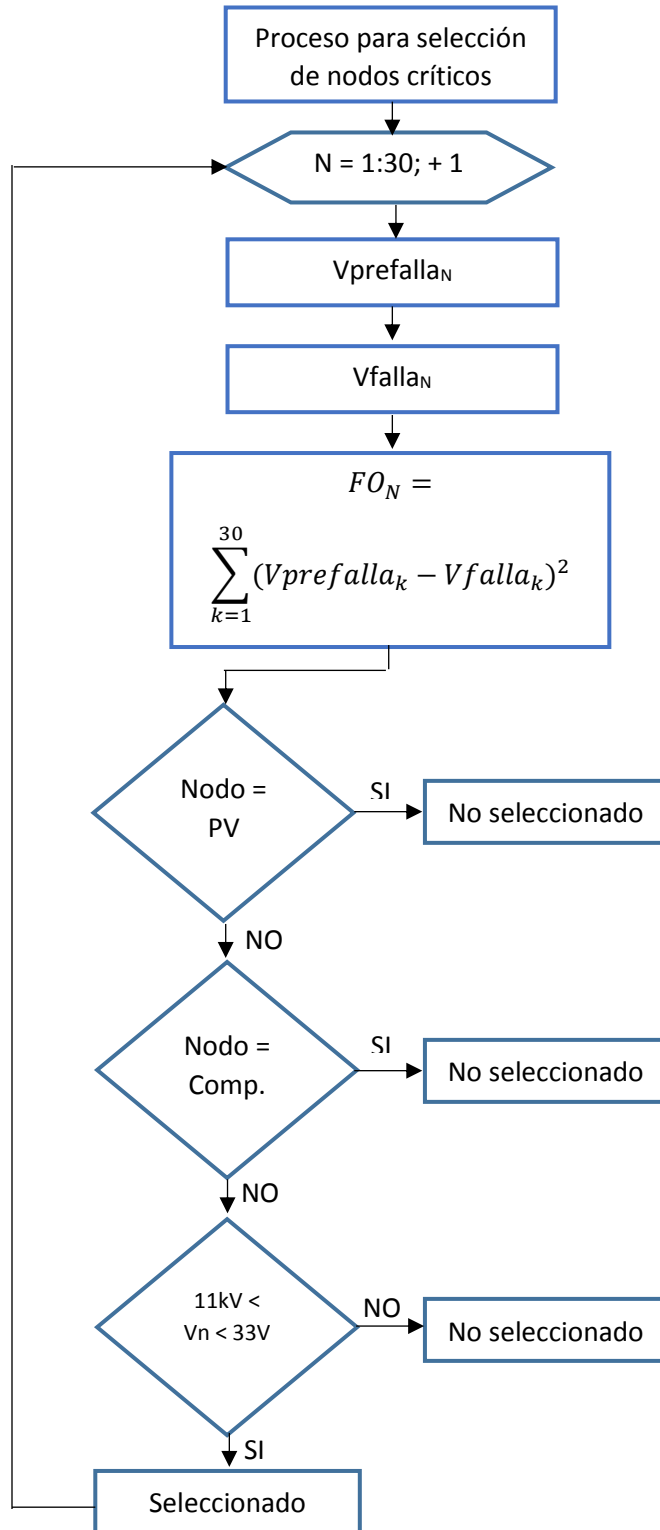


Figura 134. Diagrama de flujo de carga para la selección de nodos críticos.

Tabla 38. Tensión de prefalla

Tensión de Prefalla					
Nodo	Magnitud [kV]	Magnitud [p.u.]	Nodo	Magnitud [kV]	Magnitud [p.u.]
1	139,92	1,06	16	33,22696	1,006878
2	137,676	1,043	17	32,90187	0,9970263
3	134,7308	1,020688	18	32,63159	0,9888359
4	133,7643	1,013366	19	32,47772	0,9841734
5	133,584	1,012	20	32,58247	0,9873477
6	133,275	1,009659	21	32,59018	0,9875811
7	132,2259	1,001712	22	32,61233	0,9882523
8	133,32	1,01	23	32,60472	0,9880217
9	1,023058	1,023058	24	32,26736	0,9777989
10	33,00446	1,000135	25	32,53809	0,9860028
11	11,902	1,082	26	31,93544	0,9677406
12	33,84979	1,025751	27	33	1
13	11,781	1,071	28	132,9773	1,007404
14	33,28665	1,008686	29	32,32837	0,9796476
15	33,07362	1,002231	30	31,93998	0,9678782

Tabla 39. Valores de tensión para una falla trifásica en el nodo 15

Nodo	1	2	3	4	5	6
Magnitud [kV]	136,0772	130,4978	118,5668	114,4589	130,8071	116,7564
Magnitud [p.u.]	1,0309	0,9886	0,8982	0,8671	0,9910	0,8845
Nodo	7	8	9	10	11	12
Magnitud [kV]	122,4911	120,5828	0,7896	21,8508	10,2218	15,4054
Magnitud [p.u.]	0,9280	0,9135	0,7896	0,6621	0,9293	0,4668
Nodo	13	14	15	16	17	18
Magnitud [kV]	7,9115	8,0370	0,0000	18,2316	20,6897	7,6811
Magnitud [p.u.]	0,7192	0,2435	0,0000	0,5525	0,6270	0,2328

Nodo	19	20	21	22	23	24
Magnitud [kV]	12,2293	14,6282	20,9250	20,6286	7,1653	16,7193
Magnitud [p.u.]	0,3706	0,4433	0,6341	0,6251	0,2171	0,5066
Nodo	25	26	27	28	29	30
Magnitud [kV]	21,7512	21,7512	24,8724	115,1219	24,8724	24,8724
Magnitud [p.u.]	0,6591	0,6591	0,7537	0,8721	0,7537	0,7537
Función objetivo $FO_{15} = 5,3278$						

Tabla 40. Resultados de la función objetivo en todos los nodos

Nodo	FO_N	Nodo	FO_N
1	4,4913	16	3,0430
2	5,6204	17	4,7192
3	4,7904	18	3,0496
4	9,7592	19	3,2718
5	2,1931	20	3,4934
6	14,1922	21	6,1341
7	3,3986	22	6,1573
8	6,9811	23	2,7222
9	7,1028	24	4,0695
10	9,2997	25	3,4703
11	2,0319	26	1,2024
12	7,4071	27	4,2644
13	2,9631	28	6,6856
14	2,1220	29	1,8351
15	5,3278	30	1,6396

Fuente: Autores

Tabla 41. Resultado selección de nodos críticos

Nodo	FO_N	Criterio			Nodo seleccionado
		Nodo de generación	Nodo con compensación	Nivel de tensión entre 11kV y 33kV	
1	4,4913	Si	-	-	No
2	5,6204	Si	-	-	No
3	4,7904	No	No	No	No
4	9,7592	No	No	No	No
5	2,1931	Si	-	-	No
6	14,1922	No	No	No	No
7	3,3986	No	No	No	No
8	6,9811	Si	-	-	No
9	7,1028	No	No	No	No
10	9,2997	No	No	Si	Si
11	2,0319	No	Si	-	No
12	7,4071	No	No	Si	Si
13	2,9631	No	Si	-	No
14	2,1220	No	No	Si	Si
15	5,3278	No	No	Si	Si
16	3,0430	No	No	Si	Si
17	4,7192	No	No	Si	Si
18	3,0496	No	No	Si	Si
19	3,2718	No	No	Si	Si
20	3,4934	No	No	Si	Si
21	6,1341	No	No	Si	Si
22	6,1573	No	No	Si	Si
23	2,7222	No	No	Si	Si
24	4,0695	No	No	Si	Si
25	3,4703	No	No	Si	Si
26	1,2024	No	No	Si	Si
27	4,2644	No	No	Si	Si
28	6,6856	No	No	No	No
29	1,8351	No	No	Si	Si
30	1,6396	No	No	Si	Si

Se seleccionan los nodos 10 y 12, siendo aquellos nodos en los cuales la función objetivo dio un mayor resultado, además de cumplir con los criterios de selección mencionados anteriormente.

