



REPÚBLICA DEL ECUADOR

Escuela Politécnica Nacional

" E S C I E N T I A H O M I N I S S A L U S "

La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos de Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL" bajo el libre consentimiento del (los) autor(es).

Al consultar esta tesis deberá acatar con las disposiciones de la Ley y las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.
- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.
- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El Libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

Respeto hacia sí mismo y hacia los demás.

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO DE
SOFTWARE PARA SIMULACIÓN DE GENERADORES
SINCRÓNICOS**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO**

JORDAN WALKER LÓPEZ ROSALES

jordan.lopez@epn.edu.ec

DIRECTOR: DR. HUGO NEPTALÍ ARCOS MARTÍNEZ

hugo.arcos@epn.edu.ec

QUITO, MAYO 2017

DECLARACIÓN

Yo, Jordan Walker López Rosales, declaro bajo juramento que el trabajo descrito es de mi autoría; no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación personal; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Jordan Walker López Rosales

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Jordan Walker López Rosales, bajo mi supervisión.

Dr. Hugo Arcos
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

A mi madre Rita, la mujer más importante de mi vida, por brindarme ánimo en cada momento difícil y una sonrisa en cada momento afable. Gracias por estar incondicionalmente a mi lado y ser esa voz de aliento que siempre se necesita para seguir cada día adelante.

A mi padre Hugo, la luz de mi sendero, quien ha guiado mi camino con consejos, experiencias y reproches. Me ha apoyado en cada reto presentado y me ha enseñado los grandes valores del altruismo, solidaridad y honestidad.

A mis segundos padres, mis abuelitos, Jorge y Piedad, por siempre confiar en mí y cuidarme siempre que yo más lo necesité.

A mi hermano, Ricardo, por inspirarme a ver la vida con un enfoque diferente y ser un amigo leal en cualquier circunstancia.

A mi hermano mayor, mi tío, Carlos por haberme demostrado que en la vida no es importante cuantas veces una persona se puede tropezar sino cuan fuerte se levanta después de cada caída.

A mi tío, Jorge por enseñarme a ser la piedra más fuerte y robusta que forma una familia.

Al doctor Hugo Arcos, por la constante paciencia y ayuda brindada durante la realización del presente trabajo.

A mis incansables amigos de la universidad, colegio y de la vida, por haber enriquecido con gratas experiencias cada reunión social y cada balón disputado.

A Linda por llenar de agradables momentos una ajetreada vida politécnica.

Jordan

DEDICATORIA

A mi madre, una mujer luchadora e incansable. A todas las personas que de una u otra manera han aportado con mi formación integral. Y a todos quienes puedan utilizar este trabajo como una herramienta de guía o consulta.

CONTENIDO

DECLARACIÓN	i
CERTIFICACIÓN	ii
AGRADECIMIENTO	iii
DEDICATORIA	iv
RESUMEN	ix
PRESENTACIÓN	x
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES	1
1.2. OBJETIVOS	1
1.2.1. OBJETVO GENERAL	1
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	1
1.3. ALCANCE	2
1.4. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	2
1.5. CONCEPTOS GENERALES	2
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1. GENERADOR SINCRÓNICO	4
2.1.1. INTRODUCCIÓN	4
2.1.2. EJE DIRECTO Y EJE DE CUADRATURA	7
2.1.3. DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA	8
2.1.3.1. ECUACIONES BÁSICAS	9
2.1.3.2. ECUACIONES DEL ESTATOR	10
2.1.3.3. INDUCTANCIAS PROPIAS DEL ESTATOR	11
2.1.3.4. INDUCTANCIAS MUTUAS DEL ESTATOR	12
2.1.3.5. INDUCTANCIA MUTUA ENTRE LOS DEVANADOS DEL ESTATOR Y ROTOR	13
2.1.3.6. ECUACIONES DEL CIRCUITO DEL ROTOR	14
2.1.4. TRANSFORMACIÓN $dq0$	15
2.2. SISTEMA DE EXCITACIÓN	18
2.2.1. INTRODUCCIÓN	18
2.2.2. REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA DE EXCITACIÓN	18
2.2.3. ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE EXCITACIÓN	19
2.2.4. TIPOS DE SISTEMAS DE EXCITACIÓN	20

2.2.4.1.	Sistema de excitación DC	20
2.2.4.2.	Sistema de excitación AC	21
2.2.4.3.	Sistemas de excitación estáticos	23
2.2.4.3.1.	Sistemas fuente de potencial y rectificador controlado	23
2.2.4.3.2.	Sistemas rectificadores de fuente compuesta	24
2.2.4.3.3.	Rectificadores de excitación controlado-compuesto	25
2.3.	REGULADORES DE VELOCIDAD PARA TURBINAS HIDRÁULICAS Y DE VAPOR	26
2.3.1.	TURBINAS HIDRÁULICAS	27
2.3.1.1.	Función de transferencia de turbinas hidráulicas	28
2.3.1.2.	Regulador de velocidad para turbinas hidráulicas.....	30
2.3.1.2.1.	Requerimientos para una caída transitoria	30
2.3.1.2.2.	Regulador de velocidad – mecánico hidráulico.....	31
2.3.2.	TURBINAS DE VAPOR	34
2.3.2.1.	Función de transferencia para turbinas de vapor	36
2.3.2.2.	Modelo genérico.....	38
2.3.2.3.	Regulador de velocidad de turbinas de vapor	39
2.4.	ESTABILIZADOR DE SISTEMAS DE POTENCIA.....	40
3.	MODELACIÓN MATEMÁTICA E IMPLEMENTACIÓN DEL MÓDULO DE SOFTWARE.....	43
3.1.	ESTUDIO TRANSITORIO.....	43
3.2.	MODELO MATEMÁTICO.....	44
3.3.	MODELAMIENTO MATEMÁTICO DEL SISTEMA A SER SIMULADO .	46
3.3.1.	FUENTE DE VOLTAJE	46
3.3.2.	LÍNEA DE TRANSMISIÓN Y EQUIVALENTE THEVENIN	47
3.3.3.	CARGA.....	51
3.3.4.	TRANSFORMADOR.....	52
3.3.5.	GENERADOR SINCRÓNICO.....	54
3.3.5.1.	Inductancias y constantes de tiempo transitorias y subtransitorias	54
3.3.5.2.	Bloque de conversión de parámetros abc a qd0	56
3.3.5.3.	Bloque de devanados	58
3.3.5.3.1.	Relaciones matemáticas, q _{cct}	59
3.3.5.3.2.	Relaciones matemáticas, d _{cct}	60
3.3.5.3.3.	Relaciones matemáticas del movimiento, rotor.	62

3.3.5.4.	Bloque de oscilación	64
3.3.5.5.	Bloque qd0 a abc	65
3.3.5.6.	Bloque de variables instantáneas del estator (<i>VIPQ</i>).....	66
3.3.6.	SISTEMAS DE CONTROL	67
3.3.6.1.	Reguladores de Voltaje	68
3.3.6.1.1.	DC1A	68
3.3.6.1.2.	AC1A	69
3.3.6.1.3.	AC4A	69
3.3.6.1.4.	ST1A.....	70
3.3.6.2.	Reguladores de velocidad.....	70
3.3.6.2.1.	IEEEG3.....	71
3.3.6.2.2.	PID.....	71
3.3.6.2.3.	IEEEG1	72
3.3.6.2.4.	TGOV3.....	73
3.3.6.2.5.	Turbina a gas	73
3.3.6.3.	Estabilizadores de sistemas de potencia	74
3.3.6.3.1.	GENÉRICO.....	74
3.3.6.3.2.	STAB1	74
3.4.	INTEGRACIÓN DE MODELOS	75
3.4.1.	INTEGRACIÓN DE BARRA INFINITA, CARGA, LÍNEA DE TRANSMISIÓN, TRANSFORMADOR Y GENERADOR SINCRÓNICO	75
3.4.2.	INTEGRACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL	78
3.4.3.	INTEGRACIÓN DE LAS PERTURBACIONES TRANSITORIAS.....	82
4.	IMPLEMENTACIÓN DE CASO EJEMPLO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	
	84	
4.1.	CONDICIONES DE USO	84
4.1.1.	DIAGRAMA DE FLUJO DE LA EJECUCIÓN DEL PROGRAMA.....	85
4.2.	PROCESO DE SIMULACIÓN.....	87
4.3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS CASO DE ESTUDIO.....	96
4.3.1.	VOLTAJE DE ENTRADA AL GENERADOR	97
4.3.2.	VOLTAJE EN LA CARGA.....	99
4.3.3.	CORRIENTE DE FALLA.....	101
4.3.4.	CORRIENTE DE CAMPO	103
4.3.5.	CORRIENTE DE FASE (abc)	105
4.3.6.	TORQUE ELÉCTRICO	107

4.3.7. POTENCIA ACTIVA DEL GENERADOR SINCRÓNICO.....	111
4.3.8. POTENCIA REACTICA DEL GENERADOR SINCRÓNICO	115
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	120
5.1. CONCLUSIONES	120
5.2. RECOMENDACIONES	122
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	123

RESUMEN

El presente proyecto tiene como finalidad el desarrollo de los modelos matemáticos de los componentes más comunes de un sistema de potencia, basado en sus ecuaciones diferenciales con el propósito de estudiar su comportamiento en estado transitorio, permitiendo comprender el proceso de integración en el tiempo que se sigue en la obtención de simulaciones efectuadas por un software comercial.

El proyecto incluye la implementación de una interfaz gráfica en la que se integra los componentes básicos de un sistema eléctrico de potencia: barra de referencia, carga, línea de transmisión, transformador, generador sincrónico y sus sistemas de control. A través de esta interfaz también es posible obtener los resultados de las simulaciones en el tiempo de las principales variables del sistema eléctrico de potencia.

El proyecto se ha desarrollado en el software MATLAB – Simulink y los resultados obtenidos son contrastados con resultados del software PowerFactory de DlgSILENT.

PRESENTACIÓN

En el presente trabajo se implementa el modelo matemático de un sistema eléctrico de potencia para el estudio de su comportamiento en estado transitorio.

En el Capítulo 1 se presenta una introducción al proyecto y los objetivos alcanzados.

En el Capítulo 2 se explica la teoría que sustenta al trabajo realizado, principalmente en lo concerniente al funcionamiento y operación del generador sincrónico y los sistemas de control, regulador de voltaje, regulador de potencia y estabilizador del sistema de potencia, detallando las variables que intervienen en el modelo de la máquina sincrónica.

En el Capítulo 3 se detalla la implementación del módulo didáctico de software, describiendo como se ha integrado el modelo matemático de cada uno de los componentes incorporados en el sistema. Adicionalmente se muestra como se encuentra estructurado el sistema en Simulink.

En el Capítulo 4 se explica el uso de la herramienta computacional, para el efecto se utiliza ejemplos de selección de componentes a través de la interfaz desarrollada. En este capítulo también se presenta la comparación de los resultados con los obtenidos en un software comercial.

Finalmente, en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones y recomendaciones que se han alcanzado en el presente trabajo.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

Las actuales exigencias relacionadas a las prácticas docentes derivan en la necesidad de recurrir a herramientas de simulación computacional en particular en el caso de asignaturas técnicas de alta especialización.

Para el caso particular de la materia de Dinámica de Máquinas se requiere análisis didácticos detallados del comportamiento en estado dinámico (estado transitorio) de unidades de generación convencionales, ya que actualmente pese a existir módulos de simulación, son cajas negras que no permiten contrastar ningún tipo de información parcial de los sistemas.

El presente proyecto desarrolla una herramienta computacional que permite entender y analizar los modelos matemáticos de los elementos de un sistema de potencia.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Implementar una herramienta de software a ser utilizada por docentes del área de máquinas eléctricas con fines didácticos, para capacitación referente al funcionamiento de unidades de generación convencionales.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estructurar un software de simulación que permita la interacción usuario-máquina para el análisis y simulación de unidades de generación térmicas e hidráulicas.
- Incorporar la modelación matemática de generadores sincrónicos y de diversos tipos de sistemas de control en el software a ser desarrollado.
- Realizar un análisis comparativo entre los resultados obtenidos en el software diseñado y un software comercial.

1.3. ALCANCE

En este proyecto se realizará la simulación de unidades de generación convencionales a través de una herramienta computacional implementada para el efecto. Los modelos a ser utilizados serán modelos tipo del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) y los previamente estipulados por el software comercial PowerFactory de DlgSILENT.

Se procederá a desarrollar el software con una interfaz gráfica e intuitiva para el usuario a través de la herramienta GUIDE de MATLAB.

Los resultados obtenidos en el software implementado se compararán con simulaciones realizadas en el software comercial.

1.4. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

La disponibilidad de un software didáctico permitirá a los usuarios experimentar de forma directa los efectos y sensibilidades de los diferentes parámetros y variables en el comportamiento operativo de una unidad de generación convencional. Al poder contrastar la información brindada por un software comercial, con un programa didáctico se afianzará el conocimiento matemático brindado en clase; en tal sentido se convierte en una herramienta importante de aprendizaje.

1.5. CONCEPTOS GENERALES

Regulador de Voltaje: También conocido en sus siglas en inglés como, AVR – Automatic Voltage Regulator, controla dentro de sus límites especificados el voltaje en terminales de un generador, suministrando una señal regulada a su devanado de campo [5].

Regulador de Potencia: También conocido con su nombre en inglés como Governor cuya función principal es controlar tanto la salida de potencia como la velocidad de la turbina, generalmente referido como modo de control de límite de carga y modo de control de governor respectivamente, utiliza señales de potencia activa y de

frecuencia, tomadas en los terminales del generador sincrónico para controlar el flujo del fluido a través de las válvulas de la turbina [5].

Estabilizador del sistema de potencia: Conocido por sus siglas en inglés como PSS – Power System Stabilizer, provee una señal de ingreso adicional al regulador de voltaje para amortiguar oscilaciones de sistemas de potencia [5].

2. MARCO TEÓRICO

2.1. GENERADOR SINCRÓNICO

2.1.1. INTRODUCCIÓN

Los generadores sincrónicos son la principal fuente de energía eléctrica en los sistemas de potencia, por lo que el estudio de sus características y modelamiento matemático es fundamental para el análisis de la estabilidad de sistemas de potencia [5].

De manera general, la máquina sincrónica trifásica está conformada por un devanado de armadura trifásico y un devanado de campo que se alimenta con corriente continua. El rotor puede ser de polos salientes o rotor cilíndrico [5].

Los devanados de armadura usualmente operan a un voltaje más alto que el bobinado de campo y requieren más espacio para su aislamiento, adicionalmente están sujetos a grandes perturbaciones de corriente y por lo tanto su diseño mecánico debe ser adecuado para soportar los esfuerzos derivados de dichas perturbaciones; debido a estas razones es habitual que la armadura se ubique en el estator [5].

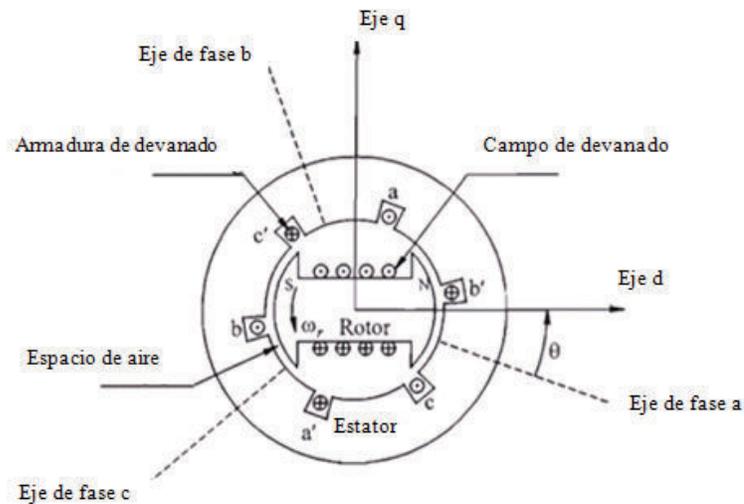


Figura 2.1 Diagrama esquemático de una máquina síncrona trifásica, [5].

Los devanados trifásicos de la armadura están distribuidos de tal forma que ocupa 120° en el espacio; permitiendo que la rotación del campo magnético del rotor induzca voltajes desplazados 120° . Debido a que la armadura está sujeta a variaciones de flujo magnético, el hierro del estator es construido con delgadas láminas para reducir las pérdidas por corrientes de Eddy [5].

Al circular corrientes trifásicas balanceadas en los terminales de la armadura, se produce un campo magnético rotatorio en el entrehierro que gira a una velocidad síncrona, es decir a la misma velocidad de giro del devanado de campo [5].

El número de polos establece la velocidad mecánica del rotor en función de la frecuencia eléctrica de las corrientes del estator. La relación entre estas magnitudes está dado por [5]:

$$n = \frac{120 \times f}{p_f} \quad [2.1]$$

Donde,

n = velocidad mecánica en RPM.

f = frecuencia eléctrica en Hz.

P_f = número de polos del generador

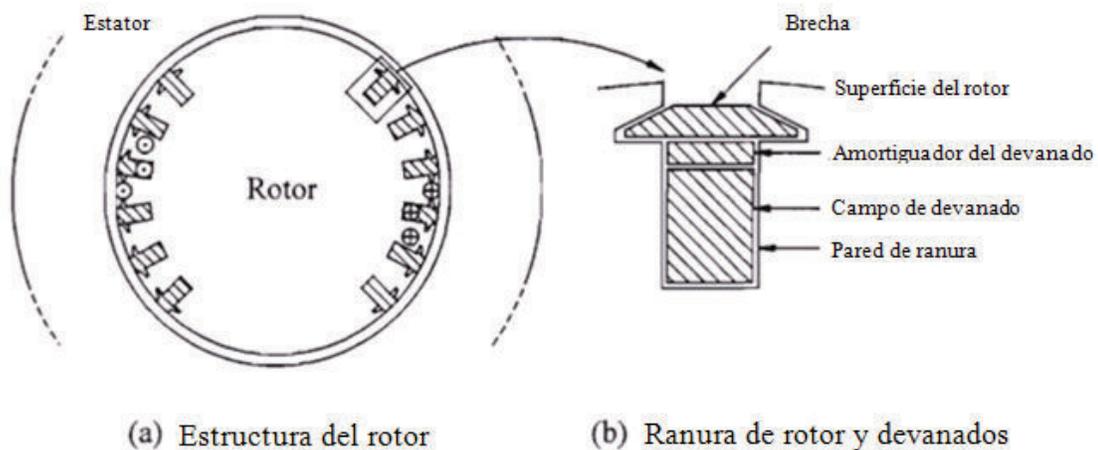


Figura 2.2 Construcción de un rotor sólido circular, [5].

Existen básicamente dos tipos de configuraciones de generadores sincrónicos, que son utilizados en función de la velocidad de operación, para el caso de turbinas hidráulicas, existe la necesidad de un gran número de polos por lo que se utiliza la configuración de polos salientes. La configuración de rotor cilíndrico es usada en turbinas térmicas operan a altas velocidades. Son de dos o cuatro polos, formado por devanados distribuidos localizados en ranuras fijadas en el rotor sólido y mantenidas en su lugar usando cuñas de acero. Los rotores usualmente cuentan con devanados de amortiguamiento constituidos por las barras estructurales que se conectan en sus extremos formando devanados en cortocircuito similares a los motores de inducción tipo jaula de ardilla como se muestra en la figura 2.3 (a). El efecto de estos devanados es la disminución de las oscilaciones de velocidad. Los devanados de amortiguamiento también pueden ser no continuos, encontrándose solamente en el espacio del polo como se muestra en la figura 2.3 (b). Los armónicos espaciales de la fuerza magnetomotriz de la armadura (fmm) contribuyen a las pérdidas por corrientes de Eddy superficiales; por lo que las caras de los polos de las máquinas de polos salientes por lo general son laminadas.

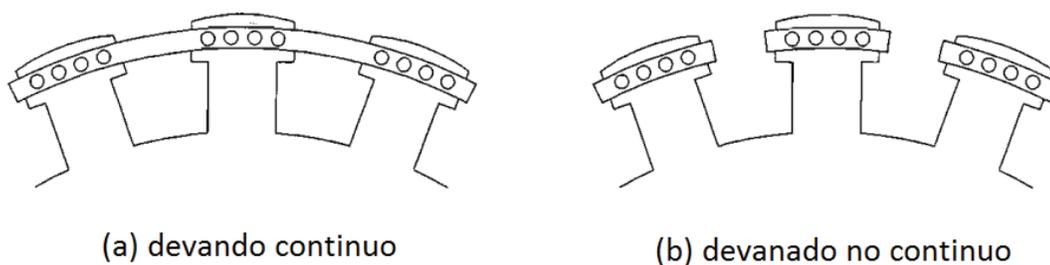


Figura 2.3 Tipo de devanado de amortiguamiento, [5].

Bajo condiciones de estado estable, la única corriente que existe por el rotor es la corriente directa por el devanado de campo. Bajo condiciones dinámicas, se inducen voltajes que producen corrientes por la superficie del rotor, las ranuras de la pared y los devanados de amortiguamiento. En la figura 2.4 se muestran las partes que integran un rotor de una turbina de un generador térmico [5].

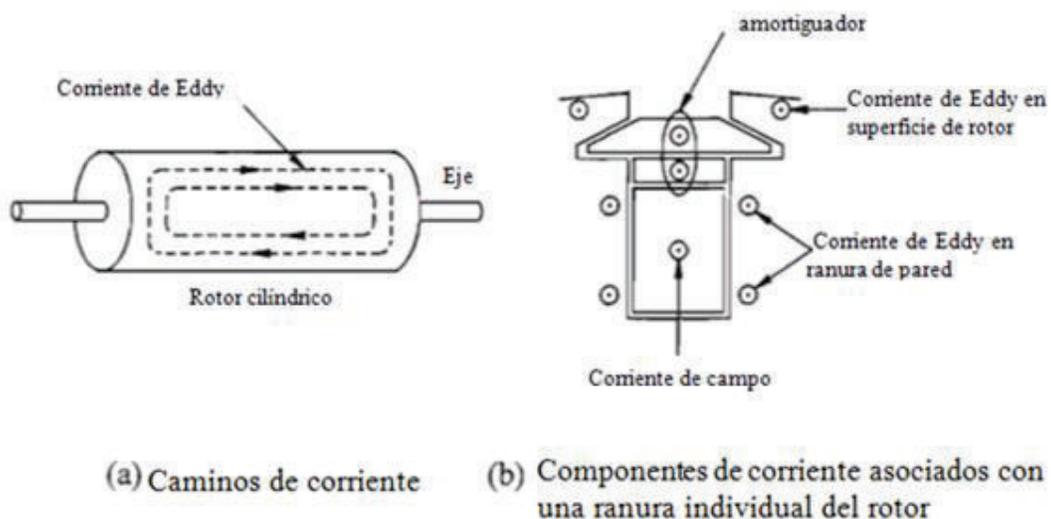


Figura 2.4 Caminos de corriente en un rotor circular, [5].

2.1.2. EJE DIRECTO Y EJE DE CUADRATURA

Los circuitos magnéticos y todos los devanados de rotor son simétricos con respecto a los ejes polares e interpolares, por lo tanto, se definen dos ejes [5]:

- Eje directo, magnéticamente centrado en el centro del polo norte.
- Eje cuadratura, desfasado 90° eléctricos delante del eje directo.

La posición relativa del rotor con el estator está medido por el ángulo entre el eje d y el eje magnético del devanado de la fase A [5].

2.1.3. DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA

Para el desarrollo del modelo matemático de la máquina síncrona, se realiza las siguientes asunciones [5]:

- Los devanados del estator se encuentran distribuidos sinusoidalmente a lo largo del entrehierro.
- Las ranuras del estator no causan variaciones apreciables en las inductancias mutuas.
- La histéresis magnética es despreciable.
- Los efectos de la saturación magnética son despreciables.

Al no ser tomada en cuenta la saturación magnética, el modelo considera solamente circuitos lineales acoplados [5].

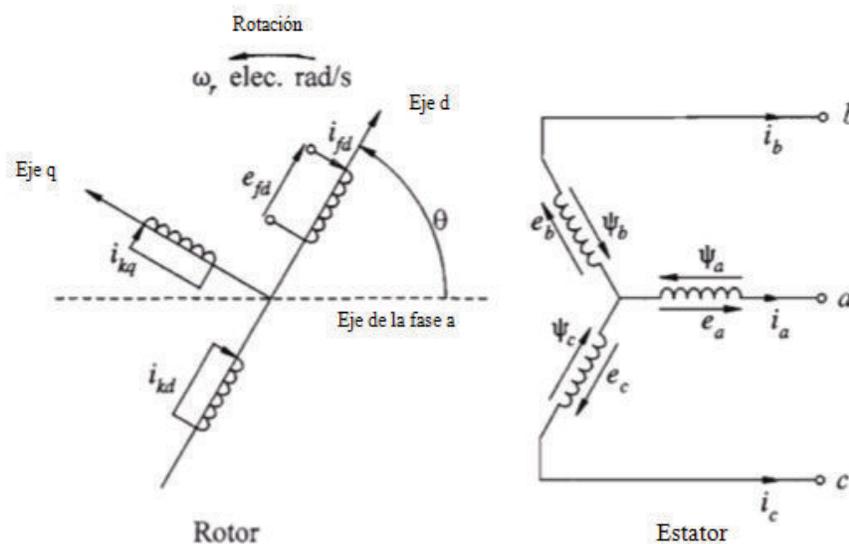


Figura 2.5 Circuitos de estator y rotor para una máquina síncrona, [5].

La figura 2.5 muestra los circuitos para el estator y el rotor de una máquina sincrónica, debido a que el rotor gira con respecto al estator, su ángulo de posición θ está incrementándose continuamente y en función de la velocidad angular ω_r y el tiempo t según la siguiente ecuación [5]:

$$\theta = \omega_r \cdot t \quad [2. 2]$$

2.1.3.1. ECUACIONES BÁSICAS

Se utilizará la convención común para generadores en lo concerniente a polaridades de tal manera que la dirección positiva de la corriente del devanado del estator es asumida que sale de la máquina. La dirección positiva de los campos y corrientes de amortiguamiento se asume que ingresan a la máquina [5].

El flujo producido por el devanado de estator sigue el camino brindado por el material del estator, a través del entrehierro, en dirección al hierro del rotor, y regresa otra vez a través del entrehierro. Las variaciones en la permeabilidad de este camino en función a la posición del rotor pueden aproximarse a [5]:

$$P = P_0 + P_2 \cos 2\alpha \quad [2. 3]$$

En la ecuación 2.3, α es la distancia angular del eje d a lo largo de la periferia como se muestra en la figura 2.6 [5].

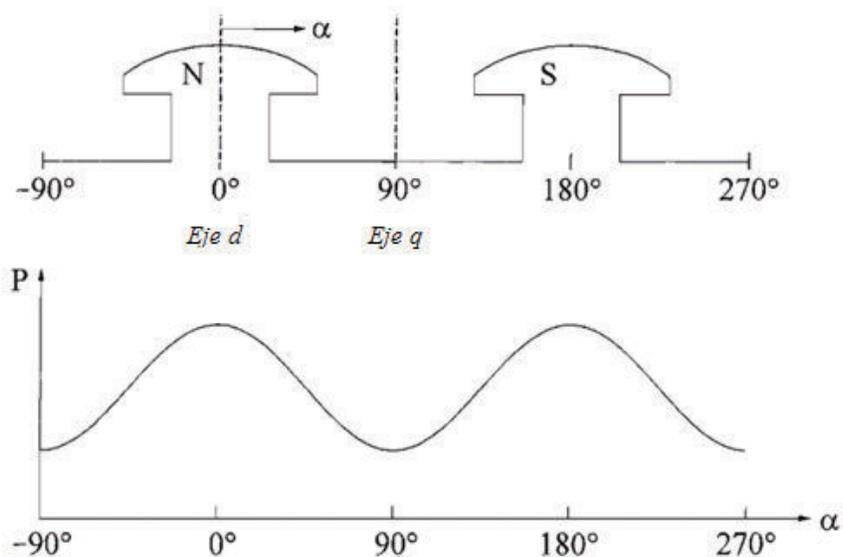


Figura 2.6 Variación de la permeabilidad con respecto a la posición del rotor, [5].

2.1.3.2. ECUACIONES DEL ESTATOR

El voltaje en las tres fases es [5]:

$$\begin{aligned} e_a &= \frac{d\psi_a}{dt} - R_a i_a = p\psi_a - R_a i_a \\ e_b &= p\psi_b - R_a i_b \\ e_c &= p\psi_b - R_a i_b \end{aligned} \quad [2. 4]$$

Donde,

e_a, e_b, e_c = voltaje instantáneo de fase a neutro del estator de las fases A, B y C.

i_a, i_b, i_c = corrientes instantáneas del estator en fases A, B y C.

ψ_a, ψ_b, ψ_c = flujo concatenado de la fase A, B y C.

El acoplamiento de flujo en el devanado de la fase A en cualquier instante de tiempo está dado por:

$$\psi_a = -l_{aa}i_a - l_{ab}i_b - l_{ac}i_c + l_{afd}i_{fd} + l_{akd}i_{kd} + l_{akq}i_{kq} \quad [2. 5]$$

Donde,

l_{aa} = inductancia propia del estator de la fase A.

l_{ab} = inductancia mutuas del estator A y B.

l_{ac} = inductancia mutuas del estator A y C.

l_{afd} = inductancia mutua de amortiguamiento entre los devanados del estator y rotor.

l_{akd} = inductancia mutua del eje d entre los devanados del estator y rotor.

l_{akq} = inductancia mutua del eje q entre los devanados del estator y rotor.

i_{fd} = corriente de campo

i_{kd} = corriente del devanado del eje d.

i_{kq} = corriente del devanado del eje q.

Se aplican ecuaciones similares para los devanados B y C.

2.1.3.3. INDUCTANCIAS PROPIAS DEL ESTATOR

La inductancia propia L_{aa} es igual a la relación del flujo concatenado del devanado de la fase a con la corriente i_a , con las corrientes en todos los demás circuitos iguales a cero. La inductancia es directamente proporcional a la permeabilidad y tendrá su máximo valor para $\theta=0^\circ$, un mínimo para $\theta=90^\circ$, y máximo negativo para $\theta=180^\circ$ [5].

Los valores picos de las dos componentes de la fuerza magnetomotriz, F_{mm} de la fase A son [5]:

$$\text{pico } FMM_{ad} = N_a i_a \cos \theta \quad [2.6]$$

$$\text{pico } FMM_{aq} = N_a i_a \cos(\theta + 90^\circ) = -N_a i_a \sin \theta \quad [2.7]$$

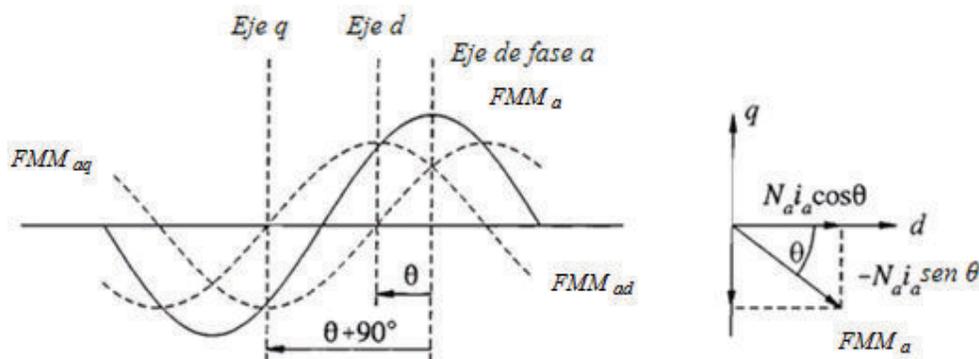


Figura 2.7 Fase A fmm y sus componentes, [5].

Donde,

N_a = número de vueltas efectivas por fase.

Por lo tanto [5],

$$\lambda_{gad} = (N_a i_a \cos \theta) P_d \quad [2.8]$$

$$\lambda_{gaq} = (-N_a i_a \sin \theta) P_q \quad [2.9]$$

Donde,

λ_{gad} = flujo del eje d en el entrehierro.

λ_{gaq} = flujo del eje q en el entrehierro.

P_d = coeficiente de permeabilidad para el eje d.

P_q = coeficiente de permeabilidad para el eje q.

El flujo total concatenado de la fase A, λ_{gaa} es [5]:

$$\begin{aligned}\lambda_{gaa} &= \lambda_{gad} \cos \theta - \lambda_{gaq} \sin \theta \\ \lambda_{gaa} &= N_a i_a (P_d \cos^2 \theta - P_q \sin^2 \theta) \\ \lambda_{gaa} &= N_a i_a \left(\frac{P_d + P_q}{2} + \frac{P_d - P_q}{2} \cos 2\theta \right)\end{aligned}\quad [2. 10]$$

La inductancia propia l_{gaa} de la fase A debido al flujo del entrehierro es [5]:

$$\begin{aligned}l_{gaa} &= \frac{N_a \psi_{gaa}}{i_a} \\ l_{gaa} &= N_a^2 \left(\frac{P_d + P_q}{2} + \frac{P_d - P_q}{2} \cos 2\theta \right) \\ l_{gaa} &= L_{g0} + L_{aa2} \cos 2\theta\end{aligned}\quad [2. 11]$$

Por lo que la inductancia total propia l_{aa} , siendo l_{al} el flujo que no atraviesa por el entrehierro, viene dada por [5]:

$$\begin{aligned}l_{aa} &= L_{al} + l_{gaa} \\ l_{aa} &= L_{al} + L_{g0} + L_{aa2} \cos 2\theta \\ l_{aa} &= L_{aa0} + L_{aa2} \cos 2\theta\end{aligned}\quad [2. 12]$$

Para las fases B y C se consideran los desplazamientos de 120° y -120° [5].

$$l_{bb} = L_{aa0} + L_{aa2} \cos 2 \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \quad [2. 13]$$

$$l_{cc} = L_{aa0} + L_{aa2} \cos 2 \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \quad [2. 14]$$

2.1.3.4. INDUCTANCIAS MUTUAS DEL ESTATOR

La inductancia mutua l_{ab} puede determinarse evaluando el flujo concatenado por la fase B, λ_{gba} cuando circula corriente exclusivamente por la fase A, se tiene que [5]:

$$\lambda_{gba} = \lambda_{gad} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) - \lambda_{gaq} \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$\lambda_{gba} = N_a i_a \left[P_d \cos \theta \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + P_q \sin \theta \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \right]$$

$$\lambda_{gba} = N_a i_a \left[-\frac{P_d + P_q}{4} + \frac{P_d - P_q}{2} \cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad [2. 15]$$

La inductancia mutua entre la fase a y b debido al flujo del entrehierro es [5]:

$$l_{gba} = \frac{N_a \psi_{gba}}{i_a}$$

$$l_{gba} = -\frac{1}{2} L_{g0} + L_{ab2} \cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad [2. 16]$$

2.1.3.5. INDUCTANCIA MUTUA ENTRE LOS DEVANADOS DEL ESTATOR Y ROTOR

Con la variación del entrehierro debida a las ranuras del estator, el circuito del rotor refleja una permeabilidad constante. Por lo tanto en este caso no se trata una variación de permeabilidad, sino que la variación de la inductancia mutua se debe al movimiento relativo entre los devanados del estator y rotor [5].

Cuando el devanado del estator se encuentra alineado con el devanado del rotor, el flujo que existe entre los dos devanados es máximo y la inductancia mutua también es máxima. Mientras que si los dos devanados se encuentran desplazados 90° , no existe flujo y la inductancia mutua es igual a cero [5].

Considerando la distribución sinusoidal de los devanados se establece [5],

$$l_{afd} = L_{afd} \cos \theta \quad [2. 17]$$

$$l_{akd} = L_{akd} \cos \theta \quad [2. 18]$$

$$l_{akq} = L_{akq} \cos\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) \quad [2. 19]$$

$$l_{akq} = -L_{akq} \sin \theta \quad [2. 20]$$

En función de los desfases, se obtiene las expresiones para las inductancias de las ecuaciones de voltaje del estator [5]:

$$\begin{aligned}\psi_a = & -i_a[L_{aa0} + L_{aa2} \cos 2\theta] + i_b \left[L_{ab0} + L_{aa2} \cos \left(2\theta + \frac{\pi}{3} \right) \right] \\ & + i_c \left[L_{ab0} + L_{aa2} \cos \left(2\theta - \frac{\pi}{3} \right) \right] + i_{fd} L_{afd} \cos \theta \\ & + i_{kd} L_{akd} \cos \theta - i_{kq} L_{akq} \sin \theta\end{aligned}\quad [2. 21]$$

De manera similar,

$$\begin{aligned}\psi_b = & i_a \left[L_{ab0} + L_{aa2} \cos \left(2\theta + \frac{\pi}{3} \right) \right] - i_b \left[L_{aa0} + L_{aa2} \cos 2 \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \right] \\ & + i_c \left[L_{ab0} + L_{aa2} \cos(2\theta - \pi) \right] \\ & + i_{fd} L_{afd} \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_{kd} L_{akd} \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ & - i_{kq} L_{akq} \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right)\end{aligned}\quad [2. 22]$$

E igualmente,

$$\begin{aligned}\psi_c = & i_a \left[L_{ab0} + L_{aa2} \cos \left(2\theta - \frac{\pi}{3} \right) \right] + i_b \left[L_{ab0} + L_{aa2} \cos(2\theta - \pi) \right] \\ & - i_c \left[L_{aa0} + L_{aa2} \cos 2 \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \\ & + i_{fd} L_{afd} \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) + i_{kd} L_{akd} \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ & - i_{kq} L_{akq} \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right)\end{aligned}\quad [2. 23]$$

2.1.3.6. ECUACIONES DEL CIRCUITO DEL ROTOR

Los circuitos del rotor ven una permeabilidad constante p , por la estructura cilíndrica del estator [5];

$$e_{fd} = p\psi_{fb} - R_{fd}i_{fd} \quad [2. 24]$$

$$0 = p\psi_{kd} - R_{kd}i_{kd} \quad [2. 25]$$

$$0 = p\psi_{kq} - R_{kq}i_{kq} \quad [2. 26]$$

Por lo tanto las inductancias propias y mutuas del rotor y no varían de acuerdo a la posición. Solamente las inductancias mutuas del rotor al estator varían periódicamente con θ [5].

