



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DEPARTAMENTO DE CIRCUITOS Y MEDICIONES



**GENERACIÓN DE SEÑALES DE FALLAS EN LINEAS DE TRANSMISIÓN DE
SISTEMAS DE POTENCIA MEDIANTE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL
CONSIDERANDO ESQUEMAS DE CONTROL DE EXCITACION Y VELOCIDAD**

Tutor:

Prof. Charles Steblina

Autores:

José Pulido

C.I. 18.166.936

Jesús Rangel

C.I. 18.436.944

Naguanagua, Noviembre 2015



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DEPARTAMENTO DE CIRCUITOS Y MEDICIONES



GENERACIÓN DE SEÑALES DE FALLAS EN LINEAS DE TRANSMISIÓN DE SISTEMAS DE POTENCIA MEDIANTE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL CONSIDERANDO ESQUEMAS DE CONTROL DE EXCITACIÓN Y VELOCIDAD

Trabajo especial de grado presentado ante la ilustre Universidad de Carabobo como
requisito para optar al título de **Ingeniero Electricista**

Tutor:

Prof. Charles Steblina

Autores:

José Pulido

C.I. 18.166.936

Jesús Rangel

C.I. 18.436.944

Naguanagua, Noviembre 2015



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DEPARTAMENTO DE CIRCUITOS Y MEDICIONES



CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes del jurado asignado para evaluar el trabajo especial de grado titulado **“Generación de señales de fallas en líneas de transmisión en sistemas de potencia mediante simulación computacional considerando esquemas de control de excitación y velocidad”**, realizado por los bachilleres **Pulido Jiménez, José Manuel C.I: 18.166936** y **Rangel Aguiar, Jesús Rangel C.I: 18.436.944**, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo.

Ing. Charles Steblina

Tutor

Prof. Jurado

Ing. Ledy Guerra

Prof. Jurado

Ing. Rubén Terán

Naguanagua, Noviembre 2015

ÍNDICE GENERAL

PORTADA 1.....	i
PORTADA 2.....	ii
CERTIFICADO DE APROBACIÓN.....	iii
ÍNDICE GENERAL.....	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
INTRODUCCIÓN.....	xiii

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPITULO I. EL PROBLEMA	1
1.1 Planteamiento del Problema	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo General.....	2
1.2.2 Objetivos Específicos	2
1.3 Justificación	3
1.4 Alcance	4
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.	7
2.1 Antecedentes del problema.	7
2.2 Bases Teóricas	8
2.2.1 Sistema Eléctrico de Potencia	8
2.2.2 Estudios en los Sistemas Eléctricos de Potencia	9
2.2.3 Estudios en régimen permanente	10
2.2.3.1 Cálculo de cortocircuitos	10
2.2.4 Estudios en régimen transitorio	10
2.2.5 Transitorios electromecánicos	11
2.2.6 Transitorios electromagnéticos.....	11
2.2.7 Modelos de elementos del sistema de energía eléctrica	11
2.2.8 Simulación de los sistemas eléctricos de potencia	12
2.2.9 Análisis de fallas en sistemas eléctricos de potencia.....	13
2.2.9.1 Cortocircuitos	13
2.2.10 Fallas en sistemas eléctricos de potencia.....	15
2.2.10.1 Falla Trifásica	15
2.2.10.2 Falla Fase – Tierra	15
2.2.10.3 Falla Fase – Fase.....	16
2.2.10.4 Falla Dos Fases – Tierra	16
2.2.11 Líneas de transmisión eléctricas:.....	16
2.2.11.1 Clasificación de las líneas de transmisión:	17
2.2.12 Máquina Sincrónica:.....	17

2.2.13 Programa de simulación ATP.....	18
2.2.13.1 Modelo de Cargas en el ATP:	22
2.2.13.2 Modelos de línea en el ATP:	23
2.2.13.3 Modelo de los transformadores:	28
2.2.13.4 Modelo Máquina sincrónica (SM 59):.....	30
2.2.13.5 TACS:.....	43
2.2.14 Sistemas de excitación según la IEEE:.....	50
2.2.14.1 Sistemas de excitación Tipo DC:	52
2.2.14.2 Sistemas de excitación AC:	54
2.2.14.3 Sistemas de excitación tipo estático:	55
2.2.14.4 Sistema de excitación tipo regulación discontinua:.....	56
2.2.15 Sistemas de Control de Velocidad y Máquinas Primarias:.....	57
2.2.15.1 Funciones de la máquina primaria y del regulador de velocidad:	57
2.2.15.2 Tipos de máquinas primarias:.....	58
2.2.15.2 Los sistemas de excitación y los reguladores de velocidad en el ATPDraw: 61	
2.2.16 Formato común estándar para el intercambio de datos transitorios para los sistemas eléctricos de potencia (IEEE Std C37.111-1999):	62
2.2.16.1 Archivo Header:	63
2.2.16.2 Archivo Configuration:	64
2.2.16.3 Archivo Data:	65
2.2.16.4 Archivo Information:.....	65
CAPITULO III. MARCO METODOLÓGICO	67
3.1 Tipo de investigación	67
3.2 Técnicas de recolección, interpretación y presentación de la información	68
3.2.1 Instrumentos de recolección de datos.....	68
3.2.2 Análisis e interpretación de datos.....	68
3.2.3 Presentación de la información.....	69
3.3 Fases metodológicas de la investigación	69
3.3.1 Fase I. Selección y descripción de los modelos de sistemas de potencia y sus esquemas de sistemas de control de excitación y velocidad.	70
3.3.2 Fase II: Selección y descripción del Software ATPDraw y componentes a utilizar dentro de la investigación.....	71

3.3.3 Fase III: Implementar los sistemas y esquemas seleccionados con ayuda del software ATPDraw:.....	72
3.3.4 Fase IV: Análisis de resultados obtenidos:.....	73
3.3.5 Fase V: Exportación de los datos obtenidos a través del software ATPDraw para ser convertidos al formato común estándar para el intercambio de datos transitorios para los sistemas eléctricos de potencia (COMTRADE) con el uso del software TOP (The Output Processor).....	73
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS	75
4.1 Comportamiento ante la pérdida de un tramo de la línea del sistema de 9 barras compuesto por 3 generadores sincrónicos con 3 sistemas de control de excitatriz de la IEEE.	75
4.1.1 Simulaciones realizadas en el sistema de 9 barras y 3 generadores:	79
4.2 Comportamiento ante la desconexión repentina de la línea del sistema de potencia de 230 kV compuesto por 1 generador sincrónico con 1 sistemas de control de excitatriz de la IEEE y 1 un control velocidad asociado a una turbina a gas de la WECC:.....	87
4.2.1 Análisis de las simulaciones realizadas en el sistema de 230 kV:.....	88
4.3 Comportamiento del sistema de potencia de 5 barras con 2 generadores sincrónicos, 2 sistemas de control de excitatriz DC1A y 2 sistemas de control de velocidad asociados a una turbina hidráulica y una turbina de vapor, ante el despeje de la línea de alta tensión LD2:	93
4.3.1 Análisis de las simulaciones realizadas en el sistema de 5 barras:.....	95
4.4 Exportación de los resultados obtenidos en el sistema de 9 barras con el software ATPDraw al formato común estándar para el intercambio de datos transitorios para los sistemas eléctricos de potencia (COMTRADE).	99
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	103
5.1 Conclusiones.....	103
5.2 Recomendaciones.....	105
Referencias	107
Anexo A	109
Anexo B.....	127
Anexo C	141
Anexo D	144

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura. 2.1. Circuito equivalente del modelo PI nominal.....	24
Figura. 2.2. Circuito equivalente PI nominal.....	25
Figura. 2.3. Red n-ésima de dos puertos para una línea de transmisión completa.....	26
Figura. 2.4. Modelo RLC pi equivalente.....	27
Figura. 2.5. Modelo RL pi acoplado.....	28
Figura. 2.6. Modelo de transformador saturable.....	30
Figura. 2.7. Dirección, ícono y ventana de configuración del SM59 sin control.....	31
Figura. 2.8. Dirección, ícono y ventana de configuración del SM59 con control.....	31
Figura. 2.9. Sistema eléctrico máquina síncrona.....	34
Figura. 2.10. Sistema mecánico del generador síncrono.....	37
Figura. 2.11. Ventana de atributos del componente SM 59.....	41
Figura. 2.12. Diagrama de bloques con su implementación del mismo en ATPDraw.....	44
Figura. 2.13. Funciones de transferencia desde el ATPDraw.....	45
Figura. 2.14. Ventana de atributos de la función de transferencia general en el ATPDraw.....	45
Figura. 2.15. Iconos de las funciones especiales TACS.....	46
Figura. 2.16. Distintos tipos de fuentes en TACS.....	46
Figura. 2.17. Dirección de las sentencias FORTRAN e ícono de la función general.....	47
Figura. 2.18. Ventana de configuración del componente EMTP_OUT.....	50
Figura. 2.19. Diagrama de bloques de un sistema de control de excitación.....	51
Figura. 2.20. Sistema de control tipo DC1A.....	53
Figura. 2.21. Sistema de control tipo AC5A.....	55
Figura. 2.22. Sistema de control tipo ST2A.....	56
Figura. 2.23. Sistema de control tipo regulación discontinua.....	57
Figura. 2.24. Diagrama de bloques para un regulador de velocidad asociado a una turbina de vapor e hidráulica	61
Figura. 2.25. Diagrama de bloques para un regulador de velocidad para una turbina a gas (GAST).....	62
Figura. 4.1. Diagrama unifilar tomado del libro “Power System Control and Stability”–Anderson & Fouad.....	75
Figura. 4.2. Sistema de 9 barras implementado en el ATPDraw.....	76
Figura. 4.3. Sistema de 9 barras con sistema discontinuo y ST2A implementado en el ATPDraw	77
Figura. 4.4. Sistema de 9 barras con sistema AC5Aimplementado en el ATPDraw.....	78
Figura. 4.5. Tensión en bornes del generador síncrono 1.....	79
Figura. 4.6. Tensión en bornes del generador síncrono 2.....	80

Figura. 4.7. Tensión en bornes del generador sincrónico 1.....	80
Figura. 4.8. Potencia en bornes del generador 1.....	81
Figura. 4.9. Potencia en bornes del generador 2.....	81
Figura. 4.10. Potencia en bornes del generador 3.....	82
Figura. 4.11. Ángulo relativo del generador 2 con respecto al generador 1.....	82
Figura. 4.12. Ángulo relativo del generador 3 con respecto al generador 1.....	83
Figura. 4.13. Desviaciones de las velocidades de los 3 generadores respecto a la referencia sincrónica.....	84
Figura. 4.14. Fem de control de cada generador.....	84
Figura. 4.15. Señal estabilizante suplementaria (PSS), en el sistema de control del generador 2.....	82
Figura. 4.16. Señal (PSS), en el sistema de control del generador 2.....	85
Figura. 4.17. Tensiones en barra 7-lado 7 al momento del cortocircuito trifásico a tierra...	85
Figura. 4.18. Corrientes en barra 7-LADO 7 al momento del cortocircuito trifásico a tierra	86
Figura. 4.19. Corrientes en barra 5-LADO 7 al momento del cortocircuito trifásico a tierra.....	86
Figura. 4.20. Implementación completa del sistema de 230 kV en el ATPDraw.....	87
Figura. 4.21. Valor pico de la sobretensión en la fase b del generador sincrónico (45,136 kV).....	88
Figura. 4.22. Valor pico de la sobretensión en la fase C del generador sincrónico.....	89
Figura. 4.23. Valor pico de la sobretensión en la fase A del generador sincrónico.....	89
Figura. 4.24. Tensión de línea en bornes del generador sincrónico, valor RMS.....	90
Figura. 4.25. Potencia activa y reactiva.....	90
Figura. 4.26. Perturbación en la frecuencia del generador sincrónico.....	91
Figura. 4.27. Tensiones al final de la línea ante un cortocircuito trifásico a tierra.....	91
Figura. 4.28. Corrientes al final de la línea al iniciar el cortocircuito trifásico a tierra.....	92
Figura. 4.29. Corrientes al final de la línea al finalizar el cortocircuito trifásico a tierra.....	92
Figura. 4.30. Diagrama unifilar del sistema de 5 barras.....	93
Figura. 4.31. Sistema de 5 barras con sus sistemas de control implementados en el ATPDraw.....	94
Figura. 4.32. Comportamiento de la barra 3 ante la desconexión de la línea LD 2 sin generación independiente.....	95
Figura. 4.33. Comportamiento de la barra 3 ante la desconexión de la línea LD 2 con generación independiente.....	96
Figura. 4.34 Variación de la tensión en la barra de generación.....	97
Figura. 4.35 Respuesta de los reguladores de tensión ante la desconexión de la línea LD2.....	97
Figura. 4.36 Velocidad de respuesta de las máquinas de generación independiente	

(generador sincrónico 2 y generador sincrónico 3).....	98
Figura. 4.37. Tensión de cada fase ante el despeje de la línea LD 2.....	98
Figura. 4.38. Corriente de cada fase ante el despeje de la línea LD 2.....	99
Figura. 4.39. Tensión en bornes de los tres generadores sincrónicos visto desde el TOP...	100
Figura. 4.40. Archivo .HDR de la señal VT1.....	101
Figura. 4.41. Archivo .CFG de la señal VT1.....	101
Figura. 4.42. Archivo .DAT de la señal VT1.....	102
Figura. A1. Componente seleccionado y no seleccionado.....	109
Figura. A2. Conjunto de componentes seleccionado.....	109
Figura. A3. Ventana de atributos del componente Resistor.....	110
Figura. A4. Ventana de características del nodo.....	111
Figura. A5. Hoja en blanco de un nuevo proyecto con la barra de selección de componentes.....	113
Figura. A6. Ingreso de la data en el objeto SM59 correspondiente al generador1.....	114
Figura. A7. Ventana de dialogo del transformador 1 con sus datos ingresados.....	115
Figura. A8. Conexiones seleccionadas en ambos devanados del transformador.....	115
Figura. A9. Ventana de configuración y atributos de la línea de transmisión 4-5.....	116
Figura. A10. Ventana de configuración y atributos de la carga RLC conectada a la barra 8.....	117
Figura. A11. Conexión entre el generador 2 y el transformador 2.....	117
Figura. A12. Generador 2 y transformador 2 ya conectados.....	117
Figura. A13. Ventana para configurar los sensores de corriente y voltaje.....	118
Figura. A14. Ventana de diálogo para la configuración del nodo de salida de la barra.....	118
Figura. A15. Los 3 interruptores temporales colocados entre la barra 7 y 5.	119
Figura. A16 Sistema de 9 barras de la IEEE implementado en ATPDraw.....	120
Figura. A17. Ventana de atributos de la línea de transmisión 1.....	122
Figura. A18. Ventana de atributos del transformador en ATPDraw.....	122
Figura. A19. Ventana de atributos del componente AC source (1&3).....	123
Figura. A20. Sistema de alta tensión de 230 kV implementado en ATPDraw.....	123
Figura. A21. Diagrama unifilar del sistema de 5 barras.(Fabrício Moura, 2011).....	125
Figura. A22. Sistema de 5 barras implementado en el ATPDraw.....	126
Figura. B1. Menú de selección del TACS Low pass y ventana de configuración.....	127
Figura. B2. Configuración del bloque general.....	128
Figura. B3. Pestaña de nodos de entrada y salida.....	128
Figura. B4. Configuración de los nodos TACS.....	129
Figura. B5. Dirección de acceso, ícono y ventana de configuración de condición inicial de TACS.....	129
Figura. B6. Ventana de atributos de una sentencia Fortran General.....	130
Figura. B7. Sistema de control tipo IEEE AC5A.....	131

Figura. B8. Diagrama de bloque del transductor de tensión y su implementación.....	132
Figura. B8. Diagrama de bloque del transductor de tensión y su implementación.....	132
Figura. B9. Diagrama de bloque del comparador y su implementación.....	126
Figura. B10. Ventana de configuración del VREF con sentencias Fortran.....	133
Figura. B11. Diagrama de bloque del amplificador y su implementación.....	133
Figura. B12. Diagrama de bloque del limitador y su implementación.....	134
Figura. B13. Diagrama de bloque del lazo de realimentación y su implementación.....	134
Figura. B14. Diagrama de bloque de la función saturación y su implementación.....	135
Figura. B15. Ventana de configuración de la señal de entrada y la señal de salida.....	135
Figura. B16. Dirección de acceso, ícono del EMTP_OUT.....	136
Figura. B17. Sistema IEEE AC5A implementado en el ATPDRAW.....	137
Figura. B18. Sistema de control tipo IEEE ST2A.....	137
Figura. B19. Sistema IEEE ST2A implementado en el ATPDRAW.....	138
Figura. B20. Sistema de control tipo IEEE regulación discontinua.....	138
Figura. B21. Sistema IEEE discontinuo implementado en el ATPDRAW.....	139
Figura. B22. Sistema de control tipo IEEE DC1A.....	139
Figura. B23. Sistema IEEE DC1A implementado en el ATPDRAW.....	140
Figura. C1. Diagrama de bloques del gobernador de la IEEE. (Anderson P y Fouad A, 1977).....	141
Figura. C2. Implementación del gobernador de la IEEE en ATPDraw.....	141
Figura. C3. Diagrama de bloques del gobernador de la WECC. (P. Mahat, Z. Chen, B. Bak-Jensen, 2011).....	142
Figura. C4. Implementación del gobernador de la WECC en ATPDraw.....	142
Figura. D1. Pantalla inicial del software TOP.....	144
Figura. D2. Pantalla de carga y selección de las variables contenidas en el archivo.....	145
Figura. D3. Ventana Plot Quantity Select.....	145
Figura. D4. Gráfica de la tensión en bornes del generador 1 del sistema 9 barras.....	146
Figura. D5. Ventana de guardado del archivo con la selección del formato Comtrade.....	146

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla B.1. <i>Parámetros del generador 1</i>	111
Tabla B.2. <i>Parámetros del generador 2</i>	112
Tabla B.3. <i>Parámetros del generador 3</i>	112
Tabla B.4. <i>Parámetros de las líneas de transmisión y de los transformadores</i>	112
Tabla B.5. <i>Parámetros del generador sincrónico, todos los valores están a una base en por unidad de 100 MVA</i>	120
Tabla B.6. <i>Parámetros del transformador de 11,5/230 kV.</i>	121
Tabla B.7. <i>Parámetros de las dos líneas de trnasmisión..</i>	121
Tabla B.8. <i>Parámetros de la carga..</i>	121
Tabla B.9. <i>Parámetros de la fuente en equivalente de thevenin..</i>	121
Tabla B.10. <i>Parámetros de los generadores.</i>	124
Tabla B.11. <i>Parámetros de los transformadores.</i>	124
Tabla B.12. <i>Parámetros del banco de capacitores.</i>	124
Tabla B.13. <i>Parámetros de las cargas.</i>	125
Tabla B.14. <i>Parámetros de las líneas.</i>	125
Tabla C1. <i>Parámetros de los sistemas de excitatriz.</i>	131
Tabla D1. <i>Parámetro del gobernador Gast de la WECC.</i>	143

INTRODUCCIÓN

Actualmente las organizaciones buscan consolidar el uso de herramientas computacionales de simulación basadas en nuevas tecnologías para analizar los sistemas de potencia en los aspectos transitorios y armónicos para afianzar aún más los entornos cambiantes y de múltiples riesgos, donde el creciente desarrollo tecnológico y la necesidad de adquisición los obliga a replantear sus estrategias bajo nuevas perspectivas.

Es de hacer notar que los criterios de operación definirán las condiciones del sistema eléctrico, por lo que es conveniente conocer de antemano si son adecuados a fin de garantizar la confiabilidad y seguridad con la finalidad de optimizar los conocimientos para cualquier evento que se presente en el sistema mediante la simulación computacional.

Las fallas en los sistemas de potencia podrían afectar negativamente la prestación del servicio, el cual es un tema fundamental, y aún más cuando el sector eléctrico forma parte de uno de los aspectos más importantes para el desarrollo de un país.

Así mismo se plantea como objetivo principal para esta investigación, la generación de señales de fallas en líneas de transmisión en modelos de sistemas clásicos y ampliamente conocidos en el estudio de transitorios utilizando una herramienta computacional para analizar los transitorios electromagnéticos.

En esta investigación se contemplará:

La selección de los modelos de los sistemas de potencia con sus sistemas de control de excitación y velocidad.

La selección de la herramienta computacional, dando un análisis detallado sobre sus ventajas y desventajas en el estudio de transitorios electromagnéticos.

La implementación de los sistemas de potencia seleccionados con su posterior simulación para la obtención de los resultados y la conversión a un formato común para el intercambio de la información obtenida.

El análisis de los resultados y la validación de las simulaciones.

La investigación constará de cinco capítulos. En el primer capítulo se expondrá el planteamiento del problema, los objetivos, la justificación y el alcance. En el segundo capítulo se desarrollarán los fundamentos teóricos requeridos que sustentan la investigación. En el tercer capítulo se describirá la metodología seguida para el cumplimiento de cada uno de los objetivos. En el capítulo cuatro se presentarán las discusiones y análisis de resultados. Por último, en el capítulo cinco se detallarán las conclusiones obtenidas y las recomendaciones de algunos puntos importantes que surgirán durante la investigación. Como información complementaria, en la investigación se colocarán una serie de anexos donde se encuentra información más detallada del estudio.

CAPITULO I. EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del Problema

En décadas recientes se ha consolidado el uso de herramientas de simulación basadas en computadoras para el análisis transitorio y armónico en sistemas de potencia, esto debido al avance tecnológico que ellas han generado. Para realizar un análisis de falla se cuenta con diversas herramientas que brindan información tanto digital como analógica, entre las principales están: secuencia de eventos (SOE) que consiste en una bitácora de señales producidas por los sistemas de protección y control en cada subestación, bases de datos donde se almacenan los estados de los equipos de todas las subestaciones. Se cuenta también con dispositivos electrónicos independientes (IED) de los cuales a su vez se derivan los registradores de fallas digitales (DFR) y los relés de protección numérica.

De igual manera el continuo aumento de la demanda de energía eléctrica induce al crecimiento constante de los sistemas de potencia, lo cual conduce a un incremento de su complejidad. Esto produce una situación a resolver ya que surge la necesidad de diseñar sistemas de potencia eficientes con el mínimo de interrupciones, esto se logrará estudiando las posibles fallas que se puedan presentar lo que a su vez facilita la toma decisiones en el diseño y operación para hacer al sistema confiable.

Las fallas en los sistemas de potencia se pueden presentar en diversas áreas de acuerdo al nivel de tensión utilizado y pueden ser de varios tipos, lo que hace de vital importancia determinar la gravedad en la interrupción en el sistema eléctrico y determinar la ubicación para así realizar las acciones correspondientes para restablecer el sistema, ya que al producirse una falla en cualquier etapa, la corriente allí se elevará y hará que los dispositivos de protección actúen para proteger un equipo o conjunto de equipos que conforman al sistema.

Se plantea realizar la modelación en detalle de los generadores sincrónicos y los diferentes controles de excitación y controles de velocidad (gobernadores) con una herramienta computacional que logre la simulación del sistema lo más real posible, que permita además, detectar las perturbaciones de carácter transitorio en sus diferentes modalidades.

Con el objeto de facilitar a los estudiantes y docentes del área, conocimientos necesarios para innovar y desarrollar nuevas estrategias que optimicen la labor de estudios de fallas eléctricas en líneas de transmisión en un sistema de potencia, tomando en cuenta los avances tecnológicos disponibles en la actualidad, se propone la generación de señales de fallas en líneas de transmisión de sistemas de potencia con esquemas de control de excitación y de velocidad mediante simulación computacional.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

- Generar señales de fallas en líneas de transmisión de sistemas de potencia mediante simulación computacional considerando esquemas de control de excitación y velocidad.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analizar los modelos de los elementos que conforman el sistema de potencia y esquemas de control para su implementación en el software.
- Implementar los modelos y esquemas en el software ATP para la elaboración de las simulaciones.
- Analizar los resultados de las simulaciones de los modelos de sistemas de potencia implementados para la descripción del comportamiento del sistema.
- Exportar los resultados al formato común estándar para el intercambio de datos transitorios para los sistemas eléctricos de potencia (COMTRADE).

1.3 Justificación

Debido a la importancia del análisis de los sistemas de potencia y sus transitorios, es necesario contar con un modelo de cada uno de los componentes de dicho sistema. En este trabajo se representará este proceso utilizando como herramienta computacional para análisis de transitorios electromagnéticos, partiendo de modelos previamente desarrollados y comprobados por otros autores e instituciones donde se busca generar las fallas eléctricas en las líneas de transmisión, y como estas perturbaciones afectan a las diferentes etapas del sistema como es el generador sincrónico, los sistemas de control de excitación, de velocidad y como a su vez estos controles permiten al sistema volver a sus condiciones antes de ocurrida las perturbaciones.

El uso de herramientas computacionales para el análisis de transitorios no es una tarea sencilla de realizar pero es de gran importancia porque permite al usuario adelantarse y prepararse ante cualquier eventualidad que pueda ocurrir en cualquier etapa de un sistema de potencia real. Es ahí donde a un bajo costo el usuario puede tomar una decisión incluso antes de realizar dichas maniobras en un ámbito real y desarrollar las herramientas que el software le proporciona.

Otra de las razones por la cual se justifica este estudio es el hecho de trabajar con uno de los programas más utilizados en estudios de sistemas eléctricos de potencia que en la actualidad puede ser aplicado en el análisis de prácticamente cualquier tipo de proceso transitorio, habiéndose ampliado su campo de aplicaciones, entre las que se pueden indicar las siguientes:

- Estudios de estabilidad transitoria.
- Estudios de sistemas de protección.
- Estudios de transitorios con fuentes no convencionales de energía.
- Estudios de régimen transitorio y régimen permanente.

La elaboración de este trabajo es un aporte a la línea de investigación de mediciones eléctricas del departamento de circuitos y mediciones, y el departamento de potencia brindándole un compendio de información relevante con la finalidad de:

- Poseer una herramienta útil para el estudio de sistemas eléctricos, electrónicos, entre otros.
- Introducir al estudiante en un software de simulación preciso, conocido en el ámbito de variables eléctricas y del análisis de circuitos transitorios.
- Unificar los diferentes datos obtenidos de las simulaciones en un solo estándar de lectura de datos transitorios en sistemas de potencia como lo es el COMTRADE.
- Permite a los estudiantes visualizar fallas en diferentes circuitos eléctricos de sistemas de potencia.
- Permite modelar las diferentes etapas que compone un sistema de potencia y decidir cuál modelo utilizar es el adecuado.
- El software tiene aplicaciones en las cuales los estudiantes pueden sumergirse para crear nuevas opciones y visualizar los diferentes comportamientos de un sistema de potencia.

1.4 Alcance

Este trabajo de investigación se focalizará en la modelación de sistemas eléctricos de potencia clásicos y de amplio uso en el estudio de transitorios electromagnéticos y el estudio de perturbaciones para generar las diferentes fallas eléctricas en las líneas de transmisión, proporcionando una herramienta de estudio que permitirá realizar un modelado más adecuado de acuerdo a la información que se desee analizar y que disponga el usuario.

La representación de cada uno de los elementos en el software computacional se realizó de la siguiente manera:

- Las cargas mediante impedancias constantes RLC.
- Las líneas de transmisión mediante el modelo PI.

- Los transformadores mediante el modelo saturable.
- Las fallas trifásicas generadas mediante interruptores controlados por tiempo.
- Los generadores sincrónicos a través de fuentes tipo 59.
- Los sistemas de excitación, y gobernadores de velocidad mediante el TACS.

Los sistemas de control velocidad fueron modelados según (Anderson, P. M. y Fouad, A. A, 1997), y excitación (IEEE 421.5-1992) respectivamente, los mismos permiten al sistema aplicar las contingencias necesarias para volver a sus condiciones anteriores a las perturbaciones aplicadas como si se tratase de un modelo real, ya que son estos controles antes mencionados son los encontrados en sistemas actuales y reales.

Los sistemas de control de excitación a modelar son los siguientes:

- Sistemas de excitación DC1A.
- Sistema de excitación AC5A.
- Sistema de excitación ST2A.
- Sistema de excitación de acción discontinua.

Los sistemas de control de velocidad a modelar son los siguientes:

- Sistema de control de velocidad asociado a una turbina de vapor.
- Sistema de control de velocidad asociado a una turbina hidráulica.
- Sistema de control de velocidad asociado a una turbina a gas.

La modelación de manera real de estos sistemas eléctricos de potencia con ayuda de la herramienta computacional, son sin duda la motivación presente de esta investigación, ya que se busca simular en el modelo circuital todas las condiciones esperadas en cualquier sistema y lograr adaptarse a la variabilidad de escenarios exigidos para cualquier modelo en la actualidad, de tal manera que se proporcione un diagnóstico acertado aún en situaciones de un alto nivel de dificultad.

El problema del diagnóstico y obtención de fallas, involucra tópicos como la determinación de la causa de la falla, la localización de la falla y la identificación del componente fallado, sin embargo la presente investigación se centrará únicamente en la clasificación de la falla y el análisis de los datos arrojados por las simulaciones.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.

2.1 Antecedentes del problema.

Turbay, J (1994), Argentina. **Empleo del EMTP para los estudios de estabilidad transitoria con especial atención al modelado de los sistemas de control de excitación**

En esta investigación con ayuda del software EMTP (versión del ATP de 1995) se estudió la estabilidad de un sistema eléctrico de potencia ante perturbaciones verificadas en la red. Se modelaron las líneas de transmisión, transformadores, cargas y máquinas sincrónicas, se implementó una representación del sistema de potencia de 9 barras de la IEEE con variables dirigidas a las máquinas sincrónicas (fuente SM 59) mediante el uso de TACS, así como el intercambio de información entre estos y dicha fuente.

En el trabajo se propuso la utilización del EMTP en estudios de estabilidad transitoria, poniendo el acento tanto en la modelización de los sistemas eléctricos mediante el TACS y la representación de los sistemas de excitación de la IEEE 421.5-1992.

Gil, J y Pérez, E (2008), Venezuela. **Simulación digital de transitorios electromagnéticos producidos por conexión y desconexión de bancos de condensadores y su influencia en los valores límites de calidad de energía.** Trabajo de grado para optar al título de ingeniero electricista en la Universidad de Carabobo. En esta investigación se presentan un estudio de transitorios producidos por conexión y desconexión de banco de condensadores utilizando como herramienta computacional el software ATP. Esta investigación sustenta el presente trabajo de grado como fuente de información en base a los modelos circuitales utilizados para simular con el software.

Oscar, Gutiérrez (2009), Argentina. **Transitorios electromagnéticos de un turbogenerador a gas de 51,6 MW conectado a una red de alta tensión de 230 kV, análisis mediante simulaciones con software.**

Esta investigación se estudia el comportamiento eléctrico ante perturbaciones de diversa índole de un turbogenerador aeroderivativo LM-6000 de General Electric con un generador de 51,6 MW (potencia ISO), en la misma se detallan los modelos dinámicos de las variables eléctricas y mecánicas consideradas.

Como plataforma de simulación se usa el software de análisis de transitorios electromagnéticos EMTP/ATPDraw el cual permite modelar las redes eléctricas trifásicas, la turbina de potencia, y simular con alto grado de detalle el generador eléctrico. Se implementa con detalle los sistemas de control de tensión y el control de potencia/velocidad de la turbina (gobernador), además el componente con mayor minuciosidad es el generador eléctrico (máquina sincrónica), el cual se implementa a través de las ecuaciones de Park en ejes $dq0$ lo que permite reproducir fenómenos electromagnéticos internos específicos del generador

Fabrício, Moura (2011), Brasil. **Generación distribuida-Impactos y contribuciones para la calidad de energía eléctrica y dinámica de los sistemas eléctricos-Un análisis a través del ATP/EMTP.**

Este estudio tiene como objetivo principal presentar un análisis de desempeño de dos generadores sincrónicos, con sus respectivos reguladores de tensión y velocidad, en paralelo con un sistema de distribución, para estudios de generación distribuida. Se resalta que los generadores accionados por las turbinas a vapor, hidráulica y sus reguladores fueron modelados utilizando la rutina TACS (Transient Analysis of Control Systems) del “ATP/EMTP- Alternative Transient Program”. Las perturbaciones aplicadas como fallas trifásicas, rechazo de carga, desconexión de líneas de distribución son aplicadas al modelo para verificar el impacto que tienen las mismas y las respuestas que ofrecen los generadores y los reguladores ante estas contingencias aplicadas.

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 Sistema Eléctrico de Potencia

Un sistema eléctrico de potencia está constituido por las centrales de generación, líneas de transmisión interconectadas entre sí, sistemas de distribución y comercialización, esenciales para el consumo de energía eléctrica, los cuales deben ser operados eficazmente para el cumplimiento de la regulación y estándares de calidad.

Centrales de Generación: Este es el primer eslabón de la cadena de valor de la energía eléctrica, generalmente se encuentran situadas cerca de la fuente de energía primaria y lejana de los centros de consumo, es aquí donde se lleva a cabo la producción de energía eléctrica, mediante la transformación de la fuente de energía primaria, pudiéndose clasificar de acuerdo a esta, de la siguiente manera:

Centrales hidroeléctricas

Centrales termoeléctricas

Centrales eólicas

Centrales solares

2.2.2 Estudios en los Sistemas Eléctricos de Potencia

El diseño, construcción y operación del sistema de generación, transporte y distribución de energía eléctrica se realiza con el objetivo de proporcionar el suministro eléctrico con una adecuada calidad y seguridad, de la manera más económica posible. Para conseguir estos objetivos es necesario comprender y cuantificar, con la mayor exactitud posible, los fenómenos que afectan a los sistemas eléctricos: descargas atmosféricas, conexión y desconexión por maniobra, transitorio electromecánico, transitorio lento.

El tipo de estudio o análisis del sistema de energía eléctrica y los elementos a considerar en el modelo, están relacionados con la duración del fenómeno a analizar. De esta forma, los estudios analizan el sistema eléctrico en diferentes condiciones de funcionamiento:

- Condiciones de régimen permanente, bajo las cuales todas las variables y parámetros se consideran constantes durante el periodo de estudio.
- Condiciones transitorias lentas, que se deben a los patrones normales de cambios de topología y las acciones de los controles automáticos (voltaje y frecuencia).

- Condiciones transitorias electromecánicas, que pertenecen a las oscilaciones electromecánicas de las máquinas y las acciones de los sistemas de control primario de tensión y frecuencia.
- Condiciones transitorias electromagnéticas, que corresponden a los fenómenos electromagnéticos rápidos, en los cuales es importante considerar la velocidad de propagación del fenómeno y se puede despreciar los fenómenos electromecánicos.

2.2.3 Estudios en régimen permanente

Es el análisis del sistema eléctrico para conocer su funcionamiento en estado estacionario y son: El cálculo de flujo de cargas, el cálculo de cortocircuitos y propagación de armónicos.

2.2.3.1 Cálculo de cortocircuitos

El problema del cálculo de cortocircuitos consiste en obtener el estado del sistema cuando se produce una situación de falla. Se trata también de una herramienta básica, para la operación y planificación del sistema eléctrico, ya que permite conocer la máxima corriente de cortocircuito en un punto cualquiera del sistema. Esto resulta imprescindible para el correcto dimensionamiento de los equipos que irán conectados en dicho punto y el diseño de los sistemas de detección y protección, así como para el estudio del sistema en situaciones de estabilidad transitoria.

2.2.4 Estudios en régimen transitorio

En este tipo de estudios se simula el comportamiento del SEP según va evolucionando en el tiempo, de un estado a otro posterior. Dependiendo del tipo de fenómeno que se quiera estudiar, el tiempo de transición entre estados (horizonte de estudio) puede comprender desde unos pocos microsegundos hasta varias horas.

2.2.5 Transitorios electromecánicos

Se analizan fenómenos transitorios rápidos provocados por las oscilaciones electromecánicas de los rotores de los generadores y las interacciones con los dispositivos de control. El periodo de tiempo en el que se trabaja es del orden de unos milisegundos a unos pocos segundos (0.1s / 10s). Estas oscilaciones pueden dar lugar a una pérdida de estabilidad del sistema. Por una parte, se puede perder el sincronismo de los generadores y por otra parte puede producirse el colapso de tensión.

2.2.6 Transitorios electromagnéticos

Estos estudios analizan fenómenos muy rápidos (microsegundos), de forma que las ondas de tensión e intensidad ya no se pueden suponer como sinusoides que varían a 60 Hz. Este tipo de estudios requieren una representación diferente, que puede ser muy detallada, de la dinámica de alguno de los elementos del sistema que intervienen en el estudio. Los fenómenos que se incluyen en el ámbito de los transitorios electromagnéticos son: sobretensiones provocados por ondas tipo rayo, sobretensiones provocadas por maniobras de interruptores y seccionadores, fenómenos de ferresonancia, resonancia subsíncrona, respuesta de sistemas de protección de alta velocidad, etc.

2.2.7 Modelos de elementos del sistema de energía eléctrica

El estudio realizado sobre los sistemas de energía eléctrica se basa en la simulación de fenómenos reales, usando modelos que presentan el mismo comportamiento que el sistema real. En la práctica, en el sistema eléctrico se presentan todo tipo de fenómenos, algunas veces simultáneamente. Dadas las diferentes características entre dichos fenómenos (por ejemplo entre estabilidad y transitorios electromagnéticos) no es posible definir un único modelo capaz de dar una imagen real para todo el rango de constantes de tiempo.

La tarea de desarrollar un modelo de un sistema se puede dividir en dos grupos: la determinación de la estructura del modelo y el hecho de proporcionar los datos a dicho

modelo. La determinación de la estructura fija las características que se deben considerar del sistema eléctrico, mientras que los datos suministran los valores de dichas características.

2.2.8 Simulación de los sistemas eléctricos de potencia

La simulación consiste en una serie de técnicas que imitan o simulan las operaciones de diferentes procesos de la vida real. Para analizar estos procesos desde el punto de vista científico, a menudo hay que realizar un conjunto de suposiciones acerca de cómo se desarrollan dichos procesos. Estas suposiciones, que normalmente adoptan la forma de ecuaciones matemáticas o relaciones lógicas, constituyen los modelos.

La simulación incluye tanto la construcción del modelo como el proceso de experimentación para estudiar un sistema. La simulación permite experimentar con el modelo antes que con el sistema real, permitiendo examinar el sistema y realizar cambios y nuevos diseños sin necesidad de cambios físicos o instalaciones adicionales.

Si las relaciones que componen el modelo son suficientemente simples pueden utilizarse métodos matemáticos sencillos para obtener información exacta acerca del comportamiento del sistema a analizar. Sin embargo, la mayoría de los sistemas reales son demasiado complejos para ser analizados mediante modelos que sean resolubles por métodos analíticos sencillos. Por lo tanto, estos modelos se deben analizar mediante técnicas más complejas.

Estas técnicas utilizan ordenadores para evaluar numéricamente los modelos desarrollados durante un determinado periodo de tiempo.

Para el análisis de la red es necesario recurrir a un proceso de cálculo o de simulación que reproduzca el comportamiento y los fenómenos que se producen en un sistema eléctrico y que permita conocer tanto la respuesta del sistema ante condiciones de funcionamiento normal y de fallas, como las consecuencias sobre los parámetros fundamentales del sistema ante dichas situaciones.

2.2.9 Análisis de fallas en sistemas eléctricos de potencia

2.2.9.1 Cortocircuitos

De forma general, se denomina falla o cortocircuito a la conexión accidental, a través de una impedancia relativamente baja, de dos o más puntos del sistema que tienen potenciales diferentes. Los cortocircuitos en general se producen al fallar el aislamiento, debido a diferentes causas como: pérdida de las propiedades aislantes del medio (envejecimiento, calentamiento, contaminación, etc), sobretensiones (tanto de origen externo como interno) o efectos mecánicos diversos (roturas, deformaciones, desplazamientos, etc).

Los efectos perjudiciales que las fallas provocan son numerosos y están asociadas, fundamentalmente a las corrientes elevadas que se pueden establecer en el sistema. Los efectos pueden ser: Calentamiento de conductores por efecto Joule, que en función del valor y la duración de la corriente de cortocircuito puede provocar deterioros irreversibles.

Esfuerzos electrodinámicos, con la posibilidad de roturas y desplazamientos bruscos que pueden dar lugar a nuevas faltas. Variaciones de tensión, con caídas en las fases involucradas en el cortocircuito y eventuales elevaciones en las otras fases.

Los cortocircuitos se clasifican en varias categorías, según el número de fases implicadas en la falla y según la existencia o no de una conexión a tierra. De esta manera, se pueden distinguir entre fallas serie, simultaneas y paralelas. Las fallas paralelo que son las más usuales, pueden ser: Trifásicas, bifásicas sin contacto a tierra, bifásicas con contacto a tierra y monofásicas.

Las fallas trifásicas se denominan también faltas simétricas, ya que al afectar a las tres fases por igual, el sistema de tensiones e intensidades continúa siendo equilibrado tras la falla. Por el contrario, las fallas monofásicas y bifásicas, con o sin contacto a tierra, afectan de distinta manera a las diferentes fases, por lo que dan lugar a sistemas de tensiones e intensidades desequilibrados, denominándose por este motivo fallas asimétricas.

La falla trifásica, a pesar de ser el tipo de falla menos habitual, es la que generalmente se considera al realizar los estudios de cortocircuito, pues suele ser la situación más desfavorable por presentar, por lo general, la mayor intensidad de falla.

Los cálculos de cortocircuito consisten en determinar las corrientes que van a aparecer en un sistema eléctrico cuando se producen distintos tipos de falla, en diferentes puntos del sistema. El conocimiento de las intensidades que pueden presentarse en caso de un cortocircuito permite:

- Seleccionar y coordinar los equipos de protección con el objeto de detectar la zona donde se produce el fallo y así separarla del sistema para que no afecte al funcionamiento del resto de la red.
- Seleccionar las características de los equipos destinados a aislar la zona de la red con falta, con el objeto de que los interruptores y seccionadores aguanten las sollicitaciones térmicas y electromecánicas que se producen durante el cortocircuito.
- Seleccionar y diseñar los equipos que forman la red, para que aguanten las sollicitaciones provocadas por una situación de falla durante el tiempo que transcurre entre su aparición y su eliminación por parte de los sistemas de protección.

El cálculo de las corrientes de falla puede dividirse en dos tipos principales:

- Averías por cortocircuito de las tres fases, cuando la red esta equilibrada eléctricamente. Para estos cálculos pueden utilizarse circuitos equivalentes normales monofásicos, como en el caso de los cálculos de flujos ordinarios de carga.
- Averías distintas de los cortocircuitos trifásicos cuando la red esta eléctricamente no equilibrada. Para facilitar estos cálculos se utiliza un método especial para tratar redes no equilibradas, conocidas como método de las componentes simétricas.

