MODELADO DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN DE MÁQUINAS SÍNCRONAS

***

PROYECTO DE FIN DE CARRERA
INGENIERO ELECTRICISTA
PLAN 97.

***

AUTORES

ROBERTO CALVETTI YANES
IGNACIO FERREÑO NUÑEZ
AGUSTÍN FRASCHINI SILVARREDONDA

TUTOR

DR. ING. ÁLVARO GIUSTO

***

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA.

Montevideo, abril 2011

Agradecimientos.

En primer lugar, quisiéramos agradecer a nuestras familias por el apoyo incondicional durante estos años de formación universitaria. Este proyecto significa el fin de un camino en el que hemos tenido la oportunidad de madurar, y adquirir una formación tanto académica como personal, para desempeñarnos correctamente en el mundo laboral.

Especialmente agradecemos a nuestro tutor Álvaro Giusto por sus sugerencias, consejos, correcciones y su apoyo. No nos queremos olvidar de Ignacio Afonso, por su gran ayuda con las simulaciones con el software PSS/E de UTE.

También agradecemos a Carlos Alonso y Michel Artenstein por la atención y consejos brindados en una presentación técnica de avance realizada en el transcurso del proyecto.

Tabla de Contenidos

1. Introducción. 11

2. Generalidades. 13
2.1. Estabilidad transitoria. . . . 13
2.1.1. Conceptos Básicos. . . . 13
2.1.2. Simulación de Sistemas de Potencia. . . . 17
2.2. Introducción a los sistemas de excitación. . . . 20
2.2.1. Requerimientos que debe cumplir un sistema de excitación. . . . 20
2.2.2. Componentes de un sistema de excitación. . . . 20
2.2.3. Tipos de sistemas de excitación. . . . 20
2.2.4. Medida del comportamiento dinámico. . . . 22
2.2.5. Modelado de los sistemas de excitación. . . . 23
2.3. Modelados y simulación de sistemas en Simulink. . . . 27
2.3.1. Sistema de control. . . . 27
2.3.2. Sistema de potencia. . . . 27

3. Metodología. 31
3.1. Modelado de Sistemas de Excitación según estándares IEEE. . . . 31
3.2. Procedimiento. . . . 31

4. Salto Grande. 35
4.1. Sist. de Excitación de Salto Grande 35
4.1.1. Análisis del diagrama de bloques del Regulador de Tensión. . . . 35
4.1.2. Modelo SG-UTE-SL. . . . 36
4.1.3. Validación del modelo SG-UTE-SL. . . . 39
4.2. Sist. de Excitación de Salto Grande IEEE 54
4.2.1. Modelo SG-IEEE-SL. . . . 54
4.2.2. Estimación de los Parámetros del modelo SG-UTE-SL. . . . 56
4.2.3. Validación del modelo SG-IEEE-SL. . . . 57
4.3. Análisis del ripple. . . . 65
4.3.1. Estudio del Ripple en SG-UTE-SL 65
4.4. Simulaciones Adicionales. . . . 70
4.5. Conclusiones del sistema de excitación de Salto Grande. . . . 73
4.5.1. Conclusiones sobre el Modelo SG-IEEE-SL. . . . 73

5. Baygorria 75
5.1. Sist. de Excitación de Baygorria 75
5.1.1. Análisis del diagrama de bloques del regulador de tensión. . . . 75
5.1.2. Modelo BY-IEEE-SL. . . . 77
5.2. Validación del modelo BAY-IEEE-SL. . . . 81
5.2.1. Simulación: Escalón en tensión de referencia 81
5.2.2. Simulación: Desconexión de carga 93
5.3. Conclusiones del Sistema de Excitación de Baygorria 105
5.3.1. Conclusiones sobre el Modelo BY-IEEE-SL. . . . 105
5.3.2. Implementaciones adicionales al modelo del regulador de tensión. . . . 106

6. Palmar **107**
6.1. Sistema de Excitación de Palmar: Modelo PAL01 . . . 107
6.1.1. Análisis diag. bloques PAL01 . . . 108
6.1.2. Modelo PAL01-UTE-SL. . . . 108
6.1.3. Validación del Modelo PAL01-UTE-SL. . . . 110
6.2. Sist. Excitación PAL01 IEEE . . . 123
6.2.1. Modelo PAL01-IEEE-SL. . . . 123
6.2.2. PAL01-IEEE-SL . . . 125
6.2.3. Validación del Modelo PAL01-IEEE-SL. . . . 127
6.3. Sistema de Excitación de Palmar: Modelo PAL02 . . . 138
6.3.1. Modelo PAL02-UTE-SL . . . 138
6.3.2. Validación del Modelo PAL02-UTE-SL. . . . 140
6.4. Sist. Excitación PAL02 IEEE . . . 151
6.4.1. Modelo PAL02-IEEE-SL. . . . 151
6.4.2. Validación del Modelo PAL02-IEEE-SL. . . . 152
6.5. Conclusiones del sistema de excitación de Palmar. . . . 164
6.5.1. Conclusiones sobre el Modelo PAL02-IEEE-SL. . . . 164

7. Validación de Modelos en PSS/E **167**
7.1. Generalidades. . . . 167
7.2. Caso de estudio. . . . 167
7.3. Modelos Estándar en PSS/E. . . . 167
7.3.1. Modelo Estándar Salto Grande: IEEE ST1A. . . . 167
7.3.2. Modelo Estándar Palmar IEEE ST3A. . . . 168
7.4. Resultados . . . 168
7.4.1. Sistema de Excitación de Salto Grande. . . . 169
7.4.2. Sistema de Excitación de Palmar. . . . 174
7.5. Conclusiones. . . . 178

8. Conclusiones Generales **179**

A. Gestión de Proyecto. **185**
A.1. Plan de Proyecto. . . . 186

B. Contenido del CD. **193**

Lista de Figuras

2.1. Ejemplo de máquina y motor síncronos interconectados . . . 15
2.2. Modelo Máquina fuente de tensión atrás de una reactancia . . . 17
2.3. Modelo Máquina fuente de tensión atrás de una reactancia considerando ec. Park . . . 18
2.4. Modelo Máquina con ecuaciones de Park completas . . . 18
2.5. Modelo Máquina con todas las dinámicas asociadas . . . 19
2.6. Excitador DC de excitación independiente. . . . 24
2.7. Excitador AC. . . . 24
2.8. Rectificador. . . . 25
2.9. Bloque integrador con límites de "windup". . . . 25
2.10. Bloque integrador con límites de "non-windup". . . . 26
2.11. Modelo de un Amplificador. . . . 26
2.12. Realimentación estabilizantes del sistema de excitación. . . . 26
2.13. Transductor de tensión y compensador de carga. . . . 27
2.14. Bloque máquina sincrónica . . . 28
2.15. Bloque Turbina Hidroeléctrica . . . 28

4.1. Regulador de Tensión de Salto Grande. . . . 36
4.2. Modelo SG-UTE-SL . . . 38
4.3. Respuesta al Escalón Modelo SG-UTE. . . . 39
4.4. Modelo SG-UTE-SL: Respuesta al Escalón . . . 41
4.5. Modelo SG-UTE-SL: Tensión de Excitación . . . 42
4.6. Modelo SG-UTE-SL: Tensión de Excitación antes del escalón . . . 43
4.7. Modelo SG-UTE-SL: Tensión de Excitación después del escalón . . . 43
4.8. Modelo SG-UTE-SL: Tensión de excitación para condiciones de carga diferentes. . . . 44
4.9. Modelo SG-UTE-SL: Tiempo de bajada de la tensión de Excitación. . . . 45
4.10. Modelo SG-UTE-SL: Tiempo de asentamiento de la tensión de Excitación. . . . 46
4.11. Modelo SG-UTE-SL: Tensión Terminal. . . . 46
4.12. Modelo SG-UTE-SL: Tensión Terminal antes de aplicado el escalón. . . . 47
4.13. Modelo SG-UTE-SL: Tensión Terminal luego de aplicado el escalón. . . . 47
4.14. Modelo SG-UTE-SL: Tiempo de subida tensión terminal. . . . 48
4.15. Modelo SG-UTE-SL: Tiempo de asentamiento de la tensión terminal. . . . 49
4.16. Modelo SG-UTE-SL: Tensión terminal para condiciones de carga diferentes. . . . 51
4.17. Sistema de Excitación Estático ST1A . . . 54
4.18. Modelo SG-IEEE-SL . . . 55
4.19. Modelo SG-IEEE-SL: Respuesta al escalón. . . . 58
4.20. Modelo SG-IEEE-SL: Tensión de Excitación. . . . 58
4.21. Modelo SG-IEEE-SL: Tiempo de asentamiento. . . . 59
4.22. Modelo SG-IEEE-SL: Tensión Terminal. . . . 60
4.23. Modelo SG-IEEE-SL: Tiempo de Subida. . . . 61
4.24. Modelo SG-IEEE-SL: Tiempo de asentamiento. . . . 61
4.25. SG-UTE-SL vs SG-IEEE-SL: Tensión de Excitación. . . . 62
4.26. SG-UTE-SL vs SG-IEEE-SL: Tensión Terminal. . . . 63
4.27. Modelo SG-UTE-SL con Entradas Constantes. . . . 65
4.28. Modelo SG-UTE-SL con Entradas Constantes: Corriente de Campo. . . . 66
4.29. Transferencia. . . . 66

4.30. Modelo SG-UTE-SL con puente de Diodos. 67
4.31. Modelo SG-UTE-SL con puente de Diodos: Tensión de Excitación. 67
4.32. Modelo SG-UTE-SL con puente de Diodos: detalle Tensión de Excitación. 68
4.33. Modelo SG-UTE-SL con puente de Diodos: Tensión terminal. 69
4.34. Modelo SG-UTE-SL con puente de Diodos: detalle Tensión terminal. 69
4.35. Respuesta a dos escalones: V_{ref_1} a V_{ref_2} y de V_{ref_2} a V_{sup} 70
4.36. Respuesta a dos escalones: V_{ref} a $1{,}1 \cdot V_{ref}$ y de $1{,}1 \cdot V_{ref}$ a V_{inf} 71
4.37. Respuesta a dos escalones: V_{ref_1} a V_{ref_2} y de V_{ref_2} a V_{sup} 71
4.38. Respuesta a dos escalones: V_{ref_1} a V_{ref_2} y de V_{ref_2} a V_{inf} 72

5.1. Regulador de Tensión de Baygorria. 76
5.2. Amplificador con límites de non-windup 76
5.3. Bloques de Compensación y detección de carga según IEEE 77
5.4. Modelo AC5A 77
5.5. Bloque de Compensación 78
5.6. Bloque de Saturación 78
5.7. Implementación en Simulink del Amplificador con límites de non windup 79
5.8. Modelo BY-IEEE-SL 80
5.9. Modelo BY-UTE: Simulación del escalón en $Vref$ 81
5.10. Respuestas temporales de la simulación del escalón en Vref, en Simulink 84
5.11. Respuesta de la tensión de excitación para el escalón en Vref 85
5.12. Respuesta de la tensión de excitación, cálculo del tiempo de subida 86
5.13. Respuesta de la tensión de excitación, cálculo del tiempo de bajada 86
5.14. Respuesta de la tensión de excitación, cálculo del tiempo de asentamiento desde el máximo . 87
5.15. Respuesta de la tensión en terminales para el escalón en Vref 88
5.16. Respuesta de la tensión en terminales, cálculo del tiempo de subida 89
5.17. Respuesta de la tensión en terminales, cálculo del tiempo de bajada 89
5.18. Respuesta de la tensión en terminales, cálculo del tiempo de asentamiento desde el máximo . 90
5.19. Simulación de desconexión de carga inductiva de UTE 93
5.20. Diagrama para la simulación de rechazo de carga implementada en Simulink 96
5.21. Respuestas temporales de la simulación de rechazo de carga en Simulink 97
5.22. Respuesta de la tensión de excitación para la simulación de desconexión de carga 98
5.23. Respuesta de la tensión de excitación, cálculo del tiempo de subida 98
5.24. Respuesta de la tensión de excitación, cálculo del tiempo de bajada 99
5.25. Respuesta de la tensión de excitación, cálculo del tiempo de asentamiento desde el máximo . 99
5.26. Respuesta de la tensión en terminales para la simulación de desconexión de carga 100
5.27. Respuesta de la tensión en terminales, cálculo del tiempo de subida 101
5.28. Respuesta de la tensión en terminales, cálculo del tiempo de bajada 101
5.29. Respuesta de la tensión en terminales, cálculo del tiempo de asentamiento desde el máximo . 102
5.30. Modelo Estándar AC5A de la IEEE 105

6.1. Regulador de Tensión PAL01 de Palmar. 108
6.2. PAL01-UTE-SL: Ajuste V_{ref} 109
6.3. PAL01-UTE-SL: Bloque limitador a URAL y Limitador de corriente 109
6.4. PAL01-UTE-SL: Bloque limitador $V_{min} - V_{max}$ 110
6.5. PAL01-UTE-SL: Implementación en Simulink 111
6.6. Tensión de excitación modelo PAL01, escalón en terminales 112
6.7. Tensión en terminales modelo PAL01, escalón en terminales 113
6.8. Diagrama para la simulación de PAL01 implementada en Simulink 114
6.9. Tensión de excitación para escalón en terminales del PAL01 115
6.10. Respuesta de la tensión de excitación, cálculo del tiempo de bajada primer escalón 116
6.11. Respuesta de la tensión de excitación, cálculo del tiempo de asentamiento del primer escalón 116
6.12. Respuesta de la tensión de excitación, cálculo del tiempo de subida del segundo escalón . . . 117
6.13. Respuesta de la tensión de excitación, cálculo del tiempo de asentamiento del segundo escalón 117
6.14. Respuesta de la tensión en terminales para el escalón en Vterm 118
6.15. Respuesta de la tensión en terminales, cálculo del tiempo de subida primer escalón 119
6.16. Respuesta de la tensión en terminales, cálculo del tiempo de asentamiento primer escalón . . 119

6.17. Respuesta de la tensión en terminales, cálculo del tiempo de bajada del segundo escalón . . . 120
6.18. Respuesta de la tensión en terminales, cálculo del tiempo de asentamiento del segundo escalón 120
6.19. Modelo estándar IEEE: ST3A . . . 123
6.20. Bloque FEX . . . 123
6.21. Implementación bloque de transferencia con límites de non-windup . . . 124
6.22. Implementación bloque HV-GATE . . . 125
6.23. Implementación bloque Ajuste V_{ref} . . . 125
6.24. Modelo PAL01-IEEE-SL . . . 126
6.25. Respuesta del modelo PAL01-IEEE-SL, escalón de 1.0 a 1.4 en tensión de referencia . . . 127
6.26. Tensión de excitación escalón a 1.4 - Modelos: PAL01-IEEE-SL vs. PAL01-UTE-SL. . . . 128
6.27. Modelo PAL01-IEEE-SL - Tensión excitación escalón a 1.4 - Tiempo de subida. . . . 129
6.28. Modelo PAL01-IEEE-SL - Tensión excitación escalón a 1.4 - Tiempo de bajada. . . . 130
6.29. Modelo PAL01-IEEE-SL - Tensión excitación escalón a 1.4 - Tiempo de asentamiento. . . . 131
6.30. Modelo PAL01-UTE-SL - Tensión excitación escalón a 1.4 - Tiempo de subida. . . . 131
6.31. Modelo PAL01-UTE-SL - Tensión excitación escalón a 1.4 - Tiempo de bajada. . . . 132
6.32. Modelo PAL01-UTE-SL - Tensión excitación escalón a 1.4 - Tiempo de asentamiento. . . . 132
6.33. Tensión en terminales escalón a 1.4 - Modelos: PAL01-IEEE-SL vs. PAL01-UTE-SL. . . . 133
6.34. Modelo PAL01-UTE-SL - Tensión en terminales escalón a 1.4 - Tiempo de subida. . . . 133
6.35. Modelo PAL01-IEEE-SL - Tensión terminales escalón a 1.4 - Tiempo de asentamiento. . . . 134
6.36. Modelo PAL01-UTE-SL - Tensión en terminales escalón a 1.4 - Tiempo de subida. . . . 134
6.37. Modelo PAL01-UTE-SL - Tensión en terminales escalón a 1.4 - Tiempo de asentamiento. . . 135
6.38. Tensión de excitación escalón a 1.1 p.u. - Modelos: PAL01-IEEE-SL vs. PAL01-UTE-SL. . . . 135
6.39. Tensión en terminales escalón a 1.1 p.u. - Modelos: PAL01-IEEE-SL vs. PAL01-UTE-SL. . . 136
6.40. Tensión de excitación escalón a 0.7 p.u. - Modelos: PAL01-IEEE-SL vs. PAL01-UTE-SL. . . . 136
6.41. Tensión en terminales escalón a 0.7 p.u. - Modelos: PAL01-IEEE-SL vs. PAL01-UTE-SL. . . 137
6.42. Regulador de Tensión PAL02 de Palmar. . . . 138
6.43. Tensión de excitación PAL01 vs tension de excitación Pal02 . . . 139
6.44. Tensión de excitación para escalón en terminales del PAL02 . . . 143
6.45. Respuesta de la tensión de excitación, cálculo del tiempo de bajada primer escalón . . . 143
6.46. Respuesta de la tensión de excitación, cálculo del tiempo de asentamiento del primer escalón 144
6.47. Respuesta de la tensión de excitación, cálculo del tiempo de subida del segundo escalón . . . 144
6.48. Respuesta de la tensión de excitación, cálculo del tiempo de asentamiento del segundo escalón 145
6.49. Respuesta de la tensión en terminales para el escalón en Vterm . . . 146
6.50. Respuesta de la tensión en terminales, cálculo del tiempo de subida primer escalón . . . 147
6.51. Respuesta de la tensión en terminales, cálculo del tiempo de asentamiento primer escalón . . 147
6.52. Respuesta de la tensión en terminales, cálculo del tiempo de bajada del segundo escalón . . . 148
6.53. Respuesta de la tensión en terminales, cálculo del tiempo de asentamiento del segundo escalón 148
6.54. Respuesta del modelo PAL02-IEEE-SL, escalón de 1.0 a 1.5 en tensión de referencia . . . 152
6.55. Tensión de excitación escalón a 1.5 - Modelos: PAL02-IEEE-SL vs. PAL02-UTE-SL. . . . 153
6.56. Modelo PAL02-IEEE-SL - Tensión excitación escalón a 1.5 - Tiempo de subida. . . . 154
6.57. Modelo PAL02-IEEE-SL - Tensión excitación escalón a 1.5 - Tiempo de bajada. . . . 155
6.58. Modelo PAL02-IEEE-SL - Tensión excitación escalón a 1.5 - Tiempo de asentamiento. . . . 156
6.59. Modelo PAL02-UTE-SL - Tensión excitación escalón a 1.5 - Tiempo de subida. . . . 156
6.60. Modelo PAL02-UTE-SL - Tensión excitación escalón a 1.5 - Tiempo de bajada. . . . 157
6.61. Modelo PAL02-UTE-SL - Tensión excitación escalón a 1.5 - Tiempo de asentamiento. . . . 157
6.62. Tensión en terminales escalón a 1.5 - Modelos: PAL02-IEEE-SL vs. PAL02-UTE-SL. . . . 158
6.63. Modelo PAL02-UTE-SL - Tensión en terminales escalón a 1.5 - Tiempo de subida. . . . 158
6.64. Modelo PAL02-IEEE-SL - Tensión terminales escalón a 1.5 - Tiempo de asentamiento. . . . 159
6.65. Modelo PAL02-UTE-SL - Tensión en terminales escalón a 1.5 - Tiempo de subida. . . . 159
6.66. Modelo PAL02-UTE-SL - Tensión en terminales escalón a 1.5 - Tiempo de asentamiento. . . 160
6.67. Tensión de excitación escalón a 1.1 p.u. - Modelos: PAL02-IEEE-SL vs. PAL02-UTE-SL. . . . 161
6.68. Tensión en terminales escalón a 1.1 p.u. - Modelos: PAL02-IEEE-SL vs. PAL02-UTE-SL. . . 162
6.69. Tensión de excitación escalón a 0.7 p.u. - Modelos: PAL02-IEEE-SL vs. PAL02-UTE-SL. . . . 162
6.70. Tensión en terminales escalón a 0.7 p.u. - Modelos: PAL02-IEEE-SL vs. PAL02-UTE-SL. . . 163

7.1. Modelo Estándar IEEE ST1A para PSS/E. . . . 168
7.2. Código para llamar el modelo ST1A en PSS/E. . . . 168

7.3. Parámetros utilizados para el modelo ST1A en PSS/E. 168
7.4. Modelo Estándar IEEE ST3A para PSS/E. 169
7.5. Código para llamar el modelo ST3A en PSS/E. 169
7.6. Parámetros utilizados para el modelo ST3A en PSS/E. 169
7.7. Máquina Salto Grande: comparación tensión de excitación. 170
7.8. Máquina Salto Grande: detalle tensión de excitación. 171
7.9. Máquina Salto Grande: comparación tensión en terminales. 171
7.10. Máquina Salto Grande: detalle tensión en terminales. 172
7.11. Máquina Salto Grande: comparación desfasaje de ángulo de giro. 172
7.12. Máquina Salto Grande: comparación de potencia activa. 173
7.13. Máquina Palmar: comparación tensión de excitación. 174
7.14. Máquina Palmar: detalle tensión de excitación. 175
7.15. Máquina Palmar: comparación tensión en terminales. 175
7.16. Máquina Palmar: detalle tensión en terminales. 176
7.17. Máquina Palmar: comparación desfasaje de ángulo de giro. 176
7.18. Máquina Palmar: comparación de potencia activa. 177
7.19. Máquina Palmar: comparación de potencia reactiva. 177

A.1. WBS 190
A.2. Matriz de riesgos inicial 191
A.3. Matriz de riesgos final 192

Capítulo 1

Introducción.

Presentación del trabajo.

El siguiente trabajo se presenta como proyecto de fin de carrera para la obtención del título de Ingeniero Electricista de la Universidad de la República Oriental del Uruguay. Se enfoca en el modelado de sistemas de excitación de máquinas sincrónicas.

El proyecto nace de la necesidad, del grupo de Estabilidad y Control del Instituto de Ingeniería Eléctrica (IIE), de simular el comportamiento de la red uruguaya. El problema que se abarca es que, si bien existen modelos de los generadores, se busca estandarizarlos con los formatos propuestos por la IEEE.

La empresa eléctrica UTE, utiliza para realizar simulaciones de estabilidad transitoria un software particular (PSS/E de Siemens), y los modelos de los sistemas de excitación están implementados como modelos de usuario en dicho programa. En algunos casos, estos modelos exceden lo imprescindible para estudios de estabilidad. Dentro de los generadores a estudiar, se encuentran los de las centrales hidroeléctricas de Palmar, Baygorria y Salto Grande.

Si bien las represas están conformadas por varias máquinas, a los efectos del proyecto, se trabajará con una sola y al simular la red completa, se utilizará el mismo modelo para todas las máquinas. Los parámetros y los modelos de usuario de los sistemas de excitación de las máquinas mencionadas, fueron tomados de la documentación brindada por UTE.

El estudio, modelado y ajuste se realizó con el software Simulink de MatLab. Los resultados obtenidos fueron validados observando los transitorios, al introducir una falta en la red uruguaya con el software PSS/E. La validación consiste en la comparación de las respuestas con los modelos ya utilizados por UTE, e implementados en el sistema, contra el mismo sistema con los modelos alternativos propuestos en el proyecto.

Desarrollo de la documentación.

En el capítulo 2 se presenta un estudio teórico con los principales conceptos que se manejan para un estudio de estabilidad y para los sistemas de excitación. En el capítulo siguiente se explican algunas generalidades de los modelos llevados a Simulink, y luego capítulo a capítulo se trabaja con el modelo particular de cada máquina. Por último el trabajo se cierra con las validaciones en gran señal realizadas con el software PSS/E y las conclusiones generales del proyecto.

Resultados.

El producto final del proyecto son los modelos de los sistemas de excitación de Salto Grande, Palmar y Baygorria según estándares IEEE. La principal ventaja es que pueden ser fácilmente implementados por cualquier programa de estudios de estabilidad transitoria, que tenga, en su librería, los modelos de la IEEE.

También se explora el uso de Simulink como software para el estudio de sistemas de potencia y se analiza el potencial de los estándares IEEE para modelar sistemas de excitación particulares.

Capítulo 2

Generalidades.

El contenido teórico que se describe a continuación fue extraído, en su mayor parte, del libro "Power System Stability and Control" del autor Prabha Kundur [4]. También se utilizaron otras referencias, las cuales serán presentadas a medida que se vayan citando.

2.1. Estabilidad transitoria.

El objetivo del proyecto es el modelado de los sistemas de excitación de generadores síncronos, desde el punto de vista de la estabilidad transitoria, por lo que para comenzar se hace una introducción a la estabilidad transitoria, con el fin de describir el marco teórico de trabajo.

2.1.1. Conceptos Básicos.

Un sistema de potencia es transitoriamente estable, para una condición de régimen inicial y una determinada perturbación, si luego de ser perturbado, el sistema alcanza una condición de operación en régimen aceptable [13].

La inestabilidad en un sistema de potencia se puede manifestar de diversas maneras, por ejemplo la pérdida de sincronismo o el colapso de tensión, dependiendo de la configuración del sistema y su modo de operación.

Estabilidad del ángulo del rotor.

La estabilidad del ángulo del rotor, es la virtud de permanecer en sincronismo que tienen un grupo de máquinas sincrónicas interconectadas entre sí. El problema de estabilidad, involucra el estudio de las oscilaciones electromecánicas inherentes al sistema de potencia, en particular, la variación de la potencia de salida de la máquina a medida que el rotor oscila. A continuación se presenta una pequeña introducción de las características de las máquinas sincrónicas.

Características de la máquina sincrónica.

Simplemente se van a describir, sin entrar en detalles constructivos ni de modelado, las principales características de una máquina sincrónica.

Una máquina sincrónica, tiene dos elementos principales: el campo y la armadura. Normalmente, el campo está en el rotor y la armadura en el estator. El devanado de campo, se excita por corriente continua (corriente de excitación) y cuando el rotor es movido por una máquina primaria (por ejemplo una turbina), el campo magnético rotativo del devanado de campo, induce una tensión alterna en los devanados de armadura del estator. La frecuencia de la tensión inducida y de la corriente (cuando se conecta una carga), depende de la velocidad del rotor. La frecuencia eléctrica del estator está sincronizada con la velocidad mecánica del rotor, de donde proviene el nombre de "máquina sincrónica".

Al interconectar dos o más máquinas sincrónicas, la tensión y la corriente del estator, para todas las máquinas, deben tener la misma frecuencia. Como la frecuencia está sincronizada con la velocidad mecánica del rotor, las velocidades mecánicas de los rotores deben estar sincronizadas entre sí.

La distribución física de los devanados de armadura es tal que la corriente alterna que circula por los devanados, produce un campo magnético rotativo que, en régimen permanente, rota a la misma velocidad

del rotor. El campo del estator, reacciona con el del rotor y un torque electromagnético surge de la tendencia a alinearse que tienen ambos campos. Dicho campo electromagnético se opone al movimiento del rotor, y por lo tanto, se necesita un torque mecánico para mantener su rotación. El torque, o potencia eléctrica, de salida del generador, se modifica cuando cambia el torque mecánico impuesto por la máquina primaria. El efecto de incrementar el torque mecánico es que la posición relativa del rotor avanza con respecto al campo magnético del estator, y si se disminuye el torque mecánico, dicha posición relativa se retarda. Bajo condiciones de régimen, el campo del estator y del rotor tienen la misma velocidad, pero existe un desfasaje entre ellos, dependiente de la potencia eléctrica de salida del generador. Los términos torque y potencia, se han usado indistintamente, dado que el promedio de la velocidad de rotación de las máquinas es constante, aunque se presentan pequeñas variaciones en torno a la velocidad de sincronismo.

Relación entre potencia y ángulo.

Un tema importante a considerar es la relación no lineal que existe entre la potencia de intercambio del generador y la posición angular del rotor. A modo de ejemplo, se consideran dos máquinas sincrónicas interconectadas por una línea de transmisión de reactancia X_L, y en donde una de las máquinas trabaja como generador y la otra como motor, ver figura 2.1(a). La potencia transferida del generador al motor es una función de separación angular δ entre los rotores de las máquinas. Esta separación angular se debe a 3 componentes, ver figura 2.1(b):

- Ángulo interno del generador: δ_G. Es el ángulo con el que el rotor adelanta con respecto al campo del estator.
- Diferencia angular entre la tensión del generador y la del motor: δ_L. (O entre los campos del estator del generador respecto al motor)
- Ángulo interno del motor: δ_M. Es el ángulo con el que el rotor atrasa con respecto al campo del estator.

Si se modela tanto el generador como el motor como una fuente de tensión (E_G y E_M) y una reactancia (X_G y X_M), la transferencia de potencia está dada por la siguiente relación no lineal:

$$P = \frac{E_G E_M}{X_T} \cdot \sin\delta \tag{2.1}$$

en donde

$$X_T = X_G + X_M + X_L$$

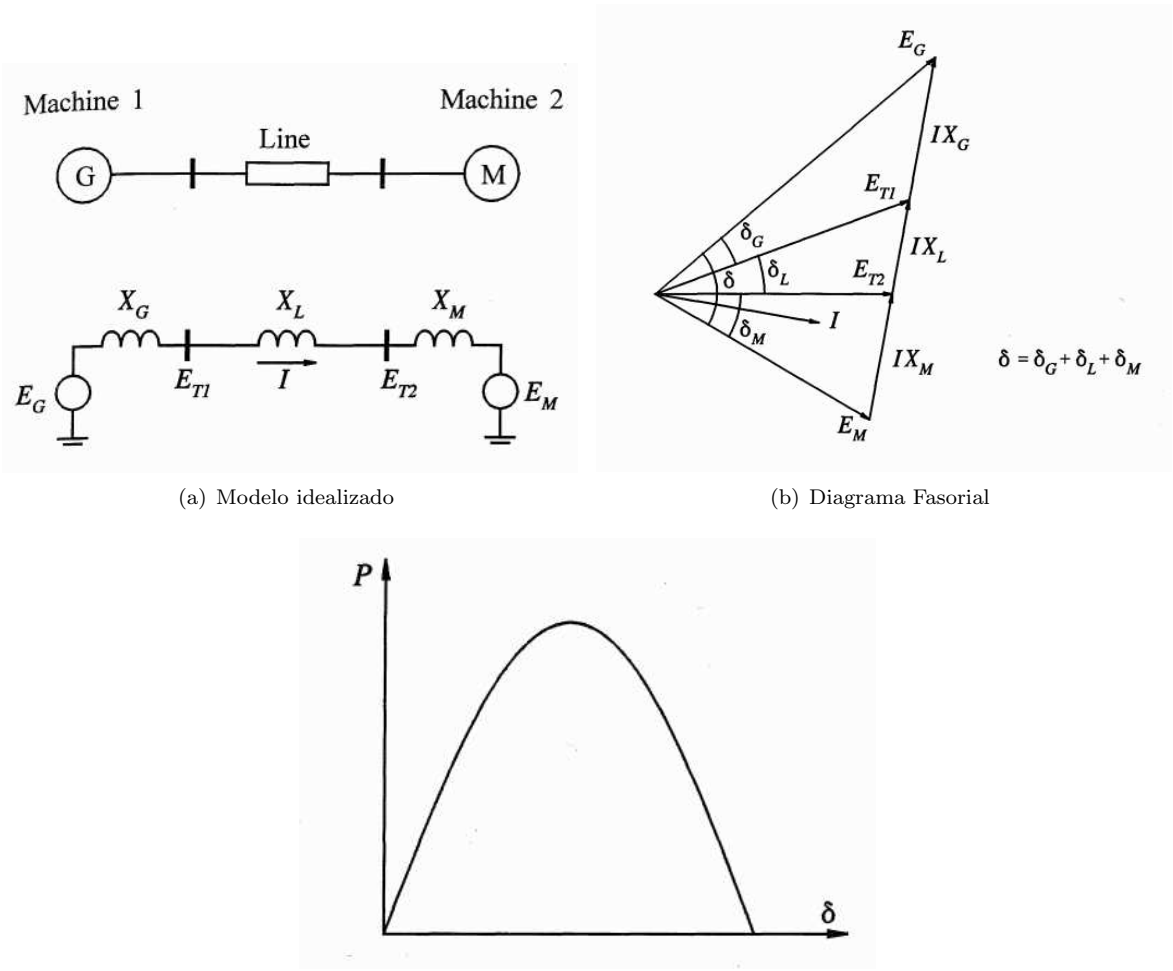
Con el modelado utilizado, la potencia activa que pueden intercambiar el generador y el motor es una función sinusoidal en δ, como se observa en la figura 2.1(c). El máximo de la potencia se da cuando $\delta = 90°$ y es directamente proporcional a los voltajes internos de las máquinas e inversamente proporcional a la reactancia de las máquinas y de la línea.

Si se consideran más de dos máquinas, el desplazamiento relativo angular afecta al intercambio de potencia de manera similar.

La estabilidad.

La estabilidad implica una condición de equilibrio entre dos fuerzas opuestas (no se va a entrar en detalle en las herramientas matemáticas que estudian la estabilidad de un punto de equilibrio). El mecanismo por el cual máquinas sincrónicas interconectadas se mantienen en sincronismo, es por fuerzas de restauración que actúan, cuando existen fuerzas que aceleran o desaceleran una o más máquinas con respecto al resto. En condiciones de régimen, existe un equilibrio entre la potencia mecánica de entrada y la potencia eléctrica de salida de cada máquina, manteniéndose de esta manera la velocidad constante. Si existe una perturbación en el sistema, el equilibrio se pierde resultando en una aceleración o desaceleración de los rotores de las máquinas implicadas. Si un generador se mueve más rápido que otro, la posición angular del rotor acelerado, en relación con la del rotor que se mueve más lento, aumenta. La diferencia angular resultante, hace que parte de la carga se transfiera desde la máquina más lenta a la más rápida, dependiendo de la relación potencia-ángulo. Esto hace que la velocidad del rotor disminuya, y por lo tanto, también disminuye la separación angular, llevando el sistema al estado de régimen inicial.

Después de un cierto límite, un incremento en la separación angular es acompañado por una disminución en la transferencia de potencia, debido a la relación que se desprende la ecuación 2.1. Esto lleva a que la separación angular aumente, llegando a una situación inestable. Para una situación dada, la estabilidad



(a) Modelo idealizado

(b) Diagrama Fasorial

(c) Relación Potencia Ángulo

Figura 2.1: Ejemplo de máquina y motor síncronos interconectados [4].

del sistema de potencia, depende de que las desviaciones angulares de los rotores, provoquen el torque de restauración necesario.

Cuando una máquina sincrónica pierde sincronismo con el resto del sistema, la velocidad del rotor es mayor ó menor que la requerida para generar voltajes con la frecuencia de la red. El deslizamiento entre el campo rotativo del estator (correspondiente a la frecuencia del sistema) y el campo del rotor, resulta en grandes fluctuaciones en la potencia de salida de la máquina, en su tensión y en la corriente. Esto provoca que el sistema de protección actúe, y aísle la máquina del resto de la red. La pérdida de sincronismo se puede dar entre una máquina y el resto, o entre un grupo de máquinas. En este último caso, el sincronismo se mantiene entre cada grupo cuando es separado del otro.

En sistemas eléctricos de potencia, la variación incremental del torque eléctrico de una máquina sincrónica luego de una perturbación se puede descomponer en dos partes, según la siguiente ecuación:

$$\Delta T_e = T_s \Delta\delta + T_D \Delta\omega \tag{2.2}$$

donde

- $T_s \Delta\delta$ es la componente del torque en fase con la variación $\Delta\delta$ del ángulo del rotor y se define como la componente sincronizante del torque. T_s es el coeficiente del torque sincronizante.
- $T_D \Delta\omega$ es la componente del torque en fase con la variación $\Delta\omega$ y se define como la componente de amortiguación del torque. T_D es el coeficiente de amortiguación.

La estabilidad del sistema, depende de la existencia de las dos componentes del torque para cada máquina sincrónica. La falta de torque sincronizante, resulta en una inestabilidad por un desvío aperiódico en el ángulo

del rotor, y la falta de torque de amortiguación, resulta en una inestabilidad oscilatoria.

Estabilidad en pequeña señal.

Un sistema de potencia es estable frente a pequeñas perturbaciones, para una condición de operación en régimen inicial, si luego de una pequeña perturbación, alcanza una operación de régimen que es idéntica o muy cercana a la condición inicial. Una pequeña perturbación es aquella para la cual las ecuaciones dinámicas del sistema pueden ser linealizadas para los propósitos del análisis [13].

Estas perturbaciones ocurren constantemente en los sistemas de potencia, debido a variaciones en la generación y en las cargas. La inestabilidad se puede dar en dos formas:

- aumento en el ángulo del rotor debido a un torque sincronizante insuficiente.
- oscilaciones del rotor con amplitud creciente debido a un torque amortiguante insuficiente.

La naturaleza de la respuesta del sistema frente a pequeñas perturbaciones, depende de numerosos factores entre los que se encuentran la condición inicial, el tamaño del sistema de transmisión y el tipo de sistema de excitación que se usan en los generadores. Para un generador, conectado en forma radial a un gran sistema de potencia, y sin considerar reguladores automáticos de tensión, la inestabilidad se debe a una falta de torque sincronizante. Esto da lugar a una inestabilidad no oscilatoria. Ahora bien, si actúan los reguladores automáticos de tensión (como es el caso de los sistemas de potencia de la actualidad) el problema de estabilidad frente a pequeñas perturbaciones, se transforma en asegurar la amortiguación necesaria para las oscilaciones del sistema. La inestabilidad se da en oscilaciones de amplitud creciente.

Estabilidad transitoria.

Es la propiedad del sistema, de mantener el sincronismo frente a severas perturbaciones transitorias. La respuesta del sistema involucra una gran excursión del ángulo del rotor y es influenciado por la relación no lineal entre la potencia y el ángulo. La estabilidad depende de las condiciones iniciales de operación, y la magnitud de la perturbación. En general, el sistema se altera de tal manera que la condición post falta es diferente a la condición pre falta de operación.

Una gran gama de perturbaciones, en distintos grados de magnitud y probabilidades de ocurrencia, se pueden dar en un sistema de potencia. Sin embargo, se selecciona un determinado conjunto de contingencias y se diseña el sistema de tal manera que sea capaz de permanecer estable frente a las perturbaciones. Usualmente, las contingencias son cortocircuitos de diferentes tipos: fase-tierra, fase-fase-tierra, trifásico. Se asume que ocurren principalmente en líneas de transmisión, pero también son consideradas, en algunos casos, en generadores y barras. La falta se despeja mediante la apertura de los interruptores apropiados.

Cuando no hay suficiente torque sincronizante, se tiene una situación denominada inestabilidad "first-swing" en la que el ángulo del rotor aumenta continuamente hasta que se pierde el sincronismo. También se puede dar una situación, en la que el sistema permanece estable después de un primer swing, pero se torna inestable debido a oscilaciones crecientes. Esto generalmente ocurre cuando, en régimen, el sistema post falta es inestable en pequeña señal, y no necesariamente como un resultado de perturbaciones transitorias.

En grandes sistemas de potencia, la inestabilidad transitoria no se da solamente por "first-swing", sino que puede suceder por una superposición de modos de oscilación, que causan grandes excursiones en el ángulo del rotor luego del primer swing.

En estudios de estabilidad transitoria, el período de tiempo de interés se encuentra entre los 3 y 5 segundos luego de la perturbación, aunque se puede extender a 10 segundos en grandes sistemas con modos de oscilación "entre áreas" (*swing* de máquinas en una parte del sistema con respecto a otras máquinas en otra parte del sistema).

Estabilidad y colapso de tensión.

La estabilidad de tensión, es la propiedad que tiene un sistema, de mantener valores de voltaje de régimen aceptables en todas las barras, tanto en condiciones normales de operación, como luego de sufrir una perturbación. Un sistema entra en un estado inestable de tensión cuando, una perturbación, aumento de carga o cambio en las condiciones del sistema, provoca una caída incontrolable de tensión. La causa principal de este tipo de inestabilidad, es la imposibilidad del sistema de cumplir con la demanda de potencia reactiva. El problema se basa en la caída de tensión, con el flujo de potencia activa y reactiva, a través de las reactancias inductivas asociadas a las líneas de transmisión [4].

El colapso de tensión es un proceso por el cual, una secuencia de eventos acompañados de inestabilidad de tensión, llevan a una significativa parte del sistema, a bajos niveles de tensión [3].

2.1.2. Simulación de Sistemas de Potencia.

Modelos para estudios de estabilidad transitoria.

Es importante aclarar que el estudio realizado se centra en el comportamiento de los sistemas de excitación, desde el punto de la estabilidad transitoria, ya que la documentación brindada por UTE, se basa en el modelado y simulaciones en el software PSS/E, el cual hace las simplificaciones propias de un programa para este tipo de estudios.

Se utilizan las hipótesis comunes para un estudio de estabilidad, despreciando los siguientes términos para el voltaje en el estator:

- Derivada del flujo $d\psi_d/dt$ y $d\psi_q/dt$ en el estator.
- Los efectos de las variaciones en la velocidad del rotor.

El objetivo de estas simplificaciones es reducir los costos computacionales asociados a las simulaciones, sin perder la información necesaria para los estudios de estabilidad transitoria. Los transitorios asociados a la red, decaen rápidamente y por lo tanto no se justifica modelar sus efectos en estudios de estabilidad. Para poder despreciar estos transitorios, se deben despreciar los transitorios asociados a la máquina que tengan constantes de tiempo del mismo orden, para no tener inconsistencia en las ecuaciones que gobiernan la dinámica del sistema de potencia.

En las siguientes figuras se observan los distintos modelos de máquinas interconectadas con la red para estudios de estabilidad transitoria. Van de la más simple en la figura 2.2 a la más compleja en la figura 2.4.

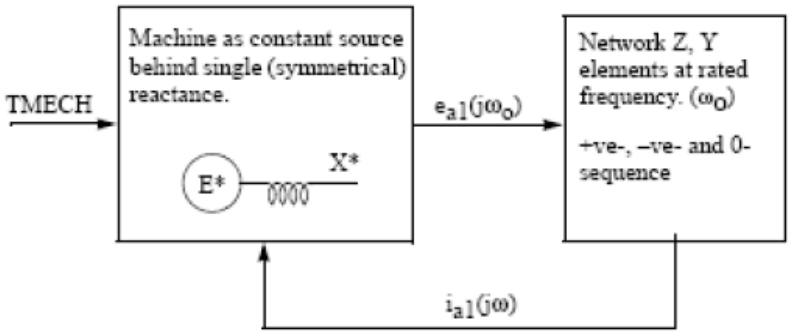


Figura 2.2: Modelo Máquina fuente de tensión atrás de una reactancia [1].

En la figura 2.2 se observa el modelo más simple de máquina sincrónica interconectada con la red. La máquina se representa como una fuente de tensión atrás de una reactancia y la red como un conjunto de impedancias serie y paralelo [1, pág. 34].

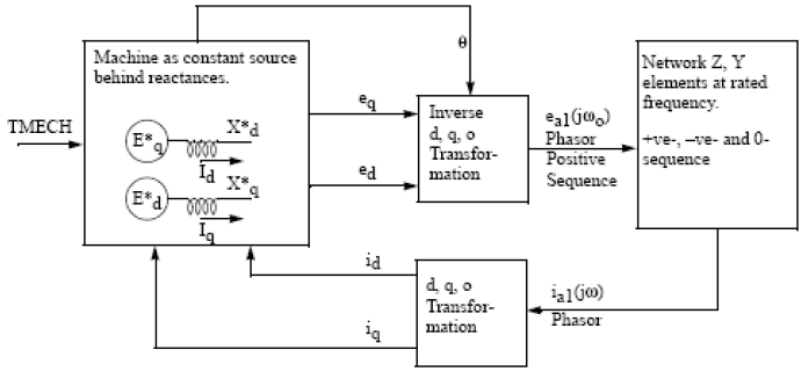


Figura 2.3: Modelo Máquina fuente de tensión atrás de una reactancia considerando ecuaciones de Park [1].

En la figura 2.3 la máquina se modela ahora con las coordenadas de Park, y las reactancias pueden ser sincrónicas, transitorias, o subtransitorias de acuerdo al estudio que se quiera realizar [1, pág. 34]. La transformada de Park se utiliza en estudios de estabilidad transitoria para simplificar las ecuaciones de la máquina, según los ejes d, q y 0. El eje d está sobre el eje del rotor, el eje q está en cuadratura con el eje del rotor y el eje 0 es ortogonal al plano formado por dq.

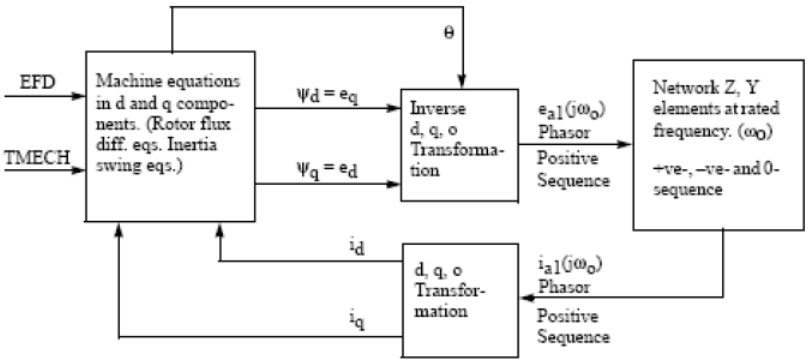


Figura 2.4: Modelo Máquina con ecuaciones de Park completas [1].

En la figura 2.4 la máquina se modela con las coordenadas de Park completas, sin despreciar la dinámica del rotor. Este es el modelo más completo que se ha desarrollado con las simplificaciones propias de estudios de estabilidad transitoria [1, pág. 35].

Es importante aclarar que estas simplificaciones modifican la respuesta del sistema, pero las diferencias no alteran el estudio de estabilidad transitoria e implican considerar un peor caso de la realidad. Por lo tanto, los resultados que se obtienen con estos modelos son válidos para estudios de estabilidad transitoria.

Programas para modelar dinámicas más rápidas que la estabilidad transitoria.

Así como los programas para estudios de estabilidad transitoria, no modelan los fenómenos que desaparecen lo suficientemente rápido para no influir en la estabilidad del sistema, existen otros estudios (por ejemplo estudios de transitorios electromagnéticos) que si los consideran, y por lo tanto existen programas de simulación adecuados. Estos programas modelan con todo detalle los elementos del sistema, por lo que las respuestas obtenidas de los mismos serán más "cercanas a la realidad". Cada modelo tiene sus ventajas y desventajas de acuerdo a las dinámicas que se quieran observar.

En la figura 2.5 se observa un ejemplo de este tipo de modelos, en donde se puede observar que la red se modela con toda su dinámica a partir de las ecuaciones diferenciales.

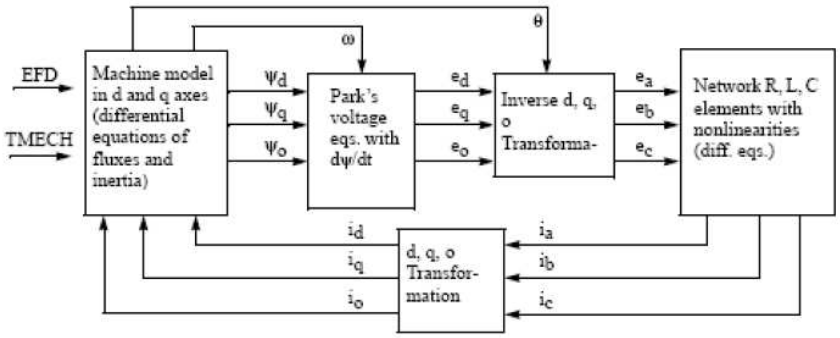


Figura 2.5: Modelo Máquina con todas las dinámicas asociadas [1]

Es importante observar que existen diferencias en los modelados con ambos tipos de programas, y por lo tanto es muy importante definir el tipo de comportamiento que se quiera estudiar para hacerlo con la herramienta adecuada. Este comentario toma importancia en el proyecto, ya que se hizo el modelado y simulaciones con el Simulink de MatLab que modela todas las dinámicas que ocurren en el sistema. Si bien para el estudio de estabilidad, se utiliza un programa que simula toda la dinámica del sistema, las simulaciones realizadas involucran cargas puntuales y máquinas aisladas. Por lo tanto, el costo computacional no será significativo.

2.2. Introducción a los sistemas de excitación.

En la sección 2.1 se definió el marco de trabajo general que son los estudios de estabilidad transitoria, de manera de dar a entender el tipo de dinámicas que se buscan observar. En este capítulo se va a dar una breve introducción a los sistemas de excitación, donde se busca exponer sobre los sistemas de excitación, y cómo están compuestos.

Funciones básicas de un sistema de excitación.

La función básica de un sistema de excitación, es suministrar la corriente de excitación al devanado de campo de la máquina sincrónica. A su vez, se le asignan funciones de protección y control, que son importantes para el desempeño del sistema de potencia.

Las funciones de protección implican velar por que los límites de operación de la máquina, del sistema de excitación y resto del equipamiento no sea excedido. Las funciones de control, incluyen el control propiamente dicho de la tensión terminal, del flujo de potencia reactiva y de la estabilidad del sistema. Ambas funciones se realizan mediante el control de la tensión de campo y por consiguiente de la corriente de campo.

2.2.1. Requerimientos que debe cumplir un sistema de excitación.

El control de excitación de un generador va a estar determinado por el propio generador y por el sistema de potencia al que está conectado.

Desde el punto de vista del generador, el sistema de excitación debe suministrar y ajustar automáticamente la corriente de campo, para mantener la tensión en terminales de la máquina, a medida que varía el flujo de potencia. A su vez, debe ser capaz de responder a perturbaciones transitorias en el sistema, manteniendo la corriente de campo adecuada de manera de no exceder los límites de funcionamiento del generador.

Desde el punto de vista del sistema de potencia, el sistema de excitación debe contribuir a un control efectivo de la tensión terminal, y mejorar la estabilidad del sistema. Debe ser capaz de responder rápidamente a una perturbación para mejorar la estabilidad transitoria, y de modular la corriente de campo para mejorar la estabilidad en pequeña señal.

2.2.2. Componentes de un sistema de excitación.

A continuación se describen los elementos que componen un sistema de excitación:

- **Excitador:** suministra potencia DC al devanado de campo de la máquina sincrónica, constituyendo la parte de potencia del sistema de excitación.
- **Regulador:** Procesa y amplifica las señales de entrada de control para que tengan un valor apropiado para el control del excitador.
- **Transductor de la tensión terminal y compensador de carga:** mide la corriente en terminales del generador, la rectifica y filtra a un valor DC y se compara con un valor de referencia que representa el valor deseado de tensión terminal. Para controlar la tensión en un punto eléctrico diferente al terminal del generador, se utiliza el compensador de carga, el cuál compensa la caída de tensión que se tiene hasta el punto que se quiere controlar.
- **Estabilizador del sistema de potencia o PSS**: es una entrada adicional al regulador, para amortiguar oscilaciones en el sistema de potencia.
- **Circuitos limitadores y de protección:** incluye las funciones de protección y control necesarias para asegurar que los límites de operación del excitador y de la máquina sincrónica no sean excedidos.

2.2.3. Tipos de sistemas de excitación.

Los sistemas de excitación se pueden clasificar en las siguientes categorías:

- Sistema de excitación DC.
- Sistema de excitación AC.
- Sistema de excitación estático.

Sistema de excitación DC.

Este tipo de sistemas de excitación utiliza generadores DC como fuente de potencia de excitación, y suministra corriente al rotor de la máquina sincrónica a través de anillos deslizantes. El excitador puede ser manejado por un motor o por el eje del generador y puede ser auto-excitado o de excitación separada. En este último caso, el campo del generador es abastecido por un excitador piloto, compuesto por un generador de imán permanente.

Los reguladores de voltaje para estos sistemas abarcan todos los tipos, desde el reóstato de acción discontinua, a sistemas que utilizan muchos escalones de amplificadores magnéticos y rotativos.

Los sistemas de excitación DC están desapareciendo lentamente, en muchos sistemas antiguos se están reemplazando por sistemas de excitación AC o estática. En algunos casos solo se cambia el regulador de tensión por reguladores modernos de estado sólido.

Sistemas de excitación AC.

Estos sistemas de excitación utilizan alternadores (máquinas AC) como fuente de excitación del generador. En general, el excitador está sobre el mismo eje que el generador. La salida del excitador se rectifica mediante un rectificador controlado o no controlado, para producir la corriente necesaria para el devanado de campo del generador.

Los primeros sistemas de excitación AC usaban una combinación de amplificadores magnéticos y rotativos como reguladores, pero los más modernos utilizan amplificadores electrónicos.

Sistemas con rectificador estacionario.

Cuando se tienen este tipo de rectificadores, la salida DC alimenta al devanado de campo del generador a través de anillos deslizantes.

Si se utiliza rectificador no controlado, el regulador controla el campo del excitador AC y éste controla la tensión de salida del excitador.

Para el caso con rectificador controlado, el regulador controla directamente la tensión de salida DC del excitador. El regulador de voltaje controla el disparo de los tiristores, y como éstos controlan directamente la salida del excitador, este tipo de sistemas tienen una respuesta rápida.

Sistemas con rectificadores rotativos.

Si se utilizan rectificadores rotativos, no se necesitan anillos deslizantes ni escobillas, y la salida DC alimenta directamente el campo del generador. La armadura del excitador AC y los diodos rectificadores, rotan con el campo del generador. Un excitador piloto AC con un rotor de imán permanente, rota con la armadura del excitador y con los diodos rectificadores. La salida rectificada del estator del excitador piloto, energiza el campo estacionario del excitador AC. El regulador de tensión controla el campo del excitador AC y éste controla el campo del generador principal.

Sistemas de excitación estáticos.

Todos los componentes en este tipo de sistemas son estáticos o estacionarios. La corriente de excitación del devanado de campo del generador es abastecida por rectificadores estáticos que pueden ser controlados o no controlados. La tensión de entrada a los rectificadores se toma del generador principal (o de la barra auxiliar para iniciar la máquina) a través de un transformador de voltaje que reduce la tensión del generador a un nivel apropiado. A continuación se presentan 3 tipos de sistemas de excitación estáticos.

Sistemas con rectificadores controlados y fuente de tensión.

La potencia de excitación se obtiene a través de un transformador conectado al terminal del generador o de la barra auxiliar y se regula por medio de un rectificador controlado.

Sistemas rectificados de fuente compuesta.

En este caso la fuente de potencia del sistema de excitación, es la tensión y la corriente del generador principal. Esto se logra utilizando un transformador de potencia, y un transformador de corriente saturable. Alternativamente, se pueden combinar en un solo transformador de excitación que sería un transformador de potencia con corriente saturable. El regulador controla la salida del excitador a través del control de la saturación del transformador.

Cuando el generador opera en vacío, la corriente de armadura es cero, y la fuente de tensión suministra toda la potencia de excitación. En condiciones de carga, parte de la potencia viene de la corriente y otra parte de la tensión. Cuando se presenta una falta en el sistema, con una importante caída en la tensión terminal del generador, la corriente permite al excitador brindar una alta capacidad de potencia de campo.

Sistemas con rectificadores controlados y fuente compuesta.

Estos sistemas utilizan rectificadores controlados en la salida del excitador, y la composición de fuentes de tensión y de corriente tomadas del estator del generador, para brindar potencia de excitación. La ventaja de esta configuración es que se tiene un alto tiempo de respuesta inicial, y una alta capacidad de potencia de campo en falta.

El transformador de excitación, consiste en 3 unidades monofásicas con 3 devanados: corriente y tensión como devanados primarios y un devanado secundario de salida. En condiciones de falta, la corriente de falta que fluye por el devanado de corriente del transformador de excitación brinda la potencia de campo necesaria cuando la tensión terminal del generador es muy pequeña.

Barra auxiliar.

Como la fuente de potencia de excitación es el propio generador, se trata de una máquina auto-excitada, y como el generador no puede producir ninguna tensión hasta que haya corriente de campo, se necesita otra fuente de tensión de excitación auxiliar para energizar el generador. Usualmente, esta potencia se toma de un banco de baterías.

2.2.4. Medida del comportamiento dinámico.

La efectividad de un sistema de excitación en aumentar la estabilidad del sistema está determinada por algunas características importantes que dependen del propio sistema de excitación, del sistema de potencia y del generador. Al tratarse de un sistema que no es lineal, es conveniente clasificar el comportamiento dinámico en dos grupos: pequeña señal y gran señal.

Gran Señal.

La medida del comportamiento en gran señal evalúa la performance del sistema de excitación frente a severos transitorios en el sistema de potencia, como aquellos que se comentaron en el capítulo 2.1. A continuación se describen los parámetros que miden el comportamiento del sistema en gran señal:

- **Tensión de ceiling del sistema de excitación:** se define como la máxima tensión de excitación que el sistema puede suministrar bajo condiciones específicas, que deben ser apropiadas para la situación que se está considerando. Este parámetros indica la capacidad de potencia de campo que tiene el sistema, altas tensiones de ceiling favorecen la estabilidad del sistema.
- **Corriente de ceiling del sistema de excitación:** es la máxima corriente de excitación que el sistema puede suministrar en un determinado tiempo.
- **Respuesta temporal de la tensión de excitación:** es la tensión de excitación expresada como una función del tiempo bajo condiciones específicas.
- **Tiempo de respuesta de la tensión de excitación:** se define como el tiempo en segundos en que la tensión de excitación alcanza el 95 % de la diferencia entre la tensión de ceiling y la tensión de campo a carga nominal, bajo condiciones específicas. La tensión de campo a carga nominal es la tensión de campo del generador bajo condiciones de carga nominales en régimen continuo y a una temperatura específica que varía con el diseño de los devanados.
- **Sistema de excitación con alto tiempo de respuesta inicial:** es un sistema que tiene una tensión de excitación con un tiempo de respuesta de 0.1 *seg* o menos. Representa a un sistema de alta respuesta y acción rápida.
- **Respuesta nominal del sistema de excitación:** es la tasa de incremento de la tensión de salida del sistema de excitación, obtenida de la curva de respuesta temporal de la tensión de excitación, dividido la tensión nominal de campo del generador. Para determinar la respuesta nominal, se parte de una condición inicial con tensión de campo a carga nominal y se crea repentinamente la tensión trifásica del generador necesaria para llevar la tensión de excitación a su valor de ceiling. Debe incluir cualquier tiempo de retraso previo a que el sistema de excitación responde a la perturbación inicial.

En sistemas más antiguos la respuesta nominal establece un buen parámetro para la medida del comportamiento en gran señal, pero en los sistemas más modernos este parámetro no es tan adecuado. Para estos, que son sistemas con alto tiempo de respuesta inicial, la tensión de ceiling y el tiempo de respuesta de la tensión de excitación son parámetros más significativos.

Pequeña Señal.

La medida del comportamiento en pequeña señal brinda un medio para evaluar el lazo cerrado del sistema de control de excitación frente a cambios incrementales en las condiciones del sistema.

El comportamiento en pequeña señal se mide mediante los índices que se utilizan en la teoría de control y están asociados a la respuesta temporal y la respuesta en frecuencia.

Respuesta temporal.

Tiempo de subida, sobretiro y tiempo de asentamiento.

Respuesta en frecuencia.

Por un lado se tienen los índices asociados a la respuesta en frecuencia del lazo abierto, que son: ganancia a bajas frecuencias, frecuencia de corte, margen de fase y margen de ganancia. Grandes valores de ganancia a bajas frecuencias brindan una mejor regulación de voltaje en régimen estacionario, un valor alto de frecuencia de corte indica un menor tiempo de respuesta, y un mayor margen de fase y de ganancia ayudan a hacer más estable el lazo de control.

Para la respuesta en lazo cerrado se tiene: el ancho de banda y el valor de pico. Un valor de pico alto, indica que el sistema oscila y en el tiempo significa un gran sobretiro. Un valor grande de ancho de banda implica respuestas rápidas.

Aplicación.

Los índices antes descritos son aplicables si la máquina está en vacío o alimentando una carga aislada. No lo son para máquinas conectadas a una red de potencia ya que se forma un sistema de muchas variables, muchos lazos y de alto orden y por lo tanto se necesitan otras técnicas de control para su resolución.

2.2.5. Modelado de los sistemas de excitación.

Modelado de los componentes.

Los elementos básicos que forman el modelo de un sistema de excitación son: excitadores DC (auto excitado o de excitación independiente), excitadores AC, rectificadores (controlados o no controlados), amplificadores magnéticos, rotativos o electrónicos, circuitos de realimentación del sistema de excitación y circuitos de determinación y procesamiento de señales.

A continuación se van a presentar la forma de modelar cada elemento mencionado anteriormente, pero sin entrar en detalle en la forma de obtención de los mismos, para más información consultar con la bibliografía de referencia [4].

Excitadores DC de excitación independiente.

En la figura 2.6 se observa el diagrama de bloques de un excitador DC independiente. Se trata de un modelo que representa también la saturación del excitador en el término $S_E(E_X)$.

El valor de la constante K_E es:

$$K_E = \frac{R_{ef}}{R_g} \tag{2.3}$$

en donde R_{ef} es el valor de la resistencia de campo y R_g es la pendiente de la curva tensión de armadura (E_X) vs corriente de campo (I_{ef}) para el gap de aire.

El valor de la constante T_E es:

$$T_E = \frac{L_{fu}}{R_g} \tag{2.4}$$

en donde $L_{fu} = L_{ef} \cdot \frac{\bar{I}_{ef_0}}{\bar{E}_{X_0}}$ en donde $\left(\bar{I}_{ef_0}, \bar{E}_{X_0}\right)$ corresponde a un punto de operación dado de la curva tensión de armadura vs corriente de campo expresado en pu.

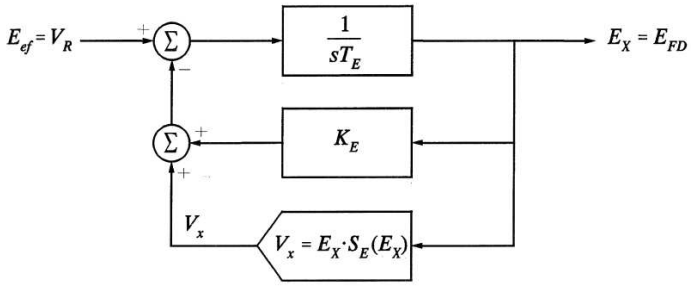


Figura 2.6: Excitador DC de excitación independiente. [4]

El modelo de la figura 2.6 representa al diagrama de bloques completo y es un modelo conveniente para representar los excitadores DC para estudios de estabilidad. Sin embargo, para estudios en pequeña señal, se puede simplificar a un solo bloque de transferencia:

$$H(s) = \frac{K}{1 + sT} \tag{2.5}$$

en donde las constantes de tiempo y de ganancia ya no serían las mismas.

Excitadores DC auto-excitados.

El diagrama de bloques para representar estos excitadores sería el mismo que para el caso de los de excitación independiente, pero con distinto valor de la constante K_E. Esta sería:

$$K_E = \frac{R_{ef}}{R_g} - 1 \tag{2.6}$$

Excitadores AC y rectificadores.

En la figura 2.7 se observa el diagrama de bloques de un excitador AC.

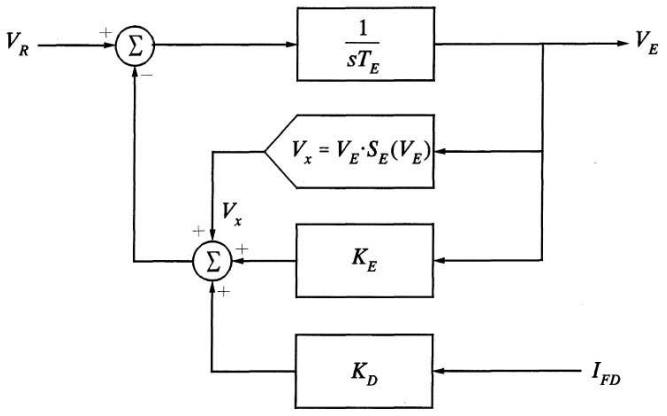


Figura 2.7: Excitador AC. [4]

La estructura general es similar a la del excitador DC, pero en este caso la regulación de carga debido al efecto de reacción de armadura se representó diferente y la función de saturación S_E se define con la curva de saturación en vacío. El voltaje interno del excitador V_E es el voltaje sin carga determinado por la función de saturación. La corriente de campo del generador principal (I_{FD}) representa a la corriente de carga del excitador y la realimentación negativa $K_D I_{FD}$ representa el efecto desmagnetizante de la reacción de armadura. El valor de la constante K_D depende del excitador sincrónico AC y de las reactancias transitorias.

En la figura 2.8 se observa el diagrama de bloques de un rectificador, en donde los parámetros cumplen las siguientes condiciones:

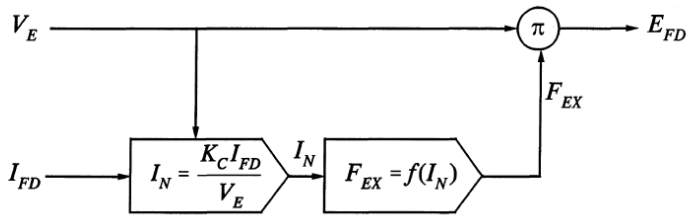


Figura 2.8: Rectificador. [4]

- $I_N = \dfrac{K_C I_{FD}}{V_E}$ donde K_C depende de la reactancia de conmutación del puente rectificador.
- $F_{EX} = f(I_N)$ en donde
  - si $I_N < 0{,}433 \Rightarrow f(I_N) = 1{,}0 - 0{,}577 I_N$
  - si $0{,}433 < I_N < 0{,}75 \Rightarrow f(I_N) = \sqrt{0{,}75 - I_N^2}$
  - si $0{,}75 < I_N < 1 \Rightarrow f(I_N) = 1{,}732(1 - I_N)$
- $E_{FD} = F_{EX} V_E$

Límites "windup" y "non-windup".

En los modelados de los sistemas de excitación es necesario distinguir entre los límites llamados "windup" y "non-windup" que están asociados a bloques integradores, de atraso-adelanto y simples bloques de constantes de tiempo.

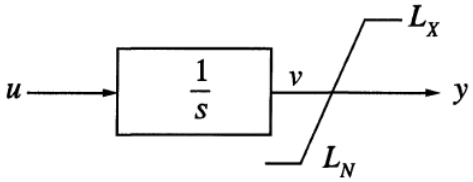


Figura 2.9: Bloque integrador con límites de "windup". [4]

En la figura 2.9 se observa un bloque integrador con límites de "windup". Los límites actúan de la siguiente manera:

- Si $L_N < v < L_X \Rightarrow y = v$.
- Si $v \geq L_X \Rightarrow y = L_X$.
- Si $v \leq L_N \Rightarrow y = L_N$.

En la figura 2.10 se observa el mismo bloque integrador, pero ahora con límites de "non-windup". Los límites actúan, para este caso, de la siguiente manera:

- Si $L_N < y < L_X \Rightarrow \frac{dy}{dt} = u$.
- Si $y \geq L_X$ y $\frac{dy}{dt} > 0 \Rightarrow \frac{dy}{dt} = 0$ y $y = L_X$.
- Si $y \leq L_N$ y $\frac{dy}{dt} < 0 \Rightarrow \frac{dy}{dt} = 0$ y $y = L_N$.

En el caso de "windup" no se limita la variable v, y por lo tanto la variable y no puede salir de un límite hasta que v lo haga. En el caso de "non-windup", se controla directamente la variable de salida y, que puede salir del límite en cuanto la entrada u cambia de signo.

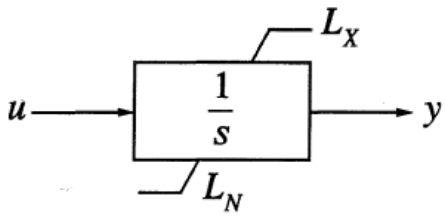


Figura 2.10: Bloque integrador con límites de "non-windup". [4]

Amplificadores.

Como ya se comentó anteriormente, los amplificadores pueden ser magnéticos, rotativos o electrónicos. Los amplificadores magnéticos y rotativos se pueden representar como una ganancia y una constante de tiempo.

La salida de un amplificador está limitada por saturación o por límites en la alimentación de potencia, y estos se pueden representar como límites de "non-windup", tal como se observa en la figura 2.11 con los parámetros V_{RMAX} y V_{RMIN}.

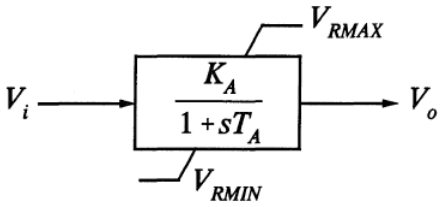


Figura 2.11: Modelo de un Amplificador. [4]

Circuitos estabilizantes del sistema de excitación.

En la figura 2.12 se observa la realimentación estabilizante del sistema de excitación, la cual puede ser realizada de diversas maneras.

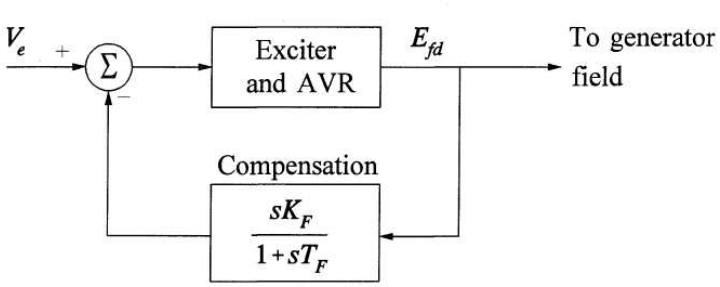


Figura 2.12: Realimentación estabilizantes del sistema de excitación. [4]

HV-LV gate.

Este tipo de bloques se utiliza cuando es necesario controlar una de dos entradas, dependiendo de la magnitud que toma una con respecto a la otra. Si se tienen dos entradas al bloque: u, v con salida y, se cumple que:

LV-Gate:

- Si $y = min(u, v)$.

HV-Gate:

- Si $y = max(u, v)$.

Transductor de tensión y compensador de carga.
En la figura 2.13 se observa el modelo de un transductor de tensión y compensador de carga. La constante de tiempo T_R representa a la rectificación y filtro de la tensión terminal de la máquina sincrónica. Los parámetros del compensador de carga son R_C y X_C, por lo que si no se hace compensación de carga, los mismos deben valer cero. Si se tiene el caso de un sistema sin compensación de carga y con constante de tiempo T_R despreciable, se cumple que $V_C = E_T$.

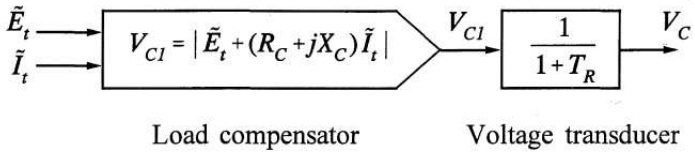


Figura 2.13: Transductor de tensión y compensador de carga. [4]

Modelo completo de sistemas de excitación.

Con los modelos de cada componente definidos anteriormente, se pueden modelar los distintos sistemas de excitación de forma completa, tal cual aparecen en la norma IEEE [2]. No es del interés de este marco teórico entrar en detalle en cada modelo completo, ya que algunos ejemplos van a ser comentados en el análisis de cada máquina. Sí es importante, poder identificar a qué corresponde cada bloque de los sistemas completos y es lo que se buscó en esta introducción.

2.3. Modelados y simulación de sistemas en Simulink.

Como se comentó anteriormente, el programa seleccionado para implementar los modelos y hacer las simulaciones es el Simulink de MatLab. En esta sección, se van a describir los bloques de Simulink utilizados que son más generales, y comunes a todas las máquinas.

Los modelos implementados en Simulink están compuestos principalmente por dos grandes partes: control y potencia. El sistema de control es el propio regulador de tensión de la máquina, y el sistema de potencia está formado por la máquina sincrónica, la máquina primaria (turbina hidroeléctrica en todos los casos) y un equivalente de la red que fue modelado como una carga puntual de impedancia constante.

2.3.1. Sistema de control.

El regulador de tensión de una máquina sincrónica, cuenta con los elementos típicos de un sistema de control lineal, como son bloques de transferencia racional, sumadores, realimentación y bloques de ganancia constantes. A su vez, cuenta con otros componentes no lineales, tales como *switches* y bloques de saturación.

La implementación de estos bloques, no presenta una mayor complicación ya que están predefinidos en la librería de Simulink, simplemente se le tienen que ajustar los parámetros correspondientes. Por lo tanto, no se va a entrar en detalle en la implementación de los bloques típicos de control.

2.3.2. Sistema de potencia.

Para la implementación del sistema de potencia también se utilizan bloques predefinidos en la librería de Simulink, pero de todas maneras resulta más interesante entrar un poco en detalle en su implementación. Los componentes del sistema de potencia son la máquina sincrónica, la turbina y la carga.

Para poder simular sistemas que incluyan bloques de la librería *SimPowerSystems* [5], como por ejemplo la máquina sincrónica, es necesario agregar el bloque *powergui*. En el mismo se elige el tipo de simulación a realizar, además de brindar una interfaz gráfica para realizar diferentes análisis. Permite realizar los cálculos necesarios para la inicialización de la máquina, mediante un flujo de carga.

Máquina Sincrónica.

Existen diferentes tipos de máquinas sincrónicas predefinidos, todos con distintos grados de complejidad y maneras de ingresar los parámetros de la máquina (unidades físicas ó en pu).

El bloque de máquina sincrónica utilizado es: "Synchronous machine pu standard" y el mismo se puede ver en la figura 2.14.

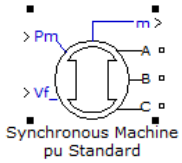


Figura 2.14: Bloque máquina sincrónica

Las entradas son la tensión de excitación, que se toma de la salida del regulador de tensión, y la potencia mecánica que se toma de la turbina. Las salidas son las 3 líneas de potencia fases A, B y C y el vector "m", que tiene en sus componentes variables internas de la máquina (velocidad del rotor, corriente de campo, tensiones y corrientes en ejes "d" y "q", etc.).

Los parámetros que se le cargaron a la máquina fueron obtenidos directamente de la documentación correspondiente de UTE.

Turbina.

Al tratarse de represas hidroeléctricas, la máquina primaria es, en todos los casos, una turbina hidroeléctrica. El Simulink cuenta con un bloque estándar de turbina, que fue el que se utilizó en las simulaciones y se puede ver en la figura 2.15. Este bloque implementa una turbina con un controlador.

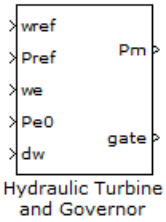


Figura 2.15: Bloque Turbina Hidroeléctrica

Las entradas al bloque son: velocidad de referencia (ω_{ref}), potencia de referencia (P_{ref}), potencia eléctrica actual de la máquina (P_{e0}), velocidad actual del rotor (ω_e) y variación de velocidad del rotor ($d\omega$). Los valores de potencia, velocidad y variación de velocidad del rotor de la máquina, se obtienen del vector "m" antes mencionado, y los valores de velocidad y potencia de referencia se obtienen al correr el flujo de carga.

Las salidas del bloque son la potencia mecánica que luego se convierte en una entrada a la máquina sincrónica y una señal de apertura de compuerta que no es utilizada.

No se ingresaron parámetros particulares de la turbina, se utilizaron los mismos que por defecto están definidos en el bloque.

Carga.

Para poder realizar simulaciones con la máquina, la turbina y el sistema de excitación es necesario definir la carga en sus terminales. Lo que se hizo fue considerar la carga como una impedancia constante que representa el resto del sistema.

Los datos a ingresar a la carga son la potencia activa y reactiva, así como la frecuencia y la tensión nominal. De esta manera, a una determinada frecuencia y tensión nominal, con las potencias quedan definidas las impedancias constantes.

Se sabe que esto no es lo más adecuado para realizar estudios de estabilidad transitoria, ya que la máquina nunca se encuentra aislada en un sistema de potencia, y por lo tanto las cargas que una máquina "ve" no son solo pasivas ni de impedancia constante. La mejor opción hubiera sido un modelo de carga que sea P, Q constante, pero esto no está disponible en la librería de elementos de Simulink.

Lo dicho anteriormente refleja otra razón para implementar el modelo de UTE en Simulink, para tener las mismas condiciones a la hora de comprarlo con el IEEE propuesto.

Capítulo 3

Metodología.

3.1. Modelado de Sistemas de Excitación según estándares IEEE.

Modelar los sistemas de excitación según los estándares de la norma 421.5 IEEE, cuenta con la principal ventaja de que cualquier programa de simulación de sistemas de potencia los tiene incorporados en su librería. Es probable que no sea posible modelar todos los sistemas de excitación que se presenten en la práctica según un modelo de la norma, pero lo cierto es que la misma va incorporando nuevos modelos y tiene una interesante gama de posibilidades.

En primer lugar, se hace una separación en las 3 grandes categorías de sistemas de excitación, las mismas que se comentaron en la sección 2.2:

- Sistemas de excitación DC.
- Sistemas de excitación AC.
- Sistemas de excitación estáticos (ST).

Cada sistema de excitación se clasifica dentro de una de las categorías anteriores y se nombra con 4 letras: las primeras dos indican el tipo de sistema de excitación (ya sea DC, AC o ST), la tercera letra es un número correlativo que se reinicia con el tipo de sistemas de excitación, y la cuarta letra es una A o B, dependiendo si es un modelo de la norma revisada en 1992 (letra A) o en 2005 (letra B). Por ejemplo, el modelo "DC4B" es el cuarto modelo de sistemas de excitación DC y se incorporó en la revisión del 2005.

La metodología de trabajo seguida para buscar el estándar, que mejor se adecúe a un modelo determinado, fue en primer lugar definir el tipo de sistema de excitación (DC, AC o ST). Luego, dentro de cada categoría, ver el que mejor representaba el modelo estudiado en cuanto a los bloques que componen dicho sistema. El tercer paso fue calcular los parámetros de cada bloque, para que ambos sistemas tuvieran la misma respuesta frente a transitorios en la red. Finalmente se procedió a validar las respuestas del modelo elegido, con los parámetros determinados.

3.2. Procedimiento.

Recapitulando, a grandes rasgos, el procedimiento de trabajo en cada caso fue:

1. Análisis del modelo utilizado por UTE.
2. Selección del modelo IEEE.
3. Determinación de los parámetros del modelo.
4. Validación de los resultados en pequeña señal.
5. Validación de los resultados en PSS/E.

Se estudiará cada procedimiento en particular.

1. Modelos utilizados por UTE.

En los 3 casos de estudio que se presentan en el proyecto, se parte de una documentación elaborada por UTE, en la que se encuentra un modelo del sistema de excitación, y la respuesta de dicho modelo cuando se le aplica un escalón en la tensión de referencia. Los modelos están implementados en el software PSS/E y las respuestas al escalón están solamente en formato gráfico. Por lo tanto es fundamental pasar estos modelos a un programa de modelado y simulación de sistemas, tanto de control como de potencia, ya que de lo contrario sería imposible realizar una validación de los modelos desarrollados.

El programa elegido para realizar estos trabajos, junto con el resto de los modelados y simulaciones es el Simulink de MatLab, debido al gran poder de cálculo, y la posibilidad de incorporar fácilmente en un mismo modelo sistemas de control y de potencia. Conjuntamente con la implementación en Simulink de los modelos utilizados por UTE, se realiza el análisis de los mismos, con el fin de identificar el tipo de sistema de excitación, y los componentes fundamentales (ver sección 2.2) que ayuden a seleccionar el estándar IEEE más adecuado.

El modelo de UTE en Simulink siempre fue validado con la simulación de la documentación de UTE. En todos los casos aparecieron diferencias apreciables entre ambos, las que se mencionarán en los capítulos correspondientes a cada máquina y se justificarán.

2. Modelos IEEE.

Una vez que se tiene el análisis del modelo del sistema de excitación de UTE, se debe seleccionar el estándar IEEE. Esta selección se hace por inspección, en primera instancia se identifica el tipo de sistema, y luego dentro de cada tipo se observan las diferentes variedades, identificando los bloques que puedan componer al modelo de UTE. Aquel modelo que pueda reproducir de manera más directa al modelo de UTE, es el candidato elegido.

3. Determinación de los Parámetros.

A partir del modelo IEEE seleccionado, se deben ajustar sus parámetros, de manera que el sistema propuesto tenga el mismo comportamiento que el sistema de UTE.

Control and Estimation Tool Manager.

Para determinar el valor de los parámetros, se utilizó el "Control and Estimation Tool Manager" que es una herramienta de MatLab que permite calcular parámetros de un modelo en Simulink, para que la respuesta se aproxime a una curva designada previamente. Este programa realiza un procedimiento iterativo por mínimos cuadrados, hasta que la diferencia entre las curvas es menor a un valor establecido.

El uso de este programa debe venir acompañado de un análisis previo del sistema, en el que se le deben fijar manualmente todos los parámetros posibles para minimizar el error de convergencia. Por lo tanto, lo que se hizo fue analizar ambos modelos (el estándar IEEE y el de UTE) para poder ajustar todos los parámetros posibles y luego estimar el resto.

4. Validación de los resultados en pequeña señal.

Con el modelo estándar IEEE y el modelo de UTE implementado en Simulink, se procede a la validación de los resultados en pequeña señal. Para la misma se tuvieron en cuenta varios índices temporales y valores de régimen. Para este caso, en el que todos los modelos son implementados en Simulink, la validación se consideró aceptable siempre y cuando el error relativo fuera menor al 10 %.

Tensión de Excitación:

- Valores de Régimen: valores de régimen de la tensión de excitación antes y después del escalón.
- Tiempo de Bajada: siendo ΔE_{FD} la diferencia entre el valor inicial y el final, el tiempo de bajada se define como el tiempo en el que la señal pasa de estar en un 10 % de ΔE_{FD} por debajo del valor inicial (instante t_1) y un 10 % de ΔE_{FD} por encima del valor final (instante t_2).
- Tiempo de Asentamiento: es el tiempo en que la señal permanece en un entorno del ± 5 % de la diferencia entre el valor final y el inicial.

Tensión Terminal:

- Valores de Régimen: valores de régimen de la tensión terminal antes y después del escalón.
- Tiempo de Subida: siendo ΔE_T la diferencia entre el valor inicial y el final, el tiempo de subida se define como el tiempo en el que la señal pasa de estar en un 10 % de ΔE_T por encima del valor inicial (instante t_1) y un 10 % de ΔE_T por debajo del valor final (instante t_2).
- Tiempo de Asentamiento: es el tiempo en que la señal permanece en un entorno del ± 5 % de la diferencia entre el valor final y el inicial.

5. Validación de resultados frente a una perturbación en la red.

Se simula una falta en la red en PSS/E, con los sistemas de excitación ya utilizados por UTE y se compara contra la misma falta en la red, con los modelos IEEE propuestos. Se realizó un análisis cualitativo de las respuestas.

Capítulo 4

Salto Grande.

El presente capítulo desarrolla el estudio realizado para el generador síncrono de Salto Grande. Se parte de la documentación de UTE de esta máquina, la cual consta de un modelo del sistema que se toma como base, y una simulación del mismo que se utiliza para la validación del nuevo modelo desarrollado.

Se definen los siguientes modelos a utilizar y/o desarrollar:

- **Modelo SG-UTE**: corresponde al documentado por UTE e implementado en PSS/E.
- **Modelo SG-UTE-SL**: corresponde al modelo de UTE implementado en Simulink.
- **Modelo SG-IEEE-SL**: corresponde al modelo estándar IEEE, implementado en Simulink, con los parámetros del sistema de excitación de Salto Grande.

Lo primero que se realizó es un estudio detallado del modelo SG-UTE, donde se identificaron los diferentes bloques, y se analizaron sus funciones para todo el sistema. Luego, se desarrolló el modelo SG-UTE-SL en Simulink para así tener información analítica para comparar este modelo con el elegido de la IEEE.

Finalmente se desarrolló el modelo SG-IEEE-SL, eligiendo los parámetros para que la tensión terminal y de excitación sean similares a las modeladas por UTE, a menos de un margen de tolerancia. Una vez que se ajustaron los parámetros, se validaron los mismos contra el modelo SG-UTE-SL.