El flujo concatenado se puede expresar como [5]:

$$\psi_{fd} = L_{ffd}i_{fd} + L_{fkd}i_{kd} - L_{afd} \left[i_a \cos \theta + i_b \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad [2. 27]$$

$$\psi_{kd} = L_{fkd}i_{fd} + L_{kkd}i_{kd} - L_{akd} \left[i_a \cos \theta + i_b \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad [2. 28]$$

$$\psi_{kq} = L_{kkq}i_{kq} + L_{akq} \left[i_a \sin \theta + i_b \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad [2. 29]$$

2.1.4. TRANSFORMACIÓN dq0

Las ecuaciones referentes al estator y rotor describen el funcionamiento eléctrico completo de la máquina síncrona. Sin embargo estas ecuaciones contienen términos que varían con el ángulo θ el cual a su vez cambia en el tiempo. Incrementando el grado de complejidad para la resolución de problemas con máquinas síncronas y sistemas de potencia. Una manera simplificada de afrontar estos problemas es obtener una transformación apropiada de las variables del estator [5].

Se puede apreciar que las ecuaciones 2.30 y 2.31 las corrientes del estator se combinan en términos convenientes para cada eje. Esto determina una transformación a nuevas variables como se muestra [5]:

$$i_d = k_d \left[i_a \cos \theta + i_b \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad [2. 30]$$

$$i_q = -k_q \left[i_a \sin \theta + i_b \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad [2. 31]$$

Las constantes k_d y k_q son arbitrarios y sus valores pueden ser determinados tal que simplifique coeficientes numéricos en el desarrollo de las ecuaciones. En el

presente trabajo se tomará un valor de $2/3$, para condiciones sinusoidales balanceadas, los valores picos de i_d e i_q son iguales al valor pico de las corrientes del estator [5].

$$i_a = I_m \sin \omega_s t \quad [2. 32]$$

$$i_b = I_m \sin \left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3} \right) \quad [2. 33]$$

$$i_c = I_m \sin \left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3} \right) \quad [2. 34]$$

Substituyendo se tiene que:

$$i_d = k_d \left[I_m \sin \omega_s t \cos \theta + I_m \sin \left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3} \right) \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + I_m \sin \left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3} \right) \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad [2. 35]$$

$$i_d = k_d \frac{3}{2} I_m \sin(\omega_s t - \theta)$$

Igualmente en el eje q se tiene que:

$$i_q = k_q \frac{3}{2} I_m \cos(\omega_s t - \theta) \quad [2. 36]$$

Para brindar un completo nivel de concordancia, un tercer componente debe ser definido tal que las tres fases de corriente se transformen en tres variables [5].

$$i_0 = \frac{1}{3} (i_a + i_b + i_c) \quad [2. 37]$$

Donde,

i_0 = corriente de secuencia cero.

Por lo que la transformación completa se daría por [5]:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad [2. 38]$$

$$i_{dq0} = T_{dq0}(\theta_r) i_s$$

Para lo cual T_{dq0} es el término variante en el tiempo que se aplicará en la sección 3.2.5 para las ecuaciones de simulación del generador sincrónico.

La transformada inversa está dada por [5]:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \quad [2. 39]$$

Como se pudo observar anteriormente en la ecuación 2.6 y 2.7 la onda de la fuerza magnetomotriz se debe a las tres corrientes de armadura que circulan a través de la periferia interna del estator a velocidad ω_s rad/s; la cual es también la velocidad del rotor. Por lo tanto para una operación sincrónica balanceada. La fuerza magnetomotriz de la armadura aparece estática con respecto al rotor y sinusoidalmente distribuida. Se puede interpretar a i_d como corriente instantánea en un devanado de armadura ficticio el cual rota a igual velocidad del rotor y permanece en una posición tal que este eje coincide con el eje d. El valor de la corriente del devanado ficticio es tal que el resultado es la misma fmm sobre el eje d que la que se produciría por los valores reales por fase del flujo de corriente del devanado de armadura; aplicándose una interpretación similar para i_q [5].

El análisis de ecuaciones de máquina sincrónica en términos de dq0 es considerado más simple por los siguientes motivos [5]:

- Las ecuaciones tienen inductancias constantes.
- Para condiciones de balance, la secuencia cero desaparece.

- Los parámetros asociados con los ejes d y q pueden ser medidos directamente.

2.2. SISTEMA DE EXCITACIÓN

2.2.1. INTRODUCCIÓN

La función básica de un sistema de excitación es proveer corriente continua al devanado de campo del generador sincrónico y realizar funciones de control y protección para el rendimiento satisfactorio del sistema de potencia mediante el control de voltaje y corriente de campo [5].

Las funciones de control sobre el sistema de excitación incluyen regular voltaje y flujo de potencia reactiva, y el mejoramiento de la estabilidad del sistema [5].

2.2.2. REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA DE EXCITACIÓN

Los requerimientos de rendimiento del sistema de excitación son determinados por las consideraciones del generador sincrónico así como del sistema de potencia [5].

En el generador se necesita un requerimiento básico, y es que el sistema de excitación provea y ajuste automáticamente la corriente de campo del generador sincrónico para mantener constante su voltaje terminal mientras la potencia de salida varía dentro de los límites de capacidad del generador. Los límites para variación de temperatura, fallas de componente, sobrecargas, etc. deben ser calculados cuando se determina el valor de potencia de estado estable [5].

Adicionalmente, el sistema de excitación debe ser capaz de responder a perturbaciones transitorias con el forzamiento de campo consistente con las capacidades de operación del generador tanto instantáneas, como de corto término. Estas capacidades son limitadas por factores como fallas de aislamiento de rotor debido a voltaje de campo, calentamiento del rotor debido a corriente de campo, calentamiento de estator debido a elevada corriente de carga en la armadura, calentamiento del núcleo durante operaciones en subexcitación y calentamiento por exceso de flujo. Los límites térmicos tienen características dependientes del tiempo y las capacidades de sobrecarga de corto término pueden

extenderse de 15 a 60 segundos. Se asegura una utilización óptima del sistema de excitación cuando se cumplen las necesidades del sistema aprovechando las capacidades de corto término del generador sin exceder sus límites [5].

Desde el punto de vista de un sistema de potencia, el sistema de excitación debe contribuir a un control efectivo de voltaje y mejoramiento de condiciones de estabilidad. También debe ser capaz de responder rápidamente a las perturbaciones para mejorar la estabilidad transitoria y modular el campo del generador para mejorar la estabilidad de pequeña señal. La combinación de altas capacidades de forzamiento de campo y el uso de estabilizadores auxiliares de señal contribuyen al mejoramiento substancial de todo el rendimiento del sistema dinámico [5].

2.2.3. ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE EXCITACIÓN

La figura 2.8 muestra el diagrama de bloques funcional de un sistema de excitación general para un generador sincrónico [5].

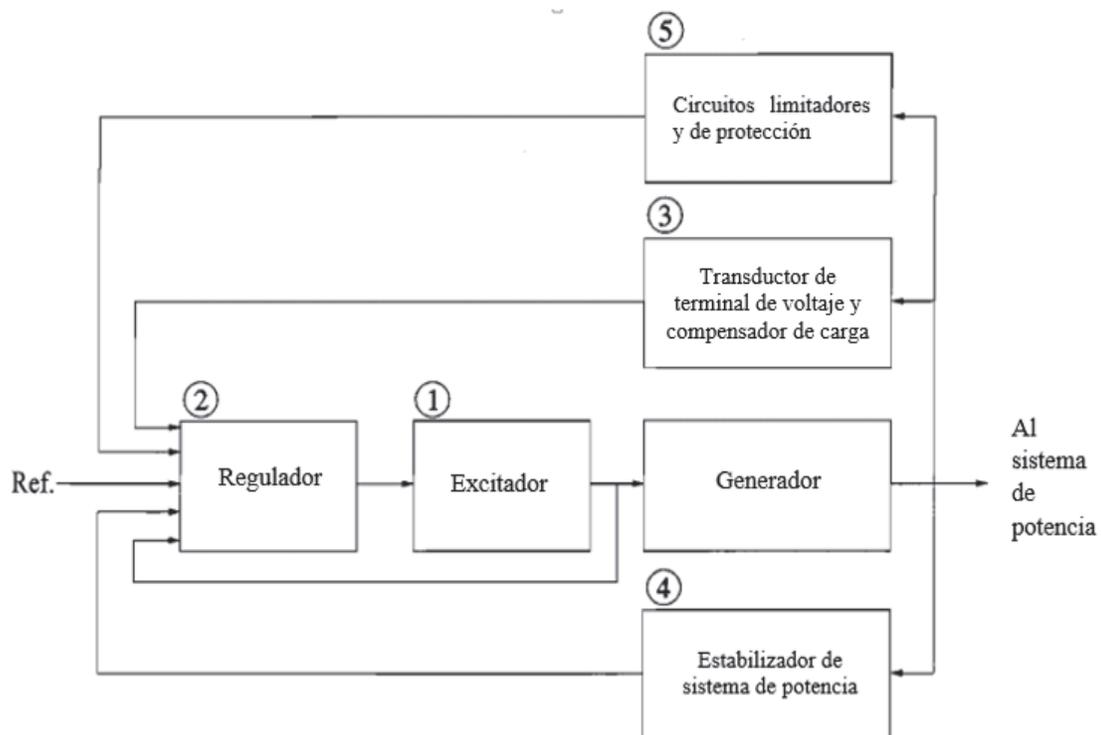


Figura 2.8 Diagrama funcional de bloques de un sistema de excitación de un generador sincrónico, [5].

- (1) Excitador. Provee potencia dc al devanado de campo del generador sincrónico, constituyendo la etapa de potencia del sistema de excitación.
- (2) Regulador. Procesa y amplifica las señales de control de entrada a un nivel y forma apropiada para controlar la excitación esto incluye las funciones de regulación y estabilización.
- (3) Transductor de voltaje terminal y compensador de carga. Censa el voltaje del terminal del generador, rectifica y filtra el mismo en cantidad dc y lo compara con el valor deseado de voltaje terminal.
- (4) Sistema estabilizador de potencia. Incluyen un amplio rango de funciones de protección y control que aseguran que los límites de capacidad del excitador y el generador no sean excedidos.
- (5) Limitadores y circuitos de protección. Incluyen un sistema de control y funciones de protección dentro de las cuales se encuentran los límites de excitación y límites del generador sincrónico.

2.2.4. TIPOS DE SISTEMAS DE EXCITACIÓN

Basadas en la fuente de potencia usada se pueden clasificar en las siguientes categorías [5]:

- Sistemas de excitación DC.
- Sistemas de excitación AC.
- Sistemas de excitación estáticos.

2.2.4.1. Sistema de excitación DC

Utiliza un generador dc como fuente de potencia de excitación y provee corriente al rotor del generador sincrónico a través de anillos rozantes. El excitador puede ser conducido por un motor o por el eje del generador. Puede ser auto excitado o excitado por separado, en cuyo caso el campo de excitación es provisto por un excitador piloto [5].

La figura 2.9 muestra una representación esquemática simplificada de un sistema de excitación típico con un regulador de voltaje amplidina. Consiste de un excitador dc que provee corriente continua al campo del generador principal a través de anillos [5].

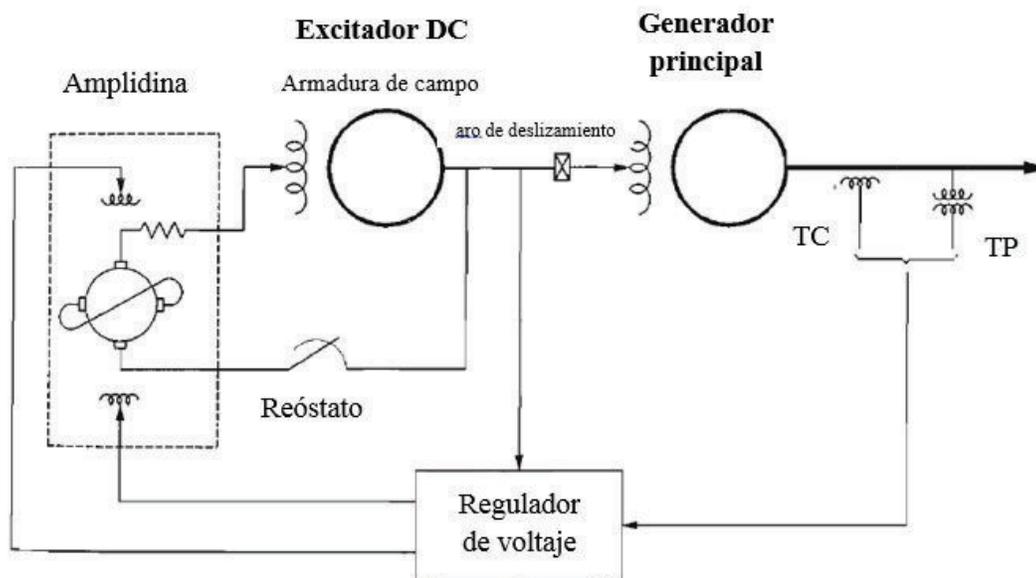


Figura 2.9 Sistema de excitación con amplidina, [5].

Amplidina es un tipo de amplificador de rotación que consiste en una máquina dc con una construcción especial con dos cepillos separados 90 grados eléctricos, uno en dirección del eje directo (d) y el otro en dirección del eje de cuadratura (q). El devanado del campo de control se localiza en el eje d [5].

En la figura 2.9, la amplidina provee cambios incrementales al campo de excitación. La salida del excitador provee el resto de su propio campo mediante auto excitación; en caso de que la amplidina no esté operando, el campo de excitación se cambia mediante el ajuste del reóstato de campo [5].

2.2.4.2. Sistema de excitación AC

Los sistemas de excitación AC utilizan alternadores como fuentes de excitación del generador principal. El excitador produce una salida AC que es rectificadora por un rectificador controlado o no controlado, produciendo la corriente directa necesaria

para el campo de generador. Los rectificadores pueden ser estacionarios o rotatorios [5].

Los sistemas de excitación AC pueden tomar diferentes formas dependiendo del arreglo del rectificador, del método de control de salida del excitador y de la fuente de excitación [5].

A continuación se tiene una descripción de las diferentes formas de sistemas de excitación:

- **Sistemas de rectificación estacionarios**

Su característica es que la salida DC es alimentada al devanado de campo del generador principal a través de anillos rozantes, cuando se usan rectificadores no controlados, el regulador controla el campo del excitador AC [5].

La figura 2.10 representa un diagrama simplificado de un sistema de rectificación estacionario en donde el excitador es manejado desde el rotor. El excitador es auto excitado con su campo de potencia derivado a través del sistema de rectificación. El regulador de voltaje deriva su potencia desde la salida de voltaje del excitador [5].

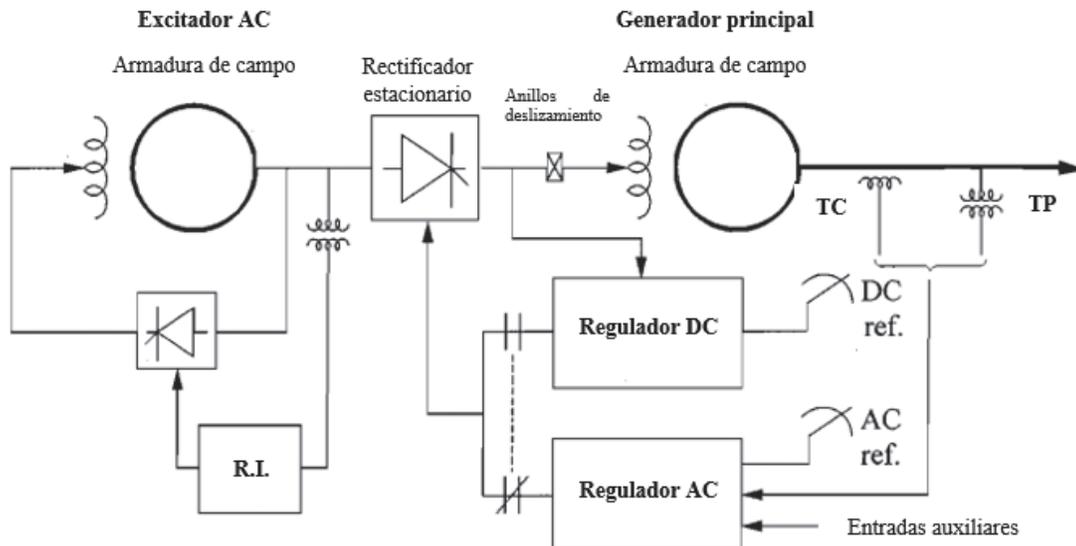


Figura 2.10 Diagrama simple de un sistema de rectificación estacionario, [5]

- **Sistemas rectificadores rotatorios**

Para estos sistemas no se requiere anillos rozantes y escobillas, la salida dc es directamente alimentada al campo de generador principal. En la figura 2.11, la armadura de un excitador AC y el puente rectificador rotan con el campo del generador principal [5].

Se tiene un piloto AC excitador, con un rotor de imán permanente que gira con la armadura y el puente rectificador. La salida del rectificador del excitador piloto que energiza el campo estacionario del excitador AC y el voltaje del regulador controla este capo de excitación [5].

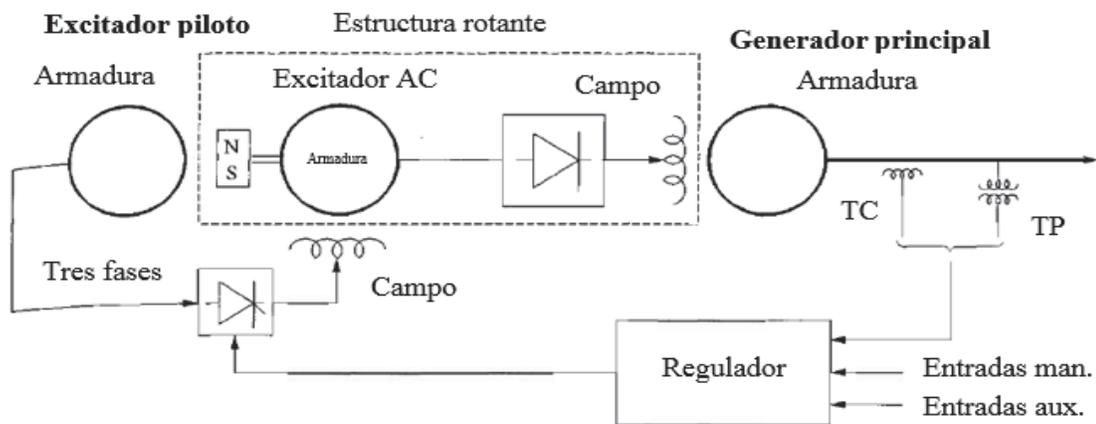


Figura 2.11 Sistema rectificador de rotación, [5].

2.2.4.3. Sistemas de excitación estáticos

Todos los componentes en estos sistemas son estáticos o estacionarios. Los rectificadores estáticos, que pueden ser controlados o no controlados, proveen corriente de excitación directamente al campo del generador sincrónico principal a través de anillos rozantes, se provee de potencia a los rectificadores desde el generador principal a través de un transformador que disminuye el nivel de voltaje a un valor adecuado [5].

Se tienen tres tipos de sistemas de excitación estáticos [5]:

2.2.4.3.1. *Sistemas fuente de potencial y rectificador controlado*

En este sistema, la potencia de excitación es provista a través de un transformador desde los terminales del generador o la barra de distribución auxiliar y es regulado

por un controlador rectificador como se muestra en la figura 2.12. Este tipo de sistema también se conoce como sistema de alimentación por transformador [5].

En este sistema, el voltaje de salida es dependiente del voltaje de entrada por lo que en condiciones de falla del sistema cuando se genera voltajes terminales bajos, el voltaje máximo es reducido también [5].

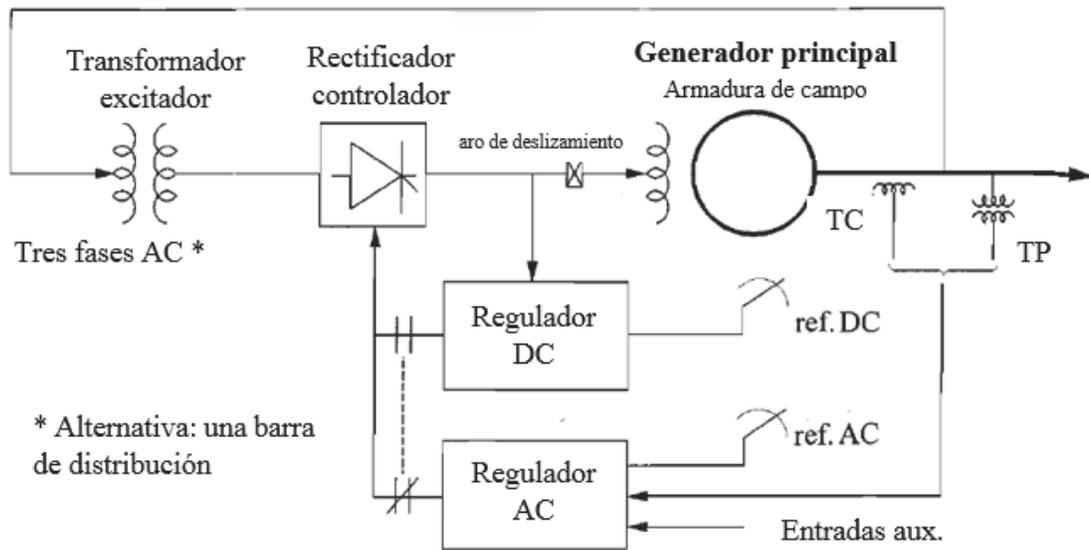


Figura 2.12 Sistema controlador-rectificador de fuente-potencial, [5]

2.2.4.3.2. Sistemas rectificadores de fuente compuesta

En este caso, la potencia del sistema de excitación se obtiene a partir de la corriente y el voltaje del generador principal. Esto se logra utilizando un transformador de potencial (TP) y un transformador de corriente saturable (TCS) como se muestra en la figura 2.13, además las fuentes de voltaje y corriente pueden ser combinadas usando un único transformador de excitación conocido como transformador de potencial y corriente saturable (TPCS) [5].

El regulador controla la salida del excitador a través del transformador de excitación, en caso de que el generador no provea carga, la corriente de armadura es cero y la fuente de potencial provee la potencia de excitación total. En condiciones de carga, parte de la potencia de excitación se deriva de la corriente del generador. En condiciones de falla, con un voltaje terminal muy bajo, la corriente

de entrada habilita el excitador para proveer una alta capacidad de corriente de campo [5].

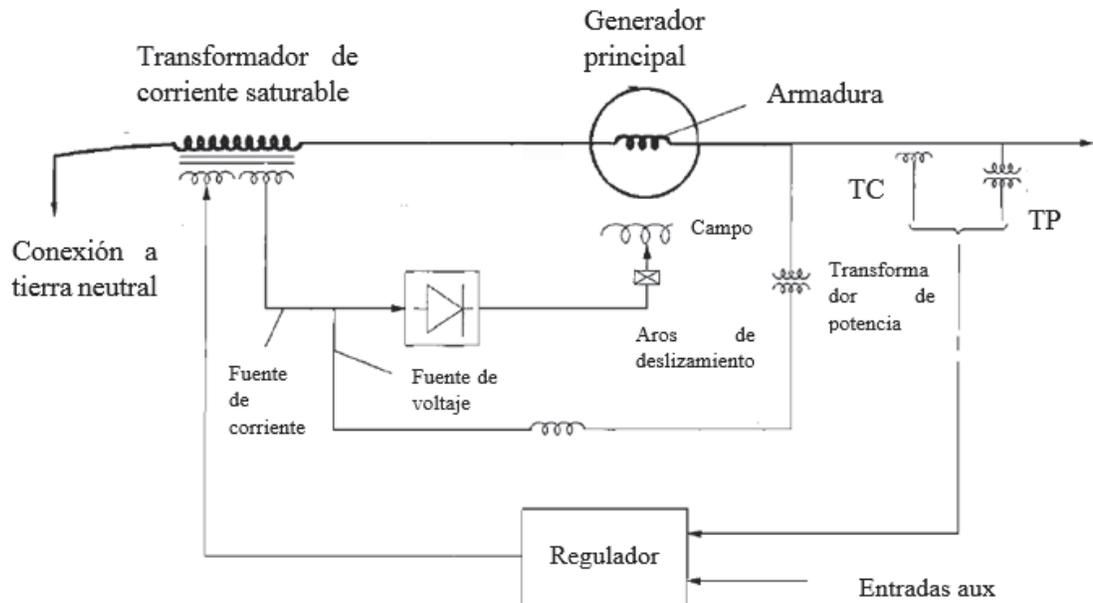


Figura 2.13 Sistema rectificador de fuente compuesta, [5].

2.2.4.3.3. Rectificadores de excitación controlado-compuesto

Este sistema utiliza rectificadores controlados en los circuitos de salida del excitador y la composición de voltaje y fuentes derivadas de corriente en el estator del generador para proveer potencia de excitación. Este esquema presenta como resultado una respuesta inicial alta del sistema de excitación estática con su capacidad de forzamiento para una falla [5].

La figura 2.14 muestra un diagrama elemental del sistema, la fuente de voltaje está formada por un conjunto de devanados de tres fases localizados en el estator y un reactor lineal de serie. La fuente de corriente se obtiene de la corriente del transformador del neutro del devanado del estator. Ambas fuentes son combinadas a través de una acción de transformación y la salida AC es rectificadas por semiconductores de potencia estacionarios [5].

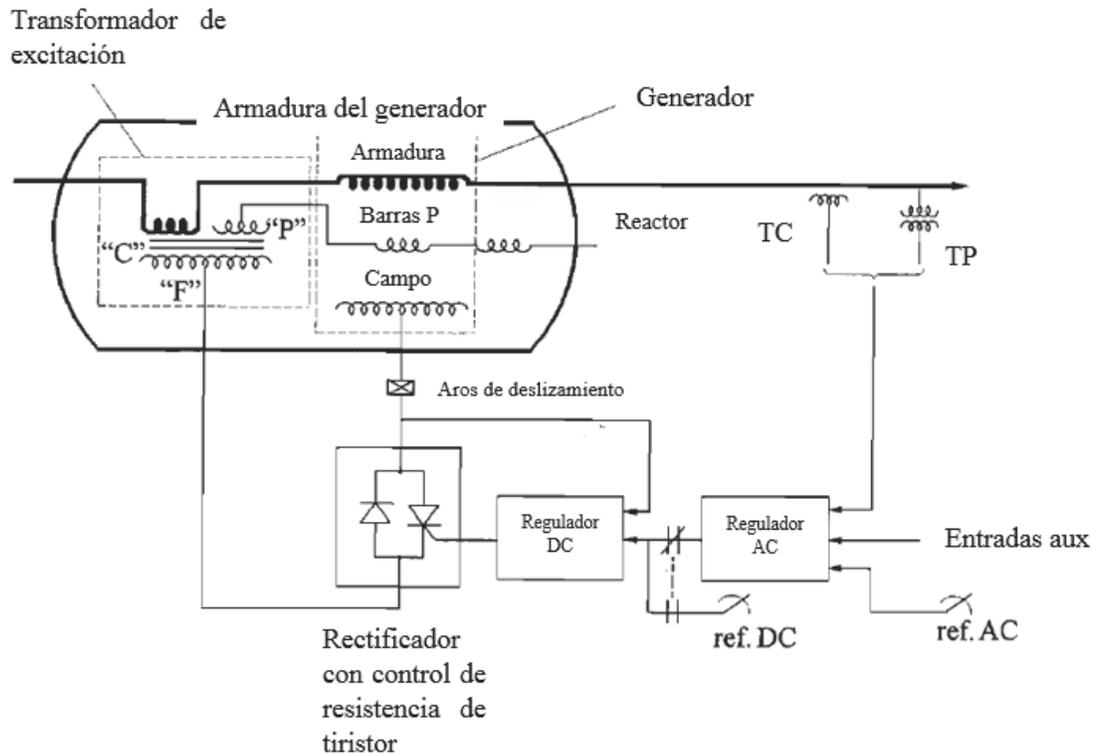


Figura 2.14 Sistema rectificador de excitación controlado-compuesto [5]

Bajo condiciones de falla, el flujo de corriente a través del devanado del transformador de excitación provee la capacidad del campo cuando el voltaje del generador disminuye [5].

2.3. REGULADORES DE VELOCIDAD PARA TURBINAS HIDRÁULICAS Y DE VAPOR

En una unidad de generación de turbina hidráulica o de vapor, el sistema de regulación de velocidad está formado por un transductor de velocidad, un comparador y uno o más amplificadores de fuerza/carrera [20].

En la figura 2.15 se puede ver un diagrama de bloques para un generador de turbina de vapor, el sistema que se muestra en la figura corresponde a un reductor de velocidad el cual tiene una salida típica de carrera que es proporcional a la velocidad [20].

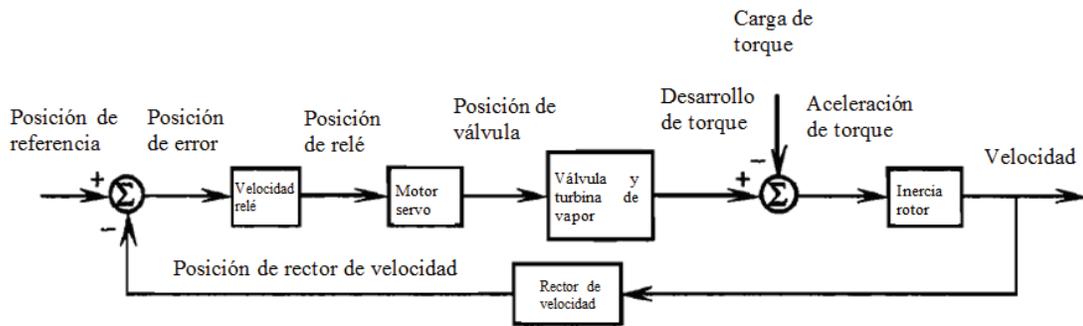


Figura 2.15 Diagrama de bloques para un generador de turbina de vapor, [20].

La carrera es comparada mecánicamente a una posición de referencia predeterminada para dar una posición de error proporcional al error de velocidad, la fuerza que produce este error de posición es pequeña y debe ser amplificada en fuerza y carrera lo que se logra con los bloques de relé de velocidad y servo motor [20].

El transductor de velocidad y puede ser un dispositivo de tipo mecánico, hidráulico o eléctrico que debe medir la velocidad del eje y proveer una señal de salida con una forma apropiada (posición, presión o voltaje) para ser comparada con la referencia y se pueda realizar la amplificación del error [20].

2.3.1. TURBINAS HIDRÁULICAS

Se tienen dos tipos de turbinas hidráulicas: turbinas de impulso y de reacción.

La turbina de impulso se usa para alturas de caída de 300 metros o más, el rotor opera a presión atmosférica y la caída de presión toma lugar en boquillas estacionarias que convierten la energía potencial en cinética. Los chorros de agua de alta velocidad afectan las cubetas con forma de cuchara, que desvían el agua axialmente a 160° ; el cambio en el momento provee el torque que maneja el rotor y emite energía cinética [5].

En una turbina de reacción, la presión de operación de la turbina está sobre la presión atmosférica; se supe de energía por el agua en forma cinética y potencial. El agua pasa en primer lugar por una espiral a través de una paleta guía radial estacionaria y compuertas alrededor de la periferia. Las compuertas controlan el flujo de agua. Existen dos subcategorías de turbinas de reacción: Francis y Propeller [5].

La turbina Francis es usada para alturas de caída de más de 360 metros. En este tipo de turbina, el agua fluye a través de las paletas impactando el corredor tangencialmente y saliendo en dirección axial [5].

La turbina Propeller, utiliza ruedas de tipo hélice. Se usa para alturas de caída bajas de hasta 45 metros. Se puede usar aspas fijas o variables, teniendo el aspa de paso variable una mayor eficiencia para todas las cargas [5].

El rendimiento de una turbina hidráulica es influenciado por las características de la columna de agua que alimenta la turbina; incluyendo los efectos de inercia que causa cambios en el flujo de la turbina que retrasan la apertura de la compuerta. El efecto de elasticidad causa que viajen ondas de presión y flujo en la tubería a lo que se conoce como el “martillo de agua” [5].

2.3.1.1. Función de transferencia de turbinas hidráulicas

Para la representación de turbinas hidráulicas y columnas de agua en estudios de estabilidad se asume [5]:

1. La resistencia hidráulica es insignificante.
2. La tubería reforzada de traslado de agua inelástica y el agua es incompresible.
3. La velocidad de agua varía directamente con la apertura de compuertas y con la raíz cuadrada de la caída neta.
4. La salida de potencia de la turbina es proporcional al producto de la altura de caída y el volumen de flujo.

Las características de la turbina y la compuerta son determinadas por tres ecuaciones básicas [5]:

- a) Velocidad de agua en la compuerta
- b) Potencia mecánica de turbina
- c) Aceleración de columna de agua

La velocidad de agua, U en la compuerta está dada por [5]:

$$U = K_u G \sqrt{H} \quad [2. 40]$$

Donde,

K_u = constante de proporcionalidad

G = posición de la compuerta

H = cabezal hidráulico en la compuerta

La potencia mecánica de turbina, P_m es proporcional al producto de la presión K_p y el flujo U ; por tanto [5]:

$$P_m = K_p H U \quad [2. 41]$$

La aceleración de la columna de agua por un cambio en la altura de caída de agua a la turbina, caracterizado por la segunda ecuación de Newton, puede expresarse como [5]:

$$(\rho L A) \frac{d\Delta U}{dt} = -A(\rho a_g) \Delta H \quad [2. 42]$$

Donde,

L = longitud del conducto.

A = área de tubería.

ρ = densidad de masa.

a_g = aceleración de la gravedad.

$\rho L A$ = masa de agua en el conducto.

$p_a \Delta H$ = cambio incremental de presión en la compuerta de la turbina.

Con estas ecuaciones se puede llegar a la función de transferencia clásica de una turbina hidráulica, que muestra como la potencia de salida de una turbina varía en respuesta a un cambio en la apertura de la compuerta, donde T_w representa el tiempo de aceleración del agua. Para lo cual se puede expresar para una turbina ideal sin pérdidas como [5]:

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta G} = \frac{1 - T_w s}{1 + \frac{1}{2} T_w s} \quad [2.43]$$

2.3.1.2. Regulador de velocidad para turbinas hidráulicas

La función básica de un sistema regulador es controlar la velocidad y / o la carga. La función de control primaria de carga – velocidad involucra una realimentación del error de la velocidad para controlar la posición de apertura de la compuerta de agua. Para asegurar una operación satisfactoria y estable en paralelo de múltiples unidades, la velocidad del sistema turbina regulador es provista con una característica de reparto, la cual asegura carga equitativa compartida entre unidades generadoras. Por lo general los valores estipulados en estado estable para esta caída está establecido en el 5%, es decir que una desviación de velocidad del 5% causa un cambio del 100% en la posición de la compuerta o salida de potencia que corresponde a una ganancia de 20 [5].

2.3.1.2.1. Requerimientos para una caída transitoria

La turbina hidráulica presenta una respuesta peculiar debido a la inercia del agua, un cambio en la posición de la compuerta produce un cambio en la potencia inicial de la turbina que es lo opuesto a lo que se busca. Para el rendimiento de control estable, se requiere una caída transitoria larga con un largo tiempo de reseteo. Esto se logra con la provisión de una tasa de retroalimentación o compensación de reducción de ganancia transitoria. La tasa de retroalimentación retarda o limita el movimiento de la compuerta hasta que el flujo de agua y potencia de salida tienen tiempo para igualarse. El resultado es un sistema turbina regulador que exhibe una

caída alta (baja ganancia) para desviaciones rápidas de velocidad y una caída baja normal (alta ganancia) para estado estable [5].

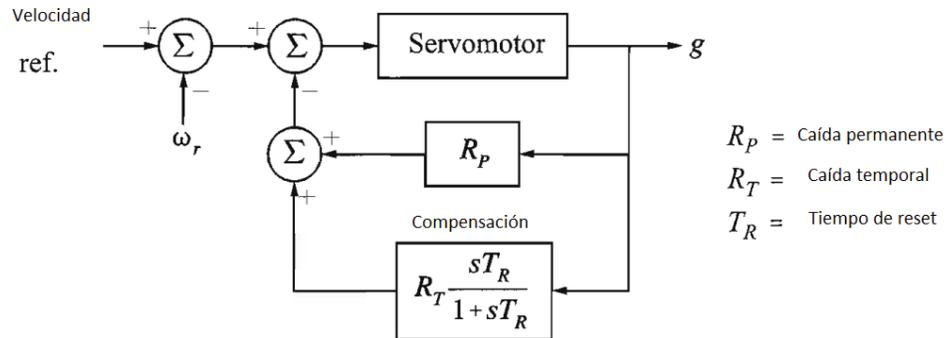


Figura 2.16 Sistema turbina regulador con compensación de caída de transiente, [5].

2.3.1.2.2. Regulador de velocidad – mecánico hidráulico

La figura 2.17 muestra un esquema simplificado de un sistema regulador mecánico hidráulico que posee sensor de velocidad, retroalimentación permanente de caudal y funciones de cálculo logradas a través de componentes mecánicos. Este sistema utiliza un amortiguador para proveer compensación de caída transitoria y se provee usualmente un arreglo de bypass para deshabilitar el amortiguador si se desea [5].

