



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE CUENCA  
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**ESTUDIO DE EXCITATRICES PARA EL SISTEMA DE CONTROL DE LAS  
MÁQUINAS SÍNCRONAS DE POLOS SALIENTES**

Trabajo de titulación previo a la obtención  
del título de Ingeniero Eléctrico

**AUTORES: GEOVANNY RICARDO BERNAL ÑAMAGUA**

**BRYAM LEONARDO SIAVICHAY CABRERA**

**TUTOR: ING. JOSÉ MANUEL ALLER CASTRO, PhD.**

Cuenca - Ecuador

2022

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL  
TRABAJO DE TITULACIÓN**

Nosotros, Geovanny Ricardo Bernal Iñamagua con documento de identificación N° 0105429591 y Bryam Leonardo Siavichay Cabrera con documento de identificación N° 0106492820; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 22 de agosto de 2022

Atentamente,



Geovanny Ricardo Bernal Iñamagua  
0105429591



Bryam Leonardo Siavichay Cabrera  
0106492820

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL  
TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA  
SALESIANA**

Nosotros, Geovanny Ricardo Bernal Iñamagua con documento de identificación N° 0105429591 y Bryam Leonardo Siavichay Cabrera con documento de identificación N° 0106492820, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto técnico: “Estudio de excitatrices para el sistema de control de las máquinas síncronas de polos salientes”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 22 de agosto de 2022

Atentamente,

Geovanny Ricardo Bernal Iñamagua  
0105429591

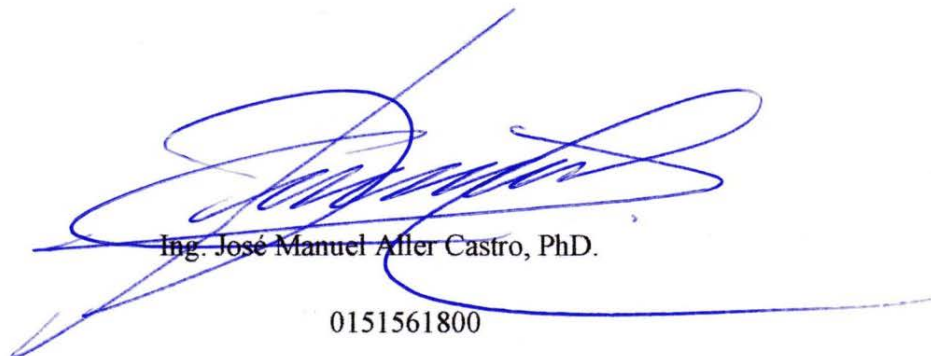
Bryam Leonardo Siavichay Cabrera  
0106492820

**CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, José Manuel Aller Castro con documento de identificación N° 0151561800, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ESTUDIO DE EXCITATRICES PARA EL SISTEMA DE CONTROL DE LAS MÁQUINAS SÍNCRONAS DE POLOS SALIENTES, realizado por Geovanny Ricardo Bernal Iñamagua con documento de identificación N° 0105429591 y por Bryam Leonardo Siavichay Cabrera con documento de identificación N° 0106492820, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 22 de agosto de 2022

Atentamente,



Ing. José Manuel Aller Castro, PhD.  
0151561800

## DEDICATORIA

*Este proyecto se lo dedico a mi papá Carlos Bernal, a mi mamá Rosa Iñamagua, a mis hermanos Luis y Roberto, a mi hermana Carmen Irene y mi cuñada Daysi ya que gracias a ellos tuve la fuerza y motivación, con sus experiencias han sido de mucha ayuda para tomar las decisiones correctas en mi vida en las diferentes circunstancias que se presentaron a lo largo de este camino para poder concluirlo, pero sobre todo a Dios y a la Virgen María Auxiliadora, por darme salud tanto a mí como a mi familia.*

*Geovanny Ricardo Bernal Iñamagua*

## DEDICATORIA

*Quiero dedicar de manera muy especial este proyecto de titulación a mi Padre Gonzalo Siavichay y a mi Madre Ubaldina Cabrera por estar siempre presente en todo momento de mi vida ofreciéndome su amor y esfuerzo para impulsarme a cumplir mi meta más anhelada. De la misma a mis hermanas Sonia y Tania las cuales con sus palabras de aliento hicieron de mi una persona de bien.*

*Bryam Leonardo Siavichay Cabrera*

## AGRADECIMIENTOS

*Agradecemos a Dios por darnos la vida y sabiduría necesaria para tomar las decisiones correctas en las diferentes situaciones que se han presentado y permitimos culminar nuestra carrera universitaria con éxito, a María Auxiliadora por guiarnos en los momentos más duros de este trayecto, a nuestros Padres, Hermanos, Hermanas por el apoyo recibido durante estos años de formación académica, al Dr. José Aller quien, con su conocimiento, experiencia, responsabilidad y paciencia nos ha ilustrado para el desarrollo y finalización del proyecto de titulación y a la Universidad Politécnica Salesiana por el apoyo educativo por parte de los docentes y personal administrativo, que gracias a ellos logramos cumplir a cabalidad y con éxito nuestro objetivo planteado.*

Cuenca, agosto de 2022.

*Geovanny Ricardo Bernal Iñamagua*

*Bryam Leonardo Siavichay Cabrera*

## RESUMEN

En este trabajo se presenta el desarrollo de un modelo dinámico de la máquina síncrona de polos salientes haciendo uso de los sistemas de excitación en DC, AC, ST, para el control de potencia reactiva (PQ) y control de voltaje (PV), utilizando la herramienta ATPDraw. La ventaja de realizar modelaciones de las excitatrices en ATP, se debe a que es una herramienta de simulación muy empleada por sus diversas prestaciones para diseñar sistemas eléctricos de potencia y es fácil su adaptación a las aplicaciones requeridas mediante el uso de MODELS y TACS. Otra ventaja de esta herramienta es que se puede utilizar comercialmente sin costos para el usuario.

El objetivo del presente trabajo consiste en validar el uso del programa ATPDraw en el estudio de los sistemas de excitación para el control de la máquina síncrona de polos salientes, comparado los resultados con otros programas similares (Simulink de Matlab), que han desarrollado los sistemas de excitación de acuerdo a bases generales presentadas en los estándares de IEEE. Adicionalmente, se analizan las fortalezas y debilidades del programa ATPDraw en el modelado de este tipo de sistemas de control de la máquina síncrona.



## ABSTRACT

This paper presents the development of a dynamic model of the salient pole synchronous machine, using the excitation systems in DC, AC, ST, for reactive power control (PQ) and voltage control (PV), using the ATPDraw program. The advantage of modeling the excitation system in ATP is that it is a simulation tool widely used for its various features to design electrical power systems and it is easy to adapt it to the required applications through the use of MODELS and TACS. Another advantage of this tool is that it can be used commercially at no cost to the user.

The objective of this work is to validate the use of the ATPDraw program in the study of excitation systems for the control of the salient-pole synchronous machine, comparing the results with other similar programs (Simulink of Matlab), which have developed the excitation systems according to general bases presented in the IEEE standards. Additionally, the strengths and weaknesses of the ATPDraw program in the modeling of this type of synchronous machine control systems are analyzed.

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>PROBLEMAS DE ESTUDIO Y OBJETIVOS</b>	<b>1</b>
1.1	Antecedentes . . . . .	1
1.2	Justificación . . . . .	4
1.3	Objetivos . . . . .	4
1.3.1	Objetivo General . . . . .	4
1.3.2	Objetivos Específicos . . . . .	5
<b>2</b>	<b>MODELADO MATEMÁTICO DE LA MÁQUINA SÍNCRONA DE POLOS SALIENTES</b>	<b>6</b>
2.1	Descripción de la máquina síncrona . . . . .	6
2.2	Valores por unidad (PU) . . . . .	8
2.2.1	Condicionantes de los valores PU . . . . .	9
2.3	Modelado matemático de la MSPS . . . . .	9
2.4	Transformación a vectores espaciales . . . . .	10
2.5	Transformación a coordenadas rotóricas . . . . .	11
2.6	Voltaje detrás de la reactancia . . . . .	14
2.7	Diagrama fasorial en conversión generador . . . . .	15
<b>3</b>	<b>SISTEMAS DE CONTROL DE EXCITACIÓN Y DIAGRAMAS DE BLOQUES DE LAS MSPS</b>	<b>17</b>
3.1	Sistemas de excitación . . . . .	17
3.2	Tipos de sistemas de excitación . . . . .	18
3.2.1	Sistemas de Excitación DC . . . . .	19
3.2.2	Sistemas de Excitación AC . . . . .	20
3.2.3	Sistemas de Excitación ST . . . . .	22
3.3	Modelado de los sistemas de excitación . . . . .	24
3.3.1	Modelado de los componentes del sistema de excitación . . . . .	24
3.3.1.1	Excitador DC excitado por separado . . . . .	24
3.3.1.2	Excitador DC autoexcitado . . . . .	29
3.3.1.3	Excitadores y rectificadores de AC . . . . .	30
3.3.1.4	Modelo del sistema tipo ST1A . . . . .	33
3.3.1.5	Amplificadores . . . . .	33

3.3.1.6 Circuito estabilizador del sistema de excitación . . . . 34

**4 PROGRAMA ATP -EMTP Y CONFIGURACIÓN PREVIA A LA SIMULACIÓN 36**

4.1 ATP-EMTP . . . . . 36

4.2 Licencia ATP-EMTP . . . . . 37

4.3 Estructura de archivos para la entrada de datos en ATP-EMTP . . . 37

4.3.1 Formas generales . . . . . 38

4.4 Ventanas de ATPDraw . . . . . 39

4.5 Elementos de la barra de menú . . . . . 39

4.6 MODELS . . . . . 42

4.6.1 Ventajas de los MODELS . . . . . 43

4.6.2 Características de los MODELS . . . . . 43

4.7 Definiciones de MODELS . . . . . 44

4.7.1 Declaraciones . . . . . 44

4.7.2 Directivas . . . . . 45

4.7.3 Procedimiento . . . . . 45

4.8 Interfaz de un MODEL en ATPDraw . . . . . 45

4.9 TACS . . . . . 46

4.9.1 Uso de losTACS . . . . . 46

4.9.2 Variables . . . . . 47

4.10 Configuración de ATPDraw previo a la simulación . . . . . 47

**5 SIMULACIONES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS 49**

5.1 Simulación de la MSPS con los sistemas de excitación . . . . . 49

5.2 Modelo circuital y algoritmo de la MSPS . . . . . 49

5.2.1 Diseño del modelo circuital del sistema . . . . . 49

5.2.2 Algoritmo de la MSPS en MODELS . . . . . 52

5.3 Modulo de Voltaje, Corriente y Potencia en la MSPS . . . . . 55

5.4 Simulación de la MSPS . . . . . 55

5.4.1 Voltaje directo y de cuadratura de la MSPS . . . . . 55

5.4.2 Corriente directa y de cuadratura de la MSPS . . . . . 56

5.4.3 Velocidad angular ( $w_m$ ) . . . . . 57

5.4.4 Ángulo  $\theta$  . . . . . 57

5.4.5 Voltajes instantáneo en el estator . . . . . 58

5.4.6 Mediciones antes de la reactancia . . . . . 59

5.5 Resultados de la simulación de la MSPS . . . . . 59

5.6 Sistemas de excitación de la MSPS . . . . . 60

5.7 Sistema de excitación DC . . . . . 60

5.7.1 Modelo DC1A en ATPDraw . . . . . 61

5.7.2	Control de potencia Reactiva mediante el modelo DC1A . . . .	61
5.7.2.1	Modulo controlador de potencia reactiva en el modelo DC1A . . . . .	62
5.7.3	Simulación del modelo DC1A control PQ . . . . .	64
5.7.3.1	Simulación con $Q_{ref} = 1,5$ . . . . .	64
5.7.3.2	Simulación con $Q_{ref} = 2$ . . . . .	65
5.7.4	Comparación del modelo DC1A en ATPDraw y Simulink control PQ . . . . .	67
5.7.5	Control de voltaje mediante el modelo DC1A . . . . .	68
5.7.5.1	Modulo controlador del voltaje en el modelo DC1A . . . . .	69
5.7.6	Simulación del modelo DC1A control PV . . . . .	70
5.7.6.1	Simulación con $V_{ref} = 1,1$ . . . . .	71
5.7.6.2	Simulación con $V_{ref} = 1,2$ . . . . .	72
5.7.7	Comparación del modelo DC1A en ATPDraw y Simulink control PV . . . . .	73
5.8	Sistema de excitación AC . . . . .	74
5.8.1	Modelo AC1A en ATPDraw . . . . .	76
5.8.2	Control de potencia reactiva mediante el modelo AC1A . . . .	77
5.8.2.1	Modulo controlador de potencia reactiva en el modelo AC1A . . . . .	78
5.8.3	Simulación del modelo AC1A control PQ . . . . .	80
5.8.3.1	Simulación con $Q_{ref} = 1,5$ . . . . .	80
5.8.3.2	Simulación con $Q_{ref} = 2$ . . . . .	82
5.8.4	Comparación modelo AC1A de ATPDraw y Simulink control PQ . . . . .	84
5.8.5	Control de voltaje mediante el modelo AC1A . . . . .	84
5.8.5.1	Modulo controlador de voltaje en el modelo AC1A . . . . .	85
5.8.6	Simulación del modelo AC1A control PV . . . . .	86
5.8.6.1	Simulación con $V_{ref} = 1,1$ . . . . .	87
5.8.6.2	Simulación con $V_{ref} = 1,2$ . . . . .	88
5.8.7	Comparación modelo AC1A de ATPDraw y Simulink control PV . . . . .	89
5.9	Sistema de excitación ST . . . . .	90
5.9.1	Modelo ST1A en ATPDraw . . . . .	91
5.9.2	Control de potencia Reactiva mediante el modelo ST1A . . . .	92
5.9.2.1	Modulo controlador de potencia reactiva en el modelo ST1A . . . . .	93
5.9.3	Simulación del modelo ST1A control PQ . . . . .	94
5.9.3.1	Simulación con $Q_{ref} = 1,5$ . . . . .	94

5.9.3.2	Simulación con $Q_{ref} = 2$ . . . . .	96
5.9.4	Comparación modelo ST1A de ATPDraw y Simulink control PQ . . . . .	97
5.9.5	Control de voltaje mediante el modelo ST1A . . . . .	98
5.9.5.1	Modulo controlador de voltaje en el modelo ST1A . . . . .	99
5.9.6	Simulación del modelo ST1A control PV . . . . .	100
5.9.6.1	Simulación con $V_{ref} = 1,1$ . . . . .	101
5.9.6.2	Simulación con $V_{ref} = 1,2$ . . . . .	102
5.9.7	Comparación modelo ST1A de ATPDraw y Simulink control PV . . . . .	103
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>105</b>
6.1	Conclusiones . . . . .	105
6.2	Recomendaciones . . . . .	106
<b>ANEXOS</b>		<b>109</b>
Anexo 1:	Modelo dinámico de la MSPS . . . . .	110
Anexo 2:	Modulo de mediciones . . . . .	112
Anexo 3:	MSPS y sistema de excitación DC1A control PQ . . . . .	113
Anexo 4:	MSPS y sistema de excitación DC1A control PV . . . . .	114
Anexo 5:	MSPS y sistema de excitación AC1A control PQ . . . . .	115
Anexo 6:	MSPS y sistema de excitación AC1A control PV . . . . .	116
Anexo 7:	MSPS y sistema de excitación ST1A control PQ . . . . .	117
Anexo 8:	MSPS y sistema de excitación ST1A control PV . . . . .	118

## ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Forma constructiva de la MSPS . . . . .	7
2.2	Forma constructiva de la máquina síncrona de rotor liso . . . . .	7
2.3	Estatore de la máquina síncrona . . . . .	8
2.4	Rotor de polos salientes . . . . .	8
2.5	Modelo en coordenadas $dqf$ de la máquina síncrona [1]. . . . .	12
2.6	Modelo circuital por fase de la MSPS . . . . .	15
2.7	Diagrama fasorial de la MSPS en la conversión de generador [1]. . . . .	16
3.1	Diagrama funcional de bloques para un sistema de excitación y control de generador síncrono [2]. . . . .	17
3.2	Sistema de excitación DC con regulador de voltaje amplidina [2]. . . . .	19
3.3	Sistema de excitación AC del rectificador con alternador controlado por campo [2]. . . . .	21
3.4	Sistema de excitación AC sin escobillas [2]. . . . .	22
3.5	Sistema de excitación ST con fuente potencial [2]. . . . .	23
3.6	Excitador DC excitado por separado [2]. . . . .	24
3.7	Curva carga-saturación del excitador [2]. . . . .	26
3.8	Diagrama de bloques de un excitador de corriente continua [3]. . . . .	28
3.9	Excitatriz de corriente continua autoexcitado [3]. . . . .	29
3.10	Diagrama de bloques de un excitador de corriente alterna [3]. . . . .	30
3.11	Características de saturación del excitador de CA [2]. . . . .	31
3.12	Modelo propuesto en la regulación del rectificador [3]. . . . .	32
3.13	Sistema de control de excitación ST1A [2]. . . . .	33
3.14	Modelo de amplificador [3]. . . . .	34
3.15	Modelo Amplidyne [3]. . . . .	34
3.16	Transformador estabilizador del sistema de excitación [2]. . . . .	35
4.1	Interfaz ATPDraw con otros programas del paquete ATP-EMTP . . . . .	38
4.2	Ventana principal ATPDraw con sus apartados [4] . . . . .	39
4.3	Menú File . . . . .	40
4.4	Menú ATP . . . . .	40
4.5	Menú Edit . . . . .	41
4.6	Menú Tools . . . . .	41

4.7	Menú View . . . . .	42
4.8	Menú Windows . . . . .	42
4.9	Menú Help . . . . .	42
4.10	Sintaxis utilizada para la definición de un modelo . . . . .	44
4.11	Icono del MODEL . . . . .	45
4.12	Estructura de sintaxis del MODEL . . . . .	46
4.13	Valores en PU . . . . .	48
5.1	Diseño del modelo dinámico de la MSPS en ATPDraw . . . . .	51
5.2	Modelo circuital de Campo . . . . .	51
5.3	Modulo de mediciones . . . . .	55
5.4	Voltaje directo y de cuadratura en la MSPS . . . . .	56
5.5	Corriente directa y de cuadratura en la MSPS . . . . .	56
5.6	Velocidad angular $w_m$ respecto al tiempo . . . . .	57
5.7	Ángulo $\theta$ respecto al tiempo . . . . .	58
5.8	Voltajes $e_a, e_b, e_c$ . . . . .	58
5.9	Señales de voltaje, corriente, potencia activa y reactiva . . . . .	59
5.10	Excitador de corriente continua tipo DC1A [5] . . . . .	60
5.11	Diseño en ATPDraw del modelo DC1A . . . . .	61
5.12	Model del controlador . . . . .	63
5.13	Potencia reactiva referencia y del sistema ( $Q_{ref} = 1,5$ ) . . . . .	64
5.14	Respuesta del modelo DC1A . . . . .	65
5.15	Señales que ingresan al sistema . . . . .	65
5.16	Potencia reactiva de referencia y del sistema ( $Q_{ref} = 2$ ) . . . . .	66
5.17	Respuesta del modelo DC1A . . . . .	66
5.18	Señales que ingresan al sistema . . . . .	67
5.19	Comparación del modelo DC1A en ATPDraw y Simulink control PQ . . . . .	68
5.20	Voltaje de referencia y del sistema ( $V_{ref} = 1,1$ ) . . . . .	71
5.21	Respuesta del modelo DC1A control PV . . . . .	72
5.22	Voltaje de referencia y del sistema ( $V_{ref} = 1,2$ ) . . . . .	72
5.23	Respuesta del modelo DC1A control PV . . . . .	73
5.24	Comparación modelo DC1A de ATPDraw y Simulink control PV . . . . .	74
5.25	Excitador rotativo de AC con modelo de rectificador no controlado [5]. . . . .	75
5.26	Sistema de excitación AC1C con el uso rectificadores no controlados y retroalimentación de la corriente de campo del excitador [5]. . . . .	76
5.27	Diseño en ATPDraw del modelo AC1A . . . . .	77
5.28	Model del controlador . . . . .	80
5.29	Potencia reactiva referencia y del sistema ( $Q_{ref} = 1,5$ ) . . . . .	81
5.30	Respuesta del modelo AC1A . . . . .	81

5.31	Señales que ingresan al sistema . . . . .	82
5.32	Potencia reactiva de referencia y del sistema ( $Q_{ref} = 2$ ) . . . . .	82
5.33	Respuesta del modelo AC1A . . . . .	83
5.34	Señales que ingresan al sistema . . . . .	83
5.35	Comparación del modelo AC1A en ATPDraw y Simulink control PQ . . . . .	84
5.36	Voltaje de referencia y del sistema ( $V_{ref} = 1,1$ ) . . . . .	87
5.37	Respuesta del modelo AC1A control PV . . . . .	87
5.38	Voltaje de referencia y del sistema ( $V_{ref} = 1,2$ ) . . . . .	88
5.39	Respuesta del modelo AC1A control PV . . . . .	89
5.40	Comparación del modelo AC1A en ATPDraw y Simulink control PV . . . . .	90
5.41	Excitador estático tipo ST1A [5]. . . . .	91
5.42	Diseño en ATPDraw del modelo ST1A . . . . .	91
5.43	Potencia reactiva referencia y del sistema ( $Q_{ref} = 1,5$ ) . . . . .	94
5.44	Respuesta del modelo ST1A . . . . .	95
5.45	Señales que ingresan al sistema . . . . .	95
5.46	Potencia reactiva de referencia y del sistema ( $Q_{ref} = 2$ ) . . . . .	96
5.47	Respuesta del modelo ST1A . . . . .	97
5.48	Señales que ingresan al sistema . . . . .	97
5.49	Comparación modelo ST1A de ATPDraw y Simulink control PQ . . . . .	98
5.50	Voltaje de referencia y del sistema ( $V_{ref} = 1,1$ ) . . . . .	101
5.51	Respuesta del modelo DC1A control PV . . . . .	102
5.52	Voltaje de referencia y del sistema ( $V_{ref} = 1,2$ ) . . . . .	102
5.53	Respuesta del modelo DC1A control PV . . . . .	103
5.54	Comparación modelo ST1A de ATPDraw y Simulink control PV . . . . .	104
6.1	MSPS y sistema de excitación DC1A control PQ. . . . .	113
6.2	MSPS y sistema de excitación DC1A control PV. . . . .	114
6.3	MSPS y sistema de excitación AC1A control PQ. . . . .	115
6.4	MSPS y sistema de excitación AC1A control PV. . . . .	116
6.5	MSPS y sistema de excitación ST1A control PQ. . . . .	117
6.6	MSPS y sistema de excitación ST1A control PV. . . . .	118



# ÍNDICE DE TABLAS

5.1	Parámetros usados en la MSPS . . . . .	52
5.2	Algoritmo de inicialización . . . . .	52
5.3	Algoritmo de HISTORY . . . . .	53
5.4	Algoritmo de Inicialización de Variables . . . . .	53
5.5	Algoritmo del ejecutable . . . . .	54
5.6	Datos modelo DC1A control potencia reactiva . . . . .	62
5.7	Algoritmo del transductor control PQ en el modelo DC1A . . . . .	63
5.8	Valores referenciales de potencia reactiva en el modelo DC1A . . . . .	64
5.9	Datos modelo DC1A control de voltaje . . . . .	69
5.10	Algoritmo del transductor control PV en el modelo DC1A . . . . .	70
5.11	Valores de referencia para el voltaje en el modelo DC1A . . . . .	70
5.12	Datos modelo AC1A control potencia reactiva . . . . .	78
5.13	Algoritmo del transductor control PQ en el modelo AC1A . . . . .	79
5.14	Valores de referencia para la potencia reactiva en el modelo AC1A . . . . .	80
5.15	Datos modelo AC1A control de voltaje . . . . .	85
5.16	Algoritmo del transductor control PV en el modelo DC1A . . . . .	86
5.17	Valores de referencia para el voltaje en el modelo AC1A . . . . .	86
5.18	Datos modelo ST1A control potencia reactiva . . . . .	92
5.19	Algoritmo del transductor control PQ en el modelo ST1A . . . . .	93
5.20	Valores referenciales de potencia reactiva en el modelo ST1A . . . . .	94
5.21	Datos modelo ST1A control de voltaje . . . . .	99
5.22	Algoritmo del transductor control PV en el modelo ST1A . . . . .	100
5.23	Valores referenciales de voltaje en el modelo ST1A . . . . .	100

## Glosario

**AC** Corriente alterna.

**ATP** Alternative Transients Program.

**DC** Corriente continua.

**EMTP** Electromagnetic Transients Program.

**f.e.m** Fuerza electromotriz.

**f.m.m** Fuerza magnetomotriz.

**IEEE** Institute of Electrical and Electronics Engineers.

**MSPS** Máquina síncrona de polos salientes.

**PU** Por unidad.

**ST** Excitación estática.

**TACS** Transient Analysis of Control Systems.

# CAPÍTULO 1

## PROBLEMAS DE ESTUDIO Y OBJETIVOS

### 1.1. Antecedentes

Las máquinas síncronas son una de las familias más importantes de los convertidores electromecánicos. Gran parte de la energía eléctrica que se utiliza es producida por los generadores síncronos [1]. De acuerdo al sistema mecánico del accionamiento, las maquinas síncronas pueden ser de rotor liso cuando se requiera operar a velocidades altas, o con rotor de polos salientes para velocidades medias o bajas [1].

La máquina sincrónica es considerada un convertidor electromecánico de energía compuesta de una pieza giratoria denominada rotor o campo, en donde la bobina se excita mediante la inyección de una DC , y otra pieza estática denominada estator, en sus bobinas circula AC. La AC que recorre los enrollados del estator generan un campo magnético rotatorio y estas a su vez hacen que gire en el entrehierro de la máquina siguiendo la frecuencia angular de las corrientes del estator. El campo magnético producido por la corriente de campo es constante y debido al giro mecánico, produce un campo rotario que gira a la velocidad mecánica [1]. De esta forma, en régimen permanente ambos campos giran a la misma velocidad y por esta razón a estos convertidores rotativos se les denomina máquina sincrónicas.

El campo originado en el rotor viene determinado por la corriente de excitación y es aproximadamente constante en condiciones normales de operación. En cambio, el campo creado en el estator es función de la tensión aplicada en estas bobinas y a la carga eléctrica aplicada al generador (reacción de armadura) [6].

Los sistemas de excitación de las máquinas síncronas se vienen estudiando durante décadas. Tuvo su primer cambio dramático en la década de los 50, como resultado

de los avances en los dispositivos semiconductores de alta potencia, generando la sustitución de reguladores electromecánicos rudimentarios, basados en conmutadores de corriente continua, por rectificadores controlados basados en silicio y controladores analógicos [7, 8]. Otro cambio ocurrió en la década de los 80, cuando los controladores migraron de la tecnología analógica a la digital [9]. En los últimos años, la evolución de la tecnología dentro del área de electrónica de potencia con la tecnología inalámbrica está generando que existan más innovaciones y posibilidades en el área de aplicación.

La función objetivo del sistema de excitación es proporcionar la corriente de campo adecuada para mantener el módulo de la tensión o la inyección de potencia reactiva en una barra de generación en un rango de tolerancia especificada. Una de las características importantes que tiene el sistema de control es su cualidad de reaccionar con la mayor velocidad a las variaciones de tensión que se producen en la operación de la máquina controlada [10].

Los sistemas de excitación DC representan los primeros dispositivos que abarcan las décadas comprendidas entre los años 20 y 60. Fueron sustituidos a mediados de la década de 60 por excitatrices AC [3]. Los reguladores de voltaje para los sistemas en DC van desde el tipo reostático, temprano de acción no continua, hasta los sistemas posteriores que utilizan muchas etapas de amplificadores magnéticos y amplificadores giratorios [11]. En la actualidad los sistemas de excitación de DC se están perdiendo paulatinamente, ya que están siendo reemplazados por sistemas AC o ST. La amplidina en los sistemas de excitación DC ocasiona cambios ascendentes en el campo del excitador en un esquema de "buck-boost". La salida del excitador proporciona el resto de su propio campo por autoexcitación. Si el regulador de amplidina está fuera de servicio, el campo excitador está en control manual y se cambia mediante el ajuste del reóstato de campo [3].

Uno de los primeros sistemas de excitación en AC usaban una fusión de amplificadores magnéticos y giratorios como reguladores [11]. Gran parte de los sistemas nuevos usan reguladores amplificadores electrónicos. Por lo tanto, los sistemas de excitación de AC pueden tener diferentes formas, dependiendo de la predisposición que tenga el rectificador. Los sistemas de excitación de esta categoría utilizan alternadores (máquinas de AC) como fuentes de excitación del generador principal. Por lo general, el excitador está en el mismo eje que el generador de la turbina. La salida de AC del excitador se rectifica mediante rectificadores controlados o no controlados para producir la corriente continua necesaria para el campo del generador [3].

Dentro de la excitación estática (ST) se considera que todos los componentes de

estos sistemas son estáticos o estacionarios. Los rectificadores estáticos, controlados o no controlados, suministran la corriente de excitación directamente al campo del generador síncrono principal a través de anillos deslizantes [1]. El suministro de energía a los rectificadores se realiza desde el generador principal, a través de un transformador para bajar el voltaje a un nivel apropiado, o en algunos casos desde devanados auxiliares en el generador [3].

Con el tiempo nace la necesidad de modelar los distintos tipos de excitatrices siendo útiles cuando los sistemas no existen o son demasiado costosos. Para la introducción de nuevos conceptos o estrategias con el cambio de valores en los parámetros se lo puede realizar con mayor velocidad en una simulación que reduce de forma considerable los gastos y tiempos a comparación de cuando se realiza experimentos o estudios en el sistema [2].

Los softwares de computadora usados dentro de la simulación contienen dos subdivisiones principales de propósito general y de aplicación específica. La subdivisión de propósito general son paquetes cuya orientación está dedicada al empleo de ecuaciones diferenciales y algebraicas en donde se puede usar a ODEPAK y ACSL. Mientras que la otra subdivisión de los paquetes de aplicación específica proporcionan un conjunto de plantillas o módulos que se encuentran ya predefinidas y abren un mundo de posibilidades en donde el usuario puede crear sus plantillas de acuerdo al proyecto que vaya a ser simulado, uno de los programas más usados para esta subdivisión son EMTP y PSS/E [2].

Electromagnetic Transients Program (EMTP) "fue desarrollado en el dominio público en la Bonneville Power Administration (BPA) de Portland, Oregón, antes de la iniciativa comercial en 1984 por el Grupo de Coordinación del Desarrollo de EMTP y el Electric Power Research Institute (EPRI) de Palo Alto, California. El nacimiento del ATP se remonta a principios de 1984, cuando los doctores Meyer y Liu no aprobaron la propuesta de comercialización del EMTP de BPA y el Dr. Meyer, utilizando su tiempo personal, inició un nuevo programa a partir de una copia del EMTP de dominio público de BPA. El Programa de Transitorios Alternativos (ATP) es uno de los sistemas de programas universales más utilizados para la simulación digital de fenómenos transitorios de naturaleza electromagnética y electromecánica en sistemas de energía eléctrica. Con el programa se pueden simular redes complejas y sistemas de control de estructura arbitraria"[4].

El desarrollo continuo de paquetes de software adecuados hace que la simulación de problemas de ingeniería energética sea cada vez más eficaz. Sin embargo, estas

herramientas de análisis se diferencian considerablemente entre sí desde el punto de vista de la aplicabilidad a un problema especial. SIMULINK es una toolbox de MATLAB, que se puede utilizar para simular un amplio espectro de sistemas dinámicos, y ATP-EMTP, es un software específico para simular problemas transitorios del sistema eléctrico [12].

## **1.2. Justificación**

La presente investigación se enfocará en estudiar los sistemas de excitación para el control de las máquinas síncronas para analizar el comportamiento de los tres tipos: DC, AC y ST . En el estudio se enfocará tanto el control de tensión como el de potencia reactiva.

Este estudio es de gran importancia debido que al operar de manera eficiente la excitatriz de las máquinas síncronas, será beneficioso ya que los tiempos de control se podrán reducir para obtener a la salida el voltaje y potencia reactiva requerida, de acuerdo con las variaciones de la carga. La comunidad científica es uno de los principales grupos objetivos de esta investigación, puesto que el desarrollo del sistema de control de excitatriz en AC, DC y ST puede apuntar a mejorar la operación y respuestas tanto de voltaje como de potencia reactiva en las máquinas síncronas de polos salientes. Los investigadores de la UPS también se verán beneficiados al contar con una herramienta conveniente para la modelación de estos sistemas de control.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo General**

Modelar y analizar los diferentes tipos de excitatrices utilizadas en el control práctico de las MSPS utilizando la herramienta ATP - EMTP

### 1.3.2. Objetivos Específicos

- Desarrollar modelos de excitatrices DC para MSPS en ATPDraw utilizando TACS y MODELS.
- Desarrollar modelos de excitatrices AC para MSPS en ATPDraw utilizando TACS y MODELS.
- Desarrollar modelos de excitatrices estáticas para MSPS en ATPDraw utilizando TACS y MODELS.
- Determinar las posibilidades del programa ATP - EMTP (ATPDraw) para controlar tensión y potencia reactiva en MSPS conectada a la red.

## CAPÍTULO 2

### MODELADO MATEMÁTICO DE LA MÁQUINA SÍNCRONA DE POLOS SALIENTES

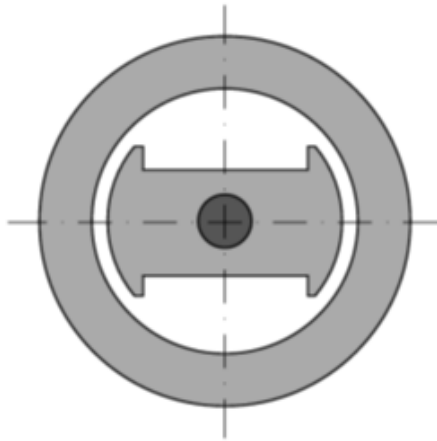
#### 2.1. Descripción de la máquina síncrona

Las máquinas síncronas se consideran que son el alma de los sistemas de potencia, siendo las más comunes y por ende las más importantes de los sistemas de potencia. La máquina síncrona es un convertidor electromecánico de energía con una pieza giratoria llamada 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 [1].

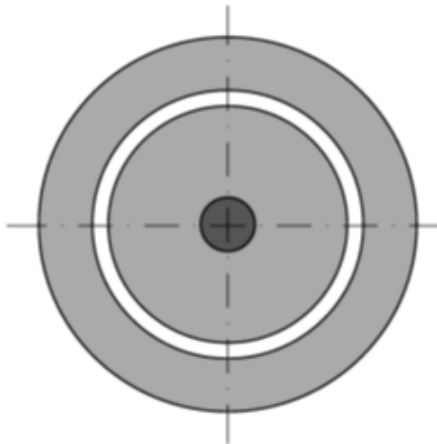
La construcción de las máquinas síncronas es más costosa a comparación de los motores de inducción, una de las ventajas más importantes que tienen las máquinas síncronas es la alta eficacia cuando se llega a valores altos de potencia nominal [2]. De acuerdo a los usos que se vayan a dar a dichas máquinas estas pueden ser:

- **Rotor de Polos Salientes:** Las máquinas de polos salientes tienen muchos polos (más de 4 polos) y baja velocidad. Su estator es cilíndrico y su rotor tiene polos salientes. Como alternadores se usan acopladas a turbinas hidráulicas o a motores Diesel [13].
- **Rotor Liso:** Las máquinas de rotor liso tienen pocos polos (2 o 4 polos) y alta velocidad. En estas máquinas tanto el estator como el rotor son cilíndricos, por lo que su entrehierro es uniforme. Como alternadores se usan acopladas a turbinas térmicas. Al girar muy rápido los conductores del rotor sufren una fuerte fuerza centrífuga [13].





**Figura 2.1:** Forma constructiva de la MSPS



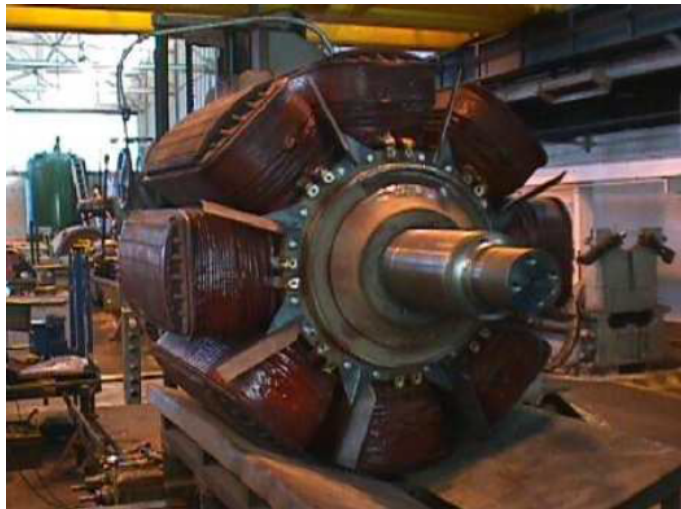
**Figura 2.2:** Forma constructiva de la máquina síncrona de rotor liso

Dentro del funcionamiento en el régimen permanente de la máquina síncrona, la velocidad mecánica del rotor termina siendo la misma velocidad angular que tiene el campo magnético rotatorio generado por el estator. Las condiciones que debe cumplir sobre las bobinas o conductores deben ser que no se induzcan fuerzas electromotrices.

Para la producción de f.m.m en el rotor se necesita que se introduzca corriente de una fuente externa en la bobina. Obteniendo así dos campos magnéticos rotatorios los cuales giran a igual velocidad, siendo producidos por el rotor y estator. Los campos se interrelacionan entre sí, lo cual genera un par eléctrico medio y se obtiene el proceso de conversión electromecánica de energía [1].



**Figura 2.3:** Estator de la máquina síncrona



**Figura 2.4:** Rotor de polos salientes

## 2.2. Valores por unidad (PU)

Debido a las diferentes magnitudes y unidades que existen en la resolución de problemas dentro de la ingeniería es complicado trabajar o resolver problemas, para esto se usa los valores en PU. Una magnitud física se expresa en PU cuando el valor general se divide por su valor base, estos valores deben ser iguales en las dimensiones que correspondan a la magnitud física. Por tal motivo se considera que los valores en PU no tienen dimensión, es decir magnitud física. [13].

### 2.2.1. Condicionantes de los valores PU

- Los valores en PU permite simplificar solo si las magnitudes se expresan en forma relativa respecto a una referencia que se denomina magnitud base.
- Las magnitudes base no se eligen de forma arbitraria, pues están relacionadas entre sí por las fórmulas de los circuitos eléctricos o dependiendo de la conexión de los mismos (estrella o triangulo).

El uso de los valores en PU en los circuitos AC trifásicos, como puede ser el inducido de una máquina, en donde se usa los valores base que pueden ser:

- **Potencia base**  $S_b$ : Expresa en PU la potencia activa, reactiva y aparente.
- **Voltaje de línea base**  $V_{bL}$ : Expresa en PU los voltajes y f.e.m de línea.
- **Voltaje de fase fase**  $V_b$ : Expresa en PU los voltajes, f.e.m y las diferentes caídas de tensión por fase.
- **Corriente de línea base**  $I_{bL}$ : Expresa en PU las corrientes de línea.
- **Corriente de fase base**  $I_b$ : Expresa en PU las corrientes de fase.
- **Impedancia base**  $Z_b$ : Expresa en PU las resistencias, reactancias e impedancias.