ANEXO E. Ecuaciones para flujo de carga por el método de Newton Raphson

En este anexo se definen las formulas o ecuaciones empleadas para la solución del flujo de carga por el método de Newton Raphson, las cuales se tuvo en cuenta para el desarrollo del algoritmo implementado en MATLAB (FlujoCargaNR.m)

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \vdots \\ \Delta P_j \\ \hline \Delta Q_i \\ \vdots \\ \Delta Q_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} & \dots & \frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} & \frac{\partial P_i}{\partial V_i} & \dots & \frac{\partial P_i}{\partial V_j} \\ \vdots & H & \vdots & \vdots & N & \vdots \\ \frac{\partial P_j}{\partial \theta_i} & \dots & \frac{\partial P_j}{\partial \theta_j} & \frac{\partial P_j}{\partial V_i} & \dots & \frac{\partial P_j}{\partial V_j} \\ \hline \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} & \dots & \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} & \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} & \dots & \frac{\partial Q_i}{\partial V_j} \\ \vdots & J & \vdots & \vdots & L & \vdots \\ \frac{\partial Q_j}{\partial \theta_i} & \dots & \frac{\partial Q_j}{\partial \theta_j} & \frac{\partial Q_j}{\partial V_i} & \dots & \frac{\partial Q_j}{\partial V_j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_i \\ \vdots \\ \Delta \delta_j \\ \hline \Delta V_i \\ \vdots \\ \Delta V_j \end{bmatrix}$$

E.1. Ecuación potencias netas conocidas

$$\begin{aligned} P_{Ni} &= Pg - Pd \\ Q_{Ni} &= Qg - Qd \end{aligned}$$

Donde:

P_{Ni}, Q_{Ni} = Potencias netas calculadas
 Pg y Qg = Potencia activa y reactiva generadas
 Pd y Qd = Potencia activa y reactiva demandada

E.2. Ecuación potencias netas calculadas

$$P_{Ni(vk,\theta k)} = \sum_{k=1}^n V_i V_k (G_{ik} \cos(\theta_{ik}) + B_{ik} \sin(\theta_{ik}))$$

$$Q_{Ni(vk,\theta k)} = \sum_{k=1}^n V_i V_k (G_{ik} \sin(\theta_{ik}) - B_{ik} \cos(\theta_{ik}))$$

Donde:

P_{Ni}, Q_{Ni} = Potencia activa y reactiva neta calculadas
 V_i, V_k = tensiones de los nodos
 G_{ik}, B_{ik} = conductancia y susceptancia tomadas de la Ybarra
 θ_{ik} = Resta de ángulos de los voltajes ($\theta_i - \theta_k$)

E.3. Ecuación deltas de potencia

$$\Delta P = P_{Ni} - P_{Ni}(V_k, \theta_k)$$

$$\Delta Q = P_{Ni} - P_{Ni}(V_k, \theta_k)$$

E.4. Determinación de los elementos de la matriz funcional (Jacobiano)

E.4.1. Submatriz H

Determinación elementos de la diagonal de la submatriz H: H_{ii}

$$H_{ii} = \frac{\partial P_{Ni}}{\partial \theta_i} = - \sum_{k=1}^n V_i V_k (-G_{ik} \text{Sen}(\theta_{ik}) + B_{ik} \text{Cos}(\theta_{ik})) - V_i^2 B_{ii} = -Q_{ni} - |V_i|^2 B_{ii}$$

Determinación elementos fuera de la diagonal de la submatriz H: H_{ik}

$$H_{ik} = \frac{\partial P_{Ni}}{\partial \theta_k} = V_i V_k [G_{ik} \text{Sen}(\theta_{ik}) - B_{ik} \text{Cos}(\theta_{ik})]$$

E.4.2. Submatriz J

Determinación elementos de la diagonal de la submatriz J: J_{ii}

$$J_{ii} = \frac{\partial Q_{Ni}}{\partial \theta_i} = \sum_{k=1}^n V_i V_k (G_{ik} \text{Cos}(\theta_{ik}) + B_{ik} \text{Sen}(\theta_{ik})) - V_i^2 G_{ii} = P_{ni} - |V_i|^2 G_{ii}$$

Determinación elementos fuera de la diagonal de la submatriz J: J_{ik}

$$J_{ik} = \frac{\partial Q_{Ni}}{\partial \theta_k} = -V_i V_k [G_{ik} \text{Cos}(\theta_{ik}) + B_{ik} \text{Sen}(\theta_{ik})]$$

E.4.3. Submatriz N

Determinación elementos de la diagonal de la submatriz N: N_{ii}

$$N_{ii} = \frac{\partial P_{Ni}}{\partial V_i} V_i = \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \text{Cos}(\theta_{ik}) + B_{ik} \text{Sen}(\theta_{ik})) + V_i^2 G_{ii} = P_{Ni} + |V_i|^2 G_{ii}$$

Determinación elementos fuera de la diagonal de la submatriz N: N_{ik}

$$N_{ik} = \frac{\partial P_{Ni}}{\partial V_k} V_k = V_i V_k [G_{ik} \cos(\theta_{ik}) + B_{ik} \sin(\theta_{ik})] = -J_{ik}$$

E.4.4. Submatriz L

Determinación elementos de la diagonal de la submatriz L: L_{ii}

$$L_{ii} = \frac{\partial Q_{Ni}}{\partial V_i} V_i = \sum_{k=1}^n V_i V_k (G_{ik} \sin(\theta_{ik}) - B_{ik} \cos(\theta_{ik})) - V_i^2 B_{ii} = Q_{Ni} - |V_i|^2 B_{ii}$$

Determinación elementos fuera de la diagonal de la submatriz L: L_{ik}

$$L_{ik} = \frac{\partial Q_{Ni}}{\partial V_k} V_k = V_i V_k [G_{ik} \sin(\theta_{ik}) - B_{ik} \cos(\theta_{ik})] = H_{ik}$$

ANEXO F. Algoritmo implementado en MATLAB – Guía de Uso

Aspectos a tener en cuenta:

- ✓ El algoritmo se puede ejecutar en cualquier versión de MATLAB
- ✓ La versión de MATLAB con la que se muestra esta guía es la versión R2015a en inglés
- ✓ El algoritmo implementado se conforma de 8 archivos, los cuales son: “DatosNodos30.m, DatosLinea30.m, Ybarra30.m, FlujoCargaNR.m, DatosDSTATCOM30.m, DSTATCOM.m, DatosSVC.m y SVC.m”
- ✓ Los archivos “DatosNodos30.m, DatosLinea30.m” tienen guardados los datos de nodos y líneas de la red IEEE 30 nodos.

Implementación del algoritmo

Para la implementación del algoritmo se utiliza el lenguaje unificado de modelado UML, con el fin de especificar, visualizar, construir y documentar su funcionamiento de cada uno de los archivos que comprenden dicho algoritmo.

Diagramas de casos de uso

Un caso de uso en Lenguaje Unificado de Modelado (UML) describe la interacción con los usuarios y el algoritmo implementado, como secuencia los resultados del sistema de potencia sin compensación, con compensación SVC y con compensación DSTATCOM. Por lo cual, en las figuras 135, 136 y 137 se establecen 3 diagramas de caso de uso por cada resultado que se quiera obtener.