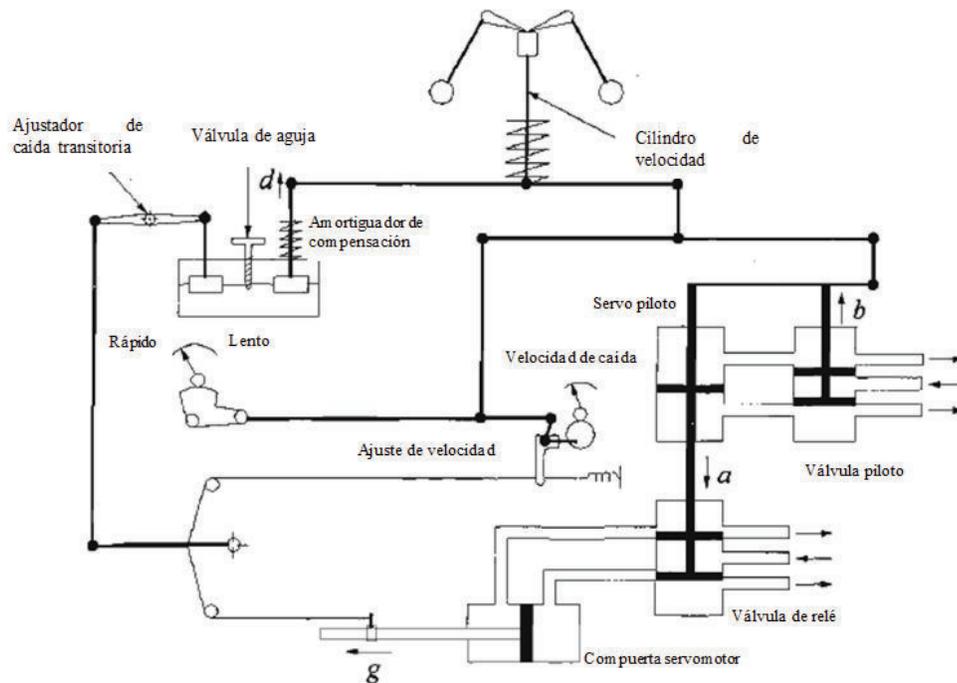


Figura 2.17 Esquema simplificado de un gobernador mecánico hidráulico, [5].

Asumiendo que el fluido en el amortiguador que pasa a través de la válvula de aguja es proporcional a la presión en el amortiguador, la función de transferencia del amortiguador está descrita por la siguiente ecuación [5]:

$$\frac{d}{g} = R_T \frac{sT_R}{1 + sT_R} \quad [2.44]$$

Donde,

R_t = caída transitoria.

T_R = tiempo de reset.

Los diagramas de bloque presentados en la figura 2.18 representan el sistema turbina regulador adecuado para estudios de estabilidad [5].

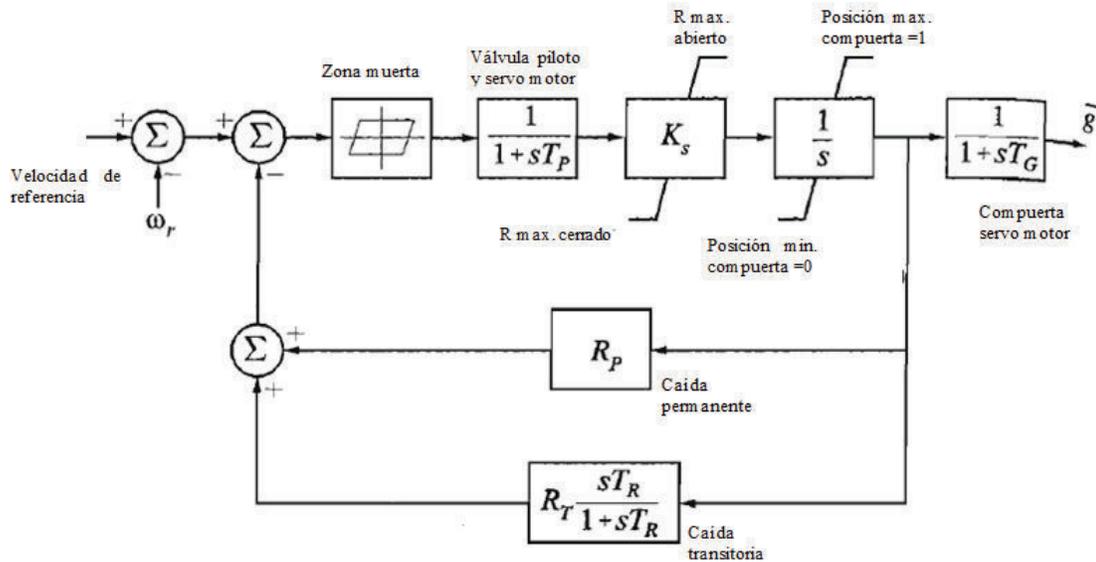


Figura 2.18 Diagrama de bloques del sistema turbina regulador, [5].

Los parámetros utilizados en el presente trabajo se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla 2.1. Parámetros para sistema turbina regulador para turbinas hidráulicas, [5].

Parámetros	Datos de muestra
T_p	0.05 s
K_s	5.0
T_G	0.2 s
R_p	0.04
R_T	0.4
T_R	5.0 s
Limitaciones:	
Límite de posición máxima de compuerta = 1.0	
Límite de posición mínima de compuerta = 0	
$R_{\text{max. abierto}}$ = Tasa máxima de apertura de compuerta 0.16 pu/s	
$R_{\text{max. cerrado}}$ = Tasa máxima de cerrado de compuerta 0.16 pu/s	
$R_{\text{max. amort.}}$ = Tasa máxima de cerrado de compuerta en región de amortiguación 0.16 pu/s	

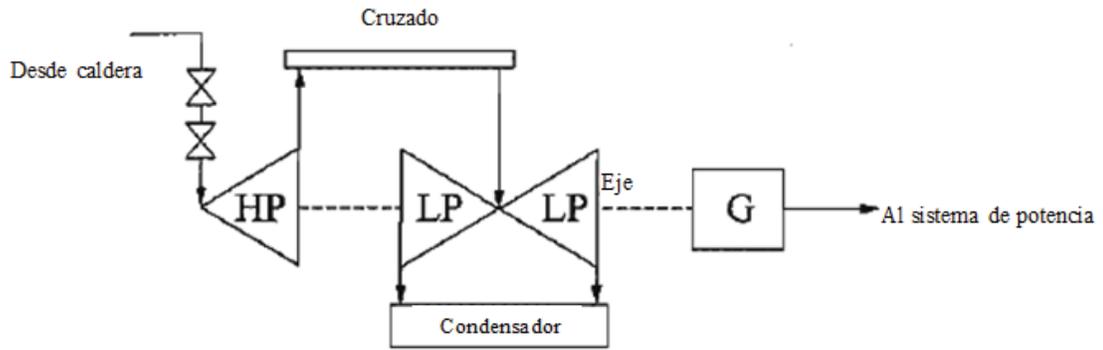
El modelo presentado puede representar efectos de zona muerta, sin embargo es difícil obtener datos que identifiquen sus magnitudes y localización por lo que no se acostumbra modelar sus efectos [5].

2.3.2. TURBINAS DE VAPOR

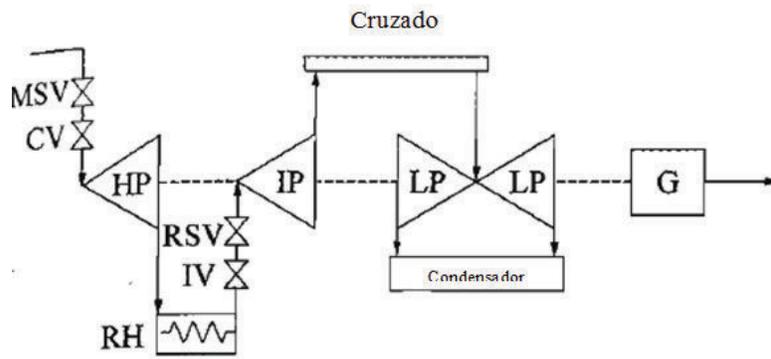
Una turbina de vapor convierte la energía almacenada de alta presión y alta temperatura de vapor en energía de rotación, que luego se convierte en energía eléctrica en el generador. Turbinas de vapor con variedad de configuraciones han sido construidas dependiendo del tamaño de las unidades y la condición del vapor, normalmente consisten en dos o más secciones de turbina o cilindros acoplados en serie, cada sección de turbina consiste en un conjunto de aspas móviles anexadas al rotor y un conjunto de paletas estacionarias [5].

Una turbina con múltiples secciones puede ser compuesta en serie o compuesta transversalmente. Una turbina compuesta en serie tiene todas las secciones en un mismo eje, con un único generador. Una turbina compuesta transversalmente tiene dos ejes, cada uno conectado a un generador y manejada por uno o más secciones de turbina; pero diseñada y operada como una única unidad con un conjunto de controles [5].

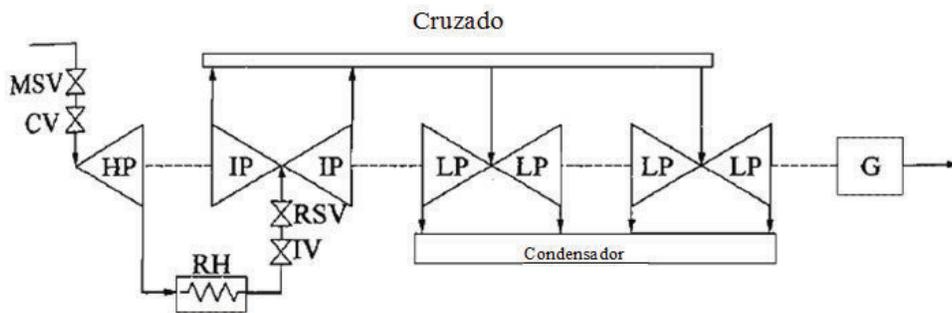
Las figuras 2.19 (a), (b), (c) y (d) muestran configuraciones típicas para los dos tipos de turbinas; las unidades en serie corren a 3600 r/min mientras que en configuración transversal se tiene una rotando a 3600 r/min y la otra a 1800 r/min [5].



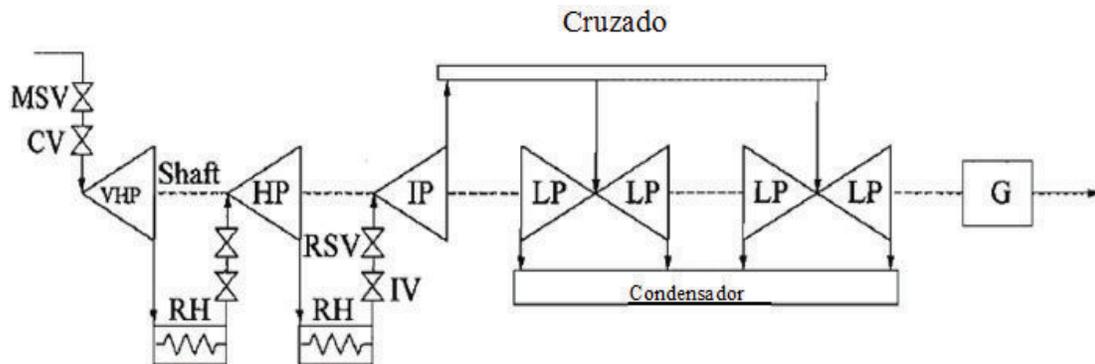
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2.19 Configuraciones típicas de turbinas (a) Sin recalentamiento, (b) Recalentamiento simple, (c) Recalentamiento simple con otra válvula (d) Recalentamiento doble, [5].

Dependiendo de la configuración de la turbina, las unidades consisten de secciones de turbina de alta presión, presión intermedia y baja presión. Estas unidades pueden ser de tipo recalentamiento, que mejora la eficiencia, o no recalentamiento [5].

2.3.2.1. Función de transferencia para turbinas de vapor

La figura 2.20 muestra el diagrama de bloques de una turbina tándem – compuesta y de recalentamiento. El modelo toma en cuenta los efectos de entrada en caja de vapor, recalentamiento, y las características no lineales de control e intercepción de válvulas [5].

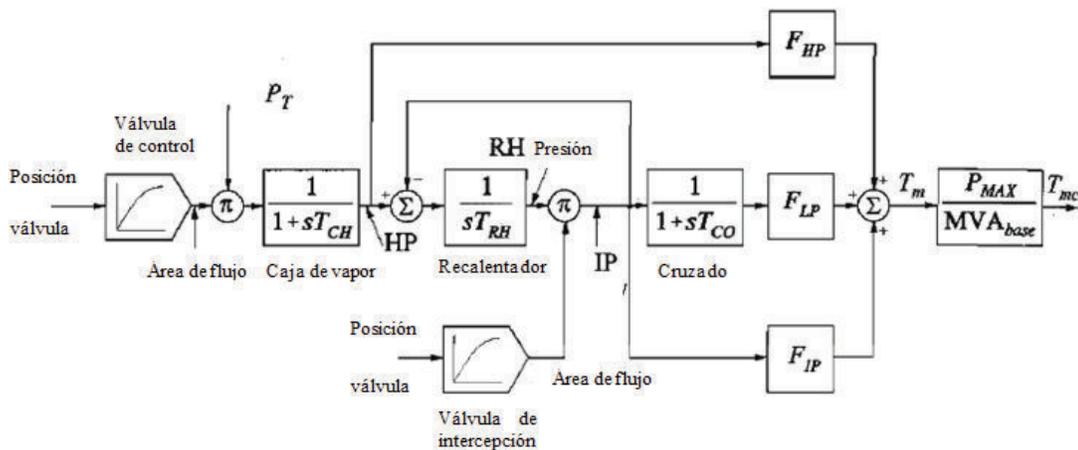


Figura 2.20 Diagrama de bloques de una turbina compuesta en serie, [5].

Tabla 2.2. Parámetros para función de turbina a vapor compuesta en serie, [5].

Parámetros	Terminología
T_{CH}	Constante de tiempo de la caja de vapor principal de entrada
T_{RH}	Constante de tiempo de recalentamiento
T_{CO}	Constante de tiempo de cruzado
T_m	Torque total en la turbina por unidad de potencia máxima en la turbina
T_{mc}	Torque total en la turbina mecánica por unidad de base MVA
P_{MAX}	Potencia máxima de la turbina en MW
F_{HP}, F_{IP}, F_{LP}	Fracción de la potencia total de la turbina generada por alta presión (HP), presión intermedia (IP) y baja presión (LP) respectivamente
MVA_{base}	Base MVA común

De este modelo se puede obtener una función de transferencia simplificada de la turbina que relaciona los valores de perturbación del torque (ΔT_m) y la posición de la válvula de control (ΔV_{cv}) [5].

$$\frac{\Delta T_m}{\Delta V_{cv}} = \frac{1 + sF_{HP}T_{RH}}{(1 + sF_{HP})(1 + sT_{RH})} \quad [2.44]$$

Para la simplificación se asume que la característica de la válvula de control es lineal y que T_{CO} es despreciable con respecto a T_{RH} [5].

2.3.2.2. Modelo genérico

La figura 2.21 muestra una estructura aplicada a las configuraciones más comunes de turbina de vapor. Con ciertos parámetros en cero se llega a simplificar algunas etapas de este modelo, logrando cambiar el funcionamiento de la planta. Este modelo puede ser usado para representar cualquier configuración de turbina mencionada anteriormente [5].

Tabla 2.3. Parámetros para modelo genérico de una turbina de vapor, [5].

Parámetro	Equivalencia
K1	F_{HP}
K6	F_{LP1}
T1	T_{HC}
K2	0
K7	0
T3	T_{RH}
K3	0
K8	0
T4	T_{CO1}
K4	0
K9	F_{LP2}
T5	T_{CO2}
K5	F_{IP}

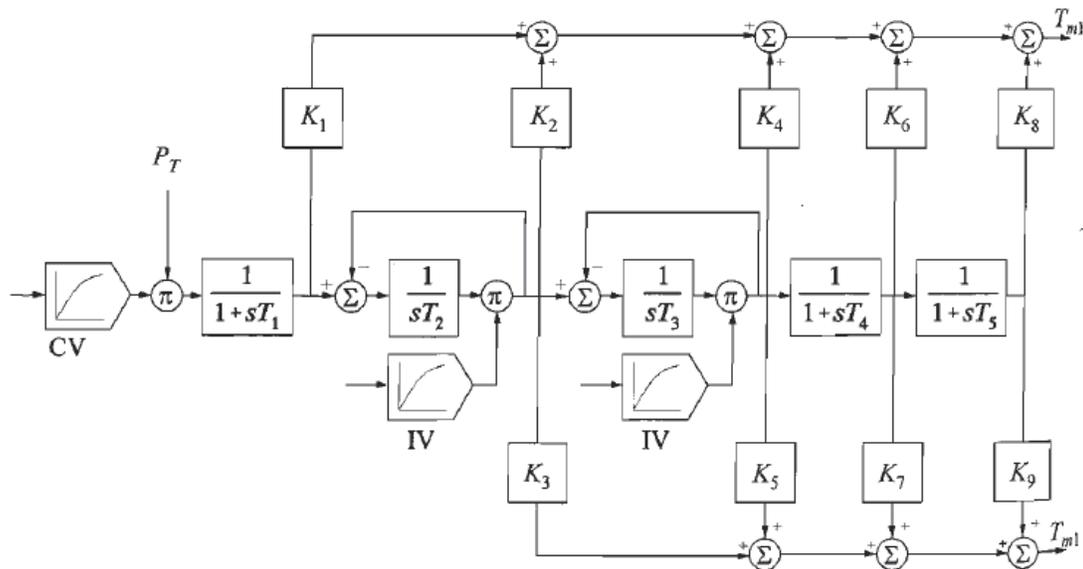


Figura 2.21 Estructura aplicada a las configuraciones más comunes de turbina de vapor, [5].

2.3.2.3. Regulador de velocidad de turbinas de vapor

El sistema de regulación de velocidad de la turbina de vapor tiene tres funciones básicas: control de carga/velocidad normal, control de sobre velocidad y activación de sobre velocidad. Adicionalmente el control de la turbina incluye otras funciones como controles de inicio y apagado y controles de presión auxiliar [5].

La función de control velocidad/carga es un requerimiento fundamental para cualquier unidad generadora. En el caso de turbinas de vapor, se logra a través del control de válvulas. La función de control de velocidad provee al regulador una velocidad de caída de 4 a 5%, lo que permite a la unidad generadora trabajar satisfactoriamente con otras unidades en paralelo con una adecuada división de carga, el control de carga se logra ajustando la referencia velocidad/carga [5].

El requerimiento de control y protección para sobre velocidades son diferentes para este tipo de turbinas, y son de gran importancia para su operación segura. La integridad de una turbina depende de su control sobre los límites de velocidad del rotor, seguida de una correspondiente reducción de la carga eléctrica, la cual es

muy por debajo del valor máximo de diseño de velocidad del 120%. El control de sobre velocidad es la primera línea de defensa contra velocidades excesivas, la cual tiene como función limitar la sobre velocidad que ocurre en rechazo de carga parcial o total y retornar la turbina a una condición de estado estable. El objetivo es prevenir la activación de la protección de sobre velocidad ante un rechazo de carga [5].

Por la característica no lineal de las válvulas de vapor, se usa compensación para linealizar la respuesta de flujo de vapor con respecto a la señal de control.

Usualmente se usan cuatro o más controles de válvulas en paralelo, cada una de estas válvulas admite el vapor a través de una boquilla y las diferentes secciones son distribuidas alrededor de la periferia de la primera etapa. Los controles de válvulas pueden operar de forma simultánea (arco completo) o en secuencia (arco parcial), siendo este último el que asegura un correcto funcionamiento de cada uno de los componentes [5].

2.4. ESTABILIZADOR DE SISTEMAS DE POTENCIA

Un estabilizador de sistemas de potencia tiene como función principal añadir atenuación a las oscilaciones del generador mediante el control de la excitación con el uso de una señal o señales estabilizadoras auxiliares [5].

La señal estabilizadora utilizada es la desviación de velocidad, representada por $\Delta\omega_r$, una señal de tipo lógico que permite controlar la excitación del generador [5].

Usualmente en la práctica el generador y el excitador tienen frecuencias dependientes de las características de fase y ganancia, por la función de transferencia del estabilizador de potencia debe tener circuitos de compensación de fase adecuados, por la fase en atraso de la señal del excitador y el torque eléctrico [5].

La ecuación que representa al estabilizador de sistemas de potencia está dada por [5]:

$$\Delta\psi_{fd} = \frac{K_3 K_A}{1 + sT_3} (-K_6 \Delta\psi_{fd} + \Delta v_s) \quad [2. 45]$$

Donde,

$\Delta\psi_{fd}$ = flujo de campo de PSS.

K_3 y K_A = ganancia del circuito de campo.

T_3 = tiempo de retardo del circuito de campo

ΔV_s = variación de velocidad.

Tabla 2.4. Parámetros para modelo implementado de estabilizador de sistemas de potencia, [5].

Parámetro	Equivalencia
K_3	0.333
K_A	200
T_3	1.91
K_6	0.3

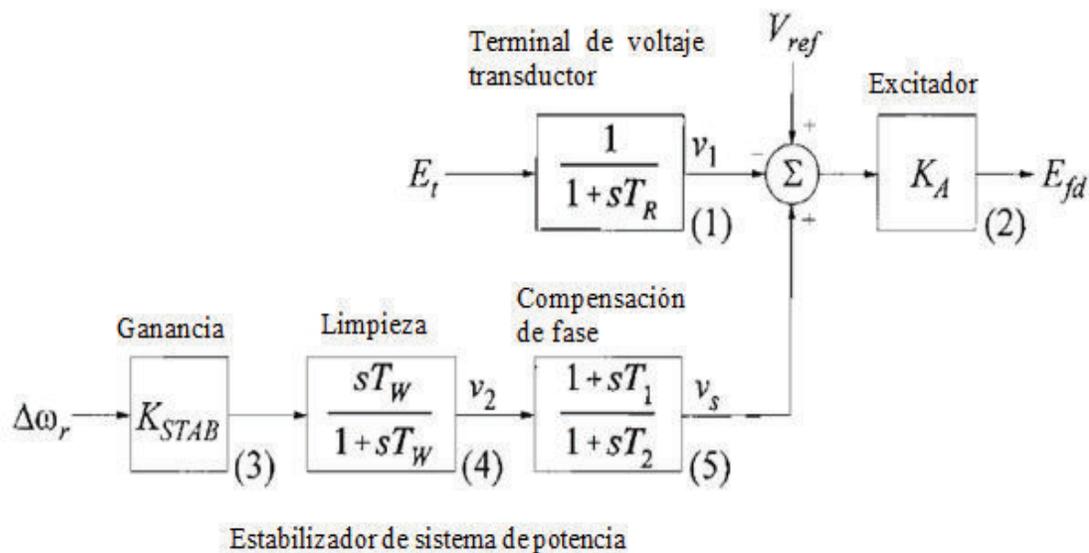


Figura 2.22 Bloques del estabilizador de sistema de potencia, [5].

La figura 2.22 presenta un diagrama general de un el estabilizador de sistemas de potencia. Consiste de tres bloques: un bloque de compensación de fase, un bloque de filtro de señal y un bloque de ganancia [5].

El bloque de compensación provee la fase de adelanto para compensar el retraso de fase entre la entrada del excitador y el torque eléctrico del generador. El rango de frecuencia normalmente esta entre 0.1 y 0.2 Hz, y la fase de adelanto debe proveer compensación en todo este rango [5].

El bloque de filtro de señal sirve como un filtro pasa alto, con una constante de tiempo T_w lo suficientemente alta para permitir que señales asociadas a ω_r (desviación de velocidad) pasen sin cambiar. Este bloque permite que el estabilizador de sistema de potencia responda solamente a cambios en la velocidad [5].

El bloque de ganancia K_{STAB} determina la cantidad de atenuación introducida por el estabilizador. Idealmente debe tener un valor que corresponda al máximo de atenuación pero usualmente está limitado por otras consideraciones [5].

3. MODELACIÓN MATEMÁTICA E IMPLEMENTACIÓN DEL MÓDULO DE SOFTWARE.

En este capítulo se muestra como a través de la teoría de circuitos eléctricos se obtienen las ecuaciones diferenciales representativas de cada elemento del sistema y de esta manera se modela al sistema eléctrico de potencia.

Primero se presenta un sistema eléctrico que contiene los elementos básicos para su funcionamiento, es decir barra de referencia – carga – línea de transmisión – transformador – generador sincrónico. La representación de estos modelos mediante ecuaciones se implementa en diagramas de bloques con la herramienta computacional Simulink – Matlab.

3.1. ESTUDIO TRANSITORIO

Un fenómeno transitorio en cualquier tipo de sistema puede ser causado por el cambio de condiciones operativas o configuración del sistema. Los transitorios en sistemas de potencia se deben a fallas, maniobras, descargas atmosféricas o variación de carga. La importancia del estudio de transitorios se debe a los efectos negativos que pueden tener en el desempeño o las fallas que pueden causar en los sistemas de potencia [22].

Los fenómenos que pueden dañar los sistemas de potencia son sobrevoltajes y sobrecorrientes. Para seleccionar una protección adecuada contra estos dos fenómenos se realizan estudios considerando las peores condiciones y calculando los transitorios probables emplean dos criterios [22]:

- De acuerdo a su origen, las perturbaciones pueden ser externas como descargas atmosféricas, o internas como fallas, maniobras o variación de carga.
- De acuerdo a la naturaleza del fenómeno físico, los transitorios pueden ser electromagnéticos, donde se necesita analizar la interacción entre la energía eléctrica almacenada en capacitores y la energía magnética almacenada en

inductores. O puede ser electromecánicos cuando el análisis involucra la interacción entre la energía eléctrica almacenada en los elementos del circuito y la energía mecánica almacenada en máquinas rotativas.

Para el análisis de estos transitorios se utilizan dos técnicas de estudio, siendo estos el análisis en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia [22]. Empleando la primera en el presente trabajo.

Para la selección adecuada del tipo de modelo a ser aplicado en el análisis de transitorios se deben tomar en cuenta los rangos de frecuencia en las cuales el modelo seleccionado sea aplicable evitando así posibles resultados erróneos [22].

Ya que las ondas de voltaje y corriente se propagan a lo largo del sistema de potencia con una velocidad finita, generalmente es necesario para el análisis de transitorios electromagnéticos que los modelos sean representados con parámetros distribuidos. Solo cuando las dimensiones físicas de los componentes que se ven afectados por un transitorio son pequeñas comparadas con la longitud de onda de las frecuencias principales, la representación de parámetros concentrados puede ser aplicada.

Para desarrollar los modelos matemáticos de los elementos del sistema estudiado en el presente trabajo se toma los parámetros eléctricos, mecánicos del elemento rotativo y además se simplifica a modelos monofásicos cada uno de ellos. La técnica de estudio empleada es de la Transformada de Laplace, la cual tiene como limitante que se emplea para circuitos lineales.

Con estas consideraciones el modelo matemático que se desarrolla puede ser empleado para transitorios de bajos niveles de frecuencia.

3.2. MODELO MATEMÁTICO

El modelamiento matemático de los diferentes elementos del sistema permite estudiar el comportamiento de las principales variables eléctricas en estado estable y ante transitorios, facilitando de esta manera la realización de estudios de funcionamiento.

En la figura 3.1 se presenta el diagrama unifilar del sistema de potencia implementado el cual se modelará en la herramienta computacional.

Además se muestran las variables de corriente y voltaje que constituyen entradas y salidas para cada uno de los bloques en la herramienta computacional.

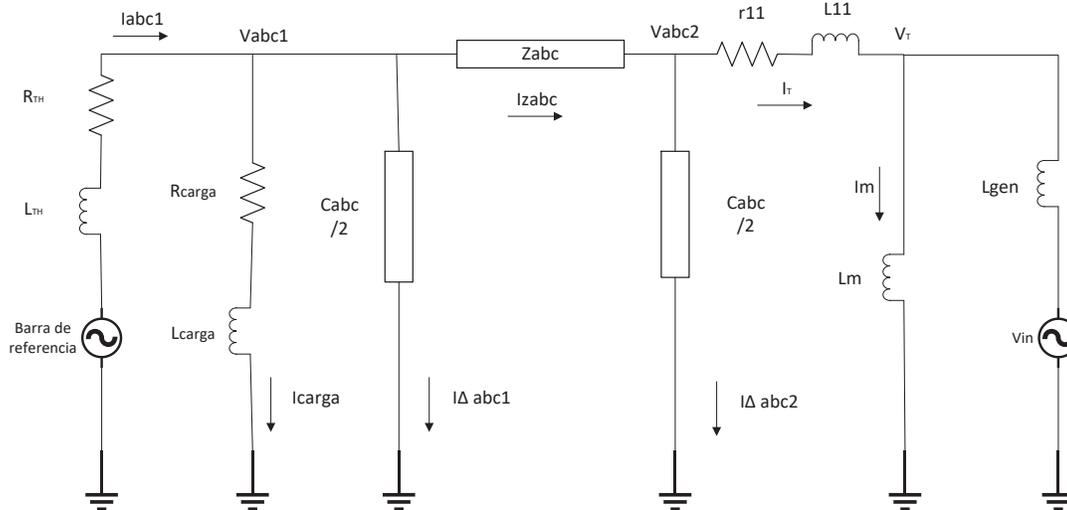


Figura 3.1 Diagrama unifilar del sistema eléctrico de potencia

Como se puede observar en la figura 3.1 la barra de referencia se modela a través de un equivalente Thevenin, apreciándose que a la línea de transmisión ingresa la diferencia de corriente, entre la que sale del generador y la que ingresa en la carga.

La carga se encuentra simulada por una resistencia y una inductancia en serie, por la cual circula la corriente I_{carga} .

La línea de transmisión se representa a través de un modelo Pi de parámetros concentrados, el cual consta de una impedancia inductiva en la conducción y capacitancias en los ramales.

El transformador tiene como entrada a sus terminales el voltaje V_{abc2} , entregado por la línea de transmisión y para su representación se utiliza un modelo tipo L entregando al generador el voltaje V_T .

3.3. MODELAMIENTO MATEMÁTICO DEL SISTEMA A SER SIMULADO

Como se muestra en la figura 3.1 el sistema va a constar de los siguientes elementos:

- Fuente de voltaje
- Línea de transmisión y equivalente Thevenin
- Carga RL
- Transformador
- Generador eléctrico

Para los elementos pasivos se utilizan las ecuaciones de voltaje que se encuentra en una inductancia y de la corriente de un elemento capacitivo:

$$L * \frac{di}{dt} = V$$

[3. 1]

$$C * \frac{dV}{dt} = I$$

3.3.1. FUENTE DE VOLTAJE

Para la parametrización de la fuente de voltaje se consideran tres voltajes sinusoidales con valor de pico de uno por unidad, con una frecuencia de 60 Hz que se encuentran desplazados 120° entre sí, tomando como referencia la fase A. Adicionalmente se utilizan otros tres voltajes referenciales adicionales con la misma magnitud y fase, los cuales brindan las condiciones iniciales de la línea de transmisión, transformador y generador, dando a este último la posibilidad de trabajar en vacío de ser requerido.

Como se muestra en la figura 3.2, en el modelo implementado, la onda de voltaje se encuentra representada con la función trigonométrica coseno. Además se tiene un multiplicador que elimina el voltaje referencial al producirse la sincronización del sistema.

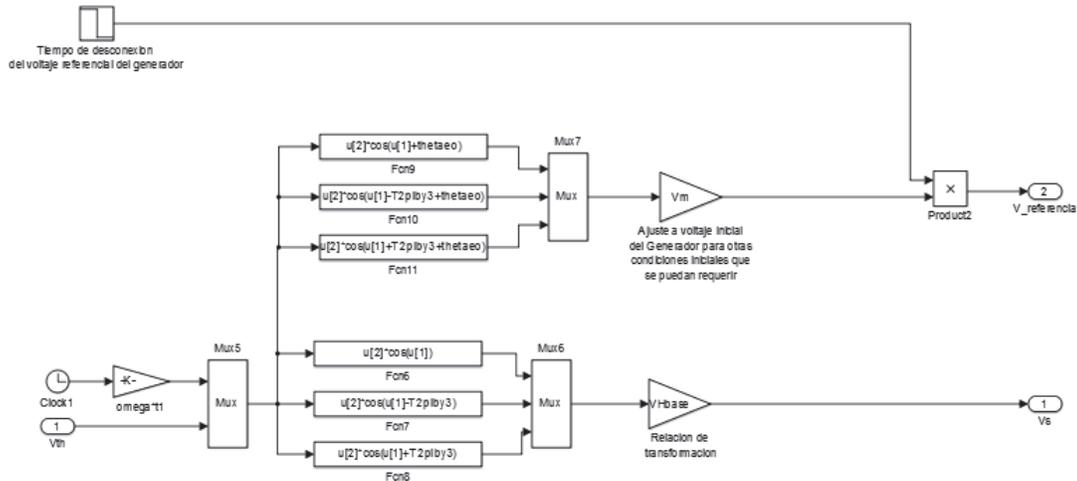


Figura 3.2 Modelo ideal de generación de voltaje

3.3.2. LÍNEA DE TRANSMISIÓN Y EQUIVALENTE THEVENIN

Al tomar como referencia las ecuaciones 3.1, se puede determinar la corriente I_{abc1} , entregada por el equivalente Thevenin, mediante las siguientes ecuaciones:

$$L_{TH} \frac{dI_{abc1}}{dt} = V_s - R_{TH} * i_{abc1} - I_{carga} * Z_{carga}$$

$$I_{carga} * Z_{carga} = V_{carga} = V_{1abc}$$

$$\frac{dI_{abc1}}{dt} = \frac{1}{L_{TH}} [V_s - R_{TH} * I_{abc1} - V_{carga}] \quad [3. 2]$$

En la figura 3.3 se muestra la implementación del modelo matemático previamente indicado, considerando que al ser el mismo punto el voltaje V_{1abc} es igual al voltaje V_{carga} .

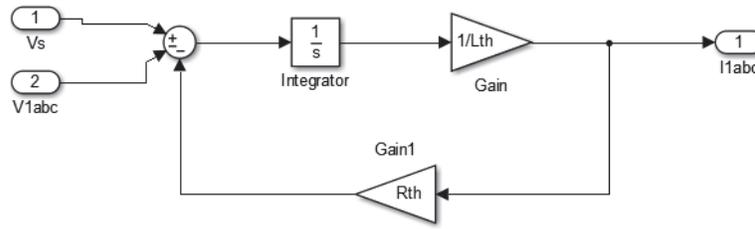


Figura 3.3 Modelo de la corriente del Equivalente Thevenin

Del equivalente Thevenin se tiene como entrada voltaje del sistema, V_s , y como salida el voltaje, V_{1abc} , como se muestra en la figura 3.4.

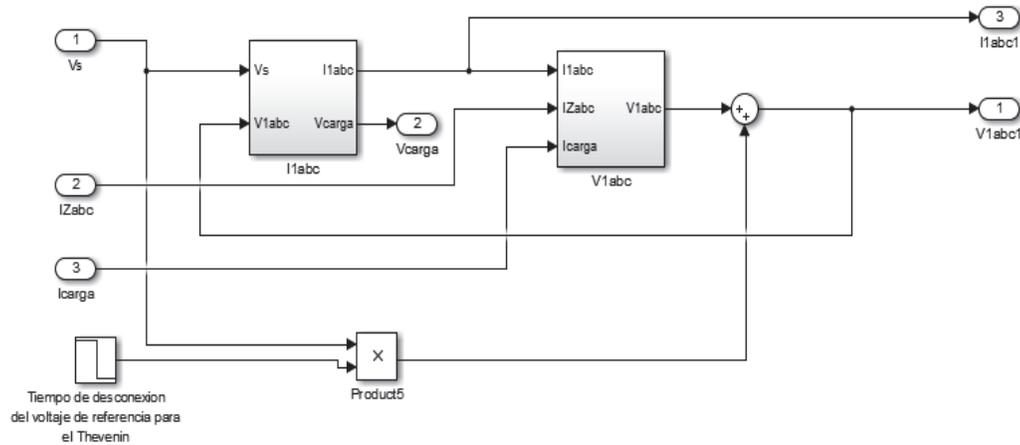


Figura 3.4 Implementación de equivalente Thevenin

Para determinar la corriente circulante a través de la línea de transmisión, I_{zabc} , considerando que el voltaje de entrada V_{abc1} , ya ha sido determinado se aplica las siguientes ecuaciones.

$$L_{abc} * \frac{dI_{zabc}}{dt} = V_{TOTAL}$$

$$L_{abc} * \frac{dI_{zabc}}{dt} = [V_{abc1} - R_{abc} * I_{zabc} - V_{abc2}]$$

$$\frac{dI_{zabc}}{dt} = \frac{1}{L_{abc}} * [V_{abc1} - R_{abc} * I_{zabc} - V_{abc2}] \quad [3. 3]$$

En la figura 3.5 se muestra la implementación en diagrama de bloques de la ecuación 3.3, considerando que el modelo de la línea de transmisión, es el de una línea transpuesta para el balance de fases.

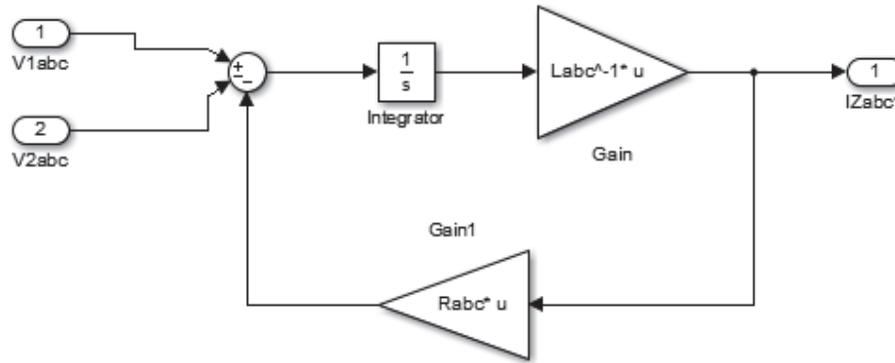


Figura 3.5 Corriente de línea de transmisión

Para los voltajes en los ramales capacitivos de la línea de transmisión V_{abc1} y V_{abc2} , se plantean las siguientes ecuaciones:

Para V_{abc1} :

$$\frac{C_{abc}}{2} * \frac{dV_{abc1}}{dt} = I_{\Delta abc}$$

$$I_{\Delta abc} = I_{abc1} - I_{zabc} - I_{carga}$$

$$\frac{C_{abc}}{2} * \frac{dV_{abc1}}{dt} = I_{abc1} - I_{zabc} - I_{carga}$$

$$\frac{dV_{abc1}}{dt} = \frac{1}{\frac{C_{abc}}{2}} [I_{abc1} - I_{zabc} - I_{carga}]$$

$$\frac{dV_{abc1}}{dt} = \frac{2}{C_{abc}} [I_{abc1} - I_{zabc} - I_{carga}] \quad [3. 4]$$

En la figura 3.6 se muestra a la ecuación 3.4 implementada en su correspondiente diagrama de bloques.

