

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Eléctrica y Computación**

MODELACIÓN, SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DE SISTEMAS DE  
CONTROL DE GENERADORES DEL SNI EMPLEANDO  
OPENMODELICA

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniería en Electricidad**

Presentado por:

Jennifer Melissa Ontano Portugal

Carla Patricia Parra Medina

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2018



## DEDICATORIA

El presente trabajo lo dedico con especial cariño a mi padre, Pedro Ontano, quien incondicionalmente me mostró su apoyo, siempre creyó en mi esfuerzo y en mis capacidades. Así también a todas las personas que han contribuido en mi formación profesional; docentes, ayudantes académicos, compañeros, personal vario de ESPOL quienes muchas veces se mostraron amigos. A mi madre, Carmen Portugal por su amor y sacrificio finalmente a mis hermanas, quienes han estado acompañándome durante este camino.

*Melissa Ontano*

Le dedico el presente trabajo a todas las personas que han formado parte de mi vida y han apoyado el esfuerzo de cada día, en el ámbito estudiantil, a mis padres, Fanny Medina y Juan Parra, por su ayuda y amor, a mi abuelita Fanny León por darme consejos de superación, a mis amigos más cercanos y compañeros con quienes he compartido gratos momentos y sobretodo a los maestros que me brindaron sus conocimientos.

*Carla Parra*



## **AGRADECIMIENTOS**

Queremos reconocer y agradecer la ayuda recibida por la Corporación CENACE, quienes nos permitieron usar sus conjuntos de datos, especialmente al Dr. Jaime Cepeda, Subgerente Nacional de Investigación y Desarrollo, el Ingeniero Pablo Verdugo, Ingeniero de Investigación y Desarrollo. Al ingeniero Andrés Pogo por su paciencia e incondicional ayuda durante este proceso, todo esto fue único e invaluable en el desarrollo de esta investigación. De igual manera queremos dar nuestros sinceros agradecimientos a la ESPOL, a cada uno de los maestros que fueron parte de nuestro proceso de formación profesional, especialmente al Dr Javier Urquiza quien con su ejemplo nos brindó siempre una formación integral no sólo en el campo técnico sino también ético, humano y de liderazgo. Nos brindó su constante apoyo en todos los proyectos que decidimos emprender, finalizando con su colaboración incondicional durante el desarrollo de este proyecto.



## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Carla Patricia Parra Medina* y *Jennifer Melissa Ontano Portugal* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



---

Carla Patricia Parra  
Medina



---

Jennifer Melissa Ontano  
Portugal



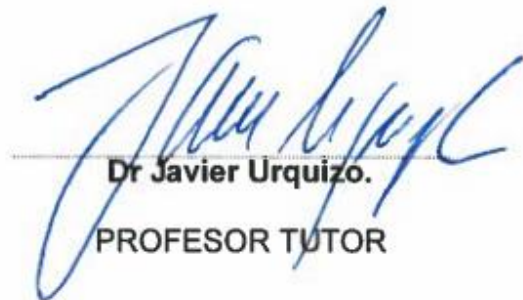


## EVALUADORES



PHD. Sixifo Falcones.

PROFESOR DE LA MATERIA



Dr. Javier Urquiza.

PROFESOR TUTOR



## RESUMEN

Este proyecto es realizado con el fin de exponer una modelación, simulación y validación de sistemas de control vía excitación, en generadores del sistema nacional interconectado (SNI), específicamente de la central hidroeléctrica Sopladora a través de un modelo equivalente en la barra de Sopladora 230 kV. El conjunto de datos utilizado fue proporcionado por especialistas del Operador Nacional de Electricidad CENACE, quienes han participado activamente en el desarrollo de este trabajo.

En busca de conseguir un sistema eléctrico óptimo, el tema de estabilidad se vuelve prioridad, requiere entonces de sistemas de control con configuraciones y parámetros óptimos, para conseguirlo es necesario realizar estudios previos que involucran simulaciones, el objetivo se centra en conseguir la mejor modelación del sistema real. Llevaremos el modelo del regulador de voltaje y estabilizador de potencia inicialmente simulado en un programa certificado y reconocido hacia el espacio de un programa de licencia libre, con programación dual (orientada a objetos y de tipo descriptiva) y con la posibilidad que el usuario modifique los modelos preestablecidos haciéndolos más simples o complejos de acuerdo a sus necesidades, cuenta también con la herramienta de exportar cualquier modelo a extensión .FMU (functional mockup unit), que es adaptable en otros espacios de simulación permitiéndonos construir sistemas híbridos. Se obtiene a través de este sistema equivalente la señal de voltaje en los terminales del generador y el voltaje de campo frente a una pequeña perturbación externa suficiente para excitar el modo oscilatorio, se validará la respuesta obtenida de los controladores, comparando las salidas de los dos programas a través del error cuadrático medio.

### **Palabras Clave:**

*Regulador automático de voltaje, Control de voltaje, Estabilidad transiente, Excitatriz, Generación de Potencia, Límites de seguridad dinámicos, Modos oscilatorios, OpenModelica, Sistemas de Potencia, Sistemas optimizadores de potencia, Reguladores, Simulación de sistemas dinámicos, Sistemas dinámicos de potencia, Transientes electromecánicos, Validación modelo a modelo.*



## **ABSTRACT**

This project is carried out with the purpose of exposing a modeling, simulation and validation of control systems via excitation, in generators of the national interconnected system (SNI), specifically Sopladora hydroelectric, through an equivalent model in Sopladora bus 230 kV. The data set used was provided by specialists of the National Electricity Operator CENACE, who have actively participated in the development of this work.

In order to achieve an optimal electrical system, stability becomes a priority, then requires control systems with optimal configurations and parameters, to get this it is necessary to develop previous studies that involve simulations, the objective is focused on approaching the best modeling of real system. We will take the model of the voltage regulator and power stabilizer system, initially simulated in a certified and recognized programa towards the interface of a free license programa, with dual programming (object oriented and descriptive type), with the possibility that user modifies the pre-established models making them simpler or more complex according to the needs but also the possibility to export any created model to extension .FMU (functional mockup unit), which is adaptable in other simulation interfaces allowing us to build hybrid systems. The voltage signal of generator terminals and the field voltage are obtained during a small external disturbance sufficient to excite the oscillatory mode is applied, the response obtained from the controllers will be validated, comparing the outputs of both programa calculating the mean square error (MSE).

### **Keywords:**

*Automatic voltage regulator, Voltage control, Transient stability, Exciter, Power generation, Dynamic safety limits, Oscillatory modes, OpenModelica, Power systems, Power system stabilizer, Regulators, Simulation, Dynamic power systems, electromechanical transients, Programa to programa.*



# TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	xi
ABSTRACT .....	xiii
TABLA DE CONTENIDO.....	xv
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xix
ÍNDICE DE TABLAS.....	xxi
LISTA DE ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS.....	xxiii
CAPÍTULO 1. Introducción .....	35
1.1 Contexto .....	29
1.1.1 <i>Elementos de un sistema de Potencia</i> .....	31
1.2 Descripción del problema .....	35
1.3 Justificación del problema .....	35
1.4 Detalles de la investigación .....	37
1.5 Visión en conjunto del documento que se ha escrito .....	38
1.6 Contribución al campo de los sistemas de potencia en el Ecuador.....	39
CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA .....	41
2.1 Introducción.....	43
2.2 Hidroeléctrica .....	43
2.2.1 <i>Partes principales de una hidroeléctrica</i> .....	43
2.2.2 <i>Hidroeléctrica Sopladora</i> .....	44
2.3 Estabilidad de un sistema de potencia .....	48
2.3.1 <i>Estabilidad del ángulo del rotor</i> .....	51
2.3.2 <i>Estabilidad de la frecuencia</i> .....	51
2.3.3 <i>Estabilidad del voltaje</i> .....	52
2.4 Unidades de generación.....	53
2.4.1 <i>Maquinas síncronas</i> .....	54
2.4.2 <i>Sistemas de excitación</i> .....	57

2.4.3 Regulador de Voltaje Automático (AVR, por su siglas en inglés) .....	58
2.4.4 Estabilizador de Sistema de Potencia .....	60
2.5 OpenModelica .....	62
2.5.1 Métodos de Integración .....	65
2.5.2 Librería IPSL .....	66
2.6 Error Cuadrático medio (MSE, mean squared error) .....	66
2.7 Trabajos relacionados con el estudio de estabilidad .....	67
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA .....	69
3.1 Introducción .....	71
3.2 Modelamiento del AVR .....	71
3.2.1 Análisis matemático para la inicialización del AVR .....	72
3.2.2 Modelamiento del AVR en OpenModelica .....	75
3.2.3 Modelamiento de bloque de voltaje de referencia .....	78
3.3 Modelamiento de PSS en OpenModelica .....	78
3.4 Sistema generador – barra – carga .....	81
3.4.1 Creación de generador sopladora .....	82
3.5 Creación y validación del sistema equivalente conectado a la barra Sopladora	
83	
3.5.1 San Bartolo .....	83
3.5.2 Transformadores .....	84
3.5.3 Líneas de transmisión .....	85
3.5.4 Barras infinitas .....	86
3.5.5 Validación de sistema equivalente .....	88
CAPÍTULO 4. RESULTADOS .....	90
4.1 introducción .....	92
4.2 Resultados de Validaciones de los controladores .....	92
4.2.1 Caso 1, Carga puramente resistiva .....	93
4.2.2 Caso 2, Carga resistiva inductiva .....	97
4.3 Resultados de la validación de AVR y PSS en Sistema Sopladora .....	102



CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN.....	112
5.1 Introducción.....	114
5.2 Datos de entrada del sistema.....	114
5.3 Procesos y validaciones en OpenModelica .....	115
5.4 Reconciliación con otros programas .....	117
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.....	118
6.1 Introducción.....	120
6.2 Recomendaciones para futuras investigaciones .....	122
APÉNDICES.....	125
A. Creación de un proyecto.....	127
B. Utilización de librerías .....	128
C. Ventana de trabajo .....	129
D. Modelación de sistemas.....	130
E. Creación de modelos.....	134
F. Compilación y Simulación de modelos .....	134
Referencias .....	137



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Circuito equivalente de un transformador .....	31
Figura 1.2 Circuito de Línea corta .....	33
Figura 1.3 Modelo $\pi$ .....	33
Figura 2.1a Diagrama unifilar del SNI. Fuente CENACE .....	45
Figura 2.2 Ubicación de la Hidroeléctrica Sopladora en el SIN .....	47
Figura 2.3 Ubicación de proyectos Hidroeléctricos en el tramo del Rio Paute ...	48
Figura 2.4 Clasificación de la Estabilidad de los sistemas de potencia .....	50
Figura 2.5 Diagrama de una unidad de generación de potencia .....	54
Figura 2.6 Circuitos de la máquina síncrona .....	56
Figura 2. 7 Rectificador controlado alimentado por el voltaje y la corriente del generador .....	58
Figura 2.8 Diagrama de bloque de excitación y sistema AVR .....	59
Figura 2.9 Diagrama de bloque del lazo de control suplementario del sistema AVR .....	61
Figura 2.10 Elementos de un PSS .....	62
Figura 2.11 Página principal del programa OpenModelica .....	65
Figura 3.1 Diagrama de bloques en Simulink .....	72
Figura 3.2 Diagrama de bloques en Simulink .....	72
Figura 3. 3 Diagrama creado en OpenModelica .....	76
Figura 3.4 Parámetros dentro de una función de transferencia .....	76
Figura 3.5 Text view del AVR sopladora – Parámetros e inicialización de bloques .....	77
Figura 3.6 Máscara del AVR Sopladora .....	77
Figura 3.7 Interfaz y código del voltaje de referencia .....	78
Figura 3.8 Diagrama de bloques de PSS en Simulink .....	79
Figura 3.9 Diagram View del PSS en OpenModelica .....	80
Figura 3.10 Interfaz de PSS en OpenModelica .....	80
Figura 3.11 Disposición de controles del generador .....	83
Figura 3.12 Parámetros de barra infinita .....	87

Figura 3.13 Parámetros de barra convencional después de impedancia interna	87
Figura 3.0.14 Parámetros de barra infinita .....	87
Figura 3.0.15 Parámetros de barra convencional después de impedancia interna .....	87
Figura 4.1 Sistema generador, barra y carga .....	92
Figura 4.2 Sistema de controladores en OpenModelica .....	93
Figura 4.3 Gráfica del voltaje de campo .....	94
Figura 4.4 Gráfica de voltaje en los terminales.....	95
Figura 4.5 Gráfica del voltaje de campo con PSS .....	96
Figura 4.6 Gráfica de voltaje en los terminales con PSS.....	96
Figura 4.7 Gráfica del voltaje de campo .....	97
Figura 4.8 Gráfica de voltaje en los terminales.....	98
Figura 4.9 Gráfica del voltaje de campo con PSS .....	99
Figura 4.10 Gráfica de voltaje en los terminales con PSS.....	99
Figura 4.11 Generadora de Sopladora añadida al SNI.....	103
Figura 4.12 Voltaje de Campo aplicado al Sistema SNI .....	104
Figura 4.13 Voltaje en los terminales aplicado al Sistema SNI.....	105
Figura 4.14 Voltaje de Campo aplicado al Sistema SNI .....	105
Figura 4.15 Voltaje en los terminales aplicado al Sistema SNI.....	106

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Parámetros de generadores Sopladora.....	81
Tabla 3.2 Perturbaciones de voltaje .....	82
Tabla 3.3 Casos de análisis para validación de AVR y PSS .....	82
Tabla 3.4 Parámetros de generadora San Bartolo .....	84
Tabla 3.5 Datos del transformador equivalente de Sopladora.....	85
Tabla 3.6 Datos del transformador equivalente de San Bartolo .....	85
Tabla 3.7 Parámetros de las líneas de transmisión.....	86
Tabla 4.1 Comparación de Validaciones entre OpenModelica y Simulink.....	101
Tabla 4.2 Resultados del ECM, de los diferentes escenarios de Simulación ....	102
Tabla 4.3 Resultados del ECM, de los diferentes escenarios de Simulación ....	107
Tabla 4.4 Comparación de Validaciones entre OpenModelica y Simulink con el pulso 2.....	108
Tabla 4.5 Resumen de proceso de las simulaciones .....	110



## LISTA DE ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

AVR	Automatic Voltage Regulator
AC	Alternating current
CELEC EP	Corporación Eléctrica del Ecuador
CENACE	Centro Nacional de Control de Energía
DC	Direct Current
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FIEC	Facultad de Ingeniería Eléctrica y Computación
FMI	Functional Mock-up Interface
FMU	Functional Mock-up Unit
GS	Generador Síncrono
LT	Línea de Transmisión
MSE	Mean Squared Error
PSAT	Power System Analysis toolbox
PSS	Power System Stabilizer
SMIB	Single Machine Infinite
SNI	Sistema Nacional de Interconectado
SNT	Sistema Nacional de Transmisión
SR	Anillos Colectores
TC	Transformador de Corriente
TE	Transformador de Excitación









# **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

---

# Capítulo 1. Introducción

---

1.1	Contexto .....	29
1.1.1	<i>Elementos de un sistema de Potencia</i> .....	31
1.2	Descripción del problema .....	35
1.3	Justificación del problema .....	35
1.4	Detalles de la investigación .....	37
1.5	Visión en conjunto del documento que se ha escrito.....	38
1.6	Contribución al campo de los sistemas de potencia en el Ecuador.....	39

## 1.1 Contexto

El presente trabajo pretende realizar la simulación de controlares de generación vía excitación aplicados a la central hidroeléctrica Sopladora, utilizando el programa OpenModelica y comparar los resultados con estudios anteriores de este año usando la herramienta Matlab/Simulink. (Vargas, 2018).

El presente capítulo describe la descripción del problema, los objetivos, preguntas de investigación, la estructura en capítulos de la tesis, y lo que consideramos una contribución a los sistemas eléctricos de potencia en el Ecuador. La narrativa inicia con la justificación del uso de las centrales hidroeléctricas como soporte de la economía. Además de ser un sostén a las actividades productivas y a la economía, se espera que su operación sea eficiente en todas sus etapas, desde la generación hasta su consumo. Para poder contar con esa eficiencia necesaria, el sistema eléctrico de potencia debe poseer la capacidad de mantener su estabilidad, es decir, su estado de equilibrio operativo, en condiciones de operación normal, y que luego de presentarse alguna perturbación, la máquina síncrona recupere su estado de equilibrio.

La estabilidad transitoria consiste en sobreponerse y mantener el sincronismo cuando hay perturbaciones de magnitud considerables (IEEE Power & Energy Society, 2007) mientras que la estabilidad oscilatoria depende de pequeñas señales, ya sea que haya un cambio de carga grande o pequeño, el generador se encontrará oscilando alrededor de su punto de operación hasta que alcance su estado estable, la primera depende de los pares de sincronización y la segunda de los pares de amortiguación, un Regulador Automático de Voltaje (AVR, por sus siglas en inglés) actúa para mejorar el coeficiente de sincronización pero puede llegar a reducir el coeficiente de amortiguamiento dependiendo de su ganancia, aquella reducción en amortiguación se compensa con un Estabilizador del Sistema de Potencia (PSS, por sus siglas en inglés) que actúa a través del regulador de tensión para proporcionar una señal extra y aumentar la amortiguación logrando estabilizar el sistema contra la inestabilidad oscilatoria. El AVR es un regulador automático de excitación el cual mantiene constante la tensión de salida de generador dentro de los rangos de carga y frecuencia establecidos. Mientras que

el PSS es el estabilizador del sistema de potencia utilizado como control suplementario al sistema de excitación el cual amortigua los efectos de las oscilaciones presentadas en las perturbaciones del sistema.

Volviendo al tema de estabilidad, las principales características en las cuales se debe considerar mantener la estabilidad son: el voltaje, la frecuencia y ángulo del rotor.

- La estabilidad en el voltaje trata de mantener los valores de voltaje constantes en todas las barras del sistema, una pérdida de estabilidad en interrupciones en cadena debido a pérdidas de carga, o disparos en equipos de protección.
- La estabilidad de frecuencia es la capacidad de mantener sus valores constantes después de un desequilibrio entre la generación y la carga, debido a una pérdida de carga.
- La estabilidad del ángulo de rotor es la capacidad de máquinas síncronas interconectadas a un sistema de potencia de permanecer en sincronismo luego de ser sometidas a una perturbación, el desequilibrio en este caso se da entre el par electromagnético y el par mecánico de cada una de las máquinas síncronas.
- El capítulo consta de tres secciones. La Sección 1.1. el contexto principal, la Sección 1.2 describe el problema, la Sección 1.3 la justificación del problema, la Sección 1.4 con lleva los detalles de la investigación, la Sección 1.5 una visión en conjunto del documento y finaliza con la Sección 1.6 la contribución al campo de los sistemas de potencia en el Ecuador.

Los sistemas de potencia son los que se ocupan del proceso de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, hasta llevar este servicio a un consumidor final ya sea un usuario residencial o un usuario industrial. Es una base vital para el desarrollo de una sociedad, y su correcta operación tiene el objetivo de cumplir los estándares más altos de confiabilidad, obtener el menor costo de operación y un factor actualmente muy importante que es realizarlo con el menor impacto ambiental. (Alcantar, 2014)

### 1.1.1 Elementos de un sistema de Potencia

En esta sección se describe como está formado un Sistema de Potencia, nombrando los elementos principales constitutivos.

#### a. Generador

El generador síncrono conocido como alternador es la maquina fundamental en todo sistema de potencia, transforma la energía mecánica proporcionada por una turbina en energía eléctrica.

#### b. Transformador

Dispositivo simple, robusto y eficaz, puede ser elevador o reductor de potencia, juega un papel importante entre la generación y transporte de la corriente alterna. Como se muestra en la Figura 1.1 muestra el circuito equivalente de un transformador monofásico real con relación:

$$n = N_p/N_s \quad (1.1)$$

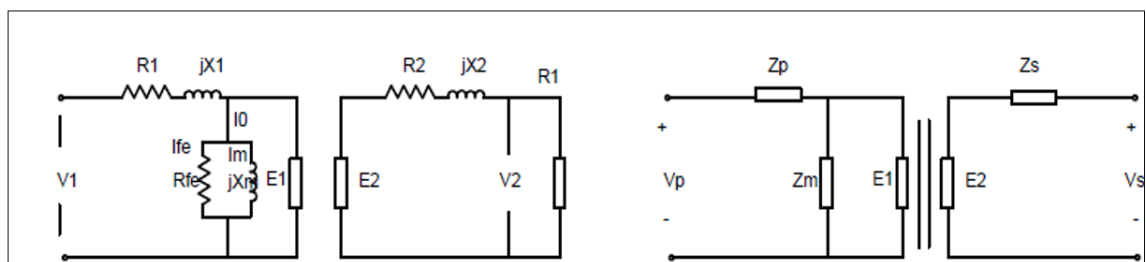


Figura 1.1 Circuito equivalente de un transformador

El transformador que se muestra en la Figura 1.1 consta de impedancias en serie  $Z_p$  y  $Z_s$ , las cuales modelan las pérdidas óhmicas de cada devanado y los flujos de dispersión,  $Z_p$  se compone por la resistencia del conductor primario  $R_1$ , y por la reactancia de dispersión  $X_1$ , así como también la impedancia de derivación  $Z_m$  cuya reactancia modela la corriente de magnetización en vacío, originada por la equivalencia de pérdidas en el entrehierro y corriente de magnetización.  $Z_s$  es la

resistencia del conductor secundario  $R_2$  Y la reactancia de dispersión  $X_2$ . Para obtener un transformador trifásico se interconectan tres bancos monofásicos o devanando tres pares de arrollamientos sobre otras columnas de un único núcleo magnético.