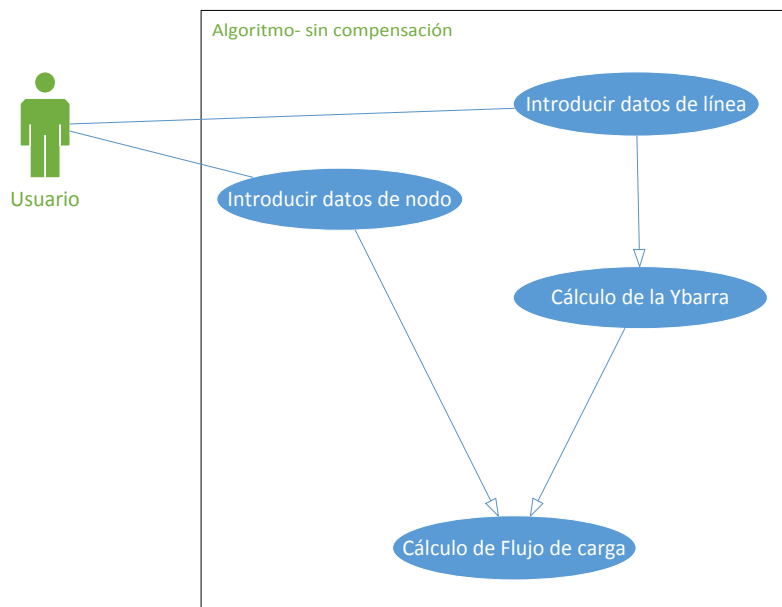


Figura 135. Diagrama de caso de uso para algoritmo sin compensación

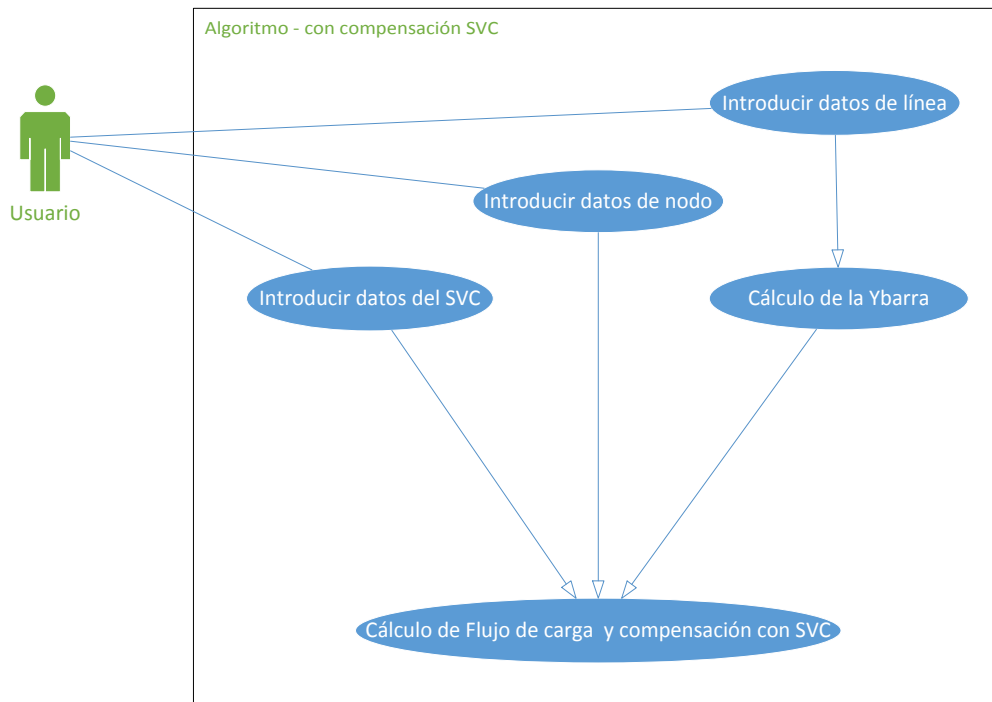


Figura 136. Diagrama de caso de uso para algoritmo con compensación SVC

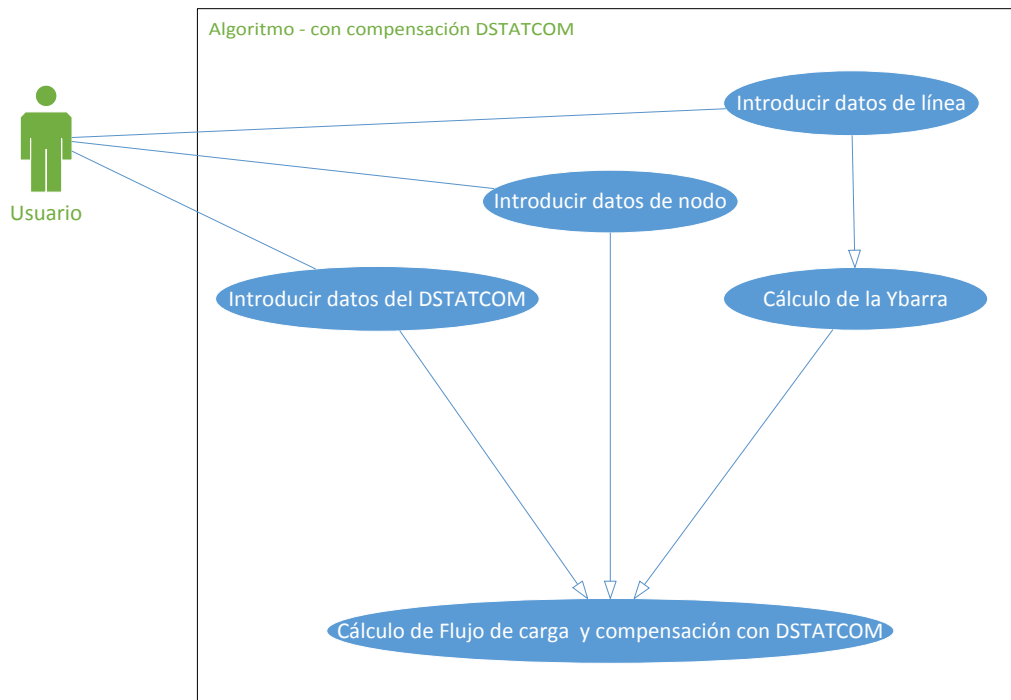


Figura 137. Diagrama de caso de uso para algoritmo con compensación DSTATCOM

Diagrama de Clases

El diagrama de clases en Lenguaje Unificado de Modelado (UML) es un tipo de diagrama de estructura estática que describe la estructura del algoritmo implementado con las clases del sistema, sus atributos, operaciones (o métodos), y las relaciones entre los objetos. En las figuras 138, 139 y 140 se observan los diagramas de clases del algoritmo por cada resultado que se quiera obtener.