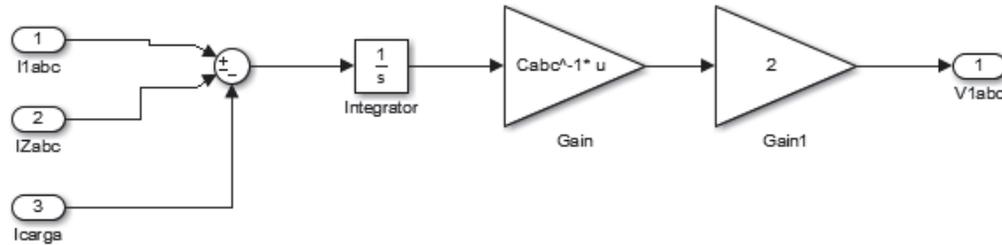


Figura 3.6 Voltaje de la rama capacitiva, V1abc.

Para Vabc2:

$$\frac{C_{abc}}{2} * \frac{dV_{abc2}}{dt} = I_{zabc} - I_{abc2}$$

$$\frac{dV_{abc2}}{dt} = \frac{1}{\frac{C_{abc}}{2}} [I_{zabc} - I_{abc2}]$$

$$\frac{dV_{abc2}}{dt} = \frac{2}{C_{abc}} [I_{zabc} - I_{abc2}] \quad [3. 5]$$

En la figura 3.7 se muestra la implementación en diagrama de bloques para la ecuación 3.5.

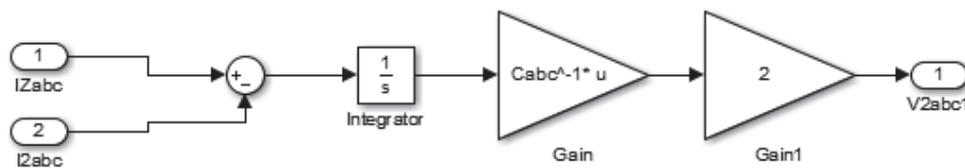


Figura 3.7 Voltaje de la rama capacitiva, V2abc.

En la figura 3.8 se muestra la implementación completa del modelo de la línea de transmisión como se tienen estipulado en la figura 3.1 con los voltajes V_{abc1} como entrada y los voltajes V_{abc2} como salida.

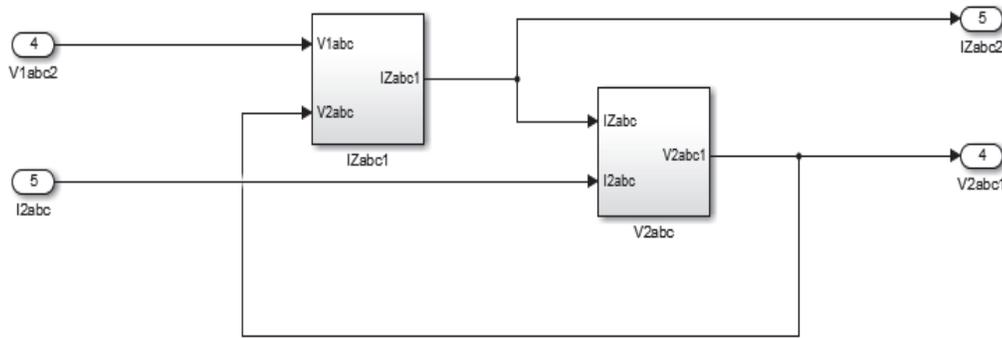


Figura 3.8 Línea de transmisión

3.3.3. CARGA

Tomando en cuenta que la impedancia de carga consta de dos parámetros, la resistencia y la inductancia, el desarrollo matemático se lo realiza de la siguiente manera:

$$L_{carga} * \frac{dI_{carga}}{dt} = V_{abc1} - R_{carga} * I_{carga}$$

$$\frac{dI_{carga}}{dt} = \frac{1}{L_{carga}} [V_{abc1} - R_{carga} * I_{carga}] \quad [3.6]$$

En la figura 3.9 se muestra la implementación en diagrama de bloques de las ecuaciones previamente indicadas.

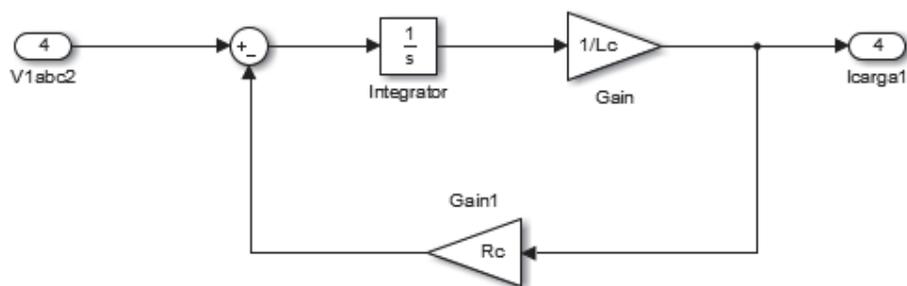


Figura 3.9 Carga RL

3.3.4. TRANSFORMADOR

Para el transformador se considera un circuito equivalente reducido representado por una impedancia serie y un ramal magnetizante a tierra. Por facilidad se supone que la relación de transformación es unitaria.

El voltaje V_t , en terminal del generador sincrónico, y la corriente que circula por el ramal de magnetización, I_t . Se pueden obtener las siguientes expresiones:

$$L_{11} * \frac{dI_t}{dt} = V_{abc2} - r_{11} * I_t - V_t$$

$$\frac{dI_t}{dt} = \frac{1}{L_{11}} [V_{abc2} - r_{11} * I_t - V_t] \quad [3. 7]$$

Y al determinar la caída de voltaje en la resistencia e inductancia del transformador se obtiene el voltaje a los terminales del generador, V_T .

$$V_{abc2} = V_{11} + V_T$$

$$V_{abc2} = I_T r_{11} + L_{11} * \frac{dI_t}{dt} + V_T$$

$$V_T = V_{abc2} - \left[I_T r_{11} + L_{11} * \frac{dI_t}{dt} \right] \quad [3. 8]$$

En la figura 3.10 se observa el diagrama de bloques implementado para el transformador, donde además se asigna la relación de transformación con la constante K.

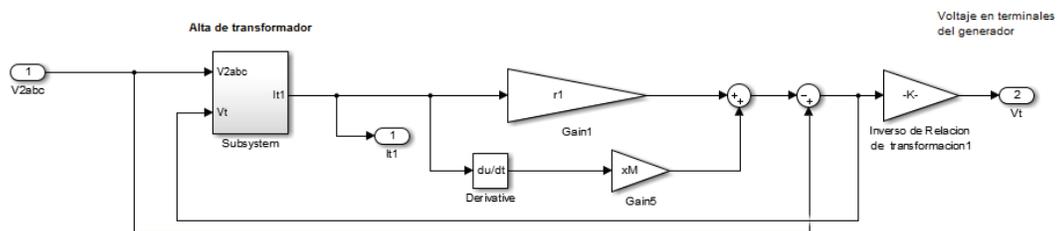


Figura 3.10 Modelo del transformador

En la figura 3.11 se implementa la ecuación 3.7 en la cual se determina la corriente magnetizante del transformador, afecta al sistema en la integración de todos los elementos.

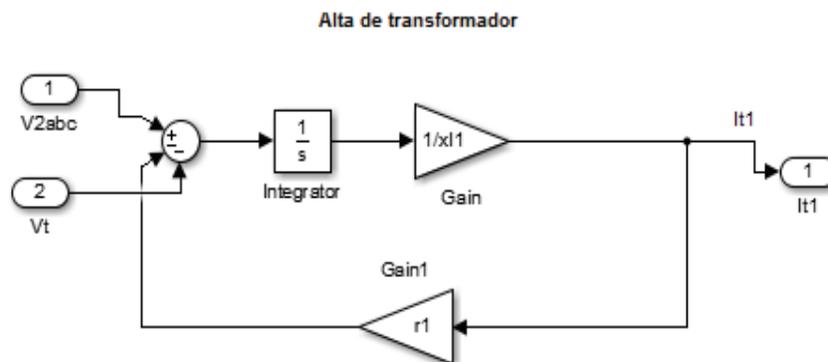


Figura 3.11 Cálculo de corriente del transformador

3.3.5. GENERADOR SINCRÓNICO

El modelo de la máquina síncrona se basa en el modelo presentado por ONG (1998) el cual tiene como entrada el voltaje V_t , es decir el voltaje en los terminales de baja del transformador y como salida las corrientes y potencias a entregar al sistema.

Para mayor facilidad el modelo matemático se divide en cinco bloques, donde se agrupan las diversas ecuaciones que constituyen el modelo del generador síncrono. Pero primeramente se debe realizar el cálculo de las inductancias y constantes de tiempo transitorio y subtransitorio.

3.3.5.1. Inductancias y constantes de tiempo transitorias y subtransitorias

Generalmente la reactancia de acoplamiento de la armadura se encuentra como parámetro preestablecido por los fabricantes. Caso contrario se puede utilizar el valor de la reactancia de secuencia cero, donde se tiene que $x_{ls} \approx x_0$. Tras obtener el valor de las reactancias de acoplamiento directo y de cuadratura de las reactancias síncronas magnetizantes de los ejes d y q se tiene que [4]:

$$x_{md} = x_q - x_{ls}$$

$$x_{md} = x_d - x_{ls}$$

Tabla 3.1 Terminología del generador síncrono

Parámetro	Terminología
x'_{lf}	Reactancia transitoria de dispersión de campo del eje d.
r'_f	Resistencia transitoria de devanado de campo del eje d.
x_{md}	Reactancia de magnetización del eje d
x_{mq}	Reactancia de magnetización del eje q
r'_{kd}	Resistencia transitoria del devanado de amortiguamiento del eje d.

r'_{kq}	Resistencia transitoria del devanado de amortiguamiento del eje q.
x'_{lkd}	Reactancia transitoria de dispersión del devanado de amortiguamiento del eje d.
x'_{lkq}	Reactancia transitoria de dispersión del devanado de amortiguamiento del eje q.
x'_d	Reactancia transitoria del eje d
x'_q	Reactancia transitoria del eje q
x_{ls}	Reactancia de dispersión del devanado del estator.
T'_{d0}	Constante de tiempo transitoria de circuito abierto del eje d.
T'_{q0}	Constante de tiempo transitoria de circuito abierto del eje q.
T''_{d0}	Constante de tiempo subtransitoria de circuito abierto del eje d.
T''_{q0}	Constante de tiempo subtransitoria de circuito abierto del eje q.

Donde al tomar la definición de la inductancia del eje d de [4] se tiene que:

$$x'_d = x_{ls} + \frac{x_{md} x'_{lf}}{x_{md} + x'_{lf}}$$

Y al considerar que $x_{md} \gg x'_{lf}$ [4]:

$$x'_{lf} = x'_d - x_{ls}$$

De igual manera la reactancia subsincrónica de acoplamiento del eje d es tomada de la definición planteada en [4] y se obtiene:

$$x''_d = x_{ls} + \frac{x_{md} x'_{lf} x'_{ld}}{x_{md} x'_{lf} + x_{md} x'_{lfd} + x'_{lf} x'_{lkd}}$$

Donde se considera igualmente $x_{md} \gg x'_{lf}$ [4]:

$$x''_d \approx \frac{(x''_d - x_{ls})x'_{lf}}{x'_{lf} - (x''_d - x_{ls})}$$

Para el devanado de la reactancia de acoplamiento tomado de [4] se tiene que:

$$x''_q = x_{ls} + \frac{x_{mq} x'_{lkq}}{x_{mq} + x'_{lkq}}$$

Se determina [4]:

$$x'_{lf} = x'_d - x_{ls}$$

Las resistencias de los devanados del rotor son determinadas a través de las constantes de tiempo deducidas en [4]. La resistencia de campo del eje d puede ser determinada a través de las constantes de tiempo a circuito abierto.

$$T'_{d0} = \frac{1}{w_b r'_f} (x'_{lf} - x_{md})$$

Al despejar r'_f se tiene:

$$r'_f = \frac{1}{w_b T'_{d0}} (x'_{lf} - x_{md})$$

Así mismo a través de T''_{d0} se puede obtener [4]:

$$T''_{d0} = \frac{1}{w_b r'_{kd}} \left(x'_{lkd} + \frac{x_{md} x'_{lf}}{x_{md} + x'_{lf}} \right)$$

Y con las ecuaciones de las reactancias de acoplamiento se determina [4]:

$$r'_{kd} = \frac{1}{w_b T''_{d0}} (x'_{lkd} + x'_d - x_{ls})$$

Mientras que para el eje q se tiene [4]:

$$T''_{q0} = \frac{1}{w_b r'_{kq}} (x'_{lkq} + x_{md})$$

Al despejar r'_{kq} se tiene:

$$r'_{kq} = \frac{1}{w_b T''_{q0}} (x'_{lkq} + x_{md})$$

3.3.5.2. Bloque de conversión de parámetros abc a qd0

Los voltajes de fase abc del devanado de estator deben ser transformados a la referencia qdo del rotor, considerando que el ángulo $\theta_r(t)$ incrementa con el tiempo y $\cos \theta_r(t)$ y $\sin \theta_r(t)$ son dependientes del mismo.

Para realizar esta transformación se estipulan dos pasos. El primero es colocar los voltajes del estator en una referencia estacionaria de qdo:

$$\begin{aligned} v_q^s &= \frac{2}{3}v_a - \frac{1}{3}v_b - \frac{1}{3}v_c \\ v_d^s &= \frac{1}{\sqrt{3}}(v_c - v_b) \\ v_0 &= \frac{1}{\sqrt{3}}(v_a + v_b + v_c) \end{aligned} \quad [3.9]$$

Y tomando como referencia la ecuación 2.38, se transforma las variables representadas en la ecuación 3.9 hacia el sistema de referencia qdo del rotor.

$$\begin{aligned} v_q &= v_q^s \cos \theta_r(t) - v_d^s \sin \theta_r(t) \\ v_d &= v_q^s \sin \theta_r(t) + v_d^s \cos \theta_r(t) \end{aligned} \quad [3.10]$$

Donde el ángulo $\theta_r(t)$ se obtiene de:

$$\theta_r(t) = \int_0^t \omega_r(t) dt + \theta_r(0) \quad [3.11]$$

En la figura 3.12 se muestra la implementación de la transformación en los dos pasos mencionados anteriormente.

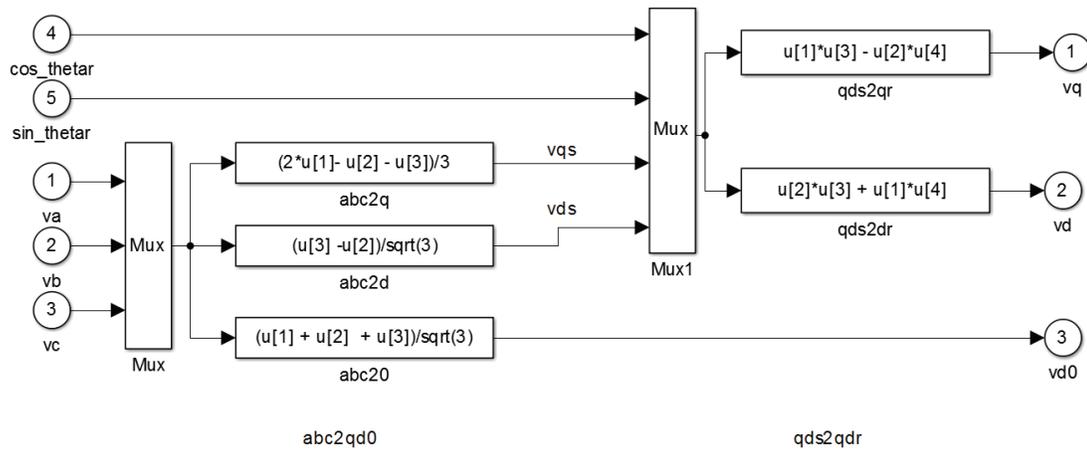


Figura 3.12 Cambio de referencia de abc a qd0, [4].

3.3.5.3. Bloque de devanados

En este bloque se agrupan las variables determinadas por los devanados del eje d, eje q y del rotor, tomando en cuenta que se desarrolla una máquina de un solo devanado de campo y dos devanados amortiguadores.

En la figura 3.13 se muestra el diagrama de bloques en el que se representan las relaciones matemáticas entre los flujos concatenados y las corrientes para cada eje. Se aprecia que las entradas de este bloque son los voltajes v_d y v_q obtenidos en la sección 3.2.5.1 y las salidas son las corrientes del generador, la velocidad w_r , y el torque eléctrico.

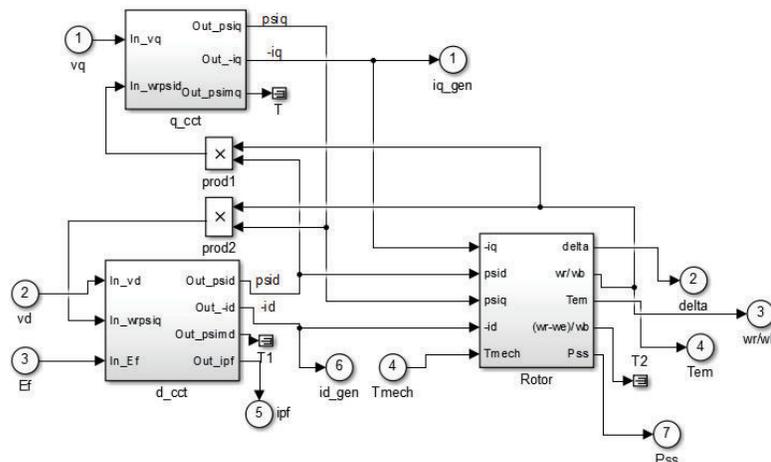


Figura 3.13 Variables en referencia q, d y rotor, [4].

3.3.5.3.1. Relaciones matemáticas, q_cct

En este bloque se incorporan las ecuaciones de flujo concatenado de las variables de estado en el sistema de referencia $qd0$ del rotor en términos ecuaciones integrales con las constantes de tiempo de la transformación:

$$r'_{kq} = \frac{x'_{lf} + x_{md}}{w_{base} \times T'_{d0}} \quad [3. 12]$$

$$\psi'_{kq} = \frac{\omega_b r'_{kq}}{x'_{lkq}} \int \{\psi_{mq} - \psi'_{kq}\} dt$$

$$\psi_q = \omega_b \int \left\{ v_q - \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_q + \frac{r_s}{x_{ls}} (\psi_{mq} - \psi_q) \right\} dt \quad [3. 13]$$

Se expresa el flujo mutuo concatenado en términos de flujos concatenados de los devanados para el eje q .

$$\psi_{mq} = x_{MQ} \left(\frac{\psi_q}{x_{ls}} + \frac{\psi'_{kq}}{x'_{lkq}} \right) \quad [3. 14]$$

El término de x_{MQ} es la suma en paralelo de las impedancias del eje q :

$$\frac{1}{x_{MQ}} = \frac{1}{x_{mq}} + \frac{1}{x'_{lkq}} + \frac{1}{x_{ls}} \quad [3. 15]$$

La diferencia de concatenación de flujos sobre la impedancia x_{ls} determina la componente de corriente del estator para el eje q :

$$i_q = - \frac{\psi_q - \psi_{mq}}{x_{ls}} \quad [3. 16]$$

En la figura 3.14 se muestra el diagrama de bloques detallado para el eje q donde se incluye el devanado de amortiguamiento. Las entradas son el voltaje del eje q y el flujo del eje d , dando como resultado la corriente i_q , y el flujo concatenado.

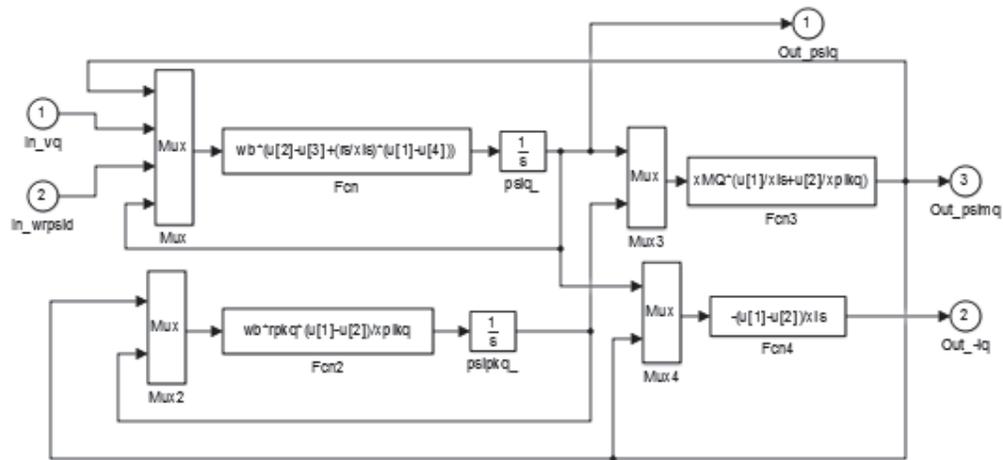


Figura 3.14 Bloque de implementación para el eje q, [4].

3.3.5.3.2. Relaciones matemáticas, d_cct

Al igual que para las ecuaciones 3.12 y 3.13 se parte de los valores de voltaje en términos qd_0 para determinar los flujos concatenados del eje directo:

$$\psi_d = \omega_b \int \left\{ v_q + \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_q + \frac{r_s}{x_{ls}} (\psi_{md} - \psi_d) \right\} dt \quad [3.17]$$

$$\psi'_{kd} = \frac{\omega_b r'_{kd}}{x'_{lkd}} \int \{ \psi_{md} - \psi'_{kd} \} dt \quad [3.18]$$

$$\psi'_f = \frac{\omega_b r'_f}{x_{md}} \int \left\{ E_f + \frac{x_{md}}{x'_{lf}} (\psi_{md} - \psi'_f) \right\} dt \quad [3.19]$$

Donde al igual que la ecuación 3.14 se expresa el flujo mutuo concatenado en términos de los flujos concatenados de los devanados del eje d,

$$\psi_{md} = x_{MD} \left(\frac{\psi_d}{x_{ls}} + \frac{\psi'_{kd}}{x'_{lkd}} + \frac{\psi'_f}{x'_{lf}} \right) \quad [3.20]$$

El término de x_{MQ} es la suma en paralelo de las impedancias del eje d:

$$\frac{1}{x_{MD}} = \frac{1}{x_{md}} + \frac{1}{x'_{lkd}} + \frac{1}{x'_{lf}} + \frac{1}{x_{ls}} \quad [3. 21]$$

La diferencia de concatenación de flujos sobre las impedancias de dispersión determina la componente de corriente del estator para el eje d y la corriente del devanado de campo i'_f :

$$i_d = -\frac{\psi_d - \psi_{md}}{x_{ls}} \quad [3. 22]$$

$$i'_f = \frac{\psi'_f - \psi_{md}}{x'_{lf}} \quad [3. 23]$$

En la figura 3.15 se muestra el diagrama de bloques detallado para el eje d en el que se considera como salidas las corrientes y flujos de este eje.

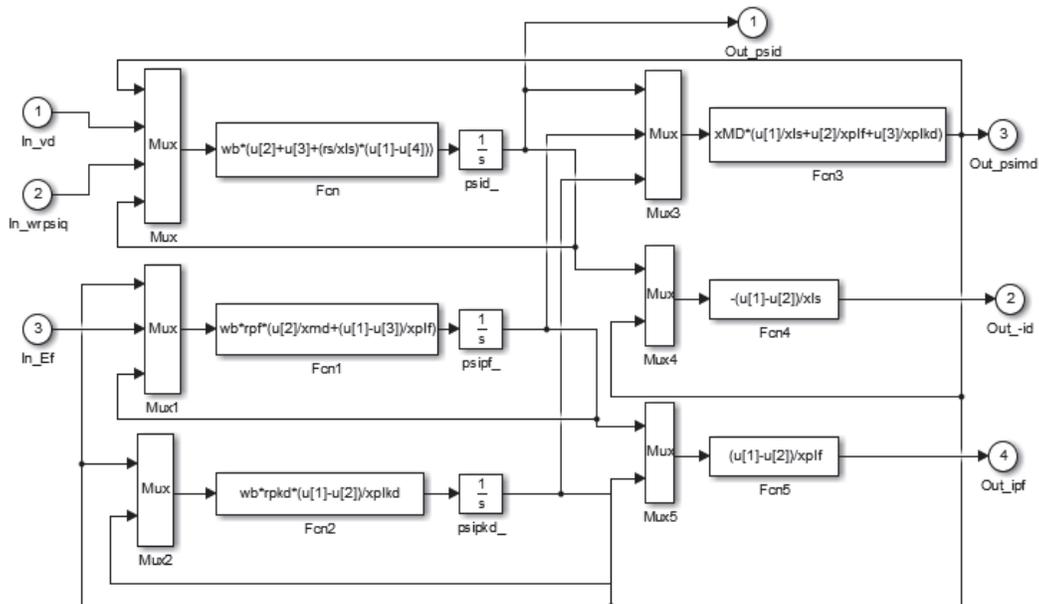


Figura 3.15 Bloque de implementación para el eje d, [4].

3.3.5.3.3. Relaciones matemáticas del movimiento, rotor.

Para realizar este modelamiento matemático se parte de la ecuación de movimiento de la máquina que se expresa como:

$$T_{em} + T_{mech} - T_{damp} = \frac{2J}{P} \frac{d\omega_{rm}(t)}{dt}$$

El ángulo de máquina, δ , variante en el tiempo, viene dado por:

$$\delta(t) = \int_0^t \{\omega_r(t) - \omega_e\} dt$$

Si la velocidad angular ω_e es constante se establece:

$$\frac{d\{\omega_r(t) - \omega_e\}}{dt} = \frac{d\omega_r(t)}{dt}$$

Determinándose la velocidad de deslizamiento, está dada por:

$$\omega_r(t) - \omega_e = \frac{P}{2J} \int_0^t \{T_{em} + T_{mech} - T_{damp}\} dt$$

En [4] se establece que el torque electromagnético de la máquina se representa como:

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_b} (\psi_d i_d - \psi_q i_q)$$

Expresión que dividida para el torque base T_b permite obtener su valor en p.u.

$$T_{em}(p.u.) = \frac{\frac{3}{2} \frac{P}{\omega_b} (\psi_d i_d - \psi_q i_q)}{\frac{3}{2} \left(\frac{V_b I_b}{P \omega_b} \right)}$$

Simplificando se obtiene:

$$T_{em}[pu] = (\psi_d i_d - \psi_q i_q) \quad [3. 24]$$

La velocidad de deslizamiento en p.u. es:

$$\frac{\omega_r(t) - \omega_e}{\omega_b} = \frac{1}{2H} \int \{T_{em} + T_{mech} - T_{damp}\} dt \quad [3. 25]$$

Donde la constante de inercia H, se define como:

$$H = \frac{1}{2} J \frac{\omega_{bm}^2}{S_b} \quad [3. 26]$$

En la figura 3.16 se presenta el diagrama de bloques correspondiente a las ecuaciones de movimiento del rotor.

De este modelo se obtiene la relación w_r/w_b y el ángulo de la máquina δ .

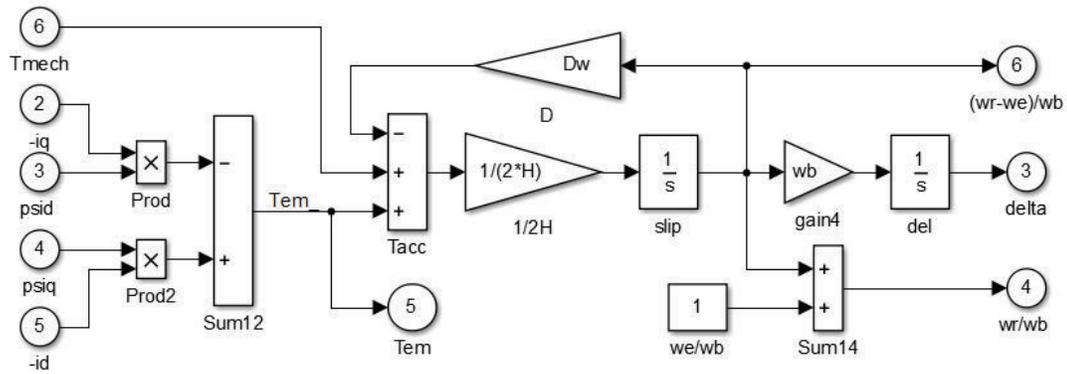


Figura 3.16 Bloque de implementación para el rotor, [4].

3.3.5.4. Bloque de oscilación

Las salidas de bloque se utilizan en las transformaciones abc a qdo y viceversa, para lo cual se utiliza las entidades trigonométricas $\sin \theta$ y $\cos \theta$ tomando como base la frecuencia nominal del sistema.

$$\cos \theta_r(t) = -\omega_b \int \left\{ \frac{\omega_r}{\omega_b} \sin \theta_r(t) \right\} \quad [3.27]$$

$$\sin \theta_r(t) = \omega_b \int \left\{ \frac{\omega_r}{\omega_b} \cos \theta_r(t) \right\} \quad [3.28]$$

En la figura 3.17 se presenta el diagrama de bloques que implementa las ecuaciones de oscilación.

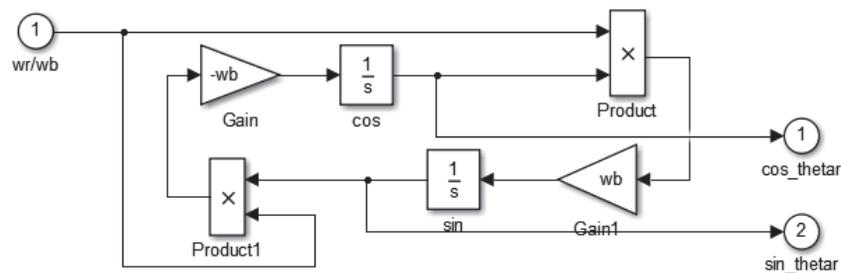


Figura 3.17 Oscilación del sistema, [4]

3.3.5.5. Bloque qd0 a abc

Para que las variables obtenidas del modelo del generador se puedan emplear en el sistema, es necesario que se realice la conversión de parámetros qdo a abc. Lo cual se desarrolla en base a la ecuación 2.39.

$$\begin{aligned} i_q^s &= i_q \cos \theta_r(t) + i_d \sin \theta_r(t) \\ i_d^s &= -i_q \sin \theta_r(t) + i_d \cos \theta_r(t) \end{aligned} \quad [3.29]$$

$$\begin{aligned} i_a &= i_q^s + i_0 - \frac{1}{3}v_b - \frac{1}{3}v_c \\ i_b &= -\frac{1}{2}i_q^s - \frac{1}{\sqrt{3}}i_d^s + i_0 \\ i_c &= -\frac{1}{2}i_q^s + \frac{1}{\sqrt{3}}i_d^s + i_0 \end{aligned} \quad [3.30]$$

Esta transformación se establece en dos pasos, el primero hacia el sistema de referencia qdo estacionario y finalmente la conversión hacia el sistema abc de estator como se muestra en la figura 3.18.

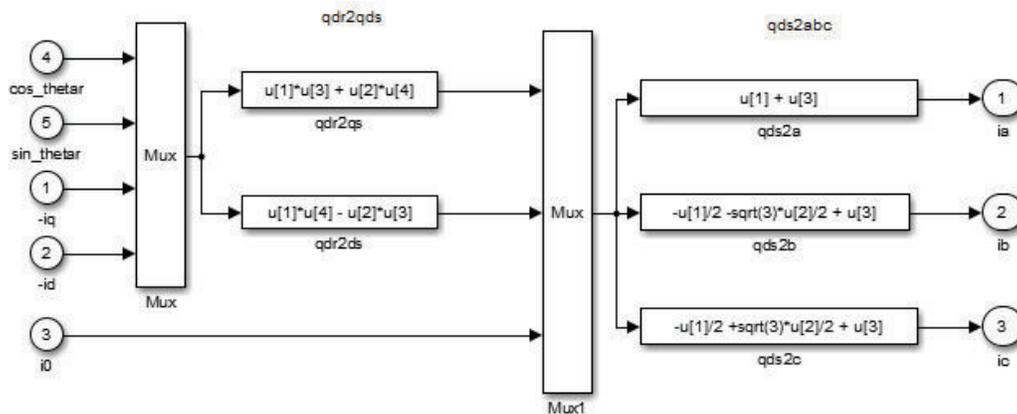


Figura 3.18 Cambio de referencia de qd0 a abc, [4]

3.3.5.6. Bloque de variables instantáneas del estator (*VIPQ*)

En este bloque se calculan las variables de voltaje, corriente, potencia activa y potencia reactiva del generador.

Se determinan los módulos del voltaje y la corriente como:

$$V_t = \sqrt{V_q^2 + V_d^2}$$

$$I_t = \sqrt{I_q^2 + I_d^2} \quad [3.31]$$

$$P_t = V_q * I_q + V_d * I_d$$

$$Q_t = V_q * I_d - V_d * I_q$$

En la figura 3.19 se muestra el diagrama de bloques que implementa las ecuaciones previamente señaladas.

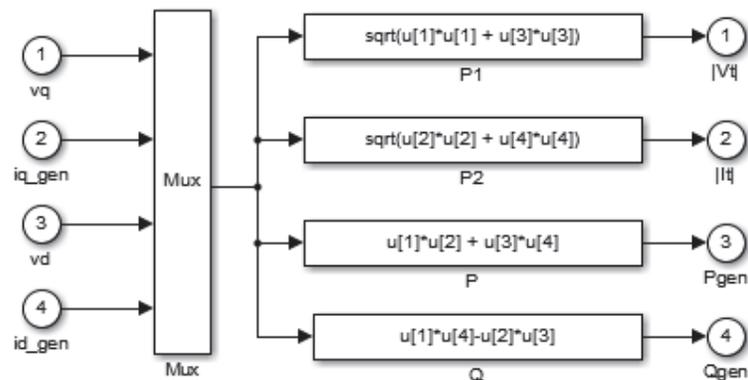


Figura 3.19 Variables del estator VIPQ, [4].

Tras haber desarrollado cada uno de los bloques en los que se dividió el modelamiento de la máquina síncrona, se los puede integrar tomando en cuenta las entradas y salidas que las interrelacionan. Se debe considerar las entradas

adiciones mostradas en la sección 3.2.5.2 que son el voltaje de excitación, E_{ex} y torque mecánico T_{mech} aplicado al eje del rotor de manera externa.

En la figura 3.20 se muestra el modelo integrado del generador, como se puede apreciar se obtiene todas las variables de salida a ser graficadas para el generador sincrónico y así como las variables que permitirán el acoplamiento con el resto del sistema.

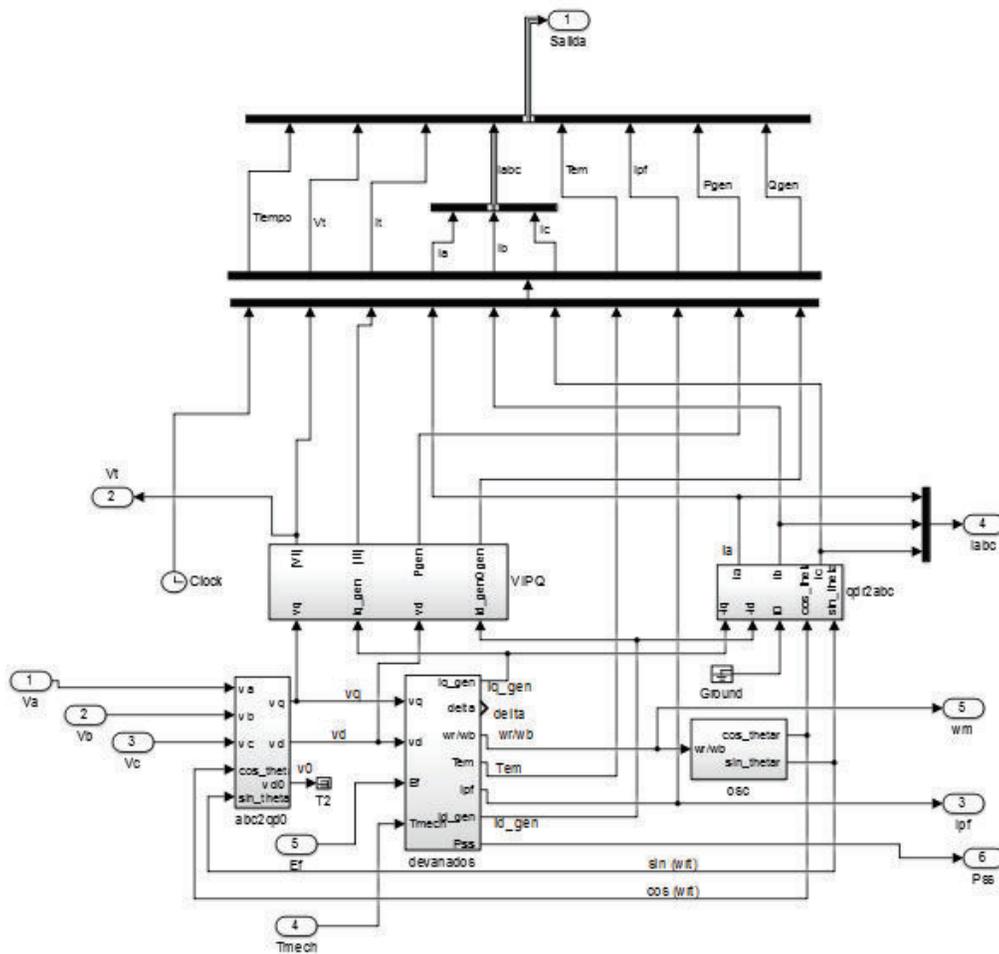


Figura 3.20 Modelo Generador Sincrónico [4].

3.3.6. SISTEMAS DE CONTROL

Los sistemas de control actúan sobre las variables del generador sincrónico tanto para reguladores de voltaje como para reguladores de velocidad.

Para que el sistema tenga un correcto funcionamiento, se ha colocado unas estampas de tiempo de su funcionamiento, es decir actúan en el momento de la ocurrencia de la falla.

Se debe tomar en cuenta que se tienen dos sistemas diferentes uno para generadores hidráulicos y otro para térmicos debido a que el modelamiento varía en función del tipo de turbina utilizado.

3.3.6.1. Reguladores de Voltaje

Los reguladores de voltaje son tomados de [8], es decir son modelos IEEE de los ejemplos del software MATLAB. Al ser modelos previamente desarrollados se presentan sus diagramas, apreciándose que las variables de ingreso son los voltajes en terminales del generador sincrónico y las salidas son voltajes y corriente de campo.