### 2.3. Modelado matemático de la MSPS

Con el comportamiento e interpretación de los ejes de la MSPS en el sistema de coordenadas que corresponden a las bobinas reales se cumple con la siguiente expresión:

$$[V_{abc}] = [R_{abc}] [i_{abc}] + \frac{d}{dt} [\lambda_{abc}] \quad (2.1)$$

donde:

$$[\lambda_{abc}(\theta, i)] = [L_{abc}(\theta)] [i_{abc}]$$

Sustituyendo en la ecuación 2.1 se obtiene la siguiente expresión en coordenadas primitivas.

$$[V_{abc}] = [R_{abc}] [i_{abc}] + [L_{abc}] p [i_{abc}] + \dot{\theta} [\tau_{abc}] [i_{abc}] \quad (2.2)$$

Las ecuaciones diferenciales mostradas 2.2 representa la conducta dinámica de las bobinas de la máquina sincrónica en las coordenadas primitivas. Estas ecuaciones que componen el sistema se puede expresar de forma canónica como lo siguiente:

$$p [i_{abc}] = [L_{abc}]^{-1} \left\{ [V_{abc}] - [[R_{abc}] + \dot{\theta} [\tau_{abc}] [i_{abc}]] \right\} \quad (2.3)$$

Mediante el uso de métodos numéricos de integración se encuentra la solución al sistema 2.3. Uno de los principales inconvenientes que se tiene al evaluar es invertir la matriz de inductancias de la máquina en cada paso de integración, por la dependencia que existe entre la posición angular del rotor con respecto a la matriz de inductancias [1].

Por tal motivo a lo largo de varios años se han desarrollado cambios de coordenadas que reducen el problema para acelerar en tiempo de cálculo para interpretar con facilidad la conducta estática y dinámica de la máquina síncrona [1].

## 2.4. Transformación a vectores espaciales

Para realizar la transformación de vectores espaciales en la ecuación 2.2 la cual representa la conducta en coordenadas primitivas de la máquina síncrona, se recomienda separar las ecuaciones tanto del rotor como del estator:

$$[v_e] = [R_e][i_e] + p \{ [L_{fe}][i_e] + L_f i_f \} \quad (2.4)$$

Donde:

$$\vec{x}_s = \sqrt{\frac{2}{3}} (1 + \alpha + \alpha^2) [x_{abc}]^T \quad (2.5)$$

El modelo supone una máquina lineal y simétrica, y sin secuencia cero, los efectos de la ranura del estator, así como todos los armónicos espaciales introducidos por la distribución del devanado y el cambio de reluctancia de los polos con términos de Fourier por encima del término de segundo orden [14].

Aplicando la transformación de vectores a la ecuación 2.4 se obtiene:

$$v_e = R_e \mathbf{i}_e + p \left\{ (L_{1e} + M_{1e}) \mathbf{i}_e + \frac{3}{2} M_{2e} e^{j2\theta} \mathbf{i}_e^* + \sqrt{\frac{3}{2}} M_{ef} e^{j\theta} i_f \right\} \quad (2.6)$$

Resolviendo la expresión 2.5 para una máquina síncrona de polos salientes trifásica se tiene lo siguiente:

$$V_e = \sqrt{\frac{2}{3}} (V_a + \alpha V_b + \alpha^2 V_c) \quad (2.7)$$

Donde:

$$\alpha = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

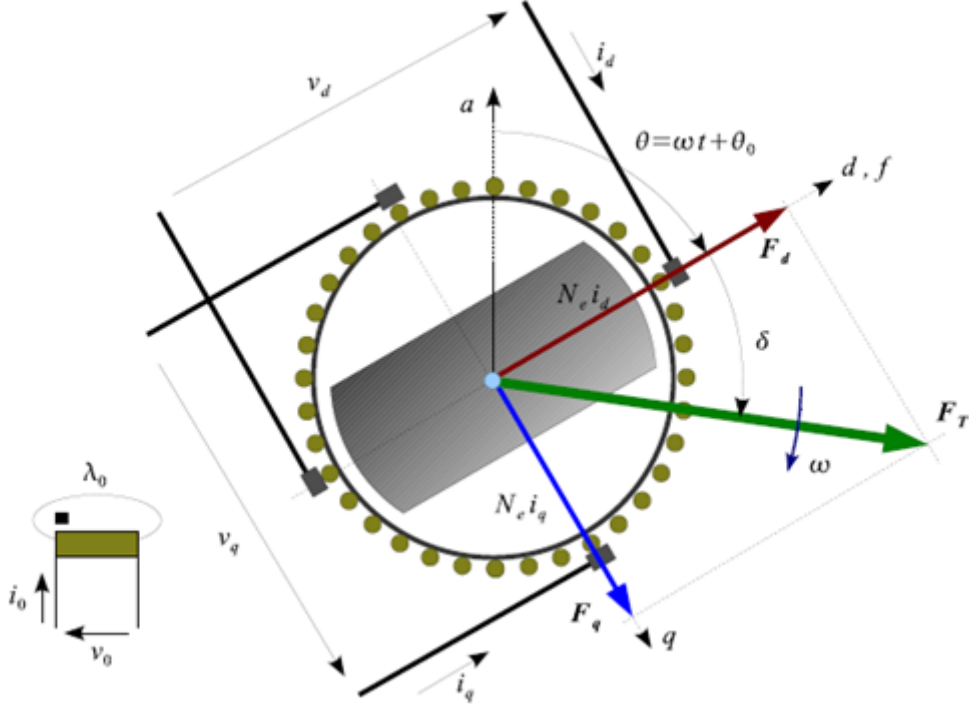
$$\alpha^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

## 2.5. Transformación a coordenadas rotóricas

En la máquina síncrona, el campo magnético rotatorio producido por las fuerzas magnetomotrices de los devanados estáticos, gira a la velocidad síncrona  $w_e$ . El rotor de la máquina también gira a la velocidad síncrona  $w_r = w_e$ . Por esta razón es conveniente referir las ecuaciones diferenciales que definen el comportamiento de la máquina a un sistema de coordenadas solidario con el rotor [1].

Para suprimir la dependencia que existe en el ángulo  $\theta$  en el modelo de la máquina síncrona con respecto a los vectores espaciales, se puede referenciar las variables del estator hacia el sistema de referencia del rotor, esta se encuentra exactamente en la posición  $\theta$  referente al sistema solidario con el estator. Por tal motivo se posibilita la multiplicación de la ecuación del estator por  $e^{-j\theta}$  para referir las ecuaciones al sistema de coordenadas que se encuentra sincronizado con el eje del campo. Este sistema de coordenadas nuevo es conocido como ejes de cuadratura (q) y directo (d) [1].

- El eje **directo d** apunta en la misma dirección que el eje del campo f. Gira con respecto al estator a la velocidad del rotor y en todo momento se encuentra colineal con el eje magnético del campo.
- El eje **cuadratura q** se encuentra  $90^\circ$  de adelanto con respecto al eje d. Rota con respecto al estator a la velocidad del rotor y en todo momento se encuentra en cuadratura con el eje magnético del campo.
- El eje **de campo f** Solidario con el sistema rotórico y colineal con el eje magnético de la bobina de campo.



**Figura 2.5:** Modelo en coordenadas  $dqf$  de la máquina síncrona [1].

En las máquinas síncronas de polos salientes, la excitación de secuencia positiva es la cual se utiliza para entregar el par al eje de las máquinas[14].

Esta componente de secuencia resulta de utilizar la siguiente expresión:

$$\vec{v}_e = v_x + jv_y = \sqrt{\frac{2}{3}} [v_a + \alpha v_b + \alpha^2 v_c] \quad (2.8)$$

La transformación entre las coordenadas primitivas (a, b, c) y las coordenadas (x, y) se puede lograr de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} f_{xy} &= [T] [f_{abc}] \\ f_{abc} &= [T]^t [f_{xy}] \end{aligned} \quad (2.9)$$

definido por:

$$[T] = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} & -\frac{\sqrt{6}}{6} & -\frac{\sqrt{6}}{6} \\ 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix}$$

donde:

$$[T]^t = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} & 0 \\ -\frac{\sqrt{6}}{6} & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ -\frac{\sqrt{6}}{6} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix}$$

De acuerdo a las fórmulas de 2.9(a) se puede realizar la conversión de coordenadas (a, b, c) a (x, y).

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} & 0 \\ -\frac{\sqrt{6}}{6} & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ -\frac{\sqrt{6}}{6} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Con la formula 2.9(b) se realiza la conversión inversa de coordenadas (x, y) hacia la coordenadas (a, b, c).

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}}e_x \\ -\frac{\sqrt{6}}{6}e_x + \frac{\sqrt{2}}{2}e_y \\ -\frac{\sqrt{6}}{6}e_x - \frac{\sqrt{2}}{2}e_y \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Con la expresión 2.7 se la desarrolla separando la parte real e imaginaria obteniendo así las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} V_x &= \sqrt{\frac{2}{3}} \left( V_a - \frac{1}{2}V_b - \frac{1}{2}V_c \right) \\ V_y &= \sqrt{\frac{2}{3}} \left( \frac{\sqrt{3}}{2}V_b - \frac{\sqrt{3}}{2}V_c \right) \end{aligned} \quad (2.12)$$

Con las expresiones anteriores se plantea la siguiente identidad:

$$\vec{v}_e = v_x + jv_y \quad (2.13)$$

De tal manera se introduce las siguientes expresiones:

$$\mathbf{v}_e^{dq} = v_d + jv_q = \vec{v}_e e^{-j\theta} \quad (2.14)$$

$$\mathbf{i}_e^{dq} = i_d + ji_q = \vec{\mathbf{i}}_e e^{-j\theta} \quad (2.15)$$

Reemplazando la igualdad 2.13 en la expresión 2.14 se obtiene el siguiente resultado:

$$V_d + jV_q = (V_x + jV_y)(\cos \theta - j \operatorname{sen} \theta) \quad (2.16)$$

Realizando la multiplicación adecuada en la expresión 5.4 y a su vez se descompone en su parte real e imaginaria como resultado se obtiene las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} V_d &= V_x \cos \theta + V_y \operatorname{sen} \theta \\ V_q &= V_y \cos \theta - V_x \operatorname{sen} \theta \end{aligned} \quad (2.17)$$

Las expresiones de corriente tienen el mismo proceso que las expresiones de voltaje. La parte real se encuentra representada por  $i_x$  mientras que la parte imaginaria por la expresión  $i_y$ .

$$\begin{aligned} i_x &= \sqrt{\frac{2}{3}} \left( i_a - \frac{1}{2}i_b - \frac{1}{2}i_c \right) \\ i_y &= \sqrt{\frac{2}{3}} \left( \frac{\sqrt{3}}{2}i_b - \frac{\sqrt{3}}{2}i_c \right) \end{aligned} \quad (2.18)$$

Con las ecuaciones presentadas con anterioridad se obtiene la siguiente igualdad.

$$\vec{i}_e = i_x + ji_y \quad (2.19)$$

Reemplazando la igualdad 2.19 en la ecuación 2.15 se tiene:

$$i_d + ji_q = (i_x + ji_y)(\cos \theta - j \operatorname{sen} \theta) \quad (2.20)$$

Resolviendo la ecuación 2.20 y separando los valores reales e imaginarios se tiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} i_d &= i_x \cos \theta + i_y \operatorname{sen} \theta \\ i_q &= i_y \cos \theta - i_x \operatorname{sen} \theta \end{aligned} \quad (2.21)$$

## 2.6. Voltaje detrás de la reactancia

Para el modelo de la MSPS la impedancia del circuito esta conformada por la reactancia inductiva y la resistencia del estator la cual se describe como:

$$Z_e = R_e + \left( \frac{L_d + L_q}{2} \right)_e \quad (2.22)$$

Reemplazando el valor de  $M_1$  y girando el marco de referencia orientado al rotor se tiene las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} e_x &= \frac{L_d - L_q}{2} \left[ \frac{di_d}{dt} \cos \theta + \frac{di_q}{dt} \operatorname{sen} \theta \right] + w_m(L_d - L_q) [i_q \cos \theta - i_d \operatorname{sen} \theta] - w_m \sqrt{3} \lambda_f \operatorname{Sen} \theta \\ e_y &= \frac{L_d - L_q}{2} \left[ \frac{di_d}{dt} \operatorname{sen} \theta - \frac{di_q}{dt} \cos \theta \right] + w_m(L_d - L_q) [i_d \cos \theta + i_q \operatorname{sen} \theta] - w_m \sqrt{3} \lambda_f \operatorname{sen} \theta \end{aligned} \quad (2.23)$$



Donde:

$$\begin{aligned}\frac{di_d}{dt} &= \frac{V_d - R_e i_d + L_q i_q \omega_n}{L_d} \\ \frac{di_q}{dt} &= \frac{V_q - R_e i_q - \omega_m (L_d i_d + \sqrt{3} \lambda_f)}{L_q}\end{aligned}\quad (2.24)$$

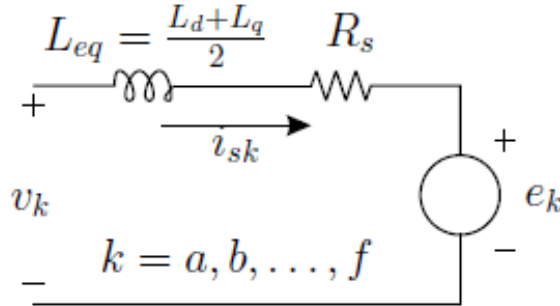
donde:

$$\lambda_f = L_{df} i_f \quad (2.25)$$

Par eléctrico

$$\begin{aligned}T_e &= (L_d - L_q) i_q i_d + L_{df} i_f i_q \\ w_m &= \int \frac{T_e - T_m}{J} * dt \\ \theta &= \int w_m\end{aligned}\quad (2.26)$$

En la figura 2.6 se aprecia el modelo equivalente por fase para la MSPS trifásica donde la inductancia y resistencia se obtienen de formula 2.22 y la f.e.m de las ecuaciones 2.23.



**Figura 2.6:** Modelo circuital por fase de la MSPS

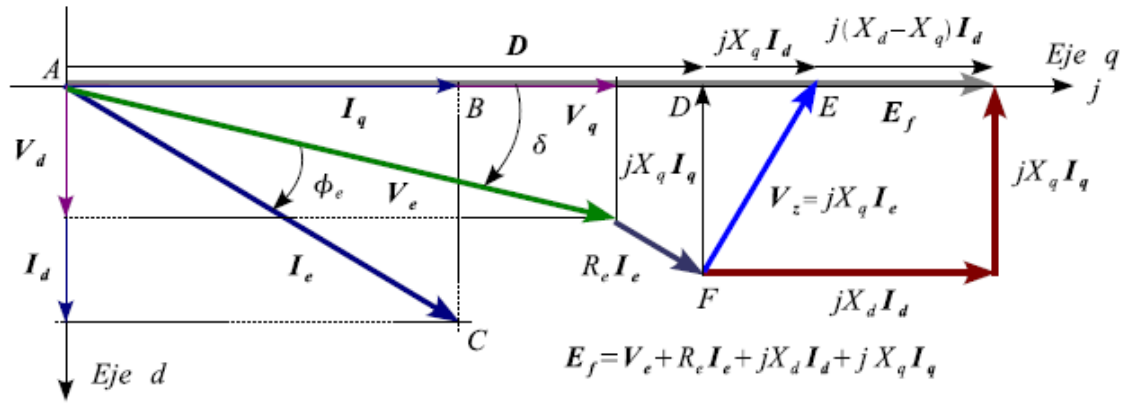
## 2.7. Diagrama fasorial en conversión generador

Las máquinas sincrónicas se emplean con mayor regularidad como generadores, en estos casos es ventajoso aplicar la convención generador [1].

En la convención generador las corrientes de armadura salen por el punto de polaridad de cada bobina, la dirección de referencia de la corriente de campo se define entrando por el punto de polaridad relativa, porque este eje eléctrico es pasivo y en general consume potencia eléctrica. El cambio de convención se realiza invirtiendo el sentido de circulación de las corrientes de los ejes directo y cuadratura; para este fin se cambia el signo de las corrientes  $i_e, i_d, i_q$  en las ecuaciones 2.19, 2.21. La fuerza

electromotriz que produce el campo no cambia de signo en la nueva convención, debido a que la corriente de campo  $i_f$  mantiene la misma referencia. De tal manera, la ecuación de la MSPS en convención generador y en régimen permanente se expresa de la siguiente forma [1]:

$$\mathbf{E}_f = \mathbf{V}_e + R_e \mathbf{I}_e + jX_d \mathbf{I}_d + jX_q \mathbf{I}_q \quad (2.27)$$



**Figura 2.7:** Diagrama fasorial de la MSPS en la conversión de generador [1].

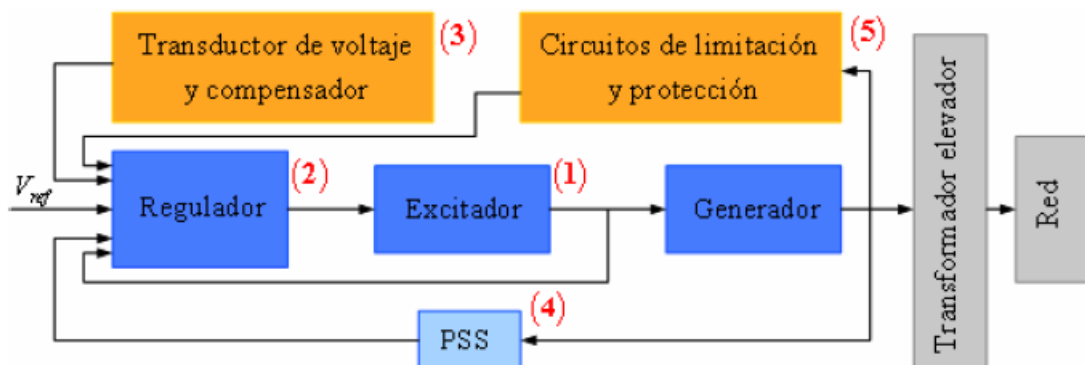
## CAPÍTULO 3

### SISTEMAS DE CONTROL DE EXCITACIÓN Y DIAGRAMAS DE BLOQUES DE LAS MSPS

#### 3.1. Sistemas de excitación

Dentro de un sistema de excitación la función básica que cumple es el control de la tensión y potencia reactiva mediante el ajuste de la corriente de campo, por eso se afirma que los sistemas de excitación se usan para conservar el nivel de voltaje requerido, así como también se usa para realizar el control de la potencia reactiva y mejorar la estabilidad del sistema [15].

La figura 3.1 muestra un diagrama funcional de bloques de un sistema típico para el control de la excitación aplicado a los generadores síncronos. Seguido se detalla brevemente los distintos subsistemas mostrados en la siguiente figura 3.1 [3].



**Figura 3.1:** Diagrama funcional de bloques para un sistema de excitación y control de generador síncrono [2].

- Excitador.

Proporciona la potencia al devanado de campo de la máquina síncrona, constituyendo la etapa de potencia del sistema de excitación.

- Regulador.

Procesa y amplifica las señales de control de entrada hasta un nivel y una fuerza adecuados para el control del excitador. Esto incluye tanto las funciones de regulación como las de estabilización del sistema de excitación (retroalimentación de la velocidad o compensación del retraso).

- Transductor de tensión en bornes y compensador de carga.

Detecta la tensión en los bornes del generador, la rectifica y filtra a la cantidad y la compara con una referencia que representa la tensión en los bornes deseada. Además, se puede proporcionar una compensación de carga (o caída de línea, o reactiva), si se desea mantener una tensión constante en un punto eléctricamente remoto del terminal del generador (por ejemplo, en parte del transformador elevador).

- Estabilizador del sistema de potencia (PSS).

Proporciona una señal de entrada adicional al regulador para amortiguar las oscilaciones del sistema de potencia. Las señales de entrada más utilizadas son la desviación de la velocidad del rotor, la potencia de aceleración y la desviación de la frecuencia.

- Limitadores y circuitos de protección.

Incluyen una amplia gama de funciones de control y protección que garantizan que no se superen los límites de capacidad del excitador y del generador síncrono. Algunas de las funciones más utilizadas son el limitador de corriente de campo, el limitador de excitación máxima, el limitador de tensión en bornes, el regulador y la protección de voltios por hertzios y el limitador de subexcitación.

## 3.2. Tipos de sistemas de excitación

Se identifican tres diferentes tipos de sistemas de excitación en función de la fuente de energía de excitación [5]:

1. Sistema de excitación tipo DC.
2. Sistema de excitación tipo AC.

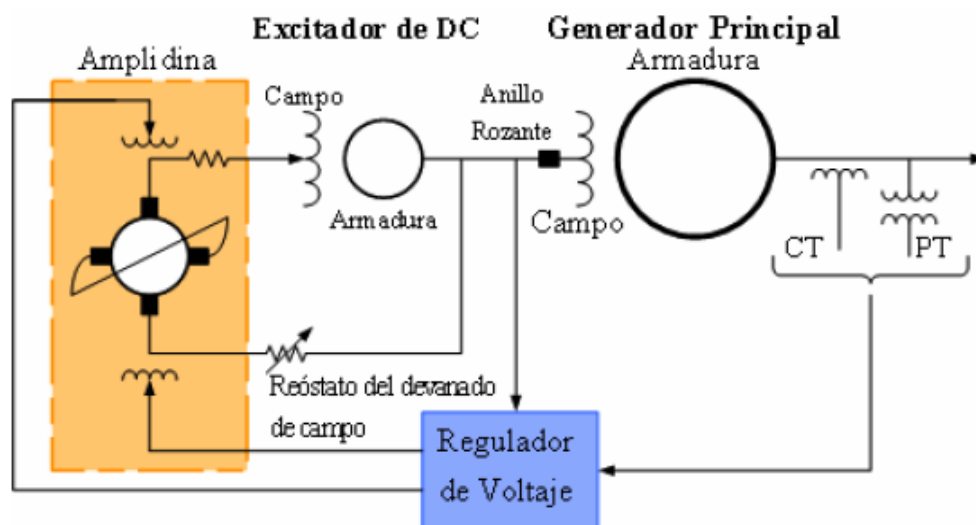
### 3. Sistema de excitación tipo ST.

En este apartado se describen las clases de sistemas de excitación mencionadas, las diferentes formas que adoptan y su estructura general.

#### 3.2.1. Sistemas de Excitación DC

Los sistemas de excitación de tipo DC (Excitador rotativo con conmutador de corriente continua), que usan un generador de DC con un conmutador como la fuente de energía del sistema de excitación [5].

En esta categoría los sistemas de excitación utilizan generadores DC como suministro de potencia de excitación y proveen corriente al rotor de la máquina síncrona mediante anillos colectores. La activación del excitador se puede dar mediante el eje del generador o un motor. Puede ser de tipo excitado por separado o auto excitado. Cuando se realiza la excitación por separado, el campo excitador es proporcionado por un excitador piloto que comprende un generador de imanes permanentes [3].



**Figura 3.2:** Sistema de excitación DC con regulador de voltaje amplidina [2].

La figura 3.2 hace una representación simplificada de un sistema esquemático de excitación en DC con un regulador de tensión amplidina. Consta de un excitador conmutador de DC que provee corriente continua al campo del generador principal por medio de anillos colectores. El campo del excitador está controlado por una amplidina [3, 1].

Un amplidina es una clase especial y general de amplificadores rotativos llamados metadinas. Es una máquina de DC con una estructura especial dada por dos conjuntos de escobillas separadas 90 grados eléctricos, una se encuentra ubicada en eje directo (d) y el otro conjunto en el eje de cuadratura (q) [3, 1].

### 3.2.2. Sistemas de Excitación AC

Sistemas de excitación de tipo AC (Sistemas de excitación de rectificadores alimentados por el alternador), que usan rectificadores estacionarios o rotativos y un alternador para generar la corriente continua utilizada para el campo de la máquina síncrona [5].

Los sistemas de excitación de esta categoría utilizan alternadores (máquinas de AC) como fuentes de la potencia de excitación del generador principal. Por lo general, el excitador se encuentra en la misma ubicación que el generador de turbina. La señal salida AC de la excitación se rectifica mediante el uso de rectificadores no controlados o controlados para generar la corriente continua adecuada para el campo del generador [3].

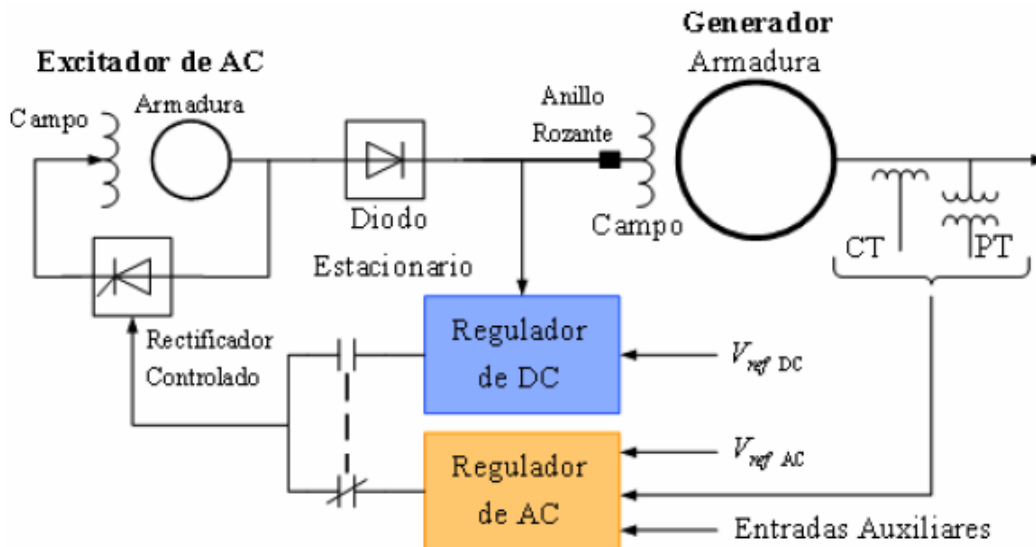
Anteriormente los sistemas de excitación AC usaban una mezcla de amplificadores giratorios como reguladores y magnéticos. La mayoría de los sistemas nuevos emplean reguladores amplificadores electrónicos. Por lo tanto, las excitatrices en AC adquieren diferentes formas que depende del método de control de salida del excitador, disposición del rectificador y la alimentación para la excitación del excitador [3].

Se presenta a continuación las formas de rectificación dentro de los sistemas de excitación de corriente alterna:

- Sistemas de rectificadores estacionarios.

Con los rectificadores estacionarios, la salida de DC se alimenta al devanado de campo del generador principal a través de anillos rozantes. Cuando se utilizan rectificadores no controlados, el regulador controla el campo del excitador de AC, que a su vez controla la tensión de salida del excitador. En la figura 3.3 se muestra un diagrama unifilar simplificado de un sistema de excitación del rectificador del alternador controlado por el campo. En el sistema mostrado, el excitador del alternador se acciona desde el rotor del generador principal.

El excitador se auto excita con su potencia de campo derivada a través de rectificadores de tiristores. El regulador de tensión obtiene su potencia de la tensión de salida del excitador [3].



**Figura 3.3:** Sistema de excitación AC del rectificador con alternador controlado por campo [2].

- Sistemas rectificadores rotativos.

Con el uso de rectificadores rotativos, se suprime los anillos rozantes y escobillas, el campo del generador principal es alimentado directamente por la salida DC [3].

Como se identifica en la figura 3.4, el inducido del excitador de AC y los rectificadores de diodos giran con el campo magnética del generador. El excitador piloto AC con un rotor de imán permanente, gira con los rectificadores de diodos y el inducido del excitador. La señal de salida rectificada proporcionada por el estator del excitador piloto alimenta al campo estacionario del excitador. El regulador de tensión maneja el campo de la excitatriz en AC, que a su vez maneja el campo magnético del generador. El sistema se denomina sistema de excitación sin escobillas. Se desarrolló para prever las problemáticas que se podían ocasionar mediante el uso de escobillas que percibían mientras se suministraban las altas corrientes de campo de generadores muy grandes [3].

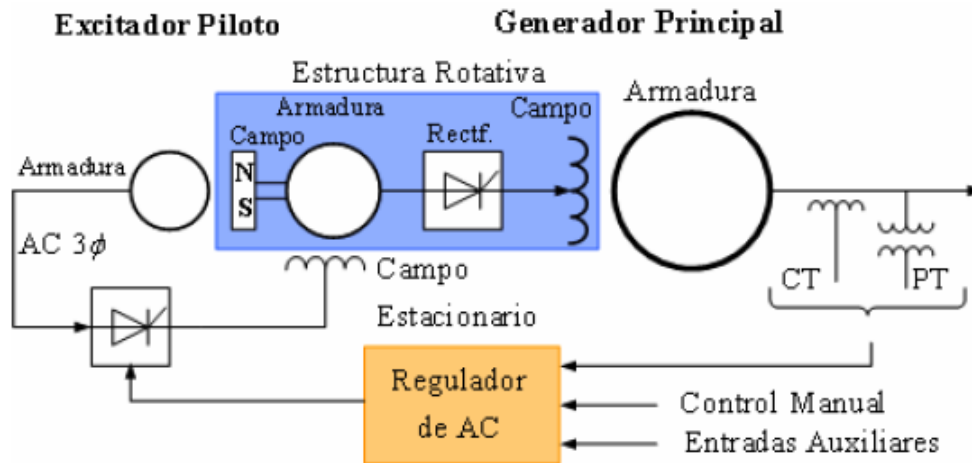


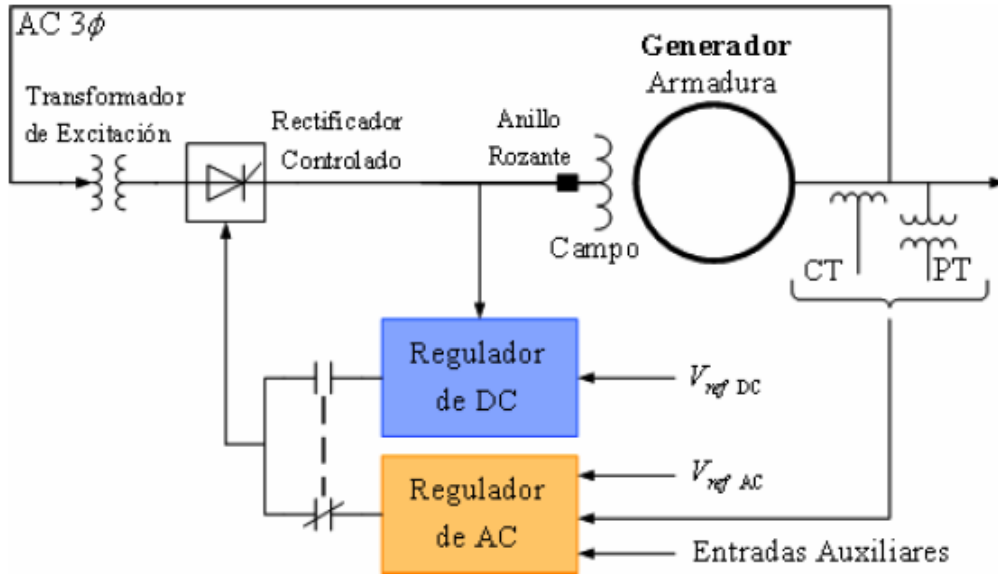
Figura 3.4: Sistema de excitación AC sin escobillas [2].

### 3.2.3. Sistemas de Excitación ST

Sistemas de excitación de tipo ST (Sistemas de excitación estática), donde la potencia de excitación se suministra mediante devanados auxiliares del generador y rectificadores o transformadores [5].

Los componentes que integran estos sistemas son de tipo estacionarios o estáticos. Los rectificadores estáticos controlados o rectificadores estáticos no controlados, suministran directo la corriente de excitación al campo del generador principal síncrono por medio de anillos colectores. Los rectificadores y su suministro de energía van desde el generador principal a través de un transformador para reducir la tensión a una escala apropiada. La siguiente figura 3.5 es una descripción de un sistema de excitación estática [3].





**Figura 3.5:** Sistema de excitación ST con fuente potencial [2].

- Sistemas rectificadores controlados por fuente de potencial.

La potencia de excitación se proporciona a través de un transformador desde la barra auxiliar de la estación o los terminales del generador, siendo regulado por un rectificador controlado. Este sistema de excitación se conoce eventualmente como sistema estático alimentado por transformador o alimentado por bus. Este sistema adquiere una constante muy pequeña de tiempo inherente. Sin embargo, la tensión de salida máxima de la excitatriz (voltaje de techo) depende del voltaje de AC de entrada. Por lo tanto, durante las condiciones de falla del sistema que causan una disminución del voltaje del terminal del generador, se reduce el voltaje de techo del excitador disponible. Esta limitación del sistema de excitación es, en gran medida, compensada por su respuesta virtualmente instantánea y su alta capacidad de fuerza de campo post-falla [3].

El sistema de excitación realiza el ajuste automático de la corriente de campo del generador sincrónico de modo que se mantenga el voltaje en sus terminales, de acuerdo a los valores especificados. Desde el punto de vista de su funcionamiento, el sistema de excitación debe ser capaz de responder a perturbaciones, tanto transitorias como estacionarias, sin alterar la operación normal del generador. Así mismo, los sistemas de potencia requieren que el sistema de excitación contribuya a un control efectivo de voltaje, y por ello estos sistemas son ampliamente utilizados para mejorar la estabilidad del sistema de potencia [16].

Debido a esto, el modelado matemático de los sistemas de excitación tiene una importancia relevante para los estudios de estabilidad en los sistemas, ya que a través de la información que arrojan las distintas simulaciones de estos modelos, se puede analizar y predecir el comportamiento de los sistemas de excitación ante las perturbaciones antes mencionadas, definiendo así su impacto en la estabilidad del sistema en estudio [16].

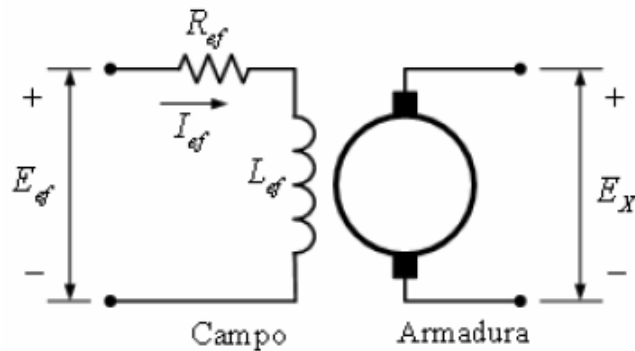
### 3.3. Modelado de los sistemas de excitación

En esta sección vamos a describir la modelación de los sistemas de excitación. Comenzamos con la consideración de un sistema apropiado por unidad, luego describimos modelos para los diversos componentes y, finalmente, presentamos modelos completos para los tipos seleccionados de sistemas de excitación [3].

#### 3.3.1. Modelado de los componentes del sistema de excitación

##### 3.3.1.1. Excitador DC excitado por separado

El modelo de circuito de la excitatriz que se presenta en la figura 3.6:



**Figura 3.6:** Excitador DC excitado por separado [2].

Para el circuito de campo del excitador, escribimos:

$$E_{ef} = R_{ef}I_{ef} + \frac{d\Psi}{dt} \quad (3.1)$$

Con:

$$\Psi = L_{ef}I_{ef}$$

Sin tener en cuenta las fugas de campo, la tensión de salida del excitador  $E_x$  viene dada por:

$$E_X = K_X \Psi \quad (3.2)$$

Donde  $K_x$  es dependiente de la velocidad y configuración del devanado de la armadura del excitador. La tensión de salida  $E_x$  se considera como una función no lineal de la corriente de campo del excitador  $I_{ef}$  debido a la saturación magnética. La tensión  $E_x$  también se ve afectada por la carga del excitador. La práctica habitual en la modelación de excitadores de corriente continua es tener en cuenta la saturación y la regulación de la carga de forma aproximada combinando los dos efectos y usando la curva de carga-saturación de resistencia constante, como se presencia en la Figura 3.7 [3].

La parte lineal inferior de la curva de saturación en un circuito abierto es tangente a la línea del entrehierro. Sea  $R_g$  la pendiente de la línea del entrehierro e  $\Delta I_{ef}$  la desviación de la curva de saturación de la carga respecto a la línea del entrehierro. A partir de la figura 3.7, escribimos:

$$I_{ef} = \frac{E_X}{R_g} + \Delta I_{ef} \quad (3.3)$$

Para  $\Delta I_{ef}$  se considera una función no lineal de  $E_x$  y se expresa:

$$\Delta I_{ef} = E_X S_e(E_X) \quad (3.4)$$

Para  $S_e(E_x)$  es una función de saturación dependiente de  $E_x$ .

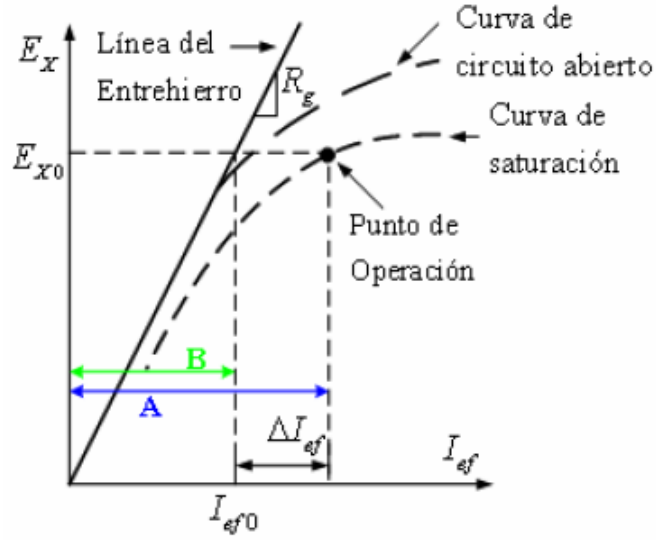


Figura 3.7: Curva carga-saturación del excitador [2].

De las ecuaciones 3.1 a 3.4, tenemos:

$$E_{ef} = \frac{R_{ef}}{R_g} E_X + R_{ef} S_e(E_X) E_X + \frac{1}{K_X} \frac{dE_X}{dt} \quad (3.5)$$

La ecuación mencionada con anterioridad muestra la relación que existe entre la salida  $E_x$  y la tensión de entrada  $E_{ef}$ . Un sistema conveniente PU para esta ecuación se usa con valores base de  $E_x$  y  $I_{ef}$  elegidos para ser iguales a los valores requeridos para proporcionar el voltaje nominal de la máquina síncrona en la línea del entrehierro [3].