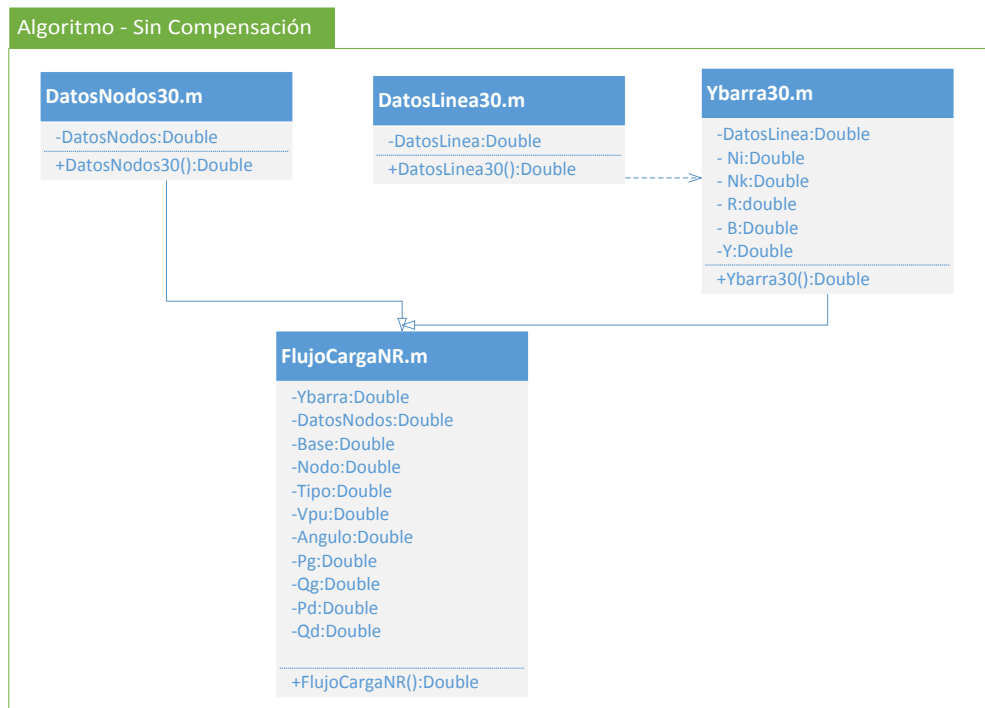


Figura 138. Diagrama de clase de algoritmo sin compensación

Algoritmo - Con Compensación SVC

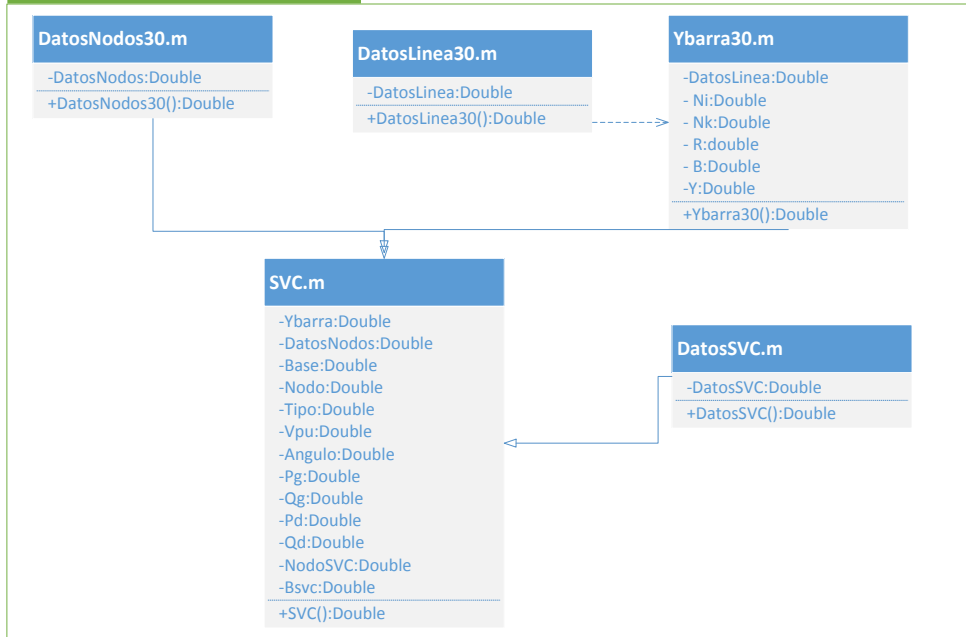


Figura 139. Diagrama de clase de algoritmo con compensación SVC

Algoritmo - Con Compensación DSTATCOM

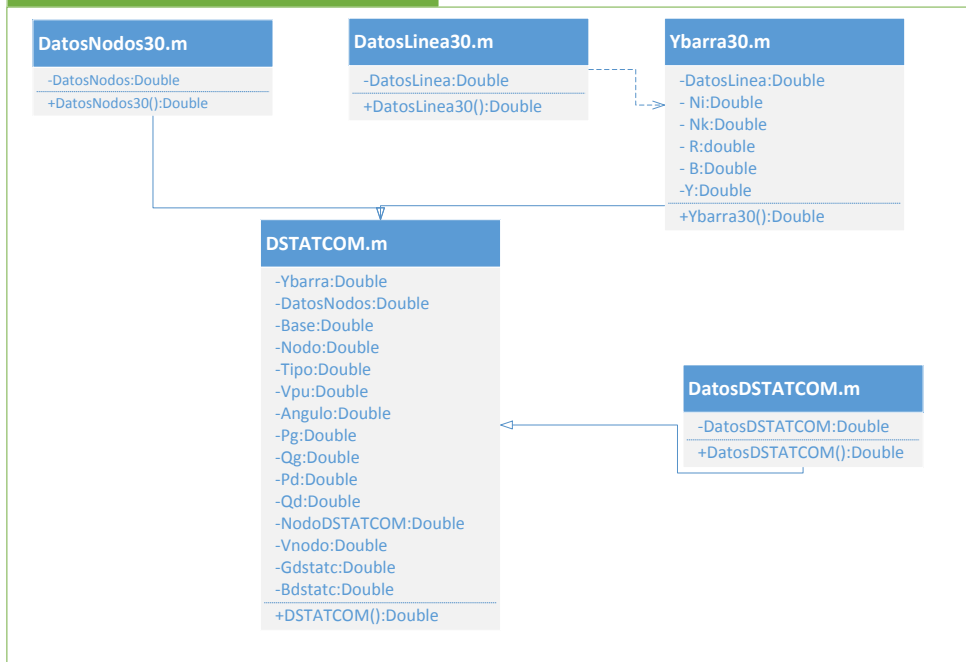


Figura 140. Diagrama de clase de algoritmo con compensación DSTATCOM

Contenido de la guía:

- ❖ Apertura de archivos
- ❖ Modificación de cargas para generar un *sag* o *swell*
- ❖ Algoritmo para cálculo del flujo de carga sin compensación
- ❖ Algoritmo para cálculo del flujo de carga con *DSTATCOM*
- ❖ Algoritmo para cálculo del flujo de carga con *SVC*
- ❖ Obtención de gráficas

Nota: Para tener mayor claridad del uso del algoritmo, a manera de ejemplo se explica el procedimiento para obtener los valores y gráficas cuando se presenta un *swell* en el nodo 10 con una magnitud de 1.3.

❖ Apertura de Archivos:

1. Abrir MATLAB
2. Dar clic en la carpeta "Open" y se abrirá un cuadro de diálogo como el que se muestra bordeado en azul en la Figura 141.
3. Buscar la ubicación de la carpeta "Algoritmo MATLAB" en la cual están los archivos: DatosDSTATCOM30.m, DatosLinea30.m, DatosNodos30.m, DatosSVC.m, DSTATCOM.m, FlujoCargaNR.m, SVC.m, Ybarra30.m
4. Seleccionar el archivo que se quiera abrir. En este caso, para el ejemplo se abre inicialmente el archivo DatosNodos30.m
5. Dar clic en "abrir"

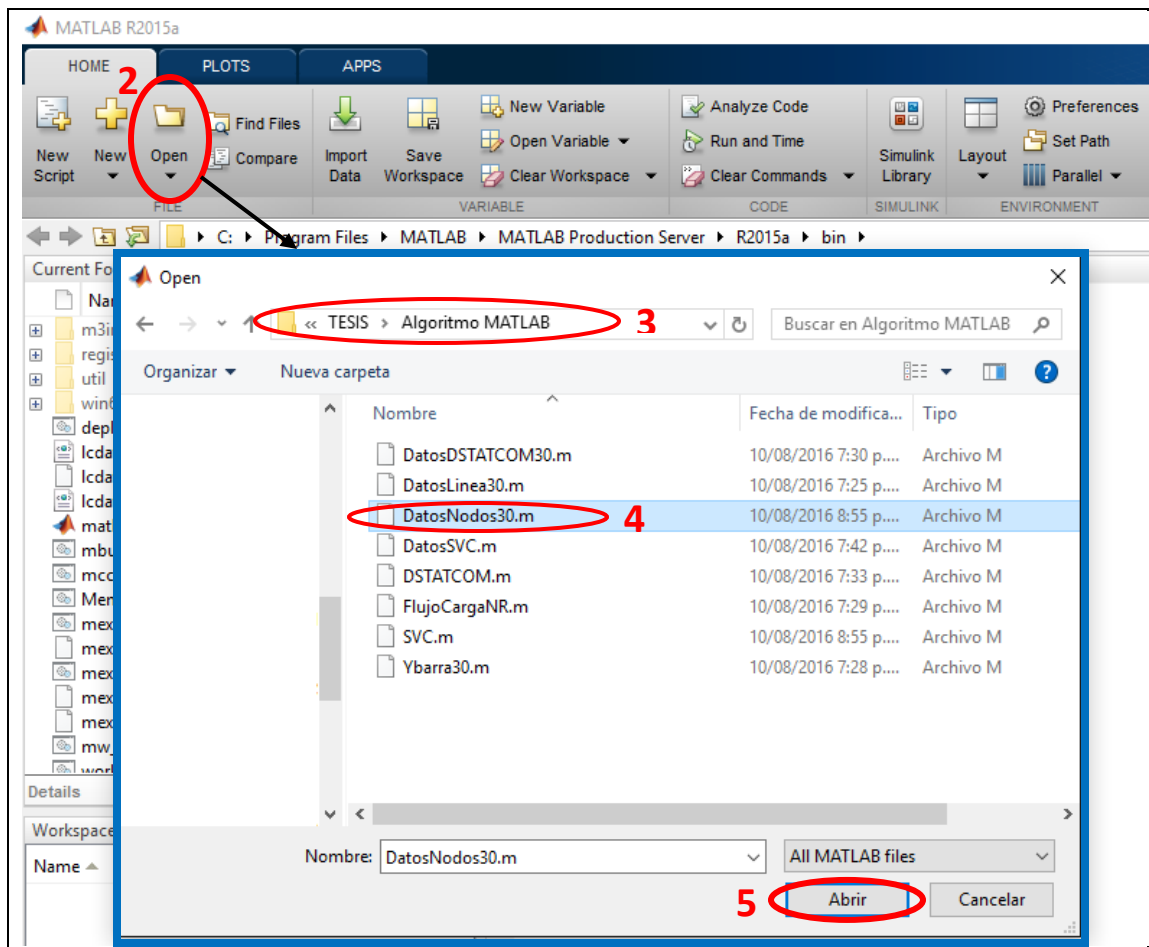



Figura 141. Apertura de archivos en MATLAB

6. Después de dar clic en “abrir”, se abre el programa con la función “DatosNodos30”, como se ve en la Figura 142.
7. Dar clic en el icono verde  que dice “Run”, con el que se abrirá un cuadro de diálogo que dice “MATLAB Editor”.
8. Dar clic en “Change Folder” y seguido de esto, en la ventana “Command Window” aparecerán los valores que se encuentran en la función “DatosNodos30”, tal como se ve en la Figura 143.