3.3.6.1.1. DC1A

El modelo presentado en la figura 3.21 representa excitatrices de conmutador controlados por campo, con reguladores de voltaje actuando continuamente. El excitador puede ser activado por separado o auto activado, siendo el ultimo tipo el más común [8].

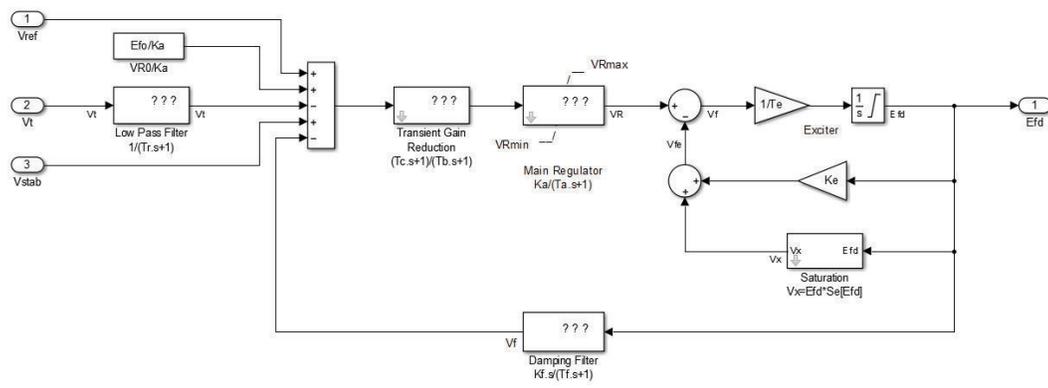


Figura 3.21 AVR – DC1A [8]

3.3.6.1.2. AC1A

El modelo de la figura 3.21 representa un sistema de excitación con alternador controlado por campo y se aplica a excitación de sistemas sin escobillas. La característica del rectificador impone un límite inferior a cero en el voltaje de salida del excitador y su campo de excitación es suministrado por una excitatriz piloto. De esta forma la fuente de suministro del regulador de voltaje no es afectada por transitorios externos [8].

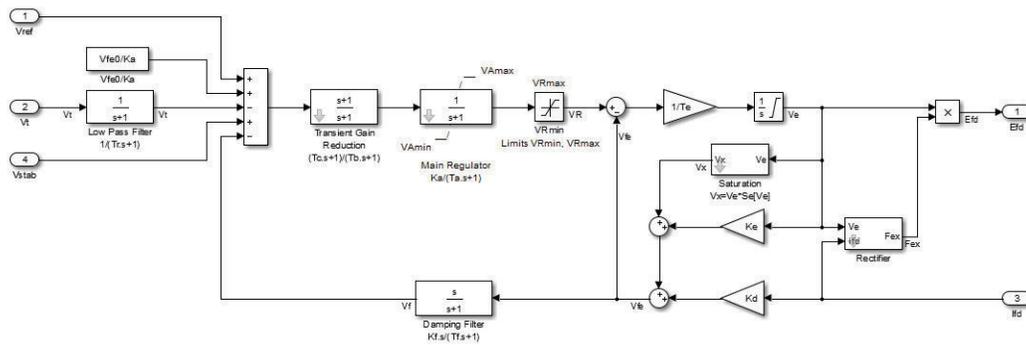


Figura 3.22 AVR – AC1A, [8].

3.3.6.1.3. AC4A

El modelo de la figura 3.23 se representa un sistema de excitación con alternador. La estabilización del sistema de excitación es usualmente provista en forma de una reducción de ganancia transitoria [8].

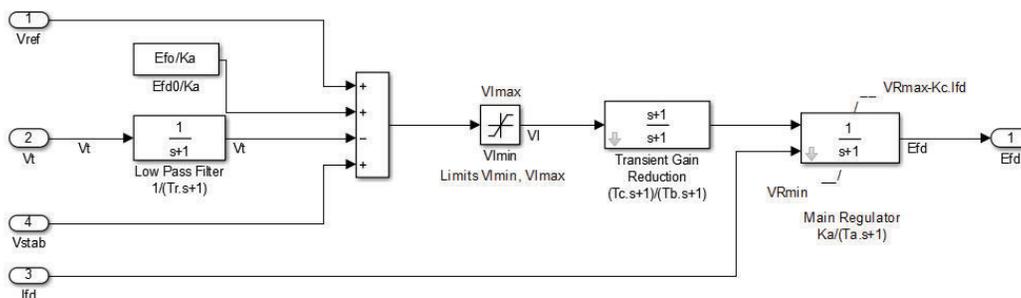


Figura 3.23 AVR – AC4A, [8]

3.3.6.1.4. ST1A

El modelo mostrado en la figura 3.24 se representa un regulador de voltaje con un sistema de fuente de potencia con rectificadores controlados en el cual el voltaje pico de excitación es directamente proporcional al voltaje terminal. El modelo provee flexibilidad para representar estabilización de la retroalimentación. Debido a la alta capacidad del campo del sistema, en ocasiones se utiliza como limitador de corriente [8].

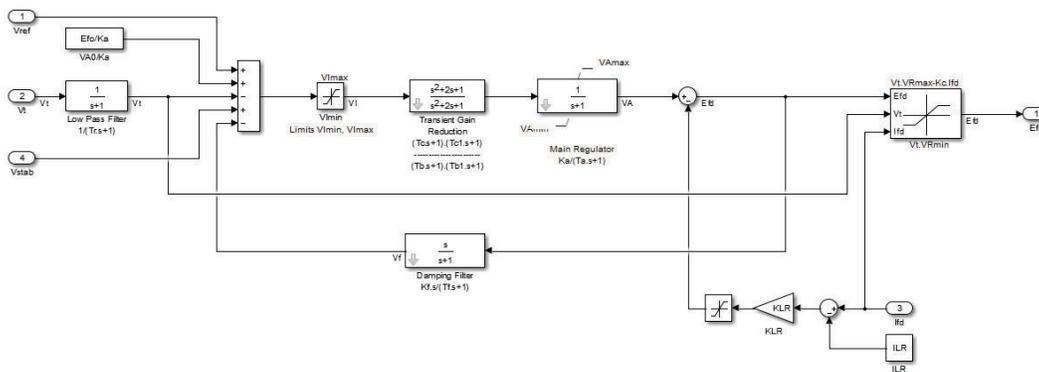


Figura 3.24 AVR – ST1A [8]

3.3.6.2. Reguladores de velocidad

Ya que en el presente trabajo se han desarrollado modelos de generadores sincrónicos hidráulicos y térmicos, se tiene el modelamiento de turbinas para ambos casos.

GENERADORES HIDRÁULICOS

3.3.6.2.1. IEEEG3

El modelo de la figura 3.25 representa un modelo linealizado dinámico de compuerta, este modelo actúa de manera efectiva cuando es parametrizado para los datos del flujo de carga [9].

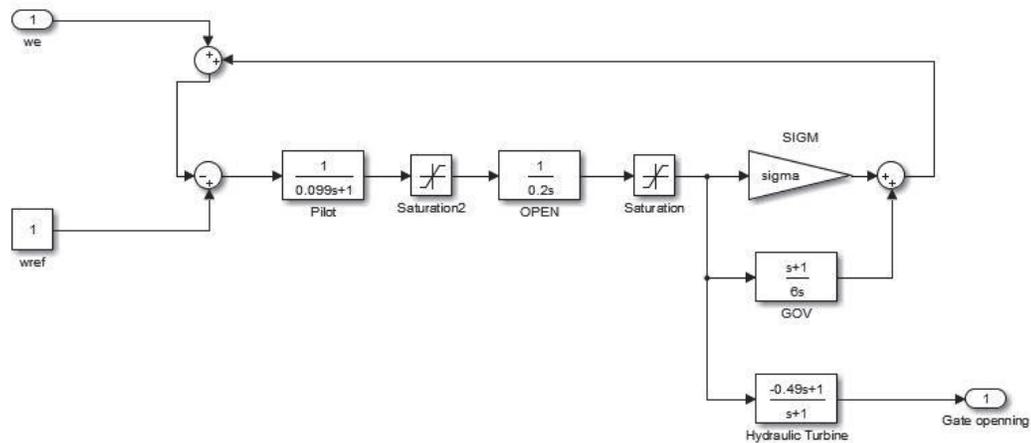
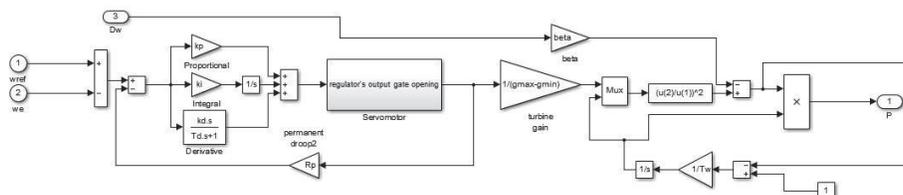


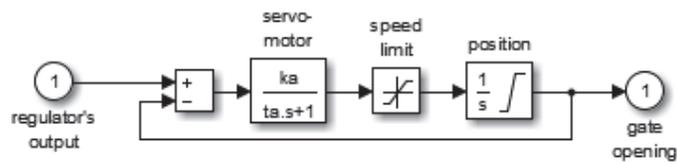
Figura 3.25 Governor – IEEEG3 [9]

3.3.6.2.2. PID

En la figura 3.26 se muestra el diagrama de un modelo de sistema de regulador de velocidad que representa tres puntos eléctricos y mecánicos. Se utiliza una compuerta accionada por servomotor que no toma en cuenta el efecto de la variación de la inercia del agua con la apertura de dicha compuerta [9].



(a)



(b)

Figura 3.26 (a) Sistema turbina generador PID (b) Servomotor [9]

GENERADORES TÉRMICOS

Tanto para los modelos IEEEG1 y TGOV3 se considera una turbina que consta de cuatro estaciones, la primera representa la chimenea mientras que las otras tres son los recalentadores y las tuberías de cruce, además se asume que la presión de la caldera es constante [11].

3.3.6.2.3. IEEEG1

En este modelo representado en la figura 3.27, el sistema de control consiste de un regulador proporcional, un relé de velocidad y un servomotor de control para la apertura de la compuerta. Por lo general en este modelo se toma en cuenta la chimenea y una parte de los recalentadores [9].

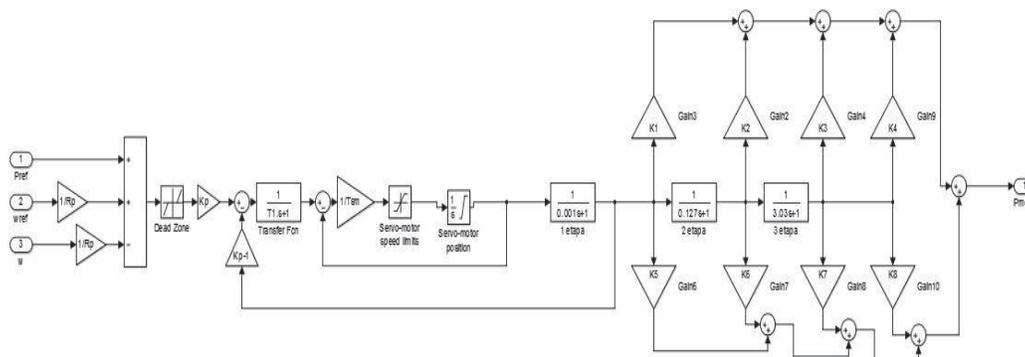


Figura 3.27 Governor – IEEEG1 [9]

3.3.6.2.4. TGOV3

El modelo de la figura 3.28 consiste en dos servomotores para el control de posición y límite de velocidad. En este modelo por lo general se incluye la chimenea despreciando los recalentadores [9].

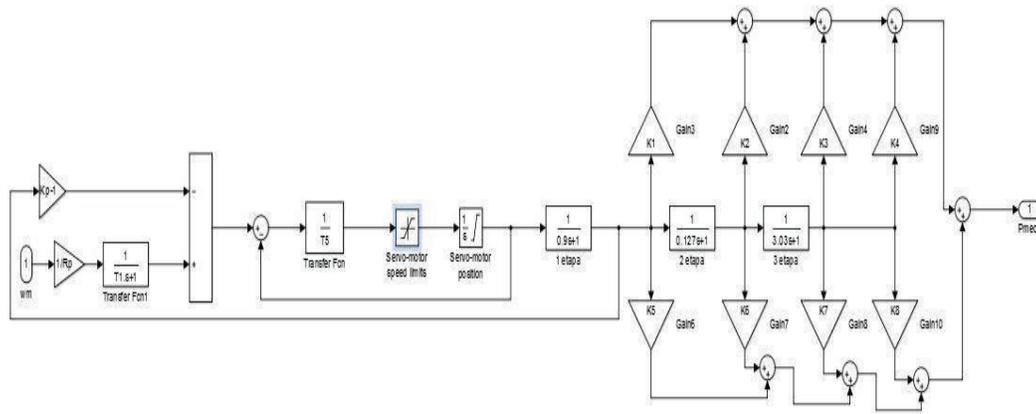


Figura 3.28 Governador – TGOV3 [9]

3.3.6.2.5. Turbina a gas

En la figura 3.29 se muestra el modelo de un compresor axial, una cámara de combustión y una turbina, donde idealmente el proceso entre la entrada al compresor de la combustión es isotrópico, lo que significa que la presión de gas caliente es constante al expandirse por la turbina [1].

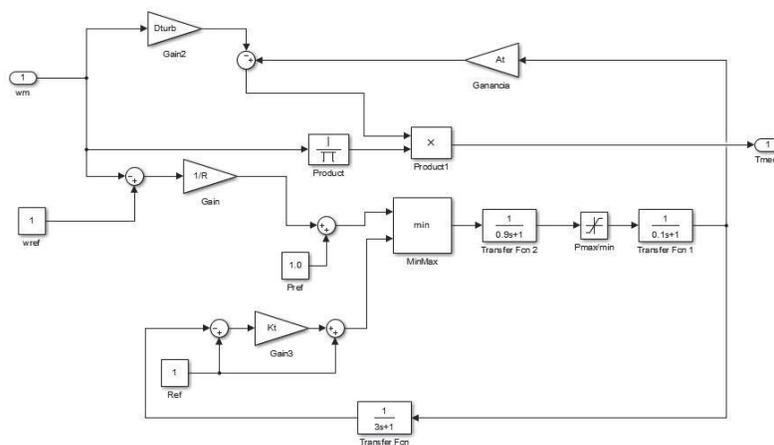


Figura 3.29 Governador para turbina a gas, [1].

3.3.6.3. Estabilizadores de sistemas de potencia

Los estabilizadores de sistemas de potencia añaden amortiguamiento a las oscilaciones del rotor mediante el control de la excitación a través de señales estabilizadoras auxiliares [10].

3.3.6.3.1. GENÉRICO

En la figura 3.30 se muestra el modelo general de un regulador de potencia con una señal de entrada del amortiguamiento del rotor del generador sincrónico. A través del primer sensor se obtienen las variaciones de la frecuencia, se debe considerar la necesidad de permitir el paso de señales estabilizadoras, requiriéndose que no sean de gran magnitud de tal manera de evitar que la velocidad del generador supere su valor nominal [5].

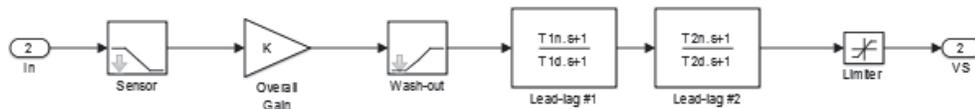


Figura 3.30 PSS Modelo – Genérico [5]

3.3.6.3.2. STAB1

En la figura 3.31 se muestra el esquema de un estabilizador de potencia, derivado del modelo genérico y enfocado en oscilaciones de torque. Teóricamente se producen ondas de 180 grados de desfase con relación a la velocidad oscilatoria del rotor, es decir que genera una señal negativa pura [10].

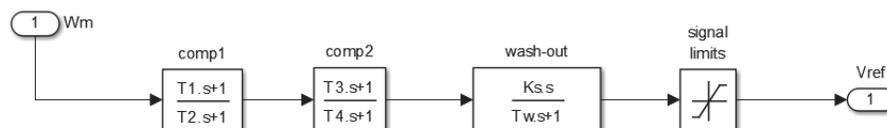


Figura 3.31 PSS – STAB1 [10]

3.4. INTEGRACIÓN DE MODELOS

Como ya se mencionó el sistema de potencia propuesto consta de barra de referencia – carga – línea de transmisión – transformador – generador sincrónico; este último con sus sistemas de control de voltaje y velocidad. Tomando en cuenta los parámetros dinámicos para todo el sistema, se integran los elementos con diferentes tiempos de sincronización, manteniendo una misma referencia para todo el sistema.

Del diagrama de circuito presentado en la figura 3.1 se puede realizar un diagrama de bloques como el que se muestra en la figura 3.32 para explicar de mejor manera la integración de modelos en un sistema eléctrica.

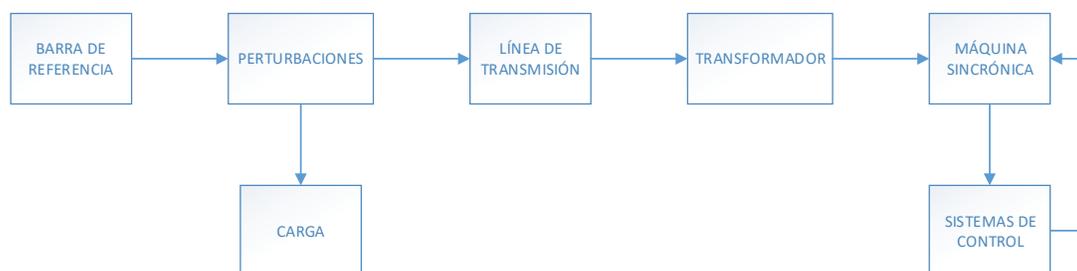


Figura 3.32 Diagrama de bloques de la simulación

3.4.1. INTEGRACIÓN DE BARRA INFINITA, CARGA, LÍNEA DE TRANSMISIÓN, TRANSFORMADOR Y GENERADOR SINCRÓNICO

La integración de cada uno de estos elementos se lo realiza por intervalos de tiempo para evitar introducir ruido en la simulación del sistema. Como se menciona en la sección 3.2.1 desde la fuente de voltaje se derivan tres señales referenciales las cuales se encargan de alimentar al estator del generador sincrónico en vacío, a la línea de transmisión y a la carga. La energización e interconexión se emula posterior al inicio de la simulación, estableciéndose el siguiente orden de eventos [21]:

- Inicio de la simulación y generación de voltaje por parte de la fuente.

- Energización de la línea de transmisión.
- Sincronización del generador con el sistema considerando que en un inicio se encontraba operando en vacío.
- Falla en los terminales de la carga. La falla simulada es de tipo falla monofásica ya que es la más común en el sistema eléctrico.

Debido a la posición de la carga eléctrica en el sistema, ésta se considera que se encuentra unida permanentemente a la barra de referencia. Para la energización de la línea de transmisión se simula un interruptor a la entrada de este elemento, permitiendo la operación en vacío hasta su cierre y sincronización.

Previo a la sincronización del generador con el sistema, se registra la operación de la barra de referencia conectada a la línea de transmisión, la carga y el transformador. Durante este lapso de tiempo se tiene la operación en vacío del generador, hasta la sincronización con el sistema, momento para el cual se repartirá la carga de acuerdo a lo asignado en sus parámetros de simulación.

Para que el generador tenga una correcta toma de carga se han incluido dos entradas: la primera que mediante un lapso de tiempo permita realizar dicha acción y la segunda que mediante una señal enviada a través del torque mecánico establezca la cantidad de carga a tomar por el generador.

Además a la corriente desarrollada por el generador a partir de la sincronización con el sistema, se realimenta al sistema considerando su generación y aporte de potencia al circuito eléctrico.

Se acoplan los terminales para el ingreso de datos del voltaje de campo y torque mecánico permitiendo la integración de los sistemas de control del generador como se detallará en la sección 3.3.2.

En la figura 3.33 se muestra la integración del sistema con todos los lapsos de tiempo implementados.

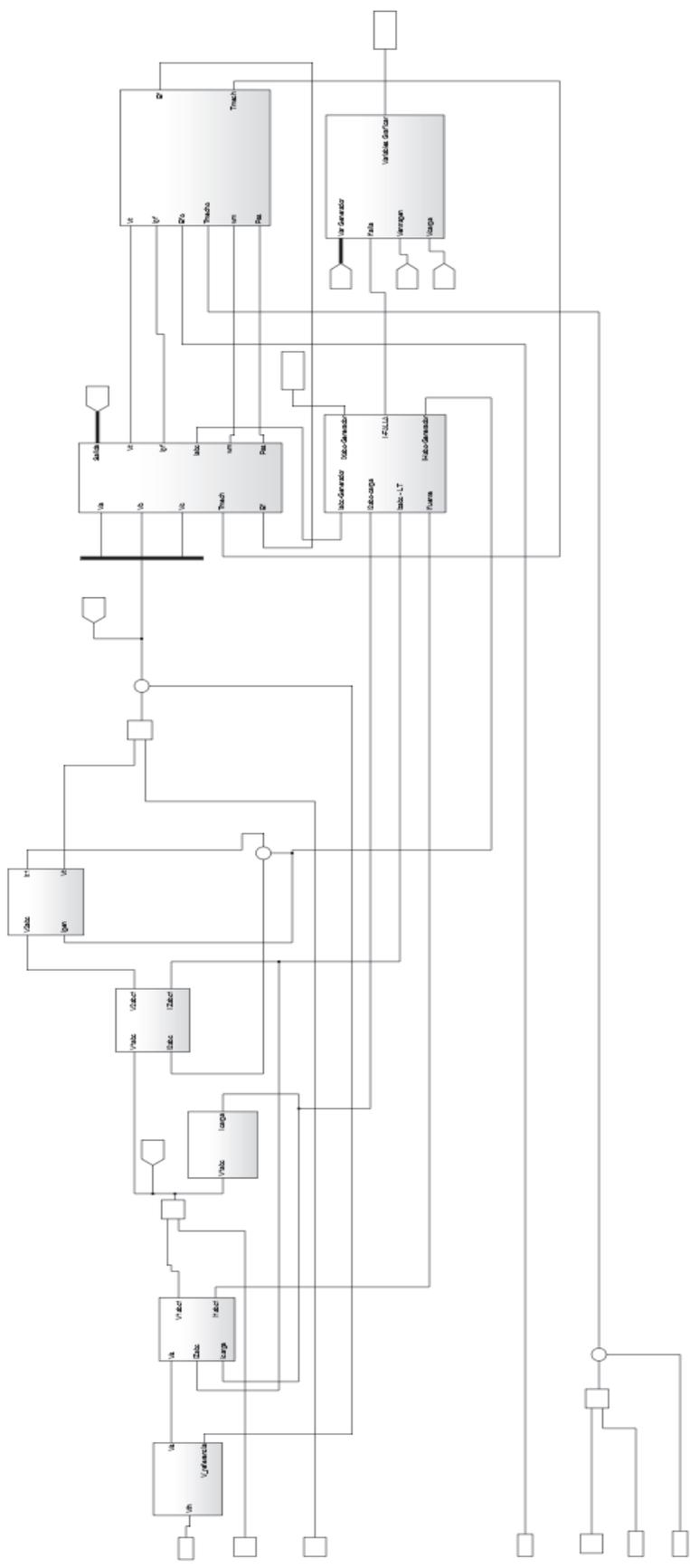


Figura 3.33 Modelo del sistema eléctrico en Simulink

3.4.2. INTEGRACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL

Como se observa en el diagrama de bloques de la figura 3.32 los sistemas de control se integran al generador, creando un lazo y actúan de acuerdo a la perturbación que se produzca en el sistema. Para integrar los sistemas de control con el generador y el resto de componentes se obtiene cada señal necesaria del generador y se ingresa a cada bloque de control como se muestra en la figura 3.34. A través de una señal de inicialización se simula un sensor que actúa en el momento de la perturbación.

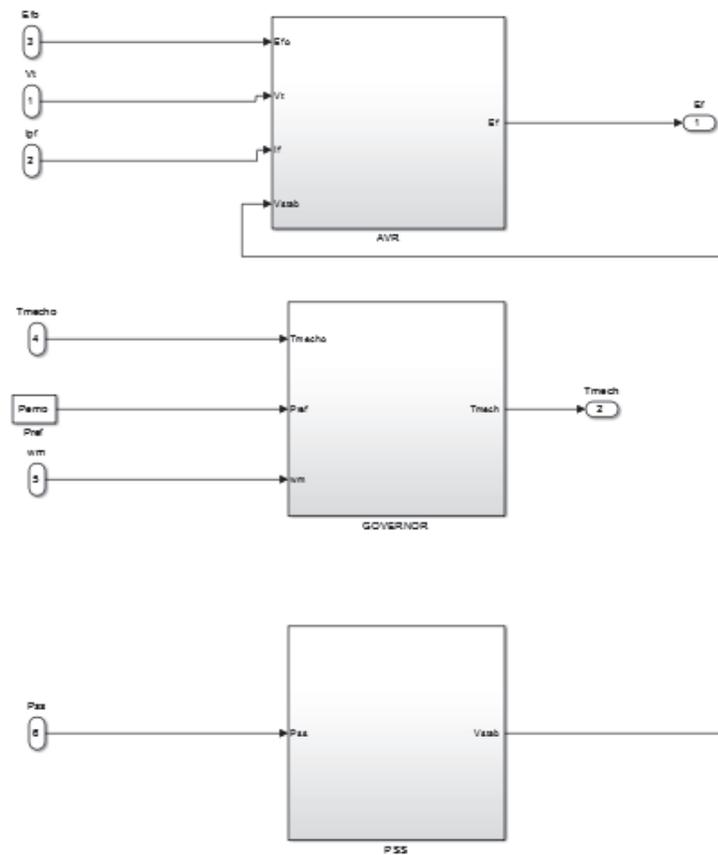


Figura 3.34 Bloque de sistemas de control

Para el bloque del regulador de voltaje se puede escoger uno de los modelos presentados en la sección 3.2.6.1, es decir DC1A, AC1A, AC4A y ST1A; a través de un selector multipuerto. Por defecto la primera opción es aquella en la cual no se incluye ningún sistema de control.

La señal que activa o desactiva la operación del bloque de control está determinada por una constante de tiempo que opera en conjunto con la falla transitoria del sistema.

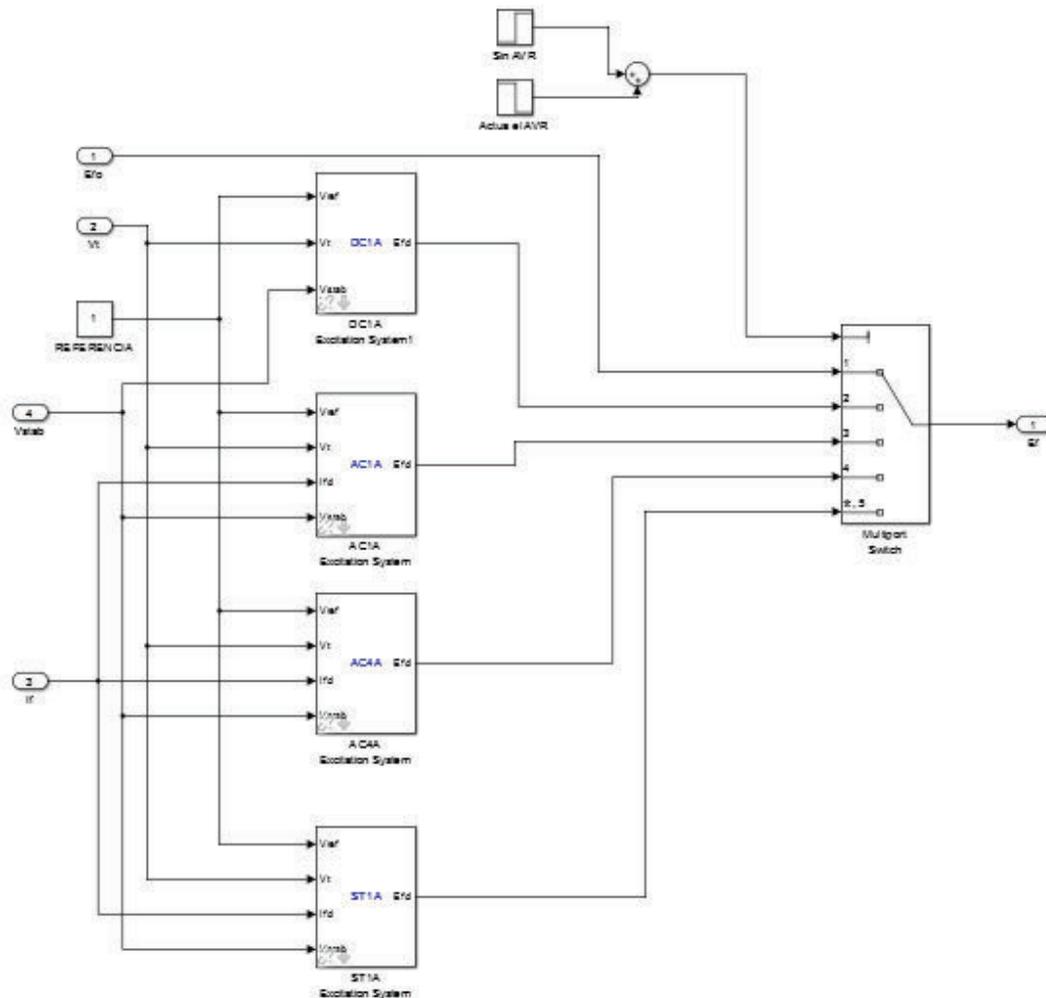
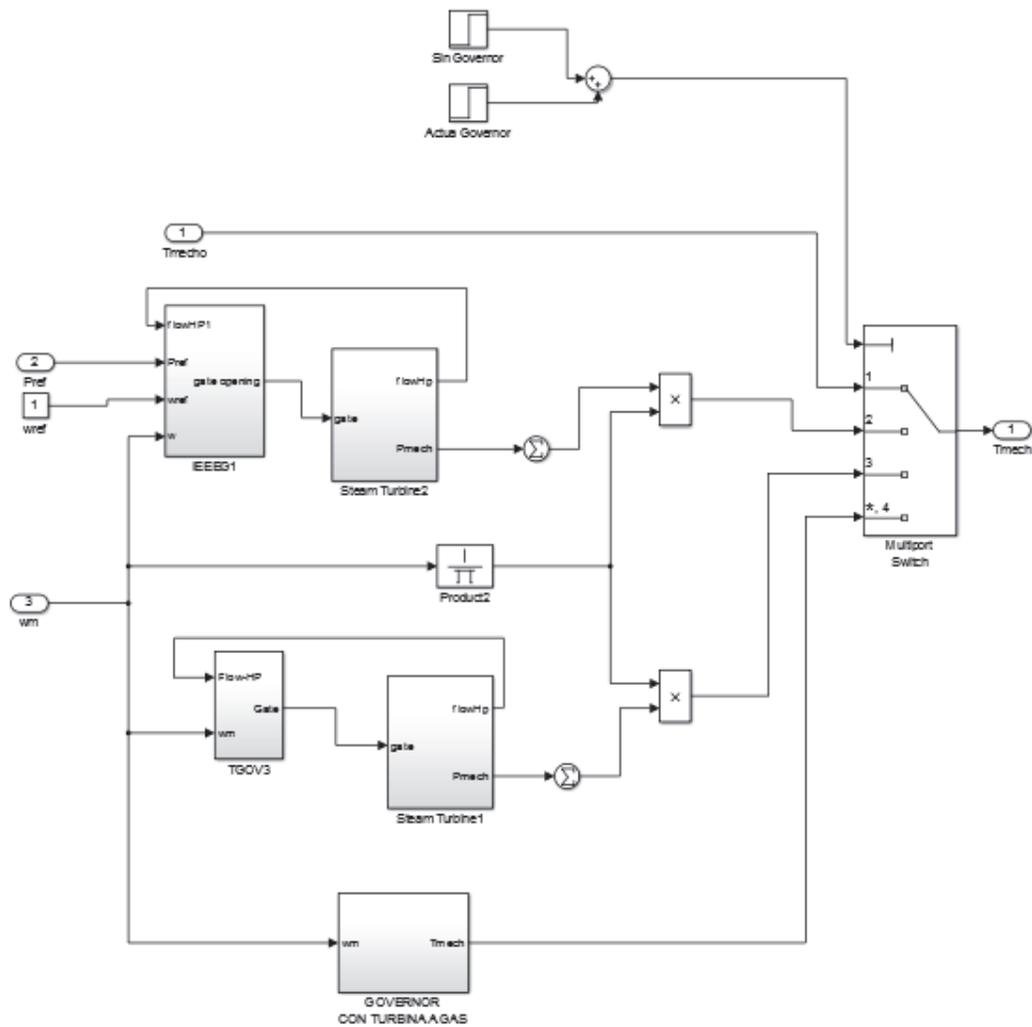


Figura 3.35 Reguladores de Voltaje

Para el sistema regulador de velocidad se han estipulado dos tipos de bloques. Uno para modelos de generadores térmicos y otro para generadores hidráulicos. Como

se muestra en la figura 3.36 los sistemas de tipo hidráulico son PID e IEEEG3; mientras que los sistemas de regulación de tipo térmico son IEEEG1, TGOV3 y para turbina a gas. Pudiéndose escoger cualquier opción según el caso de estudio requerido.

Para que el modelo seleccionado funcione adecuadamente, se debe parametrizar de manera similar que el generador sincrónico. En estos casos se tiene una base de datos almacenados tomados de [5]. A través del sistema multipuerto se permite el paso de la señal de control elegida.



(a)

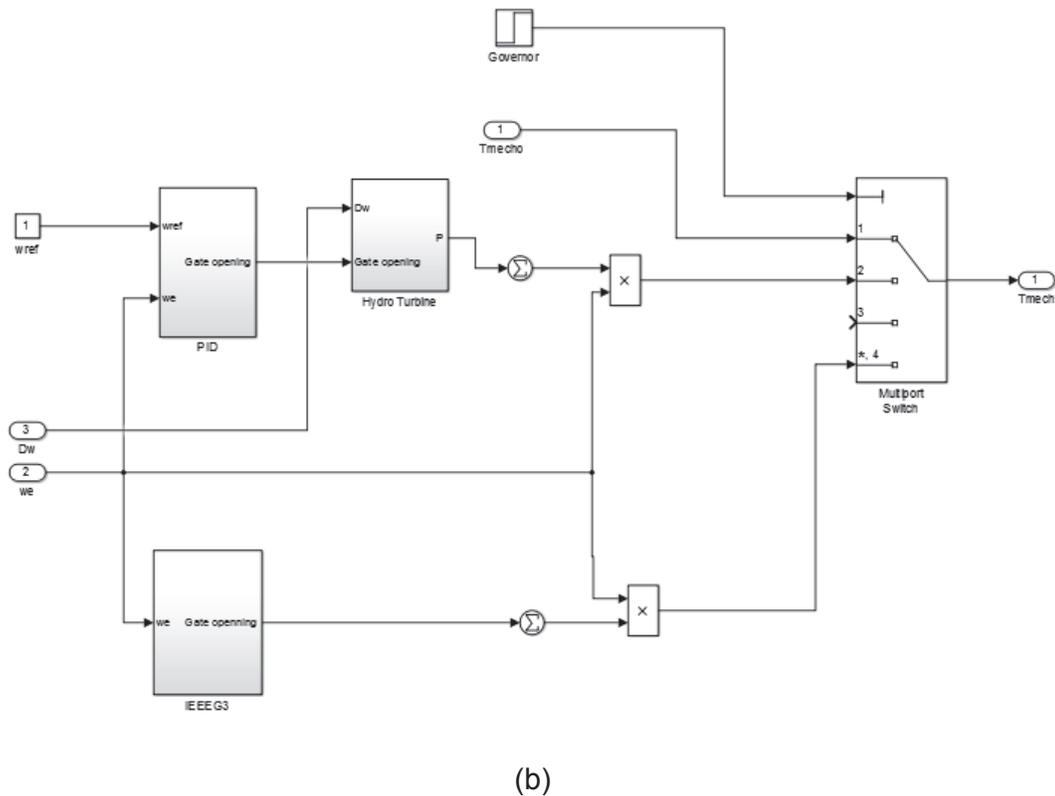


Figura 3.36 Reguladores de velocidad para (a) generadores térmicos y (b) generadores hidráulicos.

Para el caso del bloque del estabilizador de potencia se encuentra integrado bajo el mismo principio del resto de sistemas de control del generador; es decir toma la señal requerida perturbada del generador y al estar sintonizada con la falla transitoria del sistema actúa de acuerdo a la señal que comande el bloque multipuerto, como se muestra en la figura 3.37.

Este módulo se añade a los terminales del voltaje de carga, punto en común con el voltaje de la barra infinita y el voltaje que ingresa a la línea de transmisión.

Para integrar este bloque al sistema se define el tiempo en el que se produce la falla transitoria. Posteriormente a los voltajes de fase se multiplican por una función paso, la cual coloca en cero estos valores de onda sinusoidales según el caso de estudio así seleccionado, como se muestra en la figura 3.39 donde se muestra el ejemplo del bloque de falla trifásica, asemejando una falla franca a tierra sin impedancia de cortocircuito.

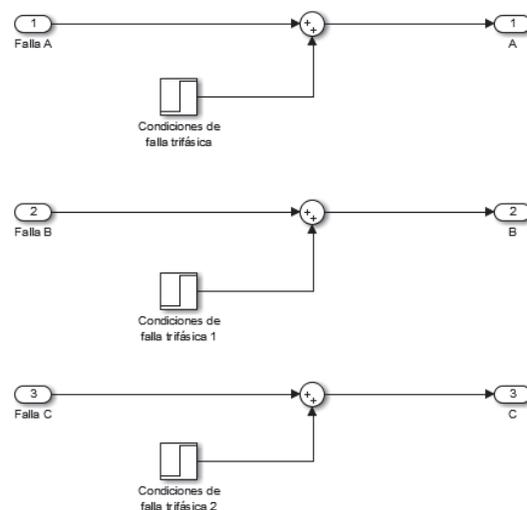


Figura 3.39 Falla Trifásica

4. IMPLEMENTACIÓN DE CASO EJEMPLO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se brinda una guía de uso del programa para la realización de simulaciones para una unidad de generación, partiendo desde la parametrización de la máquina sincrónica y de sus unidades de control.