Así pues:

$$E_{Xbase} = E_{fdbase} \quad (3.6)$$

$$I_{efbase} = E_{fdbase}/R_g$$

$$R_{gbase} = R_g$$

Dividiendo la ecuación 3.5 por  $E_{xbase}$  tenemos:

$$\frac{E_{ef}}{E_{Xbase}} = \frac{R_{ef}}{R_g} \frac{E_X}{E_{Xbase}} + R_{ef} S_e(E_X) \frac{E_X}{E_{Xbase}} + \frac{1}{K_X} \frac{d}{dt} \left( \frac{E_X}{E_{Xbase}} \right)$$

En forma unitaria, tenemos:

$$\bar{E}_{ef} = \frac{R_{ef}}{R_g} \bar{E}_X [1 + \bar{S}_e(\bar{E}_X)] + \frac{1}{K_X} \frac{d\bar{E}_X}{dt} \quad (3.7)$$

En la anterior ecuación,  $\bar{S}_e(\bar{E}_X)$  es la función de saturación PU que está definida

por:

$$\bar{S}_e(\bar{E}_X) = \frac{\Delta \bar{I}_{ef}}{\bar{E}_X} = R_g S_e(E_X) \quad (3.8)$$

A partir de la figura 3.7, con  $E_x$  y  $I_{ef}$  la función de saturación en PU esta dado por:

$$\bar{S}_e(\bar{E}_X) = \frac{A - B}{B} \quad (3.9)$$

El parámetro  $K_x$  definido por la ecuación 3.2 puede escribirse como:

$$K_X = \frac{E_X}{\Psi} = \frac{E_X}{L_{ef} I_{ef}} = \frac{R_g \bar{E}_X}{L_{ef} \bar{I}_{ef}}$$

Correspondiendo a cualquier punto de funcionamiento ( $I_{ef0}$ ,  $E_{X0}$ ), sea:

$$L_{fu} = L_{ef} \frac{\bar{I}_{ef0}}{\bar{E}_{X0}} \quad (3.10)$$

Por lo tanto,  $K_X = \frac{R_g}{L_{fu}}$ . Sustituyendo en la ecuación 3.7 obtenemos:

$$\bar{E}_{ef} = K_E \bar{E}_X + S_E(\bar{E}_X) \bar{E}_X + T_E \frac{d\bar{E}_X}{dt} \quad (3.11)$$

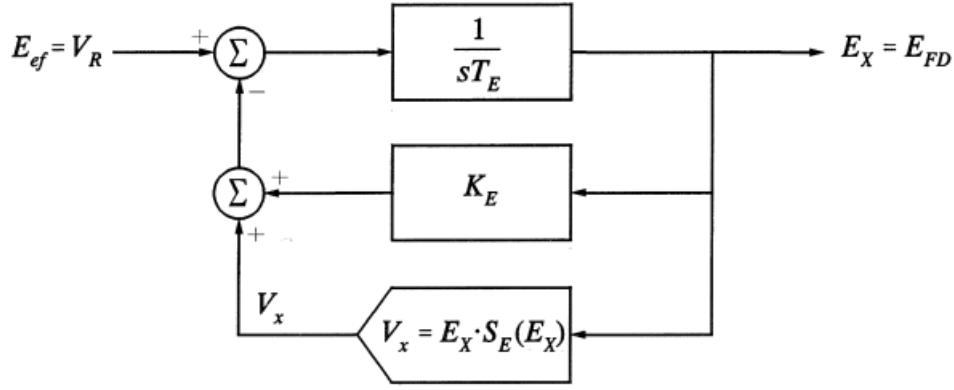
Donde:

$$K_E = \frac{R_{ef}}{R_g} \quad (3.12)$$

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

$$S_E(\bar{E}_X) = \bar{S}_E(\bar{E}_X) \frac{R_{ef}}{R_g}$$

La ecuación 3.11 muestra la relación que existe entre la entrada-salida del excitador. Para un excitador excitado por separado, el voltaje de entrada  $E_{ef}$  es la salida del regulador  $V_R$ . El voltaje de salida  $E_X$  de un excitador de corriente continua se aplica directo al campo de la máquina síncrona. Mientras, el excitador se representa en forma de diagrama de bloques que se muestra en la figura 3.8. En el diagrama, las variables están en PU; no obstante, se elimina la notación de súper barra que denota esto [3].



Commonly used representation:  $V_x = A_{EX} e^{B_{EX} E_x}$

**Figura 3.8:** Diagrama de bloques de un excitador de corriente continua [3].

La modificación de la resistencia del circuito de campo  $R_{ef}$  interfiere a  $K_E$  así como a la expresión de saturación  $S_E(E_X)$ , pero no afecta al tiempo de la integración  $T_E$  del bucle de avance.

Hay varias términos matemáticas que se utilizan para abordar el efecto de la saturación del excitatriz. Un término usualmente utilizado es la función exponencial.

$$V_x = E_X S_E(E_X) = A_{EX} e^{B_{EX} E_X} \quad (3.13)$$

En la Figura 3.8 se presenta un diagrama de bloques que provee una representación del excitador de corriente continua en los estudios de estabilidad. No obstante, la constante de tiempo del excitador y la ganancia efectiva no son claros. Estos son muy claros cuando el diagrama de bloques se reduce a la forma estándar tomando en cuenta la respuesta de señal [3]:

$$\Delta E_{ef} = \Delta V_R \longrightarrow \left[ \frac{K}{1 + sT} \right] \longrightarrow \Delta E_X = \Delta E_{FD}$$

La constante de tiempo del excitatriz para perturbaciones pequeñas y la ganancia efectiva  $K$ . Para algún punto de funcionamiento con  $E_X = E_{FD} = E_{FD0}$ , son:

$$K = \frac{1}{B_{EX} S_E(E_{FD0}) + K_E} \quad (3.14)$$

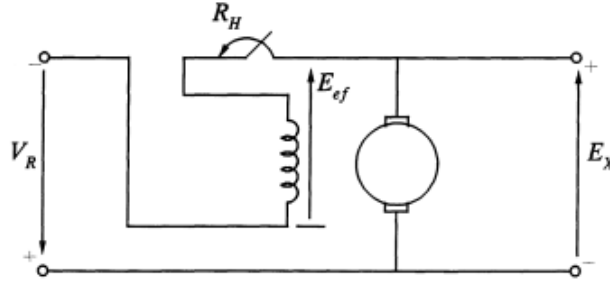
$$T = \frac{T_E}{B_{EX} S_E(E_{FD0}) + K_E} \quad (3.15)$$

Donde:

$$S_E(E_{X0}) = A_{EX} e^{B_{EX} E_{FD0}}$$

### 3.3.1.2. Excitador DC autoexcitado

La figura 3.9 presenta un circuito de una excitatriz de corriente continua autoexcitado.



**Figura 3.9:** Excitatriz de corriente continua autoexcitado [3].

Para este excitador, la salida del regulador  $V_R$  está en serie con el campo de la excitación. Por lo tanto, la tensión unitaria a través del campo del excitador (sin la notación explícita por unidad) es [3]:

$$E_{ef} = V_R + E_X \quad (3.16)$$

El vínculo que existe entre los valores PU de  $E_{ef}$  y  $E_X$  desarrollada para la excitador excitado por separado también se adapta a este caso. Sustituyendo para  $E_{ef}$  dado por ecuación 3.16 en la ecuación 3.7, tenemos:

$$V_R + E_X = \frac{R_{ef}}{R_g} E_X [1 + S_e(E_X)] + \frac{1}{K_X} \frac{dE_X}{dt}$$

Esto se reduce a:

$$V_R = K_E E_X + S_E(E_X) E_X + T_E \frac{dE_X}{dt} \quad (3.17)$$

Donde:

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

$$T_E = \frac{L_{fu}}{R_g} \quad (3.18)$$

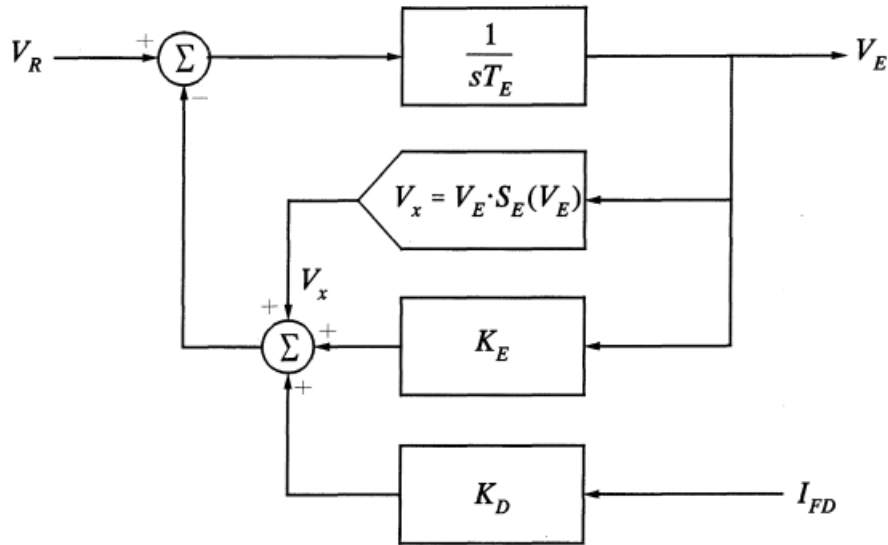
$$S_E = S_E(E_X) \frac{R_{ef}}{R_g}$$

En la figura 3.8 asimismo se aplica al excitador de DC autoexcitado. La constante de  $K_E$ , sin embargo, es igual a  $R_{ef}/R_g - 1$  en comparación con  $R_{ef}/R_g$  para el caso de excitación separada.

Los operadores de la estación suelen hacer un seguimiento del regulador de tensión ajustando periódicamente la consigna del reóstato para que la salida del regulador de tensión sea cero. Para ello se selecciona el valor de  $K_E$  de forma que el valor inicial de  $V_R$  tienda a ser cero. Por consiguiente, el parámetro  $K_E$  no es estático, sino que cambia en función de las condiciones de funcionamiento [3].

### 3.3.1.3. Excitadores y rectificadores de AC

En la figura 3.10 se muestra la representación del excitador de corriente alterna (excluyendo la rectificación) para su uso en estudios de estabilidad a gran escala.



**Figura 3.10:** Diagrama de bloques de un excitador de corriente alterna [3].

La estructura básica que tiene el modelo es casi igual a la del excitador de corriente continua. Sin embargo, la regulación de la carga debida al efecto de reacción del inducido se tiene en cuenta de forma diferenciada y la gráfica de saturación en vacío se utiliza para mostrar la función de saturación  $S_E$ . La tensión interna del excitador  $V_E$  es la tensión en vacío determinada por la función de saturación. La corriente de campo que tiene el generador principal  $I_{FD}$  corresponde a la corriente de carga que

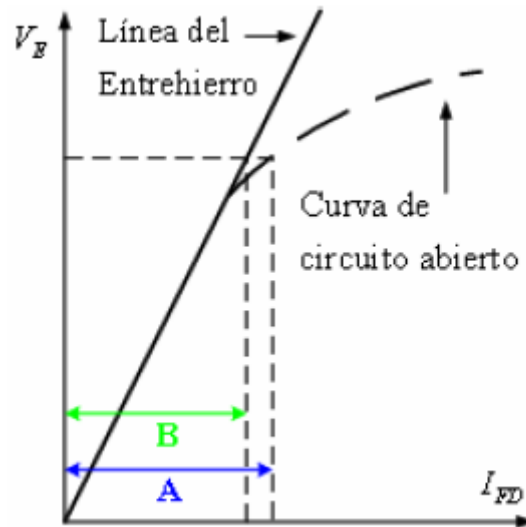


tiene el excitador, y la retroalimentación negativa de  $K_D I_{FD}$  representa los efectos desmagnetizadores de la acción del inducido. La constante  $K_D$  depende de las reactancias sincrónica y transitoria del excitador de corriente alterna. La figura 3.11 ilustra el cálculo de la función de saturación  $S_E$  para un valor determinado de  $V_E$  [3].

La función de saturación por unidad es:

$$S_E(V_E) = \frac{A - B}{B} \quad (3.19)$$

Se puede utilizar la expresión matemática que se ajusta para representación de la expresión de saturación. Como en el caso de las excitatrices de DC, una función comúnmente utilizada en  $V_X = V_E S_E(V_E)$  es la función exponencial dada por la ecuación 3.13.



**Figura 3.11:** Características de saturación del excitador de CA [2].

Para rectificar la tensión de salida del excitador de corriente alterna se utilizan habitualmente circuitos rectificadores trifásicos de onda completa. La impedancia similar de la alimentación de corriente alterna analizada por el rectificador es predominantemente una reactancia inductiva. El efecto causado por esta reactancia inductiva es retrasar el marcha de conmutación. Esto genera una disminución de la tensión media de salida del rectificador a medida que aumenta su corriente de carga. Se muestra que un circuito rectificador trifásico en puente de onda completa funciona en 1 de los 3 modos distintos a medida que la corriente de carga del rectificador cambia desde la ausencia de carga hasta el nivel de cortocircuito. El modo de funcionamiento es dependiente de la caída de tensión de conmutación [3].

Las expresiones que definen la regulación del rectificador dependiente de la caída de tensión de conmutación se expresa como sigue:

$$E_{FD} = F_{EX}V_E \quad (3.20)$$

Donde:

$$F_{EX} = f(I_N) \quad (3.21)$$

Y

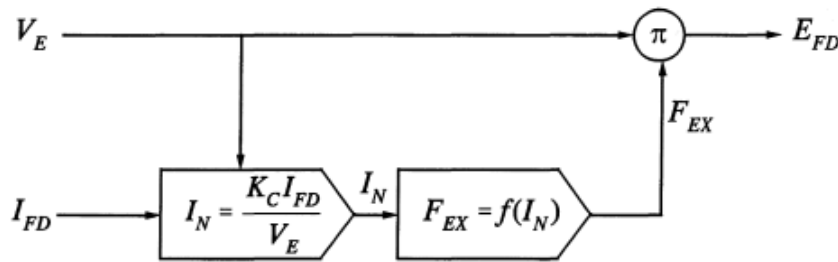
$$I_N = \frac{K_C I_{FD}}{V_E} \quad (3.22)$$

La constante de valor  $K_C$  es dependiente de la reactancia de conmutación. Las expresiones de la función  $f(I_N)$  que caracterizan los 3 modos de funcionamiento del circuito rectificador son:

$$\begin{aligned} \text{Modo 1 :} & \quad f(I_N) = 1,0 - 0,577I_N, & \quad \text{Si } I_N \leq 0,433 \\ \text{Modo 2 :} & \quad f(I_N) = \sqrt{0,75 - (I_N)^2}, & \quad \text{Si } 0,433 < I_N < 0,75 \\ \text{Modo 3 :} & \quad f(I_N) = 1,732(1,0 - I_N), & \quad \text{Si } 0,75 \leq I_N \leq 1,0 \end{aligned}$$

Ahora  $I_N$  no debería ser mayor que 1.0, pero si llegara a ocurrir,  $F_{EX}$  debe ser igual a cero.

Los efectos de regulación del rectificador identificados con anterioridad se representan en forma de diagrama de bloques como se visualiza en la Figura 3.12.



**Figura 3.12:** Modelo propuesto en la regulación del rectificador [3].

Refiriéndose a las figuras 3.10 y 3.11, la tensión de salida del excitador  $E_{FD}$  se simula como la tensión interna del excitador de corriente alterna  $V_E$  reducida por la reacción del inducido ( $I_{FD}K_D$ ) y la regulación del rectificador ( $F_{EX}$ ) [3].

### 3.3.1.4. Modelo del sistema tipo ST1A

El modelo del sistema tipo ST1A representada en la figura 3.13 es versátil en la representación de la disminución transitoria de la ganancia implementada ya sea en la ganancia principal mediante de las constantes de tiempo  $T_B$  y  $T_C$ , o en el lazo de retroalimentación a través de un análisis adecuado para los parámetros de retroalimentación,  $K_F$  y  $T_F$  [2].

La constante de tiempo inherente de sistema y la ganancia del regulador de voltaje de excitación se representan por  $K_A$  y  $T_A$ , sucesivamente. Las constante de tiempo,  $T_{C1}$  y  $T_{B1}$  permiten representar un incremento transitorio en la ganancia, generalmente modificando a  $T_{C1}$  con un valor mayor a  $T_{B1}$  [2].

La derivación del ángulo en el cual dispara el puente de rectificadores incide la relación que existe entre entrada y salida, que se analiza como lineal en el modelo por medio de una selección de ganancia simple  $K_A$ . Para la mayoría de sistemas esta relación lineal se considera válida. No obstante algunos de estos sistemas, la relación que existe entre los rectificadores no es lineal, dejando la ganancia lineal dentro de una una expresión senoidal, el valor de amplitud de esta señal sera dependiente de la alimentación del voltaje [2].

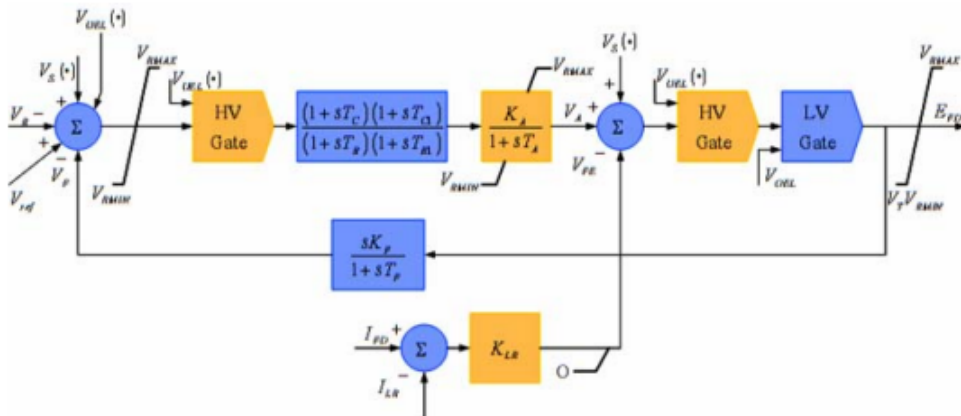
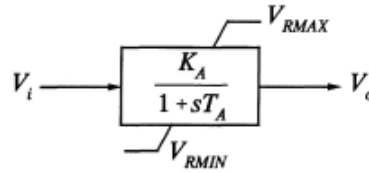


Figura 3.13: Sistema de control de excitación ST1A [2].

### 3.3.1.5. Amplificadores

Los amplificadores son de tipo electrónico, magnético o rotativo . Los amplificadores magnéticos y electrónicos tiene en característica principal una ganancia y también incluyen una constante de tiempo. Como tales, son representados mediante

el diagrama de bloques en la figura 3.14 [3].

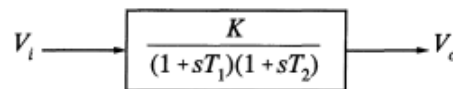


**Figura 3.14:** Modelo de amplificador [3].

La salida del amplificador se encuentra limitada por las limitaciones de la fuente de alimentación o la saturación; esto está representado por los límites "no devanados"  $V_{RMAX}$  y  $V_{RMIN}$  en la Figura 3.14 [3].

Los límites de salida de algunos amplificadores que tienen fuentes de alimentación a partir de la tensión del generador o del bus auxiliar varían con la tensión de los terminales del generador. En estos casos,  $V_{RMAX}$  y  $V_{RMIN}$  cambian directamente con la tensión terminal del generador  $E_r$  [3].

La función de transferencia de la amplidina se deriva y se muestra de una forma general en la figura 3.15.



**Figura 3.15:** Modelo Amplidyne [3].

### 3.3.1.6. Circuito estabilizador del sistema de excitación

Existen algunas formas de realizar de manera física el análisis de estabilización identificada en la figura 3.1. Algunos sistemas de excitación utilizan transformadores en serie, visualizado en la figura 3.16.

En notación de Laplace se tiene las siguientes ecuaciones del transformador [3]:

$$V_1 = R_1 i_1 + sL_1 i_1 + sM i_2 \quad (3.23)$$

$$V_2 = R_2 i_2 + sL_2 i_2 + sM i_1$$

Donde los subíndices 1 y 2 muestran los valores primarias y secundarias donde se encuentra la inductancia mutua (M), resistencias (R) e inductancia de fuga (L).

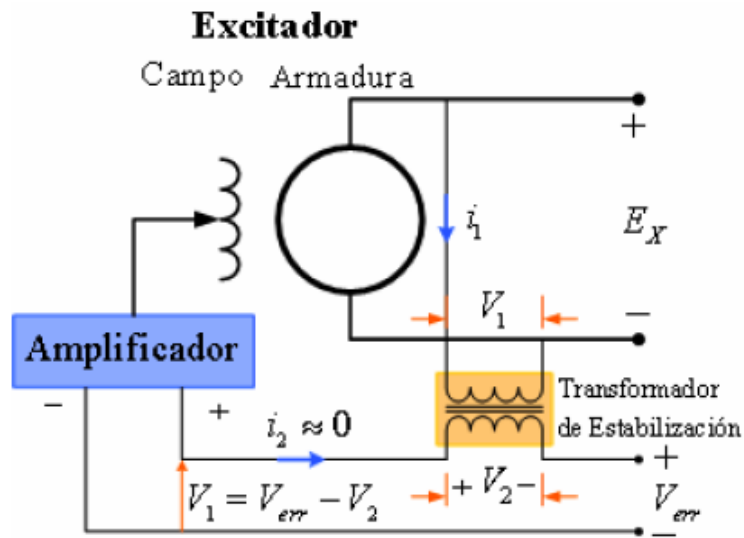


Figura 3.16: Transformador estabilizador del sistema de excitación [2].

Un circuito de alta impedancia es conectado al secundario del transformador, Por lo que se desprecia  $i_2$ , teniendo los siguiente:

$$V_1 = (R_1 + sL_1)i_1 \quad (3.24)$$

$$V_2 = sMi_1$$

Así:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{sM}{R_1 + sL_1} \quad (3.25)$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{sK_F}{1 + sT_F}$$

Donde  $K_F = \frac{M}{R}$  y  $T_F = \frac{L_1}{R}$

## CAPÍTULO 4

### PROGRAMA ATP -EMTP Y CONFIGURACIÓN PREVIA A LA SIMULACIÓN

#### 4.1. ATP-EMTP

El programa ATP es uno de los sistemas de programas universales más utilizados dentro la simulación de los fenómenos transitorios de naturaleza electromecánica y electromagnética dentro de los sistemas que integran la energía eléctrica [4]. Dicho software tiene la interfaz gráfica ATPDraw del programa EMTP versión ATP.

Los dos programas son simuladores orientados a bloques con una interfaz gráfica de usuario. En ambos casos hay dos tipos de conexiones entre los bloques: eléctricas y de señal. El primero conecta bloques como transformadores, líneas, etc., mientras que el segundo conecta las unidades de procesamiento de señales. En ATP-EMTP estos bloques pueden ser objetos TACS o MODELS [12].

El programa ATP-EMTP fue originalmente diseñado para el cálculo de procesos transitorios en sistemas eléctricos de potencia. Durante los últimos años se han incluido varias herramientas de apoyo con los que ha obtenido un paquete de simulación muy flexible y potente, cuyas prestaciones son actualizadas regularmente. ATPDraw es un editor gráfico que funciona en entorno Windows y dispone de una lista muy completa de los componentes necesarios para representar un sistema eléctrico en código ATP. El usuario ha de capturar los iconos de los elementos que forman el sistema en estudio y especificar los parámetros de cada uno [17].

ATP analiza variables dentro de los sistemas eléctricos como funciones de tiempo, normalmente iniciadas por perturbaciones. Dentro del análisis se usa la regla trapezoidal de integración que sirve para resolver las ecuaciones diferenciales del

sistema en el dominio del tiempo. Las condiciones iniciales no nulas se determinan automáticamente mediante una solución fasorial de estado estacionario o son introducidas por el usuario para componentes básicos [4].

Mediante el programa ATP-EMTP es posible determinar posibilidades para controlar tensión y potencia reactiva en máquinas síncronas de polos salientes conectados a la red. Dispone de muchos modelos que incluyen máquinas rotativas, transformadores, descargador de sobrevoltaje, cables y líneas de transmisión. La ventaja de realizar la conexión con los módulos de programa TACS y MODELS (un lenguaje de simulación) permite modelar sistemas de control y componentes con características no lineales como arcos y corona [4].

## 4.2. Licencia ATP-EMTP

ATP es dueña de ATPDraw, por lo que la licencia de ATP es necesaria antes de obtener la descargar el programa de los sitios web oficiales. La licencia ATP es gratuita para todos los que no se han involucrado en el comercio de EMTP. Una vez que uno obtiene la licencia, está autorizado a descargar materiales ATP del sitio oficial de Internet o recibir de un usuario con igual licencia, o requerir estos softwares a los grupos regionales [4].

El debido procedimiento para la obtención de la licencia y demás información que sea requerida se la puede encontrar en la página oficial [www.emtp.org](http://www.emtp.org)

## 4.3. Estructura de archivos para la entrada de datos en ATP-EMTP

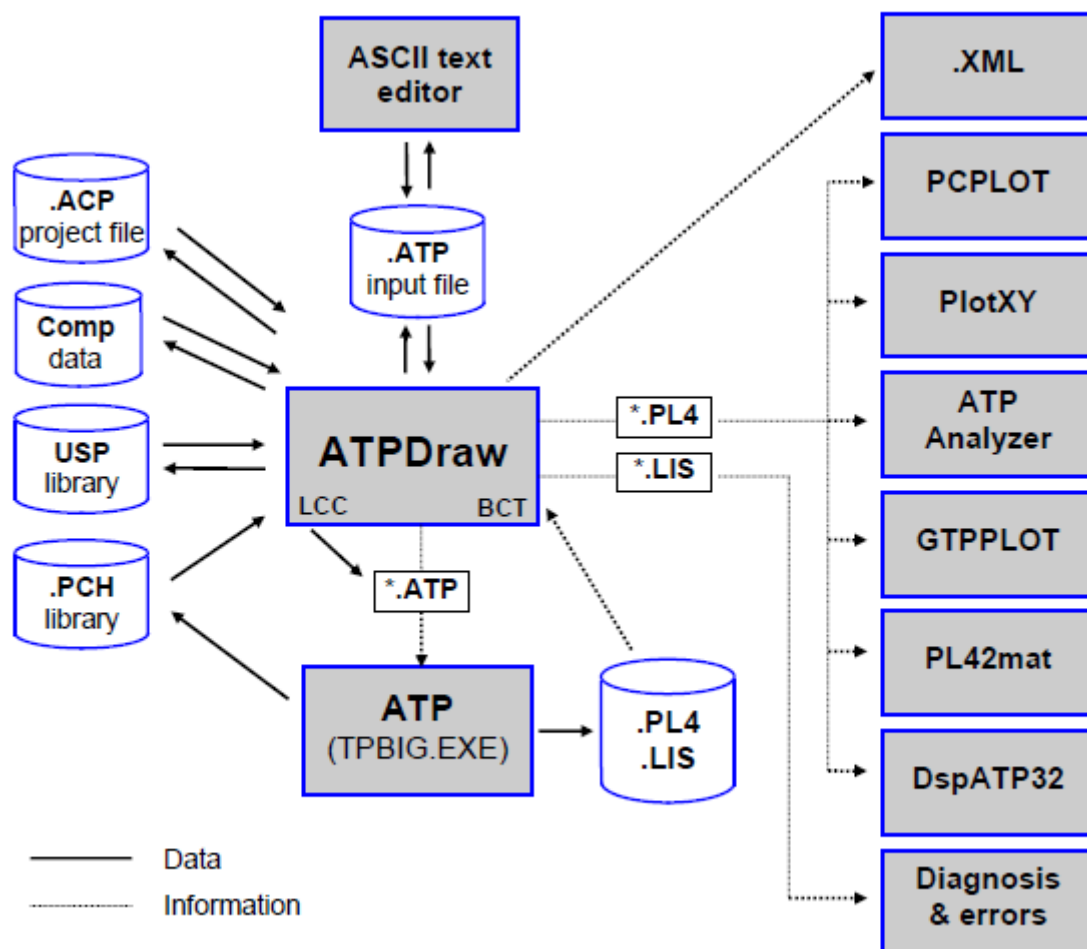
ATP es un considerado programa simulativo, en donde este analiza los armónicos, transitorios electromagnéticos, fenómenos dinámicos, así como también su análisis en el régimen permanente teniendo así una amplia versatilidad frente a los diferentes campos de estudio [18].

Este programa cuenta con una entrada de datos a través de líneas de 80 caracteres como máximo, estas líneas provienen de la programación en lenguaje FORTRAN, siendo una contextura compleja para los usuarios y es el motivo principal para la creación de la interfaz ATPDraw la cual simplifica la entrada de datos [18].

### 4.3.1. Formas generales

Las formas en el uso del programa ATPDraw son las siguientes:

- Realizar la simulación de un sistema de potencia para obtener la respuesta transitoria, dentro de esta simulación se puede tener diferentes elementos circuitales y de control para que trabaje a la par con la red.
- Es usado para determinar los parámetros de los diferentes elementos que se encuentran en el sistema de potencia como son: cables, transformadores, máquinas eléctricas, etc.



**Figura 4.1:** Interfaz ATPDraw con otros programas del paquete ATP-EMTP

En la figura 4.1 se puede observar como la interfaz de ATPDraw se puede acoplar a los diferentes datos, información y programas del paquete de ATP-EMTP.



## 4.4. Ventanas de ATPDraw

El entorno principal de la interfaz de ATPDraw se asemeja a cualquier otro programa o aplicación de Windows, las cuales constan de tres partes fundamentales como son:

- Barra de menú
- Barra de herramientas
- Zona de trabajo

En la figura 4.2 se puede apreciarla distribución de los tres menús mencionados y otras opciones que se encuentran en la ventana principal del programa.

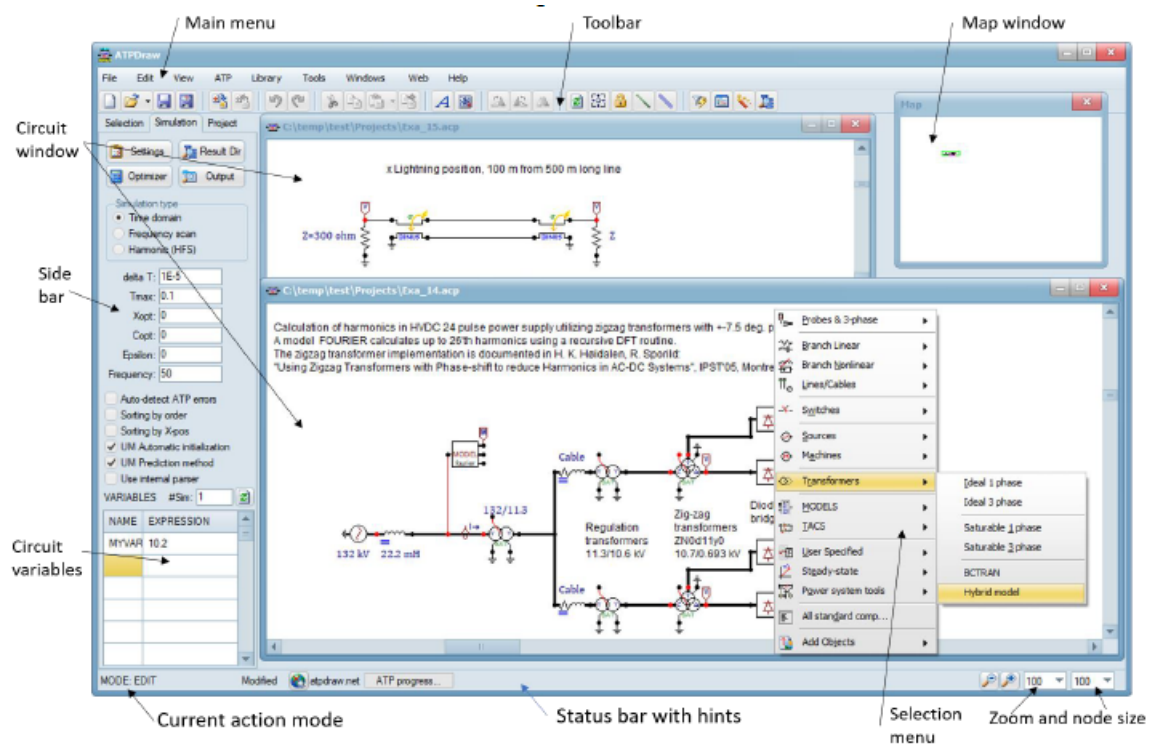


Figura 4.2: Ventana principal ATPDraw con sus apartados [4]

## 4.5. Elementos de la barra de menú

En la barra de menú se encuentran los siguientes elementos que se describen a continuación.

1. File: Menú que contiene los elementos básicos como son: crear, abrir, guardar, imprimir.

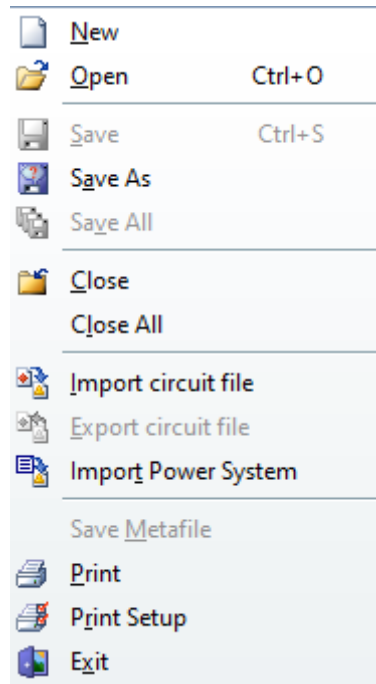


Figura 4.3: Menú File

2. ATP: Contiene los diferentes elementos para compilar el proyecto así como para ejecutar en la pantalla cmd, o algún otro programa que se encuentre conectado al ATPDraw.

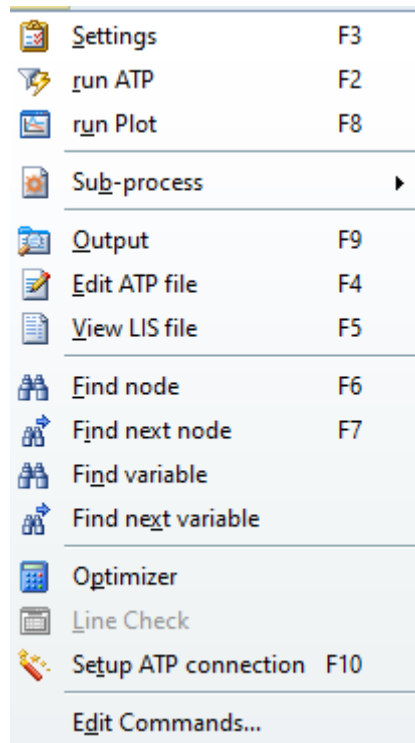
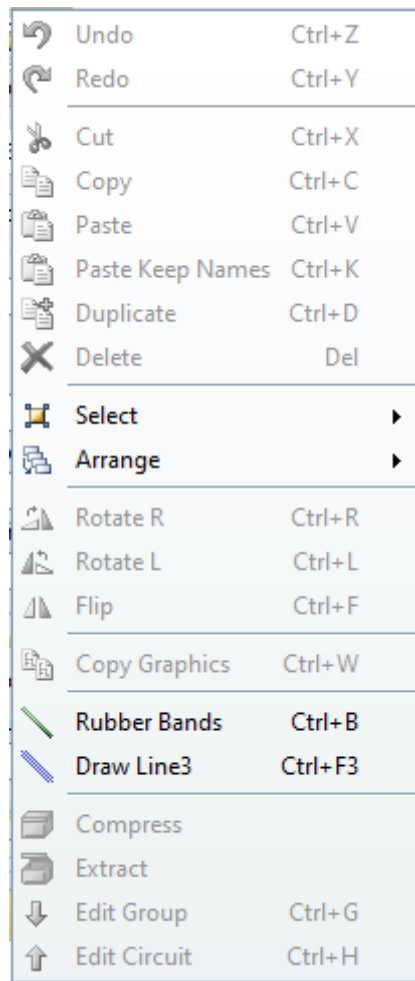


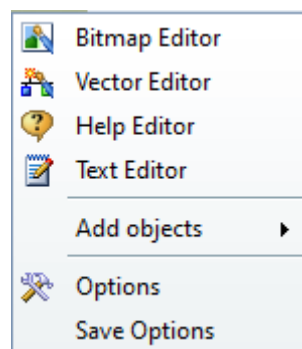
Figura 4.4: Menú ATP

3. Edit: Como su nombre lo indica en este apartado se encuentran todos los elementos para la edición del respectivo proyecto que se este trabajando en la siguiente imagen se aprecia las opciones que lo integran.



**Figura 4.5:** Menú Edit

4. Tools: Se usa para editar los archivos, iconos, textos pudiendo así personalizar de diferentes formas el programa.



**Figura 4.6:** Menú Tools

5. View: En este apartado el usuario puede modificar lo que respecta a la vista

en cuanto a la cercanía o lejanía del proyecto, también se pueden activar o desactivar la barra de herramientas.

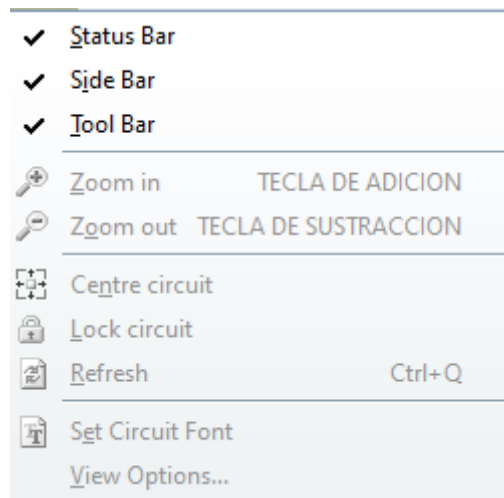


Figura 4.7: Menú View

6. Windows: Se usa comúnmente para organizar las ventanas del circuito.

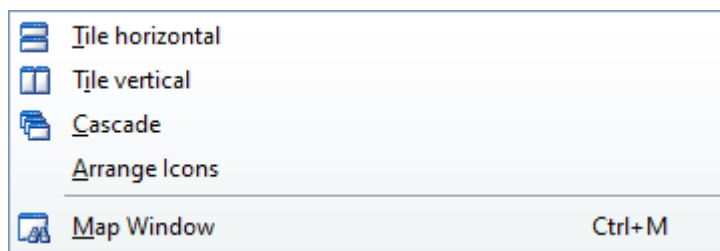


Figura 4.8: Menú Windows

7. Help: Como todo programa es el lugar en donde se encuentra el repositorio de ayuda especial de ATPDraw.

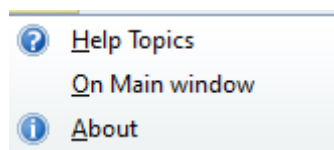


Figura 4.9: Menú Help

## 4.6. MODELS

El módulo de programa MODELS en ATP es centralizado en la asociación de la estructura de un modelo y en la función de los elementos, siendo así un lenguaje de

descripción de propósito general apoyado por un amplio conjunto de herramientas de simulación para la representación y el estudio de sistemas variables en el tiempo [4].

En MODELS se puede distinguir entre el uso de un modelo y la descripción de un modelo. Los modelos individuales como su nombre lo indica se pueden crear o modificar independientemente, agruparse en una o varias bibliotecas que consten de modelos y utilizarse en diferentes modelos siendo totalmente independientes en la construcción de los sistema [4].

#### 4.6.1. Ventajas de los MODELS

Frente a las disposiciones y versatilidad que tienen los MODELS se puede obtener ventajas al momento de poner en practica dentro de algún proyecto.

- La descripción de cada modelo se habilita mediante una sintaxis de formato libre, basada en palabras clave de contexto local y que se auto documenta en gran medida evitando tener algún formato fijo en la representación.
- Los MODELOS en ATP permiten la descripción de componentes de control y circuitos arbitrarios definidos por el usuario, proporcionando una interfaz sencilla para conectar otros programas/modelos a ATP.
- Como herramienta programable de propósito general, MODELS puede utilizarse para procesar los resultados de la simulación tanto en el dominio de la frecuencia como en el dominio del tiempo.

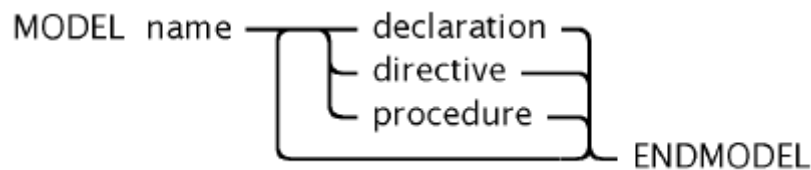
#### 4.6.2. Características de los MODELS

- La sintaxis de MODELS permite la representación de un sistema según la estructura funcional del mismo, soportando la descripción explícita de composición, secuencia, concurrencia, selección, repetición y replicación.
- La descripción de un modelo se puede usar como las misma documentación.
- La interfaz de un modelo con el mundo exterior está claramente especificada.
- Un sistema puede dividirse en submodelos individuales, cada uno con un espacio de nombres local sin afectar a los demás modelos.

- Los modelos y funciones utilizados para describir el funcionamiento de un sistema pueden construirse en lenguajes de programación distintos del lenguaje MODELS.

## 4.7. Definiciones de MODELS

Como se aprecia en la figura 5.3 se tiene un orden jerárquico para la realización correcta del algoritmo de models correspondientes al proyecto realizado.



**Figura 4.10:** Sintaxis utilizada para la definición de un modelo

### 4.7.1. Declaraciones

- **CONST:** Especifica el nombre, el rango del array y el valor de las constantes del modelo.
- **DATA:** Especifican el nombre, el rango de la matriz y el valor opcional por defecto de los parámetros de datos del modelo.
- **VAR:** Especifican el nombre y el rango de la matriz de las variables del modelo.
- **INPUT:** Especifican el nombre, el rango de la matriz y el valor opcional por defecto de las entradas del modelo.
- **OUTPUT:** Especifican qué elementos del modelo pueden ser utilizados como salidas del modelo.
- **FUNCTION:** Especifican la descripción de las funciones utilizadas en el modelo.
- **MODEL:** Especifican la descripción de los submodelos utilizados en el modelo.