4.1. Sistema de Excitación de Salto Grande.

4.1.1. Análisis del diagrama de bloques del Regulador de Tensión.

En la figura 4.1, se observa el diagrama de bloques del regulador de tensión de Salto Grande, obtenido de la documentación de UTE [12]. En el mismo, están identificados los bloques correspondientes, los cuales van a ser analizados en esta sección.

En primer lugar, se hizo un estudio en donde se identificaron los bloques que corresponden al control y los que corresponden al propio excitador. El bloque que corresponde al excitador tiene la transferencia

$$H(s) = \frac{1}{1 + sT_E}$$

mientras que los otros bloques corresponden a funciones de limitación y control.

Bloques de Limitación y Control.

- *Bloque de realimentación:* $H(s) = k_F \dfrac{s}{1 + sT_F}$ que representa a la función estabilizadora del sistema de excitación.
- *Bloque de Limitación:* Está representado por los límites $EFDmax$ y $EFDmin$. Este bloque limita la tensión de salida de la siguiente manera:
  1. $EFD_{min} < U < EFD_{max} \Rightarrow EFD = U$
  2. $U < EFD_{min} \Rightarrow EFD = EFD_{min}$
  3. $U > EFD_{max} \Rightarrow EFD = EFD_{max}$
- *Bloque de compensación atraso - adelanto:* Hace al sistema más robusto en cuanto a la estabilidad.

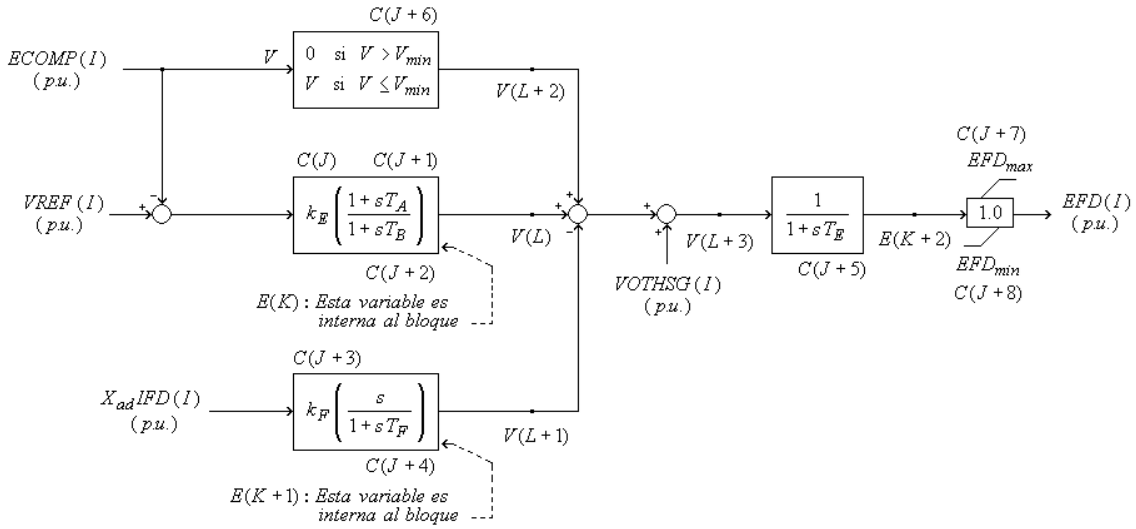


Figura 4.1: Regulador de Tensión de Salto Grande. [12]

4.1.2. Modelo SG-UTE-SL.

Luego de identificar los bloques básicos que componen el sistema de excitación de Salto Grande, se lo implementó con los bloques disponibles en Simulink de modo de obtener el mismo comportamiento frente a las simulaciones realizadas en PSS/E. A este modelo se lo llama SG-UTE-SL y se utilizó la respuesta al escalón disponible en la documentación de UTE para su validación.

A continuación, se describe bloque a bloque el modelo obtenido.

Regulador de Tensión.

El excitador fue modelado en Simulink utilizando un bloque que implementa una función de transferencia racional. En este bloque el numerador y el denominador de la transferencia se ingresan como coeficientes en potencias de s. Utilizando el valor para T_e de la documentación de UTE, se obtiene la misma transferencia que en el modelo SG-UTE:

$$H(s) = \frac{1}{1 + sT_e} \tag{4.1}$$

Bloque $Vmin$**.**

Para modelar este bloque se usó un *switch*. El mismo dispone de tres entradas, en dos de ellas se conectan las señales a conmutar y en la otra se conecta una señal de control. Se define un valor de umbral, una vez que el umbral es superado por la señal de control se conmuta la salida del switch. Para lograr el mismo funcionamiento que en el modelo SG-UTE se conectó en una entrada un bloque de valor constante cero y en las otras dos la tensión terminal. El umbral V_{min} está definido en la documentación de UTE.

Lazo de realimentación.

El lazo de realimentación se modeló con un bloque que implementa una función de transferencia de la forma:

$$H(s) = \frac{K_f s}{1 + sT_f} \tag{4.2}$$

En este caso la realimentación se realiza con la corriente de campo la cual se obtiene del vector m de la máquina sincrónica. Con un bus selector se descompone el vector m en los diferentes parámetros que lo componen. La corriente se multiplicó por el bloque de ganancia constante X_{ad} que representa a la reactancia saturable. El valor de esta reactancia fue calculado a partir de los valores para X_d y X_1 de la documentación de UTE de la siguiente manera: $X_{ad} = X_d - X_1$ donde X_d es la reactancia del eje directo y X_1 es la reactancia de fugas [1, pág. 16].

Bloque de Limitación.
Este bloque fue modelado como una saturación con límites constantes E_{FDmax} y E_{FDmin}, ya que se obtiene el mismo comportamiento que en el modelo SG-UTE. Para una entrada u y salida v se cumple:

- Si $E_{FDmin} < u < E_{FDmax} \Rightarrow v = u$
- Si $u < E_{FDmin} \Rightarrow v = E_{FDmin}$
- Si $u > E_{FDmax} \Rightarrow v = E_{FDmax}$

Bloque de Compensación atraso-adelanto.
Este bloque se implementó con una función de transferencia dada por:

$$H(s) = \frac{1 + sT_a}{1 + sT_b} \tag{4.3}$$

Bloque de ganancia K_e.
En el modelo SG-UTE (figura 4.1), se observa una ganancia de valor K_e en el bloque de compensación atraso-adelanto. La implementación de dicho bloque, fue considerada por separado al bloque de compensación atraso-adelanto, lo que permite cierta flexibilidad en el bloque del excitador para el modelo SG-IEEE-SL.

Señales de Entrada.
La tensión E_{comp} es igual a la tensión de terminales E_{Term} ya que no se realiza compensación de carga. La tensión terminal de la máquina sincrónica en *pu* se obtuvo a partir de los valores de V_d y V_q por la relación $V_t = \sqrt{V_d^2 + V_q^2}$.
En la señal V_{ref} se utilizó el bloque *step* de Simulink, con el que se genera un escalón en donde se fija el tiempo, el valor inicial y final del mismo. El escalón utilizado fue el mismo que aplicó UTE en el modelo en PSS/E. La señal V_s, que corresponde a las señales estabilizantes del PSS, se fijó en cero ya que estas señales no son tenidas en cuenta para estudios de estabilidad transitoria, debido a las constantes de tiempo asociadas a las mismas.

Resto del Sistema.

- **Máquina Sincrónica.** Se utilizaron los parámetros que figuran en la documentación de UTE [12] y se pueden observar en la tabla 4.1.

T'_{do}	7.76
T''_{do}	0.052
T''_{q0}	0.0860
H	4.4
X_d	0.8370
X_q	0.6310
X'_d	0.3050
$X''_d = X''_q$	0.2310
X_1	0.1650

Tabla 4.1: Datos del Generador de Salto Grande.

- **Máquina Primaria.** Como ya se mencionó se usa el bloque *"Hydraulic Turbine and Governor (HTG)"*.
- **Carga Trifásica.** La potencia fue determinada de la simulación documentada por UTE, en la que se toma en cuenta el máximo hidráulico de la máquina Salto Grande.

En la figura 4.2 se observa el modelo SG-UTE-SL descrito en esta sección.

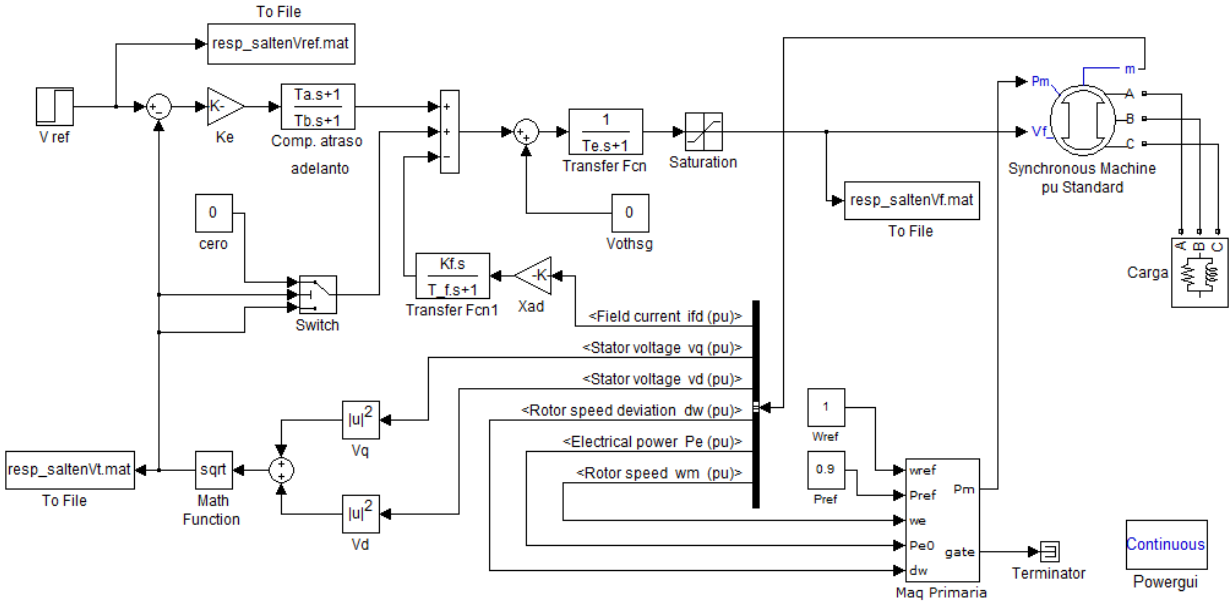


Figura 4.2: Modelo SG-UTE-SL

4.1.3. Validación del modelo SG-UTE-SL.

Como se mencionó anteriormente se realizó un modelo en Simulink, con el fin de utilizarlo como base para validar el modelo estándar IEEE. En la sección anterior se mostró la forma de llegar al primer modelo, en esta sección se va a justificar por qué dicho modelo se puede tomar como válido para compararlo con el de UTE.

La información disponible por parte de UTE es el modelo SG-UTE y una simulación del mismo, la cual muestra la respuesta del sistema, partiendo del régimen, a un escalón en la señal V_{ref} [9].

Simulación del modelo SG-UTE.

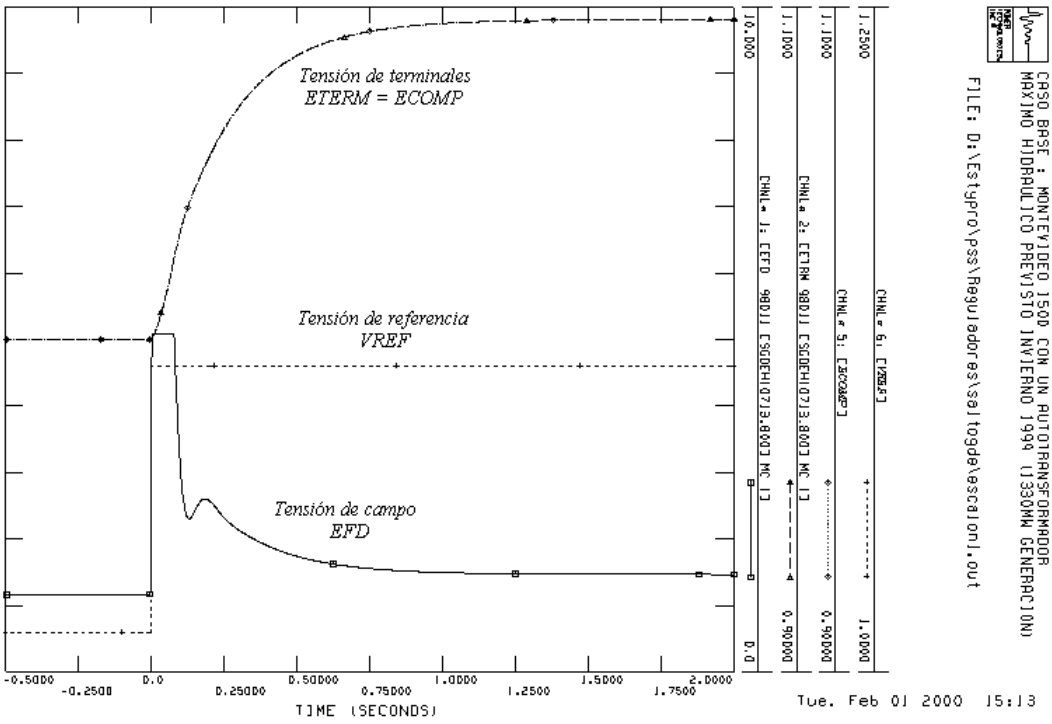


Figura 4.3: Respuesta al Escalón Modelo SG-UTE. [9]

En la figura 4.3 se observa la respuesta al escalón simulada en PSS/E por UTE, en la cual se distinguen tres gráficos distintos:

- Trazo continuo: tensión de campo.
- Trazo punteado: tensión de referencia (escalón).
- Trazo entrecortado: tensión terminal.

Antes de aplicar el escalón en la tensión de referencia, el sistema se encuentra en régimen, con $V_{ref} = 1{,}015$ pu. El escalón aplicado lleva la tensión a un valor de $V_{ref} = 1{,}115$ pu.

A continuación, se van a calcular los índices comentados en la sección 3.2 para luego poder realizar la comparación con el modelo SG-UTE-SL.

Tensión de Excitación.

- **Valores de régimen:**

$$\begin{cases} E_{FD} = 1{,}20 \text{ pu - Antes de aplicado el escalón.} \\ E_{FD} = 1{,}45 \text{ pu - Luego de aplicado el escalón.} \end{cases}$$

- **Tiempo de bajada:**

  La diferencia entre el valor inicial y el valor final es:

$$\Delta E_{FD} = 5{,}09 - 1{,}45 = 3{,}64 \text{ pu} \tag{4.4}$$

  Entonces el 10 % es 0.364 pu.

  Instante t_1.
  La tensión de excitación para el instante t_1 vale:

$$E_{FD_1} = 5{,}09 - 0{,}364 = 4{,}726 \text{ pu} \tag{4.5}$$

  Se estima que el tiempo para el que la tensión de excitación vale 4,73 *pu* es aproximadamente: $t_1 \approx 0{,}10$ *seg*.

  Instante t_2.
  La tensión de excitación para el instante t_2 vale:

$$E_{FD_2} = 1{,}45 + 0{,}364 = 1{,}814 \text{ pu} \tag{4.6}$$

  Se estima que el tiempo para el que la tensión de excitación vale 1,814 *pu* es aproximadamente: $t_2 \approx 0{,}48$ *seg*.

  Por lo tanto, el tiempo de bajada es aproximadamente: $t_{bajada} \approx 0{,}48 - 0{,}10 = 0{,}38$ *seg*.

- **Tiempo de asentamiento:**

  El 5 % de la diferencia entre el valor final y el inicial es:

$$5\,\%\Delta E_{FD} = 0{,}05 \cdot (5{,}09 - 1{,}45) = 0{,}182 \text{ pu} \tag{4.7}$$

  Entonces, el tiempo de asentamiento t_{as}, es aquel que cumple:

$$E_{FD} \in (1{,}268; 1{,}632)\ \forall t > t_{as}$$

  Gráficamente, se puede observar que este tiempo corresponde aproximadamente a $t_{as} = 0{,}50$ *seg*.

Tensión Terminal.

- **Valores de régimen:**

$$\begin{cases} V_T = 1{,}000 \text{ pu - Antes de aplicado el escalón.} \\ V_T = 1{,}095 \text{ pu - Luego de aplicado el escalón.} \end{cases}$$

- **Tiempo de subida:**

  El 10 % de la diferencia entre el valor final y el inicial es:

$$\Delta V_T = 1{,}095 - 1 = 0{,}095 \text{ pu} \Rightarrow 10\,\%\Delta V_T = 0{,}0095 \text{ pu} \tag{4.8}$$

  Instante t_1.
  La tensión terminal para el instante t_1 vale:

$$V_{T_1} = 1 + 0{,}0095 = 1{,}0095 \text{ pu} \tag{4.9}$$

  Se estima, gráficamente, que el tiempo para el que la tensión terminal vale 1,010 *pu* es aproximadamente: $t_2 \approx 0{,}05$ *seg*.

  Instante t_2.
  La tensión terminal para el instante t_2 vale:

$$V_{T_2} = 1{,}095 - 0{,}0095 = 1{,}0855 \text{ pu} \tag{4.10}$$

Se estima, gráficamente, que el tiempo para el que la tensión terminal vale 1,086 *pu* es aproximadamente: $t_2 \approx 0{,}63$ *seg*.

Entonces, el tiempo de subida para la tensión de terminales es aproximadamente: $t_{subida} \approx 0{,}63 - 0{,}05 = 0{,}58$ *seg*.

- **Tiempo de asentamiento:**

  El 5 % de la diferencia entre el valor final y el inicial vale:

$$\Delta V_T = 1{,}095 - 1 = 0{,}095 \text{ pu} \Rightarrow 5\,\%\Delta V_T = 0{,}004725 \text{ pu} \tag{4.11}$$

  De la figura 4.3, se observa que el tiempo de asentamiento es de aproximadamente 0,75 *seg*.

Simulación del modelo SG-UTE-SL.

La simulación antes mencionada, corresponde a una situación de máximo hidráulico en invierno de 1999. Lamentablemente no se cuenta con la información exacta de la carga de la máquina, por lo que se optó por utilizar un valor de máximo hidráulico provisto por el Grupo de Estabilidad y Control del IIE. Los valores de carga son:

$$\begin{cases} P = 135\text{MW} \\ Q = 11{,}56\text{MVar} \end{cases}$$

Se corrió un flujo de carga para obtener la potencia mecánica que debe alimentar a la máquina síncrona, y poder así generar la energía necesaria para esas cargas.

Luego de dejar definidas las condiciones de carga, se simuló el modelo propuesto y se comparó con la documentación de UTE.

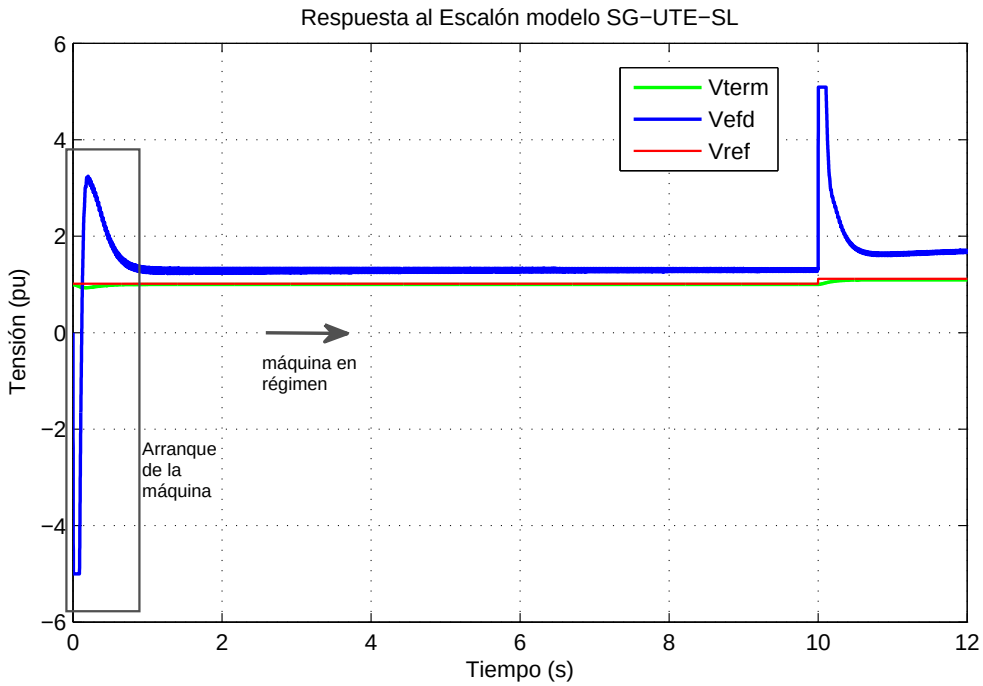


Figura 4.4: Modelo SG-UTE-SL: Respuesta al Escalón

En el gráfico de la figura 4.4 se observa la respuesta al escalón del modelo SG-UTE-SL. Se puede observar la zona de arranque de la simulación, luego llega al régimen, momento en el que se le aplica el escalón. La

zona de arranque de la máquina no se tomó en cuenta a la hora de comparar las respuestas, ya que no se dispone de dicha información para el modelo SG-UTE.

Este modelo cuenta con la ventaja, con respecto al modelo SG-UTE, que fue simulado en Simulink, y por lo tanto se pueden utilizar las herramientas de cálculo de MatLab, para calcular los índices necesarios que nos permiten validar la respuesta.Se implementó un programa para determinar las constantes de tiempo de interés. A continuación se presentan los resultados obtenidos.

Tensión de Excitación.

En la figura 4.5, se puede observar un detalle de la tensión de excitación de la máquina durante el tiempo de la simulación. En el momento en que se le aplica el escalón, a los 10 *seg*, la tensión de excitación crece rápidamente y satura durante 0,1064 *seg* y luego desciende más lentamente hasta alcanzar el valor de régimen que es 1,72 *pu*.

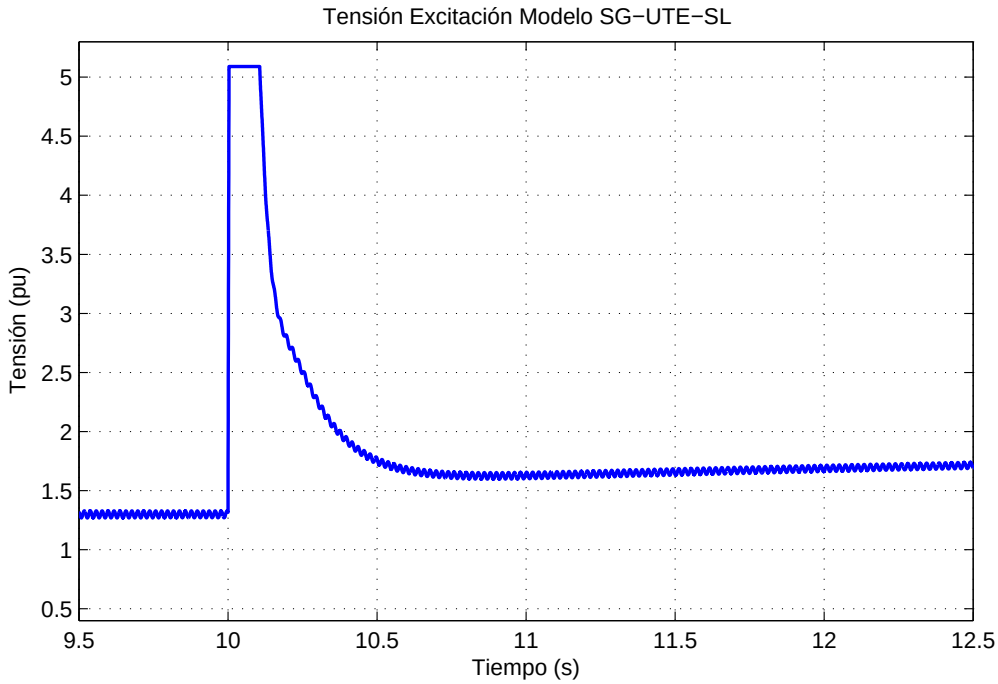


Figura 4.5: Modelo SG-UTE-SL: Tensión de Excitación

- **Valores de régimen:**

  En la figura 4.6, se puede ver que la tensión de excitación en el modelo SG-UTE-SL oscila entre los valores 1,33 *pu* y 1,27 *pu*, en condición de régimen y un valor de tensión de referencia de $V_{ref} = 1{,}015$ *pu*. Por tanto, el valor medio de la tensión de excitación antes de aplicado el escalón sería:

$$E_{FD} = \frac{1{,}33 + 1{,}27}{2} = 1{,}30 \text{ pu} \tag{4.12}$$

  En la figura 4.7, se observa que la tensión de excitación oscila entre 1,74 *pu* y 1,69 *pu* luego de haber aplicado el escalón de 0,1 *pu*. El valor medio de la tensión de excitación luego de aplicado el escalón sería:

$$E_{FD} = \frac{1{,}74 + 1{,}69}{2} = 1{,}72 \text{ pu} \tag{4.13}$$

  En ambas figuras se observa una oscilación de 20 *ms*, lo que equivale a 50Hz. Es interesante notar, que dicha oscilación varía con el consumo de reactiva que tiene la máquina. Para mayor consumo de reactiva, la oscilación es mayor, y para menor consumo de reactiva la oscilación es menor, en donde si la reactiva consumida es nula, no se aprecia oscilación en la salida de la tensión de excitación.

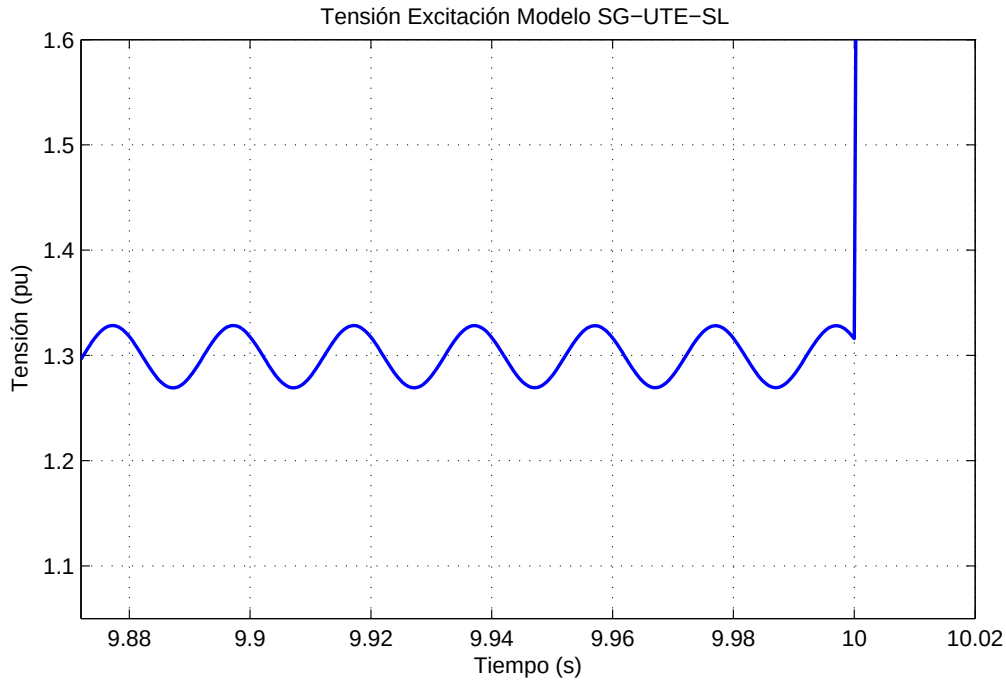


Figura 4.6: Modelo SG-UTE-SL: Tensión de Excitación antes del escalón

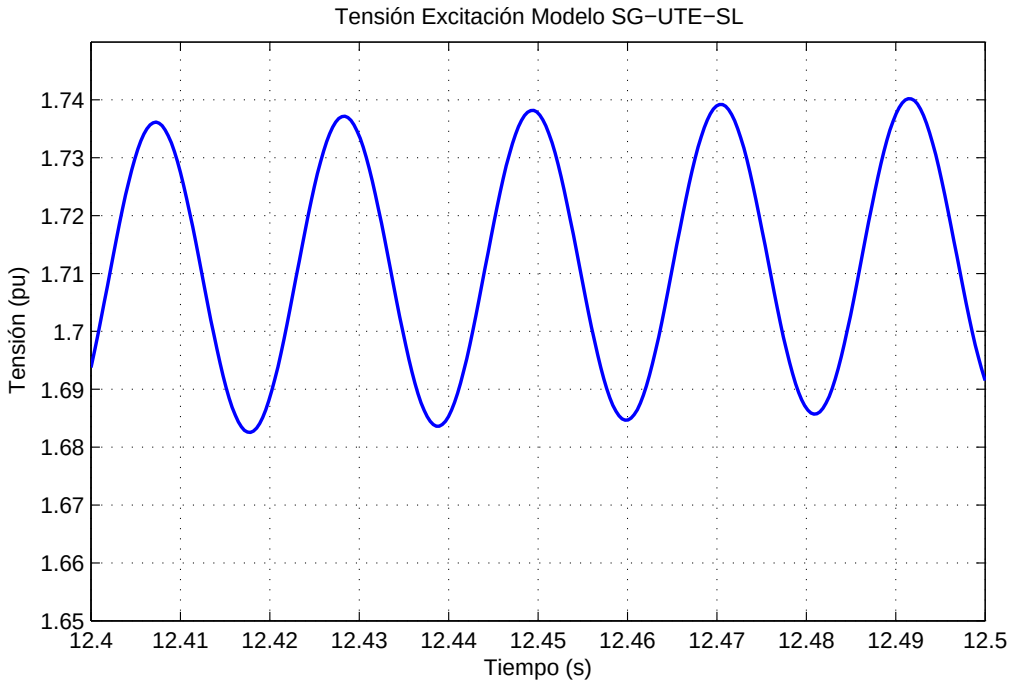
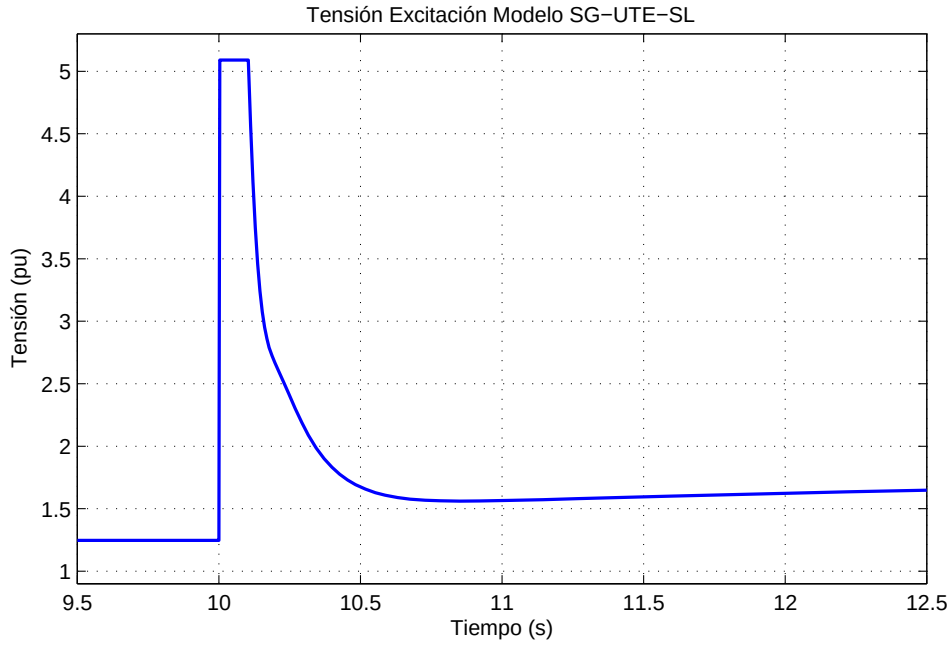
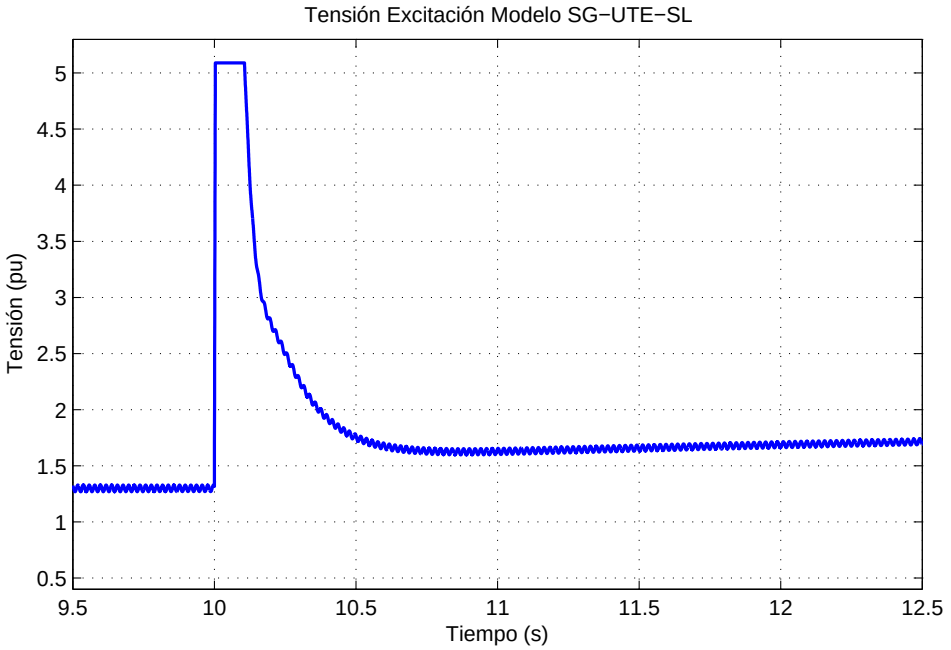


Figura 4.7: Modelo SG-UTE-SL: Tensión de Excitación después del escalón

En la figura 4.8, se presenta una comparación de las respuestas al escalón de la tensión de excitación para las condiciones de carga nominales, y para consumo de reactiva nulo en donde se puede ver claramente el fenómeno comentado anteriormente.



(a) Tensión de Excitación sin consumo de reactiva



(b) Tensión de Excitación en máximo hidráulico

Figura 4.8: Modelo SG-UTE-SL: Tensión de excitación para condiciones de carga diferentes.

- **Tiempo de bajada:**

  El valor final se determinó como un promedio de los últimos 4 períodos del ripple de la tensión de excitación y el valor inicial se tomó como el último punto para el cual la tensión de excitación satura. El programa da como resultado: $t^*_{bajada} = 0{,}2469\ seg$.

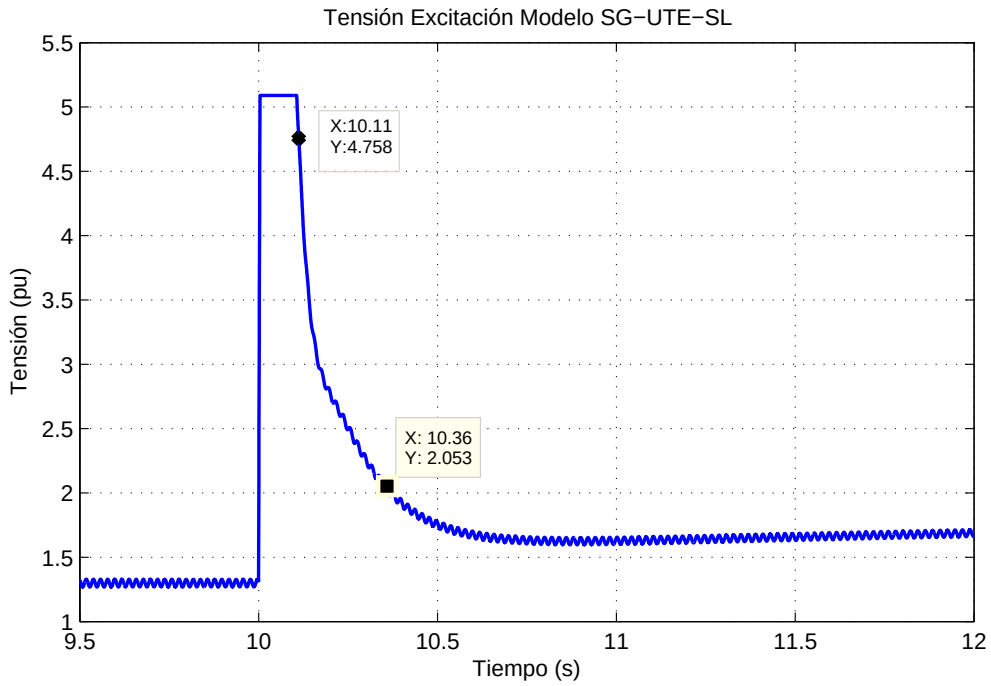


Figura 4.9: Modelo SG-UTE-SL: Tiempo de bajada de la tensión de Excitación.

En la figura 4.9 se observan los puntos de interés, para calcular el tiempo de bajada.

- **Tiempo de asentamiento:**

  El programa implementado da como resultado: $t^*_{as} = 0{,}3304\ seg$. En la figura 4.10 se observa el tiempo en el cuál la tensión entra en la franja del 5 %.

Tensión Terminal.

En la figura 4.11, se puede observar la tensión terminal de la máquina en el tiempo de la simulación. Al igual que la tensión de excitación, se parte de una situación de régimen, y luego de aplicado el escalón en la tensión de referencia, sucede un transitorio para luego obtener un nuevo punto de funcionamiento en régimen.

- **Valores de régimen:**

  En la figura 4.12, se observa en detalle la tensión terminal de la máquina antes de aplicado el escalón. Se puede notar una oscilación entre los valores 0,99875 pu y 0,99787 pu. La tensión terminal antes de aplicado el escalón se puede tomar como el valor medio de la oscilación, esto es:

$$V_T = \frac{0{,}99875 + 0{,}99787}{2} = 0{,}99831 \text{ pu} \tag{4.14}$$

  En la figura 4.13, se presenta la gráfica de la tensión terminal luego de haber aplicado el escalón y alcanzado el valor de un nuevo régimen. La oscilación es entre 1,09246 pu y 1,09327 pu, quedando un valor medio de:

$$V_T = \frac{1{,}09246 + 1{,}09327}{2} = 1{,}09286 \text{ pu} \tag{4.15}$$

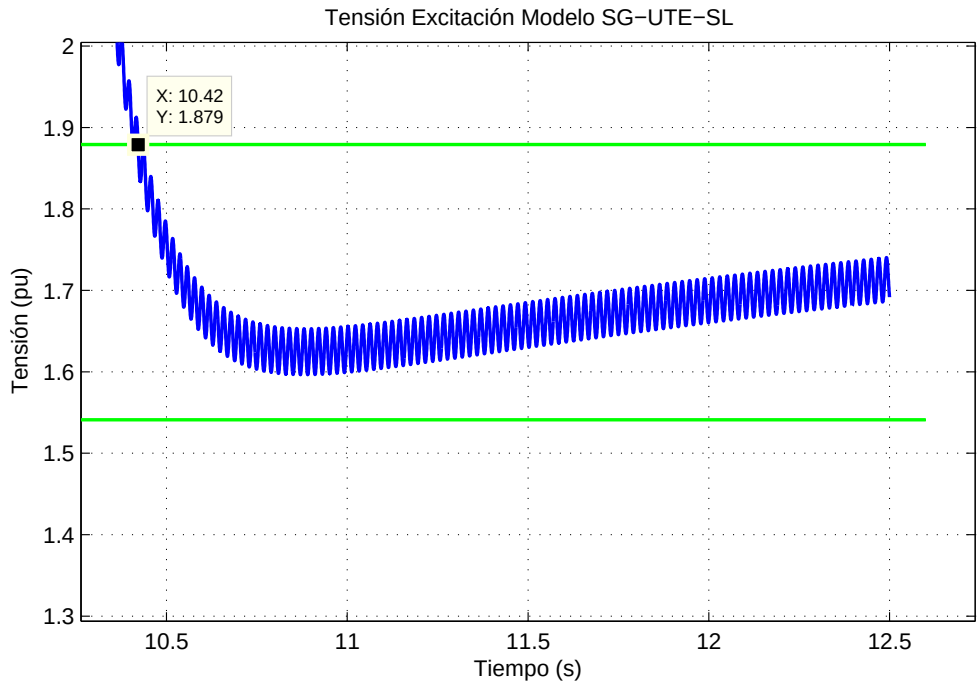


Figura 4.10: Modelo SG-UTE-SL: Tiempo de asentamiento de la tensión de Excitación.

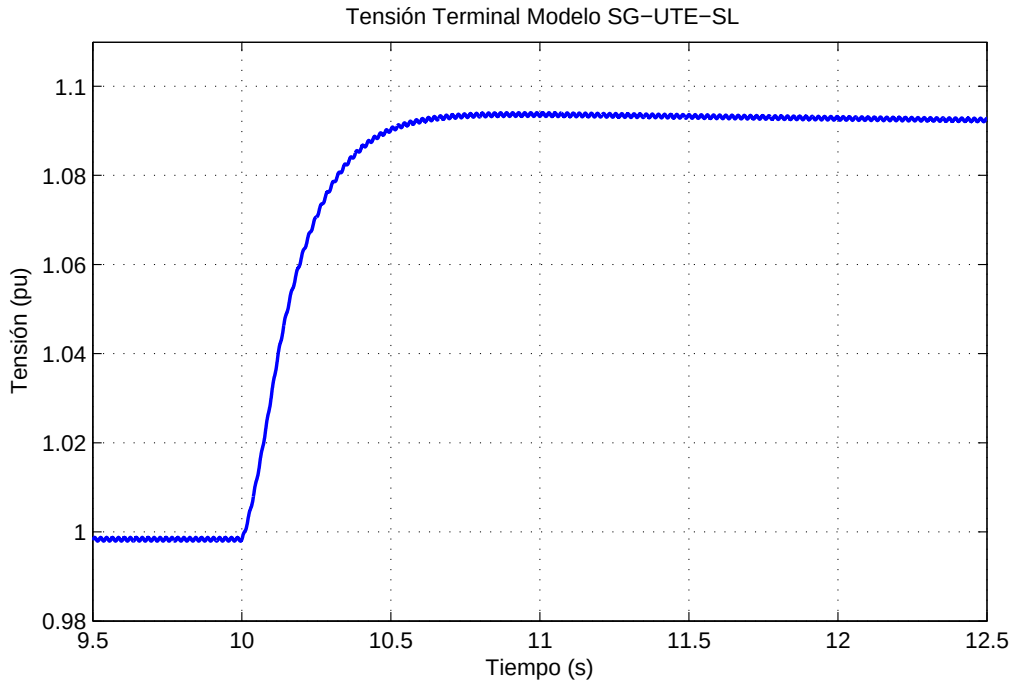


Figura 4.11: Modelo SG-UTE-SL: Tensión Terminal.

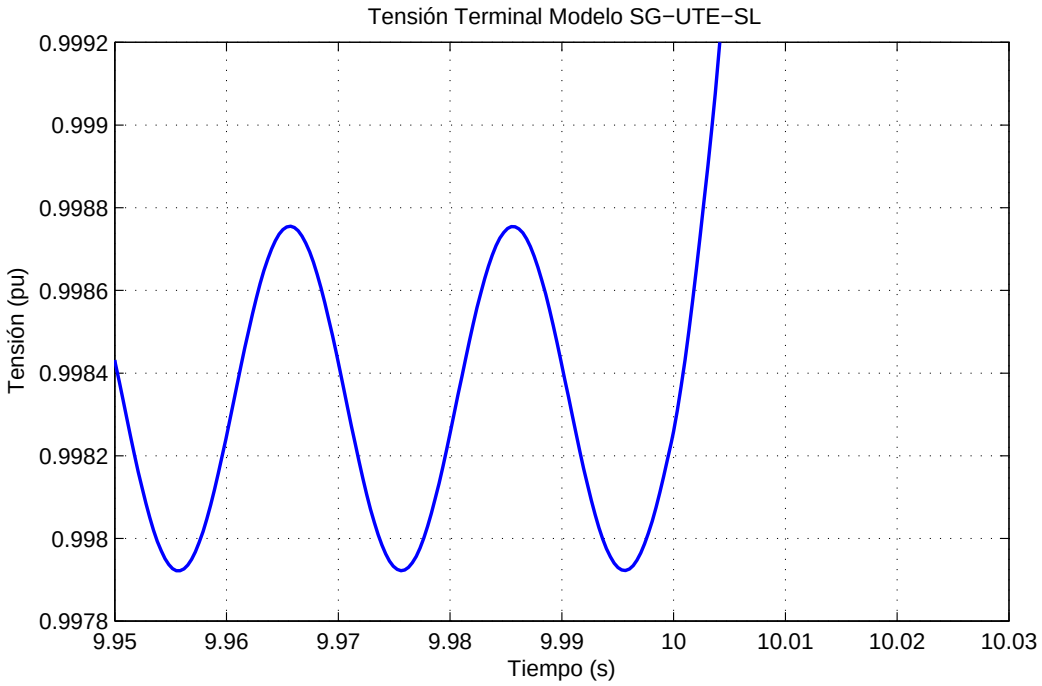


Figura 4.12: Modelo SG-UTE-SL: Tensión Terminal antes de aplicado el escalón.

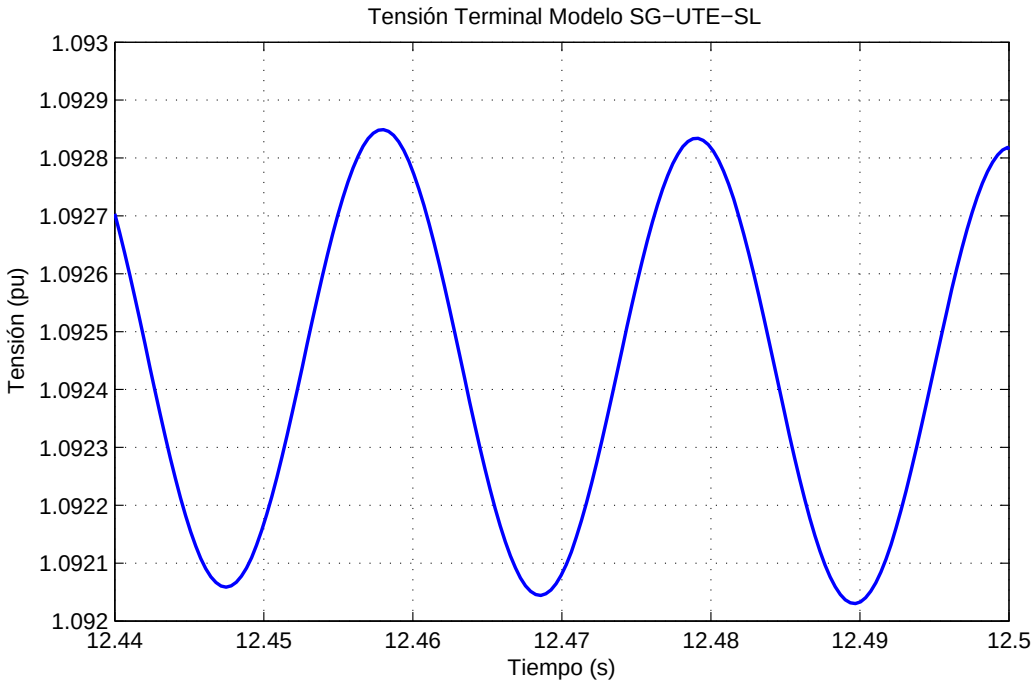


Figura 4.13: Modelo SG-UTE-SL: Tensión Terminal luego de aplicado el escalón.

- **Tiempo de subida:**

  El resultado obtenido con el programa es un tiempo de subida: $t^*_{subida} = 0{,}3203\ seg.$

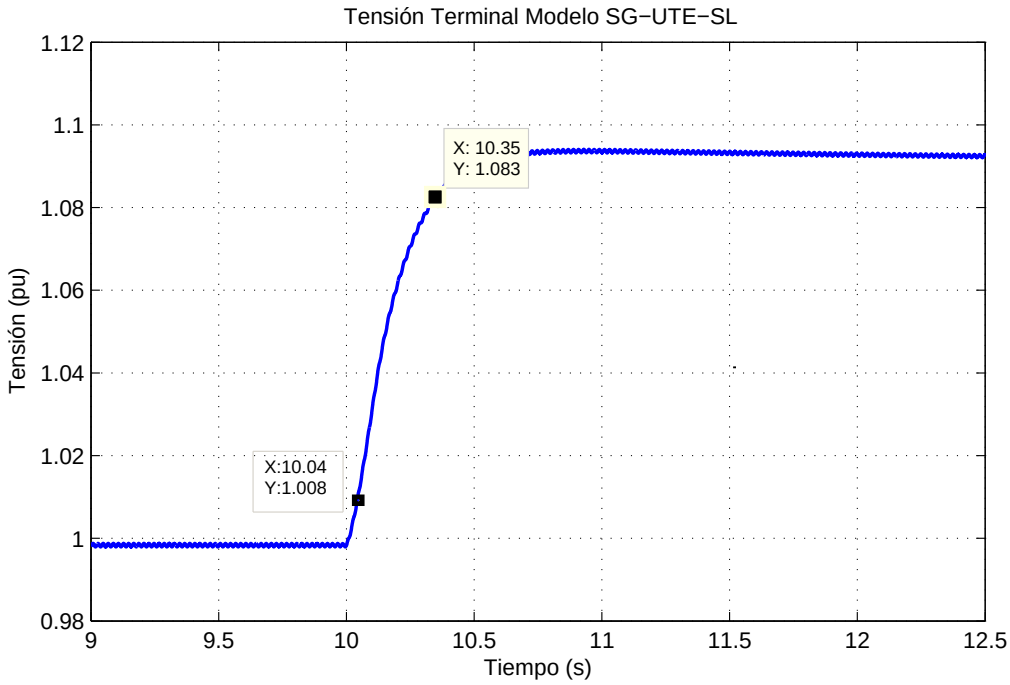


Figura 4.14: Modelo SG-UTE-SL: Tiempo de subida tensión terminal.

En la figura 4.14 se observan los puntos de interés, para calcular el tiempo de subida.

- **Tiempo de asentamiento:**

  El programa da como resultado el siguiente tiempo de asentamiento: $t^*_{asentamiento} = 0{,}4384\ seg.$
  La figura 4.15 se observa el tiempo en el cuál la tensión entra en la franja del 5 %.

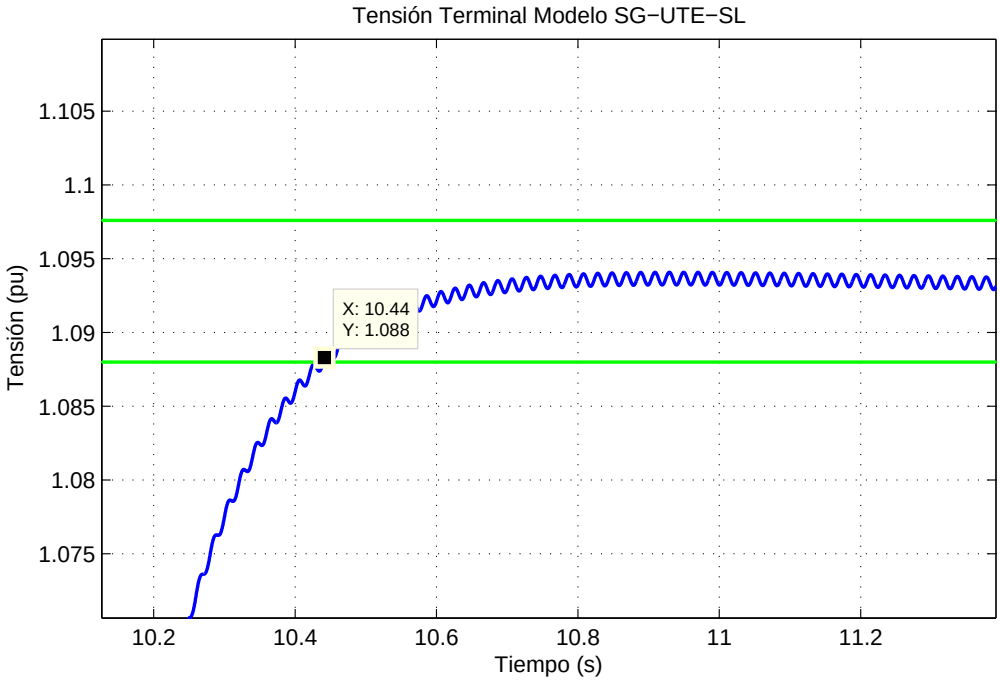


Figura 4.15: Modelo SG-UTE-SL: Tiempo de asentamiento de la tensión terminal.

Comparación Modelo SG-UTE vs Modelo SG-UTE-SL.

Tensión de Excitación.

Comparación cualitativa entre modelos.

La respuesta obtenida en esta simulación es similar a la que se muestra en la documentación de UTE, la mayor diferencia se encuentra luego de la saturación de la tensión de excitación, ya que la respuesta del modelo SG-UTE presenta dos puntos de inflexión que no aparecen en el modelo SG-UTE-SL. A su vez, como se nombró anteriormente, el modelo SG-UTE-SL cuenta con la presencia de un ripple que no es observado, con la misma magnitud, en la respuesta del modelo SG-UTE.

Comparación cuantitativa entre modelos.

El objetivo de esta comparación es presentar numéricamente las diferencias entre las simulaciones realizadas con PSS/E y con Simulink, cuando es el mismo sistema de excitación implementado en uno u otro programa.

1. **Valores de régimen.**
   El valor de régimen antes de aplicado el escalón para el modelo SG-UTE es: $E_{FD} = 1{,}20\ pu$ mientras que para el modelo SG-UTE-SL es: $E_{FD} = 1{,}30\ pu$, por lo tanto el error relativo es:

$$e_{rel} = \frac{|1{,}20 - 1{,}30|}{1{,}20} \cdot 100 = 8{,}3\,\% \tag{4.16}$$

   Los valores de régimen luego de aplicado el escalón para los modelos SG-UTE y SG-UTE-SL son 1,45 pu y 1,72 pu respectivamente, por lo tanto el error relativo es:

$$e_{rel} = \frac{|1{,}45 - 1{,}72|}{1{,}45} \cdot 100 = 18{,}6\,\% \tag{4.17}$$

2. **Tiempo de bajada.**
   El tiempo de bajada para el modelo SG-UTE es: $t_{bajada} = 0{,}38\ seg$ mientras que para el modelo SG-UTE-SL es: $t_{bajada} = 0{,}2469\ seg$. El error relativo es:

$$e_{rel} = \frac{|0{,}38 - 0{,}25|}{0{,}38} \cdot 100 = 34\,\% \tag{4.18}$$

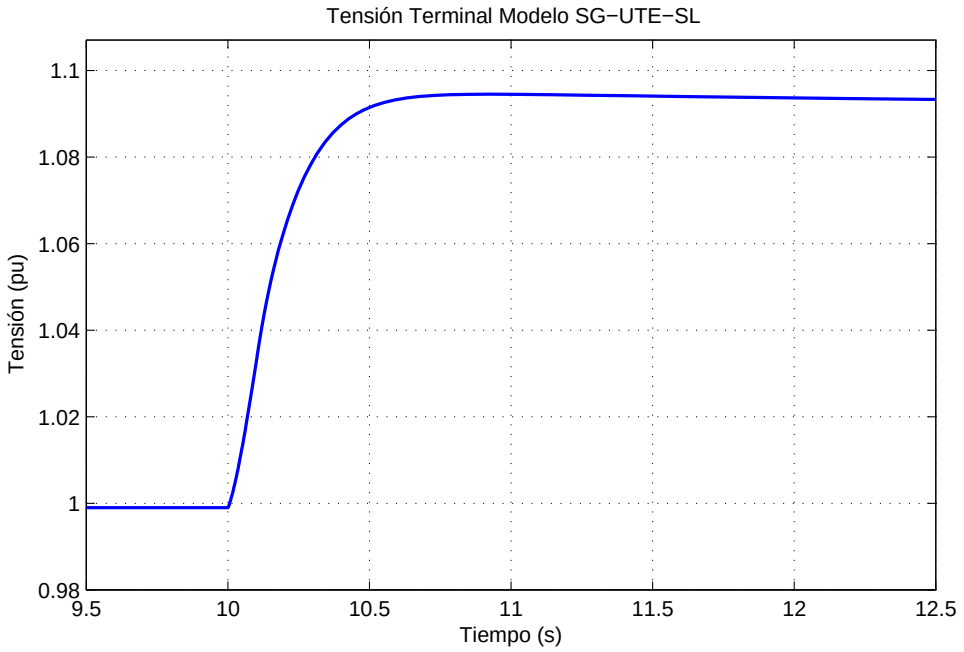
3. **Tiempo de asentamiento.**
   El tiempo de asentamiento para el modelo SG-UTE es: $t_{as} = 0{,}5\ seg$ mientras que para el modelo SG-UTE-SL es: $t_{as} = 0{,}3304\ seg$. El error relativo es:

$$e_{rel} = \frac{|0{,}50 - 0{,}33|}{0{,}50} \cdot 100 = 34\,\% \tag{4.19}$$

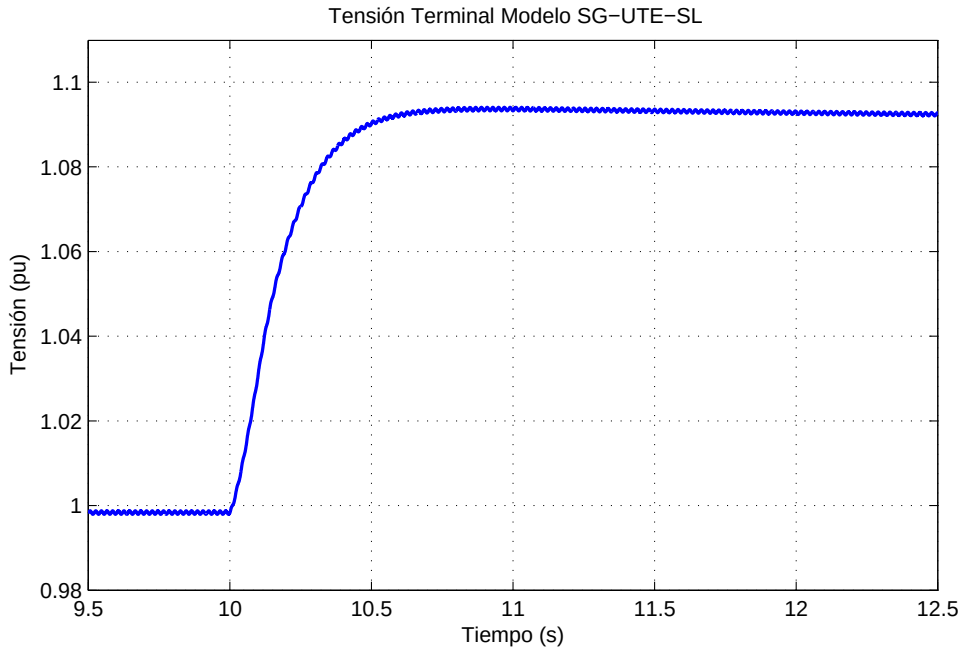
Tensión Terminal.

Comparación cualitativa entre modelos.

El principal punto de comparación se da en el ripple que presenta la tensión. En la figura 4.16, se puede observar una gráfica donde se compara la respuesta de la tensión terminal para la condición de carga de máximo hidráulico con la respuesta para carga puramente resistiva. Se observa el mismo comportamiento que para la tensión de excitación, verificando la dependencia de la oscilación con el consumo de reactiva de la carga.



(a) Tensión Terminal sin consumo de reactiva



(b) Tensión Terminal en máximo hidráulico

Figura 4.16: Modelo SG-UTE-SL: Tensión terminal para condiciones de carga diferentes.

Comparación cuantitativa entre modelos.

Al igual que para la tensión de excitación, se procede a la comparación cuantitativa de las respuestas, calculando el error relativo para cada índice.

1. **Valores de régimen.**
   El valor de régimen de la tensión terminal antes de aplicado el escalón para SG-UTE es: $V_T = 1{,}000$ pu y para SG-UTE-SL es: $V_T = 0{,}99831$ pu. Error relativo:

$$e_{rel} = \frac{|1{,}000 - 0{,}998|}{1{,}000} \cdot 100 = 0{,}2\,\% \tag{4.20}$$

   Después de aplicado el escalón los valores de tensión terminal en régimen son para SG-UTE $V_T = 1{,}095$ pu y para SG-UTE-SL $V_T = 1{,}09286$ pu. El error relativo es:

$$e_{rel} = \frac{|1{,}095 - 1{,}093|}{1{,}095} \cdot 100 = 0{,}18\,\% \tag{4.21}$$

2. **Tiempo de subida.**
   Los tiempos de subida son 0,575 seg para SG-UTE y 0,3203 seg para SG-UTE-SL. Por lo tanto, el error relativo es:

$$e_{rel} = \frac{|0{,}58 - 0{,}32|}{0{,}58} \cdot 100 = 45\,\% \tag{4.22}$$

3. **Tiempo de asentamiento.**
   Los tiempos de asentamiento son 0,75 seg para SG-UTE y 0,4384 seg para SG-UTE-SL. Por lo tanto, el error relativo es:

$$e_{rel} = \frac{|0{,}75 - 0{,}44|}{0{,}75} \cdot 100 = 41\,\% \tag{4.23}$$

Comentarios sobre la validación.

En la comparación cuantitativa de los modelos existen diferencias apreciables entre los mismos, y las mismas se pueden considerar aceptables considerando las siguientes razones:

- En primera instancia se reitera el hecho de que no se tenía un valor exacto de la carga, y se supuso un valor de una simulación de máximo hidráulico propuesto por el grupo de estabilidad y control.
- Las condiciones del ensayo en Simulink son con una máquina aislada y carga puntual, mientras que el ensayo en PSS/E se simula frente a un sistema de potencia. A esto se le puede agregar que el PSS/E se utiliza para simular grandes sistemas de potencia, por lo que simplifica los modelos despreciando algunas constantes de tiempo que no influyen para estudios de estabilidad transitoria. En cambio, el Simulink toma en cuenta todas las constantes de tiempo de las ecuaciones diferenciales que gobiernan el comportamiento.
- El modelo utilizado para la máquina síncrona es un modelo estándar de Simulink, al cual se le cargaron los parámetros específicos de la documentación de UTE. No se hizo el diagrama de bloques específico de la máquina de Salto Grande que figura en la documentación de UTE.

4.2. Sistema de Excitación de Salto Grande según Estándares IEEE.

4.2.1. Modelo SG-IEEE-SL.

Luego de haber hecho un análisis al modelo del sistema de excitación de Salto Grande, se obtuvo que el modelo estándar ST1A de la IEEE, es el que mejor se aproxima. Esto último debido a que ambos modelos comparten varios bloques, y la realidad indica que efectivamente el sistema de excitación de Salto Grande es estático. Se observa el modelo de la IEEE en la figura 4.17.

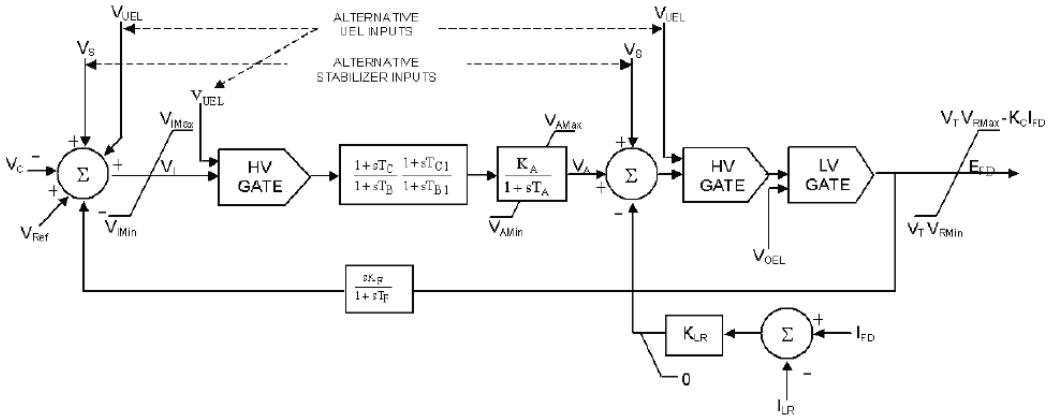


Figura 4.17: Sistema de Excitación Estático ST1A

La metodología seguida para modelar el sistema fue identificar los bloques del modelo ST1A en el modelo SG-UTE-SL. Este procedimiento lleva a que hay bloques que se pueden modelar exactamente igual y otros que no. Lo que se buscó en todo momento, fue que el lazo de control principal se mantenga, en la medida de lo posible. Teniendo en cuenta estas consideraciones, se llega al modelo SG-IEEE-SL de la figura 4.18, que se describe a continuación.

Compensación atraso-adelanto.
En primer lugar se observa que, el bloque de compensación atraso-adelanto, se puede modelar de la misma forma en ambos modelos. Para esto, las constantes del modelo IEEE deben ser: $T_{C1} = T_{B1} = 0$. De esta manera, surge el bloque de transferencia:

$$H(s) = \frac{1 + sT_{c_{IEEE}}}{1 + sT_{b_{IEEE}}} \tag{4.24}$$

Rectificador y Regulador de tensión.
El bloque que representa al Rectificador y Regulador de Tensión es aquel con transferencia:

$$H(s) = \frac{K_A}{1 + sT_A} \tag{4.25}$$

En donde el parámetro K_A representa la influencia del ángulo de disparo del puente de tiristores, que se asume lineal en el modelo y por tanto se representa simplemente como una ganancia.
En el modelo SG-UTE-SL, el excitador es modelado con la transferencia:

$$H(s) = \frac{1}{1 + sT_e} \tag{4.26}$$

En donde la ganancia en continua es 1, pero a la entrada se tiene una ganancia K_e que en el modelo 4.1 forma parte del bloque de compensación atraso - adelanto. Para representar el sistema según el estándar ST1A de la IEEE se consideró, a la hora de modelar en Simulink, como parte del bloque del rectificador y excitador. Por tanto la transferencia 4.26 pasa a ser:

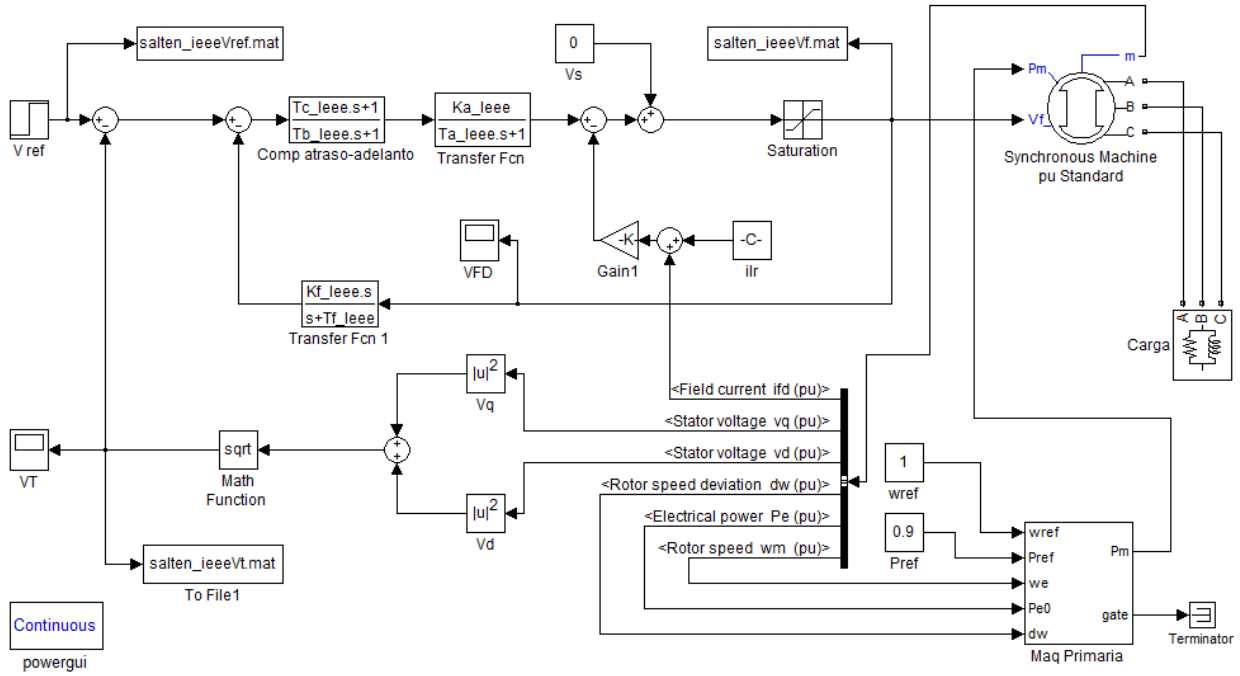


Figura 4.18: Modelo SG-IEEE-SL

$$H(s) = \frac{K_e}{1 + sT_e} \tag{4.27}$$

De esta manera, el bloque que modela el Rectificador y Regulador de Tensión es:

$$H(s) = \frac{K_{a_{IEEE}}}{1 + sT_{a_{IEEE}}} \tag{4.28}$$

HV GATE - LV GATE.

Los bloques *HV GATE* y *LV GATE* se pueden modelar como una saturación, ya que la transferencia para una entrada u y salida v es la siguiente:

- Si $u \in [V_{OEL}, V_{UEL}] \Rightarrow v = u$
- Si $u < V_{OEL} \Rightarrow v = V_{OEL}$
- Si $u > V_{UEL} \Rightarrow v = V_{UEL}$

Realimentación de la tensión de excitación.

La principal diferencia conceptual que se encuentra en los modelos SG-UTE-SL y ST1A de la IEEE, es que en el primer caso la realimentación se hace por medio de la corriente de campo, mientras que en el segundo, se hace con la tensión de campo. El bloque de realimentación de la tensión de campo está dado por la transferencia:

$$H(s) = \frac{K_{f_{IEEE}}}{1 + sT_{f_{IEEE}}} \tag{4.29}$$

Por tanto, la realimentación de la tensión de campo que se observa en la figura 4.18 a priori no se corresponde directamente con ningún bloque del modelo SG-UTE-SL.

Limitador de Corriente de Campo.
En el modelo de la figura 4.17, se tiene una señal que limita la corriente de campo. Dicha señal es la I_{LR}, que se le resta a la corriente de campo y se amplifica por medio de una ganancia K_{LR}. El resultado se resta en el lazo principal de control a la tensión de campo antes del bloque de saturación. En la figura 4.18, se observa la misma señal, pero como es una función de protección que no está modelada en SG-UTE-SL, la constante $K_{LR} = 0$.

Tensión mínima de Excitación.
El único bloque que no está contemplado en el modelo de la figura 4.18, pero si está contemplado en el modelo SG-UTE-SL, es aquel que le suma V al lazo principal de control, si la tensión terminal es menor a un determinado valor. Este comportamiento se pierde al modelar según estándar de la IEEE.

Señales Estabilizantes del PSS.
Al igual que se comentó en el modelo SG-UTE-SL, las señales estabilizantes del PSS, no son tenidas en cuenta para estudios de estabilidad transitoria, y por tanto no fue considerada en el análisis.

Resto del Sistema.
El resto del sistema se modeló de la misma manera que para SG-UTE-SL.

4.2.2. Estimación de los Parámetros del modelo SG-UTE-SL.

En esta sección se va a describir el procedimiento seguido para la obtención de los parámetros del modelo SG-IEEE-SL. Como ya se dijo en la sección 4.2.1, lo que se buscó es mantener el lazo principal de control al pasar del modelo SG-UTE-SL al modelo SG-IEEE-SL.

Control and Estimation Tool Manager.

Para estimar los parámetros del modelo, se utilizó el "Control and Estimation Tool Manager", el cual fue descrito en la sección 3.2.

Para obtener un resultado correcto y que el algoritmo converja en el entorno de interés, se deben elegir ciertas variables fijas y otras libres, decidiendo de esta manera los grados de libertad.

Elección de parámetros fijos.
Los parámetros que se dejaron fijos, fueron aquellos que se pueden determinar con el análisis del modelo SG-UTE-SL. A continuación se describe la elección de cada parámetro.

Compensación atraso-adelanto.
Este bloque es modelado idéntico en el modelo SG-UTE-SL, y por lo tanto la influencia de este bloque sobre la salida es la misma para cada modelo por lo que los parámetros deben tomar el mismo valor:

$$\begin{cases} T_{c_{IEEE}} = T_a = 0{,}0760 \\ T_{b_{IEEE}} = T_b = 0{,}0210 \end{cases}$$

Rectificador y Regulador de tensión.
El rectificador y regulador de tensión en el modelo SG-IEEE-SL, es representado por la multiplicación de dos bloques del modelo SG-UTE-SL, tal como se describe en la sección 4.2.1, y se observa en la ecuación

$$H(s) = K_e \cdot \frac{1}{1 + sT_e} = \frac{K_e}{1 + sT_e} = \frac{K_{a_{IEEE}}}{1 + sT_{a_{IEEE}}} \tag{4.30}$$

Por lo que es adecuado asignar los siguientes valores:

$$\begin{cases} K_{a_{IEEE}} = K_e = 78 \\ T_{a_{IEEE}} = T_e = 0{,}0240 \end{cases}$$

HV GATE - LV GATE.
Los valores máximos y mínimos están dados por el bloque de saturación en el modelo SG-UTE-SL.

$$\begin{cases} EFD_{max} = 5{,}09 \\ EFD_{min} = -5 \end{cases}$$

Parámetros libres.
Una vez determinados los parámetros que se consideran fijos en la estimación, se definen los parámetros libres, que son aquellos cuyo valor se puede variar para obtener la respuesta más adecuada al sistema. La elección de estos parámetros, se hizo con el criterio de dejar libres aquellos que no tienen una correspondencia directa entre un modelo y otro. El bloque de **realimentación de la tensión de excitación**, no se corresponde directamente con el modelo SG-UTE-SL, ya que en éste la realimentación se hace con la corriente de campo. Por lo tanto, los parámetros de este bloque:

$$\begin{cases} K_{F_{IEEE}} \\ T_{F_{IEEE}} \end{cases}$$

se consideran libres a la hora de la iteración para obtener la mejor respuesta.

Resultados Obtenidos.
Una vez hecha la configuración de los parámetros, se le da comienzo a la iteración. Los resultados obtenidos fueron:

$$\begin{cases} T_{F_{IEEE}} = 1{,}1979 \\ K_{F_{IEEE}} = 5{,}3 \cdot 10^{-3} \end{cases}$$

4.2.3. Validación del modelo SG-IEEE-SL.

Una vez obtenidos los parámetros, se procede a su validación, en la cual se comparan las respuestas entre ambos modelos. Al igual que en la sección 4.1.3, se hace una comparación cuantitativa y cualitativa de las respuestas.

Simulación del modelo SG-IEEE-SL.

En la figura 4.19, se observa la tensión de excitación y la tension terminal de la máquina cuando la misma es sometida a un escalón en la tensión de referencia. Se observa la zona de arranque (que no se va a tener en cuenta en los estudios) y la zona en que la máquina está en régimen. La simulación se realizó para la misma situación de carga que en el modelo SG-UTE-SL.

Al igual que para SG-UTE-SL, se implementó un programa en MatLab para calcular las constantes de tiempo de interés. A continuación se presentan los índices de interés para la validación del modelo.

Tensión de Excitación.
En la figura 4.20 se observa la tensión de excitación cuando se le aplica un escalón en la tensión de referencia. En la misma se parte de una situación de régimen, y a los 10 *seg*, se aplica un escalón en V_{ref} que pasa de 1,015 *pu* a 1,115 *pu*.

- **Valores de régimen:**

  De la gráfica de la figura 4.20 se obtiene que el valor de régimen antes de aplicar el escalón para la tensión de excitación vale $E_{FD_{inicial}} = 1{,}295\ pu$ y luego de aplicado el escalón el nuevo valor de régimen es $E_{FD_{final}} = 1{,}711\ pu$.

- **Tiempo de bajada:**

  El programa implementado da como resultado un tiempo de bajada: $t_{bajada} = 0{,}2185\ seg$.

- **Tiempo de asentamiento:**

  Se calcula un tiempo de asentamiento de: $t_{as} = 0{,}2851\ seg$.

  En la figura 4.21 se observa el momento en el que la tensión entra en la franja del 5 %.

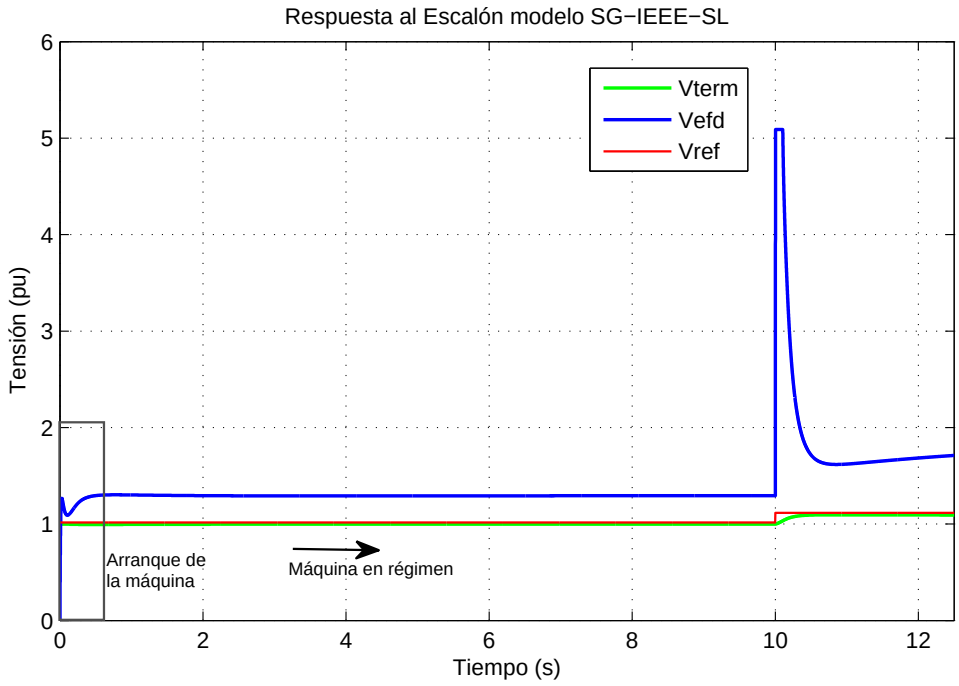


Figura 4.19: Modelo SG-IEEE-SL: Respuesta al escalón.

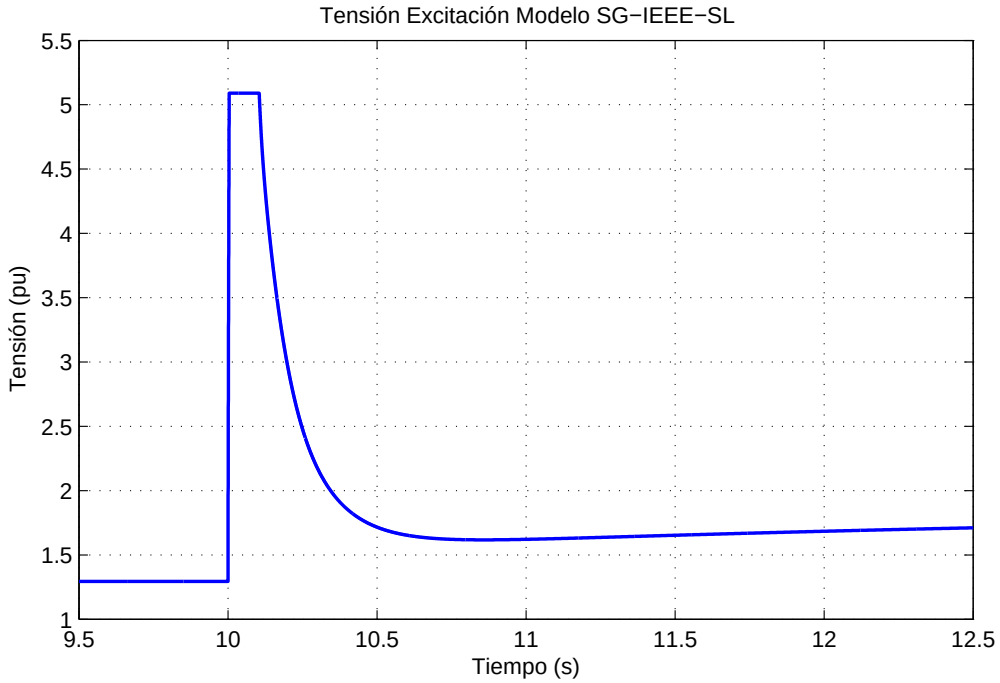


Figura 4.20: Modelo SG-IEEE-SL: Tensión de Excitación.

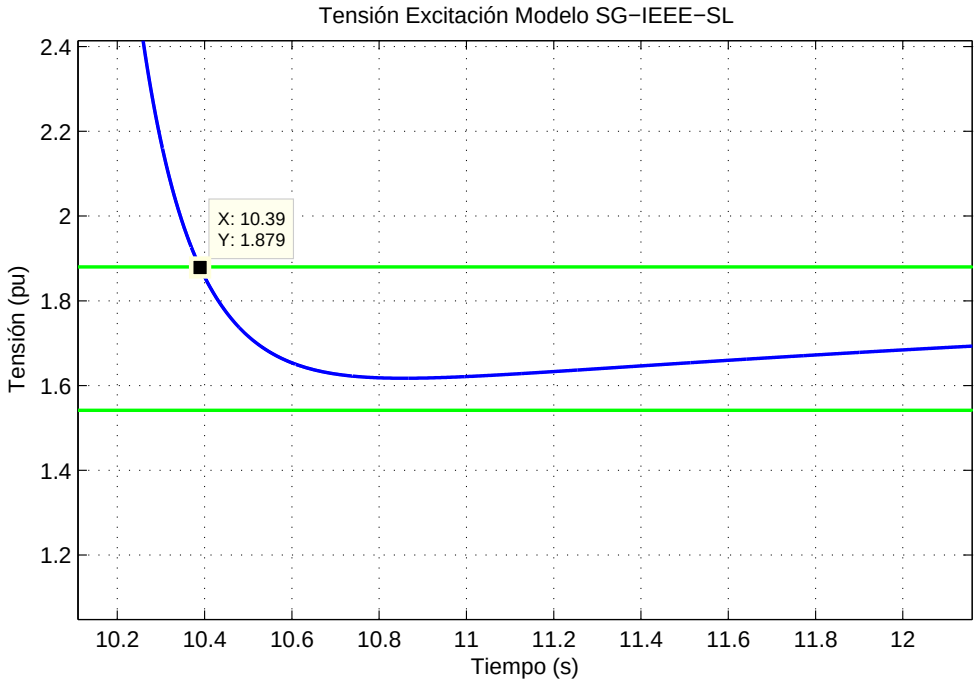


Figura 4.21: Modelo SG-IEEE-SL: Tiempo de asentamiento.

Tensión Terminal.

En la figura 4.26 se puede ver la tensión terminal de la máquina. De la misma manera que la tensión de excitación, se puede observar que la respuesta es muy similar a la obtenida para el modelo SG-UTE-SL que se observa en la figura 4.11.