### c. Líneas de transmisión

Las Líneas de Transmisión (LT) por lo común operan con una carga trifásica balanceada; por lo tanto, el análisis puede hacerse sobre la base por fase. Una LT sobre la base por fase, se puede considerar como una red de dos puertos, donde la tensión en el extremo de envío  $V_S$  (voltaje de envío) y la corriente  $I_S$  (corriente de envío) están relacionados con la tensión y corriente en el extremo receptor  $V_R$  (voltaje de recepción), e  $I_R$  (corriente de recepción) mediante las constantes ABCD [3], como se muestra en la Ecuación 1.2.

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

Los diferentes modelos de líneas dependen de las distancias a la cual se quiere transmitir la energía, se consideran líneas cortas, medias y largas.

Para la línea corta se considera longitudes menores a los 80 km, con tensiones menor o igual a los 60 kV. En la Figura 1.2 se refleja el diagrama del modelo de línea corta, se constata que es un diagrama en serie, por lo cual las corrientes  $I_S$  e  $I_R$  es la misma.



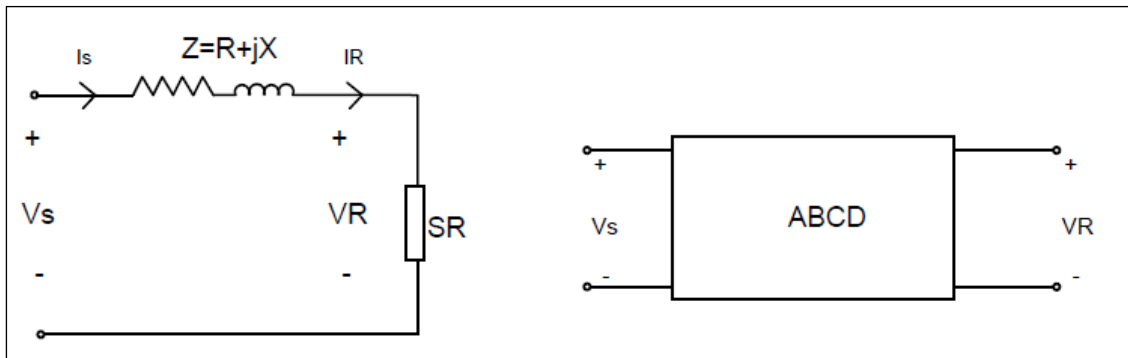


Figura 1.2 Circuito de Línea corta

El modelo matricial de línea corta reflejado en la Figura 1.2 indica sus constantes tal y como  $A=1$ ,  $B=Z$ ,  $C=0$  Y  $D=1$ . Por lo que las ecuaciones formadas a partir de la matriz (1.2) se obtienen las Ecuaciones 1.3 y 1.4:

$$V_S = AV_R + BI_R \quad (1.3)$$

$$I_S = CV_R + DI_R \quad (1.4)$$

Para una línea de longitud mayor a 80km, pero menor de 240 km, se considera línea media. Se utiliza la representación  $\pi$  como en la Figura 1.3 en la cual su capacitancia es dividida en dos partes iguales. (Eléctrica, 2017)

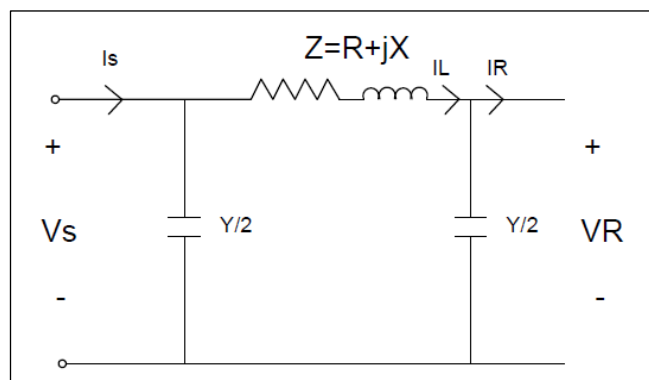


Figura 1.3 Modelo  $\pi$

Debido a su diferente diagrama el  $I_S$  y  $V_S$  cambian, con lo que se obtienen las Ecuaciones 1.5 a 1.9:

$$I_L = I_R + \frac{Y}{2} V_R \quad (1.5)$$

$$V_S = V_R + Z I_L \quad (1.6)$$

$$V_S = \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) V_R + Z I_R \quad (1.7)$$

$$I_S = I_L + \frac{Y}{2} V_S \quad (1.8)$$

$$I_S = Y \left(1 + \frac{ZY}{4}\right) V_R + \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) I_R \quad (1.9)$$

En este modelo se establece  $A = \left(1 + \frac{ZY}{2}\right)$ ,  $B = Z$ ,  $C = Y \left(1 + \frac{ZY}{4}\right)$ ,  $D = \left(1 + \frac{ZY}{2}\right)$ . Por lo que  $A = D$

$$\begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & -B \\ -C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

Las líneas de transmisión con longitudes mayores a 240 km son consideradas líneas largas, con las siguientes ecuaciones:

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{zy} \quad (1.11)$$

en aquella ecuación  $\alpha$  es la constante de atenuación y  $\beta$  la constante de fase.

$$z_c = \sqrt{\frac{Z}{y}} \quad (1.12)$$

Al considerar  $x=l$  para así obtener la corriente y el voltaje en el extremo del generador, se tiene

$$V_S = V_R \cosh \gamma l + I_R Z_C \sinh \gamma l \quad (1.13)$$

$$I_S = I_R \cosh \gamma l + \frac{V_R}{Z_C} \sinh \gamma l \quad (1.14)$$

Por lo que sus valores matriciales son  $A = \cosh \gamma l$ ,  $B = Z_C \sinh \gamma l$ ,  $C = \frac{1}{Z_C} \sinh \gamma l$  y  $D = A$ , su estructura igual que la matriz (1.2).

## **1.2 Descripción del problema**

En esta sección queremos dar a conocer el problema que se desea resolver en esta tesis. El Ecuador actualmente cuenta con un sistema eléctrico de potencia conformado por un anillo de transmisión el cual alimenta a todo el país, entre sus principales centrales de generación está la Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair, la Central Hidroeléctrica Paute, Central Hidroeléctrica Toachi Pilatón, Proyecto hidroeléctrico Minas de San Francisco, la Central Hidroeléctrica Sopladora, entre otras. Haciendo énfasis en la hidroeléctrica Sopladora, cabe mencionar que es una de centrales con mayor potencia instalada, construidas recientemente, utilizando los recursos del Rio Paute, ubicada luego de la central Paute-Molino, el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable indica que su potencia es de 487 MW y aporta anualmente 2.800 GWh al Sistema Nacional Interconectado. Siendo de gran importancia para el sector eléctrico, la estabilidad que introduzca al sistema debe ser optimizado.

## **1.3 Justificación del problema**

El Operador Nacional de Electricidad ha tenido la función de conseguir que el sistema nacional interconectado se mantenga confiable y operando sin interrupciones, para esto es necesario que la estabilidad del sistema de potencia se mantenga así mismo, dentro de los límites de seguridad dinámicos, siendo el método de sintonización de estabilizadores de potencia (PSS) el más viable, técnica y económicamente, CENACE ejecutó el estudio para desarrollo de la investigación y posteriormente implementación del mismo, en base a análisis previos se plantea que incluir estabilizadores de potencia bien sintonizados únicamente en las máquinas de mayor participación de modos oscilatorios es mejor que la intervención de todas las máquinas conectadas al sistema, (Armendáriz, et al., 2018) luego de estudio se analizó que quien aportaría con mayor transitorios electromecánicos frente a una perturbación es la central hidroeléctrica Coca Coda Sinclair, por tal razón en esta central se llevó a cabo la primera sintonización en campo del PSS en el mes de febrero del 2017 (Verdugo

& Cepeda, 2017) Siendo la segunda opción más viable, CENACE comienza con la planificación de sintonización en campo de PSS en la central hidroeléctrica Sopladora el 2 de abril del 2018, luego de la validación de parámetros en las tres unidades de la central, verificar que el comportamiento frente a pequeñas perturbaciones sea el deseado y probar diferentes escenarios de carga, el 18 de abril se declaró que la sintonización fue llevada a cabo con éxito.

En el Ecuador, se han realizado investigaciones desarrolladas en la interfaz de un simulador a tiempo real, de hecho, la verificación de la sintonización de los estabilizadores de potencia en las centrales hidroeléctricas Coca Codo Sinclair y Sopladora durante su etapa de desarrollo e investigación fueron llevadas a cabo mediante el módulo eMEGASim perteneciente a OPAL – RT Technologies y monitoreado por el Sistema de Supervisión de Área Extendida WAMS (Verdugo & Cepeda, s.f.), estas simulaciones se realizaron con un sistema equivalente de máquina conectado a barra infinita (SMIB: Single machine infinite bus) sin embargo este módulo del simulador es limitado respecto al número de barras que permite simular, además su interfaz solamente es compatible con Simulink, Simscape Power System. Basándonos en estas limitaciones, trasladamos el interés de desarrollo al módulo ePHASORSim, el cual forma parte de uno de los cuatro módulos del simulador de tiempo real pero su principal función es el análisis electromecánico, además tiene la capacidad de soportar una red de hasta 30.000 nodos y es compatible con ambientes como Simulink, Excel, PSS®E, CYME, Power Factory y OpenModelica (RT TECHNOLOGIES, 2018).

Destaca OpenModelica por su herramienta de exportar modelos FMU, dejando claro que esta extensión no es más que un documento comprimido que contiene archivos XML y código C compilado, (L. Vanfretti, 2004). Así facilita adaptar el modelo creado por el usuario en la interfaz de ePHASORSim (OpenModelica, 2018) y no sólo eso, sino que permite la creación de modelos híbridos, al permitir por ejemplo la inclusión de un bloque FMU en el interfaz de Simulink.

El desarrollo de este trabajo busca la aproximación a modelos exactos vía el software libre OpenModelica para contar con mejores estudios en el campo eléctrico del país, se desarrollará esta modelación para los controlares vía excitación de la central Sopladora.

#### 1.4 Detalles de la investigación

Los sistemas actuales y futuros de diferentes redes energéticas, con lleva el avance mediante diferentes programas que van de la mano. Es decir, las simulaciones y modelos que expresen una situación deben ser aprovechados por medio de estos recursos para poner en evidencia y análisis varios escenarios a suceder. Es por eso la elaboración de diferentes preguntas que se espera aclarar en esta investigación.

1. ¿Los programas actuales de simulación son suficientes?
2. ¿Cómo implementar OpenModelica y obtener resultados satisfactorios?
3. ¿Se puede implementar sistemas de control exactos en diferentes programas?
4. ¿Qué ventaja tiene OpenModelica frente a otros simuladores?

Los objetivos a donde se quiere llevar esta investigación, se encuentran a continuación:

1. Dar a conocer los antecedentes y el estado presente del problema que se quiere resolver.
2. Dar a exponer los conceptos utilizados, los tipos de estabilidad, así como una introducción a las maquinas síncronas, la operación de una central hidroeléctrica haciendo énfasis en las características de la cual vamos a desarrollar el análisis y su simulación de estabilizadores y por último el programa a utilizar.
3. Establecer las condiciones iniciales y de operación de la central Hidroeléctrica "Sopladora" y realizar análisis con aquellos datos para garantizar la correcta estabilidad del sistema.
4. Efectuar los estudios necesarios para llevar acabo la simulación de los estabilizadores de Potencia aplicados a la central hidroeléctrica Sopladora, utilizando el programa OpenModelica y compararlos con estudios anteriores mediante la herramienta Simulink.

5. Realizar un análisis de los resultados obtenidos y presentar las recomendaciones necesarias para la correcta implementación del sistema dentro del simulador digital de tiempo real del CENACE.

### **1.5 Visión en conjunto del documento que se ha escrito**

En este capítulo, se aborda la introducción al tema a desarrollar, el cual se centra específicamente a los temas de estabilidad y a los programas a utilizar para cumplir el propósito del proyecto, se describe la situación del problema y los distintos objetivos planteados para el trabajo y los diferentes capítulos presentados. En este capítulo se cumple el objetivo 1.

En el capítulo 2, se da una retroalimentación de temas básicos, así como los más puntuales, para facilitar el análisis y llevar a cabo el proyecto. Se da a una breve explicación sobre el tipo de generación eléctrica realizada que vino a ser de tipo Hidro, los conceptos de estabilidad con su clasificación, y el tema tratado sobre unidades de generación, que abarca lo referente a maquinas síncronas, sistemas de excitación y con los controladores que aplicaremos para manejar el tema de estabilidad. Otro punto de la fundamentación teórica se trata sobre el programa a utilizar OpenModelica, así como una guía básica que ayudo a comenzar a implementar el programa OpenModelica. En este capítulo se cumple el objetivo 2.

En el capítulo 3, se realiza el desarrollo de los modelos controladores, muestra los resultados de simulación y validación del AVR y PSS. Luego se requiere implementar aquellos controladores al sistema general, para obtener sus resultados y ser comparados con los obtenidos en Simulink. En este capítulo se cumple los objetivos 3.

En el capítulo 4, se muestra un análisis de resultados, detallando los casos presentes, hallando las respuestas a las simulaciones de los controladores y enfocando el análisis con el sistema SNI. En este capítulo se cumple el objetivo 4.

En el capítulo 5 se da una breve discusión a razón de los resultados obtenidos en el capítulo 4, y de la manera en cómo se llegó a esos resultados. Como se desarrolló el proceso y los datos necesarios de entrada y cuales se obtienes de salida. Este capítulo cumple el objetivo 5

En el capítulo 6, se dan unas breves conclusiones, siguiendo la estructura de los objetivos, y respondiendo a las preguntas de investigación generadas en el capítulo 1, también se generan las recomendaciones para futuras investigaciones.

### **1.6 Contribución al campo de los sistemas de potencia en el Ecuador**

El trabajo que se ha llevado a cabo dentro de esta tesis hará una importante contribución al campo de la investigación de los modelos de sistemas de potencia de varias maneras.

- La metodología empleada aumentará significativamente nuestra comprensión teórica de las interrelaciones complejas que existen.
- El hallar nuevas plataformas útiles para el estudio de Sistemas Eléctricos de Potencia con sus respectivos sistemas de control, con condiciones reales que faciliten el estudio de varios escenarios.
- Obtener el respaldo de diferentes pruebas y llegar a las mismas respuestas.





# **CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA**

---

## Capítulo 2. Revisión de la Literatura

---

2.1	Introducción.....	43
2.2	Hidroeléctrica.....	43
2.2.1	<i>Partes principales de una hidroeléctrica</i> .....	43
2.2.2	<i>Hidroeléctrica Sopladora</i> .....	44
2.3	Estabilidad de un sistema de potencia .....	48
2.3.1	<i>Estabilidad del ángulo del rotor</i> .....	51
2.3.2	<i>Estabilidad de la frecuencia</i> .....	51
2.3.3	<i>Estabilidad del voltaje</i> .....	52
2.4	Unidades de generación.....	53
2.4.1	<i>Maquinas síncronas</i> .....	54
2.4.2	<i>Sistemas de excitación</i> .....	57
2.4.3	<i>Regulador de Voltaje Automático (AVR, por su siglas en inglés)</i> .....	58
2.4.4	<i>Estabilizador de Sistema de Potencia</i> .....	60
2.5	OpenModelica .....	62
2.5.1	<i>Métodos de Integración</i> .....	65
2.5.2	<i>Librería IPSL</i> .....	66
2.6	Error Cuadrático medio (MSE, mean squared error) .....	66
2.7	Trabajos relacionados con el estudio de estabilidad .....	67

## 2.1 Introducción

En el siguiente capítulo se quiere dar a conocer los conceptos y la teoría utilizada e interpretada en la realización de la investigación para una mayor comprensión del lector. Las secciones en este capítulo son: la Sección 2.1 una breve introducción, Sección 2.2 lo que compone a una hidroeléctrica, se expondrá sus características principales, La Sección 2.3 trata sobre la estabilidad de un sistema de potencia, se hablará de las características y diferentes tipos de estabilidad, la Sección 2.4 las Unidades de generación, que abarca a las maquinas síncronas, y los sistemas de excitación, y los conceptos de los controladores a modelar, , la Sección 2.5 Open modélica, se expondrá el programa a ser utilizado para las simulaciones, la Sección 2.6 el tipo de cálculo de error, la Sección 2.7 Trabajos realizados, narra proyectos acerca de la estabilidad realizados con programas relacionados y por último la Sección 2.7 la cual trata de un manual básico que indica los primeros manejar de OpenModelica haciendo referencia a como se llegaron a obtener los primeros resultados.

## 2.2 Hidroeléctrica

Esta sección comprende acerca de las hidroeléctricas, se conoce que son las principales fuentes de generación de energía eléctrica del Ecuador, vienen a ser de gran importancia. Las hidroeléctricas son las principales fuentes de generación eléctrica del Ecuador, para aprovechar el recurso hidráulico es necesario un determinado caudal y un desnivel. El desnivel viene a ser la distancia medida en vertical que recorrerá la masa de agua, y el caudal es aquella masa de agua que fluye. Éstas definen las principales componentes que conforman una hidroeléctrica (ESHA, 2006).

### 2.2.1 Partes principales de una hidroeléctrica

En esta sección se describe las partes principales que conforma una Central Hidroeléctrica. Que son las descritas a continuación:

- a. La Presa: Permite obtener un nivel de agua para la producción de energía cinética, también se utilizan para aumentar el salto necesario, su construcción dependerá de las condiciones topográficas y geotécnicas de donde se encuentre ubicada.  
Las presas constan de aliviaderos, los cuales liberan una parte del agua detenida para así evitar causar daños al caer desde una gran altura.
- b. Tomas de agua: Estas permiten el ingreso del líquido para ser llevado por medio de las tuberías hasta las máquinas. Poseen compuertas para regular la cantidad de agua y rejillas que impiden el paso de impurezas o desechos. Generalmente se utiliza tuberías de presión hasta donde se ubican las turbinas
- c. Chimeneas de equilibrio: Evitan que se produzca sobrepresión en las tuberías y alabes de la turbina, los cuales provocan golpes de ariete, los cuales se originan por las fluctuaciones de presión al tener cambios bruscos de paso de agua, pudiendo originar daños severos en las tuberías.
- d. Casa de máquinas: En este lugar se ubican todas las máquinas que comprenden las turbinas , alternadores y elementos de control y regulación.

#### **2.2.2 Hidroeléctrica Sopladora**

En esta sección se expone la central hidroeléctrica a la cual le haremos énfasis en este trabajo, la cual se le hará los estudios de estabilidad correspondientes al proyecto.

Actualmente el Ecuador consta de una infraestructura eléctrica que es el Sistema Nacional de Transmisión (SNT), el cual posee diferentes niveles de voltaje, los cuales son 138Kv, 230Kv y 500Kv, con un total de 5.040 km de líneas de transmisión distribuido en todo el país. También consta de 61 subestaciones a nivel nacional con una capacidad instalada de transformación de 14.698 MVA incluyendo potencia de reserva (Celec, 2018). A continuación, se muestra en la Figura 2.1 el SNI del Ecuador.