2.2.10 Fallas en sistemas eléctricos de potencia

Las técnicas de modelado y estudio habituales de las redes eléctricas se puede dividir en tres regímenes: Estacionario, electromecánico y electromagnético. En el caso del análisis de fallas, se tiene un proceso claramente electromagnético donde la red en una situación estacionaria sufre una modificación brusca de su topología. De este modo para el análisis de una determinada falla, la red debe modelarse por las ecuaciones diferenciales de sus elementos. Esto en ciertos casos no es práctico cuando se requiere el cálculo de redes con cientos de nodos y ramas. Por ello, las normas existentes y el cálculo habitual de cortocircuitos admiten como suficiente aproximación el modelo estacionario de la red.

Los tipos de falla que se analizan en los SEP entre fases de un mismo equipo son:

- Falla Trifásica
- Falla Fase – Tierra
- Falla Fase – Fase
- Falla Dos Fases – Tierra

2.2.10.1 Falla Trifásica

Se presenta cuando las tres fases entran en contacto, con caídas de voltaje y aumento de corriente similar para las tres fases.

2.2.10.2 Falla Fase – Tierra

Este tipo de falla únicamente afecta una sola fase del SEP, presentándose un aumento de corriente y caída de voltaje en la fase que presenta el problema. La falla puede ser de baja impedancia (falla franca) con valores cercanos a 0 ohmios, de media-alta ó de alta impedancia con valores mayores a 30 y 60 ohmios, respectivamente. Las fallas de alta impedancia no presentan gran variación en la variable corriente de la fase fallada por lo que a veces no se detecta fácilmente ya que pueden ser vistas como un aumento en la demanda de energía del

SEP. En contraste las fallas francas presentan un importante aumento de la corriente, lo cual facilita su detección.

2.2.10.3 Falla Fase – Fase

Se presenta entre dos fases de forma aislada de la tierra. Este tipo de falla es frecuente cuando se realizan quemas debajo de la línea, lo que ocasiona cambios en la rigidez dieléctrica del aire y en sus propiedades de conducción.

2.2.10.4 Falla Dos Fases – Tierra

En esta falla se afectan dos fases del SEP, generalmente por la caída de una de las fases, haciendo contacto con otro cable y con elemento externo que conduce a tierra. Cuando se presenta esta falla aumenta la corriente en ambas fases y disminuye el voltaje. En la Figura se puede apreciar el comportamiento de la corriente frente a este tipo de falla.

2.2.11 Líneas de transmisión eléctricas:

Una línea de transmisión eléctrica es básicamente el medio físico mediante el cual se realiza la transmisión y distribución de la energía eléctrica, está constituida por: conductores, estructuras de soporte, aisladores, accesorios de ajustes entre aisladores y estructuras de soporte, y cables de guarda (usados en líneas de alta tensión, para protegerlas de descargas atmosféricas); es de suma importancia el estudio de las características eléctricas en los conductores de las líneas, estas abarcan los parámetros impedancia y admitancia, la primera está conformada por la resistencia y la inductancia uniformemente distribuidas a lo largo de la línea y se representa como un elemento en serie. La segunda está integrada por la susceptancia y la conductancia y en este caso se representa como un elemento en paralelo, la conductancia representa las corrientes de fuga entre los conductores y los aisladores, esta es prácticamente despreciable por lo que no es considerado un parámetro influyente. Para un transporte eficiente se eleva el voltaje, por medio de un transformador elevador en la

subestación de generación y se reduce el nivel a través de un transformador reductor en la subestación de distribución.

2.2.11.1 Clasificación de las líneas de transmisión:

Las líneas eléctricas se pueden clasificar por su función en:

2.2.11.1.1 Líneas de transmisión:

Son aquellas que se utilizan para transportar la energía eléctrica a grandes distancias, a niveles de voltajes superiores a los 34.500V. Estas constituyen el eslabón de unión entre las centrales generadoras y las redes de distribución. Para la construcción de estas líneas se utilizan casi exclusivamente conductores metálicos desnudos, que se obtienen mediante cableado de hilos metálicos (alambres) alrededor de un hilo central.

2.2.11.1.2 Líneas de distribución:

Son aquellas que van desde las subestaciones hasta los centros de consumo como son las industrias, domicilios y alumbrado público, los niveles de tensión utilizados son por debajo de los 34.500V. Los conductores en media tensión siguen siendo desnudos, pero en baja tensión se usan conductores aislados, para mayor seguridad en zonas urbanas.

2.2.12 Máquina Sincrónica:

La máquina sincrónica es un convertidor electromecánico de energía con una pieza giratoria denominada rotor o campo, cuya bobina se excita mediante la inyección de una corriente continua, y una pieza fija denominada estator o armadura por cuyas bobinas circula corriente alterna. Las corrientes alternas que circulan por los enrollados del estator producen un campo magnético rotatorio que gira en el entrehierro de la máquina con la frecuencia

angular de las corrientes de armadura. El rotor debe girar a la misma velocidad del campo magnético rotatorio producido en el estator para que el par eléctrico medio pueda ser diferente de cero. Si las velocidades angulares del campo magnético rotatorio y del rotor de la máquina sincrónica son diferentes, el par eléctrico medio es nulo. Por esta razón a esta máquina se la denomina sincrónica; el rotor gira mecánicamente a la misma frecuencia del campo magnético rotatorio del estator durante la operación en régimen permanente.

2.2.13 Programa de simulación ATP

El software utilizado para el modelado y la simulación de los circuitos de prueba es el ATP (Alternative Transients Program). Este en sus primeras versiones fue llamado EMTP (“Electro Magnetic Transient Program”). Este software se creó en la década de los 60s por el Dr. Hermann Dommel, quien luego cedió sus derechos a la “Boneville Power Administration” (BPA). La BPA lo liberó para evadir costos asociados a su mantenimiento, para lo cual lo tomó la “Electric Power Research Institute” (EPRI), años más tarde sus colaboradores junto con un grupo europeo crearon la versión para PC llamado ATP, con la diferencia que este último maneja diferentes plataformas para su interfaz gráfica, pero conserva la misma máquina de solución del EMTP (fortran), haciéndolo un software rápido y confiable (Rule book-ATP, 2011).

El ATP es un programa de simulación universal que sirve para modelar sistemas complejos en el dominio del tiempo, también para realizar mediciones de las señales y realizar estudios de análisis transitorios (Høidalen, Hans K. Prikler, 2002). Lo cual permite realizar estudios de calidad de la energía relacionados con la localización de fallas en sistemas de distribución.

El ATP es un programa digital utilizado para simular transitorios electromagnéticos, electromecánicos y de sistemas de control en sistemas eléctricos polifásicos de potencia, de amplia difusión y utilización en todo el mundo; cuenta con la ventaja adicional de ser de distribución gratuita por contar con una licencia de carácter no comercial. Los estudios que involucran el uso del ATP, tienen objetivos encuadrados dentro de dos categorías. Una es el

diseño, la cual incluye la coordinación de aislamiento, dimensionamiento de los equipos, especificación de los equipos de protección, diseño de los sistemas de control, etc. La otra es la solución de problemas de operación, tales como fallas en los sistemas y análisis de los transitorios que normalmente ocurren en la operación del sistema. Entre los estudios típicos que se realizan utilizando este software se encuentran:

- **Transitorios de maniobra:** Estudios determinísticos y probabilísticos, maniobra de reactores y transformadores, maniobra de capacitores, maniobra de interruptores.
- **Impulsos atmosféricos:** Flámeos inversos, impulsos inducidos, ingreso de impulsos atmosféricos a subestaciones.
- **Coordinación de aislamiento:** líneas aéreas, subestaciones, subestaciones blindadas en SF6 (GIS), selección y ubicación de descargadores.
- **Solicitaciones torsionales de ejes (por analogía electro-mecánica):** resonancia sub sincrónica, rechazo de carga.
- **Sistemas de alta tensión en corriente continua (HVDC):** Sistema de control, transitorios eléctricos, armónicos.
- **Compensadores estáticos:** Sistema de control, sobretensiones, armónicos.
- **Ferro resonancia**
- **Análisis de armónicos.**
- **Arranque de motores.**
- **Sistemas de control en general.**
- **Análisis de sistemas desbalanceados.**
- **Análisis de fallas.**

Algunas ventajas que posee este software de simulación son:

- Tiene una distribución gratuita mediante grupos de usuarios. Esta condición lo hace atractivo para su uso, lo cual permite tener una referencia bastante amplia sobre su aplicación.
- Utiliza modelos detallados para simular en forma precisa los transitorios ocurridos durante periodos cortos, permitiendo su aplicación en análisis de fallas.
- Su facilidad de manejo mediante programas adicionales como el ATPDraw, que interactúa con el usuario de forma gráfica.

- Utiliza diferentes modelos para representar líneas de distribución y transmisión, los cuales manejan diferente información, dependiendo de los datos que se disponen.
- Permite crear nuevos bloques de simulación, como módulos de protección implementados por el grupo de investigación.
- El ATP, posee la capacidad de programar módulos TACS (Transient Analysis of Control Systems) y MODELS (un lenguaje de simulación), que permite modelar los sistemas de control y los componentes con características no lineales como son arcos eléctricos y otros elementos del sistema (L.Dubé, 1996).
- El ATP, emplea la integración trapezoidal para resolver las ecuaciones diferenciales de los componentes del sistema en el dominio del tiempo, lo que permite realizar fácilmente la discretización de las ecuaciones de los elementos que se deseen implementar (N. Watson y J. Arrillaga, 2007).
- Este software realiza el cálculo de la respuesta fasorial de las redes, en función de la frecuencia utilizando un escaneo de frecuencia y tiene la capacidad de realizar un análisis armónico en el dominio de la frecuencia utilizando el método de inyección de corriente armónica.
- Los manuales y publicaciones referentes a su uso, se manejan mediante grupos de usuarios, lo que permite obtenerlo fácilmente.
- Su facilidad de iteración con otros programas utilizados en la academia, como son el Matlab.
- Su popularidad en el gremio académico.

Así queda establecido, la importancia del manejo de dicho software para llevar a cabo este proyecto, además de sus subprogramas como el ATPDraw y la iteración del mismo con Matlab.

El usuario define el sistema a ser simulado interconectando los diversos componentes que constituyen el modelo del sistema; los tipos de componentes que pueden ser utilizados son:

- **Resistencias, capacitancias e inductancias concentradas.** Estas pueden ser elementos monofásicos, o secciones polifásicas consistentes en matrices R , C y L simétricas.

- **Modelos para representar líneas aéreas o cables**, ya sea con parámetros distribuidos o con secciones pi. Se disponen de distintos tipos de modelos que permiten considerar las transposiciones, la variación de los parámetros con la frecuencia.
- **Inductancias y Resistencias no lineales**, Como por ejemplo inductores no lineales para representar dispositivos con saturación magnética y descargadores de protección.
- **Llaves de diversos tipos** que permiten representar interruptores, diodos, tiristores.
- **Fuentes ideales de corriente y tensión**, las cuales pueden ser sinusoidales de cualquier frecuencia, exponenciales, o cualquier otra especial definida por el usuario.
- **Máquinas sincrónicas**, siendo posible modelar la parte eléctrica, mecánica y también sus dispositivos de control.
- **Modelo de máquina universal** que permite representar máquinas sincrónicas, de inducción y de continua.
- **Sistemas de control**. Las señales eléctricas medidas pueden ser transferidas a un programa auxiliar denominado TACS (Transient Analysis of Control System), donde se emula una computadora analógica y se calculan las variables de control que son retornadas a la red eléctrica principal. También se dispone de otro programa auxiliar denominado MODELS que cumple similares funciones.

El dimensionamiento del programa es variable de tal manera que, de ser necesario, es posible ajustarlo a las necesidades de cada tipo de problema. Las entradas del programa consisten en el intervalo de tiempo para el cálculo, el tiempo máximo de simulación, las variables de salida deseadas y los datos del modelo. El modelo puede armarse con un programa adicional denominado ATPDraw, el cual actúa como un preprocesador de los datos, permitiendo ensamblar los distintos componentes del modelo en forma gráfica.

Como resultado de la simulación, el EMTP/ATP provee las tensiones de barra, corrientes de ramas, energía, variables de máquina, variables de control, etc. Estos valores pueden ser graficados y/o impresos como función del tiempo y almacenados en archivos para su

posterior tratamiento. También se dispone de la impresión de los valores máximos y mínimos de las variables y del tiempo al cual ocurren.

Antes de la simulación transitoria es realizada una solución de estado estacionario para definir las condiciones iniciales, y esto puede ser también una útil herramienta de estudio en sí misma. Todas las tensiones, corrientes y potencias de estado estacionario son determinadas para todos los nodos de la red. También se dispone de una opción de barrido en frecuencia de las fuentes que permite realizar estudios de armónicos en el sistema eléctrico.

Los datos de entrada requeridos por el ATP son diferentes y superiores en cantidad que los necesarios para otros programas tales como flujo de carga, cortocircuito y estabilidad. Esto se debe a que el EMTP/ATP utiliza modelos más detallados que dichos programas, para poder simular en forma precisa los transitorios de alta frecuencia que ocurren durante cortos períodos de tiempo. Para facilitar la entrada de datos, existen programas auxiliares que ayudan al usuario en la entrada de los datos de líneas, cables, transformadores, etc.

2.2.13.1 Modelo de Cargas en el ATP:

El modelado de cargas eléctricas es un campo difícil de abordar debido a las particularidades que éste presenta. Entre las características más relevantes se pueden nombrar las siguientes (C. Chao-Shun, W. Tsung-Hsien, 1993):

- Las cargas eléctricas se encuentran compuestas por una gran cantidad de componentes que por lo general no se pueden caracterizar totalmente.
- La propiedad y ubicación de las cargas no son de fácil acceso para las empresas distribuidoras de energía.
- Las cargas eléctricas cambian de composición y magnitud con el tiempo (día, semana, mes, temporada) (C. Chao-Shun, W. Tsung-Hsien, 1995).
- La información que se toma como guía para determinar la composición por lo general es limitada.

Por otro lado, las cargas en los sistemas de distribución pueden ser modeladas como conexiones estrella (Y) o delta (Δ); pueden ser trifásicas, bifásicas o monofásicas, con algún grado de desbalance y pueden ser modeladas como (W.H. Kersting, 1994):

- Potencia constante (S_{cte}).
- Corriente constante (I_{cte}).
- Impedancia constante (Z_{cte}).
- alguna combinación de las anteriores.

2.2.13.2 Modelos de línea en el ATP:

El ATP permite modelar las líneas de transmisión de diferentes maneras permitiendo realizar modelos tan sencillos como se quiera o tan complejos como sean necesarios; las limitaciones de un modelo sencillo pueden hacer inservible una simulación por tanto se recurre entonces a modelos más rigurosos, suponiendo que una mayor complejidad estará ligada a una mejor representación y por tanto precisión en los resultados obtenidos (W.H. Kersting, 1994).

A continuación se realizara una pequeña mención de dichos modelos, así como en los fenómenos que mejor pueden ser modelados con estos. Los modelos disponibles en el ATP son modelos de parámetros concentrados como los modelos π , el modelo de parámetros distribuidos constantes (o de K. C. Lee), los modelos dependientes de la frecuencia basados en la descomposición modal: Semlyen Setup, JMarti Setup, y Taku Noda Setup. Para ésta investigación se les dará un enfoque solamente a los modelos de parámetros concentrados que ofrece el ATP.

2.2.13.2.1 Modelo π nominal:

El modelo π nominal es bastante exacto y es el modelo para usar en simulaciones de estado estacionario de líneas cortas, a la frecuencia de la red, no condicionan el paso de

tiempo de cálculo y la solución en estado estacionario es exacta. Este modelo es la base para el estudio del modelo de línea de circuitos PI nominales en cascada; como defecto, no se pueden representar líneas con parámetros dependientes de la frecuencia y deben aceptarse oscilaciones espurias provocadas por los elementos concentrados dichas oscilaciones puede amortiguarse mediante resistencias en paralelo con las ramas R-L.

En la figura 2.1 siguiente se representa el circuito nominal para una línea de transmisión, las ecuaciones que relacionan los voltajes y corrientes en los extremos de la línea están representadas por las ecuaciones (Ec. 2.1) y (Ec. 2.2):

$$V_k = \left(\frac{ZY}{2} + 1 \right) V_m + Zi_m \quad (\text{Ec. 2.1})$$

$$i_k = Y \left(1 + \frac{ZY}{4} \right) V_m + \left(\frac{ZY}{2} + 1 \right) i_m \quad (\text{Ec. 2.2})$$

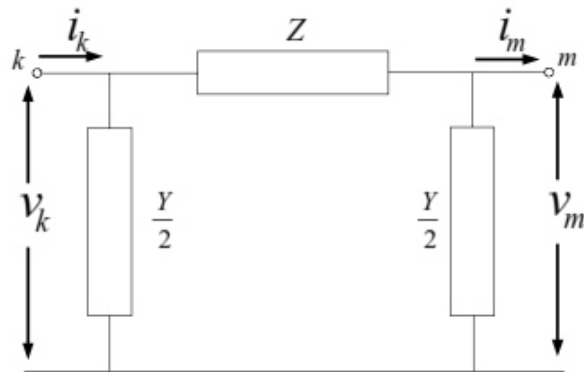


Figura. 2.1. Circuito equivalente del modelo PI nominal. W.H. Kersting, 1994

Donde:

$$Z = l(R' + j\omega L') \quad (\text{Ec. 2.3})$$

$$\frac{Y}{2} = \frac{l}{2}(G' + j\omega C') \quad (\text{Ec. 2.4})$$

V_k =Voltaje en el nodo K

i_k = Corriente en el nodo k

V_m =Voltaje en el nodo m

i_m = Corriente en el nodo m

R' = Resistencia por unidad de longitud [ohm / km]

L' = Inductancia por unidad de longitud [H / km]

C' = Capacitancia por unidad de longitud [F / km]

G' = Conductancia por unidad de longitud [S / km]

l = Longitud total de la línea [km]

Z = Impedancia serie de la línea de transmisión

Y =Admitancia en derivación de la línea de transmisión

2.2.13.2.2 Modelo PI en cascada:

La cantidad de secciones PI nominales en cascada para la correcta representación de la línea, depende principalmente de la frecuencia del fenómeno transitorio a estudiar, la conexión en cascada de circuitos PI puede ser útil para líneas no transpuestas, puesto que no es necesario considerar aproximaciones a la matriz de transformación fase-modo.

La representación de este modelo se ilustra en la figura 2.2 siguiente donde se representan circuitos PI nominales en cascada:

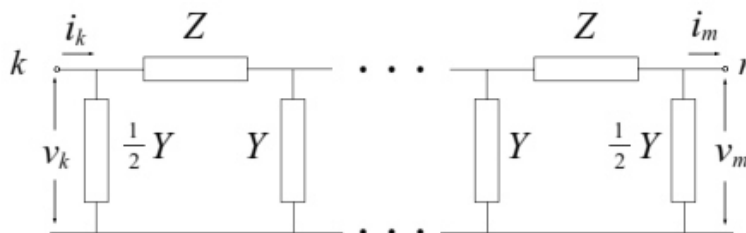


Figura. 2.2. Circuito equivalente PI nominal. W.H. Kersting, 1994

Para obtener las variables de entrada con respecto a las variables de salida, el sistema se representa como una red de parámetros de dos puertos como se ilustra en la figura 2.3 siguiente:

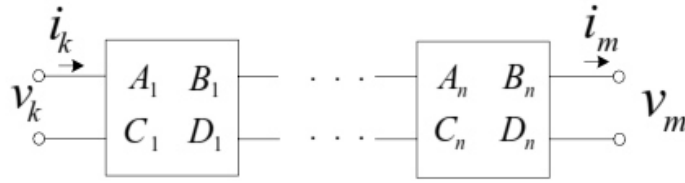


Figura. 2.3. Red n-ésima de dos puertos para una línea de transmisión completa. W.H. Kersting, 1994

Si todos los circuitos corresponden a segmentos de igual longitud, entonces el modelo de la línea se representa mediante la ecuación (Ec 2.5):

$$\begin{bmatrix} V_k \\ i_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}^n \begin{bmatrix} V_m \\ i_m \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Es decir, la matriz de cualquiera de los segmentos elevada al número de segmentos, representa la relación deseada de un extremo al otro.

La cantidad de secciones PI nominales en cascada para la correcta representación de la línea, depende principalmente de la frecuencia del fenómeno transitorio a estudiar. Por consiguiente, para una frecuencia máxima de estudio, la longitud máxima de una sección de línea representada por un circuito PI nominal, no debe ser mayor a la expresada en la ecuación (Ec. 2.6):

$$S_{max} \leq \frac{a}{5f_{max}} \quad (\text{Ec. 2.6})$$

$$a = \frac{1}{\sqrt{L'C'}} \quad (\text{Ec. 2.7})$$

Donde:

a=Velocidad de propagación de la onda viajera

L'= Inductancia por unidad de longitud [H / km]

C'= Capacitancia por unidad de longitud [F / km]

El modelo de línea de circuitos PI nominales en cascada no es muy exacto para fenómenos basados en ondas viajeras (sobrevoltajes por maniobra y por descargas atmosféricas), ni muy eficiente debido a la cantidad de secciones de circuitos PI nominales utilizadas en el momento de representar este tipo de fenómenos; por lo tanto, para un mejor modelado de operaciones de maniobra, los modelos basados en la propagación de las ondas viajeras son la mejor opción ya que son más rápidos y usualmente más precisos.

2.2.13.2.3 Modelos de líneas con parámetros concentrados (Lumped):

- Modelo de línea RLC *pi* equivalente

El modelo *pi* es usado para modelar líneas cortas en estado estacionario, a la frecuencia de la red (Luis H. Restrepo, 2008). Tiene en cuenta tanto el efecto capacitivo de las líneas como el acople entre cada una de las fases, permitiendo así representar circuitos de tipo monofásicos, bifásicos y trifásicos.

- Modelo de línea RL acoplado

Este modelo conserva las características del modelo *pi*, con la diferencia que no toma en cuenta los efectos derivados de la capacitancia shunt. Así en el modelo se eliminan todas las variables que correspondan a este valor (Rule book-ATP, 2011), (EMTP Theory book, 1994).

En las figura 2.4 y figura 2.5, se presentan el modelo *pi equivalente* y el modelo RL *acoplado* respectivamente, con la ruta para ser obtenidos mediante el ATPDraw.



Figura. 2.4. Modelo RLC pi equivalente, ATPDraw

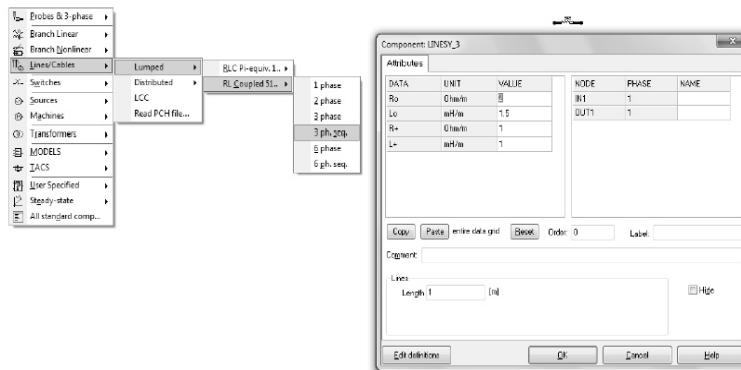


Figura. 2.5. Modelo RL pi acoplado, ATPDraw

2.2.13.3 Modelo de los transformadores:

El transformador es un componente clave en todos los sistemas de energía. Así, bancos de transformadores trifásicos pueden ser encontrados en subestaciones de distribución, donde los voltajes son transformados desde un nivel de tensión de transmisión o sub-transmisión a niveles de alimentación de distribución. En la mayoría de los casos los transformadores de una subestación son unidades trifásicas. Para un alimentador de cuatro hilos en estrella, la conexión más común del transformador de la subestación es delta-estrella aterrizado (Δ -Yg). Un alimentador trifásico en delta, típicamente tendrá un transformador delta-delta conectado en la subestación. Bancos de transformadores trifásicos fuera de la alimentación van a

proveer la transformación de tensión final a la carga del usuario. Se puede aplicar una variedad de conexiones del transformador, dependiendo del tipo de alimentación que se desee entregar al usuario final y de la carga conectada (W.H. Kersting, 1994).

Adicionalmente, al igual que en el modelo de las líneas, el modelo de los transformadores está bien definido en el ATP, pudiendo modelar desde transformadores ideales, hasta transformadores Saturable o BCTRAN, ya sean monofásicos, bifásicos o trifásicos. Los transformadores ideales solo requieren la relación de transformación para ser representados, los transformadores saturables requieren, además de la relación de transformación entre espiras, los parámetros de impedancia tanto en el primario como en el secundario, grupo de conexión, ángulo de desfase y la resistencia de la rama de magnetización (Rule book-ATP, 2011), (Dután Luis, 2010). Adicionalmente, hay transformadores híbridos (XFMR), y en estos el usuario puede basar el modelo del transformador en tres fuentes de datos: Diseño (especificar parámetros de la geometría y el material del núcleo y devanados), Informe de la prueba (similar a BCTRAN excepto para el modelo básico), y típica (valores típicos basados en el voltaje y la potencia) (Dután Luis, 2010), (Hans Hoidalén, Bruce Mork, 2009).

Los modelos de transformadores más usados en el ATP son Saturable, BCTRAN y XFMR (Modelo híbrido). El modelado del núcleo del transformador en el programa ATP/EMTP para los transformadores saturable y BCTRAN se basa en la curva característica flujo-corriente (λ pico vs. Ipico), que es obtenida a partir de los datos de Voltaje rms y Corriente rms de la prueba de vacío mediante la rutina SATURA, la cual, realiza una extrapolación lineal de los dos últimos puntos de datos de dicha prueba considerando constante la inclinación del segmento formado por dichos puntos. Por otro lado, el modelo híbrido toma el modelo BCTRAN y tiene varias mejoras (Dután Luis, 2010).

2.2.13.3.1 Modelo saturable:

Este modelo presenta en su entrada de datos una tabla en la cual se ingresan los valores de V_{rms} e I_{rms} de la prueba de vacío. Al momento de ejecutar el programa ATP/EMTP, esta tabla de valores es convertida a λ pico vs. I pico mediante la subrutina SATURA y el núcleo así representado es conectado en el primario del transformador. Este modelo considera a sus elementos como desacoplados (Dután Luis, 2010), (Hans Hoidalen, Bruce Mork, 2009). La figura 2.6 muestra la ruta de acceso del ATPDraw y la ventana de datos para dicho transformador.

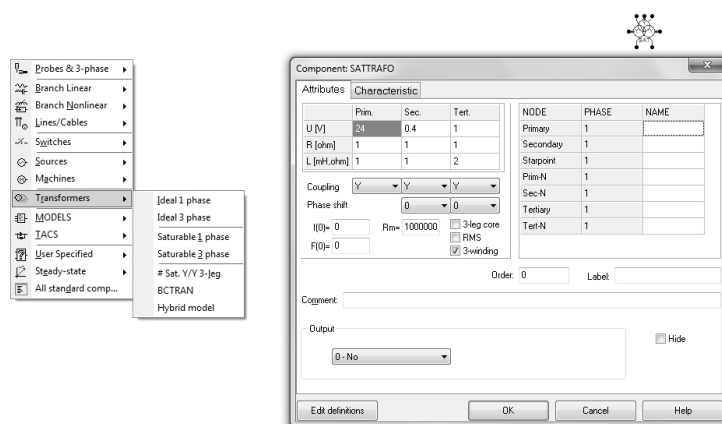


Figura. 2.6. Modelo de transformador saturable, ATPDraw

En la figura anterior, en la pestaña “Characteristic”, se deben ingresar los datos de la curva de vacío y así por medio de la rutina SATURA, el transformador calcula la curva de saturación.

2.2.13.4 Modelo Máquina sincrónica (SM 59):

La máquina sincrónica es el elemento más importante de los sistemas de potencia, en ella se genera la energía eléctrica que es inyectada a las redes de transmisión, en la figura 2.7 y la figura 2.8 se muestra la ruta de acceso del ATPDraw y la ventana de datos para este modelo, tomando en cuenta que para utilizar éste elemento será necesario estudiar su modelo eléctrico y mecánico, como también su implementación en el programa de simulación. Para esto se describirá como se modela e implementa el generador trifásico sincrónico en el ATPDraw.



Figura. 2.7. Dirección, ícono y ventana de configuración del SM59 sin control, *ATPDraw*

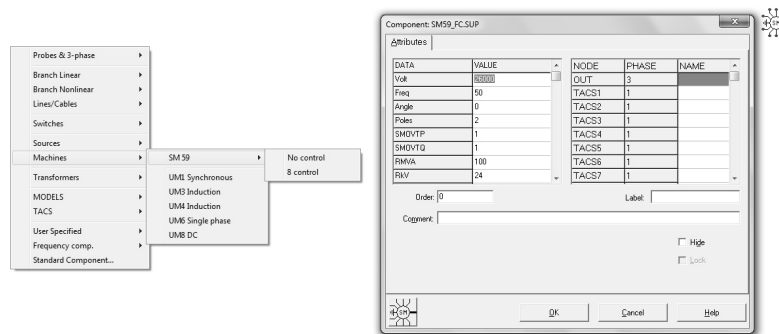


Figura. 2.8. Dirección, ícono y ventana de configuración del SM59 con control, *ATPDraw*

Como se muestra en las figuras anteriores, la máquina sincrónica SM59 puede ser utilizada sin control o con control. En este último caso las variables que pueden ser controladas son la potencia en el eje y la tensión de campo; también se pueden utilizar los nodos de control para pasar variable al módulo TACS. Los posibles tipos de valores y sus correspondientes variables asociadas son los siguientes (Hoidalén, Hans K. Prikler, 2002):

0= Sin Control.

1= Eje-D corriente de armadura. Salida a TACS.

2= Eje-Q corriente de armadura. Salida a TACS.

- 3= Secuencia-Cero corriente de armadura. Salida a TACS.
- 4= Corriente del devanado de campo. Salida a TACS.
- 5= Eje-D corriente del devanado de amortiguamiento. Salida a TACS.
- 6= Corriente en el devanado de corriente inducida. Salida a TACS.
- 7= Eje-Q corriente del devanado de amortiguamiento. Salida a TACS.
- 8= Tensión aplicada al eje-D. Salida a TACS.
- 9= Tensión aplicada al eje-Q. Salida a TACS.
- 10= Tensión de secuencia cero. Salida a TACS.
- 11= Tensión aplicada al devanado de campo. Salida a TACS.
- 12= Fuerza magnetomotriz total en el entrehierro de la máquina. Salida a TACS.
- 13= Ángulo entre las componentes de fuerza magnetomotriz en el eje Q y D. Salida.
- 14= Torque electromagnético de la máquina. Salida a TACS.
- 15= No usado.
- 16= Flujo concatenado en el eje-D. Salida a TACS.
- 17= Flujo concatenado en el eje-Q. Salida a TACS.
- 18= Ángulo del Rotor. Salida a TACS.
- 19= Velocidad angular del rotor. Salida a TACS.
- 20= Torque en el eje del rotor. Salida a TACS.
- 21= Tensión de campo. Entrada de control.**
- 22= Potencia mecánica. Entrada de control.**

2.2.13.4.1 Modelado del SM 59:

El ATP utiliza para el componente SM59 el modelo de Park de máquina síncrona (P. Kundur, 1994), acoplado a un modelo mecánico de múltiples masas conectadas en tándem.

Para la parte eléctrica se consideran los siguientes devanados:

- Tres devanados de armadura de las fases A, B, C, conectados a la red. Estos se encuentran desfasados geométricamente 120° .
- Un devanado de campo f , el cual produce el flujo en el eje directo.
- Un devanado hipotético k_d , el cual representa el efecto de las barras amortiguadoras, sobre el eje directo.
- Un devanado hipotético g , sobre el eje en cuadratura, el cual representa el efecto de las corrientes inducidas en el hierro del rotor.
- Un devanado hipotético k_q , el cual representa el efecto de las barras amortiguadoras, sobre el eje en cuadratura.

Por defecto los devanados de armadura son conectados en estrella, con posibilidad de conectar el neutro a tierra mediante una impedancia.

Es posible conectar los devanados de armadura en triángulo, para lo cual se deberá agregar en el ATP-file una línea de comando con la sentencia “DELTA CONNECTION” (Rule book- ATP-Rb-80-LEC, 2011).

Si el modelo de SM59 es controlable mediante TACS, las variables que se pueden modificar son la tensión del devanado de campo y la potencia mecánica en el eje del generador. Por defecto el EMTP considera que estas variables son constantes y sus valores tales que mantienen a la máquina en su estado estacionario inicial.

La saturación puede ser considerada, pero por defecto el EMTP considera una máquina sin saturación (Rule book-ATP-Rb-80-LEC, 2011).

La máquina puede ser considerada con cualquier número de masas en el eje del sistema. Por defecto la SM59 desde el ATPDraw considera solo la masa del generador, para adicionar las demás masas se debe modificar el ATP-file (Rule book-ATP-Rb-80-LEC, 2011).

2.2.13.4.2 Ecuaciones del modelo dqo del generador sincrónico:

La SM59 implementa el modelo dqo para modelar internamente a la máquina sincrónica. En la figura 2.9 se aprecia la disposición de los tres devanados de armadura A, B, y C, desfasados geométricamente 120°, como también los devanados del rotor sobre el eje directo y el eje en cuadratura.

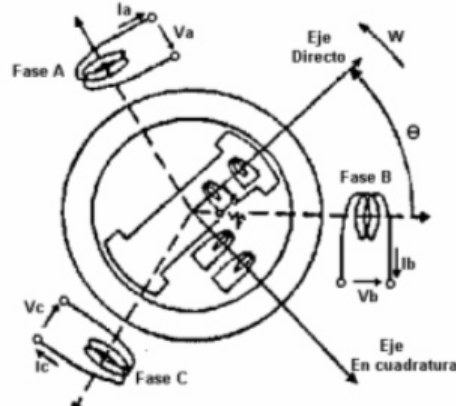


Figura. 2.9. Sistema eléctrico máquina sincrónica. (Oscar Gutiérrez, 2009).

La modelación eléctrica de la máquina sincrónica viene dada por el siguiente conjunto de ecuaciones de Park en el sistema de referencia dqo, (P. Kundur, 1994), las ecuaciones mostradas son las mismas que resuelve el ATPDraw:

- Ecuaciones de tensión:

$$[v] = -[R][i] - \frac{d[l]}{dt} \quad (\text{Ec. 2.8})$$

Donde:

$$[v] = [va, vb, vc, -vf, 0, 0]^T \quad (\text{Ec. 2.9})$$

$$[i] = [ia, ib, ic, if, ikd, ig, ikq]^T \quad (\text{Ec. 2.10})$$

$$[l] = [la, lb, lc, lf, lkd, lg, lkq]^T \quad (\text{Ec. 2.11})$$

$$[R] = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{kd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_g & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{kq} \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 2.12})$$

- Ecuaciones de flujo:

$$[l] = [L][i] \quad (\text{Ec. 2.13})$$

Donde la matriz [L] es función de la posición del rotor.

Dada la forma de las inductancias que componen la Matriz [L], se puede plantear una transformación que resulte en un conjunto de ecuaciones diferenciales con parámetros constantes, en un nuevo sistema que llamaremos dqo.

La transformación a plantear es la siguiente:

$$[T] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(q) & \cos\left(q - \frac{2p}{3}\right) & \cos\left(q + \frac{2p}{3}\right) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin(q) & \sin\left(q - \frac{2p}{3}\right) & \sin\left(q + \frac{2p}{3}\right) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{Ec. 2.14})$$

Su relación con las variables en el sistema de fases A, B, C, es:

Para los flujos

$$\begin{bmatrix} ld \\ lq \\ lo \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} la \\ lb \\ lc \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 2.15})$$

Para las tensiones

$$\begin{bmatrix} vd \\ vq \\ vo \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} va \\ vb \\ vc \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 2.16})$$

Para las corrientes

$$\begin{bmatrix} id \\ iq \\ io \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} ia \\ ib \\ ic \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 2.17})$$

En el nuevo sistema transformado, las ecuaciones de tensión son:

$$\begin{bmatrix} vd \\ vq \\ vo \\ -vf \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{kd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_g & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{kq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} id \\ iq \\ io \\ if \\ ikd \\ ig \\ ikq \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} ld \\ lq \\ lo \\ lf \\ lkd \\ lg \\ lkq \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -wlq \\ wld \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 2.18})$$

Y las ecuaciones de flujos:

$$\begin{bmatrix} ld \\ lf \\ lkd \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} L_d & L_{af} & L_{akd} \\ L_{af} & L_f & L_{fkd} \\ L_{akd} & L_{fkd} & L_{kd} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} id \\ if \\ ikd \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 2.19})$$

$$\begin{bmatrix} lq \\ lg \\ lkq \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} L_q & L_{ag} & L_{akq} \\ L_{ag} & L_g & L_{gkd} \\ L_{akq} & L_{gkd} & L_{kd} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} iq \\ ig \\ ikq \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 2.20})$$

$$lo = L_o * io \quad (\text{Ec. 2.21})$$

Además si los devanados de armadura se conectan en estrella y el neutro se une a tierra mediante una impedancia, se debe considerar la siguiente ecuación:

$$un = 3R_n * io + 3L_n * \frac{dio}{dt} \quad (\text{Ec. 2.22})$$

2.2.13.4.3 Ecuaciones de la parte mecánica del SM 59

La parte mecánica puede estar constituida por un gran número de masas rotantes todas solidarias a un mismo eje. Estas masas pueden ser las distintas etapas de una turbina de vapor, como la de alta presión (HP), presión intermedia (IP) y una o varias de baja presión (LP1). La masa del generador es siempre considerada por defecto, y también se podría adicionar si es que la hay la masa de la excitatriz. La figura 2.10 muestra este conjunto de masas acopladas mediante el eje del sistema.

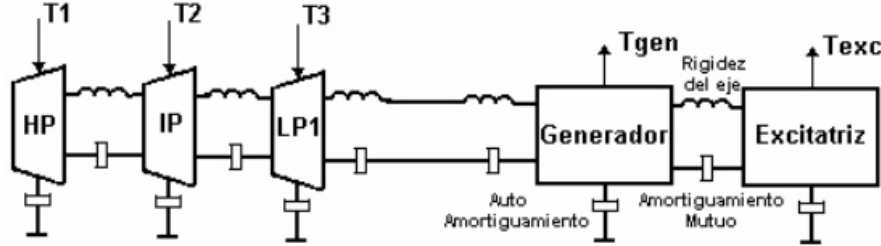


Figura. 2.10. Sistema mecánico del generador sincrónico. . (Oscar Gutiérrez, 2009).

Las ecuaciones de Newton aplicadas a este conjunto de masas acopladas nos conducen a las siguientes ecuaciones matriciales.

$$[J] \frac{d^2[q]}{dt^2} + [D] \frac{d[q]}{dt} + [K][q] = [turbina] - [Tgen/exc] \quad (\text{Ec. 2.23})$$

Donde:

El vector de posiciones angulares es:

$$[q] = [q1, q2, q3, \dots, qn] \quad (\text{Ec. 2.24})$$

El vector de velocidades angulares es:

$$[w] = \frac{d[q]}{dt} \quad (\text{Ec. 2.25})$$

La matriz de momentos de inercia:

$$[J] = \begin{bmatrix} J1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J2 & 0 & 0 \\ \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} \\ 0 & 0 & 0 & Jn \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 2.26})$$

La matriz de coeficientes de amortiguamientos:

$$[D] = \begin{pmatrix} D1 + D12 & -D12 & 0 & 0 \\ -D12 & D12 + D2 + D23 & -D23 & 0 \\ \dot{0} & \dot{0} & \dot{0} & -Dn - \dot{1}, n + Dn \end{pmatrix} \quad (\text{Ec. 2.27})$$

La matriz de coeficientes de rigidez:

$$[K] = \begin{pmatrix} K1 + K12 & -K12 & 0 & 0 \\ -K12 & K12 + K2 + K23 & -K23 & 0 \\ \dot{0} & \dot{0} & \dot{0} & -Kn - \dot{1}, n + Kn \end{pmatrix} \quad (\text{Ec. 2.28})$$

Este tipo de modelo es útil para máquinas térmicas cuando se realizan estudios de resonancia subsincrónica. No obstante en el caso de unidades hidráulicas el modelo que considera solo la masa del generador puede llegar a ser una suficiente aproximación. En este caso las ecuaciones se reducen a (P. Kundur, 1994):

$$J \frac{d^2 q}{dt^2} + D \frac{dq}{dt} = Turbina - Tgen \quad (\text{Ec. 2.29})$$

$$w = \frac{dq}{dt} \quad (\text{Ec. 2.30})$$

Finalmente la relación entre las ecuaciones de la parte eléctrica con los de la parte mecánica están dadas por:

$$q_{mec} = \frac{q_{elec}}{NP/2} \quad (\text{Ec. 2.31})$$

$$Tgen = \frac{NP}{2} (ld * iq - lq * id) \quad (\text{Ec. 2.32})$$

$$Texc = \frac{-vf * if}{wexc} \quad (\text{Ec. 2.33})$$

Donde NP es el número de polos.

2.2.13.4.4 Ingreso de datos de la SM 59

Si bien en el modelo dco las inductancias son constantes y están perfectamente caracterizadas, no es posible obtenerlas directamente de ensayos sobre la máquina en forma externa. Por esto el EMTP permite que se ingresen los datos de fabricante en forma de reactancias sincrónica, transitoria, subtransitoria, constantes de tiempo, etc. Para ello el ATPDraw agrega una línea de comando en el ATP-file con la instrucción “PARAMETER FITTING”, el cual se encuentra en el registro 2 del componente SM59. A continuación se describen las 7 “clases” de registros que clasifica la información de la máquina (Rule book-ATP-Rb-80-LEC, 2011):

Registros Clase 1: Lo integran tres tarjetas que soportan el código 59, que identifica a esta fuente, así como los nombres de las barras a la que se conecta, su tensión, frecuencia y ángulo a $t=0$.

Registros Clase 2: Algunos de éstos son opcionales y tienen por objeto modificar tolerancias preestablecidas para el cálculo y declarar si, eventualmente, la máquina sincrónica estará conectada en estrella (el programa asume por defecto que está conectada en estrella). He aquí donde se encuentra el PARAMETER FITTING, que es fundamental: su presencia o ausencias le señala al programa cómo debe interpretar los parámetros eléctricos que se ingresarán en los registros clase 3 (bien como las clásicas reactancias y constantes de tiempo subtransitorias, transitorias y permanente, bien como inductancias en el sistema de coordenadas Park).

Registros Clase 3: Son los que describen las características y parámetros eléctricos nominales de la máquina, para lo cual deben ingresarse 4 o 5 registros (dependiendo de la opción tomada con los registros clase 2).

Registros Clase 4: Describen las características mecánicas de las distintas masas que interconectadas entre si forman el conjunto rotante de la máquina.