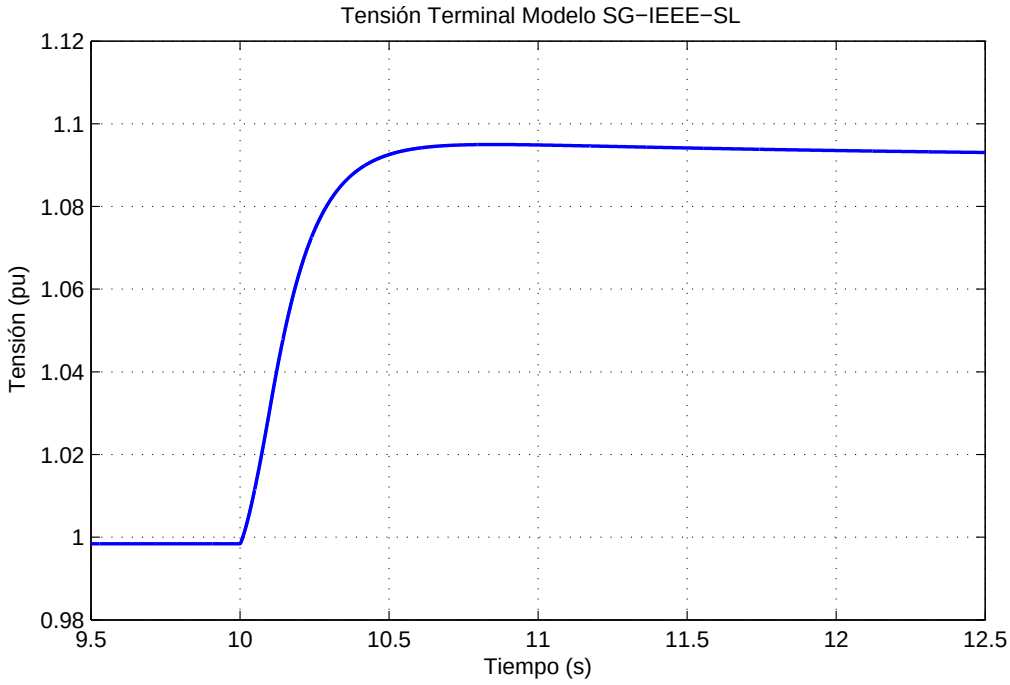


Figura 4.22: Modelo SG-IEEE-SL: Tensión Terminal.

- **Valores de régimen:**

  De la figura 4.22 se deduce que el valor de régimen antes de aplicado el escalón es $V_{T_{ini}} = 0{,}9984\ pu$ y el valor de régimen luego de aplicado el escalón es $V_{T_{final}} = 1{,}0935\ pu$.

- **Tiempo de subida:**

  Con el programa en MatLab, el tiempo de subida obtenido es: $t_{subida} = 0{,}2852\ seg$.

  En la figura 4.23 se observan los puntos de interés para calcular el tiempo de subida.

- **Tiempo de asentamiento:**

  El tiempo de asentamiento obtenido es: $t_{as} = 0{,}3880\ seg$ y en la figura 4.24 se observa este tiempo, recordar que el tiempo en que se aplica el escalón es a los 10 seg.

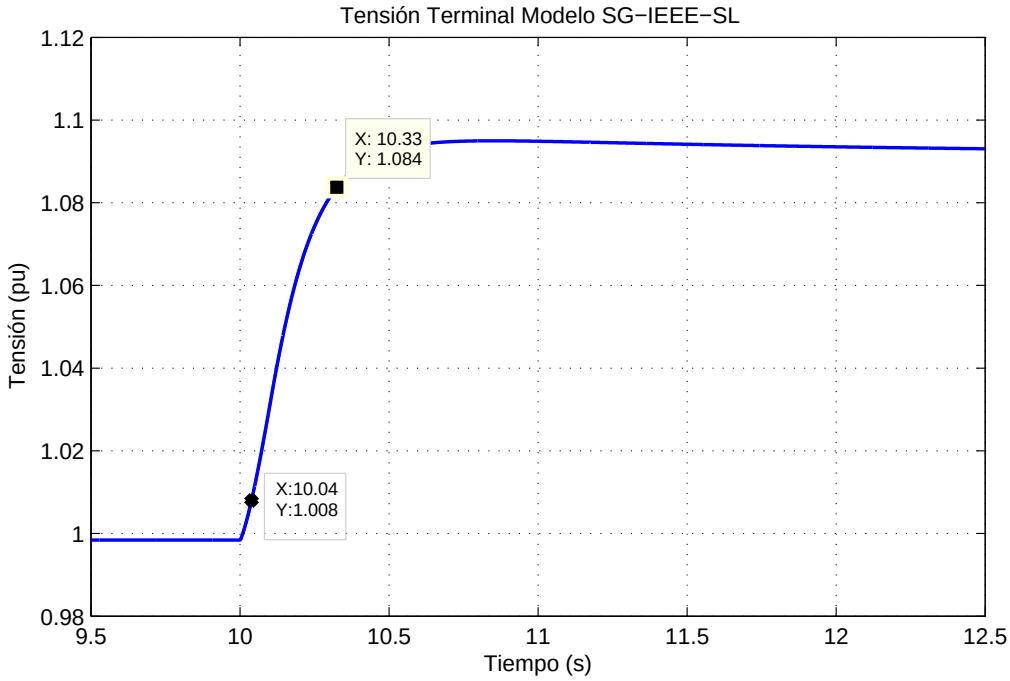


Figura 4.23: Modelo SG-IEEE-SL: Tiempo de Subida.

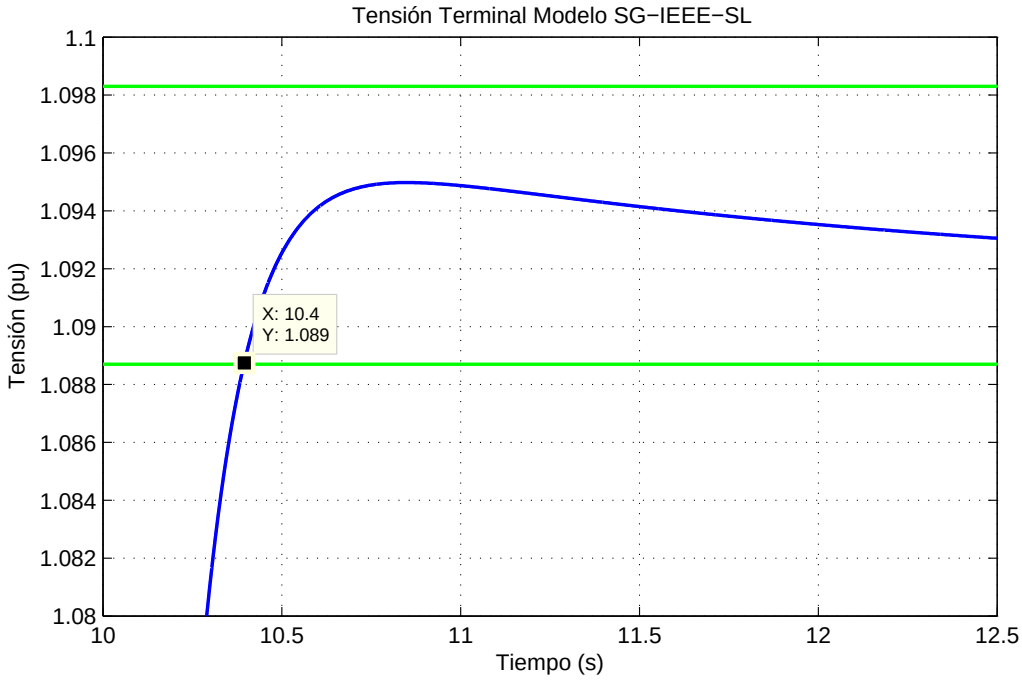


Figura 4.24: Modelo SG-IEEE-SL: Tiempo de asentamiento.

Comparación Modelo SG-UTE-SL vs Modelo SG-IEEE-SL.

Tensión de Excitación.

Comparación cualitativa entre modelos.

La mayor diferencia cualitativa que se observa en las respuestas de los dos modelos, es que en SG-UTE-SL la tensión de excitación tiene un ripple de 50Hz que en SG-IEEE-SL no se observa. Ambas respuestas se pueden visualizar en una misma gráfica en la figura 4.25.

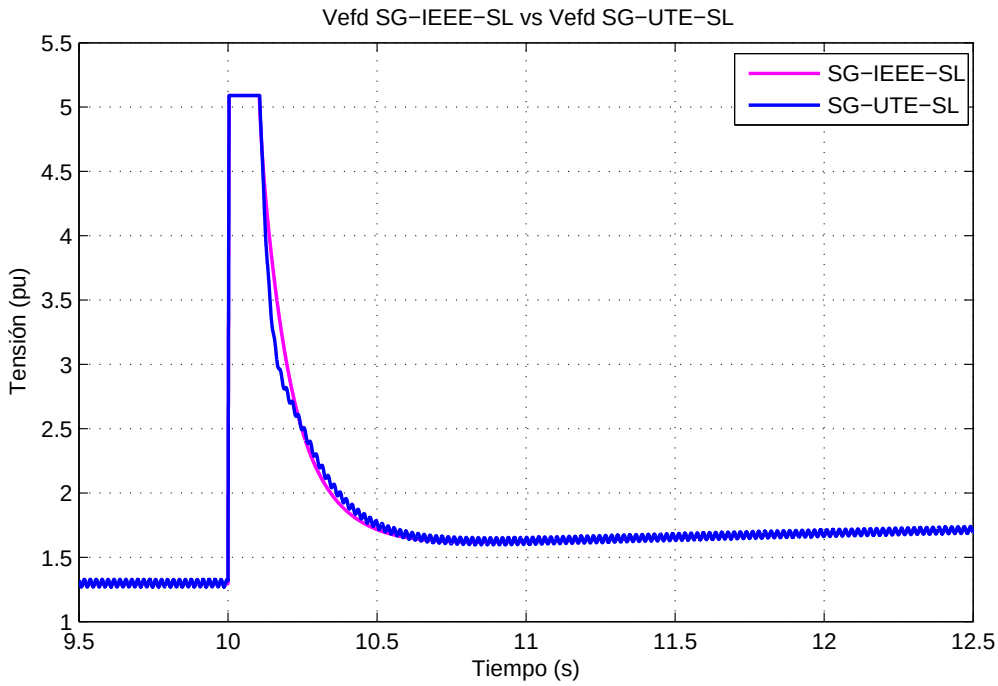


Figura 4.25: SG-UTE-SL vs SG-IEEE-SL: Tensión de Excitación.

Comparación cuantitativa entre modelos.

Al igual que en la sección 4.1.3, se calculan los errores relativos a modo de comparación cuantitativa.

1. **Valores de régimen.**

   Se recuerda que los valores de régimen calculados para el modelo SG-UTE-SL son: 1,300 *pu* antes de aplicado el escalón y 1,713 *pu* luego de aplicado el escalón. Los valores de régimen para el modelo SG-IEEE-SL son: 1,295 *pu* y 1,711 *pu* antes y luego de aplicado el escalón respectivamente.

   Con estos resultados, se puede calcular el error relativo en cada uno de los casos.

$$e_{rel_i} = \frac{1{,}300 - 1{,}295}{1{,}300} \cdot 100 = 0{,}38\,\% \tag{4.31}$$

$$e_{rel_f} = \frac{1{,}713 - 1{,}711}{1{,}713} \cdot 100 = 0{,}12\,\% \tag{4.32}$$

2. **Tiempo de bajada.**

   El tiempo de bajada calculado para el modelo SG-UTE-SL es 0,2469 *seg*, y para el SG-IEEE-SL es 0,2185 *pu*. Por lo tanto el error relativo es:

$$e_{rel_{bajada}} = \frac{0{,}2469 - 0{,}2185}{0{,}2469} \cdot 100 = 11{,}5\,\% \tag{4.33}$$

3. **Tiempo de asentamiento.**

   El modelo SG-UTE-SL tiene un tiempo de asentamiento de 0,3304 *seg* en la simulación realizada. El modelo SG-IEEE-SL tiene un tiempo de 0,2851 *seg* y por lo tanto el error relativo es:

$$e_{rel_{asen}} = \frac{0{,}3304 - 0{,}2851}{0{,}3304} \cdot 100 = 13{,}7\,\% \tag{4.34}$$

Tensión Terminal.

Comparación cualitativa entre modelos.

En la figura 4.26, se observa que la mayor diferencia apreciable en la tensión terminal del modelo SG-UTE-SL con el modelo SG-IEEE-SL, es la presencia del ripple en el modelo SG-UTE-SL.

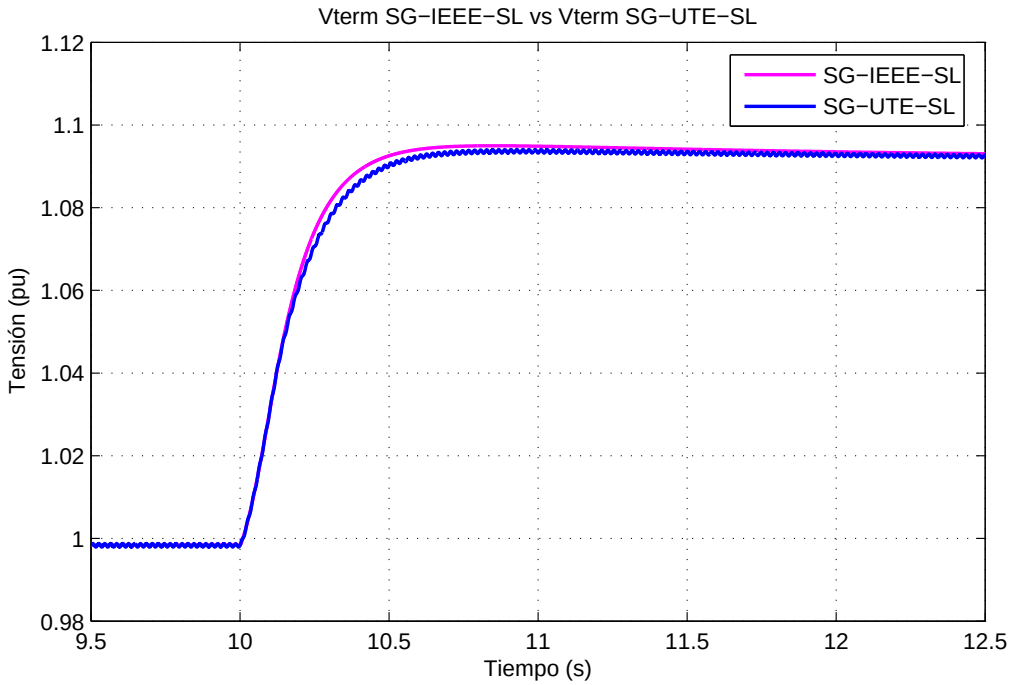


Figura 4.26: SG-UTE-SL vs SG-IEEE-SL: Tensión Terminal.

Comparación cuantitativa entre modelos.

1. **Valores de régimen.**
   Se recuerda que los valores iniciales y finales para el modelo SG-UTE-SL son $V_{T_{ini}} = 0{,}99831\ pu$ y $V_{T_{final}} = 1{,}09286\ pu$ respectivamente. Por lo tanto, los errores relativos quedan:

$$e_{rel_i} = \frac{|0{,}9983 - 0{,}9984|}{0{,}9983} \cdot 100 = 0{,}009\,\% \tag{4.35}$$

$$e_{rel_f} = \frac{|1{,}0929 - 1{,}0935|}{1{,}0929} \cdot 100 = 0{,}06\,\% \tag{4.36}$$

2. **Tiempo de subida.**

   El tiempo de subida para el modelo SG-UTE-SL es 0,3203 *seg*, y el error relativo en el tiempo de subida es:

$$e_{rel_sub} = \frac{0{,}3203 - 0{,}2852}{0{,}3203} \cdot 100 = 10{,}9\,\% \tag{4.37}$$

3. **Tiempo de asentamiento.**

   Se recuerda que el tiempo de asentamiento en el modelo SG-UTE-SL es: $t_{as} = 0{,}4384\ seg$. Por lo tanto, el error relativo es:

$$e_{rel_{as}} = \frac{0{,}4384 - 0{,}3880}{0{,}4384} = 11{,}5\,\% \tag{4.38}$$

4.3. Análisis del ripple.

4.3.1. Ripple en las respuestas obtenidas en SG-UTE-SL.

Estudio del sistema con entradas constantes.

El objetivo de este estudio es determinar si el ripple es producido por la máquina sincrónica, en cuyo caso no se dispone de herramientas para corregirlo.

Para esto lo que se hizo fue aislar el sistema de control de excitación y el bloque de la turbina de la máquina sincrónica, asignándole a las respectivas entradas un valor constante, como se observa en la figura 4.27.

A su vez, se hizo una modificación en la carga, ya que la carga utilizada anteriormente varía con la tensión de la siguiente manera:

$$X_L = \frac{V^2}{Q}$$

que equivale al comportamiento de una carga inductiva en régimen sinusoidal permanente.

La máquina está modelada con todo detalle (ecuaciones diferenciales sin despreciar constantes de tiempo muy rápidas), por lo que se pensó que un modelo más exacto de un inductor (con la ecuación diferencial correspondiente), podría resultar más apropiado, porque el fenómeno del ripple está asociado al consumo de potencia reactiva de la máquina. Por lo tanto, se modela el inductor con la resistencia en paralelo como se puede ver en la figura 4.27.

La variable a observar en la simulación es la corriente de campo, y no interesa el valor que toma la corriente de campo, sino la presencia del ripple.

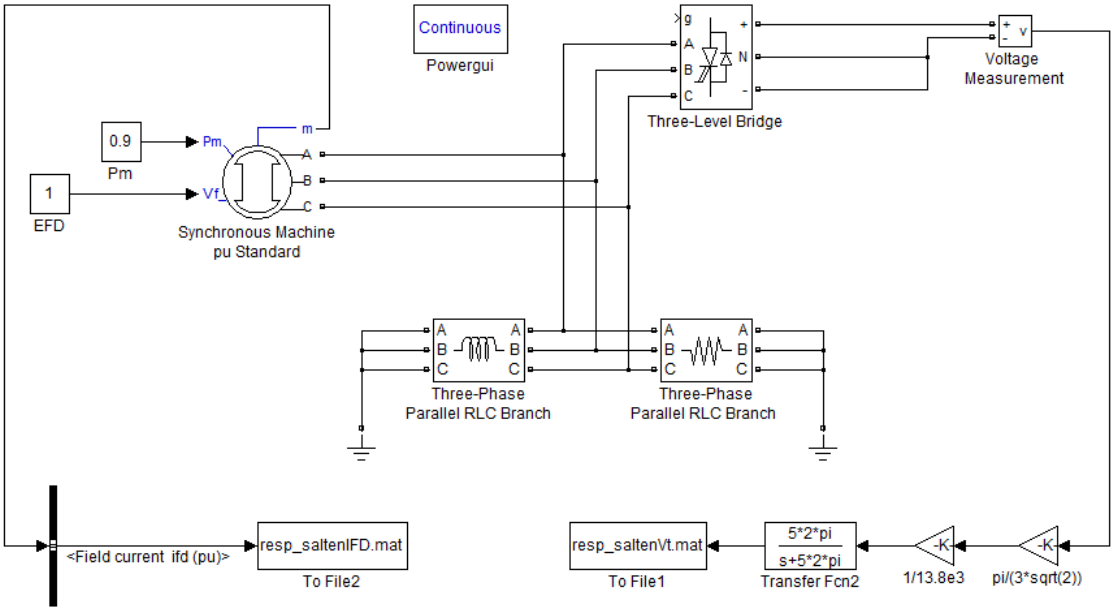


Figura 4.27: Modelo SG-UTE-SL con Entradas Constantes.

En la figura 4.28, se observa la corriente de campo y el ripple se mantiene, aún cuando las entradas a la máquina sincrónica son constantes. Por lo tanto, se deduce que la presencia del ripple se debe a un problema interno del modelo de la máquina sincrónica del Simulink, que se ve reflejado cuando se pone un consumo de reactiva en los terminales de la máquina. Como este modelo realimenta con la corriente de excitación, el ripple presente en la misma, se propaga en el sistema, y aparece en la tensión de excitación.

A continuación, se va a estudiar el comportamiento en frecuencia a 50 Hz, con el objetivo de estudiar la evolución del ripple cuando es sometido al sistema de control.

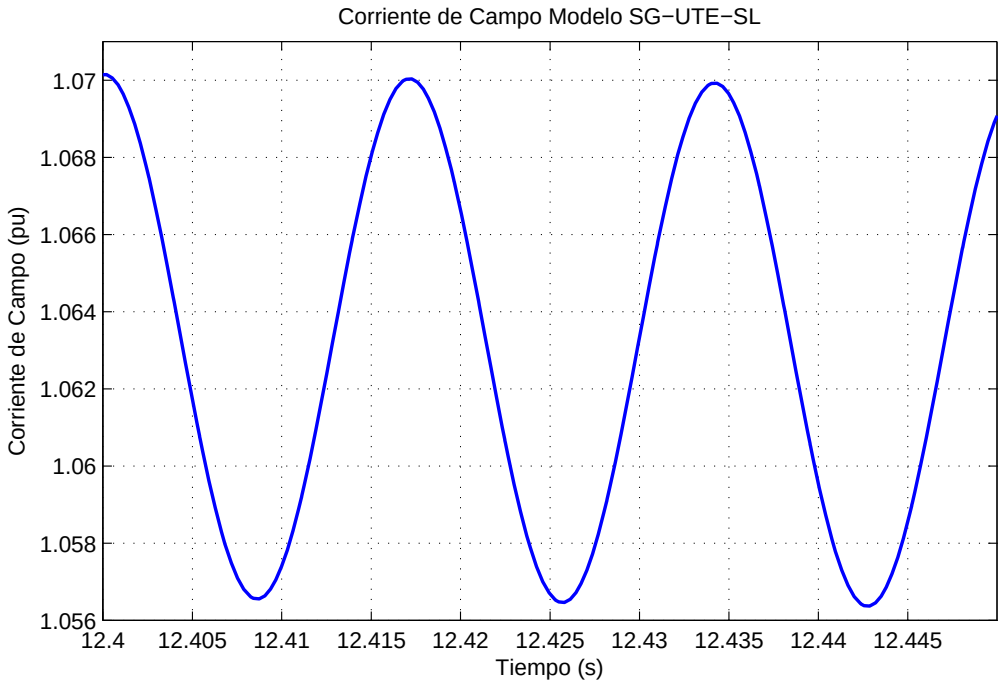


Figura 4.28: Modelo SG-UTE-SL con Entradas Constantes: Corriente de Campo.

Análisis de la transferencia de la corriente de excitación.

En la figura 4.1, se observa el diagrama de bloques del regulador de tensión de Salto Grande, obtenido de la documentación de UTE, donde están identificadas las funciones que cumple cada bloque. Se observa que los bloques que afectan a la corriente de excitación son: la realimentación y el excitador.

En la figura 4.29, se observa la transferencia a la que se somete la corriente para obtener a la salida la tensión de excitación.

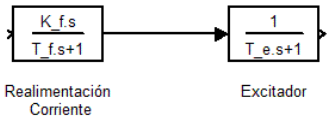


Figura 4.29: Transferencia.

Como fue mencionado anteriormente, los valores para los parámetros de la transferencia son: $Kf = 2,682$, $Tf = 0,08$ y $Te = 0,024$.

Con estos valores, el módulo de la transferencia de la corriente, para un valor de $s = j2\pi 50Hz$, es $|H(s)| = 4,4043$. Esto produce que el ripple que se formó en la máquina se vea amplificado al ser sometido al sistema de excitación.

Alternativas al modelo SG-UTE-SL.

El origen del ripple se da en la propia máquina sincrónica y es amplificado por el sistema de control. Se puede observar que las tensiones v_d y v_q tienen este ripple, y por lo tanto se buscó una alternativa para realimentar la tensión V_T.

Se propone el modelo de la figura 4.30 en el que la tensión terminal se obtiene rectificando la tensión de línea, tal como se hace en los sistemas reales. Al introducir el puente de diodos, se tuvo que agregar un filtro de ganancia unitaria y un bloque que compense la ganancia del puente de diodos que vale:

$$\frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi}$$

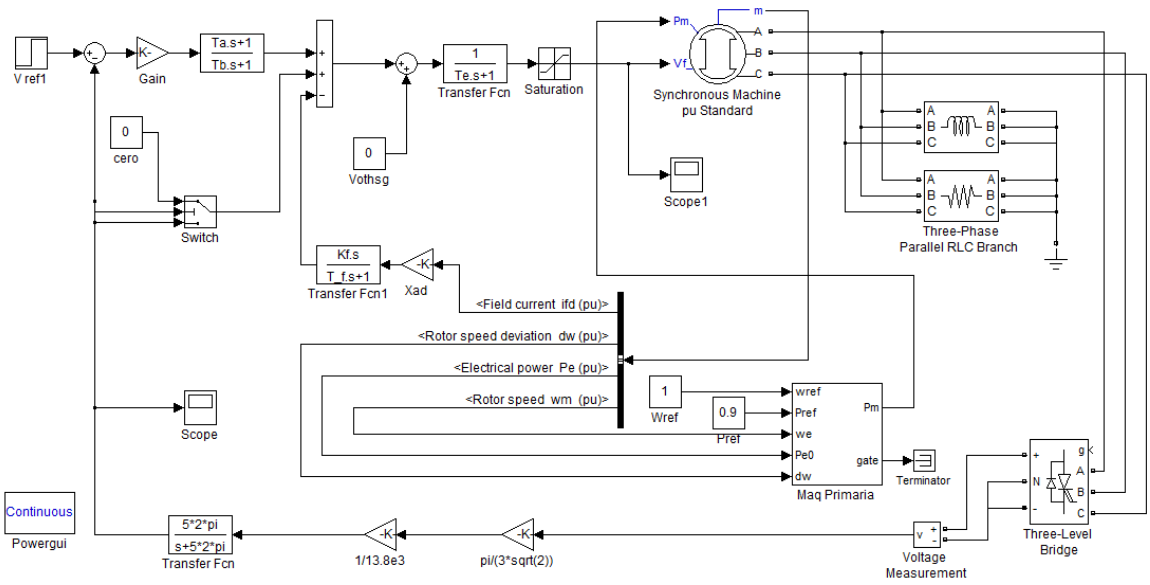


Figura 4.30: Modelo SG-UTE-SL con puente de Diodos.

Tensión de Excitación.

En la figura 4.31 se observa la tensión de excitación del sistema 4.30. En la misma se puede observar que el ripple no es atenuado. A su vez, en la figura 4.32 se ve que el ripple, en este caso, está formado por la superposición de dos frecuencias. Una de ellas es a 50Hz, mientras que la otra es la resultante de la salida del puente de diodos y se ve con mejor detalle en la gráfica de la figura 4.34. El tamaño del ripple no es modificado significativamente.

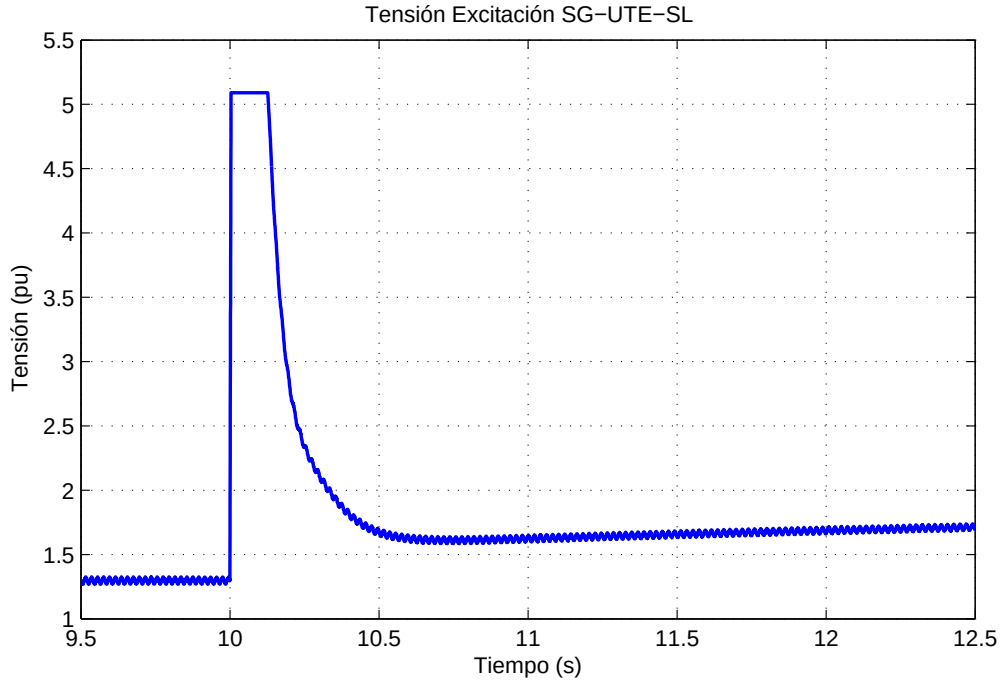


Figura 4.31: Modelo SG-UTE-SL con puente de Diodos: Tensión de Excitación.

Tensión Terminal.

En las figuras 4.33 y 4.34 se observa la tensión terminal para el modelo 4.30. En las mismas se puede

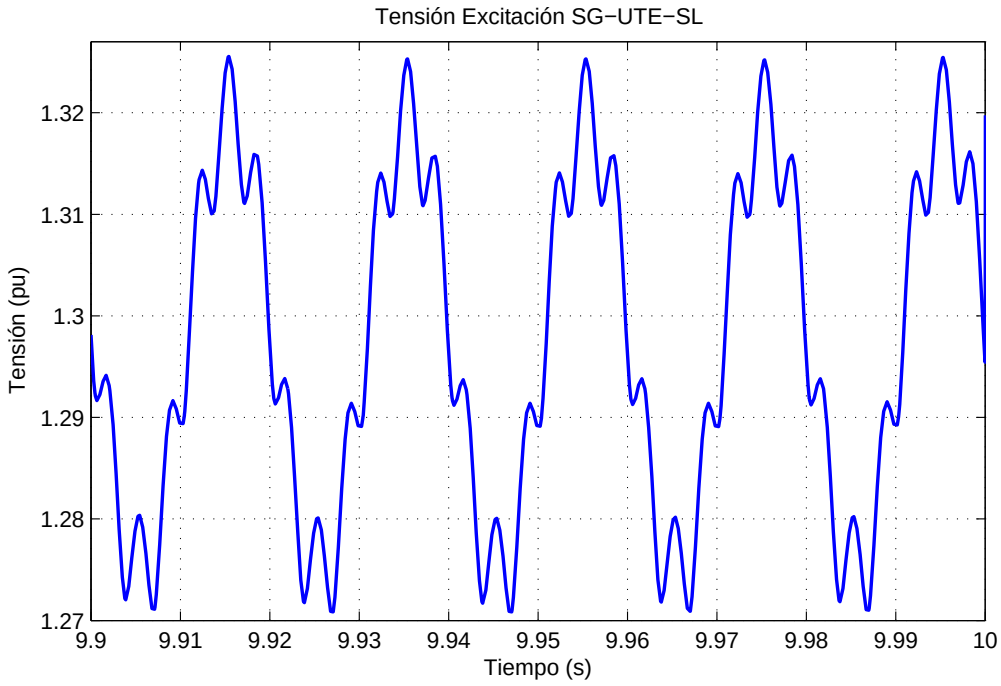


Figura 4.32: Modelo SG-UTE-SL con puente de Diodos: detalle Tensión de Excitación.

observar el ripple en la tensión terminal. En este caso el ripple tiene sentido, ya que es producido al rectificar con un puente de diodos. Luego se puso un filtro pasabajos a 5Hz, lo que equivale a 200 ms. El ripple que figura en la tensión de salida es aproximadamente de 0.104 seg. Por lo tanto es razonable que no se vea afectado por el filtro. No se consideró apropiado utilizar un filtro con menor frecuencia de corte, ya que al estar una década por debajo de los 50Hz, si se sigue bajando para tener un resultado diferente en cuanto al filtrado, se empieza a tener resultados inaceptables al trabajar en frecuencias tan bajas.

Comentarios.

Luego del estudio realizado, se sigue observando un ripple a 50Hz que no es producido ni alterado significativamente por la tensión terminal sino por el propio modelo en Simulink de la máquina sincrónica. La presencia del ripple se va a aceptar, ya que no se manejan herramientas como para minimizarlo o anularlo.

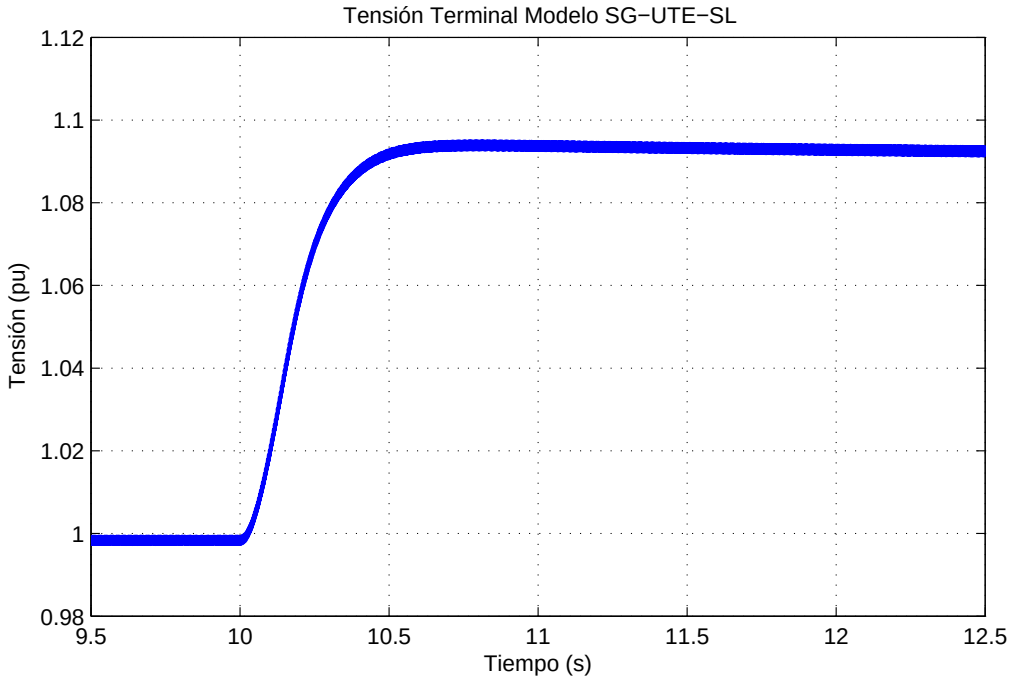


Figura 4.33: Modelo SG-UTE-SL con puente de Diodos: Tensión terminal.

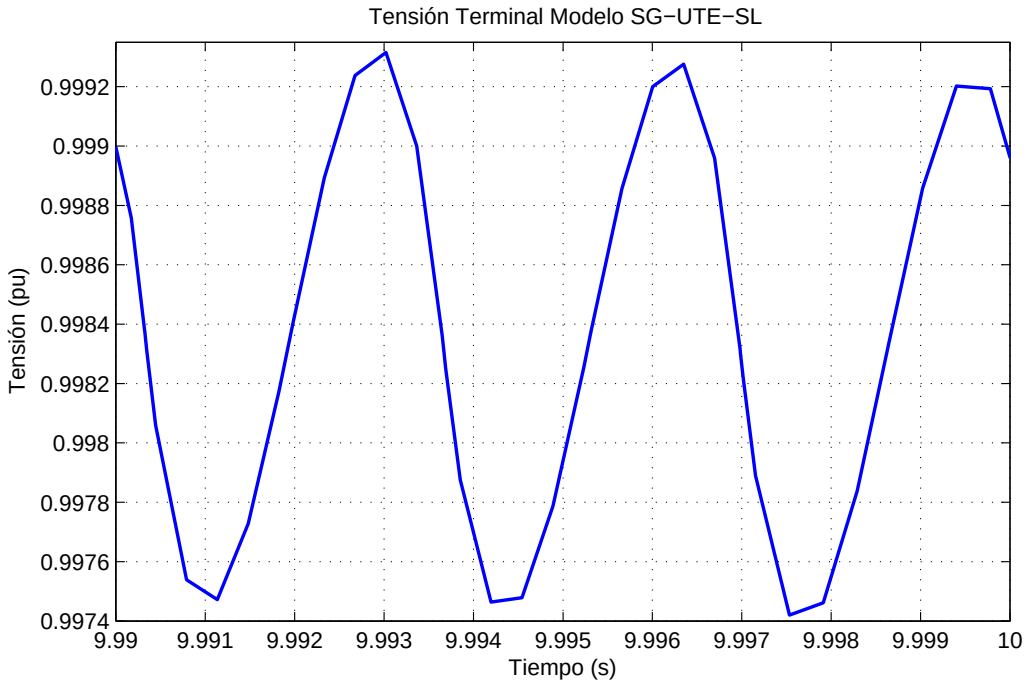


Figura 4.34: Modelo SG-UTE-SL con puente de Diodos: detalle Tensión terminal.

4.4. Simulaciones Adicionales.

Con el fin de probar la robustez del modelo SG-IEEE-SL, se hicieron simulaciones adicionales en las cuales se tomaron distintos valores de escalón en la tensión de referencia. El análisis de las mismas será solamente cualitativo.

A los efectos de simplificar la notación se definen los siguientes valores de tensión:

- Tensión de referencia inicial: $V_{ref_1} = 1{,}015$ pu
- Tensión de referencia final: $V_{ref_2} = 0{,}1$ pu $+ V_{ref_1} = 1{,}115$ pu

Los escalones simulados fueron los siguientes:

- $V_{sup} = 0{,}1$ pu $+ V_{ref_2} = 1{,}215$ pu
- $V_{inf} = V_{ref_2} - 0{,}2$ pu

1. Tensión de Excitación.

   En la figura 4.35 se observa la respuesta al escalón de la tensión de excitación cuando se aplica un primer escalón de V_{ref_1} a V_{ref_2} y un segundo escalón de V_{ref_2} a V_{sup}.

   En la figura 4.36 se observa la respuesta al escalón de la tensión de excitación cuando se aplica un primer escalón de V_{ref_1} a V_{ref_2} y un segundo escalón de V_{ref_2} a V_{inf}.

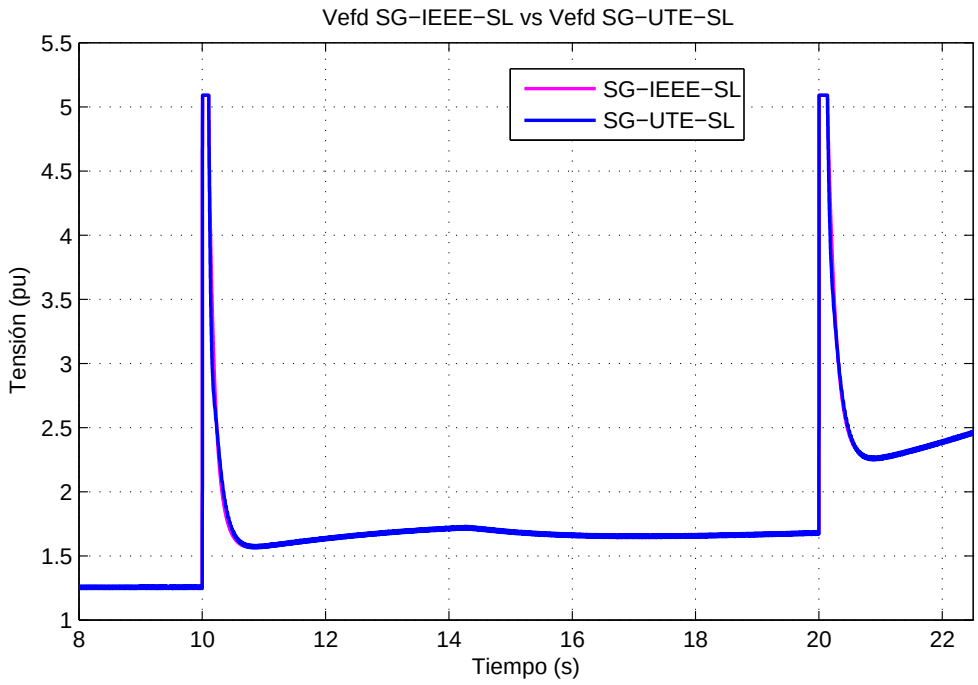


Figura 4.35: Respuesta a dos escalones: V_{ref_1} a V_{ref_2} y de V_{ref_2} a V_{sup}

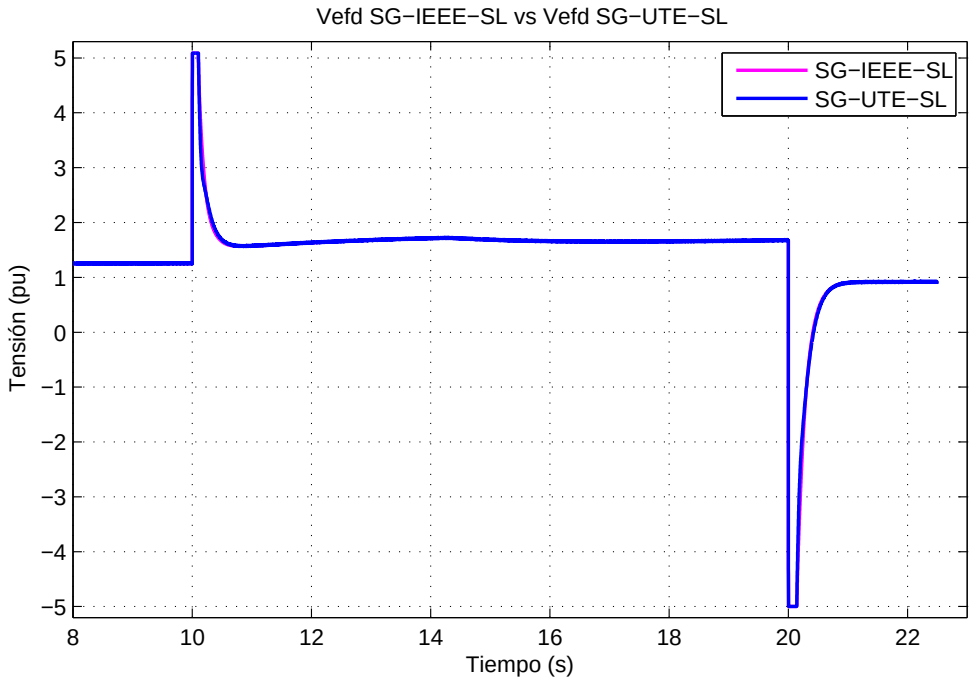


Figura 4.36: Respuesta a dos escalones: V_{ref} a $1{,}1 \cdot V_{ref}$ y de $1{,}1 \cdot V_{ref}$ a V_{inf}

2. Tensión Terminal.

   En la figura 4.37 se observa la respuesta al escalón de la tensión de terminal cuando se aplica un primer escalón de V_{ref_1} a V_{ref_2} y un segundo escalón de V_{ref_2} a V_{sup}.

   En la figura 4.38 se observa la respuesta al escalón de la tensión de excitación cuando se aplica un primer escalón de V_{ref_1} a V_{ref_2} y un segundo escalón de V_{ref_2} a V_{inf}.

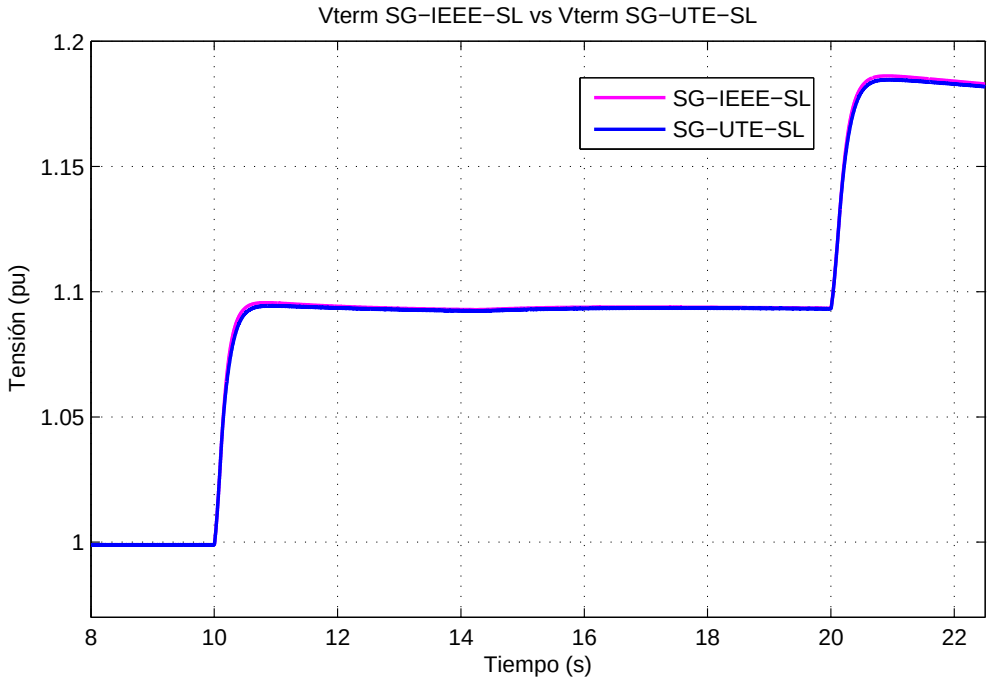


Figura 4.37: Respuesta a dos escalones: V_{ref_1} a V_{ref_2} y de V_{ref_2} a V_{sup}

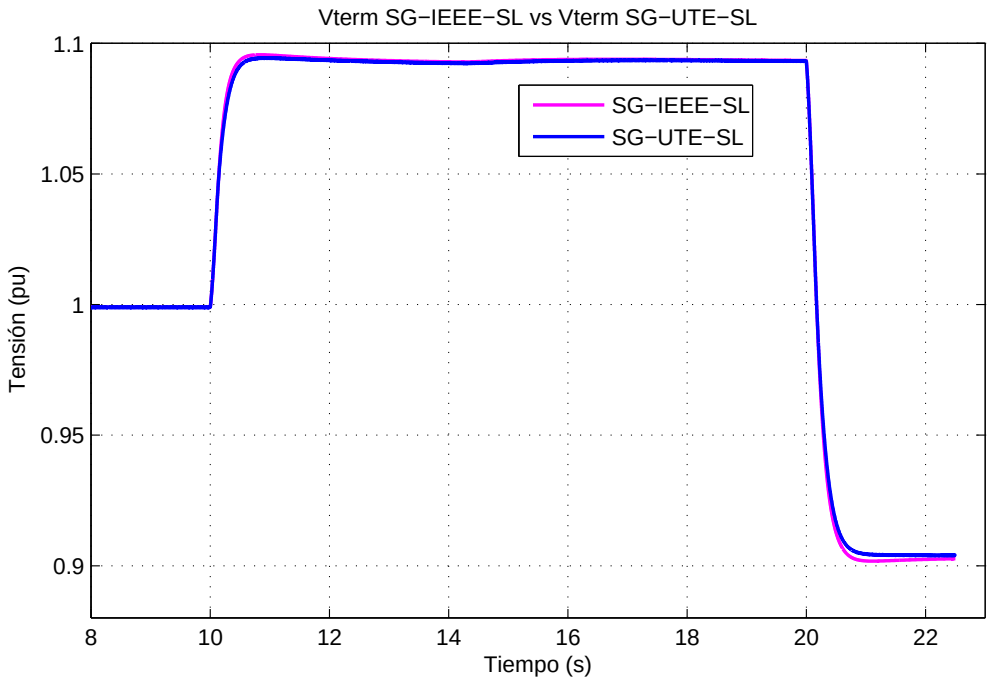


Figura 4.38: Respuesta a dos escalones: V_{ref_1} a V_{ref_2} y de V_{ref_2} a V_{inf}

Como se puede ver en todas las figuras de las simulaciones, las respuestas en todos los casos son muy similares, lo que muestra que el modelo obtenido no es solamente representativo para el escalón inicial y en el transitorio simulado en la sección 4.2.1.

4.5. Conclusiones del sistema de excitación de Salto Grande.

4.5.1. Conclusiones sobre el Modelo SG-IEEE-SL.

Por lo expresado en el capítulo 4.2, se observa que se logró obtener un modelo que cumple los estándares de la IEEE, y se aproxima de manera aceptable al modelo sugerido por UTE, para el sistema de excitación de Salto Grande.

De esta manera se obtiene un modelo que se puede insertar en cualquier programa de simulación de sistemas de potencia.

Parámetros del modelo.

En la tabla 4.2 se muestran los parámetros que se deben ajustar en el modelo ST1A de la IEEE, para obtener el modelo del sistema de excitación de la máquina de Salto Grande.

V_{IMax}	∞
V_{IMin}	$-\infty$
T_C	0.076
T_B	0.021
T_{C_1}	0
T_{B_1}	0
K_A	78
T_A	0.024
V_{AMax}	5,09
V_{AMin}	-5
K_{LR}	0
I_{LR}	0
V_{RMax}	∞
V_{RMin}	$-\infty$
K_F	0.0053
T_F	1.1979
K_C	0

Tabla 4.2: Parámetros del modelo ST1A para representar Salto Grande.

Validación del modelo SG-IEEE-SL.

A modo de resumen, a continuación se presentan los resultados cuantitativos para la validación del modelo SG-IEEE-SL.

Tensión de Excitación.

1. **Valores de régimen.**
   Los errores obtenidos en el modelo SG-IEEE-SL con respecto al modelo SG-UTE-SL fueron:
   - Error en el valor de régimen antes de aplicado el escalón: $e_{rel_i} = 0{,}38\,\%$
   - Error en el valor de régimen luego de aplicado el escalón: $e_{rel_f} = 0{,}12\,\%$

   Para ambos casos se considera que el error obtenido es aceptable.
2. **Tiempo de bajada.**
   El error en el tiempo de bajada para los dos modelos es de un 11.5 % de error relativo y de 0.03 *seg* de error absoluto. Por más de que el error relativo supere el 10 %, se considera aceptable ya que el error absoluto es de 28ms y hay que considerar el ripple que no se pudo anular en SG-UTE-SL.
3. **Tiempo de asentamiento.**
   El error en el tiempo de asentamiento es: $e_{rel_{asen}} = 13{,}7\,\%$ que también se considera aceptable. El error absoluto es de 45ms.

Tensión terminal.

1. **Valores de régimen.**
   Los errores obtenidos para los valores de régimen fueron:

   - Error en el valor de régimen antes de aplicado el escalón: $e_{rel_i} = 0{,}009\,\%$
   - Error en el valor de régimen luego de aplicado el escalón: $e_{rel_f} = 0{,}06\,\%$

   En ambos casos el error obtenido se considera aceptable.

2. **Tiempo de subida.**
   El error en el tiempo de subida es: $e_{rel_{sub}} = 10{,}9\,\%$ que se considera aceptable.

3. **Tiempo de asentamiento.**
   Para el tiempo de asentamiento, el error entre los modelos queda: $e_{rel_{as}} = 11{,}5\,\%$ que es considerado aceptable.

En los índices de tiempos, el error obtenido es mayor al 10 %, igualmente, se consideran aceptables ya que no se pudo eliminar el ripple en el modelo SG-UTE-SL y la diferencia en valor absoluto no es significativa. El principal problema, es que el modelo SG-IEEE-SL responde más rápido que el SG-UTE-SL, pero se podría pensar que esto se debe al ripple que aparece en estas respuestas.

Estudio del ripple.

Se determinó, en el capítulo 4.3, que para entradas constantes el ripple aparece a la salida del modelo de la máquina sincrónica. Se concluye que es generado por la misma y se amplifica por el sistema de excitación particular de Salto Grande.

Por lo tanto, a partir de ahora, se desestimará la ocurrencia del mismo para próximas simulaciones de los distintos modelos que se realicen en Simulink.

Capítulo 5

Baygorria

En el siguiente capítulo, se presenta el estudio realizado para el sistema de excitación de Baygorria. El objetivo principal del mismo es la obtención de un modelo en Simulink, que permita ensayar el modelo propuesto por UTE. Se busca que el nuevo modelo tenga el mismo comportamiento que el anterior a menos de un margen de tolerancia. Se parte de la documentación proporcionada por UTE, la cual consta de un modelo del sistema, que se toma como base y dos simulaciones que se utilizarán para la validación del nuevo modelo desarrollado.

Se definen los siguientes modelos a utilizar y/o desarrollar, ambos modelos cumplen con el estándar de la IEEE std 421.5 para el modelado de sistemas de excitación:

- **Modelo BY-UTE**: modelo propuesto por UTE e implementado en PSS/E.
- **Modelo BY-IEEE-SL**: corresponde al modelo de UTE implementado en Simulink.

5.1. Sistema de Excitación de Baygorria.

5.1.1. Análisis del diagrama de bloques del regulador de tensión.

En la figura 5.1 se observa el modelo propuesto por UTE para el sistema de excitación de Baygorria [10]. Al mismo le ingresa la tensión de referencia V_{ref} y la señal V_s proveniente del PSS, luego se le resta la señal de realimentación que proviene de un circuito de compensación y de detección de carga. De esta manera se genera una señal de error, que ingresa al amplificador con límites de non windup. Un segundo lazo de realimentación con compensación cero-polo, le proporciona más estabilidad al sistema. A la señal V_R, salida de la etapa anterior, se le resta la señal que proviene del bloque de saturación, y luego, ingresa al bloque que modela al excitador generador. Finalmente, se obtiene la tensión de campo E_{FD} que se aplica al campo del rotor del generador sincrónico.

En primer lugar, se hizo un estudio en donde se identificaron los bloques que forman el sistema, los mismos serán analizados a continuación.

Excitador.

El bloque que corresponde al excitador tiene la transferencia $H(s) = \dfrac{1}{Ke + sT_E}$, mientras que los otros bloques realizan funciones de limitación y control.

Bloques de Limitación y Control.

Bloque de realimentación.

Se utiliza una compensación serie para mejorar la respuesta dinámica del sistema. La realimentación del regulador de tensión, se realiza antes de pasar por la constante de tiempo de la excitatriz, mediante las transferencias $H(s) = \dfrac{sK_F}{1 + sT_F1}$ y $H(s) = \dfrac{1}{1 + sT_{F2}}$.

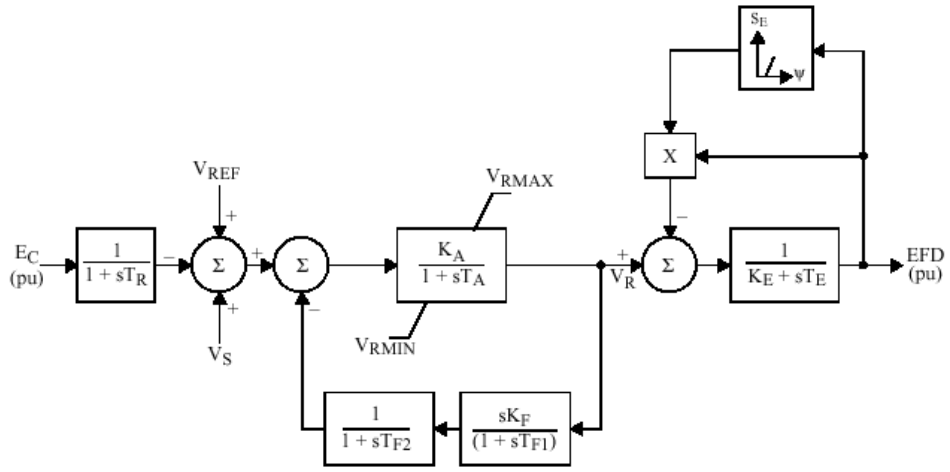


Figura 5.1: Regulador de Tensión de Baygorria [10]

Bloque de saturación.
Este bloque incluye en el modelo la saturación de la excitatriz y representa el incremento que debe de tener la tensión de campo para compensar los efectos de la saturación.

Circuito de compensación.
El bloque de compensación de carga, se utiliza cuando el sistema de excitación no controla el voltaje en los terminales del estator, sino un voltaje en un determinado punto de la red. El compensador simula la impedancia entre los terminales del generador y el punto de control de voltaje. La tensión y la corriente de línea, que se obtienen de los parámetros disponibles en el vector m, se combinan y son rectificadas para generar una corriente continua que alimenta al electroimán del regulador. La constante de tiempo del bloque de detección (T_R), modela la rectificación y el filtrado del voltaje en terminales del generador.

Amplificador con límites de non windup.
Los límites de non windup representan limitaciones físicas del amplificador, como pueden ser las de la fuente que lo alimenta o la saturación del mismo. Este tipo de amplificador, además de limitar la salida, limita la variable de estado involucrada.
En la figura se muestra una descripción de su funcionamiento e implementación.

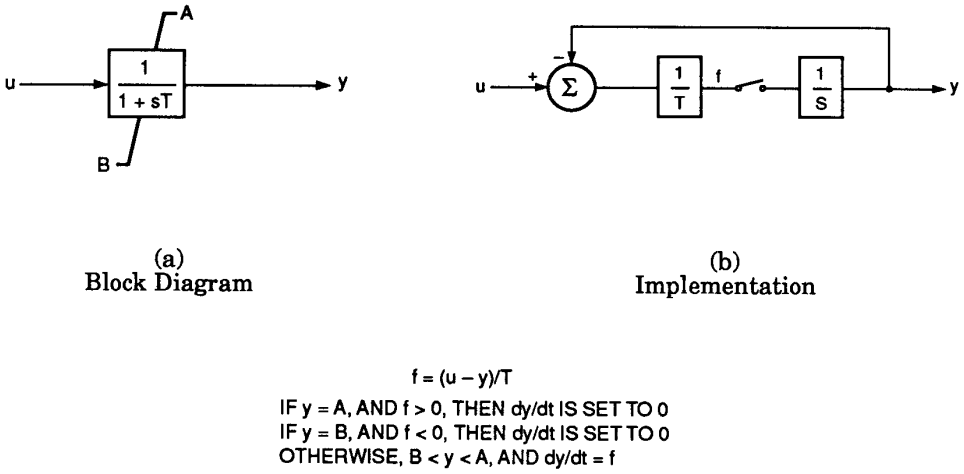


Figura 5.2: Amplificador con límites de non-windup [2, pág. 54]

5.1.2. Modelo BY-IEEE-SL.

El modelo propuesto por UTE, para el sistema de excitación de Baygorria, se corresponde con el modelo estándar de la IEEE, denominado T2 en la norma de 1968. El mismo es adaptable al modelo AC5A de la norma actual fijando en cero el parámetro T_{F3}. La señal V_C que ingresa al modelo AC5A es la salida de los bloques de compensación y de detección de carga, como se muestra en la figura 5.3. Se utiliza un bloque de compensación diferente al que aparece en la norma, el mismo está detallado en la documentación de UTE y se describirá más adelante.

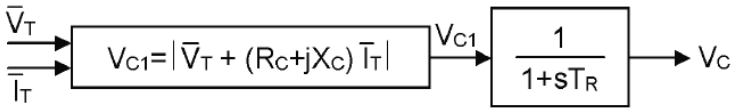


Figura 5.3: Bloques de Compensación y detección de carga según IEEE

En la figura 5.4 se muestra el sistema de excitación AC5A, este modelo se realizó en Simulink con los parámetros propuestos por UTE, y se lo validó con las simulaciones correspondientes. El mismo representa sistemas de excitación AC, pero también se utiliza cuando no se tienen suficientes datos o se requiere un modelo aproximado, como en este caso.

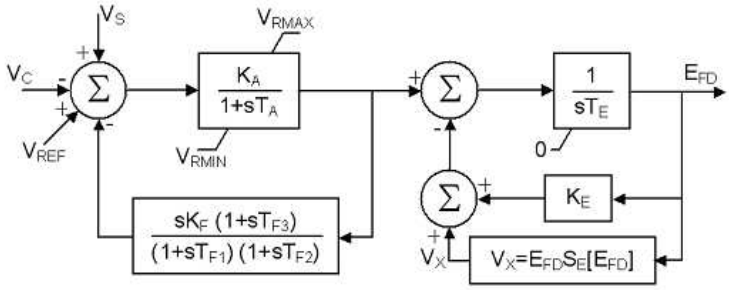


Figura 5.4: Modelo AC5A

A continuación, se describe bloque a bloque el modelo obtenido en Simulink.

Regulador de Tensión.
El excitador fue modelado utilizando un bloque que implementa una función de transferencia racional. El numerador y el denominador se ingresan como coeficientes en potencias de s.

$$H(s) = \frac{1}{K_e + sT_e} \tag{5.1}$$

Bloque de compensación y detección de carga.
Este bloque tiene como función, adaptar la corriente y la tensión de campo de modo de poder realimentarlas al sistema. La siguiente ecuación, obtenida de la documentación disponible [7], modela la relación existente entre la tension y corriente de campo con la tension E_C, salida del circuito de compensación.

$$E_C = -2{,}16263 \left(\frac{E_{FD}}{\sqrt{3}I_{FD}}\right)^2 + 13{,}3235 \left(\frac{Vfd}{\sqrt{3}I_{FD}}\right) + 106{,}22 \tag{5.2}$$

Esta ecuación fue implementada en Simulink y agrupada en un subsistema, de modo de mejorar la visualización del modelo completo, como se observa en la figura 5.5.

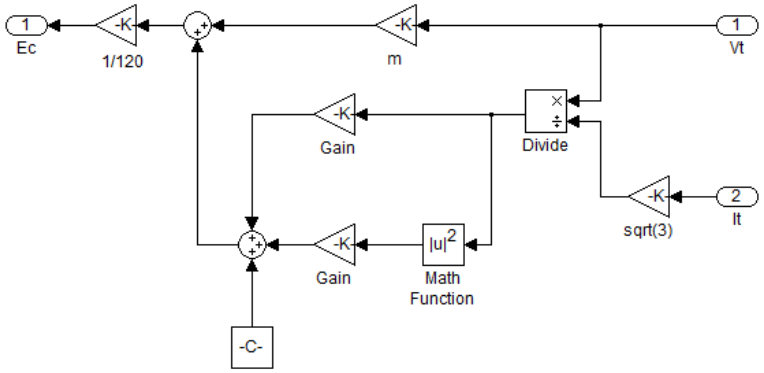


Figura 5.5: Bloque de Compensación

Bloque de saturación.

El bloque de saturación se implementó mediante una ecuación cuadrática. Dentro de los parámetros proporcionados por UTE [10], figuran dos parejas de datos para la tensión de campo E_{FD} y su correspondiente valor de saturación. En la ecuación 5.3, se modela la saturación.

$$\begin{cases} \text{Si } E_{FD} > A \Rightarrow S_e = \dfrac{B(E_{FD} - A)^2}{E_{FD}} \\ \text{Si } E_{FD} < A \Rightarrow S_e = 0 \end{cases} \tag{5.3}$$

Se partió de las parejas (E_{FD}, Se) de la documentación de UTE: (2.50, 0.80) y (3.33, 3.10), y si se resuelve la ecuación antes mencionada, se llega a los siguientes valores para los parámetros A y B:

- $A = 1{,}8474$
- $B = 4{,}6965$

Para una mejor visualización del modelo, se agruparon los bloques que implementan la saturación en un subsistema, que se observa en la figura 5.6.

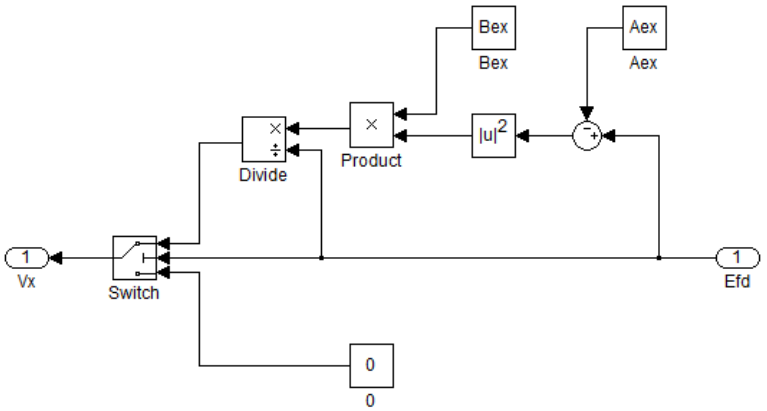


Figura 5.6: Bloque de Saturación

Lazo de realimentación.

El bloque de realimentación se modeló con un bloque que implementa una función de transferencia de la forma:

$$H(s) = \frac{sK_F}{(1 + sT_{F1})(1 + sT_{F2})} \tag{5.4}$$

Amplificador con límites de non windup.

El bloque de amplificación con límites de non windup se modeló mediante un circuito con comparadores lógicos y un *switch*. La norma IEEE indica la forma de implementar este límite, que se observa en la figura 5.2. El bloque fue encapsulado usando un subsistema. Si la salida del bloque está creciendo y su valor esta por encima del máximo V_{RMAX}, o si la señal de salida está decreciendo y su valor está por debajo del límite inferior V_{RMIN}, la señal toma el valor de los límites. De esta manera, se limita además de la salida la variable de estado involucrada. Este bloque se observa en la figura 5.7.

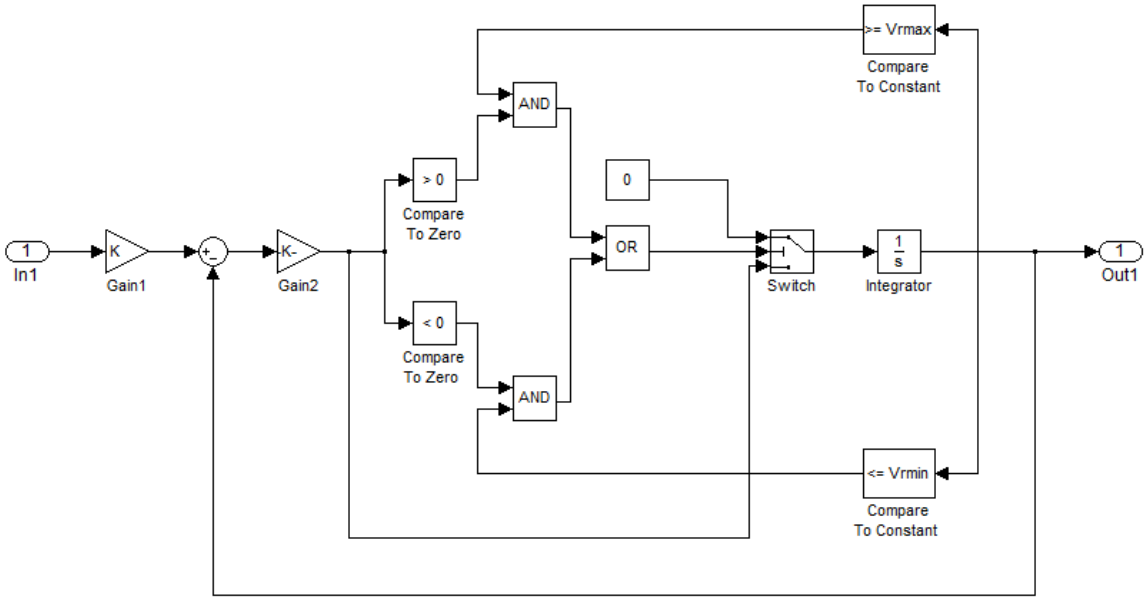


Figura 5.7: Implementación en Simulink del Amplificador con límites de non windup

Señales de Entrada.

La tensión E_{comp} es la salida del bloque de compensación descrito anteriormente. La tensión terminal de la máquina sincrónica, en *pu*, se obtuvo a partir de los valores de V_d y V_q, por la ecuación $V_t = \sqrt{V_d^2 + V_q^2}$.

En la señal V_{ref} se utilizó el bloque *step* de Simulink, con el que se genera un escalón en donde se fija el tiempo, el valor inicial y final del mismo.

Resto del Sistema.

- **Máquina Sincrónica.** Se utilizaron los siguientes parámetros, obtenidos de la documentación de UTE [10]:

T'_{do}	2.4600
T''_{do}	0.0600
T''_{q0}	0.0700
H	3.3300
X_d	0.9520
X_q	0.6180
X'_d	0.3260
$X''_d = X''_q$	0.2220
X_1	0.1950

Tabla 5.1: Datos del Generador de Baygorria.

- **Máquina Primaria.** Como fue mencionado, se usa el bloque *"Hydraulic Turbine and Governor (HTG)"*.
- **Carga Trifásica.** Se estimó la carga para tener los mismos valores de régimen que la simulación de UTE.

En la figura 5.8 se observa el modelo BY-IEEE-SL.

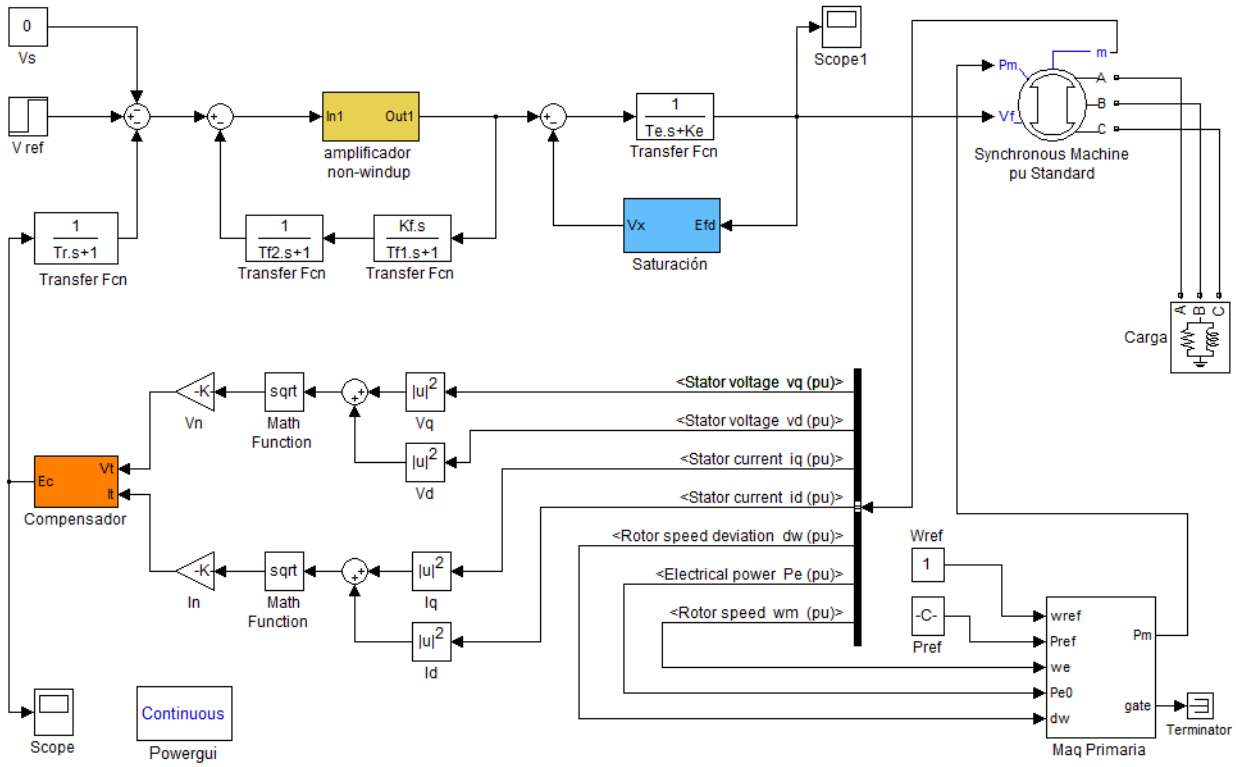


Figura 5.8: Modelo BY-IEEE-SL

5.2. Validación del modelo BAY-IEEE-SL.

En la presente sección, se realizará la validación del modelo del sistema de excitación de Baygorria implementado en Simulink. Para esto, se realizarán las mismas simulaciones que las documentadas por UTE [6], numeradas a continuación:

- Respuesta a un escalón en la tensión de referencia.
- Desconexión de carga inductiva a partir de la máquina trabajando en régimen estacionario.

A diferencia del estudio realizado con el modelo de Salto Grande, al no ser necesaria la realización de dos modelos distintos (el de UTE y el estándar de la IEEE), no se realizarán simulaciones extras a las existentes en la documentación.

5.2.1. Simulación: Escalón en la tensión de referencia.

La primera simulación que se menciona en la documentación, es la de un escalón en la tensión de referencia del 10 %. A continuación se analizará la documentación de la simulación realizada por UTE, y luego se analizará la misma para el modelo propuesto.

Simulación del Modelo BY-UTE.

Al igual que para el caso de Salto Grande, no se cuenta con los datos de carga del sistema, solamente se expresa que se realiza para el máximo hidráulico-térmico con conversora, para el año 2004.

En la figura 5.9 se observan las respuestas temporales de la simulación de la tensión de excitación E_{FD} y la tensión en terminales de la máquina E_{TERM}. El escalón se aplica a los 0 *seg* y la duración de la simulación es de 5 *seg*, momento en el que se estabiliza y vuelve al régimen.

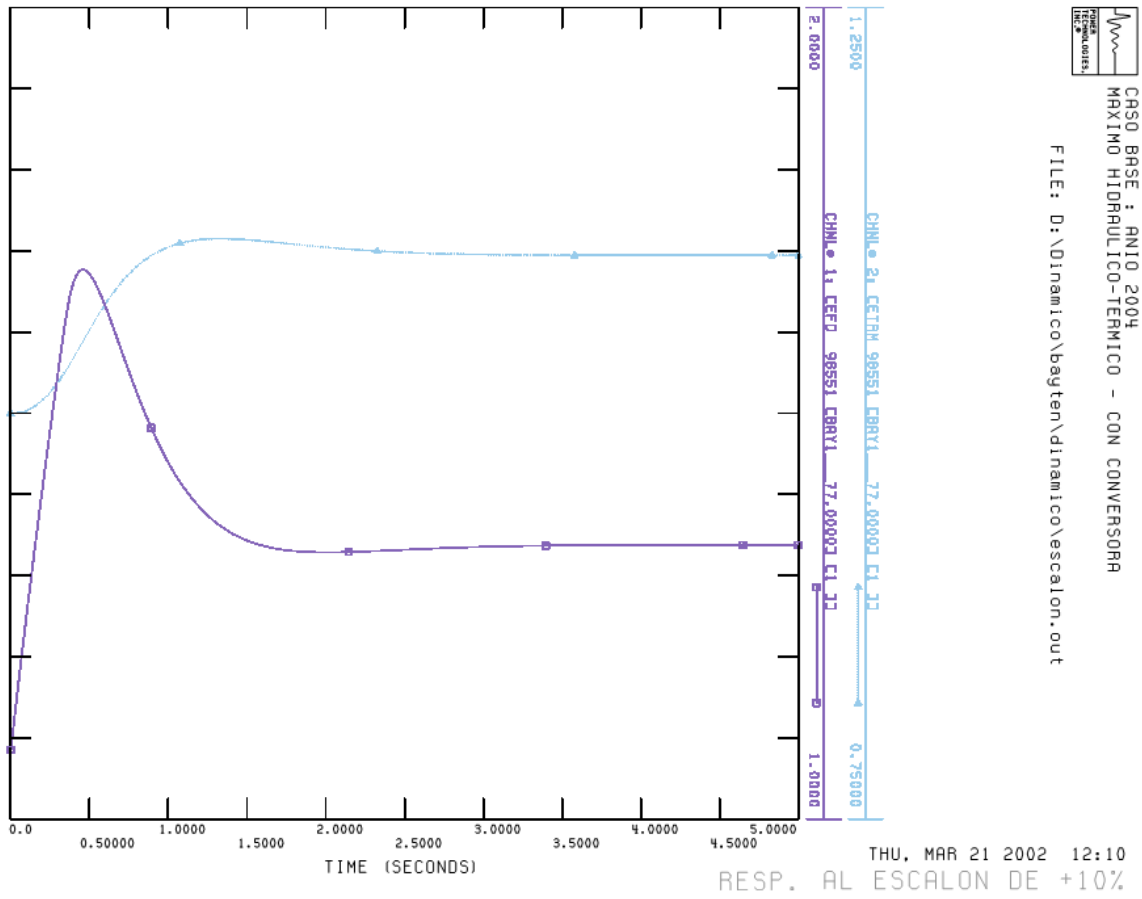


Figura 5.9: Modelo BY-UTE: Simulación del escalón en $Vref$ [6]

Para poder comparar con los resultados de la simulación en Simulink, se calculan los mismos índices que fueron utilizados en Salto Grande.

Tensión de Excitación.

La gráfica de la respuesta de la tensión de excitación, se puede ver en la figura 5.9.

La escala de tensiones para esta señal, en por unidad, va de 1,00 hasta 2,00, por lo que cada intervalo varía 0,1 y si se divide en diez segmentos, se podría definir una apreciación de 0,01 *pu*.

La escala de tiempos va de 0,00 *seg* hasta 5,00 *seg*, con intervalos de 0,50, por lo que la apreciación queda de 0,05 *seg*.

Se hallan, gráficamente, los siguientes valores:

- Tensión de excitación previa al escalón: 1,08 *pu*.
- Tensión de excitación de pico: 1,68 *pu*.
- Tensión de excitación en régimen final: 1,34 *pu*
- Tiempo de subida: 0,30 *seg*.
- Tiempo de bajada: 0,65 *seg*.
- Tiempo de asentamiento: 0,75 *seg*. Medido desde el tiempo en que se produce el máximo.

De manera de facilitar las medidas en el gráfico de la documentación de UTE se hacen algunos cambios para el cálculo de las constantes de tiempos, por lo que se hacen las siguientes aclaraciones:

- Tiempo de subida: se calcula entre la tensión de arranque y el pico. Siendo ΔE_{FD} la diferencia entre el valor inicial y el de pico, el tiempo de subida se define como el tiempo en el que la señal pasa de estar en un 10 % de ΔE_{FD} por encima del valor inicial y un 10 % de ΔE_{FD} por debajo del valor de pico. En este caso $\Delta E_{FD} = 0{,}60$ *pu*, por lo que los valores de tensión de los puntos entre los que se calcula el tiempo de subida son: 1,14 *pu* y 1,62 *pu*.
- Tiempo de bajada: se calcula entre la tensión de pico y la tensión final. Siendo ΔE_{FD} la diferencia entre el valor de pico y el final, el tiempo de bajada se toma como el tiempo en el que la señal pasa de estar en un 10 % de ΔE_{FD} por debajo del valor de pico y un 10 % de ΔE_{FD} por encima del valor final. En este caso $\Delta E_{FD} = 0{,}34$ *pu*, por lo que los valores de tensión de los puntos entre los que se calcula el tiempo de subida son: 1,65 *pu* y 1,37 *pu*.
- Tiempo de asentamiento: se calcula desde el pico a la tensión final. Es el tiempo en que la señal permanece en un entorno del $\pm$ 5 % de la diferencia entre el valor final y el de pico, a partir del tiempo en el cual llega al pico. En este caso $\Delta E_{FD} = 0{,}34$ *pu*, por lo que los márgenes para el valor final son entre 1,36 *pu* y 1,32 *pu*.

Tensión Terminal.

En la gráfica 5.9 se observa la respuesta de la tensión terminal a la simulación realizada.

La escala de tensiones, en por unidad, va de 0,75 hasta 1,25, por lo que cada intervalo varía 0,05 y dividiendo el intervalo en diez segmentos, se obtiene una apreciación de 0,005 *pu*.

La escala de tiempos es la misma que en el caso anterior, por lo tanto la apreciación es de 0,05 *pu*.

Del gráfico se obtienen los siguientes valores:

- Tensión en terminales previa al escalón: 1,000 *pu*.
- Tensión en terminales en régimen final: 1,095 *pu*.
- Tiempo de subida: 0,60 *seg*.
- Tiempo de asentamiento: 1,40 *seg*. Medido desde el tiempo de aplicado el escalón.

A continuación se detalla los cálculos de las constantes de tiempo:

- Tiempo de subida: se calcula entre la tensión de arranque y el pico. Siendo ΔE_{TERM} la diferencia entre el valor inicial y el de pico, el tiempo de subida se define como el tiempo en el que la señal pasa de estar en un 10 % de ΔE_{TERMD} por encima del valor inicial y un 10 % de ΔE_{TERM} por debajo del valor de pico. En este caso $\Delta E_{TERM} = 0{,}105\ pu$, por lo que los valores de tensión de los puntos entre los que se calcula el tiempo de subida son: 1,010 *pu* y 1,085 *pu*.
- Tiempo de asentamiento: se calcula desde el inicio a la tensión final. En este caso $\Delta E_{TERM} = 0{,}095$ *pu*, por lo que los márgenes para el valor final son entre 1,100 *pu* y 1,090 *pu*.

Simulación del Modelo BY-IEEE-SL

En esta sección se analizará la simulación realizada en Simulink al modelo BY-IEEE-SL. Se trata de repetir la simulación documentada por UTE, en las condiciones descritas anteriormente.

Como ya se mencionó, no se contaba con el valor de la carga de la máquina durante la simulación. Para obtener una respuesta similar a la documentada por UTE, se fueron variando paulatinamente la carga de la máquina y el valor inicial al escalón (siempre se tomó un escalón de 0,1 pu), hasta obtener valores en régimen similares a los de la documentación.

En la figura 5.8 se observa el diagrama de bloques implementado para realizar la simulación. En particular los valores finales elegidos para la carga de la máquina son:

$$\begin{cases} P = 15\text{MW} \\ Q = 2{,}0\text{MVAr} \end{cases}$$

En el gráfico 5.10 se observa la tensión de campo y en terminales de la máquina, frente al escalón simulado. A continuación se realizará el estudio para la tensión de excitación y para la terminal, tal como se hizo en 5.2.1 para la simulación de UTE.

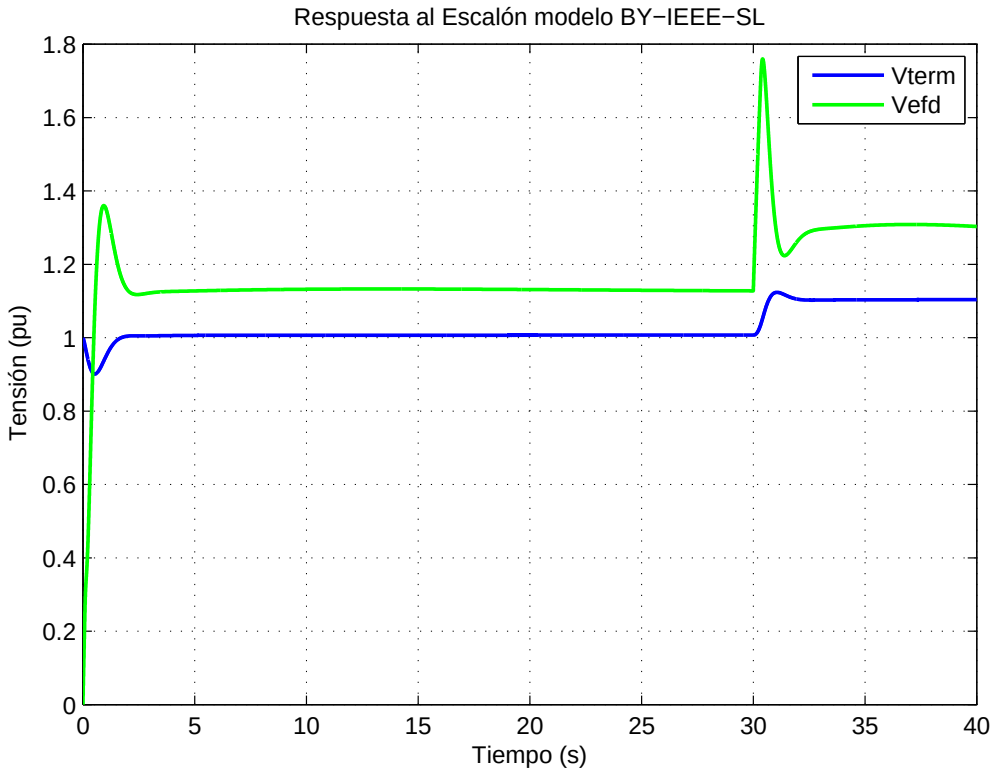


Figura 5.10: Respuestas temporales de la simulación del escalón en Vref, en Simulink

Tensión de Excitación.

La figura 5.11 muestra la respuesta temporal de la tensión de excitación para la simulación del escalón en la tensión de referencia. Para comparar la misma con la documentada por UTE, se implementaron los cálculos en MatLab obteniéndose los siguientes valores:

- Tensión de excitación previa al escalón: 1,1277 pu.
- Sobretiro de la tensión de excitación: 1,7601 pu.
- Tensión de excitación en régimen final: 1,3036 pu.
- Tiempo de subida: 0,2969 seg.

- Tiempo de bajada: 0,4017 *seg*.
- Tiempo de asentamiento: 1,8521 *seg*. Medido desde el tiempo en que se produce el máximo.