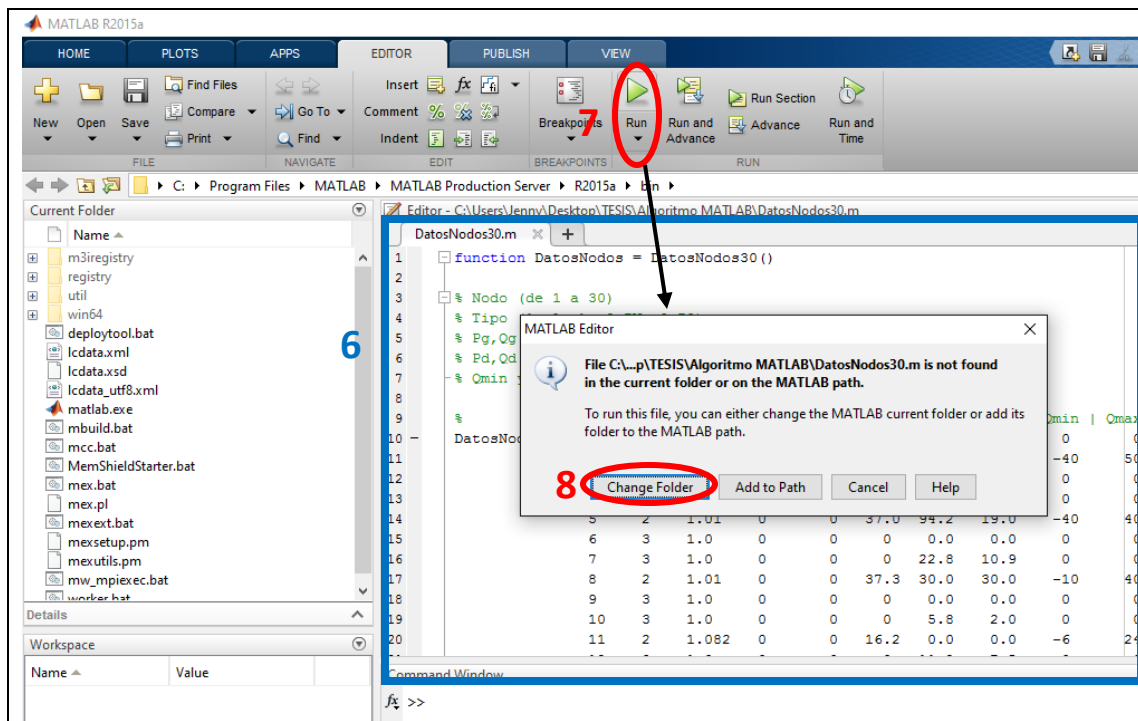


Figura 142. Apertura archivo "DatosNodos30"

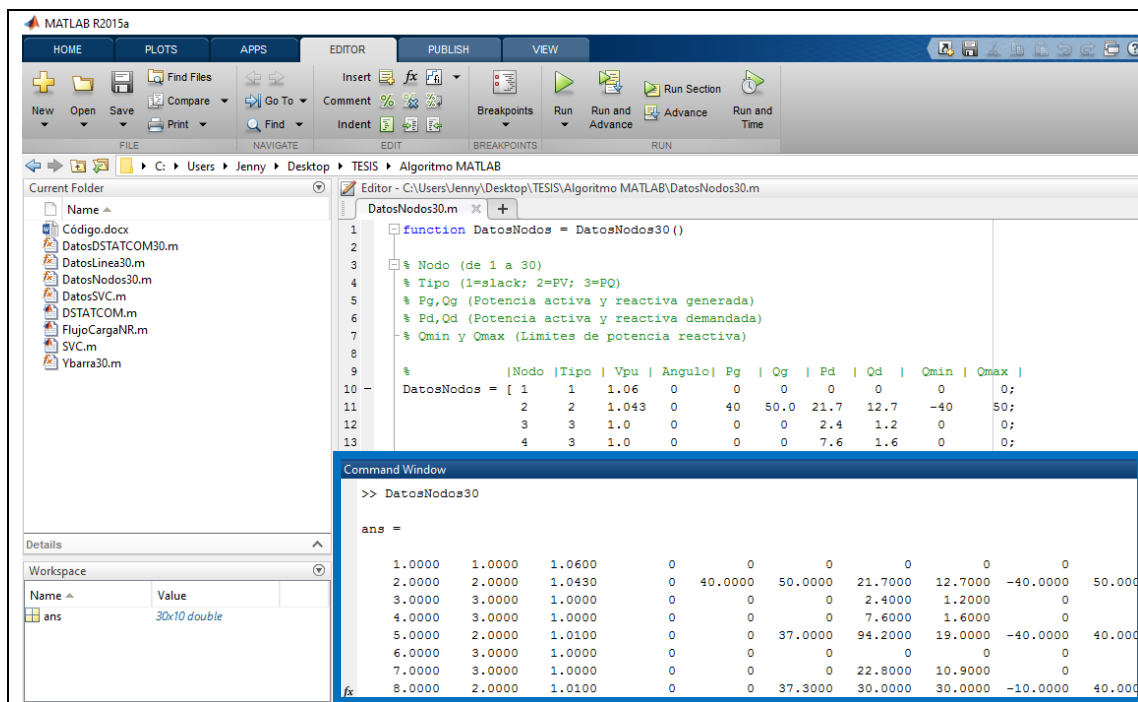


Figura 143. Datos obtenidos al ejecutar la función DatosNodos30

Si se quiere, para borrar los datos que aparecen en la barra que dice "Command Window" se puede usar los comandos: "clear all", se oprime "enter", se escribe "clc" y se vuelve a oprimir "enter" (ver Figura 144).


```

Command Window
28.0000  3.0000  1.0000  0  0  0  0  0  0  0
29.0000  3.0000  1.0000  0  0  0  2.4000  0.9000  0  0
30.0000  3.0000  1.0000  0  0  0  10.6000  1.9000  0  0

>> clear all
fx >> clc

```

Figura 144. Borrar datos de "command window"

❖ **Modificación de carga para generar un Sag o Swell:**

En el archivo "DatosNodos30.m" se debe modificar el valor de la potencia reactiva en el nodo que se quiera generar este evento, si se quiere generar un *sag* se modifica el valor de Qd y si se quiere generar un *swell*, se modifica el valor de Qg. En este caso, como el ejemplo es para generar un *swell* en el nodo 10, se modifica el valor de Qg de acuerdo con el valor dado en la Tabla 17, siendo 330 para un *swell* de 1.3. Nuevamente se da clic en el icono "Run" (paso 7), y se puede ver que estos datos aparecen en la ventana de "Command Window".

```

Editor - C:\Users\Jenny\Desktop\TESIS\Algoritmo MATLAB\DatosNodos30.m
DatosNodos30.m
5 % Pg,Qg (Potencia activa y reactiva generada)
6 % Pd,Qd (Potencia activa y reactiva demandada)
7 % Qmin y Qmax (Limites de potencia reactiva)
8
9 %
10 %
11 %
12 %
13 %
14 %
15 %
16 %
17 %
18 %
19 %
20 %
21 %

```

	Nodo	Tipo	Vpu	Angulo	Pg	Qg	Pd	Qd	Qmin	Qmax
10	1	1	1.06	0	0	0	0	0	0	0;
11	2	2	1.043	0	40	50.0	21.7	12.7	-40	50;
12	3	3	1.0	0	0	0	2.4	1.2	0	0;
13	4	3	1.0	0	0	0	7.6	1.6	0	0;
14	5	2	1.01	0	0	37.0	94.2	19.0	-40	40;
15	6	3	1.0	0	0	0	0.0	0.0	0	0;
16	7	3	1.0	0	0	0	22.8	10.9	0	0;
17	8	2	1.01	0	0	37.3	30.0	30.0	-10	40;
18	9	3	1.0	0	0	0	0.0	0.0	0	0;
19	10	3	1.0	0	0	330	5.8	2.0	0	0;
20	11	2	1.082	0	0	16.2	0.0	0.0	-6	24;
21	12	3	1.0	0	0	0	11.2	7.5	0	0;

```

Command Window
6.0000  3.0000  1.0000  0  0  0  0  0  0  0  0
7.0000  3.0000  1.0000  0  0  0  22.8000  10.9000  0  0
8.0000  2.0000  1.0100  0  0  0  37.3000  30.0000  30.0000  -10.0000  40.0000
9.0000  3.0000  1.0000  0  0  0  0  0  0  0  0
10.0000  3.0000  1.0000  0  0  0  330.0000  5.8000  2.0000  0  0
11.0000  2.0000  1.0820  0  0  0  16.2000  0  0  -6.0000  24.0000
12.0000  3.0000  1.0000  0  0  0  0  11.2000  7.5000  0  0
13.0000  2.0000  1.0710  0  0  0  10.6000  1.9000  0  -6.0000  24.0000

```

Figura 145. Configuración de Qg y Qd para generación de SAGS y SWELLS en MATLAB

❖ **Algoritmo para cálculo del flujo de carga sin compensación**

De la misma manera que se abrió el archivo "DatosNodos30.m" (ver pasos 2 a 5 de "Apertura de archivos"), se procede a abrir el archivo "FlujoCargaNR.m". En este archivo no se debe hacer ninguna modificación, lo único que se debe hacer es dar clic en "Run" (paso 7), con esto el

programa se ejecuta y en la ventana “Command Window” muestra los valores resultantes de tensión y ángulo por nodo, así como una gráfica del perfil de tensión (Figura 146)