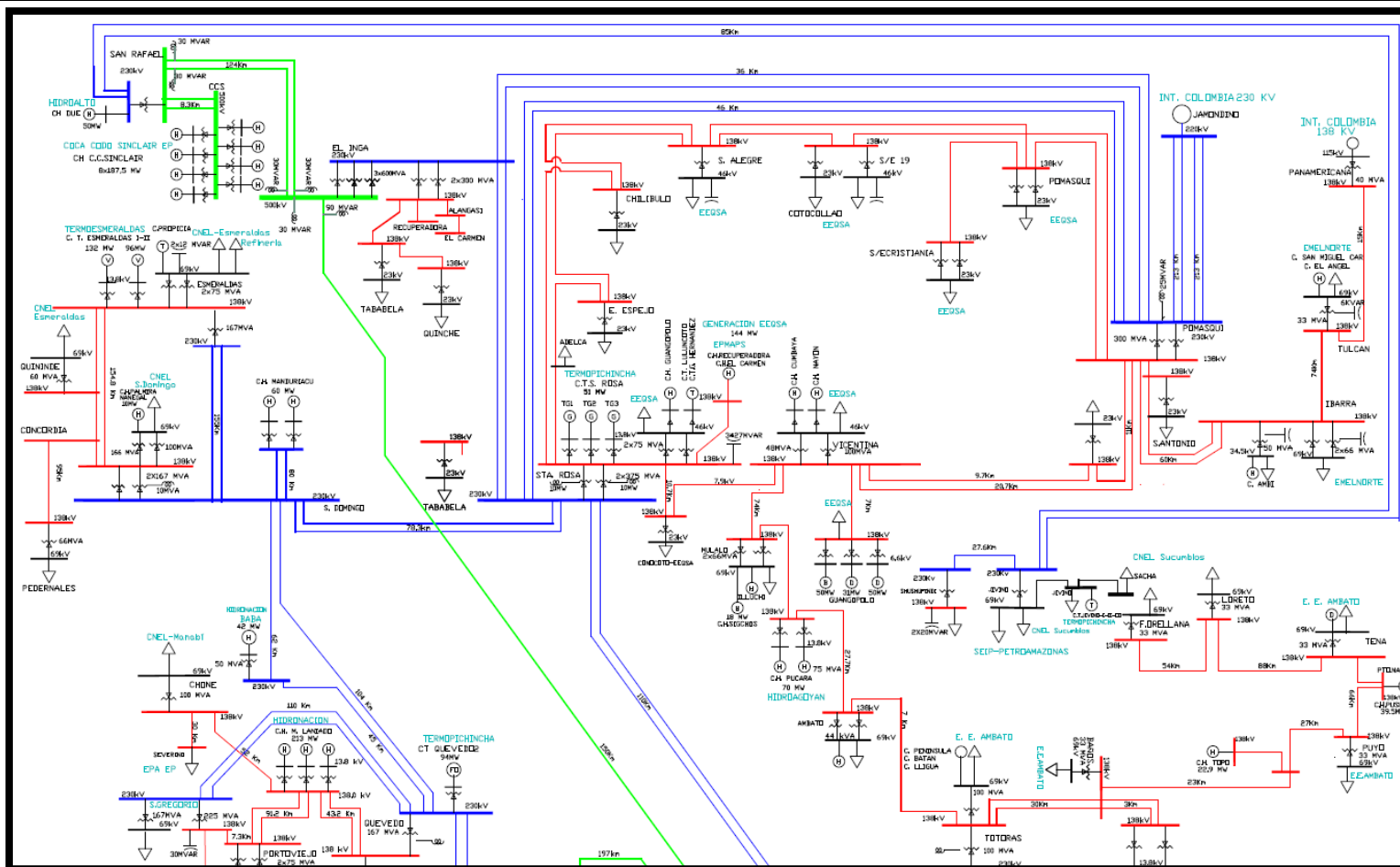


Figura 2.1a Diagrama unifilar del SNI. Fuente CENACE

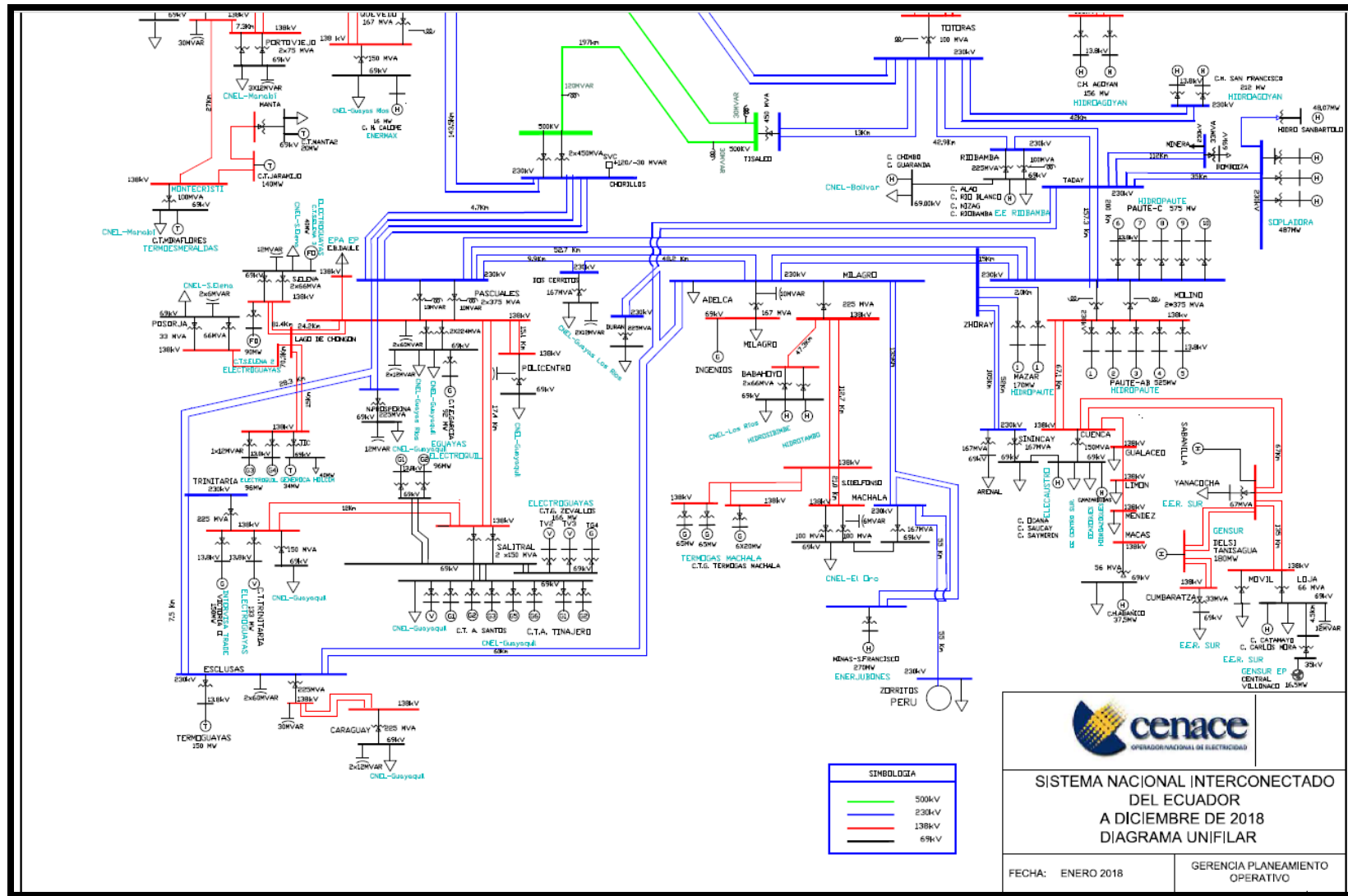


Figura 2.1b. Diagrama unifilar del SNI. Fuente CENACE

En la Figura 2.1 a y b (Unfilar, 2018), podemos observar todo el sistema interconectado, los diferentes niveles de voltaje se representan con los colores presentes, las líneas de 500Kv de color verde, nivel de voltaje de 230Kv de color azul, 138kV de color rojo y por último el nivel de voltaje de distribución 69Kv de color negro. Pero refiriéndonos a la central hidroeléctrica Sopladora, esta se encuentra en el sur del SNI.

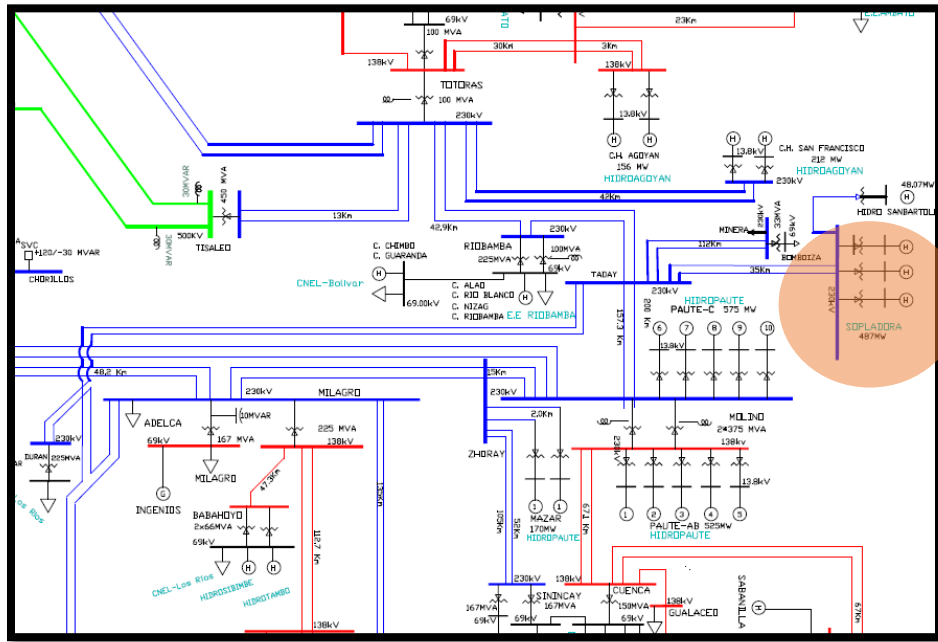


Figura 2.2 Ubicación de la Hidroeléctrica Sopladora en el SIN

En la Figura 2.2, se observa la Central Sopladora conectada al SNI, señalada en el círculo naranja, esta posee 3 turbinas con sus propios generadores, y llega a conectarse a la subestación Taray a un nivel de voltaje de 230kV. HidroPaute CELEC EP, ha generado distintos proyectos y la provisión de energía de fuentes renovables, la Hidroeléctrica Sopladora aprovecha las aguas salientes de las turbinas que ya generaron energía en la central Hidroeléctrica Mazar y la Central Hidroeléctrica Paute Molino.



Figura 2.3 Ubicación de proyectos Hidroeléctricos en el tramo del Rio Paute

Tal como se expone en la Figura 2.3 , las aguas que llegan a la Hidroeléctrica Sopladora llegan turbinadas, con una potencia instalada de 487MW, y se espera una producción anual de 2.800 GWh.

### 2.3 Estabilidad de un sistema de potencia

En esta sección daremos a conocer los conceptos básicos de estabilidad, se define como estabilidad a la propiedad de un sistema de potencia que, para poder permanecer en un estado de operación en equilibrio, bajo condiciones normales de operación y poder recuperar un estado de equilibrio aceptable luego de haber estado sometido a una perturbación (Kundur, 1994). Si las fuerzas que tienden a mantener a las máquinas en sincronismo entre sí son suficientes para superar las fuerzas perturbadoras, se considera que el sistema está en equilibrio (Saadat, 2010). El problema de la estabilidad usualmente ha sido el mantener la operación en sincronismo, pero también puede ser por el control del voltaje.

Kundur clasifica la estabilidad de un sistema de potencia según como se muestra de manera resumida en la Figura 2.4, identificando tres tipos de estabilidad: la estabilidad



del ángulo del rotor, la estabilidad de frecuencia y la estabilidad de voltaje. Estos tipos, son importantes desde el punto de vista de definición y clasificación de la estabilidad de los sistemas de potencia. Debido a que los sistemas de potencia son no lineales, su estabilidad dependerá de las condiciones iniciales y del tamaño de la perturbación. La estabilidad de sistemas de potencia y la seguridad de un sistema de potencia son términos muy relacionados, la seguridad viene a ser la habilidad de un sistema de potencia a sobrevivir posibles contingencias sin la necesidad de interrumpir el servicio. La estabilidad viene a ser un factor importante, pero la seguridad es un tema más amplio ya que abarca temas como la evaluación del estado de equilibrio desde el punto de vista de sobrecargas, caídas de voltaje y bajas de frecuencia.

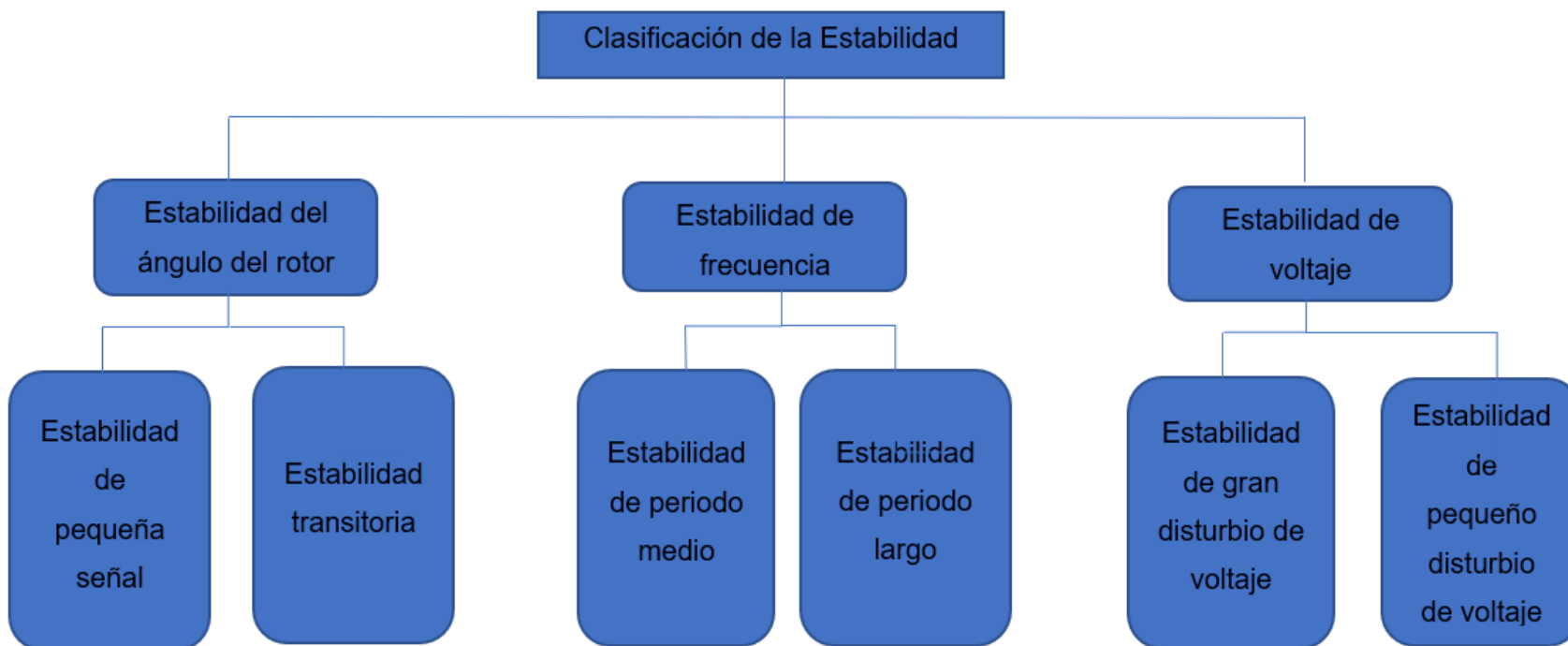


Figura 2.4 Clasificación de la Estabilidad de los sistemas de potencia

Para definir los tipos de clasificación que indica la

Figura 2.4, se describirá desde la Sección 2.3.1 hasta la Sección 2.3.3.

### ***2.3.1 Estabilidad del ángulo del rotor***

La estabilidad del ángulo del rotor es la capacidad de las máquinas síncronas de mantener sincronismo en un sistema de potencia interconectado luego de haber pasado por un disturbio. Todo depende de que el equilibrio entre el torque electromagnético y el torque mecánico de cada máquina síncrona pueda mantenerse o recuperarse en el sistema. (Kundur, 1994)

### ***2.3.2 Estabilidad de la frecuencia***

La estabilidad de frecuencia es la capacidad de restablecer la frecuencia en el sistema de potencia luego de una perturbación fuerte que provoca el pierde de balance entre generación y carga, con mínima pérdida de carga. (Kundur, 1994)

La pérdida de estabilidad de frecuencia usualmente es relacionada con una mala coordinación de protecciones, insuficientes sistemas de control o escasa reserva de generación. También depende mucho del tiempo como veremos en la sección 2.1.2.1 que es por periodo medio y la sección 2.1.2.2 por periodo largo.

#### ***a. Estabilidad Periodo medio***

En la estabilidad de periodo medio está enfocado en la sincronización de las oscilaciones de potencia entre las máquinas incluyendo efecto de fenómenos lentos y salidas de frecuencia. (Kundur, 1994)

#### ***b. Estabilidad Periodo largo***

En la estabilidad de periodo largo se refiere a que la sincronización de las oscilaciones

---

Inter máquinas poseen amortiguamiento dado por la frecuencia del sistema al ser fe forma uniforme.

Generalmente los problemas de estabilidad de periodo medio y largo son asociados con las malas respuestas de equipos, insuficiente coordinación de los equipos de control y protección. (Kundur, 1994)

### ***2.3.3 Estabilidad del voltaje***

La estabilidad del voltaje es cuando un sistema tiene la capacidad de sostener o mantener los voltajes de las barras de un sistema de manera estable después de presentarse ante él una perturbación. La inestabilidad puede provocarse si al menos una barra al tener inyección de potencia reactiva (Q) aumenta y su voltaje (v) baja, al contrario de las demás barras, en las cuales su sensibilidad entre V y Q es positiva para todas.

La pérdida de estabilidad del voltaje viene a ser muy significativa para un sistema eléctrico de potencia, su causa usualmente es la carga la cual, consume potencia, pero es restaurada por reguladores de voltaje de distribución, taps de transformadores y termostatos. (Kundur, 1994)

#### ***a. Estabilidad pequeño disturbio de voltaje***

La estabilidad de periodo medio es caracterizada por la carga, controles continuos y controles discretos para un tiempo determinado. Es una manera eficaz para determinar las características del voltaje en respuesta a cambios pequeños del sistema. Al suceder pequeñas perturbaciones que provocan una leve inestabilidad se considera que son de naturaleza de estado constante. En muchas ocasiones la inestabilidad de voltaje viene de la mano con la inestabilidad del ángulo, es importante reconocer cual condujo a cuál, para elaborar procedimientos para un adecuado funcionamiento. (Kundur, 1994)

---

***b. Estabilidad de Gran disturbio de voltaje***

El sistema tiene la capacidad de controlar voltajes luego de que ocurran grandes perturbaciones, tales como fallas del sistema, pérdida de generación, y contingencias de circuitos. La estabilidad dependerá de las características de la carga, y la manera de interacción con las protecciones y controles continuos y discretos. El análisis de estabilidad requiere de análisis de funcionamiento dinámico no lineal.

En esta sección se estableció los conceptos principales de estabilidad tales como indicó Kundur, los cuales son las bases de nuestro trabajo de investigación específicamente la estabilidad de voltaje de los controladores de excitación.

**2.4 Unidades de generación**

En esta sección se revisa la literatura que explica cómo un sistema de potencia adquiere la capacidad de generación y como interviene el generador síncrono en este proceso. Para comenzar se afirma que la energía eléctrica es producida mediante generadores síncronos conducidos por una fuerza motriz, usualmente viene a ser una turbina o una maquina a Diésel, Machowski afirma que aquella turbina gobierna la velocidad o la potencia de salida dependiendo de las características de potencia y frecuencia. La potencia generada es alimentada hacia la red de transmisión por medio del transformador de elevación, la corriente de excitación produce el campo magnético dentro del generador, que se realiza mediante la excitación.

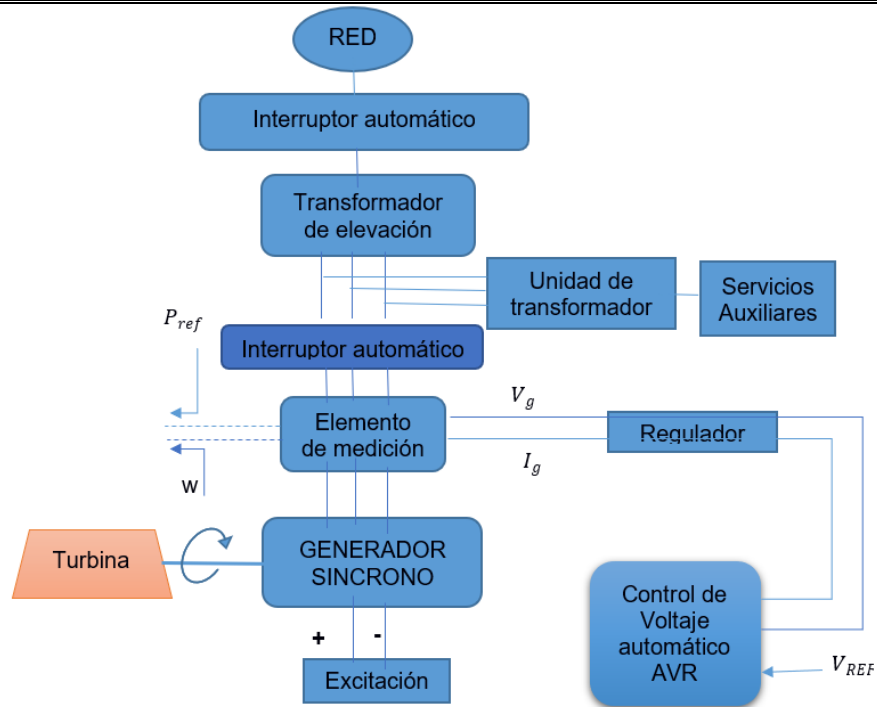


Figura 2.5 Diagrama de una unidad de generación de potencia

La

Figura 2.5, indica que la corriente de excitación, así como los voltajes en los terminales del generador es controlado por un Regulador Automático de Voltaje (AVR), también se observa la conexión de una unidad de transformador para ser utilizado con los servicios auxiliares esto sirve para aquellos servicios donde intervengan motores, a su vez un Interruptor automático principal en el lado de alto voltaje en caso de que se produzca una falla. Dentro de las unidades de generación descritas en la

Figura 2.5, tenemos que explicar acerca de las principales características que lo representan. Por lo que se definirá a las máquinas síncronas en la sección 2.3.1 y los sistemas de excitación que permiten controlar a aquel generador en la sección 2.3.2.