Registros Clase 5: Son los que permiten seleccionar que tipo de información relacionada con las distintas variables de la máquina han de ser almacenada para su análisis en los archivos *.LIS y *.PL4.

Registros Clase 6: Estos serán de especial interés en este trabajo, ya que son aquellos que permitirán el intercambio de información con, y el control de la tensión de excitación por, el TACS.

Registros Clase 7: Son opcionales y su presencia indica que una máquina adicional ha de ser colocada en paralelo con la anterior.

2.2.13.4.5 Los Registros Clase 6 del SM 59:

Una primera clasificación de estos registros puede hacerse entre aquellos que permiten “sacar” información de la máquina sincrónica y dejarla disponible para el TACS y aquellos que permiten “ingresar” información proveniente del TACS (Hoidalen, Hans K. Prikler, 2002).

Los primeros tienen por objetivo permitir suministrarle al TACS el estado de ciertas variables de la máquina sincrónica, para que éste (a través de algún algoritmo elaborado por el usuario) tome alguna decisión que le comunicará a la máquina sincrónica a través de los segundos, ejerciendo cierto control sobre la misma.

Los códigos de aquellos registros utilizados para “ingresar” información a la máquina sincrónica son: el 71 si se trata de controlar la tensión del devanado de excitación, o el 72 si se intenta hacer otro tanto con la potencia mecánica de la turbina que la impulsa.

Si en cambio se trata de “sacar” información de la máquina sincrónica los códigos de los registros correspondientes serán: el 73 si se trata de variables eléctricas o el 74 si son mecánicas.

A continuación se muestra la ventana de configuración del componente, los datos de entrada y nombres de los distintos nodos aparecerán en una ventana como la mostrada en la figura 2.11.

DATA	VALUE
Volt	26000
Freq	50
Angle	0
Poles	2
SMOVTP	1
SMOVTD	1
RMVA	100
RkV	24

NODE	PHASE	NAME
OUT	3	
TACS1	1	
TACS2	1	
TACS3	1	
TACS4	1	
TACS5	1	
TACS6	1	
TACS7	1	

Order: 0 Label: Comment: ☐ Hide

Figura. 2.11. Ventana de atributos del componente SM 59, *ATPDraw*

Los distintos parámetros que la máquina sincrónica requiere en el *ATPDraw* son:

Volt= Tensión inicial en [V], en bornes de la máquina.

Freq= Frecuencia [Hz].

Angle= Ángulo inicial de la fase A en [deg].

Poles= Numero de Polos.

SMOVTP= Factor de proporcionalidad de la potencia activa, usado con máquinas en paralelo. Si no hay máquinas en paralelo: SMOVTP=1.

SMOVTQ= Factor de proporcionalidad de la potencia reactiva, usado con máquinas en paralelo. Si no hay máquinas en paralelo: $SMOVTQ=1$.

RMVA= Potencia aparente nominal de la máquina en [MVA].

RkV= Tensión nominal de línea de la máquina en [kV].

AGLINE= Corriente de campo en [A] la cual produce la tensión nominal de armadura sobre el eje-D.

RA= Resistencia de armadura en [pu].

XL= Reactancia de dispersión de armadura en [pu].

Xd= Reactancia sincrónica en el eje-D en [pu].

Xq= Reactancia sincrónica en el eje-Q en [pu].

Xd'= Reactancia transitoria en el eje-D en [pu].

Xq'= Reactancia transitoria en el eje-Q en [pu].

Xd''= Reactancia subtransitoria en el eje-D en [pu].

Xq''= Reactancia subtransitoria en el eje-Q en [pu].

Tdo'= Constante de tiempo transitoria en el eje-D en [seg].

Tqo'= Constante de tiempo transitoria en el eje-Q en [seg].

Tdo''= Constante de tiempo subtransitoria en el eje-D en [seg].

Tqo''= Constante de tiempo subtransitoria en el eje-Q en [seg].

Xo= Reactancia de secuencia cero en [pu].

RN= Resistencia de neutro de puesta a tierra en [pu].

XN= Reactancia de neutro de puesta a tierra en [pu].

XCAN= Reactancia de la característica Canay's en [pu].

HICO= Momento de inercia del rotor: En [millones pound-feet²] si MECHUN=0.

En [millones kg-m²] si MECHUN=1.

DSR= Coeficiente de auto amortiguamiento del rotor, respecto de la velocidad relativa

T= DSR(W-Ws): En [(pound-feet)/(rad./sec)] si MECHUN=0.

En [(N-m)/(rad./sec)] si MECHUN=1.

DSD= Coeficiente de auto amortiguamiento del rotor, respecto de la velocidad absoluta

T= DSD(W): En [(pound-feet)/(rad./sec)] si MECHUN=0.

En [(N-m)/(rad./sec)] si MECHUN=1.

FM= <=2: Constante de tiempo basadas en mediciones a circuito abierto.

>2: Constante de tiempo basadas en mediciones de corto circuito.

MECHUN= 0: Unidades Inglesas.

1: Unidades del sistema métrico.

2.2.13.5 TACS:

Los TACS (sistemas de control para el análisis de transitorios), son componentes del EMTP que permiten implementar sistemas de control en forma general. Estos pueden ser utilizados en diversas funciones como:

Sistemas de control:

- Control de la excitación y gobernación de máquinas generadoras.
- Lazos de control de convertidores electrónicos de potencia.
- Disparo de circuitos semiconductores de potencia.

- Algoritmos de regulación.

Monitoreo de variables post-procesadas de la red:

- Filtro analógicos y digitales.
- Cálculo de FFT.
- Cálculo de torques de motores o generadores.
- Cálculo de valores RMS de tensión y corriente.
- Simula sistemas mecánicos y electromecánicos.
- Respuestas no lineales.
- Fuente multi-frecuencia o de frecuencia variable.

Los sistemas de control se representan en general mediante diagrama de bloques, interconectando distintos tipos de elementos tales como funciones de transferencia, sumadores, limitadores, ect. La figura 2.12 es un típico ejemplo.

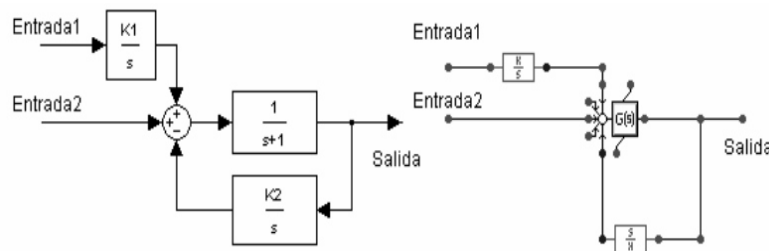


Figura. 2.12. Diagrama de bloques con su implementación del mismo en ATPDraw, *ATPDraw*

Los sistemas de control modelados en TACS y las redes eléctricas son resueltos en forma separada en el tiempo por el EMTP. La salida, solución de alguna variable de la red, puede ser usada como variable de entrada del TACS en un mismo paso de tiempo (Δt). En cambio la solución de salida de una variable TACS solo será considerada por algún elemento de la red un paso de tiempo después. Esto se realiza de esa manera pues los sistemas de ecuaciones de TACS y la RED son resueltos independientemente en cada paso de simulación.

Los datos son ingresados al ATPDraw mediante bloques con parámetros en el dominio de Laplace, aunque los resultados nodo a nodo estén dados en el dominio del tiempo. Los nodos

y nombres de variables pueden tener hasta 6 caracteres. La conexión entre bloques puede ser arbitraria.

2.2.13.5.1 Las funciones de transferencia:

La figura 2.13 muestra cómo se obtiene éstas funciones a partir del menú despegable del ATPDraw.

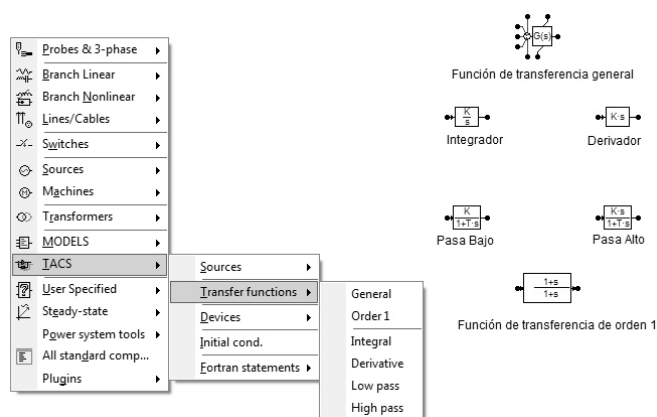


Figura. 2.13. Funciones de transferencia desde el ATPDraw, *ATPDraw*

La función de transferencias general, permite mediante el ingreso de polos y ceros construir cualquier función hasta orden 7. Como caso particular de ésta se pueden obtener integradores, derivadores, constantes, filtros pasa altos y pasa bajos. Esta función también permite el ingreso de límites, como se observa en la figura 2.14.

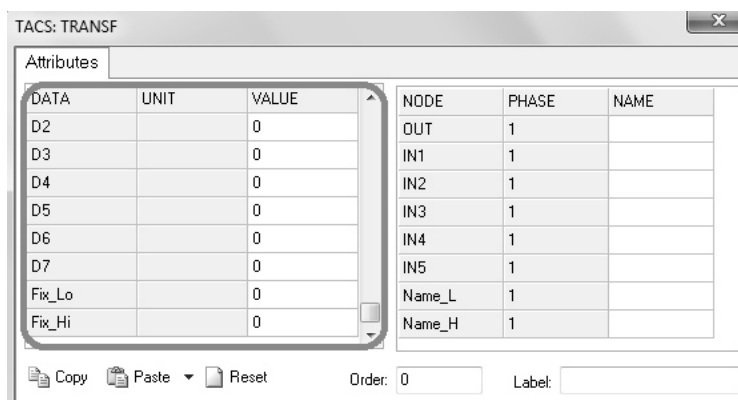


Figura. 2.14. Ventana de atributos de la función de transferencia general en el ATPDraw

2.2.13.5.2 Funciones Especiales o Devices:

Hay 17 funciones especiales para las cuales se deben suministrar solamente los parámetros (Rule book-ATP-Rb-03-A, 2011). En la figura 2.15 se muestran los íconos de estas funciones especiales como se observan desde el ATPDraw.

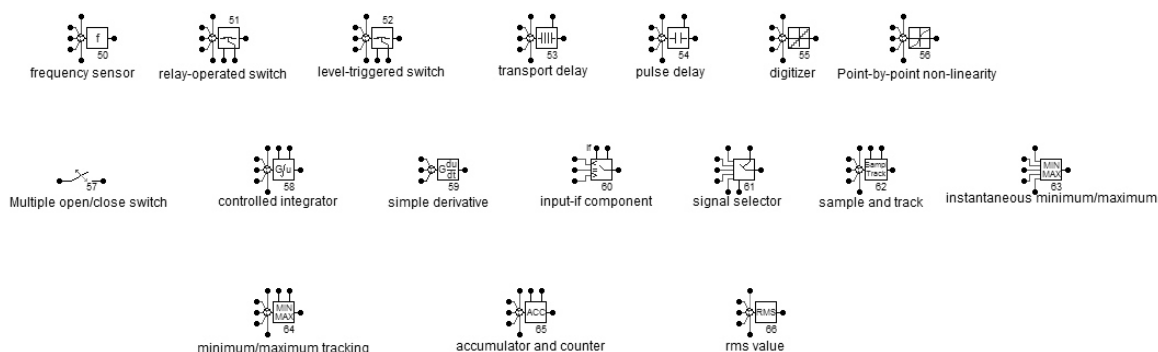


Figura. 2.15. Iconos de las funciones especiales TACS, *ATPDraw*

2.2.13.5.3 Las fuentes de TACS:

Hay distintos tipos de fuentes definidas en el ATPDraw (Rule book-ATP-Rb-03, 2011), y otras que se pueden obtener con sentencias FORTRAN, también se pueden pasar variables desde la red y utilizarse como fuentes, la figura 2.16 muestra las diferentes fuentes TACS que posee el software.

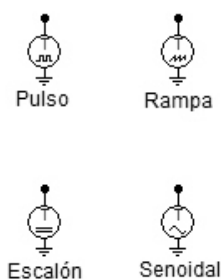


Figura. 2.16. Distintos tipos de fuentes en TACS, *ATPDraw*

2.2.13.5.4 Constantes y variables internas predefinidas:

TIMEX= Simula el tiempo en segundos (comienza en cero).

ISTEP= Número de pasos de simulación (desde que la simulación comienza).

DELTAT = (TIMEX = ISTEP*DELTAT).

FREQHZ = Frecuencia en Hz.

OMEGAR = $2 \cdot \text{PI} \cdot \text{FREQHZ}$ (unidades rad/seg).

ZERO = 0.0

MINUS1 = -1.0

PLUS1 = 1.0

UNITY = 1.0 (use PLUS1)

INFTY = (número muy grande en relación al sistema computacional)

PI = 3.14159

2.2.13.5.5 Funciones definidas en FORTRAN:

El dispositivo FORTRAN mostrado en la figura 2.17 permite definir y combinar funciones de FORTRAN dentro del TACS.

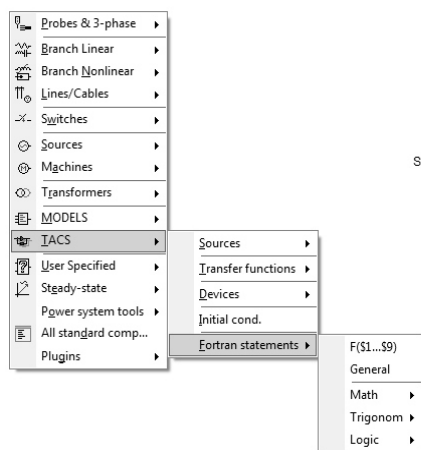


Figura. 2.17. Dirección de las sentencias FORTRAN e ícono de la función general, ATPDraw

Los operadores aritméticos que se pueden usar son:

- +, -, *, /, **

Operadores relacionales:

- .EQ., .NE., .LT., .LE., .GE., .GT. Las salidas de estos operadores son binarios (0 o 1).

Funciones FORTRAN:

- SQRT, ABS, EXP, LOG, LOG10.
- SIN, COS, TAN, COTAN (argumentos en radianes)
- ASIN, ACOS, ATAN (respuesta en radianes).
- SINH, COSH, TANH.

Funciones especiales:

- TRUNC, MINUS, INVR
- RAD, DEG, NOT
- SIGN (-1 para números negativos, +1 para positivos o cero)
- SEQ6, RAN (generador de números aleatorios)

Se pueden combinar las funciones por ejemplo SQRT(ABS(INVR(X))), pero no se pueden usar funciones del tipo GOTO, IF, DO, SUBROUTINE, o FUNCTION que son típicas del código de algoritmos para FORTRAN.

Condiciones iniciales:

En algunas simulaciones es necesario un conjunto de condiciones iniciales, tales que le permitan a ciertos dispositivos (como la SM59) comenzar a $t = 0$ desde un estado estacionario. Las salidas de TACS o de la RED son cero a menos que se especifique otro valor.

Algunos dispositivos que pueden requerir condiciones iniciales son los siguientes:

- Integradores o funciones de transferencia de alto orden.
- Expresiones FORTRAN.
- Dispositivos tipo 50, 51, 52, etc.
- Fuentes donde no se especifica su valor a $t = \text{START}$, o es cero.

2.2.13.5.6 Conexión entre el EMTP (Red) y el TACS (sistema de control):

Para que la conexión se pueda realizar, el nombre de la variable TACS debe coincidir con la del nodo de la red. En la figura se observa el menú despegable desde el cual se definen los parámetros y el ícono usado en el ATPDraw. Considérese que las variables son pasadas desde el tiempo T_{sta} hasta el tiempo T_{sto} , si se llena ambos casilleros con “0” las variables serán pasadas durante toda la simulación.

Hay cuatro tipos de variables a ser pasadas (Rule book-ATP-Rb-03-A, 2011), ver figura 2.18:

- Type 90: Nodo de tensión.
- Type 91: Switch de corriente.
- Type 92: Variable interna para o desde algún dispositivo especial del EMTP (ejemplo SM59).
- Type 93: Control de Switch (Output = 0 si switch está abierto y 1 si switch está cerrado).

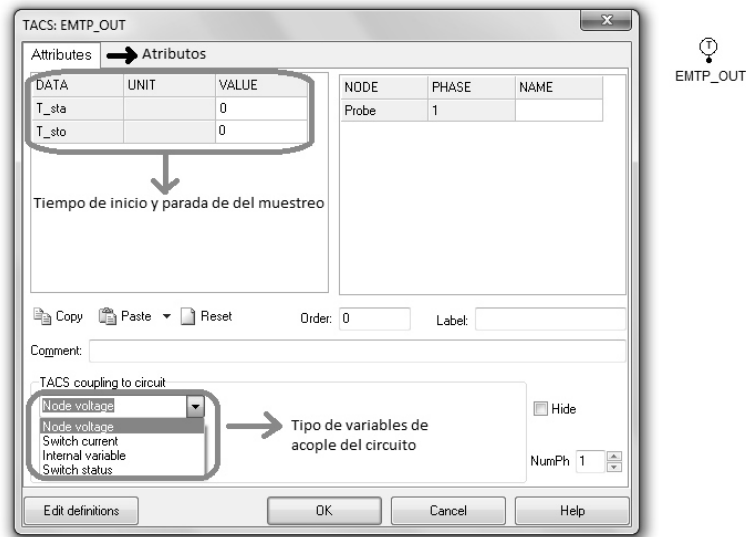


Figura. 2.18. Ventana de configuración del componente EMTP_OUT, *ATPDraw*

2.2.14 Sistemas de excitación según la IEEE:

Cuando el comportamiento de la máquina síncrona se desea simular de forma precisa en los estudios de estabilidad, es esencial que los sistemas de excitación de la máquina síncrona se modelen con suficiente detalle, ya que sin un sistema que controle la tensión en sus bornes no se da en los sistemas reales (IEEE 421.5-1992). Pues ante perturbaciones en la red, la tensión podría variar más allá de los límites establecidos por seguridad y calidad de servicio. Corriéndose el riesgo de tener tensiones muy elevadas las cuales dañarían el aislamiento de las instalaciones o tensiones muy reducidas que podrían llevar el sistema a un colapso de tensión, por ello a continuación se detallan estos sistemas y sus principales componentes.

Los sistemas de excitación tienen la función primordial de alimentar el devanado de campo de la máquina síncrona.

Estos incluyen funciones de control que permiten regular la tensión en bornes y el flujo de potencia reactiva, como así también mejorar la estabilidad del sistema ante eventuales fallas.

En la figura 2.19 se muestran en diagrama de bloques, las principales partes de un sistema de control de excitación de una máquina síncrona.

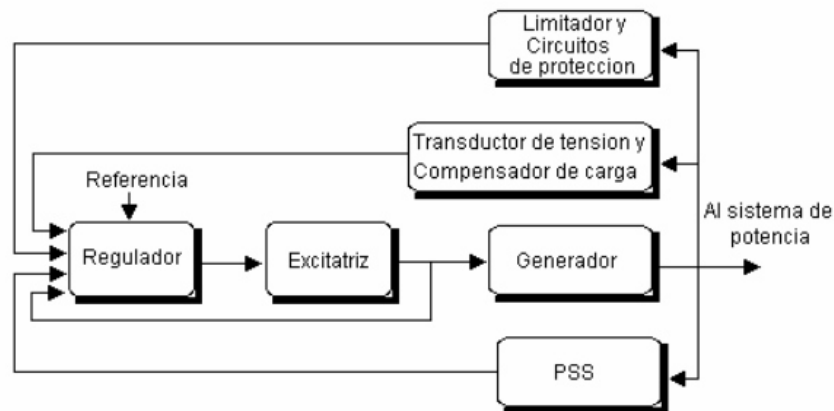


Figura. 2.19. Diagrama de bloques de un sistema de control de excitación, . (Oscar Gutiérrez, 2009).

Las funciones de los diferentes bloques, son las siguientes:

- **Excitatriz:**

Esta alimenta con potencia los devanados de campo de la máquina síncrona.

- **Regulador:**

Este procesa y amplifica las señales de entrada de control, a un nivel y forma apropiada para poder manejar la excitatriz. Incluye regulación y funciones de estabilización del sistema de excitación (retroalimentaciones y compensadores de adelanto-atraso).

- **Transductor de tensión y Compensador de carga:**

El transductor mide la tensión en bornes del generador, la transforma, rectifica y filtra, suministrando una tensión continua que es proporcional a la tensión en bornes del generador.

El compensador de carga permite regular la tensión en algún punto remoto a los terminales del generador, por ejemplo en los bornes de alta de un transformador elevador.

- **PSS (Power system stabilizer):**

Este provee una señal adicional de entrada que permite amortiguar las oscilaciones del sistema de potencia. Algunas señales comúnmente usadas como entrada son, la desviación de velocidad del rotor, la potencia acelerante, y la desviación de la frecuencia.

- **Limitador y circuitos de protección:**

Este puede incluir un amplio arreglo de funciones de control y protección, las cuales aseguran que no se excedan las curvas límite P-Q de la excitatriz, ni la de la máquina sincrónica. Algunas de las funciones comúnmente usadas son, limitador de la corriente de campo, limitador máximo de excitación, limitador de la tensión en bornes del generador, regulación y protección Volt/Hertz, y limitador de baja excitación. Hay tres grandes tipos de sistemas de excitación dependiendo de qué clase de excitatriz se utilice.

2.2.14.1 Sistemas de excitación Tipo DC:

Los sistemas de excitación de esta categoría utilizan generadores de corriente continua como fuentes de potencia, para proveer la corriente al rotor de la máquina sincrónica a través de anillos rozantes. La excitatriz puede ser impulsada por un motor o estar solidaria al eje del generador, y la alimentación de sus campos puede ser auto-excitada o con excitación independiente. Con los años este tipo de máquina está siendo reemplazada por los sistemas AC o por los estáticos (IEEE 421.5-1992). A continuación se describe el sistema Tipo DC1A:

2.2.14.1.1 Sistema de excitación tipo DC1A:

Este modelo representado por el diagrama de bloques de la figura 2.20, de acción de regulación de tensión continua, es usado para representar excitatrices con colector (IEEE 421.5-1992).

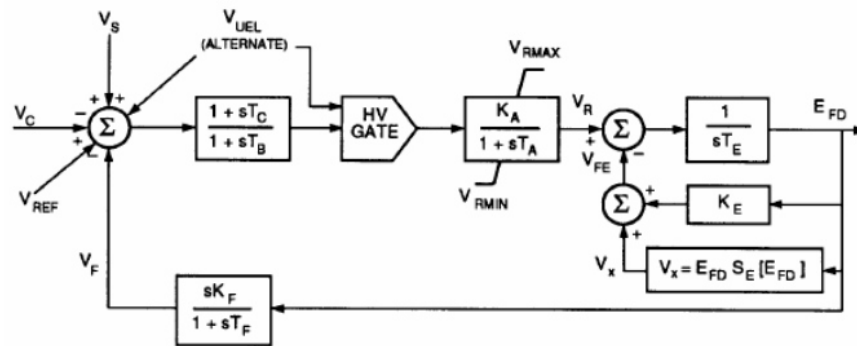


Figura. 2.20. Sistema de control tipo DC1A

Fuente: IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies 421.5-1992

La señal de entrada a este modelo DC1A, es la señal de salida V_C del transductor de tensión y compensador de carga. La señal de tensión V_C se sustrae de la señal de referencia V_{REF} . La señal de retroalimentación estabilizante V también se sustrae, y la señal V_S del PSS se adiciona. En estado estacionario estas dos últimas señales son cero, quedando solamente el error de tensión terminal ($V_C - V_{REF}$). Luego la señal resultante es amplificada en el regulador de tensión.

El bloque con constante de tiempo T_A y ganancia K_A , asociada con el regulador de tensión, incorpora limitadores, los cuales muestran típicamente saturación o limitaciones en el suministro de potencia del amplificador.

El regulador de tensión utiliza fuentes de alimentación independientes de los transitorios de la máquina síncrona o fallas en la red. Las constantes T_B y T_C pueden usarse para

modelar constantes de tiempo equivalentes inherentes en el regulador de tensión; no obstante estas constantes de tiempo son lo suficientemente pequeñas como para ser despreciadas.

La salida del regulador de tensión V_R , es usada para controlar la excitatriz, la cual puede tener excitación-independiente o puede auto-excitarse.

Cuando el devanado de campo en paralelo es auto-excitado el valor de K_E refleja el valor del reóstato en serie con el devanado de campo de la excitatriz. Para algunos casos el valor resultante de K_E podría ser negativo.

El término $S_E [E_{FD}]$ es una función no lineal dependiente del valor de E_{FD} . La salida del bloque de saturación V_X , es el producto de la entrada E_{FD} y el valor de la función no lineal $S_E [E_{FD}]$, y es la tensión de la excitatriz.

Por último una señal V_F , derivada de la tensión de campo de la máquina sincrónica, es utilizada para proveer estabilidad al sistema de excitación, mediante un lazo de realimentación compuesto de una ganancia K_F y una constante de tiempo T_F .

2.2.14.2 Sistemas de excitación AC:

Los sistemas de excitación de esta categoría utilizan alternadores como fuentes de potencia para el rotor. En general esta suele estar en el mismo eje de la turbina. La salida de tensión alterna de la excitatriz es rectificada por un puente rectificador (controlado o no-controlado), el cual produce la corriente continua necesaria para el devanado de campo del generador. El puente rectificador puede ser estacionario o rotante.

2.2.14.2.1 Sistema de excitación tipo AC5A:

La figura 2.21 muestra este tipo de excitatriz, este es un modelo simplificado de los sistemas de excitación tipo brushless. El regulador tiene una fuente de alimentación, tal que las perturbaciones de la red no lo afectan.

Este modelo puede ser usado para representar pequeños sistemas de excitación. Se puede notar que este tipo sistema de control, no es como otros modelos AC; aquí se simula la saturación tal cual se hace en los modelos DC. Este modelo ha sido usado ampliamente en la

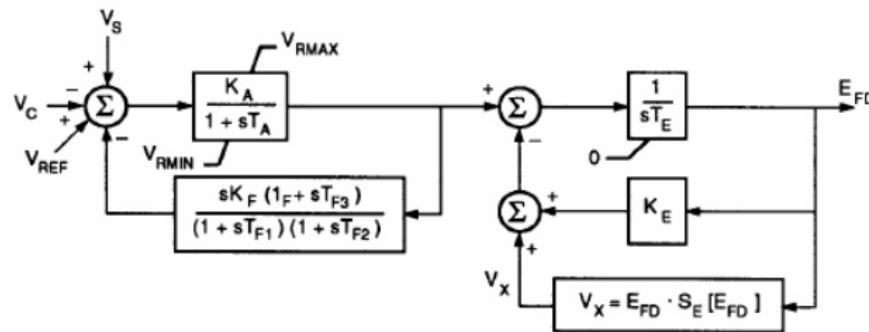


Figura. 2.21. Sistema de control tipo AC5A. Fuente:IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies 421.5-1992

industria, algunas veces cuando no se disponen de datos de otros tipos de control de excitación o se requieren modelos simplificados.

2.2.14.3 Sistemas de excitación tipo estático:

En este sistema todos los componentes son estáticos o estacionarios. El rectificador estático (controlado o no-controlado) suministra la corriente continua a los devanados del rotor mediante anillos rozantes. La potencia del rectificador proviene de los bornes del generador mediante un transformador reductor de tensión, o en algunos casos mediante bobinados auxiliares en el generador (IEEE 421.5-1992).

2.2.14.3.1 Sistema de excitación tipo ST2A:

Algunos sistemas estáticos utilizan señales de tensión y corriente de los bornes del generador para controlar la excitatriz. Este sistema de excitación con puente rectificador y señales compuestas se muestra en la figura 2.22. Es necesario, para implementar la fuente de potencia de la excitatriz, utilizar una combinación de los fasores de la tensión terminal V_T y la corriente terminal I_T .

El valor de E_{FDMAX} representa el límite de la tensión de la excitatriz debido a la saturación de los componentes magnéticos (transformador) y T_E es una constante de tiempo asociada con la inductancia de un devanado de control.

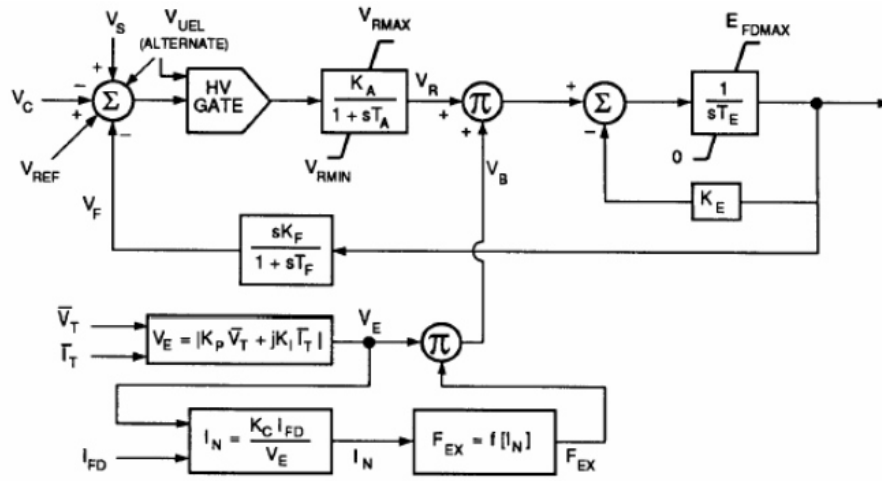


Figura. 2.22. Sistema de control tipo ST2A.

Fuente: IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies 421.5-1992

2.2.14.4 Sistema de excitación tipo regulación discontinua:

Este es un sistema de control de los llamados discontinuos, ver figura 2.23. Este presenta la particularidad de operar con dos caminos directos en paralelo, seleccionando la magnitud del error de tensión V_2 cuál de ellos opera en cada momento, si es que alguno lo hace. Esto último debido a la existencia de una denominada Zona Muerta Interior (ZMI) que hace que si el error es inferior a un preestablecido valor, el SE (función de saturación de la excitatriz) no intente siquiera corregirlo. Si el error supera esta ZMI pero no alcanza un valor superior

de tensión, el dispositivo 60 superior habilita al reóstato de campo [bloque $K_A / (1 + s.T_{RH})$] para que produzca lentamente la corrección deseada (Regulación Lenta), pero, si el error superara el límite superior de tensión (constante que determina la actuación lenta o rápida), actúa entonces el dispositivo 60 inferior, enviando bruscamente la máxima señal de corrección, VRmax o VRmin, según el signo del error (Regulación rápida), esto equivale a cortocircuitar o insertar toda la resistencia del reóstato de campo.

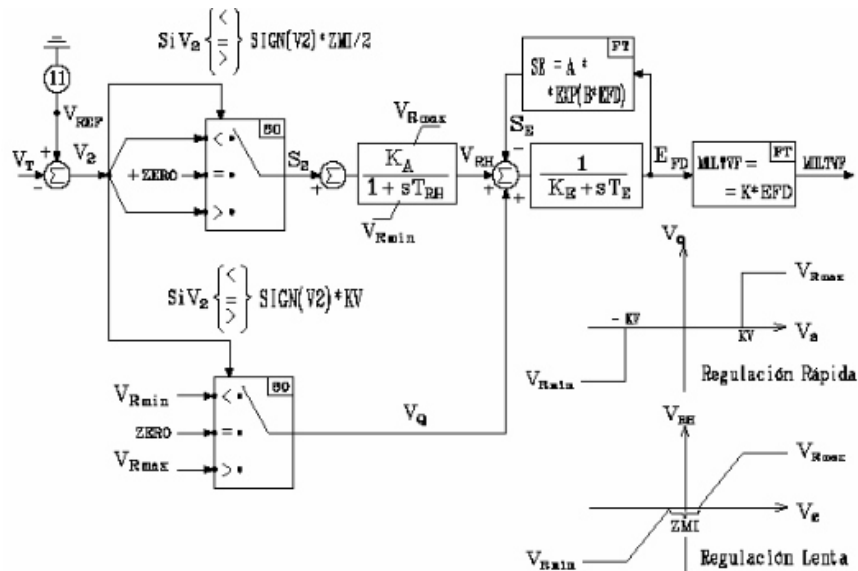


Figura. 2.23. Sistema de control tipo regulación discontinua.

Fuente: IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies 421.5-1992

2.2.15 Sistemas de Control de Velocidad y Máquinas Primarias:

2.2.15.1 Funciones de la máquina primaria y del regulador de velocidad:

Se denomina a una máquina primaria (Anderson, P. M. y Fouad, A. A, 1977), a cualquier unidad responsable del accionamiento de un generador de energía eléctrica. Esta máquina se asocia generalmente con una unidad de control, el regulador de velocidad (gobernador), responsable del ajuste de la fuente de alimentación del eje mecánico de la máquina, de acuerdo a las necesidades de potencia activa demandada a los terminales del generador.

Este mecanismo de ajuste automático de la velocidad actúa para aumentar o reducir la potencia de la máquina cuando la velocidad (o frecuencia) se desvía de la velocidad de referencia.

Otra tarea del regulador de velocidad es llevar a cabo la correcta distribución de la potencia entre las máquinas de un sistema multimáquinas.

2.2.15.2 Tipos de máquinas primarias:

Las máquinas primarias utilizadas normalmente para proporcionar potencia a los sistemas de generación de energía eléctrica son: turbinas hidráulicas, de vapor, gas, además de los motores diesel. Las turbinas hidráulicas y de vapor son las máquinas más utilizadas para la generación de energía a gran escala (sistemas interconectados). La turbina gas y los motores diesel se utilizan con frecuencia en los sistemas industriales y/o aislados, así como en la exploración costa afuera petróleo, islas o barcos, entre otros.

Se presentarán las características más relevantes de estas turbinas a continuación.

2.2.15.2.1 Turbina de Vapor:

Esta máquina convierte la energía almacenada en forma de vapor en de alta presión y alta temperatura en el poder rotatorio. Esto se convierte a electricidad por el generador. La fuente de calor, que suministra calor para la caldera puede ser un horno de combustible fósil (carbón, petróleo y gas) o incluso un reactor nuclear.

Estas turbinas constan de dos o más etapas, llamados cilindros, acoplados en serie y que operan a diversas presiones y temperaturas diferentes. Los cilindros están conectados por

tubos adecuados en muchos conjuntos, el vapor es recalentado en la caldera entre dos cilindros alta presión e intermedio.

El vapor fluye a través de los cilindros y tubos con un recalentador de velocidad finita. En este diagrama de bloques es equivalente a incluir retrasos tiempo en el sistema. El recalentador tiene una constante de tiempo más grande. En sistemas grandes, el recalentador de vapor correspondiente puede retener varios segundos la potencia del generador completo. Esto implica un retardo para los sistemas de control, ya que esta energía se almacena.

La inercia predominante de un conjunto generador-turbina es la inercia de la turbina de vapor, cuya velocidad nominal suele ser 3.600 o 1.800 rpm (para generadores de 2 o 4 polos, respectivamente). Los valores de las constantes de inercia, que corresponden al vapor almacenado en la turbina, varían con el tamaño del sistema, y son típicamente comprendidos en el rango de 1 a 6 segundos.

2.2.15.2.2 Turbinas Hidráulicas:

Estas turbinas por lo general grandes cantidades de energía están involucradas en forma de flujo de agua, las cuales van desde un depósito superior hacia la turbina. Las características de control de una turbina hidráulica son similares a las de vapor. Sin embargo, la inercia de una turbina hidráulica es inferior a la de una turbina de vapor de la misma potencia. Esto tiene claras implicaciones para los estudios estabilidad transitoria y desconexión de carga.

Algunos aspectos que afectan el comportamiento de la turbina hidráulica son: la característica de la columna de agua que alimenta la turbina (es decir, la inercia de agua), la compresibilidad del agua y la elasticidad de la pared tubular del conducto.

2.2.15.2.3 Turbinas de gas:

Estas turbinas tienen varias cualidades como fuentes de energía primaria tales como (P. Mahat, Z. Chen, B. Bak-Jensen, 2011): ausencia de componentes de movimiento alternativos, en oposición al movimiento de los pistones de los motores diesel, proporcionando de esta manera una operación suave y libre vibraciones. Además de este hecho, el desarrollo continuo de la tecnología fabricación de estas máquinas ha proporcionado avances en su aerodinámica, los tipos de materiales utilizados y las técnicas de fabricación, hace que resulte en una mayor confiabilidad en estas máquinas.

Las constantes de tiempo involucrados son generalmente más pequeñas que los relacionados con turbinas de vapor e hidráulico. Para grandes sistemas interconectados con predominancia en el uso de turbinas hidráulicas y vapor, las dinámicas de grupos electrógenos alimentados a través de turbinas de gas no son consideradas importantes en el contexto general del sistema, siendo consideradas a problemas locales.

En la figura se puede observar un modelo de gobernador llamado GAST, el cual permite tener un lazo de control de la potencia mecánica en el eje, realimentado a través de la velocidad de rotación. Este modelo de gobernador adiciona un lazo de control realimentado en paralelo que posibilita la limitación de la temperatura de los gases de escape en el exhaust de la turbina, los cuales para temperatura ambiente elevada y generación al límite de potencia permite evitar que la temperatura no sobrepase los límites admisibles de los materiales.

El gobernador permite controlar la velocidad de rotación de la turbina y estabilizar la máquina ante cambios repentinos que pueda demandar la red de energía. El lazo comienza midiendo la velocidad de rotación o frecuencia de red (que en valores por unidad son lo mismo), y este valor se resta a la potencia de referencia que se impone como la generación deseada en la máquina. Luego la señal de error obtenida es pasada a un bloque de constante

de tiempo T_1 el cual modela la dinámica de la válvula de combustible con límites en la regulación de la misma $V_{\max}$, $V_{\min}$. La señal del anterior bloque pasa al siguiente de constante de tiempo T_2 que modela la dinámica de la turbina incluido el combustor. La salida de este bloque es la potencia mecánica que la máquina debe desarrollar en su eje. Finalmente ahí un lazo de realimentación negativa el cual toma el control de la potencia cuando se superan los límites admisibles de temperatura en el exhaust. Este opera disminuyendo la cantidad de combustible que pasa al combustor de la turbina.

2.2.15.2 Los sistemas de excitación y los reguladores de velocidad en el ATPDraw:

La estrategia a utilizar para la implementación de los reguladores de velocidad, se llevará a cabo a través de la función de transferencia de control del regulador, la figura 2.24 muestra el diagrama de bloques que representa un modelo simple de un regulador de velocidad asociado a una turbina de vapor (si $T_4 = 0$) y a una turbina hidráulica (si $T_4 \neq 0$) de la IEEE y la figura 2.25 muestra un regulador asociado a una turbina a gas de la WECC (Western Electricity Coordinating Council) antes mencionada, el uso de los TACS generan los códigos necesarios para modelar los diferentes reguladores, al igual que los controladores de excitatriz antes mencionados.

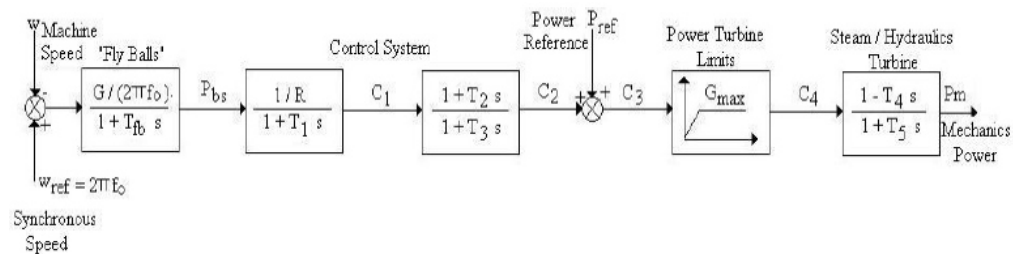


Figura. 2.24. Diagrama de bloques para un regulador de velocidad asociado a una turbina de vapor e hidráulica.

Fuente: (Anderson P y Fouad A, 1977),

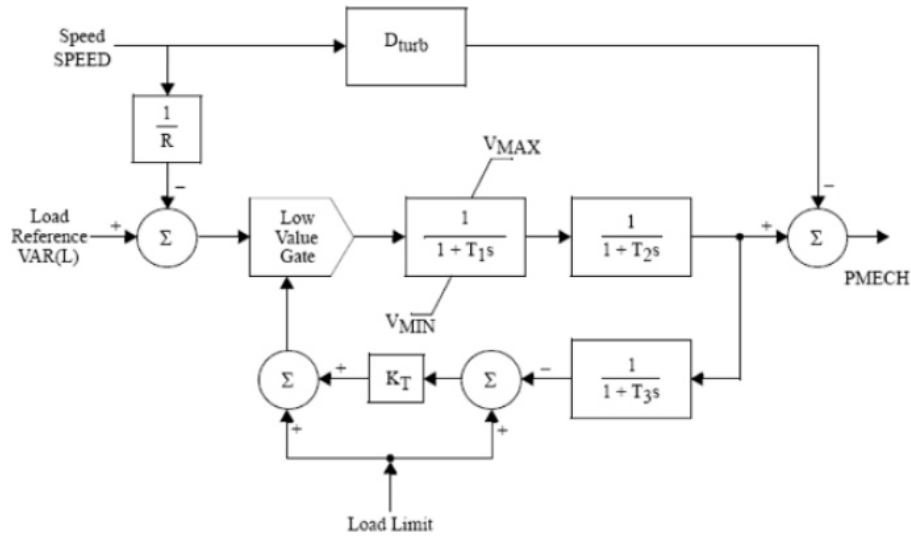


Figura. 2.25. Diagrama de bloques para un regulador de velocidad para una turbina a gas (GAST)

Fuente: (P. Mahat, Z. Chen, B. Bak-Jensen, 2011)

2.2.16 Formato común estándar para el intercambio de datos transitorios para los sistemas eléctricos de potencia (IEEE Std C37.111-1999):

Este estándar define un formato común para el intercambio de archivos de datos y a su vez el intercambio necesario de varios tipos de fallas, pruebas y datos de simulación.

La rápida evolución e implementación de los dispositivos digitales para el registro y puesta a prueba de datos de fallas y transitorios en la industria eléctrica ha generado la necesidad de un formato estándar para el intercambio de datos. Estos datos son usados con varios dispositivos para mejorar y automatizar el análisis, de puesta a prueba, evaluación, y simulación de sistemas de potencia y esquemas de protección relacionados a condiciones de fallas y perturbaciones. Como cada fuente de datos puede usar formatos de diferentes propiedades, un formato común es necesario para facilitar el uso en diversas aplicaciones y permitir al usuario de un sistema en particular usar los datos digitales de otro sistema.

A continuación se describen solamente el contenido de cada uno de los campos de los 4 archivos dados del estándar IEEE Std C37.111-1999.

2.2.16.1 Archivo Header:

Este es un archivo de texto en formato ASCII, utilizado para guardar información adicional para una mejor comprensión del registro del transitorio por parte del usuario.