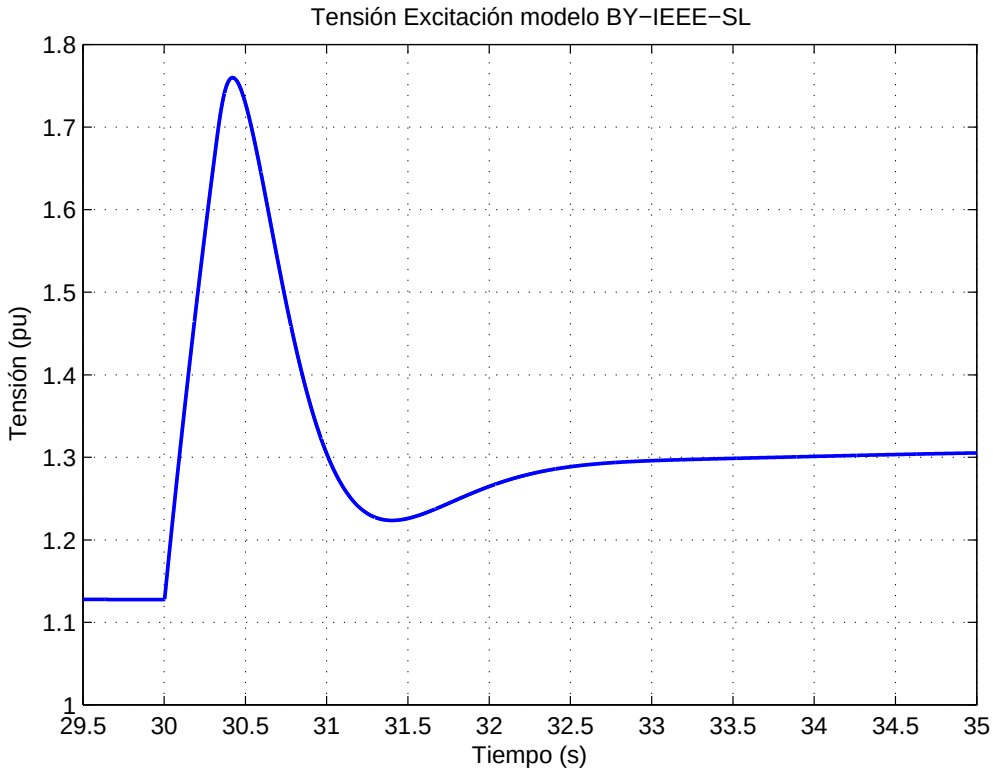


Figura 5.11: Respuesta de la tensión de excitación para el escalón en Vref

En las figuras 5.12, 5.13 y 5.14 se observa con más detalle los tiempos de subida, bajada y de asentamiento respectivamente.

Los tiempos se calcularon de la misma forma que para los de la documentación de UTE.

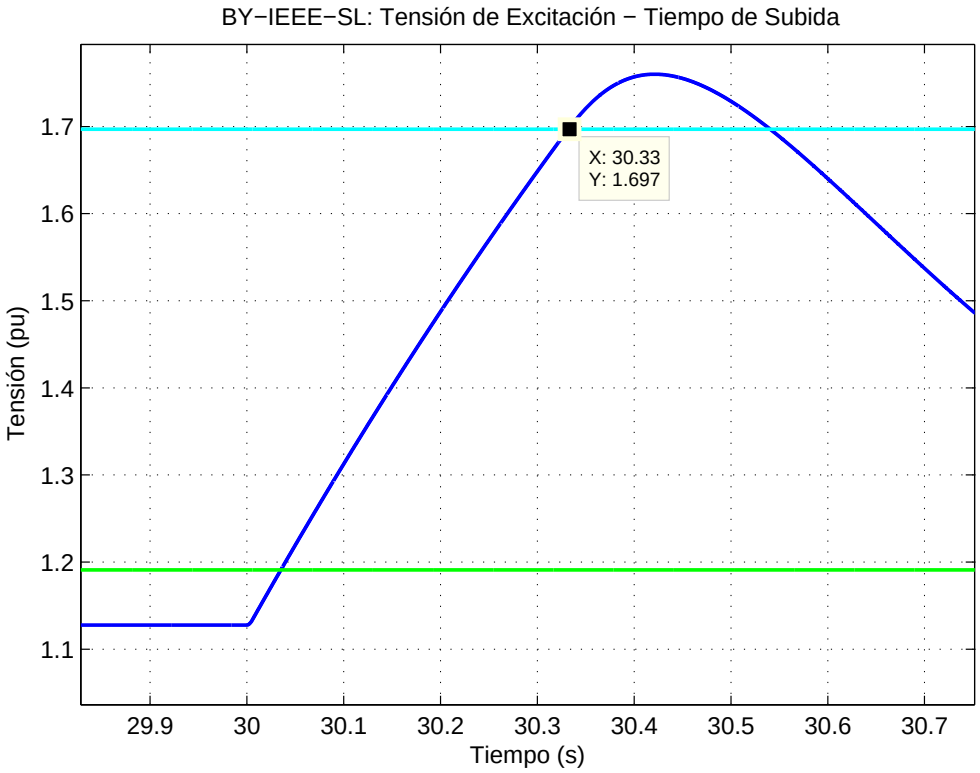


Figura 5.12: Respuesta de la tensión de excitación, cálculo del tiempo de subida

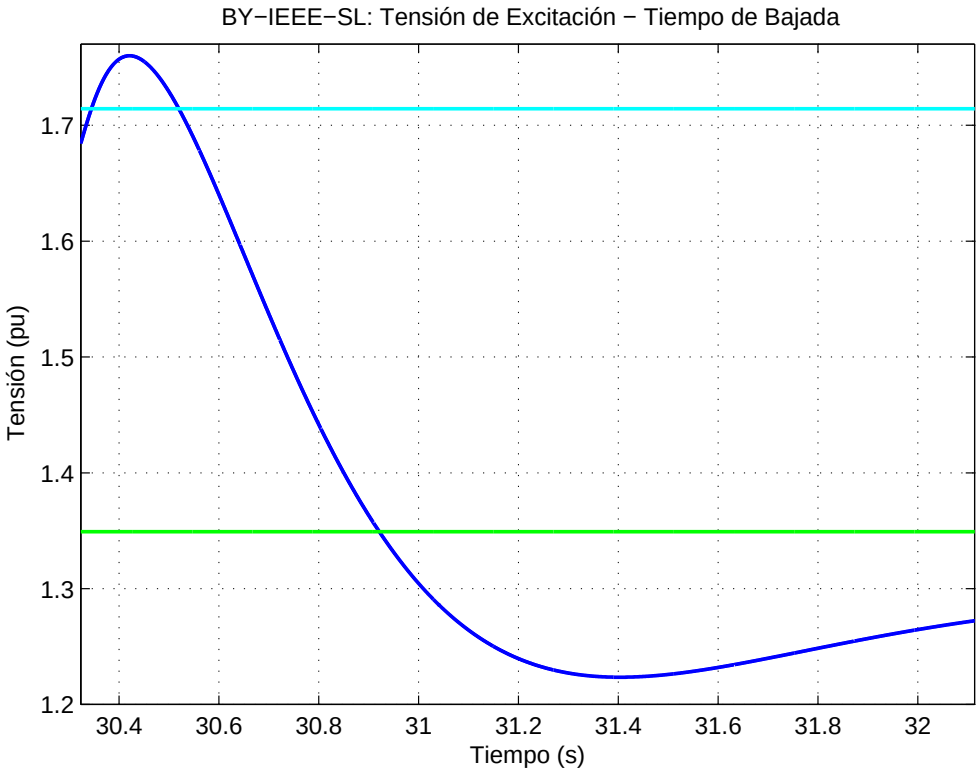


Figura 5.13: Respuesta de la tensión de excitación, cálculo del tiempo de bajada

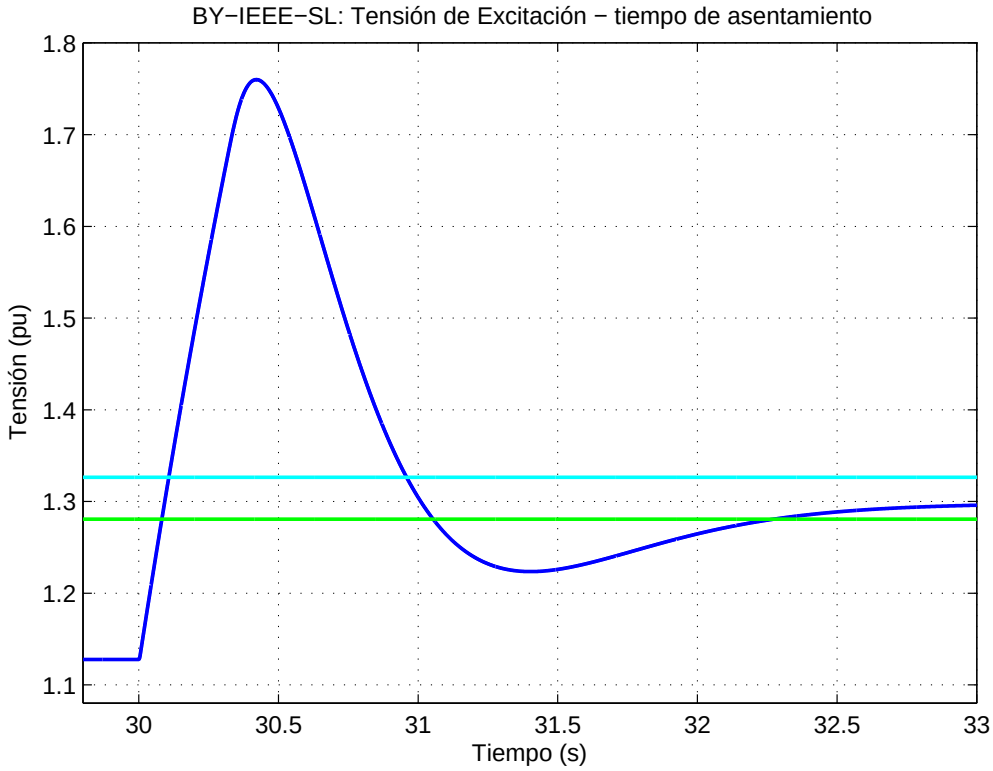


Figura 5.14: Respuesta de la tensión de excitación, cálculo del tiempo de asentamiento desde el máximo

Tensión Terminal.

La figura 5.15 muestra la respuesta temporal de la tensión en terminales de la máquina para la simulación del escalón en la tensión de referencia. Para comparar la misma con la documentada por UTE, se implementaron los cálculos en MatLab obteniéndose los siguientes valores:

- Tensión en terminales previa al escalón: 1,0070 *pu*.
- Sobretiro de la tensión terminal: 1,1237 *pu*.
- Tensión en terminales de régimen final: 1,1040 *pu*.
- Tiempo de subida: 0,5533 *seg*.
- Tiempo de bajada: 0,6857 *seg*.
- Tiempo de asentamiento: 2,3815 *seg*. Medido desde el tiempo de aplicado el escalón.

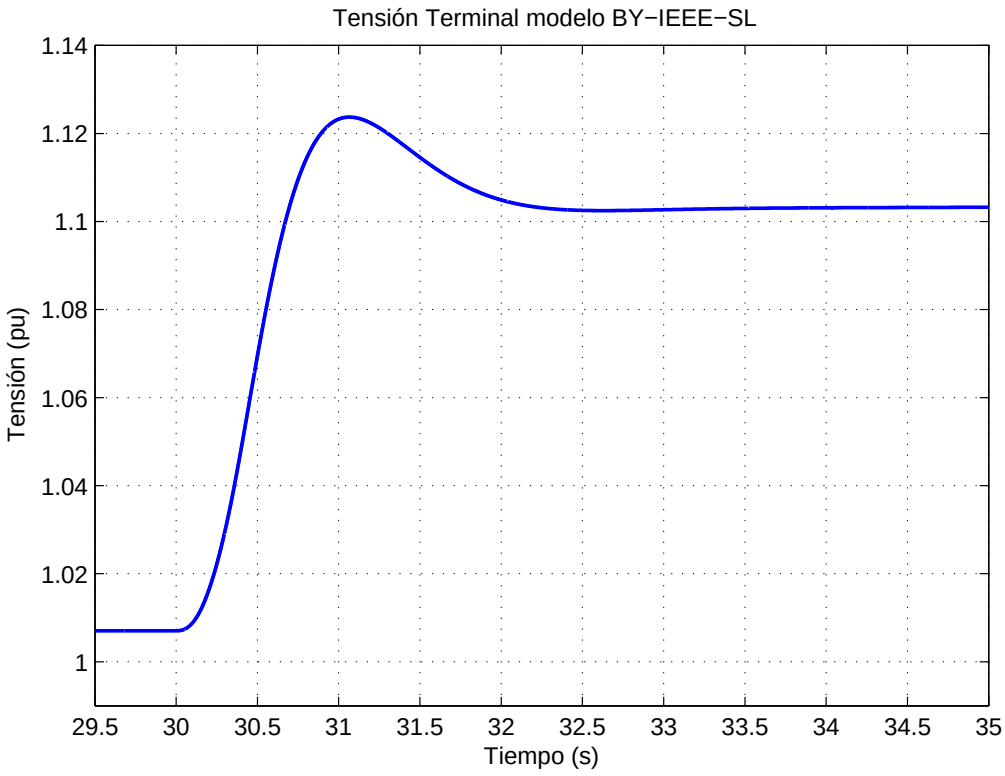


Figura 5.15: Respuesta de la tensión en terminales para el escalón en Vref

En las figuras 5.16, 5.17 y 5.18 se observa con más detalle los tiempos de subida, bajada y de asentamiento respectivamente.

Los tiempos se calcularon de igual manera que los de la documentación de UTE mostrados en 5.2.1.

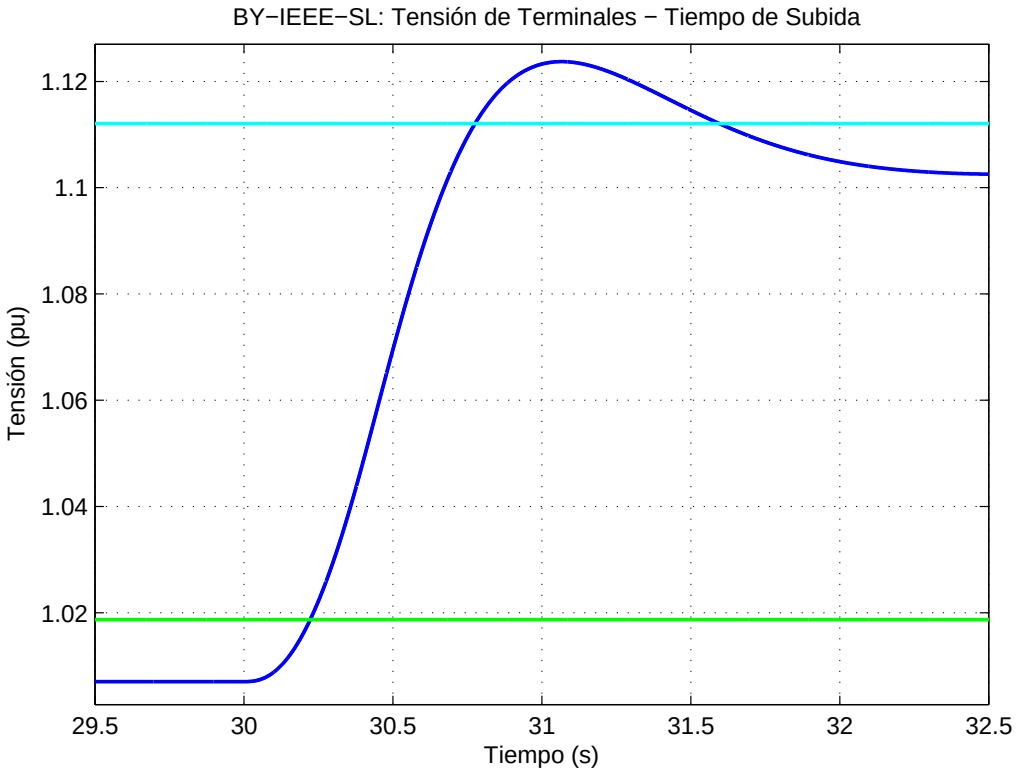


Figura 5.16: Respuesta de la tensión en terminales, cálculo del tiempo de subida

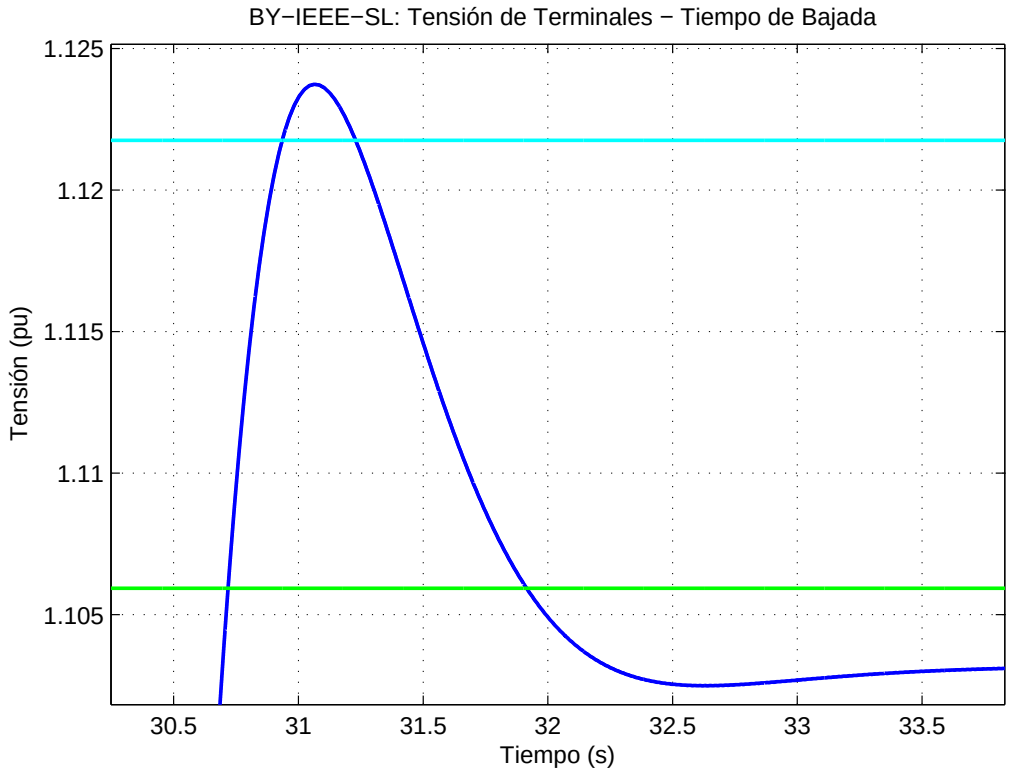


Figura 5.17: Respuesta de la tensión en terminales, cálculo del tiempo de bajada

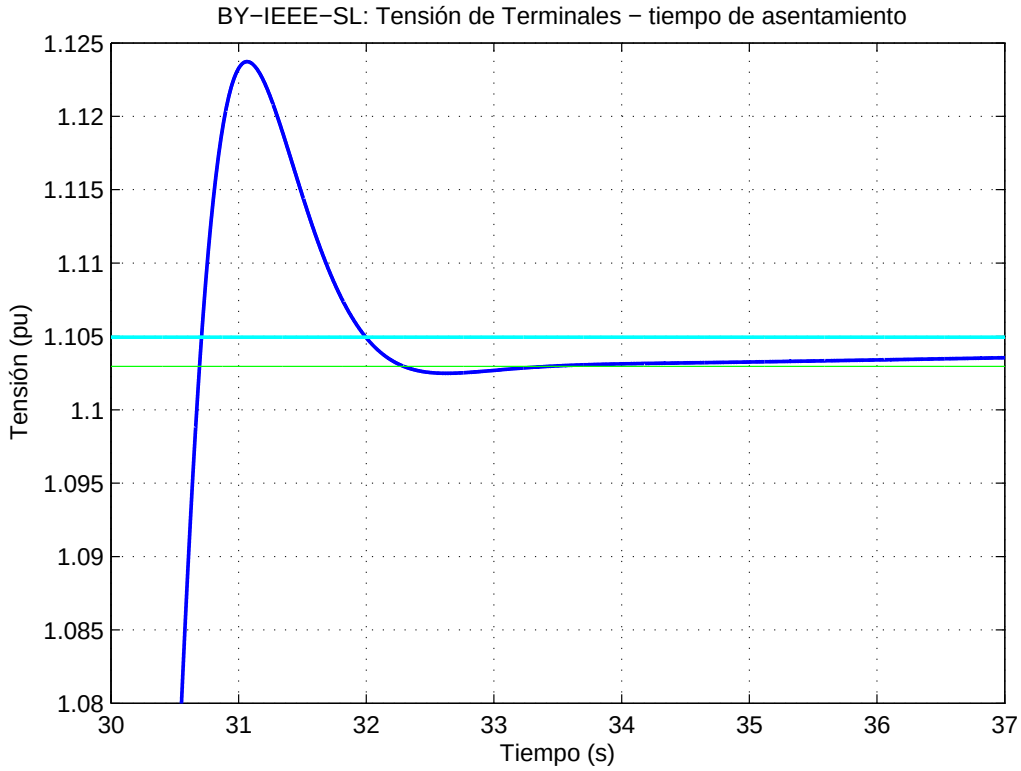


Figura 5.18: Respuesta de la tensión en terminales, cálculo del tiempo de asentamiento desde el máximo

Comparación Modelo BY-UTE vs Modelo BY-IEEE-SL.

Luego del estudio por separado de las simulaciones en PSS/E y Simulink respectivamente, se compararán los resultados para ambas simulaciones:

Comparación cualitativa entre modelos.
La mayor diferencia cualitativa que se observa en las respuestas de los dos modelos, es que en BY-IEEE-SL tanto la tensión de excitación como la terminal presentan un sobretiro mayor al observado en BY-UTE.

Comparación cuantitativa entre modelos.
Los valores para los modelos BY-UTE y BY-IEEE-SL son los obtenidos en 5.2.1 y 5.2.1 respectivamente.

Tensión de Excitación.

1. **Valores de régimen.**
   Del estudio anterior se deduce que para el modelo BY-IEEE-SL el valor de régimen antes de aplicar el escalón es $E_{FD_{inicial}} = 1{,}1277\ pu$ y luego de aplicado el escalón es $E_{FD_{final}} = 1{,}3036\ pu$. Los valores de régimen, para el modelo BY-UTE, son 1,08 *pu* y 1,34 *pu* antes y luego de aplicado el escalón respectivamente. Además, el máximo se alcanza en 1,7601 *pu*, mientras que en el de UTE se da en 1,68 *pu*.

   Con estos resultados, se puede calcular el error relativo en cada uno de los casos.

$$e_{rel_i} = \frac{1{,}08 - 1{,}13}{1{,}08} \cdot 100 = 4{,}4\,\% \tag{5.5}$$

$$e_{rel_f} = \frac{1{,}34 - 1{,}30}{1{,}34} \cdot 100 = 3{,}0\,\% \tag{5.6}$$

2. **Tiempo de subida.**
   Los valores de este parámetro para BY-UTE y BY-IEEE-SL coinciden en 0,30 *pu*, el valor de BY-IEEE-SL expresado con todas sus cifras es de 0,2969 *seg*.

3. **Tiempo de bajada.**
   Los valores de este parámetro para BY-UTE y BY-IEEE-SL son, respectivamente, 0,65 *seg* y 0,4017 *seg*.

   Se calcula el error relativo:

$$e_{rel_{bajada}} = \frac{0{,}40 - 0{,}65}{0{,}65} \cdot 100 = 38\,\% \tag{5.7}$$

4. **Tiempo de asentamiento.**

   Los valores de este parámetro para BY-UTE y BY-IEEE-SL son, respectivamente, 0,75 *seg* y 1,8521 *seg*. Con lo cual, se observa que el tiempo de asentamiento para el modelo BY-IEEE-SL es prácticamente el doble que el calculado para BY-UTE.

Tensión Terminal.

1. **Valores de régimen.**
   Del estudio anterior se obtiene que para el modelo BY-IEEE-SL el valor de régimen antes de aplicar el escalón es $V_{T_{ini}} = 1{,}0070\ pu$, y luego de aplicado el escalón es $V_{T_{final}} = 1{,}1040\ pu$. Mientras que el valor del modelo BY-UTE da 1,000 *pu* para el valor de régimen inicial, y 1,095 *pu* para el valor de régimen final. Además, el máximo se da en 1,1237 *pu*, mientras que BY-UTE prácticamente no presenta sobretiro.

   Por lo tanto, los errores relativos quedan:

$$e_{rel_i} = \frac{|1{,}000 - 1{,}007|}{1{,}000} \cdot 100 = 0{,}7\,\% \tag{5.8}$$

$$e_{rel_f} = \frac{|1{,}095 - 1{,}104|}{1{,}095} \cdot 100 = 0{,}8\,\% \tag{5.9}$$

2. **Tiempo de subida.**
   Los valores de este parámetro para BY-UTE y BY-IEEE-SL son, respectivamente, 0,60 *seg* y 0,5533 *seg*.

$$e_{rel_{subida}} = \frac{0{,}60 - 0{,}55}{0{,}60} \cdot 100 = 9{,}0\,\% \tag{5.10}$$

3. **Tiempo de bajada.**
   El tiempo de bajada para el modelo BY-IEEE-SL es de 0,6857 *seg*, mientras que para el BY-UTE es prácticamente despreciable.

4. **Tiempo de asentamiento.**

   Los valores de este parámetro para BY-UTE y BY-IEEE-SL son, respectivamente, 1,40 *seg* y 2,3815 *seg*. El error en el tiempo de asentamiento es:

$$e_{rel_{asen}} = \frac{1{,}40 - 2{,}38}{1{,}40} \cdot 100 = 70\,\% \tag{5.11}$$

5.2.2. Simulación: Desconexión de carga reactiva.

Luego del estudio de la respuesta al escalón 5.2.1, la segunda simulación a estudiar es la que respecta a la desconexión de carga reactiva de la máquina. Nuevamente se realizará el análisis de lo documentado por UTE, y luego se realizará la misma simulación en Simulink para el modelo propuesto.

Simulación Modelo BY-UTE.

Al igual que para el caso anterior, el único dato expresado es que se realiza para el máximo hidráulico-térmico, con conversora, para el año 2004, por lo que no se tienen los datos específicos de la carga. Se describe que la simulación consiste en la desconexión de carga reactiva de 16 $MVAr$ inductivos, pero no se hace mención de la carga conectada antes y después de la desconexión.

En la figura 5.19 se observa la tensión de excitación E_{FD} y la tensión en terminales de la máquina E_{TERM}. El escalón se aplica al segundo de comenzada la simulación y en 5 *seg* se estabiliza y vuelve a una situación de régimen.

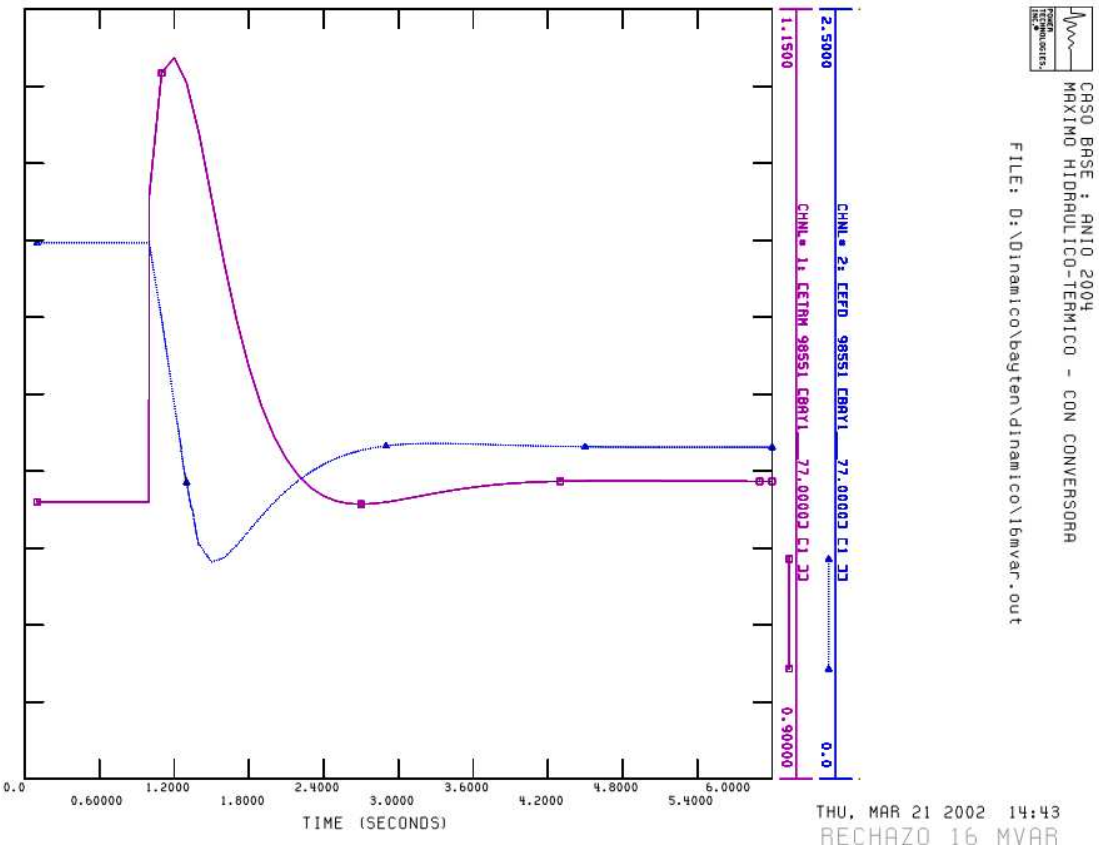


Figura 5.19: Simulación de desconexión de carga inductiva de UTE. [6]

Para comparar con los resultados de la simulación en Simulink, se calculan las mismas constantes de tiempo que para estudios anteriores.

Tensión de Excitación.

Para la tensión de excitación se utilizarán las siguientes constantes de tiempo: tiempo de subida, tiempo de bajada y tiempo de asentamiento. Se observa la respuesta en el gráfico 5.19.

La escala de tensiones, en *pu*, es de 0,00 hasta 2,50, por lo que cada intervalo varía 0,25 y dividiendo el intervalo en diez segmentos, se obtiene una apreciación de 0,03 *seg*.

La escala de tiempos va de 0,00 hasta 6,00, con intervalos de 0,60 *seg*, por lo que la apreciación es de $0,06$ *seg*.

Se obtienen, gráficamente, los siguientes valores:

- Tensión de excitación previa a la desconexión: 1,75 *pu*.

- Tensión de excitación mínima: 0,73 *pu*.
- Tensión de excitación en régimen final: 1,08 *pu*.
- Tiempo de bajada: 0,36 *seg*.
- Tiempo de subida: 0,84 *seg*.
- Tiempo de asentamiento: 1,52 *seg*. Medido desde el tiempo en el cual ocurre el mínimo.

Nuevamente, para el cálculo de las constantes se hacen las siguientes consideraciones:

- Tiempo de bajada: se calcula entre la tensión de inicio y la tensión mínima. Siendo ΔE_{FD} la diferencia entre el valor de inicio y el mínimo, el tiempo de bajada se toma como el tiempo en el que la señal pasa de estar en un 10 % de ΔE_{FD} por debajo del valor inicial y un 10 % de ΔE_{FD} por encima del valor mínimo. En este caso $\Delta E_{FD} = 1{,}03$ *pu*, por lo que los valores de tensión de los puntos entre los que se calcula el tiempo de bajada son: 1,65 *pu* y 0,83 *pu*.
- Tiempo de subida: se calcula entre la tensión mínima y el valor final. Siendo ΔE_{FD} la diferencia entre el valor mínimo y el final, el tiempo de subida se define como el tiempo en el que la señal pasa de estar en un 10 % de ΔE_{FD} por encima del mínimo y un 10 % de ΔE_{FD} por debajo del valor final. En este caso $\Delta E_{FD} = 0{,}35$ *pu*, por lo que los valores de tensión de los puntos entre los que se calcula el tiempo de subida son: 0,75 *pu* y 1,05 *pu*.
- Tiempo de asentamiento: se calcula desde la tensión inicial hasta la tensión final. Es el tiempo en que la señal permanece en un entorno del ± 5 % de la diferencia entre el valor final y el de pico, a partir del tiempo en el que llega al pico. En este caso $\Delta E_{FD} = 0{,}34$ *pu*, por lo que los márgenes para el valor final son entre 1,36 *pu* y 1,32 *pu*.

Tensión Terminal.

Se observa la respuesta para el gráfico antes mencionado 5.19, y se calculan las mismas constantes de tiempo que para la tensión de excitación.

La escala de tensiones, en *pu*, es de 0,900 hasta 1,150, por lo que cada intervalo varía 0,025 y dividiendo el intervalo en diez segmentos, se obtiene una apreciación de 0,003 *pu*.

La escala de tiempos va de 0,00 *seg* hasta 5,00 *seg*, con intervalos de 0,50, por lo tanto la apreciación es de 0,05 *seg*.

Del gráfico se obtienen los siguientes valores:

- Tensión en terminales previa al escalón: 0,990 *pu*.
- Tensión en terminales de pico: 1,135 *pu*.
- Tensión en terminales de régimen final: 0,998 *pu*.
- Tiempo de subida: 0,12 *seg*.
- Tiempo de bajada: 0,72 *seg*.
- Tiempo de asentamiento: 1,44 *seg*. Medido desde el tiempo en que se da el pico hasta el valor final.

A continuación se detalla los cálculos de las constantes de tiempo:

- Tiempo de subida: se calcula entre la tensión de arranque y el pico. Siendo ΔE_{TERM} la diferencia entre el valor inicial y el de pico, el tiempo de subida se define como el tiempo en el que la señal pasa de estar en un 10 % de ΔE_{TERMD} por encima del valor inicial y un 10 % de ΔE_{TERM} por debajo del valor de pico. En este caso $\Delta E_{TERM} = 0{,}145$ *pu*, por lo que los valores de tensión de los puntos entre los que se calcula el tiempo de subida son: 1,005 *pu* y 1,121 *pu*.
- Tiempo de bajada: se calcula entre la tensión de pico y el mínimo. Siendo ΔE_{TERM} la diferencia entre el valor de pico y el mínimo, el tiempo de bajada se define como el tiempo en el que la señal pasa de estar en un 10 % de ΔE_{TERMD} por debajo del valor de pico y un 10 % de ΔE_{TERM} por encima del valor mínimo. En este caso $\Delta E_{TERM} = 0{,}157$ *pu*, por lo que los valores de tensión de los puntos entre los que se calcula el tiempo de subida son: 1,119 *pu* y 1,014 *pu*.

- Tiempo de asentamiento: se calcula desde la tensión de pico hasta la tensión final. Es el tiempo en que la señal permanece en un entorno del $\pm$ 5 % de la diferencia entre el valor final y el de pico, a partir del tiempo en el que se da el pico. En este caso $\Delta E_{TERM} = 0{,}095\ pu$, por lo que los márgenes para el valor final son entre 1,006 pu y 0,990 pu.

Simulación Modelo BY-IEEE-SL.

A continuación, se analizará la simulación realizada en Simulink del modelo BY-IEEE-SL, en las condiciones descritas anteriormente.

Como ya se mencionó, no se contaba con el valor de la carga de la máquina durante la simulación. Se describe que la simulación consiste en el rechazo de carga reactiva de 16 $MVAr$ inductivos, pero no se hace mención de la carga conectada antes y después de la desconexión. Para obtener una respuesta similar a la documentada por UTE, se fue variando paulatinamente, la carga de la máquina antes de la desconexión y el valor de la tensión de referencia, hasta obtener valores en régimen similares a los de la documentación.

En la figura 5.20 se observa el diagrama de bloques implementado para realizar la simulación. En particular los valores elegidos para la carga de la máquina son:

Carga que se mantiene conectada:

$$P = 22 \text{ MW}$$

Carga que se desconecta:

$$\begin{cases} P = 6\text{MW} \\ Q = 16\text{MVAr} \end{cases}$$

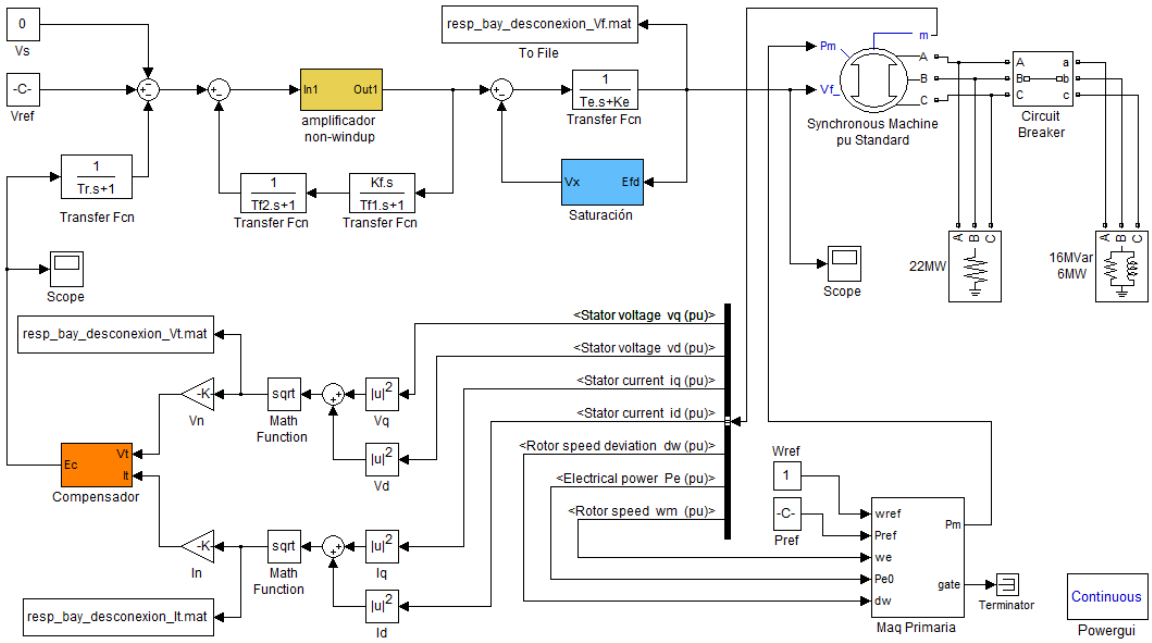


Figura 5.20: Diagrama para la simulación de rechazo de carga implementada en Simulink

En el gráfico 5.21 se observan las respuestas de la tensión de excitación y terminal de la máquina, frente a la simulación comentada. A continuación se realizará el estudio para la tensión de excitación y terminal, tal como se hizo en 5.2.2 para BY-UTE.

Tensión de Excitación.

La figura 5.22 muestra la respuesta temporal de la tensión en terminales de la máquina, para la simulación del rechazo de carga. Para comparar la misma con BY-UTE se implementaron los cálculos en MatLab obteniéndose los siguientes resultados:

- Tensión de excitación previa a la desconexión: 1,6503 pu.
- Tensión de excitación mínima: 0,2695 pu.
- Tensión de excitación en régimen final: 1,0289 pu.
- Tiempo de bajada: 0,3873 seg.

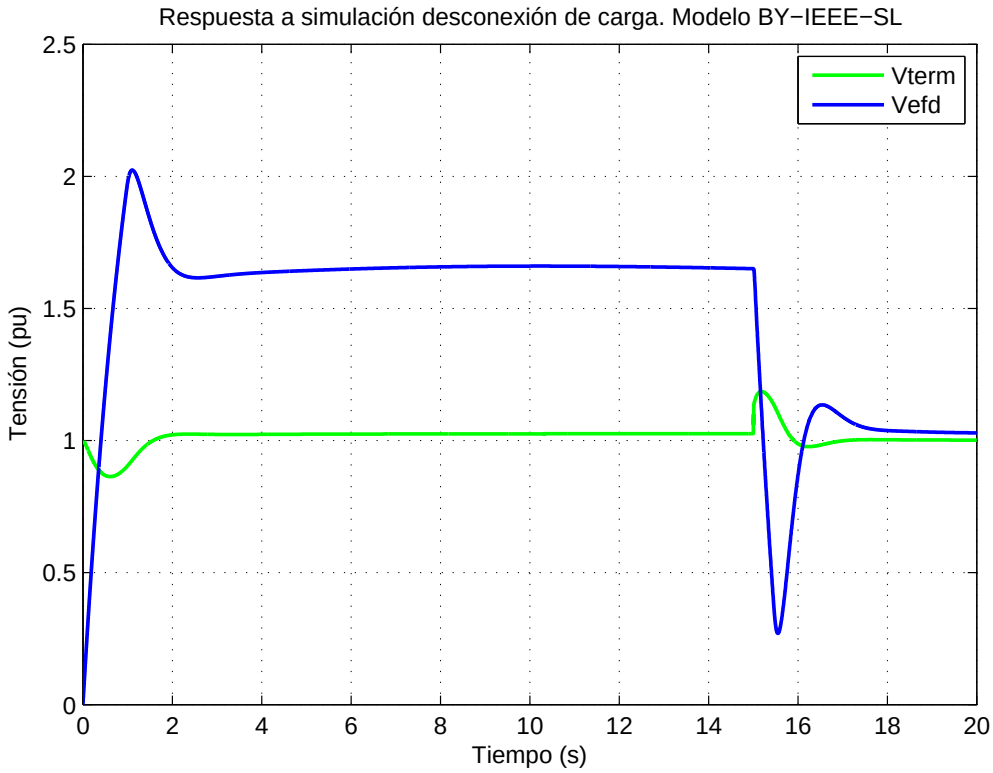


Figura 5.21: Respuestas temporales de la simulación de rechazo de carga en Simulink

- Tiempo de subida: 0,4234 *seg*.
- Tiempo de asentamiento: 1,6664 *seg*. Medido desde el tiempo en que se da el mínimo.

En las figuras 5.23, 5.24 y 5.25 se observa con más detalle los tiempos de subida, bajada y de asentamiento respectivamente.

Los tiempos se calcularon de igual manera que para los de la documentación de UTE mostrados en 5.2.2.

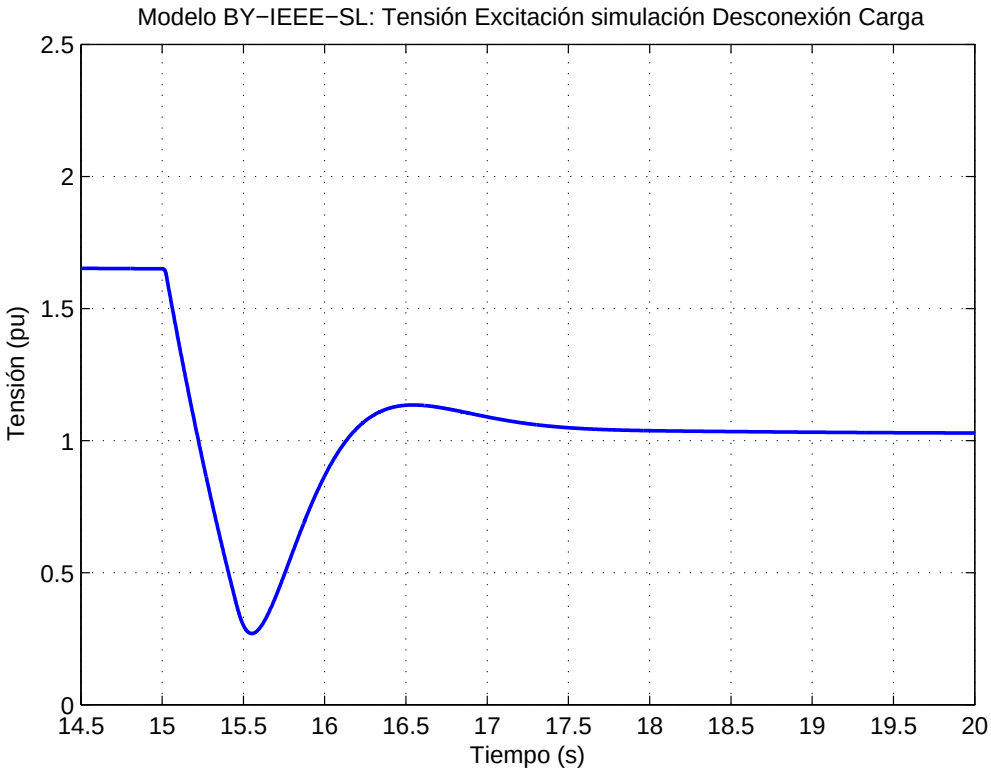


Figura 5.22: Respuesta de la tensión de excitación para la simulación de desconexión de carga

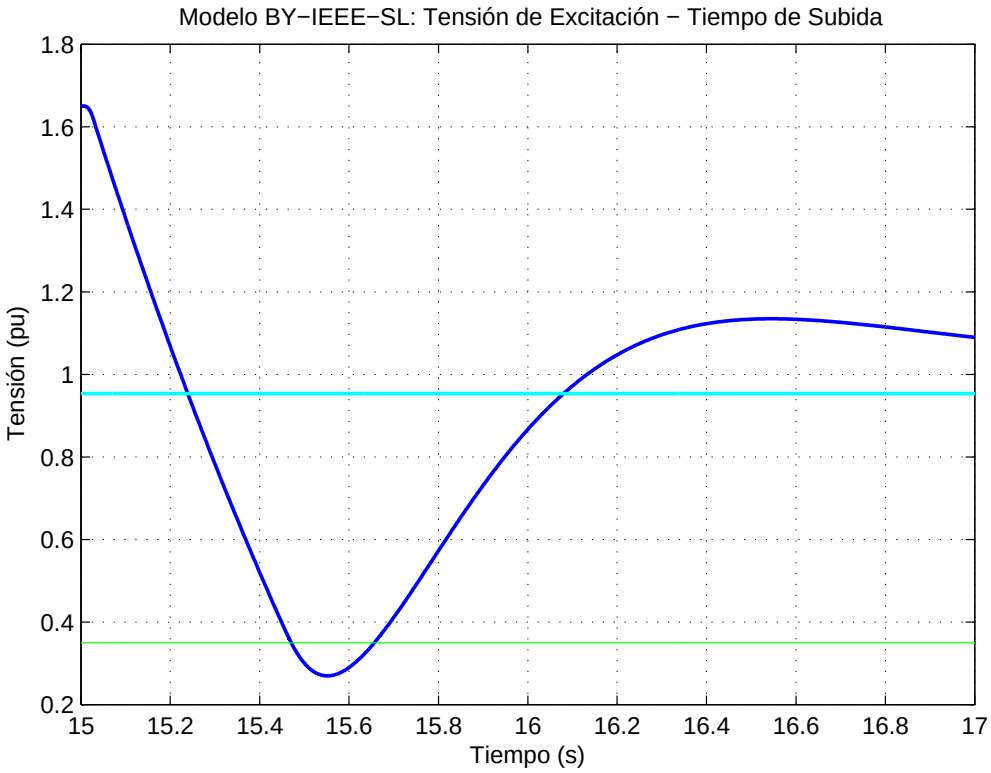


Figura 5.23: Respuesta de la tensión de excitación, cálculo del tiempo de subida

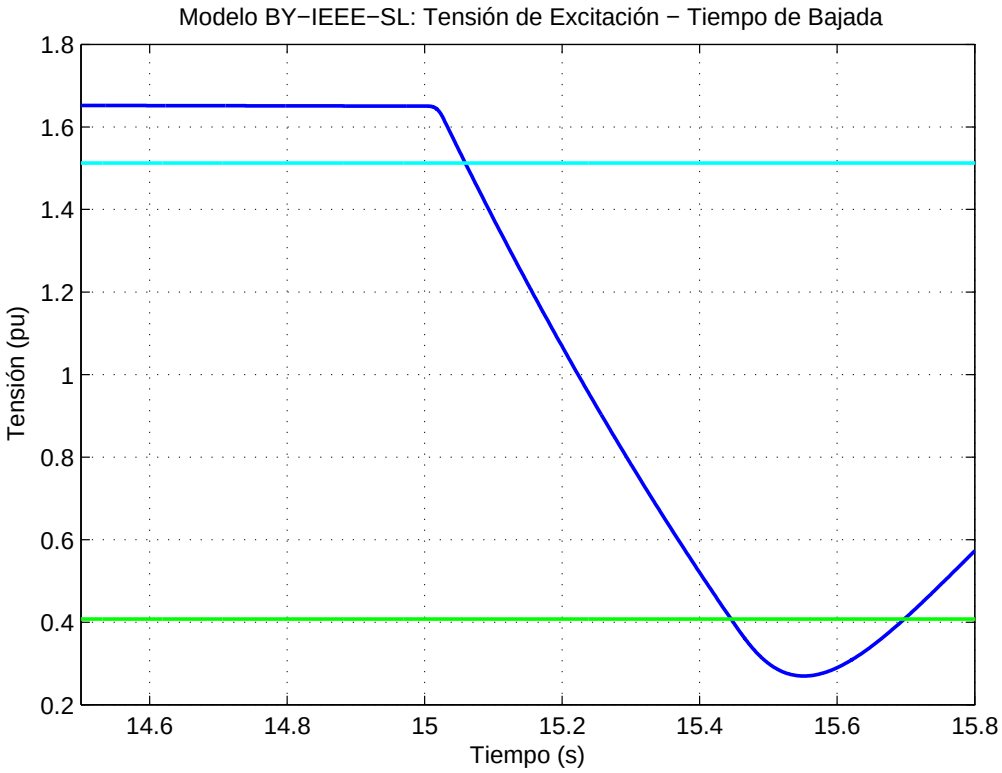


Figura 5.24: Respuesta de la tensión de excitación, cálculo del tiempo de bajada

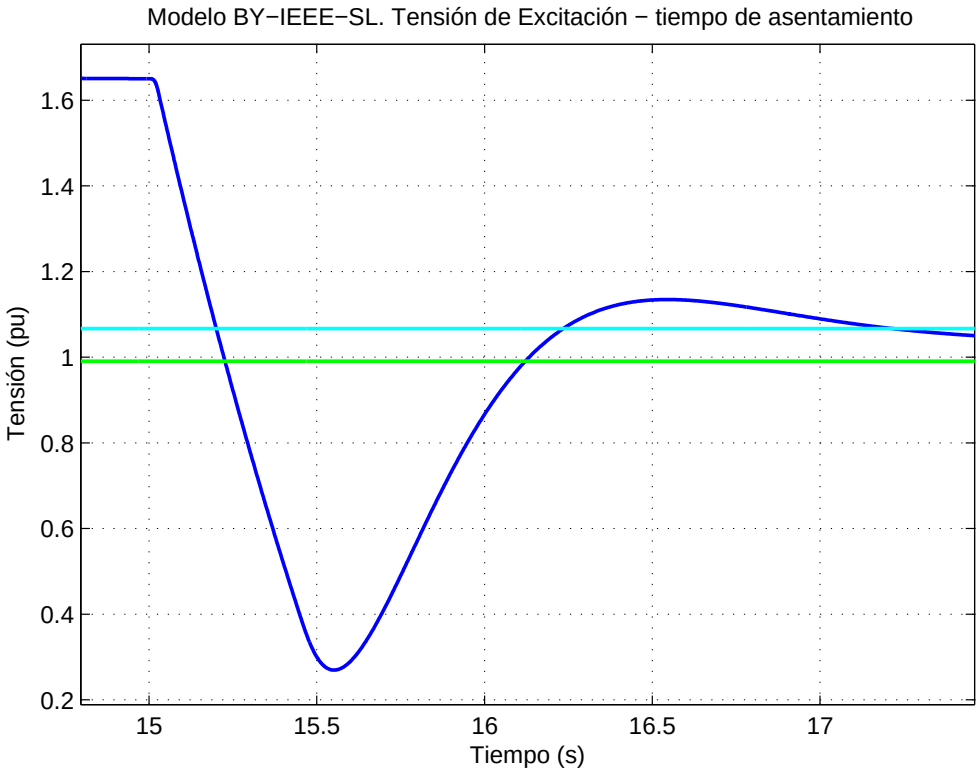


Figura 5.25: Respuesta de la tensión de excitación, cálculo del tiempo de asentamiento desde el máximo

Tensión Terminal.

La figura 5.26 muestra la respuesta temporal de la tensión en terminales de la máquina para el ensayo del escalón en la tensión de referencia. Para comparar la misma con la documentada por UTE, se implementaron los cálculos en MatLab obteniéndose los siguientes resultados:

- Tensión en terminales previa al escalón: 1,0256 *pu*.
- Tensión en terminales de pico: 1,1851 *pu*.
- Tensión en terminales de régimen final: 1,0013 *pu*.
- Tiempo de subida: 0,0707 *seg*.
- Tiempo de bajada: 0,4698 *seg*.
- Tiempo de asentamiento: 1,5778 *seg*. Medido desde el tiempo en que se da la tensión de pico.

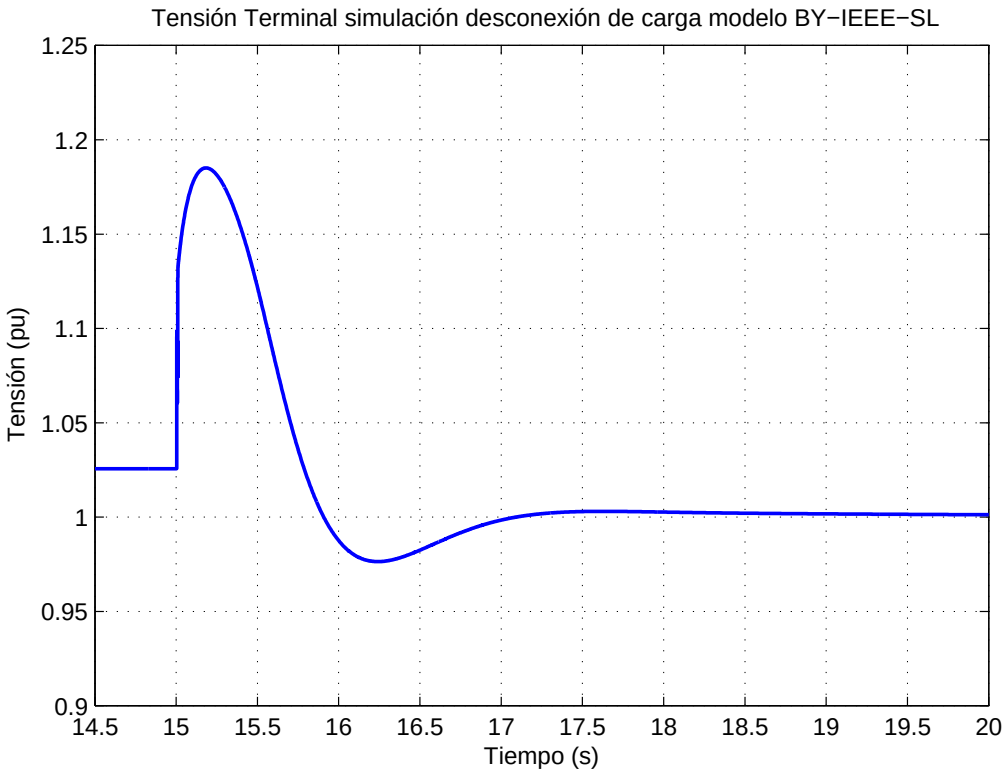


Figura 5.26: Respuesta de la tensión en terminales para la simulación de desconexión de carga

En las figuras 5.27, 5.28 y 5.29 se observa con más detalle los tiempos de subida, bajada y de asentamiento respectivamente.

Los tiempos se calcularon de igual manera que para los de la documentación de UTE mostrados en 5.2.2.

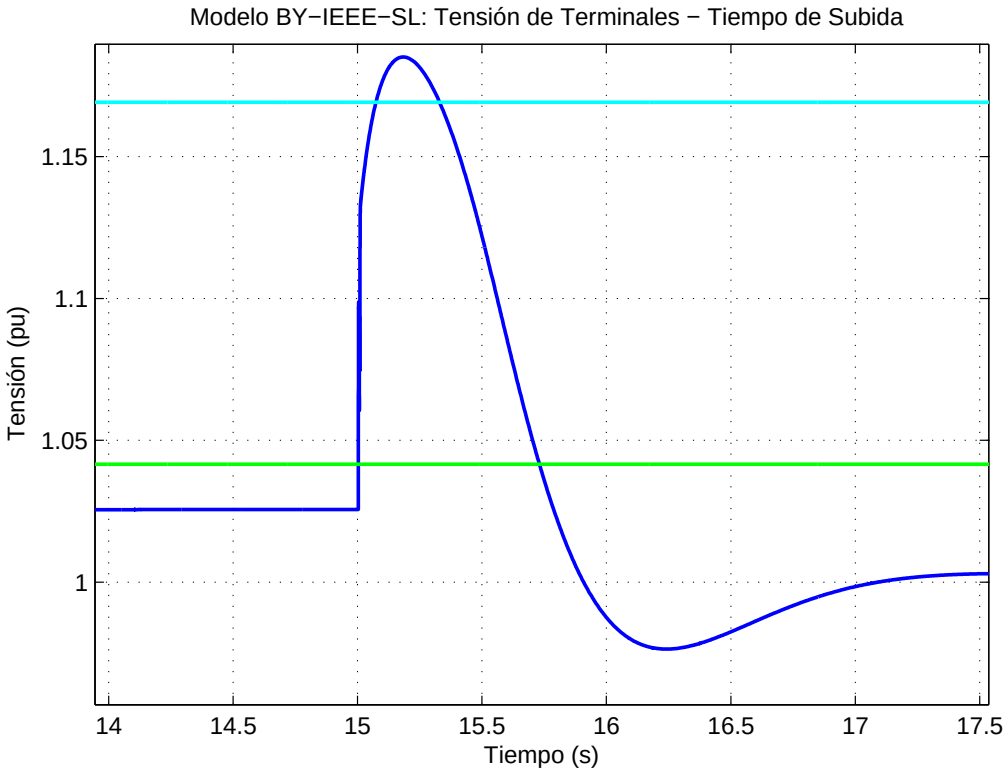


Figura 5.27: Respuesta de la tensión en terminales, cálculo del tiempo de subida

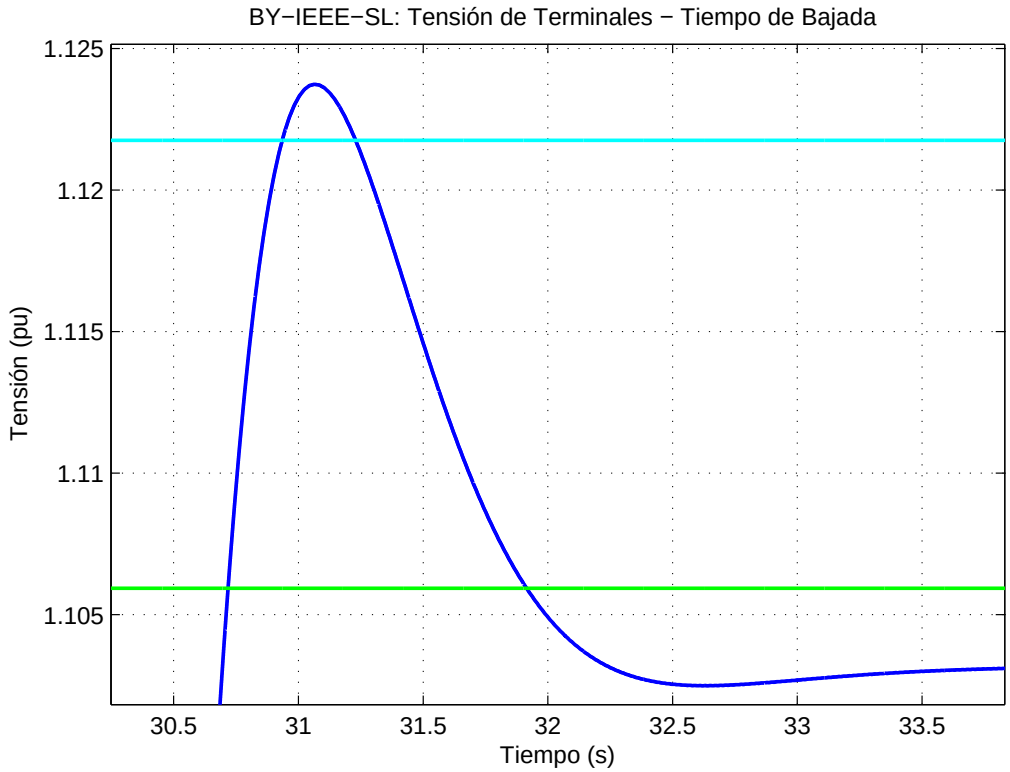


Figura 5.28: Respuesta de la tensión en terminales, cálculo del tiempo de bajada

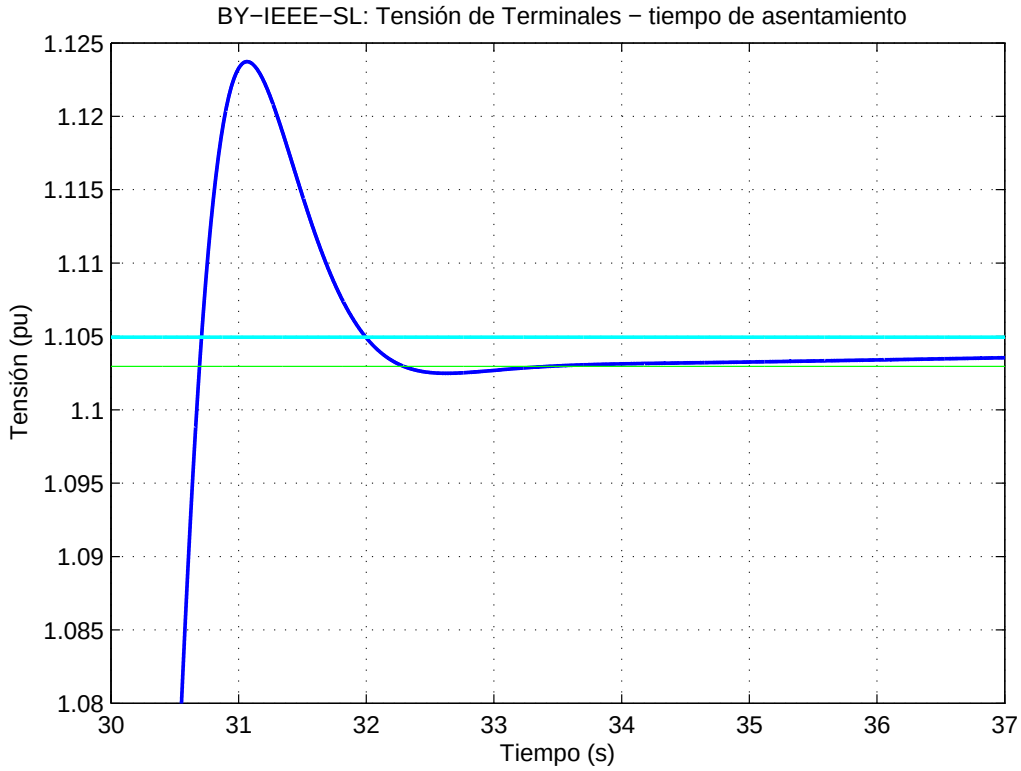


Figura 5.29: Respuesta de la tensión en terminales, cálculo del tiempo de asentamiento desde el máximo

Comparación Modelo BY-UTE vs BY-IEEE-SL.

Luego del estudio por separado de las simulaciones en PSS/E y Simulink, se compararán los resultados para ambas simulaciones:

Comparación cualitativa entre modelos.
La mayor diferencia cualitativa que se observa en las respuestas de los dos modelos, es que en BY-IEEE-SL tanto la tensión de excitación como la terminal presentan un mínimo y un máximo, respectivamente, de mayor orden que el observado en BY-UTE.

Comparación cuantitativa entre modelos.
Los valores para el modelo BY-UTE y BY-IEEE-SL son los obtenidos en 5.2.2 y 5.2.2 respectivamente.

Tensión de Excitación.

1. **Valores de régimen.**
   Del estudio anterior se obtiene que para el modelo BY-IEEE-SL el valor de régimen antes de la desconexión es $E_{FD_{inicial}} = 1{,}6503\ pu$ y luego de la desconexión es $E_{FD_{final}} = 1{,}0289\ pu$. El modelo BY-UTE da 1,75 *pu* para el valor de régimen inicial y 1,08 *pu* para el valor de régimen final. Además, para el primero, el mínimo se da en 0,2695 *pu*, mientras que en el de UTE se da en 0,73 *pu*.

   Con estos resultados, se puede calcular el error relativo en cada uno de los casos.

$$e_{rel_i} = \frac{1{,}75 - 1{,}65}{1{,}75} \cdot 100 = 5{,}7\,\% \tag{5.12}$$

$$e_{rel_f} = \frac{1{,}08 - 1{,}0289}{1{,}08} \cdot 100 = 4{,}7\,\% \tag{5.13}$$

2. **Tiempo de bajada.**
   Los valores para BY-UTE y BY-IEEE-SL son, respectivamente, 0,36 *seg* y 0,3873 *seg*.

   Se calcula el error relativo:

$$e_{rel_{bajada}} = \frac{0{,}36 - 0{,}39}{0{,}36} \cdot 100 = 8{,}3\,\% \tag{5.14}$$

3. **Tiempo de subida.**
   Los valores para BY-UTE y BY-IEEE-SL son, respectivamente, 0,84 *seg* y 0,4234 *seg*.

   Se calcula el error relativo:

$$e_{rel_{subida}} = \frac{0{,}84 - 0{,}4234}{0{,}84} \cdot 100 = 50\,\% \tag{5.15}$$

4. **Tiempo de asentamiento.**
   Los valores para BY-UTE y BY-IEEE-SL son, respectivamente, 1,52 *seg* y 1,6664 *seg*.

   El error en el tiempo de asentamiento es:

$$e_{rel_{asen}} = \frac{1{,}52 - 1{,}6664}{1{,}52} \cdot 100 = 9{,}6\,\% \tag{5.16}$$

Tensión Terminal.

1. **Valores de régimen.**
   Del estudio anterior se obtiene que para el modelo BY-IEEE-SL el valor de régimen antes de la desconexión es $V_{T_{ini}} = 1{,}0256\ pu$ y luego de la desconexión es $V_{T_{final}} = 1{,}0013\ pu$. El modelo BY-UTE da 0,990 *pu* para el valor de régimen inicial y 0,998 *pu* para el valor de régimen final. Además, para el primero, el máximo se da en 1,1851 *pu*, mientras que en BY-UTE se ubica en 1,135 *pu*.

   Por lo tanto, los errores relativos son:

$$e_{rel_i} = \frac{|1{,}135 - 1{,}026|}{1{,}135} \cdot 100 = 9{,}6\,\% \tag{5.17}$$

$$e_{rel_f} = \frac{|0{,}998 - 1{,}001|}{0{,}998} \cdot 100 = 0{,}3\,\% \tag{5.18}$$

2. **Tiempo de subida.**
   Los valores para BY-UTE y BY-IEEE-SL son, respectivamente, 0,12 *seg* y 0,0707 *seg*.
   El error en el tiempo de subida es:

$$e_{rel_{subida}} = \frac{0{,}12 - 0{,}07}{0{,}12} \cdot 100 = 42\,\% \tag{5.19}$$

3. **Tiempo de bajada.**
   Los valores para BY-UTE y BY-IEEE-SL son, respectivamente, 0,72 *seg* y 0,4698 *seg*.
   El error en el tiempo de bajada es:

$$e_{rel_{bajada}} = \frac{0{,}72 - 0{,}47}{0{,}72} \cdot 100 = 35\,\% \tag{5.20}$$

4. **Tiempo de asentamiento.**

   Los valores para BY-UTE Y BY-IEEE-SL son, respectivamente, 1,44 *seg* y 1,5778 *seg*.
   El error en el tiempo de asentamiento es:

$$e_{rel_{asen}} = \frac{1{,}44 - 1{,}58}{1{,}44} \cdot 100 = 9{,}7\,\% \tag{5.21}$$

5.3. Conclusiones del Sistema de Excitación de Baygorria.

5.3.1. Conclusiones sobre el Modelo BY-IEEE-SL.

Por lo expresado en la sección 4.1.2, se observa que el modelo del regulador de tensión propuesto por UTE, se puede llevar al modelo AC5A de la norma actual de la IEEE, sin realizarle modificaciones.

De esta manera se obtiene un modelo que se puede insertar en cualquier programa de simulación de sistemas de potencia.

Parámetros del modelo.

Se observa en la figura 5.30 el estándar de la IEEE que se puede utilizar para obtener el modelo del sistema de excitación de la máquina de Baygorria, y en la tabla 5.2 se muestran los parámetros que se le deben ajustar al mismo.

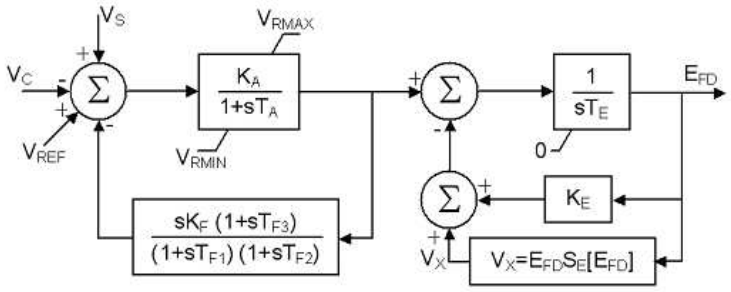


Figura 5.30: Modelo Estándar AC5A de la IEEE

K_A	100
T_A	0.02
V_{RMax}	3.50
V_{RMin}	-2.50
K_E	1.00
T_E	1.40
K_F	0.086
T_{F1}	0.60
T_{F2}	1.40
T_{F3}	0.00
K_E	1.00

Tabla 5.2: Parámetros del modelo AC5A para representar Baygorria

Validación del modelo BY-IEEE-SL.

Anteriormente, se mostró la diferencia entre los valores obtenidos con la simulación documentada por UTE y la realizada en Simulink. A continuación se muestran los valores para los cuales el error relativo supera el 10 %:

- Ensayo del escalón en la tensión de referencia:
  - el tiempo de bajada de la tensión de excitación.
  - el tiempo de asentamiento en la tensión de excitación.
  - el tiempo de asentamiento en la tensión en terminales.
- Ensayo de rechazo de carga reactiva:

- el tiempo de subida la tensión de excitación.
- el tiempo de subida en la tensión en terminales.
- el tiempo de bajada en la tensión en terminales.

Si bien estos errores están fuera del margen de tolerancia, se observa que son debidos a la respuesta "suavizada"presente en la documentación de UTE. Nuevamente, se puede adjudicar esta diferencia a las simplificaciones de las constantes de tiempo utilizadas en PSS/E, para simular grandes sistemas de potencia.

Además como ya se mencionó en su momento, la máquina síncrona utilizada no es la que aparece documentada por UTE, sino que es un estándar de la librería de Simulink.

Por último, cabe recordar que no se tenía los valores exactos de carga de la máquina, ni de la tensión de referencia para las simulaciones, datos que fueron estimados para llevar las simulaciones, a los mismos valores de régimen que en la documentación de UTE.

5.3.2. Implementaciones adicionales al modelo del regulador de tensión.

Para implementar el modelo BY-UTE en Simulink fue necesario la realización de subsistemas, en particular, como se mencionó en 5.1.2 se necesitaron implementar los bloques de compensación y saturación.

Además se implementó, como se especifica en la norma de la IEEE [2], el amplificador con límites de non-windup, el cual será utilizado nuevamente en el modelo IEEE a llevar el sistema de excitación del generador de Palmar, que se verá en el siguiente capítulo.

Capítulo 6

Palmar

A continuación se presenta el estudio realizado para el sistema de excitación de Palmar. El objetivo principal del mismo, es la obtención de un modelo que pertenezca al estándar de la IEEE, y que presente el mismo comportamiento que el modelo desarrollado por UTE, a menos de un margen de tolerancia. Se parte de la documentación proporcionada por UTE, la cual consta de dos modelos del sistema, uno con más detalle que el otro, y dos simulaciones de los mismos, que se utilizarán para la validación del nuevo modelo desarrollado.

Definiciones.
Se definen los siguientes modelos a utilizar y/o desarrollar:

- **Modelo PAL-UTE**: modelo propuesto por UTE e implementado en PSS/E.
- **Modelo PAL01-UTE-SL**: corresponde al modelo PAL01 de UTE implementado en Simulink.
- **Modelo PAL02-UTE-SL**: corresponde al modelo PAL02 de UTE implementado en Simulink.
- **Modelo PAL01-IEEE-SL**: corresponde al modelo estándar IEEE, implementado en Simulink, con los parámetros del sistema de excitación PAL01.
- **Modelo PAL02-IEEE-SL**: corresponde al modelo estándar IEEE, implementado en Simulink, con los parámetros del sistema de excitación PAL02.

Procedimiento.
Como se puede ver en las definiciones, UTE cuenta con dos modelos de sistema de excitación de Palmar: PAL01 y PAL02. En primer lugar, lo que se hizo fue estudiar ambos modelos, para observar sus diferencias. Cuando son sometidos a las mismas simulaciones, ambos presentan un comportamiento similar en tiempos de respuesta, pero difieren principalmente en valores de saturación.

Por lo tanto, y debido al grado de complejidad que presenta el sistema de excitación PAL02, lo que se hizo fue trabajar, en una primera instancia, con el modelo PAL01. Una vez que se tuvo implementado el modelo PAL01 en Simulink, se cambiaron sus parámetros de manera de que la respuesta sea "similar" a la del modelo PAL02. De esta manera, el modelo que se llamó PAL-UTE es el modelo PAL01 de UTE. Definido esto, se implementó el modelo PAL-UTE en Simulink y se obtiene el modelo PAL01-UTE-SL.

El modelo PAL01-IEEE-SL se obtiene a partir del estándar IEEE que mejor se aproxima al modelo PAL01-UTE-SL, y realizando las simulaciones adecuadas, se encontraron los parámetros correspondientes y se hizo la validación. Con esto se completa el estudio del sistema PAL01.

Para pasar a trabajar con PAL02, se ajustaron algunos parámetros de PAL01-UTE-SL, para que la respuesta tenga los valores de pico que tiene el sistema PAL02 obteniéndose el modelo llamado PAL02-UTE-SL. A partir de éste último, se obtuvo el modelo IEEE correspondiente definido como PAL02-IEEE-SL. Ambos modelos fueron simulados y validados.

6.1. Sistema de Excitación de Palmar: Modelo PAL01

En esta sección se trabajará únicamente con el modelo de Palmar PAL01. Se implementa en Simulink y se halla el estándar IEEE correspondiente.

6.1.1. Análisis del diagrama de bloques del Regulador de Tensión.

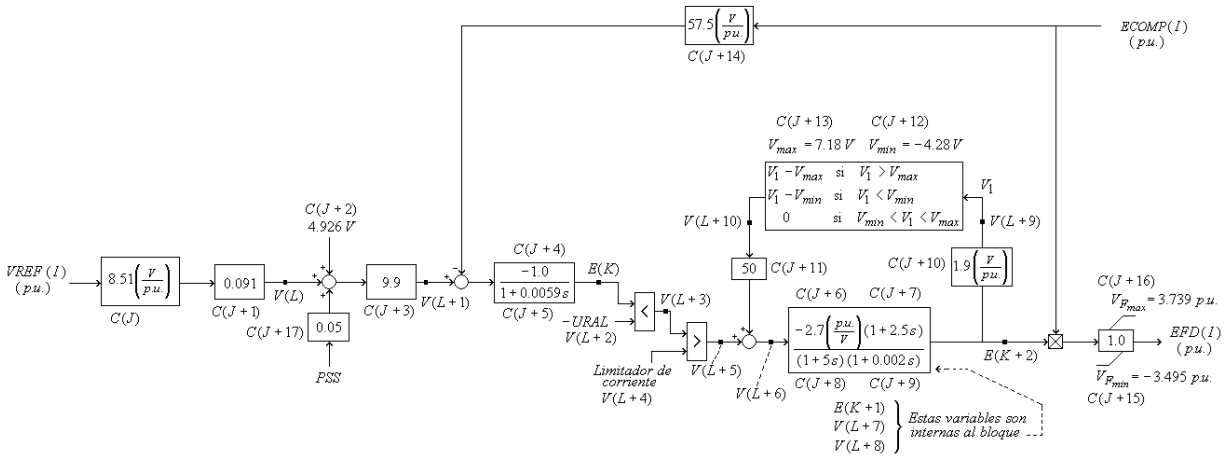


Figura 6.1: Regulador de Tensión PAL01 de Palmar [14]

En la figura 6.1, se observa el diagrama de bloques del regulador de tensión PAL01 de Palmar. A continuación se mencionan algunos aspectos que se consideran de interés.

Señales -URAL y Limitador de corriente.
Las señales -URAL y Limitador de corriente, no son tenidas en cuenta a la hora de implementar este modelo, dado que no son consideradas en las simulaciones de UTE.

Señales V_{ref} y V_{term}.
Con respecto a estas señales, cabe destacar que la tensión V_{term} que se resta en el sistema de control, se expresa en unidades físicas en lugar de en *pu*, como sucede en el resto de los modelos analizados. De la misma manera, la tensión V_{ref}, que se ingresa en *pu* al sistema de control, es llevada a unidades de V. En la salida del sistema, tanto V_{ref} como V_{term} están en *pu*.

Bloque multiplicador.
Es interesante observar que el modelo de la figura 6.1, tiene un bloque que multiplica la tensión terminal con la tensión de excitación a la salida del sistema de control. Este bloque va a ser muy importante a la hora de encontrar el estándar IEEE que mejor se ajusta al modelo PAL-UTE.

Resto del modelo.
El resto del modelo no presenta mayores particularidades, salvo el bloque V_{min}-V_{max} que busca acotar la tensión de excitación entre un mínimo y un máximo. Los demás bloques corresponden a ganancias y transferencias típicas en los sistemas de control, así como bloques de saturación.

6.1.2. Modelo PAL01-UTE-SL.

A continuación, se describe la implementación del modelo PAL-UTE en Simulink, que da lugar al modelo PAL01-UTE-SL. El objetivo de esta descripción es entrar en detalle en los bloques particulares, y simplemente nombrar los bloques que ya se han descrito anteriormente en Salto Grande y Baygorria.

Bloques de ajuste tensión de referencia.
Como se dijo anteriormente, la tensión de referencia pasa por unos bloques que ajustan su valor a unidades físicas. Dichos bloques no presentan mayores dificultades para implementar en Simulink, ya que son de ganancia constante y suma de un valor constante. La implementación de estos bloques se puede apreciar en la figura 6.2. En la misma, se observa que el valor de la señal estabilizante proveniente del PSS es cero, tal como especifica la documentación de UTE para hacer las simulaciones.

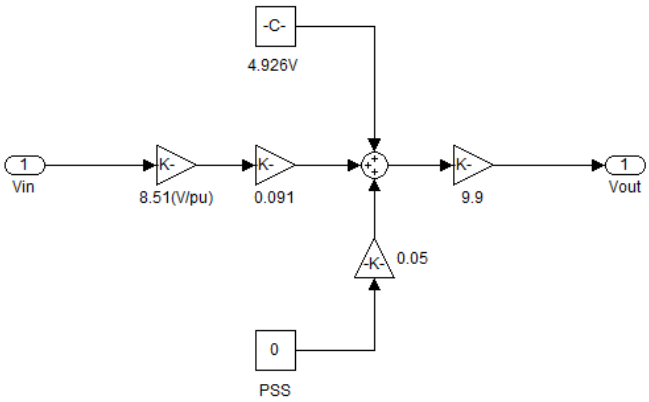


Figura 6.2: PAL01-UTE-SL: Ajuste V_{ref}

URAL y Limitador de Corriente.

Las señales URAL y Limitador de corriente, no son tenidas en cuenta en las simulaciones, pero igualmente se implementó el bloque al que entran estas señales. Este bloque limita la señal a un valor entre [-URAL, Limitador de corriente]. Por lo tanto, para anular estas señales lo que se hace es asignarle a URAL un valor muy alto (por ejemplo, 999) y al Limitador de Corriente un valor muy bajo (por ejemplo, -999), de modo que no influyan con el resto del sistema. La implementación de este bloque se puede observar en la figura 6.3.

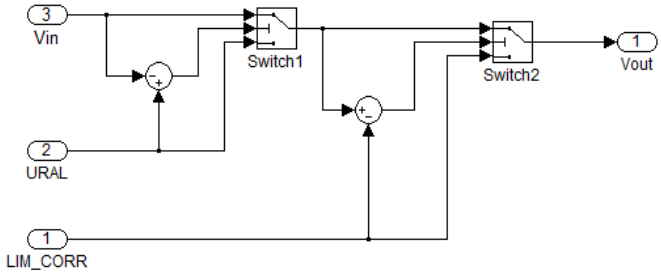


Figura 6.3: PAL01-UTE-SL: Bloque limitador a URAL y Limitador de corriente

Funciones de transferencia.

Se implementaron las siguientes funciones de transferencia:

- $H(s) = \dfrac{-1}{0{,}0059s + 1}$
- $H(s) = \dfrac{2{,}5s + 1}{(1 + 5s)(1 + 0{,}002s)}$

Bloque limitador $V_{min} - V_{max}$.

Este bloque se implementa de la siguiente manera.

- Si $V_{in} > V_{max} \Rightarrow V_{out} = V_{in} - V_{max}$
- Si $V_{in} < V_{min} \Rightarrow V_{out} = V_{in} - V_{min}$
- Si $V_{min} < V_{in} < V_{max} \Rightarrow V_{out} = 0$
- con $V_{max} = 7{,}18V$ y $V_{min} = -4{,}28V$

La implementación de este bloque se puede ver en la figura 6.4.

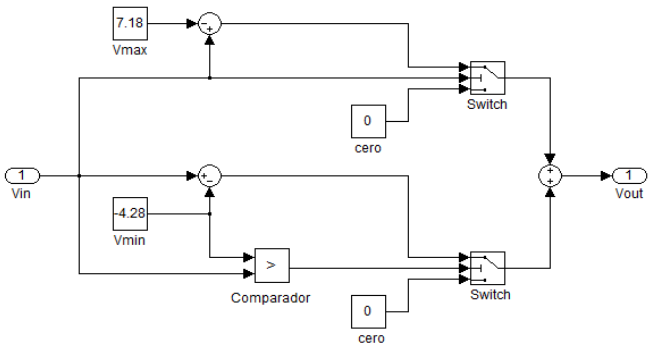


Figura 6.4: PAL01-UTE-SL: Bloque limitador $V_{min} - V_{max}$

Bloque multiplicador.
El bloque multiplicador, explicado anteriormente, se implementó en Simulink directamente, ya que el mismo tiene en su librería un bloque que multiplica 2 señales.

Resto del sistema.

- **Máquina Sincrónica:** los datos fueron obtenidos de la información brindada por UTE [10], y se presentan en la tabla 6.1.

T'_{do}	7.1
T''_{do}	0.05
T''_{q0}	0.09
H	3.75
X_d	0.72
X_q	0.51
X'_d	0.27
$X''_d = X''_q$	0.21
X_1	0.14

Tabla 6.1: Datos del Generador de Palmar.

- **Máquina Primaria:** Se usa el bloque *"Hydraulic Turbine and Governor (HTG)"*, como en el resto de los modelos.
- **Carga Trifásica:** Se determinó para que, en una situación de régimen, se tengan los mismos valores que en la documentación de UTE. Se utilizó una carga que consume $P = 55MW$ de potencia activa y $Q = 9MVar$ de reactiva .

Modelo.
Luego de la descripción anterior, en la figura 6.5, se puede observar el modelo implementado en Simulink.

6.1.3. Validación del Modelo PAL01-UTE-SL.

A continuación, se realizará la validación del modelo del sistema de excitación de Palmar PAL01, implementado en Simulink. Se realizará la misma simulación que la mostrada en la documentación de UTE [16], la cual consiste en un escalón en la tensión de terminales de $15kV$ a $16kV$, y vuelta a $15kV$. Se destaca el hecho de que este escalón no es producido en la tensión de referencia, sino en la tensión terminal. La información disponible propone realizar esta simulación variando la constante que multiplica a la tensión terminal, previo a la realimentación, de 57,5 a 53,55.