#### 4.7.2. Directivas

- **TIMESTEP:**- Propone el valor opcional por defecto de los límites mínimo y máximo para el modelo.
- **INTERPOLATION:** Especifica el grado de interpolación por defecto que se aplicará a las entradas del modelo si el modelo se utiliza en subpasos del paso de tiempo externo.
- **DELAY:** Especifica el tamaño por defecto del almacenamiento de valores asociado al uso de la función `delay()` en el modelo.
- **HISTORY:** Pueden utilizarse opcionalmente para asignar funciones históricas por defecto a cualquiera de las entradas y variables del modelo;

#### 4.7.3. Procedimiento

- **EXEC:** Describe el algoritmo de ejecución del modelo.
- **INIT:** Describe el algoritmo de inicialización del modelo.

### 4.8. Interfaz de un MODEL en ATPDraw

El programa ATPDraw consta de Models por defecto los cuales se pueden modificar de acuerdo al proyecto que se vaya a realizar estos cumplen con las estructuras de sintaxis predefinidas en la figura 5.3. En la figura 4.11 se puede apreciar como es icono del model que luego sera usado para la interacción correspondiente.



**Figura 4.11:** Icono del MODEL

En la figura 4.12 se aprecia como es la programación interna de un model, dicho código presentado en la figura es el que viene por defecto y cumple con las estructura de sintaxis.

```
1  MODEL DEFAULT
2  DATA d1,d2
3  INPUT i1,i2
4  OUTPUT o1,o2
5  VAR o1,o2
6  INIT
7     o1:=0
8     o2:=1
9  ENDINIT
10 EXEC
11     o1:=(i1-i2)*t
12     o2:=sin(o1)
13 ENDEXEC
14 ENDMODEL
```

Figura 4.12: Estructura de sintaxis del MODEL

## 4.9. TACS

El módulo de programa TACS es un módulo de simulación para el análisis en el dominio del tiempo de los sistemas de control. La interfaz entre la red eléctrica y TACS, se establece mediante el intercambio de señales como el nodo tensión, corriente del interruptor, estado del interruptor, resistencia variable en el tiempo, fuentes de tensión y corriente. Para TACS, se utiliza un diagrama de bloques de los sistemas de control [4].

### 4.9.1. Uso de losTACS

Centro del ámbito funcional se tiene que los pueden facilitar muchos de los circuitos, funciones de transferencia ya que su código de estructura ya esta definido solo se debe realizar los cambios de datos.

Así se pueden mencionar algunos de los casos más comunes en los cuales se integran los TACS como son:



- Sistemas de excitación de máquinas síncronas
- Electrónica de potencia y accionamientos
- Arcos eléctricos (arcos de corte y de avería).

#### 4.9.2. Variables

El uso de variables también puede llamarse parametrización o scripting y en lugar de un valor de datos se puede especificar un nombre de variable y asignarle un valor externamente. La ventaja es cuando los valores de datos se utilizan en muchos componentes diferentes, y cuando hay necesidad de actualizaciones frecuentes de algunos parámetros clave. Además, las Variables permiten variaciones sistemáticas de valores con Múltiples Ejecuciones ya que la variable por defecto KNT está disponible como el número de simulación. Un componente clave compatible con las Tiradas Múltiples es el modelo WriteMaxMin que está diseñado para extraer los valores extremos de una simulación en función de variables o el número de simulación [4].

Con la opción clásica PARAMETER, la parametrización se gestiona dentro de ATP. Esto significa que las variables utilizadas en los cálculos internos de ATPDraw no pueden ser asignadas a variables. El atributo de datos Params se establece en la unidad cuando se permite la parametrización. Con la opción Internal Parser, las variables obtienen sus valores asignados antes de la ejecución de ATP en hilos y carpetas paralelas [4].

### 4.10. Configuración de ATPDraw previo a la simulación

Con los parámetros y ventanas principales especificadas con anterioridad para el inicio de la simulación es importante tener en cuenta los valores de tiempo, valores de delta de tiempo y frecuencia en los que se va a trabajar cada proyecto. En el presente trabajo investigativo se propone trabajar en valores PU para lo cual se sigue con los siguientes cálculos para realizar la conversión de tiempo a valor en PU.

Como se menciona en el capítulo 2 los valores dePU deben tener una unidad base, en este caso se toma como unidad base la velocidad angular con el siguiente valor.

$$w_b = 377$$

Con el valor base anterior, para que la MSPS gire a la velocidad de sincronismo el valor de su velocidad angular debe ser:

$$w = 1$$

Teniendo en cuenta la siguiente igualdad:

$$w = 2\pi f$$

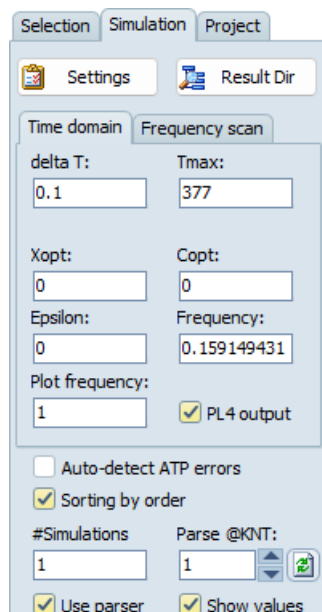
Y realizando el despeje de la frecuencia se tiene.

$$f = \frac{w}{2\pi}$$

Con los valores obtenidos y realizando las igualdades pertinentes se tiene el valor de la frecuencia.

$$f = 0,1591549431$$

De acuerdo a estos resultados se ingresan en ATPDraw para configurar todos los valores en MSPS y así trabajar sin alguna restricción.



**Figura 4.13:** Valores en PU

En la figura 4.13 se observa como han sido ingresados los valores de frecuencia, tiempo de muestreo y tiempo de simulación todo esto representa 1 segundo (1s).

## CAPÍTULO 5

### SIMULACIONES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 5.1. Simulación de la MSPS con los sistemas de excitación

En este capítulo se realizarán las simulaciones respectivas de acuerdo a los diferentes sistemas de control de excitación que se han propuesto. Para cumplir con estos objetivos de análisis de resultados se ha iniciado con el modelo y construcción del algoritmo de la MSPS.

#### 5.2. Modelo circuital y algoritmo de la MSPS

Con las ecuaciones mostradas en el capítulo 2 se puede crear el algoritmo de mando en el modelo respectivo para el correcto funcionamiento de la MSPS.

En la figura 5.1 se observa el modelo dinámico de la MSPS realizado en el software ATPDraw. El modelo de la figura presenta el modelo circuital equivalente con su respectiva impedancia descrita por la ecuación 2.22.

##### 5.2.1. Diseño del modelo circuital del sistema

En el modelo circuital se representa al sistema, conectado como una fuente y una impedancia compuesta por un sistema RL que se asemeja al modelo de una barra. El valor de la fuente está con un valor de 1 en PU, mientras que los valores de R y L se obtienen de la siguiente manera.

$$\frac{X}{R} = 15 \quad (5.1)$$

$$I_{cc} = 25 \quad (5.2)$$

Como se tiene el valor de la fuente y el valor de la corriente de corto circuito se obtiene la impedancia del sistema que es la siguiente:

$$Z = \frac{V}{I_{cc}} \quad (5.3)$$

$$Z = \frac{1}{25} = 0,04PU \quad (5.4)$$

Una vez obtenido el valor de la impedancia se realiza el calculo de R y L con la siguiente expresión.

$$0,04^2 = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (5.5)$$

Con la igualdad de la expresión 5.1 se obtiene el valor de X y se lo reemplaza el ecuación 5.5 quedando de la siguiente manera.

$$X = 15R \quad (5.6)$$

$$0,04^2 = \sqrt{R^2 + (15R)^2} \quad (5.7)$$

Resolviendo la expresión anterior se tiene que el valor de R es el siguiente.

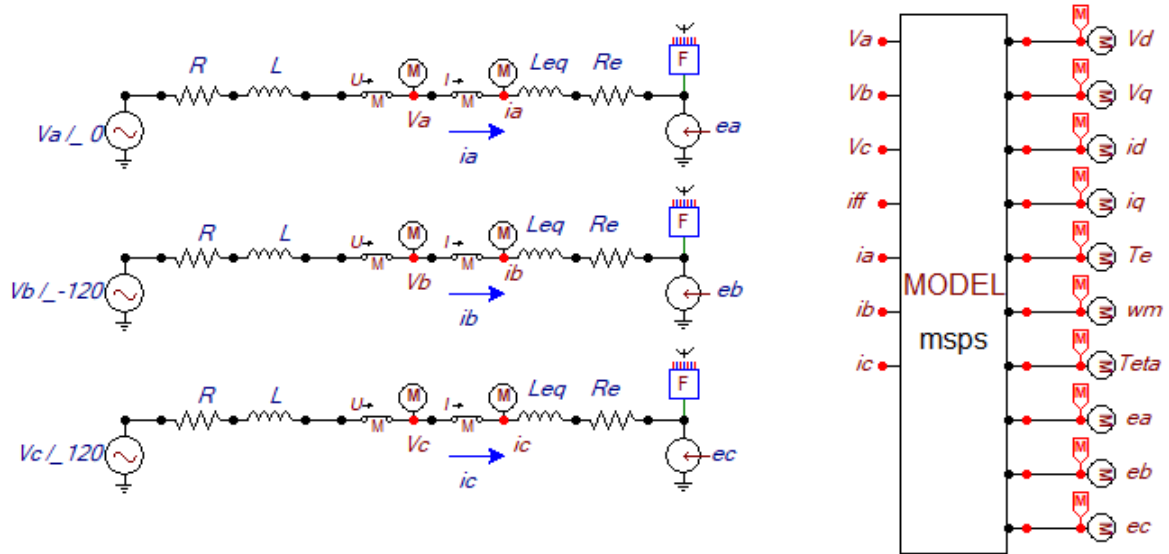
$$R = 0,103165 \quad (5.8)$$

Reemplazando el valor de R obtenido en la igualdad 5.1 se tiene que:

$$X = 0,154747 \quad (5.9)$$

Tanto el valor de R y X entran satisfacen las igualdades y corrientes de cortocircuito del sistema. Estos son valores fijos que son ingresados en el modelo circuital mostrado en la figura 5.1.

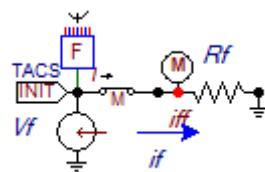
Para desarrollar el algoritmo de la MSPS se necesita conocer las ecuaciones que rigen a la máquina, estas ecuaciones están descritas en el capítulo 2.



**Figura 5.1:** Diseño del modelo dinámico de la MSPS en ATPDraw

Como se muestra en la figura 5.1, las entradas y salidas que tiene el MODEL son complementadas con el modelo circuital.

En el modelo circuital el control de potencia y voltaje se realiza mediante el circuito de campo que esta conformado por una fuente de corriente continua (DC) y la resistencia de campo mostrado en la figura número 5.2.



**Figura 5.2:** Modelo circuital de Campo

La programación en MODELS es necesario conocer los parámetros de la MSPS los cuales se presentan en la tabla 5.1, teniendo en cuenta que los valores están en PU.

<b>Parámetros de la MSPS</b>	
Ldf	0.9
Ld	1
Lf	1.05
Re	0.01
Rf	0.02

**Tabla 5.1:** Parámetros usados en la MSPS

### 5.2.2. Algoritmo de la MSPS en MODELS

En el algoritmo 5.2 se presenta el código implementado dentro del model donde se muestra los parámetros a usar en la MSPS los cuales son: entradas, salidas, variables y valores por defecto que recibirán ciertas constantes usadas.

<b>Inicialización de variables, entradas y salidas</b>
MODEL MSPS
DATA Ldf{dff: 0.9}, Ld{dff: 1}, Lq{dff: 0.6}, Lf{dff: 1.05}
DATA Re {dff: 0.01}, Rf{dff: 0.02}
CONST SQRT23{val: 0.816496581}, SQRT32{val: 0.8660254038}
CONST SQRT66{val: 0.4082482905}, SQRT22{val: 0.7071067812}
CONST SQRT3{val: 1.732050808}
INPUT Va, Vb, Vc, iff, ia, ib, ic
OUTPUT Vd,Vq, id, iq, Te, wm, Teta, ea, eb,ec
VAR Vx, Vy, Vd, Vq, Teta, Teta_n
VAR dat, ex, ey, ea, eb, ec
VAR ix, iy, id, iq, wm, Te
VAR pFid, pFiq, pwm, Tm, eq1, eq2

**Tabla 5.2:** Algoritmo de inicialización

En la sección HISTORY se realiza el almacenamiento de las variables que deben preservar su valor anterior en cada paso de muestreo. En el algoritmo 5.3 se presentan las variables deben almacenar su valor anterior a cada paso de muestreo.

<b>Historial de variables</b>
HISTORY
pwm {dfflt:0}
integral(pwm) {dfflt:1}
wm {dfflt:1}
integral(wm) {dfflt:1}

**Tabla 5.3:** Algoritmo de HISTORY

En la sección de inicialización mostrado en el algoritmo 5.4 se muestran los valores que deben tener las variables al momento de compilar el programa donde se incluyen las variables de las ecuaciones de la MSPS mostradas en el capítulo 2.

<b>Inicio de Variables</b>
INIT
Vx:=0, Vy:=0
Vd:=0, Vq:=0
Teta:=0
Te:=0
pFid:=0, pFiq:=0
pwm:=0
dat:=0
ex:=0, ey:=0
ea:=0, eb:=0, ec:=0
wm:=1
ix:=0, iy:=0
id:=0, iq:=0
eq1:=0, eq2:=0
ENDINIT

**Tabla 5.4:** Algoritmo de Inicialización de Variables

En el algoritmo 5.5 se presenta el cuerpo del model usando las diversas ecuaciones que se presentan en el capítulo 2, para obtener los valores deseados en la ejecución del model.

### Ejecutable del modelo de la MSPS

EXEC

— Transformación ABC a DQ —

```
Vx:= sqrt23*(Va-(Vb/2)-(Vc/2))
Vy:= sqrt23*((sqrt32*Vb)-(sqrt32*Vc))
Teta_n:=Teta-2*pi*trunc(Teta/(2*pi))
Vd:=(Vx*cos(Teta_n))+(Vy*sin(Teta_n))
Vq:=(Vy*cos(Teta_n)-(Vx*sin(Teta_n))
```

```
ix:= sqrt23*(ia-(ib/2)-(ic/2))
iy:= sqrt23*((sqrt32*ib)-(sqrt32*ic))
id:= (ix*cos(Teta_n))+(iy*sin(Teta_n))
iq:= (iy*cos(Teta_n)-(ix*sin(Teta_n))
```

— Resolución de landa F —

```
dat:= SQRT3*Ldf*iff
```

— Funciones derivadas —

```
pFid:=(Vd-(Re*id)+(Lq*iq*wm))/Ld
pFiq:=(Vq-(Re*iq)-(wm*((Ld*id)+dat)))/Lq
```

— Variables auxiliares de las ecuaciones ex, ey

```
eq1:=(wm*(Ld-Lq)*((iq*cos(Teta_n)-(id*sin(Teta_n))))
-(wm*dat*sin(Teta_n))
eq2:=(wm*(Ld-Lq)*((id*cos(Teta_n)+(iq*sin(Teta_n))))
+(wm*dat*cos(Teta_n))
```

— Función ex y ey —

```
ex:= ((Ld-Lq)/2)*((pFid*cos(Teta_n)+(pFiq*sin(Teta_n)))+eq1
ey:= ((Ld-Lq)/2)*((pFid*sin(Teta_n)-(pFiq*cos(Teta_n)))+eq2
```

— Transformación xy a abc —

```
ea:= SQRT23*ex
eb:=-(SQRT66*ex)+(SQRT22*ey)
ec:=-(SQRT66*ex)-(SQRT22*ey)
```

— Par —

```
Te:=((Ld-Lq)*(id*iq))+(Ldf*iq*iff)
Tm:=Te;
pwm:=(Te-Tm)/J
wm:= INTEGRAL(pwm)
Teta:= INTEGRAL(wm)
```

ENDEXEC

**Tabla 5.5:** Algoritmo del ejecutable



### 5.3. Modulo de Voltaje, Corriente y Potencia en la MSPS

Con el modelo principal de la MSPS es necesario crear un modulo el cual permita obtener las señales de voltaje, potencia y corriente de la máquina, siendo estas señales las que están presentes en el sistema para luego ser controladas mediante las diferentes excitatrices.

En la figura se observa el modulo generado con sus entradas y salidas respectivas.

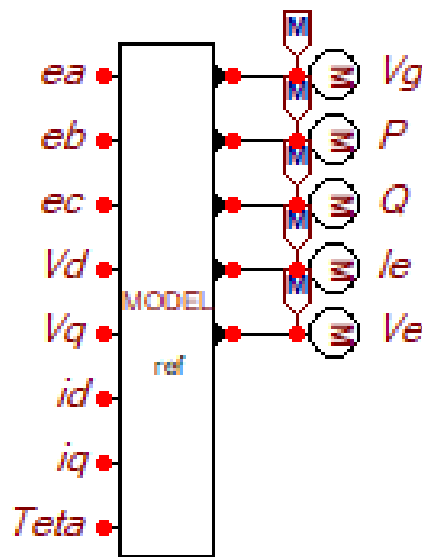


Figura 5.3: Modulo de mediciones

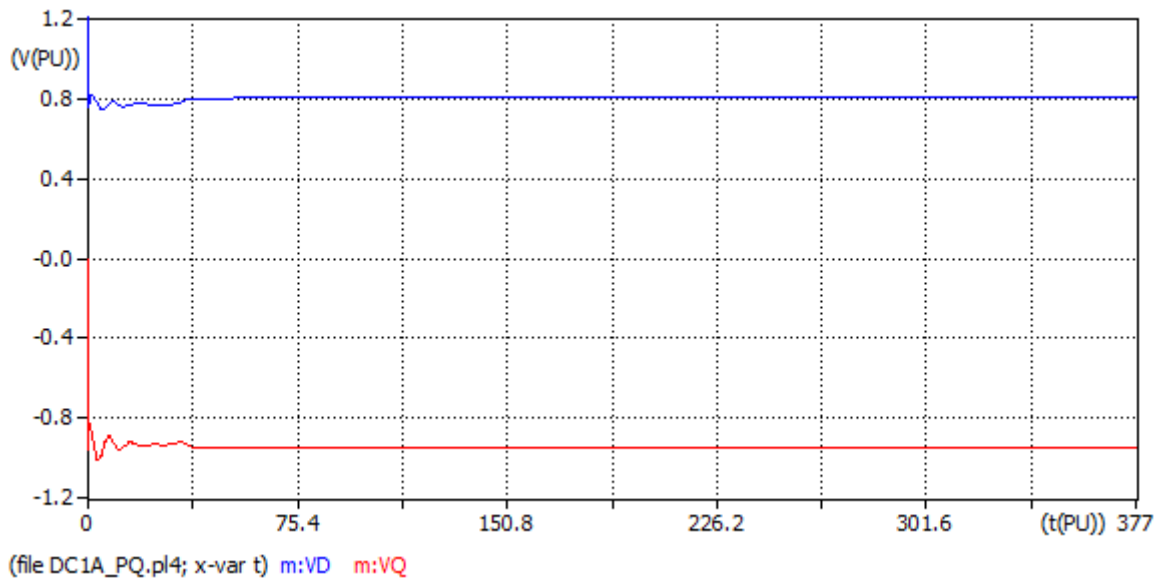
La respectiva programación del modulo se la puede observar en el anexo 6.2

### 5.4. Simulación de la MSPS

#### 5.4.1. Voltaje directo y de cuadratura de la MSPS

Con el algoritmo creado se obtiene la señales de las voltaje directo y de cuadratura en donde cada una de estas señales con el paso del tiempo es de valor constante mostrado en la figura 5.4.

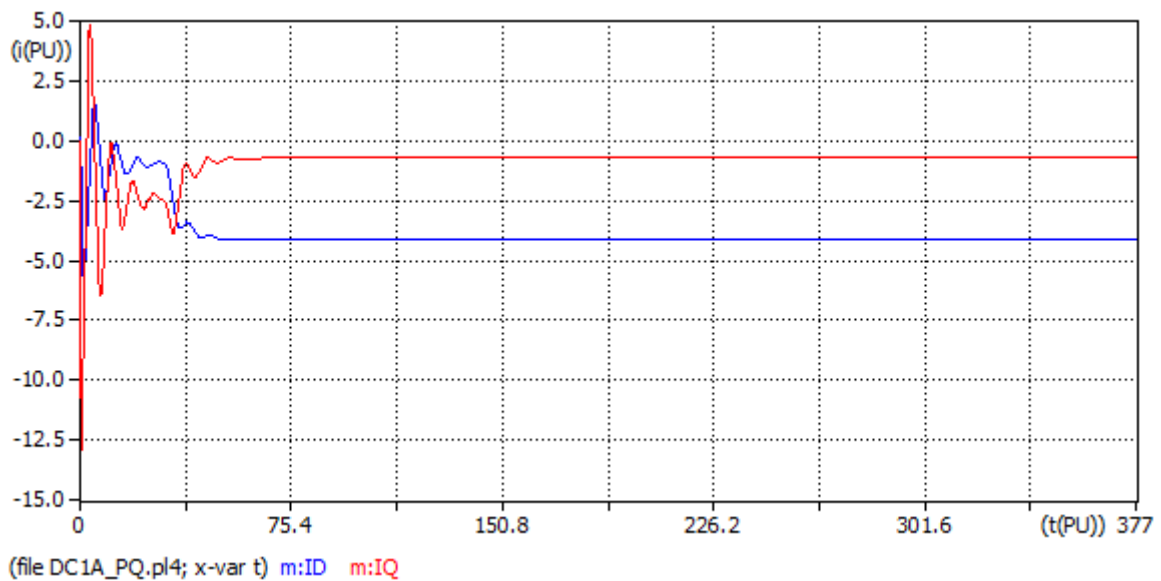
La figura 5.4 muestra el los picos iniciales hasta que se estabiliza en la velocidad de sincronismo.



**Figura 5.4:** Voltaje directo y de cuadratura en la MSPS

#### 5.4.2. Corriente directa y de cuadratura de la MSPS

De la misma manera que en la sección anterior las gráficas de la corriente directa y de cuadratura en el proceso transitorio obtienen sus variaciones hasta que llega el estado permanente, donde estas señales se mantienen constantes al paso del tiempo. En la figura 5.5 se puede verificar los cambios que hay en las señales de corriente donde se estabiliza en el estado permanente.

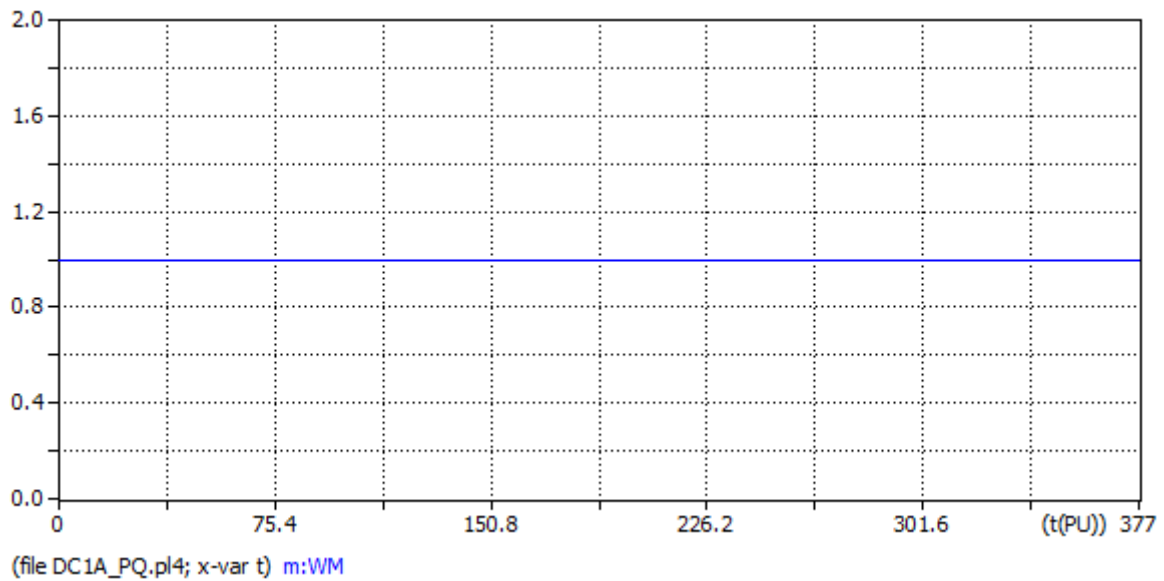


**Figura 5.5:** Corriente directa y de cuadratura en la MSPS

### 5.4.3. Velocidad angular ( $w_m$ )

La velocidad angular al igual que las corrientes y voltajes directos y de cuadratura se va a mantener permanente en el tiempo con un valor de unidad debido a que se esta trabajando a velocidad de sincronismo y todos los valores de la MSPS se encuentran en PU.

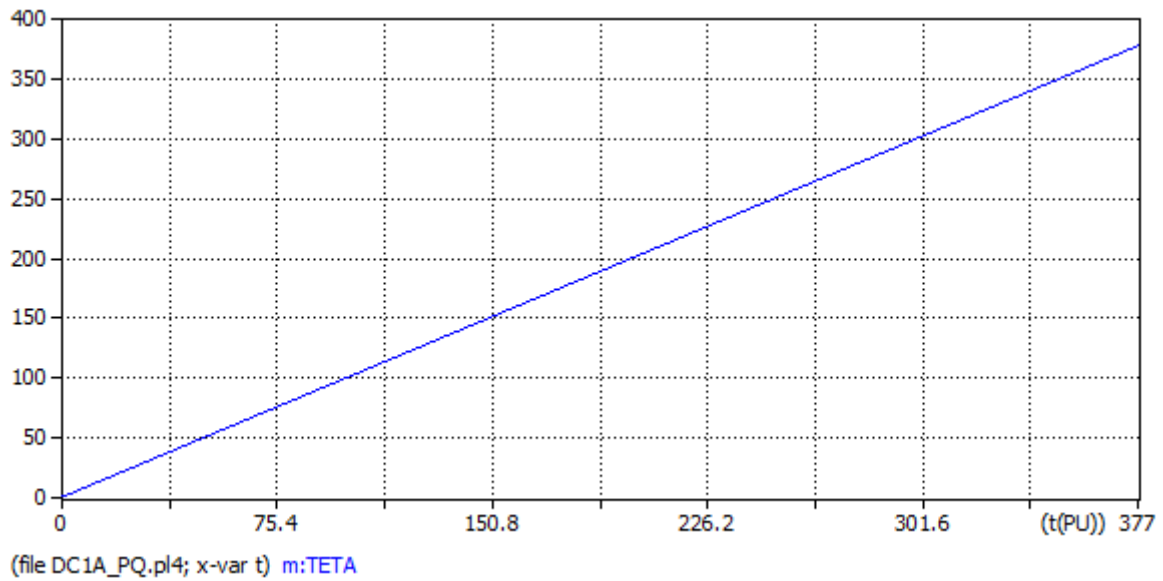
Como se aprecia en la figura 5.6 todo el tiempo de muestreo o simulación que mantiene la máquina es constante la velocidad angular ( $w_m$ ).



**Figura 5.6:** Velocidad angular  $w_m$  respecto al tiempo

### 5.4.4. Ángulo $\theta$

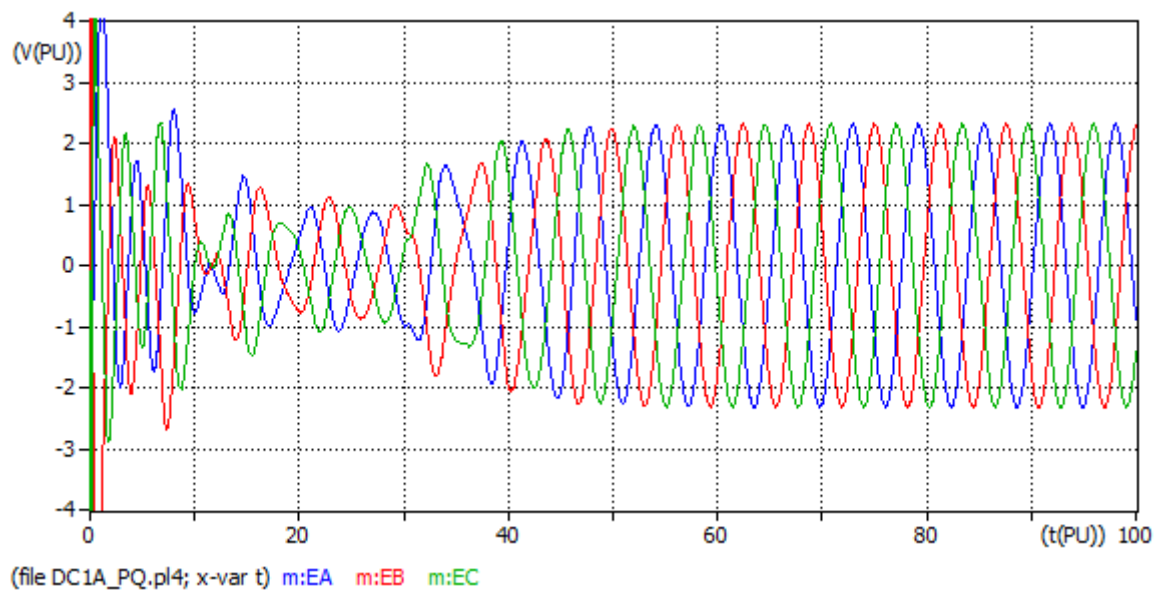
Con el funcionamiento de la máquina el ángulo debe ir incrementando cumpliendo así con la integración de la velocidad angular la cual es contante en el tiempo. La figura 5.7 muestra como ATPDraw integra el valor de la velocidad angular ( $w_m$ ) en el tiempo para obtener el ángulo ( $\theta$ ).



**Figura 5.7:** Ángulo  $\theta$  respecto al tiempo

#### 5.4.5. Voltajes instantáneo en el estator

Los valores de voltaje instantáneo producidos en la MSPS son señales sinusoidales que tienen sus respectivos desfases de  $120^\circ$  en comparación a la siguiente fase. Como se aprecia en la figura 5.8 se aprecia las formas sinusoidales obtenidas y el desfase adecuado entre fase, estas señales tienen su tiempo de transitorios hasta llegar al estado permanente y de estabilización.



**Figura 5.8:** Voltajes  $e_a$ ,  $e_b$ ,  $e_c$

#### 5.4.6. Mediciones antes de la reactancia

Con el modulo de mediciones se obtiene las respectivas señales de voltaje  $V_e$ , corriente  $I_e$ , potencia activa  $P$  y potencia reactiva  $Q$ . La figura 5.9 muestra las señales mencionadas que son usadas para la comparación entre lo que se entrega al sistema y lo que se debe implementar en los sistemas de excitación para controlar el voltaje o la potencia reactiva.

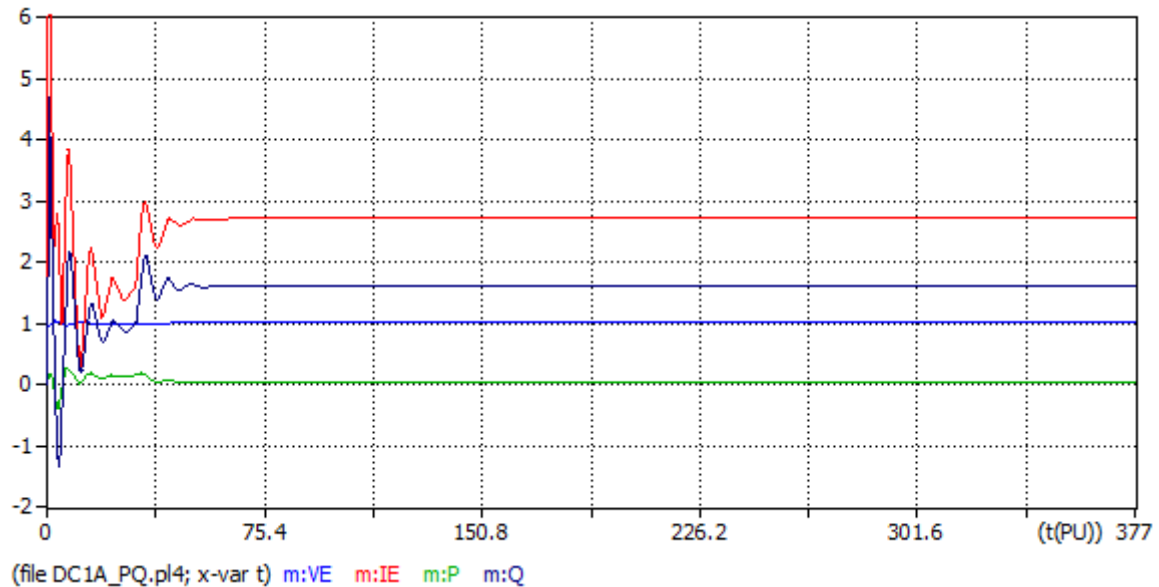


Figura 5.9: Señales de voltaje, corriente, potencia activa y reactiva

### 5.5. Resultados de la simulación de la MSPS

Con la simulación de la máquina síncrona de polos salientes, se puede observar el comportamiento de las diferentes señales tanto de voltajes, corrientes y potencias son los adecuados en el modelado de la misma máquina.

Este modelo generado por los algoritmos mostrados en 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5 cumplen con el modelo dinámico de la maquina en donde se han implementado las ecuaciones del modelo matemático dando lugar al correcto funcionamiento de laMSPS.

## 5.6. Sistemas de excitación de la MSPS

El sistema de excitación en la MSPS inyectan una corriente continua generando un campo magnético con el cual se puede controlar el voltaje y potencia de la máquina que entrega al sistema.

## 5.7. Sistema de excitación DC

Siguiendo el estándar de IEEE [5] en el cual se encuentra los diferentes modelos de excitación DC, se ha elegido el modelo DC1A que se presenta en la figura 5.10.

Este modelo es uno de los principales en el estudio debido a su similitud con el modelo DC1C propuesto en la IEEE.

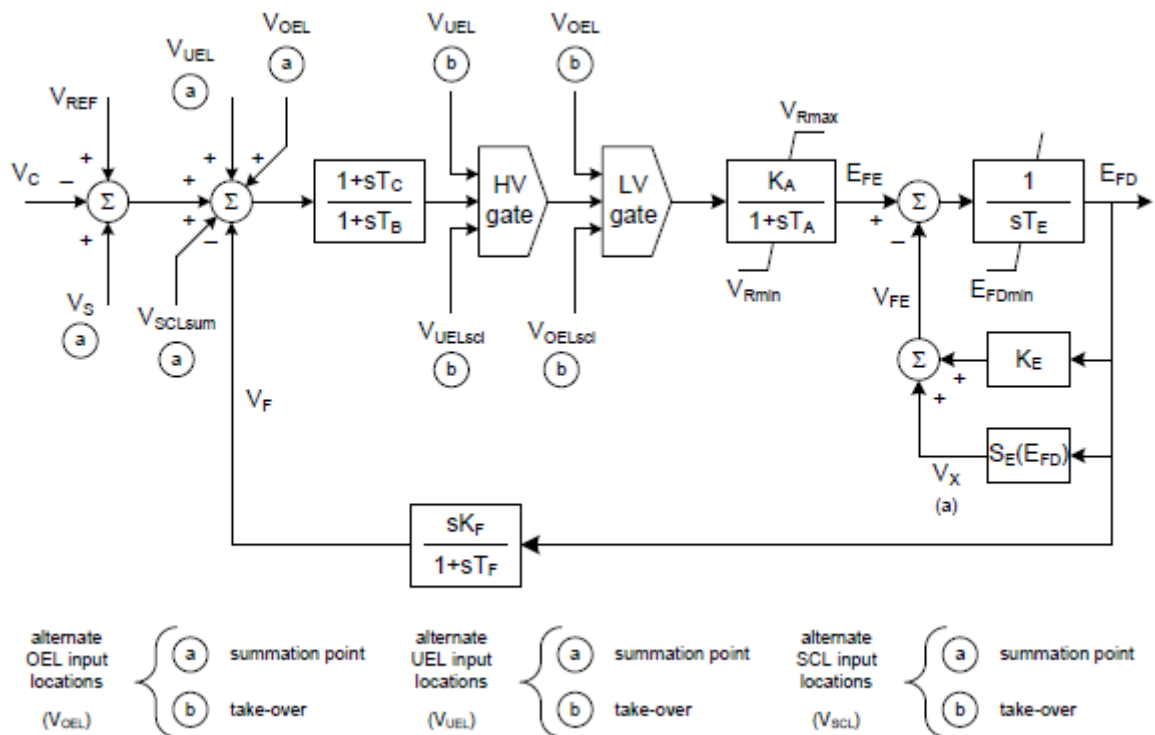


Figura 5.10: Excitador de corriente continua tipo DC1A [5]

### 5.7.1. Modelo DC1A en ATPDraw

Debido a la gran versatilidad y usos que se tiene software ATPDraw se a diseñado de forma similar las distintas funciones de transferencias mediante el uso de TACS. De acuerdo al control sea de potencia reactiva o voltaje los parámetros de la función de transferencia principal varían.

En la figura 5.11 se observa el modelo DC1A implementado en el software usado para la simulación.

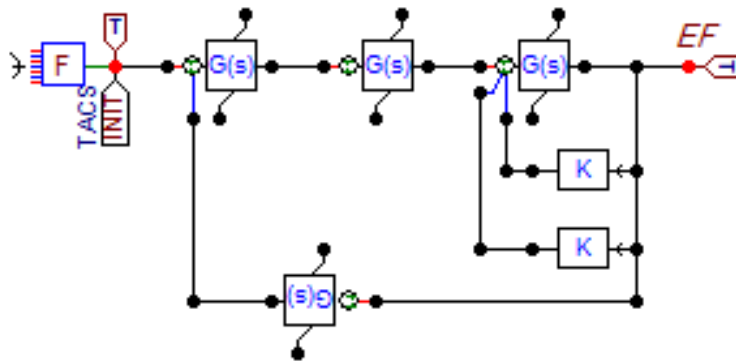


Figura 5.11: Diseño en ATPDraw del modelo DC1A

Como se observa en 5.11 el modelo solo tiene las funciones de transferencia ya que se ha simulado como un sistema que no tiene limitaciones en tanto a voltaje máximos y mínimos. Los voltaje máximos y mínimos que soportara el modelo DC1A será controlado por un model el cual funciona como transductor, a su vez este limitará y adecuara las referencias que debe tener el modelo para el control de potencia reactiva o voltaje en la MSPS.

### 5.7.2. Control de potencia Reactiva mediante el modelo DC1A

Para el control de potencia reactiva en el modelo DC1A se debe tomar en cuenta los diferentes parámetros y constantes que deben ser aplicados al modelo para que funcione de manera adecuada con las referencias que se ingresen en el modelo. Los parámetros de las funciones de transferencia se han adecuado dependiendo de los rangos de las señales de referencia que ingresan y se ha calculado mediante el uso del software MATLAB cuyo uso es para distintas aplicaciones.

En la tabla 5.6 se aprecia los valores obtenidos del software MATLAB los cuales se han implementado en el modelo DC1A.