2.2.16.1.1 Contenido:

Este archivo contiene la información que se detalla a continuación:

- Descripción del sistema de potencia antes de la perturbación.
- Nombre de la Subestación.
- Identificación de la Línea, Transformador, Generadores o Disyuntores que experimenta el transitorio.
- Distancia de falla en la Línea.
- Resistencia, reactancia y capacitancia de secuencia positiva y cero.
- Acoplamiento mutuo entre líneas paralelas.
- Localización y rangos de los reactores en paralelo y las capacitancias en serie.
- Rangos de Voltajes Nominales de los bobinados de los transformadores, especialmente de los Transformadores de potencial y de corriente.
- Especificaciones del transformador de Potencia y la conexión de los bobinados.
- Parámetros del Sistema visto desde los nodos donde se obtiene el registro (impedancias de las fuentes equivalentes de secuencia positiva y cero).
- Descripción de cómo fueron obtenidos los datos, si fueron obtenidos desde un elemento de la subestación, o desde una simulación de una condición del sistema como un programa de transitorios electromagnéticos (EMTP).

- Descripción de los circuitos analógicos.
- La secuencia de las fases de entrada.
- Número de discos en los que el registro será grabado.

2.2.16.2 Archivo Configuration:

El archivo Configuration es un archivo de texto en formato ASCII que provee al usuario o a un programa computacional la facilidad de interpretar los valores de los datos asociados en el archivo de datos. Este archivo es predefinido, y posee un formato estandarizado.

2.2.16.2.1 Contenido:

En el interior del archivo Configuration consta la siguiente información:

- Nombre de la Subestación, identificación del elemento que genera el registro, y el año del Estándar COMTRADE.
- Número y tipos de canales.
- Nombre del canal, unidades, y factores de conversión.
- Frecuencia de Línea.
- Frecuencia de muestreo y número de muestras de cada canal.
- Fecha y tiempo del primer punto.
- Fecha y tiempo del punto de disparo.
- Tipo del archivo de datos.
- Factor de multiplicación del tiempo.

Este archivo está dividido por líneas. Cada línea terminará con un <CR/LF> al final de la línea. Las comas son utilizadas para separar campos dentro de una línea. La coma es requerida incluso si los datos no son enteros dentro de un campo.

2.2.16.3 Archivo Data:

Este archivo contiene los valores de los datos representados a escala del evento de muestreo. Los datos deben ser adecuadamente trabajados por los campos especificados en el archivo Configuration para ser procesados por algún programa que pueda leer registros COMTRADE, además el formato del archivo de datos puede ser en formato ASCII o en formato binario, esto se especifica en el campo ft del archivo Configuration.

2.2.16.3.1 Contenido:

Este archivo de datos contiene los números de las muestras, "timestamp", y los valores de los datos de cada muestra de cada canal. Todos los datos en el archivo de datos están en formato de números enteros.

Para los archivos de datos en formato ASCII, los datos de las muestras de cada canal están separados por una coma, Las muestras son secuenciales y están separadas por un <CR/LF>. En archivos binarios los datos no tienen algún separador entre canales o entre los periodos secuenciales de muestreo. Además este archivo no contiene ninguna otra información.

2.2.16.4 Archivo Information:

El archivo Information (.INF) es opcional. El archivo .INF provee información con respecto al evento del registro COMTRADE, esto permitirá una mejor manipulación y análisis de los datos.

La información opcional guardada en un archivo diferente permitirá una plena compatibilidad con programas anteriores o programas futuros que utilizan el estándar

COMTRADE. Cualquier programa lee los datos del archivo Information y estará en capacidad de reconocer cualquier sección pública de la sección principal u otros datos definidos en el estándar y podrá realizar cualquier acción sobre los datos.

El formato del archivo es similar al que presenta "Windows TM" "INI" y muchos lenguajes de programación que incluyen funciones para leer o escribir estos archivos. Algunas secciones de este archivo duplican la información guardada en el archivo de configuración .CFG. Los archivos .CFG y .DAT son los archivos primarios del estándar COMTRADE. Cualquier dato de una variable es definido y guardado en estos dos archivos, incluso así se repita esta información en el archivo Information. El nombre de este archivo es similar al nombre de los otros del registro y se diferencia por la extensión .INF.

CAPITULO III. MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo de investigación

Tomando en consideración el texto “Normas Para la Elaboración y Presentación de los Trabajos de Grado de Especialización y de Maestría y las Tesis Doctorales “, de la Universidad Pedagógica Experimental Libertador; se puede calificar este trabajo de investigación como:

De **tipo documental** debido a que tiene apoyo a través de análisis de documentos, donde se utiliza material bibliográfico para poder llevar una relación correcta entre la teoría y la práctica, para de esta forma tratar de obtener una estrategia académica correcta que conlleve a una enseñanza efectiva y además, una vez finalizada la investigación, se contará con un trabajo que explique el procedimiento para la realización de una simulación digital de transitorios electromagnéticos en un circuito eléctrico.

(Universidad Pedagógica Experimental Libertador- página 20, 2014), ubica como proyectivas todas aquellas investigaciones que conducen a inventos, a programas, a diseños o a creaciones dirigidas a cubrir una determinada necesidad y basadas en conocimientos anteriores.

Es por esto que se ubica este trabajo como una investigación proyectiva, ya que conduce a una simulación digital dirigida a fortalecer un área de estudio. Al respecto se considera que a través de la investigación proyectiva se es capaz de realizar mejoras a situaciones existentes. Este tipo de investigación se enfoca en el cómo podrían o deberían ser las cosas, en términos de necesidades, preferencias o decisiones de ciertos grupos de personas.

(Hernández Sampieri Roberto, Fernández Collado Carlos y Baptista Lucio Pilar, 2010, pag: 60) en su libro titulado Metodología de la Investigación, plantean este tipo de trabajo

como un estudio descriptivo, el cual conceptualizan como los que miden o evalúan diversos aspectos, dimensiones o componentes del fenómeno o fenómenos a investigar. Esta medición debe ostentar la mayor precisión posible. El investigador debe definir que se va a medir y cómo lograr la precisión de esta medición.

3.2 Técnicas de recolección, interpretación y presentación de la información

3.2.1 Instrumentos de recolección de datos

Son las distintas formas o maneras empleadas para obtener la información, las técnicas e instrumentos de recolección de datos aplicados en este estudio han sido diseñadas siguiendo los pasos según (Universidad Pedagógica Experimental Libertador- página 20, 2014) y se describen a continuación:

- Se listan las variables que se pretenden medir.
- Se revisa su definición conceptual y se comprende su significado.
- Se revisan las definiciones operacionales de las variables.
- Se elige un instrumento que haya sido favorecido por la comparación y se adapta al contexto de esta investigación.

Se realizan los ajustes y mejoras para verificar la confiabilidad y validez de los instrumentos. Además como técnica de recolección de datos se emplea:

Recopilación documental: Esta técnica permite la recolección de información bibliográfica (Hoidalen, Hans K. Prikler, 2002). En el presente estudio se efectúa mediante la revisión de textos, trabajos de investigación, revistas, páginas web, normas y reglamentos relacionados al tema de investigación.

3.2.2 Análisis e interpretación de datos

Para procesar los datos recolectados se ingresa la información en el software Alternative Transient Program (ATP), versión 3.5, para sistema Windows. Este programa computacional

desarrollado a partir de la versión M39 del EMTP-BPA es una versión no comercial del EMTP.

3.2.2.1 El procesador gráfico ATPDraw

Según (Hoidalen, Hans K. Prikler, 2002), El ATPDraw, es un procesador gráfico desarrollado por el noruego Hans Kr. Hoidalen en el Norwegian Electric Power Research Institute, bajo contrato con la BPA, el mismo permite:

Construir la red a simular sobre la pantalla mediante íconos arrastrados por un Mouse y adjudicarle valores a sus parámetros mediante una ventana de diálogos con el usuario.

Traducir este esquema eléctrico en un *.ATP que es el *.DAT clásico, pero en base a tres facilidades que brinda el ATP, La clasificación de los datos mediante sentencias BRANCH y SWITCH, el uso de registros INCLUDE para operar con módulos que representan elementos de la red y pasarles valores a sus parámetros y librerías que contienen plantillas de estos módulos y generadas con ayuda de la subrutina de apoyo BASE DATA MODULE.

3.2.2 Fase II: Sistemas de control de excitación y de control de velocidad:

3.2.3 Presentación de la información

Se realiza la descripción de los resultados obtenidos de cada variable mediante tablas, gráficos, diagramas y/o cuadros, con un respectivo análisis para la fácil comprensión e interpretación de los resultados obtenidos en cada ítem.

3.3 Fases metodológicas de la investigación

Para el desarrollo y cumplimiento de los objetivos planteados, se llevan a cabo las siguientes fases.

3.3.1 Fase I. Selección y descripción de los modelos de sistemas de potencia y sus esquemas de sistemas de control de excitación y velocidad.

3.3.1.1 Sistema de potencia de 9 Barras de la IEEE:

La red está compuesta por 3 generadores sincrónicos, 3 transformadores elevadores, 6 líneas de transmisión representadas con circuitos PI y 3 cargas trifásicas representadas con circuitos RL, e interruptores trifásicos que representaran la falla trifásica a tierra cercano a la barra 7, y el consecuente despeje de la línea 0,05 segundos después. A los tres generadores van conectados tres sistemas de excitación diferentes, todos con el estándar de la IEEE, los sistemas son los siguientes:

- IEEE tipo AC5A, para el generador 1.
- IEEE tipo ST2A, para el generador 2.
- IEEE tipo discontinuo, para el generador 3.

La construcción detallada de éste sistema de potencia se puede ver en el anexo A y la de los sistemas de excitación en el anexo B.

3.3.2.1 Sistema de alta tensión de 230 kV:

La red eléctrica consta de un transformador elevador de tensión, una barra en el secundario del transformador donde se conectará una carga. Se dispone de dos líneas de transmisión modelada mediante circuitos PI y un sistema de potencia simplificado mediante su equivalente de Thevenin, a la red va conectado un turbogenerador a gas derivativo de la General Electric junto con un generador de 51,6 MW, al generador se conectará un control de excitación tipo AC5A, se representará el corto circuito en el extremo de la línea de alta tensión. La implementación del sistema eléctrico se puede ver en el anexo A, juntos con sus datos, mientras que el sistema de control de excitación y velocidad (gobernador) en el anexo B y el anexo C respectivamente.

3.3.2.2 Sistema de distribución de energía de 5 barras:

La red está compuesta por dos generadores sincrónicos, una fuente de tensión ideal, 3 transformadores de potencia, 2 bancos trifásicos de capacitores y 2 cargas trifásicas, conectados a la barra 2 y 3, además de las 2 líneas de transmisión están 2 cargas independientes, una carga estática representada por un circuito RL y una carga dinámica representada por un motor trifásico. Para éste caso se plantea realizar el despeje de una de las líneas y analizar el comportamiento del sistema ante ésta perturbación. Como simulación de los sistemas de control de excitación se implementarán dos sistemas tipo DC1A y una turbina hidráulica y a vapor para el control de velocidad, cada uno de ellos conectados a los dos generadores, véase el capítulo 2 y la construcción en el anexo B.

3.3.2 Fase II: Selección y descripción del Software y componentes a utilizar dentro de la investigación

3.3.2.1 Breve reseña y características principales del ATP

En este apartado se señala el desarrollo del software, además de las características principales y sus ventajas al momento de implementar los modelos, haciendo énfasis en la simulación de transitorios electromagnéticos (fallas, perturbaciones, análisis de armónicos, entre otros) y la modelación de sistemas de control general mediante TACS.

3.3.2.2 Componentes a utilizar dentro del ATPDraw para implementar los sistemas a simular.

Específicamente se muestran los componentes a utilizar:

- Modelo de cargas.
- Modelo de líneas de transmisión:
 - Modelo de línea RLC pi equivalente.
 - Modelo de línea RL acoplado.

- Modelo de los transformadores:
 - Modelo Saturable.
- Modelo Máquina síncrona (SM 59)

A cada uno de los componentes antes mencionados se describe su representación dentro del ATPDraw, así como su ventana de atributos y su visualización en el software.

3.3.2.3 Implementación de sistemas de control a través del TACS:

Se especifican las características de esta herramienta para la modelación de sistemas de control a través de los componentes:

- Fuentes general de TACS.
- Funciones de transferencia.
- Fuentes especiales o Devices.
- Constantes y variables internas predefinidas.
- Funciones Fortran.
-

3.3.3 Fase III: Implementar los sistemas y esquemas seleccionados con ayuda del software ATPDraw:

3.3.3.1 Instalación efectiva del software ATP e implementación de los sistemas de potencia:

Para ejecutar esta fase primero se debe instalar en la PC, el software para realizar la simulación. Ya luego de realizar éste paso se procede a construir cada etapa de los sistemas de potencia con sus sistemas de control anteriormente seleccionados y que van a ser modelados a través de la herramienta TACS, los tres sistemas de potencia a implementar que servirán de validación para ésta investigación son los siguientes:

- Implementación del sistema de potencia de 9 Barras de la IEEE (Anderson, P. M. y Fouad, A. A, 1977) y (Turbay J, 1994).

- Sistema de alta tensión de 230 kV (Oscar Gutiérrez, 2009).
- Sistema de distribución de energía de 5 barras (Fabrício Moura, 2011).

En el anexo A se encuentran los tres sistemas implementados.

3.3.3.2 Obtención de resultados de la simulación.

Entre las opciones que ofrece el software ATP, se encuentran los gráficos de variables eléctricas como Tensión, Corriente en el nodo que se desee, esto permite comparar los resultados obtenidos con el simulador con las condiciones eléctricas esperadas en cualquier sistema eléctrico.

3.3.4 Fase IV: Análisis de resultados obtenidos:

3.3.4.1 Interpretación de los resultados obtenidos de la simulación.

Entre las opciones que ofrece el software ATP, se encuentran los gráficos de variables eléctricas como Tensión, Corriente en el nodo que se desee, esto permite comparar los resultados obtenidos con el simulador con las condiciones eléctricas esperadas en cualquier sistema eléctrico.

3.3.5 Fase V: Exportación de los datos obtenidos a través del software ATPDraw para ser convertidos al formato común estándar para el intercambio de datos transitorios para los sistemas eléctricos de potencia (COMTRADE) con el uso del software TOP (The Output Processor)

El procesamiento de señales de un registro COMTRADE y la extracción de sus características eléctricas en un rango de falla establecido constituye probablemente el paso más importante con miras al desarrollo final del proyecto.

3.3.5.1 Instalación efectiva del software TOP.

Para ejecutar esta fase primero se debe instalar en la PC, el software requerido para realizar la simulación.

3.3.5.2 Exportación de los archivos al software TOP (The Output Processor).

Las simulaciones modeladas en ATP para las diferentes condiciones de falla presentan un archivo gráfico cuya extensión es (.PL4). Posteriormente a la simulación realizada en ATP se exporta estas oscilografías al programa TOP (The Output Processor) cuya finalidad es convertir estos archivos al estándar COMTRADE. Una vez que los datos se encuentran en este software, se extrae la información necesaria que contiene características eléctricas de la/s falla/s analizadas, logrando obtener los 4 archivos que contiene el COMTRADE, ver anexo F:

- .CFG.
- .HDR.
- .DAT.
- .INF

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Comportamiento ante la pérdida de un tramo de la línea del sistema de 9 barras compuesto por 3 generadores sincrónicos con 3 sistemas de control de excitatriz de la IEEE.

El sistema tomado de (Anderson P y Fouad A, 1977) está compuesto por 9 barras, 3 generadores sincrónicos con 3 controles de excitatriz, 3 transformadores elevadores de tensión, 6 líneas de transmisión cuya representación se logra con circuitos PI trifásicos, las cargas están representadas por circuitos RL.

La figura 4.1, muestra el diagrama unifilar del sistema, como también las condiciones iniciales de tensión y potencia en régimen estacionario, se dan los valores de potencia activa y reactiva que consumen cada carga.

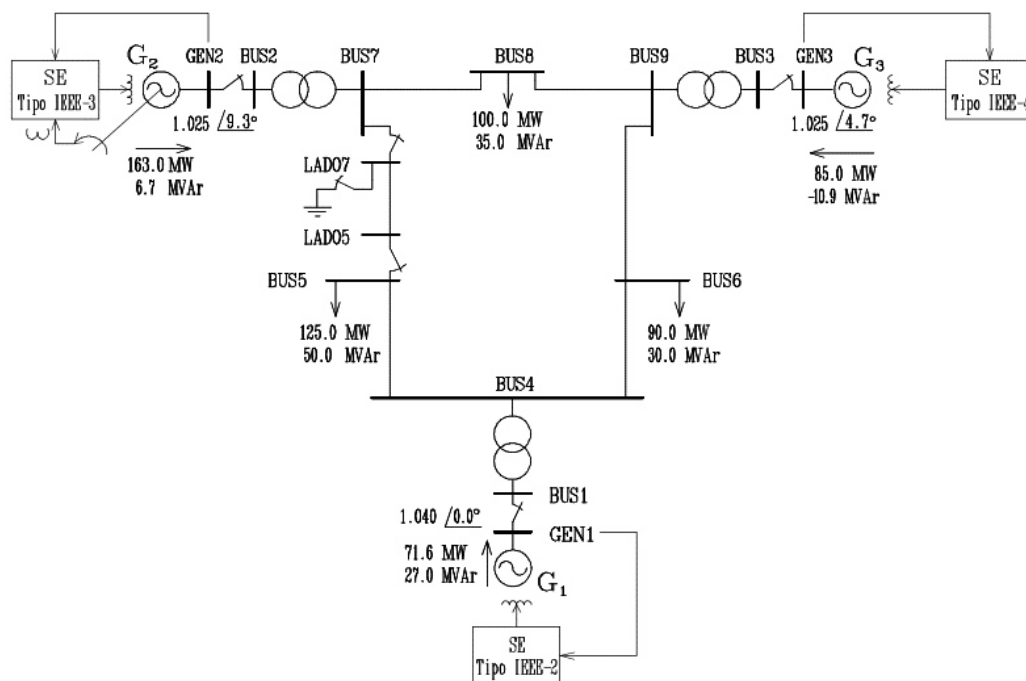


Figura. 4.1. Diagrama unifilar tomado del libro “power System Control and Stability” –Anderson & Fouad.

Se desea simular con interruptores temporales una falla trifásica a tierra cerca de la barra 7, sobre la línea que a su vez conecta las barras 5 y 7, para luego hacer el despeje de la línea 0,05 segundos después de producida la falla.

La figura 4.2 muestra el sistema de potencia ya implementado en el ATPDraw con sus 3 generadores sincrónicos, la implementación completa del sistema 9 barras se encuentra en el anexo A de ésta investigación.

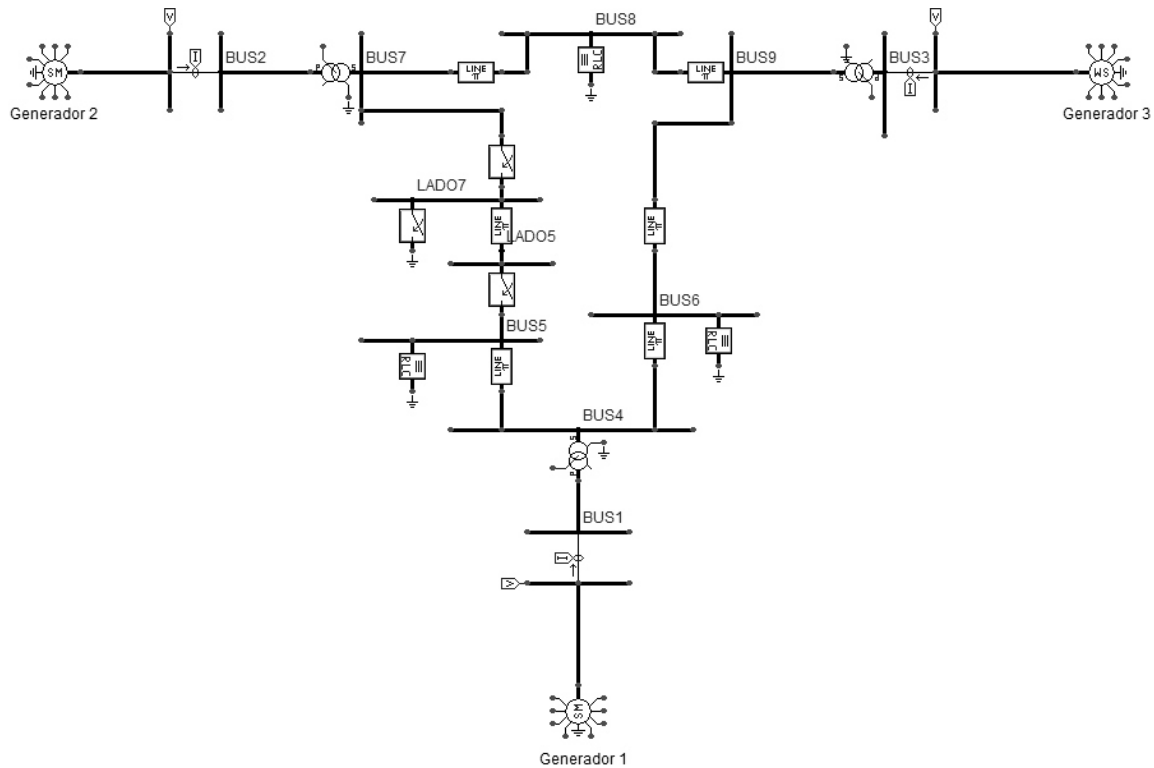


Figura. 4.2. Sistema de 9 barras implementado en el ATPDraw, *ATPDraw*

Cada generador sincrónico va conectado a un sistema de control de excitación diferente, los cuales se listan a continuación:

- Sistema IEEE AC5A, para el generador 1.
- Sistema IEEE ST2A, para el generador 2.
- Sistema IEEE Discontinuo, para el generador 3.

Cada uno de ellos detallados en el capítulo 2, con sus diagramas de control e implementados en el anexo B de ésta investigación. La figura 4.3 y 4.4 siguiente muestra el sistema de potencia completo junto con los 3 sistemas de control de la IEEE.

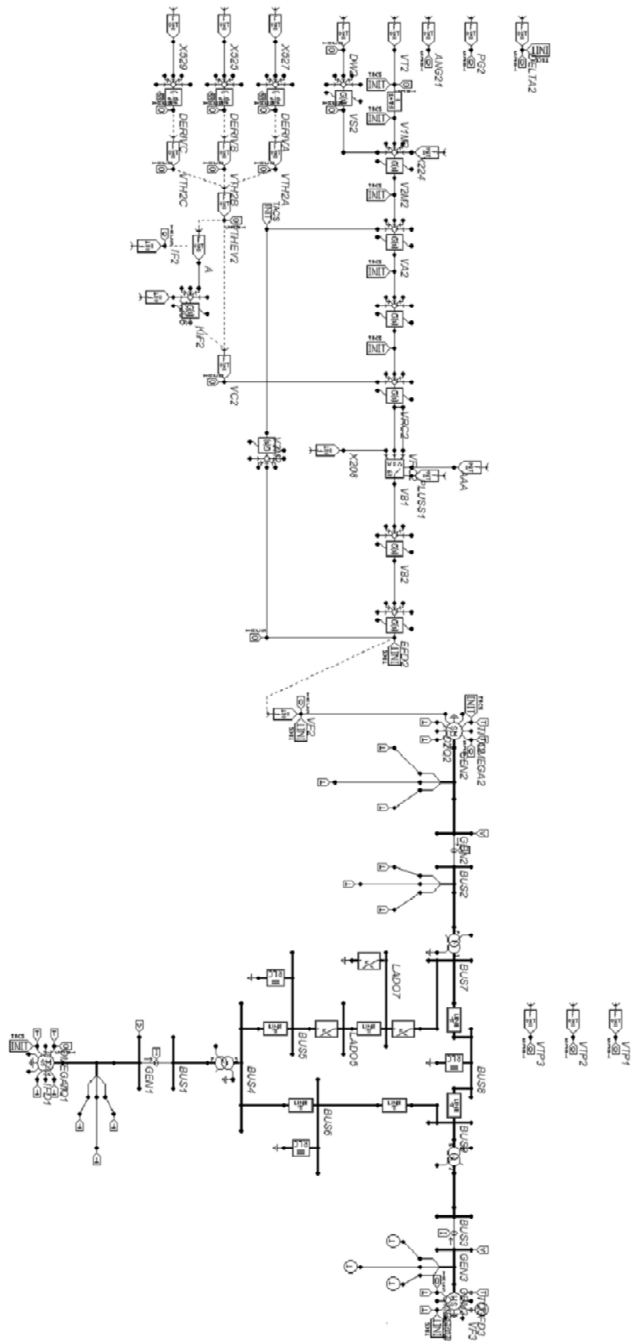


Figura. 4.4. Sistema de 9 barras con sistema AC5Aimplementado en el ATPDraw,ATPDraw

4.1.1 Simulaciones realizadas en el sistema de 9 barras y 3 generadores:

La perturbación efectuada a esta implementación es un cortocircuito trifásico a tierra en $t=0$ en la línea próxima a la barra 7 (Anderson P y Fouad A, 1977), pero para una correcta inicialización se comenzará en $t= 0,01$ s y el despeje del tramo de línea 5-7 en $t=0,06$ s (Turbay J, 1994).

Se observarán distintas variables para el caso cuando el sistema de potencia opera con los tres sistemas de control de excitatriz anteriormente mencionados.

En la figura 4.5, 4.6 y 4.7 se muestra las tensiones VT1, VT2, VT3 respectivamente en por unidad que corresponden a los tres generadores sincrónicos. Se observa que la tensión (VT2 y VT3) de los generadores 2 y 3, los cuales tienen sistemas de control tipo IEEE ST2A y discontinuo, son similares, siendo el sistema IEEE AC5A con su tensión VT1 la señal más estable de los tres. También pasado el transitorio inicial los valores tienden a 1 pu.

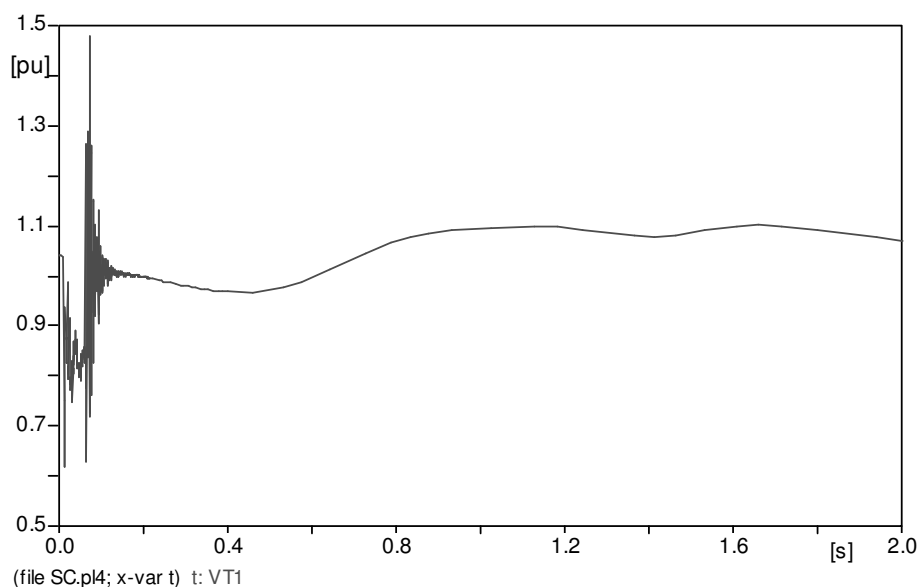


Figura. 4.5. Tensión en bornes del generador sincrónico 1, *ATPDraw*

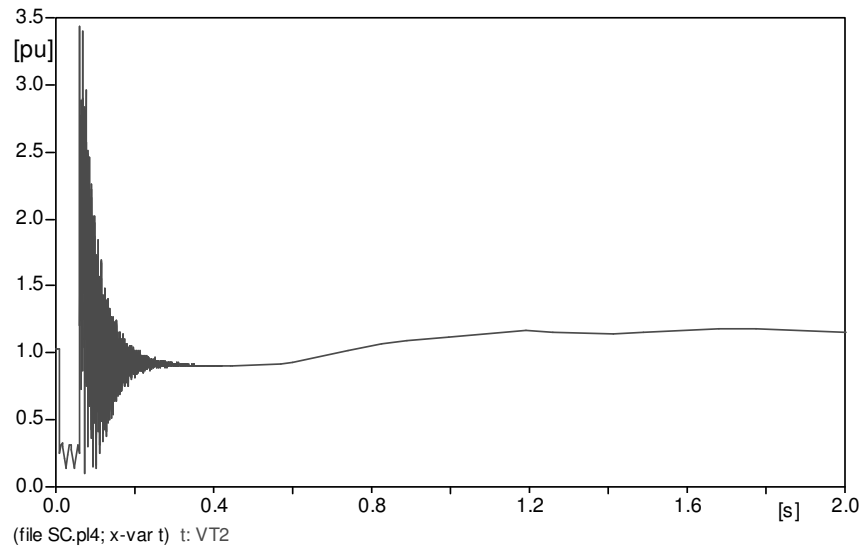


Figura. 4.6. Tensión en bornes del generador sincrónico 2, *ATPDraw*

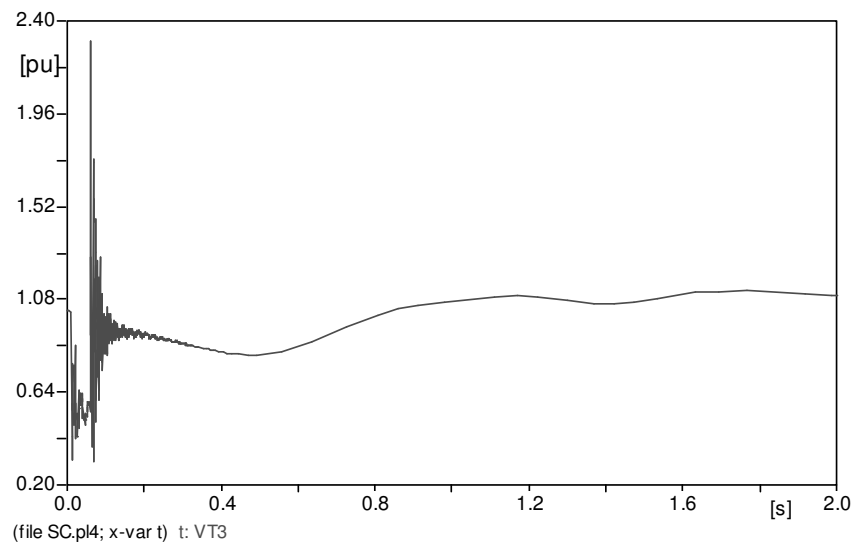


Figura. 4.7. Tensión en bornes del generador sincrónico 3, *ATPDraw*

En las figuras 4.8, 4.9, 4.10, se muestran las potencias eléctricas suministradas por los tres generadores, se consideran los mismos sistemas de excitación para cada máquina. Se observa que el generador 1, tiene mayores perturbaciones en la potencia que suministra. Por otro lado el generador 3 ya que es el que se encuentra más alejado de la perturbación, es el menos afectado ante la falta de la línea 5-7.

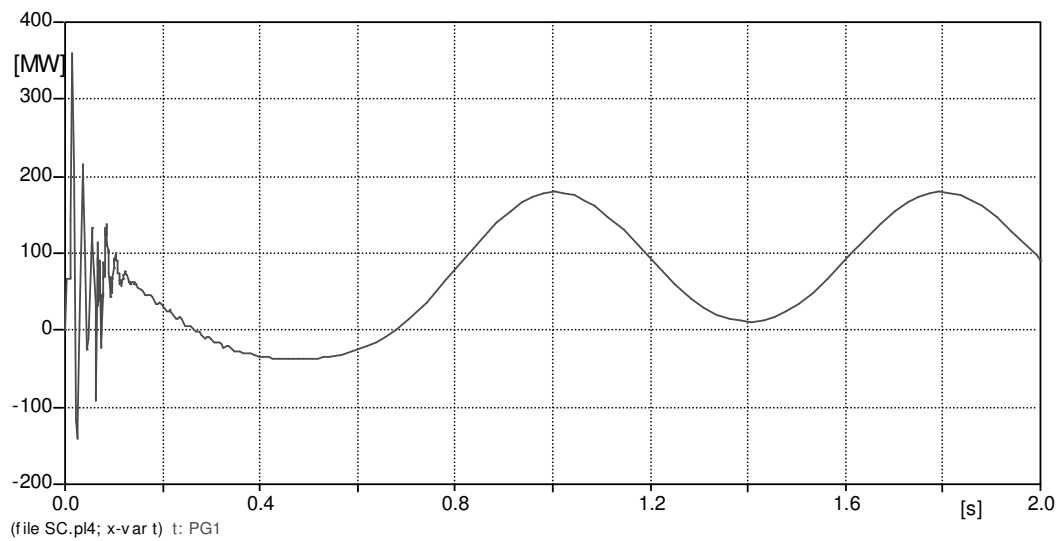


Figura. 4.8. Potencia del generador 1, *ATPDraw*

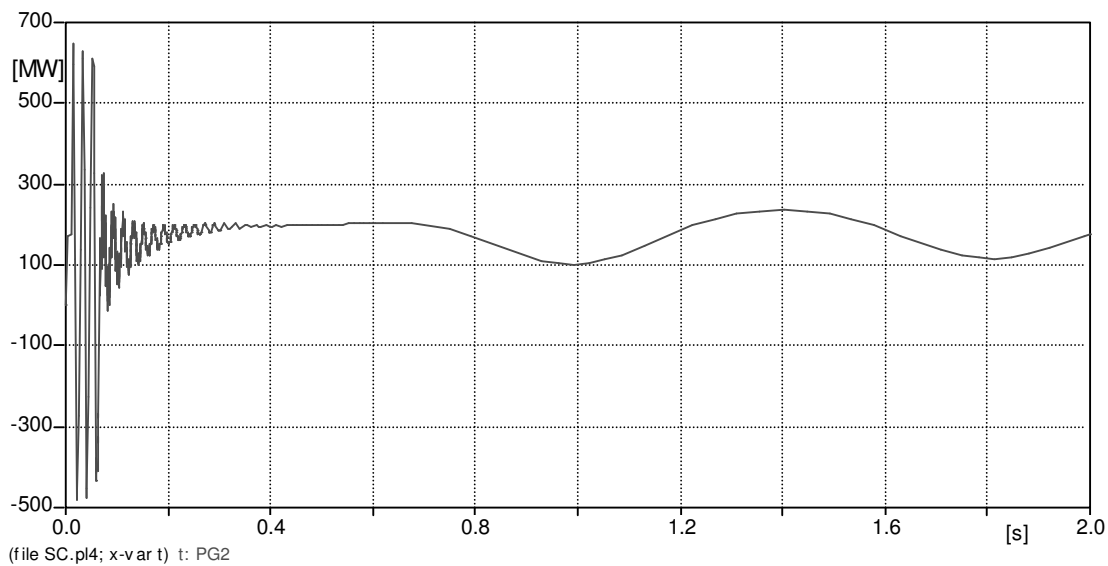


Figura. 4.9. Potencia del generador 2, *ATPDraw*

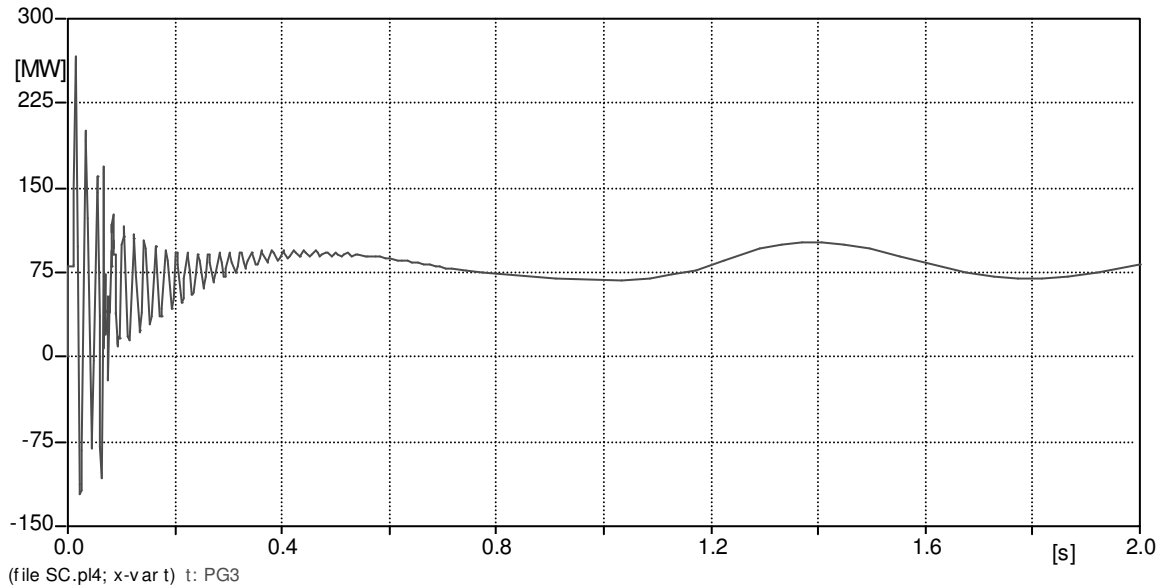


Figura. 4.10. Potencia del generador 3, *ATPDraw*

Las figuras 4.11 y 4.12, muestran los ángulos de los rotores de los generadores 2 y 3 referidas al ángulo del rotor del generador 1. Para la obtención de estos ángulos es necesario el manejo de los TACS, véase el capítulo 2, junto con la sentencia Fortran para cada uno de los tres generadores, como observación de los resultados se aprecia que el generador 2 con respecto al 1 no pierde el sincronismo, esto ocurre de igual forma para el generador 3 con respecto al 1.

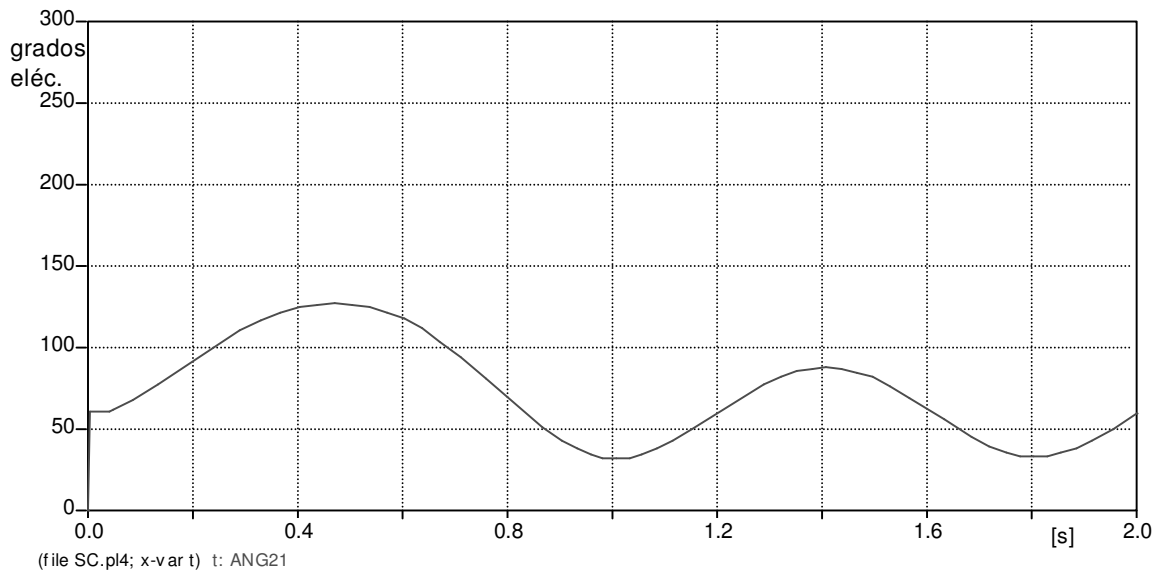


Figura. 4.11. Ángulo relativo del generador 2 con respecto al generador 1, *ATPDraw*

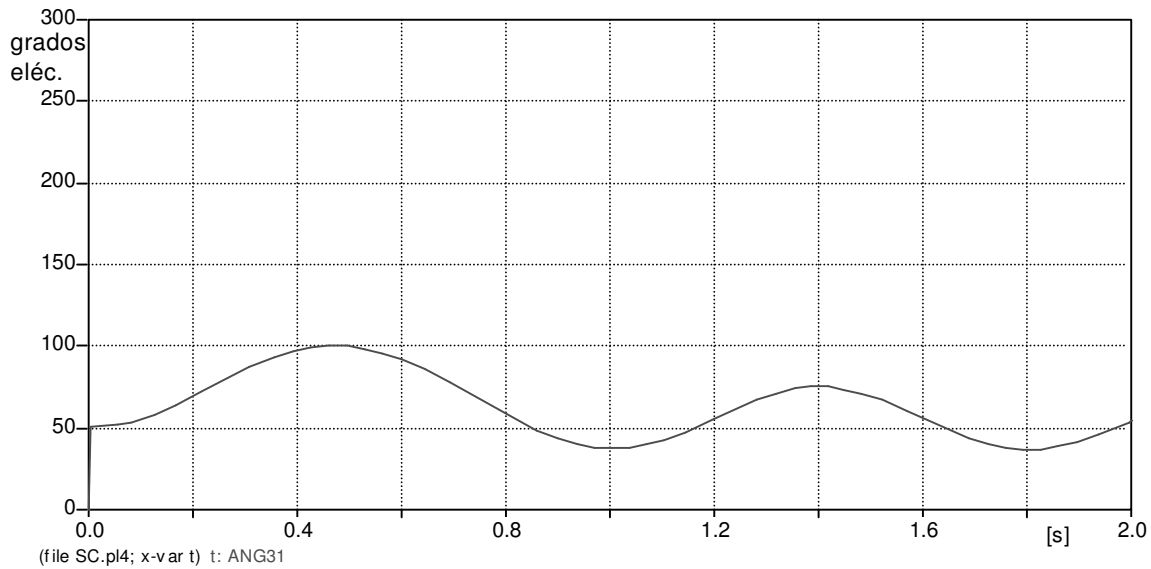


Figura. 4.12. Ángulo relativo del generador 3 con respecto al generador 1, *ATPDraw*

La figura 4.13, muestra las velocidades (DW1, DW2, DW3) de los 3 generadores, en ella se observa que la velocidad menos perturbada es la del generador 1, ya que el valor de su inercia es mayor que el de las otras dos masas rotantes.