### 2.4.1 Maquinas síncronas

La estabilidad que se desea conseguir para el adecuado rendimiento de la central hidroeléctrica se basa en las condiciones de manifestación de la máquina síncrona.

Definiendo las características, las máquinas síncronas son máquinas eléctricas que poseen una velocidad de rotación, la cual, depende mucho de su frecuencia, mayormente utilizadas como manera de generador. (M, 2003)

Se conocen dos tipos principales de máquinas síncronas, una es la de polos salientes usualmente utilizado en centrales hidráulicas y la otra es la conocida como rotor cilíndrico utilizado en centrales térmicas. Para el caso propuesto en este trabajo se utilizará las máquinas síncronas, existen dos tipos, con polos salientes en el estator o polos salientes en el rotor, en el caso de que se ubiquen en el estator, este necesitará un sistema de colector de anillos el cual facilita que pase a través del flujo magnético, los polos magnéticos son provistos por la parte metálica del propio estator y sus devanados, en cambio el generador con polos salientes ubicado en el rotor, posee el inducido en el estator, debido a esto solo necesitara un par de anillos que permita el ingreso del voltaje de campo, estos anillos y las escobillas no serán de gran tamaño, puesto que el voltaje de campo es menor a la tensión generada.

Los generadores sincrónicos tienen su frecuencia eléctrica sincronizada con la tasa mecánica del generador. Un rotor sincrónico consta de un electroimán al cual se suministra corriente directa, su relación entre el campo magnético de la máquina y la frecuencia eléctrica del estator se define como: (Kundur, 1994)

- Los devanados del estator se distribuyen sinusoidalmente a lo largo, en lo que se refiere a los efectos mutuos del rotor
- Las ranuras del estator no causan variaciones apreciables de las inductancias del rotor con la posición del rotor
- La histéresis magnética es insignificante
- Los efectos de saturación magnética son insignificantes

Los primeros tres puntos son razonables, en cambio los efectos de saturación son más importantes debido a su relación lineal entre la corriente de campo y la tensión.

En la siguiente imagen se muestra los circuitos para el análisis del generador, el estator consta de un enrollado de armadura de tres fases con corriente alterna, mientras que el rotor consta de un enrollado de campo y circuitos de amortiguación. En la Figura 2.6, se representa un esquema de la maquina síncrona describiendo sus principales circuitos.

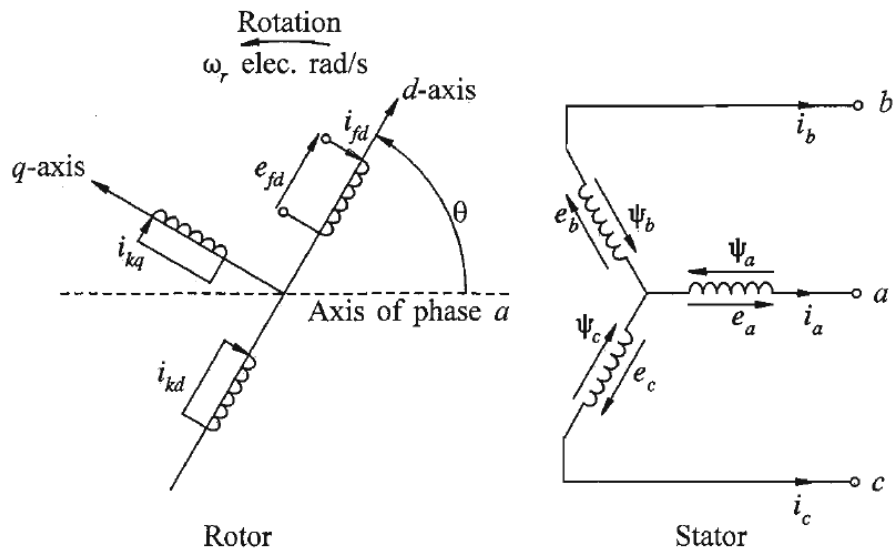


Figura 2.6 Circuitos de la máquina síncrona

En donde:

a,b,c: fases del enrollado del estator

fd: enrollado de campo

kd y kq: circuitos amortiguadores

Θ: angulo del eje d se aleja del eje magnético de la fase

La máquina al actuar como generador, su rotor gira a la velocidad  $\omega_r$ , que induce el flujo magnético en el núcleo del sistema conocido como rotor-estator.



---

El generador síncrono es conectado al sistema de transmisión por medio del transformador de elevación, la potencia del transformador se conecta a las barras colectoras de la subestación por medio de cables alto voltaje o una línea aérea corta.

#### **2.4.2 Sistemas de excitación**

El sistema de excitación es fundamental ya que controla la corriente de campo, y este a su vez permite que el voltaje de salida del generador este dentro de los rangos permitidos de operación. Su función es tener la capacidad de responder ante perturbaciones tanto estáticas como transientes. Los sistemas de excitación al controlar el voltaje de salida son exclusivamente usados para controlar la estabilidad del sistema [4]. Los excitadores pueden ser clasificados como giratorios o estáticos, los excitadores giratorios la corriente de excitación viene a ser suplida ya sea por un generador DC o un generador AC con rectificadores. El generador DC sule bajas potencias por lo que deben colocarse en forma de cascadas para lograr obtener el voltaje de salida, pero al cometer esta acción de aumentar el número de generadores DC las propiedades dinámicas del generador se deteriorarán provocando un incremento en la constante de tiempo, actualmente estos generadores han sido reemplazados por alternadores. Muchos sistemas de excitación utilizan convertidores tiristores estáticos que son directamente controlados por un regulador de voltaje. En la Figura 2. 7 se muestra una alternativa factible, es el modelo en el que representa un sistema de excitación en el cual, el generador no pierde excitación porque su voltaje de suministro es aumentado, o compuesto por un componente derivado de la corriente de carga del generador. (Machowski., et al., 2012)

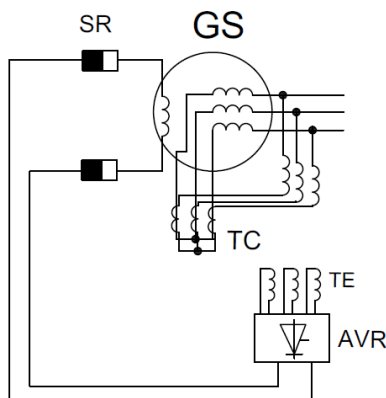


Figura 2. 7 Rectificador controlado alimentado por el voltaje y la corriente del generador

La Figura 2. 7, se muestra el generador síncrono (GS), los anillos colectores (SR), un transformador de corriente (TC), el transformador de excitación (TE), y el regulador de voltaje automático (AVR).

Una desventaja de los sistemas de excitación estáticos es la necesidad de usar anillos colectores para alimentar la corriente al rotor del generador principal. Esto se compensa en gran medida por la rápida velocidad de reacción de las señales de control. A medida que el costo de los rectificadores de alta potencia disminuye y aumenta la confiabilidad, los excitadores estáticos se están convirtiendo en la principal fuente de excitación para los generadores de alta potencia.

### **2.4.3 Regulador de Voltaje Automático (AVR, por su siglas en inglés)**

En esta sección se define una parte muy importante del proyecto, que viene a ser el regulador de voltaje automático, con sus siglas AVR por su nombre en inglés de Automatic Voltage Regulator, como se pudo ver en la sección 2.3.2 se empleaba el AVR en el diagrama de excitación que llegaba a los anillos colectores. La función del AVR es regular el voltaje terminal del generador, controlando la cantidad de corriente suministrada al devanado del campo por el excitador. El elemento de medición sensa la corriente, potencia, voltaje de terminal y frecuencia del generador, el voltaje medido del terminal, del generador, es compensado por la corriente de carga y comparado con el voltaje medido de referencia, y así se obtiene la diferencia de voltaje considerado como

el error. Aquel error es luego amplificado y usado para alterar la excitación de salida y consecuentemente la corriente de campo del generador, es por eso que ese error de voltaje es eliminado. En la Figura 2.8 se muestra un diagrama de bloque general de un subsistema del AVR.

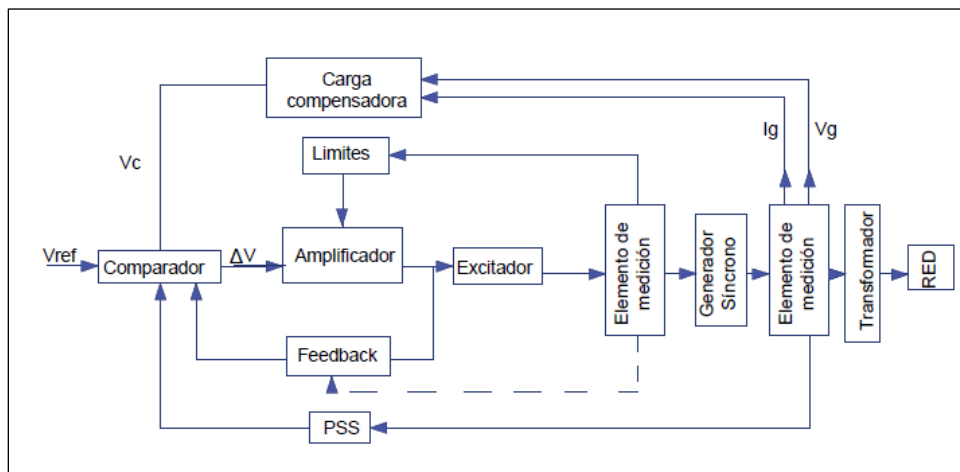


Figura 2.8 Diagrama de bloque de excitación y sistema AVR

La Figura 2.8, muestra una retroalimentación negativa (feedback), tomado entre el amplificador y el excitador el cual estabiliza el proceso de regulación.

La carga compensadora posee una impedancia, si aquella carga no es implementada, el subsistema AVR sostendrá su voltaje terminal del generador de manera constante. Al usar la compensación de una forma efectiva provocará que el punto donde se mantiene la tensión constante sea introducido en la red a una distancia que es eléctricamente igual a la impedancia de compensación.

El diagrama bloque de excitación incluye un número de limitadores cuya función es proteger el AVR, el excitador y el generador, de corrientes y voltajes excesivos, manteniendo las señales del AVR entre límites establecidos. De esta manera el amplificador está protegido contra señales de entrada excesivamente altas, el excitador y el generador protegido contra un alto voltaje de campo y el generador contra una alta corriente de armadura y un alto ángulo de potencia.

Un estabilizador de sistema de potencia, conocido como PSS por sus siglas en inglés es muchas veces adherido a un subsistema de AVR para ayudar a la amortiguación de los cambios de potencia en el sistema, sus parámetros tienen que ser electos de una manera apropiada para que cumpla la clase de voltaje requerido.

#### **2.4.4 Estabilizador de Sistema de Potencia**

En la sección 2.4.3 se explicaron los estabilizadores de potencia conocidos como PSS, estos proporcionan lazos de control suplementarios a un sistema de AVR y a su vez también a la turbina de la unidad de generación.

Un AVR mejora la estabilidad en un sistema así sea de pequeñas o largas señales, y con la adición de un PSS mejora significativamente el sistema.

Un objetivo del PSS, es reconocer que en estado estable, si la velocidad de desviación es cero o cercana a cero, el voltaje del controlador debería ser conducido por el voltaje error únicamente. En el estado transiente la velocidad del generador la velocidad no es constante, el rotor oscilará y sufrirá oscilaciones causadas por el cambio del ángulo del rotor, ahí es donde entra la misión del PSS, el cual añade una señal adicional para compensar aquellas oscilaciones y proporcionar una componente de amortiguación. La Figura 2.9, indica la señal adherida al error de voltaje principal. En el caso de estado estable debe ser igual a cero, entonces eso no distorsiona el proceso de regulación de voltaje

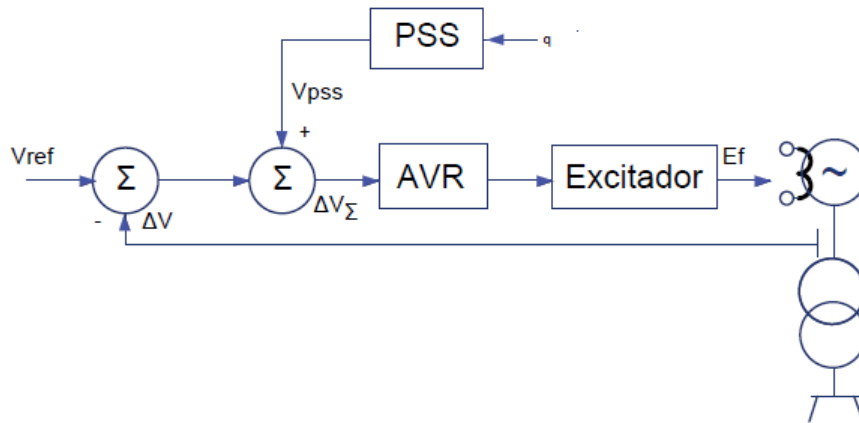
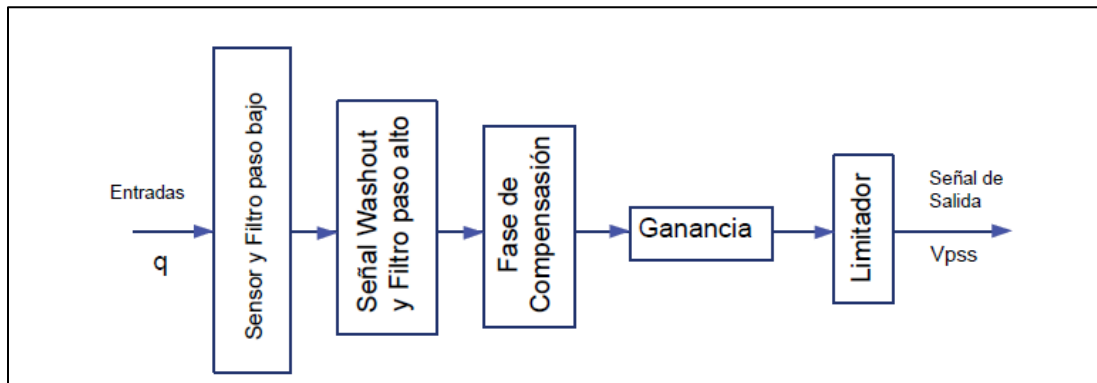


Figura 2.9 Diagrama de bloque del lazo de control suplementario del sistema AVR

El PSS se añade y es uno de los más eficientes métodos para mejorar la estabilidad del sistema.

Ahora se da a presentar una estructura general del PSS en la Figura 2.10, donde la señal puede ser dada por un numero de diferentes señales de entradas medidas en los terminales del generador, las mediciones pasan por filtros pasa bajos y pasa alto, para luego esa señal filtrada pasará a través de un elemento que compensará adelantando o atrasando su fase para así tener el desplazamiento de fase requerido, finalmente se amplifica y pasa hacia el limitador. Hay que tener en cuenta las fases de las señales de entrada que pasaran primero por los filtros paso bajo y alto.



---

---

Figura 2.10 Elementos de un PSS

Usualmente las mediciones que se toman como señales de entrada hacia el PSS, son la velocidad de desviación del rotor, la potencia activa del generador o la frecuencia de los terminales de voltaje del generador, la configuración del PSS depende de las señales que se tomen como entrada.

Con estos conceptos principales de los controladores, se tiene una idea clara de sus elementos y funcionamiento que serán útiles en el capítulo de 3 donde se desarrollará la metodología.

## **2.5 OpenModelica**

Modélica está muy bien constituida como un lenguaje computacional para el desarrollo y ejecución de niveles bajos y altos de algoritmos numéricos como sistemas de control, resolución de sistemas de ecuaciones no lineales y desarrollo de algoritmos de optimización. (OM, 2017).

Uno de los objetivos que posee OpenModelica es el de utilizar herramientas y librerías necesarias para así crear un adecuado lenguaje computacional que permita el desarrollo de algoritmos numéricos que sean eficaces para el modelamiento de sistemas de control, mediante el uso de sistemas de ecuaciones no lineales, aquella misión es estimada como un objetivo a corto plazo.

Por otro lado, un objetivo extendiendo su plazo de ejecución sería la realización de una implementación completa, manejando grandes modelos que requieran análisis y optimizaciones avanzadas, en donde no limita un desarrollo completo incluyendo tanto su semántica estática como dinámica con la opción de crear semánticas de referencia para futuras implementaciones. Así como también el desarrollo de su lenguaje, enfocando en ampliar su alcance en sus características de configuración, declaración, expresión y reutilización, otro objetivo es mejora del rendimiento del código para así

generar códigos para hardware paralelos, la mejora de la interfaz gráfica con técnicas de visualización y animación para la interpretación de resultados.

En OpenModelica su ambiente de trabajo es a base de subsistemas interconectados, el espacio principal es el manejador de sesión interactiva, este espacio analiza e interpreta comandos y expresiones para su posterior evaluación y simulación, también una herramienta importante es el compilador el cual convierte lo realizado en Modelica en código C. Posee un módulo de ejecución el cual ejecuta código binario compilado de expresiones y funciones traducidas. Es muy factible su editor de modelos OMNotebook DrModelica, es más liviano que otros editores como MathModelica permite editar todas sus secciones que se representan. Para representar las gráficas de las respuestas generadas por las simulaciones se cuenta con editor de modelos gráficos/ navegador OMEdit, este editor gráfico incluye un editor de texto para editar las definiciones de clase de modelo y una ventana interactiva de comandos de Modelica. Otro subsistema es el de optimización OMOptim, elige un conjunto óptimo de parámetros de diseño para un modelo específico la optimización dinámica en cambio utiliza métodos de colocación que posee especificaciones y restricciones adicionales.

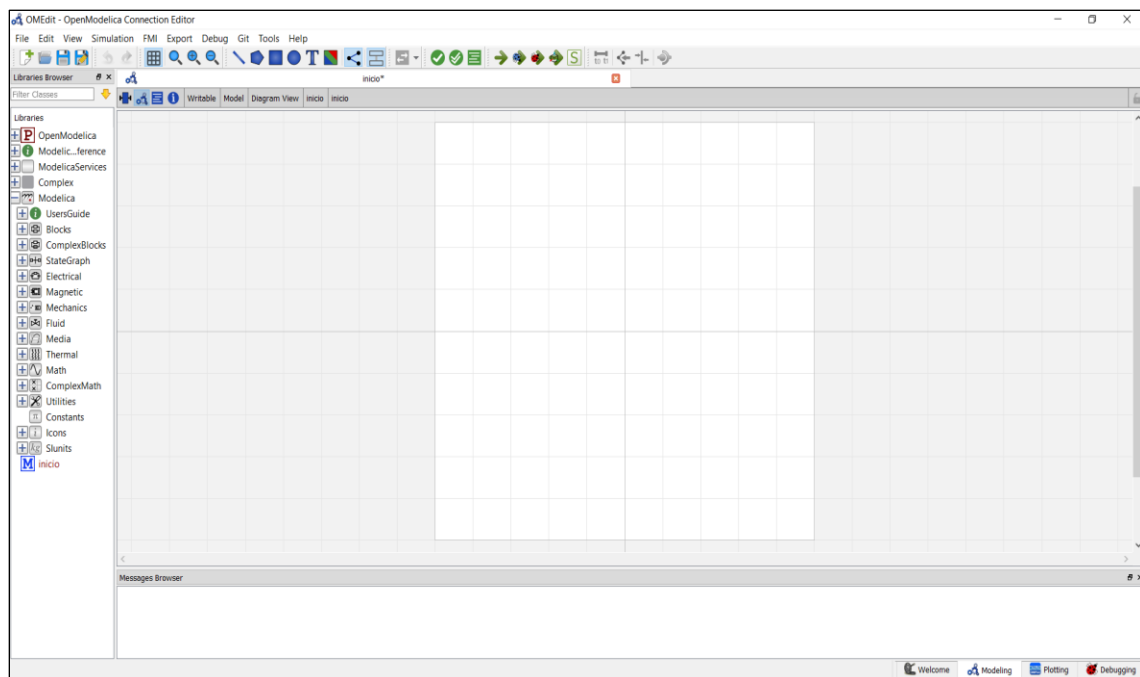
Muy importante como parte de subsistema es el depurador de modelos de ecuaciones, indica la ubicación del error generado en el código fuente, muestra todas las transformaciones realizadas. Otra clase de depurador es la de código algorítmico, aquel proporciona la depuración de un subconjunto algorítmico, excluye los modelos basados en ecuaciones pero incluye extensiones de modelos para Modelica

Si bien Modelica se parece a los lenguajes de programación orientados a objetos, como C++ o Java, difiere en dos aspectos importantes. Primero, Modelica es un lenguaje de modelado en lugar de un lenguaje de programación convencional. Las clases de Modelica no se compilan en el sentido habitual, sino que se traducen en objetos que luego son ejercidos por un motor de simulación. El motor de simulación no está especificado por el lenguaje, aunque se describen ciertas capacidades necesarias.