Descripción	Parámetro	Valor	Unidad
Componente resistivo de la compensación de carga	$R_C$	0	pu
Componente de reactancia de la compensación de carga	$X_C$	0	pu
Constante de tiempo del filtro de entrada del regulador	$T_R$	0	s
Ganancia de salida del regulador	$K_A$	1	pu
Constante de tiempo del regulador	$T_A$	0.06	s
Constante de tiempo del denominador del regulador	$T_B$	0	s
Constante de tiempo del numerador del regulador	$T_C$	0	s
Constante proporcional del campo del excitador	$K_E$	0.05	pu
Constante de tiempo del campo de excitación	$T_E$	5	s
Ganancia de realimentación de velocidad	$K_F$	0.0001	pu
Constante de tiempo de realimentación	$T_F$	0.1	s
Factor de saturación SE(E)	$SE_E$	0.95	pu

**Tabla 5.6:** Datos modelo DC1A control potencia reactiva

### 5.7.2.1. Modulo controlador de potencia reactiva en el modelo DC1A

En la obtención de las referencias para el modelo DC1A en control de potencia reactiva se plantea el diseño de un model que funciona como transductor de las señales del sistema y adecua la salida a la referencia necesaria para la excitación, cumpliendo los parámetros de control en lo que representa la potencia reactiva.

Para obtener la referencia que se ajuste a los requerimientos del usuario se ha realizado una tabla de muestreo de datos para así cuantificar en una ecuación que cumpla y ajuste a los datos.

De acuerdo a los parámetros de la conexión a la red esta ecuación varia, para el caso en análisis cumple perfectamente como se aprecia en la ecuación 5.10.

$$V_{VAR} := 0,0002 * Q_{ref}^2 + 0,0827 * Q_{ref} - 0,0756 \quad (5.10)$$

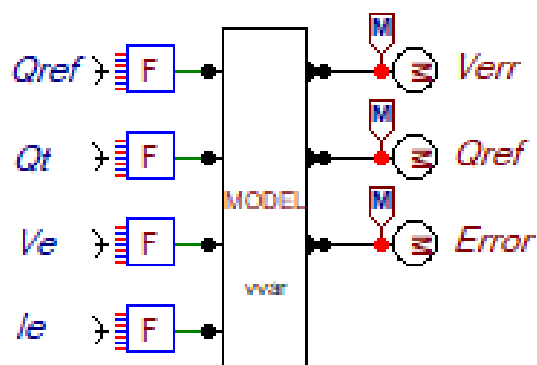
Con la ecuación principal que comanda el modulo del transductor se implementa los limites de voltaje mínimo y máximo que debe tener el sistema para funcionar de la mejor manera como se muestra en el algoritmo 5.7.



<b>MODEL VVAR</b>	
DATA	itmin,vtmin
CONST	ini{val: -0.08026 }
INPUT	Qrf,Qt1, v1, i1
OUTPUT	Vvar,o2, error
VAR	Vvar,o2, error
INIT	
	Vvar:=0
	o2:=0
	error:=0
ENDINIT	
EXEC	
	if i1>itmin and v1>vtmin then
	Vvar:= (0.0002*(Qrf**2))+ (0.0827*Qrf)-0.0756
	else
	Vvar:= ini
	endif
	o2:=Qrf
	error:=abs((((Qrf-Qt1)/Qrf)*100)
ENDEXEC	
ENDMODEL	

**Tabla 5.7:** Algoritmo del transductor control PQ en el modelo DC1A

En la figura 5.12 se aprecia el modelo tipo transductor con las entradas y salidas que tendrá para actuar el excitador DC1A.



**Figura 5.12:** Model del controlador

### 5.7.3. Simulación del modelo DC1A control PQ

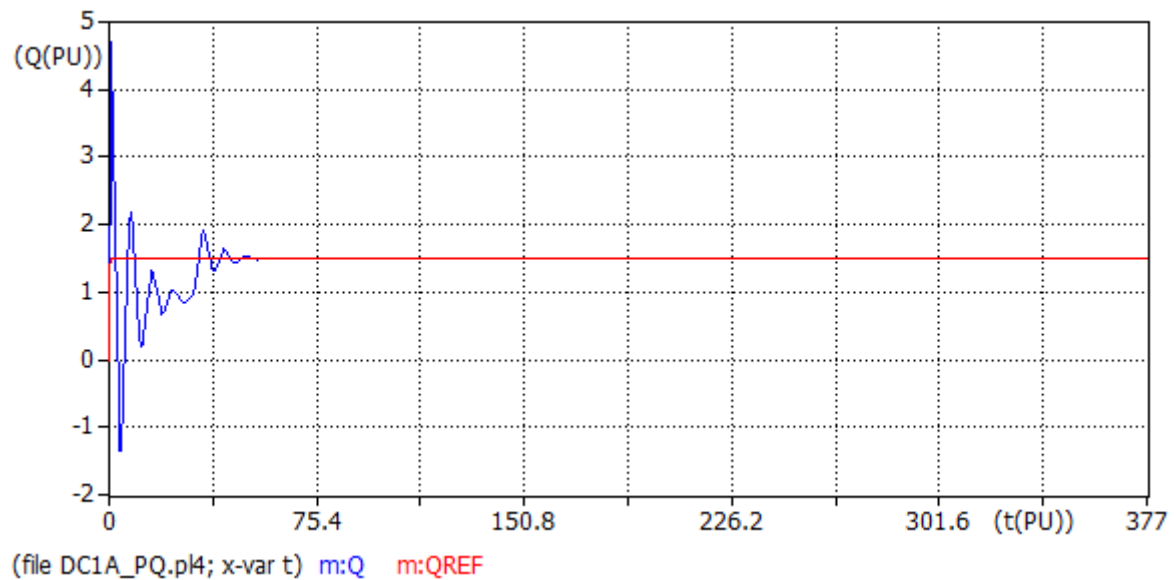
Para la simulación se hace las pruebas de funcionamiento en donde se ha elegido los valores de potencia de referencia que se debe adaptar el sistema teniendo la siguiente tabla 5.8 con la referencias de pruebas.

Referencias	
Qref1	1.5
Qref2	2

**Tabla 5.8:** Valores referenciales de potencia reactiva en el modelo DC1A

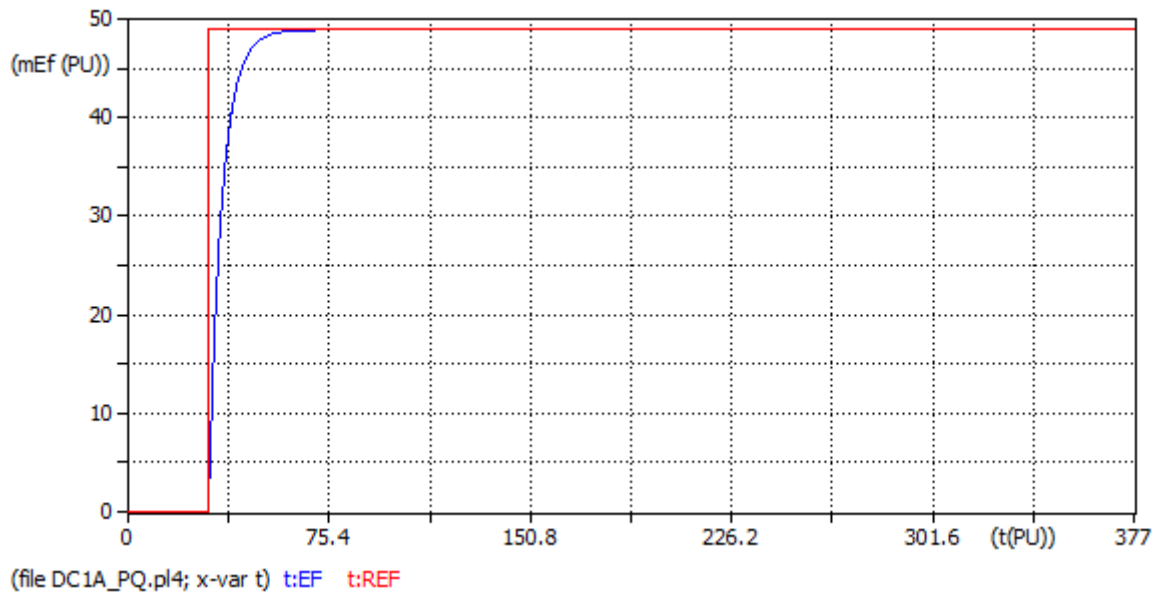
#### 5.7.3.1. Simulación con $Q_{ref} = 1,5$

Ingresando la referencia en el transductor el valor de 1.5 se ve en la figura 5.13 como la máquina adecuada la potencia reactiva que esta entregando al sistema y toma el valor de la referencia, este valor ingresa en el tiempo igual a 30 debido a que en este tiempo empieza el estado permanente de la máquina.



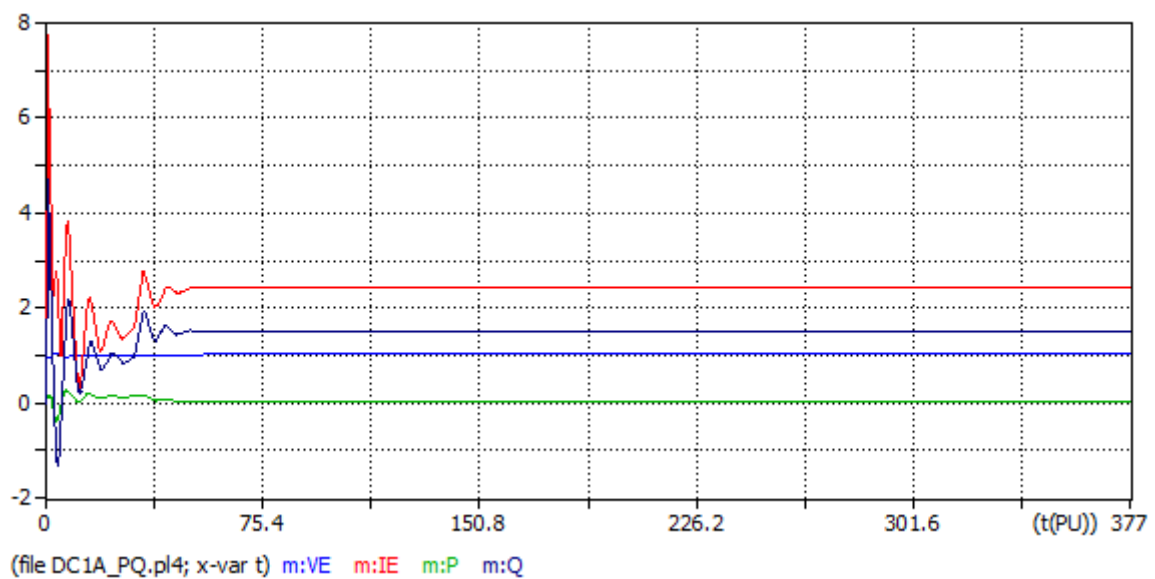
**Figura 5.13:** Potencia reactiva referencia y del sistema ( $Q_{ref} = 1,5$ )

De la misma manera se observa en la figura 5.14 como actúa el modulo y entrega la referencia adecuada para el modelo DC1A y que este entregue el voltaje necesario al circuito de campo y a su vez este genere una corriente que sera inyectada en la máquina.



**Figura 5.14:** Respuesta del modelo DC1A

En la siguiente figura 5.15 se muestra como el sistema recibe las diferentes señales tanto de voltaje, corriente y potencia (activa, reactiva).

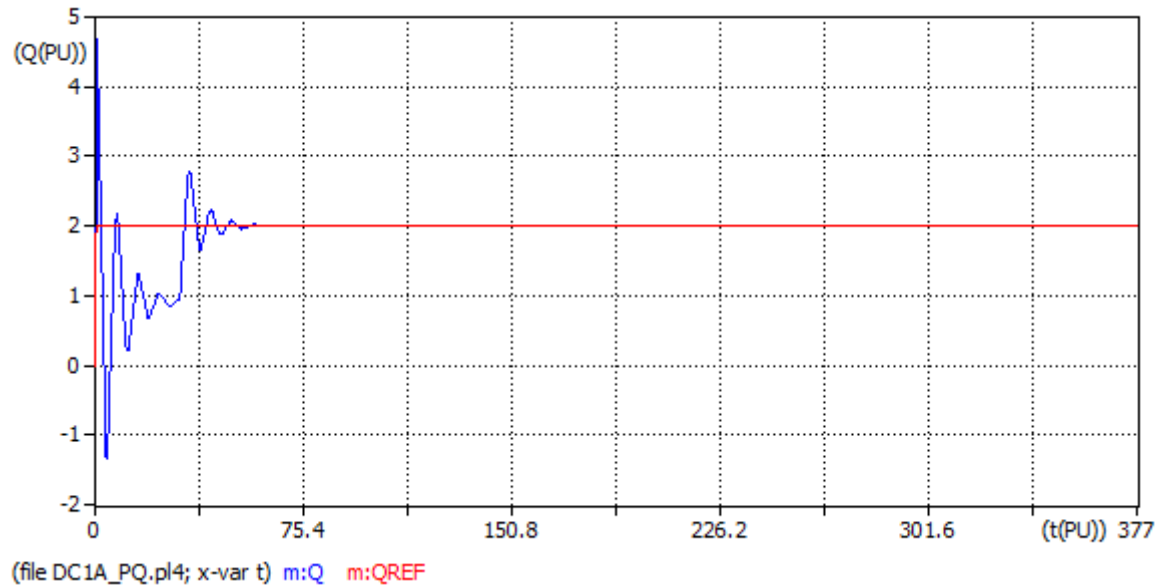


**Figura 5.15:** Señales que ingresan al sistema

### 5.7.3.2. Simulación con $Q_{ref} = 2$

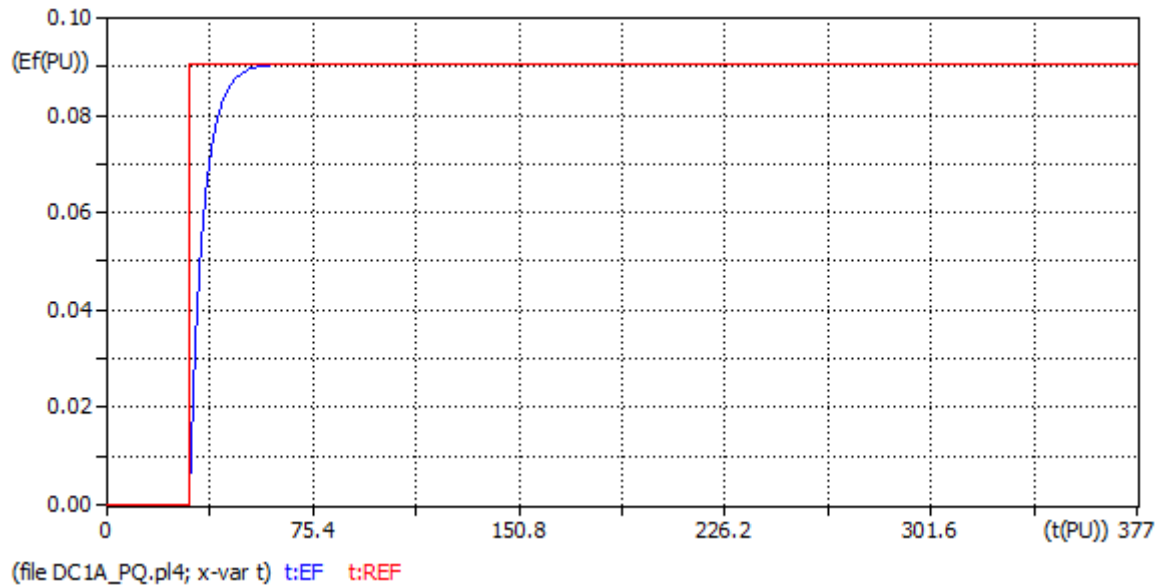
Con el modulo transductor se ingresa el nuevo valor de la referencia de potencia reactiva y se obtuvo los siguientes resultados. En la figura 5.16 se ve como el sistema

después de un paso de simulación de 30 adecua la señal de potencia a la ingresada en la referencia.



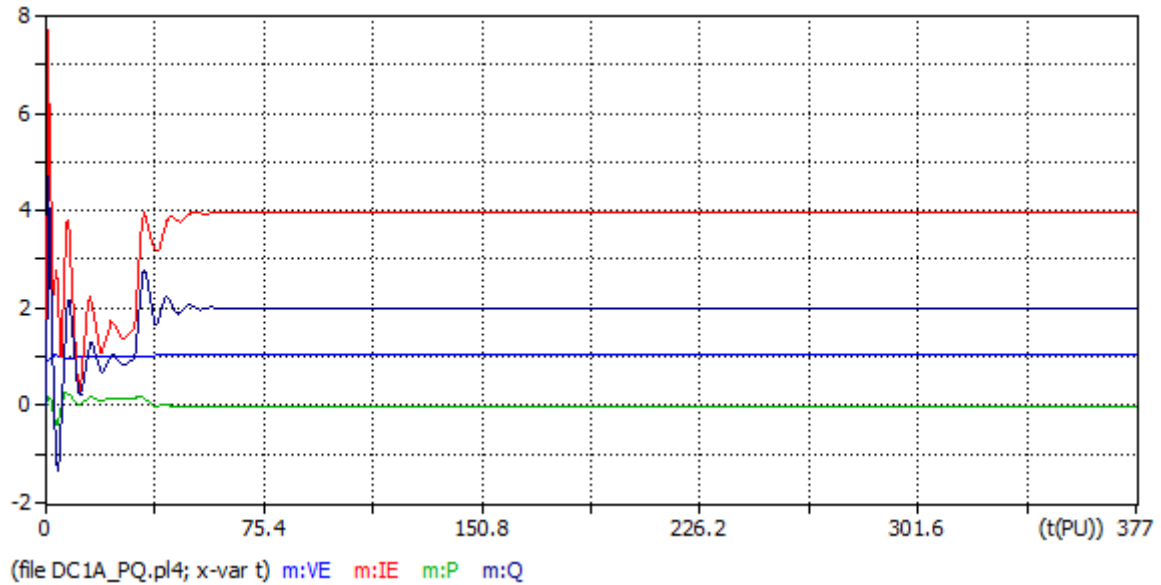
**Figura 5.16:** Potencia reactiva de referencia y del sistema ( $Q_{ref} = 2$ )

El controlador transductor actúa en la adecuación de la señal de referencia para el modelo DC1A como se muestra en la figura 5.17, ingresa la referencia y el modelo efectúa la respuesta sobre amortiguada que ingresa al modelo circuital de campo.



**Figura 5.17:** Respuesta del modelo DC1A

La figura 5.18 muestra todas las señales que ingresan al sistema.



**Figura 5.18:** Señales que ingresan al sistema

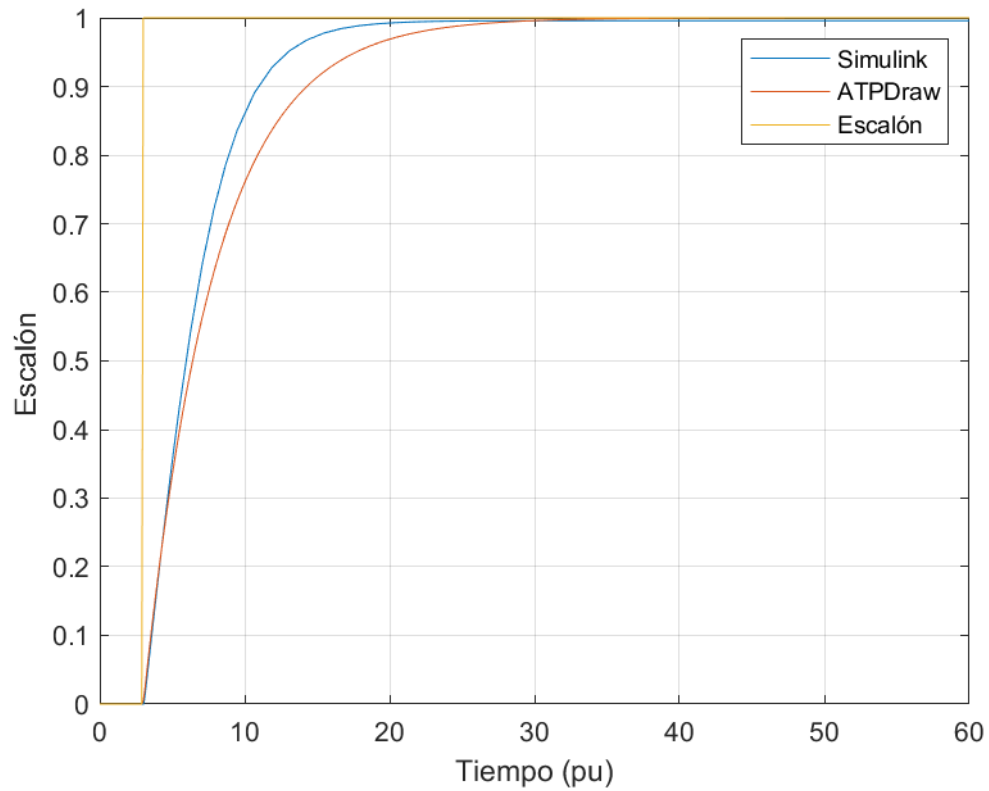
En la comparación de la figura 5.15 y la figura 5.18 se aprecia que el valor de la potencia activa no varía ante las variaciones de la potencia reactiva esto debido que para hacer el control de dicha potencia se debe implementar un gobernador.

#### 5.7.4. Comparación del modelo DC1A en ATPDraw y Simulink control PQ

Al realizar la comparación se necesita superponer las curvas generadas en Simulink y ATPDraw teniendo en cuenta la igualdad de puntos. Con el modelo genérico de Simulink se cambian los valores de las constantes a los mismos que están ingresados en ATPDraw mostrados en la tabla 5.6 y así realizar la comparación respectiva.

En la figura 5.19 se aprecia las curvas de comparación que existe en el modelo DC1A en el control de la potencia reactiva, en el programa ATPDraw y Simulink.

En el programa de Simulink se denota como la curva actúa en un menor tiempo que la obtenida en el programa ATPDraw.



**Figura 5.19:** Comparación del modelo DC1A en ATPDraw y Simulink control PQ

### 5.7.5. Control de voltaje mediante el modelo DC1A

El control del voltaje con el modelo DC1A se tiene variaciones en los parámetros de las funciones de transferencias los cuales se visualizan en la tabla 5.9. Dichos valores mostrados se han calculado usando el software MATLAB.

Descripción	Parámetro	Valor	Unidad
Componente resistivo de la compensación de carga	$R_C$	0	pu
Componente de reactancia de la compensación de carga	$X_C$	0	pu
Constante de tiempo del filtro de entrada del regulador	$T_R$	0	s
Ganancia de salida del regulador	$K_A$	1	pu
Constante de tiempo del regulador	$T_A$	0.06	s
Constante de tiempo del denominador del regulador	$T_B$	0	s
Constante de tiempo del numerador del regulador	$T_C$	0	s
Constante proporcional del campo del excitador	$K_E$	0.05	pu
Constante de tiempo del campo de excitación	$T_E$	6	s
Ganancia de realimentación de velocidad	$K_F$	32e-4	pu
Constante de tiempo de realimentación	$T_F$	0.1	s
Factor de saturación SE(E)	$SE_E$	0.95	pu

**Tabla 5.9:** Datos modelo DC1A control de voltaje

#### 5.7.5.1. Modulo controlador del voltaje en el modelo DC1A

En el control de voltaje se genera un modulo que funciona como transductor y adecua la señal de referencia para la excitación DC1A. Mediante muestreo de datos se tiene la ecuación característica del modulo.

En la ecuación 5.11 se verifica que cumple con los parámetros de ingreso de señales para el control de excitación.

$$V_{VAR} := -0,0706 * V_{ref}^2 + 1,8603 * V_{ref} - 1,7998 \quad (5.11)$$

En el algoritmo 5.10 se aprecia como esta funcionando internamente el modulo con las limitaciones que son puestas por el usuario.

<b>MODEL VVAR</b>	
DATA	itmin,vtmin, vtmax
CONST	ini{val: 0.0195 }
INPUT	Vref, Ve, ie
OUTPUT	Vvar, o2, error
VAR	Vvar, o2, error
INIT	
	Vvar:=0
	o2:=0
	error:=0
ENDINIT	
EXEC	
	if (Vref >= vtmin) and (Vref <= Vtmax)and (ie >itmin) then
	Vvar:= (-0.0706*Vref**2)+(1.8703*Vref)-1.7798
	else
	if (Vref <vtmin) then
	Vvar:= ini
	else
	Vvar:= (-0.0706*vtmax**2)+(1.8703*vtmax)-1.7798
	endif
	endif
	o2:= Vref
	error:=((abs(Vref-Ve))/Ve)*100
ENDEXEC	
ENDMODEL	

**Tabla 5.10:** Algoritmo del transductor control PV en el modelo DC1A

### 5.7.6. Simulación del modelo DC1A control PV

Para la simulación se hace las pruebas de funcionamiento en donde se elige los valores de voltaje de referencia que se debe adaptar el sistema, teniendo la siguiente tabla 5.11 con la referencias de pruebas.

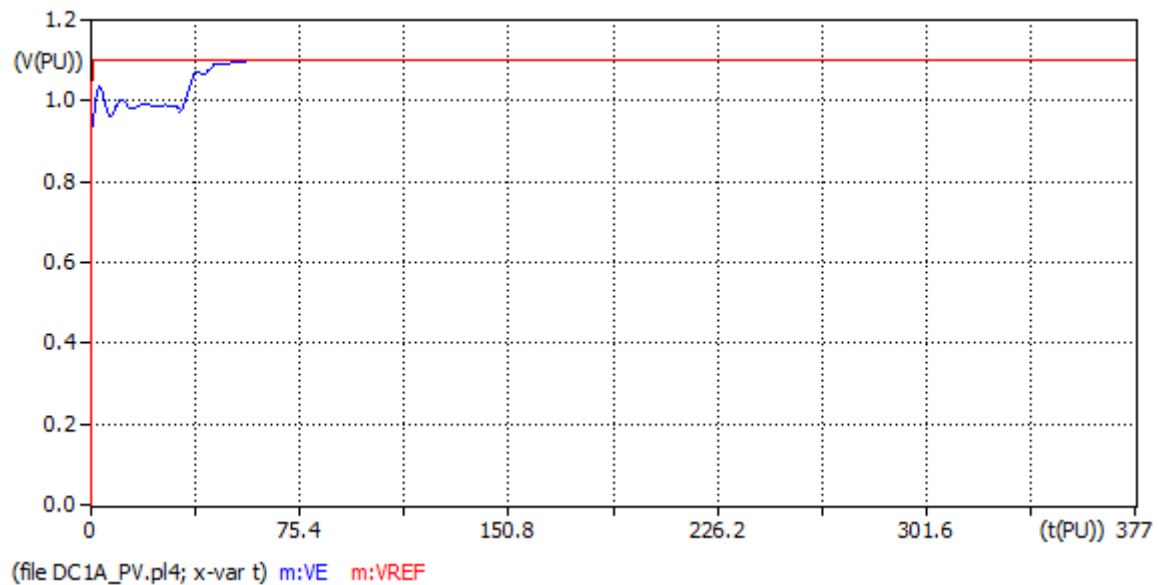
<b>Referencias</b>	
Vref1	1.1
Vref2	1.2

**Tabla 5.11:** Valores de referencia para el voltaje en el modelo DC1A



### 5.7.6.1. Simulación con $V_{ref} = 1,1$

Con la referencia en el transductor con el valor de 1.1 se ve en la figura 5.20 como la máquina adecuada la señal de voltaje en el sistema y la iguala a la referencia ingresada. En el tiempo 30 actúa la excitatriz debido a que en ese tiempo inicia el estado permanente.



**Figura 5.20:** Voltaje de referencia y del sistema ( $V_{ref} = 1,1$ )

En la figura 5.21 se observa como actúa el modulo y entrega la referencia adecuada para el modelo DC1A y que este entregue el voltaje necesario al circuito de campo y a su vez este genere una corriente que sera inyectada en la máquina para obtener el voltaje de referencia requerido.

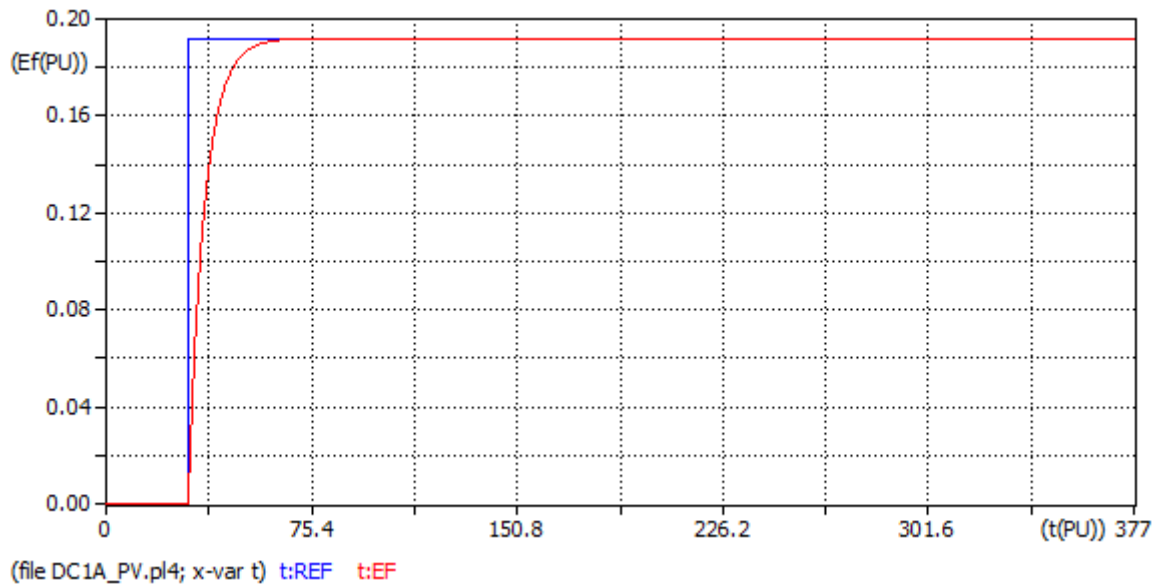


Figura 5.21: Respuesta del modelo DC1A control PV

#### 5.7.6.2. Simulación con $V_{ref} = 1,2$

De la misma manera con los valores anterior se simula con una referencia de 1.2 esta respuesta se la muestra en la figura 5.22 en donde el modulo DC1A control PV actúa para adecuar el voltaje a la referencia ingresada.

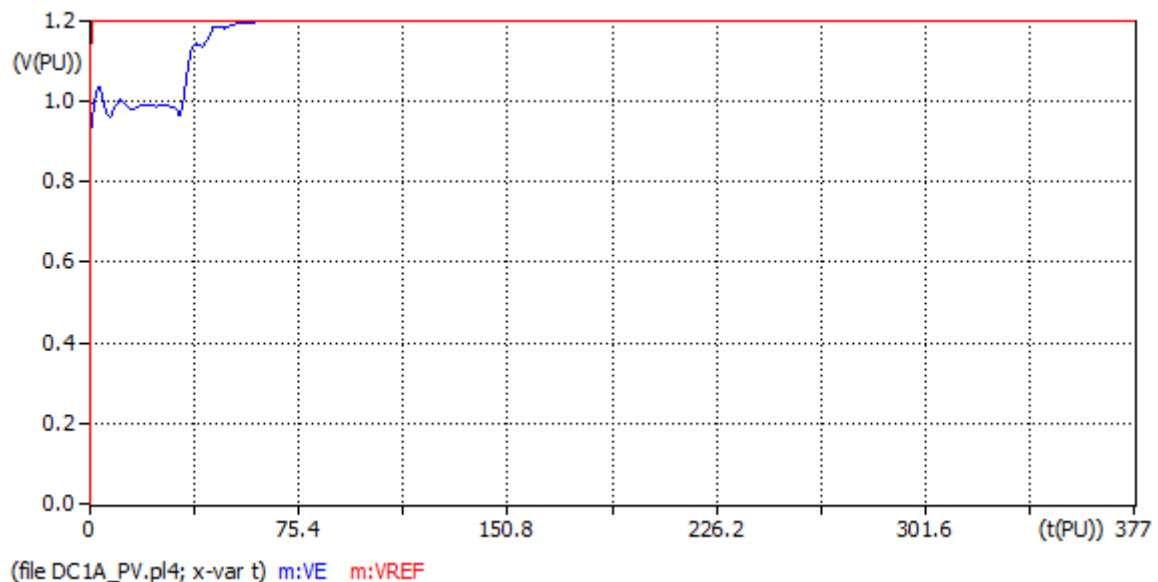
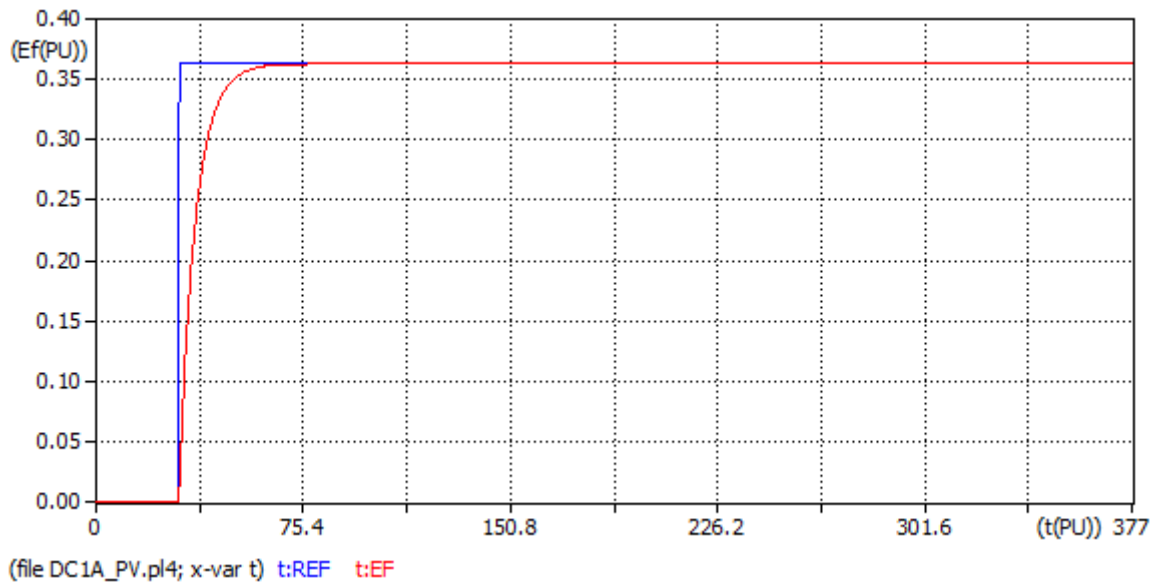


Figura 5.22: Voltaje de referencia y del sistema ( $V_{ref} = 1,2$ )

El modulo de excitación DC1A control PV tiene la siguiente respuesta como se ve en la figura 5.23 de acuerdo a la referencia adecuada del transductor.

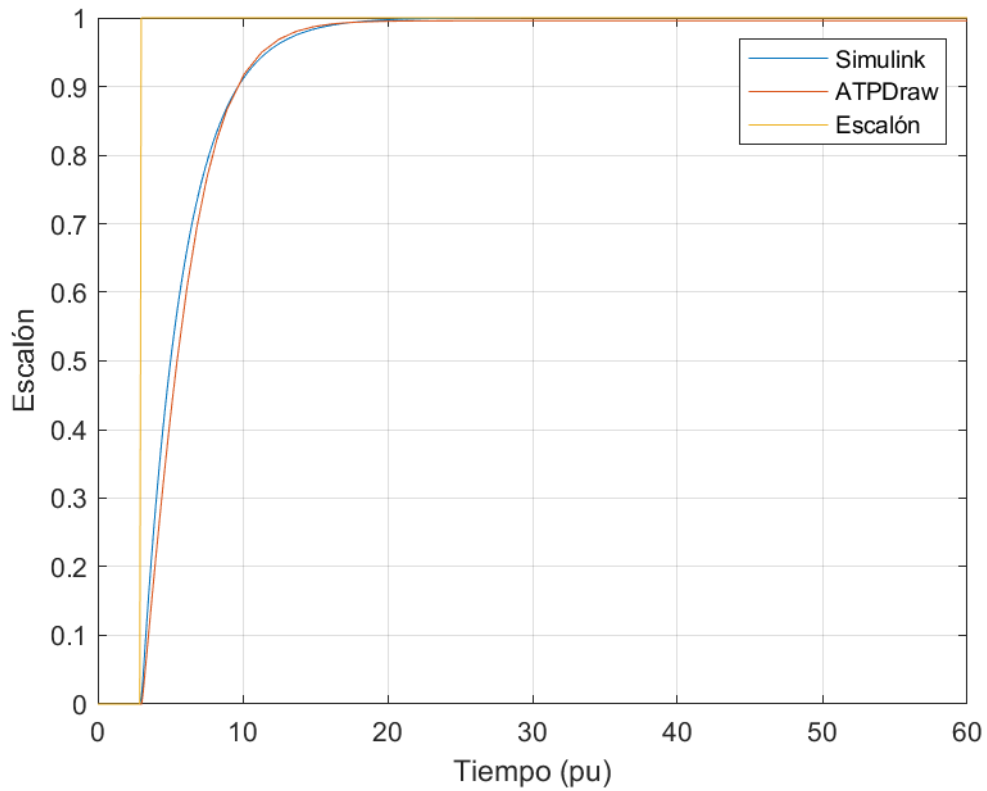


**Figura 5.23:** Respuesta del modelo DC1A control PV

#### 5.7.7. Comparación del modelo DC1A en ATPDraw y Simulink control PV

De la misma manera entre los programas se superponen las dos curvas tanto del programa SIMULINK y ATPDraw en donde cada una de estas curvas en respuesta al escalón tiene unas pequeñas diferencias en los tiempos de actuación.

En la figura 5.24 se observa la diferencia en respuesta que tiene el modelo DC1A en el control de voltaje con respecto a la referencia de escalón unitario.

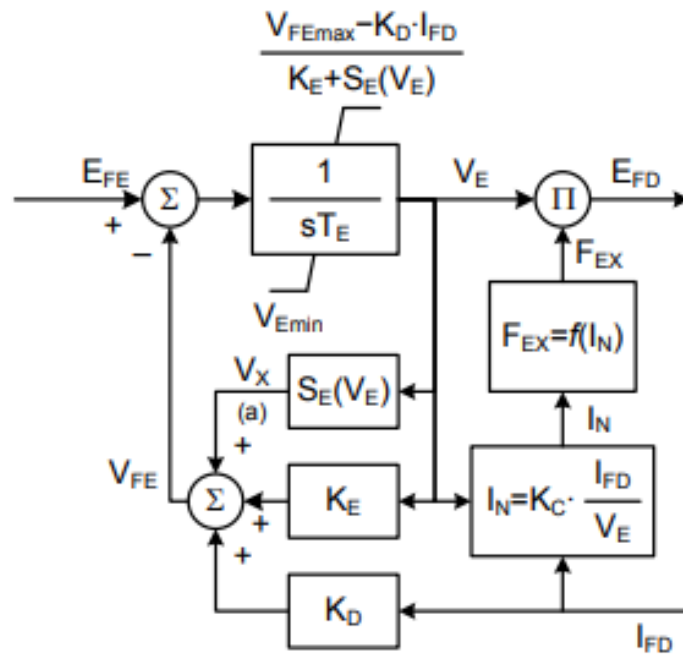


**Figura 5.24:** Comparación modelo DC1A de ATPDraw y Simulink control PV

## 5.8. Sistema de excitación AC

De los modelos de excitación AC del estándar de IEEE [5], se ha elegido el modelo de excitación AC1A que se visualiza en la figura 5.25.

El modelo de excitación AC1A está siendo sustituido por el modelo AC1C. Cualquier sistema de excitación existente representado por el modelo AC1A también puede ser representado por el modelo AC1C.