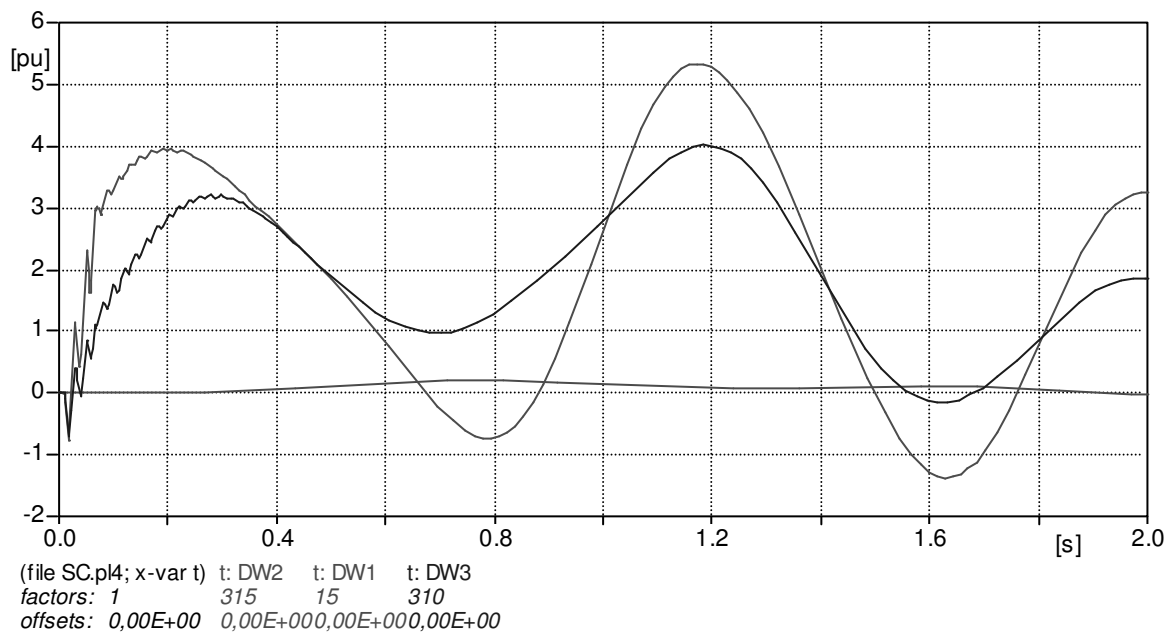


Figura. 4.13. Desviaciones de las velocidades de los 3 generadores respecto a la referencia sincrónica, *ATPDraw*

Las figuras 4.14 y 4.15, muestran las señales de control de la Fem y el PSS respectivamente, estas señales son pasadas desde el TACS.

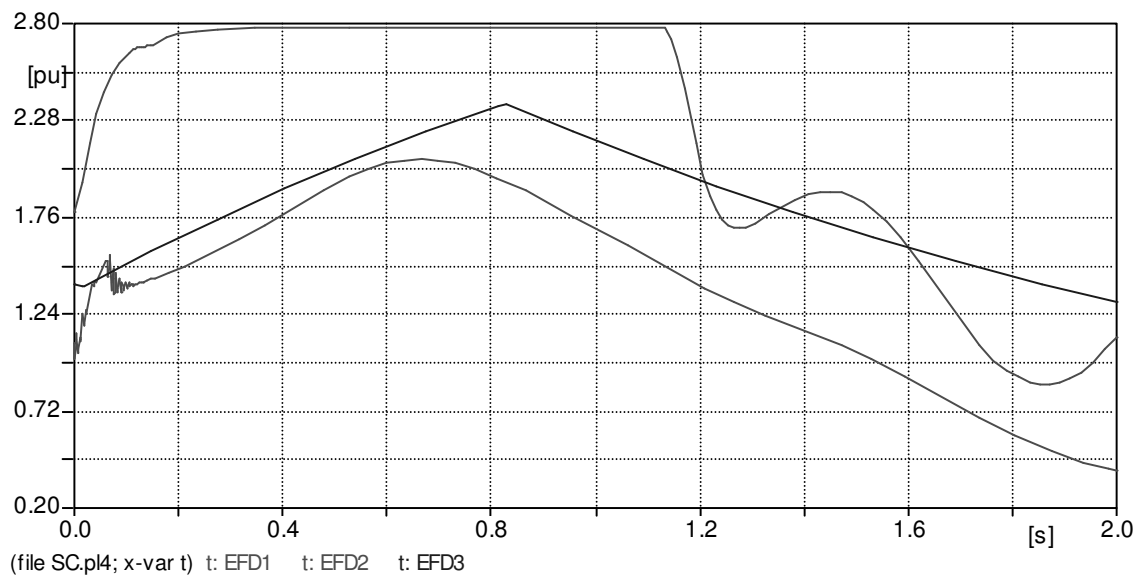


Figura. 4.14. Fem de control de cada generador, *ATPDraw*

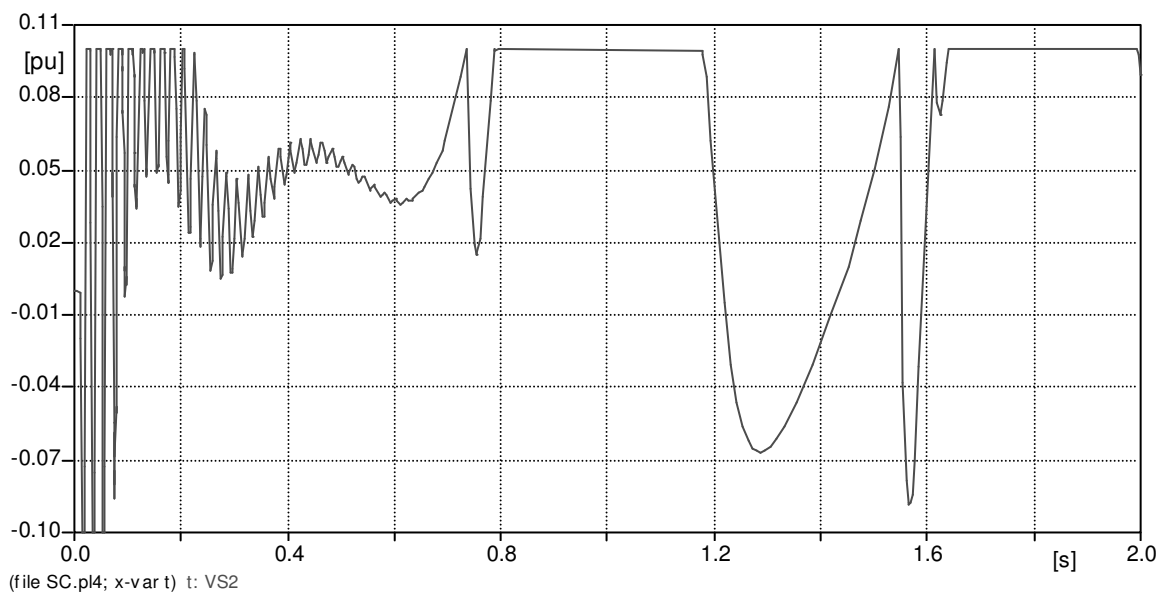


Figura. 4.15. Señal estabilizante suplementaria (PSS), en el sistema de control del generador 2, *ATPDraw*

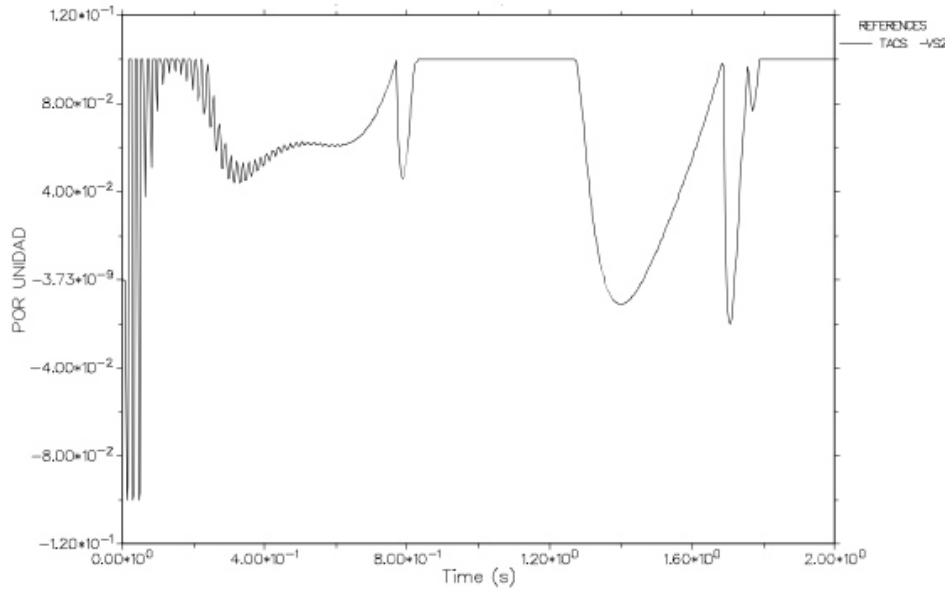


Figura. 4.16. Señal (PSS), en el sistema de control del generador 2.

Fuente: (Turbay J, 1994)

Las siguientes simulaciones corresponden a las tensiones y corrientes del cortocircuito trifásico en la línea 7. La figura 4.17 muestra el voltaje en el segmento barra 7-LADO 7 al momento ($t=0,01s$) de ocurrir la perturbación, en ella se observa la caída de la tensión a 0 V en sus tres fases.

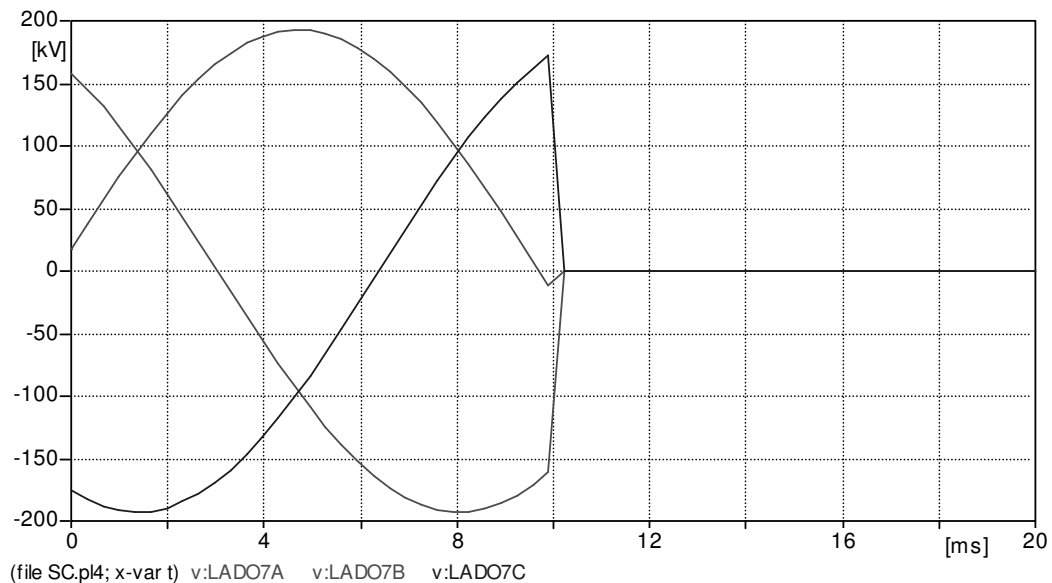


Figura. 4.17. Tensiones en barra 7-lado 7 al momento del cortocircuito trifásico a tierra, ATPDraw

La figura 4.18, muestra en este caso las corrientes al instante en que ocurre la falla a tierra en barra 7-LADO 7, se observa el aumento brusco de la corriente en cada una de las tres fases.

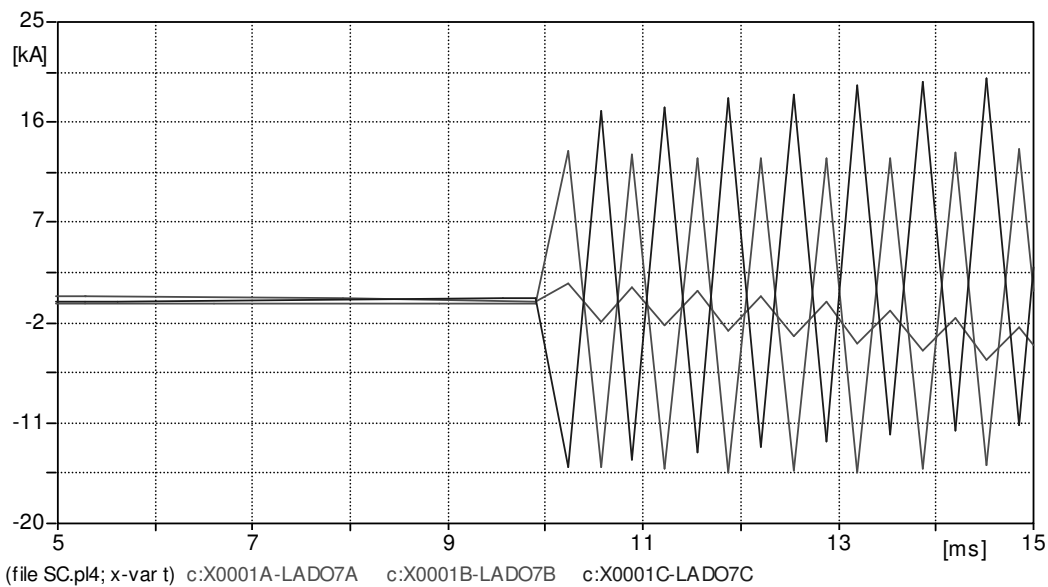


Figura. 4.18. Corrientes en barra 7-LADO 7 al momento del cortocircuito trifásico a tierra, *ATPDraw*

La figura 4.19, muestra ahora la corriente ante la falla, pero del segmento barra 5-LADO 7, se observa al igual que la otra figura el aumento repentino de la corriente en sus tres fases.

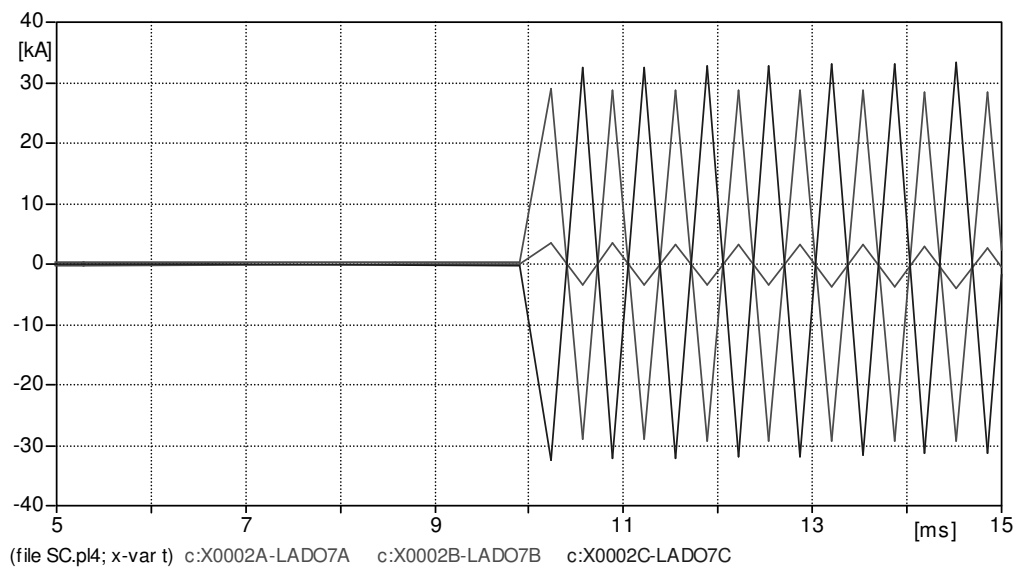


Figura. 4.19. Corrientes en barra 5-LADO 7 al momento del cortocircuito trifásico a tierra, *ATPDraw*

4.2 Comportamiento ante la desconexión repentina de la línea del sistema de potencia de 230 kV compuesto por 1 generador sincrónico con 1 sistemas de control de excitatriz de la IEEE y 1 un control velocidad asociado a una turbina a gas de la WECC:

La red eléctrica consta de un transformador elevador de tensión, una barra en el secundario del transformador donde se conectará una carga. Se dispone de dos líneas de transmisión modelada mediante circuitos PI y un sistema de potencia simplificado mediante su equivalente de Thevenin, a la red va conectado un turbogenerador a gas derivativo de la General Electric junto con un generador de 51,6 MW, al generador se conectará un control de excitación tipo AC5A, la implementación del sistema eléctrico se puede ver en el anexo A, juntos con sus datos, mientras que el sistema de control de excitación y velocidad (gobernador) en el anexo B y anexo C respectivamente.

La figura 4.20, muestra el montaje completo implementado en el ATPDraw, con su control de velocidad y control de excitatriz.

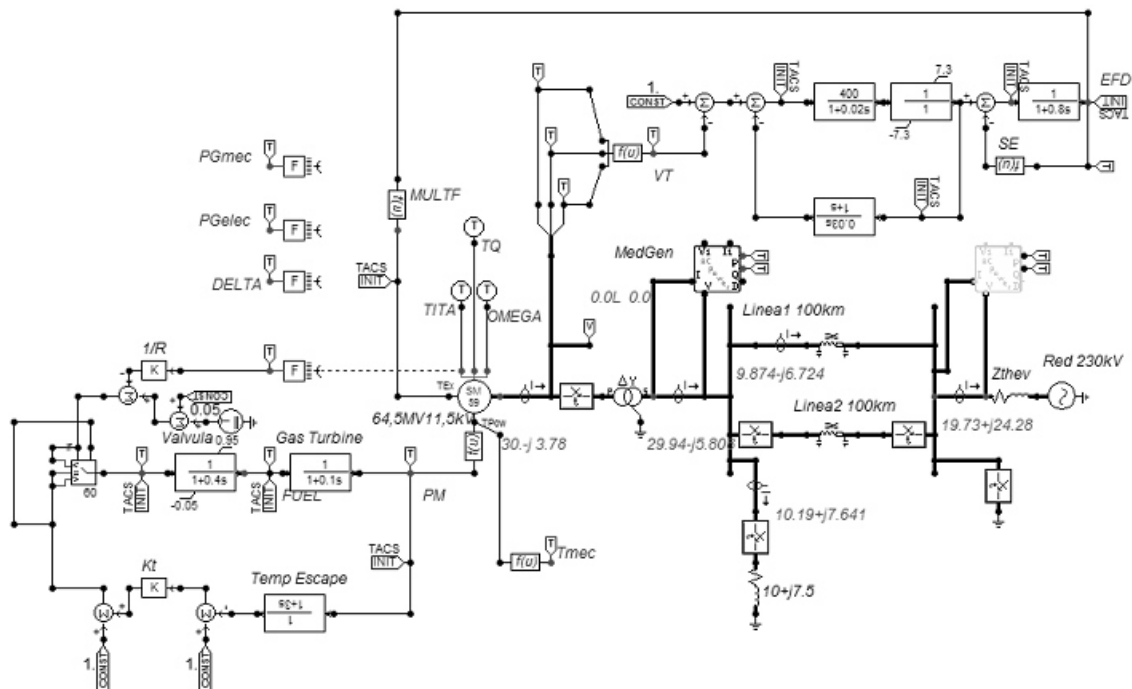


Figura. 4.20. Implementación completa del sistema de 230 kV en el ATPDraw, ATPDraw

4.2.1 Análisis de las simulaciones realizadas en el sistema de 230 kV:

Se planteará la desconexión repentina de la línea de alta tensión, Se simulará la desconexión de una de las dos líneas en paralelo de 100km de longitud. La desconexión de la segunda línea de transporte se producirá, luego de que se presente un corto circuito trifásico en las proximidades de su extremo final. La simulación parte de un estado estable y a 0,1segundos se produce el corto circuito en el extremo de la línea de alta tensión, y luego de 400ms los interruptores en ambos extremos de la línea se abren al mismo instante (Oscar Gutiérrez, 2009). La figura 4.21 muestra la tensión en valores instantáneos para la fase B (que fue la que mayor sobretensión presentó) en bornes del generador sincrónico, en dicha figura se puede observar que la tensión llega hasta un valor de 45,136kV.

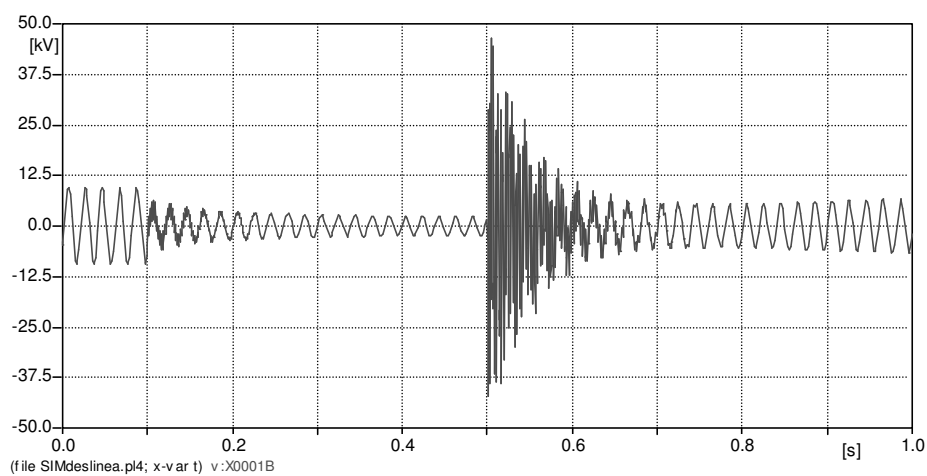


Figura. 4.21. Valor pico de la sobretensión en la fase B del generador sincrónico (45,136 kV), ATPDraw

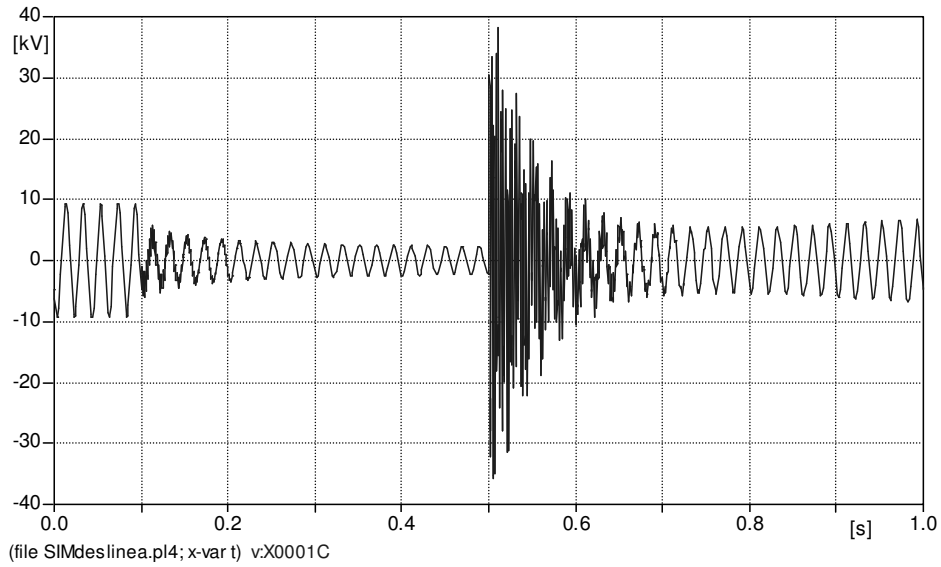


Figura. 4.22. Valor pico de la sobretensión en la fase C del generador sincrónico, *ATPDraw*

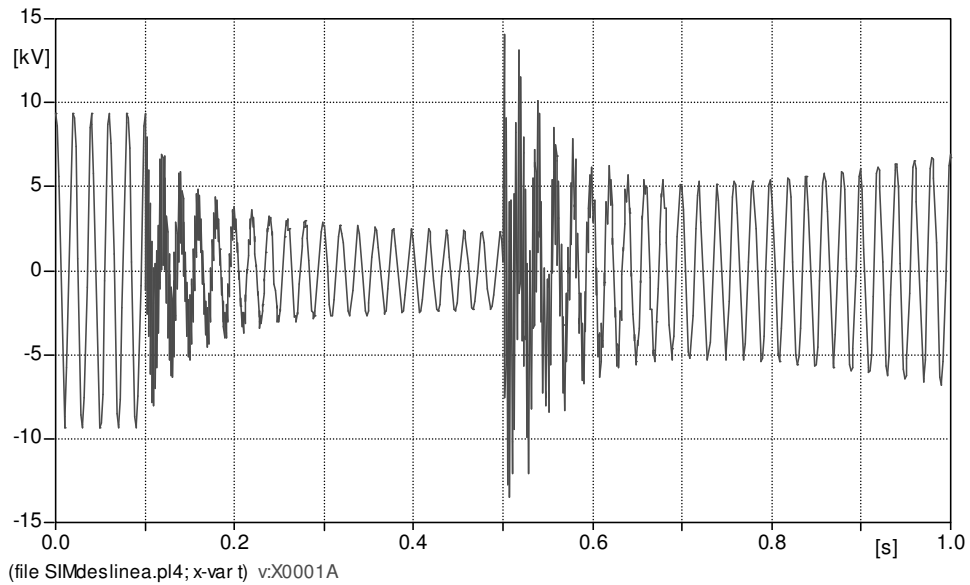


Figura. 4.23. Valor pico de la sobretensión en la fase A del generador sincrónico, *ATPDraw*

La figura 4.24 también muestra el valor de la tensión en bornes del generador, solo que en este caso la tensión es medida en valor RMS en por unidad (respecto a los 11,5kV). Se puede apreciar que la tensión presenta oscilaciones de alta frecuencia, producto de las capacidades e inductancias distribuidas a lo largo de la línea, y consideradas en su circuito

PI. La figura 4.25 muestra los cambios que se producen en la potencia activa, y en la potencia reactiva, en la línea que se mantiene en operación (en la cual no se presentó la falla trifásica).

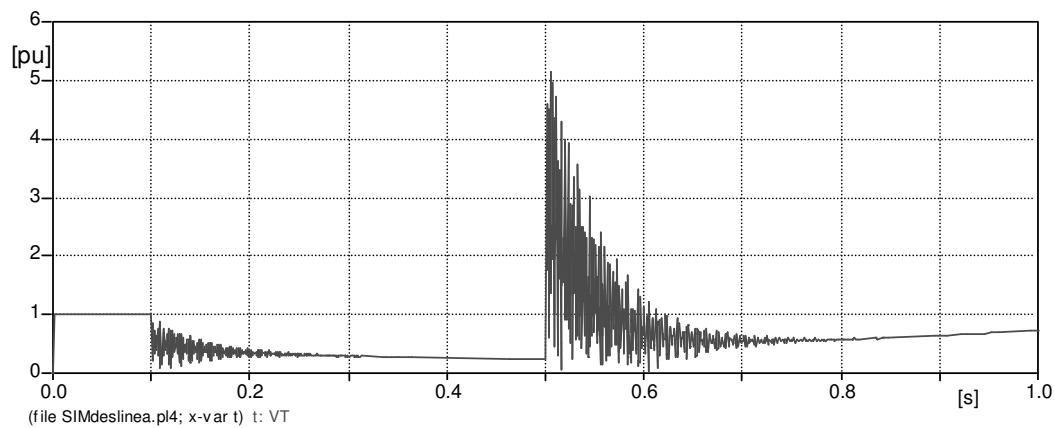


Figura. 4.24. Tensión de línea en bornes del generador sincrónico, valor RMS, *ATPDraw*

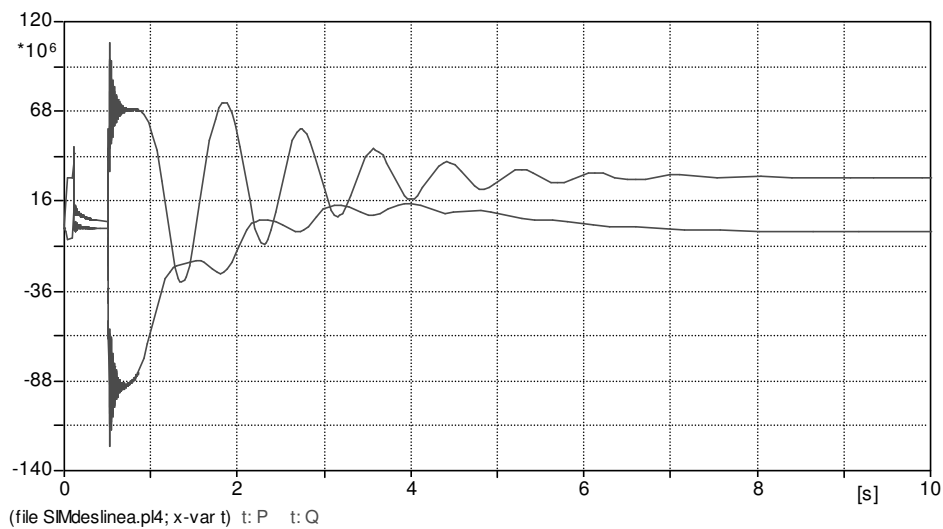


Figura. 4.25. Potencia activa y reactiva, *ATPDraw*

La figura 4.26 muestra el comportamiento de la frecuencia del generador durante el transitorio en valores por unidad.

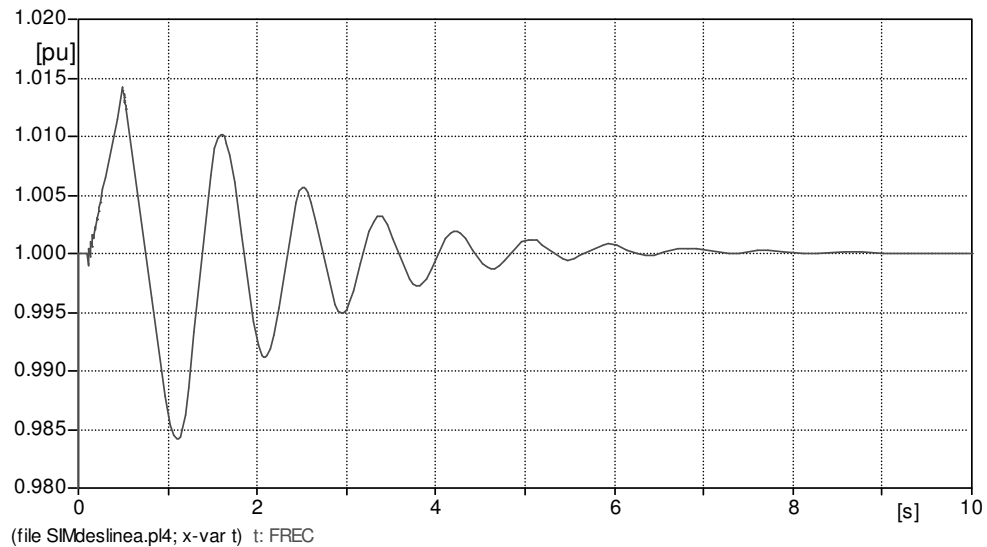


Figura. 4.26. Perturbación en la frecuencia del generador sincrónico, *ATPDraw*

Las siguientes simulaciones corresponden a las tensiones y corrientes del cortocircuito trifásico al final de la línea de alta tensión. La figura 4.27 muestra el voltaje al momento ($t=0,1s$) de ocurrir la perturbación y la finalización de la misma en ($t=0,5s$), en ella se observa la caída de la tensión a 0 V en sus tres fases, al igual que la figura 4.28, donde se muestra la gráfica de la corriente al inicio de la perturbación y la figura 4.29 donde se observa el final de la perturbación.

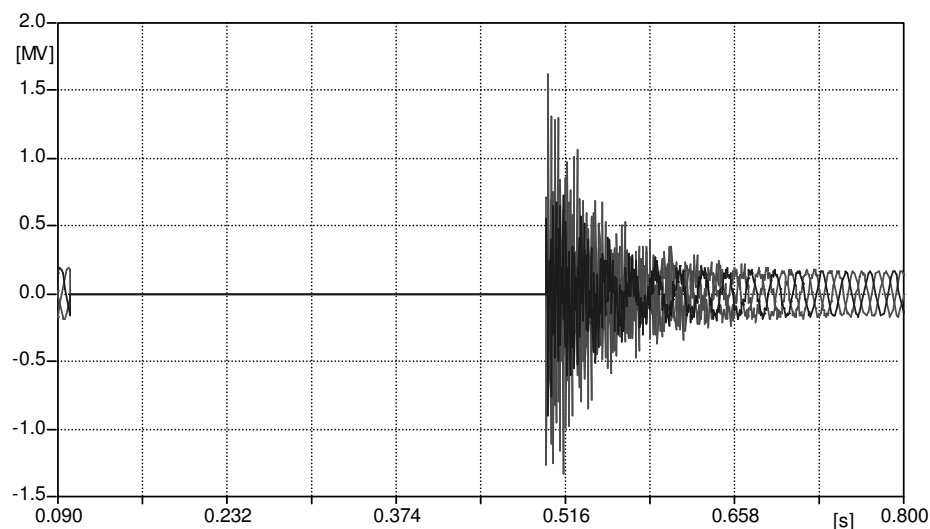


Figura. 4.27. Tensiones al final de la línea ante un cortocircuito trifásico a tierra, *ATPDraw*

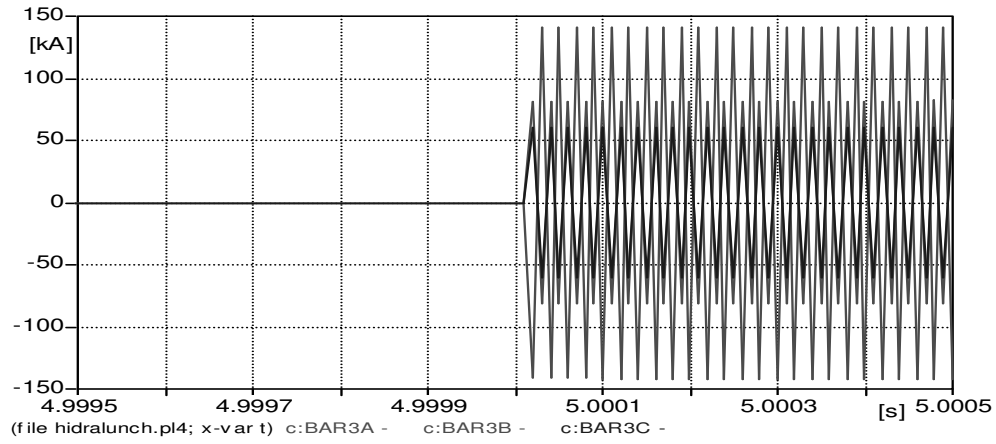


Figura. 4.28. Corrientes al final de la línea al iniciar el cortocircuito trifásico a tierra, *ATPDraw*

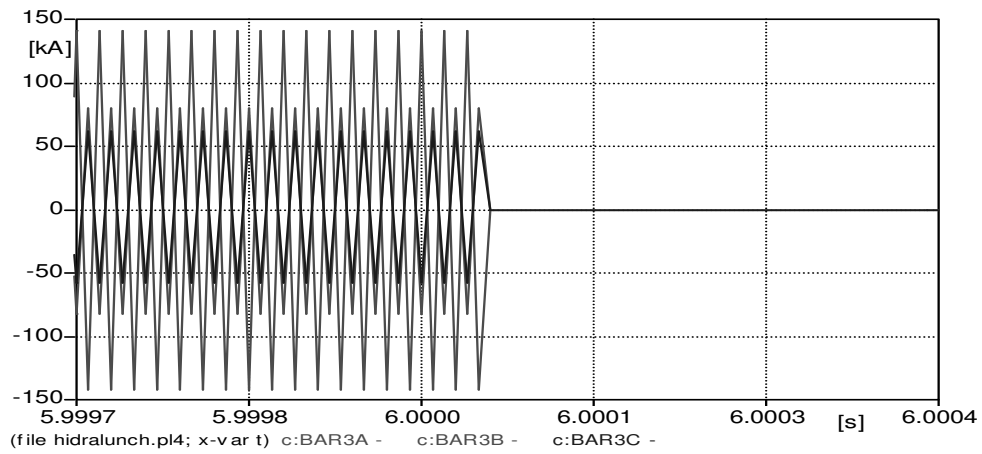


Figura. 4.29. Corrientes al final de la línea al finalizarel cortocircuito trifásico a tierra, *ATPDraw*

4.3 Comportamiento del sistema de potencia de 5 barras con 2 generadores sincrónicos, 2 sistemas de control de excitatriz DC1A y 2 sistemas de control de velocidad asociados a una turbina hidráulica y una turbina de vapor, ante el despeje de la línea de alta tensión LD2:

La red tomada de (LIPA-Long, Island Power Authority, 2007) y (Fabrício Moura, 2011) está compuesta por dos generadores sincrónicos, una fuente de tensión ideal, 3 transformadores de potencia, 2 bancos trifásicos de capacitores y 2 cargas trifásicas, conectados a la barra 2 y 3, además de las 2 líneas de transmisión están 2 cargas independientes, una carga estática representada por un circuito RL y una carga dinámica representada por un motor trifásico. Como simulación de los sistemas de control de excitación se implementarán dos sistemas tipo DC1A y una turbina hidráulica y a vapor para el control de velocidad, cada uno de ellos van conectados a los dos generadores, véase el capítulo 2 y la construcción en el anexo B y anexo C.

La figura 4.30 muestra el diagrama unifilar y la figura 4.31 el montaje completo del sistema antes mencionado en el ATPDraw, la construcción del sistema de potencia está detallada en el anexo A.

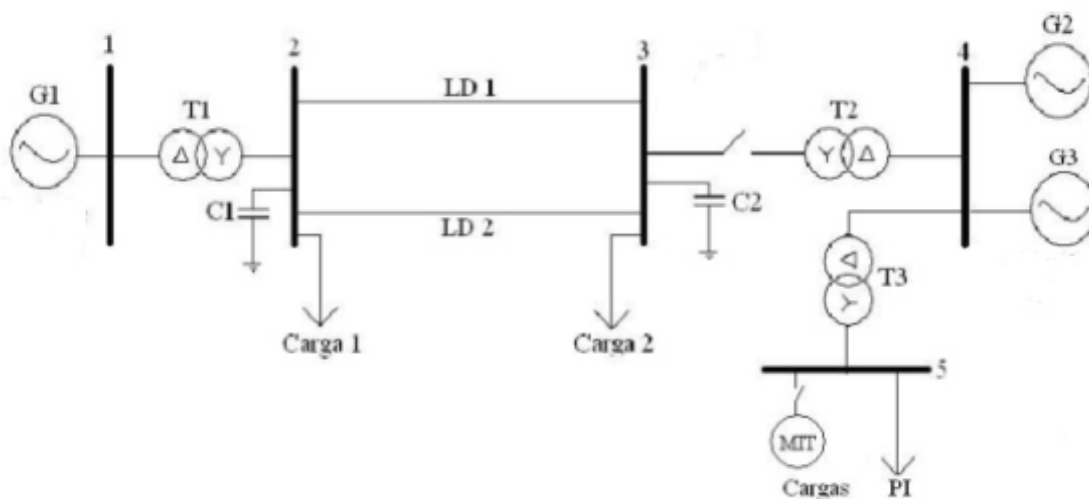
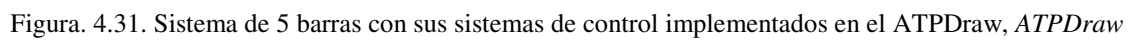


Figura. 4.30. Diagrama unifilar del sistema de 5 barras.(Fabrício Moura, 2011)



4.3.1 Análisis de las simulaciones realizadas en el sistema de 5 barras:

Se plantea realizar el despeje de la línea LD2 del sistema eléctrico, y verificar las implicaciones en el mismo bajo ciertas condiciones:

Se evaluará el comportamiento de la barra 3 del sistema ante dos condiciones: cuando el mismo está sin generación independiente (sólo conectada la fuente infinita), ver figura 4.32, y cuando el sistema si tiene presencia de generación independiente, ver figura 4.33.

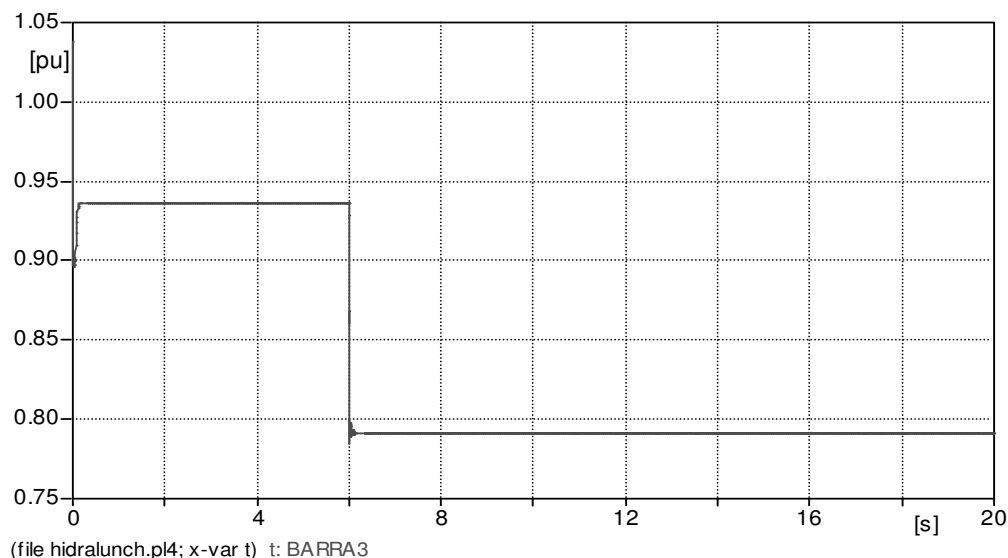


Figura. 4.32. Comportamiento de la barra 3 ante la desconexión de la línea LD 2 sin generación independiente, *ATPDraw*

Con el despeje de la línea LD 2, la impedancia eléctrica equivalente, vista por la fuente ideal y por los generadores de generación independiente, aumenta de forma significativa. Esto acarrea en el aumento de pérdidas eléctricas en el sistema, originando una acentuada reducción de la magnitud de la tensión en un instante inmediatamente después de aplicada la contingencia

Entre tanto, la perturbación aquí aplicada de origen a una disminución de la tensión a valores cercanos a 0,80 pu en la barra 3, esto conlleva a una serie de perturbaciones para el sistema (Fabrício Moura, 2011), ver figura 4.32. Sin embargo, la reducción de la magnitud

de la tensión evidenciada a través de la figura 4.33, se presenta menos pronunciada, de tal forma que se asegura una tensión después de la contingencia de características adecuadas.

Después de aplicada la perturbación aquí estudiada, la tensión en la barra 3 se eleva de forma transitoria y se estabiliza en torno a 1.01 pu, ver figura 4.33.