Al igual que para los casos de Salto Grande y Baygorria, no se cuenta con los datos de carga del sistema, solamente se expresa que se realiza para el máximo hidráulico-térmico, con conversora, en el año 2004.

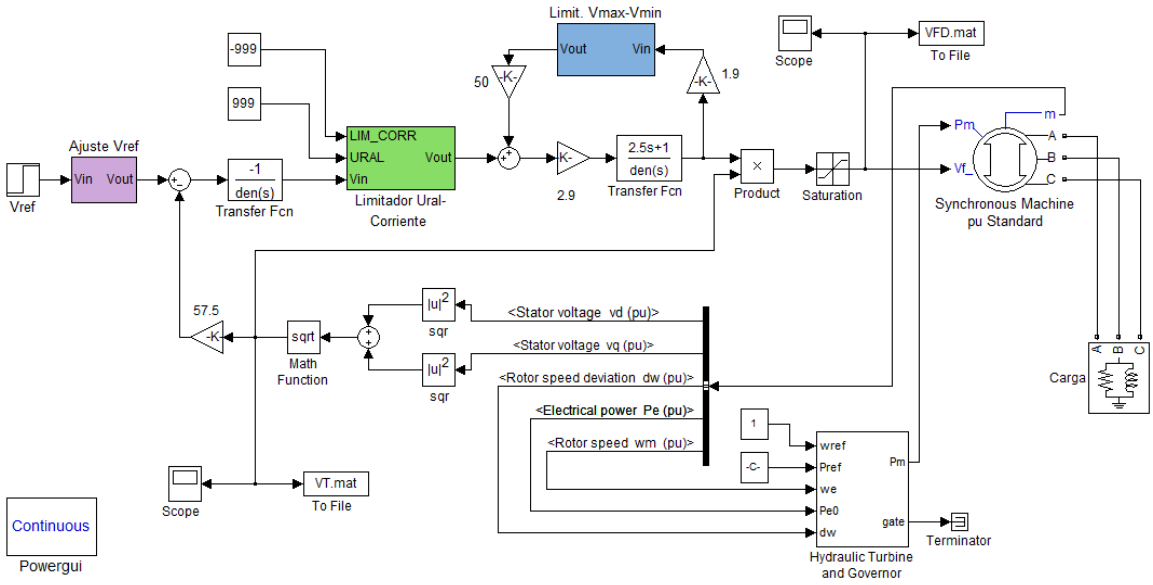


Figura 6.5: PAL01-UTE-SL: Implementación en Simulink

Se realizará el análisis para la validación del modelo expuesto anteriormente. En primera instancia se trabajará con las simulaciones documentadas por UTE, luego con las respuestas del modelo propuesto, y por último se hará una comparación de ambas. En las gráficas se muestran las señales para el modelo PAL01 y PAL02, como se explicó anteriormente, en esta instancia solo se analizará la del PAL01.

Simulación del Modelo PAL-UTE.

En la documentación se presentan dos gráficas que ilustran las respuestas temporales para las señales de tensión de excitación (E_{FD}) y la tensión en terminales (E_{TERM}).

Tensión de Excitación.

En la figura 6.6 se observa las respuestas de la tensión de excitación de la simulación. En color rosado se observa la respuesta del modelo PAL01. El primer escalón se aplica a los 0,0 *seg*, el segundo escalón se aplica a los 2,5 *seg*, y a los 5,0 *seg* se estabiliza y vuelve a una situación de régimen.

La escala de tensiones para la tensión de excitación, en *pu*, va de $-5{,}0$ a 5,0, con intervalos de 1,0 *pu*, que si se dividen en diez segmentos, se obtiene una apreciación de 0,1 *pu*.

La escala de tiempos va de 0,00 *seg* hasta 5,00 *seg*, con una apreciación de 0,50, para este caso la apreciación es de 0,05 *seg*.

Se hallan, gráficamente, los siguientes valores para el primer escalón:

- Tensión de excitación previa al primer escalón: 1,1 *pu*.
- Tensión de excitación de pico del primer escalón: 3,8 *pu*.
- Tensión de excitación en régimen luego del primer escalón: 1,2 *pu*.
- Tiempo en saturación del primer escalón: 0,15 *seg*.
- Tiempo de bajada del primer escalón: 0,10 *seg*.
- Tiempo de asentamiento del primer escalón: 0,20 *seg*. Medido desde el tiempo que finaliza la saturación.

En el segundo escalón, se puede observar que la tensión de excitación no tiene una saturación constante como en el primero, sino que el mínimo pasa por cierta integración, tomando la forma de una rampa con pendiente positiva. Esto implica que se van a tener dos valores de mínimos, correspondientes a los extremos de la rampa, antes de salir de la zona de saturación. Se numeran los extremos, tal como fueron sucedidos en el tiempo.

A continuación, se presentan los valores de interés para el segundo escalón:

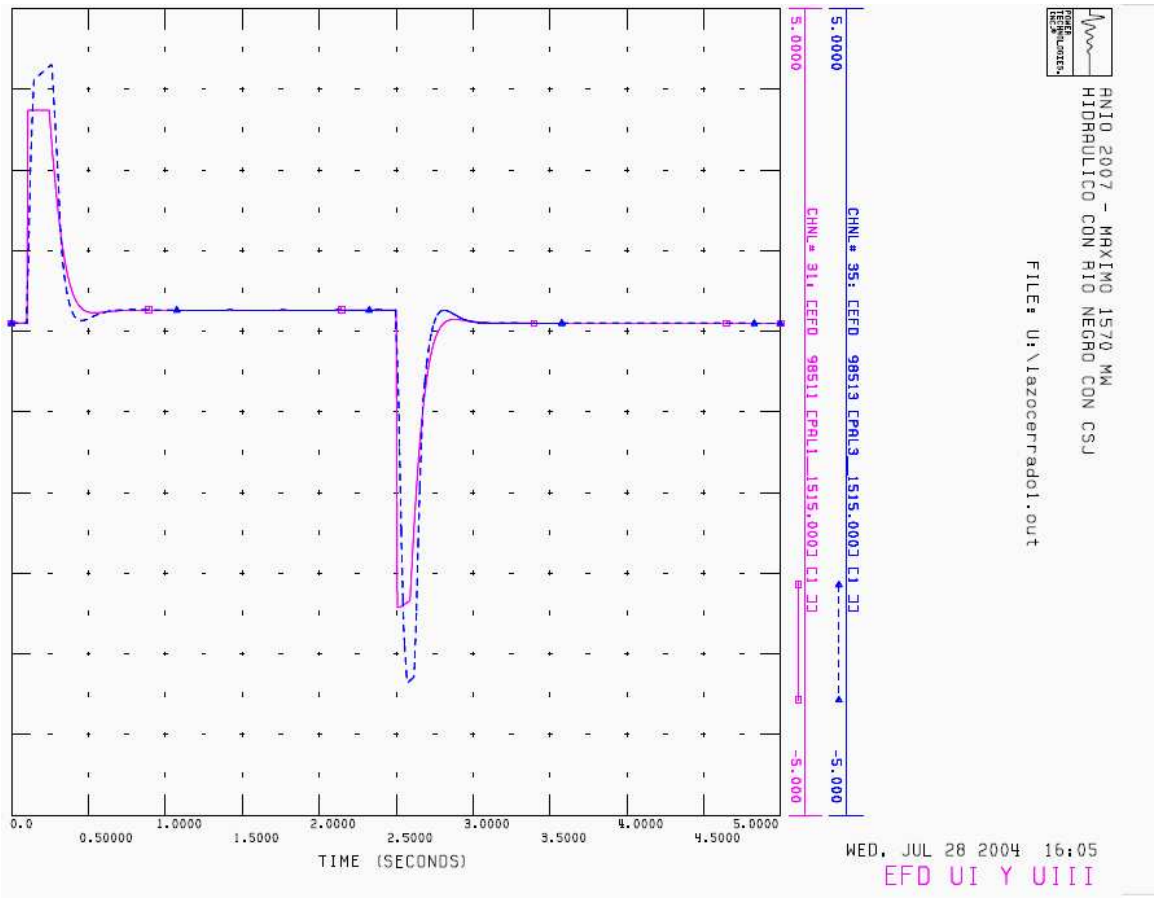


Figura 6.6: Tensión de excitación modelo PAL01, escalón en terminales [16]

- Tensión de excitación previa al segundo escalón: 1,2 *pu*.
- Valor del primer mínimo de la tensión de excitación: $-2{,}4$ *pu*.
- Valor del segundo mínimo de la tensión de excitación: $-2{,}3$ *pu*.
- Tensión de excitación en régimen luego del segundo escalón: 1,1 *pu*.
- Tiempo en saturación del segundo escalón: 0,10 *seg*.
- Tiempo de subida del segundo escalón: 0,20 *seg*.
- Tiempo de asentamiento del segundo escalón: $0,30$ *s*. Medido desde el tiempo que finaliza la saturación.

Tensión Terminal.

En la figura 6.7 se observa las respuestas de la tensión en terminales de la máquina, la gráfica rosada corresponde al modelo PAL01.

Para la tensión en terminales se utilizarán las siguientes constantes de tiempo: tiempo de subida, tiempo de bajada y tiempo de asentamiento. En particular, el tiempo de bajada y de subida del primer y segundo escalón respectivamente, no se calculan dado que no son apreciables en el gráfico.

La escala de tensiones para esta señal, en *pu*, va de 0,900 a 1,150, con intervalos de 0,025, que si se dividen en diez segmentos, se obtiene una apreciación de 0,003 *pu*.

La escala de tiempos va de 0,00 *seg* hasta 5,00 *seg*, con intervalos de 0,50. Para este caso la apreciación es 0,05 *seg*.

Se hallan los siguientes valores para el primer y segundo escalón:

- Tensión en terminales previa al primer escalón: 1,000 *pu*.

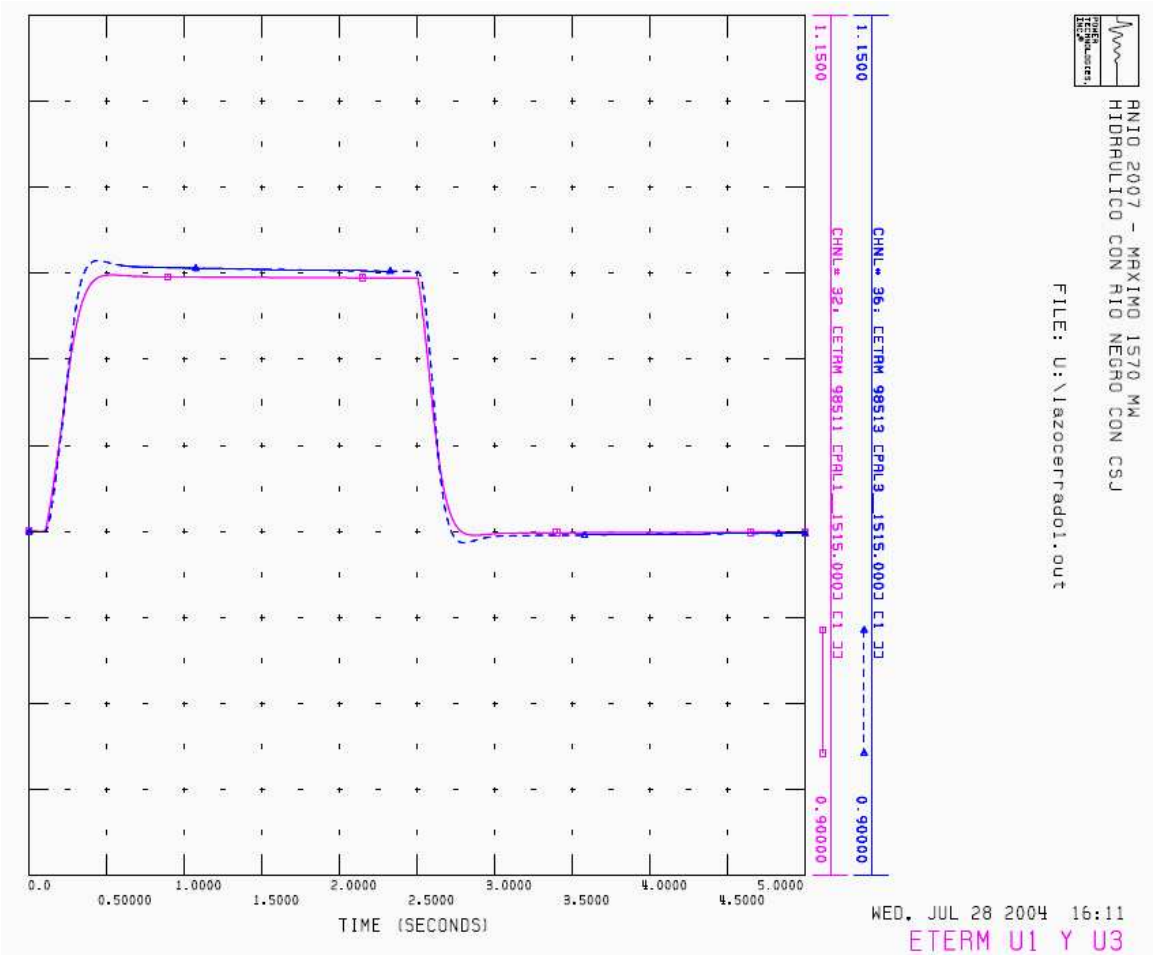


Figura 6.7: Tensión en terminales modelo PAL01, escalón en terminales [16]

- Tensión en terminales de pico del primer escalón: 1,075 *pu*.
- Tensión en terminales en régimen luego del primer escalón: 1,073 *pu*.
- Tiempo de subida del primer escalón: 0,20 *seg*.
- Tiempo de asentamiento del primer escalón: 0,30 *seg*.
- Tensión en terminales previa al segundo escalón: 1,073 *pu*.
- Tensión en terminales en régimen luego del segundo escalón: 1,000 *pu*.
- Tiempo de bajada del segundo bajada: 0,30 *seg*.
- Tiempo de asentamiento del segundo escalón: 0,40 *seg*.

El cálculo de las constantes de tiempo se realiza de forma análoga a lo expresado para la validación del modelo de Baygorria, por lo que no se hace hincapié en dichos cálculos.

Simulación del Modelo PAL01-UTE-SL.

En la presente sección se analizarán las respuestas del modelo PAL01-UTE-SL. Se trata de repetir la simulación documentada por UTE, en las condiciones descritas anteriormente.

No se contaba con el valor de la carga de la máquina durante la simulación. Para obtener una respuesta similar al modelo PAL-UTE, se varió la carga de la máquina hasta obtener los mismos valores de régimen.

En la figura 6.8 se observa el diagrama de bloques implementado para realizar la simulación. Interesa destacar que la realimentación de la tensión en terminales presenta dos constantes distintas, actuando una u otra, de acuerdo al *switch* que provoca el escalón en la tensión terminal. Los valores finales elegidos para la carga de la máquina son:

$$\begin{cases} P = 55\text{MW} \\ Q = 9{,}0\text{MVar} \end{cases}$$

A continuación se realizará el estudio para la tensión de excitación y para la de terminales tal como se hizo para PAL-UTE.

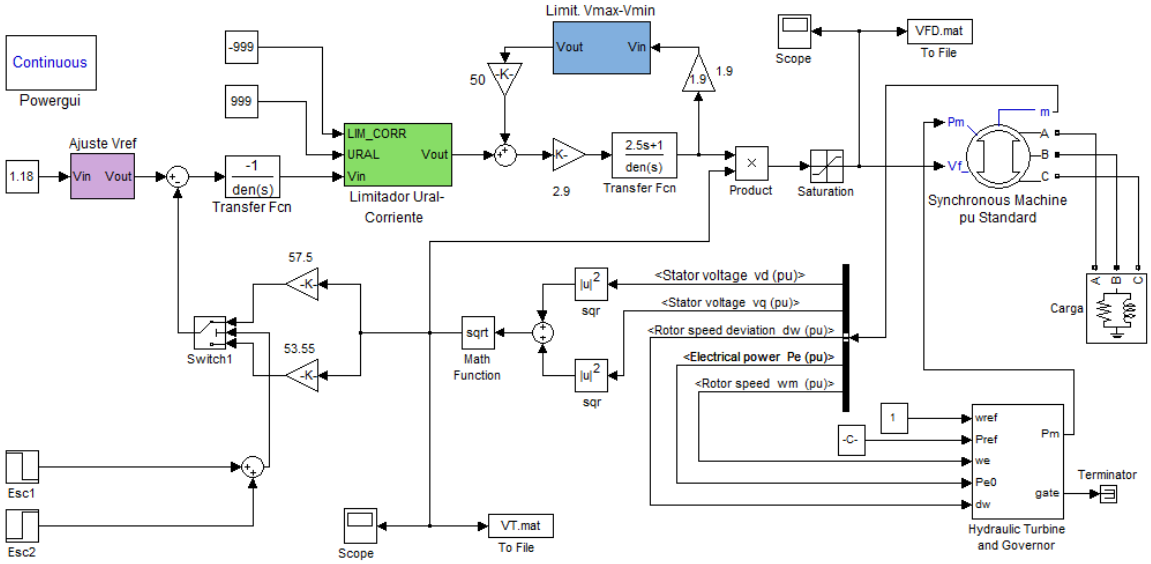


Figura 6.8: Diagrama para la simulación de PAL01 implementada en Simulink

Tensión de Excitación.

La figura 6.9 muestra la respuesta temporal de la tensión de excitación, para la simulación del escalón en la tensión en terminales de la máquina. Para comparar la misma con la documentada por UTE, se implementaron los cálculos en MatLab obteniéndose los siguientes resultados, para el primer y segundo escalón respectivamente.

Primer escalón:

- Tensión de excitación previa al primer escalón: 1,1133 pu.
- Tensión de excitación de pico del primer escalón: 3,7390 pu.
- Tensión de excitación en régimen luego del primer escalón: 1,3123 pu.
- Tiempo en saturación del primer escalón: 0,1542 seg.
- Tiempo de bajada del primer escalón: 0,1147 seg.
- Tiempo de asentamiento del primer escalón: 0,2797 seg. Medido desde el tiempo en que se produce el máximo.

Segundo escalón (son válidos los mismos comentarios sobre los mínimos que se hicieron para el modelo PAL-UTE.):

- Tensión de excitación previa al segundo escalón: 1,3123 pu.
- Valor del primer mínimo de la tensión de excitación: $-2{,}4200$ pu.
- Valor del segundo mínimo de la tensión de excitación: $-2{,}3349$ pu.
- Tensión de excitación en régimen luego del segundo escalón: 1,0950 pu.
- Tiempo en saturación del segundo escalón: 0,0938 seg.
- Tiempo de subida del segundo escalón: 0,11470 seg.
- Tiempo de asentamiento del segundo escalón: 0,1468 seg. Medido desde el tiempo en que se produce el mínimo.

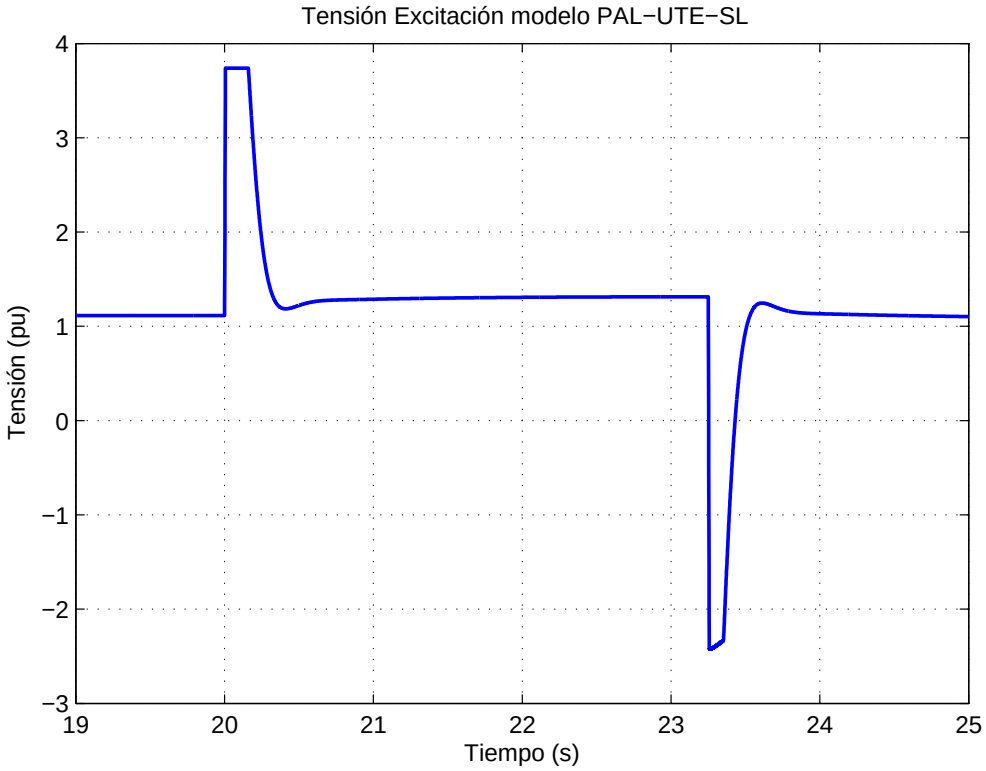


Figura 6.9: Tensión de excitación para escalón en terminales del PAL01

En las figuras 6.10 y 6.11 se observa con más detalle el tiempo de bajada y asentamiento del primer escalón respectivamente. En las figuras 6.12 y 6.13, se observa el tiempo de subida y asentamiento del segundo escalón.

Los tiempos se calcularon de igual manera que para los de la documentación de UTE mostrados en 6.1.3.

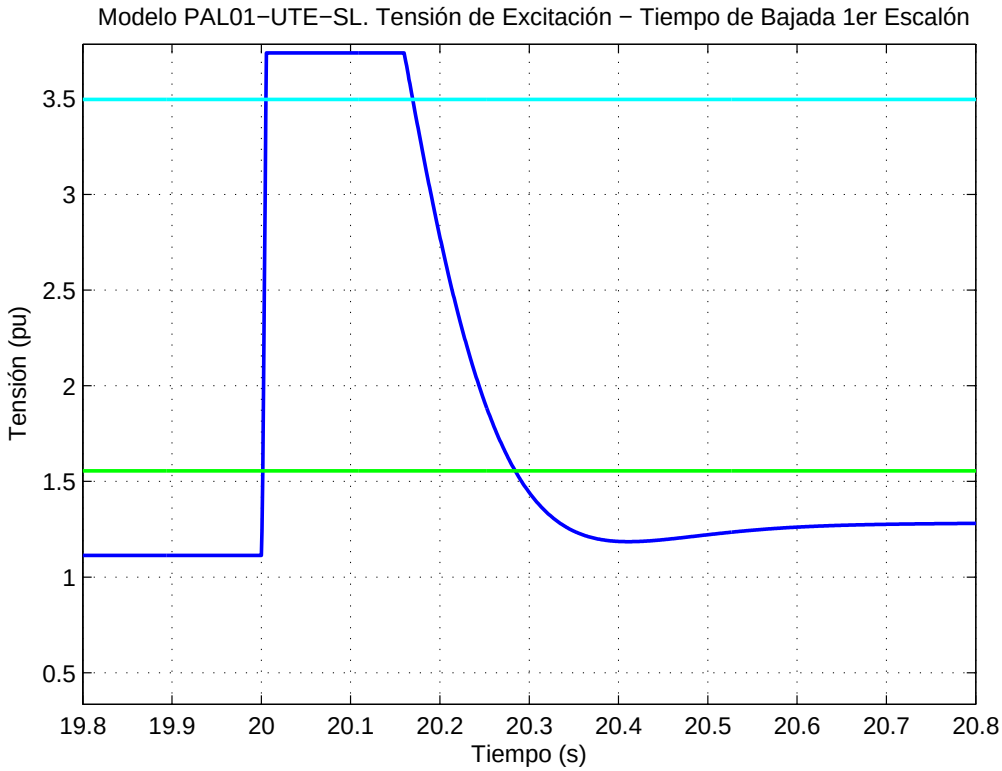


Figura 6.10: Respuesta de la tensión de excitación, cálculo del tiempo de bajada primer escalón

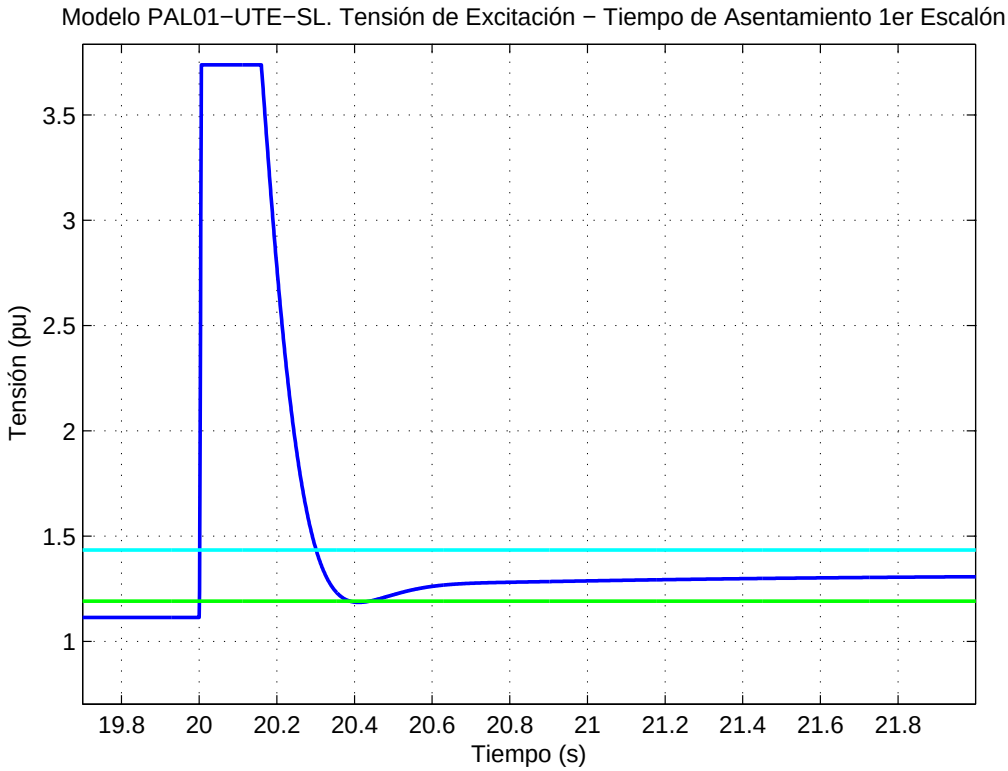


Figura 6.11: Respuesta de la tensión de excitación, cálculo del tiempo de asentamiento del primer escalón

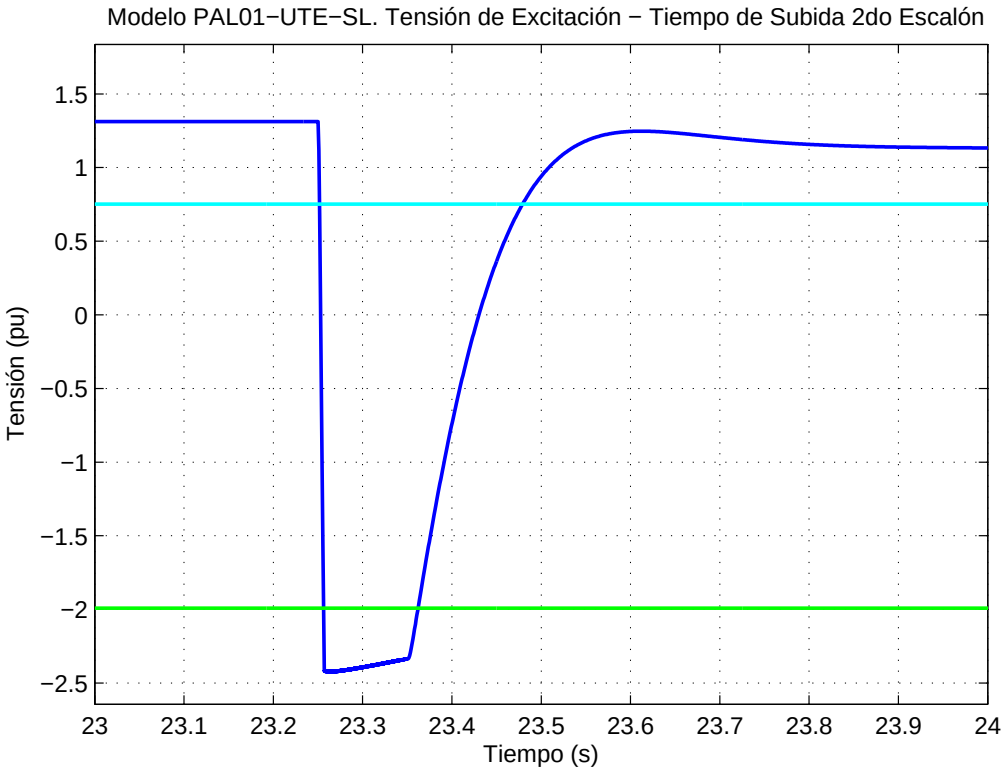


Figura 6.12: Respuesta de la tensión de excitación, cálculo del tiempo de subida del segundo escalón

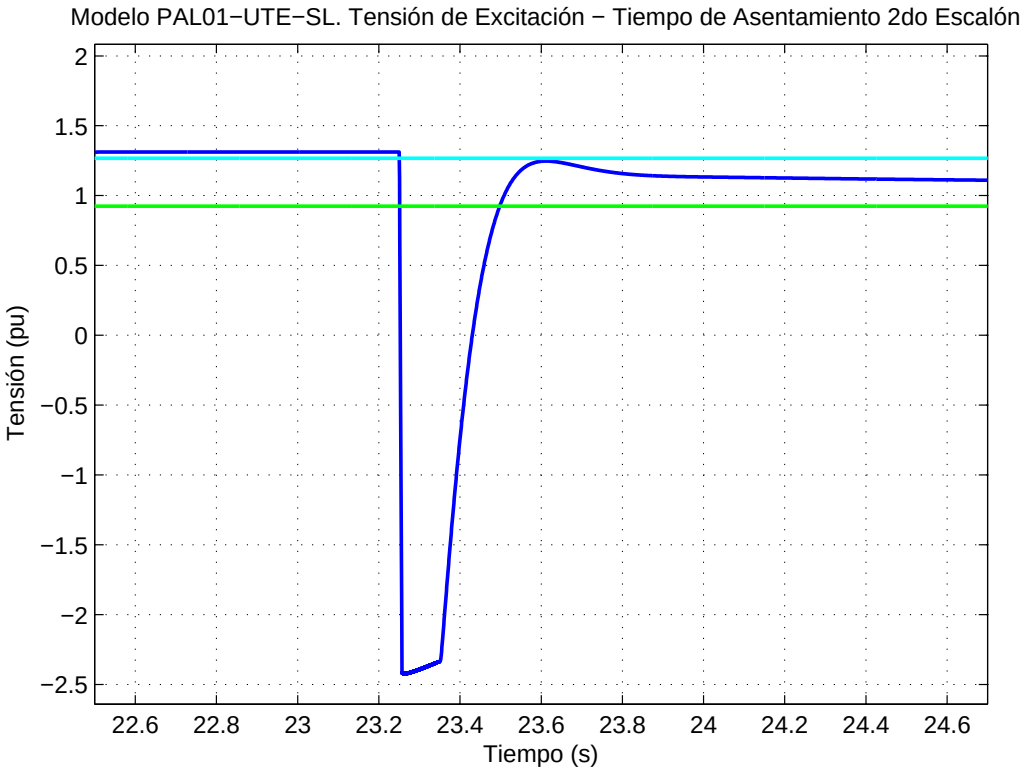


Figura 6.13: Respuesta de la tensión de excitación, cálculo del tiempo de asentamiento del segundo escalón

Tensión de Terminales.

La figura 6.14, muestra la respuesta temporal de la tensión en terminales de la máquina, para la simulación del escalón en la tensión en terminales. Al igual que para la tensión de excitación, se implementaron los cálculos obteniéndose los siguientes valores, para el primer y segundo escalón:

- Tensión en terminales previa al primer escalón: 0,9987 *pu*.
- Tensión en terminales de pico del primer escalón: 1,0745 *pu*.
- Tensión en terminales en régimen luego del primer escalón: 1,0724 *pu*.
- Tiempo de subida del primer escalón: 0,2118 *seg*.
- Tiempo de asentamiento del primer escalón: 0,2838 *seg*.
- Tensión en terminales previa al segundo escalón: 1,0724 *pu*.
- Tensión en terminales en régimen luego del segundo escalón: 0,9992 *pu*.
- Tiempo de bajada del segundo bajada: 0,1801 *seg*.
- Tiempo de asentamiento del segundo escalón: 0,2239 *seg*.

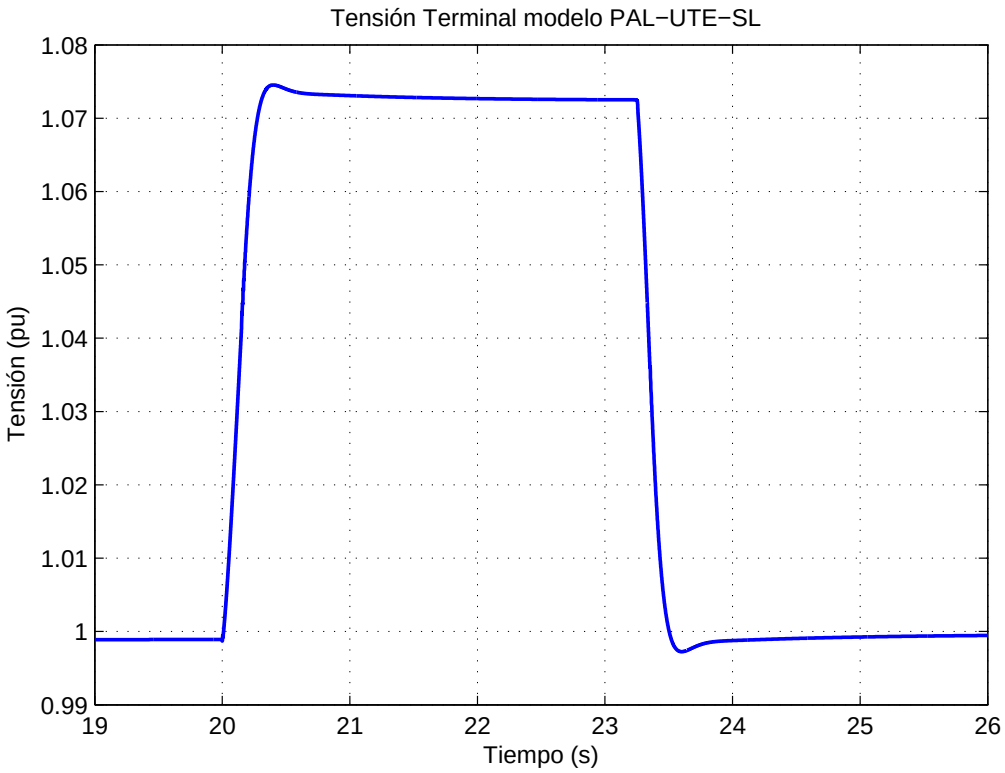


Figura 6.14: Respuesta de la tensión en terminales para el escalón en Vterm

En las figuras 6.15, 6.16, 6.17 y 6.18 se observa con más detalle los tiempos de subida y asentamiento del primer escalón, y el de bajada y de asentamiento del segundo escalón respectivamente.

Los tiempos se calcularon de igual manera que para los de la documentación de UTE mostrados en 6.1.3.

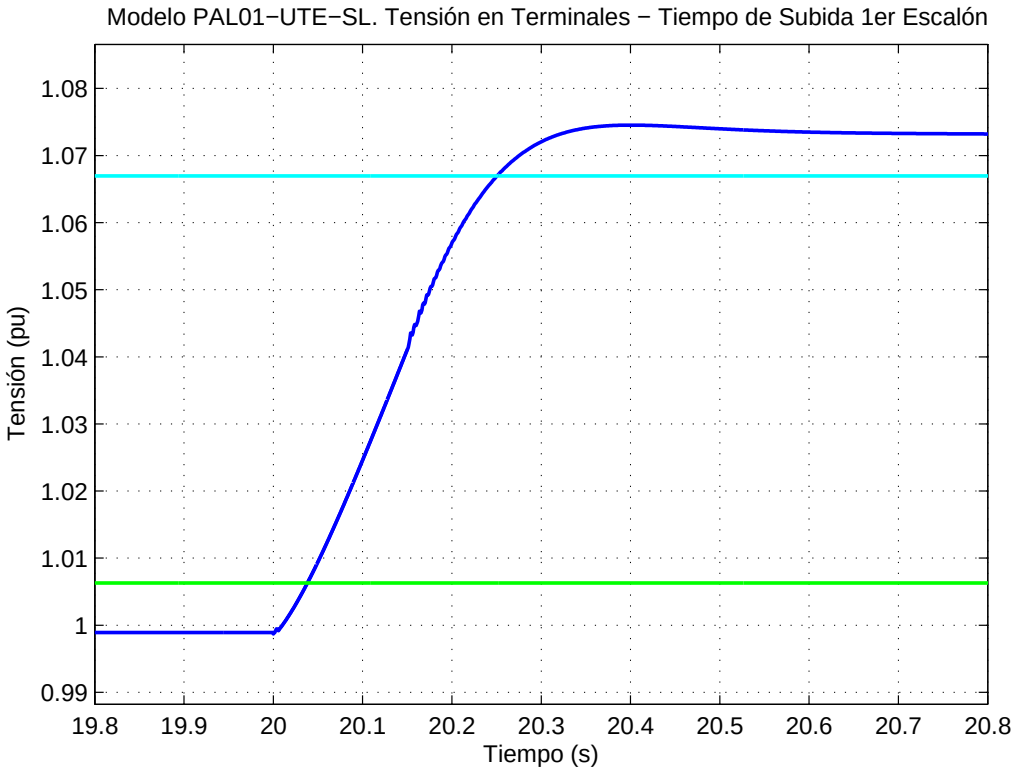


Figura 6.15: Respuesta de la tensión en terminales, cálculo del tiempo de subida primer escalón

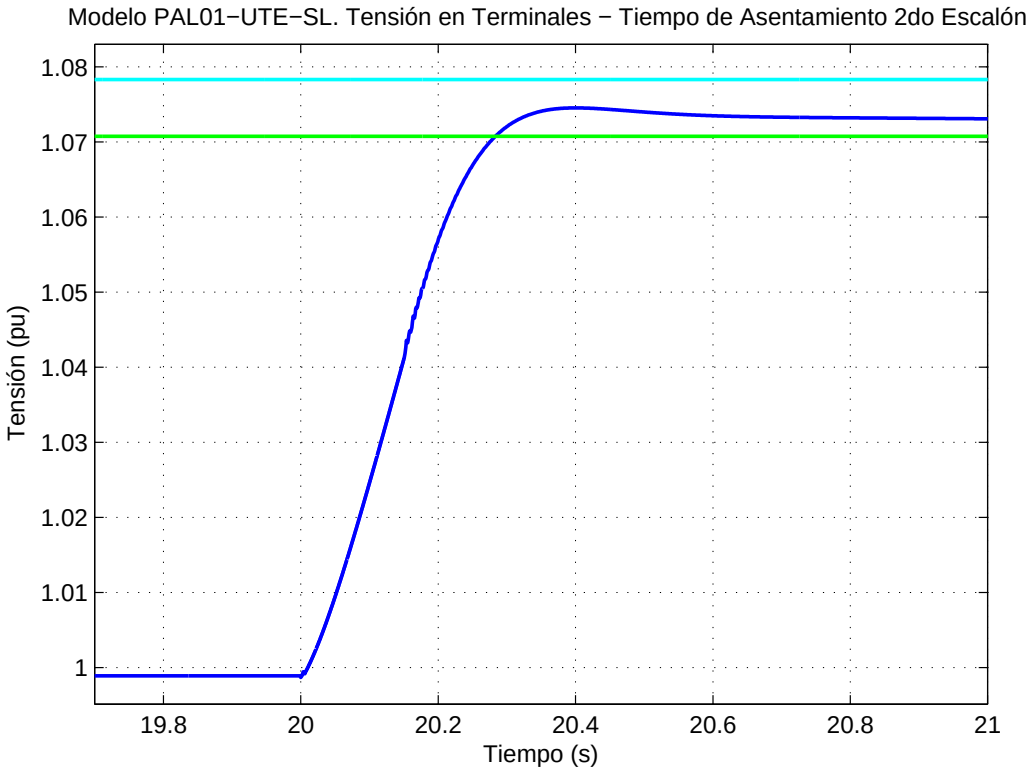


Figura 6.16: Respuesta de la tensión en terminales, cálculo del tiempo de asentamiento primer escalón

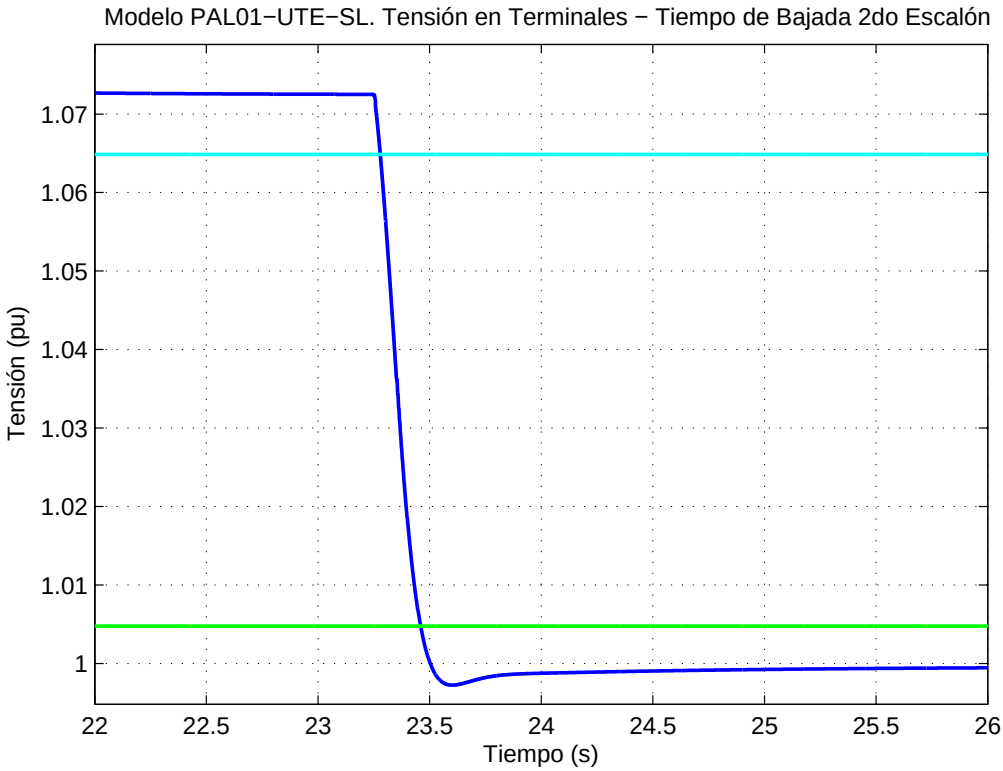


Figura 6.17: Respuesta de la tensión en terminales, cálculo del tiempo de bajada del segundo escalón

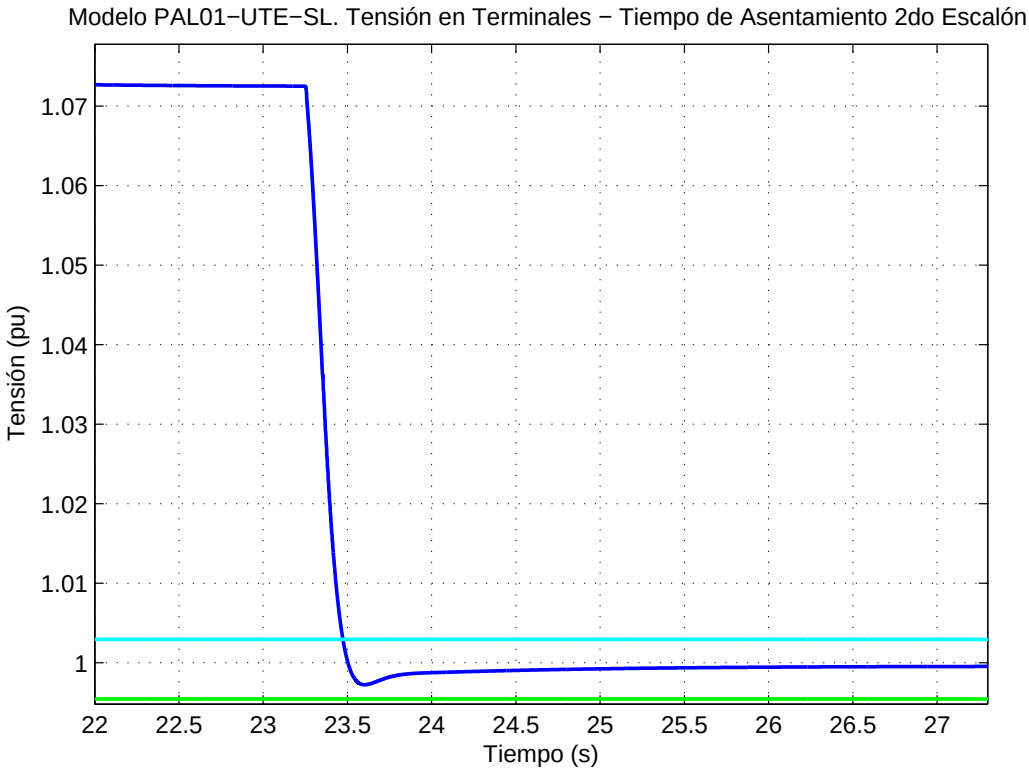


Figura 6.18: Respuesta de la tensión en terminales, cálculo del tiempo de asentamiento del segundo escalón

Comparación Modelo PAL-UTE vs Modelo PAL-UTE-SL.

Luego del estudio por separado de las simulaciones en PSS/E y Simulink respectivamente, se comparan ambos resultados.

Tensión de Excitación.

1. **Valores de régimen primer escalón.**
   Del estudio anterior, se obtiene que para el modelo PAL01-UTE, el valor de régimen antes de aplicar el primer escalón, es $E_{FD_{inicial}} = 1{,}1\ pu$, el valor de sobretiro es 3,8 pu y el valor de régimen final es 1,2 pu. Para el modelo PAL01-UTE-SL, estos valores son: 1,1133, 3,7390 y 1,3123 pu, respectivamente.

   Con estos resultados, se puede calcular el error relativo en cada uno de los casos, se nota que para el primero éste es despreciable.

$$e_{rel_{sobretiro}} = \frac{3{,}8 - 3{,}7}{3{,}8} \cdot 100 = 2{,}6\,\% \tag{6.1}$$

$$e_{rel_f} = \frac{1{,}2 - 1{,}3}{1{,}2} \cdot 100 = 8{,}3\,\% \tag{6.2}$$

2. **Tiempos primer escalón.**
   Para el PAL-UTE, los valores de tiempo hallados para la saturación, de bajada y de asentamiento son: 0,15 seg, 0,10 seg y 0,20 seg, respectivamente. Para PAL01-UTE-SL, los valores son: 0,1541 seg, 0,1147 seg y 0,2797 seg. El error en el tiempo de saturación es despreciable, y para los otros casos es:

$$e_{rel_{bajada}} = \frac{0{,}10 - 0{,}11}{0{,}10} \cdot 100 = 10\,\% \tag{6.3}$$

$$e_{rel_{asentamiento}} = \frac{0{,}20 - 0{,}28}{0{,}20} \cdot 100 = 40\,\% \tag{6.4}$$

3. **Valores de régimen segundo escalón.**
   Para el modelo PAL-UTE, el valor de régimen antes de aplicar el segundo escalón, es $E_{FD_{inicial}} = 1{,}2$ pu, el primer mínimo es $-2{,}4\ pu$, el segundo es $-2{,}3\ pu$ y el valor final de régimen es 1,1 pu. Los valores para el modelo PAL01-UTE-SL son: 1,3123 pu, $-2{,}4200\ pu$, $-2{,}33493\ pu$ y 1,0950 pu, respectivamente.

   Al calcular el error relativo, se nota que el único que no se desprecia es el primero:

$$e_{rel_i} = \frac{1{,}2 - 1{,}3}{1{,}2} \cdot 100 = 8{,}3\,\% \tag{6.5}$$

4. **Tiempos segundo escalón.**
   Para el PAL-UTE, los valores de tiempo hallados para el tiempo en saturación, tiempo de subida y de asentamiento del segundo escalón son: 0,10 seg, 0,20 seg y 0,30 seg respectivamente. Para el modelo PAL01-UTE-SL, los valores son: 0,0938 seg, 0,1178 seg y 0,1468 seg.

   Los errores relativos son:

$$e_{rel_{saturacion}} = \frac{0{,}10 - 0{,}09}{0{,}10} \cdot 100 = 10\,\% \tag{6.6}$$

$$e_{rel_{subida}} = \frac{0{,}20 - 0{,}12}{0{,}20} \cdot 100 = 40\,\% \tag{6.7}$$

$$e_{rel_{asentamiento}} = \frac{0{,}30 - 0{,}15}{0{,}30} \cdot 100 = 50\,\% \tag{6.8}$$

Tensión Terminal.

1. **Valores de régimen primer escalón.**
   Del estudio anterior se obtiene que, para el modelo PAL01-UTE el valor de régimen antes de aplicar el primer escalón, es $E_{TERM_{inicial}} = 1{,}000\ pu$, el valor de sobretiro es 1,075 *pu* y el valor de régimen final es 1,073 *pu*. Para el modelo PAL01-UTE-SL, estos valores son: 0,9987 *pu*, 1,0745 *pu* y 1,0724 *pu*, respectivamente.

   Con estos resultados, se puede calcular el error relativo en cada uno de los casos.

$$e_{rel_{inicial}} = \frac{1{,}000 - 0{,}999}{1{,}000} \cdot 100 = 0{,}1\,\% \tag{6.9}$$

$$e_{rel_{sobretiro}} = \frac{1{,}075 - 1{,}074}{1{,}075} \cdot 100 = 0{,}1\,\% \tag{6.10}$$

$$e_{rel_{final}} = \frac{1{,}073 - 1{,}072}{1{,}073} \cdot 100 = 0{,}1\,\% \tag{6.11}$$

2. **Tiempos primer escalón.**
   Para el modelo PAL-UTE, los valores de tiempo hallados para el tiempo de subida y de asentamiento son: 0,20 *seg* y 0,30 *seg*, respectivamente. Para el modelo PAL01-UTE-SL, los valores son: 0,2118 *seg* y 0,2838 *seg*.

   Los errores relativos son los siguientes:

$$e_{rel_{subida}} = \frac{0{,}20 - 0{,}21}{0{,}20} \cdot 100 = 5{,}0\,\% \tag{6.12}$$

$$e_{rel_{bajada}} = \frac{0{,}20 - 0{,}28}{0{,}20} \cdot 100 = 6{,}7\,\% \tag{6.13}$$

3. **Valores de régimen segundo escalón.**
   Se obtiene que, para el modelo PAL-UTE, el valor de régimen antes de aplicar el segundo escalón es $E_{TERM_{inicial}} = 1{,}073\ pu$, y el valor final de régimen es 1,000 *pu*. Los valores del modelo PAL01-UTE-SL son 1,0724 y 0,9992 *pu*, respectivamente.

   Con estos resultados, se calcula el error relativo en cada uno de los casos:

$$e_{rel_{inicial}} = \frac{1{,}073 - 1{,}074}{1{,}073} \cdot 100 = 0{,}1\,\% \tag{6.14}$$

$$e_{rel_{final}} = \frac{1{,}000 - 0{,}999}{1{,}000} \cdot 100 = 0{,}1\,\% \tag{6.15}$$

4. **Tiempos segundo escalón.**
   Para el PAL-UTE, los valores de tiempo hallados para el tiempo de bajada y de asentamiento del segundo escalón son de 0,30 *seg* y 0,40 *seg*, respectivamente. Los valores del modelo PAL-UTE-SL son: 0,1801 *seg* y 0,2239 *seg*.

$$e_{rel_{bajada}} = \frac{0{,}30 - 0{,}18}{0{,}30} \cdot 100 = 40\,\% \tag{6.16}$$

$$e_{rel_{subida}} = \frac{0{,}40 - 0{,}22}{0{,}40} \cdot 100 = 45\,\% \tag{6.17}$$

$$e_{rel_{asentamiento}} = \frac{0{,}30 - 0{,}15}{0{,}30} \cdot 100 = 50\,\% \tag{6.18}$$

6.2. Sistema de Excitación PAL01 de Palmar según estándar IEEE.

6.2.1. Modelo PAL01-IEEE-SL.

El sistema de excitación de Palmar corresponde a un sistema de excitación estático y por lo tanto, se buscó, dentro de los sistemas estáticos de la norma, el modelo que mejor se le aproxime. El procedimiento para encontrar este modelo fue, identificar las particularidades de PAL01 para ver si se podían modelar según la norma. Lo que más se tuvo en cuenta para acotar los modelos estándar, fue que PAL01 presenta un bloque que multiplica la tensión terminal por la tensión de referencia. Luego de esto, se buscó mantener la cantidad de polos, lo que lleva a que el estándar elegido es: ST3A, que se puede ver en la figura 6.19.

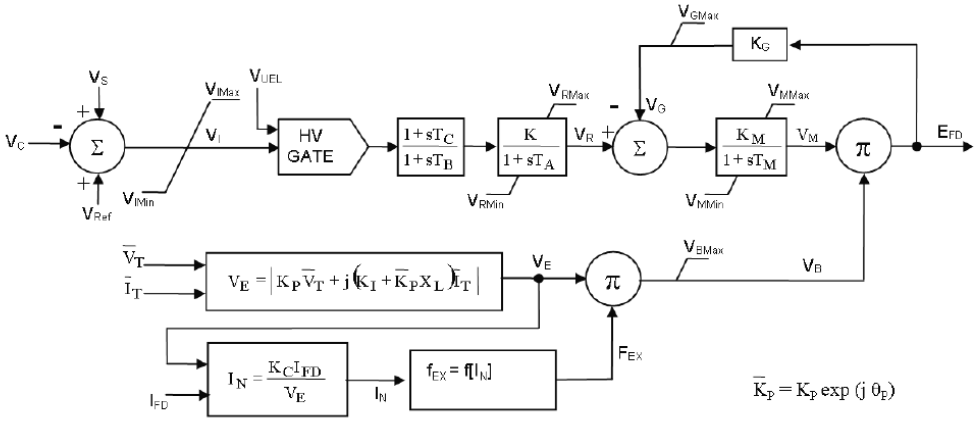


Figura 6.19: Modelo estándar IEEE: ST3A

A continuación se describe la implementación del modelo estándar ST3A de la norma IEEE en Simulink, que da lugar al modelo PAL01-IEEE-SL.

Bloque multiplicador.

Antes de implementar el modelo ST3A en Simulink, se hizo un estudio para poder determinar si es posible hacer que la señal V_B se pueda hacer igual a la tensión terminal. Para esto, se parte del anexo D de la norma para visualizar las funciones del bloque *FEX*, como se observa la figura 6.20.

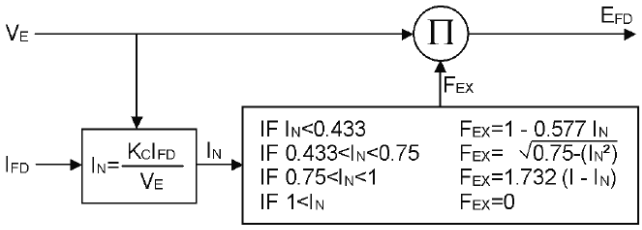


Figura 6.20: Bloque FEX

Para lograr que $V_B = V_T$ se deben elegir las constantes tal que:

- $Fex = 1$.
- $V_E = V_T$.

Para que $Fex = 1$, la señal I_N debe ser igual a cero, ya que, como se observa en la figura 6.20 y al ser $I_N < 0{,}433$, se cumple la ecuación $Fex = 1 - 0{,}577 I_N$, y por lo tanto $Fex = 1$. Para que $I_N = 0$, se debe cumplir que $K_C = 0$.

Resta cumplir que $V_E = V_T$, lo que se logra de la siguiente manera:

$$\begin{cases} K_P = 1 \\ \theta_P = 0 \\ x_L = 0 \\ K_I = 0 \end{cases}$$

Entonces, $V_B = V_T$ y, por lo tanto, no se requiere implementar en Simulink los bloques que dan como resultado V_B, ya que se toma directamente la tensión de referencia.

Bloques de transferencia con límites de non-windup.
La implementación de estos bloques se hizo de la misma manera que se hizo con Baygorria, solo se cambiaron los valores correspondientes. Como ejemplo, se observa en la figura 6.21, la implementación del bloque de ganancia K_A y polo en $\frac{-1}{T_A}$. Los parámetros de estos bloques serán calculados en la sección 6.2.2.

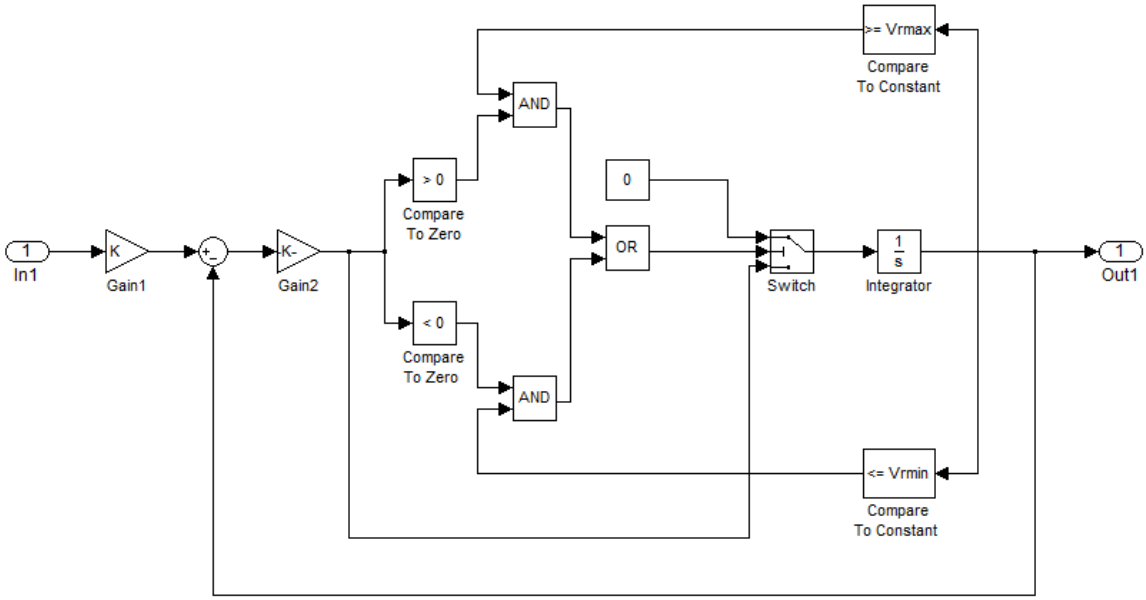


Figura 6.21: Implementación bloque de transferencia con límites de non-windup

Compensación cero-polo.
La compensación cero-polo se implementó directamente con el bloque de transferencia racional que tiene la librería de Simulink. El cero $s = -1/T_C$ y el polo $s = -1/T_B$ se dejaron como parámetros que serán calculados en la sección 6.2.2.

HV-Gate.
Este bloque tiene dos entradas y una salida, que corresponde a la que sea más grande de las dos entradas. La implementación se puede ver en la figura 6.22, en donde el *switch* conmuta entre las dos entradas si la resta es mayor o menor que cero. El valor de V_{UEL} se dejó lo suficientemente pequeño, para que no influya en el sistema al no estar modelado en PAL01-UTE-SL.

Ajuste V_{ref}.
Al igual que se comentó en la sección 6.1.2 el modelo PAL01-UTE-SL presenta un ajuste en V_{ref} y el mismo no se considera en el estándar de la IEEE. Por lo tanto, lo que se hizo fue implementar este bloque, y su salida es la entrada al estándar de la IEEE. El bloque Ajuste V_{ref} se puede observar en la figura 6.23.

Realimentación de la tensión de excitación.
La realimentación, que se puede observar en la figura 6.19, en donde al lazo principal de control se le resta

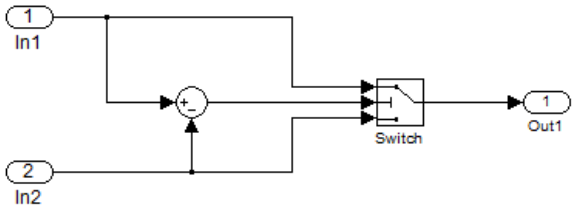


Figura 6.22: Implementación bloque HV-GATE

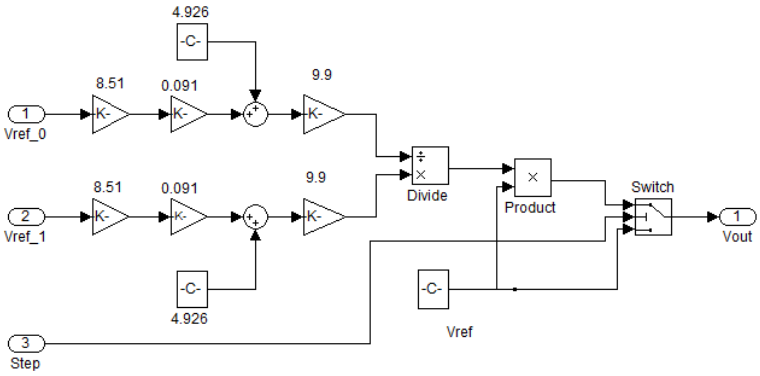


Figura 6.23: Implementación bloque Ajuste V_{ref}

la señal V_G no es considerada ya que este comportamiento no está presente en el modelo PAL01-UTE-SL. Para esto alcanza con anular la constante K_G. Por lo tanto $K_G = 0$.

Saturación $V_{IMAX} - V_{IMIN}$.
Esta saturación se modeló, pero los límites se eligieron tal que no influyan en el sistema. Por lo tanto, $V_{IMAX} = -V_{IMIN} = \infty$

Resto del sistema.
El resto del sistema (máquina sincrónica, máquina primaria y carga trifásica) fueron implementados exactamente igual al modelo PAL01-UTE-SL.

Modelo.
En la figura 6.24 se observa el modelo PAL01-IEEE-SL.

6.2.2. Parámetros del modelo PAL01-IEEE-SL.

En esta sección se va a describir el procedimiento realizado para la elección de los parámetros del modelo PAL01-IEEE-SL. En primer lugar, lo que se hizo fue hacer que los parámetros de la saturación sean lo suficientemente grandes para que no influyan en la respuesta cuando se aplica un escalón en la tensión de referencia de 1 *pu* a 1,1 *pu*. Con esta simulación se ajustan las ganancias y los polos. Luego de que se tienen las ganancias y los polos, se aplica un escalón de 1 *pu* a 1,4 *pu* y se ajustan los valores de saturación.

Ajuste de parámetros según escalón de 1 **a** 1,1 *pu*.

Para realizar los ajustes de los parámetros al aplicar un escalón en V_{ref} de 1 a 1,1 *pu* lo que se hizo fue tratar de mantener los polos y ceros que tiene el sistema PAL01-UTE-SL. Por lo tanto, lo primero que se hizo fue dejar los ceros y polos fijos y con el "Control and Estimation Tool Manager" encontrar los valores de K y K_M. Las condiciones iniciales para estas constantes fueron:

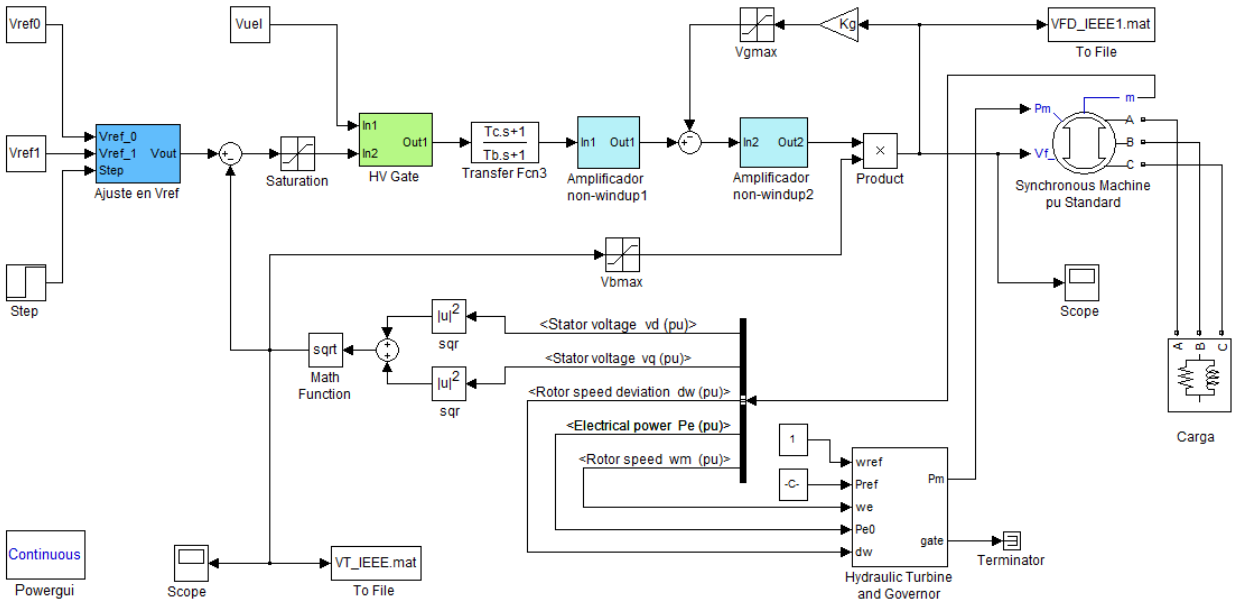


Figura 6.24: Modelo PAL01-IEEE-SL

$$\begin{cases} K_A = 200 \\ K_M = 7{,}93 \end{cases}$$

Estos valores se eligieron de esta manera, porque están tomados como ejemplo en la norma.
La estimación de estos parámetros da como resultado:

$$\begin{cases} K_A = 221 \\ K_M = 0{,}7024 \end{cases}$$

Por lo tanto, en una primera instancia se obtuvieron los siguientes valores de ganancias, ceros y polos:

$$\begin{cases} K_A = 221 \\ K_M = 0{,}7024 \\ T_C = 2{,}5 \\ T_B = 5 \\ T_A = 0{,}0059 \\ T_M = 0{,}002 \end{cases}$$

Ajuste de parámetros según escalón de 1 **a** 1,4 pu**.**

Una vez que se tienen los valores antes mencionados, se hace el ajuste de valores para la saturación. Para esto se utilizó el "Control and Estimation Tool Manager" pero dejando fijos los valores que ya fueron encontrados y libres (para ser calculados) los valores correspondientes a la saturación. Para poder ajustar los parámetros de saturación, se aplicó un escalón de 1 a 1,4 en la tensión de referencia. El resultado del estimador es el siguiente:

$$\begin{cases} V_{Bmax} = 0{,}9875 \\ V_{Rmax} = 5{,}7 \\ V_{Mmax} = 3{,}786 \\ V_{Mmin} = -3{,}21 \\ V_{Rmin} = -3{,}21 \end{cases}$$

De esta manera, quedan definidos los parámetros de los bloques del modelo PAL01-IEEE-SL.

6.2.3. Validación del Modelo PAL01-IEEE-SL.

En la presente sección, se realizará la validación del sistema de excitación del modelo de PAL01-IEEE-SL, que cumple con los estándar de la IEEE, comparándolo con el modelo PAL01-UTE-SL que se validó en el capítulo anterior.

Se desarrollarán distintas simulaciones para tres saltos distintos en (V_{REF}), siempre comenzando en 1,0 *pu*, y llevándolo a 1,4, 1,1 y 0,7 *pu*. En todos los casos, la carga que se utilizó fue la misma que se halló para validar el modelo de UTE, que se mostró en 6.1.3. Se hará especial hincapié en la simulación del escalón hasta 1,4 *pu*, en sus valores de régimen y constantes de tiempo. Para las otras simulaciones solo se hará una comparación gráfica, sin realizar un análisis exhaustivo de las mismas.

Simulación del Modelo PAL01-IEEE-SL.

En primera instancia se observaron las respuestas temporales para un escalón en (V_{REF}) en el que el sistema satura, de manera de comparar las respuestas de ambos modelos PAL01-IEEE-SL y PAL01-UTE-SL. Por esta razón, la simulación a estudiar es la que respecta al escalón de 1,0 a 1,4 *pu*. En la figura 6.25 se observa la respuesta en la tensión de terminales y en la tensión de excitación. Se observa que el escalón se aplica a los 15 *seg*.

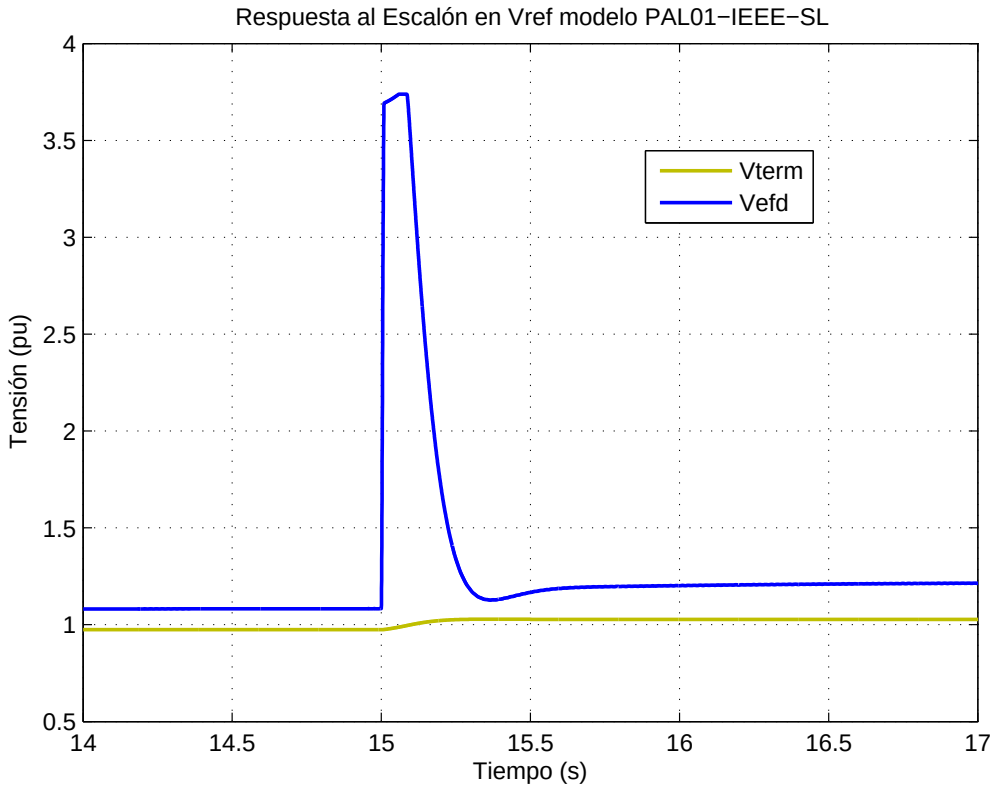


Figura 6.25: Respuesta del modelo PAL01-IEEE-SL, escalón de 1.0 a 1.4 en tensión de referencia

Comparación Modelo PAL01-IEEE-SL vs. Modelo PAL01-UTE-SL

Para validar el modelo de PAL01-IEEE-SL, fue necesario simular este modelo junto con el modelo PAL01-UTE-SL. A continuación se realizará la comparación de las respuestas temporales de ambos modelos. Se analizarán las dos variables temporales, la tensión de excitación y la tensión en terminales del generador.

Tensión de Excitación.

En el gráfico 6.26, se observa la comparación de la tensión de excitación para ambos modelos. Cualitati-

vamente se observa que las respuestas de ambos modelos son muy similares. Con el fin de profundizar más en este estudio, se hará énfasis en los valores en régimen y las constantes de tiempo de las respuestas.

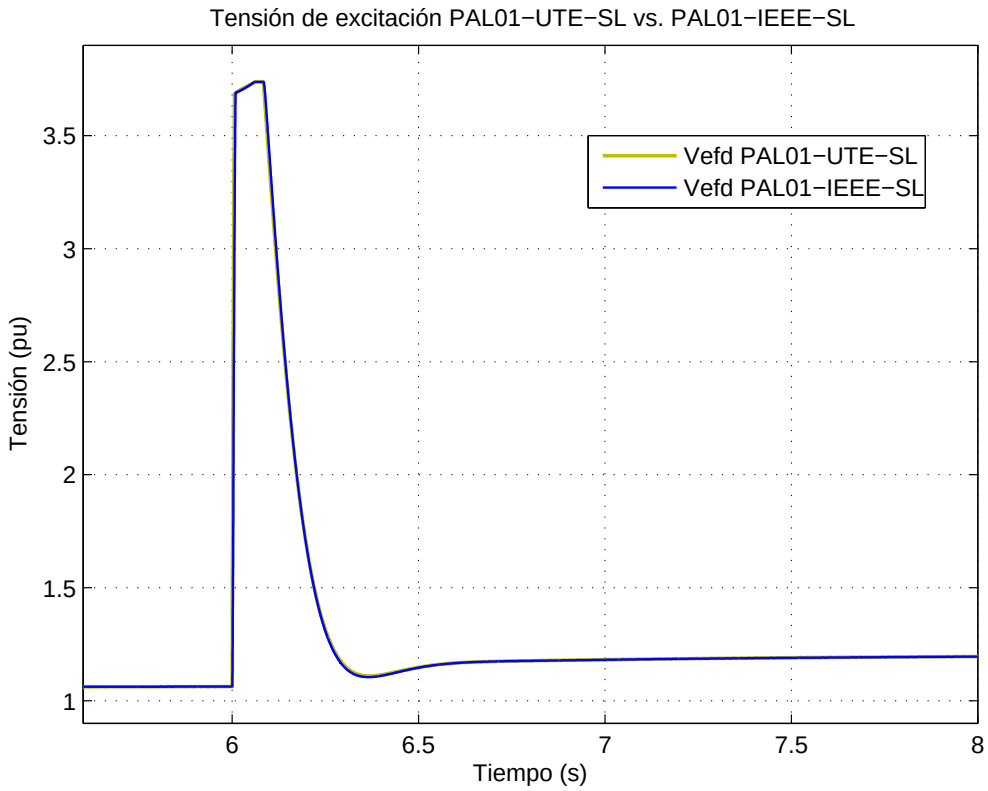


Figura 6.26: Tensión de excitación escalón a 1.4 - Modelos: PAL01-IEEE-SL vs. PAL01-UTE-SL.

Valores de Régimen.

Para el modelo PAL01-IEEE-SL los valores de régimen: antes de aplicar el escalón, en su punto máximo y en régimen luego de aplicado el escalón son: 1,0827 *pu*, 3,7388 *pu* y 1,1796 *pu*, respectivamente. Para el modelo PAL01-UTE-SL estos valores son: 1,0822 *pu*, 3,7390 *pu* y 1,1800 *pu*. Con lo que se obtienen los siguientes errores relativos:

$$e_{rel_{inicial}} = \frac{1{,}0827 - 1{,}0822}{1{,}0822} \cdot 100 = 0{,}05\,\% \tag{6.19}$$

$$e_{rel_{maximo}} = \frac{3{,}7388 - 3{,}7390}{3{,}7390} \cdot 100 = 0{,}005\,\% \tag{6.20}$$

$$e_{rel_{final}} = \frac{1{,}1796 - 1{,}1800}{1{,}1800} \cdot 100 = 0{,}03\,\% \tag{6.21}$$

Constantes de Tiempo.

Dentro de las constantes de tiempo, se calcularon los tiempos de subida, bajada y asentamiento (a partir del tiempo en que se aplica el escalón en V_{ref}).

Para el modelo PAL01-IEEE-SL los valores de los tiempos de subida, bajada y asentamiento son: 0,0061 *seg*, 0,1345 *seg* y 0,2739 *seg*, respectivamente. Estos valores se muestran en las siguientes gráficas 6.27, 6.28 y 6.29.

Para el modelo PAL01-UTE-SL los valores de los tiempos de subida, bajada y asentamiento son: 0,0049 *seg*, 0,1379 *seg* y 0,2757 *seg*. Estos valores se muestran en las siguientes gráficas 6.30, 6.31 y 6.32 respectivamente.

A partir de estos datos se calculan los siguientes errores relativos:

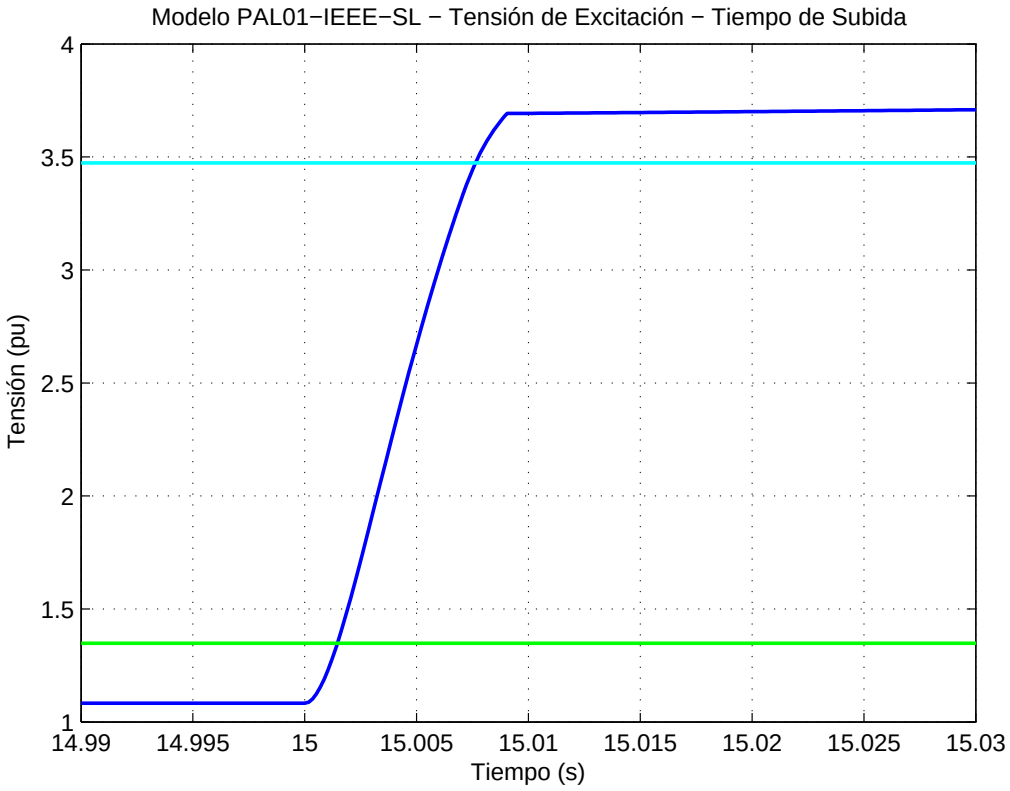


Figura 6.27: Modelo PAL01-IEEE-SL - Tensión excitación escalón a 1.4 - Tiempo de subida.

$$e_{rel_{subida}} = \frac{0{,}0049 - 0{,}0061}{0{,}0061} \cdot 100 = 19\,\% \tag{6.22}$$

$$e_{rel_{bajada}} = \frac{0{,}1345 - 0{,}1379}{0{,}1345} \cdot 100 = 2{,}5\,\% \tag{6.23}$$

$$e_{rel_{asentamiento}} = \frac{0{,}2739 - 0{,}2757}{0{,}2757} \cdot 100 = 0{,}65\,\% \tag{6.24}$$

Tensión Terminal.

En el gráfico 6.33, se observa la comparación de la tensión en terminales para ambos modelos. Cualitativamente se pude ver que las respuestas de ambos modelos son muy similares. Para profundizar más en este estudio se hará énfasis en los valores en régimen y las constantes de tiempo de las respuestas.

Valores de Régimen.

Para el modelo PAL01-IEEE-SL los valores de régimen antes y después de aplicar el escalón son: 0,9743 *pu* y 1,0284 *pu*. Para el modelo PAL01-UTE-SL estos valores son: 0,9743 *pu* y 1,0286 *pu*, con lo que se obtienen los siguientes errores relativos (se desprecia el valor de régimen inicial):

$$e_{relfinal} = \frac{1{,}0286 - 1{,}0284}{1{,}0284} \cdot 100 = 0{,}019\,\% \tag{6.25}$$

Constantes de Tiempo.

Como constantes de tiempo, se calcularon los tiempos de subida y asentamiento (a partir del tiempo en que se aplica el escalón en V_{ref}).

Para el modelo PAL01-IEEE-SL los valores del tiempo de subida y de asentamiento son: 0,1801 *seg* y 0,2479 *seg*. Estos valores se muestran en las siguientes gráficas.

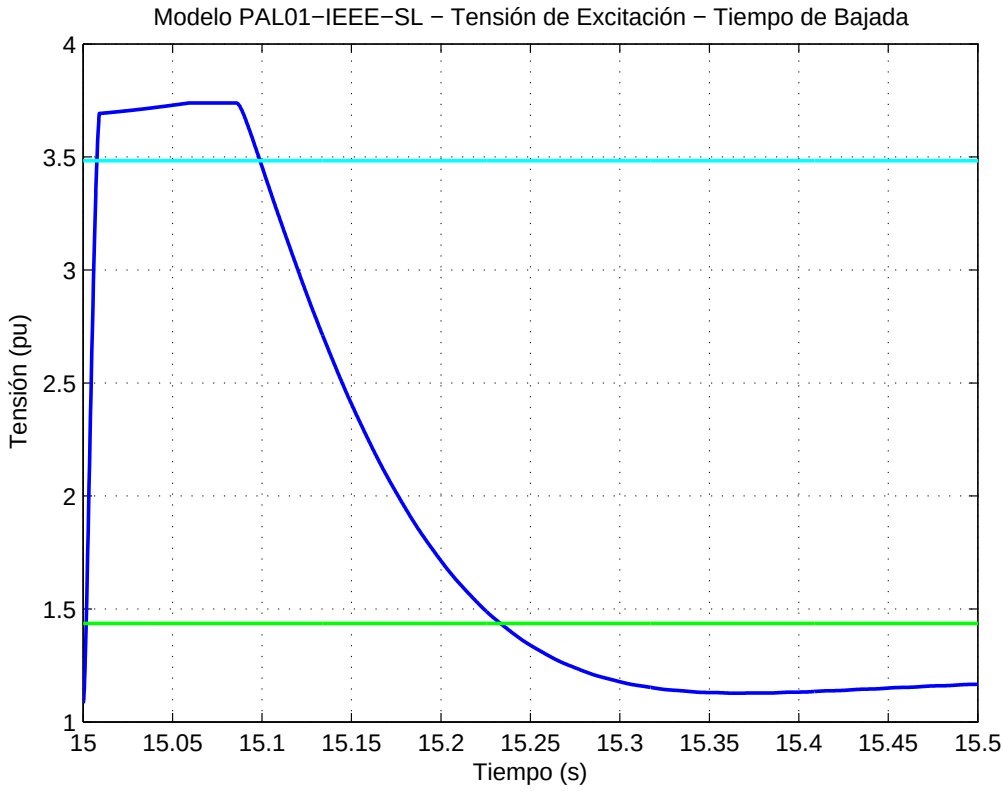


Figura 6.28: Modelo PAL01-IEEE-SL - Tensión excitación escalón a 1.4 - Tiempo de bajada.

Para el modelo PAL01-UTE-SL, los valores de los tiempos de subida y asentamiento son: 0,1813 *seg* y 0,2470 *seg*. Estos valores se muestran en las siguientes gráficas 6.36 y 6.37 respectivamente.

Se calculan los siguientes errores relativos:

$$e_{relsubida} = \frac{0{,}1801 - 0{,}1813}{0{,}1813} \cdot 100 = 0{,}66\,\% \tag{6.26}$$

$$e_{relasentamiento} = \frac{0{,}2479 - 0{,}2470}{0{,}2470} \cdot 100 = 0{,}36\,\% \tag{6.27}$$

Simulaciones Adicionales.