OpenModelica posee varias capacidades muy útiles a la hora de la simulación de sistemas de potencia.

- Es Orientada a objetos, esto permite modelar los componentes de forma independiente, enfatiza el modelado matemático estructurado, es decir pone todo como en un solo idioma.
- Al obtener todos sus componentes de manera general esto ayuda a la reutilización, simplificando el modelado de grandes sistemas de energía
- Las propiedades del modelo dinámico se llegan a describir de manera declarativa por medio de ecuaciones, así se llega a modelar los componentes de potencia y redes por medio de estas ecuaciones
- Open modélica contiene componentes eléctricos, pero además consta de componentes mecánicos , térmicos e hidráulicos de control.

La Figura 2.11, podemos ver la vista principal de la inicialización del programa OpenModelica, lugar donde haremos las simulaciones del Capítulo 4.





---

---

Figura 2.11 Página principal del programa OpenModelica

### 2.5.1 Métodos de Integración

Dentro de OpenModelica se encuentran varias representaciones de simulación usando diferentes métodos de integración numérica. Se identifican por sus características las cuales son: explícita Vs implícita, según su orden, según su tamaño de pasos, o múltiples pasos. Los métodos usualmente usados son los nombrados a continuación. (Anon., 2017)

- DASSL

Este método de integración es el más usado, al ser el predeterminado a la compilación de OpenModelica, sus características indican que es implícito de orden superior y múltiples pasos, controla el tamaño de pasos y trabaja de una manera estable para distintos modelos, su manera de compilación se basa en la fórmula de diferenciación hacia atrás, su implementación se llama DASPL2.0.

- IDA

Es parte de una familia de programa llamada sundials: SUite of Nonlinear y Differential / Algebraic Equation. Su implementación se basa en DASPK , incluye un sistema de solución lineal de alto rendimiento KLU.

- Compiladores explícitos básicos

Su modo de operación es con un tamaño de pasos fijos, y solo difiere el orden de integración, los métodos son Euler para orden 1, Heun para orden 2, y Rungekutta de orden 4.

- Compiladores implícitos básicos

Está basado en el solucionador no lineal KINSOL, de SUNDIALS. Sus pasos de integración son determinador por los métodos explícitos básicos. Los métodos son: impeuler de orden 1, trapezoidal de orden 2 y imprunkutta el cual puede ser ajustado su orden.

---

### 2.5.2 Librería IPSL

Haremos uso de la biblioteca OpenIPSL o Open-Instance Power System la cual es una parte de la Biblioteca del sistema iTesla Power, actualmente desarrollada y mantenida por SmarTS Lab; El grupo de investigación del Prof. Luigi Vanfretti. La biblioteca pueda usarse eficientemente para simulación de sistemas de energía dentro de flujos de trabajo basados en Modelica (es decir, ayudar a dar modelos de sistemas de energía de referencia para desarrollo y prueba de compiladores de back-end de Modelica) frente a los desafíos de simulación del sistema de potencia. Su librería se compone de conectores, interfaces eléctricas y no eléctricas. Aquella biblioteca será de gran aporte para futuros proyectos e implementaciones, lo bueno de Open modélica viene a ser la capacidad de exportar proyectos a otras plataformas para el mismo fin de estudio.

### 2.6 Error Cuadrático medio (MSE, mean squared error)

El error cuadrático medio tiene como objetivo la predicción o posible estimación de los datos tomados, hallar el promedio de cuadrados de los errores. El error es la diferencia entre un valor a estimar y el estimador, entonces el valor cuadrático medio se puede sobreentender como una función de riesgo del valor esperado de la pérdida de error al cuadrado. Algunas de las características del error cuadrático medio son (web, 2012):

- Si el valor de MSE resulta ser cero, quiere decir que es el estimador y el valor estimado se encuentra en común precisión uno del otro.
- Los valores de MSE, se utilizan para comparar entre dos o más modelos estadísticos.
- El MSE, se utiliza para determinar el número de predictores para incluir en cierto modelo al partir de un escenario con observaciones establecidas
- El análisis de varianza, es decir ANOVA, estima el error cuadrático medio como parte del análisis estadístico

Suponiendo que  $\hat{Y}_i$  el vector que da n valores de predicción, y  $Y_i$  el vector que representa n números de valores reales. Por lo que se tiene la siguiente fórmula para hallar el error cuadrático medio como se muestra en la Ecuación 2.1:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2 \quad (2.1)$$

Desde el punto matemático es inconveniente manejar el valor absoluto, de una manera más general su valor se da como  $T$  el parámetro desconocido y  $\theta$  el estimador correspondiente.

$$E[(T - \theta)^2] \quad (2.2)$$

Siendo una propiedad del MSE el descomponerse como la suma de dos componentes como se muestra a continuación:

$$E[(T - \theta)^2] = V(T) + sesgo^2(T) \quad (2.3)$$

Por tanto, en el caso de comparar diversos estimadores centrados de un parámetro  $\theta$ , el MSE coincidirá con sus varianzas. Con lo que el estimador con menor MSE coincidirá con el de menor varianza.

Por la tanto, podemos obtener el predictor óptimo de las futuras observaciones, bajo el supuesto de que los parámetros del modelo son conocidos.

## 2.7 Trabajos relacionados con el estudio de estabilidad

Los estudios de estabilidad en las centrales de generación se han manifestado en los últimos años para obtener un mayor rendimiento de servicio, en Uruguay se realizó un estudio de la red eléctrica de su red, análisis de estabilidad transitoria y pequeñas perturbaciones mediante una herramienta en Matlab llamada PSAT (Power System Analysis toolbox) (Sghirla, 2007). Aquella herramienta permite realizar análisis estático, dinámico y de control de los sistemas eléctricos de potencia, mediante diagramas de bloques construyeron modelos de los excitadores de los generadores de varias centrales

eléctricas, para lograr aquello se necesitó la herramienta Simulink, editando los sistemas que soporta el PSAT, y así logrando establecer los parámetros del excitador del PSAT, el PSAT consta con tres sistemas de excitación AVR, ellos lograron modelar su sistema de transmisión de forma simplificada, con restricciones que provocaron pérdida de información respecto a las protecciones y limitadores. Realizaron el modelo de las cargas de forma estática, sin valores a tiempo real y utilizaron la herramienta PSS/E para la realización de los estudios de estabilidad transitoria.

En nuestro país se han realizado estudios similares, como en el caso de la Central Hidroeléctrica Manduriacu, se realizó un análisis de la estabilidad transitoria al SNI considerando la incorporación de dicha central, donde se establecieron ajustes necesarios en los sistemas de regulación de voltaje y estabilizadores de potencia, su estudio se realizó mediante el programa DlgSILENT Power Factory, utilizando los escenarios de máxima demanda, concluyendo con su análisis la central Manduriacu es de gran aporte a la generación de potencia activa y soporte de voltaje para el SNI. Para su estudio de estabilidad transitoria toman en cuenta reguladores de excitación y velocidad y el PSS, ajustados para obtener respuestas dentro de las normas en condiciones normales y de emergencia

## **CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA**

---

## Capítulo 3. Metodología

---

3.1 Introducción.....	71
3.2 Modelamiento del AVR .....	71
3.2.1 <i>Análisis matemático para la inicialización del AVR</i> .....	72
3.2.2 <i>Modelamiento del AVR en OpenModelica</i> .....	75
3.2.3 <i>Modelamiento de bloque de voltaje de referencia</i> .....	78
3.3 Modelamiento de PSS en OpenModelica .....	78
3.4 Sistema generador – barra – carga.....	81
3.4.1 <i>Creación de generador sopladora</i> .....	82
3.5 Creación y validación del sistema equivalente conectado a la barra Sopladora	83
3.5.1 <i>San Bartolo</i> .....	83
3.5.2 <i>Transformadores</i> .....	84
3.5.3 <i>Líneas de transmisión</i> .....	85
3.5.4 <i>Barras infinitas</i> .....	86
3.5.5 <i>Validación de sistema equivalente</i> .....	88

---

### **3.1 Introducción**

En esta sección se detalla el proceso llevado a cabo para la elaboración del diagrama de bloques equivalente al AVR y al PSS de Sopladora, también se muestra el proceso durante la construcción total del sistema equivalente visto por la barra de Sopladora, el mismo que involucra líneas, transformadores, un generador adicional (Central Hidroeléctrica San Bartolo), inductancias mutuas y barras infinitas.

Todo esto será validado mediante un sistema equivalente desarrollado y verificado previamente por el Ing. Pablo Verdugo (Ingeniero de Investigación y Desarrollo – CENACE) en la interfaz de Simulink.

Para llevar a cabo la aproximación entre el modelo propuesto en Simulink y desarrollado en OpenModelica se emplearon elementos existentes de la librería OpenIPSL, creada por el grupo de investigación SmarTS-Lab liderado por el profesor Luigi Vanffretti, (Maxime Baudette, 2018) y principal ejemplo del amplio potencial de OpenModelica en el campo de sistemas de potencia, desarrollada para simulación fasorial en el dominio del tiempo, a través del conector tipo PwPin, permite intercambiar información real e imaginaria de corriente y voltaje entre los distintos elementos conectados.

### **3.2 Modelamiento del AVR**

La Figura 3.1, muestra el sistema AVR a replicar en OpenModelica, se utilizaron bloques pertenecientes a la librería propia del programa llamada Modelica y de la librería OpenIPSL sección “continuous”, entre ellos se encuentran; limitadores, funciones de transferencia, ganancias, sumadores de retroalimentación, funciones tipo “leadLag” “SimpleLag”, entre otras. Dado que este sistema de control se encuentra bajo el dominio de la transformada de Laplace y que posee como entrada una variable inicial conocida que es el voltaje de campo del generador, nos fue necesario desarrollar matemáticamente la inicialización de cada bloque de función de transferencia con sus respectivas variables de estado.

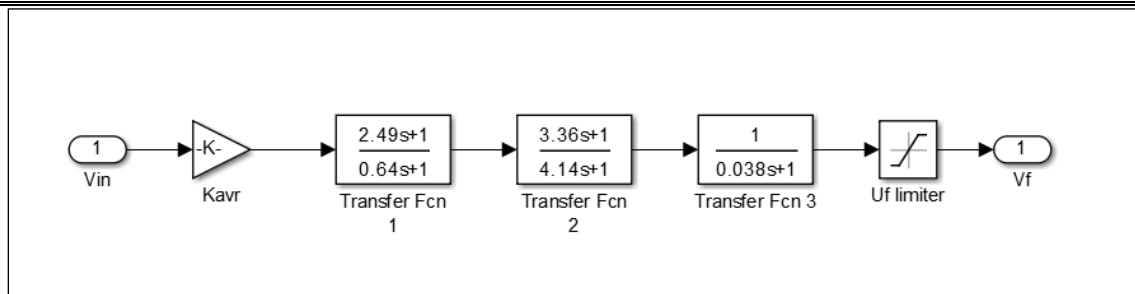


Figura 3.1 Diagrama de bloques en Simulink

### 3.2.1 Análisis matemático para la inicialización del AVR

Partiendo de que las entradas y salidas de cada función de transferencia tiene la nomenclatura mostrada en la Figura 3.2, y conociendo que la señal “vf” tendrá un valor inicial “vf0” el mismo que llegará de la máquina, se desarrolla el siguiente análisis matemático. Al bloque sumador también le ingresa la señal de salida del PSS, sin embargo, su valor inicial es cero por tal razón no se lo ha incluido en este análisis.

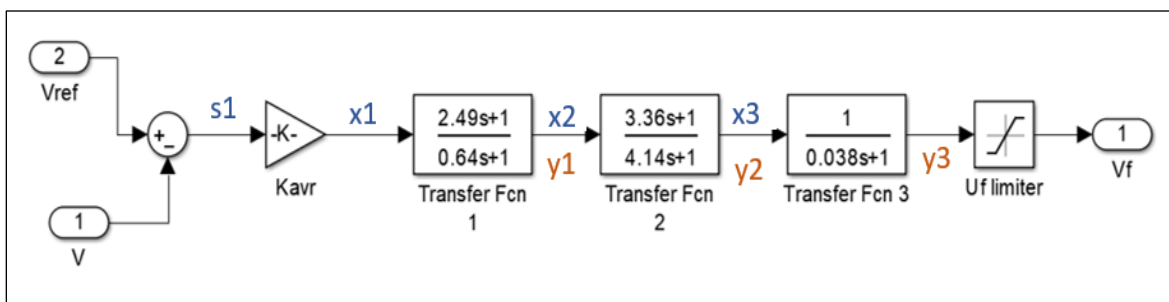


Figura 3.2 Diagrama de bloques en Simulink

$$Vf(0) = vf0 \tag{3.1}$$

Si el valor de vf0, se encuentra en el rango permitido del limitador de voltaje (Uf limiter), entonces:

$$y3(0) = vf0 \tag{3.2}$$

De acuerdo al diagrama de bloques propuesto;

$$x2(s) = y1(s) \tag{3.3}$$



$$x_3(s) = y_2(s) \tag{3.4}$$

La salida de una función de transferencia es el valor de la entrada multiplicada por la función, por lo tanto, para “Transfer Fcn 3”, tenemos que:

$$y_3(s) = \frac{1}{0.038s+1} \cdot x_3(s) \tag{3.5}$$

Y al despejar  $x_3(s)$  de la ecuación 3.5 obtenemos:

$$x_3(s) = 0.038 \cdot y_3(s) \cdot s + y_3(s) \tag{3.6}$$

Ya que la transformada de Laplace está íntimamente relacionada al dominio del tiempo que es de nuestro interés, la transformada inversa de  $x_3(s)$  se convertirá en:

$$x_3(t) = 0.038 \frac{\partial y_3}{\partial t} + y_3(t) \tag{3.7}$$

Por condiciones iniciales;

$$\frac{\partial y_3}{\partial t} = 0 \tag{3.8}$$

Entonces,

$$x_3(t) = y_3(t) \tag{3.9}$$

$$x_3(0) = y_3(0) = vf_0 \tag{3.10}$$

Por ecuación (3.4);

$$y_2(0) = vf_0 \tag{3.11}$$

$$y_2(s) = \frac{3,36s+1}{4,14s+1} x_2(s) \tag{3.12}$$

$$4,14 y_2(s) \cdot s + y_2(s) = 3,36x_2(s) \cdot s + x_2(s) \tag{3.13}$$

De igual forma, cuando cambiamos pasamos del dominio de Laplace al dominio del tiempo obtenemos la ecuación 3.14 que se pertenece a las señales de entrada y salida del “Transfer Fcn 2”.

$$4,14 \frac{\partial y_2}{\partial t} + y_2(t) = 3,36 \frac{\partial x_2}{\partial t} + x_2(t) \quad (3.14)$$

Por condiciones iniciales;

$$\frac{\partial y_2}{\partial t} = \frac{\partial x_2}{\partial t} = 0 \quad (3.15)$$

$$y_2(t) = x_2(t) \quad (3.16)$$

Y para t=0 segundos,

$$x_2(0) = vf_0 \quad (3.17)$$

Por ecuación (2.3);

$$y_1(0) = vf_0 \quad (3.18)$$

Finalmente, la “Transfer Fcn 1”, también relaciona sus variables de entrada y salida mediante su función de transferencia, el proceso es el mismo que en las anteriores:

$$y_1(s) = \frac{2,49s+1}{0,64s+1} x_1(s) \quad (3.19)$$

$$0,64y_1(s).S + y_1(s) = 2,49x_1(s).S + x_1(s) \quad (3.20)$$

Dado que nuestro valor conocido se encuentra en el dominio del tiempo, nos será necesario aplicar también la transformada inversa a la ecuación 3.20 teniendo como resultado la ecuación 3.21 mostrada a continuación.

$$0,64 \frac{\partial y_1}{\partial t} + y_1(t) = 2,49 \frac{\partial x_1}{\partial t} + x_1(t) \quad (3.21)$$

Por condiciones iniciales;

$$\frac{\partial y_1}{\partial t} = \frac{\partial x_1}{\partial t} = 0 \quad (3.22)$$

$$y_1(t) = x_1(t) \quad (3.23)$$

$$x_1(0) = vf_0 \quad (3.24)$$

La variable  $s_1$ , es la entrada del bloque de ganancia denominado “Kavr” y la salida de dicho bloque es la ya conocida variable  $x_1$  como se detalla a continuación.

$$x_1(s) = Kavr * s_1(s) \quad (3.25)$$

Pero al resolver la operación inicial de las señales de entrada, también concluimos una ecuación para la señal  $s_1$ .

$$s_1(s) = Vref(s) - V(s) \quad (3.26)$$

En función del tiempo y bajo condiciones iniciales:

$$x_1(t) = Kavr * (Vref(t) - V(t)) \quad (3.27)$$

$$x_1(0) = Kavr * (Vref(0) - V(0)) \quad (3.28)$$

$$Vref(0) = \frac{vf_0}{Kavr} + V(0) \quad (3.29)$$

### 3.2.2 Modelamiento del AVR en OpenModelica

En el espacio de trabajo de OpenModelica fue necesario crear un “package” denominado “Sopladora”, dentro de este paquete se creó un modelo, en la pestaña “Diagram View” se desarrolló todo el diagrama de bloques que se muestra en la Figura 3. 3.

Lo primero en colocarse fueron las entradas (color azul) y salidas (color blanco), mismas que se encuentran en “Interfaces” de la librería Modelica, el siguiente paso fue colocar los bloques de función de transferencia, primer orden, limitador, feedback y al final crear

las conexiones. La entrada  $Vf0$  a pesar de no tener conexiones internas juega un papel fundamental en la inicialización del control del AVR como se explica en la sección 3.1.1.

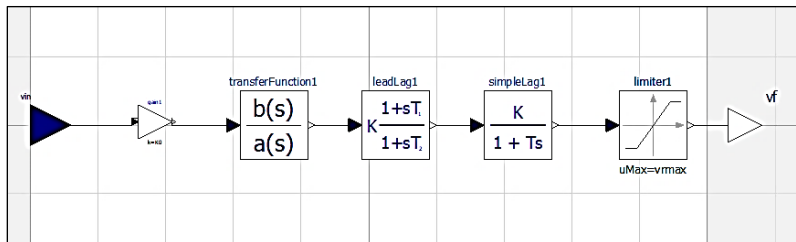


Figura 3. 3 Diagrama creado en OpenModelica

Al abrir la ventana de parámetros de cualquier función de transferencia, simple Lag, o leadLag nos solicita información como numerador, denominador, valor de ganancia y tipo de inicialización para entrada y salida como se muestra en la Figura 3.4, es aquí donde colocaremos la inicialización obtenida previamente y los numeradores y denominadores de acuerdo a los parámetros descritos en la sección “Text View” de la Figura 3.5.