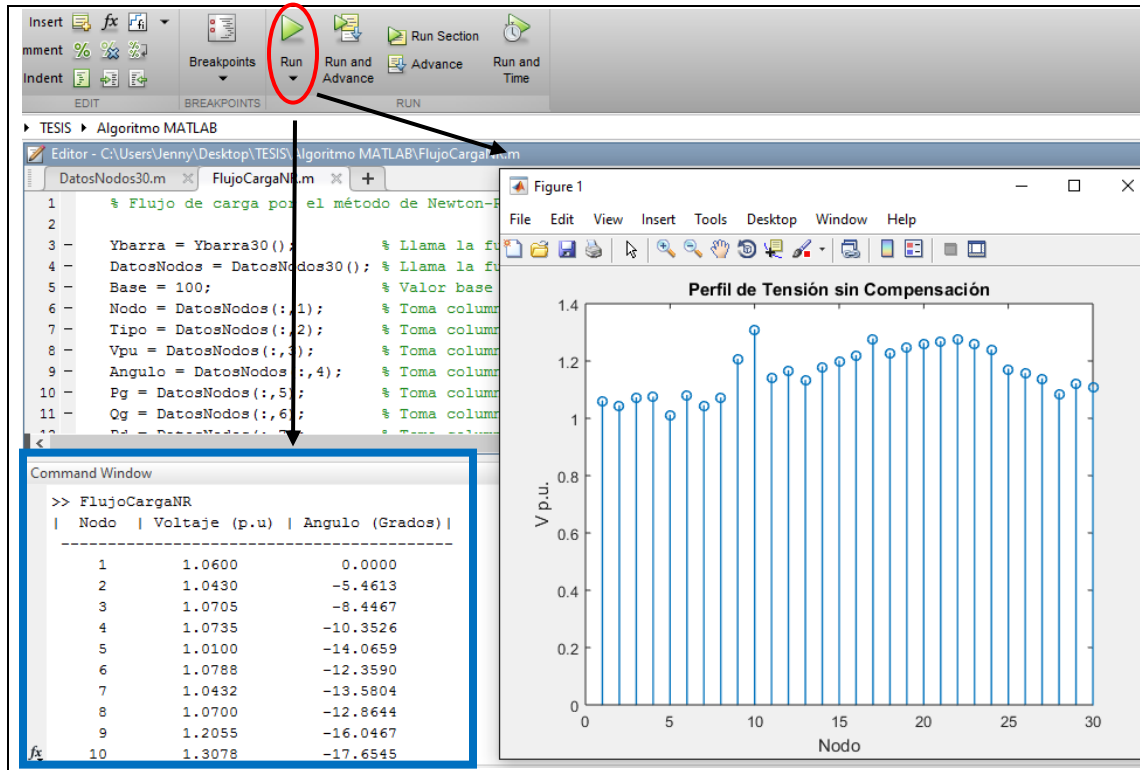


Figura 146. Compilación algoritmo `FlujoCargaNR.m` (resultados red y gráfica)

❖ Algoritmo para cálculo del flujo de carga con *DSTATCOM*

Para esto, se debe abrir primero el archivo “DatosDSTATCOM30.m” en el cual se debe indicar el nodo en el cual se quiere incluir el compensador y la tensión a la que se espera que el nodo llegue. En este caso será en el nodo 10 y un valor de tensión de 1.0 p.u., tal como se indica en la Figura 147.

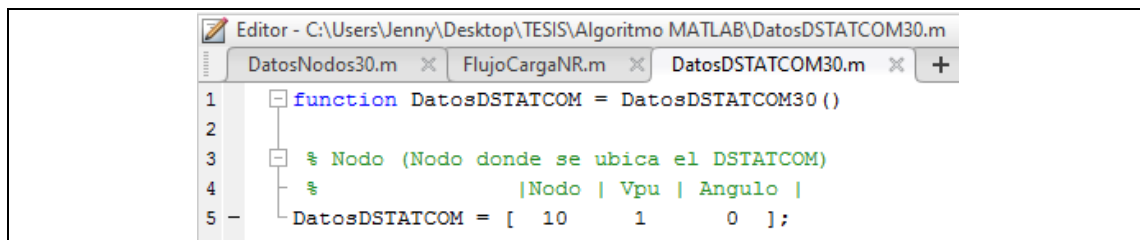



Figura 147. Configuración de datos en `DatosDSTATCOM30.m`

Nuevamente se da clic en el icono  que dice “Run”.

Luego de esto se abre el archivo “DSTATCOM.m” en el cual, al igual que para el archivo “FlujoCargaNR”, no debe hacerse ninguna modificación, solamente dar clic en “Run”, con esto el programa se ejecuta y en la ventana “Command Window” muestra los valores resultantes de

tensión y ángulo por nodo, los valores de tensión, ángulo y potencia entregada o absorbida por el DSTATCOM (positiva absorbe, negativa entrega), así como una gráfica del perfil de tensión. (Figuras 148 y 149)

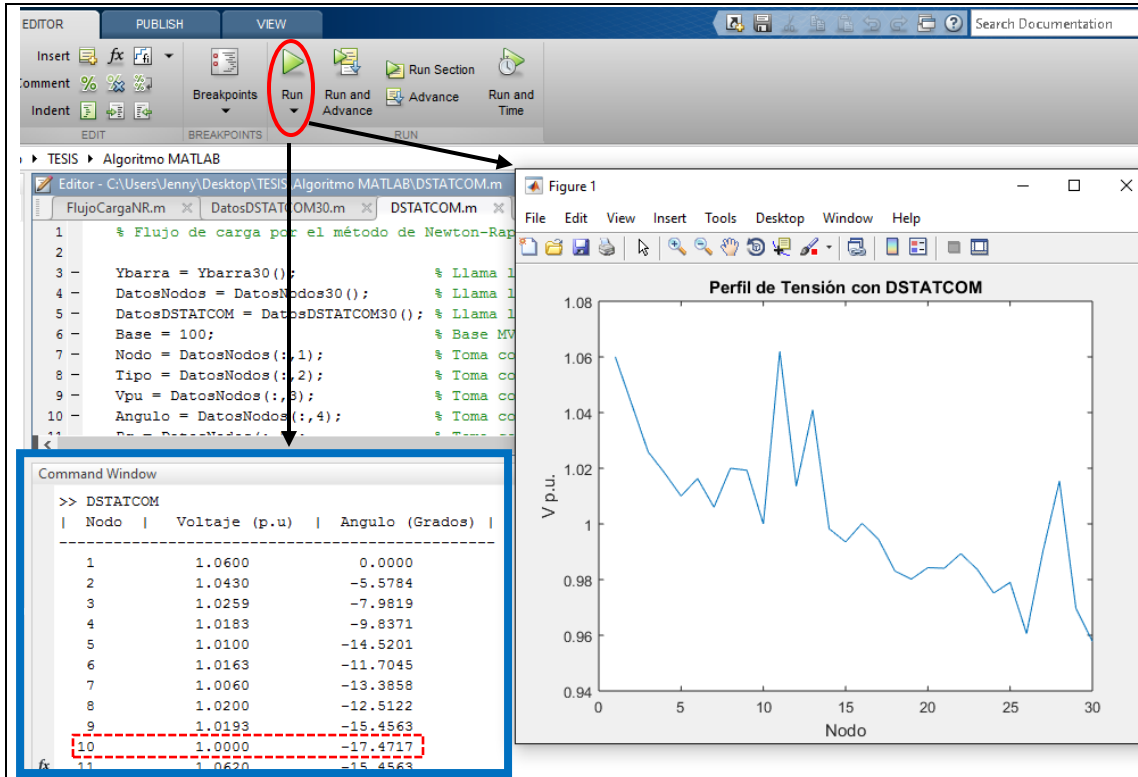


Figura 148. Compilación algoritmo DSTATCOM.m (resultados red y gráfica)