Como se mencionó anteriormente, se analizó la respuesta para el escalón de 1,0 *pu* a 1,4 *pu* en la tensión de referencia. Además, para observar que los parámetros elegidos para el modelo $ST3A$ de la norma de la IEEE no fueran una solución particular para esta simulación, se realizaron dos simulaciones adicionales, un escalón de subida que no provoque la saturación del sistema y uno de bajada que sature.

Escalón de 1,0 *pu* **a** 1,1 *pu* **en** V_{ref}**.**

La primera simulación adicional que se presenta, es un escalón a 1,1 *pu*. En el gráfico 6.38 se observa la comparación de la tensión de excitación de PAL01-IEEE-SL con PAL01-UTE-SL y en la figura 6.39 la tensión en terminales. En ambos casos el sistema no satura para ningún tiempo.

La respuesta para ambos casos es muy similar, tal es así, que no se observan diferencias.

Escalón de 1,0 *pu* **a** 0,7 *pu* **en** V_{ref}**.**

La otra simulación adicional que se presenta es un escalón a 0,7 *pu*. En el gráfico 6.40 se observa la comparación de la tensión de excitación del modelo PAL01-IEEE-SL con PAL01-UTE-SL y en la figura 6.41 la tensión en terminales.

No hay diferencias apreciables entre ambas respuestas.

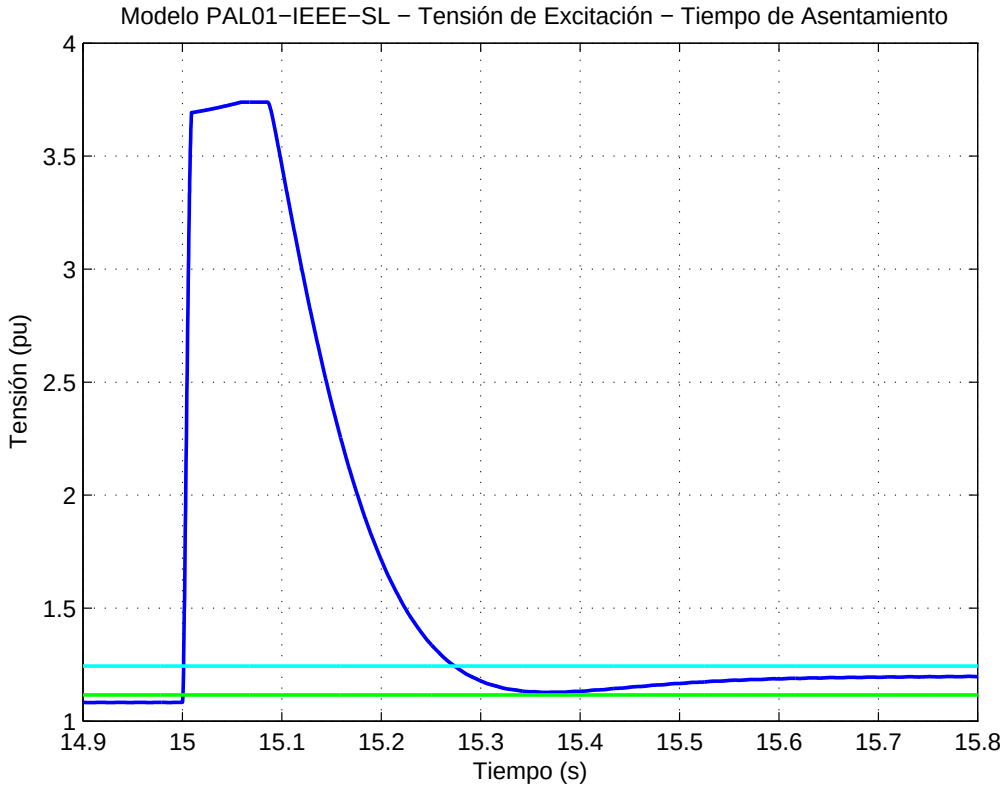


Figura 6.29: Modelo PAL01-IEEE-SL - Tensión excitación escalón a 1.4 - Tiempo de asentamiento.

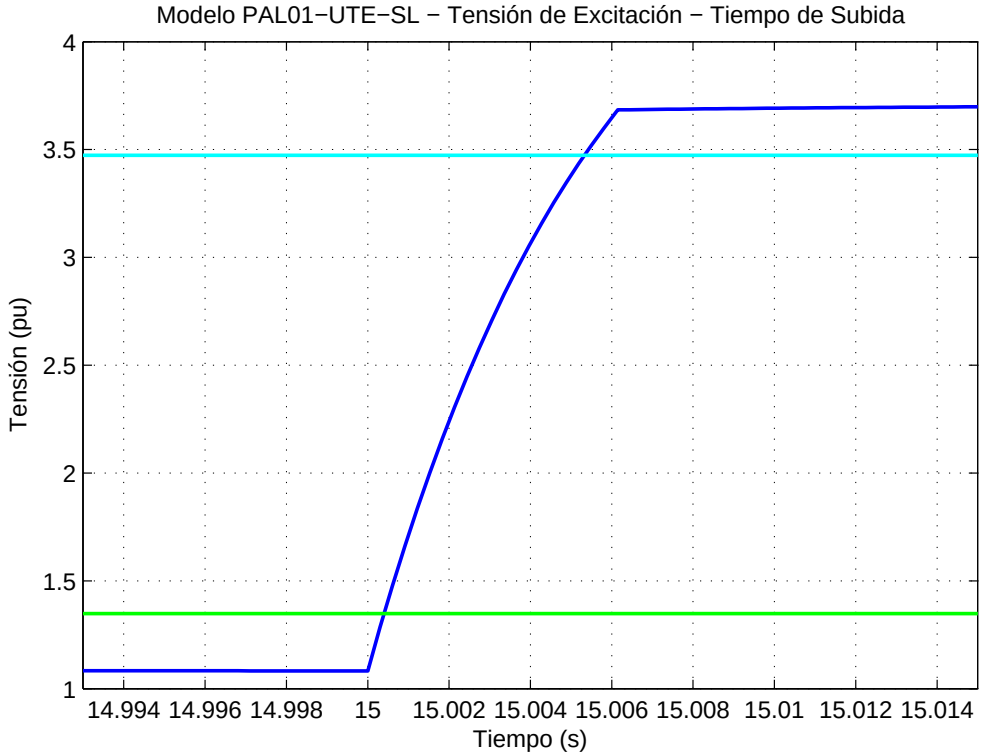


Figura 6.30: Modelo PAL01-UTE-SL - Tensión excitación escalón a 1.4 - Tiempo de subida.

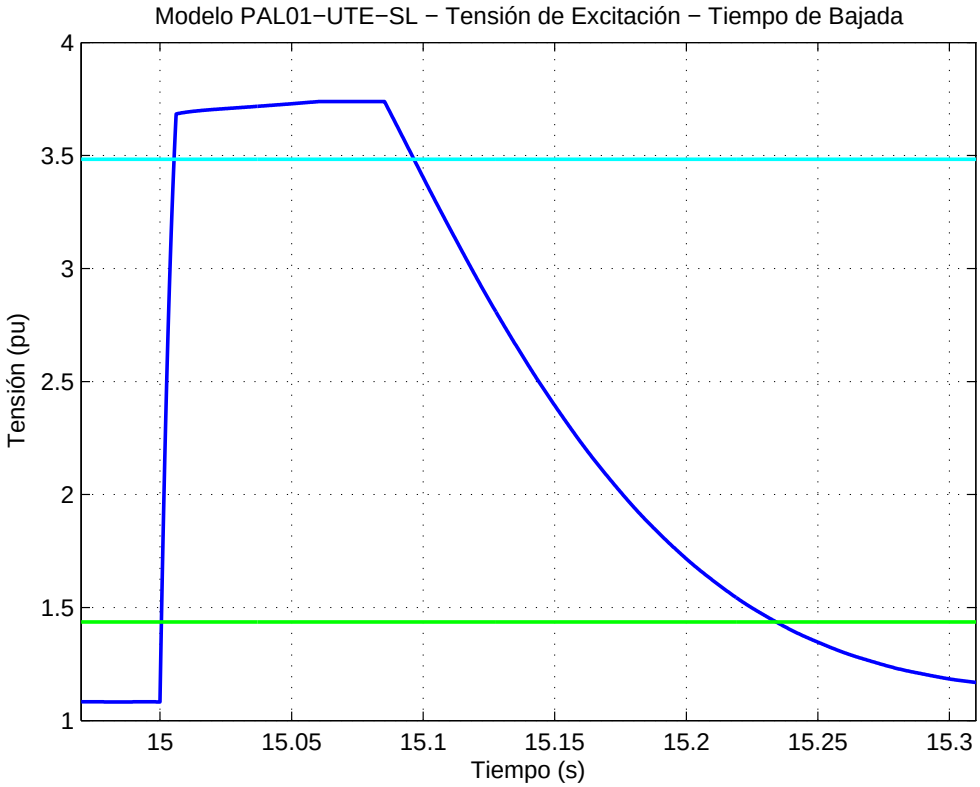


Figura 6.31: Modelo PAL01-UTE-SL - Tensión excitación escalón a 1.4 - Tiempo de bajada.

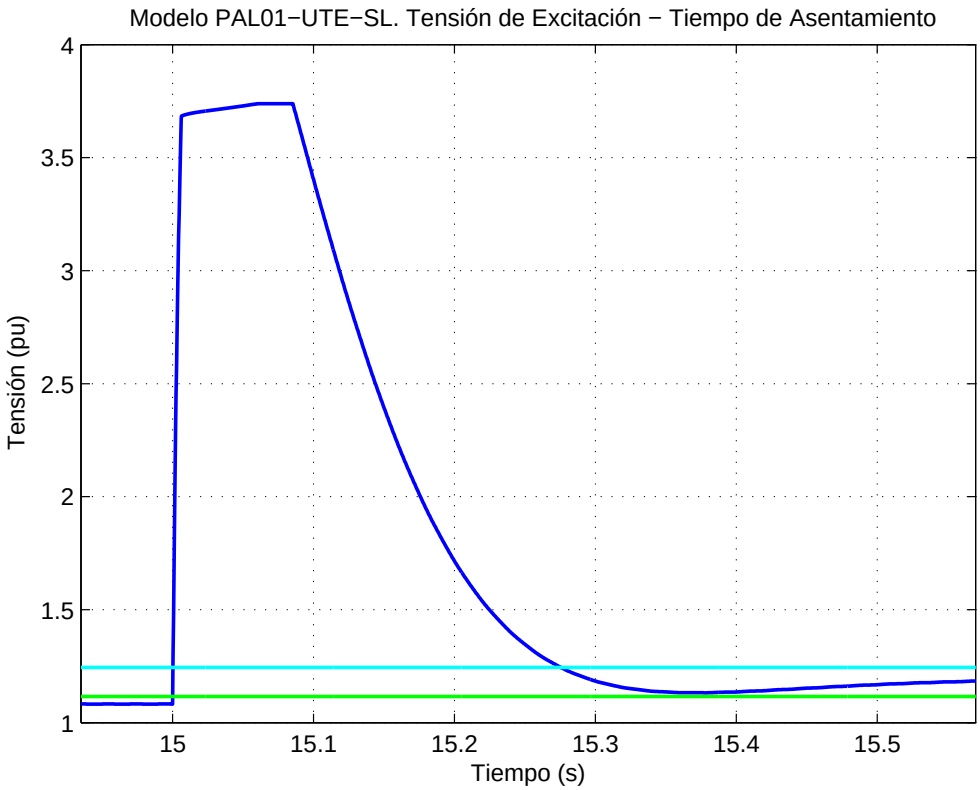


Figura 6.32: Modelo PAL01-UTE-SL - Tensión excitación escalón a 1.4 - Tiempo de asentamiento.

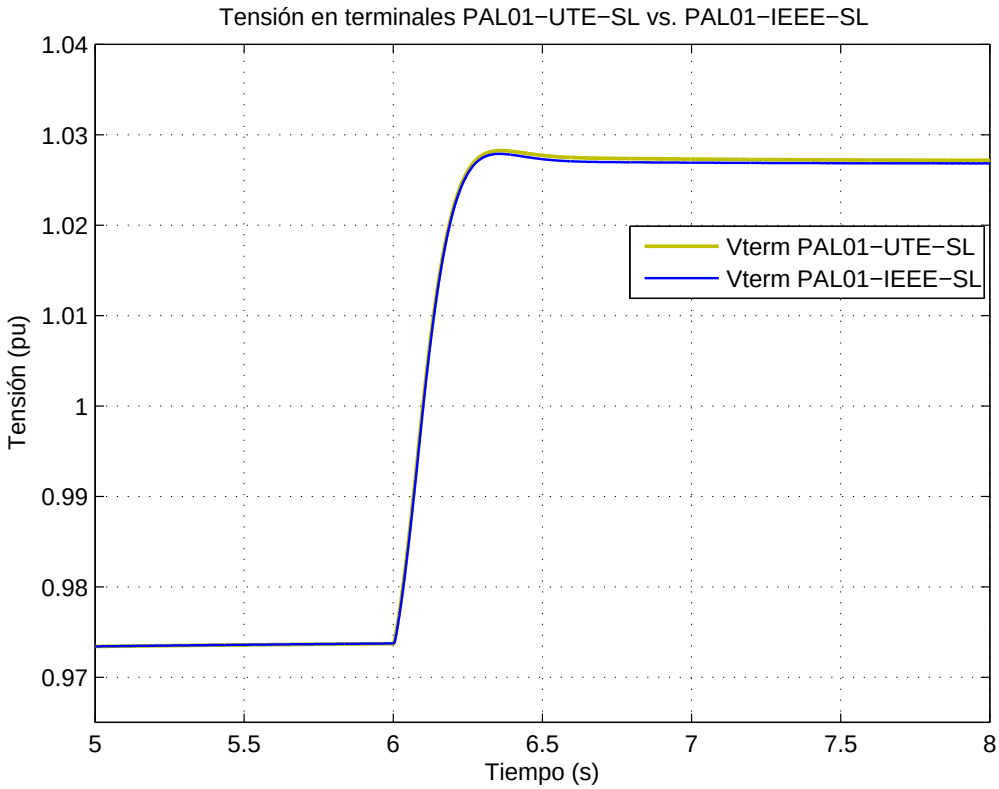


Figura 6.33: Tensión en terminales escalón a 1.4 - Modelos: PAL01-IEEE-SL vs. PAL01-UTE-SL.

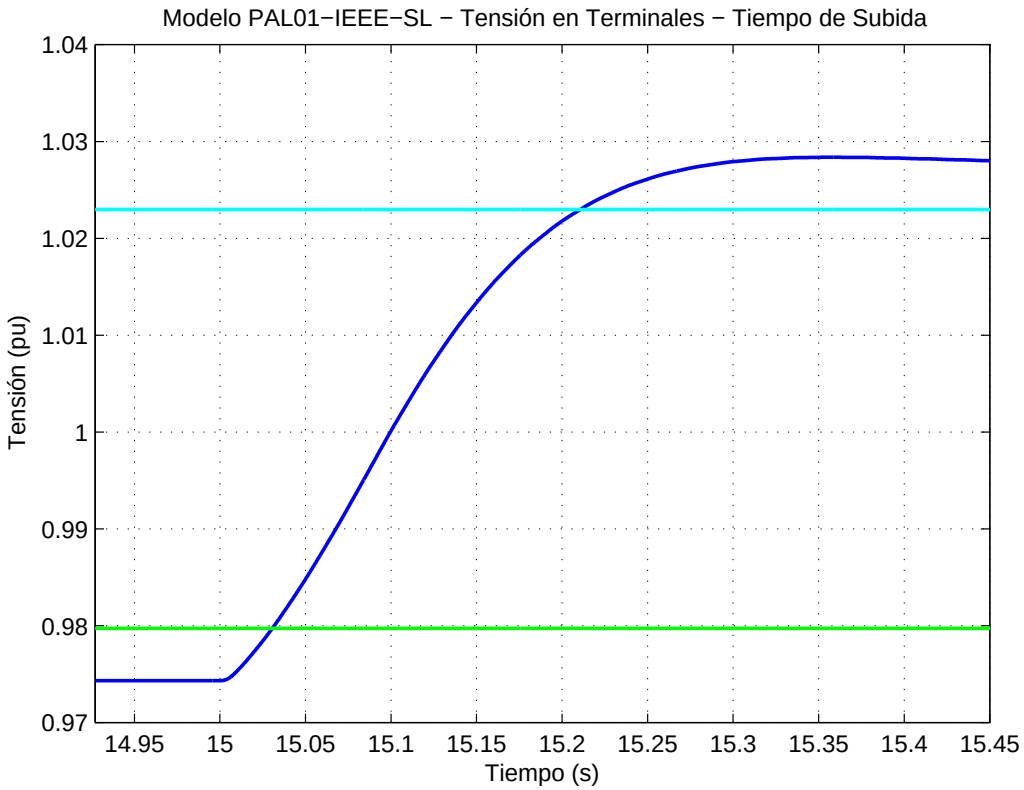


Figura 6.34: Modelo PAL01-UTE-SL - Tensión en terminales escalón a 1.4 - Tiempo de subida.

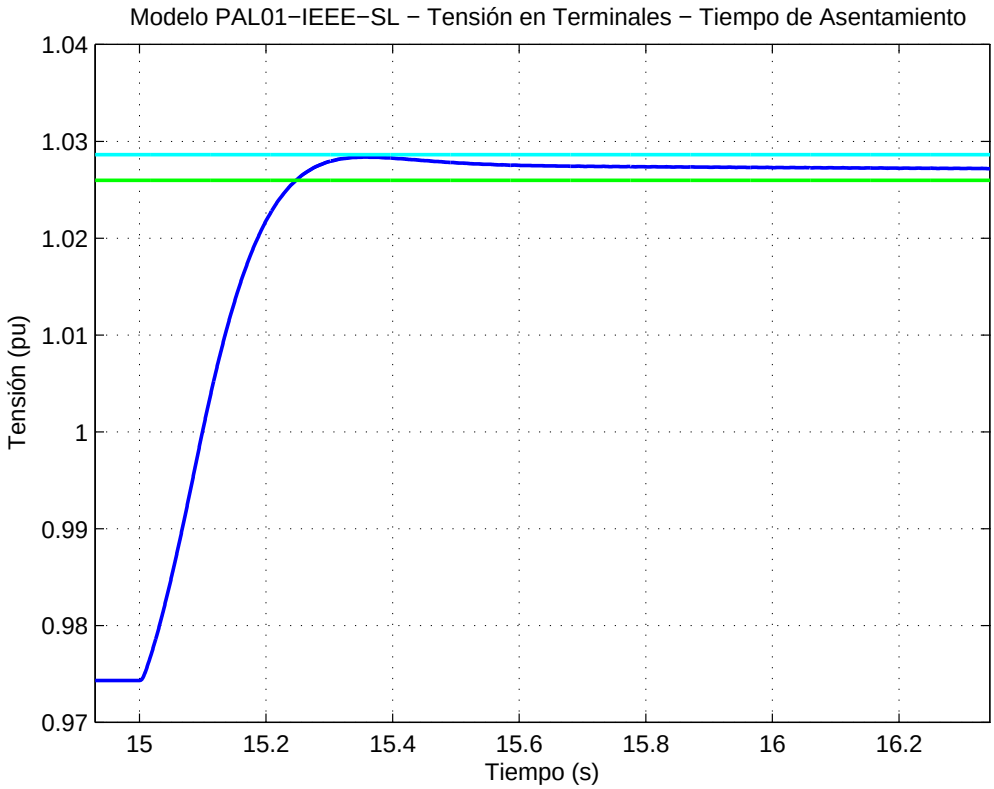


Figura 6.35: Modelo PAL01-IEEE-SL - Tensión terminales escalón a 1.4 - Tiempo de asentamiento.

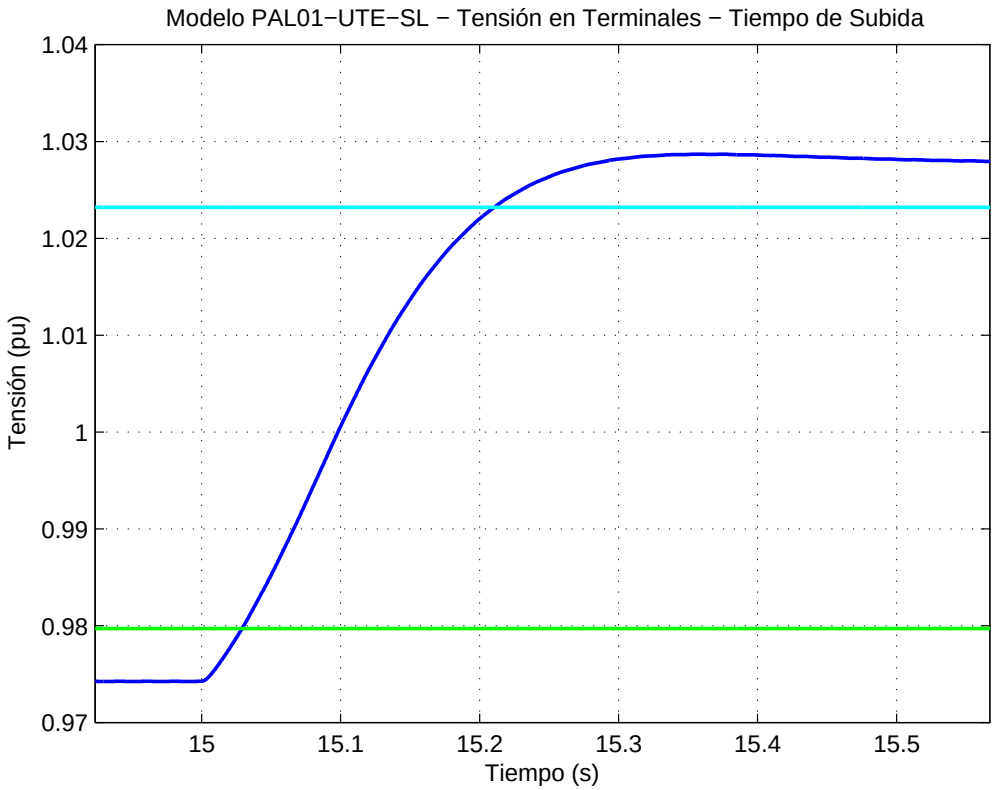


Figura 6.36: Modelo PAL01-UTE-SL - Tensión en terminales escalón a 1.4 - Tiempo de subida.

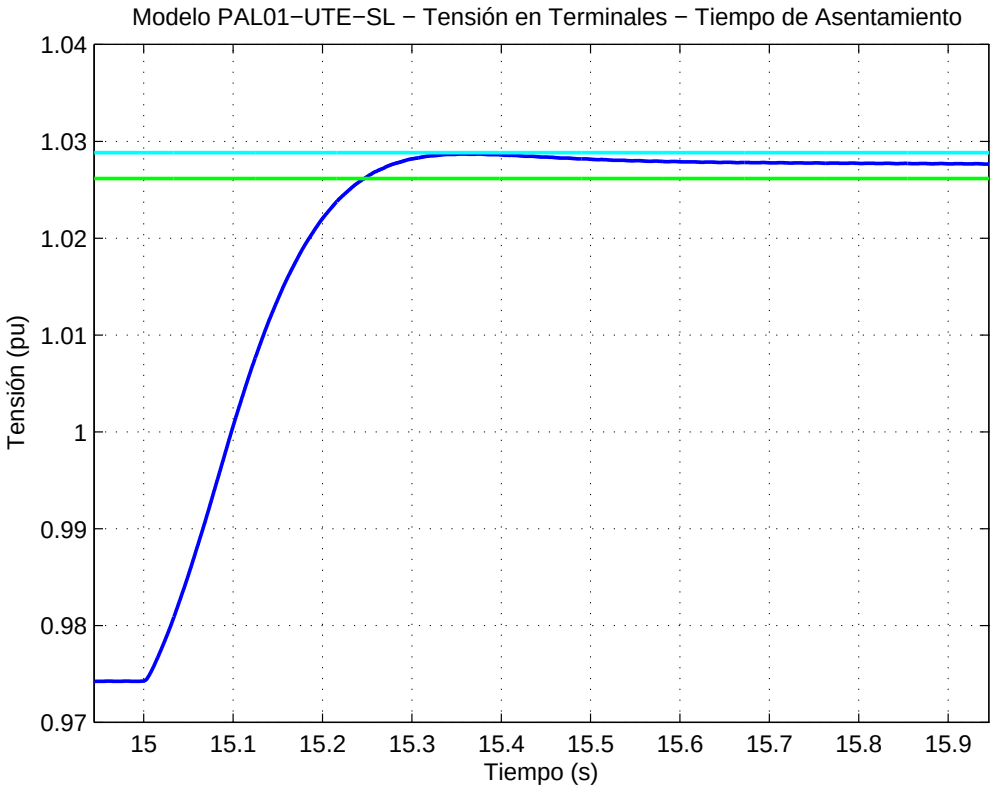


Figura 6.37: Modelo PAL01-UTE-SL - Tensión en terminales escalón a 1.4 - Tiempo de asentamiento.

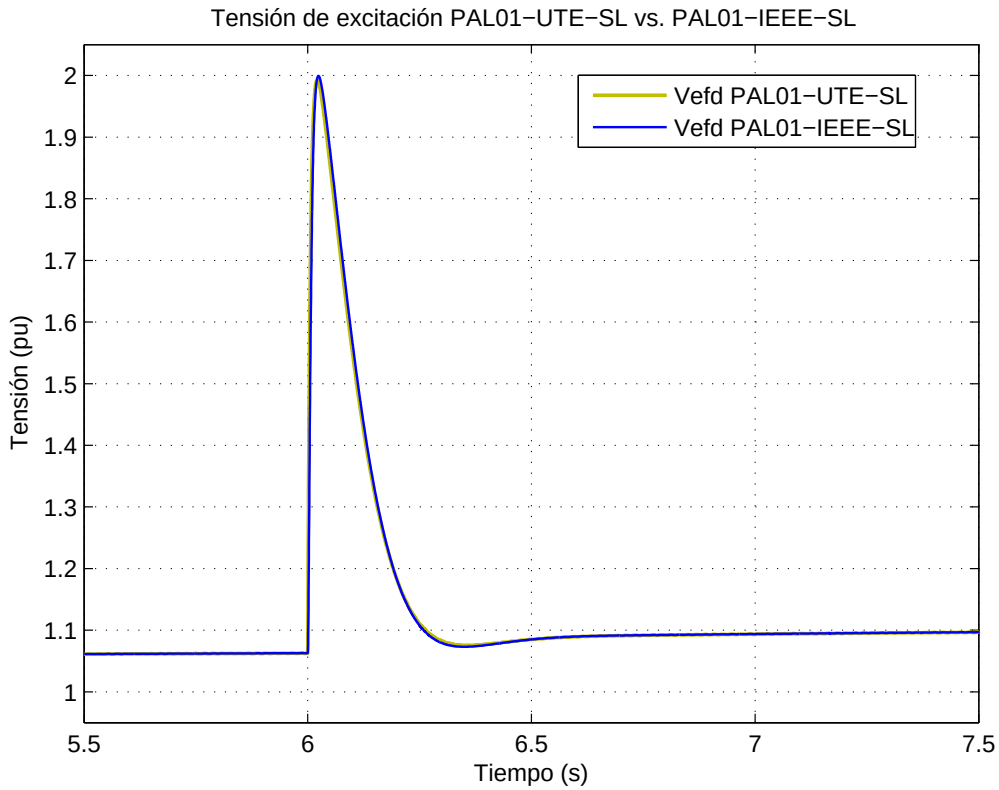


Figura 6.38: Tensión de excitación escalón a 1.1 p.u. - Modelos: PAL01-IEEE-SL vs. PAL01-UTE-SL.

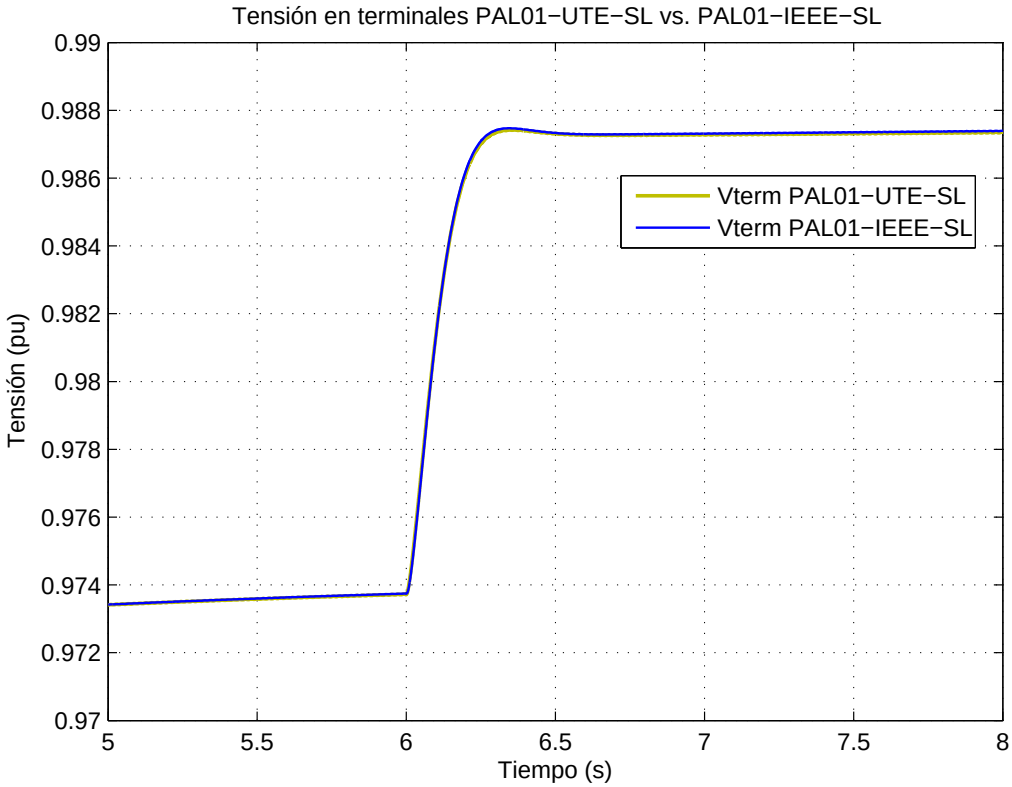


Figura 6.39: Tensión en terminales escalón a 1.1 p.u. - Modelos: PAL01-IEEE-SL vs. PAL01-UTE-SL.

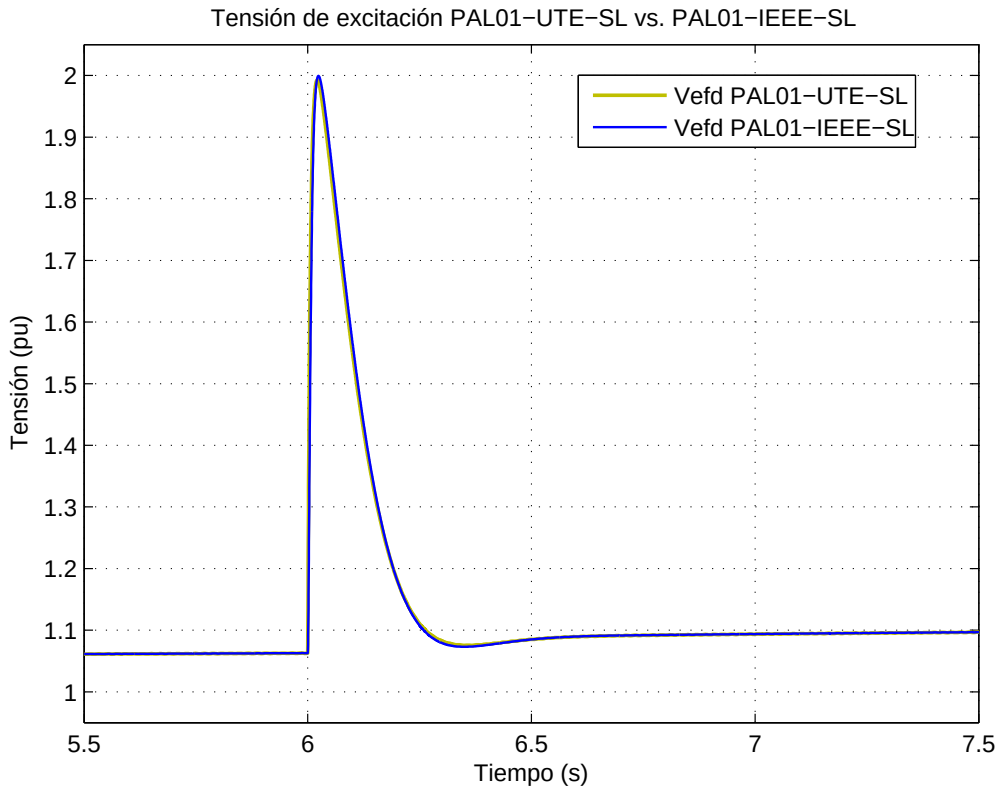


Figura 6.40: Tensión de excitación escalón a 0.7 p.u. - Modelos: PAL01-IEEE-SL vs. PAL01-UTE-SL.

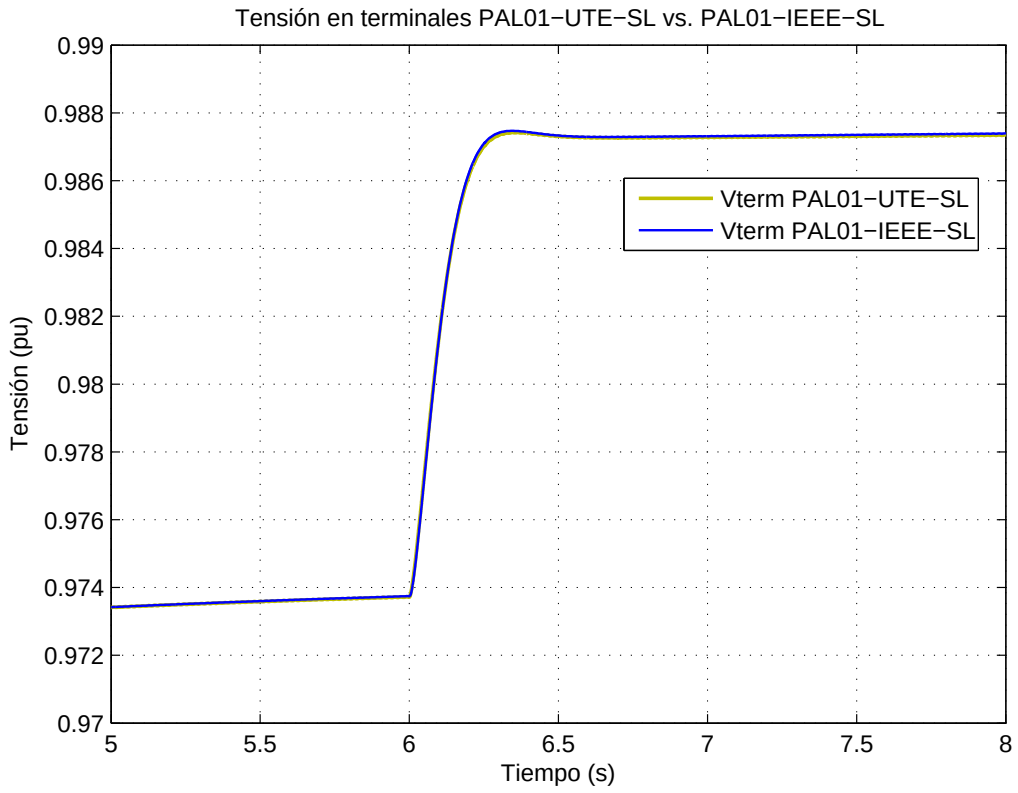
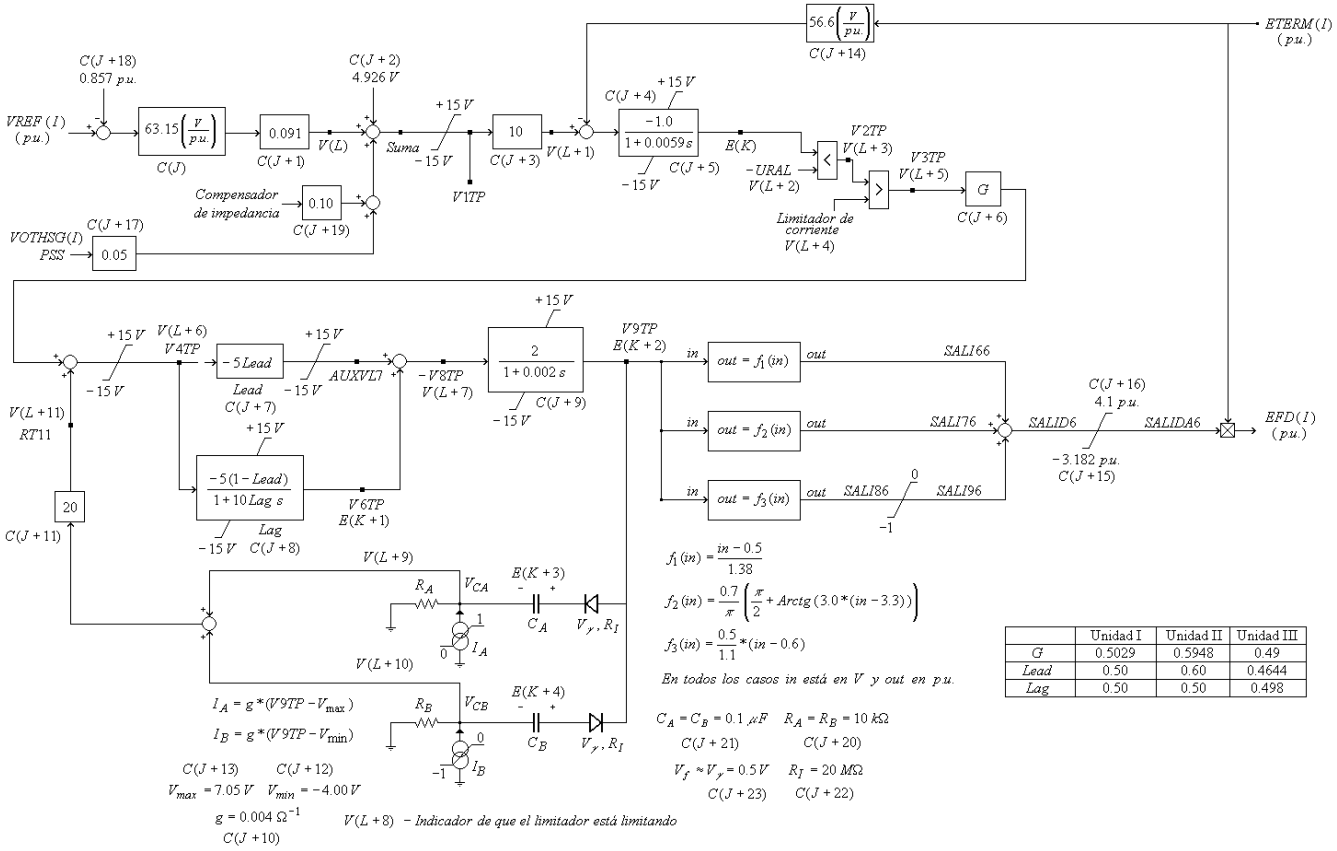


Figura 6.41: Tensión en terminales escalón a 0.7 p.u. - Modelos: PAL01-IEEE-SL vs. PAL01-UTE-SL.

6.3. Sistema de Excitación de Palmar: Modelo PAL02

En esta sección, se va a trabajar con el modelo PAL02-UTE-SL. Se recuerda que el mismo, no es el modelo PAL02 de UTE sino que es el modelo PAL01-UTE-SL, pero con modificaciones en algunos parámetros para que la respuesta tenga los mismos valores de saturación que el modelo PAL02.

6.3.1. Modelo PAL02-UTE-SL



	Unidad I	Unidad II	Unidad III
G	0.5029	0.5948	0.49
Lead	0.50	0.60	0.4644
Lag	0.50	0.50	0.498

Figura 6.42: Regulador de Tensión PAL02 de Palmar [11]

En la figura 6.42 se muestra el sistema de excitación de Palmar PAL02. Este modelo, si bien es más actual que el PAL01 y es el considerado válido por UTE, tiene mayor complejidad e incluye funciones y elementos que no se encuentran en los modelos de la norma IEEE, como son el bloque de limitación con diodos y las funciones implementadas a la salida del regulador. Por lo tanto, en lugar de pasar este modelo a Simulink y adaptarlo a un estándar IEEE, se modificaron los parámetros del modelo PAL01-UTE-SL para tener una respuesta similar al modelo PAL02.

En la figura 6.43 se puede observar que la principal diferencia entre los modelos PAL01 y PAL02, son los valores máximos y mínimos de saturación.

En una primera instancia, se identificaron los parámetros en el modelo PAL01-UTE-SL que son responsables de la saturación, los mismos se encuentran en el limitador $V_{min} - V_{max}$. Se modificaron estos parámetros hasta encontrar la respuesta deseada.

Si bien se logró obtener una respuesta similar a la de PAL02, el sistema cambia la ganancia de forma discontinua, antes y después de saturar, y este comportamiento no se logra en el modelo IEEE. Esto provoca que el sistema no se ajuste de forma adecuada. Por lo tanto, se cambió la constante $C(J + 10)$, del modelo PAL01, que determina el momento en que empieza a actuar el limitador. Si se modifica esta constante y las ganancias del sistema, se logra que el límite superior de la respuesta, sea determinado por el bloque de saturación (a la salida del sistema) y no por el limitador.

Se fijaron los parámetros que influyen en la saturación de modo que no afecten la respuesta del sistema, y

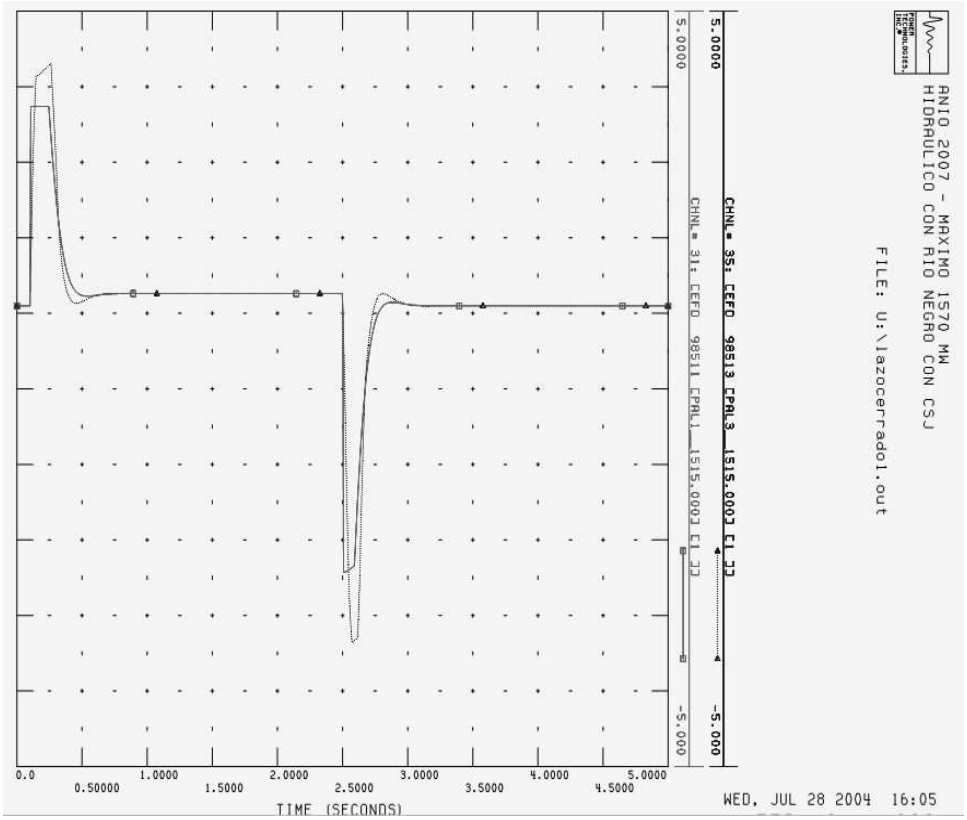


Figura 6.43: Tensión de excitación PAL01 vs tension de excitación Pal02 [16]

los polos en los mismos valores que PAL01-UTE-SL. Las ganancias del sistema se estimaron con el "Control and Estimation Tool Manager".

6.3.2. Validación del Modelo PAL02-UTE-SL.

En la presente sección, se realizará la validación del modelo PAL02-UTE-SL, expuesto en la sección anterior.

Para la validación del modelo, se realizará la misma simulación utilizada en la validación del modelo PAL01-UTE-SL en la sección 6.1.3. Se simula un escalón en la tensión de terminales de 15 a $16kV$ y vuelta a $15kV$.

A continuación se realizará el análisis para la validación del modelo expuesto anteriormente. En primera instancia, se analiza lo documentado por UTE [16], luego las respuestas del modelo propuesto y por último se compararán ambas. Los gráficos del modelo PAL02, fueron presentados junto con los del PAL01 en la sección 6.1.3.

Simulación Modelo PAL02.

En la documentación se presentan dos gráficas que ilustran las respuestas temporales para las señales de tensión de excitación (E_{FD}) y la tensión en terminales (E_{TERM}).

Tensión de Excitación.

En la figura 6.6 se observa las respuestas de la tensión de excitación, en azul y con trazado discontinuo, se representa la respuesta del modelo PAL02. El primer escalón se aplica a los 0,0 *seg*, a los 2,5 *seg* se aplica el segundo escalón, y a los 5,0 *seg* se estabiliza y vuelve al régimen.

Para la tensión de excitación se utilizarán las siguientes constantes de tiempo: tiempo de subida, tiempo de bajada y tiempo de asentamiento. En particular, los tiempos de subida y bajada del primer y segundo escalón, no se calculan, dado que no son apreciables en el gráfico.

La escala de tensiones para esta señal, en *pu*, va de $-5{,}0$ a 5,0, con intervalos de 1,0 y dividiéndolo en diez segmentos, se obtiene una apreciación de 0,1 *pu*.

La escala de tiempos va de 0,00 *seg* a 5,00 *seg*, con intervalos de 0,50, para este caso la apreciación es $0,05$ *seg*.

En este caso, tanto el primer como el segundo escalón presentan una saturación en forma de rampa, ambas con pendiente positiva. Al igual que se hizo anteriormente, se numeran los extremos de las mismas tal como fueron sucedidos en el tiempo.

Se hallan los siguientes valores para el primer escalón:

- Tensión de excitación previa al primer escalón: 1,1 *pu*.
- Valor del primer máximo en la tensión de excitación: 4,1 *pu*.
- Valor del segundo máximo en la tensión de excitación: 4,3 *pu*.
- Tensión de excitación mínima del primer escalón: 1,1 *pu*.
- Tensión de excitación en régimen luego del primer escalón: 1,2 *pu*.
- Tiempo en saturación del primer escalón: 0,10 *seg*.
- Tiempo de bajada del primer escalón: 0,15 *seg*.
- Tiempo de asentamiento del primer escalón: 0,20 *seg*. Medido desde el tiempo en que se da el máximo.

Los siguientes son los valores para el segundo escalón:

- Tensión de excitación previa al segundo escalón: 1,2 *pu*.
- Valor del primer mínimo en la tensión de excitación: $-3{,}4$ *pu*.
- Valor del segundo mínimo en la tensión de excitación: $-3{,}3$ *pu*.
- Tensión de excitación máxima del primer escalón: 1,2 *pu*.
- Tensión de excitación en régimen luego del segundo escalón: 1,1 *pu*.
- Tiempo en saturación del segundo escalón: 0,05 *seg*.

- Tiempo de subida del segundo escalón: 0,20 *seg*.
- Tiempo de asentamiento del segundo escalón: 0,25 *seg*. Medido desde el tiempo en que se da el mínimo.

El cálculo de las constantes de tiempo se realiza de forma análoga a lo expresado para la validación del modelo de Baygorria.

Tensión Terminal.

En la figura 6.7 se observa, en azul y con trazo discontinuo, la respuesta de la tensión en terminales de la máquina del modelo PAL02.

Para la tensión en terminales se utilizarán las siguientes constantes de tiempo: tiempo de subida, tiempo de bajada y tiempo de asentamiento. En particular, los tiempos de bajada y subida del primer y segundo escalón, no se calculan dado que no son apreciables en el gráfico.

La escala de tensiones para esta señal, *pu*, va de 0,900 hasta 1,150, con intervalos de 0,025 que si se dividen en diez segmentos, se obtiene una apreciación de 0,003 *pu*.

La escala de tiempos va de 0,00 *seg* hasta 5,00 *seg*, con intervalos de $0,50$, para este caso la apreciación es $0,05$ *seg*.

Se hallan los siguientes valores:

- Tensión en terminales previa al primer escalón: 1,000 *pu*.
- Tensión en terminales de pico del primer escalón: 1,080 *pu*.
- Tensión en terminales en régimen luego del primer escalón: 1,077 *pu*.
- Tiempo de subida del primer escalón: 0,20 *seg*.
- Tiempo de asentamiento del primer escalón: 0,30 *seg*.
- Tensión en terminales previa al segundo escalón: 1,077 *pu*.
- Tensión en terminales en régimen luego del segundo escalón: 1,000 *pu*.
- Tiempo de bajada del segundo bajada: 0,20 *seg*.
- Tiempo de asentamiento del segundo escalón: 0,30 *seg*.

El cálculo de las constantes de tiempo se realiza de forma análoga a lo expresado para la validación del modelo de Baygorria.

Simulación Modelo PAL02-UTE-SL.

En la presente sección se analizarán las respuestas del modelo PAL02-UTE-SL. Se utilizó el mismo valor de carga que al validar el PAL01-UTE-SL. El diagrama de bloques es el mismo que utilizado para PAL01-UTE-SL, que se mostró en la figura 6.8.

A continuación se realizará el estudio para la tensión de excitación y para la de terminales tal como se hizo en la sección anterior para la simulación de UTE.

Tensión de Excitación.

La figura 6.44 muestra la respuesta temporal de la tensión de excitación, para la simulación del escalón en la tensión en terminales de la máquina. Para comparar la misma con la documentada por UTE, se implementaron los cálculos en MatLab obteniéndose los siguientes resultados, para el primer y segundo escalón respectivamente.

Primer escalón:

- Tensión de excitación previa al primer escalón: 1,1130 pu.
- Tensión de excitación de pico del primer escalón: 4,2300 pu.
- Tensión de excitación en régimen luego del primer escalón: 1,3101 pu.
- Tiempo en saturación del primer escalón: 0,1062 seg.
- Tiempo de bajada del primer escalón: 0,1368 seg.
- Tiempo de asentamiento del primer escalón: 0,1713 seg. Medido desde el tiempo en que se da el máximo.

Segundo escalón:

- Tensión de excitación previa al segundo escalón: 1,3101 pu.
- Valor del primer mínimo en la tensión de excitación: $-3{,}3716$ pu.
- Valor del segundo mínimo en la tensión de excitación: $-3{,}3101$ pu.
- Tensión de excitación de régimen luego del segundo escalón: 1,0902 pu.
- Tiempo en saturación del segundo escalón: 0,0430 seg.
- Tiempo de subida del segundo escalón: 0,1368 seg.
- Tiempo de asentamiento del segundo escalón: 0,1798 seg. Medido desde el tiempo en que se da el mínimo.

En las figuras 6.45 y 6.46 se observa con más detalle los tiempos de bajada y asentamiento del primer escalón, y en las figuras 6.47 y 6.48, los tiempos de subida y asentamiento del segundo escalón.

Los tiempos se calcularon de igual manera que para los de la documentación de UTE mostrados en 6.1.3.

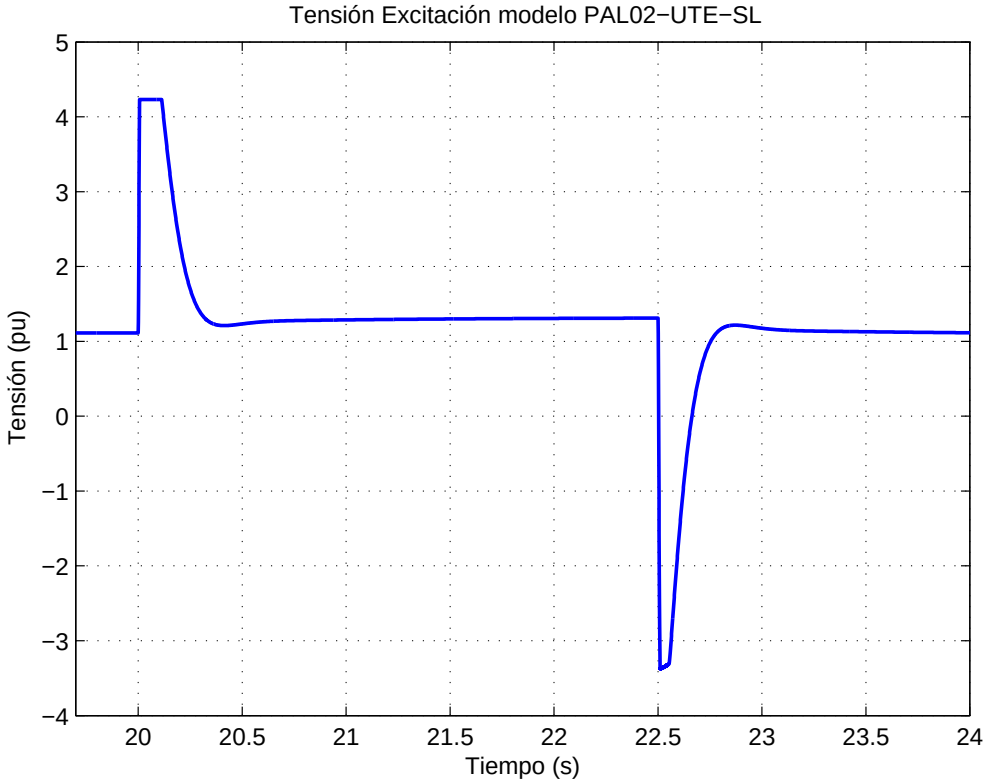


Figura 6.44: Tensión de excitación para escalón en terminales del PAL02

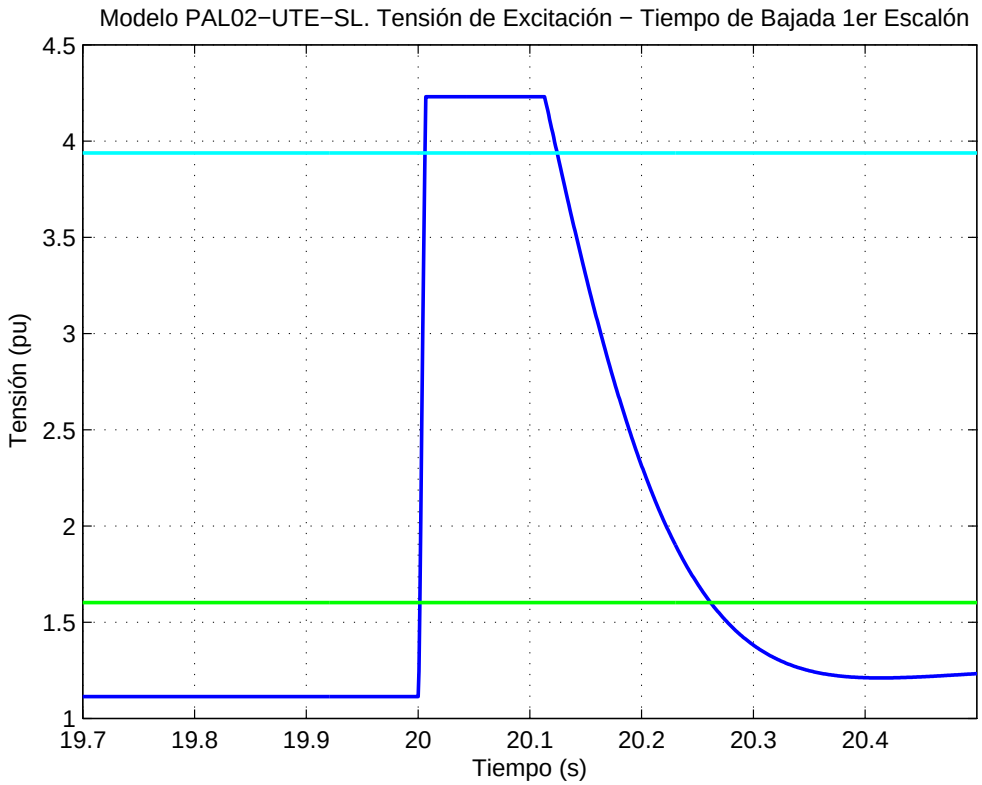


Figura 6.45: Respuesta de la tensión de excitación, cálculo del tiempo de bajada primer escalón

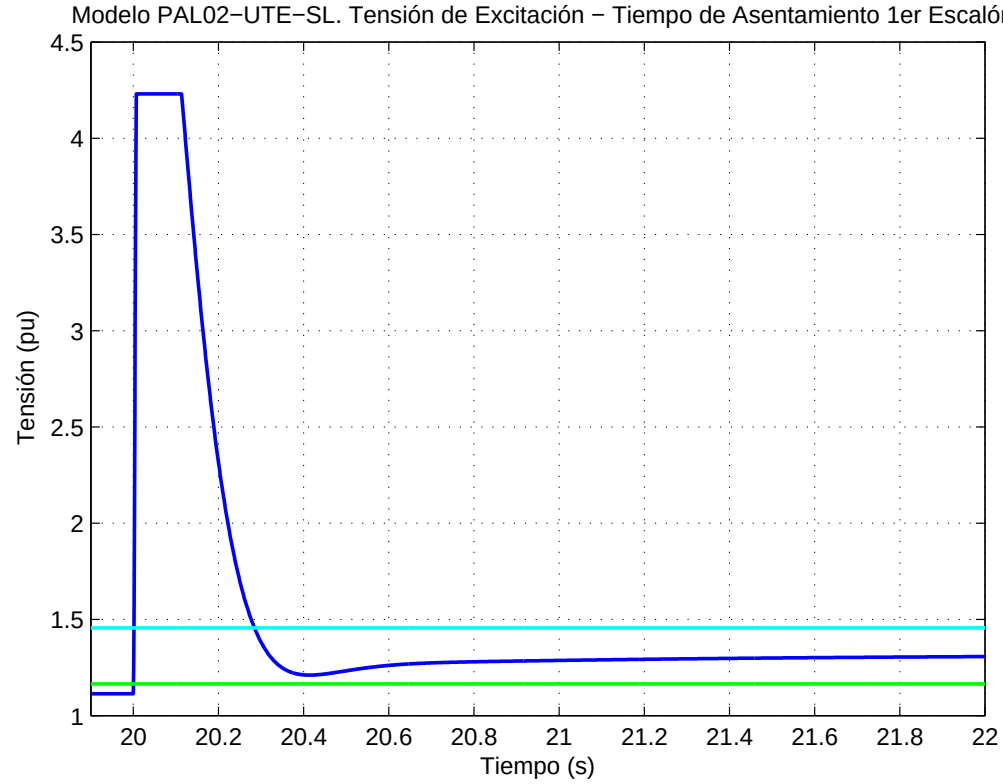


Figura 6.46: Respuesta de la tensión de excitación, cálculo del tiempo de asentamiento del primer escalón

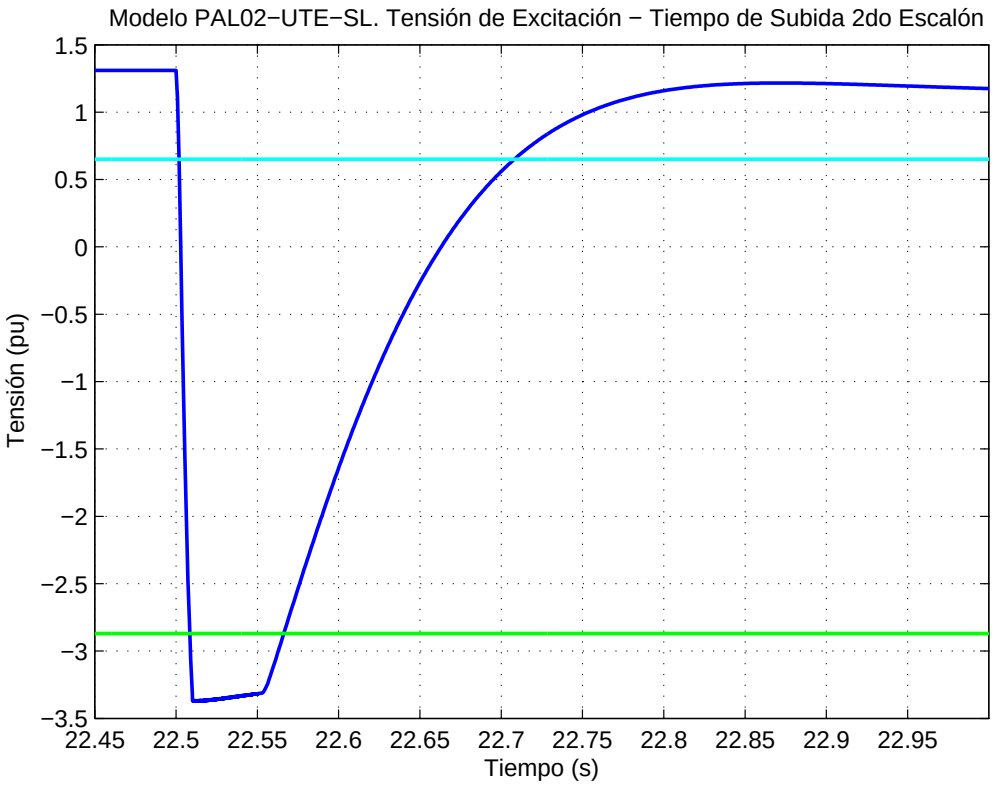


Figura 6.47: Respuesta de la tensión de excitación, cálculo del tiempo de subida del segundo escalón

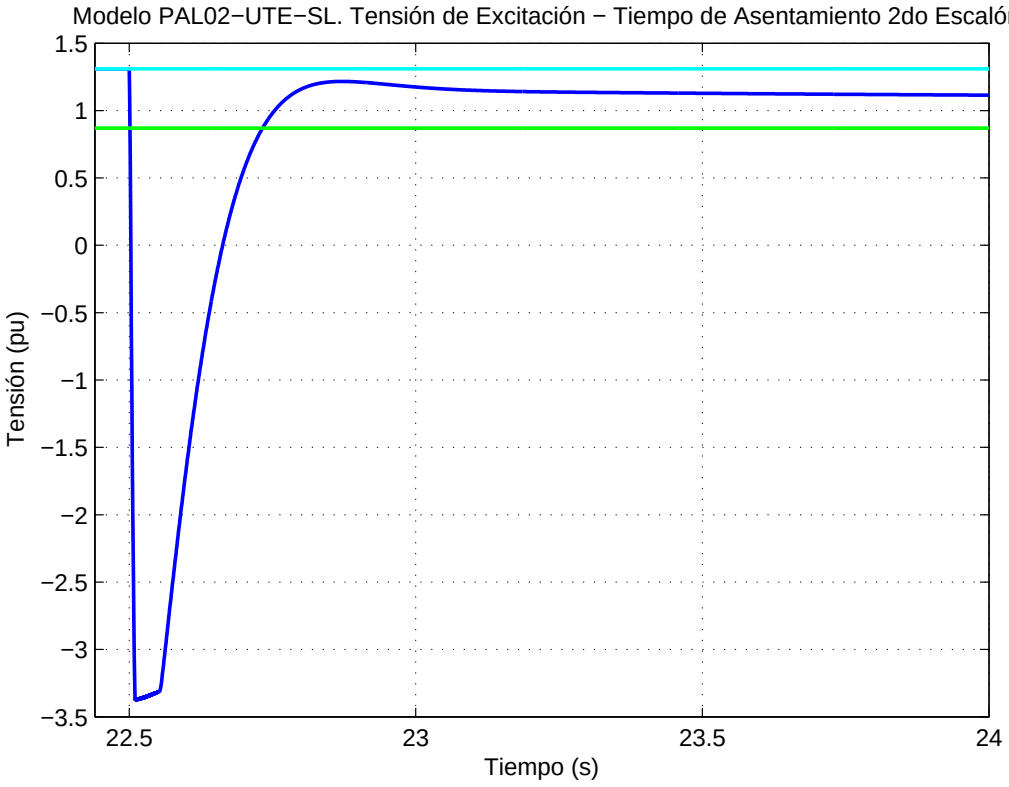


Figura 6.48: Respuesta de la tensión de excitación, cálculo del tiempo de asentamiento del segundo escalón

Tensión Terminal.

La figura 6.49 muestra la respuesta temporal de la tensión en terminales de la máquina para la simulación del escalón en la tensión en terminales. Para comparar la misma con la documentada por UTE se implementaron los cálculos en MatLab obteniéndose los siguientes resultados:

- Tensión en terminales previa al primer escalón: 0,9984 *pu*.
- Tensión en terminales de pico del primer escalón: 1,0740 *pu*.
- Tensión en terminales en régimen luego del primer escalón: 1,0712 *pu*.
- Tiempo de subida del primer escalón: 0,1994 *seg*.
- Tiempo de asentamiento del primer escalón: 0,2699 *seg*.
- Tensión en terminales previa al segundo escalón: 1,0740 *pu*.
- Tensión en terminales en régimen luego del segundo escalón: 0,9988 *pu*.
- Tiempo de bajada del segundo bajada: 0,1741 *seg*.
- Tiempo de asentamiento del segundo escalón: 0,2176 *seg*.

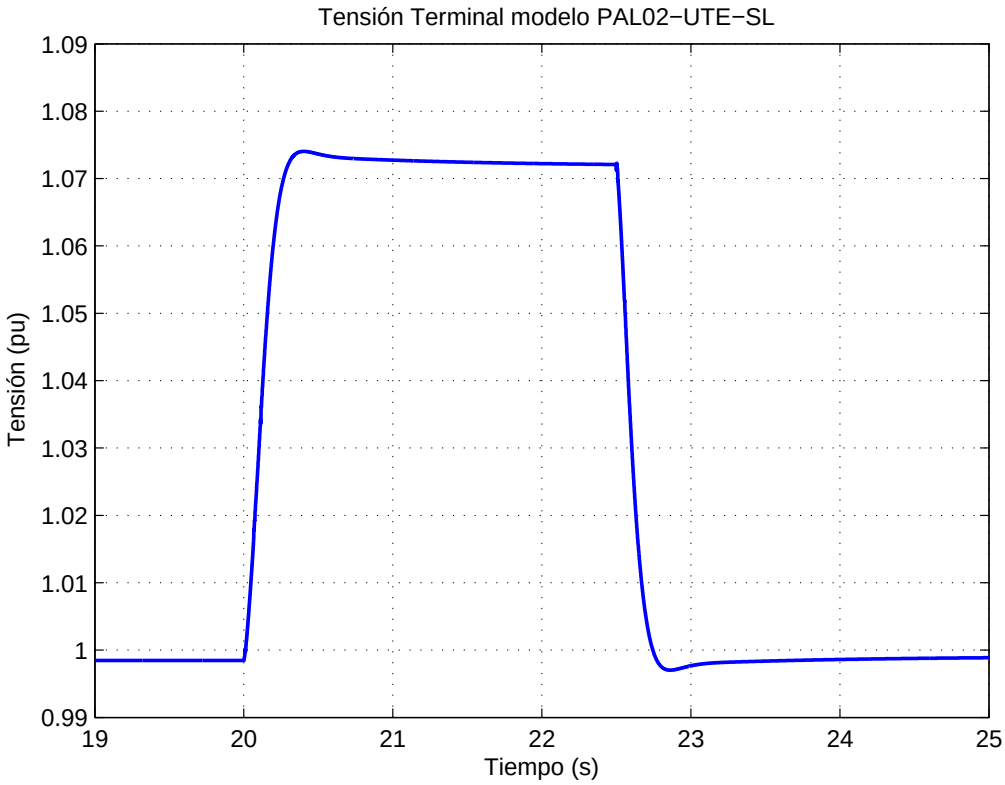


Figura 6.49: Respuesta de la tensión en terminales para el escalón en Vterm

En las figuras 6.50, 6.51, 6.52 y 6.53 se observa con más detalle los tiempos de subida y asentamiento del primer escalón, y los de bajada y asentamiento del segundo escalón.

Los tiempos se calcularon de igual manera que para los de la documentación de UTE mostrados en 6.3.2.

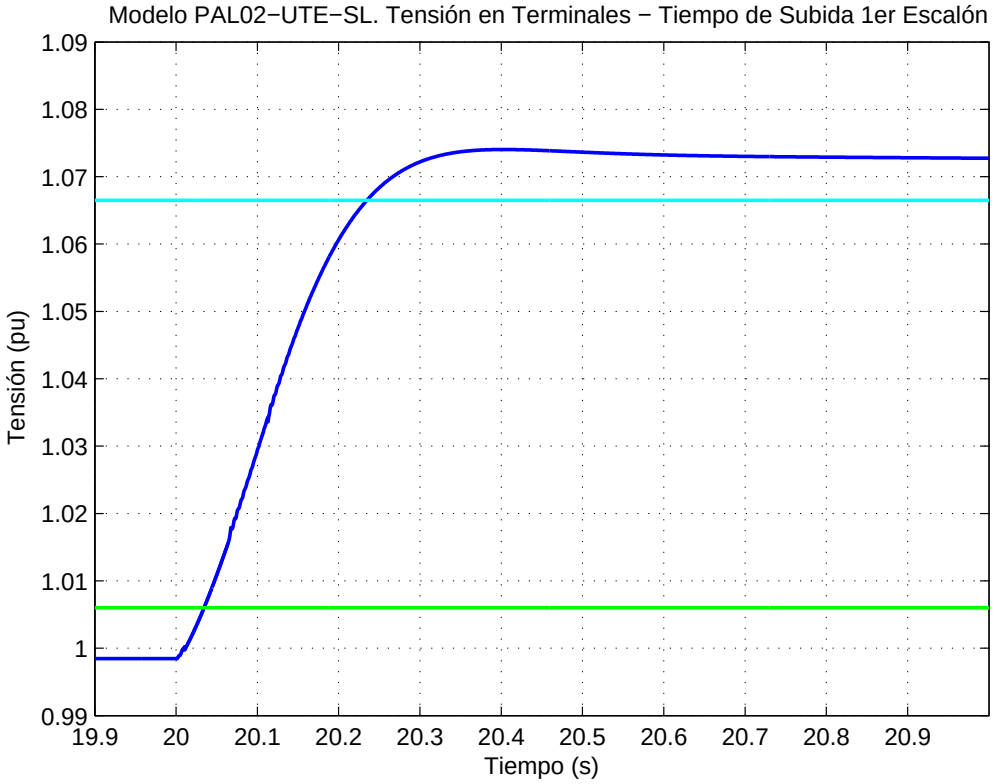


Figura 6.50: Respuesta de la tensión en terminales, cálculo del tiempo de subida primer escalón

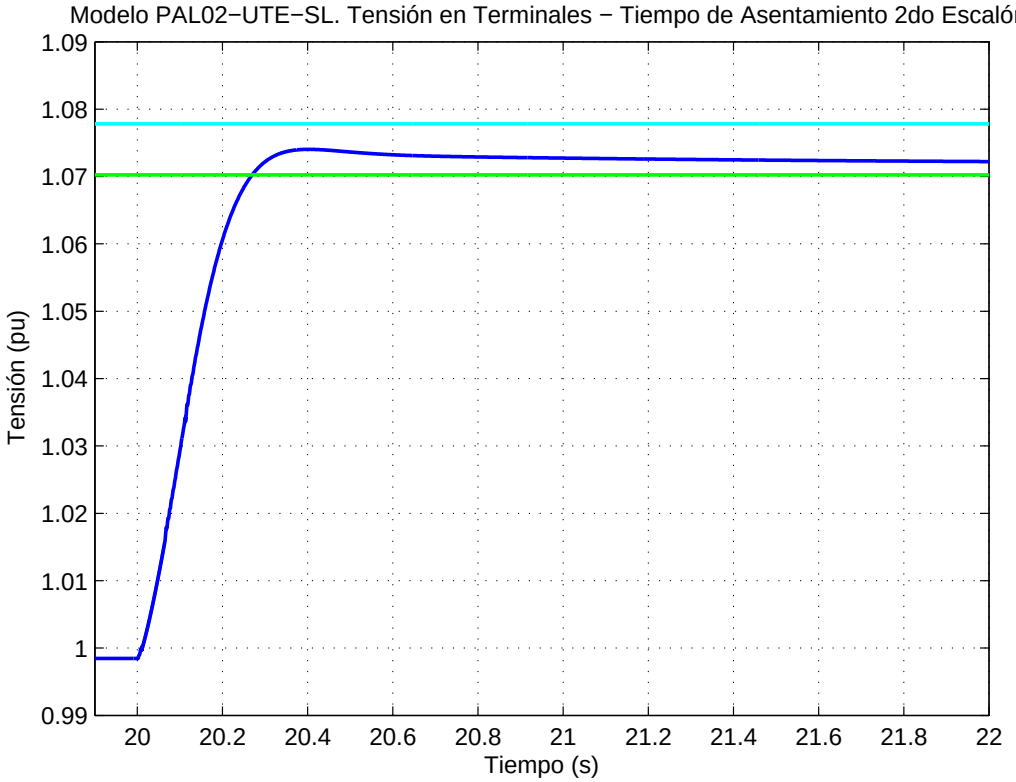


Figura 6.51: Respuesta de la tensión en terminales, cálculo del tiempo de asentamiento primer escalón

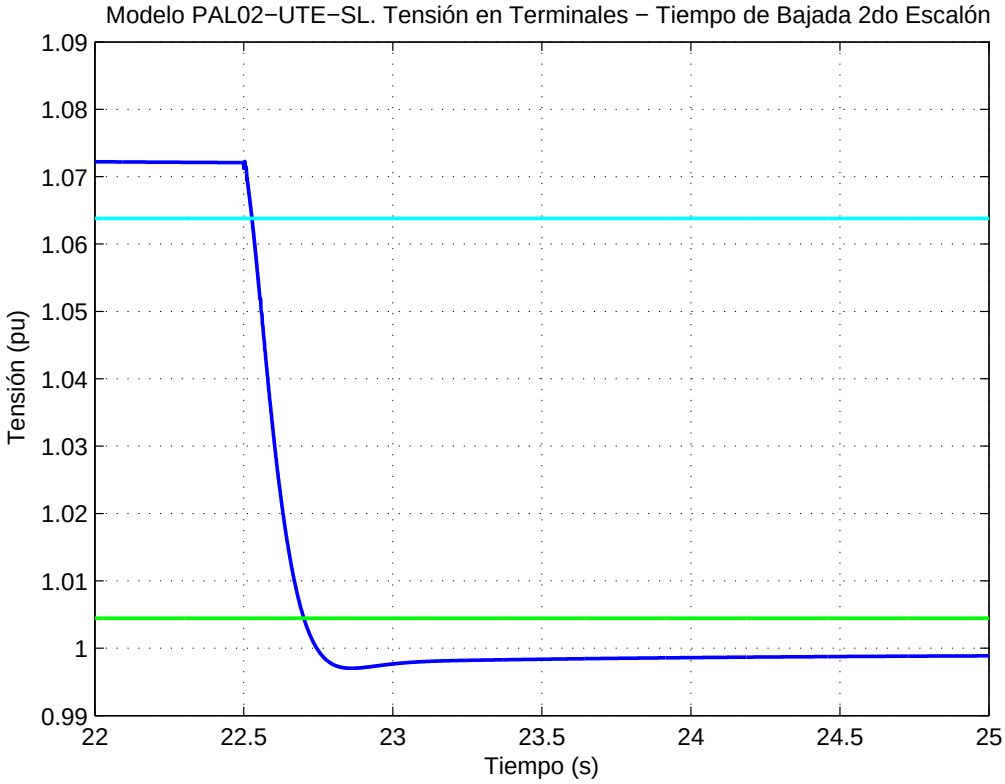


Figura 6.52: Respuesta de la tensión en terminales, cálculo del tiempo de bajada del segundo escalón

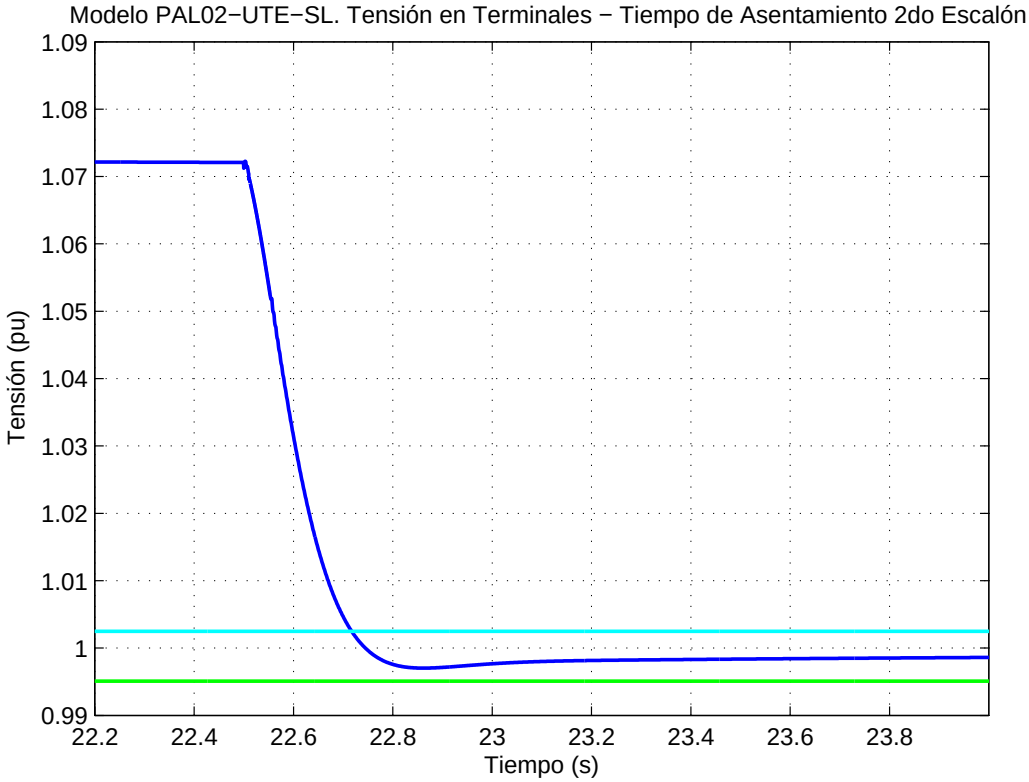


Figura 6.53: Respuesta de la tensión en terminales, cálculo del tiempo de asentamiento del segundo escalón

Comparación PAL02 vs PAL02-UTE-SL.

Luego del estudio por separado de las simulaciones en PSS/E y Simulink, se compararán ambos resultados.

Tensión de Excitación.

1. **Valores de régimen primer escalón.**
   Del estudio anterior se obtiene que para el modelo PAL02 el valor de régimen antes de aplicar el primer escalón es $E_{FD_{inicial}} = 1{,}1$ pu, los valores de saturación son 4,1 y 4,3, y el valor de régimen final es de 1,2. Para el modelo PAL01-UTE-SL, el valor de régimen antes y después del escalón es 1,1130 y 1,3101 *pu*. La saturación, en lugar de ser una rampa, es constante y de valor 4,2300 *pu*.

   Se calculan los siguientes errores relativos:

$$e_{relfinal} = \frac{1{,}2 - 1{,}3}{1{,}2} \cdot 100 = 8{,}3\,\% \tag{6.28}$$

2. **Tiempos primer escalón.**
   Para el PAL02 los valores de los tiempos en saturación, bajada y asentamiento son: 0,10 *seg*, 0,15 *seg* y 0,20 *seg* respectivamente. Para PAL02-UTE-SL los valores son: 0,1062 *seg*, 0,1368 *seg* y 0,1713 *seg*.

$$e_{rel_{saturacion}} = \frac{0{,}10 - 0{,}11}{0{,}10} \cdot 100 = 10\,\% \tag{6.29}$$

$$e_{rel_{bajada}} = \frac{0{,}15 - 0{,}14}{0{,}15} \cdot 100 = 6{,}7\,\% \tag{6.30}$$

$$e_{rel_{asentamiento}} = \frac{0{,}20 - 0{,}17}{0{,}20} \cdot 100 = 15\,\% \tag{6.31}$$

3. **Valores de régimen segundo escalón.**
   Para el modelo PAL02 el valor de régimen antes de aplicar el segundo escalón es $E_{FD_{inicial}} = 1{,}2$ *pu*, el primer valor de saturación es $-3{,}4$ *pu*, el segundo es $-3{,}3$ *pu* y el valor final de régimen es 1,1 *pu*. Los valores del modelo PAL01-UTE-SL son 1,3101, $-3{,}3716$, $-3{,}3101$ y 1,0902 *pu* respectivamente. Con estos resultados, se puede calcular el error relativo en cada uno de los casos:

$$e_{relinicial} = \frac{1{,}2 - 1{,}3}{1{,}2} \cdot 100 = 8{,}3\,\% \tag{6.32}$$

4. **Tiempos segundo escalón.**
   En el PAL02 los valores para los tiempos en saturación, subida y asentamiento del segundo escalón son: 0,05 *seg*, 0,20 *seg* y 0,25 *seg* respectivamente. Para el modelo PAL01-UTE-SL los valores son: 0,0431 *seg*, 0,13668 *seg* y 0,1798 *seg*. El error en el tiempo de saturación es despreciable, y para los otros casos es:

$$e_{rel_{saturacion}} = \frac{0{,}05 - 0{,}04}{0{,}05} \cdot 100 = 20\,\% \tag{6.33}$$

$$e_{rel_{subida}} = \frac{0{,}20 - 0{,}14}{0{,}20} \cdot 100 = 30\,\% \tag{6.34}$$

$$e_{rel_{asentamiento}} = \frac{0{,}25 - 0{,}18}{0{,}25} \cdot 100 = 28\,\% \tag{6.35}$$

Tensión Terminal.

1. **Valores de régimen primer escalón.**
   Del estudio anterior se obtiene que para el modelo PAL02 el valor de régimen antes de aplicar el primer escalón es $E_{TERM_{inicial}} = 1{,}000\ pu$, el valor de sobretiro es 1,080 *pu* y el valor final de régimen es 1,075 *pu*. Para el modelo PAL02-UTE-SL son 0,9984 *pu*, 1,0740 *pu* y 1,0712 *pu* respectivamente. Con estos resultados, se puede calcular el error relativo en cada uno de los casos.

$$e_{rel_{inicial}} = \frac{1{,}000 - 0{,}998}{1{,}000} \cdot 100 = 0{,}2\,\% \tag{6.36}$$

$$e_{rel_{sobretiro}} = \frac{1{,}080 - 1{,}074}{1{,}080} \cdot 100 = 0{,}6\,\% \tag{6.37}$$

$$e_{rel_{final}} = \frac{1{,}075 - 1{,}071}{1{,}075} \cdot 100 = 0{,}4\,\% \tag{6.38}$$

2. **Tiempos primer escalón.**
   Para el PAL02 los tiempos de subida y asentamiento son: 0,20 *seg* y 0,30 *seg* respectivamente. Para PAL02-UTE-SL los valores son 0,1994 *seg* y 0,2699 *seg*.

$$e_{rel_{bajada}} = \frac{0{,}30 - 0{,}27}{0{,}30} \cdot 100 = 10\,\% \tag{6.39}$$

3. **Valores de régimen segundo escalón.**
   Para PAL02-UTE el valor de régimen antes de aplicar el segundo escalón es $E_{TERM_{inicial}} = 1{,}075\ pu$, y el valor final de régimen es 1,000 *pu*. Los valores del modelo PAL02-UTE-SL son 1,0712 y 0,9988 *pu* respectivamente. Con estos resultados, se puede calcular el error relativo en cada uno de los casos.

$$e_{rel_{inicial}} = \frac{1{,}075 - 1{,}071}{1{,}075} \cdot 100 = 0{,}4\,\% \tag{6.40}$$

$$e_{rel_{final}} = \frac{1{,}000 - 0{,}999}{1{,}000} \cdot 100 = 0{,}1\,\% \tag{6.41}$$

4. **Tiempos segundo escalón.**
   Para el PAL02 los tiempos de bajada y asentamiento del segundo escalón son 0,20 *seg* y 0,30 *seg* respectivamente. Para PAL02-UTE-SL los valores son 0,1741 *seg* y 0,2176 *seg*.

$$e_{rel_{bajada}} = \frac{0{,}20 - 0{,}17}{0{,}20} \cdot 100 = 15\,\% \tag{6.42}$$

$$e_{rel_{asentamiento}} = \frac{0{,}30 - 0{,}22}{0{,}30} \cdot 100 = 27\,\% \tag{6.43}$$

6.4. Sistema de Excitación PAL02 de Palmar según estándar IEEE.

En esta sección se va a implementar y validar el modelo PAL02-IEEE-SL.