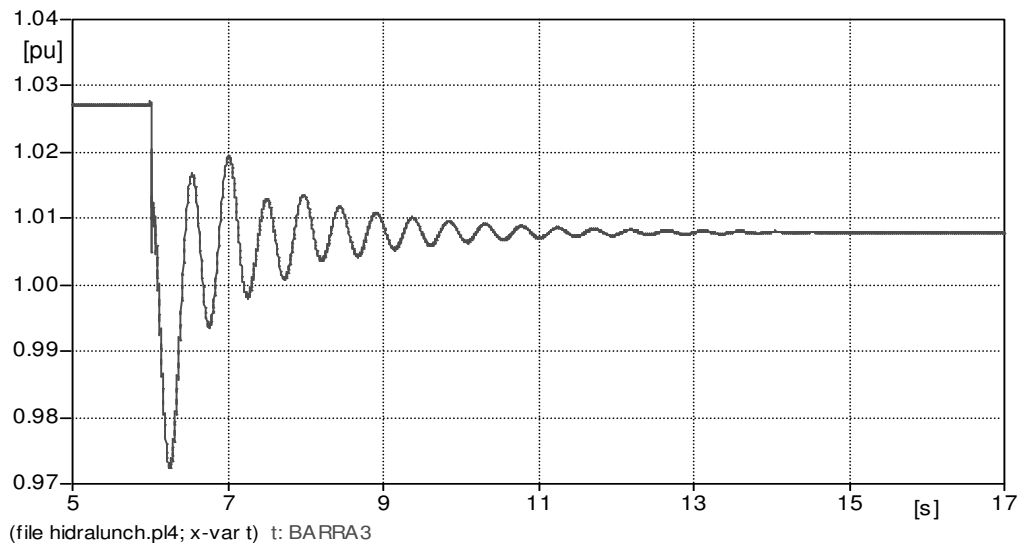


Figura. 4.33. Comportamiento de la barra 3 ante la desconexión de la línea LD 2 con generación independiente, *ATPDraw*

Ese incremento se debe a la potencia reactiva derivada de la generación independiente de la energía eléctrica, pues como se observa en las barras 3 y 4 están interconectadas. Por lo tanto, la reducción de la magnitud de la tensión en el barra 3, por consiguiente existe una reducción de tensión en la barra de generación. Consecuentemente, los reguladores de tensión de las máquinas de generación independiente de energía actúan de forma que elevan la excitación de las máquinas con el objetivo de restaurar la tensión en la barra 4 a un valor de 1 pu. Sin embargo, con el consiguiente aumento de la impedancia entre la barra infinita y la carga 2 de la red eléctrica, hay un cambio en el sistema de alteración de la potencia reactiva del sistema. La figura 4.34 muestra las variaciones de la magnitud de tensión en la barra de generación y en la figura 4.35 muestra la respuesta de los reguladores de tensión ante la perturbación aplicada.

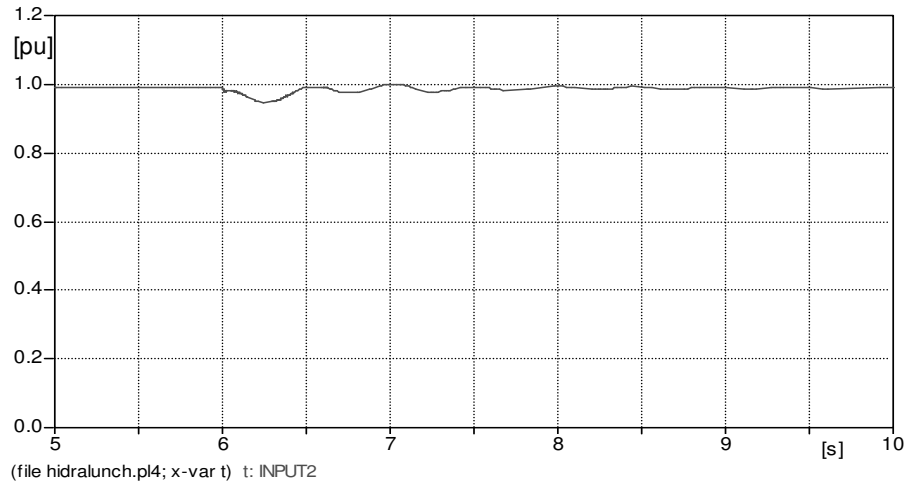


Figura. 4.34 Variación de la tensión en la barra de generación, *ATPDraw*

A través de la figura 4.34 se observa reducción en la magnitud de la tensión, llegando a 0,97 pu. En tanto en la figura 4.35, los reguladores de tensión actúan sobreexcitando las máquinas. Así, los reguladores oscilan de forma transitoria amortiguada acompañando a las oscilaciones en la barra de generación y estabilizando la excitación en torno a 1.10 pu, es decir, las máquinas llegan a un nuevo estado de régimen permanente.

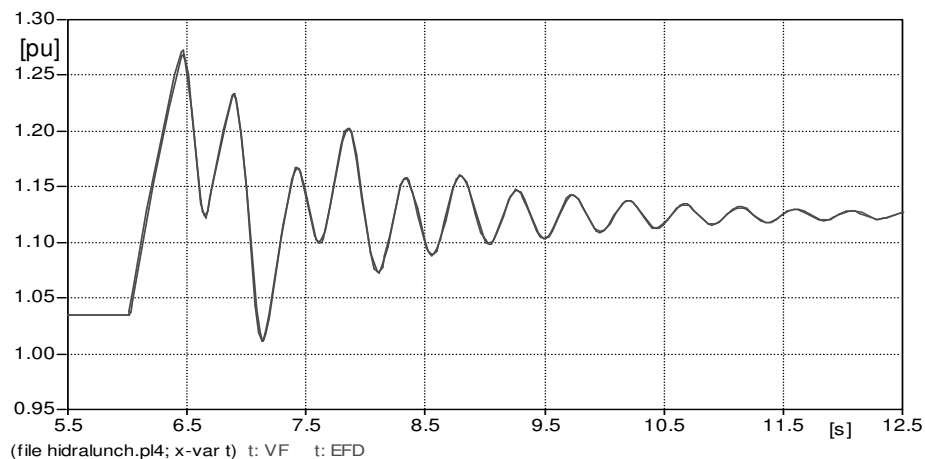


Figura. 4.35 Respuesta de los reguladores de tensión ante la desconexión de la línea LD2, *ATPDraw*

Mediante el despeje de la línea LD 2, hay una elevación de la impedancia equivalente de la red. Tal anomalía es sentida por la generación independiente como un aumento de carga. Por lo tanto, hay un desequilibrio entre el conjunto mecánico y el conjunto eléctrico, siendo este momentáneamente superior al primero. Como consecuencia directa, las máquinas de

generación independiente presentan una primera oscilación con el fin de reducir la velocidad de operación, ver figura 4.36.

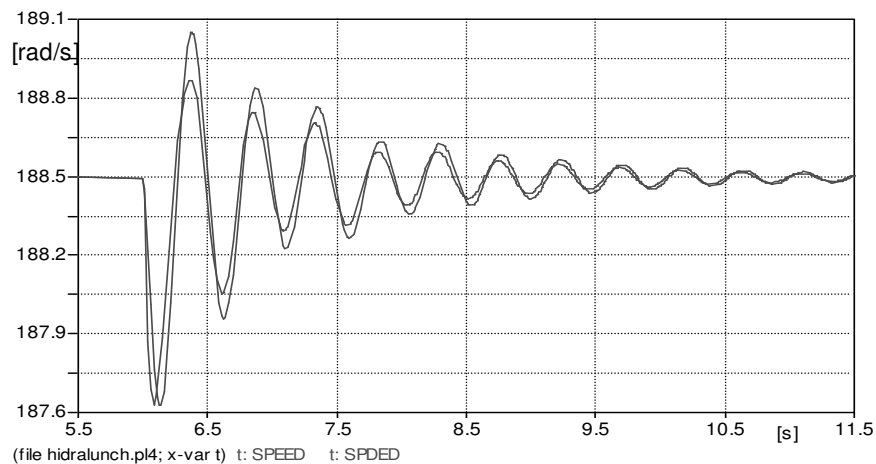


Figura. 4.36 Velocidad de respuesta de las máquinas de generación independiente (generador sincrónico 2 y generador sincrónico 3), *ATPDraw*

De acuerdo con la figura 4.36, en el instante después de la abertura de LD 2, el generador G2 presenta una velocidad mínima $\omega = 187,6[\text{rad/s}]$ y su máxima corresponde a $\omega = 189,1[\text{rad/s}]$. En cuanto al generador G3 la velocidad mínima alcanzada fue $\omega = 187,5[\text{rad/s}]$ y su máxima equivale a $\omega = 189,13[\text{rad/s}]$. Ambas oscilan de forma transitoria amortiguada, sin embargo debe tenerse en cuenta, que G2 presenta un mayor amortiguamiento debido a su menor inercia en comparación con G3.

Ya para finalizar, se muestran un comportamiento opcional a esta investigación, que es la tensión de las tres fases, figura 4.37, y las corrientes de cada fase, figura 4.38, ante el despeje de la línea LD 2.

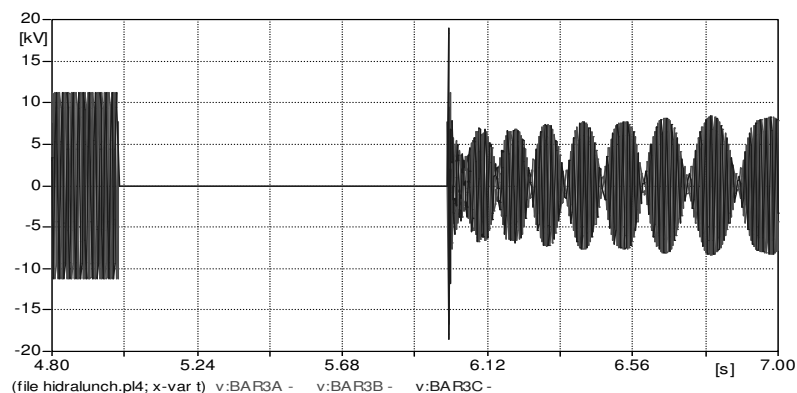


Figura. 4.37. Tensión de cada fase ante el despeje de la línea LD 2, *ATPDraw*

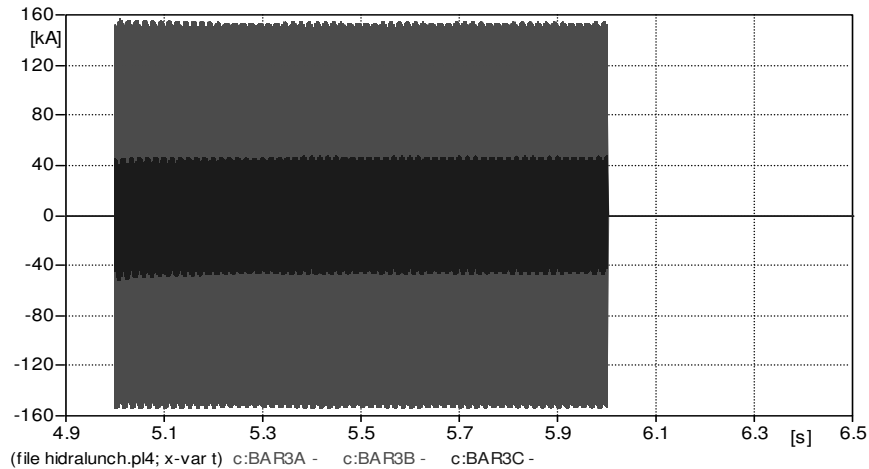


Figura. 4.38. Corriente de cada fase ante el despeje de la línea LD 2, *ATPDraw*

4.4 Exportación de los resultados obtenidos en el sistema de 9 barras con el software ATPDraw al formato común estándar para el intercambio de datos transitorios para los sistemas eléctricos de potencia (COMTRADE).

El software ATPDraw arroja archivos de salida en formatos .PL4 en los cuales están contenidos toda la información necesaria para una conversión a un formato que pueda ser recibido por diferentes registradores de fallas o por otros softwares de análisis de transitorios similares al usado en ésta investigación. Es ahí donde entra el TOP (The Output Processor) como software seleccionado para cumplir ésta tarea. La instalación, configuración y exportación de los archivos de salida del ATPDraw hacía el TOP se encuentra detallado en el anexo D.

Para validar el uso del software TOP se tomarán los resultados obtenidos en las simulaciones llevadas a cabo al sistema de potencia de 9 barras, es importante recordar que el software usado para la conversión nos da la opción de visualizar la data y también de realizar la configuración del archivo .PL4 hacia el archivo COMTRADE, el cual contiene los archivos .CFG (configuration), .HDR (header), .DAT (data) e .INF (information) el cual es un archivo opcional dentro de la norma pero no obligatorio, véase capítulo 2, en este último caso el software no arroja éste archivo.

La figura 4.39 muestra las tensiones en bornes de los 3 generadores, pero ahora visto desde el TOP, en la misma se aprecia en la parte superior el nombre del archivo con el cual fue guardado en el ATPDraw al momento de la implementación (9barrasexcitatriz), a continuación se muestra de donde provienen en este caso las tres variables, la cual son obtenidas a través de la herramienta TACS, después continúa con el nombre de cada una de las tres variables (VT1, VT2, VT3).

La parte inferior de la gráfica muestra el tiempo de ejecución de la simulación en milisegundos. Se puede observar la similitud de las variables entre los dos softwares usados, es importante recordar que el software de conversión de formatos solo le permite al usuario modificar el tiempo de muestreo de cualquier variable, ajustar la forma como arrojar los archivos de salida, que variables desea tomar para la conversión al archivo COMTRADE. El TOP no está en la capacidad de ajustar variables del sistema de potencia, por eso es importante el uso correcto del ATPDraw.

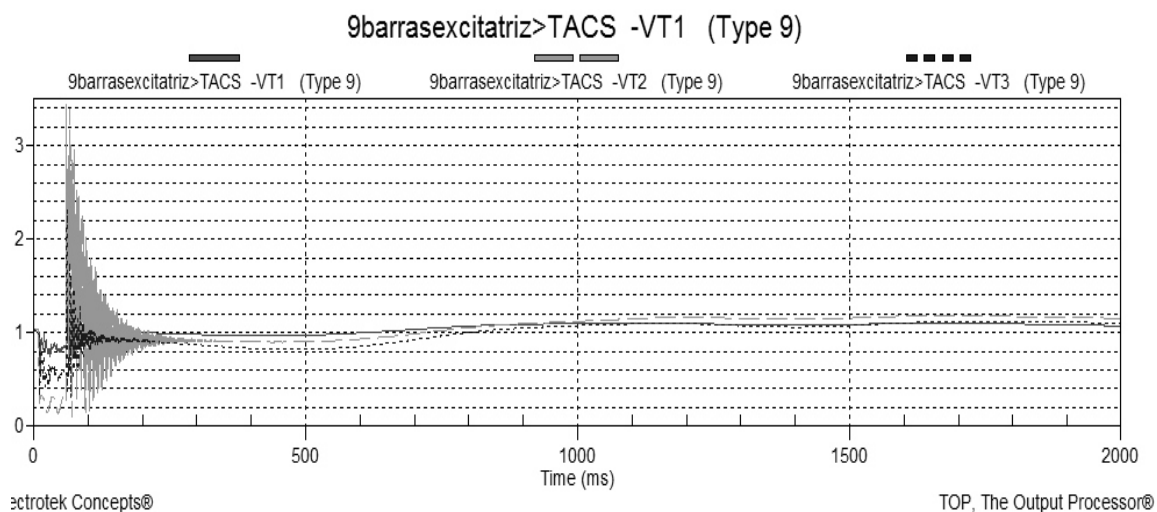


Figura. 4.39. Tensión en bornes de los tres generadores sincrónicos visto desde el TOP, *The Output Processor*

Como siguiente paso se mostrará el contenido solamente de la variable VT1 al exportarse al formato común COMTRADE, al exportar sólo ésta señal que corresponde a la tensión del generador sincrónico 1 no se van a observar todo el contenido completo que contiene cada uno de los tres archivos obligatorios que contiene éste formato, La figura 4.40 muestra el archivo .HDR (encabezamiento).

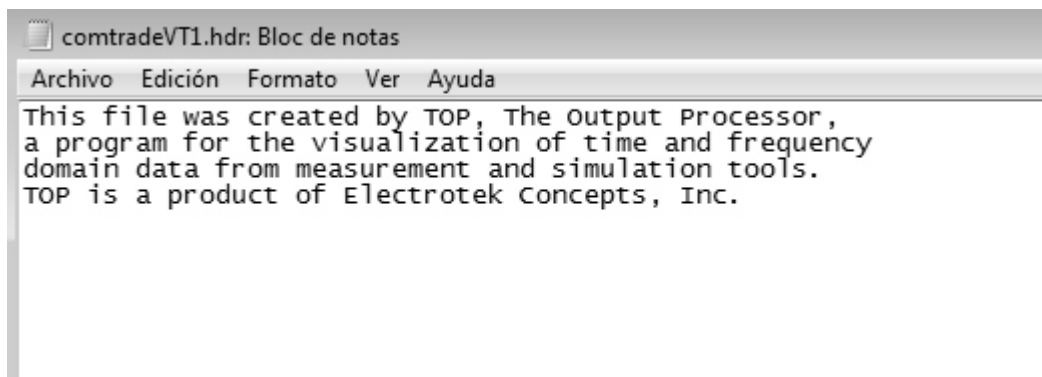


Figura. 4.40. Archivo .HDR de la señal VT1, *The Output Processor*

En la figura anterior se observa el contenido del archivo .HDR, el mismo se accedió con ayuda de un editor de texto para visualizar su contenido, sólo muestra la información de que software realizó la conversión, en este caso el TOP. En el capítulo 2 se detalla el contenido que la norma propone que el archivo .HDR debe tener, pero al tener este archivo a través del software eso es lo que se obtiene como información primaria para identificar al COMTRADE.

La figura 4.41 muestra el archivo .CFG, igual que el anterior se va a acceder al mismo a través de un editor de texto para visualizar su contenido, en la figura se señalan los aspectos más importantes que contiene el archivo, los cuales se va a señalar.

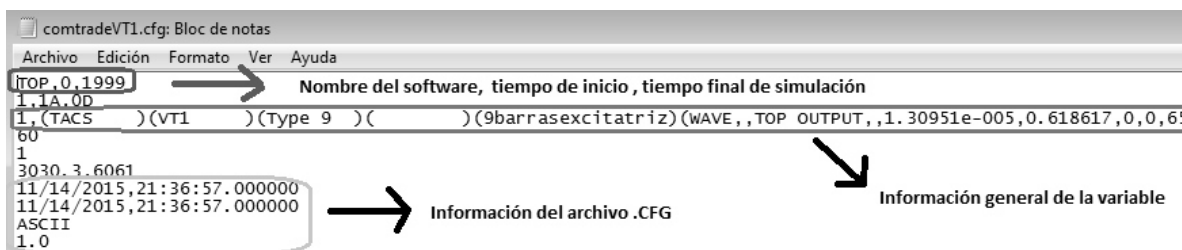


Figura. 4.41. Archivo .CFG de la señal VT1, *The Output Processor*

La figura 4.41 muestra en la parte superior el nombre del software que hizo la exportación y el tiempo de inicio y final del muestreo en el ATPDraw, las siguientes líneas corresponden a información que ya viene contenida en el archivo de salida del .PL4 (exclusivo del ATPDraw) entre ellos se encuentra el tipo de variable (TACS), el nombre de la señal (VT1), el tipo de señal que le da el TOP a una señal de tensión (Type 9) y el nombre del archivo que se le dio al momento de realizar la operación en el ATPDraw, en la parte inferior del archivo se muestra la fecha en que se aplicó la exportación, y el tiempo de ejecución de ese proceso, siempre asignando el tipo de formato de archivo (ASCII) y su versión.

Ya por último la figura 4.42 muestra el archivo .DAT (datos) y su contenido, en el mismo se encuentran tres valores separados por comas, el primer valor representa el número de la muestra (en este caso la primera), le sigue el valor cero que es el tiempo en milisegundos y por último el valor de la muestra en ese instante.



Figura. 4.42. Archivo .DAT de la señal VT1, *The Output Processor*

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Se seleccionaron los modelos sistemas de potencia y esquemas de control de excitación, tomando como referencia el sistema de nueve barras de la IEEE. Se utilizó este sistema por ser ampliamente conocido, sirviendo de esta manera como base principal para la implementación en el software utilizado donde se validaron los resultados obtenidos con estudios anteriores asegurando el correcto funcionamiento de la herramienta computacional, y a su vez mostrando el comportamiento de los elementos que componen el sistema estudiado.

Se seleccionó como herramienta o software a utilizar el ATPDraw. Dicho procesador tiene la capacidad de implementar cualquier sistema, adicionalmente cuenta con amplios modelos de líneas de transmisión y distribución, ideales para la modelación de los sistemas seleccionados. El lenguaje de programación es el Fortran, lenguaje base del EMTP utilizado durante todo el proceso del cálculo computacional.

Se describió la funcionalidad de la herramienta utilizada en la implementación del sistema de nueve barras, el cual demostró ser un sistema completo y complejo para su estudio y posterior generación de fallas. En la fase de generación se cuenta con 3 generadores sincrónicos, la falla se generó inicialmente en la barra siete. Haciendo uso de las simulaciones y los datos suministrados por la fuente se logró conseguir un modelo aproximado de la situación planteada. Por lo tanto en la utilización de este software el usuario se encuentra obligado a suministrar y reflejar todos los datos de las líneas de transmisión, cargas, transformadores y generadores.

Además se explicó la forma de como la perturbación ocurrida en la barra siete (7) incide de manera casi directa por la cercanía del evento al generador sincrónico dos (2) del sistema de estudio, pero es allí donde los controladores de excitación actúan como contingencia ante

la perturbación ocasionada, reestableciendo el funcionamiento a unas condiciones anteriores a la falla. Es importante señalar que los interruptores encargados de despejar la línea de falla les fueron asignados valores muy pequeños en su apertura y cierre de manera automática gracias al uso del software.

En el sistema de alta tensión de 230 kV se generó una falla al final de una de las líneas con su consiguiente despeje luego del cortocircuito, con ayuda del software se logró ubicar la perturbación en el punto del sistema de potencia donde se estaba presentando, se validó el rol del sistema de control de velocidad en la estabilización del generador sincrónico, donde el mismo mostró una alta frecuencia al inicio de la perturbación y luego se estabiliza con ayuda de sus respectivos controles.

Para el último sistema utilizado se modelaron turbinas hidráulica y a vapor, estas son usadas ampliamente en cualquier sistema eléctrico conocido. En este caso como en el anterior se realizó la desconexión de una de las dos líneas de transmisión en paralelo con un cortocircuito al final del tramo cerca de la barra tres del sistema de potencia, de allí se estudiaron dos cosas en particular, cuando el sistema no contaba con generación independiente y por ultimo cuando si contaba ella, es ahí donde los reguladores de tensión elevan la excitación en las máquinas ayudando a la restauración del sistema en colaboración con el control de velocidad que permite la amortiguación de las máquinas para reducir la velocidad de las mismas.

Una vez obtenidos los resultados después de la generación de las señales de fallas en los tres sistemas de potencia, se tomaron los resultados del sistema 9 barras para exportarlo a un formato común de intercambio de datos transitorios COMTRADE, se comprobó que es posible la visualización de los resultados pero haciendo uso del software TOP de esta manera se evidenció que la exportación entre diferentes softwares que soporten los archivos de la

herramienta utilizada son correctos y al realizar la comparación entre ambos los resultados permanecen igual.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda la simulación de distintos sistemas de potencia, con sistemas de control de excitación y sistemas gobernadores de velocidad para así aumentar la librería de los diferentes modelos existentes ya que el ATPDraw no posee ninguna, es necesario simular la mayor cantidad de modelos con una gran variedad de sistemas de control.

Se recomienda la modelación de las líneas de transmisión a través de los diferentes modelos que posee el ATPDraw, ya que permiten al usuario modelar este mismo elemento con mayor precisión y obtener resultados de acuerdo a las necesidades de otras investigaciones futuras.

Se recomienda el desarrollo de bloques de carga mediante el Models del ATPDraw, que es otra herramienta además del TACS, el cual permitirá simular el modelo de la carga que se desee, no sólo los modelos de impedancias con valores de resistencias, capacitancias y admitancias constantes utilizados en esta investigación. El uso de ésta herramienta puede reproducir adecuadamente los mismos comportamientos de ésta investigación, pero en este caso a través de otros modelos de cargas y no los elementos típicos que posee el ATPDraw.

Se recomienda el estudio de fallas eléctricas ahora ubicados en otras etapas del sistema de potencia, no solamente las realizadas en esta investigación, ya que así se podrán observar por medio del software como estas perturbaciones inciden en los sistemas de generación, y a su vez en los sistemas de control que ayudan al mismo a volver a las condiciones antes de la falla.

Desarrollar métodos de localización de fallas, precisos y robustos que permitan observar el porcentaje de la ubicación de la falla en cualquier segmento de la línea de transmisión, que las perturbaciones producidas consideren las características de los modelos de cargas a lo largo del circuito.

Se recomienda con ayuda del ATPDraw implementar estrategias de protección a través de modelos de relés, ya que los archivos de salida del ATP al ser convertidos al formato COMTRADE pueden ser exportados a dispositivos de protección sofisticados con propósitos de prueba.

Referencias

Anderson Paul M. y Fouad A.A. “Power System Control and Stability”, IEEE Press, New York 1977.

Balestrini, M (2010). Metodología de la investigación. Edt. Trillas. Caracas. Venezuela.

C. Chao-Shun, W. Tsung-Hsien, L. Chung-Chieh y T. Yenn-Minn. “The application of load models of electric appliances to distribution system analysis”. *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol. 10, No. 3. August

Dubé L. *Users Guide to Models in ATP*. April. 1996.

Dután, Luis. “modelación de transformadores para estudios de energización usando ATP-EMTP”. CELEC EP TRANSELECTRIC. Quito, Ecuador, 2010. [Online]. Disponible: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/3734>

Fabrizio, Moura (2011). Generación distribuida-Impactos y contribuciones para la calidad de energía eléctrica y dinámica de los sistemas eléctricos-Un análisis a través del ATP/EMTP

Formato común estándar para el intercambio de datos transitorios para los sistemas eléctricos de potencia (IEEE Std C37. 111-1999)

Gutiérrez, O. 2009-Transitorios electromagnéticos de un turbogenerador a gas de 51,6 MW conectado a una red de alta tensión de 230 kV, análisis mediante simulaciones con software

Hans K. Høidalen, Bruce A. Mork, Francisco Gonzalez-Molina, Dmitry Ishchenko y Nicola Chiesa. “Implementation and verification of the Hybrid transformer model in ATPDraw”. 2009. *7th International Conference on power Systems Transients*.

Høidalen, Hans K. Prikler, “ATPDraw manual”, version 3.5, October 2002.

IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, *IEEE Std 421.5-1992*.

Kundur, P. “Power system stability and control”. Electric Power Research Institute. McGraw-Hill, inc. 1994

LIPA-Long Island Power Authority , Control and Protection Requirements for Independent Power Producers, Transmission Interconnections, encontrado en internet en 22/11/2007, <http://tinyurl.com/33clo4>

P. Mahat, Z. Chen y B. Bak-Jensen, “Gas Turbine Control for Islanding Operation of Distribution Systems”, EWEC’04 European Wind Energy Conference and WECC.

Tsu-huei Liu y W. Scott. “Electro-Magnetic Transient Program (EMTP) Theory Book”. Branch of system engineering. Boneville Power Administration. U.S.A. 1994

Turbay, J. (1994). “Empleo del EMTP para los Estudios de estabilidad transitoria con especial atención al modelado de los sistemas de control de la excitación”. GISEP; Santa Fé, Argentina.

Universidad Pedagógica Experimental Libertador (2014). Manual de trabajos de grado de especialización, maestría y tesis doctorales. 4^a Edición, Editorial FEDUPEL. Caracas-Venezuela.

User Group, “Rule Book Alternative transient program (ATP)”, 2011. [Online]. Disponible en <http://www.emtp.org>

___Watson N. and J. Arrillaga, *Power Systems Electromagnetic Transients Simulation*. IET Power and Energy Series 39. Published by Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom. 2007. ISBN: 0 85296 106 5. Page(s): 68 – 73.

W. H. Kersting. “Distribution system modeling and analysis”, New Mexico State University. Las Cruces, New Mexico. CRC Press, Boca Rton London New York Washigton, D.C. ISBN 0-8493-0812-7

Anexo A

Implementación de los sistemas de potencia en el ATPDraw:

Consideraciones a tomar antes del montaje de cualquier simulación:

Antes de realizar la construcción del sistema se procede a resumir ciertas acciones que se pueden realizar con la ayuda del ratón. El botón izquierdo generalmente se utiliza para la selección de componentes o conexión de nodos, el botón derecho se utiliza para la especificación o el ajuste de propiedades del componente o nodo.

Al hacer un solo click con el botón izquierdo:

En el componente: Se selecciona el componente o la conexión del nodo de un componente hacia otro nodo de un componente diferente.

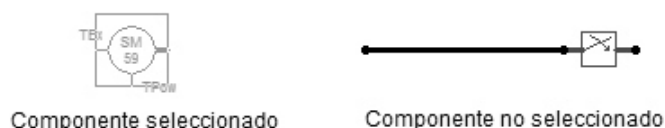


Figura. A1. Componente seleccionado y no seleccionado, *ATPDraw*

En la figura A1 se muestra el aspecto de un componente seleccionado y al presionar con el botón izquierdo uno de los nodos, en este caso el componente no seleccionado en éste aparece la línea de conexión hacia el nodo del otro componente, al momento de conectar ambos nodos o cancelar ésta acción sólo hacer click con el botón izquierdo basta.

Nota: Al hacer click sin soltar el botón izquierdo en una zona libre de la ventana del ATPDraw, se pueden seleccionar muchos componentes, inclusive el montaje completo, ver figura A2.

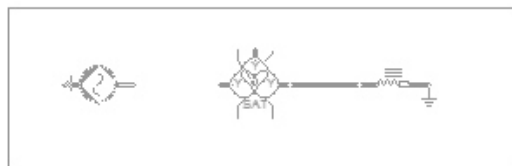


Figura. A2. Conjunto de componentes seleccionados, *ATPDraw*

Al hacer doble click con el botón izquierdo:

En el componente: Se abre una ventana en la cual se introducen los respectivos datos que necesita cada componente para operar.

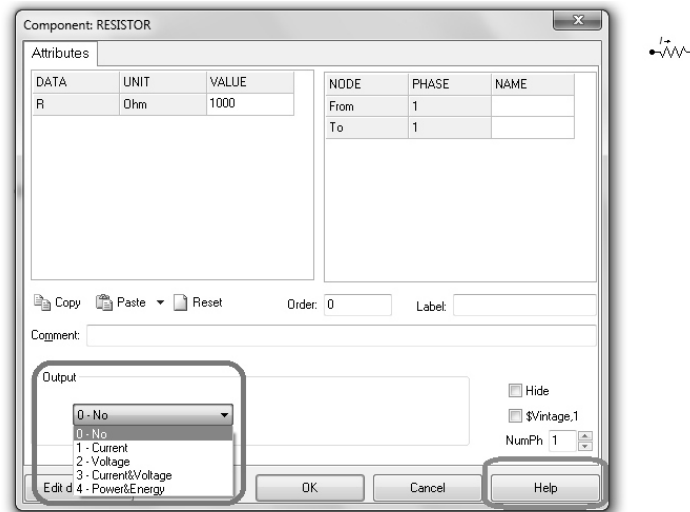


Figura. A3. Ventana de atributos del componente Resistor, *ATPDraw*

En la figura A3 se muestra la ventana de datos del resistor que se encuentra en la dirección **Branch linear | Resistor**, en la misma se observan los atributos los cuales son el valor de la resistencia, así como la cantidad de nodos que posee el componente, en este apartado se pueden editar el nombre de cada nodo haciendo click sobre la pestaña en blanco NAME. En la parte inferior izquierda está remarcada la opción de salida de éste componente, al extender la pestaña se muestran 4 opciones diferentes las cuales están visibles para facilidad del usuario y que permiten dependiendo de cuál opción se seleccione obtener una medición diferente, se quiere decir en éste caso si el usuario selecciona la opción 1 (Current) el ATPDraw va a sensar la corriente que circule por el componente.

En la parte inferior derecha está señalada la pestaña Help que si se presiona se va a mostrar todas las características del componente, esto se cumple para cada componente del software.

Nota: No todos las ventanas de los componentes del ATPDraw muestran las mismas características, cada objeto varía dependiendo de los parámetros que use, pero en general la ventana contiene ciertos parámetros que facilitan el ingreso de datos, así como edición de sus características. Durante la implementación del montaje se va a especificar cada componente a usar en el mismo al igual que sus características.

Al hacer click con el botón derecho:

En cualquier zona libre de la ventana del ATPDraw: Las acciones que se pueden realizar son las siguientes: Abre el menú de selección de componentes, cancela la conexión de un nodo. Si después que se selecciona un componente se hace click con el botón derecho esta acción va a girarlo en sentido antihorario, si se selecciona el componente previamente y se presiona la tecla shift al mismo tiempo se abre la ventana del menú que permite copiar, cortar, eliminar, duplicar, eliminar el componente seleccionado. Es de hacer notar que las

nuevas versiones del ATPDraw han cambiado un poco éstas características de uso del click derecho, pero en esencia se mantienen algunas de las acciones antes mencionada.

En el componente: Al hacer click con el botón derecho sobre el componente se abre la misma ventana de atributos que se muestra al hacer doble click con el botón izquierdo sobre el mismo. Cada componente viene con sus nodos, al posicionarse sobre cualquiera de ellos y hacer click derecho sobre alguno se muestra una ventana que permite transferir información al mismo, como conectar a tierra (Ground) dicho nodo o identificarlo, ver figura A4.

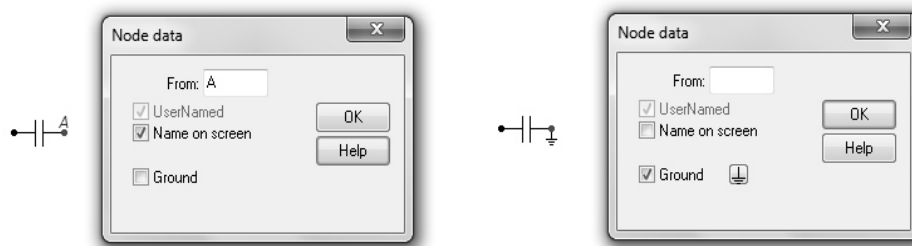


Figura. A4. Ventana de características del nodo, *ATPDraw*

Nota: Las acciones que se realizan con el click derecho en su mayoría son las mismas que se realizan con el click izquierdo pero en éste caso al hacer doble click, para mayor información el ATPDraw tiene su manual de usuario dependiendo de la versión que se disponga.

Implementación del sistema de potencia 9 barras de la IEEE:

Para obtener las diferentes formas de onda se procede a la construcción de una red en anillo, compuesta de 9 barras, tres generadores sincrónicos, tres transformadores elevadores de tensión, líneas representadas con circuitos PI trifásicos, cargas representadas con circuitos RL, e interruptores temporales que representan la falla trifásica a tierra, y el consecuente despeje de la línea 0,05 segundos después de producida la falla.

Los parámetros de las tres máquinas sincrónicas se listan a continuación:

Generador 1, Hidráulico:

Sn= 247,5 MVA	Xd=0,36135pu	Xq=0,23982 pu	Td0'=8,96 seg	Tq0'=0 seg
Un= 16,5 KV	Xd'=0,15048pu	Xq'=0,23982pu	Td0''=0 seg	Tq0''=0 seg
Fn = 50 Hz	Xd''=0 pu	Xq''=0 pu	Xl= 0,08316 pu	Ra=0,004
In(field)=450 A	Npolos=40	X0=0,15	Xcan=Xl (Xcanay's no conocida)	
H= 315,63 [million pound-feet^2] (sistema inglés MECHUN=0)				

Tabla A1 Parámetros del generador 1

Generador 2, de Vapor:

Sn= 192 MVA	Xd=1,7199 pu	Xq=1,6598 pu	Td ₀ '=6 seg	Tq ₀ '=0,535 seg
Un= 18 KV	Xd'=0,230 pu	Xq'=0,3780 pu	Td ₀ ''=0 seg	Tq ₀ ''=0 seg
Fn = 50 Hz	Xd''=0 pu	Xq''=0 pu	Xl= 0,1 pu	Ra=0
In(field)=410 A	Npolos=2	X ₀ =0,1053	X _{can} =Xl (Xcanay's no conocida)	
H= 0,2137 [million pound-feet^2] (sistema inglés MECHUN=0)				

Tabla A2 Parámetros del generador 2

Generador 3, de Vapor:

Sn= 128 MVA	Xd=1,68 pu	Xq=1,6099 pu	Td0'=5,89 seg	Tq0'=0,6 seg
Un= 13,8 KV	Xd'=0,231 pu	Xq'=0,3200 pu	Td0''=0 seg	Tq0''=0 seg
Fn = 50 Hz	Xd''=0 pu	Xq''=0 pu	Xl= 0,17 pu	Ra=0
In(field)=325 A	Npolos=2	X0=0,09999	Xcan=Xl (Xcanay's no conocida)	
H= 0,1005 [million pound-feet^2] (sistema inglés MECHUN=0)				

Tabla A3 Parámetros del generador 3

Nota: todos los generadores están conectados en estrella tierra. Sus reactancias están valoradas en por unidad de 100 MVA y sus respectivas tensiones nominales, (Anderson P y Fouad A, 1977).

Los parámetros de las líneas, representadas con circuitos PI, y de los transformadores se muestran en la tabla siguiente:

Línea (Barra Inicial-Barra Final)	Impedancia Serie	Admitancia Transversal
4-5	(0,010 + j0,085) pu	j0,176 pu
5-7	(0,032 + j0,161) pu	j0,306 pu
7-8	(0,0085 + j0,072) pu	j,0149 pu
8-9	(0,0119 + j0,1008) pu	j0,209 pu
9-6	(0,039 + j0,170) pu	j0,358 pu
6-4	(0,017 + j0,092) pu	j0,158 pu
Transformadores (Barra Inicial-Barra Final)	Impedancia Serie	Conexión
1-4	j0,0576	16,5kV D / 230 kV YN
2-7	j0,0625	18,0kV D / 230 kV YN
3-9	j0,0586	13,8kV D / 230 kV YN

Tabla A4 Parámetros de las líneas de transmisión y de los transformadores. (Anderson P y Fouad A, 1977).

Nota: Todos estos parámetros están valorados en por unidad de 100 MVA y de sus respectivas tensiones nominales. (Turbay J, 1994) propone el tipo de conexión de los devanados de los transformadores.

Al realizar la apertura del ATPDraw, se abre una ventana la cual en la parte superior izquierda de la barra de herramientas, posee un ícono con la imagen de una hoja en blanco que simboliza la creación de un nuevo proyecto donde se construirá el circuito. Se realiza un click con el botón derecho del mouse para visualizar el menú de componentes que posee el ATPDraw como lo muestra la figura A5.

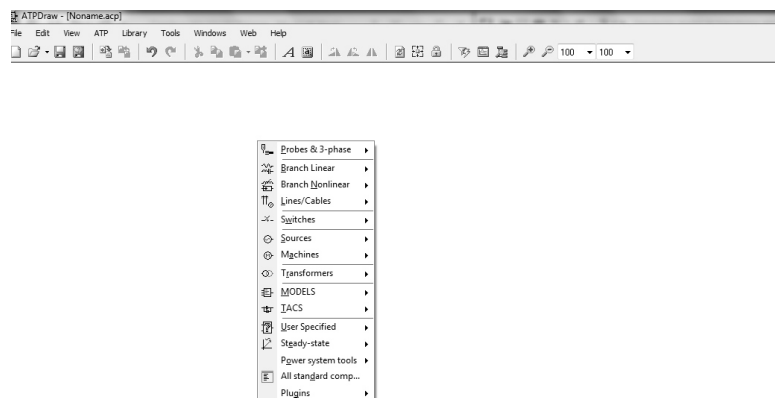


Figura. A5. Hoja en blanco de un nuevo proyecto con la barra de selección de componentes, *ATPDraw*

Fuentes de generación:

Para comenzar con la construcción del circuito se va a configurar los tres generadores del sistema a modelar, consta de tres generadores cada uno con su data específica que se debe ingresar en la ventana de atributos. El componente que permite una buena modelación de cada generador es el **SM59**, para acceder a este componente se hace click derecho para luego ir a la dirección **Machines | SM 59 | 8 control** la elección de seleccionar una máquina con control permite la comunicación con los TACS los cuales llevan la información de otros elementos que se conectarán a la máquina como son las diferentes excitatrices y los gobernadores de velocidad junto con las turbinas, ver capítulo 2.

La figura A6 muestra la ventana de atributos con los datos ingresados de la tabla correspondiente al generador 1

Component: Sm59_fc.sup

DATA	VALUE
Volt	14011.1
Freq	60
Angle	0
Poles	40
SMOVTP	1
SMOVTO	1
RMVA	247.5
RKV	16.5

DATA	VALUE
AGLINE	450
RA	0.004
XL	0.08316
Xd	0.36135
Xq	0.2398275
Xd'	0.15048
Xq'	0.2398275
Xd''	0

DATA	VALUE
Xq''	0
Tdo'	8.96
Tqo'	0
Tdo''	0
Tqo''	0
Xo	0.15
RN	0
XN	0

DATA	VALUE
RN	0
XN	0
XCAN	0.08316
HICD	315.63
DSR	0
DSD	0
FM	2
MECHUN	0

Figura. A6. Ingreso de la data en el objeto SM59 correspondiente al generador 1, *ATPDraw*

La ventana de atributos también permite colocar comentarios en la pestaña **Comment**, eso facilita el usuario una mejor ubicación del objeto al momento de correr la simulación (si está bien señalado el usuario podrá ubicar el objeto en su forma de código). El llenado de estos datos, en el apartado de atributos es similar a los otros dos generadores restantes que componen la parte de generación del sistema de 9 barras, así que no es necesario mostrar la ventana de los dos generadores restantes.

Fuentes de transformación de tensión:

El sistema de 9 barras posee tres transformadores elevadores de tensión, los cuales se van a configurar accediendo con un click derecho a la pestaña de selección de componentes siguiendo la dirección **Transformers | Saturable 3 phase**, La ventana de diálogo se muestra en la figura A7, ésta ventana además de poseer las mismas características de cualquier objeto tiene una página llamada **Characteristic** la cual permite añadir las curvas de saturación del transformador si es necesario. En nuestro caso se va a trabajar en la pestaña de atributos dejando en blanco I_o , F_o , que definen la inductancia en la rama de magnetización en estado estable y R_m que es la resistencia de la rama de magnetización y representa la histéresis y las pérdidas de corriente en el núcleo de hierro.