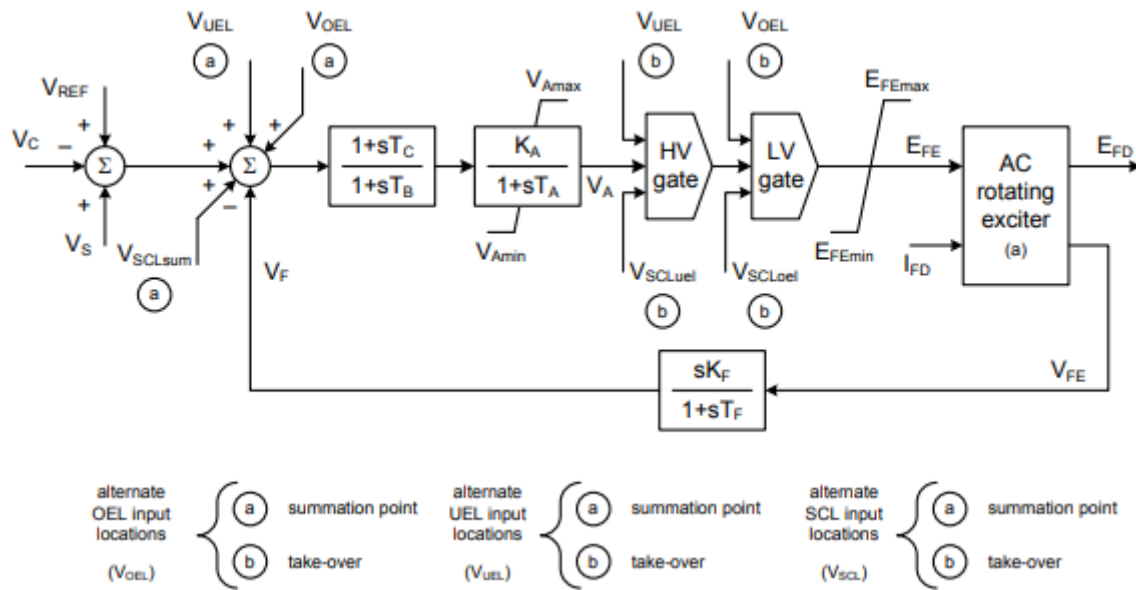


**footnotes:**

(a)  $V_X = V_E \cdot S_E(V_E)$

**Figura 5.25:** Excitador rotativo de AC con modelo de rectificador no controlado [5].

El modelo que mostrado en la Figura 5.26 representa los sistemas de excitación del rectificador del alternador controlado por el campo designados como Tipo AC1C. Estos sistemas de excitación consisten en un excitador principal del alternador que alimenta su salida a través de rectificadores no controlados. El excitador no hace uso de la autoexcitación y la potencia que tiene el regulador de tensión se toma de una alimentación que no es afectada por los transitorios.

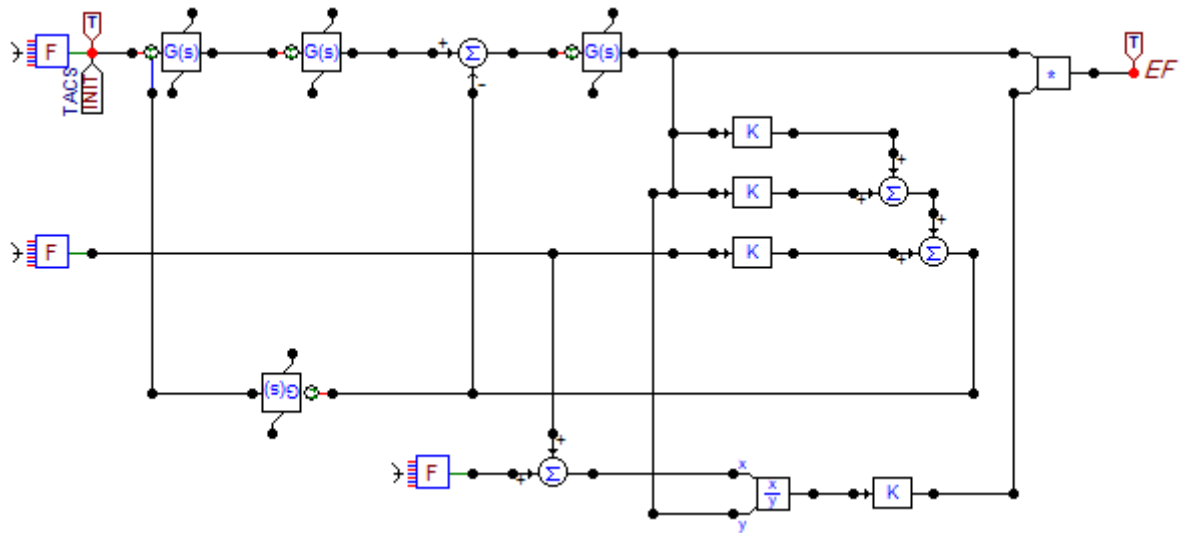


**Figura 5.26:** Sistema de excitación AC1C con el uso rectificadores no controlados y retroalimentación de la corriente de campo del excitador [5].

### 5.8.1. Modelo AC1A en ATPDraw

Con el fin de facilitar el diseño del modelo de excitación en el software ATPDraw se usó TACS ya que ha sido diseñado para representar sistemas de control descritos en forma de diagrama de bloques permitiendo ajustar los parámetros según el tipo de control que se realice ya sea de potencia reactiva o voltaje.

En la figura 5.27 se presenta el modelo AC1A implementado en el software ATPDraw usado para la simulación.



**Figura 5.27:** Diseño en ATPDraw del modelo AC1A

El modelo de la figura 5.27 se ha simulado como un sistema que no tiene límites en voltajes máximos y mínimos en las funciones de transferencia. Estos voltaje máximos y mínimos que soportara el modelo AC1A será controlado por un modelo el cual funciona como transductor, a su vez este limitará y adecuara las referencias que debe tener el modelo para el control de potencia reactiva o voltaje en la MSPS.

### 5.8.2. Control de potencia reactiva mediante el modelo AC1A

Para el control de potencia reactiva en el modelo AC1A se aplico los datos de muestra recomendada por el IEEE Std 421.5-2016 [5], también se debe tomar en cuenta algunos parámetros y constantes que deben ser aplicados de acuerdo a las referencias que ingresen en el sistema. Los parámetros de las funciones de transferencia se han adecuado dependiendo de los rangos de las señales de referencia que ingresan para esto se ha calculado mediante el uso del software MATLAB.

En la tabla 5.12 se aprecia los valores obtenidos del software MATLAB los cuales se han implementado en el modelo AC1A.

Descripción	Parámetro	Valor	Unidad
Componente resistivo de la compensación de carga	$R_C$	0	pu
Componente de reactancia de la compensación de carga	$X_C$	0	pu
Constante de tiempo del filtro de entrada del regulador	$T_R$	0	s
Ganancia de salida del regulador	$K_A$	400	pu
Constante de tiempo de salida del regulador	$T_A$	0.02	s
Constante de tiempo del denominador del regulador (retraso)	$T_B$	0	s
Constante de tiempo del numerador del regulador (de avance)	$T_C$	0	s
Ganancia del estabilizador del sistema de excitación de retroalimentación de velocidad	$K_F$	0.03	pu
Constante de tiempo de retroalimentación	$T_F$	1	s
Constante proporcional del inductor	$K_E$	1.0	pu
Constante de tiempo del campo del excitador	$T_E$	0.8	s
Factor de carga del rectificador proporcional a la reactancia de conmutación	$K_C$	0.2	pu
Factor de desmagnetización, en función de las reactancias del alternador de la excitadora	$K_D$	0.38	pu
Tensión de salida del excitador para el factor de saturación $S_E(E_1)$	$E_1$	-	pu
Factor de saturación del excitador a la tensión de salida del excitador $E_1$	$S_E(E_1)$	0.10	pu
Tensión de salida del excitador para el factor de saturación $S_E(E_1)$	$E_2$	-	pu
Factor de saturación del excitador a la tensión de salida del excitador $E_2$	$S_E(E_2)$	-	pu

**Tabla 5.12:** Datos modelo AC1A control potencia reactiva

### 5.8.2.1. Modulo controlador de potencia reactiva en el modelo AC1A

El modelo AC1A en control de potencia reactiva se plantea el diseño de un modulo que funciona como transductor de las señales de potencia del sistema en la MSPS y adecua la señal de salida a la referencia necesaria para la excitación en el modelo AC1A. Para obtener la salida que se ajuste a la referencia requerida del usuario se ha realizado una tabla de muestreo de datos para así cuantificar en una expresión que cumpla y se ajuste al muestreo de datos.



Como se observa en la ecuación 5.12 de acuerdo a los parámetros de ingreso esta ecuación varia y cumple para el sistema de control en análisis.

$$V_{VAR} := 0,0002 * Q_{ref}^2 + 0,0827 * Q_{ref} - 0,0756 \quad (5.12)$$

En la tabla 5.13 se muestra el algoritmo del modulo transductor con su ecuación principal implementada con los limites de voltaje mínimo y máximo impuestas por el usuario.

<b>MODEL VVAR</b>	
DATA	itmin,vtmin
CONST	ini{val: -0.08026 }
INPUT	Qrf,Qt1, v1, i1
OUTPUT	Vvar,o2, error
VAR	Vvar,o2, error
INIT	<div style="margin-left: 40px;">Vvar:=0</div> <div style="margin-left: 40px;">o2:=0</div> <div style="margin-left: 40px;">error:=0</div>
ENDINIT	
EXEC	<div style="margin-left: 40px;">if i1&gt;itmin and v1&gt;vtmin then</div> <div style="margin-left: 80px;">Vvar:= (0.0002*(Qrf**2))+0.0827*Qrf-0.0756</div> <div style="margin-left: 40px;">else</div> <div style="margin-left: 80px;">Vvar:= ini</div> <div style="margin-left: 40px;">endif</div> <div style="margin-left: 40px;">o2:=Qrf</div> <div style="margin-left: 40px;">error:=abs(((Qrf-Qt1)/Qrf)*100)</div>
ENDEXEC	
ENDMODEL	

**Tabla 5.13:** Algoritmo del transductor control PQ en el modelo AC1A

En la figura 5.28 se muestra el modelo tipo transductor para el excitador AC1A en ATPDraw.

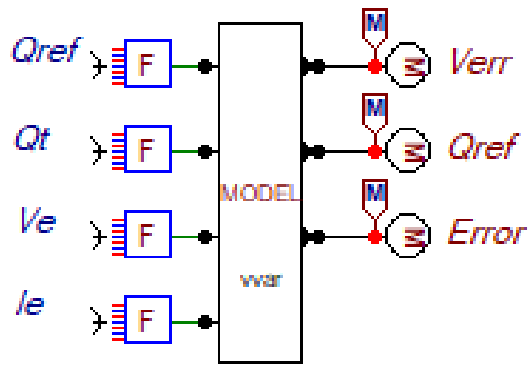


Figura 5.28: Model del controlador

### 5.8.3. Simulación del modelo AC1A control PQ

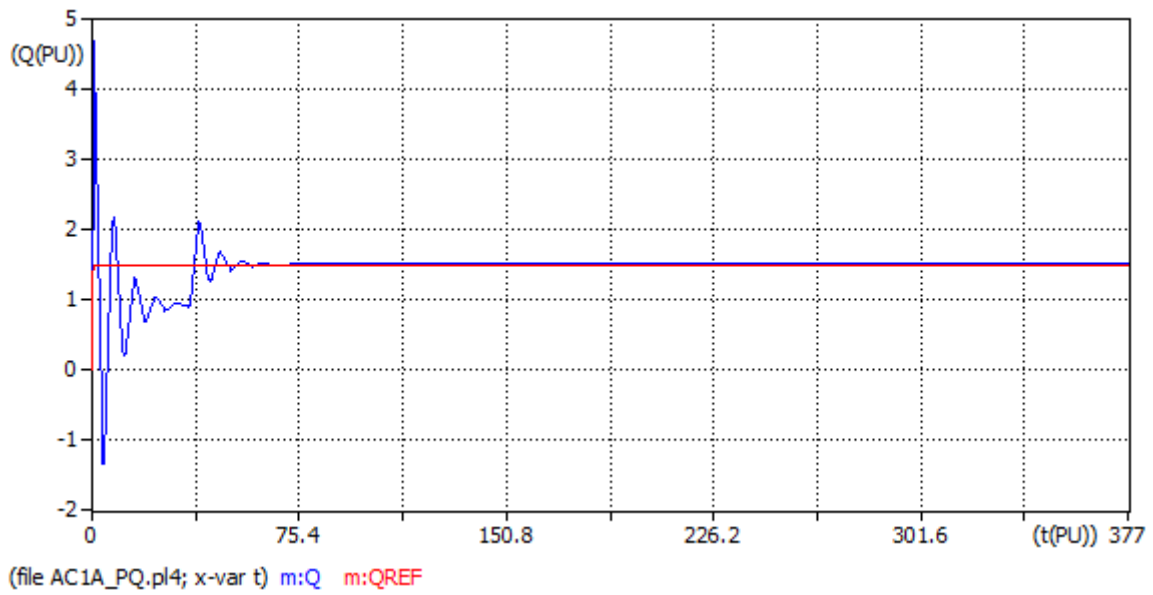
Para definir los valores referencia de potencia se a realizado pruebas de simulación y elegido los valores a los cuales el sistema se debe adaptar, como observamos en la tabla 5.14.

Referencias	
Qref1	1.5
Qref2	2

Tabla 5.14: Valores de referencia para la potencia reactiva en el modelo AC1A

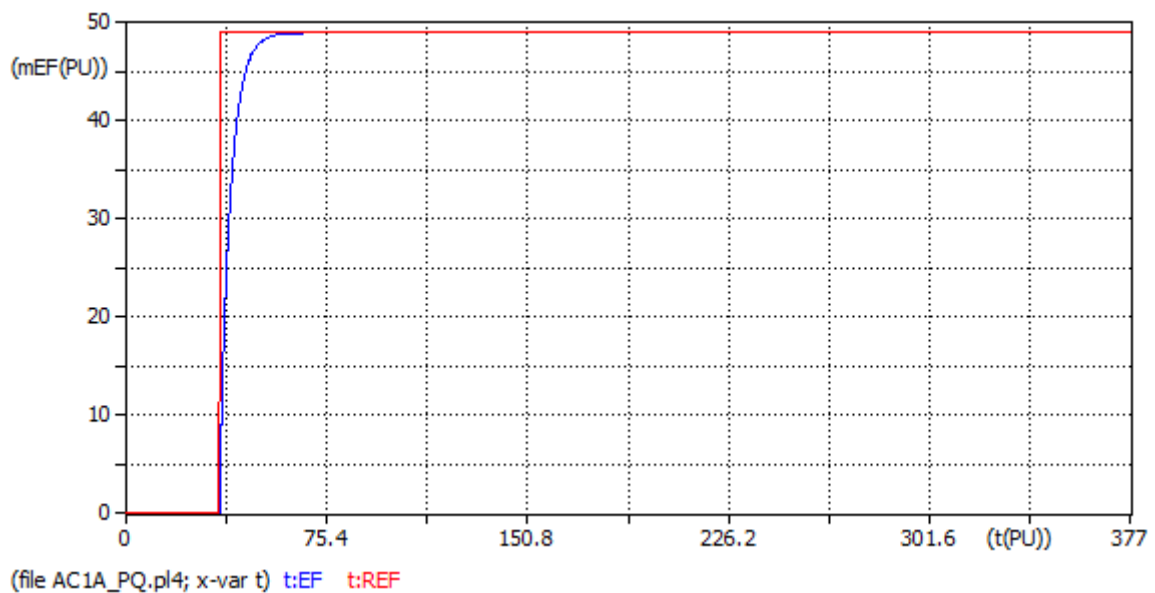
#### 5.8.3.1. Simulación con $Q_{ref} = 1,5$

Al ingresar el valor  $Q_{ref} = 1,5$  en la referencia del módulo transductor se observa en la figura 5.29 la potencia reactiva de la máquina como se ajusta al valor ingresado en la referencia, este valor ingresa cuando empieza el estado permanente de la maquina en un tiempo de 30s.



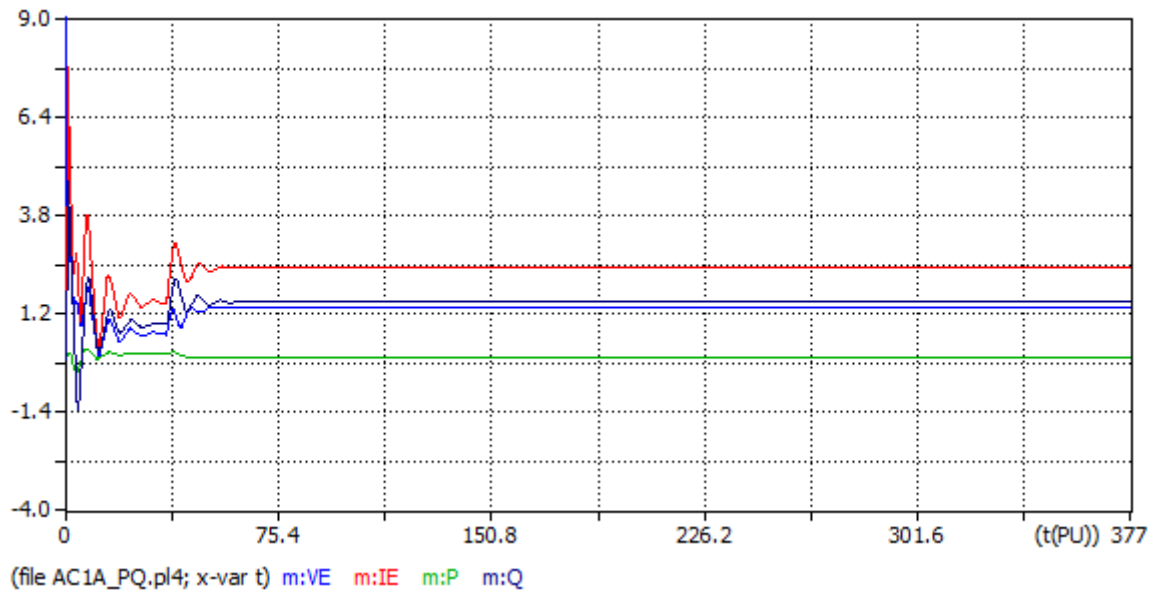
**Figura 5.29:** Potencia reactiva referencia y del sistema ( $Q_{ref} = 1,5$ )

Como se observa en la figura 5.30 el módulo transductor entrega la referencia adecuada para el sistema de excitación AC1A y que este entregue el voltaje necesario al circuito de campo y a su vez este genere una corriente que sera inyectada en la máquina.



**Figura 5.30:** Respuesta del modelo AC1A

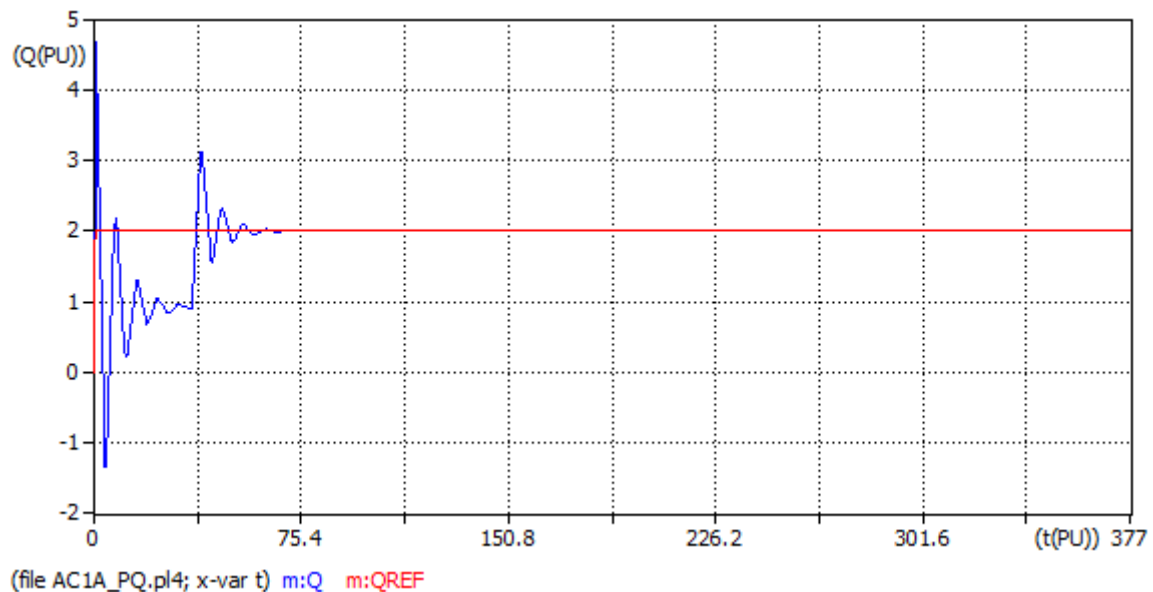
En la figura 5.31 se observa las diferentes señales tanto de voltaje, corriente y potencia (activa, reactiva) que ingresan al sistema.



**Figura 5.31:** Señales que ingresan al sistema

### 5.8.3.2. Simulación con $Q_{ref} = 2$

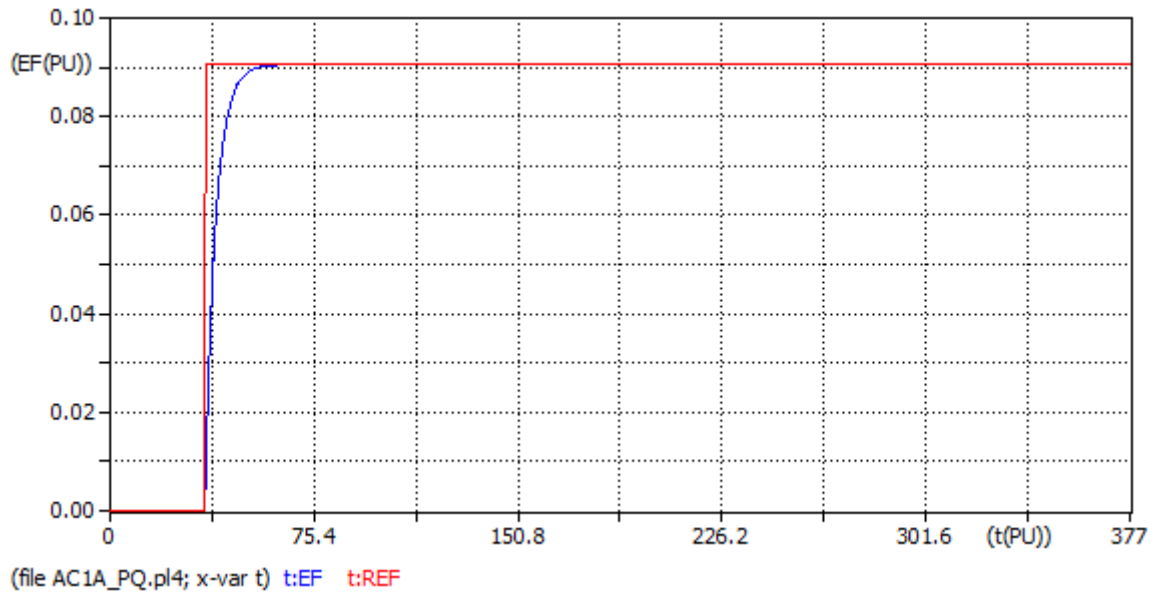
Se ingresa el valor  $Q_{ref} = 2$  en la referencia del módulo transductor y se observa como en la figura 5.32 el sistema después de un paso de simulación de 30s ajusta la señal de potencia al nuevo valor de la referencia.



**Figura 5.32:** Potencia reactiva de referencia y del sistema ( $Q_{ref} = 2$ )

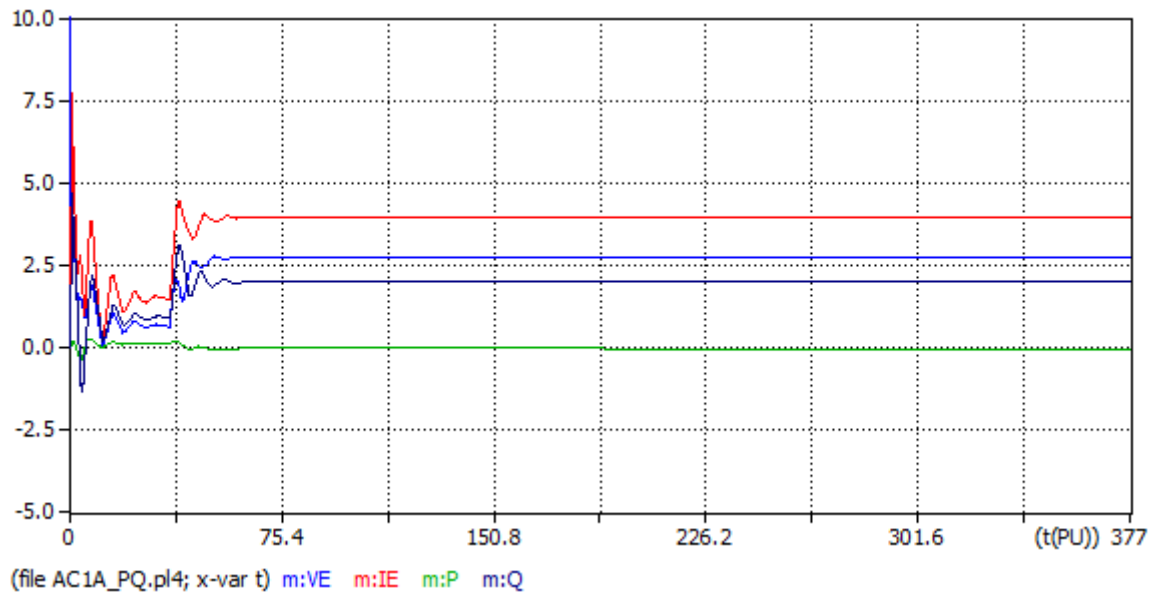
En la figura 5.33 el módulo transductor entrega la referencia adecuada para el

sistema de excitación AC1A el cual ajusta la respuesta para la referencia ingresada.



**Figura 5.33:** Respuesta del modelo AC1A

En la figura 5.34 se observa las señales de voltaje, corriente y potencia (activa, reactiva) que ingresan al sistema.

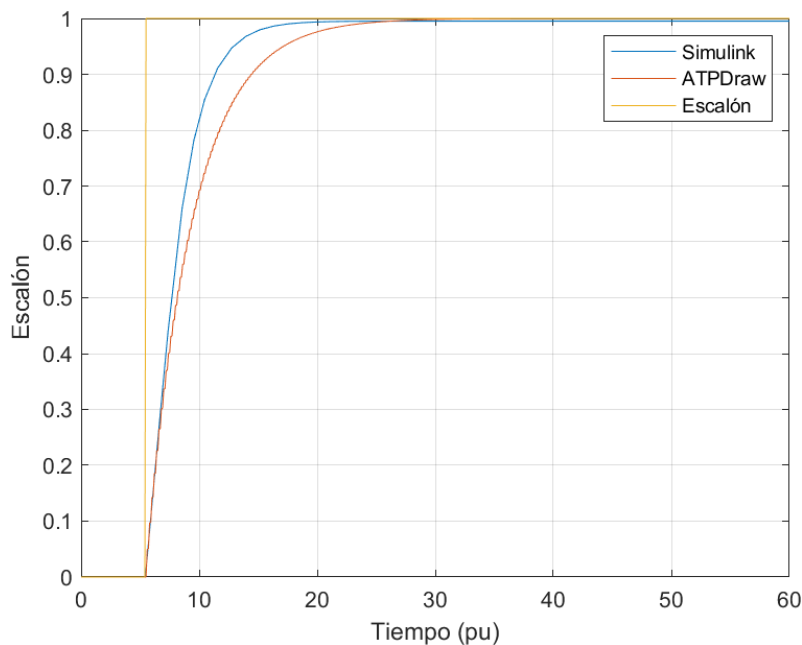


**Figura 5.34:** Señales que ingresan al sistema

#### 5.8.4. Comparación modelo AC1A de ATPDraw y Simulink control PQ

La comparación se realizó con la superposición de las curvas generadas por el modelo en ATPDraw y Simulink. Esta superposición se hizo exportando los resultados obtenidos tales como la referencia con su respuesta de la excitatriz en ATPDraw y Simulink conservando los mismos tiempos de muestreo, cambiando los valores de las constantes a los ingresados en ATPDraw de la tabla 5.12.

En la figura 5.35 se observa las curvas en comparación del modelo AC1A en el control de la potencia reactiva en el programa ATPDraw y Simulink, se puede analizar como en el programa de Simulink se denota que la curva actúa de forma rápida con un menor tiempo que la curva obtenida en el programa ATPDraw.



**Figura 5.35:** Comparación del modelo AC1A en ATPDraw y Simulink control PQ

#### 5.8.5. Control de voltaje mediante el modelo AC1A

Para el control de voltaje en el modelo AC1A se aplico los datos de muestra recomendada por el IEEE Std 421.5-2016 [5], también se debe tomar en cuenta algunos parámetros y constantes que deben ser aplicados de acuerdo a las referencias que ingresen en el sistema para esto se ha calculado mediante el uso del software MATLAB.

En la tabla 5.15 se aprecia los valores obtenidos del software MATLAB los cuales se han implementado en el modelo AC1A.

Descripción	Parámetro	Valor	Unidad
Componente resistivo de la compensación de carga	$R_C$	0	pu
Componente de reactancia de la compensación de carga	$X_C$	0	pu
Constante de tiempo del filtro de entrada del regulador	$T_R$	0	s
Ganancia de salida del regulador	$K_A$	400	pu
Constante de tiempo de salida del regulador	$T_A$	0.02	s
Constante de tiempo del denominador del regulador (retraso)	$T_B$	0	s
Constante de tiempo del numerador del regulador (de avance)	$T_C$	0	s
Ganancia del estabilizador del sistema de excitación de retroalimentación de velocidad	$K_F$	3E-5	pu
Constante de tiempo de retroalimentación	$T_F$	1	s
Constante proporcional del inductor	$K_E$	1.0	pu
Constante de tiempo del campo del excitador	$T_E$	0.8	s
Factor de carga del rectificador proporcional a la reactancia de conmutación	$K_C$	0.2	pu
Factor de desmagnetización, en función de las reactancias del alternador de la excitadora	$K_D$	0.38	pu
Tensión de salida del excitador para el factor de saturación $S_E(E_1)$	$E_1$	-	pu
Factor de saturación del excitador a la tensión de salida del excitador $E_1$	$S_E(E_1)$	0.10	pu
Tensión de salida del excitador para el factor de saturación $S_E(E_1)$	$E_2$	-	pu
Factor de saturación del excitador a la tensión de salida del excitador $E_2$	$S_E(E_2)$	-	pu

**Tabla 5.15:** Datos modelo AC1A control de voltaje

### 5.8.5.1. Modulo controlador de voltaje en el modelo AC1A

El modelo AC1A en control de voltaje se plantea el diseño de un módulo que funciona como transductor de las señales de potencia del sistema en la MSPS y adecua la señal de salida a la referencia necesaria para la excitación en el modelo AC1A. Para el módulo transductor se realiza un muestreo de datos y se obtiene la ecuación 5.13 y se verifica que cumple con los parámetros de ingreso de señales para

el control de excitación.

$$V_{VAR} := -3E - 5 * V_{ref}^2 + 0,0307 * V_{ref} - 0,00528 \quad (5.13)$$

En el algoritmo 5.16 se observa el funcionamiento del módulo con las limitaciones que son puestas por el usuario.

<b>MODEL VVAR</b>	
DATA	itmin, vtmin
INPUT	Vrf, Qt1, v1, il
OUTPUT	Vvar,o2, error
	Vvar,o2, error
INIT	
	Vvar:=0
	o2:=0
	error:=0
ENDINIT	
EXEC	
	Vvar:= ((-3E-5)*(Vrf**2))+ (0.0307*Vrf)-(0.00528)
	o2:=Vrf
	error:=abs(((Vrf-v1)/v1)*100)
ENDEXEC	
ENDMODEL	

**Tabla 5.16:** Algoritmo del transductor control PV en el modelo DC1A

### 5.8.6. Simulación del modelo AC1A control PV

En esta para para la simulación se elige los valores de voltaje de referencia usadas en las prueba de funcionamiento que se debe adaptar el sistema, teniendo la siguiente tabla 5.17.

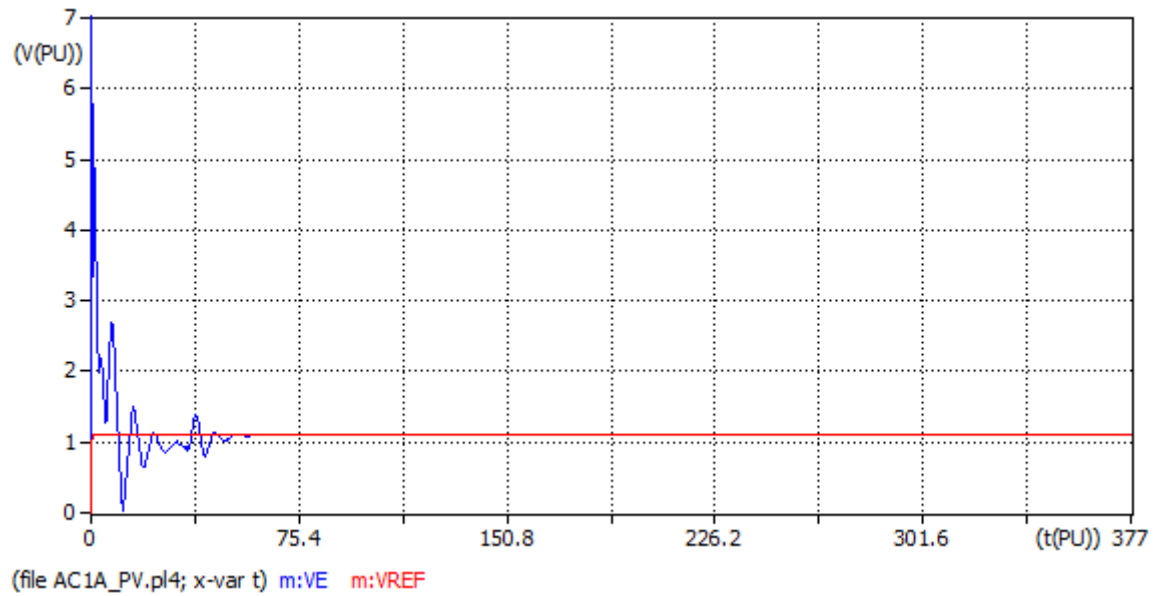
<b>Referencias</b>	
Vref1	1.1
Vref2	1.2

**Tabla 5.17:** Valores de referencia para el voltaje en el modelo AC1A



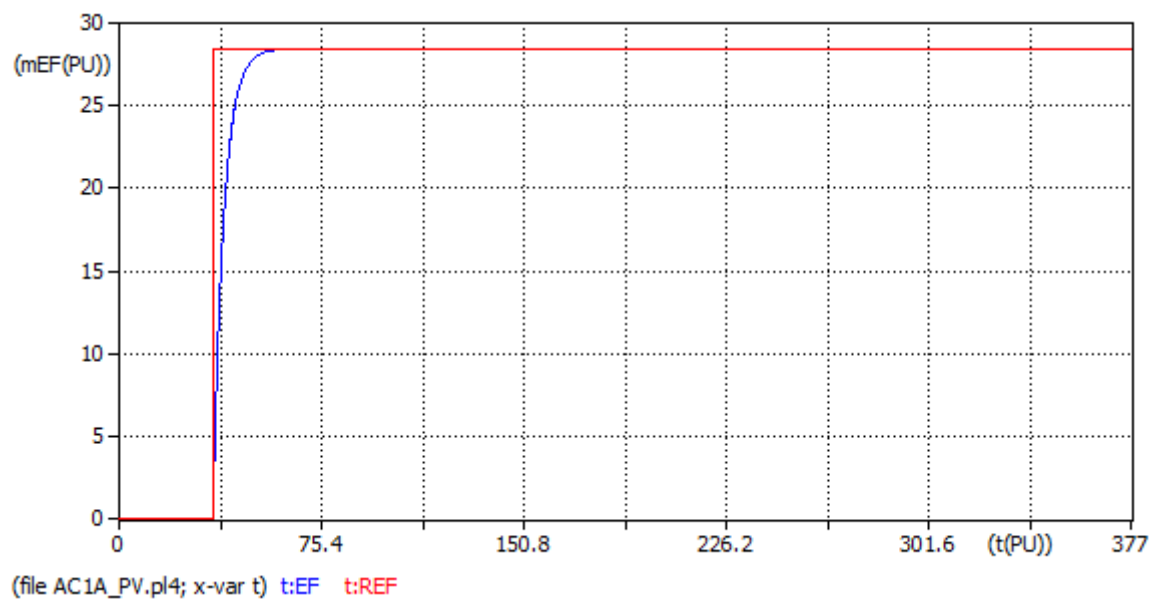
### 5.8.6.1. Simulación con $V_{ref} = 1,1$

La referencia de  $V_{ref} = 1,1$  ingresada en el módulo transductor observado en la figura 5.36 la máquina estabilizan a dicha referencia.



**Figura 5.36:** Voltaje de referencia y del sistema ( $V_{ref} = 1,1$ )

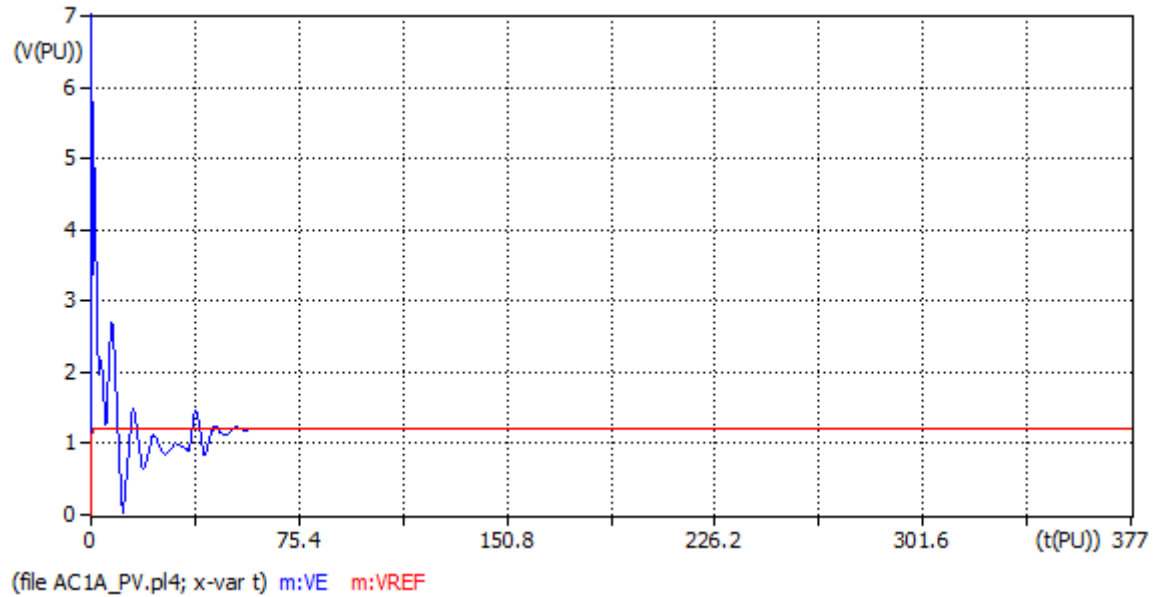
En la figura 5.37 muestra el actuar del excitador AC1A para entregar la señal de voltaje continuo al circuito de campo y a su vez este genere una corriente que sera inyectada en la máquina para obtener el voltaje de referencia requerido.