6.4.1. Modelo PAL02-IEEE-SL.

El modelo PAL02-IEEE-SL corresponde a la implementación en Simulink del estándar ST3A de la IEEE, con los parámetros calculados de tal manera que la respuesta, frente a las simulaciones realizadas, sea la misma que la obtenida en PAL02-UTE-SL.

Parámetros del modelo PAL02-IEEE-SL.

En esta sección se va a describir el procedimiento realizado para la elección de los parámetros del modelo PAL02-IEEE-SL. En primer lugar, los parámetros de la saturación se dejaron lo suficientemente grandes, para que no influyan en la respuesta cuando se aplica un escalón en la tensión de referencia de 1 *pu* a 1,1 *pu*. Con esta simulación se ajustan las ganancias y los polos. Luego de que se tienen las ganancias y los polos, se aplica un escalón de 1 a 1,5 *pu* y se ajustan los valores de saturación.

Ajuste de parámetros según escalón de 1 **a** 1,1 *pu*.
Para realizar los ajustes de los parámetros primero se aplicó un escalón en V_{ref} de 1 a 1,1 *pu*. Los ceros y polos se tomaron como parámetros fijos y con el " Control and Estimation Tool Manager" se ajustaron los valores de K y K_M para ajustar a la respuesta deseada. Las condiciones iniciales para estas constantes fueron:

$$\begin{cases} K_A = 221 \\ K_M = 0{,}7024 \end{cases}$$

La estimación de estos parámetros da como resultado:

$$\begin{cases} K_A = 218{,}94 \\ K_M = 0{,}7024 \end{cases}$$

Por lo tanto, en una primera instancia, se obtuvieron los siguientes valores de ganancias, ceros y polos:

$$\begin{cases} K_A = 218{,}94 \\ K_M = 0{,}7024 \\ T_C = 2{,}53 \\ T_B = 5 \\ T_A = 0{,}0059 \\ T_M = 0{,}002 \end{cases}$$

Ajuste de los parámetros vinculados a la saturación.
Una vez que se tienen los valores antes mencionados, se hace el ajuste de valores para la saturación. Para esto se utilizó el "Control and Estimation Tool Manager", en dónde los valores que ya fueron estimados se dejan fijos y los valores correspondientes a la saturación se dejan libres (para ser calculados). Para poder ajustar los parámetros de saturación, se aplicaron dos escalones en la tensión de referencia. El primero de 1 a 1,5 y el segundo de 1 a 0,5. El resultado obtenido es el siguiente:

$$\begin{cases} V_{Bmax} = 5{,}000 \\ V_{Rmax} = 9{,}000 \\ V_{Mmax} = 4{,}280 \\ V_{Mmin} = -3{,}720 \\ V_{Rmin} = -4{,}537 \end{cases}$$

De esta manera, quedan definidos los parámetros del modelo PAL02-IEEE-SL.

6.4.2. Validación del Modelo PAL02-IEEE-SL.

A continuación, se realizará la validación del modelo PAL02-IEEE-SL, comparándolo con el modelo PAL02-UTE-SL validado en la sección anterior.

Se desarrollarán distintas simulaciones para tres saltos distintos en (V_{REF}), en todos los casos se comienza en 1,0 *p.u.*, y se lleva a 1,5, 1,1 y 0,7 *pu*. La carga que utilizada fue la misma con la que se trabajó anteriormente. Se hará especial hincapié en la simulación del escalón hasta 1,5 *pu*, en sus valores de régimen y constantes de tiempo. Para las otras simulaciones solo se hará una comparación gráfica, sin realizar un análisis exhaustivo de las mismas, de manera análoga a lo realizado para PAL01-IEEE-SL.

Simulación del Modelo PAL02-IEEE-SL.

La simulación a estudiar es la que respecta al escalón de 1,0 a 1,5 *pu*. En la figura 6.54 se observa la tensión de terminales y la tensión de excitación, donde el escalón se aplica a los 20 *seg*.

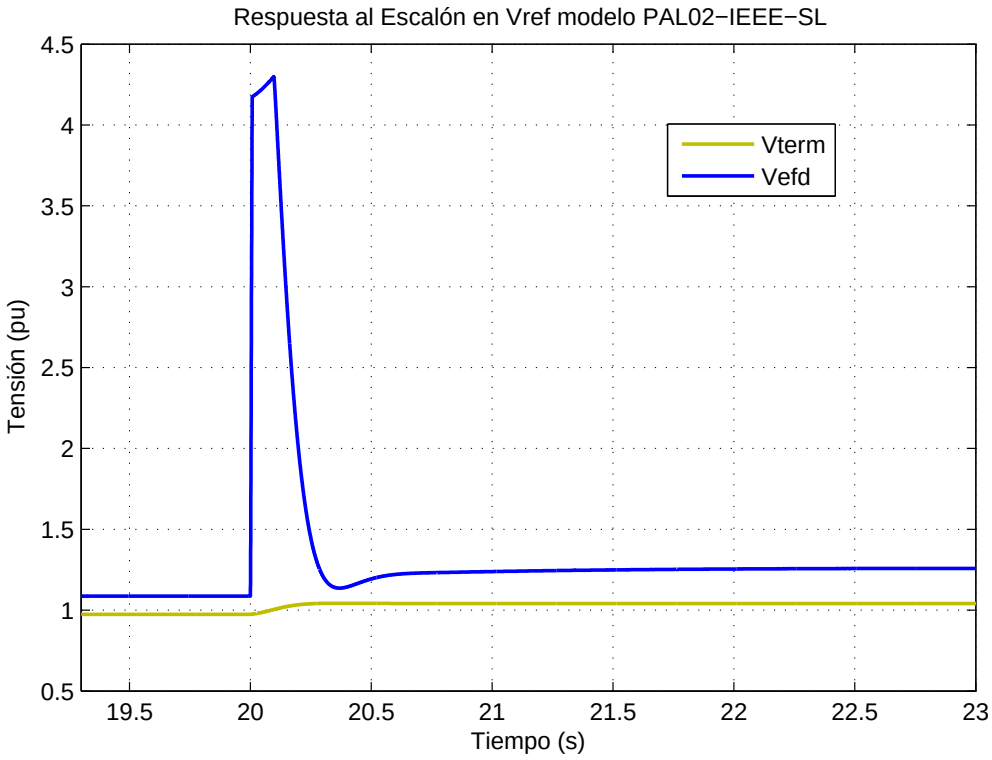


Figura 6.54: Respuesta del modelo PAL02-IEEE-SL, escalón de 1.0 a 1.5 en tensión de referencia

Comparación Modelo PAL02-IEEE-SL vs Modelo PAL02-UTE-SL.

Para validar el modelo de PAL02-IEEE-SL, fue necesario simular este modelo junto con el modelo PAL02-UTE-SL. A continuación se realizará la comparación de las respuestas temporales de ambos modelos. Se analizarán las dos variables temporales, la tensión de excitación y la tensión en terminales del generador.

Tensión de Excitación.

En el gráfico 6.55, se observa la comparación de la tensión de excitación para ambos modelos. Cualitativamente las respuestas de ambos modelos son muy similares, a menos de una diferencia en el pico de tensión en la saturación, ya que en el caso del modelo PAL02-IEEE-SL es constante y en PAL02-UTE-SL tiene la ya comentada forma de rampa.

Valores de Régimen.

Para el modelo PAL02-IEEE-SL los valores de régimen: antes y luego de aplicar el escalón son 1,0867 y

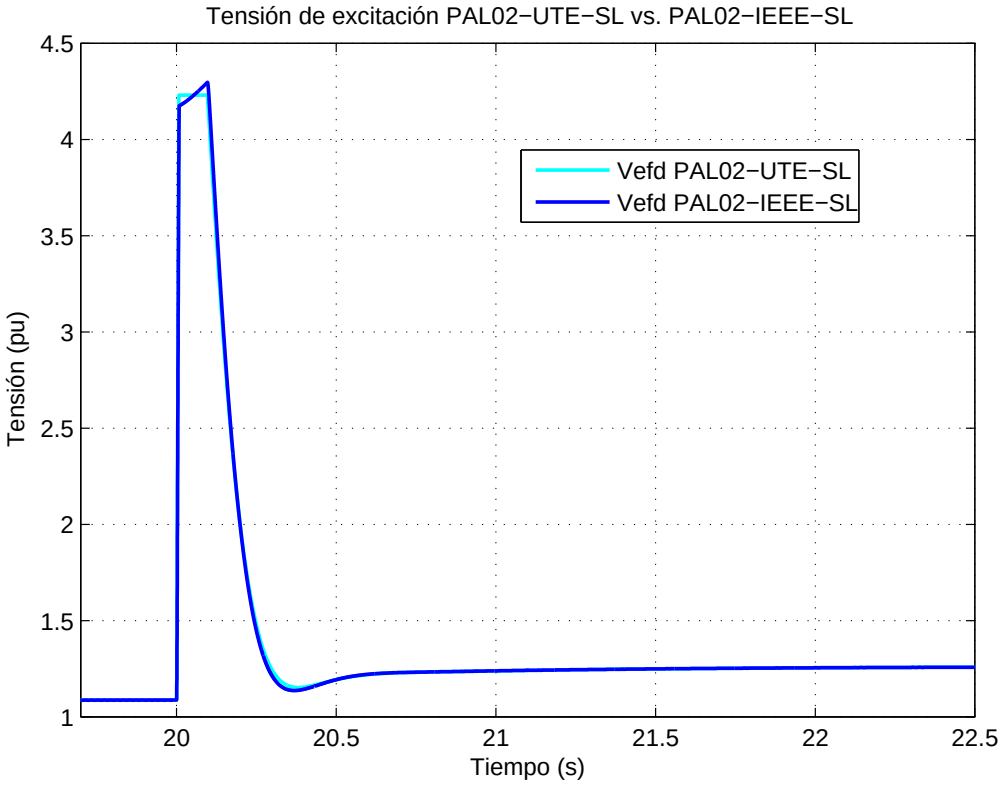


Figura 6.55: Tensión de excitación escalón a 1.5 - Modelos: PAL02-IEEE-SL vs. PAL02-UTE-SL.

1,2506 *pu* respectivamente. Para el modelo de UTE PAL02-UTE-SL estos valores son 1,0866 y 1,2508 *pu*. Con lo que se obtienen los siguientes errores relativos:

$$e_{relinicial} = \frac{1{,}0867 - 1{,}0866}{1{,}0866} \cdot 100 = 0{,}01\,\% \tag{6.44}$$

$$e_{relfinal} = \frac{1{,}2506 - 1{,}2508}{1{,}2508} \cdot 100 = 0{,}02\,\% \tag{6.45}$$

Constantes de Tiempo.

Dentro de las constantes de tiempo, se calcularon: los tiempos de subida, bajada y asentamiento. Este último se calcula a partir del tiempo en el que se aplica el escalón en la tensión de referencia.

Para el modelo PAL02-IEEE-SL los valores de los tiempos de subida, de bajada y de asentamiento son: 0,0058, 0,1269 y 0,4615 *pu* respectivamente. Estos valores se muestran en las siguientes gráficas 6.56, 6.57 y 6.58.

Para el modelo PAL02-UTE-SL los valores de los tiempos de subida, bajada y asentamiento son: 0,0052, 0,1324 y 0,4603 *pu*. Estos valores se muestran en las siguientes gráficas 6.59, 6.60 y 6.61.

Con estos valores se calculan los siguientes errores relativos:

$$e_{relsubida} = \frac{0{,}0058 - 0{,}0052}{0{,}0052} \cdot 100 = 11{,}5\,\% \tag{6.46}$$

$$e_{relbajada} = \frac{0{,}1269 - 0{,}1324}{0{,}1324} \cdot 100 = 4{,}2\,\% \tag{6.47}$$

$$e_{relasentamiento} = \frac{0{,}4615 - 0{,}4603}{0{,}4603} \cdot 100 = 0{,}3\,\% \tag{6.48}$$

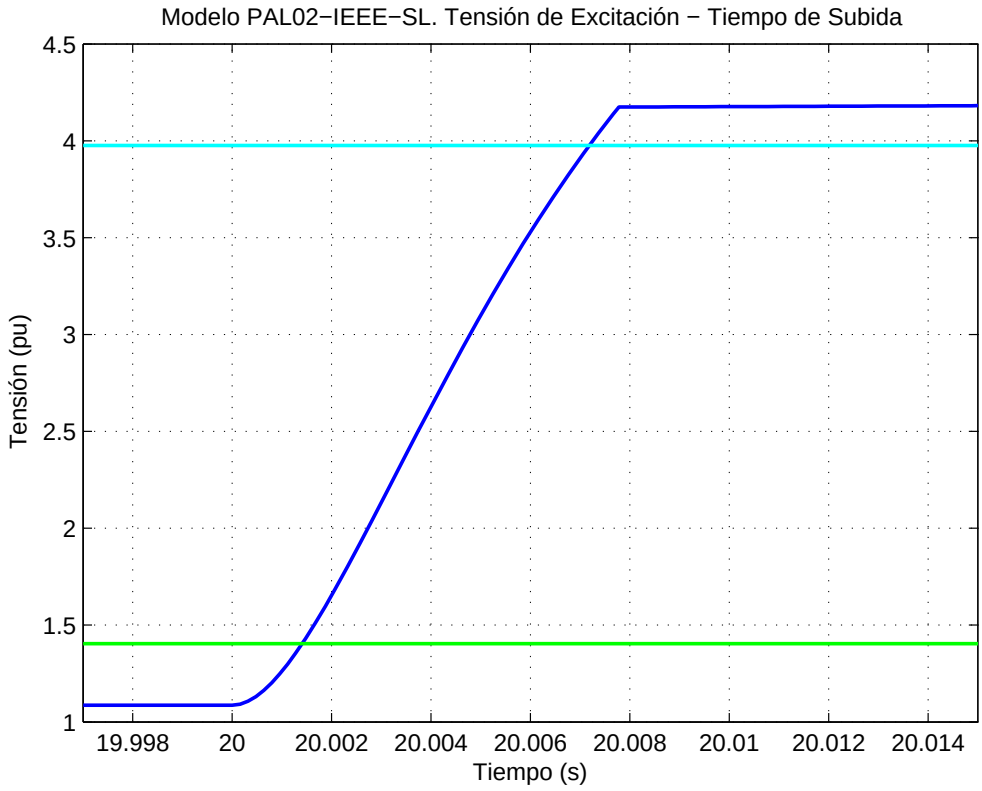


Figura 6.56: Modelo PAL02-IEEE-SL - Tensión excitación escalón a 1.5 - Tiempo de subida.

Tensión en Terminales.

En el gráfico 6.62, se observa la comparación de la tensión en terminales para ambos modelos. Cualitativamente las respuestas de ambos modelos son muy similares. Para ahondar más en este estudio se hará énfasis en los valores en régimen y las constantes de tiempo de las respuestas.

Valores de Régimen.

Para el modelo PAL02-IEEE-SL los valores de régimen antes y después de aplicar el escalón son: 0,9744 y 1,0407 *pu*, mientras que el valor máximo es 1,0428 *pu*. Para el modelo PAL02-UTE-SL estos valores son 0,9742, 1,0412 y 1,0430 *pu*. Con lo que se obtienen los siguientes errores relativos:

$$e_{relinicial} = \frac{0{,}9744 - 0{,}9742}{0{,}9742} \cdot 100 = 0{,}02\,\% \tag{6.49}$$

$$e_{relfinal} = \frac{1{,}0407 - 1{,}0412}{1{,}0412} \cdot 100 = 0{,}05\,\% \tag{6.50}$$

$$e_{relmaximo} = \frac{1{,}0428 - 1{,}0430}{1{,}0430} \cdot 100 = 0{,}02\,\% \tag{6.51}$$

Constantes de Tiempo.

Como constantes de tiempo se calcularon los tiempos de subida y asentamiento. Este último se calcula a partir del tiempo en el que se aplica el escalón en la tensión de referencia.

Para el modelo PAL02-IEEE-SL los valores de los tiempos de subida y asentamiento son: 0,1829 y 0,1862 *seg*. Estos valores se muestran en las siguientes gráficas 6.63 y 6.64.

Para el modelo PAL02-UTE-SL los valores de los tiempos de subida y asentamiento son: 0,1862 y 0,4144 *seg*. Estos valores se muestran en las siguientes gráficas 6.65 y 6.66.

A partir de estos datos, se calculan los siguientes errores relativos:

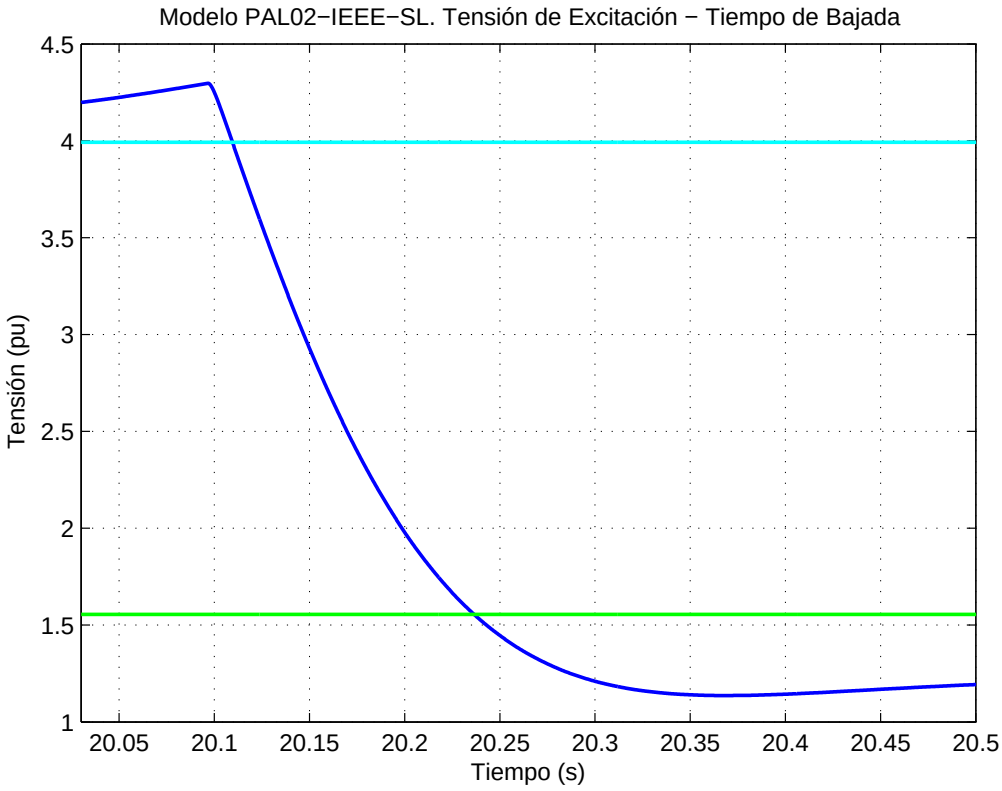


Figura 6.57: Modelo PAL02-IEEE-SL - Tensión excitación escalón a 1.5 - Tiempo de bajada.

$$e_{relsubida} = \frac{0{,}1829 - 0{,}1862}{0{,}1829} \cdot 100 = 1{,}8\,\% \tag{6.52}$$

$$e_{relasentamiento} = \frac{0{,}4408 - 0{,}4144}{0{,}4144} \cdot 100 = 6{,}4\,\% \tag{6.53}$$

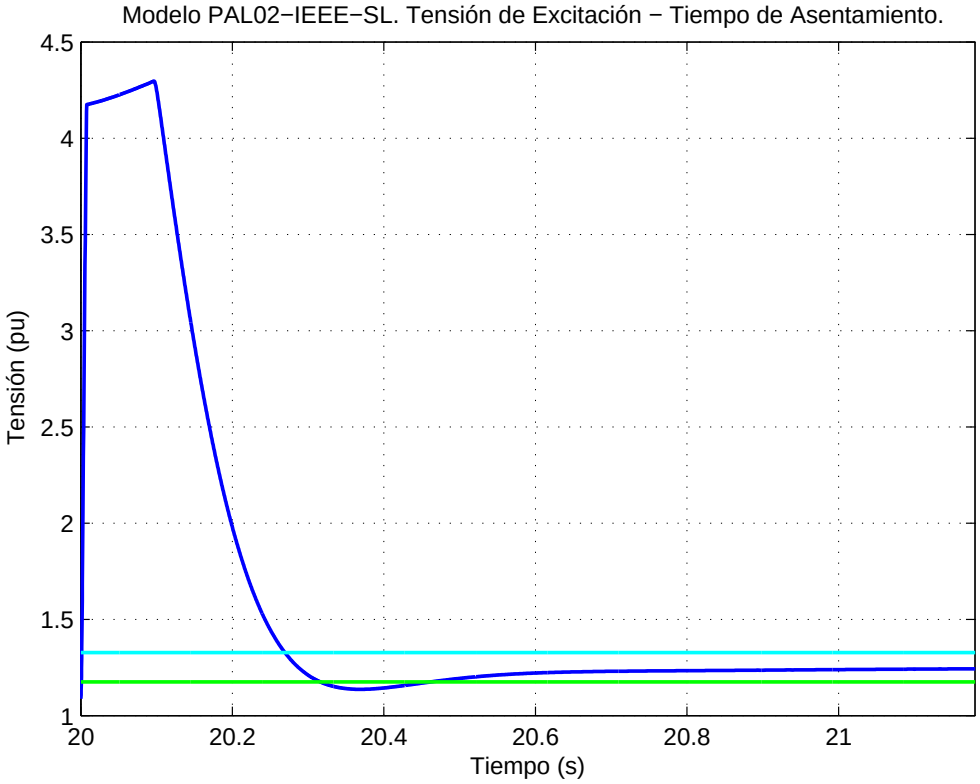


Figura 6.58: Modelo PAL02-IEEE-SL - Tensión excitación escalón a 1.5 - Tiempo de asentamiento.

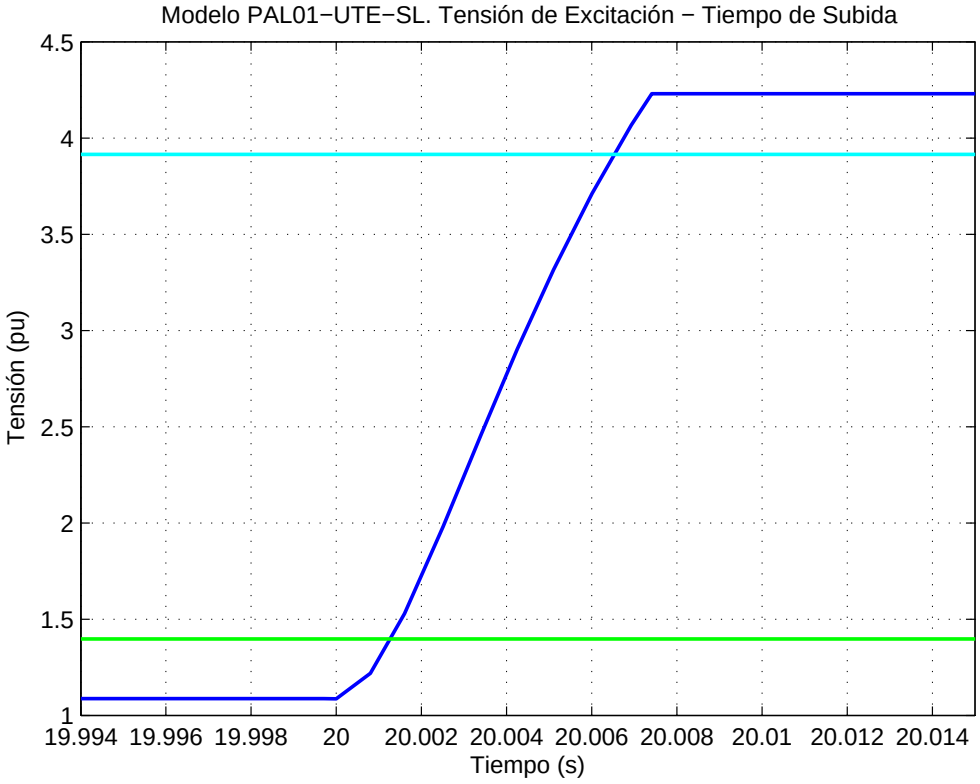


Figura 6.59: Modelo PAL02-UTE-SL - Tensión excitación escalón a 1.5 - Tiempo de subida.

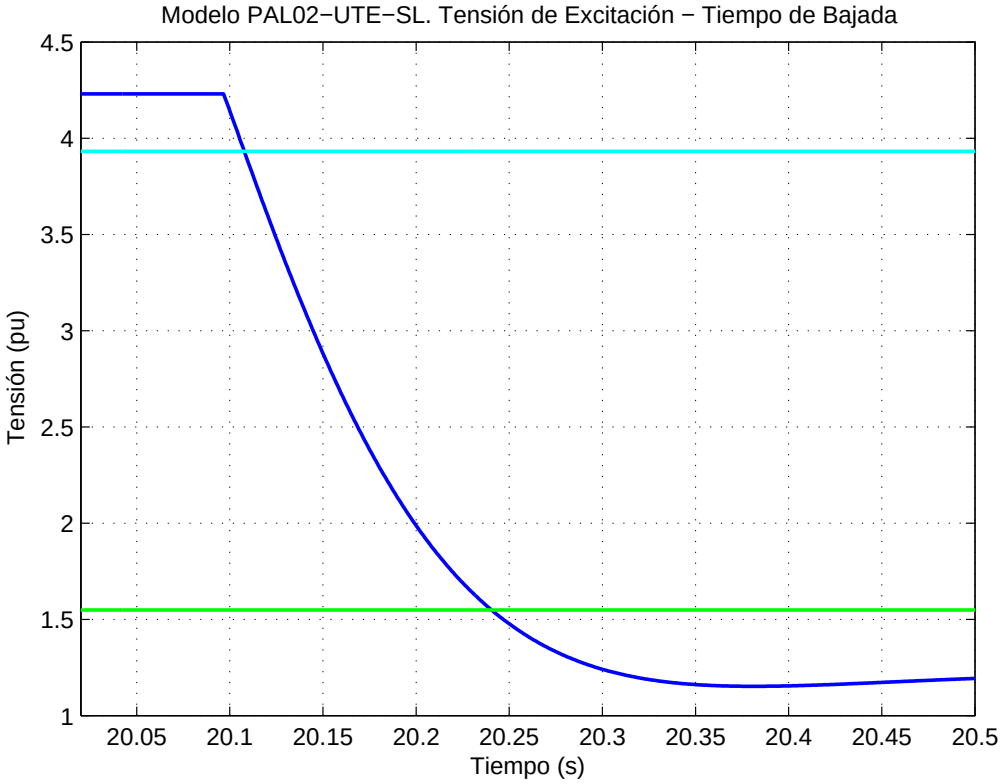


Figura 6.60: Modelo PAL02-UTE-SL - Tensión excitación escalón a 1.5 - Tiempo de bajada.

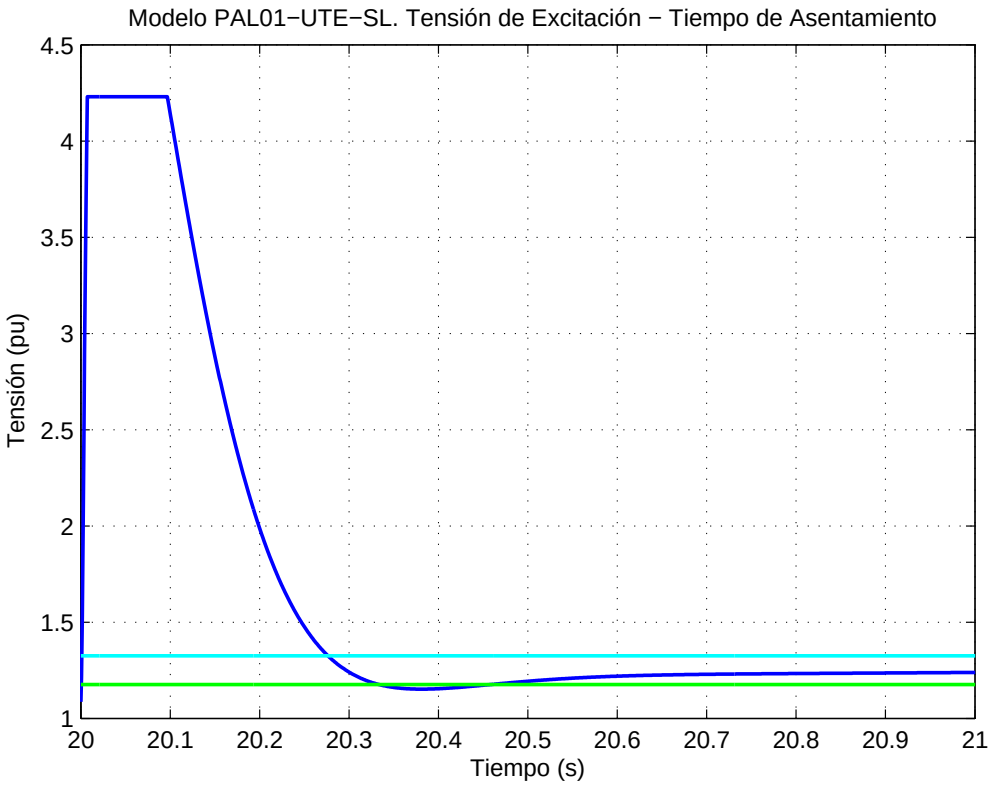


Figura 6.61: Modelo PAL02-UTE-SL - Tensión excitación escalón a 1.5 - Tiempo de asentamiento.

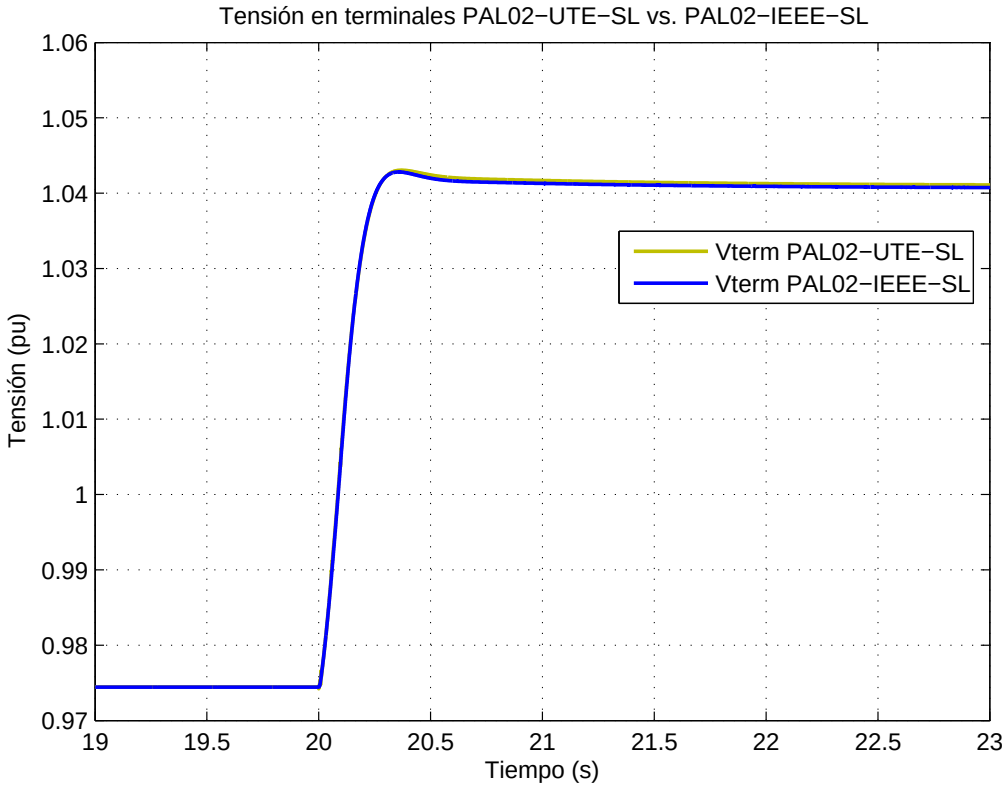


Figura 6.62: Tensión en terminales escalón a 1.5 - Modelos: PAL02-IEEE-SL vs. PAL02-UTE-SL.

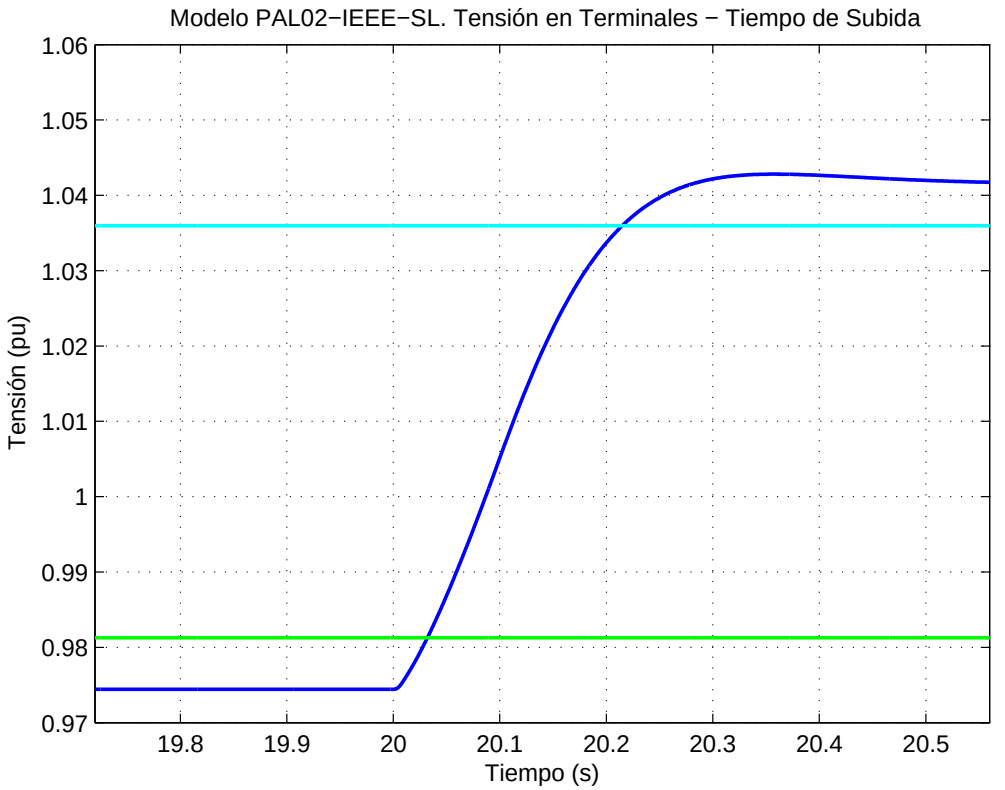


Figura 6.63: Modelo PAL02-UTE-SL - Tensión en terminales escalón a 1.5 - Tiempo de subida.

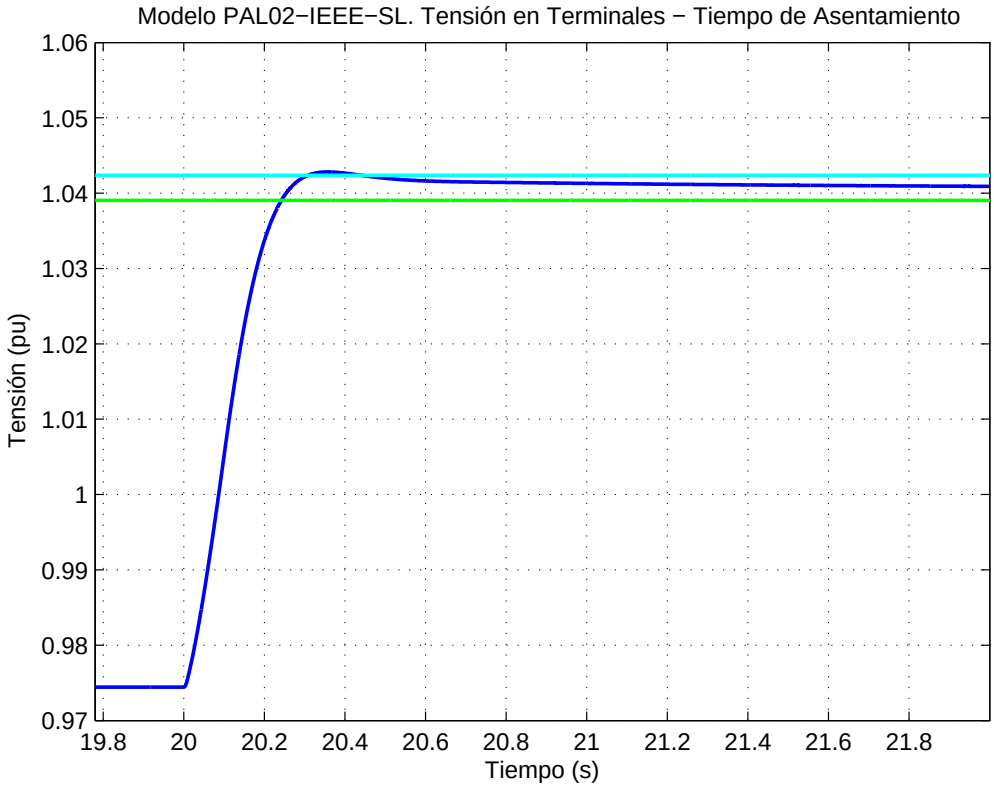


Figura 6.64: Modelo PAL02-IEEE-SL - Tensión terminales escalón a 1.5 - Tiempo de asentamiento.

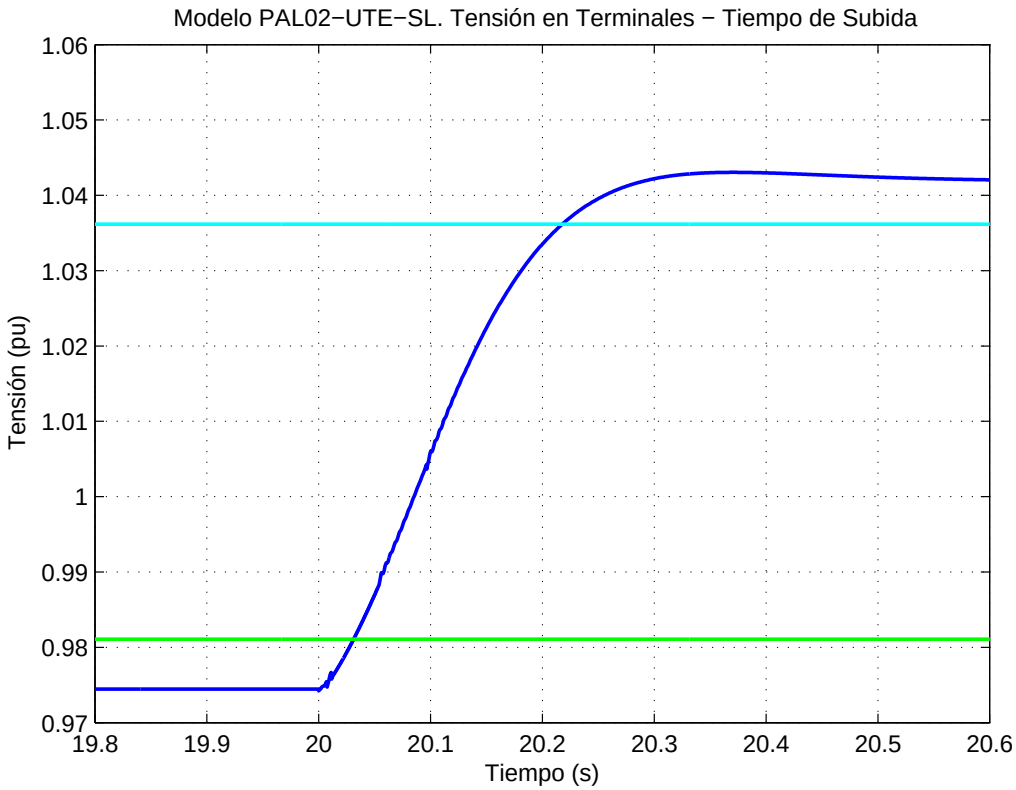


Figura 6.65: Modelo PAL02-UTE-SL - Tensión en terminales escalón a 1.5 - Tiempo de subida.

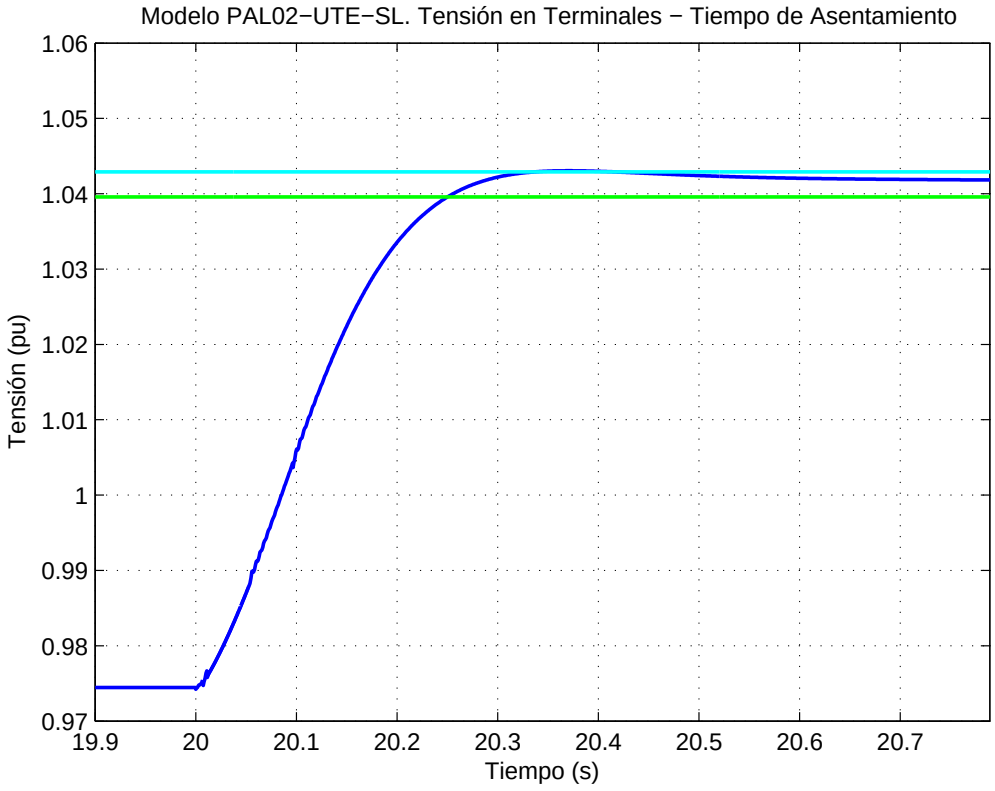


Figura 6.66: Modelo PAL02-UTE-SL - Tensión en terminales escalón a 1.5 - Tiempo de asentamiento.

Simulaciones Adicionales.

Como se mencionó anteriormente, se analizó la respuesta para el escalón de 1,0 a 1,5 *pu* en la tensión de referencia. Al igual que lo realizado para el modelo PAL01-IEEE-SL, para observar que los parámetros elegidos para el modelo $ST1A$ de la norma de la IEEE no fueran una solución particular para esta simulación, se realizaron dos escalones adicionales: un de subida que no provoque la saturación del sistema y uno de bajada que sature.

Escalón de 1,0 *pu* **a** 1,1 *pu* **en** V_{ref}**.**

La primer simulación adicional que se presenta es un escalón a 1,1 *pu*. En el gráfico 6.67 se observa la comparación de la tensión de excitación del modelo PAL02-IEEE-SL y PAL02-UTE-SL. En la figura 6.68 se compara la tensión en terminales. En ambos casos el sistema no satura para ningún tiempo.

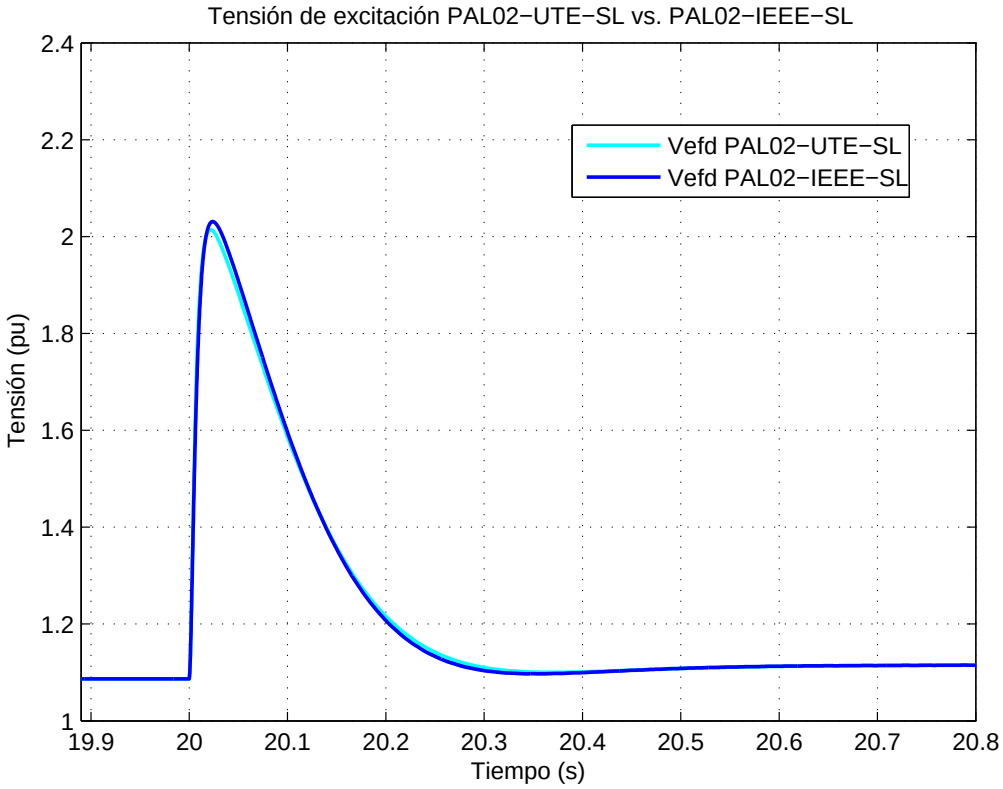


Figura 6.67: Tensión de excitación escalón a 1.1 p.u. - Modelos: PAL02-IEEE-SL vs. PAL02-UTE-SL.

Para ambos casos, la tensión es muy similar.

Escalón de 1,0 *pu* **a** 0,7 *pu* **en** V_{ref}**.**

La siguiente simulación adicional que se presenta es un escalón a 0,7 *pu*. En el gráfico 6.69 se observa la comparación de la tensión de excitación del modelo PAL02-IEEE-SL con PAL02-UTE-SL. En la figura 6.70 se compara la tensión en terminales.

Ambos modelos tienen el mismo comportamiento.

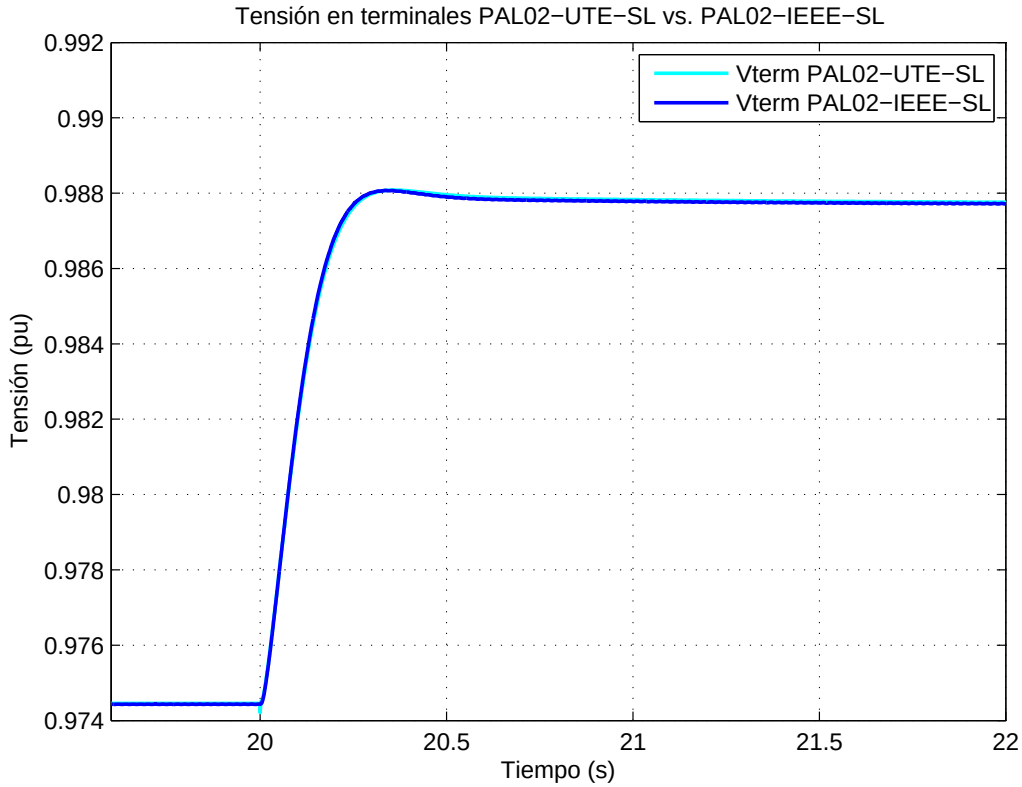


Figura 6.68: Tensión en terminales escalón a 1.1 p.u. - Modelos: PAL02-IEEE-SL vs. PAL02-UTE-SL.

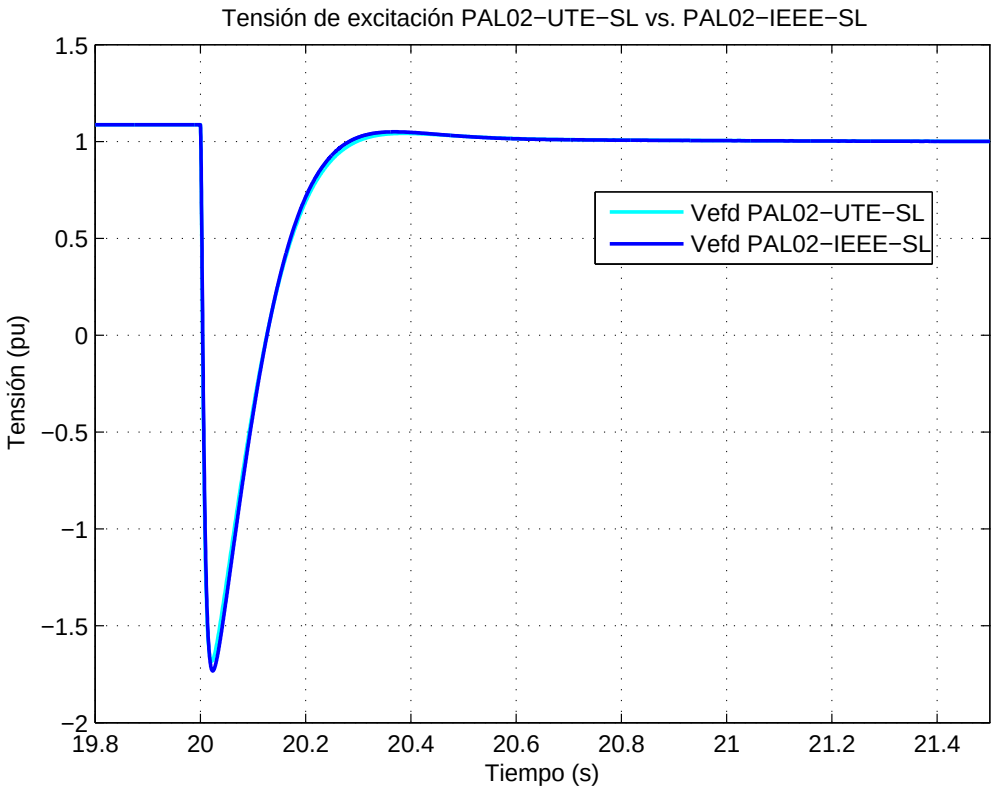


Figura 6.69: Tensión de excitación escalón a 0.7 p.u. - Modelos: PAL02-IEEE-SL vs. PAL02-UTE-SL.

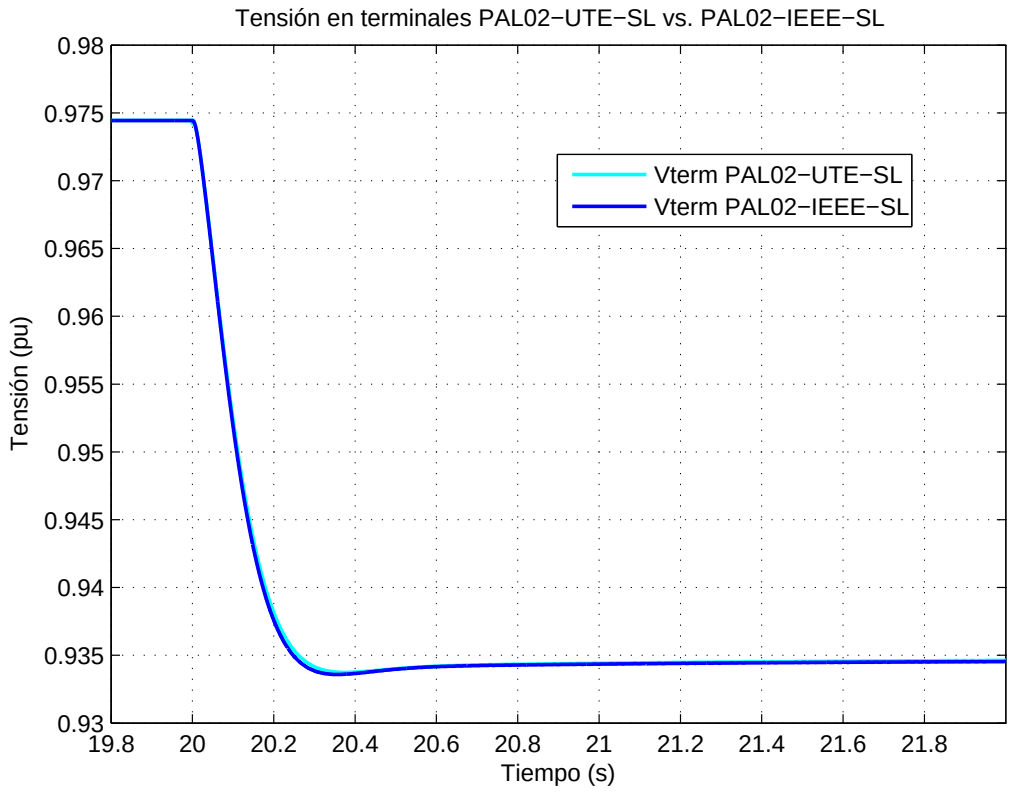


Figura 6.70: Tensión en terminales escalón a 0.7 p.u. - Modelos: PAL02-IEEE-SL vs. PAL02-UTE-SL.

6.5. Conclusiones del sistema de excitación de Palmar.

6.5.1. Conclusiones sobre el Modelo PAL02-IEEE-SL.

Como se ha observado en el estudio realizado en 6.4, si bien se partió de un modelo más sencillo que la última versión de UTE, se observa que los resultados para la respuestas del modelo de UTE son muy similares.

Para el sistema de excitación de Palmar, se obtiene un modelo, estándar de la IEEE, que se puede insertar en cualquier programa de simulación de sistemas de potencia.

Parámetros del modelo.

En la tabla 6.2 se muestran los parámetros que se deben ajustar en el modelo ST3A de la IEEE, para obtener el modelo del sistema de excitación de la máquina de Palmar.

K_A	218.94
K_M	0.7024
T_C	2.53
T_B	5
T_A	0.0059
T_M	0.002
V_{BMax}	5.000
V_{RMax}	9.000
V_{MMax}	4.280
V_{MMin}	-3.720
V_{RMin}	-4.537
K_P	1
θ_P	0
x_L	0
K_I	0
V_{IMax}	∞
V_{IMin}	$-\infty$
K_G	1

Tabla 6.2: Parámetros del modelo ST3A para representar Palmar.

Validación del modelo PAL02-IEEE-SL.

A modo de resumen, se presentan los resultados cuantitativos para la validación del modelo PAL02-IEEE-SL.

Tensión de Excitación.

1. **Valores de régimen.**
   Los errores obtenidos en el modelo PAL02-IEEE-SL con respecto al modelo PAL02-UTE-SL fueron:

   - Error en el valor de régimen antes de aplicado el escalón: $e_{rel_i} = 0{,}01\,\%$
   - Error en el valor de régimen luego de aplicado el escalón: $e_{rel_f} = 0{,}02\,\%$

   Para ambos casos se considera que el error obtenido es aceptable.

2. **Tiempo de subida.**
   El error en el tiempo de subida entre los dos modelos es de un 12 % de error relativo y de un 0,0006 seg de error absoluto. Por más de que el error relativo supere el 10 %, se considera un resultado aceptable ya que el error absoluto es de 0,6 ms.

3. **Tiempo de bajada y de asentamiento.**
   El error en el tiempo de asentamiento es: $e_{rel_{asen}} = 0{,}3\,\%$, y el error del tiempo de bajada es de $e_{rel_{bajada}} = 4{,}23\,\%$, ambos son considerados aceptables.

Tensión terminal.

1. **Valores de régimen.**
   Los errores obtenidos para los valores de régimen fueron:

   - Error en el valor de régimen antes de aplicado el escalón: $e_{rel_i} = 0{,}02\,\%$
   - Error en el valor de régimen luego de aplicado el escalón: $e_{rel_f} = 0{,}05\,\%$

   En ambos casos el error obtenidos se considera aceptable.

2. **Tiempo de subida.**
   El error en el tiempo de subida es: $e_{rel_{sub}} = 1{,}8\,\%$ que se considera aceptable.

3. **Tiempo de asentamiento.**
   Para el tiempo de asentamiento, el error entre los modelos queda: $e_{rel_{as}} = 6{,}4\,\%$ que al ser menor al $10\,\%$ es considerado aceptable.

Metodología de Trabajo.

Dado los resultados finales del modelo propuesto de Palmar, se puede considerar como satisfactoria la idea de utilizar el modelo más sencillo de Palmar para elegir el modelo de la IEEE que mejor se aproxime. Además, se observa que la modificación en los parámetros de éste, logra la obtención de la respuesta del último modelo de UTE.

Capítulo 7

Validación de Modelos en PSS/E.

7.1. Generalidades.

Hasta ahora, cuando se presentaron y justificaron los modelos sugeridos se validaron para ciertas simulaciones en pequeña señal que, en la mayoría de los casos, correspondieron a escalones en la tensión de referencia. En todos estos casos, se simulaba el sistema con la máquina aislada y una carga puntual.

En este capítulo, se presentarán simulaciones con las máquinas conectadas a la red interconectada Uruguay-Argentina. Además, se estudiará la respuesta de las máquinas frente a una falta (cortocircuito) en algún punto de la red.

Se aclara que, como fue mencionado en su momento, dado que el sistema de excitación de Baygorria ya es modelado por UTE con un estándar de la IEEE, no se harán modificaciones en éste a la hora de simular la red, y no se estudiarán sus respuestas.

Para los sistemas de Salto Grande y Palmar, se estudiará la misma falta, comparando las respuestas de ambos modelos para dos casos, uno con el modelo del sistema de excitación documentado por UTE, y otro con el estándar propuesto.

7.2. Caso de estudio.

Para la comparación de los modelos, se utiliza el modelo de red que tiene UTE, y la simulación se realiza con el software de simulación de sistemas de potencia PSS/E, el cual se presentó en el marco teórico de la presente documentación. En una primera instancia se simula la red tal cual la utiliza UTE, y se observa la respuesta de las máquinas respecto a la falta. Luego se modifican los modelos de los sistemas de excitación de los generadores, y se observa la respuesta de éstos frente a la misma falta.

Se simula la misma falta para el estudio de los dos sistemas, la cual consiste en un cortocircuito trifásico en la barra de $500kV$ de Palmar. El cortocircuito tiene una duración de 60 ms, y luego se extingue, manteniéndose la misma red antes y después de la falta.

7.3. Modelos Estándar en PSS/E.

En los capítulos anteriores, se definieron los valores de los parámetros de los modelos estándar IEEE, que simulan los sistemas de excitación de las distintas máquinas. El software PSS/E contiene diferentes modelos que corresponden a los estándar de la IEEE. A continuación se presentan los modelos a usar para Salto Grande y Palmar, y se mostrará el código implementado para cargar los modelos en el software.

7.3.1. Modelo Estándar Salto Grande: IEEE ST1A.

En el capítulo de Salto Grande se hallaron los valores de los parámetros que adecúan las respuestas del modelo a las respuestas documentadas por UTE. En la figura 7.1, se observa el diagrama del modelo del estándar ST1A en PSS/E. La figura 7.2 detalla el código a implementar para llamar al modelo, y en la figura 7.3 se observa un ejemplo de cómo llamarlo, utilizando los parámetros hallados. Para realizar la simulación con los modelos propuestos, se modifican los sistemas de excitación de las 14 máquinas de Salto Grande, tanto las del lado uruguayo como las argentinas.

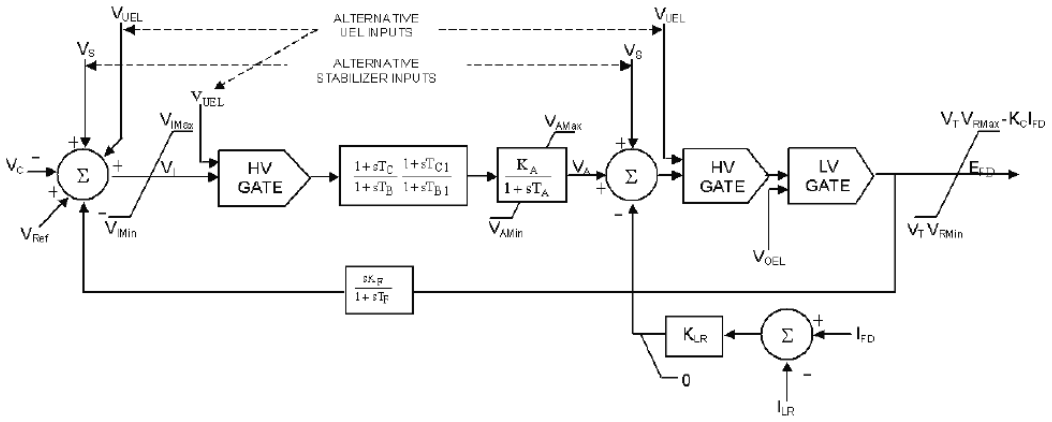


Figura 7.1: Modelo Estándar IEEE ST1A para PSS/E.

IBUS, 'ESST1A', I, UEL, VOS, T_R, V_{IMAX}, V_{IMIN}, T_C, T_B, T_{C1}, T_{B1}, K_A, T_A, V_{AMAX}, V_{AMIN}, V_{RMAX}, V_{RMIN}, K_C, K_F, T_F, K_{LR}, I_{LR} /

Figura 7.2: Código para llamar el modelo ST1A en PSS/E.

```
4603 'ESST1A'  3   1      2      0     9999  -9999      0.076
      0.021        0      0      78    0.024  5.09      -5    9999
      -9999        0   0.0053  1.1979 0     0       / SGDEHI03
```

Figura 7.3: Parámetros utilizados para el modelo ST1A en PSS/E.

En el código para llamar al modelo se observa, en primer lugar, el número identificador de la barra a la cual se va a conectar el sistema de excitación que, en este caso, corresponde a la barra de Salgo Grande. Después se ingresa el texto identificador del modelo, seguido por el número de máquina y luego, uno a uno los parámetros que se describen en 7.2, cuyos valores fueron hallados en su momento. Si no se quieren tomar en cuenta determinadas variables, como en este caso parámetros de saturación, se le asigna a las mismas un número muy grande (9999) o muy chico (−9999).

7.3.2. Modelo Estándar Palmar IEEE ST3A.

Análogamente en la figura 7.4, se observa el diagrama del modelo del estándar ST3A en PSS/E, el cual se utiliza para el modelo de Palmar. En la figura 7.5 se observa el código a implementar para llamar el modelo. En la figura 7.6, se muestra un ejemplo del llamado del modelo, con los parámetros utilizados para los modelos propuestos. Para la simulación con toda la red, es necesario modificar los sistemas de excitación de las 3 máquinas de Palmar.

7.4. Resultados de las simulaciones.

Como se mencionó anteriormente, se realizaron dos simulaciones diferentes para cada modelo. En primera instancia se simuló el sistema con los modelos que dispone UTE actualmente, y se afectó temporalmente el sistema, con la falta antes mencionada. Luego se corrió la misma simulación, pero cambiando el modelo de los sistemas de excitación de los generadores correspondientes, y se compararon los resultados.

Este procedimiento se realiza en primer lugar para las máquinas de Salto Grande, y luego para las de Palmar. En todos los casos las variables a observar en los sistemas de excitación son: tensión de excitación, tensión en terminales de la máquina, ángulo de desfasaje de la máquina, potencia activa y reactiva.

A continuación se muestra el estudio para los dos sistemas de excitación.

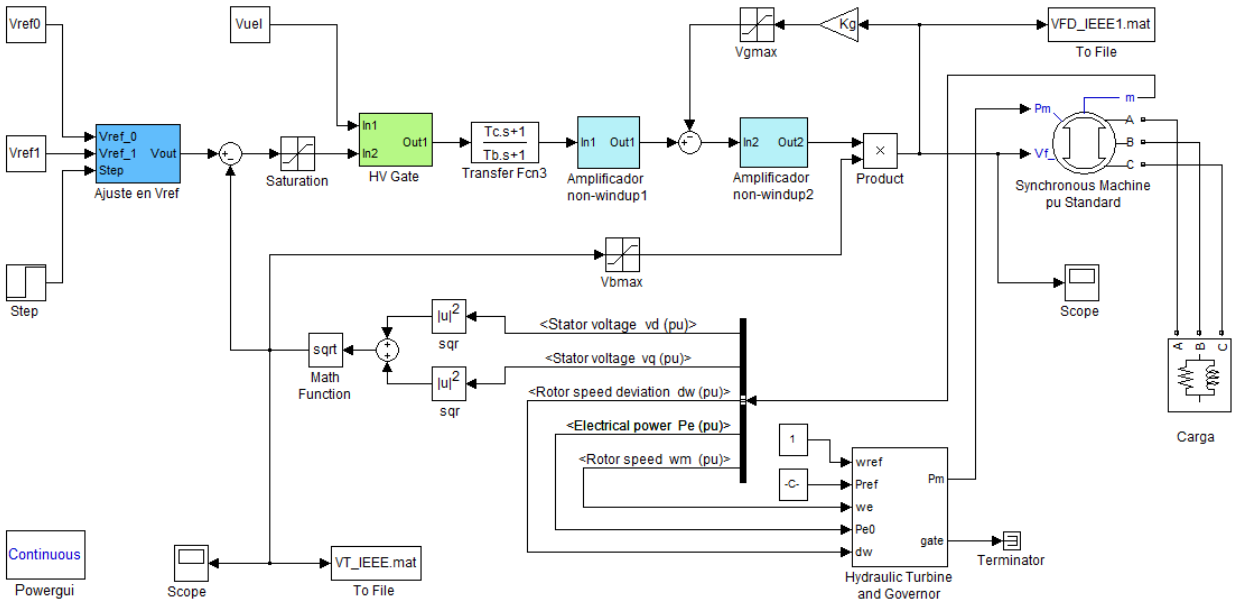


Figura 7.4: Modelo Estándar IEEE ST3A para PSS/E.

IBUS, 'ESST3A', I, T_R, V_{IMAX}, V_{IMIN}, K_M, T_C, T_B, K_A, T_A, V_{RMAX}, V_{RMIN}, K_G, K_P, K_I, V_{BMAX}, K_C, X_L, V_{GMAX}, θ_P, T_M, V_{MMAX}, V_{MMIN}/

Figura 7.5: Código para llamar el modelo ST3A en PSS/E.

```
98512 'ESST3A'  1        0          9999          -9999       0.7024
        2.53          4.978        218.9424       0.00585        9
       -4.5369          0            1              0           5
          0             0            0              0          0.002
       4.28          -3.72                                          / PALMAR 2
```

Figura 7.6: Parámetros utilizados para el modelo ST3A en PSS/E.

7.4.1. Sistema de Excitación de Salto Grande.

Se comienza con el análisis de las máquinas de Salto Grande. Se presentan las gráficas que comparan las distintas variables de las máquinas durante la simulación.

Tensión de Excitación.

En la figura 7.7, se muestra la tensión de excitación de la máquina con el modelo de UTE y con el modelo propuesto. Se observa que, la situación en régimen de la misma antes de que ocurra la falla, es idéntica, e inmediatamente después de que ocurre la misma, la respuesta de saturación máxima y mínima son muy similares. La respuesta de UTE permanece 11 ms más en saturación. Luego, la señal para el modelo de UTE tiene una respuesta más enérgica, de mayor ganancia, pero demora más tiempo en volver al régimen. Ambas respuestas son subamortiguadas. En la figura 7.8 se observa un detalle de la saturación.

Tensión en Terminales.

Para este caso las respuestas son aún más similares y se observan en la figura 7.9. En la misma se distingue una pequeña diferencia de sobretiro, cuando la señal se recupera de la falta (10 ms a partir del tiempo de ocurrencia de la falta 3 seg), lo que se muestra en detalle en la figura 7.10.

Ángulo de Giro.

En la figura 7.11 se observa la comparación del ángulo de giro de la máquina Salto Grande respecto a una

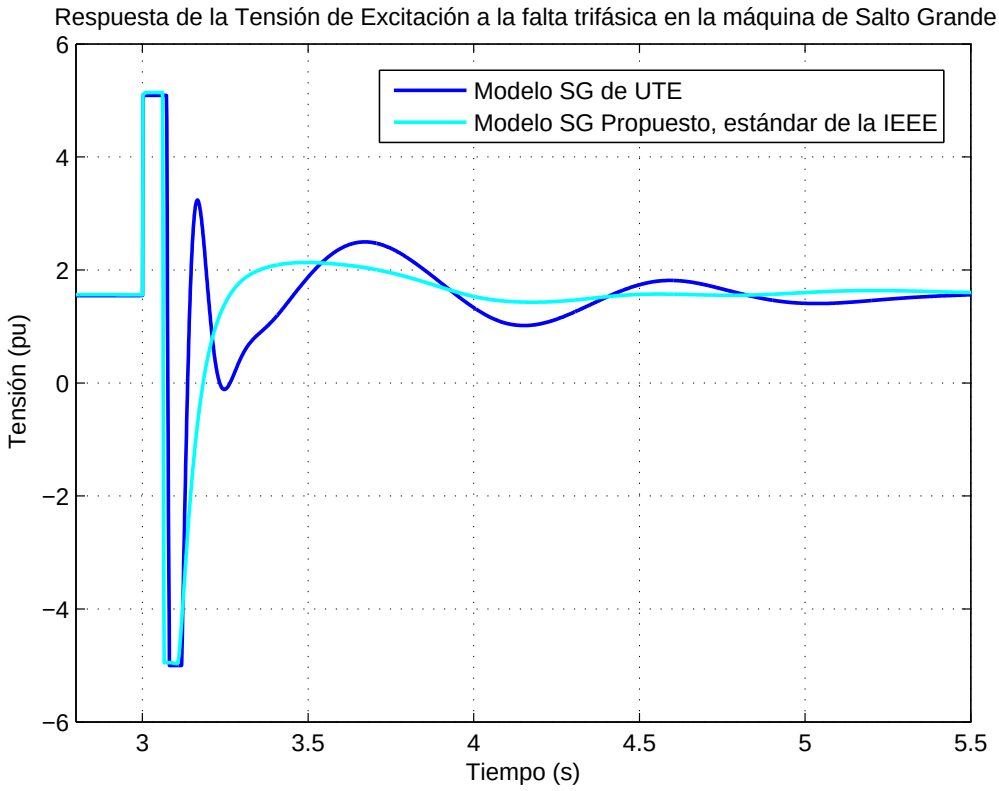


Figura 7.7: Máquina Salto Grande: comparación tensión de excitación.

misma referencia. En primera instancia, da la impresión de que las gráficas son distintas, pero se observa que la amplitud de la oscilación es menor a un grado para ambos casos. Se nota que la máquina no sufre problemas de sincronismo, y la variación del ángulo de giro es muy pequeña, lo que es razonable pensando que la falta ocurre en Palmar, cuando se está observando la máquina de Salto Grande, y que la referencia de ángulos es la máquina 1 de esta misma barra.

Potencia Activa.

En la figura 7.12 se observa, que las diferencias entre las potencias activas surgen luego de que el sistema se recupera de la falta. Para el modelo de UTE las oscilaciones son menos pronunciadas y llega antes al régimen.

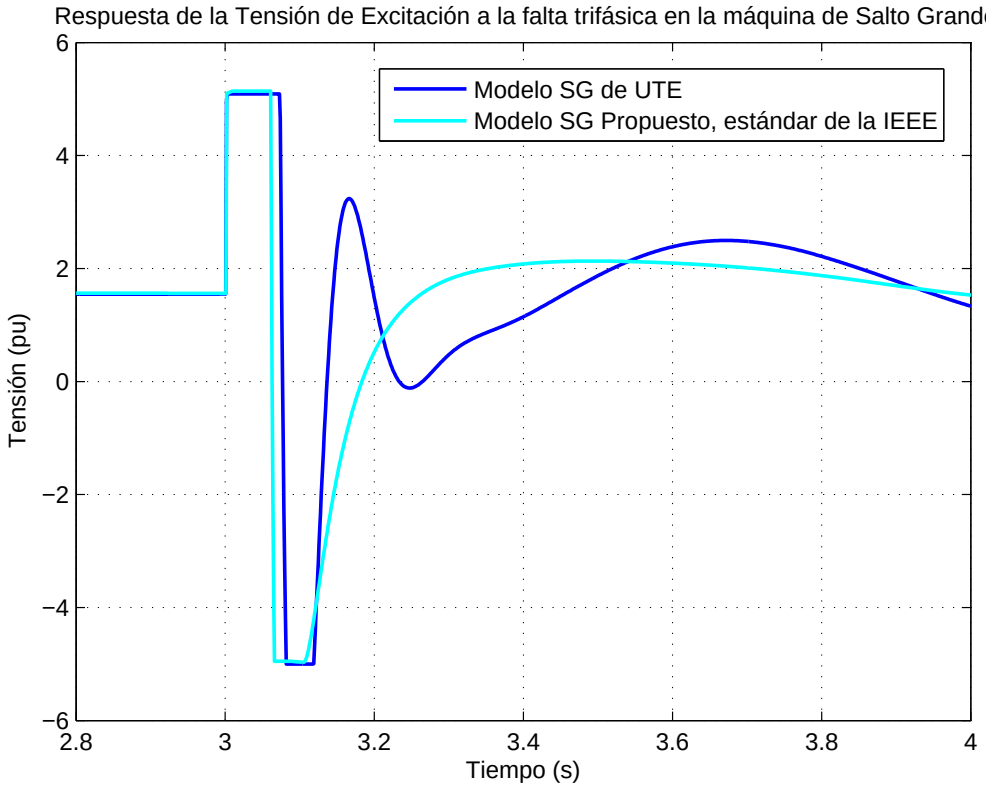


Figura 7.8: Máquina Salto Grande: detalle tensión de excitación.

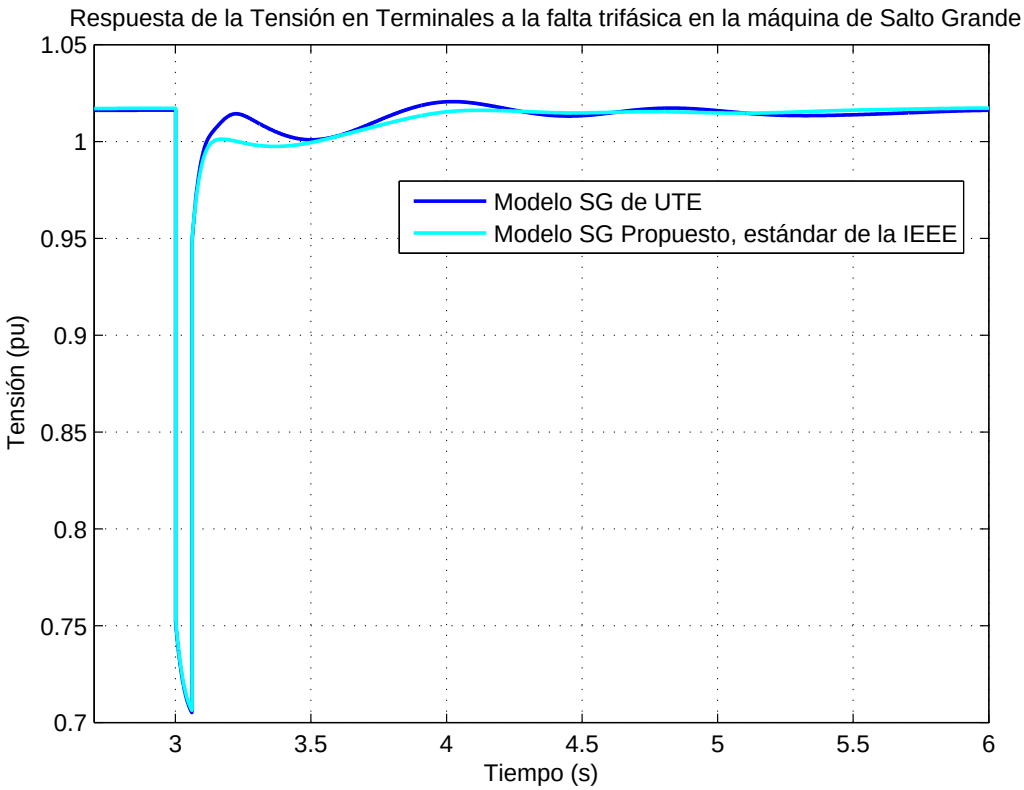


Figura 7.9: Máquina Salto Grande: comparación tensión en terminales.

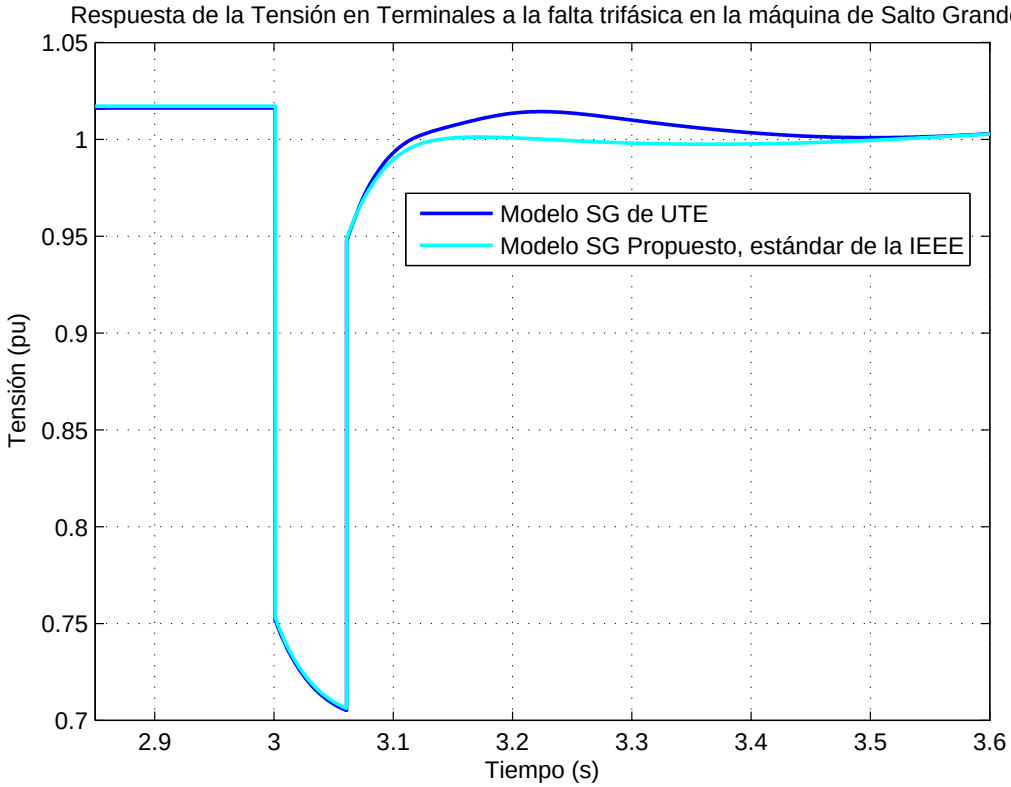


Figura 7.10: Máquina Salto Grande: detalle tensión en terminales.

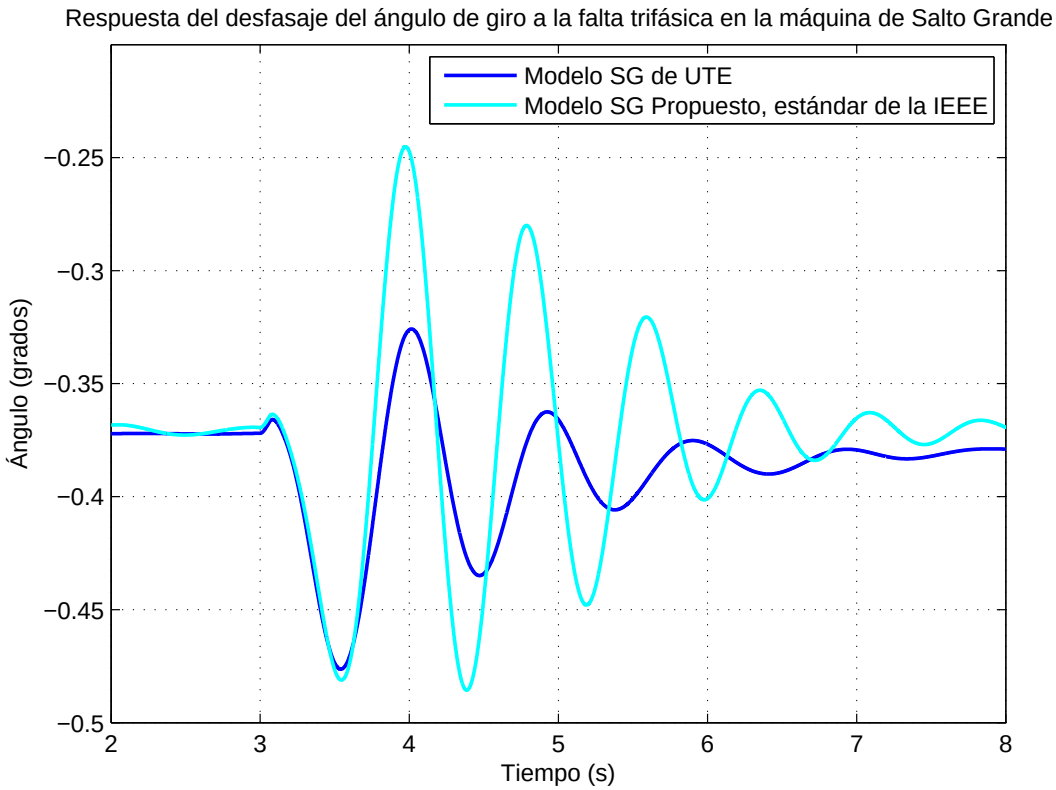


Figura 7.11: Máquina Salto Grande: comparación desfasaje de ángulo de giro.