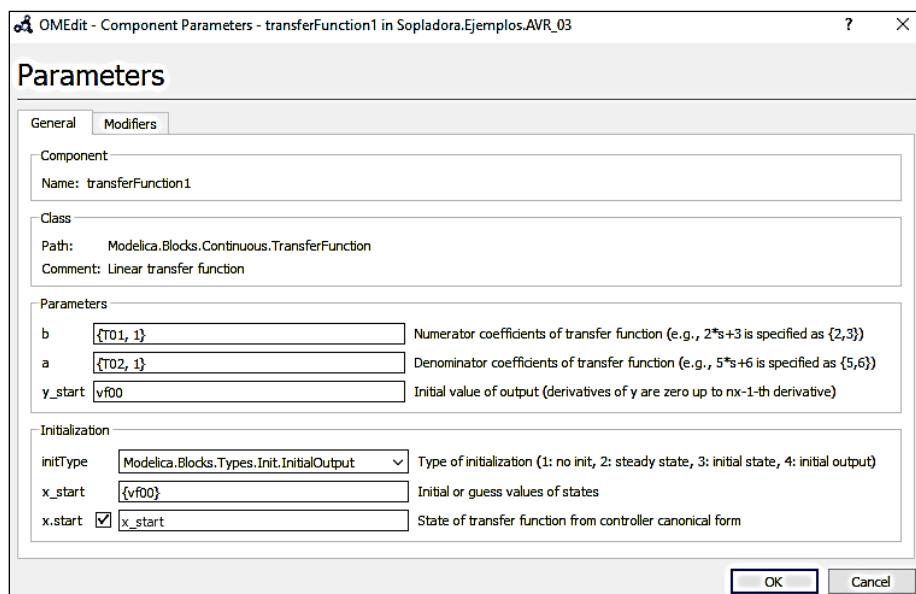


Figura 3.4 Parámetros dentro de una función de transferencia

```

737 model AVR_03
738
739# ModLib.Blocks.Interfaces.RealInput vin annotation(
740# ModLib.Blocks.Interfaces.RealOutput vf(fixed=false) annotation(
741# ModLib.Blocks.Interfaces.RealInput vf0(fixed=false) annotation(
742
743
744 parameter Real vmax = 10 "Voltaje máximo del AVR (pu)";
745 parameter Real vmin = -10 "Voltaje mínimo del AVR (pu)";
746 parameter Real K0 = 5.38 "Ganancia del regulador";
747 parameter Real T01 = 2.48 "Primer cero (s)";
748 parameter Real T02 = 0.64 "Primer polo (s)";
749 parameter Real T03 = 3.36 "Segundo cero (s)";
750 parameter Real T04 = 4.14 "Segundo polo (s)";
751 parameter Real Tc = 0.038 "Tercer polo (s)";
752 parameter Modelica.SIunits.PerUnit vf00(fixed = false);
753
754# ModLib.Blocks.Nonlinear.Digital ffd=act1init=act=act=
755# ModLib.Blocks.Continuous.Transfer
756# ModLib.Blocks.Types.Init.Initial
757# ModLib.Blocks.Math.Gain gain(k = av; annotation(
758# OpenPFL.NonElectrical.Continuous.LeadLag leadLag(K = 1, T1 = T03, T2 = T04, y_start = vf00) annotation(
759# OpenPFL.NonElectrical.Continuous.SimpleLag simpleLag(K = 1, T = Tc, y_start = vf00) annotation(
760
761 initial algorithm
762   vf00 := vf0;
763 equation
  
```

Figura 3.5 Text view del AVR sopladora – Parámetros e inicialización de bloques

Para finalizar se crea la máscara o ícono que se visualizará para el modelo, para esto tenemos un set de herramientas que permiten crear texto, formas y rellenos de colores en la pestaña “Icon View” para poder simbolizar y etiquetar entradas y salidas del modelo desarrollado, en nuestro caso el ícono del AVR se muestra en la Figura 3.6

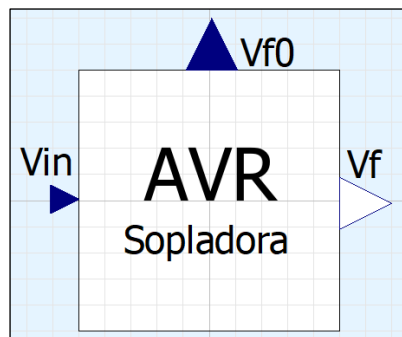


Figura 3.6 Máscara del AVR Sopladora

El voltaje de entrada del AVR es el resultado de sumar el voltaje del PSS ( $V_{pss}$ ), el voltaje de referencia ( $V_{ref}$ ) y restar el voltaje en los terminales del generador ( $V_t$ ), en nuestra simulación a esto se le ha añadido un pulso para producir una pequeña variación en la entrada y ver la actuación del AVR.

$$V_{in} = V_{ref} + V_{pss} - V_t \tag{3.30}$$

### 3.2.3 Modelamiento de bloque de voltaje de referencia

Como ya se desarrolló en la sección 3.1.1 de este documento la inicialización matemática del AVR implica un valor de voltaje de referencia, el mismo que es calculado bajo la ecuación 3.29, para implementarlo en la simulación se ha creado un bloque (interfaz y código en la Figura 3.7) que involucra el valor del voltaje en los terminales de la máquina previo a la perturbación, el mismo que es obtenido del flujo de potencia.

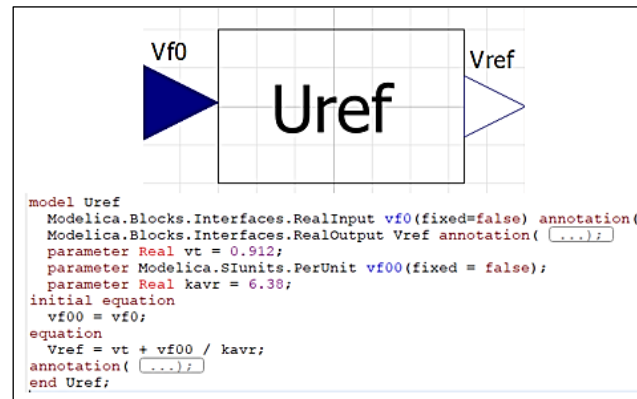


Figura 3.7 Interfaz y código del voltaje de referencia

### 3.3 Modelamiento de PSS en OpenModelica

El PSS a diseñar en OpenModelica posee como entradas de control la variación de velocidad del rotor ( $\Delta\omega$ ) y la potencia eléctrica ( $P$ ), ambos valores en por unidad, la salida del mismo se sumará con el resto de las entradas del AVR para afectar al voltaje de campo, por esto es importante entender que el PSS es un componente del regulador de voltaje y no un control independiente.

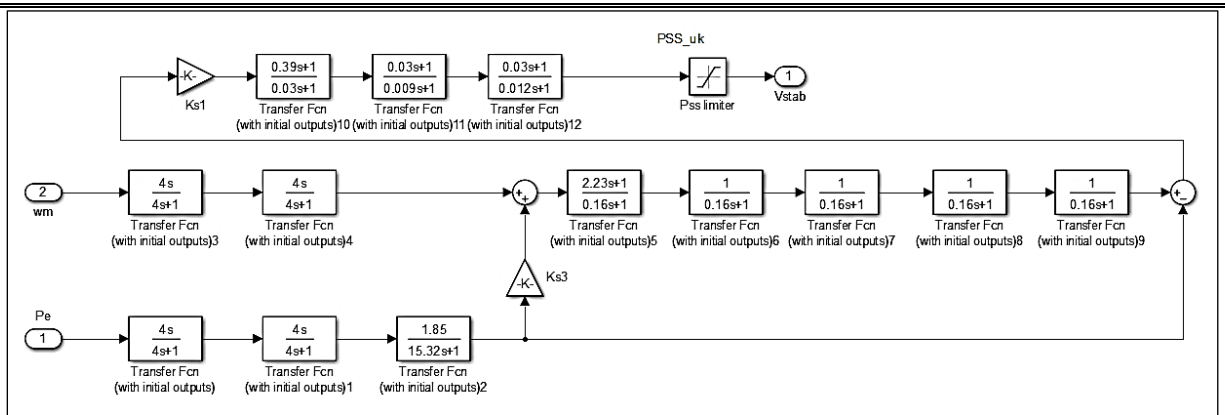


Figura 3.8 Diagrama de bloques de PSS en Simulink

Al igual que en el desarrollo del AVR, para la modelación del PSS en OpenModelica serán necesarios bloques de función de transferencia en el dominio de Laplace y bloques matemáticos como sumas y ganancias. Se establece además que el voltaje de salida ( $V_{pss}$ ) inicial sea cero, sin embargo, el valor de las entradas será designado en la inicialización de las funciones de transferencia que se encuentran en serie a la señal de velocidad y potencia, bajo la modalidad de “initial state”. El valor inicial de potencia eléctrica se obtuvo mediante una constante directamente de la máquina, mientras que el valor inicial de la variación de velocidad es cero, teniendo en cuenta que en estado estable cualquier variación toma este valor. Una de las salidas en la máquina generadora de orden 5 tipo 2, es la velocidad angular en por unidad, dado que nuestro interés realmente es conocer la variación de velocidad, nos fue necesario previamente realizar la operación pertinente para enviar la señal de “dw” o variación de velocidad.

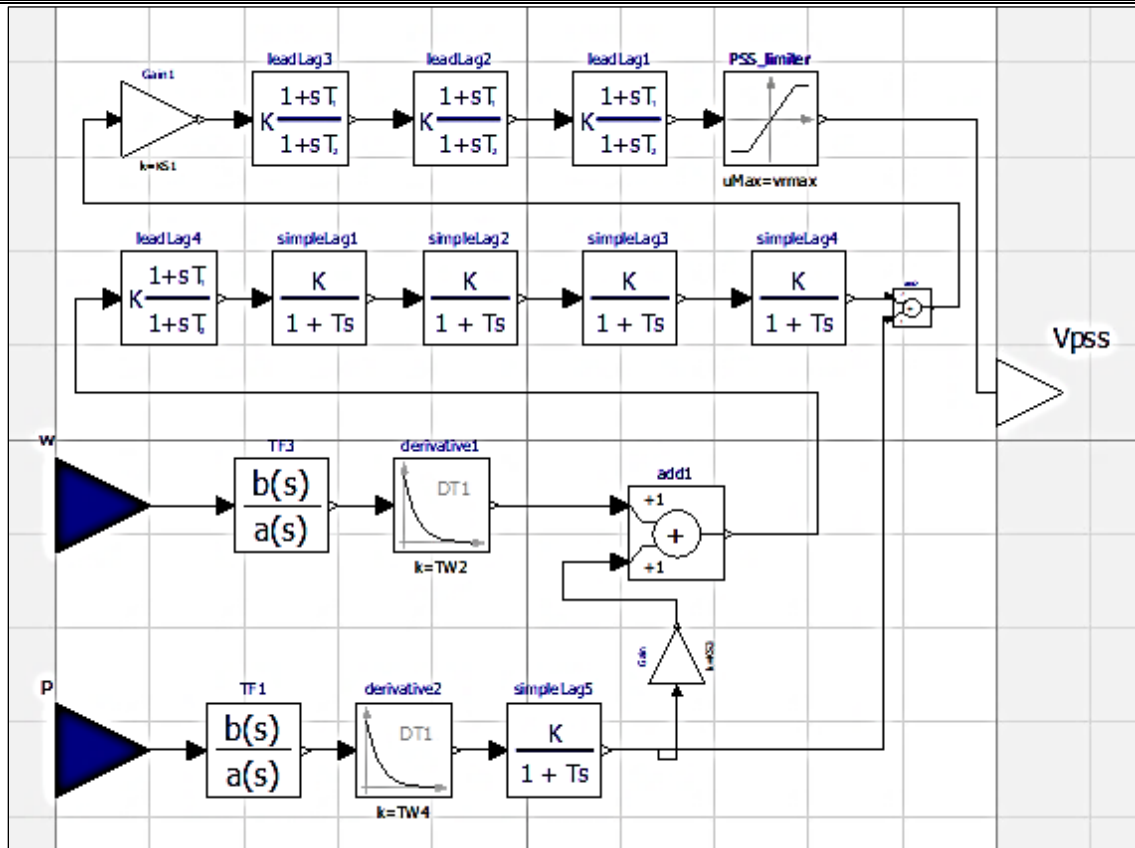


Figura 3.9 Diagram View del PSS en OpenModelica

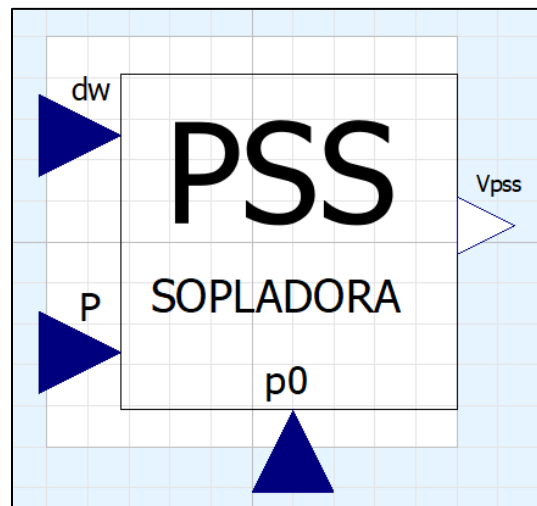


Figura 3.10 Interfaz de PSS en OpenModelica



### 3.4 Sistema generador – barra – carga

Para verificar el correcto modelamiento de los controladores construidos en el área de OpenModelica, se utilizó un sistema simple de potencia formado por un generador de orden 5 tipo 2 (ideal para simular generadores hidroeléctricos) con las características eléctricas de un equivalente a las unidades generadoras de Sopladora (Tabla 3.1), una barra y una carga que tomó dos valores (ver Tabla 3.3) para verificar que las respuestas sean similares. Dado que en este caso se están simulando controladores vía excitación nuestras señales de interés serán el voltaje en los terminales del generador y el voltaje de campo.

Parámetros de la máquina generadora - Equivalente Sopladora		
Reactancia síncrona eje - d (pu)	xd	0.95
Reactancia síncrona eje - q (pu)	xq	0.617
Reactancia sub transiente eje -d (pu)	x2d	0.25
Reactancia sub transiente eje -q (pu)	x2q	0.227
Constante de tiempo transiente circuito abierto eje -d (pu)	T1d0	8.06997
Constante de tiempo sub transiente circuito abierto eje -d (pu)	T2d0	0.1731231
Constante de tiempo sub transiente circuito abierto eje -q (pu)	T2q0	0.3026119
Potencia nominal (MVA)	Sn	541.11
Voltaje nominal (KV)	Vn	13.8
Resistencia de armadura (pu)	ra	0.002
Reactancia transiente eje - d (pu)	x1d	0.283
Tiempo mecánico (KWs/KVA)	M	8.28
Amortiguamiento	D	0

Tabla 3.1 Parámetros de generadores Sopladora

Para modelar variaciones de voltaje se incluyó como señal de entrada en el AVR un bloque “pulse generator” con la finalidad de que el voltaje de referencia vea una variación y el control se accione.

Se enviaron señales de pulso de amplitud con las siguientes características:

	Amplitud	Periodo (s)	Ancho de pulso (%)	Start (s)
Pulse 1	-0.01	20	50	10
Pulse 2	-0.03			
Pulse 3	-0.05			

Tabla 3.2 Perturbaciones de voltaje

Las simulaciones tuvieron una duración de 40 segundos, en total se realizaron 12 casos de validación, los primeros seis comprenden el sistema Generador – barra – carga resistiva bajo la actuación del primero, segundo y tercer pulso sólo con AVR y con la combinación de AVR y la señal del PSS, se analizó el comportamiento del voltaje de campo y voltaje en los terminales para poder verificar que el seguimiento de las señales resultantes sean las mismas que las de Simulink, el mismo análisis se realizó para el sistema Generador – barra – carga resistiva e inductiva donde se efectuaron los seis casos restantes como detalla la Tabla 3.3

	Load		Solo AVR	AVR + PSS
<b>Resistiva</b>	P(MW)	463	Pulse 1	
	Q (MVAR)	0		
	P(MW)	463	Pulse 2	
	Q (MVAR)	0		
	P(MW)	463	Pulse 3	
	Q (MVAR)	0		
<b>Resistiva e Inductiva</b>	P (MW)	463	Pulse 1	
	Q (MVAR)	293		
	P (MW)	463	Pulse 2	
	Q (MVAR)	293		
	P (MW)	463	Pulse 3	
	Q (MVAR)	293		

Tabla 3.3 Casos de análisis para validación de AVR y PSS

### 3.4.1 Creación de generador sopladora

Para desarrollar el sistema de validación, primero creamos el generador de Sopladora, un modelo con la interfaz de generador que nos brinda OpenIPSL en la sección de

“Interfaces”, dentro de este modelo colocamos la máquina de orden 5 tipo 2 con todas las características detalladas en la Tabla 3.1, pero también se incluyó el AVR y el PSS con sus respectivas entradas y salidas, adicionalmente como se menciona antes, al voltaje de referencia se le suma un generador de pulso para introducir una variación de voltaje en el sistema. Ordenamos el AVR y el PSS de tal manera que actúen como se ha descrito anteriormente, además se incluyó una ganancia en serie a la salida del PSS para usarlo como “switch” y poder desactivarlo cuando sea necesario.

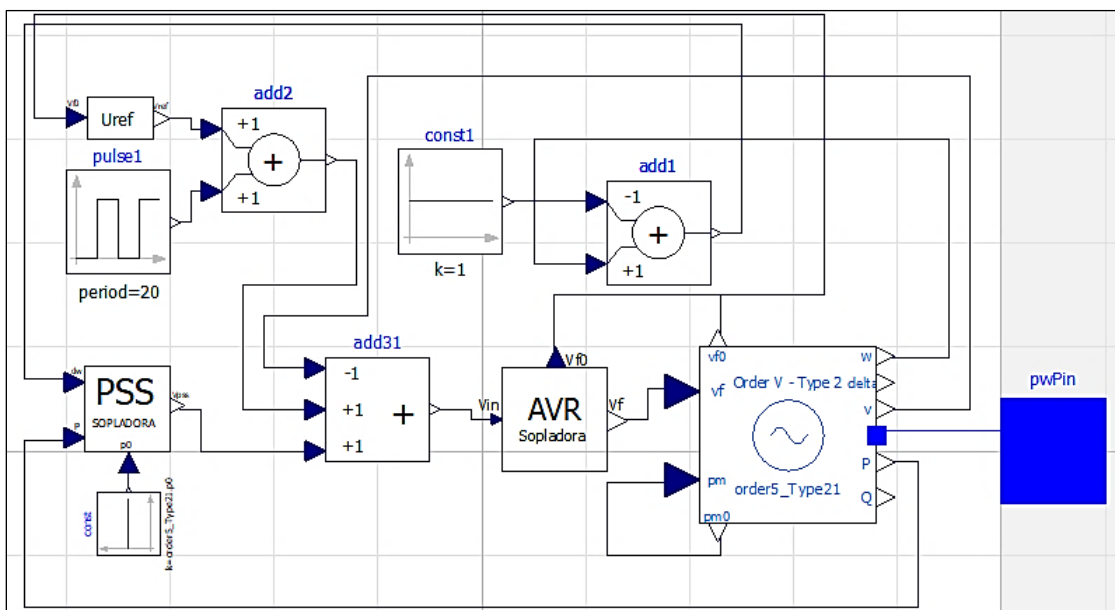


Figura 3.11 Disposición de controles del generador

### 3.5 Creación y validación del sistema equivalente conectado a la barra Sopladora

Ya validados e inicializados los controladores y el generador de la central Hidroeléctrica Sopladora, se comienza a construir el sistema equivalente conectado directamente en la barra Sopladora – 230 kV.

#### 3.5.1 San Bartolo

El primer elemento que incluimos en nuestra simulación fue la central hidroeléctrica San Bartolo, conectada a la barra Sopladora 230 kV mediante una línea de aproximadamente 19 km, la misma que pertenece al Grupo La Favorita (Anon., s.f.) y cuenta con una

capacidad instalada de 49.9 MW. Los parámetros considerados para el equivalente de esta generadora se detallan en la Tabla 3.4

<b>Parámetros de la máquina generadora - Equivalente San Bartolo</b>		
Reactancia síncrona eje - d (pu)	x <sub>d</sub>	1.48
Reactancia síncrona eje - q (pu)	x <sub>q</sub>	0.74
Reactancia sub transiente eje -d (pu)	x <sub>2d</sub>	0.176
Reactancia sub transiente eje -q (pu)	x <sub>2q</sub>	0.176
Constante de tiempo transiente circuito abierto eje -d (pu)	T <sub>1d0</sub>	8.06997
Constante de tiempo sub transiente circuito abierto eje -d (pu)	T <sub>2d0</sub>	0.1731231
Constante de tiempo sub transiente circuito abierto eje -q (pu)	T <sub>2q0</sub>	0.3026119
Potencia nominal (MVA)	S <sub>n</sub>	57
Voltaje nominal (KV)	V <sub>n</sub>	13.8
Resistencia de armadura (pu)	r <sub>a</sub>	0.003
Reactancia transiente eje - d (pu)	x <sub>1d</sub>	0.255
Tiempo mecánico (KWs/KVA)	M	3.68
Amortiguamiento	D	0

Tabla 3.4 Parámetros de generadora San Bartolo

### 3.5.2 Transformadores

A la salida de ambos generadores (Sopladora y San Bartolo) existen transformadores elevadores (13.8:230 kV) conectados, la conexión existente de los mismos es de triangulo en el lado primario (generación) y estrella en el secundario (transmisión), sin embargo en nuestra simulación hemos considerado que el transformador se encuentra conectado en el lado primario y secundario como estrella aterrizado, esto se debe a que en el modelo de OpenModelica considera cualquier transformador como una reactancia

en serie sin pérdidas de hierro, lo cual nos limita al querer realizar la configuración equivalente de triángulo a estrella o viceversa. Los datos obtenidos de la simulación de Simulink y los datos cargados en OpenModelica se encuentran en la tabla Tabla 3.5 y Tabla 3.6.