**Figura 5.37:** Respuesta del modelo AC1A control PV

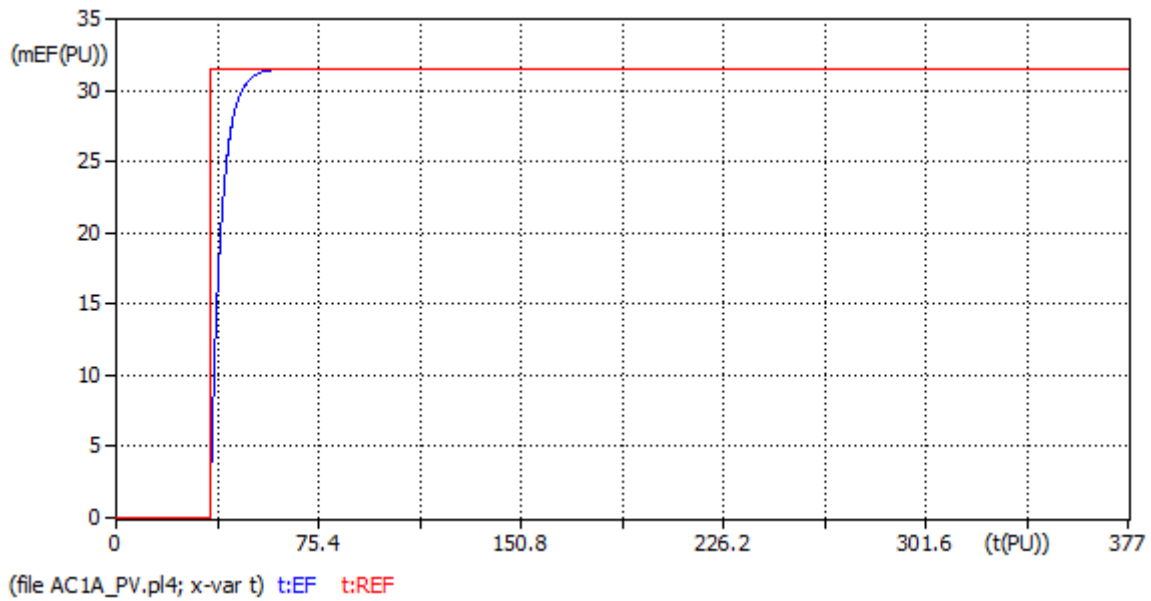
### 5.8.6.2. Simulación con $V_{ref} = 1,2$

Para la simulación del sistema de excitación control de voltaje con la referencia de 1.2 se tiene que el modelo actúa de forma instantánea como se observa en la figura 5.38 .



**Figura 5.38:** Voltaje de referencia y del sistema ( $V_{ref} = 1,2$ )

El modulo de excitación ST1A control PV genera la siguiente respuesta como se muestra en la figura 5.39 de acuerdo a la referencia adecuada del transductor para el circuito de campo.

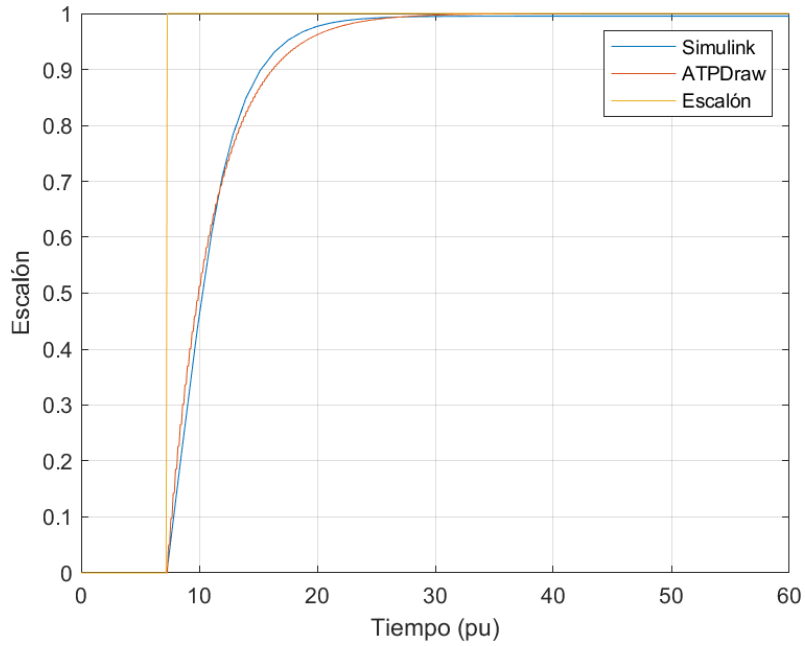


**Figura 5.39:** Respuesta del modelo AC1A control PV

### 5.8.7. Comparación modelo AC1A de ATPDraw y Simulink control PV

Para realizar la comparación entre las curvas generadas por el modelo AC1A control PV se toma como referencia la respuesta al escalón tanto en ATPDraw como en Simulink recordando que se debe conservar los mismos tiempos de muestreo y conservando los valores de las constantes ingresadas en ATPDraw de la tabla 5.15.

En la siguiente figura 5.40 se presentan las curvas en comparación del modelo AC1A en el control de voltaje aplicados en el programa ATPDraw y Simulink, se puede analizar como en el programa de Simulink la curva actúa de forma ligeramente rápida con un tiempo casi nulo respecto a la curva obtenida en el programa ATPDraw.



**Figura 5.40:** Comparación del modelo AC1A en ATPDraw y Simulink control PV

## 5.9. Sistema de excitación ST

Con el estándar de IEEE [5], se muestra los diferentes modelos de excitación ST, del cual se ha elegido el modelo ST1A que se presenta en la figura 5.41. En estos sistemas de excitación estáticos, la tensión y corriente son sistemas compuestos se transforma en un nivel adecuado para proporcionar la corriente continua necesaria para el campo del generador.

Este modelo es uno de los principales en el estudio debido a su similitud con el modelo DC1C propuesto en la IEEE.

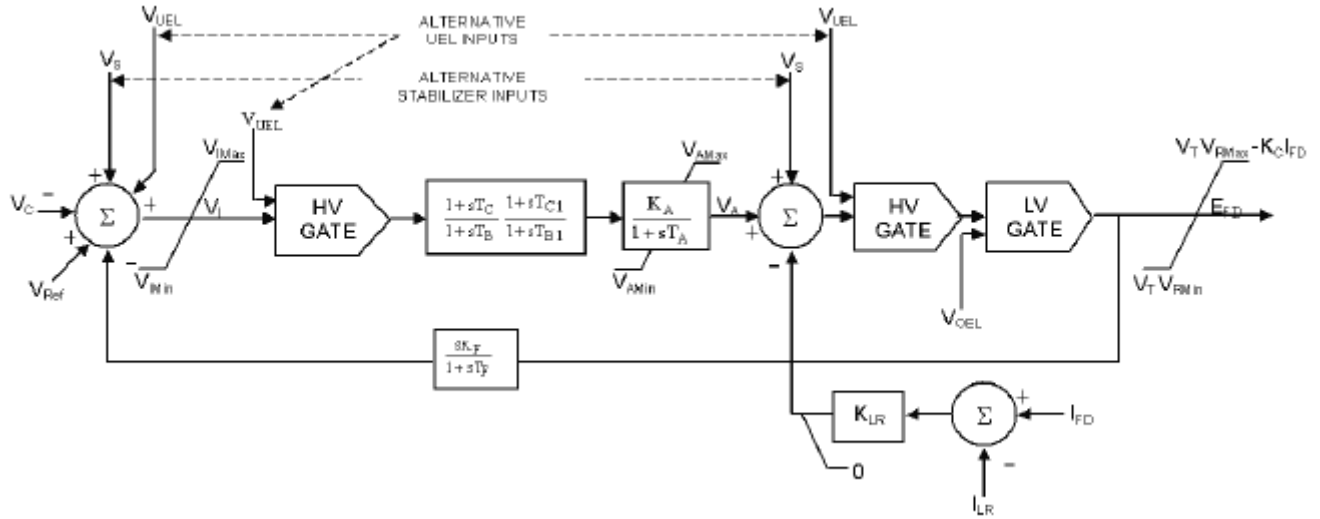


Figura 5.41: Excitador estático tipo ST1A [5].

### 5.9.1. Modelo ST1A en ATPDraw

Mediante el uso de TACS en el software ATPDraw se facilita el diseño del modelo de excitación debido a la gran versatilidad y aplicaciones que se lo puede integrar. Dependiendo el control que se realice ya sea de potencia reactiva o voltaje los parámetros principales varían para cumplir con el tipo de control.

En la figura 5.42 se observa el modelo ST1A implementado en el software ATPDraw usado para el control de la MSPS.

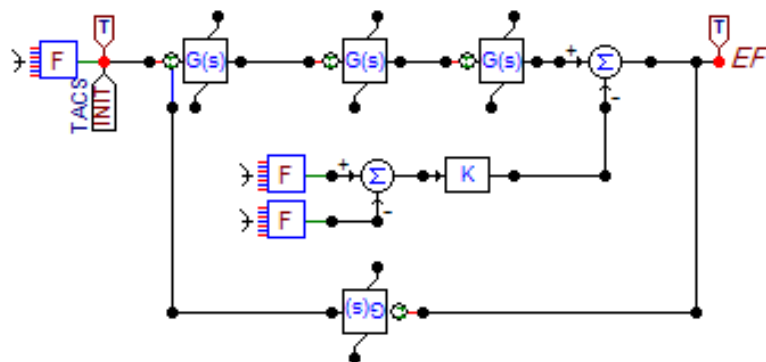


Figura 5.42: Diseño en ATPDraw del modelo ST1A

Como se observa en 5.42 el modelo tiene funciones de transferencia ya que se ha simulado como un sistema que no tiene limitaciones en tanto a voltaje máximos

y mínimos. Los voltaje máximos y mínimos que soporta el modelo ST1A será controlado por un model, el cual funciona como transductor, a su vez este limitará y adecuara las referencias que debe tener el modelo para el control de potencia reactiva o voltaje en la MSPS.

### 5.9.2. Control de potencia Reactiva mediante el modelo ST1A

En el control de potencia reactiva del modelo ST1A se toma en cuenta los diferentes parámetros y constantes que deben ser acondicionados al modelo para que funcione de manera óptima con las referencias que se ingresen en el modelo. Los parámetros de las funciones de transferencia se han adecuado dependiendo de los rangos de las señales de referencia que ingresan y las funciones de transferencia se ha calculado mediante el uso del software MATLAB cuyo uso es para distintas aplicaciones siendo esta una de ellas.

En la tabla 5.18 se observa los valores obtenidos en el software MATLAB los cuales se han implementado en el modelo ST1A.

Descripción	Parámetro	Valor	Unidad
Componente resistivo de la compensación de carga	$R_C$	0	pu
Componente de reactancia de la compensación de carga	$X_C$	0	pu
Constante de tiempo del filtro de entrada del regulador	$T_R$	0	s
Ganancia del regulador de voltaje	$K_A$	1	pu
Constante de tiempo del regulador de voltaje	$T_A$	6	s
Constante de tiempo del denominador del regulador	$T_B$	0	s
Constante de tiempo del numerador del regulador	$T_C$	0	s
Constante de tiempo del denominador del regulador	$T_{B1}$	0	s
Constante de tiempo del numerador del regulador	$T_{C1}$	0	s
Ganancia de retroalimentación	$K_F$	1e-6	pu
Constante de tiempo de realimentación	$T_F$	1	s
Factor de carga del rectificador proporcional a la reactancia de conmutación	$K_C$	0.038	pu
Ganancia del limitador de corriente de salida del excitador	$K_{LR}$	4.54E-6	pu
Referencia del limitador de corriente de salida del excitador	$I_{LR}$	4.4	pu

**Tabla 5.18:** Datos modelo ST1A control potencia reactiva

### 5.9.2.1. Modulo controlador de potencia reactiva en el modelo ST1A

En el control de potencia reactiva se genera un modulo el funcione como transductor de las señales de potencia del sistema en la MSPS y adecua la señal para la referencia en el modelo ST1A. Con los datos obtenidos por muestreo se obtiene la ecuación característica que comanda el modulo.

En la ecuación 5.14 se verifica que cumple con los parámetros de ingreso de señales para el control de excitación.

$$Q_{VAR} := 0,000253 * Q_{ref}^2 + 0,08275 * Q_{ref} - 0,07567 \quad (5.14)$$

En el algoritmo 5.19 se aprecia como funciona internamente el modulo transductor, con las limitaciones que son puestas por el usuario.

<b>MODEL VVAR</b>	
DATA	itmin,vtmin
CONST	ini{val: -0.08026 }
INPUT	Qrf,Qt1, v1, i1
OUTPUT	Vvar,o2, error
VAR	Vvar,o2, error
INIT	
	Vvar:=0
	o2:=0
	error:=0
ENDINIT	
EXEC	
	if i1>itmin and v1>vtmin then
	Vvar:= (0.000253*(Qrf**2))+0.08275*Qrf)-0.07567
	else
	Vvar:= ini
	endif
	o2:=Qrf
	error:=abs(((Qrf-Qt1)/Qrf)*100)
ENDEXEC	
ENDMODEL	

**Tabla 5.19:** Algoritmo del transductor control PQ en el modelo ST1A

### 5.9.3. Simulación del modelo ST1A control PQ

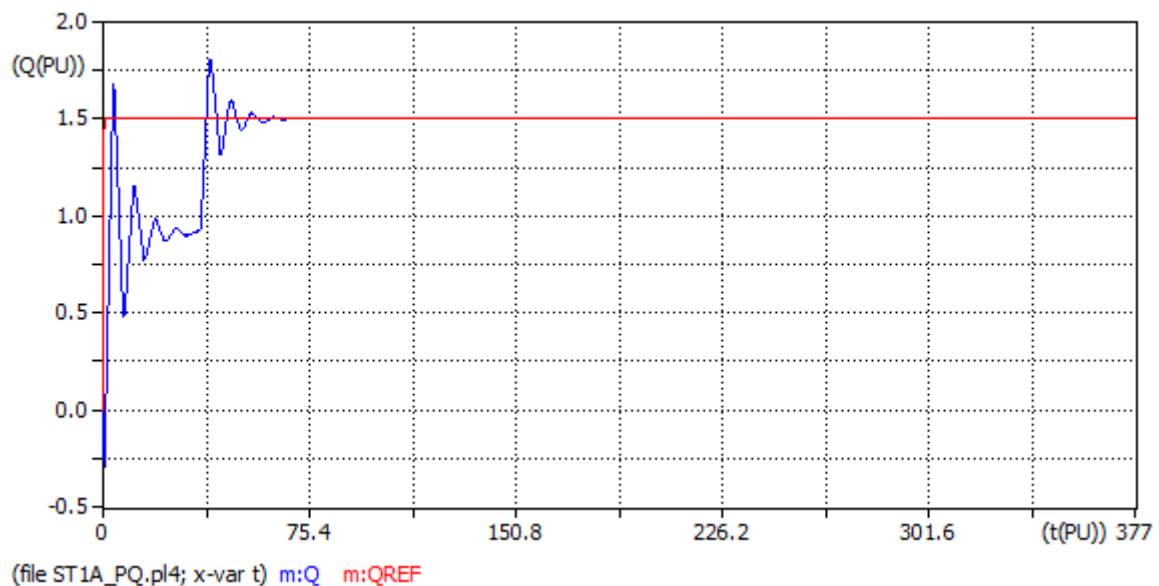
Para la simulación se ha elegido los valores de potencia base de referencia que se debe adaptar el sistema teniendo la siguiente tabla 5.20 con las referencias de pruebas.

Referencias	
Qref1	1.5
Qref2	2

**Tabla 5.20:** Valores referenciales de potencia reactiva en el modelo ST1A

#### 5.9.3.1. Simulación con $Q_{ref} = 1,5$

Ingresando la referencia en el modulo transductor el valor de 1.5 se ve en la figura 5.43 como la máquina adecuada la potencia reactiva que esta entregando al sistema y toma el valor de la referencia propuesta, el valor ingresa en el tiempo igual a 35 debido a que en este tiempo empieza el estado permanente de la máquina y no se tiene la perturbaciones del arranque.

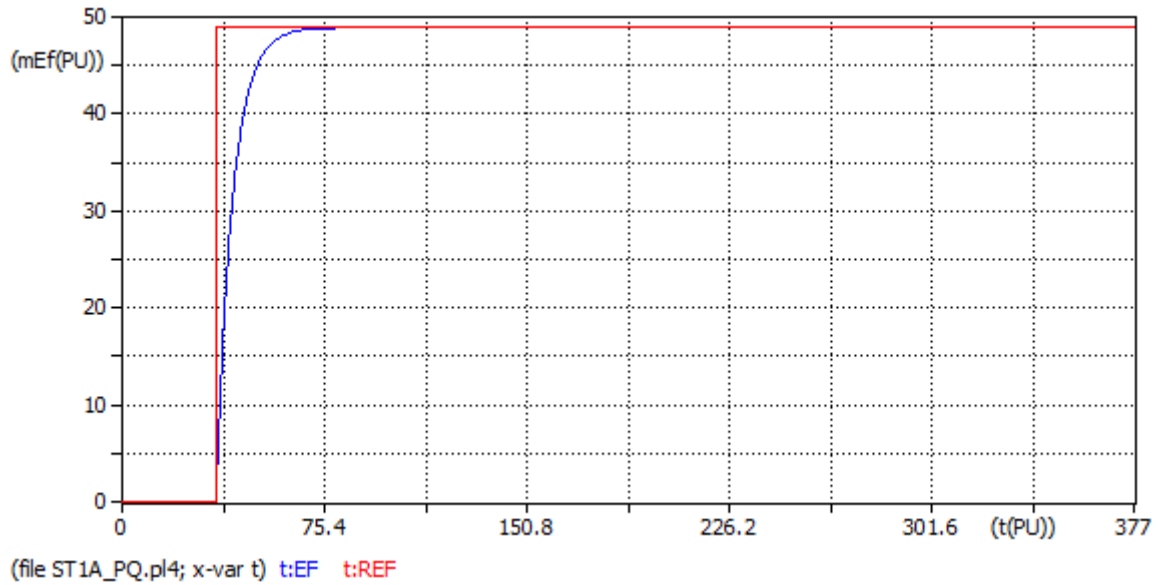


**Figura 5.43:** Potencia reactiva referencia y del sistema ( $Q_{ref} = 1,5$ )

En la figura 5.44 se observa como actúa el modulo y entrega la referencia adecuada para el modelo de excitacion ST1A y que este entregue el voltaje necesario

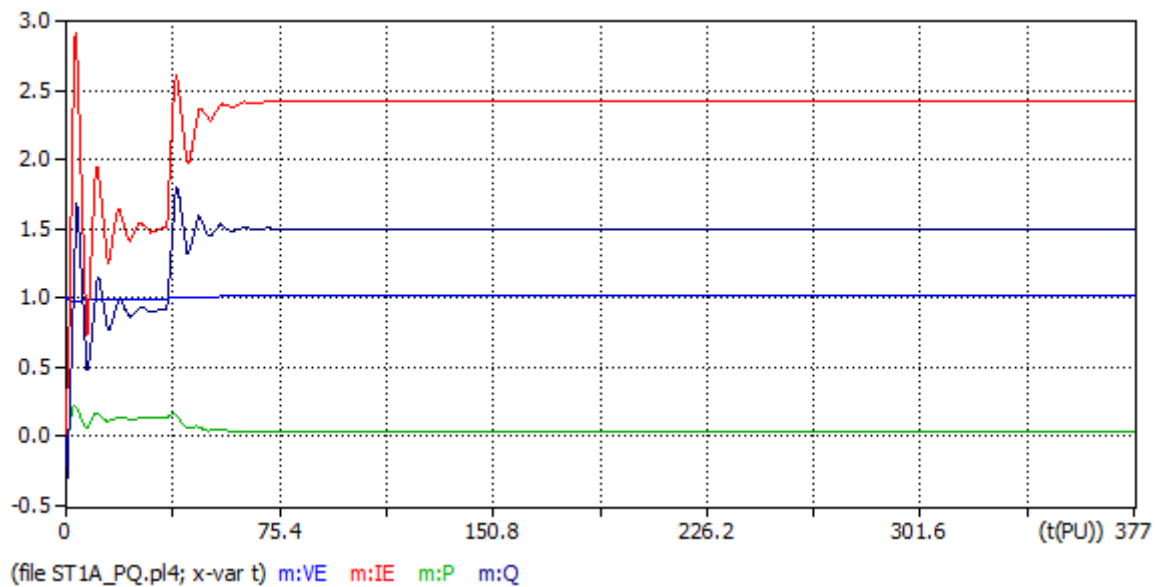


para el circuito de campo y a su vez este genere una corriente que sera inyectada en la máquina.



**Figura 5.44:** Respuesta del modelo ST1A

La figura 5.45 muestra como el sistema recibe las diferentes señales tanto de voltaje, corriente y potencia (activa, reactiva).

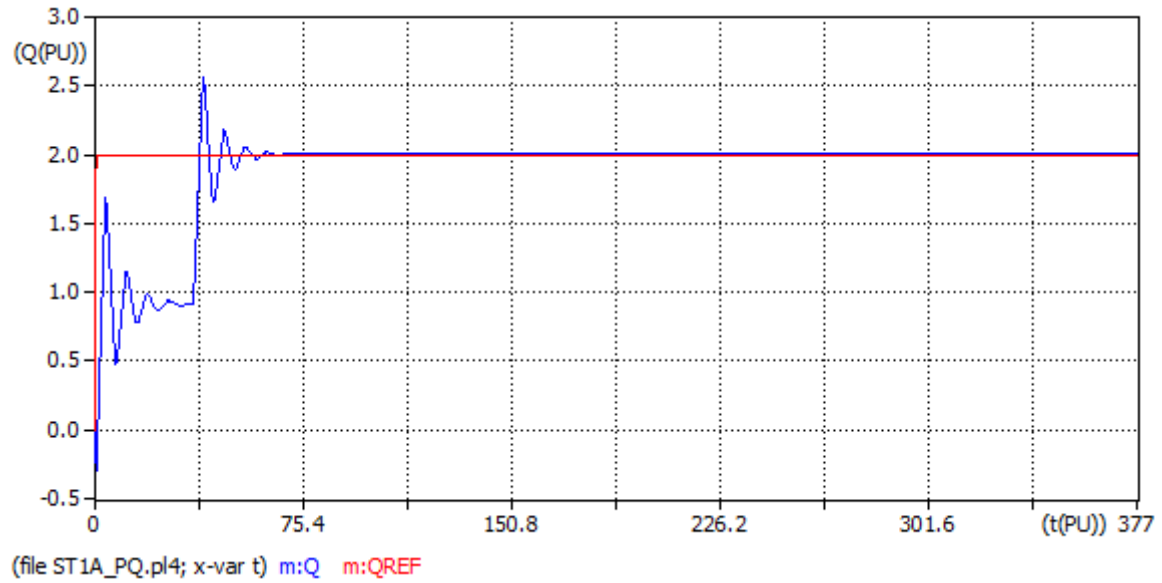


**Figura 5.45:** Señales que ingresan al sistema

### 5.9.3.2. Simulación con $Q_{ref} = 2$

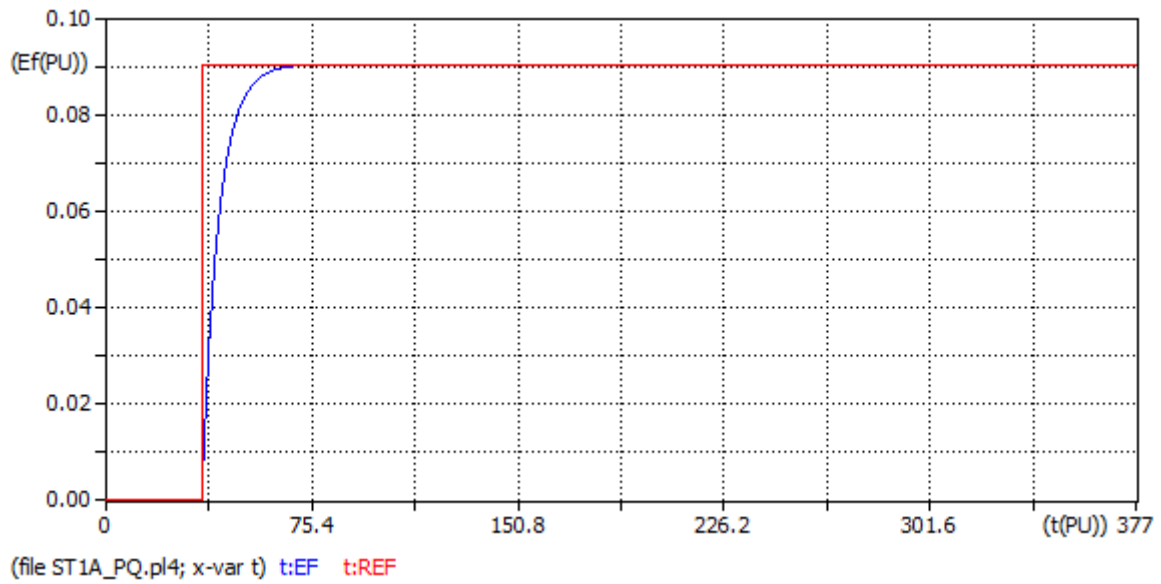
Con el modulo transductor se ingresa el nuevo valor de la referencia de potencia reactiva y se obtuvo los siguientes resultados.

En la figura 5.46 se ve como el sistema después de un paso de simulación de 30 adecua la señal de potencia del sistema a la ingresada en la referencia.



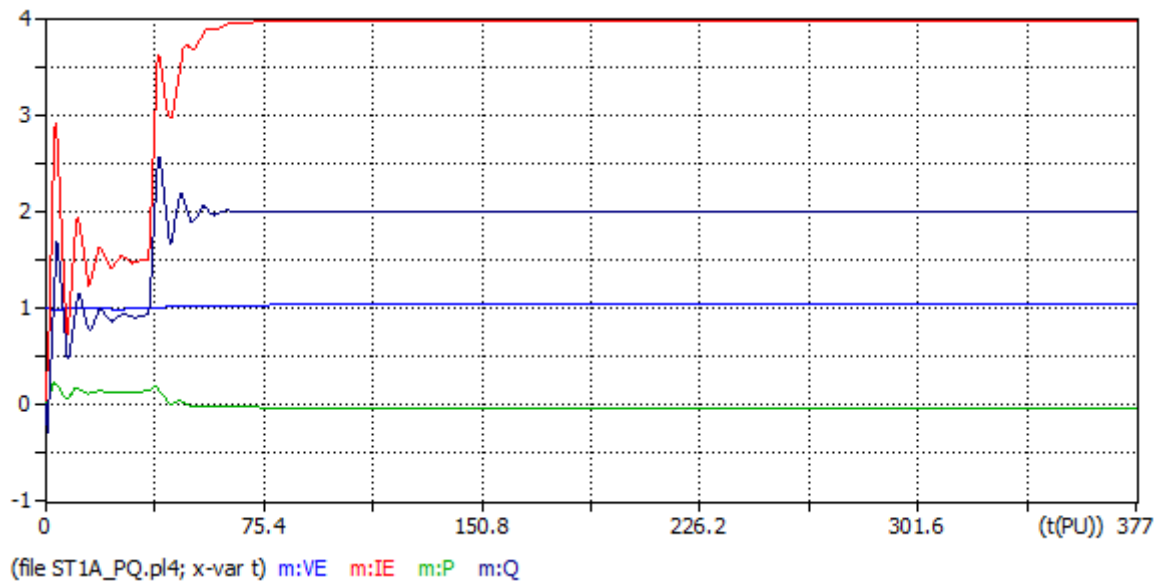
**Figura 5.46:** Potencia reactiva de referencia y del sistema ( $Q_{ref} = 2$ )

El modulo transductor adecua la señal de referencia para el modelo ST1A como se muestra en la figura 5.47.



**Figura 5.47:** Respuesta del modelo ST1A

La figura 5.48 muestra todas las señales que ingresan al sistema conectado.

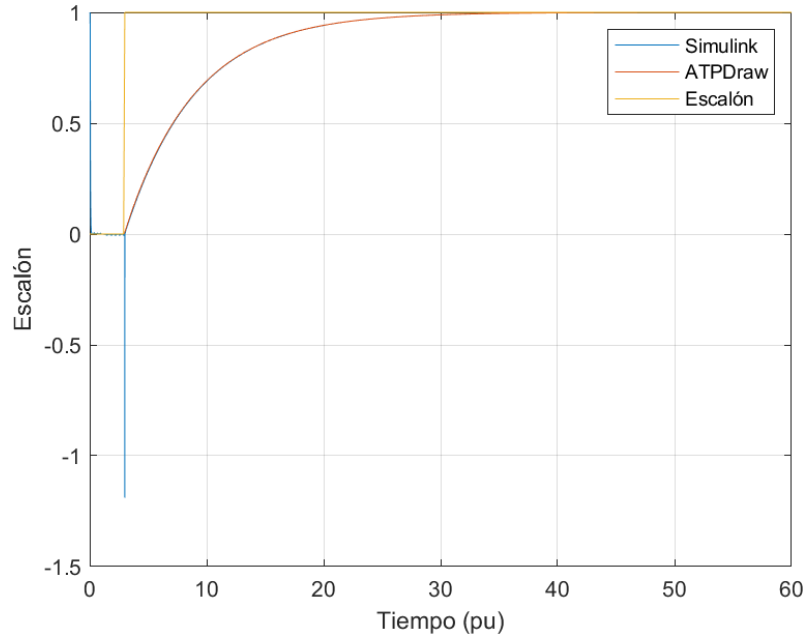


**Figura 5.48:** Señales que ingresan al sistema

#### 5.9.4. Comparación modelo ST1A de ATPDraw y Simulink control PQ

En la comparación se superpone las curvas generadas en Simulink y ATPDraw con la cantidad adecuada de puntos. Con el modelo genérico de Simulink se cambian los valores de las constantes a los valores que ingresadas en la simulación de ATPDraw analizados en la tabla 5.18.

En la figura 5.49 se aprecia las curvas de respuesta que tiene el modelo ST1A en el control de potencia reactiva, tanto en el programa Simulink y ATPDraw respectivamente en donde la respuesta es similar en los dos programas teniendo así una alta confiabilidad de resultados.



**Figura 5.49:** Comparación modelo ST1A de ATPDraw y Simulink control PQ

### 5.9.5. Control de voltaje mediante el modelo ST1A

El control del voltaje con el modelo de excitación ST1A se tiene variaciones en las constantes de las funciones de transferencias las cuales se muestran en la tabla 5.21. Dichos valores se han obtenido mediante el uso del software MATLAB.

Descripción	Parámetro	Valor	Unidad
Componente resistivo de la compensación de carga	$R_C$	0	pu
Componente de reactancia de la compensación de carga	$X_C$	0	pu
Constante de tiempo del filtro de entrada del regulador	$T_R$	0	s
Ganancia del regulador de voltaje	$K_A$	1	pu
Constante de tiempo del regulador de voltaje	$T_A$	3	s
Constante de tiempo del denominador del regulador	$T_B$	0	s
Constante de tiempo del numerador del regulador	$T_C$	0	s
Constante de tiempo del denominador del regulador	$T_{B1}$	0	s
Constante de tiempo del numerador del regulador	$T_{C1}$	0	s
Ganancia de retroalimentación	$K_F$	1e-5	pu
Constante de tiempo de realimentación	$T_F$	1	s
Factor de carga del rectificador proporcional a la reactancia de conmutación	$K_C$	0.038	pu
Ganancia del limitador de corriente de salida del excitador	$K_{LR}$	4.54E-6	pu
Referencia del limitador de corriente de salida del excitador	$I_{LR}$	4.4	pu

**Tabla 5.21:** Datos modelo ST1A control de voltaje

### 5.9.5.1. Modulo controlador de voltaje en el modelo ST1A

Para el control de voltaje en la excitacion del modelo ST1A se genera un transductor de las señales de voltaje del sistema en la MSPS y este adecua la señal de la referencia en el modelo ST1A. Con los datos obtenidos por muestreo se obtiene la ecuación característica que comanda el modulo.

En la ecuación 5.15 se verifica que cumple con los parámetros de ingreso de señales para el control de excitación.

$$Q_{VAR} := 0,000253 * V_{ref}^2 + 0,08275 * V_{ref} - 0,07567 \quad (5.15)$$

En el algoritmo 5.22 se aprecia como funciona internamente el modulo transductor, con las limitaciones que son puestas por el usuario.

<b>MODEL VVAR</b>	
DATA	itmin,vtmin, vtmax
CONST	ini{val: 0.0195 }
INPUT	Vref, Ve, ie
OUTPUT	Vvar, o2, error
VAR	Vvar, o2, error
INIT	
	Vvar:=0
	o2:=0
	error:=0
ENDINIT	
EXEC	
	if (Vref >= vtmin) and (Vref <= Vtmax)and (ie >itmin) then
	Vvar:= (-0.0723*Vref**2)+(1.8751*Vref)-1.783
	else
	if (Vref <vtmin) then
	Vvar:= ini
	else
	Vvar:= (-0.0723*vtmax**2)+(1.8751*vtmax)-1.783
	endif
	endif
	o2:= Vref
	error:=((abs(Vref-Ve))/Ve)*100
ENDEXEC	
ENDMODEL	

**Tabla 5.22:** Algoritmo del transductor control PV en el modelo ST1A

### 5.9.6. Simulación del modelo ST1A control PV

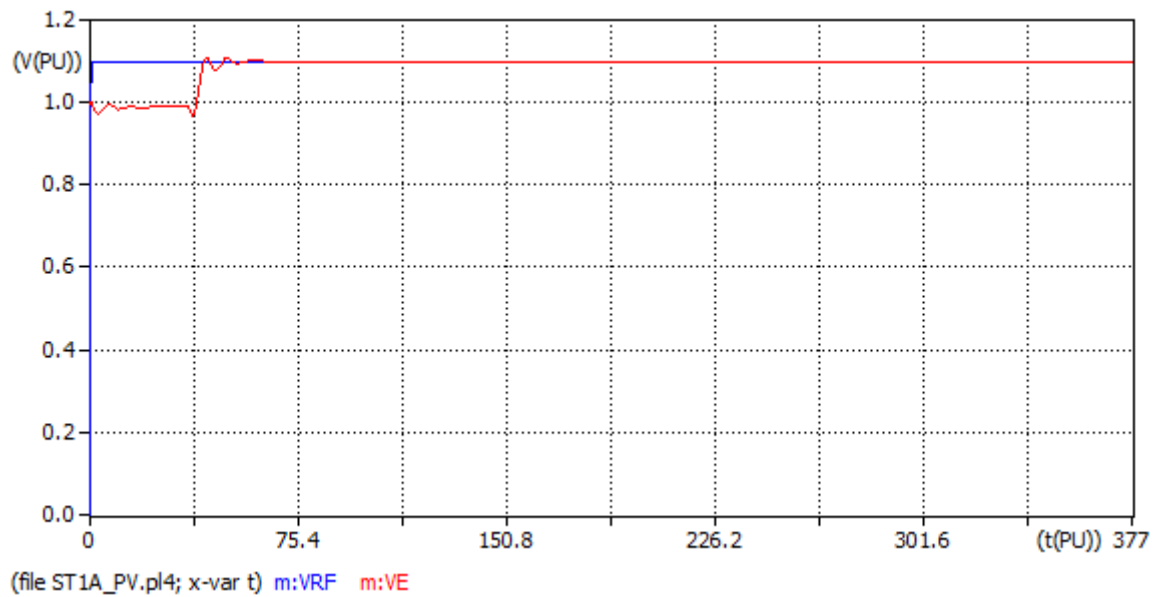
Para la simulación se ha elegido los valores de voltaje de referencia que se debe adaptar el sistema teniendo la siguiente tabla 5.23 con las referencias usadas en las pruebas.

<b>Referencias</b>	
Vref1	1.1
Vref2	1.2

**Tabla 5.23:** Valores referenciales de voltaje en el modelo ST1A

### 5.9.6.1. Simulación con $V_{ref} = 1,1$

Con la referencia de 1.1 ingresada en el transductor se muestra en la figura 5.50 como la máquina estabiliza la señal de voltaje en el valor de referencia introducida el sistema. En el tiempo 30 actúa la excitatriz debido a que en ese tiempo inicia el estado permanente y es donde se genera el voltaje de campo.



**Figura 5.50:** Voltaje de referencia y del sistema ( $V_{ref} = 1,1$ )

La figura 5.51 muestra el actuar del excitador ST1A para entregar la señal de voltaje continuo al circuito de campo y a su vez este genere una corriente que será inyectada en la máquina para obtener el voltaje de referencia requerido.

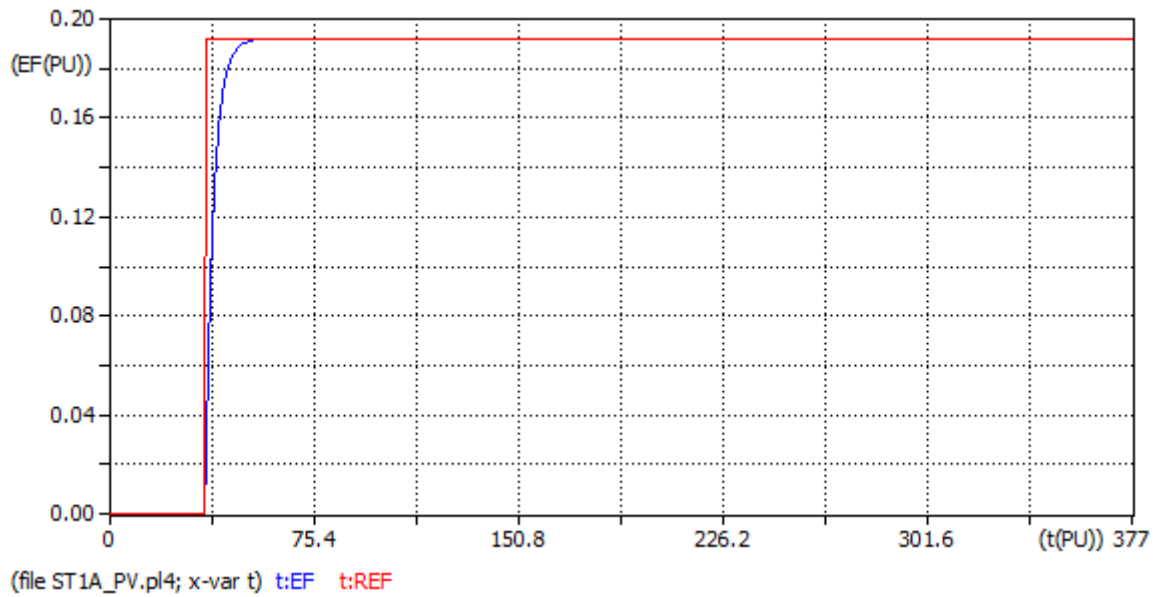


Figura 5.51: Respuesta del modelo DC1A control PV

#### 5.9.6.2. Simulación con $V_{ref} = 1,2$

En la simulación del sistema de excitación control de voltaje con la referencia de 1.2 se tiene que el modelo actúa de forma instantánea como se muestra en la figura 5.52 en donde el voltaje obtenido en el sistema es igual a la referencia ingresada.