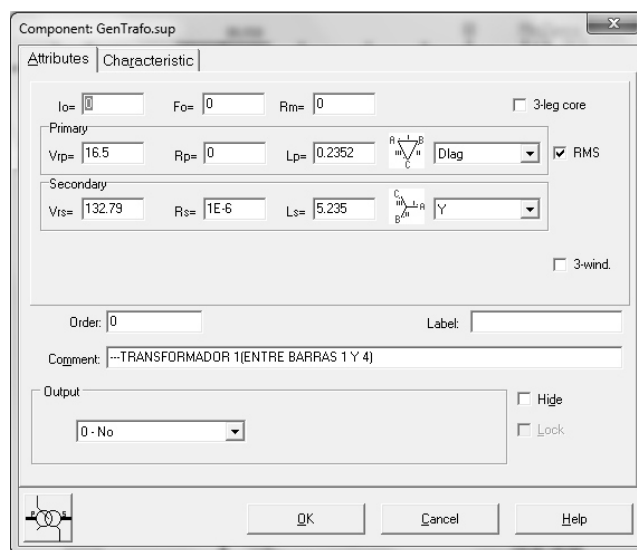


Figura. A7. Ventana de dialogo del transformador 1 con sus datos ingresados, *ATPDraw*

Para esta implementación no se va a seleccionar la checkbox llamada **3-leg core** ya que va a transformar el componente en un transformador de tres devanados con lo cual se va a mostrar un nuevo valor a especificar Ro-field, al no habilitar la checkbox nuestros tres transformadores se van a comportar como uno saturable.

Al seleccionar la checkbox **RMS** permite especificar las características de saturación en valores rms de la corriente y voltaje en la pestaña **Characteristic**, lo que se quiere decir con esto es que al ingresar los valores Vrp, Vrs, Rp, Rs, Lp, Ls, el ATPDraw va a realizar un cálculo de saturación. El tercer devanado no se va a utilizar en ninguno de los tres transformadores por eso no se habilita el botón **3-wind**.

El devanado primario del transformador tiene una conexión Delta y el devanado secundario tiene una conexión Estrella es ahí donde en la misma ventana de diálogo del transformador saturable permite elegir entre cuatro opciones de conexión, en la figura A8 se observa las conexiones seleccionadas para el transformador 1.

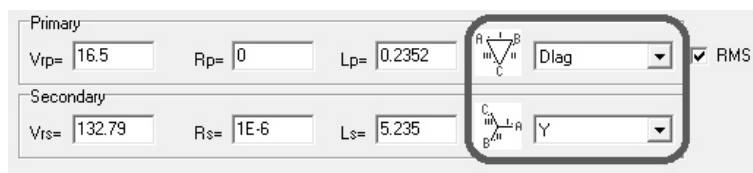


Figura. A8. Conexiones seleccionadas en ambos devanados del transformador, *ATPDraw*

Es importante recordar que éste mismo procedimiento de ingreso de datos para el transformador 1 se debe realizar para los otros dos transformadores.

Líneas de transmisión:

En este caso para modelar las líneas de transmisión se van a construir con ayuda del modelo PI equivalente trifásico, la dirección de acceso al componente es **Lines/Cables | Lumped | RLC Pi-equi.1 | 3 phase**, al seleccionarlo solo queda ingresar los datos de las tablas que corresponden a su impedancia serie y su admitancia transversal, en la figura A9 se muestra el ingreso de los datos de la línea que se encuentra entre la barra 4 y la barra 5.

DATA	VALUE
R11	5.29
R21	0
R22	5.29
R31	0
R32	0
R33	5.29
L11	44.965
L21	0

Order: 0 Label:

Comment: LINEA 4 A 5

☐ Hide ☐ Lock ☐ \$vintage,1

OK Cancel Help

DATA	VALUE
R11	5.29
R21	0
R22	5.29
R31	0
R32	0
R33	5.29
L11	44.965
L21	0
L22	44.965
L31	0
L32	0
L33	44.965
C11	332.7
C21	0
C22	332.7
C31	0
C32	0
C33	332.7

Figura. A9. Ventana de configuración y atributos de la línea de transmisión 4-5, ATPDraw

Se deben ingresar los datos tres veces en la pestaña de atributos ya que el modelo PI equivalente es trifásico, al igual que con cualquier componente, el mismo tiene su barra de comentarios donde se puede colocar algún texto para su fácil identificación en el código al momento de correr el montaje. En total hay 6 modelos de líneas de transmisión que se deben realizar para esta implementación, el ingreso de los datos para los otros 5 restantes es similar y los mismos se encuentran en la tabla.

Modelos de cargas:

Hay 3 cargas que van conectadas a las barras 8, 5 y 6, las cuales van a ser representadas con circuitos RL, la dirección de este objeto dentro del ATPDraw es **Branch Linear | RLC 3-ph**, la pestaña de atributos muestra tanto el espacio para el ingreso de datos de la resistencia, capacitancia e inductancia, en nuestro caso la capacitancia se va a dejar en un valor cero ya que el modelo de cargas es RL para este caso. La figura A10 muestra la ventana de diálogos del componente RLC y la data para la carga conectada en la barra 8.

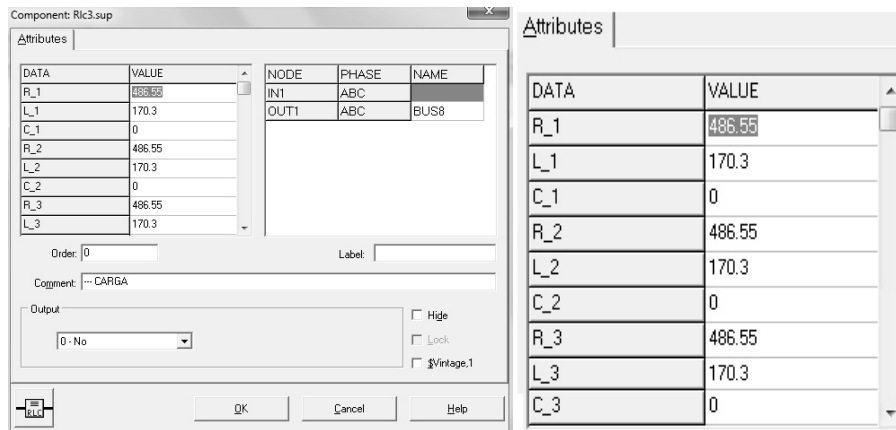


Figura. A10. Ventana de configuración y atributos de la carga RLC conectada a la barra 8, *ATPDraw*

Ya que se tienen la mayoría de elementos se puede empezar a construir la red de acuerdo a su diagrama unifilar, es importante mantener la misma disposición de acuerdo al diagrama para mantener un orden y que el montaje sea entendible para que cualquier usuario se sienta cómodo al observar todo el sistema en el software.

El primer paso es conectar todos los componentes configurados anteriormente (cargas, líneas de transmisión, transformadores etc), se dará comienzo con el generador 2 pasando por la barra 2, luego el transformador 2 hasta llegar a la barra 7, para conectar cada elemento se debe realizar las acciones con el click izquierdo para así generar los nodos, en la figura A11 se muestra el procedimiento de conexión de los elementos.

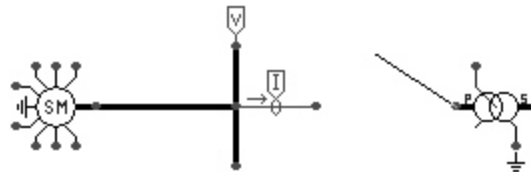


Figura. A11. Conexión entre el generador 2 y el transformador 2, *ATPDraw*

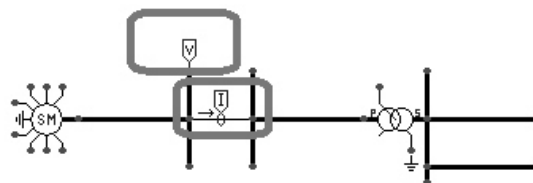


Figura. A12. Generador 2 y transformador 2 ya conectados, *ATPDraw*

En la figura A12 se muestra el generador 2 y transformador 2 conectados a través de los nodos pero además se identifican dos componentes que no han sido nombrados anteriormente, uno de ellos es un sensor de corriente y el otro un sensor de voltaje, los mismos se disponen a criterio del usuario en cualquier parte del sistema si se quiere censar la corriente o voltaje en cualquiera de sus ramas, la dirección para ubicar a los dos componentes es **Probe & 3-phase | Probe Volt** (sensor de voltaje) o **Probe & 3-phase | Probe curr** (sensor de corriente), en la figura A13 se muestra la configuración de cada elemento para que cense los voltajes y corrientes de 1 o 3 fases si es necesario, en nuestro caso sólo al hacer doble click con el botón izquierdo sobre los componentes y seleccionar la opción **3 Phases** nos permite censar las tres fases (A, B, C). Las 2 ventanas de diálogo para los dos sensores es la misma.

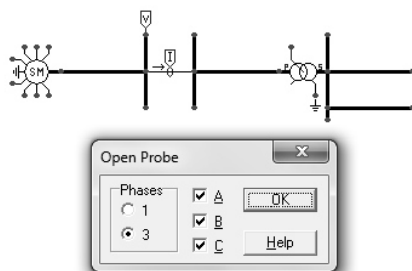


Figura. A13. Ventana para configurar los sensores de corriente y voltaje, *ATPDraw*

Ya que se tiene completa la construcción desde el generador 2 hasta la barra 7, el usuario puede y debe nombrar los nodos del circuito para tener un mayor control de los elementos y a su vez cualquier usuario externo tenga un acceso más rápido y ordenado de las variables a la hora de verificar el código de la simulación, en la figura A14 se muestra la identificación del nodo de salida de la barra 7 el cual se le debe hacer click izquierdo para que se despliegue la ventana de configuración del nodo, la misma tiene una pestaña para colocar el nombre del nodo, además de un botón llamado **display** que al seleccionarlo muestra el nombre asignado por el usuario en pantalla.

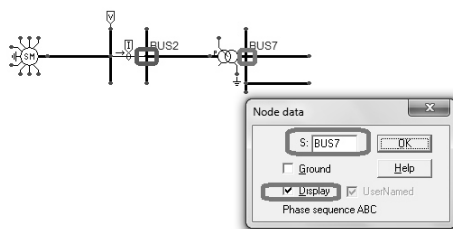


Figura. A14. Ventana de diálogo para la configuración del nodo de salida de la barra 7, *ATPDraw*

Ya que se ha completado todos los pasos para una buena modelación junto con la identificación de todos los nodos de las barras 2 y 7, se continúa con la construcción de las barras restantes del sistema, quedando por construir las barras 8, 3, 9, 6, 4, 1 y 5, con cada uno de sus elementos. En la figura A15 se muestra ya el sistema construido en su totalidad a excepción de los elementos que van entre la barra 7 y 5, donde se señalan los interruptores que van a representar la falla trifásica a tierra con el consecuente despeje de la línea.

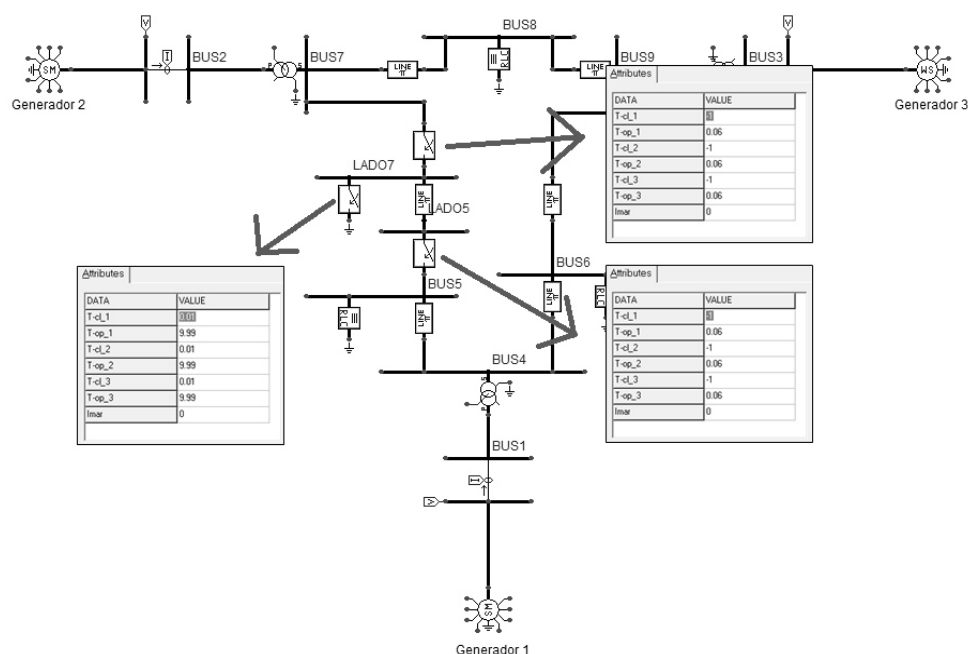


Figura. A15. Los 3 interruptores temporales colocados entre la barra 7 y 5, ATPDraw

Para lograr la configuración de los tres interruptores se debe ingresar a la barra de selección de componentes la cual tiene la siguiente dirección **Siwtches | Switch time 3-ph**, el interruptor que va del lado de la barra 7 representa una falla trifásica a tierra por eso el tiempo de apertura (t-op) es 9,99 segundos para las 3 fases, un tiempo mayor al de cierre (t-cl) para que se pueda observar la perturbación, los dos interruptores que van dispuestos en el lado de la barra 5 están configurados para que a 0,05 segundos despejen la línea. En la figura A16 se muestra la implementación completada con cada uno de los componentes.

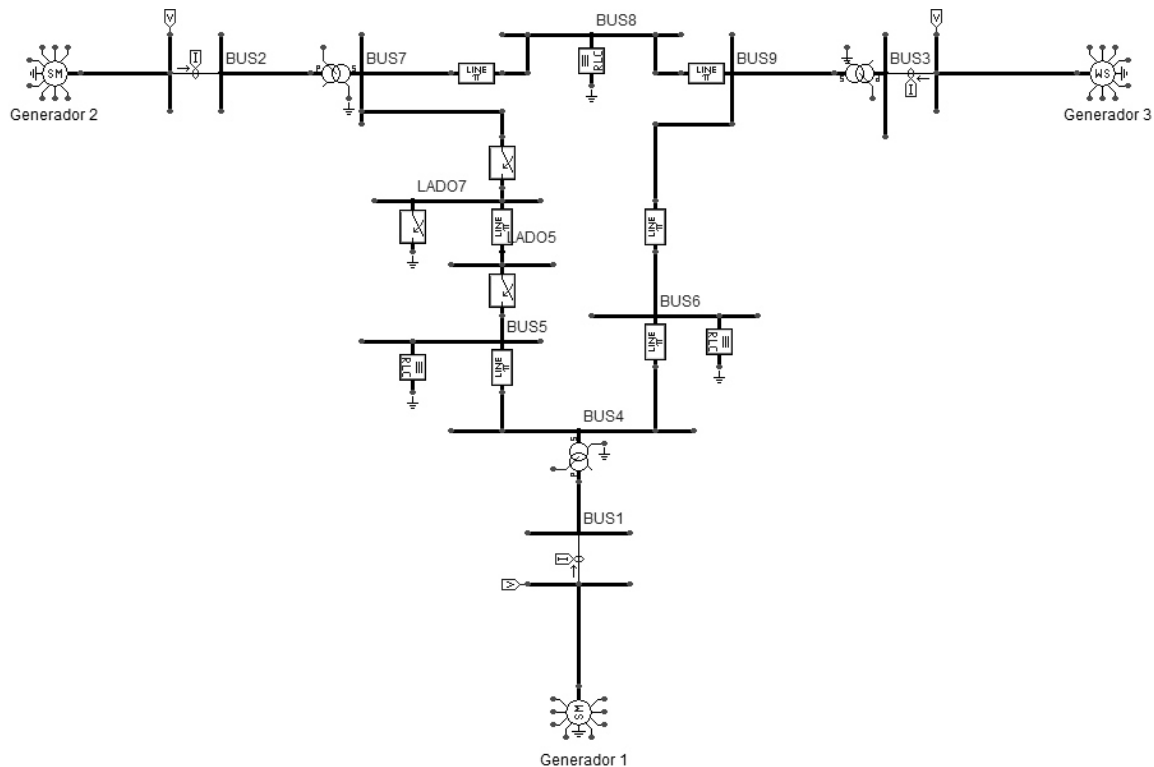


Figura. A16 Sistema de 9 barras de la IEEE implementado en ATPDraw, *ATPDraw*

Implementación de un sistema de alta tensión de 230 kV:

La misma consta de un transformador elevador de tensión de 11,5/230kV, una barra en el secundario del transformador donde se conectara una carga de 10MW+j7,5MVar en 230kV, adicionalmente se dispondrá de una línea de transmisión en doble terna modelada mediante dos circuitos Pi, un sistema de potencia simplificado mediante su equivalente Thevenin, que modelara el sistema interconectado donde se aporta la potencia generada y todo la red eléctrica va conectada a un generador de 51,6 MW. Los valores de los parámetros eléctricos de todos estos componentes se muestran a continuación:

Parámetros del generador sincrónico:

Sn= 64,5 MVA	Xd=2,94 pu	Xq=2,77 pu	Td ₀ =7 seg	Tq ₀ =2,4 seg
Un= 16,5 KV	Xd'=0,29 pu	Xq'=0,27 pu	Td ₀ '=0,039	Tq ₀ '=0,22 seg
Fn = 50 Hz	Xd''=0,22 pu	Xq''=0,22 pu	X _N = 0 pu	R _N =324,2 pu
In(field)=128 A	Npolos=2	X ₀ =0,13 pu	X _{can} =0,17 pu	
H= 0,00094*10 ⁶ Kg*m ² sistema internacional				

Tabla A5 Parámetros del generador sincrónico, todos los valores están a una base en por unidad de 100 MVA (Oscar Gutiérrez, 2009).

Parámetros del Transformador de 11,5/230 kV Δ/Y_N :

R_{mag}	14106,6 Ω
V_{rp}	11,5 kV
R_p	0,0055 Ω
L_p	0,4402 Ω
V_{rs}	132,79 kV
R_s	1,4694 Ω
L_s	58,695 Ω
Lag	-30°
I_0	4,46513 A
F_0	51,768 [Wb – turn]

Tabla A6 Parámetros del transformador de 11,5/230 kV, (Oscar Gutiérrez, 2009).

Parámetros eléctricos de las dos líneas de 100 Km:

R_0	0,0002974 Ω/m
L_0	0,001581 Ω/m
C_0	0,0022309 $\mu S/m$
R_+	0,000059 Ω/m
L_+	0,0004726 Ω/m
C_+	0,0035298 $\mu S/m$

Tabla A7 Parámetros de las dos líneas de transmisión. (Oscar Gutiérrez, 2009).

Parámetros eléctricos de la Carga:

R_c	3385,6 Ω
L_c	2539,2 Ω

Tabla A8 Parámetros de la carga. (Oscar Gutiérrez, 2009).

Parámetros eléctricos del equivalente Thevenin:

$U_{thevenin}$	225400 V
A_{angulo}	24,72°
$R_{thevenin}$	5,2632 Ω
$L_{thevenin}$	52,632 Ω

Tabla A9 Parámetros de la fuente en equivalente de thevenin. (Oscar Gutiérrez, 2009).

Las dos líneas de transmisión se llevará a cabo a través del componente RLC Pi equivalente de trifásico, la dirección en la pestaña de selección es la siguiente **Lines/Cables | Lumped | RLC Pi-equiv. 1 | 3 ph. seq**, la figura A17 muestra la ventana de atributos y el ingreso de los datos los cuales se ubican en la tabla A7.

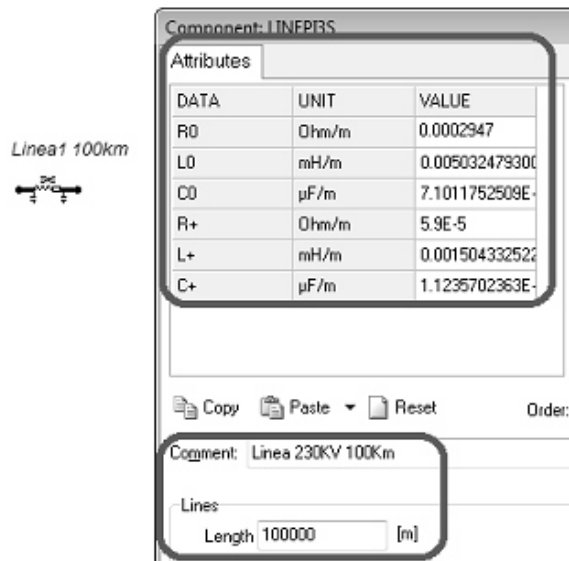


Figura. A17. Ventana de atributos de la línea de transmisión 1, *ATPDraw*

Los parámetros del único transformador a implementar para este caso se encuentran en la tabla A6, el componente a usar es un transformador saturable, la dirección de acceso es **Transformers | Saturable 1 phase**, la figura A18 muestra la ventana de atributos con todos los datos y el ícono representativo del componente.

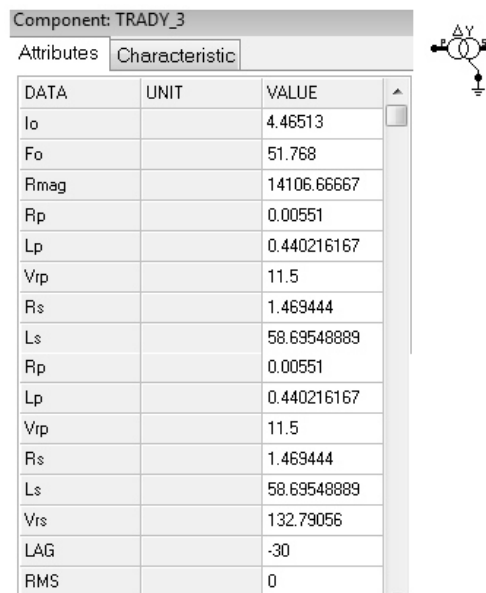


Figura. A18. Ventana de atributos del transformador en ATPDraw, *ATPDraw*

La representación del equivalente de thevenin, específicamente la tensión será representada a través del componente **AC source (1&3)**, esta fuente también llamada tipo 14 (type 14) tiene la particularidad de comportarse como una fuente de corriente de voltaje o corriente según sea el caso al pulsar una de las dos opciones en el apartado **Type of source**

que se encuentra en la parte inferior de la ventana de configuración del componente, además cuenta con cuatro parámetros más (**Num phases**, **Angle units**, **Amplitude**, **Grounding**) que deben ser seleccionados según los requerimientos del usuario, la figura A19 muestra la ventana de configuración con el ingreso de los datos los cuales se encuentran en la tabla.

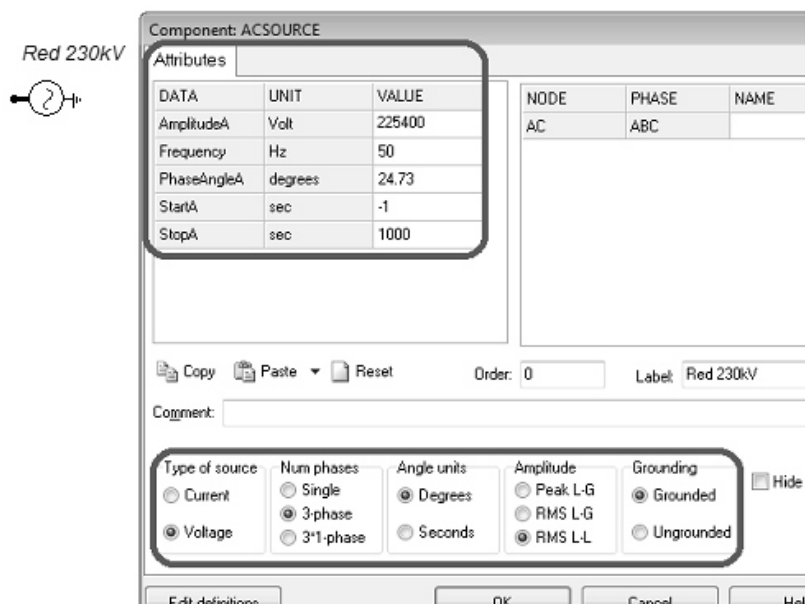


Figura. A19. Ventana de atributos del componente AC source (1&3), ATPDraw

La figura A20 muestra la implementación del sistema de alta tensión de 230 kV en el ATPDraw.

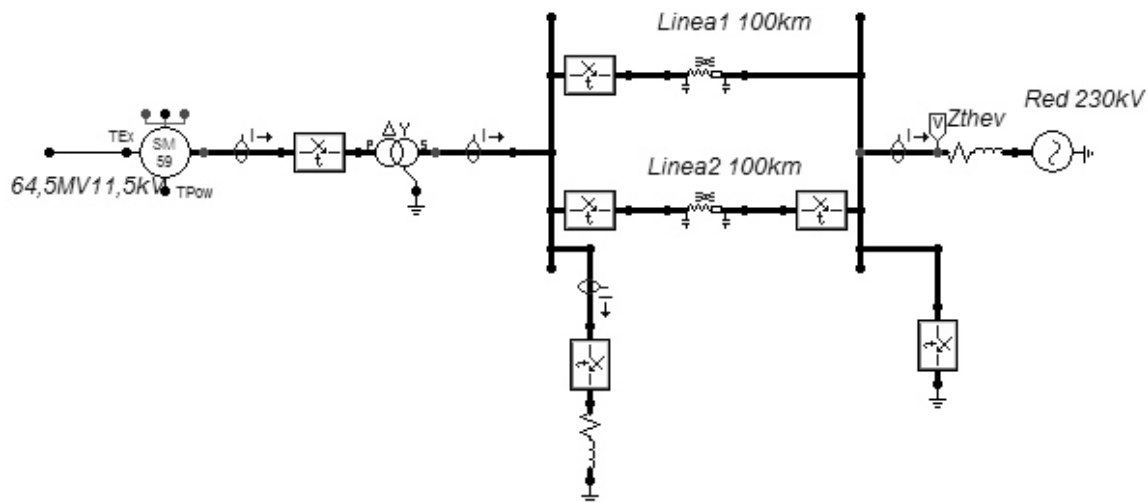


Figura. A20. Sistema de alta tensión de 230 kV implementado en ATPDraw, ATPDraw

Implementación de un sistema de potencia de 5 barras (Fabrício Moura, 2011):

La red está compuesta por dos generadores sincrónicos, una fuente de tensión ideal, 3 transformadores de potencia, 2 bancos trifásicos de capacitores y 2 cargas trifásicas, conectados a la barra 2 y 3, además de las 2 líneas de transmisión están 2 cargas independientes, una carga estática representada por un circuito RL y una carga dinámica representada por un motor trifásico. Las siguientes tablas muestran la data de la red de 5 barras.

Parámetros generales de los generadores:

Descripción	Potencia Nominal (MVA)	tensión(kV)	F.P
G1	*	11,4	*
G2	5	6,6	0,8 ind
G3	5	6,6	0,8 ind

Tabla A10 Parámetros de los generadores. *La potencia aparente, y el factor de potencia son magnitudes que dependen de otras características del sistema estudiado.(Fabrício Moura, 2011)

Parámetros de los transformadores

Descripción	Potencia nominal (MVA)	Conexión	Resistencia (%)	Reactancia (%)	Tensión nominal (kV)
T1	30	Δ/Y	0	3	11,4/13,8
T2	5	$Y-\Delta$	0	5	13,8/6,6
T3	3	$\Delta-Y$	0	5	6,6/0,38

Tabla A11 Parámetros de los transformadores.(Fabrício Moura, 2011)

Parámetros del banco de capacitores:

Descripción	Potencia Nominal (MVAR)	tensión(kV)	Conexión
C1	5	13,8	Y
C2	5	13,8	Y

Tabla A12 Parámetros del banco de capacitores.(Fabrício Moura, 2011)

Parámetros de las cargas del sistema:

Descripción	Potencia nominal (MVA)	Conexión	F.P.	Tensión nominal (kV)
Carga 1	12,5	Y	0,92 ind	13,8
Carga 2	12,5	Y	0,92 ind	13,8
Carga estática	2,5	Y	0,92 ind	0,38
Carga Motriz	0,26	Y	0,86 ind	0,38

Tabla A13. Parámetros de las cargas. (Fabrício Moura, 2011)

Parámetros de las líneas:

Descripción	R(MVA)	Xl	Longitud (Km)	Tensión nominal (kV)
LD1	0,4374	0,524	15	15
LD2	0,4374	0,524	15	15

Tabla A14. Parámetros de las líneas. (Fabrício Moura, 2011)

La figura A21 muestra el diagrama unifilar del sistema 5 barras y la figura A.22 muestra el sistema ya implementado en el ATPDraw:

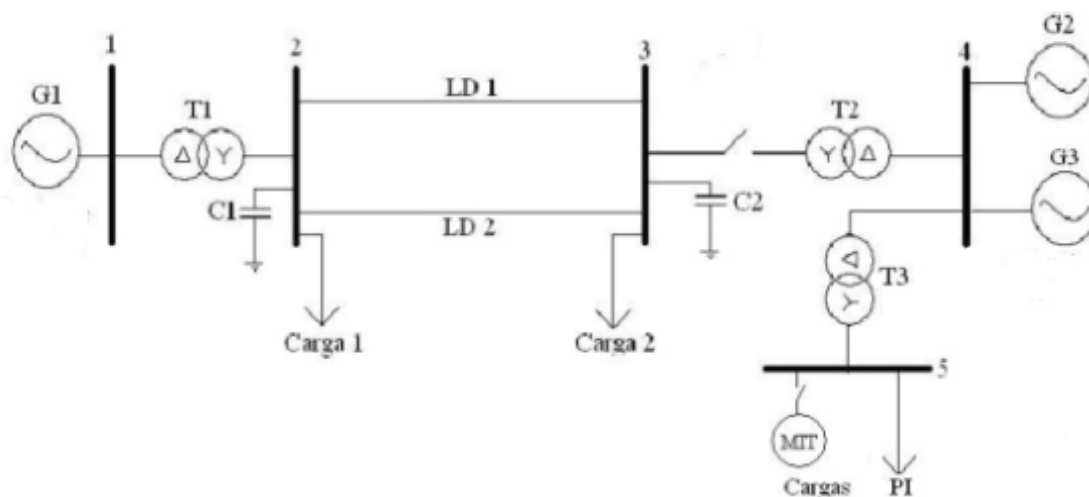


Figura. A21. Diagrama unifilar del sistema de 5 barras.(Fabrício Moura, 2011)

Anexo B

Implementación de los modelos de excitatriz de la IEEE:

Para la construcción de estos sistema de excitación el ATPDraw cuenta con una herramienta llamada TACS, que permite implementar sistemas de control, los cuales están descritos con detalle en el capítulo 2. Con ayuda del módulo TACS se va a representar cada bloque con sus características propias (ganancias, ceros, polos, valores de entrada y salida, etc), es de hacer notar que el uso de los TACS usados en este apéndice no es el único ya que dependerá del usuario mantener el mismo diagrama por cuestiones de comodidad o simplificarlo y usar otro tipo de funciones TACS que permitan representar de manera más eficiente este sistema y cualquier otro, lo importante del ATPDraw es la libertad que tiene cada usuario a la hora de realizar una simulación.

Consideraciones a tener para el uso de los TACS:

Ubicación de las funciones de transferencias:

Al hacer click derecho sobre la ventana se abre el menú de selección de componentes, la dirección a seguir es **TACS | Transfer functions**, donde en éste apartado de selección se nos permite seleccionar entre varios componentes: **General, Order 1, Integral, Derivative, Low pass, High pass**. El uso de cualquiera de estos componentes dependerá de las características de cada función de transferencia y de cómo el usuario desee representarlas, en la figura B1 se muestra el menú de selección y la ventana del componente seleccionado.

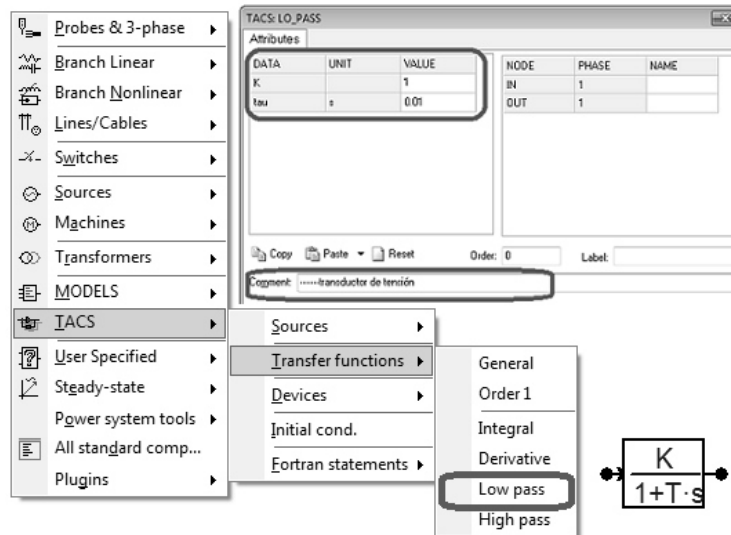


Figura. B1. Menú de selección del TACS Low pass y ventana de configuración, ATPDraw

Función de transferencia General:

El componente **General** en cuestión puede ser utilizado para representar cualquier bloque de forma general con sus ganancias, ceros, polos, límites inferior y superior de cualquier función, si el usuario lo desea puede representar cualquier diagrama de bloques con éste

mismo componente, aunque el ATPdraw tiene una amplia variedad de funciones de transferencia para una implementación más específica.

A continuación se muestra en la figura B2 la configuración del bloque **General**:

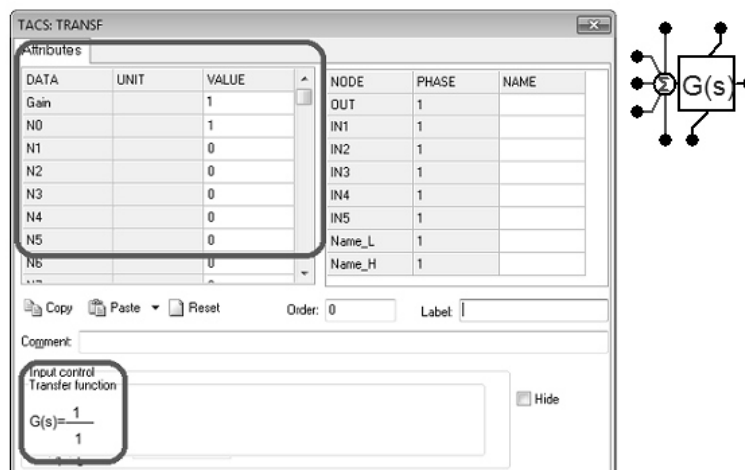


Figura. B2. Configuración del bloque general, *ATPDraw*

La ventana de configuración en la pestaña de atributos muestra la ganancia (Gain), los numeradores (ceros) que van desde N_0 hasta N_7 , los denominadores (polos) que van desde D_0 hasta D_7 y los últimos dos atributos Fix_Lo y Fix_Hi que representan los límites inferiores y superiores en que puede estar definida la función. Como se comentó anteriormente, la cantidad de ceros y polos que puede abarcar el bloque **General** son 8 para cada uno, con esto se puede lograr representar un sistema de séptimo orden sin complicaciones.

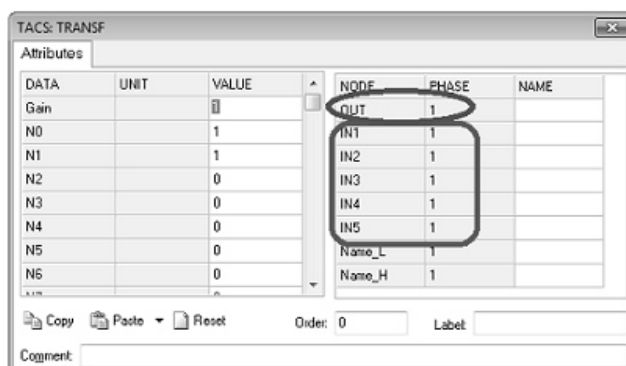


Figura. B3. Pestaña de nodos de entrada y salida, *ATPDraw*

Sólo con tener los atributos del bloque no basta, al momento de conectar o relacionar las funciones TACS a través de los bloques es necesario establecer que nodos de entrada van a ser utilizados y a su vez configurados, para así obtener una señal en el nodo de salida del bloque correspondiente, véase la figura B3. Cada bloque General tiene cinco (5) señales de entrada y una (1) señal de salida como se puede ver en la figura, el uso o no de todos los

los nodos de entrada depende del usuario y del sistema a montar, pero al momento de configurar cualquier nodo se debe hacer doble click izquierdo sobre uno de ellos y se mostrará una ventana con el nombre **TACS node**, en la figura B4 se muestra la ventana en este caso del nodo de entrada 3 (IN3) el cual se puede identificar con un nombre que sirve de ayuda al momento de localizarlo en el código después de correr la simulación, si se hace click al checkbox **Name on screen** (nombre en pantalla) el mismo se va a mostrar, pero lo importante de la sección de configuración de TACS node es la pestaña que permite cambiar entre cuatro opciones la característica del nodo, puede cambiarla entre positivo, negativo, salida o desconectado.

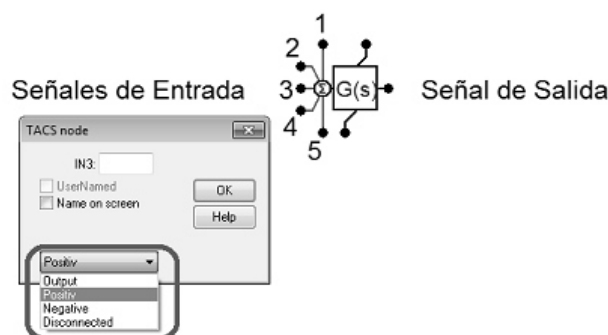


Figura. B4. Configuración de los nodos TACS, *ATPDraw*

Condiciones Iniciales en los TACS:

El uso de las condiciones iniciales en los TACS es necesario cuando los dispositivos o funciones parten de valores diferentes a cero, ya que por defecto el ATPDraw da como valor de salida el cero ($t=0$), la ruta de acceso para las condiciones iniciales es **TACS | Initial cond.** Al momento de seleccionar el objeto se hace sobre el mismo doble click izquierdo para configurar sus atributos como cualquier otro objeto del software, en este caso se debe ingresar el valor de donde va a iniciar el dispositivo a la hora de correr la simulación, una vez los atributos son agregados se da click en ok y el objeto se debe posicionar en el nodo que se desee que lleve la información. En la figura B5 se muestra la dirección de acceso más la ventana de configuración y su ícono.

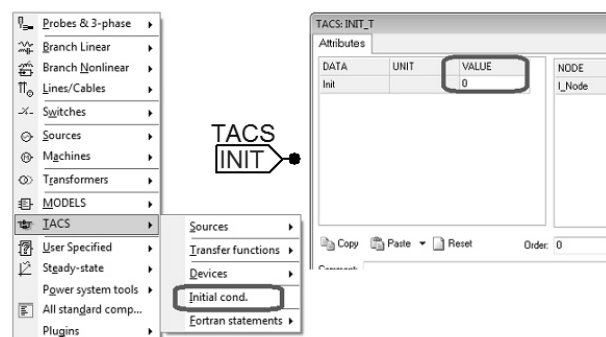


Figura. B5. Dirección de acceso, ícono y ventana de configuración de condición inicial de TACS, *ATPDraw*

Sentencia Fortran:

Otro de los componentes usados en la construcción de dispositivos con ayuda del TACS son las sentencias FORTRAN que permiten combinar funciones aritméticas, y funciones especiales dentro del TACS, la ruta de acceso a este objeto es **TACS | Fortran statements**, las sentencias que se tienen disponibles son: **General, Math, Trigonon, Logic, F(\$1...\$9)**, las cuales se explican con detalle en el capítulo 2. La sentencia Fortran General puede definir cualquier función dentro de una gran librería de opciones, pero si el usuario quiere crear funciones más específicas el ATPDraw dispone de muchas otras, en nuestro caso y durante todos los montajes en que se necesiten éstas sentencias, el componente a usar es la sentencia Fortran General (FORTRAN1). En la figura B6 se muestra la ventana de configuración.

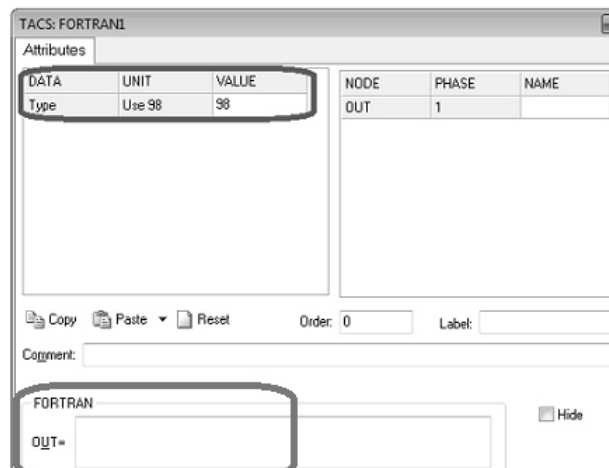


Figura. B6. Ventana de atributos de una sentencia Fortran General, *ATPDraw*

El usuario al momento de configurar la sentencia Fortran General debe especificar el tipo de sentencia Fortran que desee, existen tres tipos los cuales son: tipo 88: Inside (variable interna), tipo 98: Output (variable salida), tipo 99: Input (variable entrada). En la parte inferior izquierda de la ventana de atributos se encuentra una pestaña con el nombre OUT=, en ella se puede agregar valores o editar funciones que permita la sentencia Fortran como aritméticas y trigonométricas, véase capítulo 2, de ahí se obtiene un valor que puede ser tomado por otra función TACS para así obtener el valor deseado.

Implementación de los sistemas de excitatriz de la IEEE:

Se implementarán 4 sistemas de excitación:

- IEEE AC5A.
- IEEE ST2A.
- IEEE Discontinuo.
- IEEE DC1A.

El valor de los parámetros para estos sistemas de excitación está listado en la tabla siguiente:

Parámetro	Sistema AC5A	Sistema ST2A	Sistema Discontinuo	Sistema DC1A
K_A	400	120	----	100
K_E	1.0	1.0	1.0	1.0
K_F	0.04	0.02	----	0.03
K_R	1.0	1.0	----	----
K_P	-----	1.19	----	----
K_I	-----	2.62	----	----
V_{Rmax}	8.26	1.2	4.38	1.6 pu
V_{Rmin}	-8.26	-1.2	0.0	0.8 pu
V_{Bmax}	-----	2.78	----	----
τ_A	0.02	0.15	----	0.02
τ_E	0.015	0.05	1.98	0.8
τ_F	0.05	0.60	----	1.0
τ_R	0.0	0.0	----	----
A o (SE_{max})	(0.86)	-----	(0.0967)	500 pu
B o ($SE_{0.75max}$)	(0.50)	-----	(0.3774)	0.0 pu
τ_{RH}	-----	-----	20.0	----
ZMI	-----	-----	0.01	----
KV	-----	-----	0.05	----

Tabla B1. Parámetros de los sistemas de excitatriz. (Anderson P y Fouad A, 1977)

Los datos de los sistemas AC5A, ST2A, DC1A son tomados de la tabla 8.11 de (Anderson P y Fouad A, 1977), el tipo discontinuo del apéndice F4 tabla D.3 de (Anderson P y Fouad A, 1977).