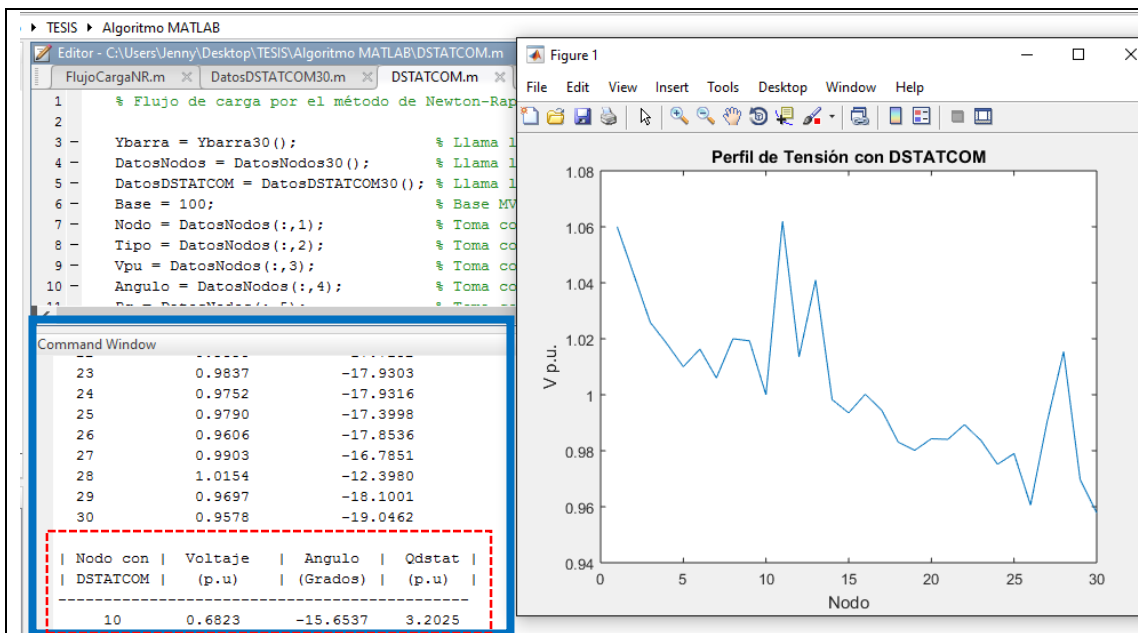
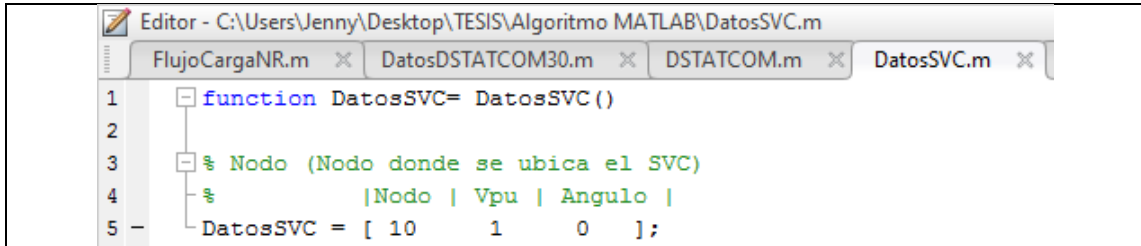


Figura 149. Compilación algoritmo DSTATCOM.m (resultados DSTATCOM)


❖ Algoritmo para cálculo del flujo de carga con SVC

Para esto, se debe abrir primero el archivo “DatosSVC.m” en el cual se debe indicar el nodo en el cual se quiere incluir el compensador y la tensión a la que se espera que el nodo llegue. En este caso será en el nodo 10 y un valor de tensión de 1.0 p.u., tal como se indica en la figura 150.



```
1 function DatosSVC= DatosSVC ()
2
3 % Nodo (Nodo donde se ubica el SVC)
4 |Nodo | Vpu | Angulo |
5 - DatosSVC = [ 10 1 0 ];
```

Figura 150. Configuración de datos en DatosSVC.m

Nuevamente se da clic en el icono  que dice “Run”.

Luego de esto se abre el archivo “SVC.m” en el cual, al igual que para el archivo “FlujoCargaNR” y “DSTATCOM.m”, no debe hacerse ninguna modificación, solamente dar clic en “Run”, con esto el programa se ejecuta y en la ventana “Command Window” muestra los valores resultantes de tensión y ángulo por nodo, los valores de la susceptancia variable “Bsvc” y la potencia entregada o absorbida por el compensador, así como una gráfica del perfil de tensión. (Figuras 151 y 152)

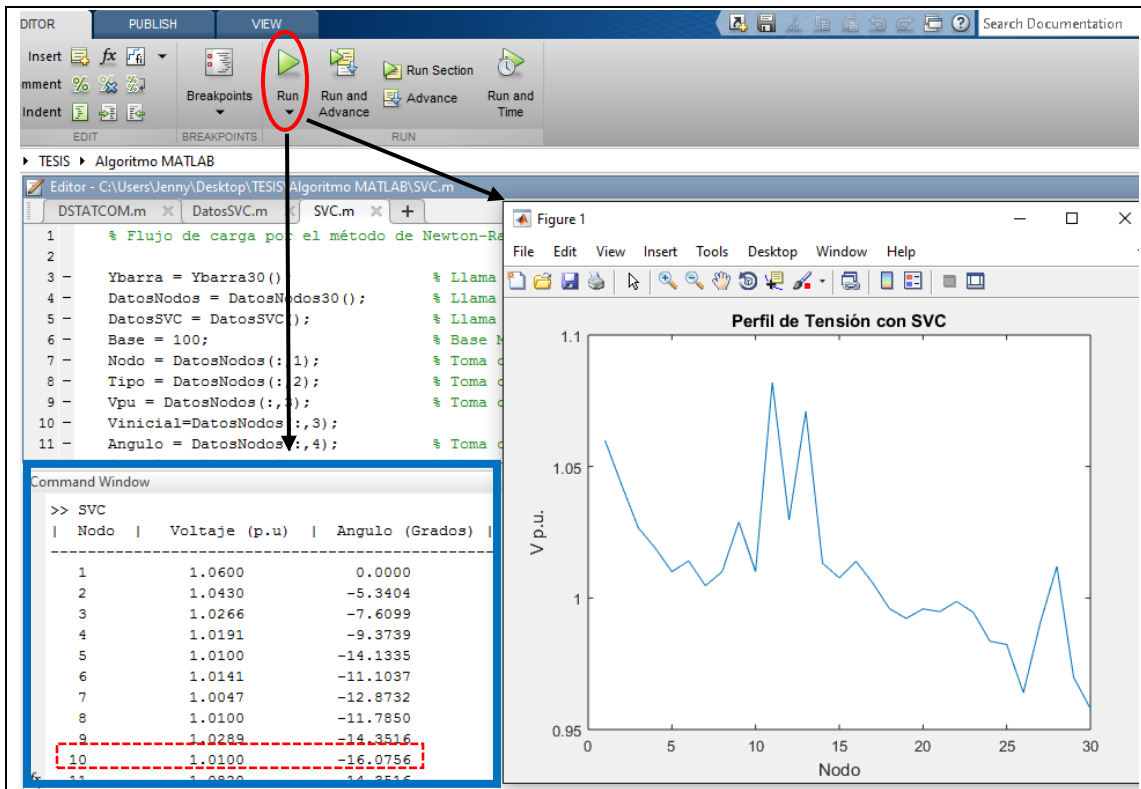


Figura 151. Compilación algoritmo SVC.m (resultados red y gráfica)

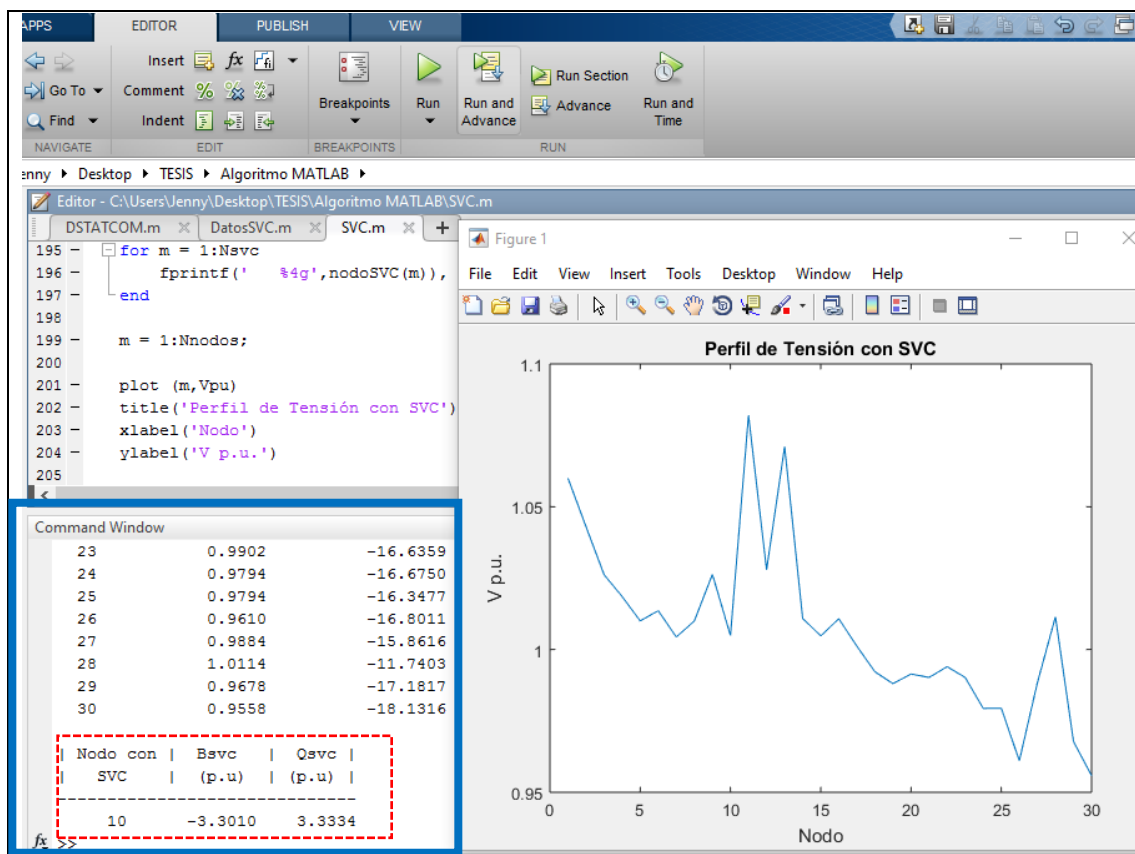


Figura 152. Compilación algoritmo *DSTATCOM.m* (resultados SVC)