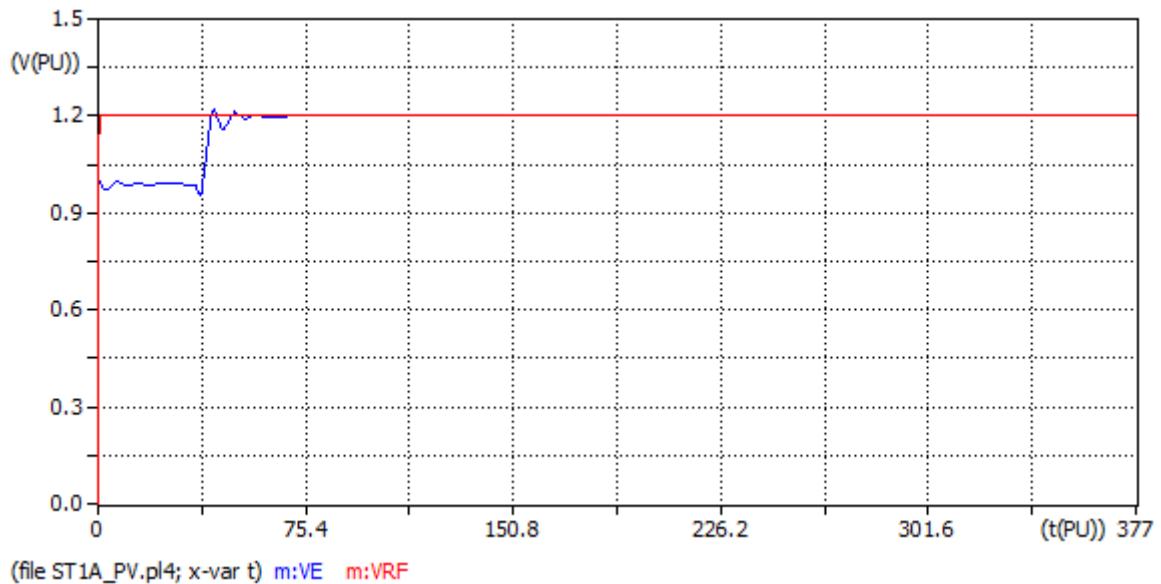
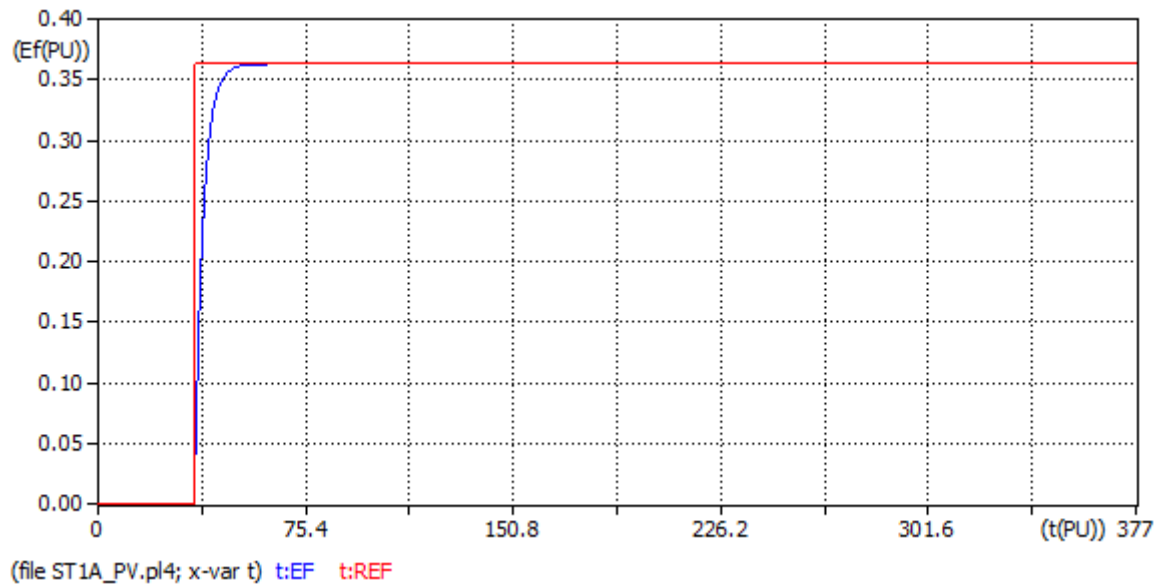


Figura 5.52: Voltaje de referencia y del sistema ( $V_{ref} = 1,2$ )

El modulo de excitación ST1A control PV genera la siguiente respuesta como se



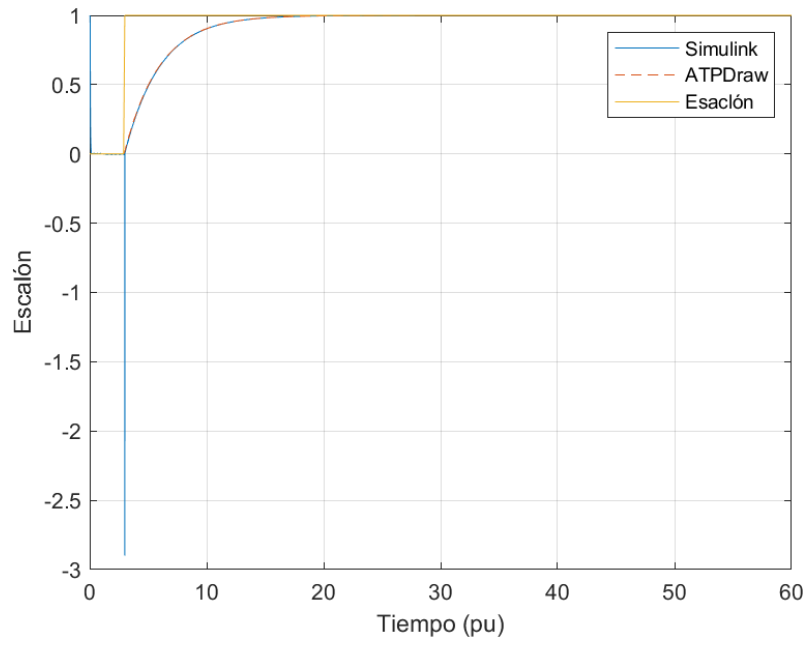
muestra en la figura 5.53 de acuerdo a la referencia adecuada del transductor para el circuito de campo.



**Figura 5.53:** Respuesta del modelo DC1A control PV

### 5.9.7. Comparación modelo ST1A de ATPDraw y Simulink control PV

Entre los programas de simulación tanto ATPDraw y Simulink se superponen las curvas de respuesta que da el sistema de excitación en respuesta al escalón. La figura 5.54 muestra la comparación realizada en los diferentes programas dando una respuesta similar con un error bajo. Se realiza esta comparación frente a Simulink debido a que este es el programa base en donde se encuentra el modelo genérico ya existente.



**Figura 5.54:** Comparación modelo ST1A de ATPDraw y Simulink control PV

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1. Conclusiones

En objetivo general del presente trabajo consistió en modelar y analizar los diferentes tipos de excitatrices utilizadas en el control práctico de las MSPS, utilizando la herramienta ATP-EMTP. En cuanto a los resultados obtenidos en cada uno de los modelos desarrollados en el programa ATPDraw, cumpliendo la normativa IEEE [5] se han obtenido representaciones adecuadas para los sistemas de excitación en ATP-EMTP, como se ha demostrado en el capítulo 5.

El programa de transitorios alternativo (ATP), diseñado para la simulación digital de fenómenos transitorios de naturaleza electromagnética y electromecánica, ha incorporado mejoras para facilitar la simulación e interacción entre los sistemas de potencia y los modelos de control, utilizando las herramientas TACS y MODELS integrados en ATP.

ATP con los módulos de simulación integrada, entre ellos el módulo TACS (Análisis transitorio de sistemas de control), se ha utilizado para simular sistemas de excitación de máquinas síncronas. Este programa también se puede emplear para resolver ecuaciones diferenciales y algebraicas. Para esto se emplea en ATPDraw una representación basada en diagramas de bloques.

Se pudo demostrar con esta investigación que ATPDraw es una herramienta adecuada para la simulación de excitatrices, la cual permite diseñar con una fácil adaptación, mediante la incorporación a los modelos de módulos MODELS y TACS.

Los sistemas de excitatrices basados en el estándar IEEE [5], cuyos modelos seleccionados para el desarrollo y análisis de la simulación fueron AC1A, DC1A,

ST1A, han generado las respuestas adecuadas y precisas para el control de PV y PQ en el sistema. Esto permite adecuar las salidas a las referencias teniendo una respuesta rápida que satisface los parámetros requeridos de control. La precisión de los modelos se analizaron mediante el cálculo del error relativo referente a la señal de salida con su referencia y se obtienen resultados muy favorables, con un error relativo menor al uno por ciento (1 %).

Para la comparación de la respuesta generada por los diferentes modelos de excitatrices se hizo la superposición de las curvas, para lo cual se exportaron los resultados obtenidos en las diferentes simulaciones en ATPDraw a Matlab y se compararon estas respuesta, utilizando los mismos tiempos de muestreo tanto en ATPDraw como en el programa Simulink de MATLAB, donde se realizaron las comparaciones. Para esta tarea resultó de gran utilidad la herramienta PlotXY, debido a la disponibilidad de un módulo de exportación de datos en el formato (.mat), el cual puede exportar directamente la información a MATLAB.

## 6.2. Recomendaciones

Es recomendable tener en cuenta las magnitudes de voltajes y corrientes en cuanto a valores eficaces y valores pico, debido a que esto altera los resultados que se obtienen en la simulación. Es importante utilizar las herramientas de ayuda que ofrece ATPDraw.

Es conveniente la inclusión del modelo circuital para complementar los MODELS y TACS en el correcto funcionamiento del proyecto realizado en ATP-EMTP.

Una vez incluidos los diferentes modelos de excitatrices, sería adecuado complementar este trabajo con la modelación de los gobernadores de las turbinas de la máquina sincrónica.

Por otra parte sería de utilidad extender el modelo de la máquina sincrónica para incluir los devanados amortiguadores y el efecto de la variación de la corriente de campo en las respuestas. El modelo utilizado en este trabajo es una simplificación que debe ser mejorada.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] José Manuel Aller. Máquinas eléctricas rotativas: Introducción a la teoría general. *Editorial Equinoccio*, 2006.
- [2] Luigi Vanfretti Fumagalli. Modelación y simulación de la máquina síncrona y su operación en sistemas de potencia, 2005.
- [3] Prabha Kundur. Power system stability. *Power system stability and control*, pages 7–1, 2007.
- [4] *ATPDRAW version 7.3 for Windows, Users' Manual*, 2021.
- [5] Ieee recommended practice for excitation system models for power system stability studies. *IEEE Std 421.5-2016 (Revision of IEEE Std 421.5-2005)*, pages 1–207, 2016.
- [6] Carlos Tobar Landeta. Diagramas pq para generadores síncronos. B.S. thesis, QUITO/EPN/1981, 1981.
- [7] DR Fenwick and WF Wright. Review of trends in excitation systems and possible future developments. In *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, volume 123, pages 413–420. IET, 1976.
- [8] WF Wright, R Hawley, and JL Dinely. Brushless thyristor excitation systems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (5):1848–1854, 1972.
- [9] Richard C Schaefer and Kiyong Kim. Excitation control of the synchronous generator. *IEEE Industry applications magazine*, 7(2):37–43, 2001.
- [10] Richard Rau Vargas. Modelamiento matemático de la máquina síncrona, sistema de excitación y regulador de velocidad para estudios de estabilidad. 2009.
- [11] Edward Wilson Kimbark. *Power system stability*, volume 1. John Wiley & Sons, 1995.

- [12] Miklós Danyek, Péter Handl, and David Raisz. Comparison of simulation tools atp-empt and matlab-simulink for time domain power system transient studies. *Proceedings of the European EMTP-ATP conference, Sopron, Hungary, 2002*, 01 2002.
- [13] Miguel Ángel Rodríguez Pozueta. *Máquinas Eléctricas I -- G862*, volume 1. Universidad de Cantabria (España), 2015.
- [14] J. M. Aller, J. A. Restrepo, J. C. Viola, and J. R. Mayor. Simplified voltage behind reactance model for the six-phase open-end salient pole pmsm. In *2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, volume 1, pages 2216–2221, 2020.
- [15] Manel Cugota Canals. Estudio de los sistemas de control de la máquina síncrona de polos salientes. B.S. thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2019.
- [16] O Tazzo and L José. *Modelado del sistema de excitación del generador sincrónico*. PhD thesis, Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería . . . , 2009.
- [17] Juan A Martinez Velasco. El paquete de simulación atp. nuevas prestaciones. *Revista Iberoamericana del ATP*, 2(2), 2000.
- [18] Cardona Correa Leonardo de Jesús. *Teoría y práctica con el ATP*, volume 1. Universidad Nacional de Colombia, 1995.

## ANEXOS

## Anexo 1: Modelo dinámico de la MSPS

```
MODEL MSPS
DATA Ldf{dflt: 0.9},Ld{dflt: 1},Lq{dflt: 0.6},Lf{dflt: 1.05}
DATA Re {dflt: 0.01}, Rf{dflt: 0.02}
DATA J {dflt: 0.62}
CONST SQRT23{val: 0.816496581}, SQRT32{val: 0.8660254038}, SQRT3{val: 1.732050808}
CONST SQRT66{val: 0.4082482905},SQRT22{val: 0.7071067812}
INPUT Va, Vb, Vc, iff, ia, ib, ic
OUTPUT Vd,Vq, id, iq, Te, wm, Teta, ea, eb,ec

VAR Vx, Vy, Vd, Vq, Teta, Teta_n
VAR dat, ex, ey, ea, eb, ec
VAR ix, iy, id, iq, wm, Te
VAR pFid, pFiq, pwm, Tm, eq1, eq2

HISTORY
    pwm {dflt:0}
    integral(pwm) {dflt:1}
    wm {dflt:1}
    integral(wm) {dflt:1}

INIT
    Vx:=0, Vy:=0, Vd:=0, Vq:=0
    Teta:=0, Te:=0
    pFid:=0, pFiq:=0, pwm:=0
    dat:=0, ex:=0, ey:=0
    ea:=0, eb:=0, ec:=0
    wm:=1, ix:=0, iy:=0
    id:=0, iq:=0, eq1:=0, eq2:=0

ENDINIT
EXEC
    --- Transformacion voltaje ABC a DQ ---
    Vx:= sqrt23*(Va-(Vb/2)-(Vc/2))
    Vy:= sqrt23*((sqrt32*Vb)-(sqrt32*Vc))
    Teta_n:=Teta-2*pi*trunc(Teta/(2*pi))
    Vd:=(Vx*cos(Teta_n))+(Vy*sin(Teta_n))
```



```

Vq:=(Vy*cos(Teta_n))-(Vx*sin(Teta_n))

ix:= sqrt23*(ia-(ib/2)-(ic/2))
iy:= sqrt23*((sqrt32*ib)-(sqrt32*ic))
id:= (ix*cos(Teta_n))+(iy*sin(Teta_n))
iq:= (iy*cos(Teta_n))-(ix*sin(Teta_n))

--- Resolucion de landa F ---
dat:= SQRT3*Ldf*iff

--- Funciones derivadas ---
pFid:=(Vd-(Re*id)+(Lq*iq*wm))/Ld
pFiq:=(Vq-(Re*iq)-(wm*((Ld*id)+dat)))/Lq

-- Variables auxiliares de las ecuaciones ex, ey
eq1:=(wm*(Ld-Lq)*((iq*cos(Teta_n))-(id*sin(Teta_n))))-(wm*dat*sin(Teta_n))
eq2:=(wm*(Ld-Lq)*((id*cos(Teta_n))+(iq*sin(Teta_n))))+(wm*dat*cos(Teta_n))

--- Funcion ex y ey ---
ex:= ((Ld-Lq)/2)*((pFid*cos(Teta_n))+(pFiq*sin(Teta_n)))+eq1
ey:= ((Ld-Lq)/2)*((pFid*sin(Teta_n))-(pFiq*cos(Teta_n)))+eq2

--- Transformacion xy a abc ---
ea:= SQRT23*ex
eb:=-(SQRT66*ex)+(SQRT22*ey)
ec:=-(SQRT66*ex)-(SQRT22*ey)

--- Par ---
Te:=((Ld-Lq)*(id*iq))+(Ldf*iq*iff)
Tm:=Te;
pwm:=(Te-Tm)/J
wm:= INTEGRAL(pwm)
--write(wm)
Teta:= INTEGRAL(wm)
--write(Teta)

ENDEXEC
ENDMODEL

```

## Anexo 2: Modulo de mediciones

MODEL REF

CONST SQRT23{val: 0.816496581}, SQRT32{val: 0.8660254038}, SQRT3{val: 1.732050808}

INPUT ea, eb, ec, Vd, Vq, id, iq, Teta;

VAR Vx1,Vy1, Teta\_n, Vd1,Vq1, Ve

VAR Vg, P, Q, Ie, Ve

VAR id1, iq1, Vd2, Vq2

OUTPUT Vg, P, Q, Ie, Ve

INIT

P:=0, Q:=0

Vg:=0, Vx1:=0

Vy1:=0, Vd2:=0

Vq2:=0 ,Ve:=0

ENDINIT

EXEC

Vx1:= sqrt23\*(ea-(eb/2)-(ec/2))

Vy1:= sqrt23\*((sqrt32\*eb)-(sqrt32\*ec))

Teta\_n:=Teta-2\*pi\*trunc(Teta/(2\*pi))

Vd1:=((Vx1\*cos(Teta\_n))+Vy1\*sin(Teta\_n))/SQRT3

Vq1:=((Vy1\*cos(Teta\_n))-(Vx1\*sin(Teta\_n))/SQRT3

id1:=id/sqrt(3)

iq1:=iq/sqrt(3)

Vd2:=Vd/sqrt(3)

Vq2:=Vq/sqrt(3)

Vg:=sqrt((Vd1\*\*2)+(Vq1\*\*2))

Ve:=(sqrt((Vd2\*\*2)+(Vq2\*\*2)))\*sqrt(2)

Ie:=sqrt((id1\*\*2)+(iq1\*\*2))

P:= (Vd2\*iq1)+(Vq2\*iq1)

Q:= (Vq2\*id1)-(Vd2\*iq1)

ENDEXEC

ENDMODEL

### Anexo 3: MSPS y sistema de excitación DC1A control PQ

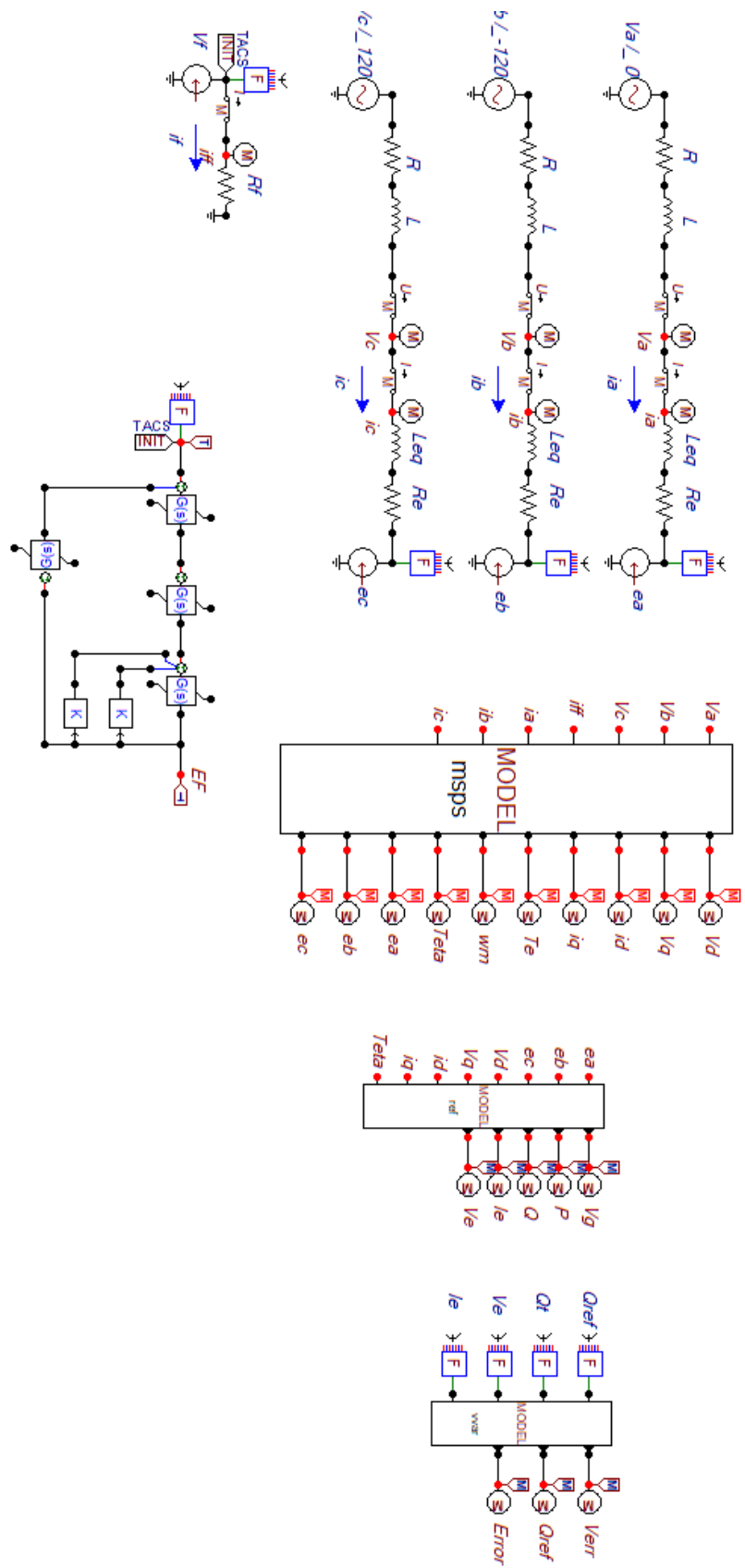


Figura 6.1: MSPS y sistema de excitación DC1A control PQ.

## Anexo 4: MSPS y sistema de excitación DC1A control PV

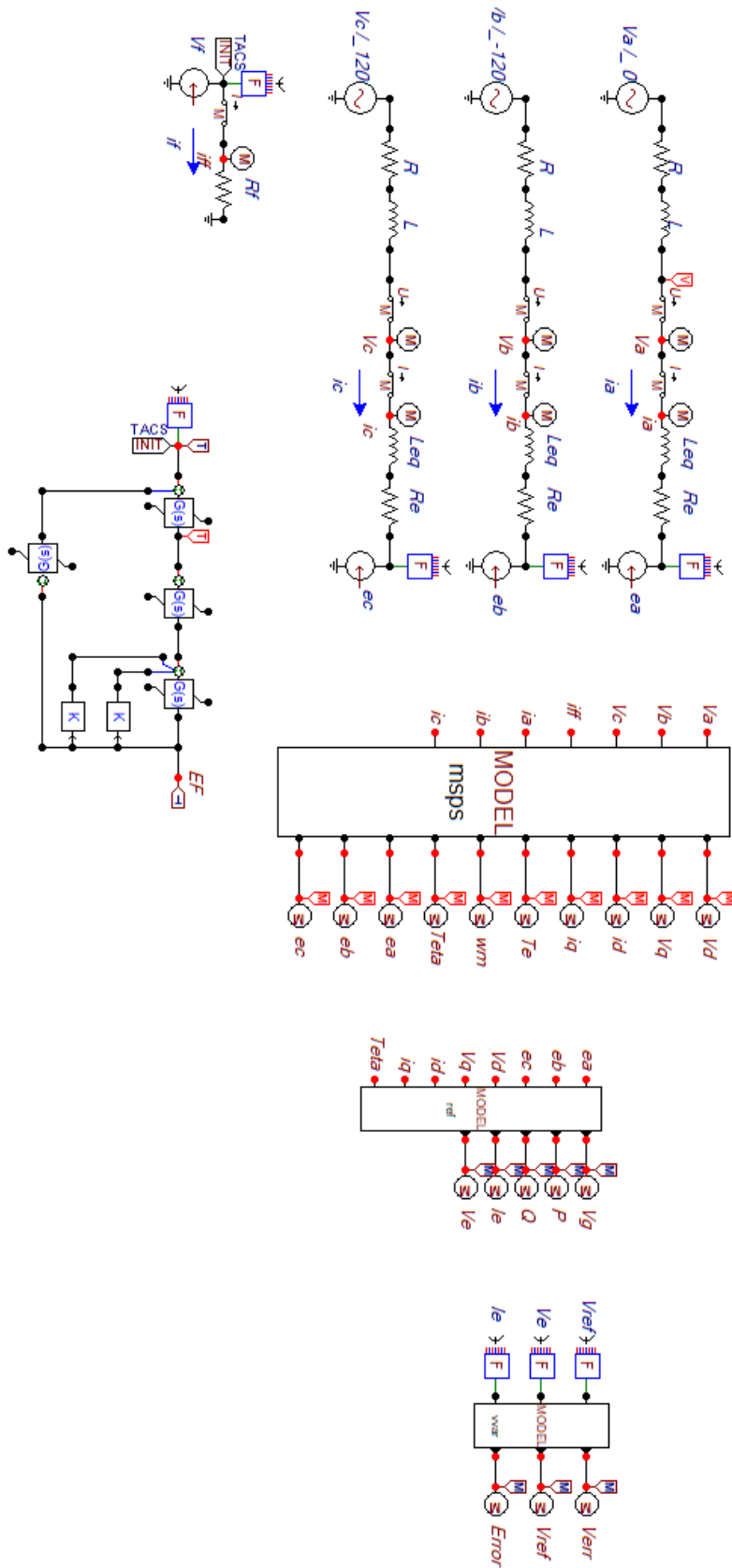


Figura 6.2: MSPS y sistema de excitación DC1A control PV.

## Anexo 5: MSPS y sistema de excitación AC1A control PQ

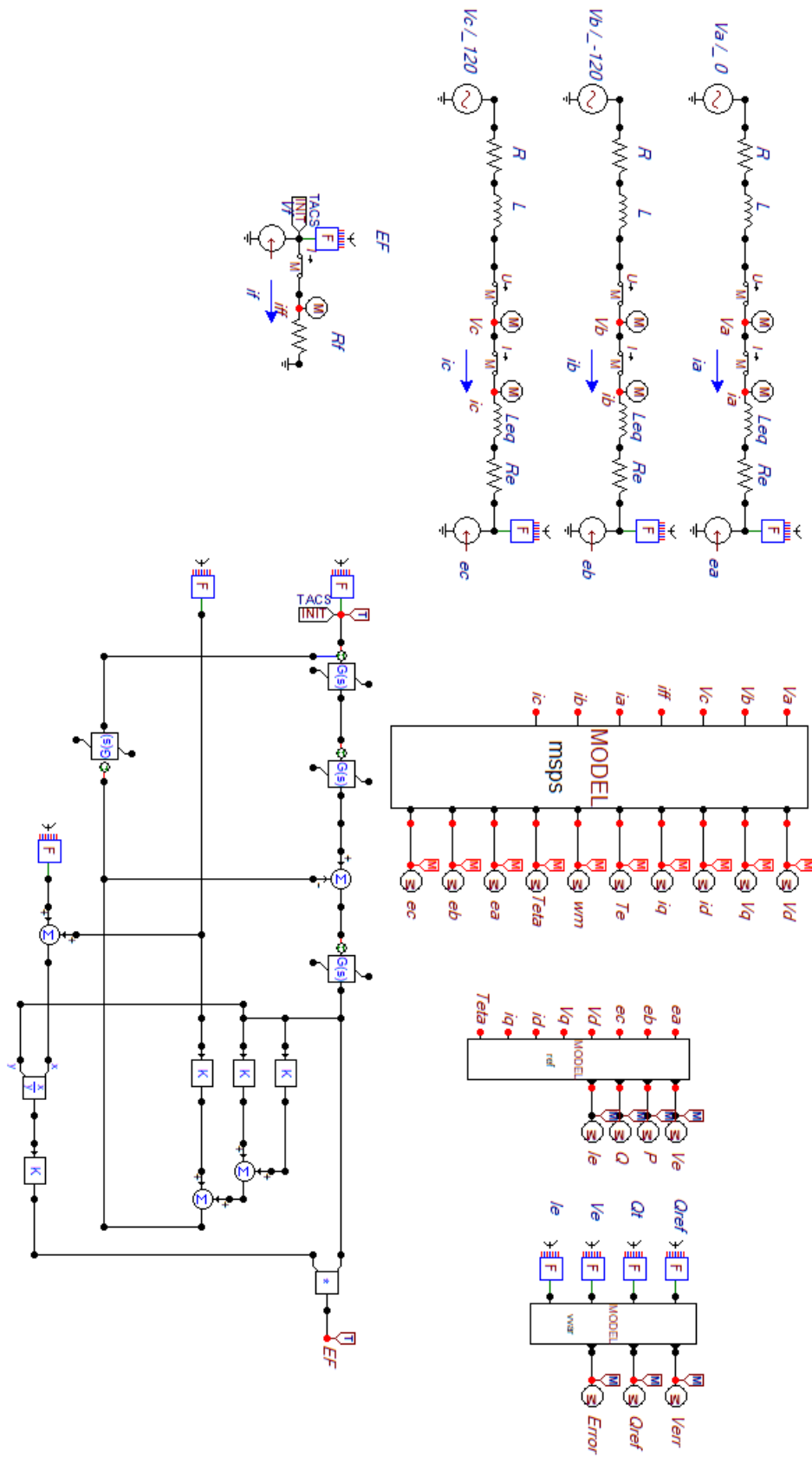


Figura 6.3: MSPS y sistema de excitación AC1A control PQ.

## Anexo 6: MSPS y sistema de excitación AC1A control PV

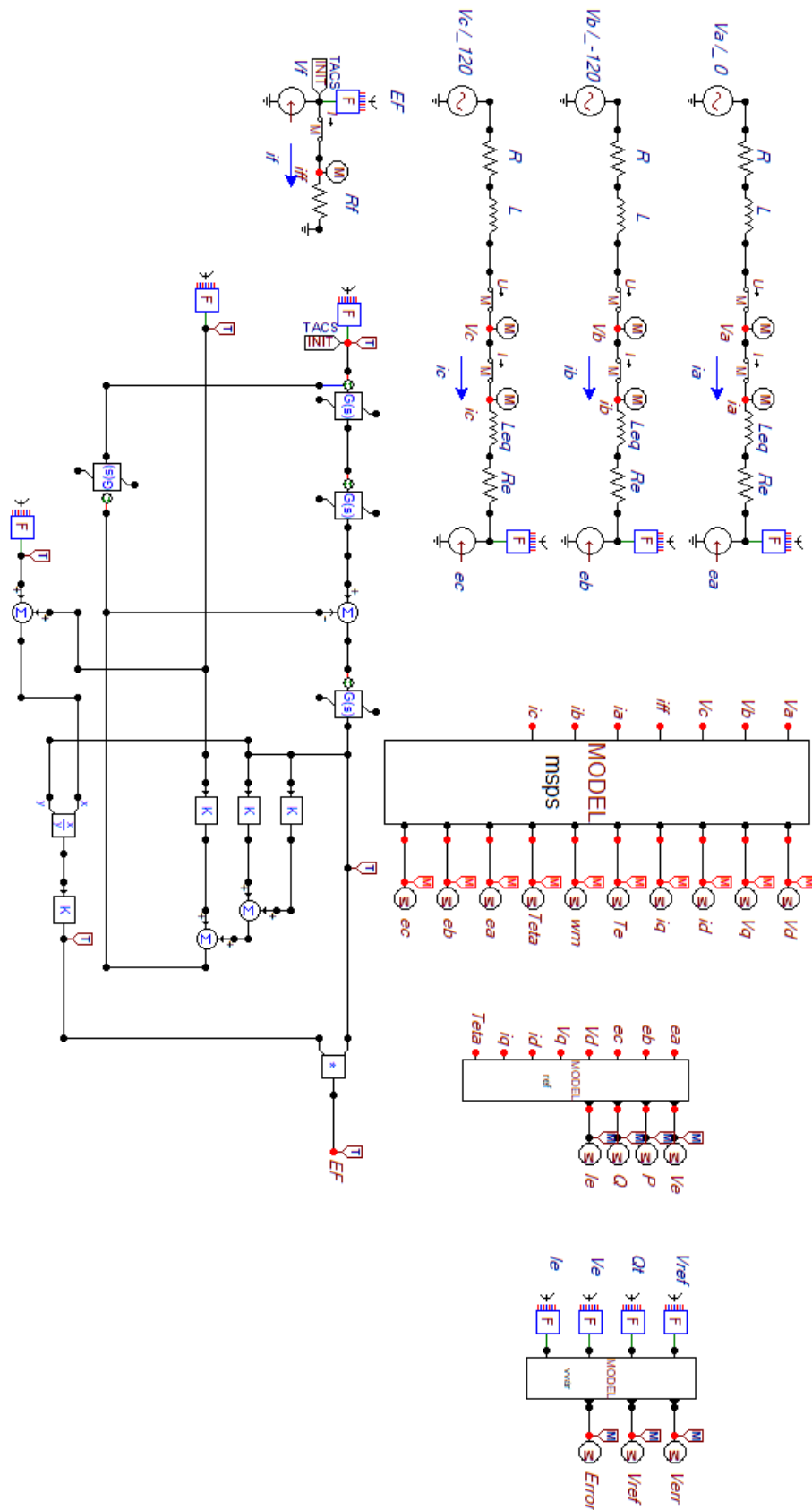


Figura 6.4: MSPS y sistema de excitación AC1A control PV.

## Anexo 7: MSPS y sistema de excitación ST1A control PQ

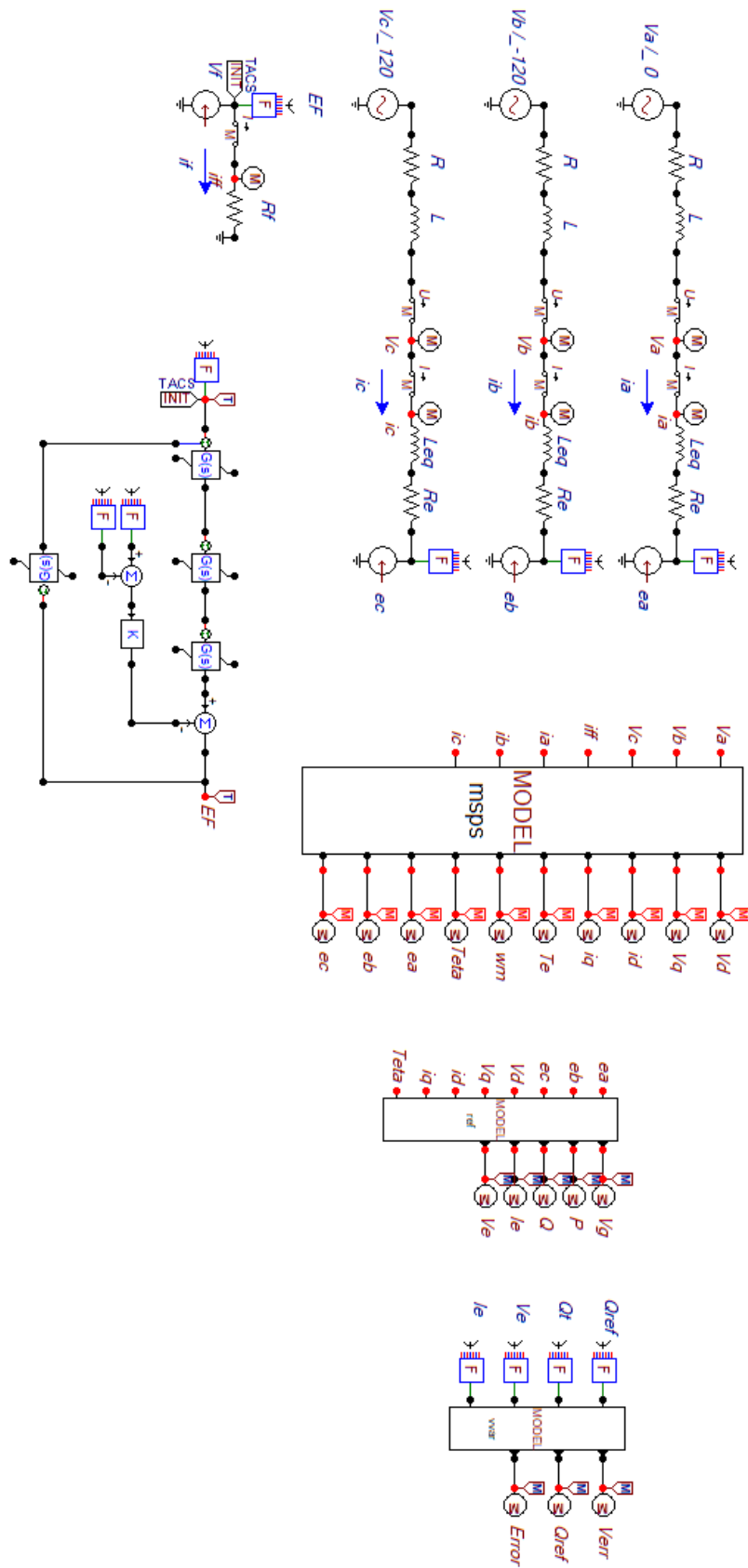


Figura 6.5: MSPS y sistema de excitación ST1A control PQ.

## Anexo 8: MSPS y sistema de excitación ST1A control PV

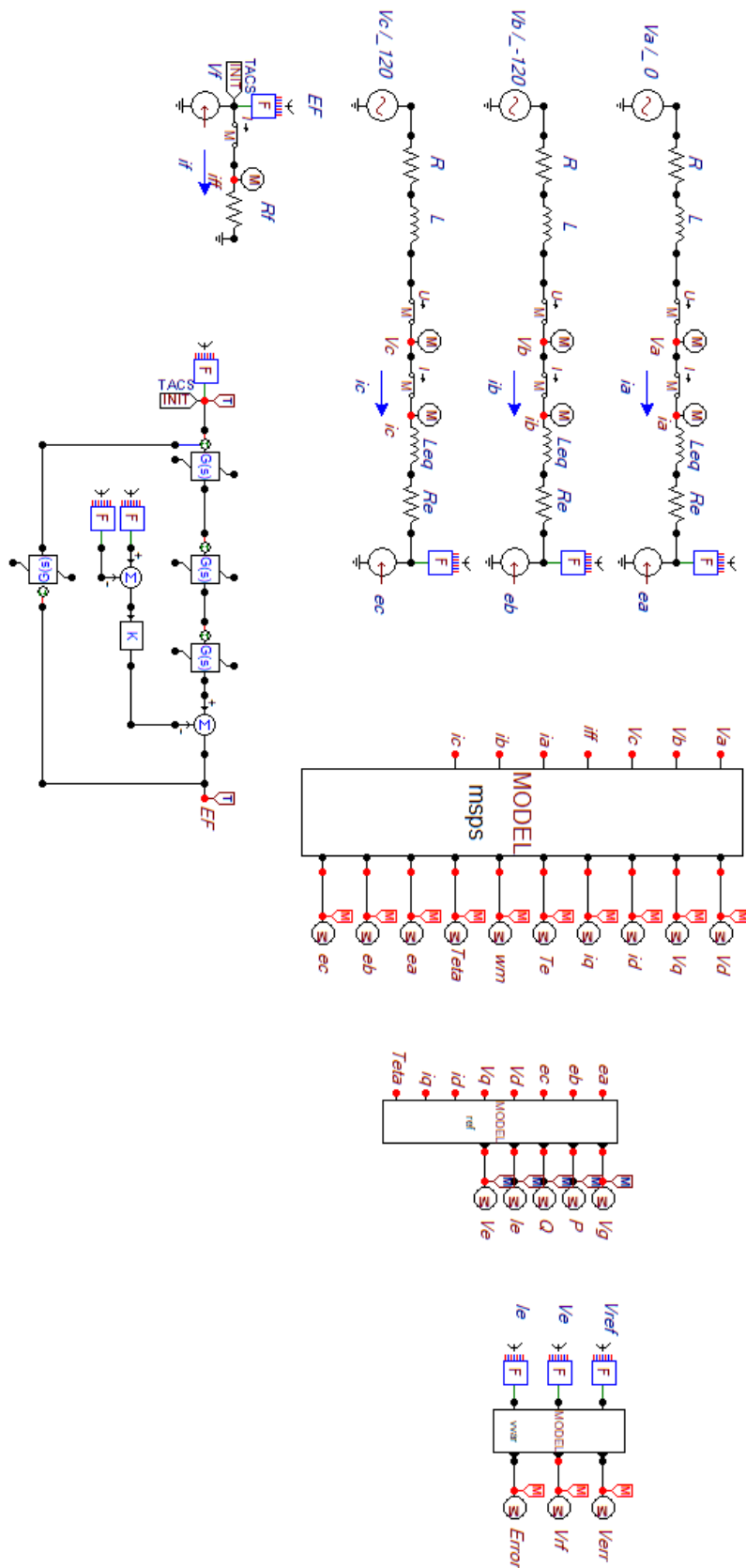


Figura 6.6: MSPS y sistema de excitación ST1A control PV.