Previamente se estipula las condiciones de uso del programa, así como las delimitaciones de los ciclos de duración de una falla transitoria que puede ingresar el usuario y su tiempo de duración.

Además se muestra un caso ejemplo con el adecuado manejo del software desarrollado. Los resultados obtenidos con la herramienta computacional se contrastan con los obtenidos con el software comercial PowerFactory de DlgSILENT.

4.1. CONDICIONES DE USO

Para la utilización de la herramienta computacional se debe tomar en cuenta ciertas restricciones:

- I. El sistema eléctrico es invariante, es decir que se puede seleccionar parámetros de generador sincrónico y sistemas de control pero no cambian la parametrización de la barra de referencia, la carga, la línea de transmisión o el transformador.
- II. El orden de los elementos tampoco se puede modificar es decir se tiene una conexión predeterminada, barra infinita – carga – línea de transmisión – transformador – generador sincrónico con sistemas de control.
- III. Se estipulan ciertos tiempos de sincronización de los componentes, es decir cada elemento del sistema se integra en un orden secuencial, para evitar distorsión en la simulación.
- IV. La falla se produce en los terminales de carga, y se puede seleccionar su duración de 10 a 22 ciclos en números enteros y el tiempo en el que se produce de 6 a 12 segundos.

- V. Se produce un despeje de falla que permite al sistema regresar a condiciones operativas.
- VI. Las variables graficadas pueden ser seleccionadas por el usuario entre una lista predeterminada.

4.1.1. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA EJECUCIÓN DEL PROGRAMA

En la figura 4.1 se muestra el funcionamiento de la herramienta computacional en base a un diagrama de flujo, donde se destaca los siguientes pasos:

- Inicio de la herramienta
- Selección y parametrización del tipo de generador sincrónico.
- Selección y parametrización de los sistemas de control
- Establecimiento de los datos de simulación
- Despliegue de las variables obtenidas.

Como se mencionó anteriormente se tienen parámetros por defecto en el programa, los que se pueden cargar tanto a los generadores como a los sistemas de control. Estos valores han sido tomados de [5].

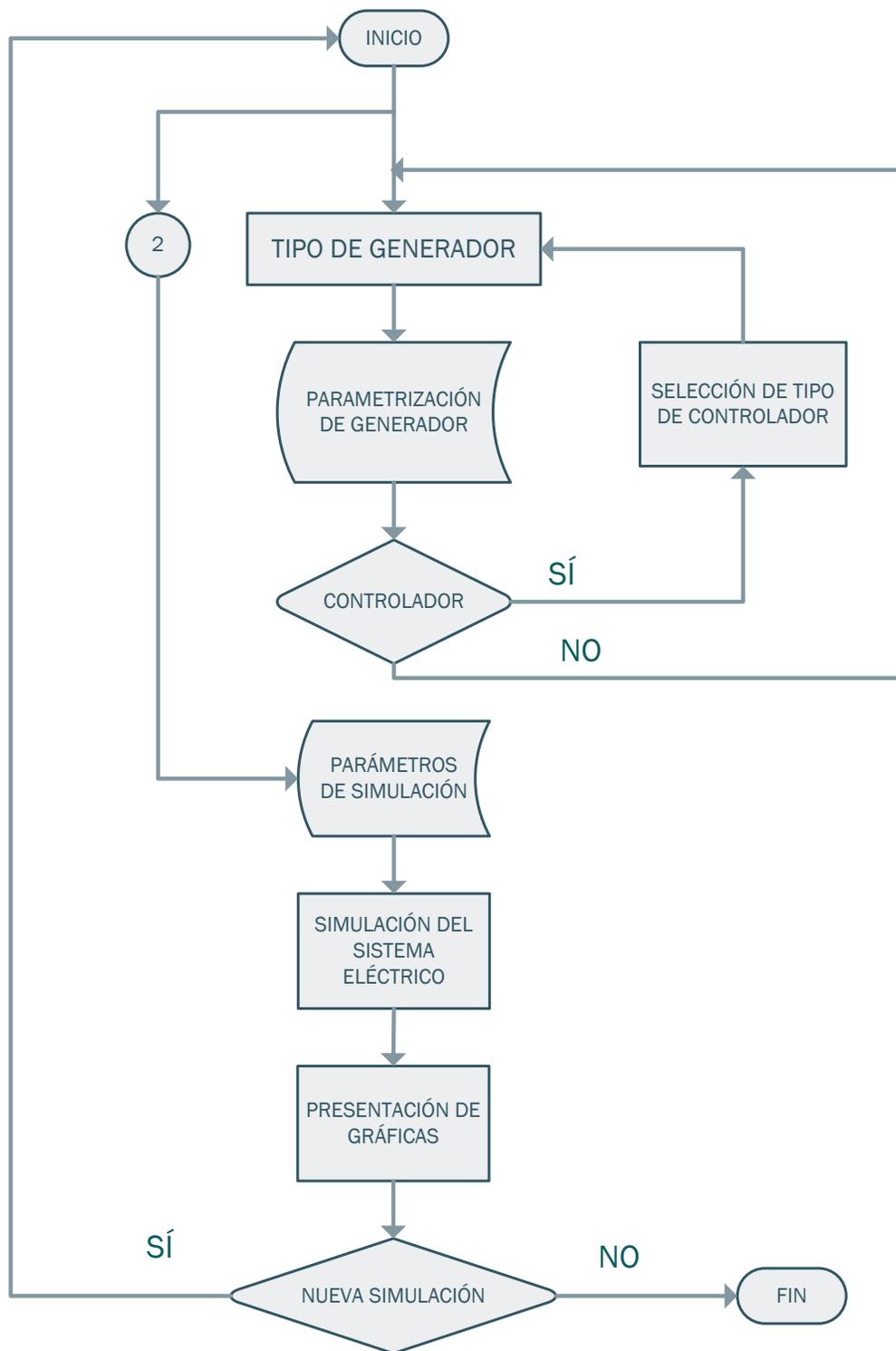


Figura 4.1 Diagrama de flujo de ejecución del programa

4.2. PROCESO DE SIMULACIÓN

El desarrollo de la herramienta computacional se fundamenta en tres módulos del software de MATLAB, los cuales son GUIDE, Workspace y Simulink. Entre estos tres módulos se produce el envío – recepción de datos con la finalidad de facilitar la realización de simulaciones dinámicas del sistema de potencia modelado.

Primero en la venta de comandos Workspace una vez añadida toda la carpeta que contiene a la herramienta al Path de MATLAB, se debe digitar la palabra 'inicio' para que el módulo empiece a funcionar.

La interfaz de inicio del programa se muestra la siguiente ventana:



Figura 4.2 Interfaz de inicio de simulación

En esta ventana se puede seleccionar las siguientes opciones:

- Información

- Contenido
- Generador
- Simulación

Al seleccionar la opción información se presenta un cuadro que brinda datos generales correspondientes al programa como se muestra en la figura 4.3. En la opción contenido se muestra una ventana de ayuda para el uso adecuado del software como se aprecia en la figura 4.4.

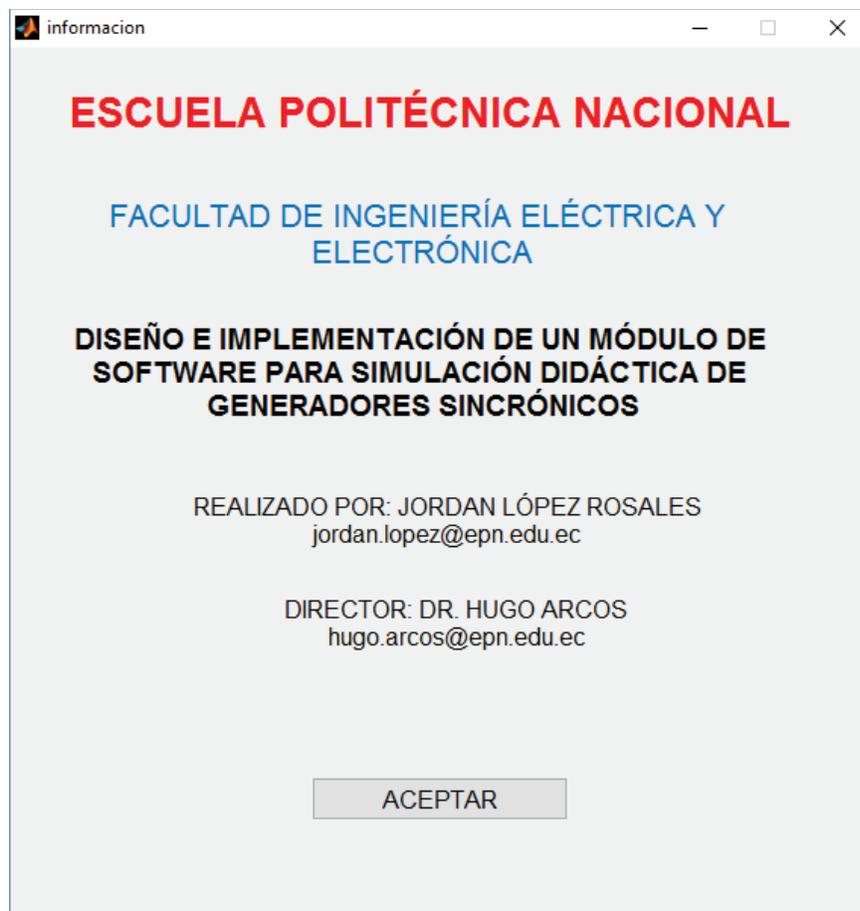


Figura 4.3 Interfaz de inicio de simulación

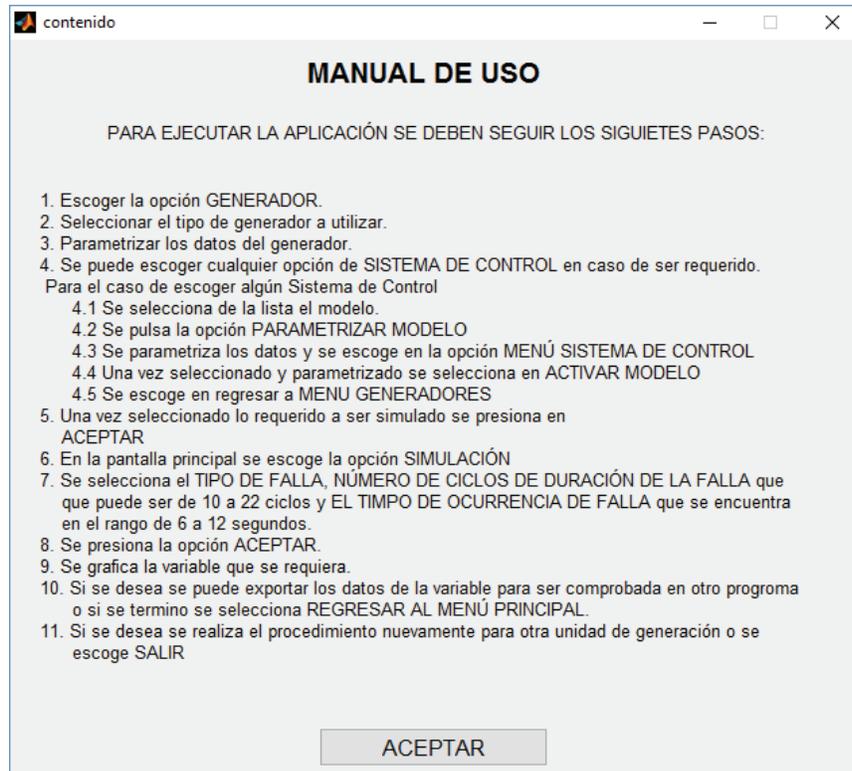


Figura 4.4 Interfaz de contenido

Siguiendo los pasos establecidos en el contenido, se debe escoger la opción GENERADOR, donde se muestra un cuadro de selección como el de la figura 4.5, aquí se debe seleccionar el tipo de generador que se requiere simular; para este caso se presenta generadores térmicos.



Figura 4.5 Interfaz de selección de tipo de generador

Posteriormente se debe ingresar los parámetros del generador sincrónico:

- Valores base
- Reactancias [p.u.]
- Constantes de tiempo [s]

Para este caso se tomará los datos de la Central Térmica Esmeraldas, que son cargados una vez se haya escogido la Opción del Generador y se haya pulsado en 'Cargar Datos por Defecto'. Un parámetro que se encuentra implícito es la frecuencia del sistema la cual es de 60 Hz.

Figura 4.6 Interfaz de datos de generador sincrónico

En la misma pantalla se puede seleccionar el tipo de sistema de control que se desea incorporar:

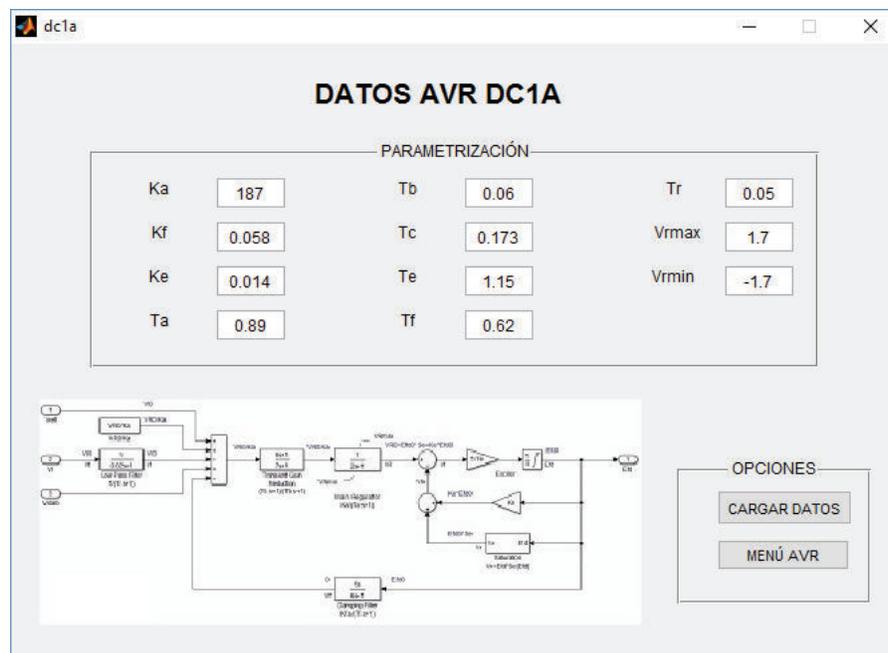
- Regulador de voltaje
- Regulador de velocidad
- Regulador de potencia

Se integrará un regulador de cada tipo para simular un sistema completo y verificar su funcionamiento.

En la ventana de selección de tipo de regulador de voltaje se puede ingresar a cada una de las diferentes opciones que se prestan y este modelo estará listo para ser utilizado una vez que se haya parametrizado adecuadamente y activado, para este caso se selecciona y parametriza el modelo DC1A.



(a)



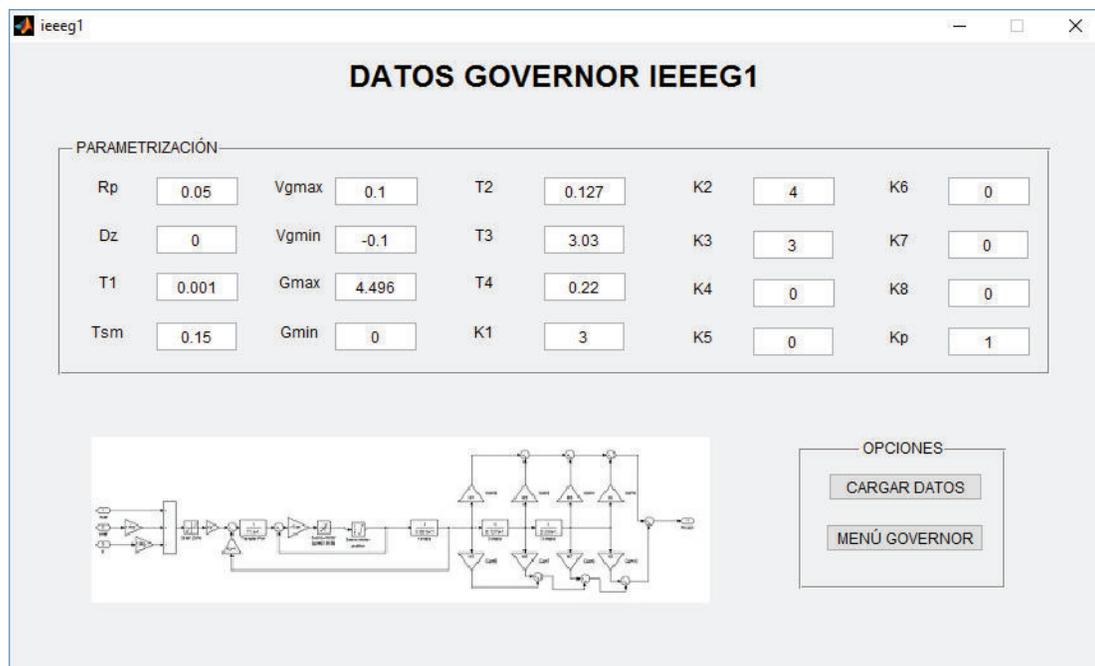
(b)

Figura 4.7 Interfaz (a) selección tipo de regulador de voltaje (b) parametrización de modelo DC1A

El funcionamiento de la ventana del sistema de regulación de velocidad es similar al del AVR, se debe seleccionar el tipo de controlador, parametrizarlo y activarlo, para este caso se ha escogido el modelo IEEEG1.



(a)



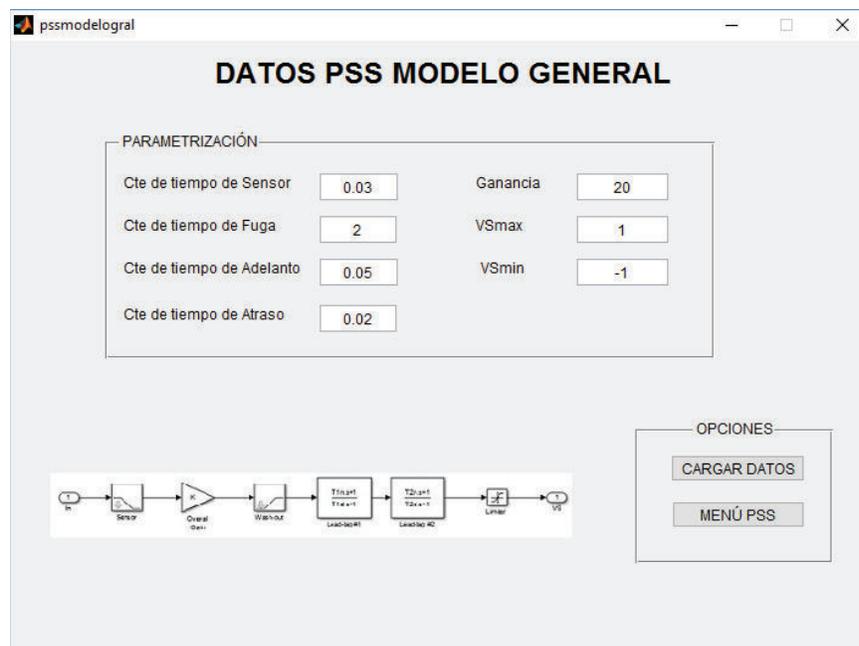
(b)

Figura 4.8 Interfaz (a) selección tipo de regulador de velocidad (b) parametrización de modelo IEEEG1

Al igual que para los otros reguladores, para el PSS se parametriza y activa el Modelo General.



(a)



(b)

Figura 4.9 Interfaz (a) selección tipo de regulador de potencia (b) parametrización de modelo General

Con los sistemas de control seleccionados; en la interfaz de parametrización del generador se escoge la opción ACEPTAR y se validan los datos ingresados, regresando a la pantalla principal de la herramienta en la que se inicia la simulación completando la siguiente información:

- Tipo de falla del sistema
- Duración del cortocircuito en ciclos.
- Tiempo de inicio de la falla en segundos.

Para el análisis de este caso se ha tomado la falla monofásica a tierra de la fase A con una duración de 18 ciclos es decir 300 milisegundos y el inicio a los 10 segundos de simulación.



The screenshot shows a software window titled 'tipofalla'. The main heading is 'SELECCIÓN TIPO DE FALLA'. Below the heading is a dropdown menu with the selected option 'FASE - TIERRA (A)'. There are two input fields: 'DURACIÓN DE FALLA:' with the value '18' and the unit 'CICLOS', and 'TIEMPO DE COMIENZO DE FALLA:' with the value '10' and the unit 'S'. At the bottom center is a button labeled 'ACEPTAR'.

Figura 4.10 Interfaz de parametrización de tipo de cortocircuito

Al pulsar ACEPTAR, quedan parametrizados todos los elementos a ser simulados, y los datos son exportados a los bloques en Simulink.

Una vez ejecutada la simulación se muestra una ventana donde se presentan las siguientes opciones:

- Selección de variables
- Opciones de Gráfico
- Salida

Permitiendo graficar las variables y analizarlas en cualquier instante de tiempo, amplificando su visualización donde sea requerido. Además se tiene la opción de exportar los datos de las siguientes variables:

- Voltaje de entrada al Generador
- Voltaje de carga
- Corriente de falla
- Voltaje en el estator
- Corriente en el estator
- Corriente de fase (abc)
- Torque eléctrico
- Corriente de campo

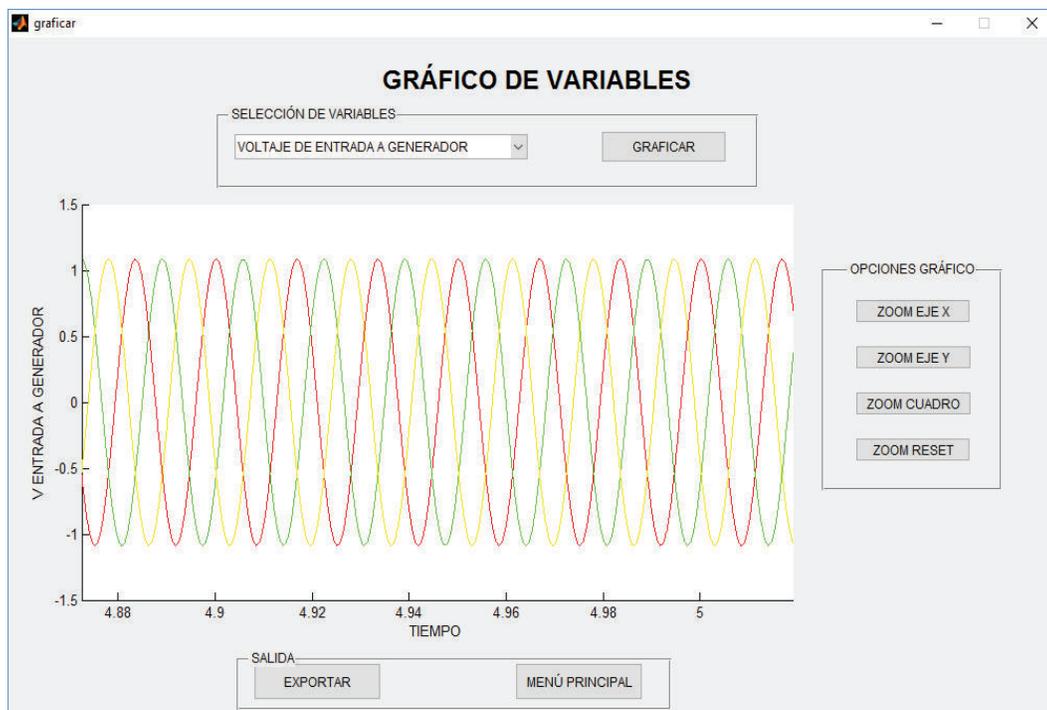


Figura 4.11 Interfaz de gráfica de variables eléctricas

4.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS CASO DE ESTUDIO

La comparación de funcionamiento se la realiza con el software comercial PowerFactory de DlgSILENT, en la cual es posible simular un sistema eléctrico similar al implementado en la herramienta.

Para que las simulaciones se aproximen lo mejor posible es necesario tomar en cuenta lo siguiente:

Power Factory de DlgSILENT

- Simulación en opción de transitorios electromagnéticos.
- Paso de integración de 0.0001 segundos.

Simulink de MATLAB

- Simulación en la opción ode23 (Bogacki-Shampine)
- Paso de integración de 0.0001 segundos.

En la figura 4.12 se muestra el sistema implementado en el software comercial. A continuación se detallan los resultados obtenidos por la herramienta computacional desarrollada y el software comercial.

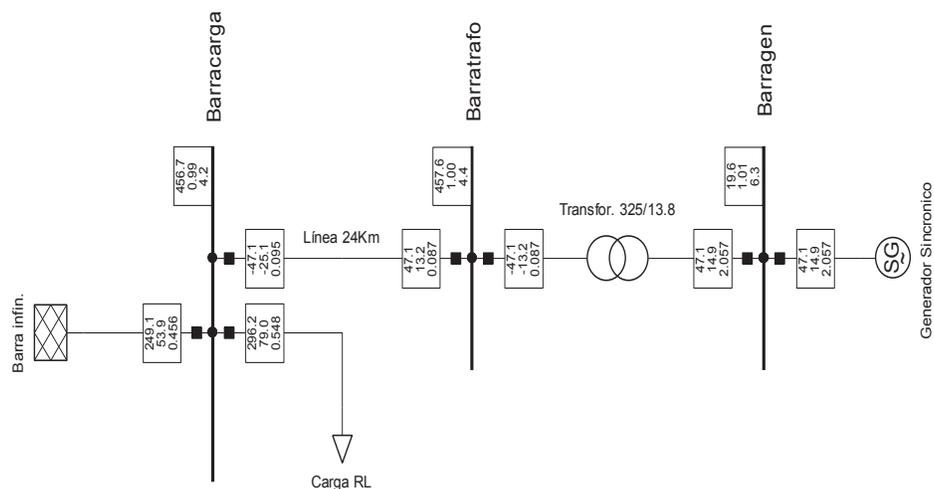


Figura 4.12 Sistema de potencia – Modelo Programa Comercial

4.3.1. VOLTAJE DE ENTRADA AL GENERADOR

Las formas de onda de los voltajes se toman a la salida de bajo voltaje del transformador, es decir se grafican las señales de ingreso al estator del generador. Antes que se integren todos los elementos del sistema, el generador opera en vacío con el voltaje de referencia otorgado por la barra de referencia y a 1.98 segundos se sincroniza con el resto de componentes del sistema de potencia.

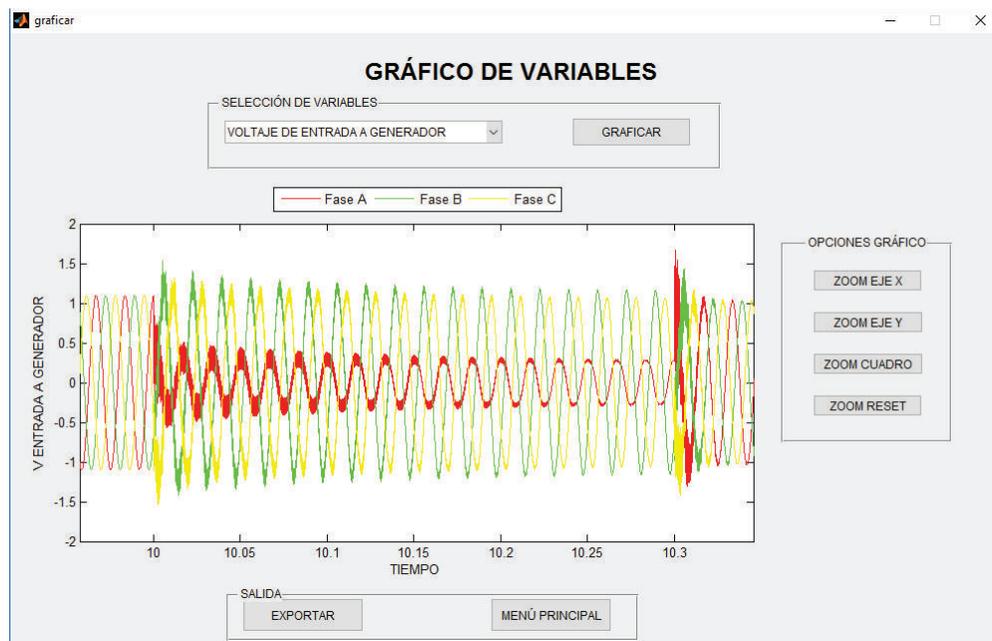


Figura 4.13 Gráfico de voltaje de entrada a generador – Módulo Didáctico

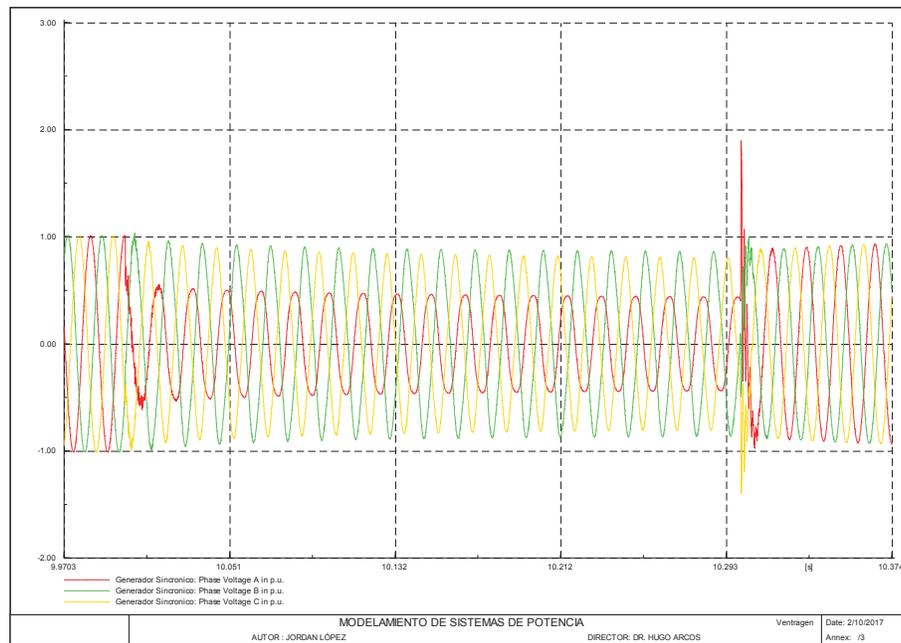


Figura 4.14 Gráfico de voltaje de entrada a generador – Modelo Programa Comercial

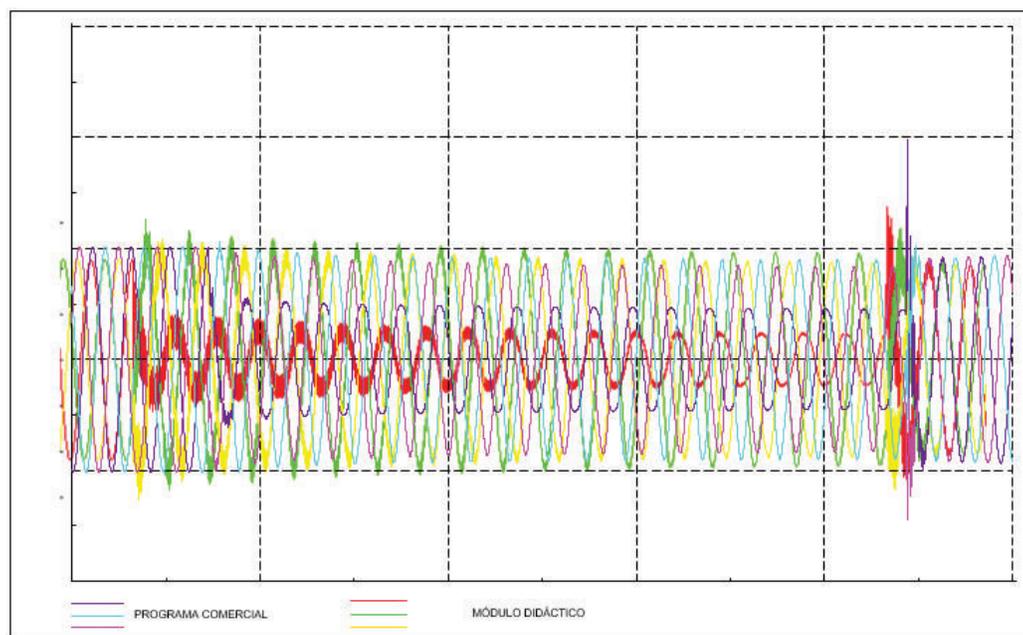


Figura 4.15 Gráfico comparativo del voltaje de entrada a generador entre los programas computacionales

Como se puede apreciar en la figura 4.14 la simulación desarrollada con el software comercial, tiene un comportamiento muy similar a la realizada por la herramienta computacional desarrollada en la figura 4.13. En la figura 4.15 al comparar los dos resultados se aprecia que en el momento que se produce la falla los resultados de la herramienta presentan mayor ruido producto del acople de modelos y señales eléctricas de los componentes del sistema. Adicionalmente los niveles de voltaje de la fase A son de menor valor pico que los presentados por el software comercial, debido al soporte que brinda la barra de referencia para el sistema en el software comercial, para las diferentes perturbaciones.

4.3.2. VOLTAJE EN LA CARGA

En la herramienta desarrollada la falla monofásica se produce al multiplicar la señal de la fase A de la barra de referencia por una función paso, la cual hace cero dicho valor de voltaje, asemejando una falla franca a tierra.

Para este ejemplo se muestra el voltaje de la carga RL del sistema, donde se produce el cortocircuito monofásico.

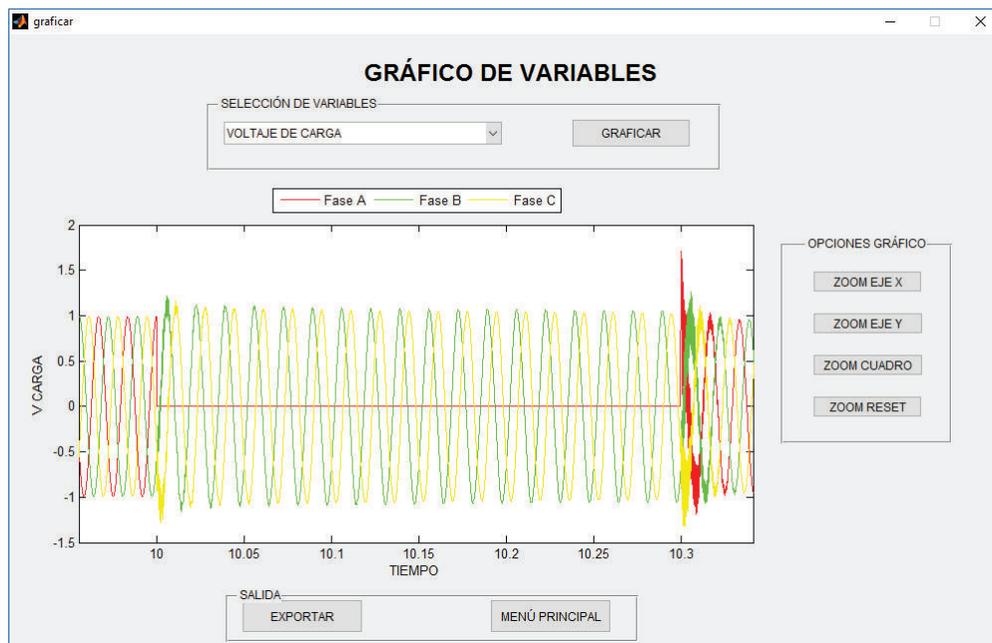


Figura 4.16 Gráfico de voltaje de carga – Módulo Didáctico

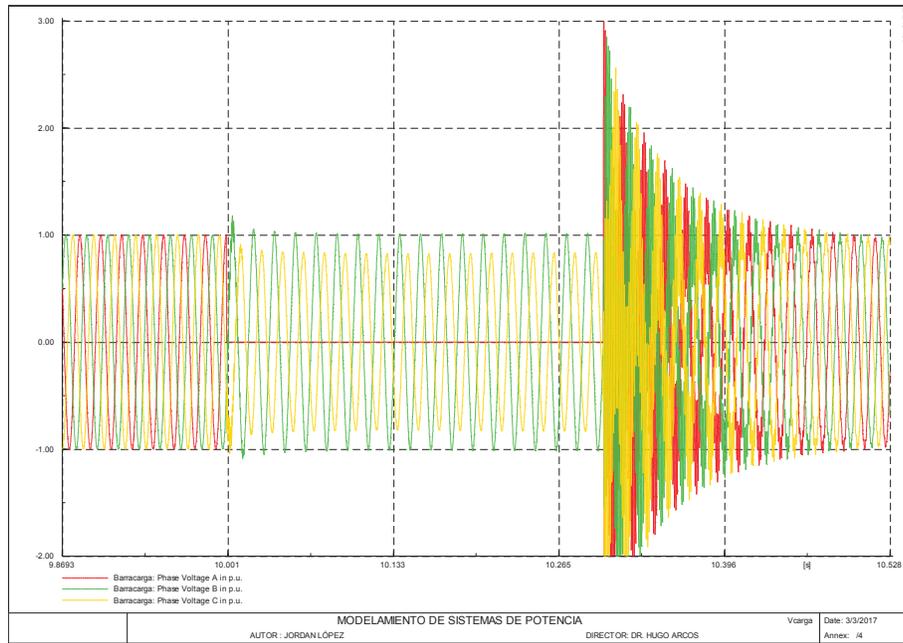


Figura 4.17 Gráfico de voltaje de carga – Modelo Programa Comercial

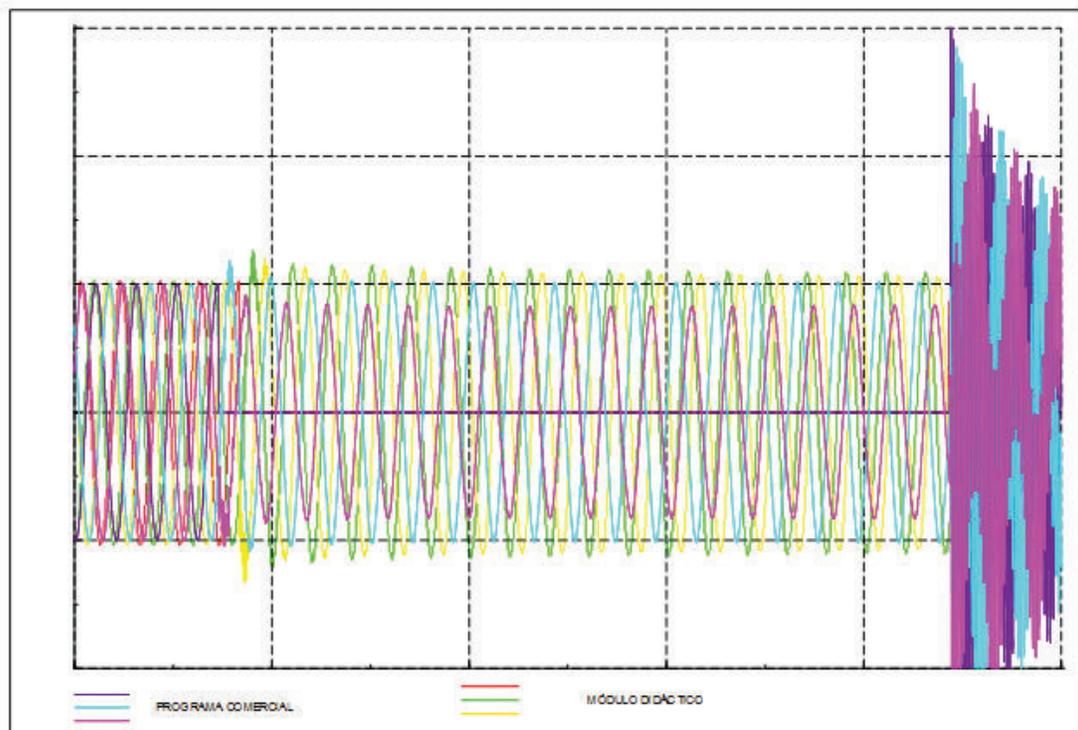


Figura 4.18 Gráfico comparativo del voltaje de carga entre los programas computacionales

Se observa claramente como en la fase A se produce la falla franca a tierra y el voltaje de esta es 0, para las dos simulaciones. En los dos programas se puede apreciar un comportamiento similar, durante el desarrollo de la falla, pero en el despeje del software comercial se tiene mayor perturbación en sus voltajes antes de su estabilización, como se muestra en la figura 4.17, ya que en la figura 4.16 se observa un comportamiento ideal de los componentes. En el análisis comparativo de la figura 4.18 se superpone el ruido del software comercial, debido a que sus componentes presentan una combinación de sus modelos utilizados.