Implementación del sistema de excitatriz AC5A:

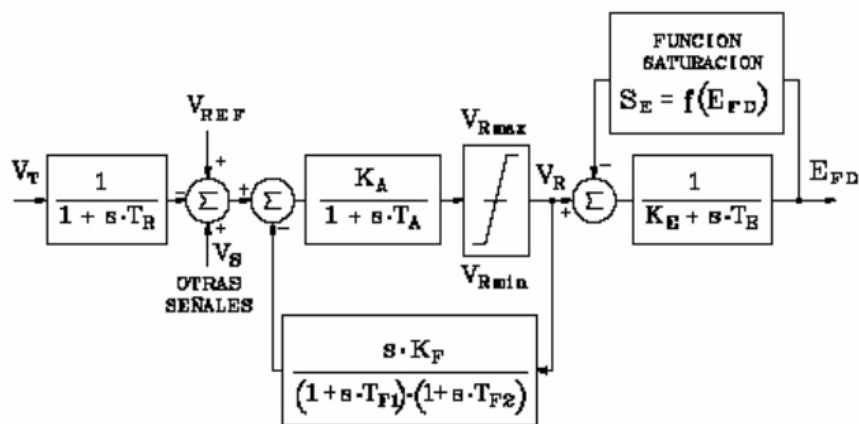


Figura. B7. Sistema de control tipo IEEE AC5A

La figura B7 muestra el diagrama de bloques del sistema de excitación AC5A de la IEEE cuenta con 6 bloques y 3 puntos de suma, los cuales serán implementados con ayuda del ATPDraw, se presentarán los montajes de cada bloque por separado para al final unir los mismos y obtener el sistema completo.

El primer bloque a implementar es el transductor de tensión, se tomará como componente el **Low pass**, véase la figura B8, el cual sólo tiene como atributos el ingreso de los parámetros K y Tau que corresponden a los valores K_R y T_R (la cual por razones de simulación se le dio un valor de 0.01 s) y se encuentran en la tabla, como es típico de cualquier componente tiene una barra de comentarios, pestañas de ayuda (help), pestaña de cancelar o para confirmar (Ok) el ingreso de los datos.

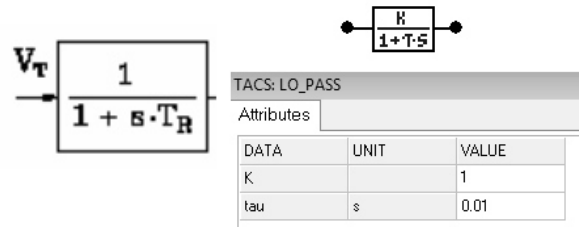


Figura. B8. Diagrama de bloque del transductor de tensión y su implementación, *ATPDraw*

El siguiente paso corresponde a la implementación del comparador (señal de error) véase la figura B9, se tomará como componente el bloque general para la representación del punto de suma, al usar el bloque como punto de suma es necesario que tenga una ganancia de valor 1, un valor de numerador $N_0 = 1$ (orden cero) y un valor de denominador $D_0 = 1$ (orden cero), al ingresar sólo estos valores se logra configurar un bloque con ganancia 1.

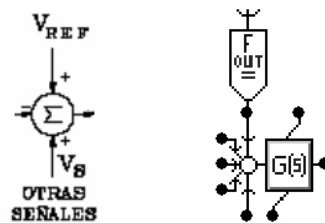


Figura. B9. Diagrama de bloque del comparador y su implementación, *ATPDraw*

Para la señal de referencia (V_{REF}) se dispone del objeto Sentencia Fortran el cual se le ingresará un valor en la pestaña OUT= de 1.04 que corresponde a un valor de referencia de la IEEE de un rectificador rotante, además de asignar el tipo de variable Fortran que para éste caso es una Tipo 88 (Type 88: Inside), en la figura C10 se muestra la configuración de los atributos de ésta variable, la señal (otras señales) no se tomaron en cuenta para la implementación.

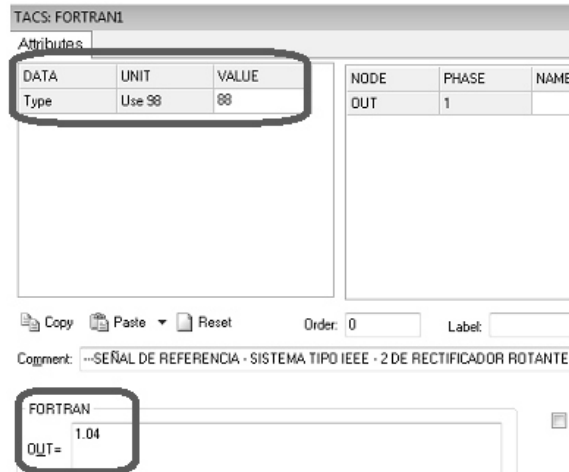


Figura. B10. Ventana de configuración del VREF con sentencias Fortran, *ATPDraw*

Ahora se continúa con la implementación del amplificador, limitador, lazo de realimentación (estabilizador), donde cada los mismos serán representados en el ATPDraw por bloques generales, ya que el procedimiento es igual para cada uno de ellos, las figuras B11, B12 y B13 muestra la comparación entre el diagrama de cada bloque y el montaje realizado en el software.

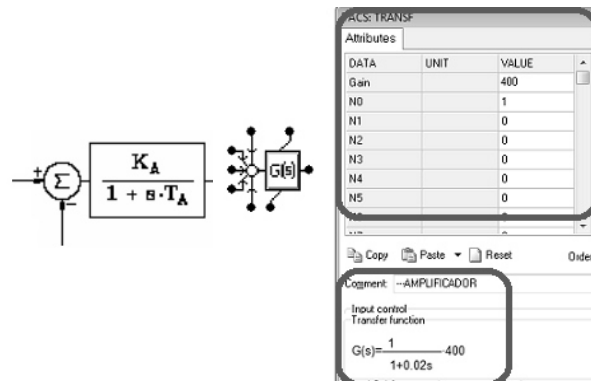


Figura. B11. Diagrama de bloque del amplificador y su implementación, *ATPDraw*

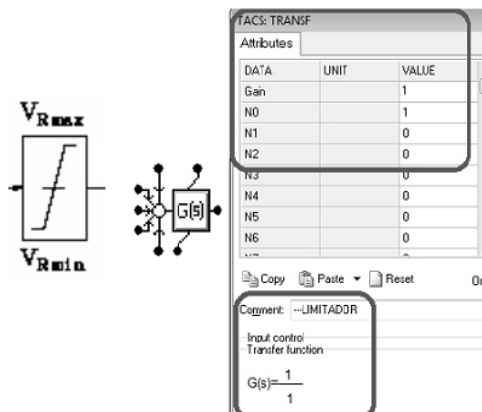


Figura. B12. Diagrama de bloque del limitador y su implementación, ATPDraw

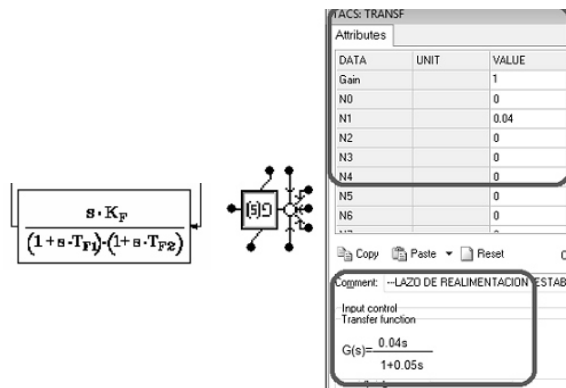


Figura. B13. Diagrama de bloque del lazo de realimentación y su implementación, ATPDraw

La implementación del bloque Función Saturación, véase en la figura B14 se llevó a cabo a través de una sentencia Fortran, ya que realmente es una función que viene dada por una expresión matemática, es por eso que lo más adecuado es representarlo con una sentencia, la configuración de la sentencia se muestra en la figura. En el caso de los bloques implementados la figura B14 muestra a los mismos unidos por una línea punteada y azul que representa la relación entre los dos bloques, el ATPDraw lo llama draw relation y se obtiene al hacer doble click sobre un nodo ya creado y presionar la tecla **Relation**, esto cambiará la forma del nodo a punteada y azul. Esta propiedad de editar el nodo no lo modifica de ningún modo ni al sistema o sus bloques, es una característica visual que ayuda al usuario a mantener el diagrama de bloques en el software lo más parecido posible al original.

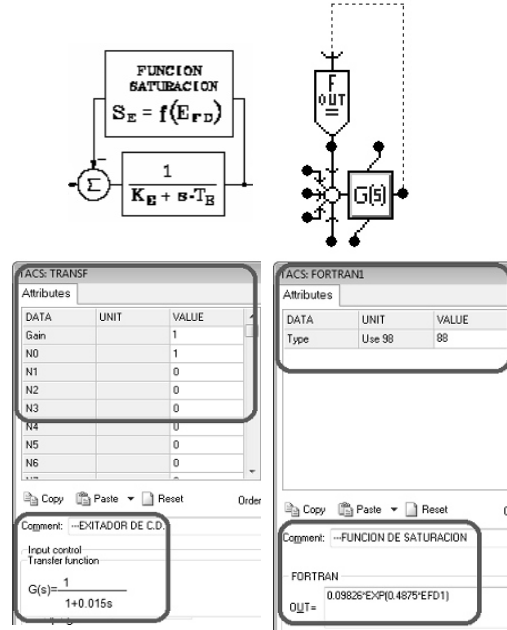


Figura. B14. Diagrama de bloque de la función saturación y su implementación, *ATPDraw*

Las señales de entrada (VT1) y salida (salida al devanado de campo del generador 1) para éste sistema son funciones matemáticas las cuales serán definidas por sentencias Fortran, ambas de tipo 98 (type 98: Output), la figura B15 muestra la ventana de configuración de atributos de ambas sentencias.

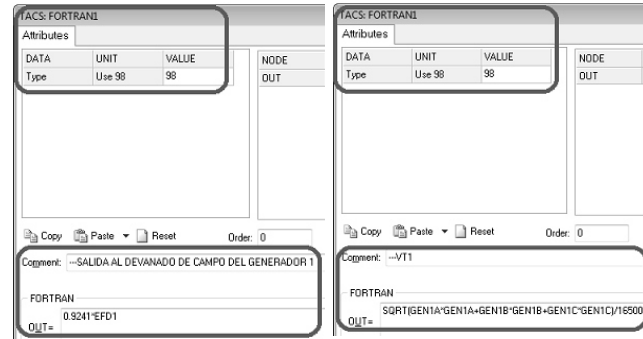


Figura. B15. Ventana de configuración de la señal de entrada y la señal de salida, *ATPDraw*

Como se observa en la figura la sentencia Fortran para la señal de entrada VT1 viene dada por la siguiente expresión:

$$OUT = \frac{SQRT(GEN1A*GEN1A+GEN1B*GEN1B+GEN1C*GEN1C)}{16500} \quad (\text{Ec. B1})$$

Estos valores son tomados directamente del generador 1 conectado al sistema de 9 barras al hacer uso de un objeto que posee el ATPDraw llamado EMTP_OUT, este objeto permite obtener información del EMTP (la red eléctrica) y pasarla al TACS, la dirección de acceso a

través de la pestaña de selección es **TACS | Sources | Circuit variable**, véase el capítulo 2 “Conexión entre el EMTP (Red) y el TACS (sistema de control)”, se especifica con detalle cada atributo de este objeto, la figura B16 muestra la ruta de acceso y el ícono representativo.

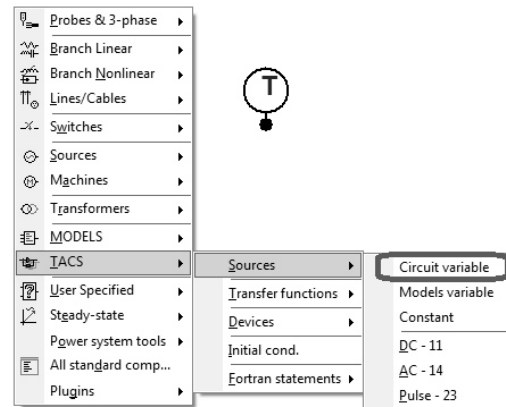


Figura. B16. Dirección de acceso, ícono del EMTP_OUT, ATPDraw

Antes de concluir con la construcción del sistema AC5A se agregan tres funciones adicionales, que aunque no tengan nada que ver con el sistema de excitación son construidas a partir de sentencias Fortran de tipo 99 (type 99: Input), con sus respectivos objetos, las funciones son:

- DW1 (Cálculo de la desviación de la velocidad, en por unidad).

$$OUT = \frac{(20 * OMEG1 - OMEGAR)}{OMEGAR} \quad (\text{Ec. B2})$$

- DELTA1 (Angulo de par en grados eléctricos).

$$OUT = \left(20 * TITA1 - OMEGAR * TIMEX - \frac{PI}{2} \right) * \frac{180}{PI} \quad (\text{Ec. B3})$$

- PG1 (Potencia del generador 1)

$$OUT = TQ1 * OMEGA1 \quad (\text{Ec. B4})$$

Cada una de éstas expresiones contiene datos que se extraen también del sistema de potencia, como también contienen constantes únicas del ATPDraw, véase el capítulo 2 “constantes y variables internas predefinidas”, y son llevadas al TACS por medio del objeto EMTP_OUT para su uso.

Como paso final queda unir cada bloque implementado en el software, tomando en cuenta el uso de las condiciones iniciales TACS, del cuidado que se debe tener para con las entradas y salidas de cada bloque así como el signo correspondiente para cada uno de ellas y los nombres que obligatoriamente deben ser colocados en los nodos ya que permite al usuario una mejor ubicación de los mismos después de haber corrido el código, así como el adición de las sentencias Fortran para generar las expresiones que van a ser pasadas al TACS. La figura B17 muestra el montaje final del sistema de excitatriz AC5A de la IEEE.

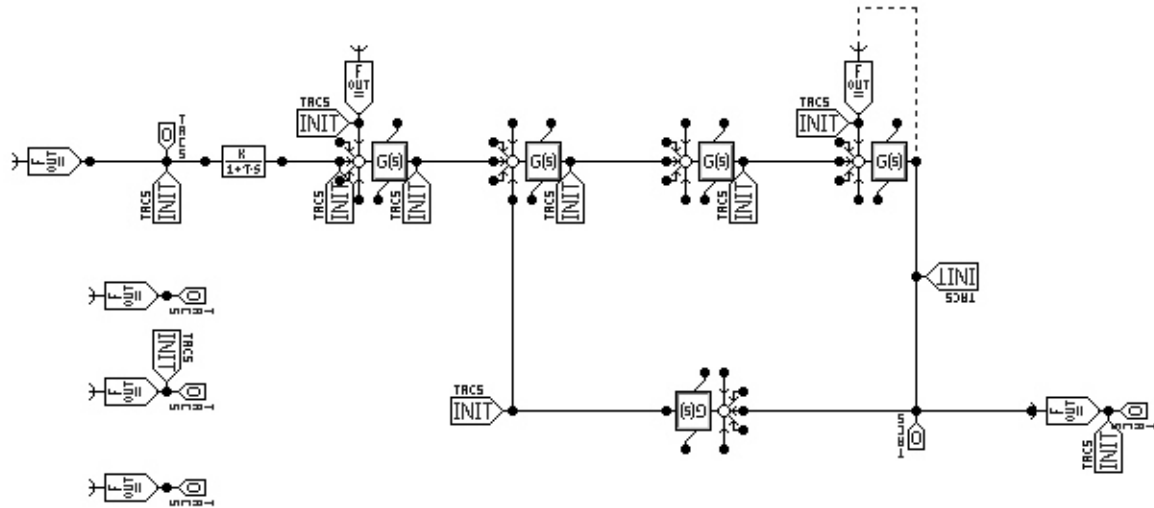


Figura. B17. Sistema IEEE AC5A implementado en el ATPDraw, ATPDraw

Implementación del sistema de excitatriz ST2A:

Este sistema IEEE ST2A ha sido descrito en capítulo 2, véase “Sistema de excitación tipo ST2A”, para la implementación se requiere el agregado de componentes especiales, como es el caso del dispositivo tipo 60 (input-if componente), véase el capítulo 2 “Funciones Especiales o Devices”, el cual es un switch comparador el cual da una u otra salida dependiendo de la señal de entrada y cierta condición a cumplir.

La figura B18 muestra el diagrama de bloques del sistema, y la figura B19 es la implementación del mismo en el ATPDraw.

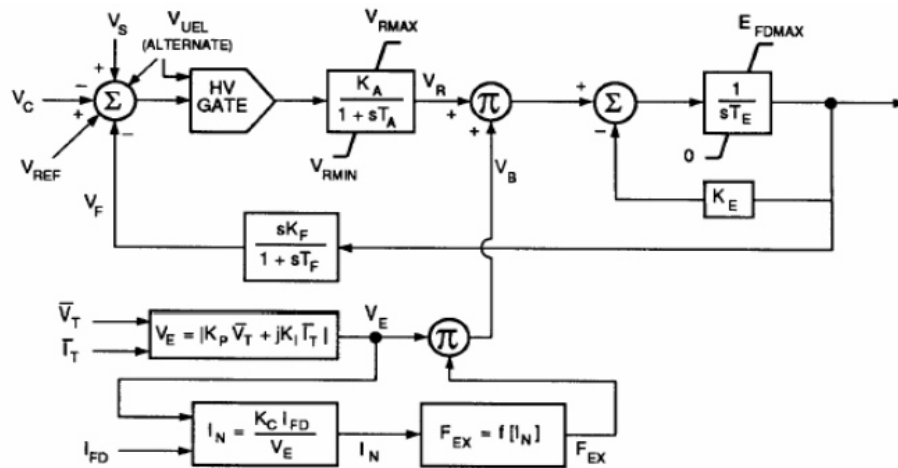


Figura. B18. Sistema de control tipo IEEE ST2A

Fuente: IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies 421.5-1992

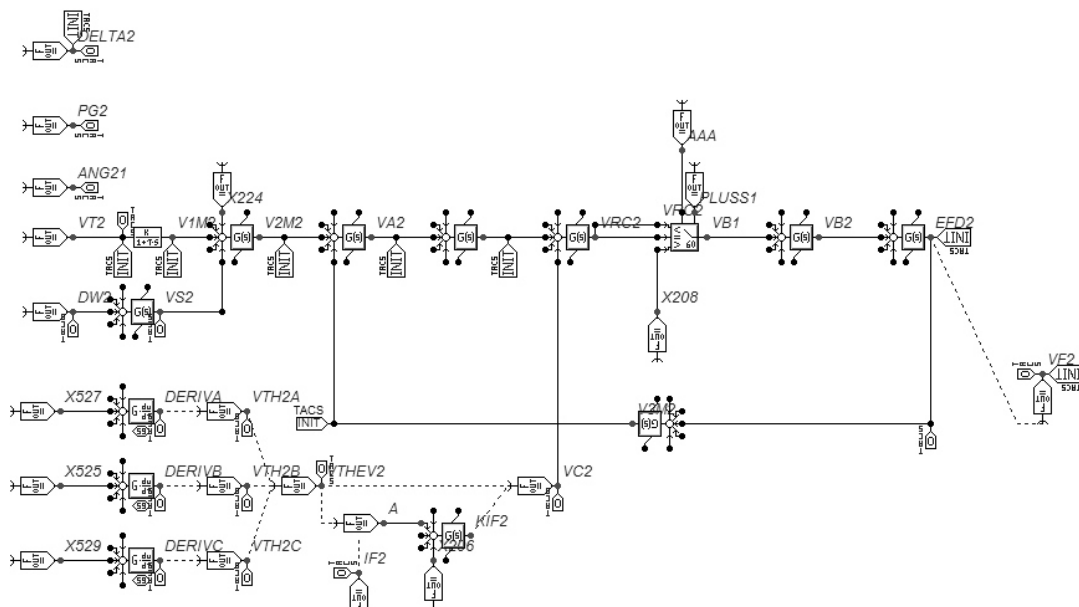


Figura. B19. Sistema IEEE ST2A implementado en el ATPDraw, *ATPDraw*

Implementación del sistema de excitatriz de regulación discontinua:

La figura B20 muestra el diagrama de bloques del sistema, y la figura B21 es la implementación del mismo en el ATPDraw.

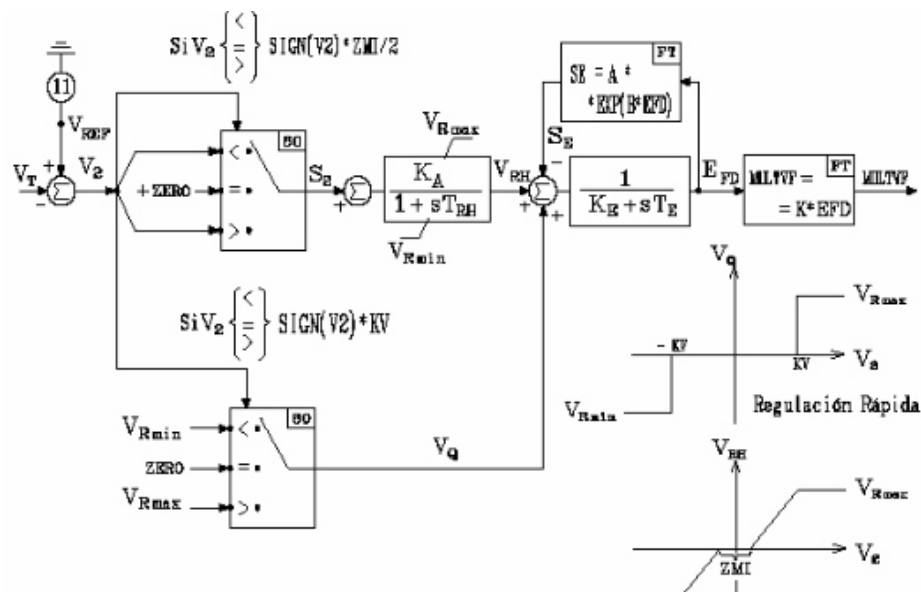


Figura. B20. Sistema de control tipo IEEE regulación discontinua

Fuente: IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies 421.5-1992

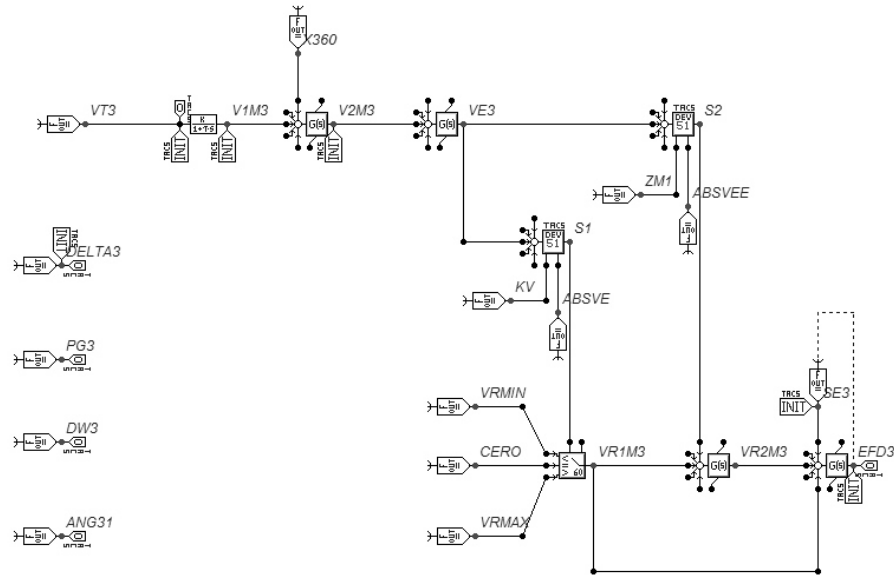


Figura. B21. Sistema IEEE discontinuo implementado en el ATPDraw, *ATPDraw*

Implementación del sistema de excitatriz DC1A:

La figura B22 muestra el diagrama de bloques del sistema, y la figura B23 es la implementación del mismo en el ATPDraw.

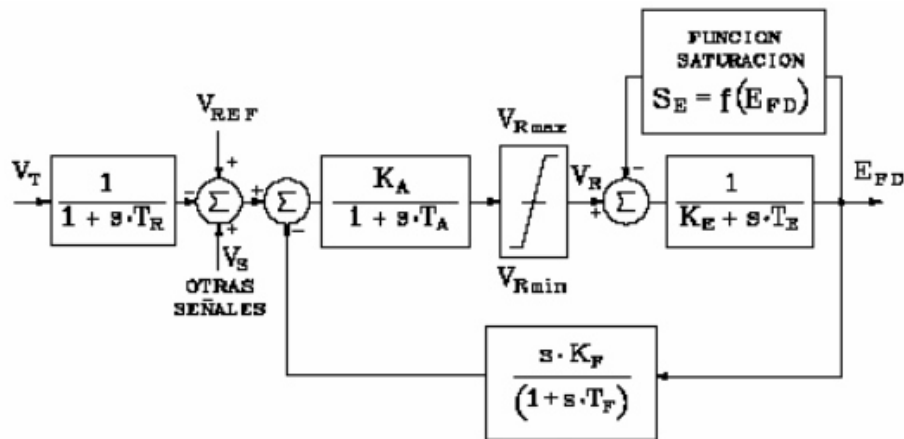


Figura. B22. Sistema de control tipo IEEE DC1A

Fuente: IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies 421.5-1992

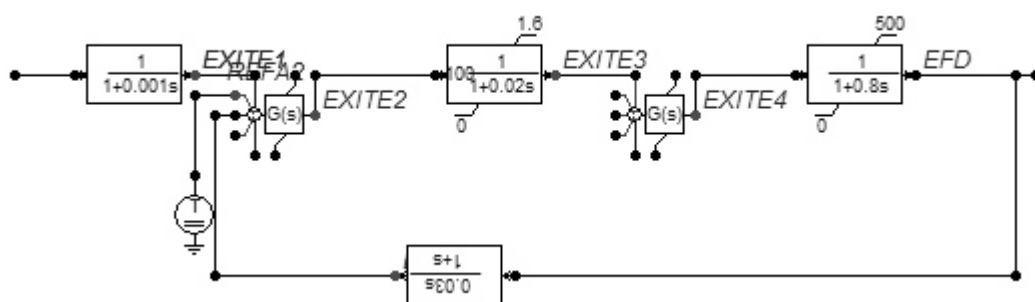


Figura. B23. Sistema IEEE DC1A implementado en el ATPDraw, *ATPDraw*

Anexo C

Implementación de los sistemas de control de velocidad (gobernadores):

Se implementarán 2 sistemas de control velocidad, el primero que corresponde a un modelo simple de un gobernador (si $T_4 = 0$) y a una turbina hidráulica (si $T_4 \neq 0$) de la IEEE, ver la figura C1, con su implementación en ATPDraw, ver la figura. Un modelo de un gobernador asociado a una turbina de gas de la WECC, ver figura C2, con su implementación en ATPDraw. Además la tabla C1 y la tabla C2 contienen los parámetros de ambos sistemas.

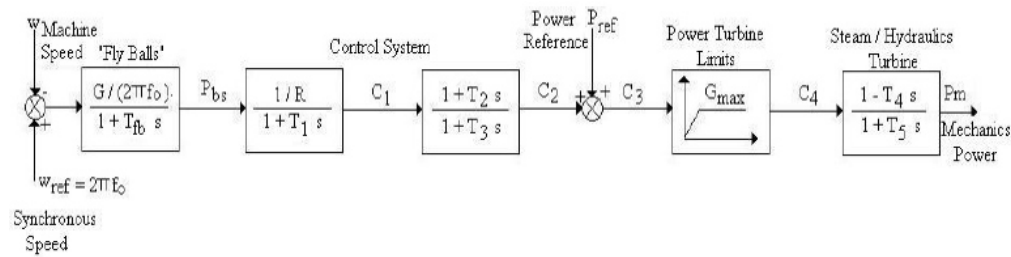


Figura. C1. Diagrama de bloques del gobernador de la IEEE. (Anderson P y Fouad A, 1977)

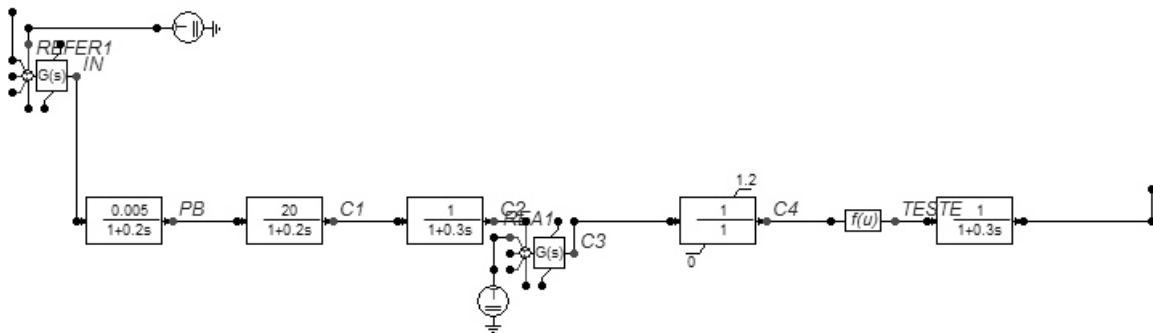


Figura. C2. Implementación del gobernador de la IEEE en ATPDraw, *ATPDraw*

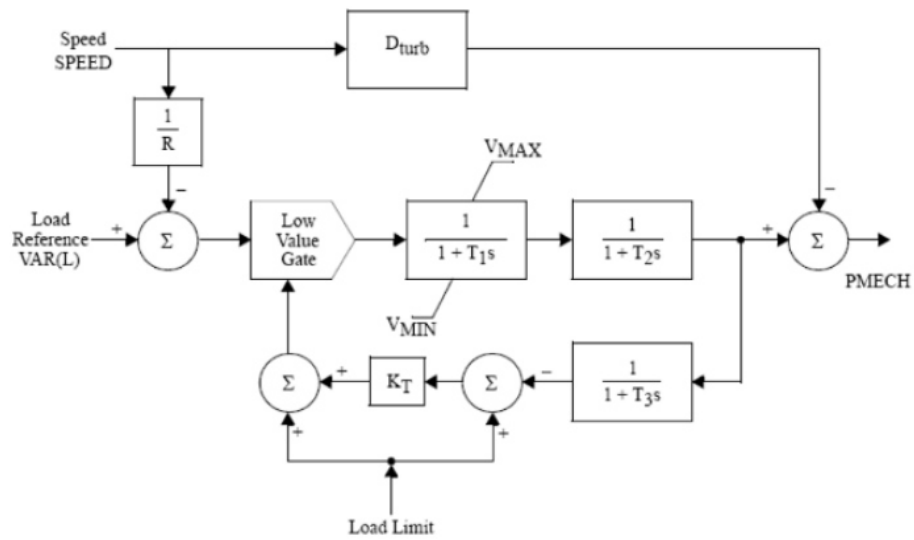


Figura. C3. Diagrama de bloques del gobernador de la WECC. (P. Mahat, Z. Chen, B. Bak-Jensen, 2011)

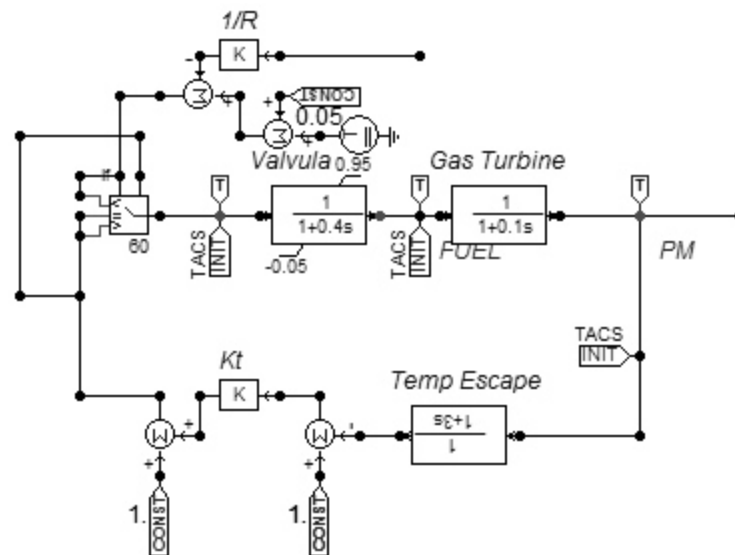


Figura. C4. Implementación del gobernador de la WECC en ATPDraw, ATPDraw

Parámetro	Sistema WECC
T_1	0,4
T_2	0,1
T_3	3
$1/R$	0,05
K_T	2
V_{MIN}	-0,05
V_{MAX}	0,95
LoadLimit	1

Tabla C1. Parámetro del gobernador Gast de la WECC. (Oscar Gutiérrez, 2009).

Parámetro	Sistema IEEE
T_1 (s)	0,0
T_2 (s)	0,0
T_3 (s)	0,3
T_4 (s)	0,0
T_5 (s)	0,3
T_{fb} (s)	0,2
P_{Ref} (pu)	1,0
P_{MAX} (pu)	1,2
Fly Balls (pu)	1,0
Regulación (pu)	0,05

Tabla C2. Parámetro del gobernador de la IEEE. (Oscar Gutiérrez, 2009).

Anexo D

Conversión de los archivos de salida del ATPDraw al formato común estándar Comtrade de la IEEE.

El ATPDraw arroja un archivo de salida, el cual contiene las gráficas de cualquier simulación que se realice, como fase final para la investigación es necesario la conversión de este archivo de salida de extensión .PL4 al formato Comtrade. Para realizar ésta conversión se utilizará el software TOP (The Output Processor), que tiene como función de procesar la data de diferentes softwares de análisis de transitorios como el ATPDraw, así como tomar esos datos y lograr automáticamente la obtención de los 3 archivos obligatorios del Comtrade (.CFG, .DAT, .HDR), véase el capítulo 2.

A continuación se mostrarán los pasos solamente necesarios para la conversión del archivo .PL4:

- Se accesa al software TOP, luego de realizar la instalación con éxito, al hacer click al ícono de acceso se mostrará la siguiente pantalla inicial

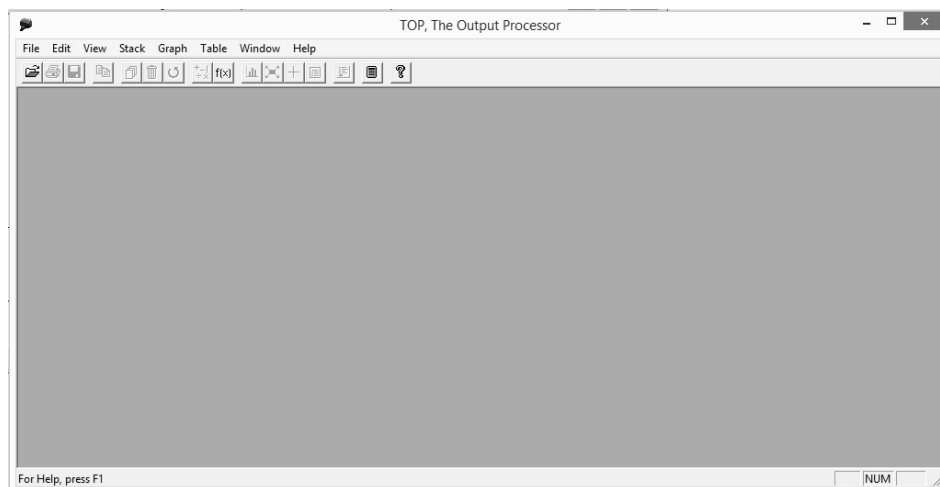


Figura. D1. Pantalla inicial del software TOP, *The Output Processor*

- Se hace click en **File | open** para ubicar el archivo de extensión .PL4 (generado por el ATPDraw, para luego seleccionar si el usuario lo desea cada una de las variables censadas en la implementación del software ATPDraw. La figura D2 muestra la pantalla de carga del archivo con cada una de las señales contenidas dentro del ATPDraw.

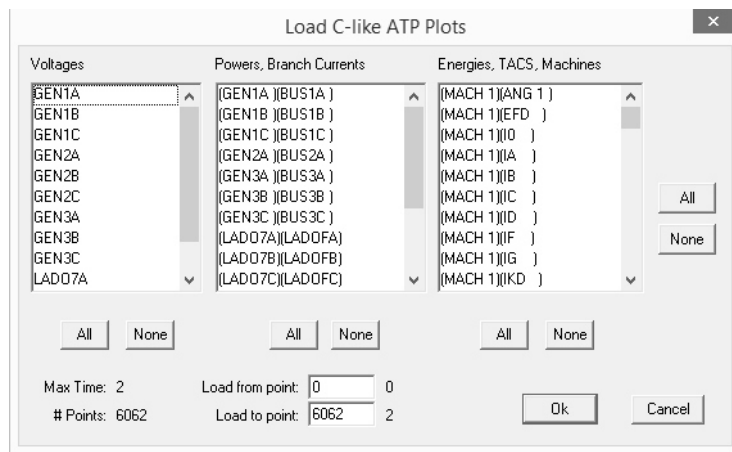


Figura. D2. Pantalla de carga y selección de las variables contenidas en el archivo, *The Output Processor*

Para seleccionar una variable de la pantalla de carga, sólo se hace click sobre una de ellas, si se desea seleccionar más de una variable se debe mantener presionada la tecla **shift** de su teclado y presionar el click izquierdo del ratón. Si se desea seleccionar todas las variables del sistema, como señales de voltaje, corriente, variables arrojadas por los TACS, sólo presione el botón **All** que se encuentra a la derecha de las tres ventanas que se muestran en la figura D2, ya dependiendo de la decisión del usuario se hace click sobre la pestaña **Ok** para confirmar la selección.

- Luego el usuario se debe dirigir a la barra de herramientas, específicamente a la dirección **Graph | New Graph**, al hacer click en esa dirección se mostrará una ventana llamada **Plot Quantity Select**, donde sólo basta con hacer click a la pestaña **All**, lo que se logra con ésta acción opcional es mostrar las gráficas pero ahora en el TOP, la figura D3 muestra la ventana emergente de ploteo y la figura D4 muestra la gráfica de la tensión del generador 1 del sistema de 9 barras que se implementó en el ATPDraw.

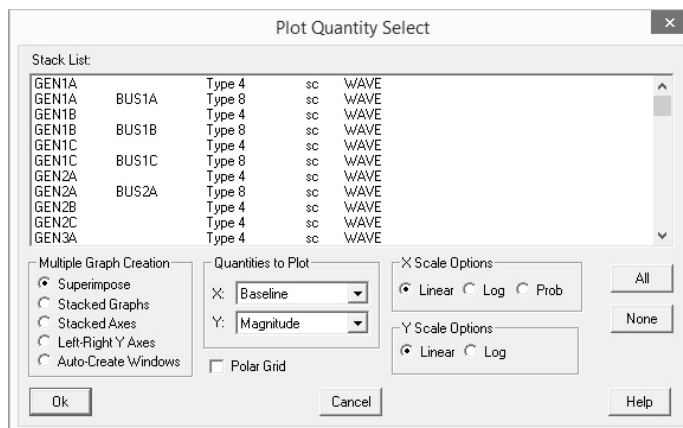


Figura. D3. Ventana Plot Quantity Select, *The Output Processor*

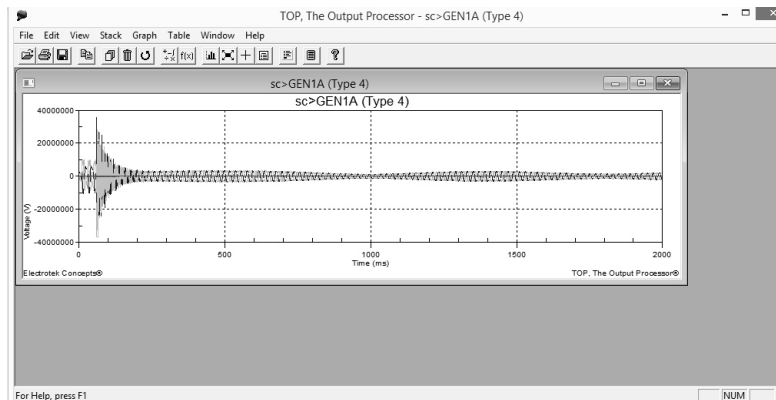


Figura. D4. Gráfica de la tensión en bornes del generador 1 del sistema 9 barras, *The Output Processor*

- La opción de mostrar la gráfica es opcional para la investigación, pero igual se muestra esa opción como comparación entre softwares diferentes que permiten al usuario poder hacer conversiones entre diferentes formatos. Como paso siguiente sólo debe hacer click en **Save** (guardar) y elegir el formato al cual se desea guardar toda la data, en este caso el formato Comtrade de la IEEE. La figura D5 muestra la ventana de guardado del archivo y la selección del nuevo formato.

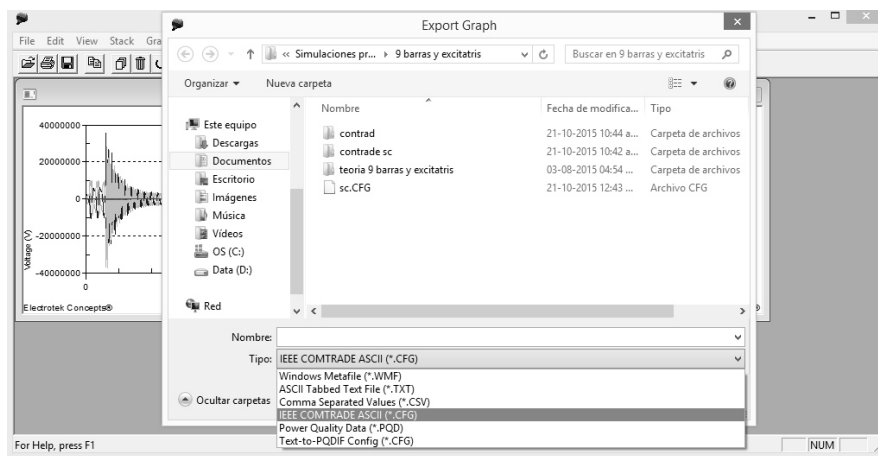


Figura. D5. Ventana de guardado del archivo con la selección del formato Comtrade, *The Output Processor*

- Verificar en la ubicación donde fue guardado el documento si se generó con éxito el archivo en formato Comtrade, el cual contiene 3 archivos .CFG, .DAT, .HDR. Estos son los archivos obligatorios que todo formato Comtrade debe contener, en el capítulo 2 se detalla de archivo adicional, el .INF (archivo información), pero la generación de éste archivo es opcional, ya que los 3 archivos nombrados anteriormente contienen toda la información necesario para el intercambio de data.