❖ Obtención de gráficas

Con los algoritmos implementados, cada una de las gráficas de los perfiles de tensión sin compensación, con *SVC* y con *DSTATCOM*, se generan de forma independiente tal como se ve en las Figuras 146, 148 y 151, debido a que están en archivos diferentes. Sin embargo, para facilitar el análisis y hacer una comparación del comportamiento de la red, los resultados obtenidos en MATLAB en cada uno de los casos se guardaron en varios archivos en Excel. Estos archivos son útiles para generar las diferentes gráficas en una sola (tal como se ve de la Figura 47 a la Figura 78), ya que se creó un archivo adicional en MATLAB llamado "Graficas.m" el cual por medio del comando "xlsread" toma los datos allí registrados y permite generar las gráficas del sistema sin y con compensación tanto con el *SVC* como con el *DSTATCOM*.

Para explicar el funcionamiento de este archivo adicional, se continúa con el ejemplo cuando se presenta un *swell* de magnitud 1.3 en el nodo 10.

Para ello se debe abrir el archivo "Graficas.m" de la misma manera que se explicó en la sección "Apertura de Archivos" de esta guía.

De acuerdo al tipo de evento, magnitud y nodo se deben hacer los siguientes ajustes en el código:


1. NoHoja: escribir el número de acuerdo a la magnitud y evento tal como se especifica en las líneas 3 y 4 del código. Como en el ejemplo se quieren generar las gráficas para un swell con magnitud de 1.3, en el número de hoja se escribe “5” tal como se ve en la figura 153.

```

1  % Gráfica de perfil de tensión para la red sin compensación, con DSTATCOM y con SVC
2  % Llama archivos de Excel a MATLAB - Datos están desde la hoja 3 en excel
3  % No. Hoja - Magnitud Sag - (3 = 0.5, 4 = 0.6, 5 = 0.7, 6 = 0.8, 7 = 0.9)
4  % No. Hoja - Magnitud Swell - (3 = 1.1, 4 = 1.2, 5 = 1.3)
5  % Nodo | Sin compensación | Con DSTATCOM | Con SVC |
6  % Nodo | Vpu | Ángulo | Vpu | Ángulo | Vpu | Ángulo |
7
8  NoHoja = 5 %Ajustar de acuerdo a la magnitud y evento
9
10 SagDiez = xlsread('Resultados_DSTATCOM_SVC_SAG_N10.xlsx',NoHoja);
11 SagDoce = xlsread('Resultados_DSTATCOM_SVC_SAG_N12.xlsx',NoHoja);
12 SwellDiez = xlsread('Resultados_DSTATCOM_SVC_SWELL_N10.xlsx',NoHoja);
13 SwellDoce = xlsread('Resultados_DSTATCOM_SVC_SWELL_N12.xlsx',NoHoja);

```

Figura 153. Selección de magnitud y evento para la generación de gráficas

2. Dependiendo el nodo y evento se debe modificar donde dice “SwellDiez” ya sea por cambiando la palabra “Swell por Sag” y/o “Diez por Doce”. Para el ejemplo se deja “SwellDiez” ya que se quiere generar la gráfica para un Swell en el nodo Diez. (ver Figura 154)
3. Para que el título del gráfico coincida con la gráfica obtenida, este se debe modificar
4. Nuevamente se da clic en el icono  que dice “Run” y se obtiene la gráfica.

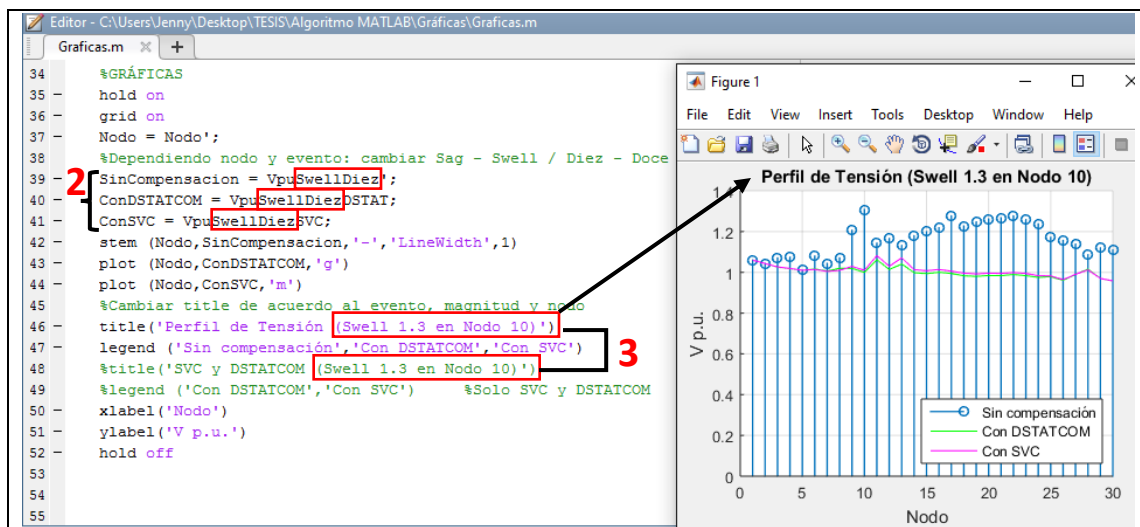



Figura 154. Configuración de código para obtener la gráfica sin y con compensación

5. Para obtener la gráfica del comportamiento de la red solo con el compensador SVC y *DSTATCOM* se deben ocultar unas líneas del código (aquellas que incluyen el comportamiento de la red sin compensación) tal como se ve en la Figura 155, esto se hace anteponiendo el símbolo porcentaje (%) en las líneas que se quieren ocultar quedando estas en color verde, en este caso son las líneas 39, 42, 46 y 47).
6. Quitar el símbolo (%) a las líneas 48 y 49 que para la anterior gráfica (Figura 154), estaban ocultas
7. Nuevamente se da clic en el icono  que dice “Run” y se obtiene la gráfica.

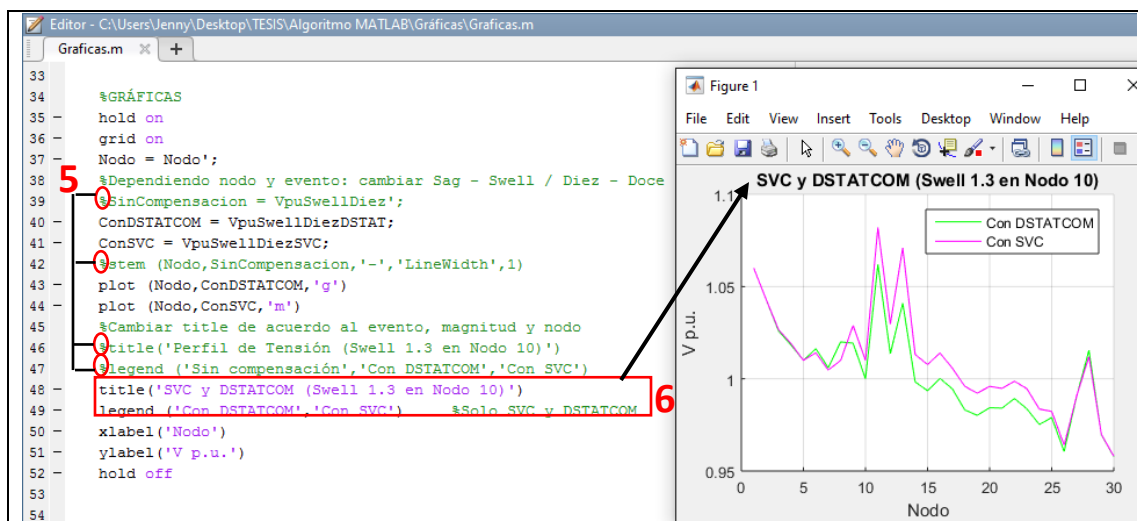


Figura 155. Configuración de código para obtener la gráfica con *DSTATCOM* y *SVC*