4.3.3. CORRIENTE DE FALLA

Para este caso ejemplo se muestra el valor de la corriente de falla de la fase A en el sistema de potencia.

Es el resultado del cálculo del valor de la falla producido en el sistema.

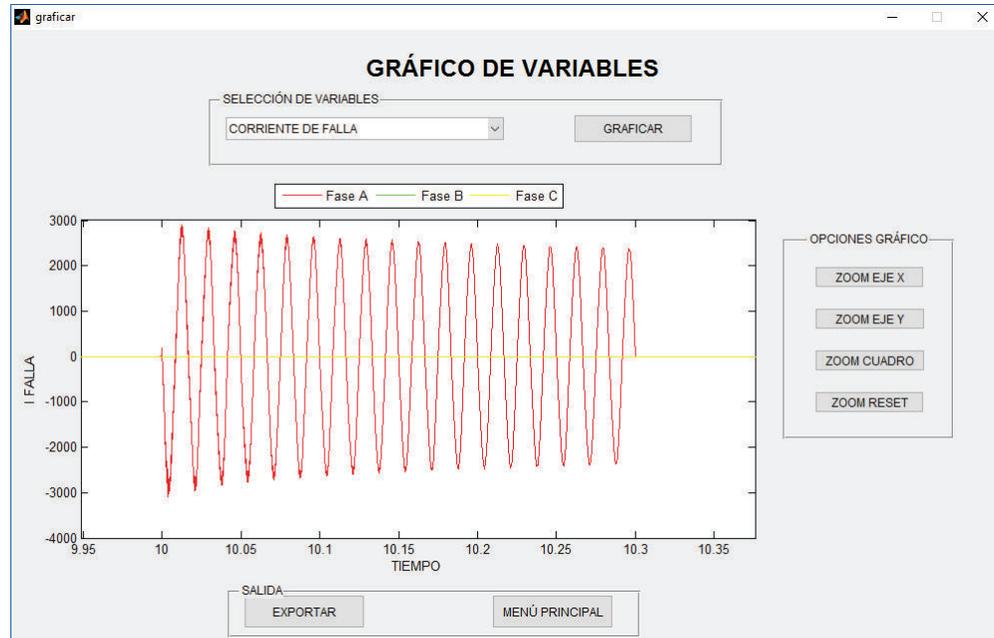


Figura 4.19 Gráfico de corriente de falla – Módulo Didáctico

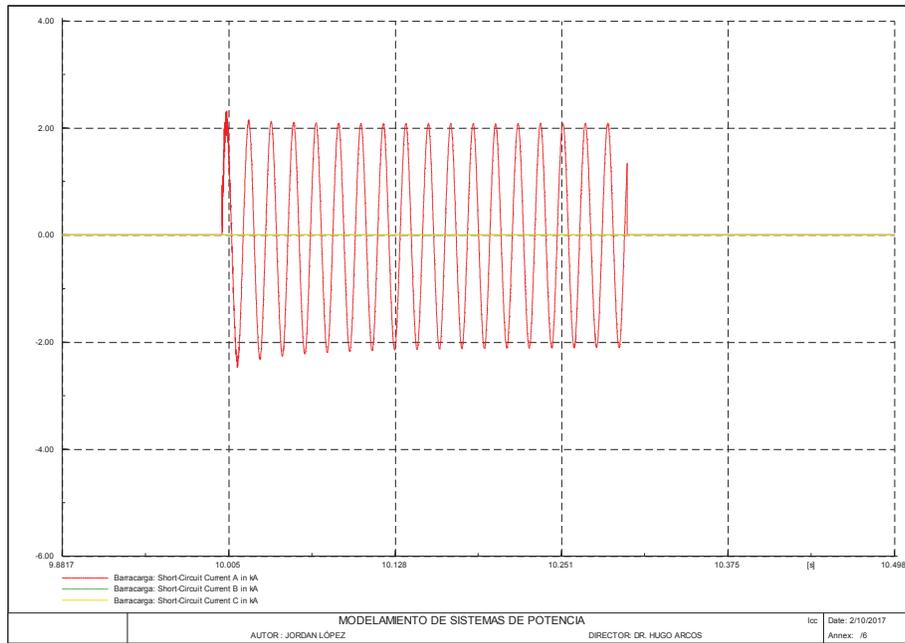


Figura 4.20 Gráfico de corriente de falla – Modelo Programa Comercial

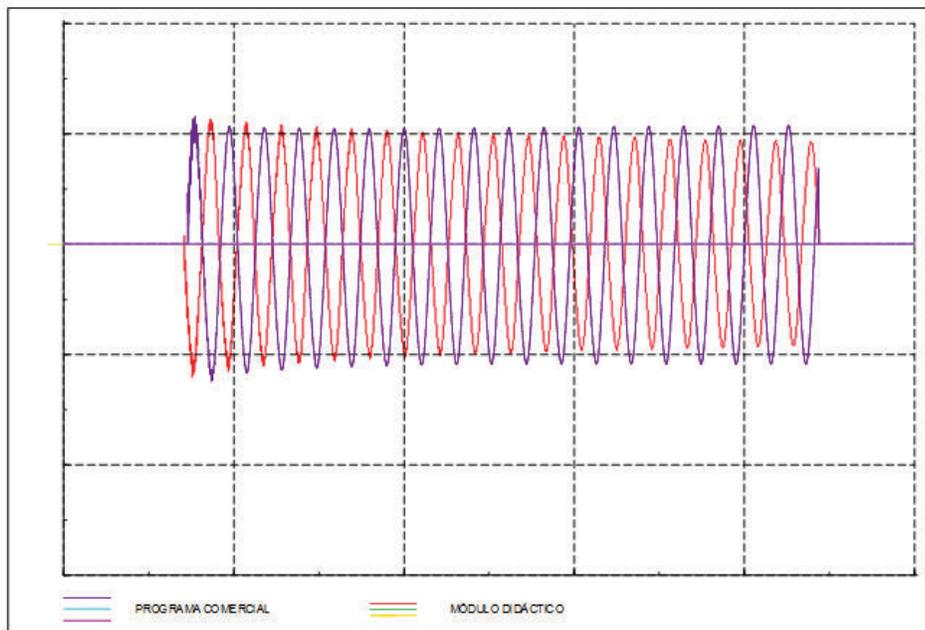


Figura 4.21 Gráfico comparativo de la corriente de falla entre los programas computacionales

La corriente de falla obtenida en el software comercial y la herramienta desarrollada de MATLAB poseen un comportamiento similar, es decir una elevación y oscilación únicamente en la fase de falla como se observa en la figura 4.20y 4.21. En la figura 4.22 se aprecia que los picos de onda son de igual magnitud pero de diferente sentido, debido a que en el módulo didáctico se realiza el acople del generador con el sistema.

4.3.4. CORRIENTE DE CAMPO

Se deriva del bloque de devanados de la máquina síncrona desarrollado en la herramienta computacional.

En la figura 4.22 se presenta el resultado de esta en el dominio del tiempo.

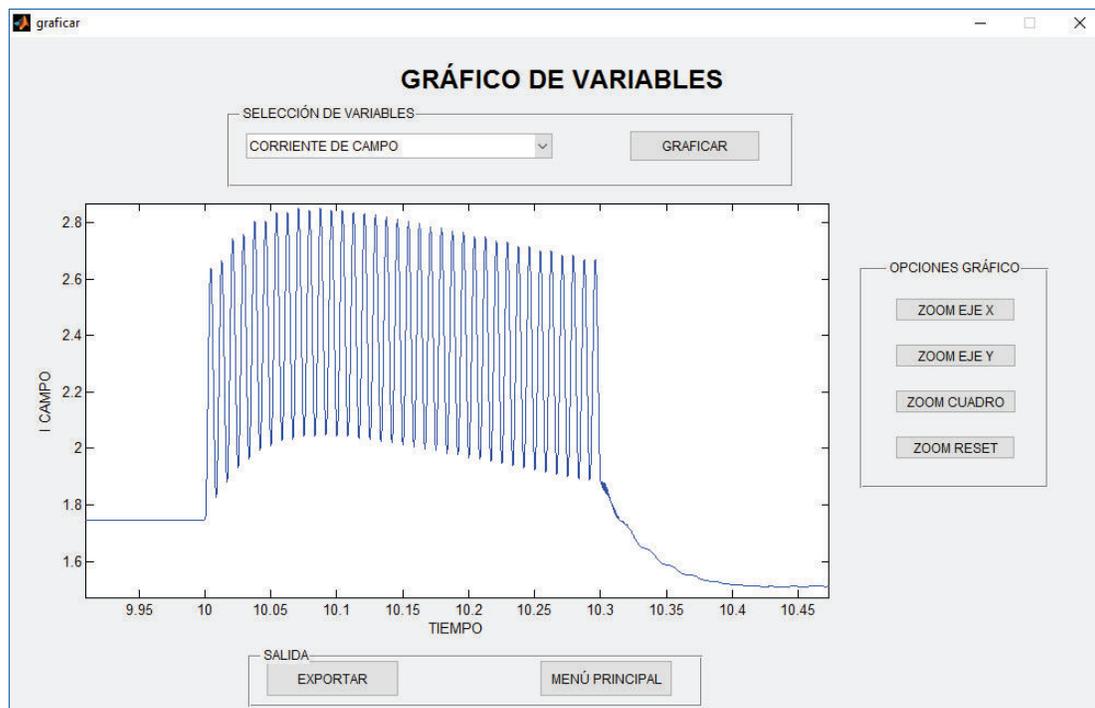


Figura 4.22 Gráfico de corriente en el estator – Módulo Didáctico

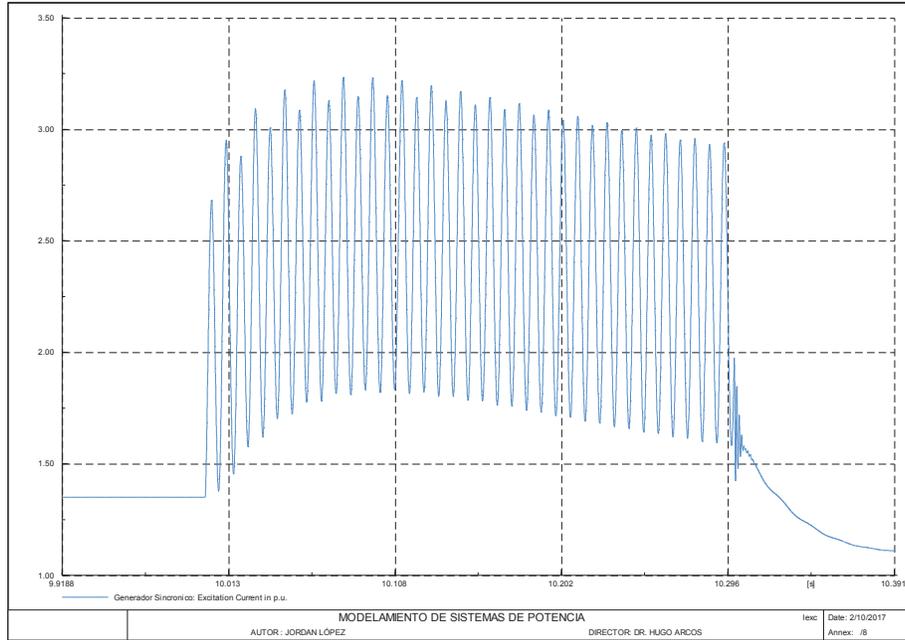


Figura 4.23 Gráfico de corriente en el estator – Modelo Programa Comercial

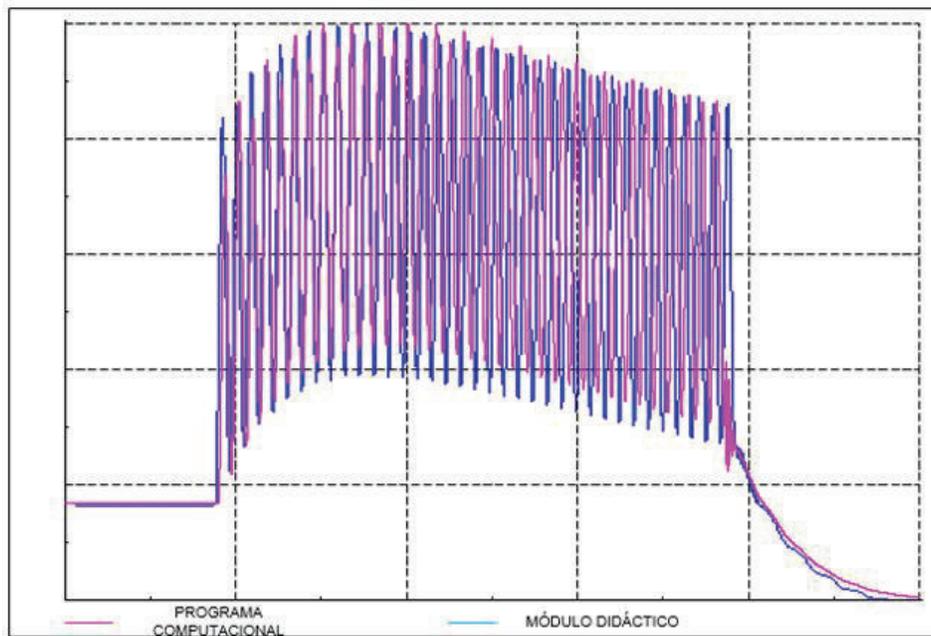


Figura 4.24 Gráfico comparativo de la corriente de excitación entre los programas computacionales

Al ser esta una corriente de excitación del devanado de campo del generador síncrono oscila en el momento en el que se produce una falla en el sistema, siendo un comportamiento similar en ambos casos. En la figura 4.24 la oscilación de la onda de ambos programas tiene un comportamiento exponencial. Siendo apreciable para ambas gráficas el estado subtransitorio en la exponente de la curva.

4.3.5. CORRIENTE DE FASE (abc)

Se muestra las corrientes i_a , i_b , i_c del generador síncrono. El resultado de estas corrientes se encuentra en el dominio del tiempo.

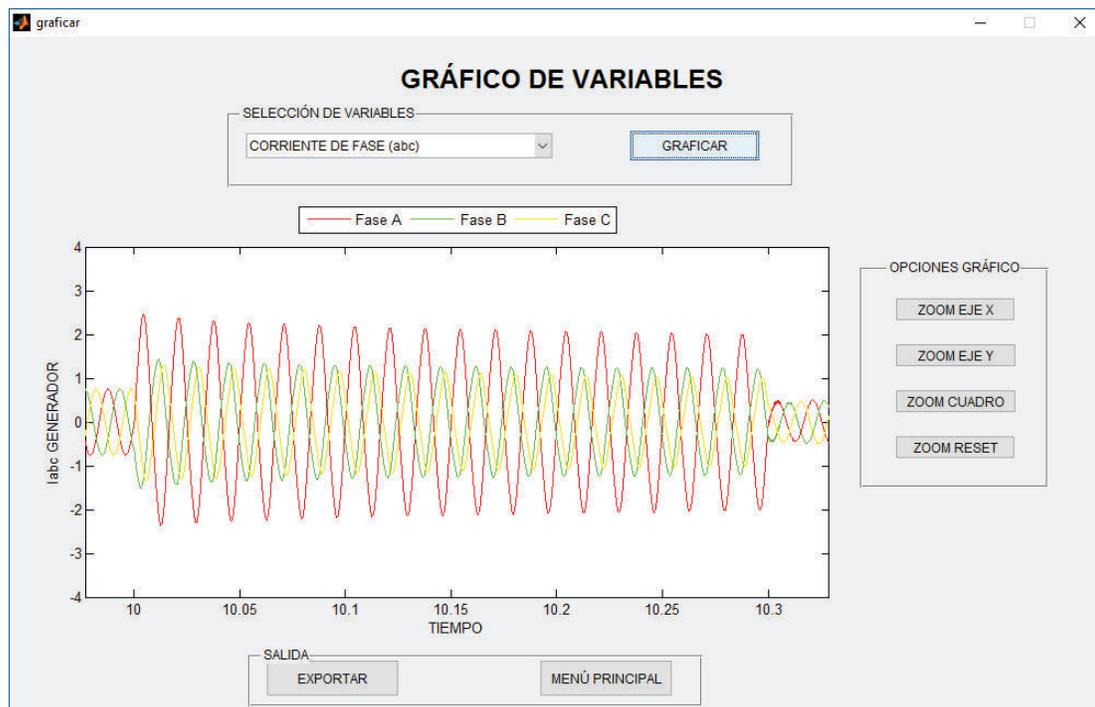


Figura 4.25 Gráfico de corriente de fase – Módulo Didáctico

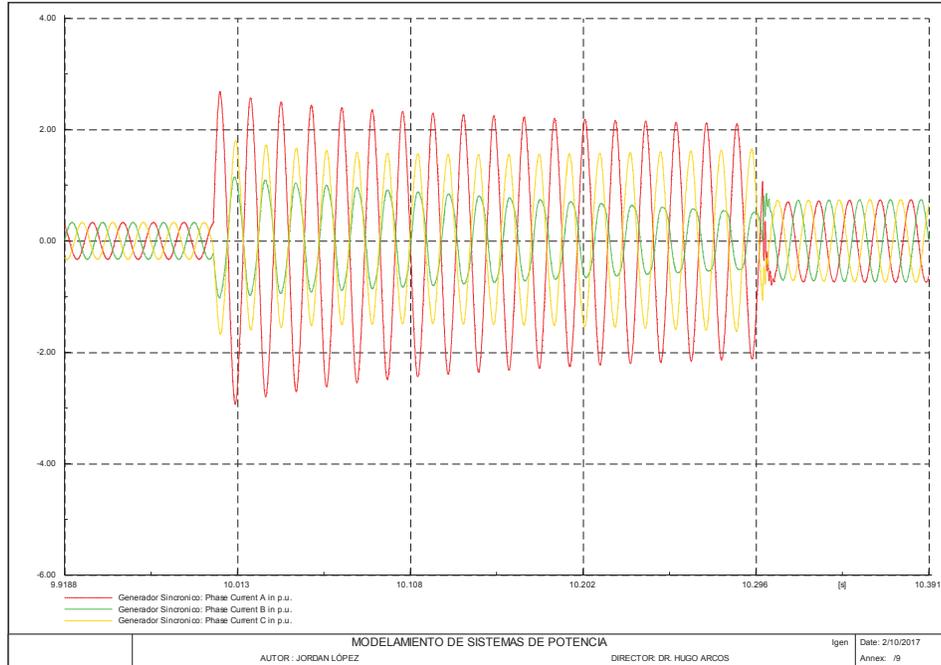


Figura 4.26 Gráfico de corriente de fase – Modelo Programa Comercial

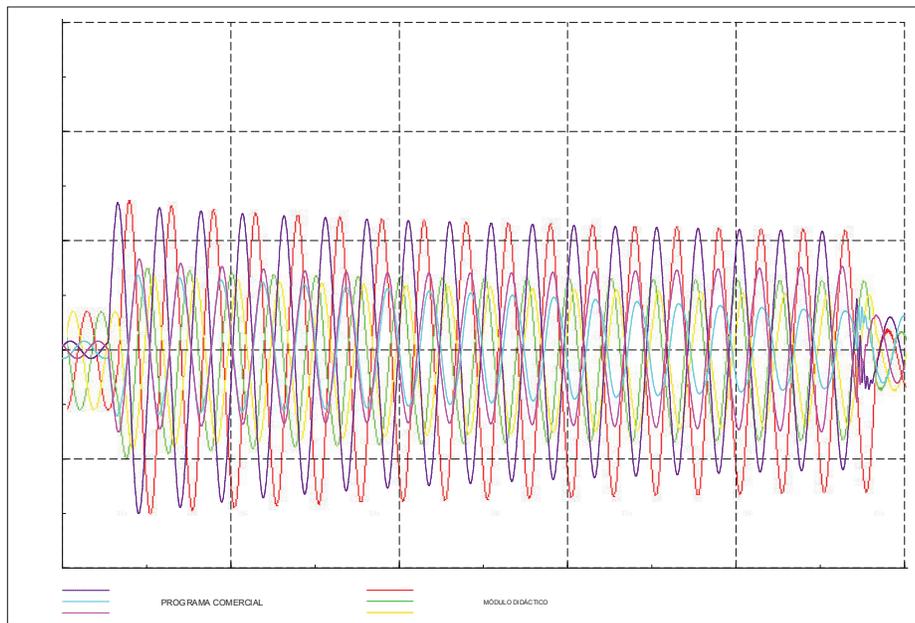


Figura 4.27 Gráfico comparativo de las corrientes de fase entre los programas computacionales

Para las corrientes del generador se tiene un comportamiento sinusoidal sin alteraciones de las tres fases antes del cortocircuito producido en el sistema, y se puede apreciar que pese al ser solamente una fase altera por una falla a tierra, las otras dos igualmente sufren variaciones en su comportamiento, como es evidente en la figura 4.25 y 4.26.

Para la figura 4.27, donde se realiza la comparación de los resultados se tiene en el instante de despeje de falla una ligera perturbación en la fase A, fase de falla, y para el análisis transitorio del generador se aprecia el aumento de las corrientes del mismo, el cual puede afectar al aislamiento o elementos rotativos.

4.3.6. TORQUE ELÉCTRICO

Representa el torque eléctrico del generador sincrónico afectado por el cortocircuito del sistema, además de la toma de carga y la perturbación del torque mecánico, en el módulo del rotor.

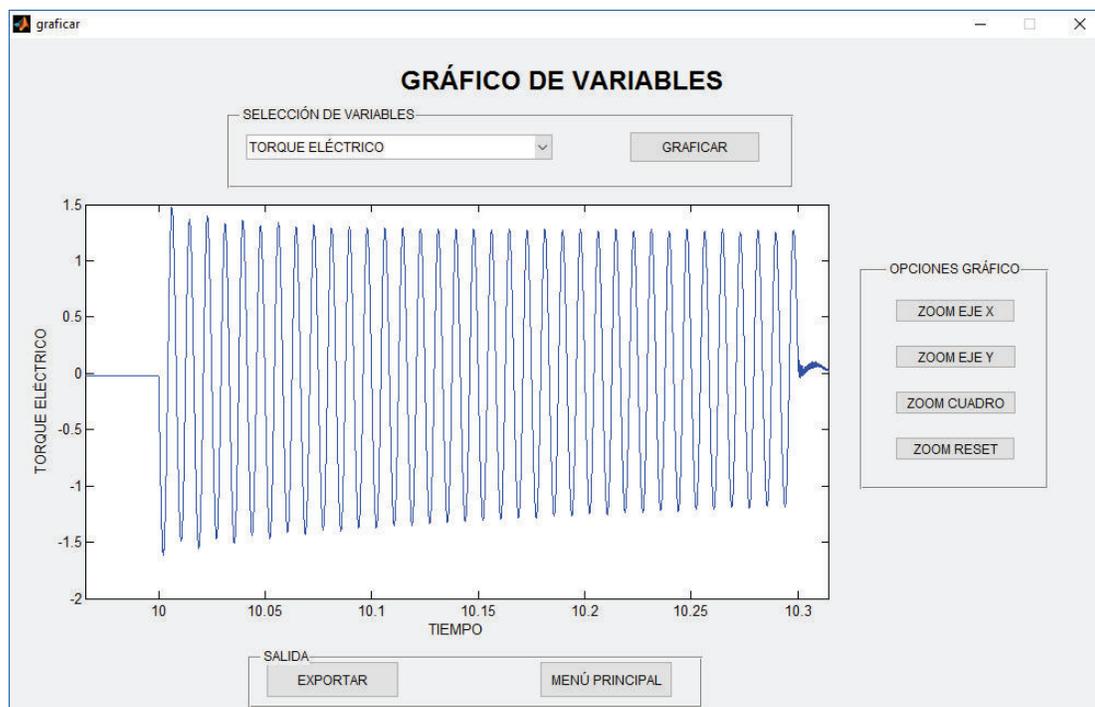


Figura 4.28 Gráfico de torque eléctrico – Módulo Didáctico

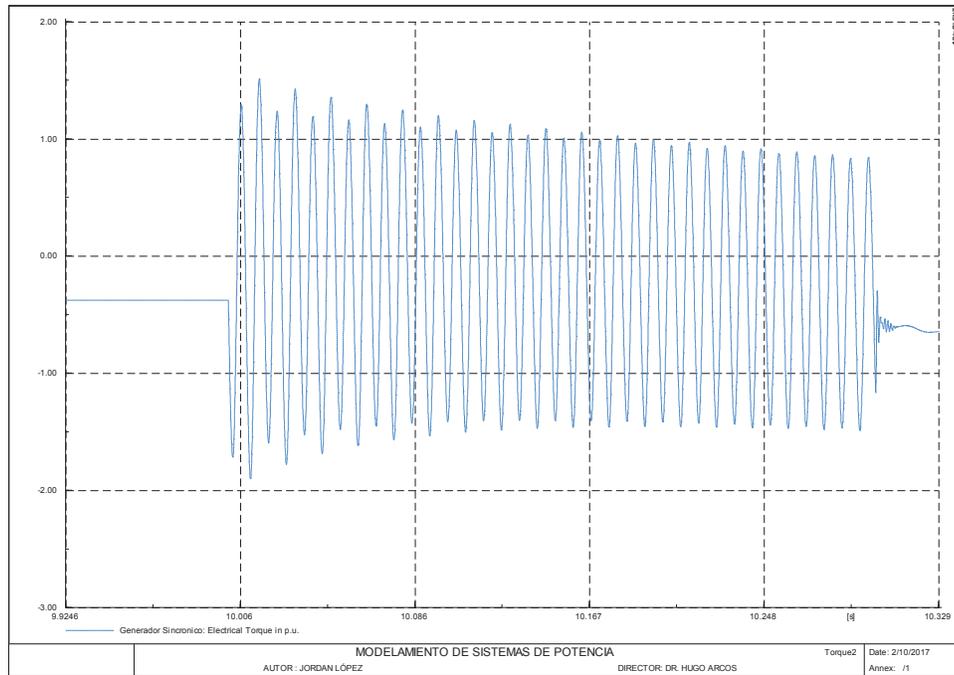


Figura 4.29 Gráfico de torque eléctrico – Modelo Programa Comercial

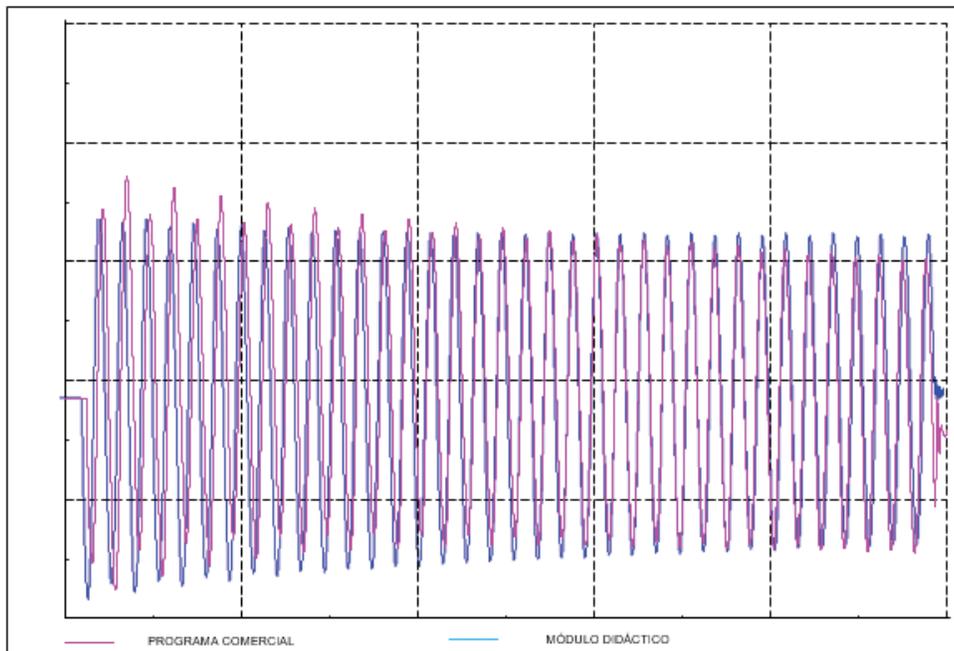


Figura 4.30 Gráfico comparativo del torque eléctrico entre los programas computacionales

Como se aprecia en la figura 4.28 y 4.29 se presenta una oscilación de esta variable durante la falla monofásica en el sistema.

Para la figura 4.30, se muestra un comportamiento exponencial por parte del torque, para los dos resultados comparados. Adicionalmente en ambos casos se muestra un ruido no significativo en el momento en el que se produce el despeje del cortocircuito, por el efecto mismo de que el sistema se estabilice.

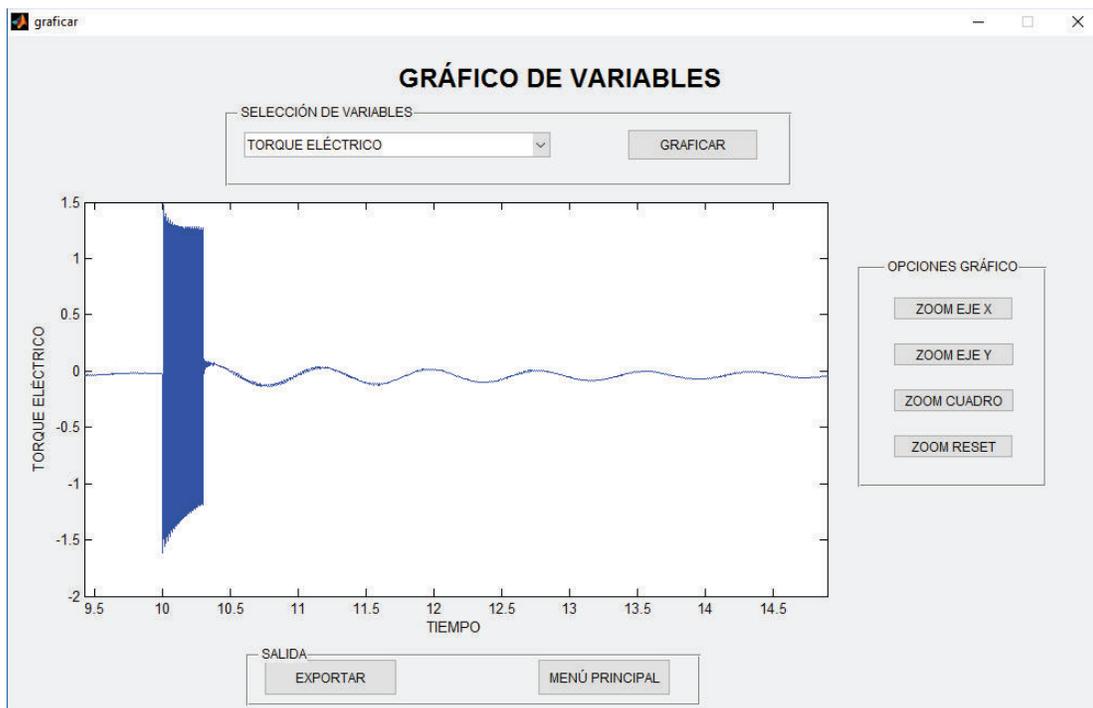


Figura 4.31 Gráfico de torque eléctrico en falla y posfalla – Módulo Didáctico

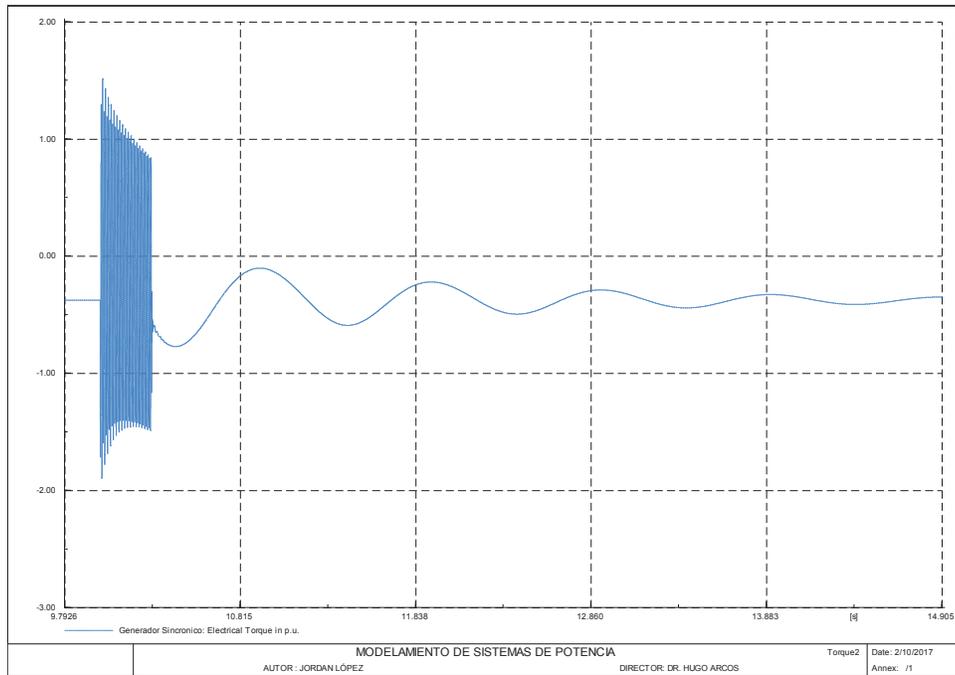


Figura 4.32 Gráfico de torque eléctrico en falla y posfalla – Modelo Programa Comercial

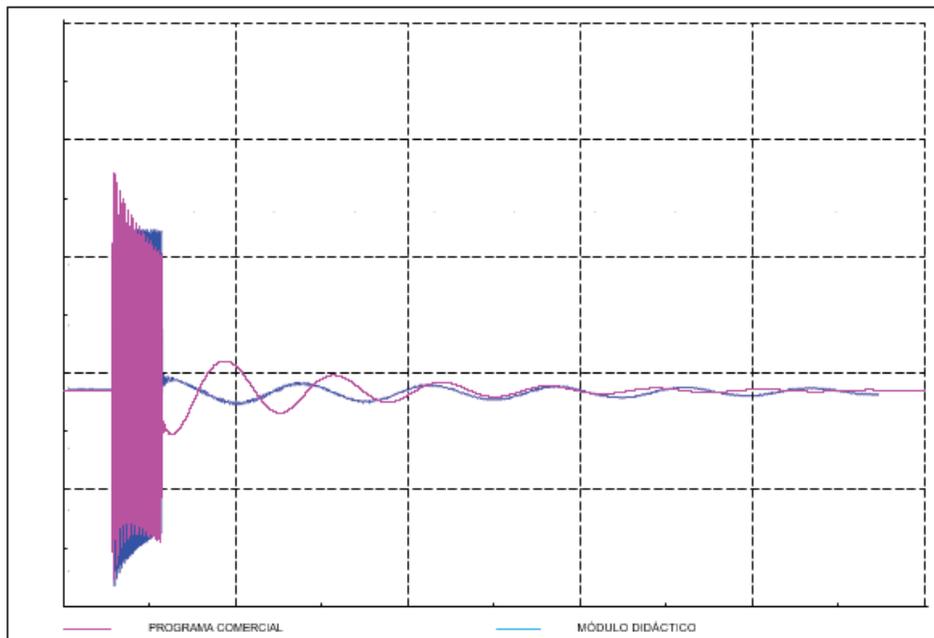


Figura 4.33 Gráfico comparativo del torque eléctrico en falla y posfalla entre los programas computacionales

Dependiendo de los parámetros establecidos en la barra de referencia se va a tener diferentes comportamientos del sistema para la estabilización una vez realizado el despeje de falla. Para los dos casos se tiene oscilaciones al estabilizar el sistema, en la figura 4.33 se observa que el software comercial tiene picos más elevados en su estabilización que el módulo didáctico. Esto se debe a las condiciones propias de modelamiento de los componentes, pero en el tiempo ambos sistemas se estabilizan en periodos de tiempo similares.