	Voltaje	Resistencia (PU)	Inductancia (PU)
<b>Winding 1</b>	13,8	0,00088685	0
<b>Winding 2</b>	230	0,00088682	0,13009
<b>Equivalente</b>		0,00177367	0,13009

Tabla 3.5 Datos del transformador equivalente de Sopladora

	Voltaje	Resistencia (PU)	Inductancia (PU)
<b>Winding 1</b>	13,8	0,0010106	0
<b>Winding 2</b>	230	0,0010106	0,13968
<b>Equivalente</b>		0,0020212	0,13968

Tabla 3.6 Datos del transformador equivalente de San Bartolo

### 3.5.3 Líneas de transmisión

OpenModelica calcula el valor de impedancias en las líneas de transmisión mediante el circuito pi equivalente, para esto utilizamos los valores de resistencia, inductancia, longitud y capacitancia proporcionados en Simulink para transformarlos a resistencia, reactancia, conductancia y susceptancia en por unidad que son los datos solicitados por OpenModelica. Se modela la línea de interconexión San Bartolo - Sopladora de 19 km, la línea Milagro – Sopladora de 145 km, la línea Esclusas -Sopladora de 182 km y la línea Milagro – Esclusas de 37 km aproximadamente. Además, entre Milagro y Esclusas se produce una inductancia mutua por la topología propia de la red, esta inductancia también fue simulada como una impedancia de línea, considerando los valores de secuencia positivos y conectándola entre las dos barras que poseen el acople. El detalle de todos los parámetros obtenidos en Simulink y se describe en la Tabla 3.7

Línea San Bartolo - Sopladora		Línea 1 y 2 Milagro - Esclusas	Línea Sopladora - Milagro Línea Sopladora - Esclusas
Longitud (km)	18,87	37,00	144,73
r (ohm/km)	0,113234	0,030184	0,039110
l (H/km)	0,001284	0,000836	0,000960
z Base (ohm)	97,762008		
c (F/km)	0,000000	0,000000	0,000000
r (ohm)	2,136726	1,116808	5,660195
r (pu)	0,021856	0,011424	0,057898
inductancia (H)	0,024237	0,030922	0,138906
Xl (ohm)	9,137061	11,657442	52,366426
Xl (pu)	0,093462	0,119243	0,535652
c(F)	0,000000	0,000000	0,000002
B (mos)	0,000087	0,000168	0,000665
B(pu)	0,004237	0,008231	0,032492

Tabla 3.7 Parámetros de las líneas de transmisión

### 3.5.4 Barras infinitas

El modelo de barra infinita en Simulink, involucra parámetros de cortocircuitos, lo que significa una impedancia interna si vemos a la barra infinita como una fuente, esto producirá que exista un voltaje interno diferente al voltaje en los terminales de la barra. En cambio, el modelo de barra infinita de OpenIPSL, se asemeja a una barra ideal, por lo que no cuenta con parámetros internos para introducir la impedancia de cortocircuito del sistema equivalente, para llevar el modelo existente e implementado desde Simulink al interfaz de OpenModelica se ha simulado la barra infinita ideal en serie a una línea de transmisión donde realmente se incluyen los valores de impedancia internos a la fuente sin considerar valores de conductancia o susceptancia dado que no es el caso produciendo que se comporte simplemente como una impedancia equivalente, esta impedancia interna causará el efecto de caída de voltaje deseado. La Figura 3.12 y la Figura 3.13. muestran los parámetros de la modelación de la barra que fue necesario

incluir, así como el bus infinito en serie a una línea de transmisión y un bus convencional, se cargó el flujo de potencia en cada elemento para referenciar la diferencia de voltaje entre la barra infinita y el bus tradicional.

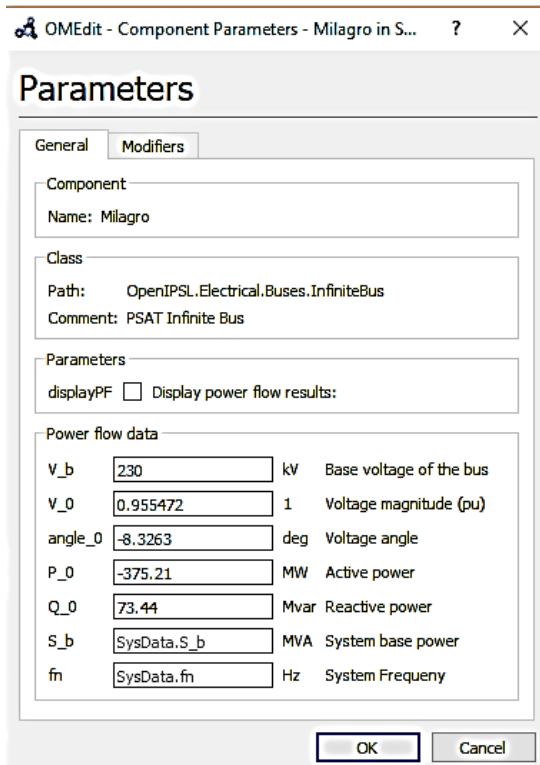


Figura 3.12 Parámetros de barra infinita

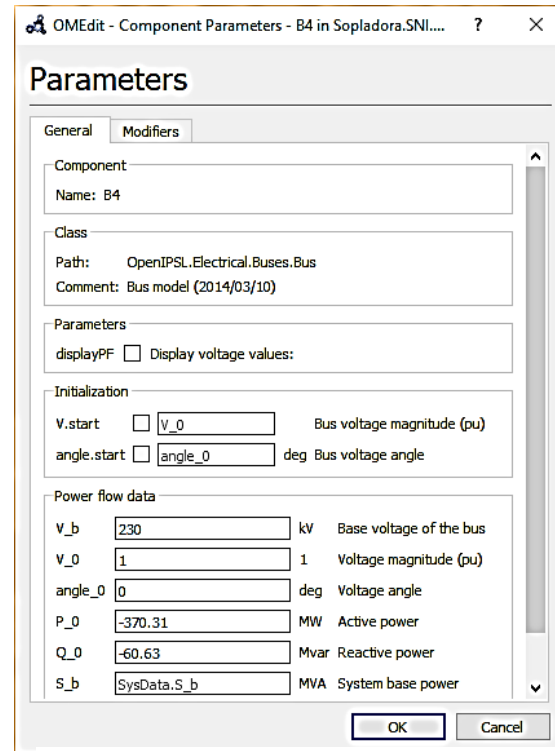


Figura 3.13 Parámetros de barra convencional después de impedancia interna

3.5.5 Validación de sistema equivalente

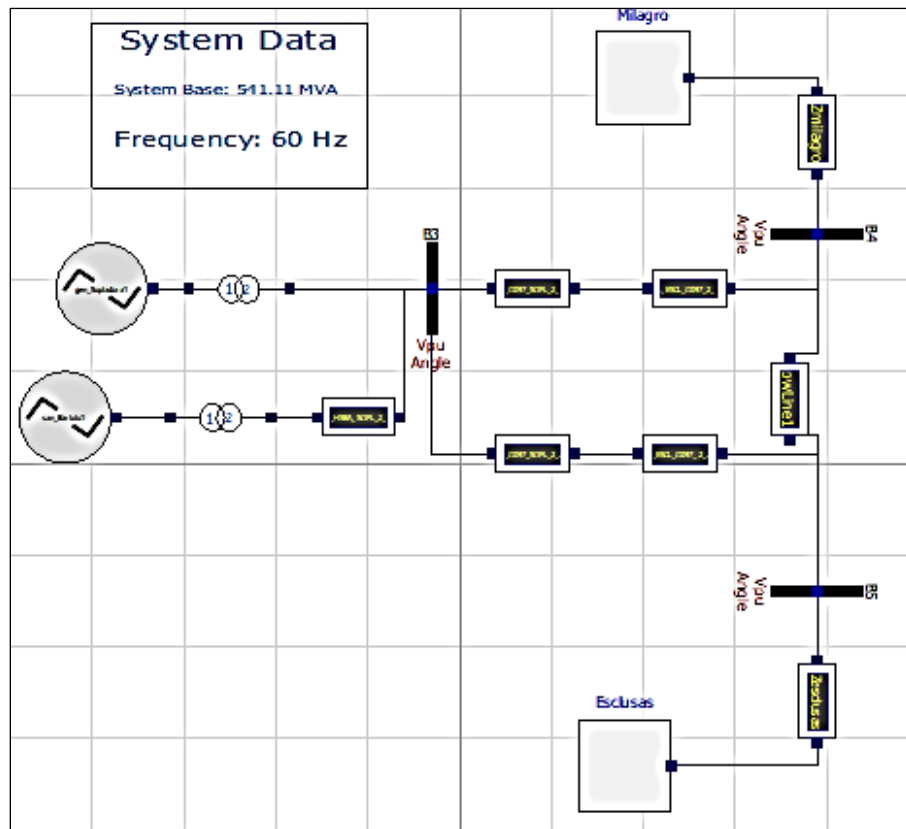


Figura3.14 Diagram View del sistema equivalente

Introducidos todos los componentes del sistema que se han detallado anteriormente, se procede a realizar la validación de los controladores AVR y PSS, para esto se mantiene el pulso interno al generador de Sopladora, el pulso tiene una amplitud de -0.01 y será sumado al voltaje de referencia para afectarlo y ver así la actuación de los controladores produciendo el cambio el voltaje de campo y en el voltaje de los terminales. La validación se realizará comparando la gráfica resultante en Simulink y en OpenModelica mediante el error cuadrático medio como se ha venido planteando hasta ahora.

Entendiendo el procedimiento que hemos seguido para la correcta validación del AVR y PSS Sopladora, el siguiente capítulo mostrará los resultados donde se podrá verificar la viabilidad de OpenModelica





# **CAPÍTULO 4. RESULTADOS**

---

## Capítulo 4. Resultados

---

4.1 introducción.....	92
4.2 Resultados de Validaciones de los controladores.....	92
4.2.1 Caso 1, Carga puramente resistiva.....	93
4.2.2 Caso 2, Carga resistiva inductiva.....	97
4.3 Resultados de la validación de AVR y PSS en Sistema Sopladora .....	102

## 4.1 introducción

En este capítulo se llevará a cabo los resultados obtenidos del trabajo realizado en el capítulo de metodología, primero la Sección 4.1 una introducción al capítulo, luego la Sección 4.2 mostrara los resultados obtenidos específicamente de los controladores diseñados y se finaliza con la Sección 4.3 la cual son los resultados de aquellos controladores validados en la Sección anterior 4.2 pero en el sistema equivalente del SNI.

## 4.2 Resultados de Validaciones de los controladores

Se realizaron varias simulaciones para validar los controladores, tanto el AVR, como el PSS en OpenModelica para ser comparados con los resultados de las simulaciones obtenidas en Simulink.

Como entradas se colocaron diferentes valores de pulsos, y a la vez diferentes cargas, una puramente resistiva y la otra a cargar resistiva inductiva . Para validar los controladores. En la Figura 4.1 se realiza un pequeño sistema conformado por una barra y carga, siendo añadido el sistema de generadores de Sopladora anteriormente explicado en el Capítulo 3.

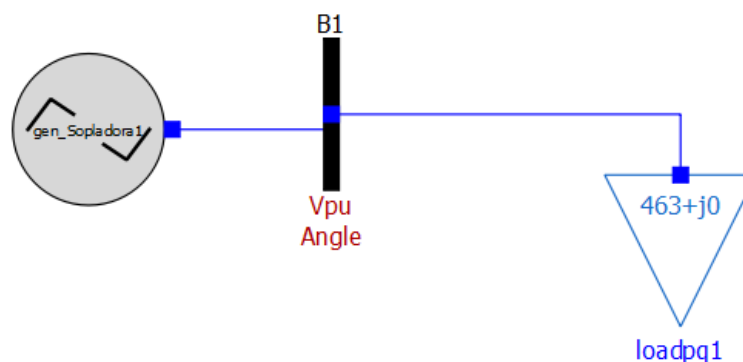


Figura 4.1 Sistema generador, barra y carga

Dentro de aquel icono llamado gen\_Sopladora1, se haya todo el esquema de los controladores a simular, con una ganancia a la salida del PSS, que indica su participación en la simulación, como se muestra en la Figura 4.2. Se procede a realizar los diferentes casos de simulación:

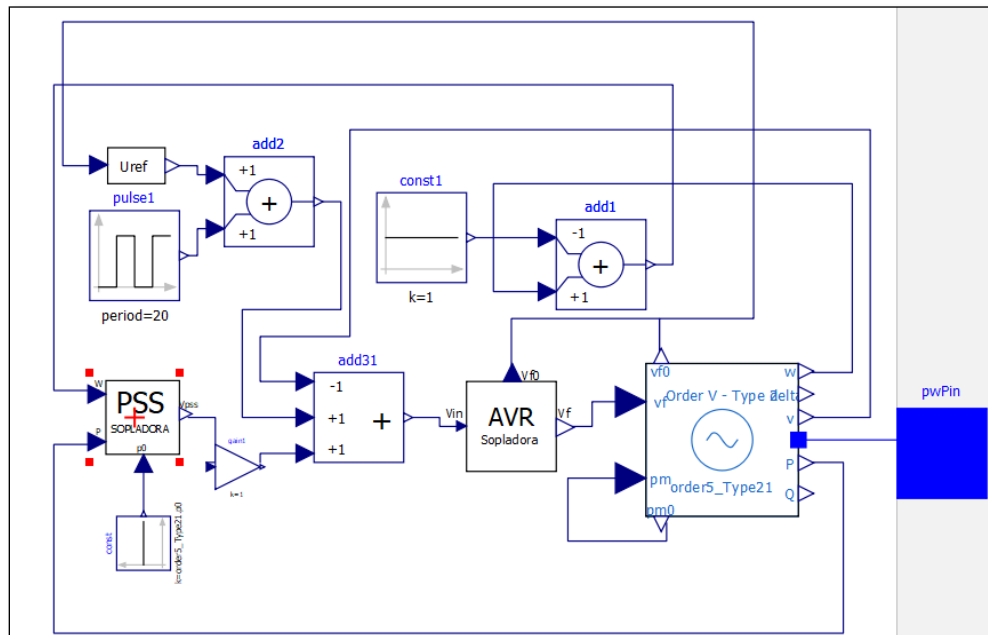


Figura 4.2 Sistema de controladores en OpenModelica

#### 4.2.1 Caso 1, Carga puramente resistiva

En el Caso 1, el tiempo de inicialización es a los 10 segundos, con una carga de 463MW, su pulso con un valor de -0.01, primero se mostrarán los resultados únicamente con los efectos del AVR y luego los efectos del AVR+PSS.

Amplitud	Tiempo de inicio (s)	Carga
-0.01	10	463MW

## Resultados únicamente con el AVR

El primer caso, se realiza únicamente con carga resistiva y un pulso de -0.01, con esto se simula y compara el efecto del AVR y la adicción del PSS.

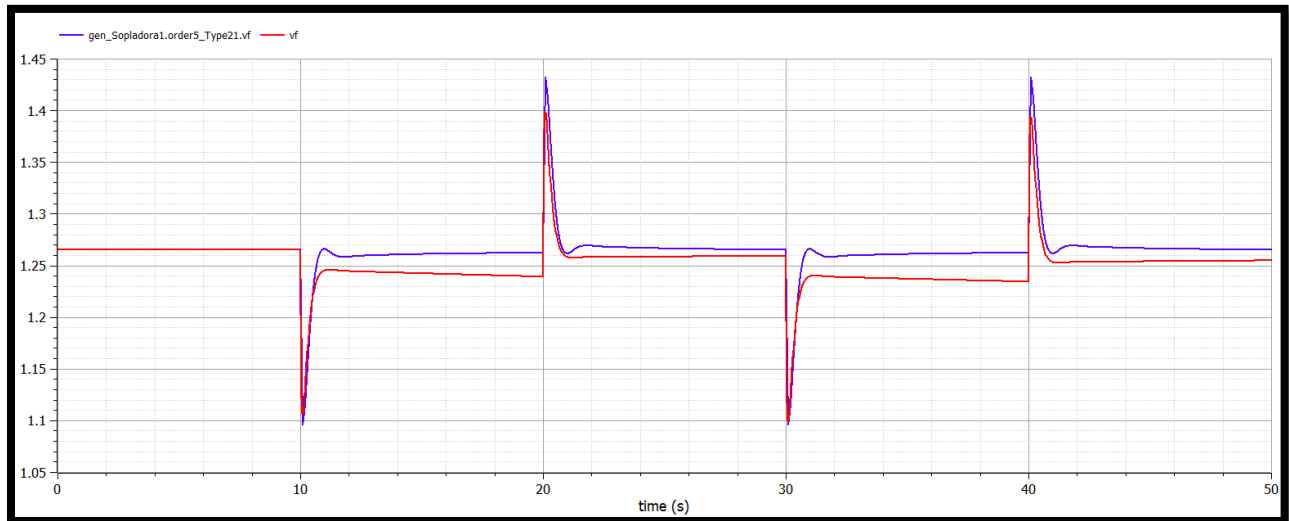


Figura 4.3 Gráfica del voltaje de campo

La Figura 4.3, muestra el voltaje de campo  $V_f$ , grafica obtenida en OpenModelica en la cual se puede observar las dos curvas tanto en simulink de color rojo y la curva en OpenModelica de color azul, observándose la similitud con una poca variación de valores, la cual será calculada con un método de error ECM. De la misma manera, en

la Figura 4.4 se efectúa el análisis con el voltaje en los terminales

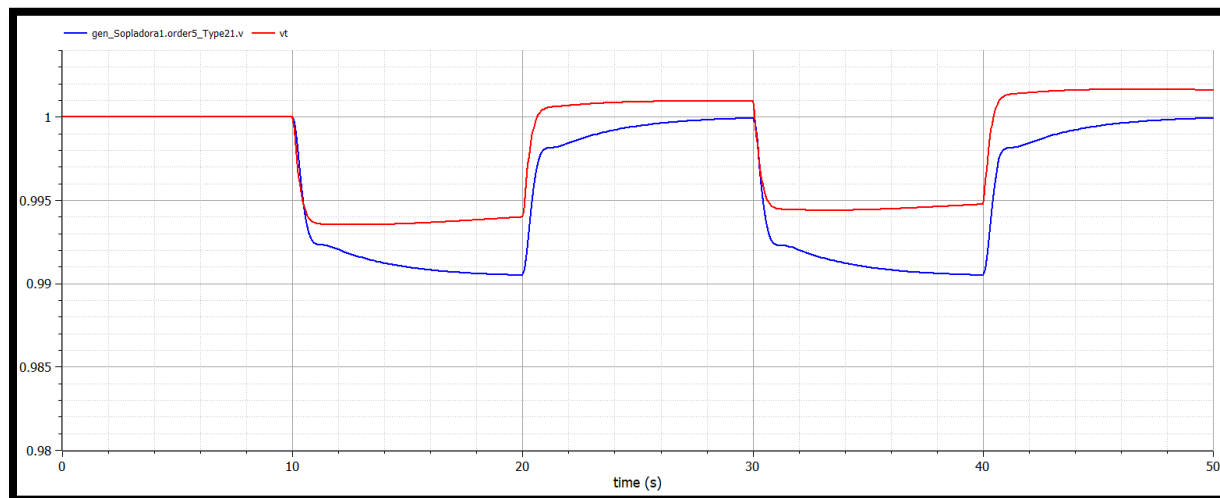


Figura 4.4 Gráfica de voltaje en los terminales

### Utilización añadiendo AVR y PSS

Se realizan las mismas simulaciones pero ahora con la participación del PSS, se procede a activar la ganancia  $k=0$  a  $k=1$ , que permite actuar al PSS como se muestran en la Figura 4.5 y Figura 4.6.

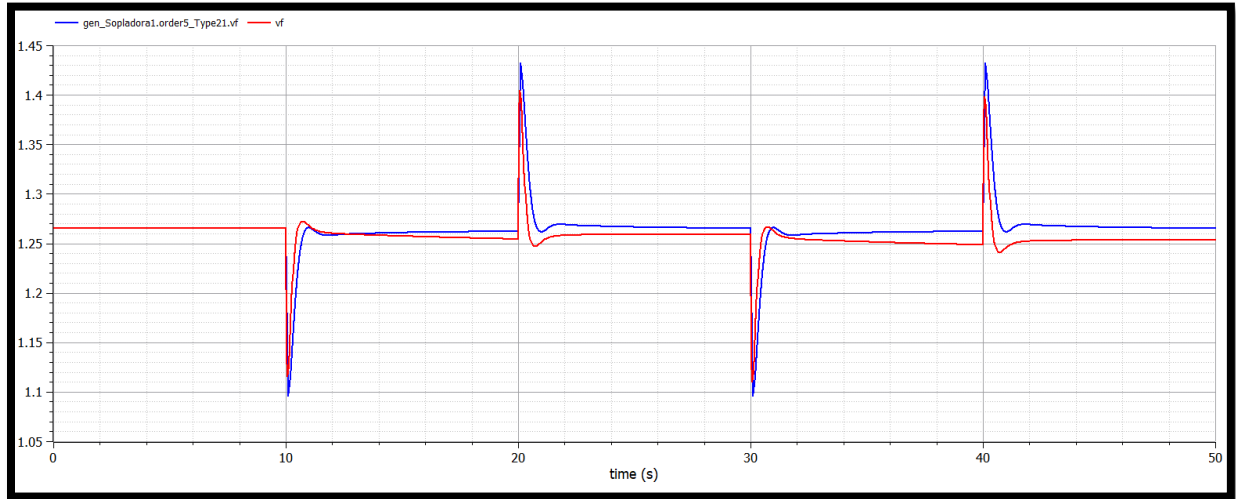


Figura 4.5 Gráfica del voltaje de campo con PSS

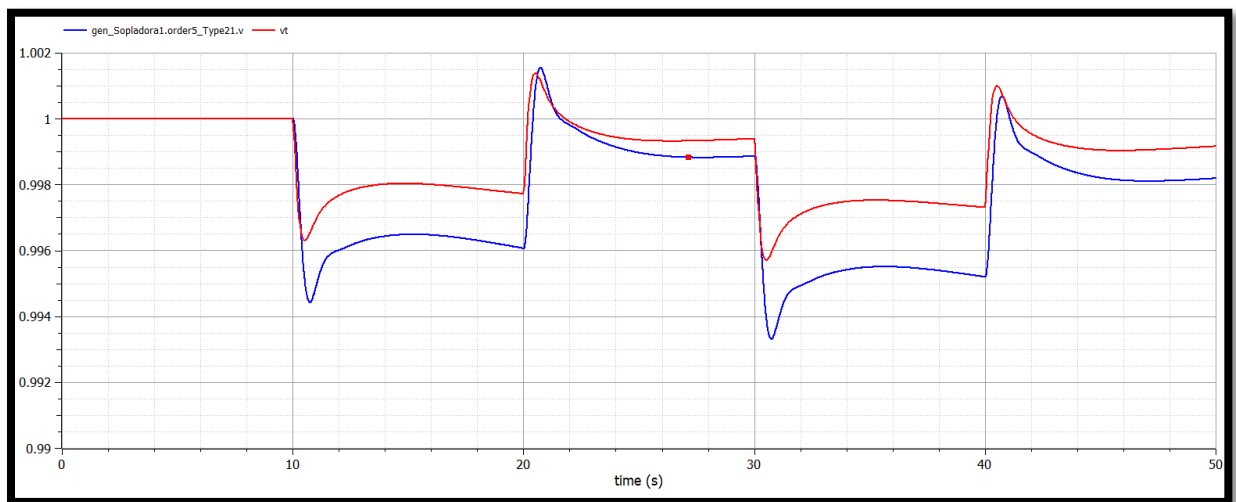


Figura 4.6 Gráfica de voltaje en los terminales con PSS

Con la adición del PSS, se refleja en la Figura 4.5, una mejor respuesta en los picos de voltaje, mientras que en la Figura 4.6 se observa cómo actúa el voltaje en los terminales con la acción del PSS.