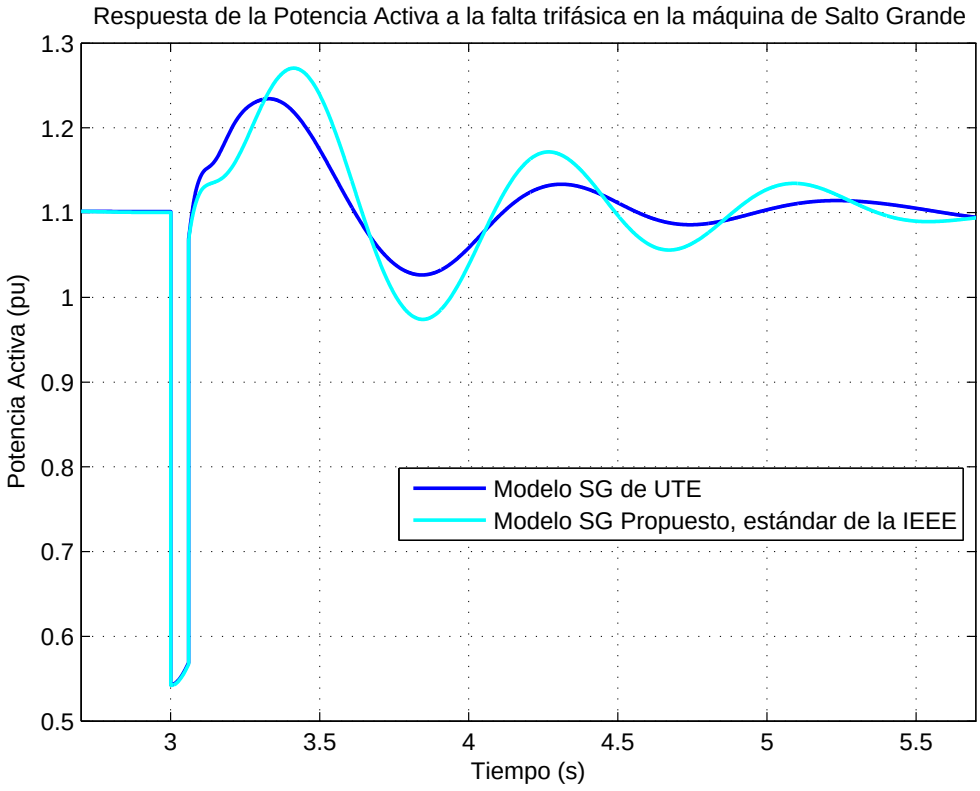


Figura 7.12: Máquina Salto Grande: comparación de potencia activa.

7.4.2. Sistema de Excitación de Palmar.

A continuación se presentan las gráficas que comparan las distintas variables durante la simulación.

Tensión de Excitación.

En la figura 7.13, se grafica la tensión de excitación de la máquina con el modelo de UTE y con el modelo propuesto. Se observa que la situación en régimen de la misma, antes de que ocurra la falla, es idéntica, e inmediatamente después es muy similar. Luego de la falta, la señal para el modelo estándar tiene una respuesta más suave, pero finalmente llegan juntas al valor de régimen. En la figura 7.13 se observa un detalle de la respuesta durante la falta.

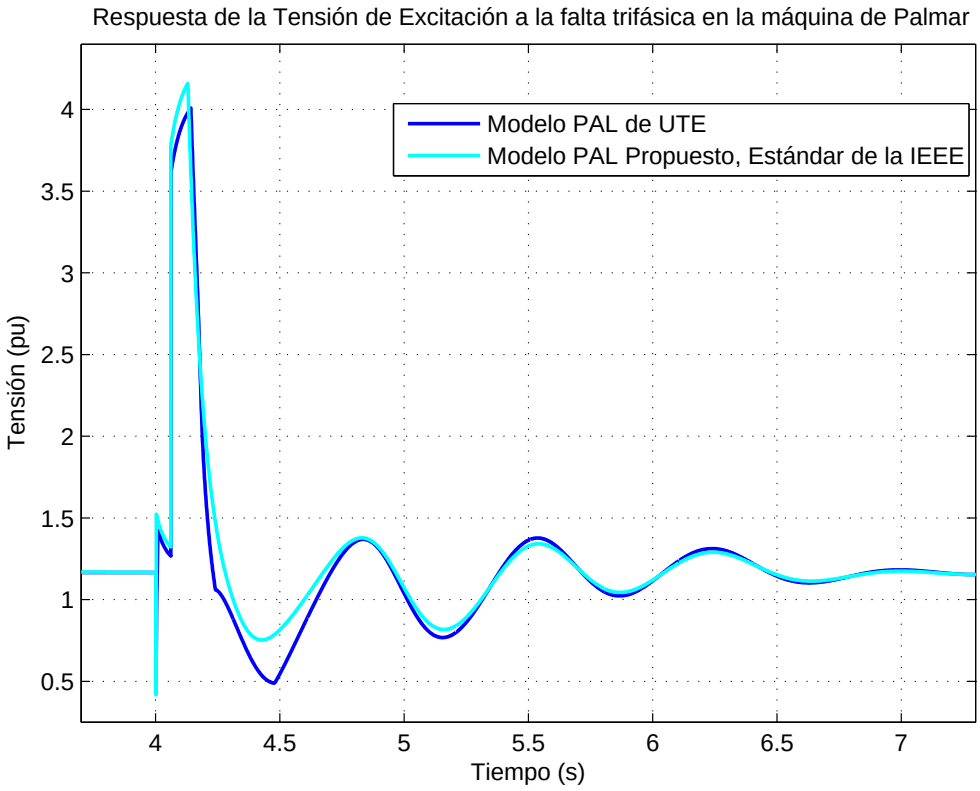


Figura 7.13: Máquina Palmar: comparación tensión de excitación.

Tensión en Terminales.

Para este caso las respuestas son muy similares y se observan en la figura 7.15. Para ver con más detalle las señales durante la falta se ilustra la figura 7.16.

Ángulo de Giro.

En la figura 7.17, se compara el ángulo de giro de la máquina de Palmar respecto a una misma referencia. En este caso, por tratarse de una falta mucho más cercana que para Salto Grande, el ángulo se llega a desfasar hasta 13 grados con respecto a la referencia y un máximo de 8 grados, entre el valor inicial y el primer swing. La respuesta es muy similar para los dos modelos.

Potencia Activa.

Este caso se observa en la figura 7.18. Las gráficas son muy similares.

Potencia Reactiva.

Se muestra en la figura 7.19. Las respuestas son idénticas.

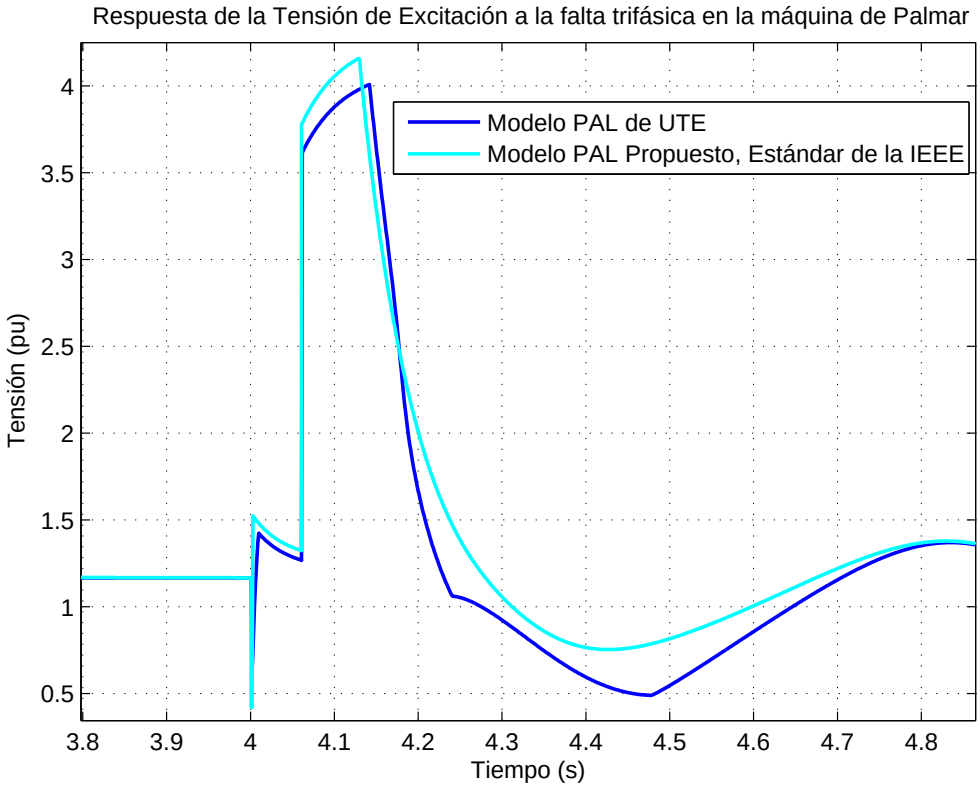


Figura 7.14: Máquina Palmar: detalle tensión de excitación.

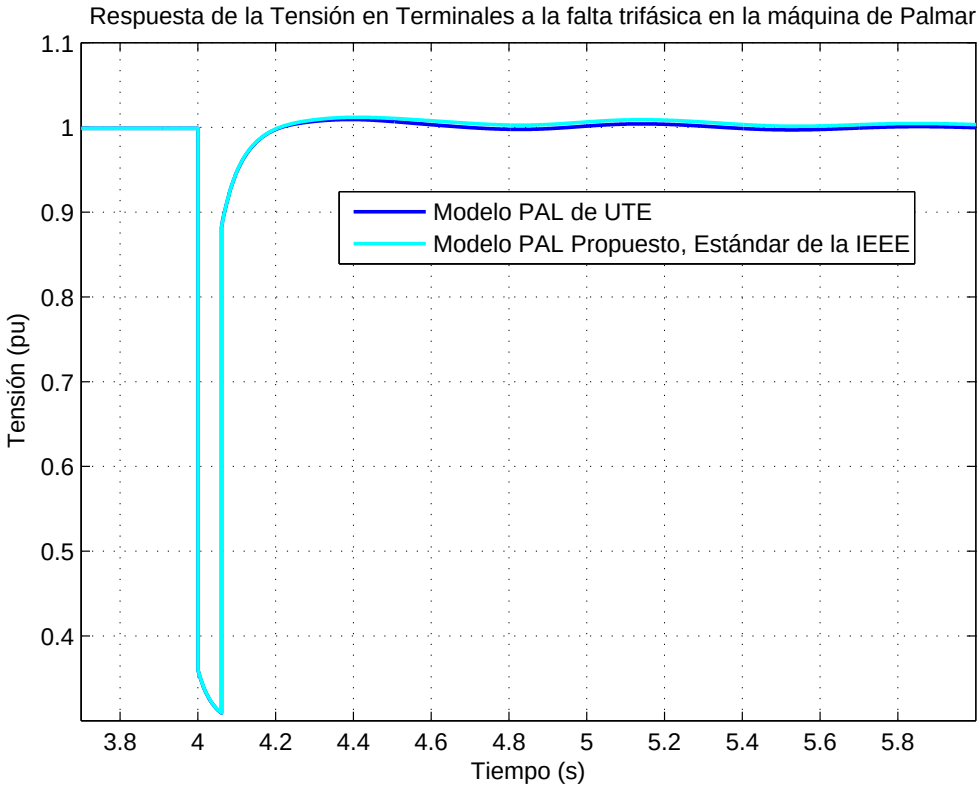


Figura 7.15: Máquina Palmar: comparación tensión en terminales.

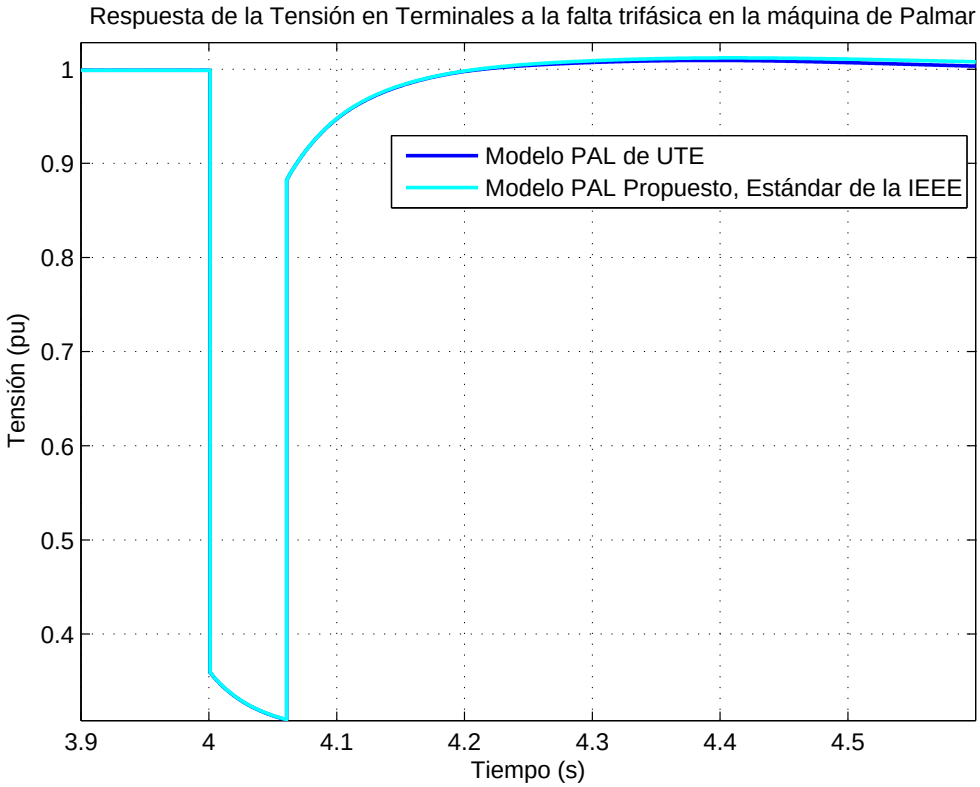


Figura 7.16: Máquina Palmar: detalle tensión en terminales.

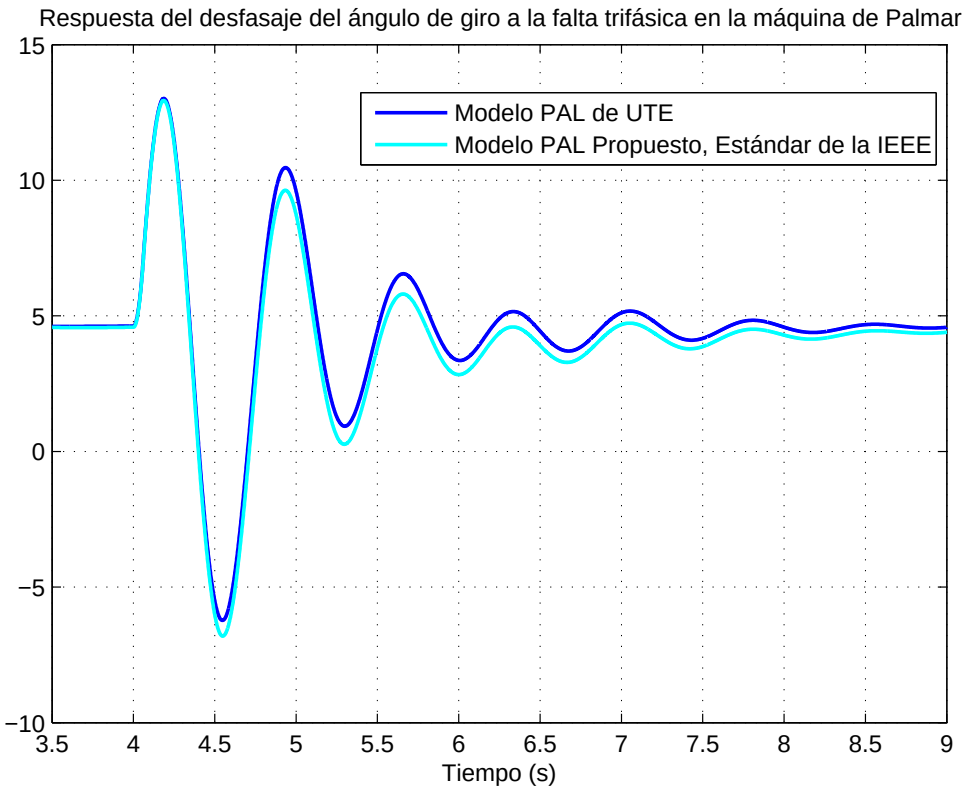


Figura 7.17: Máquina Palmar: comparación desfasaje de ángulo de giro.

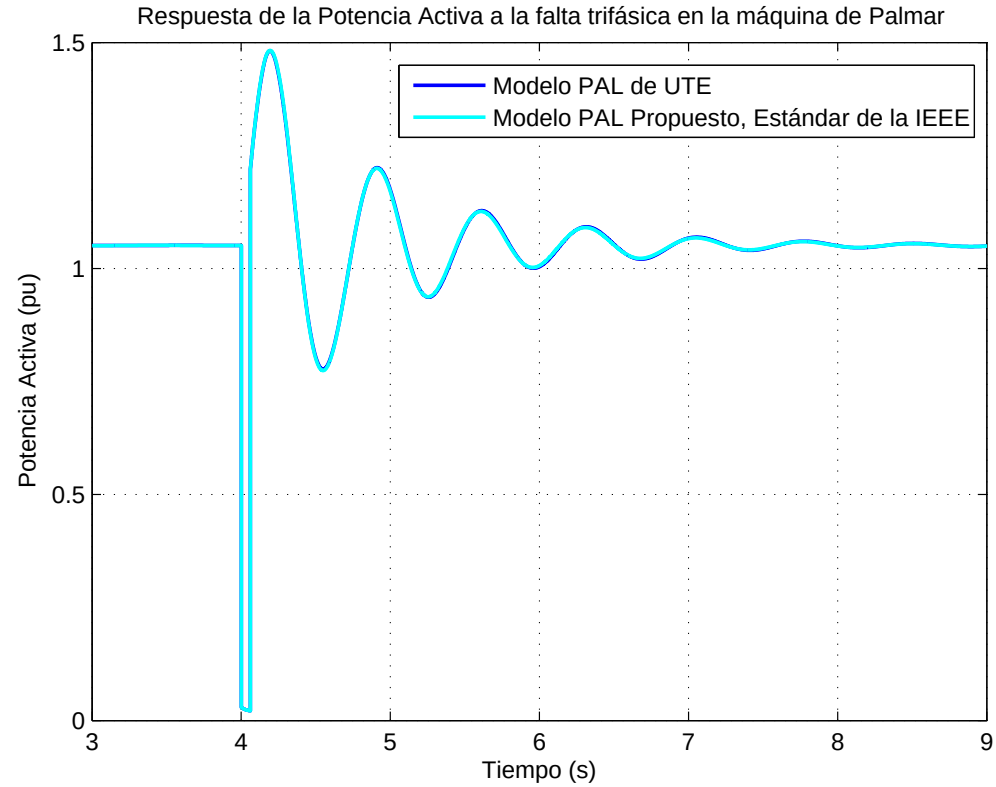


Figura 7.18: Máquina Palmar: comparación de potencia activa.

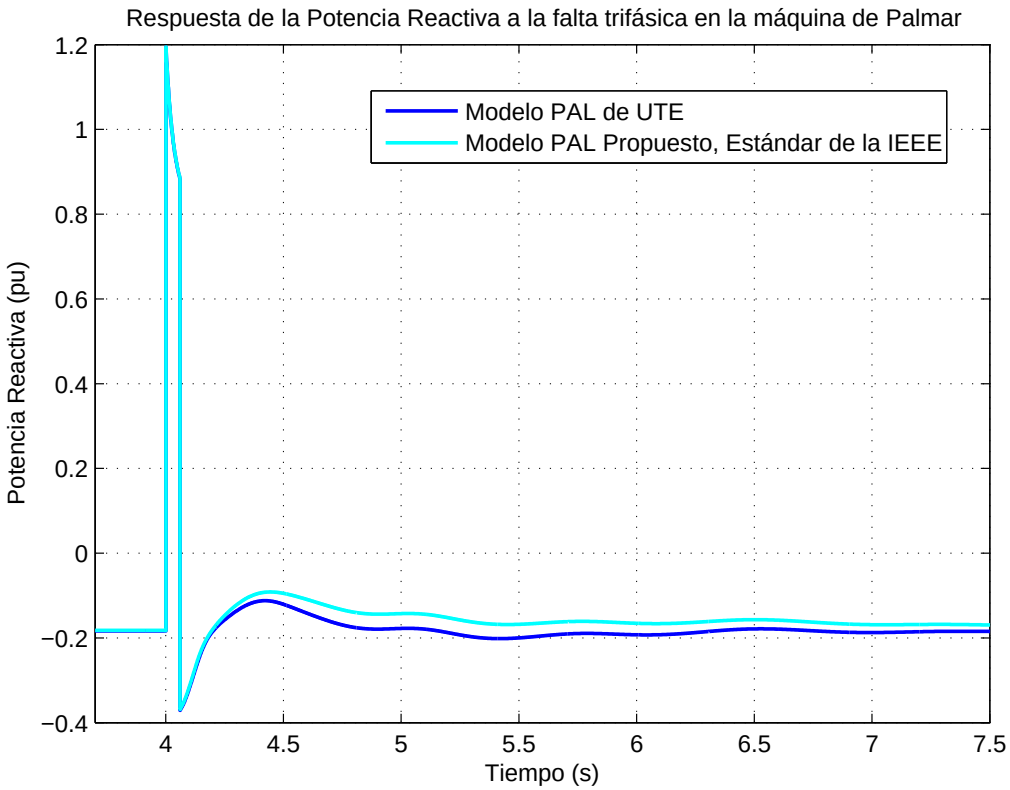


Figura 7.19: Máquina Palmar: comparación de potencia reactiva.

7.5. Conclusiones.

Luego del estudio de las respuestas de los modelos de UTE y los propuestos, se puede concluir que estos últimos se comportan de manera similar para la falta elegida. En particular, el modelo de Palmar, que fue el más exigido en la falta, tiene un comportamiento muy parecido entre ambos modelos.

Es bueno aclarar el hecho que la estimación de los parámetros de los modelos propuestos, se hizo para los ensayos documentados por UTE en pequeña señal. Mientras que, la validación en PSS/E se hizo para un sistema de red uruguaya-argentina que utiliza UTE en sus simulaciones. Por lo tanto, al calcular los parámetros de los modelos de la IEEE, estos se estimaron para tener igual respuesta frente a perturbaciones en pequeña señal.

Además, la estimación de los parámetros de los sistemas de excitación propuestos se hizo para una máquina síncrona estándar y no para las máquinas concretas de Salto Grande y Palmar.

Capítulo 8

Conclusiones Generales del Proyecto.

Luego de realizado el estudio documentado en este proyecto, se concluye que se pudo cumplir con el objetivo técnico formulado previamente al comienzo del mismo. Se generaron modelos estándar para las máquinas propuestas, que, para la simulación de la red planteada, tienen un buen grado de aproximación a las simulaciones que utiliza UTE, para modelar la realidad.

En la sección Conclusiones, de los capítulos en que se estudia cada máquina en particular, se resume el estándar propuesto con sus parámetros determinados. Además, se detalla la comparación en pequeña señal realizada. Si bien se pensaba tener una tolerancia del 10 %, en algunas constantes de tiempo, es necesario permitir un error relativo de hasta 15 %. Esto determina que no se pudo cumplir, exactamente, con los criterios de éxito del proyecto que se estimaron previamente.

En el capítulo 7, se documentan las simulaciones de los modelos propuestos conectados a la red uruguaya. No se realizó el cálculo cuantitativo de las diferencias, pero igualmente se observa la similitud de las respuestas de estos modelos, con los originales de UTE. En este punto se puede notar que, dado que el tiempo disponible para realizar el proyecto está acotado, no se pudieron realizar distintas simulaciones de las máquinas conectadas a la red, sometiéndolas a distintas faltas. Este sería un buen punto de partida para encarar futuros estudios, además de utilizar otros programas de simulación de sistemas de potencia.

Como ya se mencionó, y se puede observar a lo largo de esta documentación, la herramienta de trabajo elegida fue el Toolbox Simulink, de MatLab. La misma fue utilizada, dado que es una de las herramientas disponibles en facultad, y los estudiantes ya están familiarizados con su entorno. Fue de gran utilidad su aplicación de estimación de parámetros, lo que facilitó el trabajo a la hora de hacer el ajuste fino de los modelos. En cuanto a las desventajas enfrentadas, si bien Simulink tiene una gran cantidad de bloques y modelos, se encontraron problemas en el modelo de la máquina síncrona, como fue el ripple obtenido en la máquina de Salto Grande. Cabe recordar que se concluyó que el ripple era generado por el modelo de la máquina, y que no se observó en los demás modelos dado que el único que lo amplificaba era el de Salto Grande.

Otro problema con el que se convivió a lo largo del proyecto fue, que, como era de esperar, al implementar los mismos modelos en Simulink y en PSS/E, se tenían diferencias apreciables frente al mismo comportamiento. Si bien estas incongruencias no pudieron ser mitigadas, no fueron una limitante a la hora de realizar el proyecto.

Después del trabajo realizado con el estándar 421.5 de la IEEE, y los resultados obtenidos, se concluye que, al menos para los modelos abarcados en este trabajo, la gama de propuestas de la IEEE brinda buenas posibilidades para adaptar modelos de usuario existentes. Se trabajó con el estándar del año 2005, y se nota que en esta revisión se agregan modelos con respecto a la revisión del 1992, ampliando la gama de posibilidades. Además, para el caso particular de Palmar, si bien el modelo que tiene UTE presenta más detalle y a su vez más complejidad, a la hora de las simulaciones, no generaron diferencias apreciables.

El trabajo sirvió para desarrollar todas las actividades inherentes a la realización de un proyecto, la coordinación de actividades, el trabajo en equipo, la planificación, el replanteo y la reformulación. Fue una importante experiencia que será de utilidad a la hora del desempeño profesional.

Bibliografía

[1] Grupo de Estabilidad y Control del IIE. Modelado de la Máquina Síncrona para Estudios de Estabilidad.

[2] IEEE Power Engineering Society. IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, 2005.

[3] IEEE/CICGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions. Definition and classification of power system stability. *IEEE Transaction on Power Systems*, 19(2), 2004.

[4] Prabha Kundur. *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, Inc, 1994.

[5] Mathworks. SimPowerSystems 5.2.1. http://www.mathworks.com/products/simpower/description5.html.

[6] UTE Grupo PSS. Regulador de Tensión de Baygorria.

[7] UTE Grupo PSS. Sistema de Regulación de Tensión de Baygorria.

[8] UTE Grupo PSS. Modelos de usuario en PSS/E: Aplicación al regulador de tensión de Palmar. Technical report, Octubre 1999.

[9] UTE Grupo PSS. Modelos de usuario en PSS/E: Aplicación al regulador de tensión de Salto Grande. Technical report, Febrero 2000.

[10] UTE Grupo PSS. *Manual de modelos para PSS/E: Central Baygorria*, 3 edition, Marzo 2006.

[11] UTE Grupo PSS. *Manual de modelos para PSS/E: Central Palmar*, 3 edition, Marzo 2006.

[12] UTE Grupo PSS. *Manual de modelos para PSS/E: Central Salto Grande*, 3 edition, Marzo 2006.

[13] R.P. Schulz. Proposed Terms and Definitions for Power System Stability. *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, PAS-101(7), 1982.

[14] UTE - Grupo PSS. Regulador de Tensión de Palmar. Technical Report 1, Febrero 2000.

[15] UTE - Grupo PSS. Regulador de Tensión de Palmar. Technical Report 3, setiembre 2004.

[16] Ing.Carlos Alonso (PEE) e Ing. Freddy Rabín (EYP) UTE Grupo PSS. Regulador de Tensión de Palmar. Technical Report 2, Mayo 2003.

Glosario

AC
Corriente Alterna.

DC
Corriente Continua.

IEEE
The Institute of Electrical and Electronic Engineers.

IIE
Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República Oriental del Uruguay.

MatLab
Abreviatura de "MATrix LABoratory", es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M).

PSS
Estabilizador del Sistema de Potencia.

PSS/E
Programa de Simulación de Sistemas de Potencia, desarrollado por Siemens, para Estudios de Estabilidad Transitoria.

Simulink
Toolbox de MatLab para Simulación de Sistemas.

ST
Estático.

UTE
Administración Nacional de Usinas y Transmisiones Eléctricas.

Anexo A

Gestión de Proyecto.

En este anexo se presentan las actividades que se hicieron en paralelo durante el curso de Gestión de Proyecto, para cumplir con un requisito que la facultad establece, y que sirvió como guía y ayuda a la hora de encarar el trabajo. El proyecto surgió como necesidad del grupo de estabilidad y control de la facultad, previo al comienzo del mismo se realizaron reuniones con el tutor en las cuales se establecieron los alcances, los objetivos y criterios de éxito.

El curso de gestión de proyecto constó de varias entregas, cada una de las cuales encaraban un aspecto diferente del proyecto. Como entrega final, se elaboró un Plan de Proyecto que incluía los principales aspectos. Se identificaron las restricciones, se realizó un estudio identificando los principales riesgos que pueden afectar el proyecto, y un plan de acción para los mismos.

Se hizo énfasis en tener especificado el proyecto y los alcances del mismo antes de comenzar. Se elaboró un diagrama de Gantt para realizarle un mejor seguimiento, en el cual se discriminaron las principales tareas a realizar, y se asignaron los recursos necesarios.

Se marcaron dos hitos intermedios para registrar el avance general y poder así replantear el resto del proyecto para terminarlo en el tiempo establecido.

Como era de esperar, a lo largo del proyecto surgieron problemas, los cuales tuvieron que ser resueltos e implicaron cambios en las tareas planificadas. En cuanto a la cantidad de horas dedicadas la realidad fue muy cercana a lo que se planificó en un principio.

El principal cambio que tuvo el proyecto fue que, en primera instancia, se había pensado hacer la validación final de los modelos en el software DSAT. Las licencias para trabajar con el mencionado software llegaron recién para el final del proyecto, lo que provocó que se trabajara en las tres máquinas una por una, se validaban en pequeña señal, y se dejó para el final la validación en la red uruguaya. Finalmente se decidió validar los modelos contra el mismo software de UTE en el que estos se encontraban documentados. Para esto se necesitó de la ayuda de Ignacio Afonso, funcionario de UTE y docente de la Facultad, que tenía experiencia con el Software PSS/E.

A continuación se adjunta el Plan de Proyecto original.

A.1. Plan de Proyecto.

Resumen.

- Integrantes:
  1. Roberto Calvetti.
     - *CI:* 4.508.581-3
     - *email:* rocalvetti@gmail.com
  2. Ignacio Ferreño.
     - *CI:* 3.912.493-8
     - *email:* iferreno@gmail.com
  3. Agustín Fraschini.
     - *CI:* 3.791.222-6
     - *email:* afrasch@gmail.com
- Cliente: Instituto de Ingeniería Eléctrica - Facultad de Ingeniería.
- Tutor: Álvaro Giusto.
- Fecha prevista de finalización: El 10/03/2011 se entrega de la documentación del proyecto.
- Total de horas previstas: 2.530 horas.
- Entregables intermedios:
  1. Presentación Modelo Salto Grande.
     - Fecha de entrega: 15/09/2010.
     - Descripción: Se va a presentar un primer avance del proyecto, en particular está previsto que se entregue el modelado de la máquina de Salto Grande completo, lo que implica el modelo en Simulink y el modelo en DSAT validado. En esta instancia se va a hacer una revisión de la planificación del proyecto.
  2. Presentación Modelo Baygorria.
     - Fecha de entrega: 15/02/2011.
     - Descripción: Se va a presentar un segundo avance del proyecto, en particular está previsto que se entregue el modelado de la máquina de Baygorria completo, lo que implica el modelo en Simulink y el modelo en DSAT validado. En esta instancia está previsto realizar un ajuste de tiempos y tareas en caso de ser necesario para cumplir con la fecha de entrega del proyecto.

Descripción del Proyecto.

El proyecto nace de la necesidad del grupo de "Estabilidad y Control" del IIE de simular el comportamiento de la red uruguaya con el software de simulación de sistemas eléctricos de potencia llamado **DSAT**. El problema actual es que, si bien existen algunos modelos hechos en DSAT de los sistemas de excitación de los generadores de la red uruguaya, se pretende validarlos para que sean de mayor "confianza", a la vez que se busca tener nuevos modelos con los formatos estándares de la IEEE.

Además, si bien en documentaciones de UTE ya se encuentran modelos de los sistemas de excitación, éstos son para ser utilizados solo con el programa PSS/E, y por otro lado exceden lo imprescindible para el estudio de la estabilidad transitoria, por lo que se destaca la utilidad de implementar nuevos modelos.

Dentro de los generadores a estudiar, se encuentran los generadores síncronos de Palmar, Baygorria y Salto Grande.

Objetivo General.

Se pretende contribuir a una línea actual de investigación en la cual los integrantes del proyecto están interesados. Además, de parte de los estudiantes, se pretende reafirmar, adquirir y profundizar los estudios en las áreas de Control y Sistemas Eléctricos de Potencia. En cuanto a los objetivos más técnicos del proyecto, se espera poder contribuir con el grupo de estudio del IIE, generando los modelos para varias máquinas de distinta complejidad. También se pretende que éstos tengan un buen grado de aproximación al comportamiento real de las máquinas que tiene UTE y que describe en su documentación. Además, se busca realizar modelos estándares, definiendo los parámetros que se encuentran en los modelos de la IEEE, al igual que se pretende familiarizarse con un software que hoy en día se utiliza para el estudio de la estabilidad de los sistemas eléctricos de potencia.

Se considera que el proyecto es exitoso si se logran validar los modelos realizados contra la documentación de los ensayos que tiene UTE de las distintas máquinas. Si bien el criterio de éxito se piensa en primera instancia de forma más subjetiva y cualitativa, se plantea un estudio en "pequeña señal" y otro en "gran señal" para comparar los modelos.

Para el estudio en pequeña señal, se plantea calcular la respuesta al escalón del modelo de la máquina, y en base a la comparación de los valores de sobretiro y tiempo de establecimiento, se determinará si los modelos realmente se ajustan a la realidad. En primera instancia, se estima que se podrá lograr que estos parámetros se encuentren dentro de un margen del 10 % para el tiempo de establecimiento y un 5 % para el sobretiro, aunque se debe admitir que es un poco arriesgado anticiparlo. Para la validación en gran señal, se simulará en DSAT el comportamiento de la máquina, frente a un cortocircuito en un sistema de potencia elegido convenientemente, de modo que permita observar y comparar el valor del tiempo crítico de duración de la falta.

Otro criterio para la determinación de éxitos hace referencia a la cantidad de máquinas que se podrán modelar. Se considerará que el proyecto es exitoso si se pueden modelar al menos tres máquinas: Salto Grande, Baygorria y Palmar.

Actores, Supuestos y Restricciones.

Actores.

- Estudiantes: Roberto Calvetti, Ignacio Ferreño y Agustín Fraschini, quienes se encargan de la planificación, ejecución y cierre del proyecto.
- Tutor: Álvaro Giusto, quien se encarga de la definición del proyecto, alcance, brindar asistencia académica y evaluar los resultados.
- Cliente: el grupo de "Estabilidad y Control" del IIE, quien se verá beneficiado en caso de que el proyecto sea exitoso. Dentro del grupo se encuentran: Pablo Monzón, Celia Sena y Michel Artenstein.
- Facultad de Ingeniería: de ésta depende la cantidad de licencias del DSAT con las que podremos contar para trabajar.
- UTE: brinda la documentación necesaria, ya sean manuales, especificaciones técnicas de los generadores y también el comportamiento real de los sistemas de excitación de los distintos generadores.

Supuestos.

- Se parte de la base de que los modelados realizados por UTE "son" la realidad, ya que va a ser con lo que se determinará el éxito del proyecto.
- Se contará con las licencias necesarias del DSAT para al menos poder trabajar en red en la facultad de ingeniería.
- Se contará con la documentación necesaria de UTE para poder validar los resultados, en particular con los parámetros que se describieron en los criterios de éxito.
- Los tres integrantes del proyecto y el tutor, dispondrán de la presencia necesaria para la ejecución del proyecto.

Restricciones.

- La restricción más evidente e importante sería la del tiempo, ya que no se determina el tiempo necesario para el proyecto, sino que se pensó el proyecto en función de la restricción de tiempo presente por ser un proyecto de fin de carrera. Por más de que para definir el alcance del proyecto, se tuvo en cuenta el tiempo disponible, vale la pena remarcar este ítem ya que, dadas las condiciones del proyecto, es la que limita el alcance del proyecto al estudio de tres máquinas.
- Los posibles problemas para utilizar el programa DSAT, la restricción tanto en tiempo como en el lugar físico en que se puede utilizar el programa.

Especificación funcional del proyecto.

Una vez finalizado el proyecto, el grupo de Estabilidad y Control del IIE, dispondrá de los modelos validados para poder realizar simulaciones de la red uruguaya con el programa DSAT. En particular, se podrá estudiar la estabilidad transitoria de los distintos generadores frente a defectos en la red, con un grado de precisión tal, que los resultados obtenidos son confiables y acorde a los que se tendrían si las simulaciones fueran realizadas con el PSS/E y con los modelos que dispone UTE.

En la etapa de prediseño, se pensó el proyecto de manera de poder realizar el modelado de 3 máquinas diferentes. Cada una de las máquinas, lleva un proceso de análisis, modelado en Simulink, y luego modelado en DSAT. De esta manera, quedan definidas las tareas a realizar que se observan en la figura A.1, que permiten realizar un control y seguimiento del avance del proyecto.

Alcance del Proyecto.

El proyecto abarca el estudio y análisis de los sistemas de excitación de las máquinas de Salto Grande, Palmar y Baygorria. A continuación detallamos el alcance del proyecto:

- Estudio de las máquinas síncronas involucradas y sus sistemas de excitación.
- Simplificación de los sistemas de excitación, solo tomando constantes de tiempo que influyen en los estudios de estabilidad transitoria de los sistemas eléctricos de potencia.
- Ordenar, y organizar la documentación brindada por UTE, que es lo que se toma como realidad.
- Implementación de los modelos en la herramienta Simulink del MatLab para hacer simulaciones.
- Implementación de los modelos en DSAT.
- Adaptación de los modelos de sistemas de excitación estándares de la IEEE, definiendo los bloques de control y las constantes a utilizar en base a modelos estandarizados. La ventaja de hacer esto es que luego se podrán simular con cualquier software.
- Validar los resultados obtenidos.

No se encuentra dentro del alcance del proyecto el modelado para comportamientos subtransitorios ni en régimen.

Objetivos específicos del proyecto.

1. **Salto Grande.**
   a) *Obtener un modelo del sistema de excitación.* El resultado se podrá medir con simulaciones en Simulink y verificando que el sobretiro y el tiempo de asentamiento sean, en la respuesta en pequeña señal, iguales a los documentados por UTE a menos de un margen de tolerancia que se especifica un 5 % para el sobretiro y 10 % para el tiempo de asentamiento.
   b) *Modelo en DSAT.* El resultado se podrá medir bajo simulaciones en DSAT, conectando la máquina de Salto Grande al sistema de potencia (elegido de forma inteligente), y verificando que el comportamiento en pequeña y gran señal sea como los documentados por UTE a menos de márgenes de tolerancia.

2. **Palmar.**

   a) *Obtener un modelo del sistema de excitación.* El resultado se podrá medir con simulaciones en Simulink y verificando que el sobretiro y el tiempo de asentamiento sean, en la respuesta en pequeña señal, iguales a los documentados por UTE a menos de un margen de tolerancia que se especifica un 5 % para el sobretiro y 10 % para el tiempo de asentamiento.

   b) *Modelo en DSAT.* El resultado se podrá medir bajo simulaciones en DSAT, conectando la máquina de Palmar al sistema de potencia (elegido de forma inteligente), y verificando que el comportamiento en pequeña y gran señal sea como los documentados por UTE a menos de márgenes de tolerancia.

3. **Baygorria.**

   a) *Obtener un modelo del sistema de excitación.* El resultado se podrá medir con simulaciones en Simulink y verificando que el sobretiro y el tiempo de asentamiento sean, en la respuesta en pequeña señal, iguales a los documentados por UTE a menos de un margen de tolerancia que se especifica un 5 % para el sobretiro y 10 % para el tiempo de asentamiento.

   b) *Modelo en DSAT.* El resultado se podrá medir bajo simulaciones en DSAT, conectando la máquina de Baygorria al sistema de potencia (elegido de forma inteligente), y verificando que el comportamiento en pequeña y gran señal sea como los documentados por UTE a menos de márgenes de tolerancia.

WBS.
En la figura A.1 se observa la WBS del proyecto.

Análisis de Riesgos.

La Gestión de Riesgos es un proceso sistemático que consiste en identificar los riesgos asociados a un proyecto y cuantificarlos, analizando su probabilidad de ocurrencia y nivel de impacto de modo de planificar respuestas que permitan minimizar las consecuencias adversas que estos generan. Para realizar el análisis de riesgo se debe considerar el estudio de la probabilidad ya q no hay seguridad de la ocurrencia del evento ni del efecto que su ocurrencia conlleva.

Los riesgos se deben gestionar de manera proactiva y efectiva durante toda la duración del proyecto, por lo tanto además de este estudio inicial se deben evaluar nuevos riesgos que puedan surgir durante el transcurso del proyecto y hacer un seguimiento de los mismos.

Estimación de los riesgos.
Se identificaron los diferentes riesgos que pueden afectar de manera negativa a nuestro proyecto. A la hora de la formulación se tuvieron que realizar una serie de supuestos, en la medida que estos supuestos no se cumplan tenemos riesgos asociados que afectan el curso normal del proyecto.

Riesgos asociados a supuestos.

- *Supuesto:* Tenemos la información necesaria de las máquinas y software PSS/E.
  Riesgo 1: Falta de información de UTE a la hora de modelar y de validar los resultados.

- *Supuesto:* Tenemos disponibilidad del DSAT.
  Riesgo 2: No disponer llaves de licencia para el software DSAT.
  Riesgo 3: Conseguir únicamente llaves de licencia de DSAT para trabajar en la red de la facultad.

Riesgos asociados al manejo de archivos.
Riesgo 4: Pérdida de información debido a rotura de discos o equipos dónde se guarden los archivos. **Riesgo 5:** Pérdida de información por sobre escritura de datos, por manejo de diferentes versiones de archivos y trabajar al mismo tiempo en diferentes equipos.

Riesgos asociados a los integrantes del proyecto.
Riesgo 6: Problemas de disponibilidad horaria de los integrantes del grupo para asistir a las reuniones en los horarios establecidos por problemas laborales. Este riesgo se puede agravar en caso de disponer únicamente

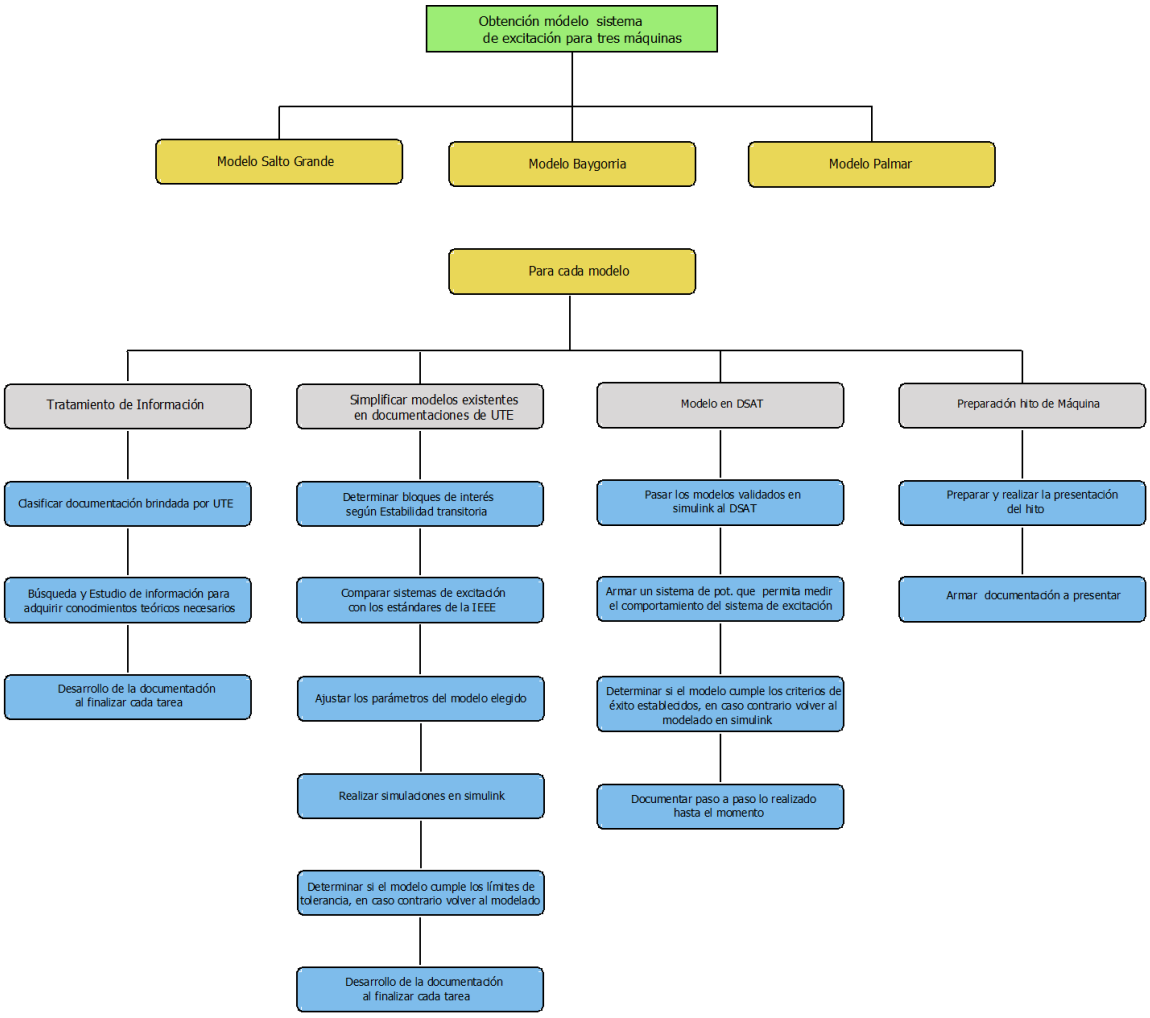


Figura A.1: WBS

de licencias para trabajar en la red de la facultad.
Riesgo 7: Abandono del proyecto por parte de alguno de los integrantes por motivos de fuerza mayor.
Riesgo 8: Conflictos entre los integrantes del grupo que lleven a problemas de comunicación y de avance en el proyecto.

Riesgos asociados a la formulación del proyecto.
Riesgo 9: Las tareas identificadas no se pueden realizar en el tiempo inicialmente previsto por error en la planificación. La planificación se basó en estimaciones y no contamos con la experiencia suficiente para realizar estas estimaciones.
Riesgo 10: En la planificación no se incluyeron todas las tareas necesarias, quedando trabajo por hacer que no es parte de ninguna tarea establecida y que afecta la duración del proyecto.
Riesgo 11: Falta de claridad en la especificación de los criterios de éxitos y de aprobación del proyecto. Aunque se hizo especial hincapié a la hora de establecer el alcance y los criterios de éxito del proyecto la falta de experiencia puede provocar indefiniciones en estos puntos críticos que afecten la finalización del proyecto.

Evaluación inicial de los riesgos.
Para la evaluación inicial de los riesgos se elabora una matriz de riesgos dónde se asignan diferentes probabilidades y niveles de impacto a los riesgos identificados con el fin de establecer prioridades y elaborar un efectivo plan de respuestas.

Matriz de Riesgos Inicial.

En la figura A.2 se muestra la matriz de riesgos inicial, la que se va a tratar de modificar con el plan de respuestas para no tener riesgos en zona roja ni amarilla.

		Probabilidad de ocurrencia		
		Poco Probable	Moderado	Muy Probable
Nivel de impacto	Ninguno			
	Bajo			6
	Medio	8	1 , 10 , 11	5 , 9
	Alto	4	3	
	Extremo	7	2	

Figura A.2: Matriz de riesgos inicial

Plan de respuestas.

Una vez identificados los riesgos se elabora un plan de respuestas con el fin de poder mitigar el efecto negativo en el proyecto de los riesgos más relevantes evaluando y combinando la probabilidad de ocurrencia y su nivel de impacto. Las posibles soluciones pueden hacer que los riesgos se eliminen o que cambien su probabilidad e impacto desplazándolos a una nueva ubicación en la matriz. Se busca con el plan de respuesta "mover"los riesgos que quedaron ubicados en la "zona rojaz eventualmente "mover"los riesgos que quedaron ubicados en la "zona amarilla".

La elaboración del plan de respuestas genera tareas adicionales que deben ser consideradas en la planificación del proyecto.

- **Riesgo 1:** Falta de información de Ute a la hora de modelar o de validar los resultados.
  Respuesta 1: Solución armar un sistema que nos permita validar los modelos con los datos disponibles, conseguir información adicional de UTE, ya sean pruebas hechas con el PSS/E, o tener alguna reunión con ellos para ver si nos pueden brindar la información que falta.

- **Riesgo 2:** No disponer llaves de licencia para el software DSAT.
  Respuesta 2: Replantear el proyecto para hacer solo simulaciones del modelado con Simulink, hacer otros estudios etc.
  Tareas asociadas: Reformulación del proyecto.

- **Riesgo 3:** Conseguir únicamente llaves de licencia de DSAT para trabajar en la red de la facultad.
  Respuesta 3: Reasignar tiempos y horarios de modo de poder trabajar en la facultad.

- **Riesgo 4:** Pérdida de información debido a rotura de discos o equipos dónde se guarden los archivos.
  Riesgo 5: Pérdida de información por sobreescritura de datos por manejo de diferentes versiones de los archivos y trabajar al mismo tiempo.
  Respuesta 4 y 5: Uso de un software que permita respaldar y compartir los archivos en un servidor web y gestionar los diferentes cambios de versiones.
  Tarea: Búsqueda, selección, instalación y configuración del software adecuado para cumplir con esta función .Se eligió el software Dropbox que cumple con las funcionalidades requeridas.

- **Riesgo 6:** Problemas de disponibilidad de los integrantes del grupo para las reuniones en los horarios establecidos por problemas laborales.
  Este riesgo se asume, si bien es muy probable dado que los tres integrantes del proyecto trabajamos, su nivel de impacto es bajo porque se pueden coordinar o buscar horarios alternativos para dedicarle al proyecto.

- **Riesgo 7:** Abandono del proyecto por parte de alguno de los integrantes por motivos de fuerza mayor.
  Respuesta 7: Reformulación del proyecto. Recortar las tareas o el alcance del proyecto.

- **Riesgo 8:** Conflictos o peleas entre los integrantes del grupo que lleven a problemas de comunicación y de avance en el proyecto. Este riesgo se asume, por ser poco probable y con un nivel de impacto medio.

- **Riesgo 9:** Las tareas identificadas no se pueden realizar en el tiempo inicialmente previsto por error en la planificación.
  Riesgo 10: En la planificación no se incluyeron todas las tareas necesarias, quedando trabajo por hacer que no es parte de ninguna tarea establecida y que afecta la duración del proyecto.
  Riesgo 11: Falta de claridad en la especificación de los criterios de éxitos y de aprobación del proyecto.
  Respuestas 9, 10,11: Para controlar efectivamente estos riesgos, se realizará un seguimiento de los mismos durante el transcurso del proyecto, revisando en caso de ser necesario la planificación y la distribución de tiempo para las diferentes tareas.

Luego de aplicado el plan de respuestas la matriz final de riesgos de riesgos se puede observar en la figura A.3.

		Probabilidad de ocurrencia		
		Poco Probable	Moderado	Muy Probable
Nivel de impacto	Ninguno			
	Bajo		1, 3, 10, 11	6 , 9
	Medio	8	2	
	Alto	7		
	Extremo			

Figura A.3: Matriz de riesgos final

Anexo B

Contenido del CD.

En este anexo se presenta el contenido del CD, que forma parte de la documentación del proyecto. El CD cuenta con un menú interactivo que permite explorar su contenido, en el cual se incluye la versión digital de este archivo, los modelos desarrollados y los resultados obtenidos. Para los sistemas de excitación estudiados, se tienen las siguientes carpetas.

- Modelos Simulink. Contiene dos archivos para cada modelo realizado, estos archivos tienen el mismo nombre que el utilizado en la documentación y diferentes extensiones. El archivo con extensión *.mat*, incluye los parámetros para poder realizar la simulación del modelo. El archivo con extensión *.mdl*, contiene la implementación en Simulink del modelo en cuestión.
- Figuras. Contiene las respuestas obtenidas en las simulaciones de pequeña señal. Cada gráfica se presenta en dos formatos, *.tif* que permite abrirlas con cualquier editor de imágenes y *.fig* para poder visualizarlas con las herramientas de MatLab.
- Validación PSS/E. Contiene los resultados de la validación realizada con el software PSS/E para Salto Grande y Palmar, como se explica en el capítulo 7. Se incluyen los archivos con extensión *.out*, que son archivos de salida con los valores correspondientes a las simulaciones en PSS/E, y las gráficas obtenidas con esos valores en MatLab, donde se comparan las respuestas de los modelos utilizados por UTE y los desarrollados según la norma IEEE.

Con lo expresado anteriormente la estructura del CD queda de la siguiente manera.

- Tesis pdf
- Salto Grande
    - Modelos Simulink
    - Figuras
    - Validación PSS/E
- Baygorria
    - Modelos Simulink
    - Figuras
- Palmar
    - Modelos Simulink
    - Figuras
    - Validación PSS/E

Modelado de Sistemas de Excitación de Máquinas Síncronas.

Roberto Calvetti, Ignacio Ferreño, Agustín Fraschini

***Abstract*—En este artículo se detalla el procedimiento seguido para el modelado de sistemas de excitación según estándares IEEE. Se parte de un modelo de usuario particular, y se lleva a un modelo estándar de la norma 421.5 de la IEEE. Luego, se validan los resultados obtenidos en pequeña señal y frente a una perturbación en la red uruguaya con el software PSS/E.**

***Index Terms*—Estabilidad Transitoria, Máquinas Síncronas, Sistemas de Excitación.**

I. Introducción

EL presente trabajo nace de la necesidad, del grupo de Estabilidad y Control del Instituto de Ingeniería Eléctrica, de simular el comportamiento de la red uruguaya. El problema que se abarca es que, si bien existen modelos de los generadores, se busca estandarizarlos con los formatos propuestos por la IEEE.

La empresa eléctrica UTE utiliza para realizar simulaciones de estabilidad transitoria un software particular (PSS/E de Siemens), y los sistemas de excitación están implementados como modelos de usuario en dicho programa. En algunos casos, estos modelos exceden lo imprescindible para estudios de estabilidad. Dentro de los generadores a estudiar, se encuentran los de las centrales hidroeléctricas de Salto Grande, Palmar y Baygorria.

Si bien las represas están conformadas por varias máquinas, se trabajará con una sola y al simular la red completa, se utilizará el mismo modelo para todas las máquinas. Los parámetros y los modelos de usuario de los sistemas de excitación de las máquinas mencionadas, fueron tomados de la documentación brindada por UTE.

El estudio, modelado y ajuste se realizó con el software Simulink de MatLab. Los resultados obtenidos fueron validados observando los transitorios, al introducir una falta en la red uruguaya con el software PSS/E. La validación consiste en la comparación de las respuestas con los modelos de los sistemas de excitación ya utilizados por UTE, e implementados en el sistema, contra el mismo sistema con los modelos alternativos propuestos en el proyecto.

II. Generalidades.

El procedimiento realizado fue, en todos los casos, el siguiente:

1) Análisis del modelo utilizado por UTE.
2) Selección del modelo IEEE.
3) Determinación de los parámetros del modelo.
4) Validación de los resultados en pequeña señal.
5) Validación de los resultados en PSS/E.

A. Modelos utilizados por UTE.

En los 3 casos de estudio que se presentan en el proyecto, se parte de una documentación elaborada por UTE, en la que se encuentra un modelo del sistema de excitación, y la respuesta de dicho modelo cuando se le aplica un escalón en la tensión de referencia. Los modelos están implementados en el software PSS/E y las respuestas al escalón están solamente en formato gráfico. Por lo tanto es fundamental pasar estos modelos a un programa de modelado y simulación de sistemas, tanto de control como de potencia, ya que de lo contrario sería imposible realizar una validación de los modelos desarrollados.

El programa elegido para realizar estos trabajos, junto con el resto de los modelados y simulaciones es el Simulink de MatLab, debido al gran poder de cálculo, y la posibilidad de incorporar fácilmente en un mismo modelo sistemas de control y de potencia. Conjuntamente con la implementación en Simulink de los modelos utilizados por UTE, se realiza el análisis de los mismos, con el fin de identificar el tipo de sistema de excitación, y los componentes fundamentales que ayuden a seleccionar el estándar IEEE más adecuado.

B. Modelos IEEE.

Modelar los sistemas de excitación según los estándares de la norma 421.5 IEEE, cuenta con la principal ventaja de que cualquier programa de simulación de sistemas de potencia los tiene incorporados en su librería. Posiblemente no sea pueda modelar todos los sistemas de excitación que se presenten en la práctica según un modelo de la norma, pero lo cierto es que va incorporando nuevos modelos y tiene una interesante gama de posibilidades.

En primer lugar, se hace una separación en las 3 grandes categorías de sistemas de excitación:

- Sistemas de excitación DC.
- Sistemas de excitación AC.
- Sistemas de excitación estáticos (ST).

Cada sistema de excitación se clasifica y se pone adentro de una de las categorías anteriores y se nombran con 4 letras: las primeras dos indican el tipo de sistema de excitación (ya sea DC, AC o ST), la tercera letra es un número correlativo que se reinicia con el tipo de sistemas de excitación y la cuarta letra es una A o B, dependiendo si es un modelo de la norma revisada en 1992 (letra A) o en 2005 (letra B). Por ejemplo, el modelo “DC4B” es el cuarto modelo de sistemas de excitación DC y se incorporó en la revisión del 2005.

El procedimiento seguido para buscar el estándar que mejor se adecúe a un modelo determinado sería definir el tipo de sistema de excitación (DC, AC o ST) y luego, dentro de cada

categoría, ver el que mejor representa a lo que se busca en cuanto a los bloques que componen el sistema. El tercer paso sería calcular los parámetros de cada bloque, para que ambos sistemas tengan la misma respuesta frente a transitorios en la red.

C. Determinación de los parámetros.

A partir del modelo IEEE seleccionado, se deben ajustar sus parámetros, de manera que el sistema propuesto tenga el mismo comportamiento que el sistema de UTE.

Para determinar el valor de los parámetros, se utilizó el "Control and Estimation Tool Manager" que es una herramienta de MatLab que permite calcular parámetros de un modelo en Simulink, para que la respuesta se aproxime a una curva designada previamente. Este programa realiza un procedimiento iterativo por mínimos cuadrados, hasta que la diferencia entre las curvas es menor a un valor establecido.

El uso del programa debe venir acompañado de un análisis previo del sistema, en el que se le deben fijar manualmente todos los parámetros posibles para minimizar el error de convergencia. Por lo tanto, lo que se hizo fue analizar ambos modelos (el estándar IEEE y el de UTE) para poder ajustar todos los parámetros posibles y luego estimar el resto.

D. Validación de los resultados en pequeña señal.

Con el modelo estándar IEEE y el modelo de UTE implementado en Simulink, se procede a la validación de los resultados en pequeña señal. Para la misma se tuvieron en cuenta los siguientes índices:

1) Tensión de Excitación:
   - Valores de Régimen: valores de régimen de la tensión de excitación antes y después del escalón.
   - Tiempo de Bajada: siendo ΔE_{FD} la diferencia entre el valor inicial y el final, el tiempo de bajada se define como el tiempo en el que la señal pasa de estar en un 10% de ΔE_{FD} por debajo del valor inicial (instante t_1) y un 10% de ΔE_{FD} por encima del valor final (instante t_2).
   - Tiempo de Asentamiento: es el tiempo en que la señal permanece en un entorno del $\pm 5\%$ de la diferencia entre el valor final y el inicial.
2) Tensión Terminal:
   - Valores de Régimen: valores de régimen de la tensión terminal antes y después del escalón.
   - Tiempo de Subida: siendo ΔE_T la diferencia entre el valor inicial y el final, el tiempo de subida se define como el tiempo en el que la señal pasa de estar en un 10% de ΔE_T por encima del valor inicial (instante t_1) y un 10% de ΔE_T por debajo del valor final (instante t_2).
   - Tiempo de Asentamiento: es el tiempo en que la señal permanece en un entorno del $\pm 5\%$ de la diferencia entre el valor final y el inicial.

E. Validación de resultados frente a una perturbación en la red.

Finalmente, se hace la validación de los resultados obtenidos, en donde se simula una falta en la red en PSS/E, con los sistemas de excitación ya utilizados por UTE y se compara contra la misma falta en la red, con los modelos IEEE propuestos. Se realizó un análisis cualitativo de las respuestas.

A continuación se va a entrar en detalle en el modelado de la máquina de Salto Grande y se va a presentar el de Palmar con los resultados obtenidos. El modelo de la máquina de Baygorria no se considera de interés en este artículo, ya que el modelo utilizado por UTE se puede modelar directamente como un estándar de la norma IEEE. Para más información de la máquina de Baygorria ver [2].

III. Sistema de Excitación de Salto Grande.

A continuación se presenta el estudio del sistema de excitación de Salto Grande, el cuál concluye con el modelo estándar IEEE.

A. Modelo de UTE.

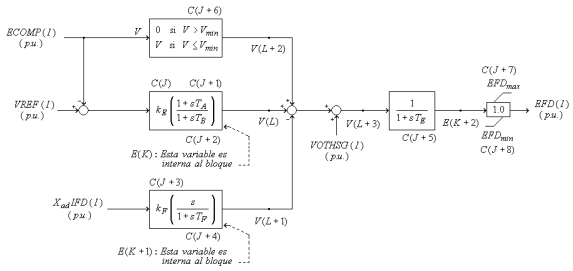


Fig. 1. Regulador de Tensión de Salto Grande

En la figura 1, se observa el diagrama de bloques del regulador de tensión de Salto Grande, obtenido de la documentación de UTE.

En primer lugar se hizo un análisis de este diagrama de bloques, y se hizo la implementación del mismo en Simulink, la cual no trajo demasiadas complicaciones ya que los bloques que lo componen están disponibles en su librería.

En los terminales de la máquina, se puso una carga puntual, de impedancia constante. Se trató de que la carga sea la misma que la utilizada en la simulación de UTE, pero como no se contaba con ese valor, el mismo fue estimado.

En la figura 2, se observa la implementación del sistema en Simulink.

El objetivo de implementar este modelo en Simulink fue tener un punto de comparación para poder hacer un análisis cuantitativo de este modelo con el de IEEE que se va a proponer más adelante. Por lo tanto, se realizaron las mismas simulaciones que UTE y en la figura 3 se puede observar la respuesta para la tensión de excitación y tensión terminal de la máquina.

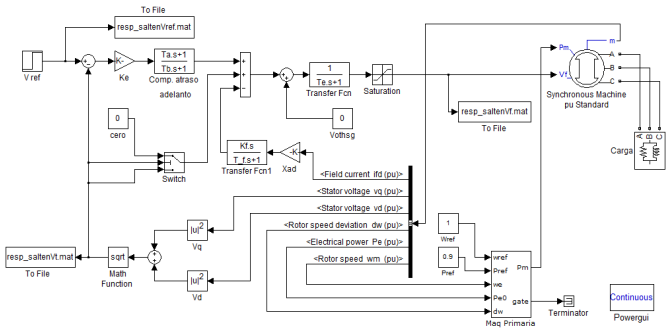


Fig. 2. Regulador de Tensión de Salto Grande implementado en Simulink

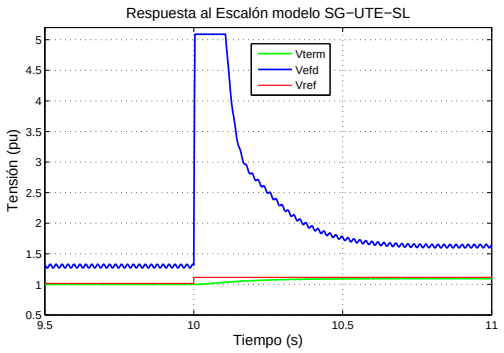


Fig. 3. Sistema de excitación de Salto Grande en Simulink: Respuesta al escalón.

B. Modelo IEEE.

El modelo elegido para Salto Grande, siguiendo el procedimiento descrito anteriormente, es el estándar "ST1A", y se puede observar en la figura 4. El mismo corresponde a un sistema de excitación estático.

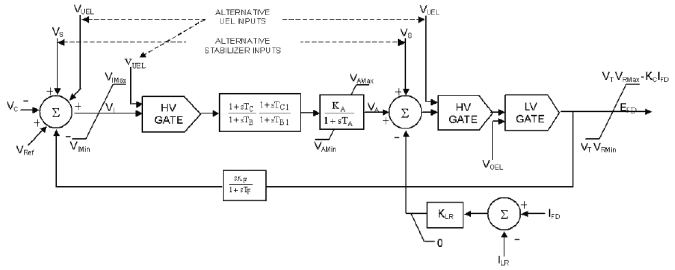


Fig. 4. Sistema de excitación estándar IEEE: ST1A

Con el modelo IEEE definido, se hizo su implementación en Simulink (ver figura 5), en la que se destacan los siguientes comentarios.

a) Compensación atraso-adelanto: este bloque se puede implementar igual en ambos modelos, en donde las constantes T_{C1} y T_{B1} del modelo IEEE deben ser: $T_{C1} = T_{B1} = 0$. De esta manera, se obtiene el bloque de transferencia:

$$H(s) = \frac{1 + sT_{c_{IEEE}}}{1 + sT_{b_{IEEE}}} \tag{1}$$

b) Rectificador y Regulador de tensión: es aquel con transferencia:

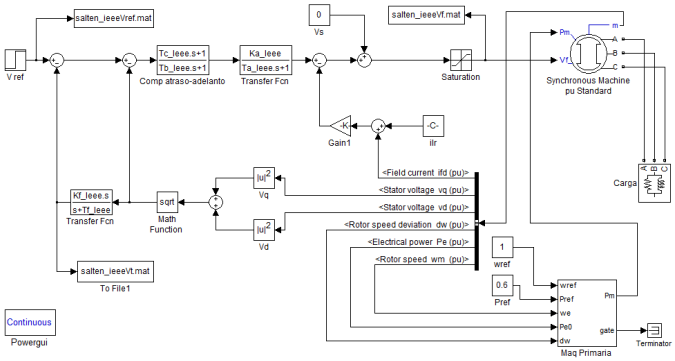


Fig. 5. Modelo estándar ST1A implementado en Simulink

$$H(s) = \frac{K_A}{1 + sT_A} \tag{2}$$

En donde el parámetro K_A representa la influencia del ángulo de disparo del puente de tiristores, que se asume lineal en el modelo y por tanto se representa simplemente como una ganancia.

En el modelo de UTE, es modelado con la transferencia:

$$H(s) = \frac{1}{1 + sT_e} \tag{3}$$

En donde la ganancia en continua es 1, pero a la entrada se tiene una ganancia K_e que en el modelo 1 forma parte del bloque de compensación atraso - adelanto. Para representar el sistema según el estándar ST1A de la IEEE se consideró, a la hora de modelar en Simulink, como parte del bloque del rectificador y regulador de tensión. Por tanto la transferencia 3 pasa a ser:

$$H(s) = \frac{K_e}{1 + sT_e} \tag{4}$$

De esta manera, el bloque que modela el Rectificador y Regulador de Tensión es:

$$H(s) = \frac{K_{a_{IEEE}}}{1 + sT_{a_{IEEE}}} \tag{5}$$

c) HV GATE - LV GATE: se pueden modelar como una saturación, ya que la transferencia para una entrada u y salida v es la siguiente:

- Si $u \in [V_{OEL}, V_{UEL}] \Rightarrow v = u$
- Si $u < V_{OEL} \Rightarrow v = V_{OEL}$
- Si $u > V_{UEL} \Rightarrow v = V_{UEL}$

d) Realimentación de la tensión de excitación: la principal diferencia conceptual que se encuentra entre el modelo implementado por UTE y el ST1A de la IEEE, es que en el primer caso la realimentación se hace por medio de la corriente de campo, mientras que en el segundo, se hace con la tensión de campo. El bloque de realimentación de la tensión de campo está dado por la transferencia:

$$H(s) = \frac{K_{f_{IEEE}}}{1 + sT_{f_{IEEE}}} \tag{6}$$

Por tanto, la realimentación de la tensión de campo que se observa en la figura 5 a priori no se corresponde directamente con ningún bloque del modelo de UTE.

e) Limitador de Corriente de Campo: en el modelo de la figura 4, se tiene una señal que limita la corriente de campo. Dicha señal es la I_{LR}, que se le resta a la corriente de campo y se amplifica por medio de una ganancia K_{LR}. El resultado se resta en el lazo principal de control a la tensión de campo antes del bloque de saturación. En la figura 5, se observa la misma señal, pero como es una función de protección que no está modelada en el sistema de UTE, la constante $K_{LR} = 0$.

f) Tensión mínima de Excitación: el único bloque que no está contemplado en el modelo de la figura 5, pero si está contemplado en el modelo de UTE, es aquel que le suma V al lazo principal de control, si la tensión terminal es menor a un determinado valor. Este comportamiento se pierde al modelar según estándar de la IEEE.

g) Señales Estabilizantes del PSS: las señales estabilizantes del PSS, no son tenidas en cuenta para estudios de estabilidad transitoria, y por tanto no fue considerada en el análisis.

h) Resto del Sistema: se modeló de la misma manera que para el modelo de UTE implementado en Simulink.

C. Determinación de los parámetros.

La determinación de los parámetros del diagrama de bloques de la figura 5, se utilizó la herramienta Control and Estimation Tool Manager de MatLab. Para obtener un resultado correcto y que el algoritmo converja en el entorno de interés, se deben elegir ciertas variables fijas y otras libres, decidiendo de esta manera los grados de libertad.

i) Elección de parámetros fijos: son aquellos que se pueden determinar con el análisis del modelo de UTE. A continuación se describe la elección de cada parámetro.

1) Compensación atraso-adelanto.
   Este bloque es modelado idéntico en el modelo de UTE, y por lo tanto la influencia de este bloque sobre la salida es la misma para cada modelo por lo que los parámetros deben tomar el mismo valor:
$$\begin{cases} T_{c_{IEEE}} = T_a = 0.0760 \\ T_{b_{IEEE}} = T_b = 0.0210 \end{cases}$$
2) Rectificador y Regulador de tensión.
   El rectificador y regulador de tensión en el modelo IEEE, es representado por la multiplicación de dos bloques del modelo de UTE, tal como se observa en la ecuación
$$H(s) = K_e \cdot \frac{1}{1+sT_e} = \frac{K_e}{1+sT_e} = \frac{K_{a_{IEEE}}}{1+sT_{a_{IEEE}}} \quad (7)$$
   Por lo que es adecuado asignar los siguientes valores:
$$\begin{cases} K_{a_{IEEE}} = K_e = 78 \\ T_{a_{IEEE}} = T_e = 0.0240 \end{cases}$$
3) HV GATE - LV GATE.
   Los valores máximos y mínimos están dados por el bloque de saturación en el modelo de UTE.
$$\begin{cases} EFD_{max} = 5.09 \\ EFD_{min} = -5 \end{cases}$$

j) Parámetros libres: son aquellos cuyo valor se puede variar para obtener la respuesta más adecuada al sistema. La elección de estos parámetros, se hizo con el criterio de dejar libres aquellos que no tienen una correspondencia directa entre un modelo y otro. El bloque de *realimentación de la tensión de excitación*, no se corresponde directamente con el modelo de UTE, ya que en éste la realimentación se hace con la corriente de campo. Por lo tanto, los parámetros de este bloque:
$$\begin{cases} K_{F_{IEEE}} \\ T_{F_{IEEE}} \end{cases}$$
se consideran libres a la hora de la iteración para obtener la mejor respuesta.

k) Resultados Obtenidos: una vez hecha la configuración de los parámetros, se le da comienzo a la iteración. Los resultados obtenidos fueron:
$$\begin{cases} T_{F_{IEEE}} = 1.1979 \\ K_{F_{IEEE}} = 5.3 \cdot 10^{-3} \end{cases}$$

D. Validación en pequeña señal.

Con todos los parámetros del modelo definidos, se procede a la validación de los resultados. A los efectos del artículo, simplemente se van a mostrar los resultados gráficos.

La simulación realizada para la validación, corresponde a un escalón en la tensión de referencia de $0.1\ pu$. En las figuras 6 y 7 se observan las gráficas comparativas de ambos modelos para la tensión de excitación y la tensión terminal respectivamente.

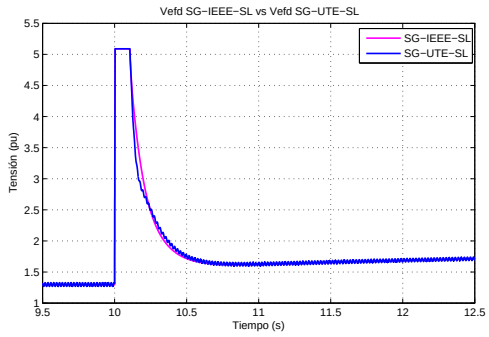


Fig. 6. Comparación de respuestas en pequeña señal: Tensión de Excitación

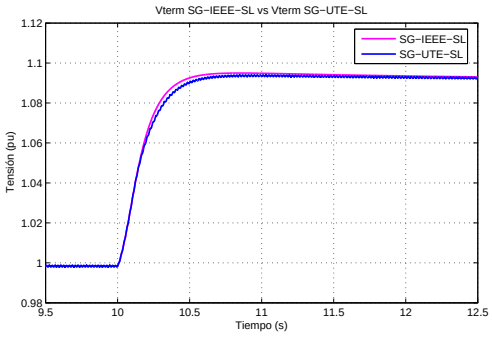


Fig. 7. Comparación de respuestas en pequeña señal: Tensión Terminal

E. Validación frente a una perturbación en la red con el software PSS/E.

Con el modelo IEEE validado en pequeña señal, se hizo una validación con el software PSS/E. La misma consiste en la simulación de una falta en la barra de Palmar de la red uruguaya. Se simula la misma falta para el estudio de los dos sistemas, la cual consiste en un cortocircuito trifásico en la barra de $500kV$ de Palmar. El cortocircuito tiene una duración de $60\ ms$, y luego se extingue, manteniéndose la misma red antes y después de la falta. A continuación se presentan los resultados gráficos.

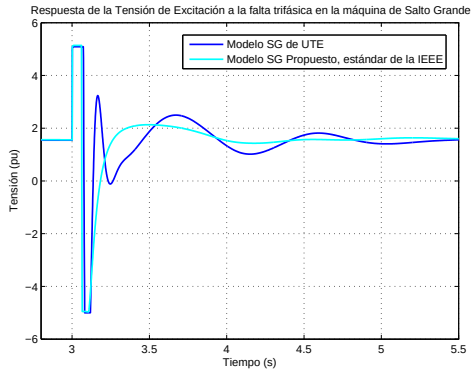


Fig. 8. Comparación de resultados en PSS/E: Tensión de Excitación

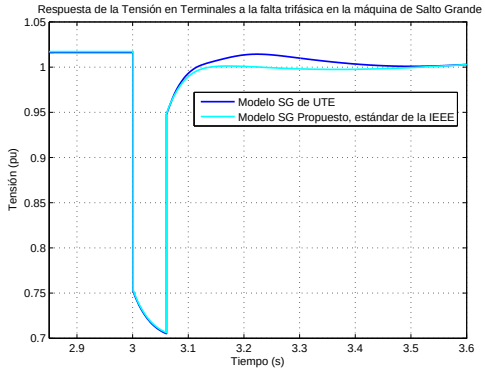


Fig. 9. Comparación de resultados en PSS/E: Tensión Terminal

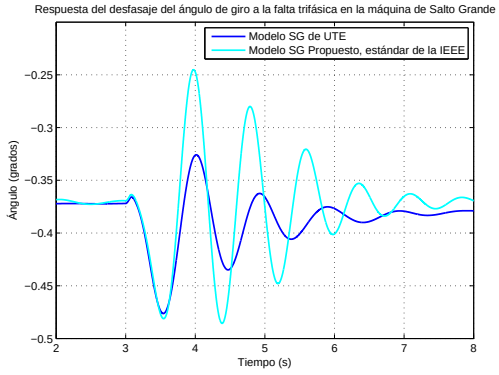


Fig. 10. Comparación de resultados en PSS/E: posición del ángulo del rotor

IV. Sistema de Excitación de Palmar.

El trabajo realizado para la máquina de Palmar tuvo ciertas diferencias con respecto a Salto Grande. En primer lugar se observa que el sistema de excitación documentado por UTE (PAL02) es muy complejo, y modela ciertas dinámicas que no se pueden implementar en un estándar IEEE. A su vez, UTE cuenta con un modelo obsoleto (PAL01), pero que tiene un grado de complejidad similar al que se manejó para Salto Grande y que no presenta inconvenientes a la hora de implementarlo según la norma. Observando las simulaciones realizadas por ambos modelos, se puede ver que la principal diferencia entre ellos es que el modelo PAL02 tiene mayores valores en la saturación de la tensión de excitación cuando se someten a un escalón en la tensión terminal, pero que los tiempos de respuesta son muy similares. Por lo tanto, se hizo un ajuste en el modelo PAL01 para que tenga una respuesta similar a PAL02 y se implementó el modelo estándar para PAL01 modificado.

No se entra en detalle en el procedimiento que se siguió luego de las observaciones anteriores, simplemente se presentan los resultados obtenidos en la validación en pequeña señal y con el software PSS/E.

l) Modelo IEEE: El modelo IEEE utilizado para el sistema de excitación de la máquina de Palmar es el ST3A. En la figura 11 se puede observar su implementación en Simulink. En la misma se pueden ver los bloques de amplificador de "non-windup" que fueron implementados por primera vez en el sistema de excitación de Baygorria. También se observa un bloque de ajuste de la tensión de referencia que se implementó aparte del sistema de excitación estándar, y fue necesario para obtener el mismo comportamiento del modelo de UTE en las simulaciones en Simulink.

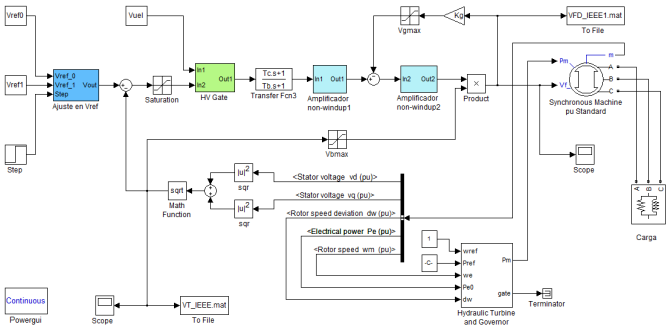


Fig. 11. Modelo estándar ST3A implementado en Simulink.

m) Validaciones en pequeña señal: En las figuras 12 y 13 se observan las comparaciones de los resultados obtenidos para un escalón en la tensión de referencia de 1 a $1.4\ pu$.

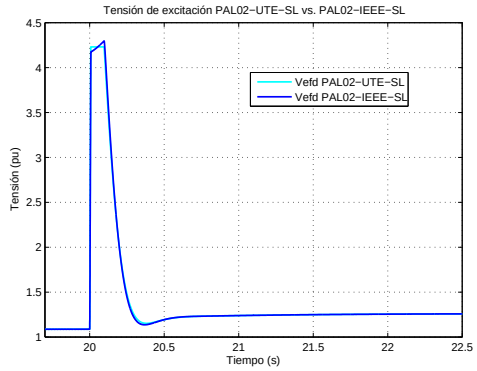


Fig. 12. Comparación de respuesta en pequeña señal: Tensión de Excitación.

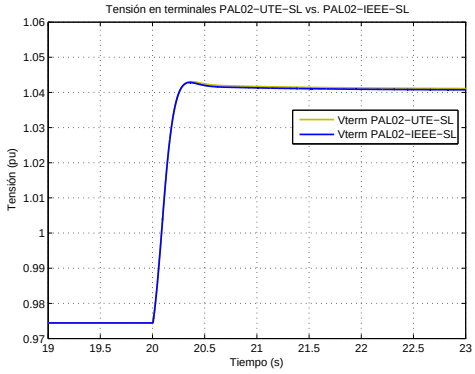


Fig. 13. Comparación de respuesta en pequeña señal: Tensión Terminal.

n) Validación de los resultados en PSS/E: La simulación realizada en este caso es exactamente la misma que se realizó para la máquina de Salto Grande, y a continuación se muestran los resultados obtenidos.

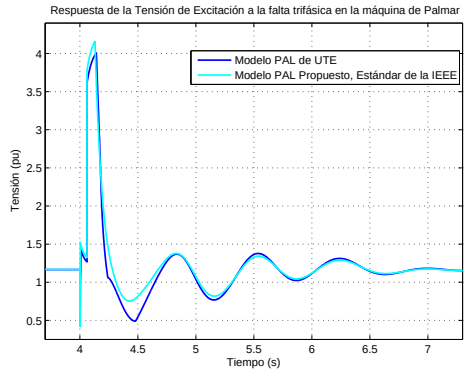


Fig. 14. Comparación de resultados en PSS/E: Tensión de Excitación

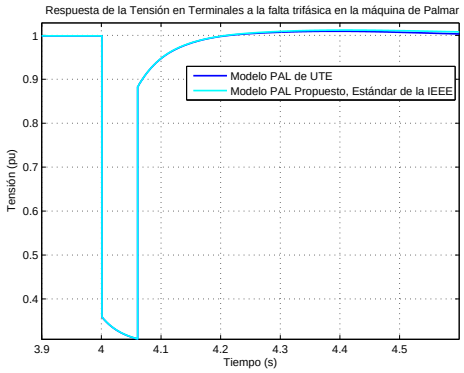


Fig. 15. Comparación de resultados en PSS/E: Tensión Terminal

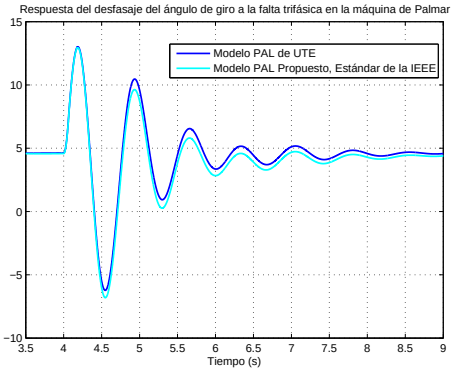


Fig. 16. Comparación de resultados en PSS/E: posición del ángulo del rotor

V. Conclusión

En el presente artículo se presentaron modelos estándar para las máquinas de Salto Grande y Palmar, que para la simulación de la red planteada, tienen un buen grado de aproximación a los modelos que utiliza UTE para modelar la realidad.

Después del trabajo realizado con el estándar 421.5 de la IEEE, y los resultados obtenidos, se concluye que, al menos para los modelos abarcados en este trabajo, la gama de propuestas de la IEEE brinda buenas posibilidades para adaptar modelos de usuario existentes. Se trabajó con el estándar del año 2005, y se nota que en esta revisión se agregan modelos con respecto a la revisión del 1992, ampliando la gama de posibilidades. Además, para el caso particular de Palmar, si bien el modelo que tiene UTE presenta más detalle y a su vez más complejidad, a la hora de las simulaciones, no generaron diferencias apreciables.

Agradecimientos

Se agradece por el apoyo, sugerencias, consejos y correcciones a Álvaro Giusto, tutor del proyecto, y a Ignacio Afonso por su gran ayuda con las simulaciones realizadas en el PSS/E.

References

[1] Prabha Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, Inc, 1994.
[2] M-SEMS, *Modelado de los sistemas de excitación de máquinas síncronas*, Proyecto de Fin de Carrera, 2011.