4.3.7. POTENCIA ACTIVA DEL GENERADOR SINCRÓNICO

Se considera la potencia activa del generador sincrónico entregada a la carga, la cual se toma de los cálculos desarrollados en el módulo del estator de la sección 3.3.5.5.

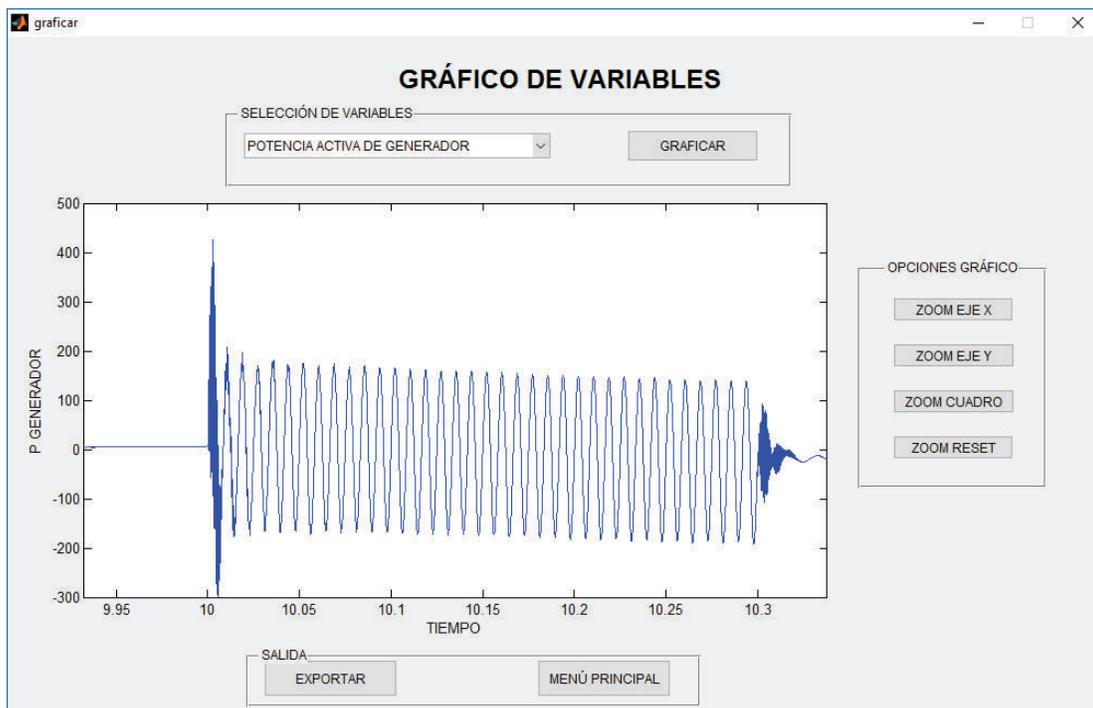


Figura 4.34 Gráfico de Potencia Activa de Generador Sincrónico – Módulo Didáctico

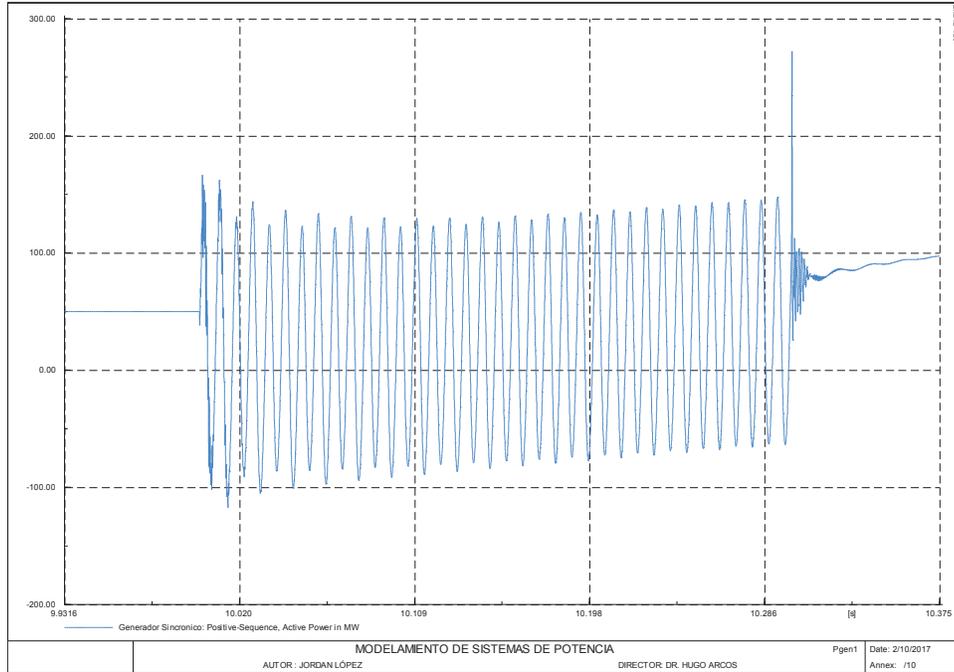


Figura 4.35 Gráfico de Potencia Activa de Generador Síncrono – Modelo Programa Comercial

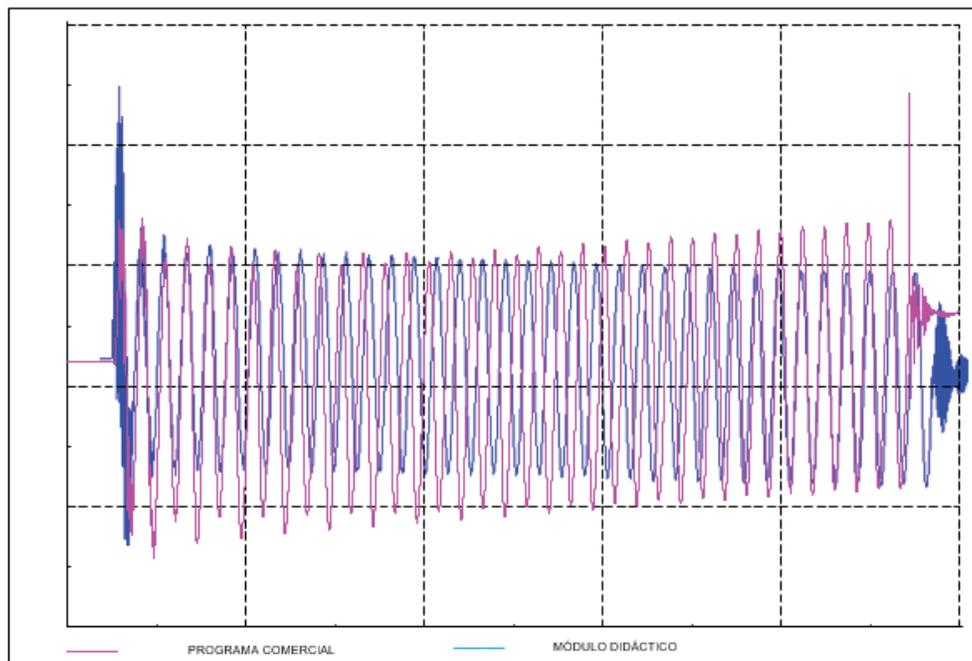


Figura 4.36 Gráfico comparativo de la potencia activa entre los programas computacionales

Para que se contemple un valor similar de potencia activa brindada por el generador antes de la falla monofásica se debe estipular el mismo valor de carga para ambas simulaciones.

Ya que el ingreso de estos valores en la herramienta desarrollada se lo realiza en términos de $R - L$ y en el software comercial en términos de $P - Q$, se han calculado los valores que cada modelo debe tener para su adecuada simulación.

Sin embargo el comportamiento es similar para ambos modelos como se tiene en la figura 4.36, mostrándose mayor ruido para los resultados del módulo didáctico en el momento de despeje de falla que en el programa comercial, debido a que el modelo tomado de [4] para el generador sincrónico es diferente al estipulado en el software comercial, y sin embargo brindan resultados semejantes.

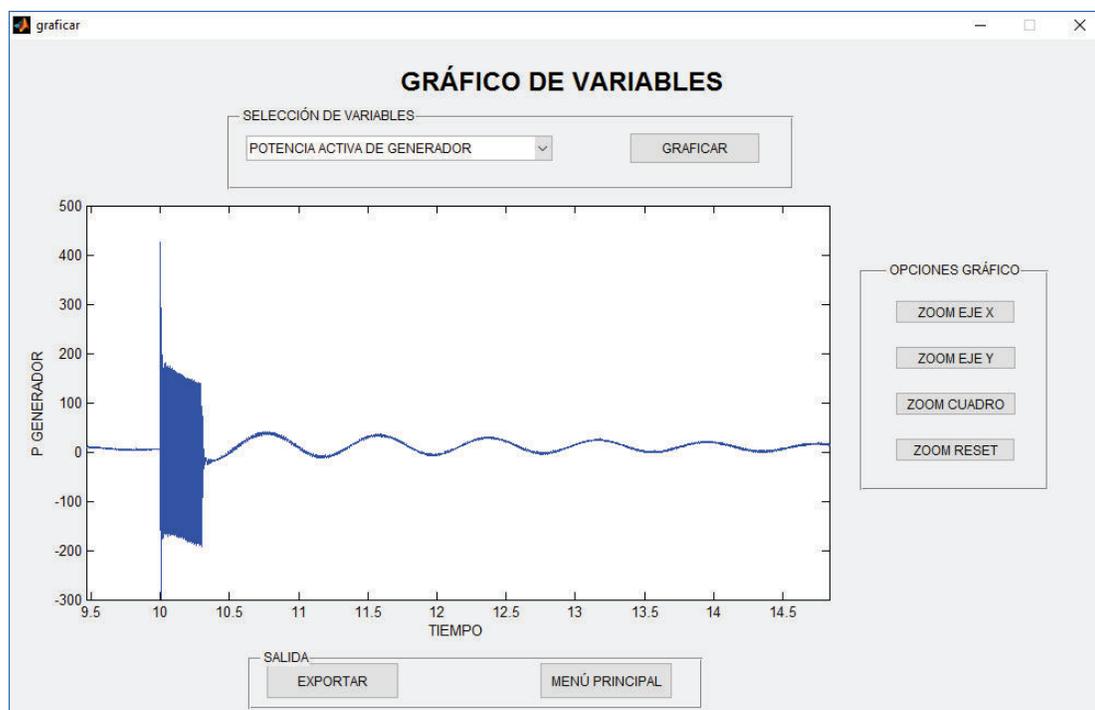


Figura 4.37 Gráfico de Potencia Activa de Generador Sincrónico eléctrico en falla y posfalla – Módulo Didáctico

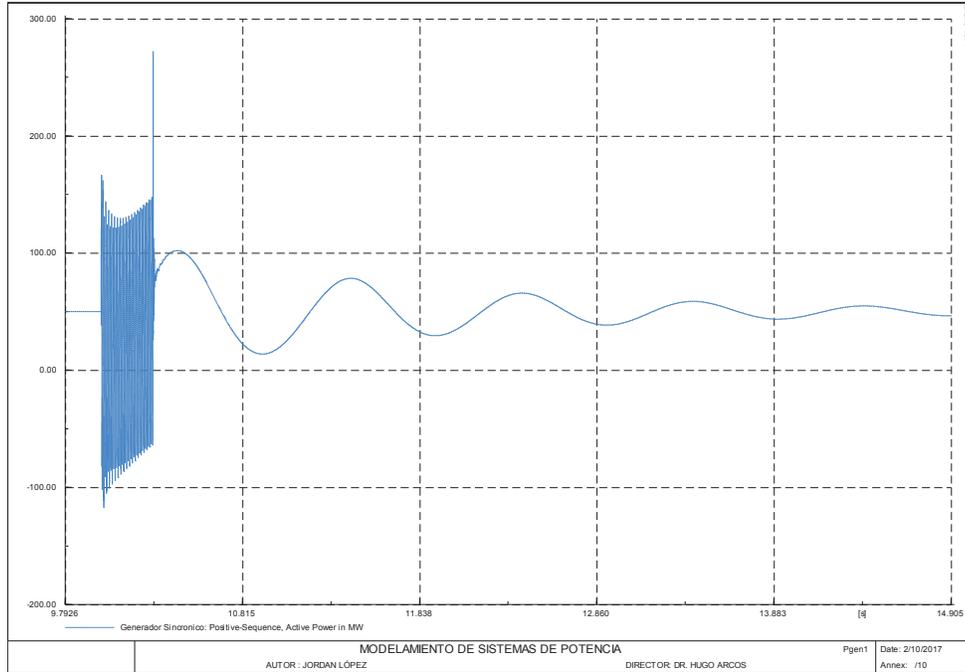


Figura 4.38 Gráfico de Potencia Activa de Generador Síncrono Modelo eléctrico en falla y posfalla – Modelo Programa Comercial

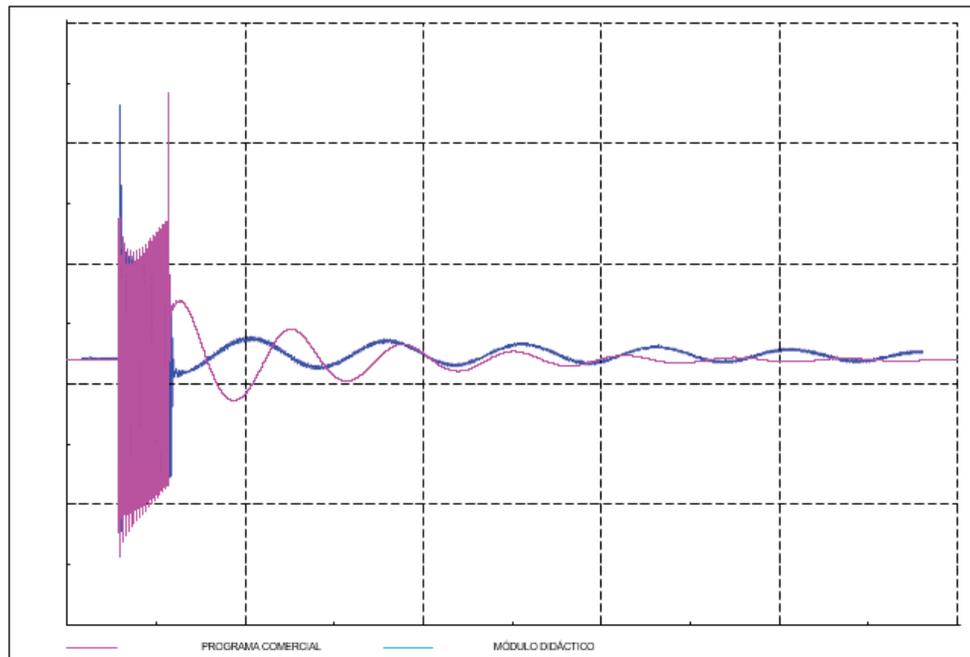


Figura 4.39 Gráfico comparativo de la potencia activa en falla y posfalla entre los programas computacionales

Para la estabilización del sistema, en la figura 4.39, se tiene mayores picos de ondas de oscilación en el software comercial que en módulo didáctico, pero su tiempo de estabilización en el sistema son similares, en ambos casos con la influencia de los sistemas de control.

4.3.8. POTENCIA REACTICA DEL GENERADOR SINCRÓNICO

Al igual que en el caso 4.4.7 se muestra la potencia pero en este caso la reactiva del generador la cual se afecta tanto por la carga como por el torque mecánico inicial que se produce en el módulo qd_gen.

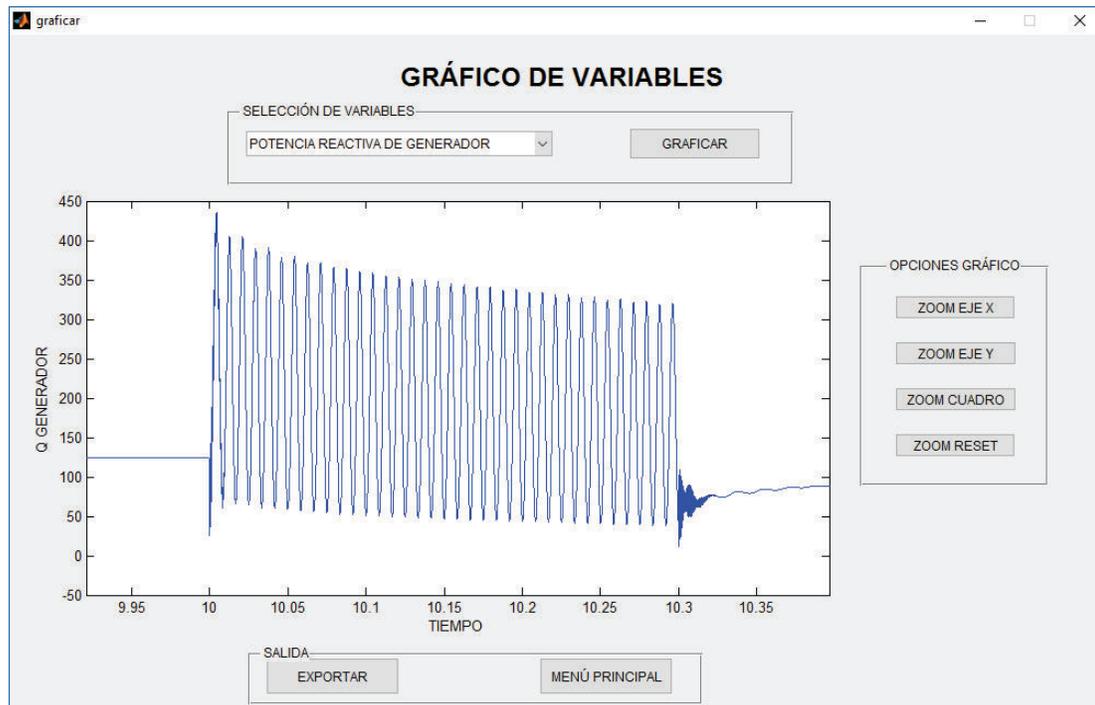


Figura 4.40 Gráfico de Potencia Reactiva de Generador Sincrónico – Módulo Didáctico

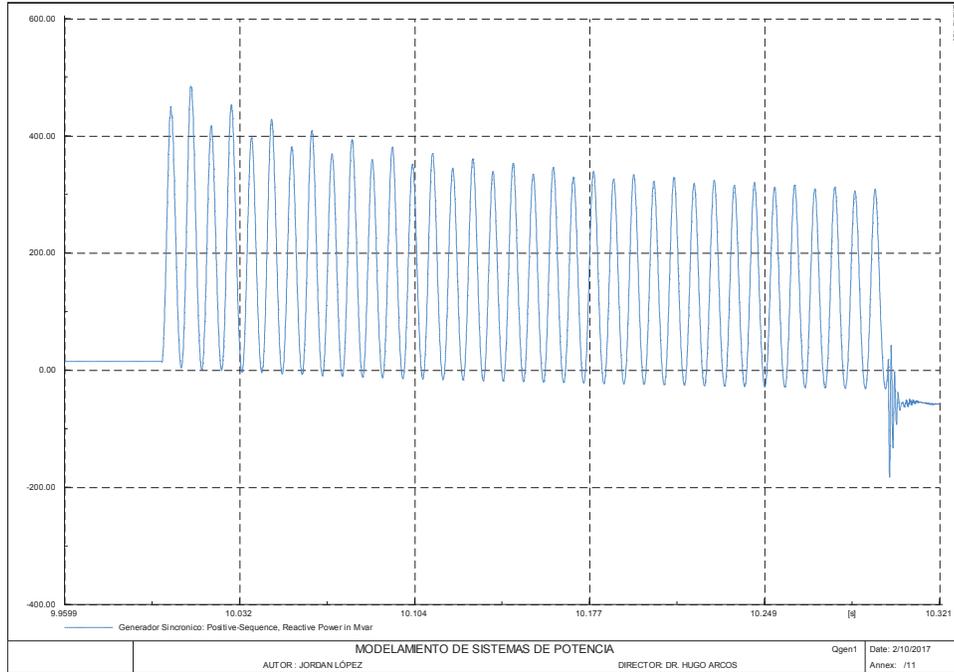


Figura 4.41 Gráfico de Potencia Reactiva de Generador Síncrono – Modelo Programa Comercial

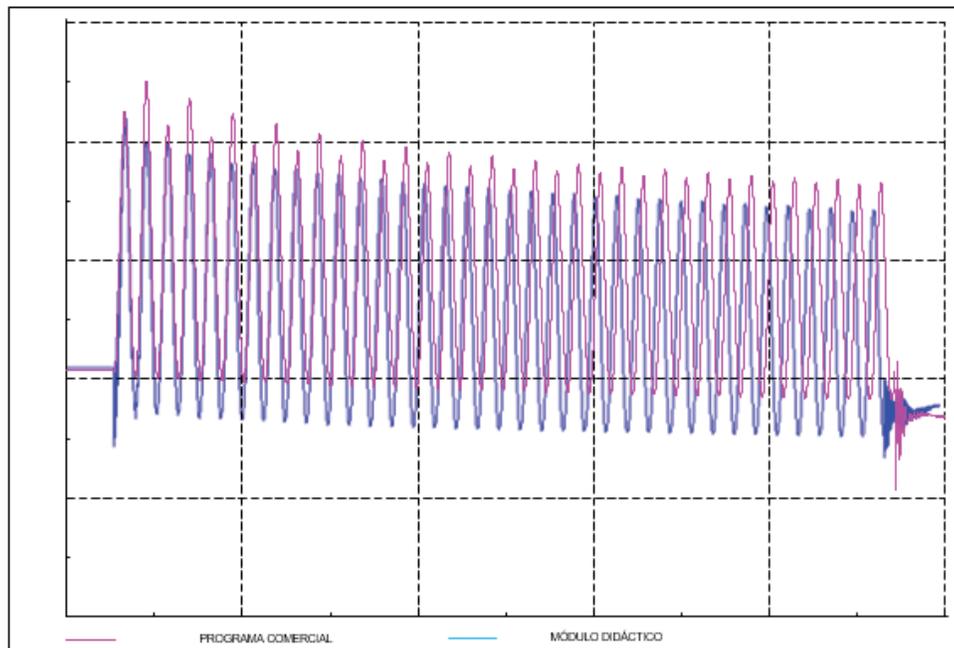


Figura 4.42 Gráfico comparativo de la potencia reactiva los programas computacionales

El comportamiento de ambos programas es similar, en su forma de onda, es decir un oscilatorio sin perturbaciones en el momento de falla. Siendo más notorio el ruido en el momento de despeje de falla. En la figura 4.42 se valores pico prácticamente de igual magnitud.

Para ambos casos tras haber transcurrido mayor tiempo en la falla el valor de picos se atenúa en magnitud, de una manera exponencial.

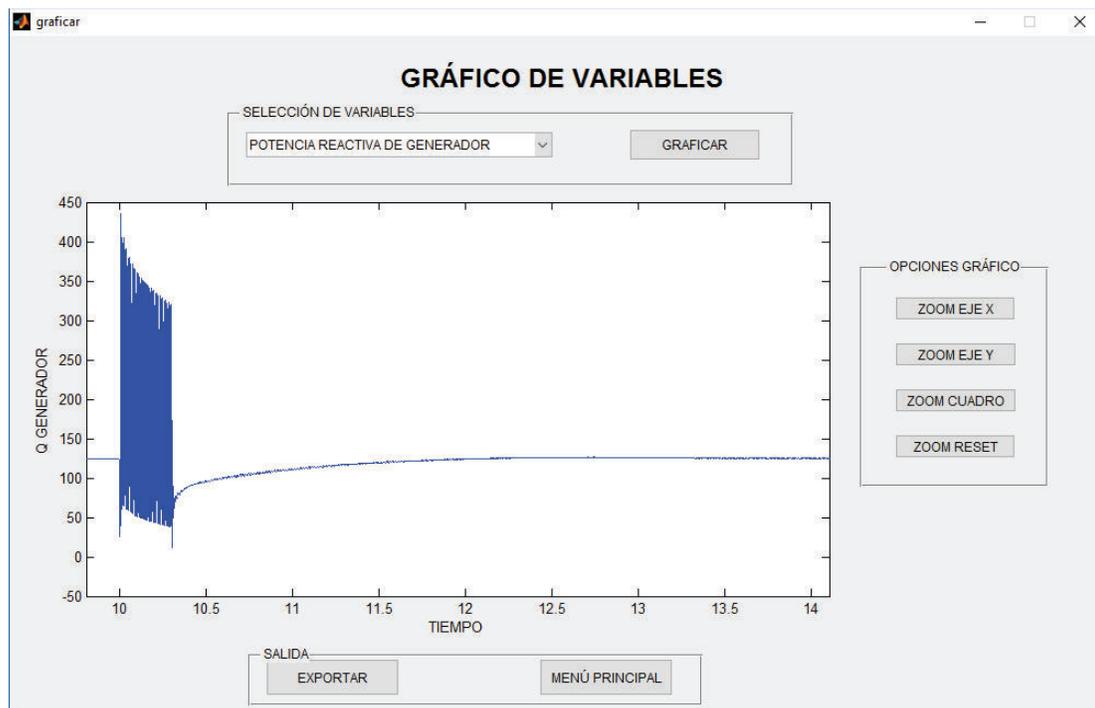


Figura 4.43 Gráfico de Potencia Reactiva de Generador Sincrónico en falla y posfalla– Módulo Didáctico

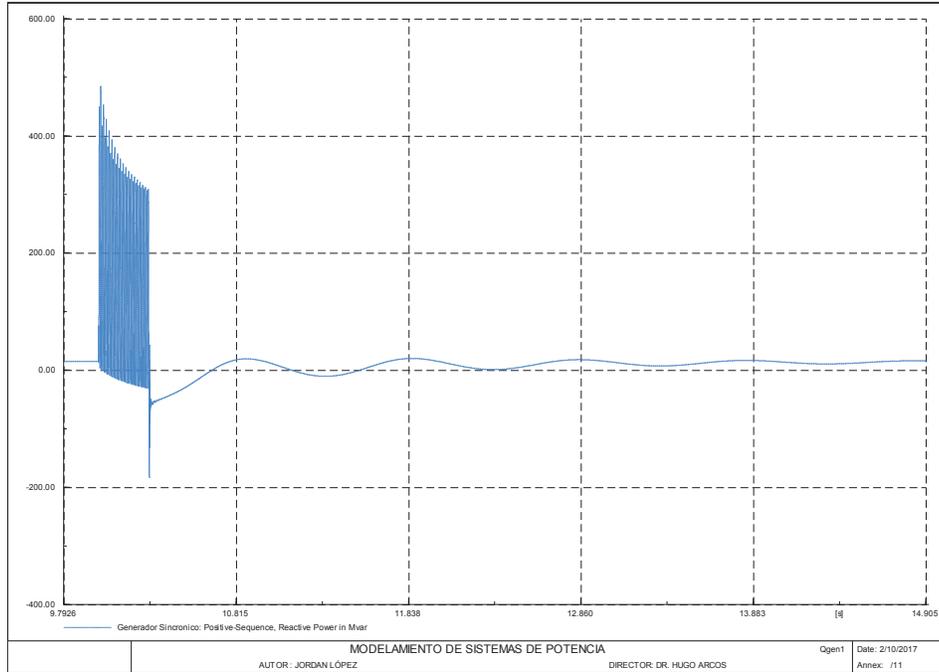


Figura 4.44 Gráfico de Potencia Reactiva de Generador Sincrónico en falla y posfalla – Modelo Programa Comercial

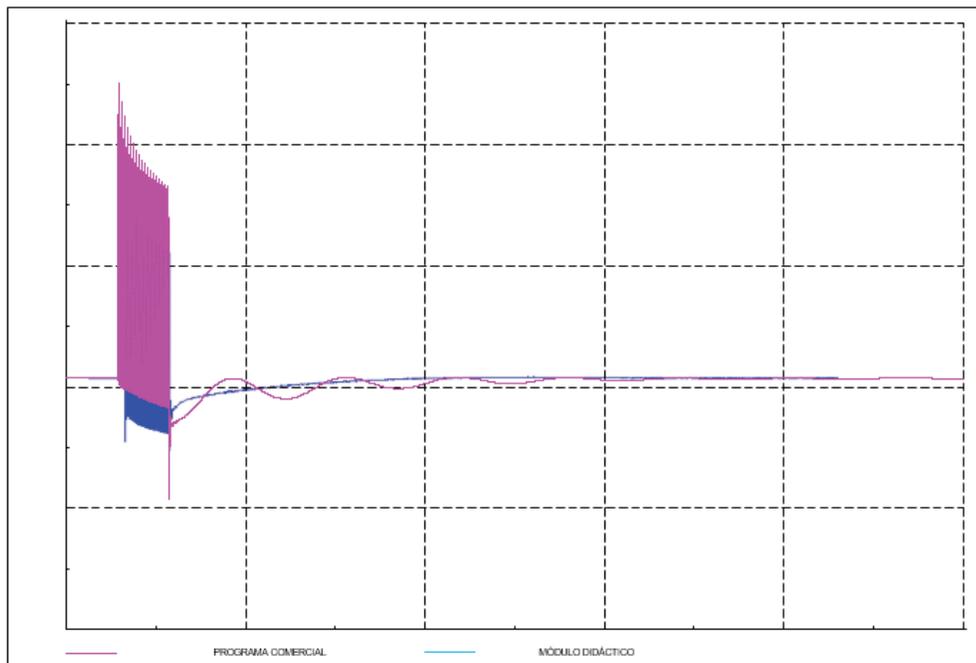


Figura 4.45 Gráfico comparativo de la potencia activa en falla y posfalla entre los programas computacionales

Desarrollando un análisis en el momento de la posfalla, los gráficos de potencia reactiva, la estabilización del generador se realiza posterior a ciertas oscilaciones, para los resultados del software comercial siendo un comportamiento más ideal para el módulo didáctico.

Como es evidente el software comercial y la herramienta desarrollada en el presente trabajo tienen comportamientos similares en su forma de onda. Al tener modelos diferentes en los sistemas establecidos se va a tener ciertas diferencias en los resultados pero estas no son remarcables de acuerdo al análisis antes realizado.

El ruido presentado en las simulaciones es aceptable debido a que se tiene una simulación en el tiempo a bajos niveles de frecuencia, y pueden existir alteraciones debido al almacenamiento de energía eléctrica y magnética en sus componentes.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- En torno al desarrollo de una herramienta computacional que involucre sistemas de potencia es necesario considerar todos los elementos a ser implementados y una correcta inicialización de cada uno de los componentes, para tener resultados acertados.
- De acuerdo al software que se utilice para implementar un modelo, se va a necesitar realizar cierto tipo de consideraciones, en el caso particular de MATLAB – Simulink se deben acoplar los pasos y tipo de simulación a ser empleada. No solo los parámetros matemáticos son importantes ya que al contrastar con un software comercial los resultados no serán comparables si se cuenta con iguales modelos pero diferentes parámetros de simulación.
- Los resultados obtenidos en el software desarrollado y el comercial se puede decir que tienen un comportamiento similar. Entendiendo de mejor manera el funcionamiento del software comercial, el cual se basa en desarrollar un sistema de potencia, según se lo requiera, parametrizando cada uno de sus componentes a través de una base de datos preestablecida en el sistema o a su vez se puede colocar los valores que el usuario desee. Donde los modelos de control ya se encuentran establecidos, con igual facultad de cambiar sus parámetros según convenga.
- Un factor trascendental a ser tomado en cuenta en el modelamiento de un sistema eléctrico es la integración de cada uno de los componentes que constituyen el caso de estudio, ya que se puede producir ruido al integrar todo el sistema en su mismo momento dando resultados equívocos. Esto se logró reducir de manera significativa al brindar lapsos de tiempo para que cada componente se acople al sistema y brindando a elementos como línea de transmisión y generador un voltaje de referencia para su operación en vacío.
- Un elemento importante a ser considerado en el modelamiento de un sistema de potencia es la barra de referencia, ya que de acuerdo a este

componente se tienen diversas condiciones de red, como la robustez del sistema frente a perturbaciones, puesto que al existir falla en el generador la barra de referencia puede alimentar a cargas del sistema sin que exista bajas de voltaje considerables. Además ayuda a la estabilización más rápida una vez que se despeja la falla.

- Como ha sido evidente durante el desarrollo de la herramienta computacional, el programa MATLAB – Simulink brinda grandes ventajas de ejecución y modelamiento, ya que permite realizar la programación necesaria para inicializar los elementos, crear una interfaz de usuario amigable y realizar simulaciones de transitorios electromagnéticos. Además de poseer un código de programación abierto para poder interactuar de mejor manera con cada componente modelado.
- El desarrollo y creación de este tipo de herramientas computacionales ayudan al usuario puesto que si bien se cuenta software comerciales que cumplen la misma función, estos son cajas negras que no muestran al ejecutor el modelo matemático que involucra el componente seleccionado y solamente se conocen los resultados sin llegar a apreciar los comportamientos individuales para cada caso. Es decir aquí se brinda acceso a la programación para conocer el funcionamiento en detalle.
- En lo concerniente a las comparaciones entre los dos programas se tiene un comportamiento similar, especialmente en el instante donde se produce la falla, radicando su principal diferencia en el tiempo que se demora cada uno en estabilizarse, siendo más apreciable este tiempo en el programa PowerFactory.
- La implementación de esta herramienta computacional es importante para el estudio y análisis de modelamiento de sistemas de potencia, y su comportamiento frente a transitorios electromagnéticos a través del desarrollo de ecuaciones diferenciales para cada componente y así poder desarrollar estudios de estabilidad. Es primordial también señalar que con los lapsos de tiempo colocados en el sistema se puede realizar el estudio de transitorio de sincronización de los elementos.

5.2. RECOMENDACIONES

- Antes de utilizar la herramienta de simulación de generadores sincrónicos se recomienda que el usuario tenga ciertos conocimientos en máquinas sincrónicas, análisis de sistemas en el dominio del tiempo y frecuencia y comportamiento en estado estable y dinámico de los sistemas de potencia.
- Para los análisis comparativos de los modelos desarrollados se recomienda asemejar la matemática con los programas comerciales para tener resultados equivalentes.
- Con lo desarrollado en la herramienta computacional se sugiere dar paso a trabajos futuros, es decir considerar otros sistemas de generación no convencionales como la eólica, sistemas de protecciones, o parametrización de otros componentes del sistema, etc.
- Para el desarrollo matemático de cada uno de los elementos es importante considerar el tipo de modelo a emplearse en cada uno de los componentes, para el respectivo cálculo de las variables eléctricas.
- No se recomienda realizar la simulación en desorden o tratar de ejecutar a través de variables almacenadas anteriormente, puesto que se pueden tomar valores erróneos y por ende dar paso a errores en simulación o resultados equívocos.
- No se recomienda desarrollar sistemas de potencia con gran cantidad de componentes ya que la herramienta computacional puede demorar su ejecución o inclusive no converger debido a la gran cantidad de variables involucradas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABAD, Torres, JOEL; (2006) Modelación global de unidades de generación del sistema nacional interconectado ecuatoriano y simulación de su comportamiento dinámico. Tesis de Ingeniería Eléctrica con especialización en Sistemas Eléctricos de Potencia, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- [2] VERDUGO, RIVADENEIRA, PABLO, XAVIER; (2012). Metodología de sintonización de parámetros del estabilizador del sistema de potencia (PSS) utilizando el programa computacional DIGSILENT POWER FACTORY, Tesis de Ingeniería Eléctrica con especialización en Sistemas Eléctricos de Potencia, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- [3] CHILES, PUMA, RÓMULO, ANDRÉS; (2010) Desarrollo de modelos dinámicos para las unidades de generación del sistema nacional interconectado ecuatoriano utilizando el software NEPLAN. Tesis de Ingeniería Eléctrica con especialización en Sistemas Eléctricos de Potencia y Dinámica de Máquinas, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- [4] ONG, Che-Mung. (1998). Dynamic Simulation of Electric Machinery. New Jersey, USA: Prentice Hall PTR.
- [5] KUNDUR, P. (1998) Power System Stability and Control. California, USA: McGraw-Hill.
- [6] KRAUSE, P. (1986) Analysis of Electric Machinery. California, USA: McGraw-Hill.
- [7] CAÑIZARES, C. (2006) Transmission lines and cables
Canadá: Lecture
- [8] IEEE COMMITTEE REPORT. Excitation systems models for power systems stability studies. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems.
- [9] IEEE TECHNICAL REPORT. Dynamic Models for Turbine-Governors in Power System Studies.
- [10] Hammer, A (2011). Analysis of IEEE Power System Stabilizer Models. Thesis of Master of Science in Electric Power Engineering. Norwegian University of Science and Technology. Trondheim Noruega.

- [11] HEIMISSON, B. (2014) Improved frequency control strategies for geothermal power plants. Master of Science Thesis. Chalmers University of Technology, Goteborg, Suecia
- [12] AGUIRRE, C. (2008) Estudios eléctricos de sistemas de potencia para la carrera de Ingeniería Eléctrica utilizando el software POWER FACTORY 13.1 DE DlgSILENT, Tesis de Ingeniería Eléctrica con especialización en Sistemas Eléctricos de Potencia. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- [13] GALÁN, S. (2011) Interfaz gráfica para la simulación de modelos dinámicos. Tesis de Ingeniería Técnica Industrial, Electricidad. Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España.
- [14] ZAMORA, E. (2012) Modelamiento dinámico de estabilidad a pequeña señal. Tesis de Ingeniería Civil Electricista, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- [15] GUASCH, L. (2006) Efectos de los huecos de tensión en las máquinas d inducción y en los transformadores trifásicos. Tesis Doctoral de Departamento de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Cataluña, Barcelona, España.
- [16] Mena, S. and Cañizares C. (2003) Modeling and Simulation of IEEE 14 bus System with facts controllers. Technical Report
- [17] Cañizares, C (2010) Transmission Lines and Cables. Presentation in Waterloo University. Ontario, Canada.
- [18] Cañizares, C (2012) Transformers. Presentation in Waterloo University. Ontario, Canada.
- [19] Cañizares, C (2012) Power System components and modeling. Presentation in Waterloo University. Ontario, Canada.
- [20] Anderson P. and Fouad A. (2003). Power System Control and Stability. USA: IEEE Press Power Mohamed E. El-Haway, Series Editor.
- [21] Fonseca A. and Valencia F. (2015). Simulación de la máquina sincrónica y su integración a sistemas de potencia para análisis de transitorios electromagnéticos. Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.
- [22] Gómez-Expósito A., Conejo A. and Cañizares (2009). Electric Energy Systems Analysis and Operation. Florida. USA: CRC Press.