**4.2.2 Caso 2, Carga resistiva inductiva**

En caso 2, se mantiene el pulso del anterior caso 1, pero cambia la carga, siendo ahora resistiva inductiva, para reflejar las respuestas que se presentan ante estos cambios de carga, por parte de los controladores.

Amplitud	Tiempo de inicio (s)	Carga
-0.01	10	463+j293

La Figura 4.7 y la Figura 4.8, indica el voltaje de campo y voltaje en los terminales respectivamente, con los cambios realizados en la carga.

**Resultados únicamente con el AVR**

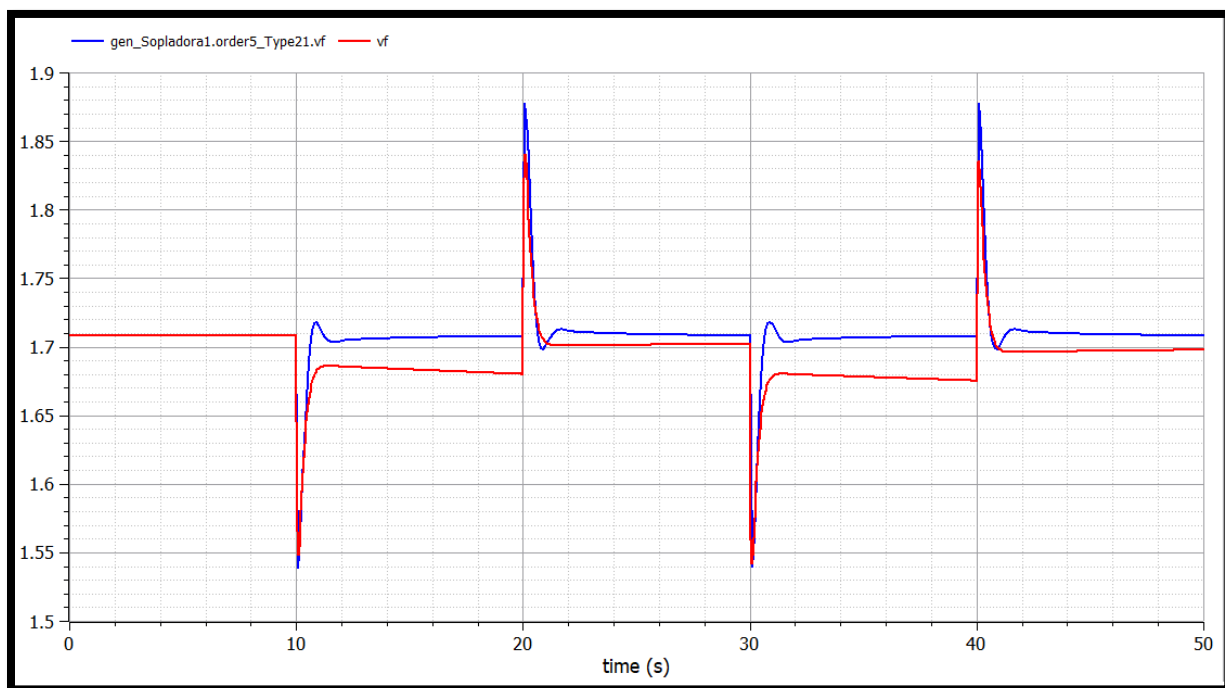


Figura 4.7 Gráfica del voltaje de campo

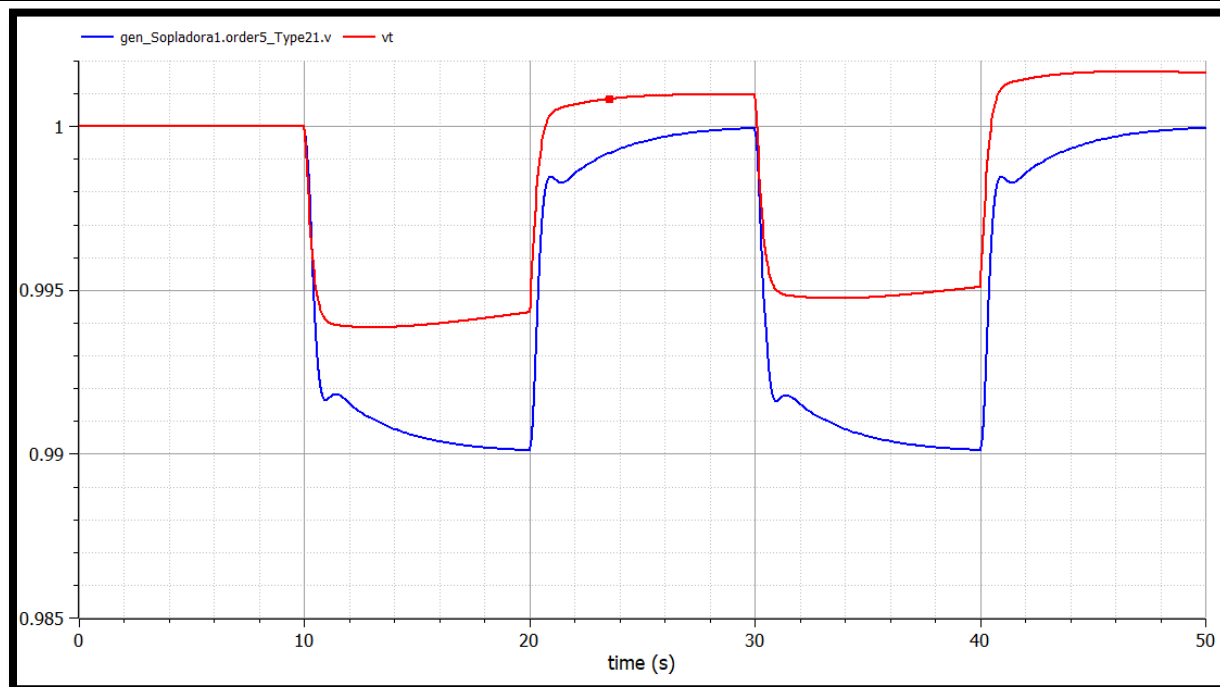


Figura 4.8 Gráfica de voltaje en los terminales

### Utilización añadiendo AVR y PSS

Se realizan las mismas simulaciones pero ahora con la participación del PSS, se procede a activar la ganancia  $k=0$  a  $k=1$ , que permite actuar al PSS como se muestran en la Figura 4.9 y la Figura 4.10

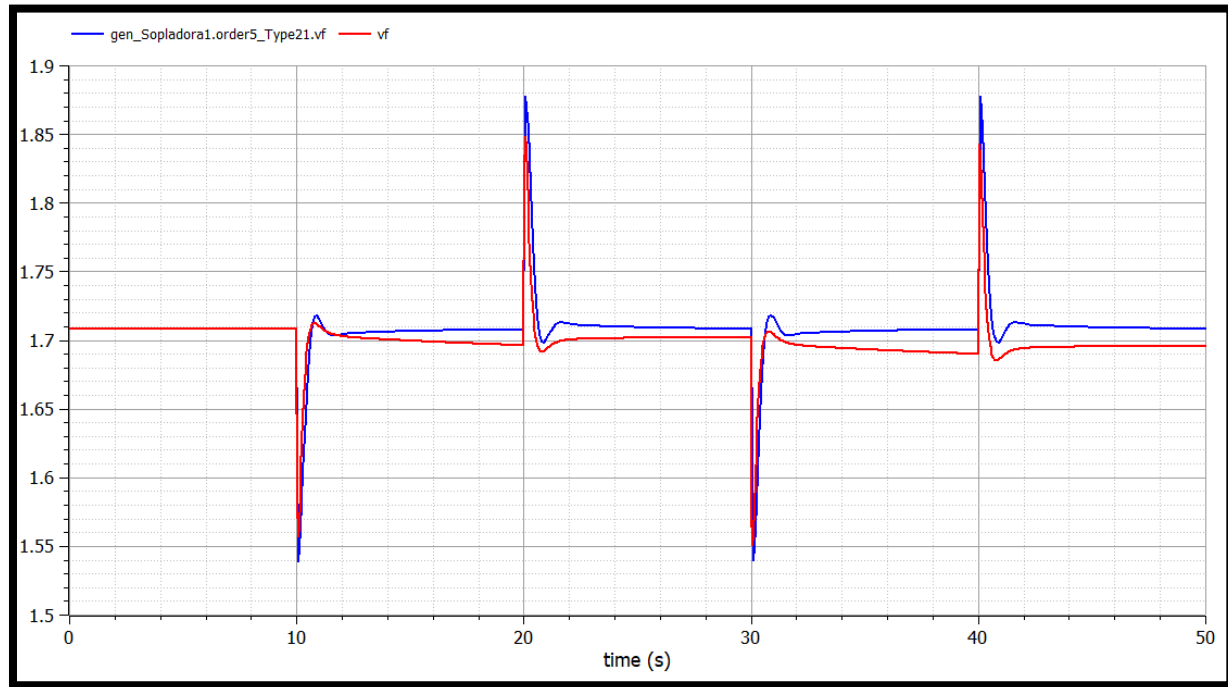


Figura 4.9 Gráfica del voltaje de campo con PSS

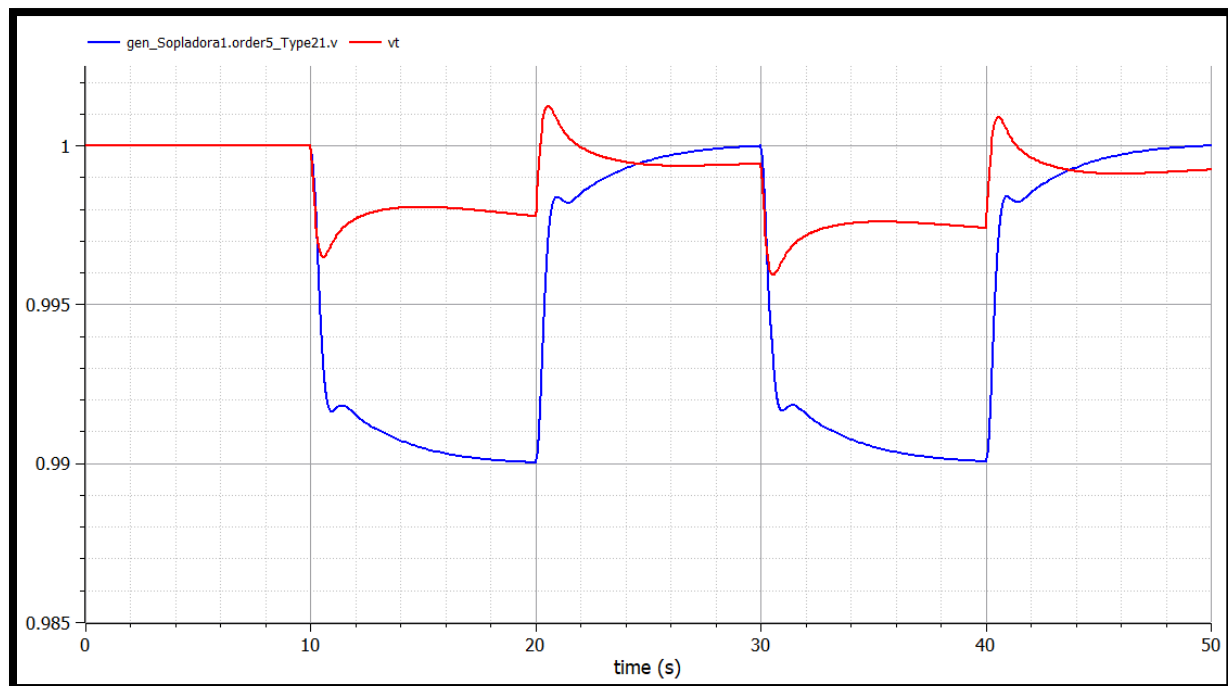


Figura 4.10 Gráfica de voltaje en los terminales con PSS

Una vez efectuada las simulaciones y haber sido comparadas, en los dos casos de análisis, se concluye un efectivo diseño de los controladores en el programa OpenModelica, se realizaron varios escenarios, obteniéndose respuestas similares entre ambos programas, para una vista más clara, en la que se ve el efecto que origina el PSS al ser incorporado, y las efectivas similitudes en las respuestas a las perturbaciones originadas se puede observar la Tabla 4.1, la cual muestra las respuestas de voltaje de campo y voltaje en los terminales, del caso 1 realizado con un pulso de  $-0.01$ , para una simulación de un tiempo de 50 segundos, con una carga implementada de 463 MW, como se refleja en la comparación, la respuesta gráfica en OpenModelica es muy similar a la respuesta en Simulink, luego con la participación del PSS, sus niveles de perturbación llegan a disminuir, el valor pico de la perturbación viene a ser de 1.008, luego con la acción del PSS su pico baja a 1.005. Por lo que se llega a obtener los primeros resultados de simulación de una manera satisfactoria.

Breve comparación de una simulación

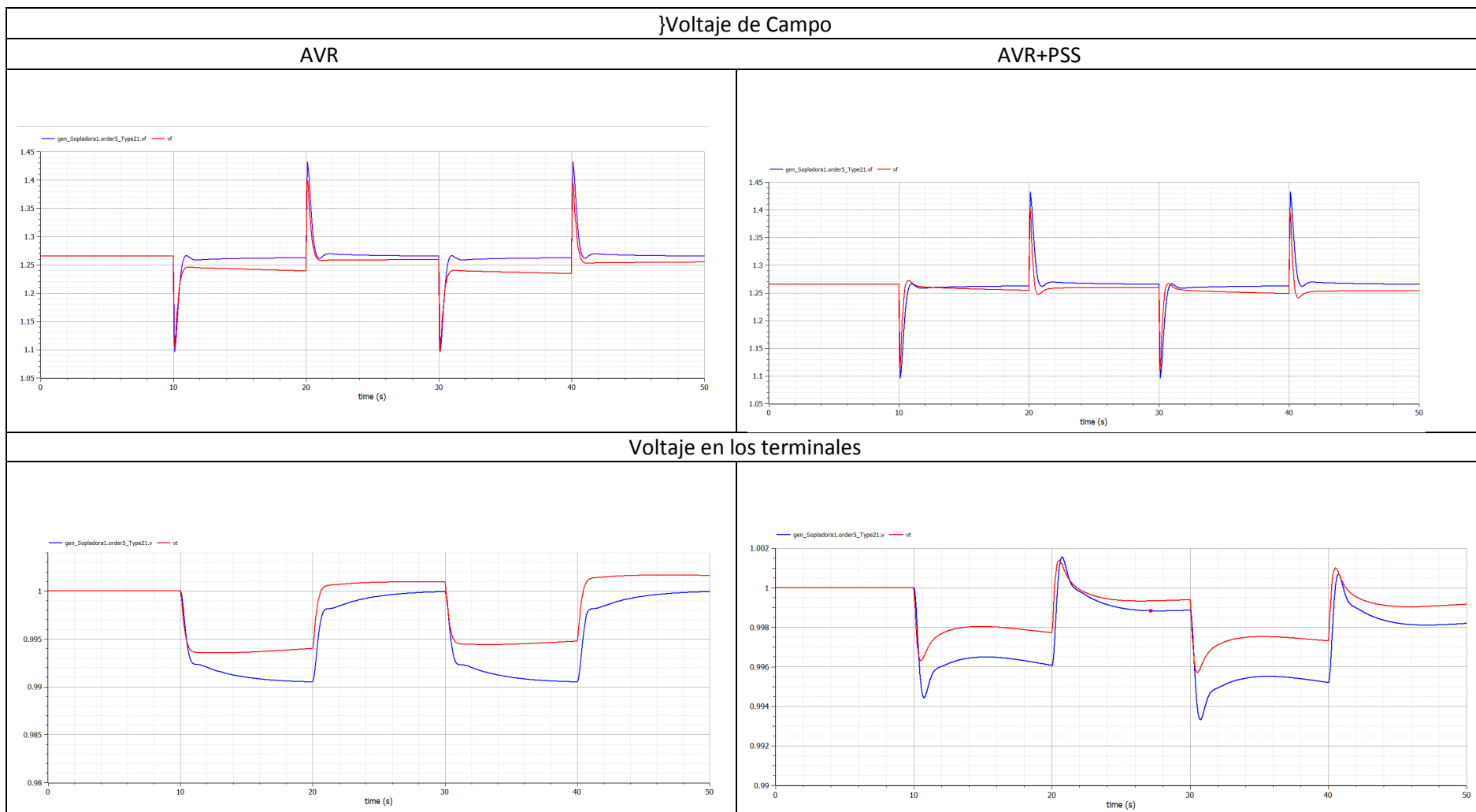


Tabla 4.1 Comparación de Validaciones entre OpenModelica y Simulink

Luego de tener los resultados se opta por un método de estimación de error conocido como el error cuadrático medio, descrito en la sección 2.6. Se tomará como valor teórico el resultado obtenido en la simulación de Simulink, y como valor real el resultado de OpenModelica. Al tener todos los cálculos se realizó la

	AVR		AVR+PSS	
	vf	vt	vf	vt
caso 1	1.285E-03	2.575E-05	9.290E-04	5.049E-06
caso 2	1.338E-03	2.736E-05	9.270E-04	2.935E-05

Tabla 4.2, que muestra los resultados de los cálculos de MSE, siendo valores muy pequeños, los valores indican que su aproximación es relativamente alta.

	AVR		AVR+PSS	
	vf	vt	vf	vt
caso 1	1.285E-03	2.575E-05	9.290E-04	5.049E-06
caso 2	1.338E-03	2.736E-05	9.270E-04	2.935E-05

Tabla 4.2 Resultados del ECM, de los diferentes escenarios de Simulación

Como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, los resultados del caso 1 y el caso 2, los valores de MSE son relativamente bajos, por lo que sus valores serían considerados similares.

### 4.3 Resultados de la validación de AVR y PSS en Sistema Sopladora

En esta sección se da a mostrar los resultados de los controladores de la sección 4.1, pero en este caso se desarrolla en el Sistema completo como se observa en la Figura 4.11

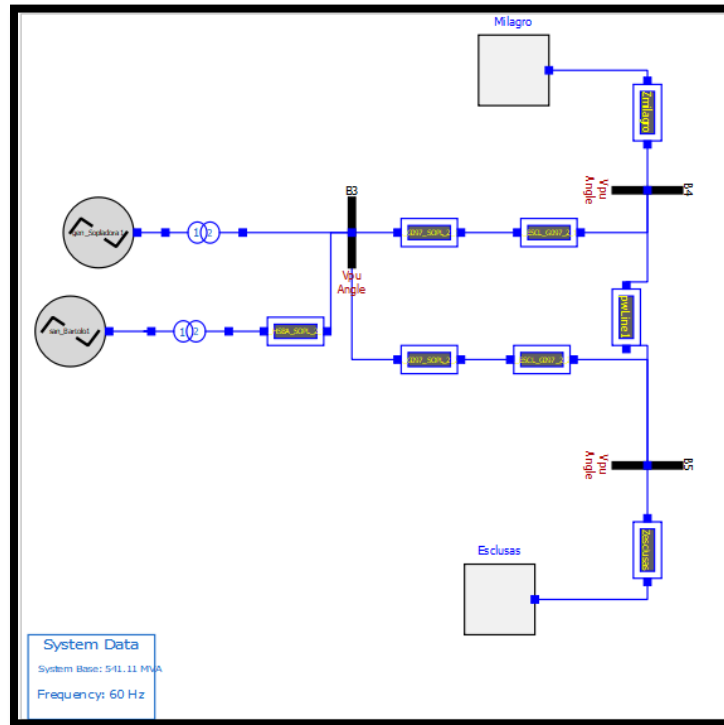


Figura 4.11 Generadora de Sopladora añadida al SNI

Las gráficas obtenidas solo aplicando el AVR, aplicando un pulso de -0,01, se obtienen a continuación, mostradas en la

Figura 4.12 Voltaje de Campo aplicado al Sistema SNI

Luego al ser incorporado el PSS, se refleja las respuestas en la

Figura 4.14 y la Figura 4.15.

**Simulaciones añadiendo solo el AVR**

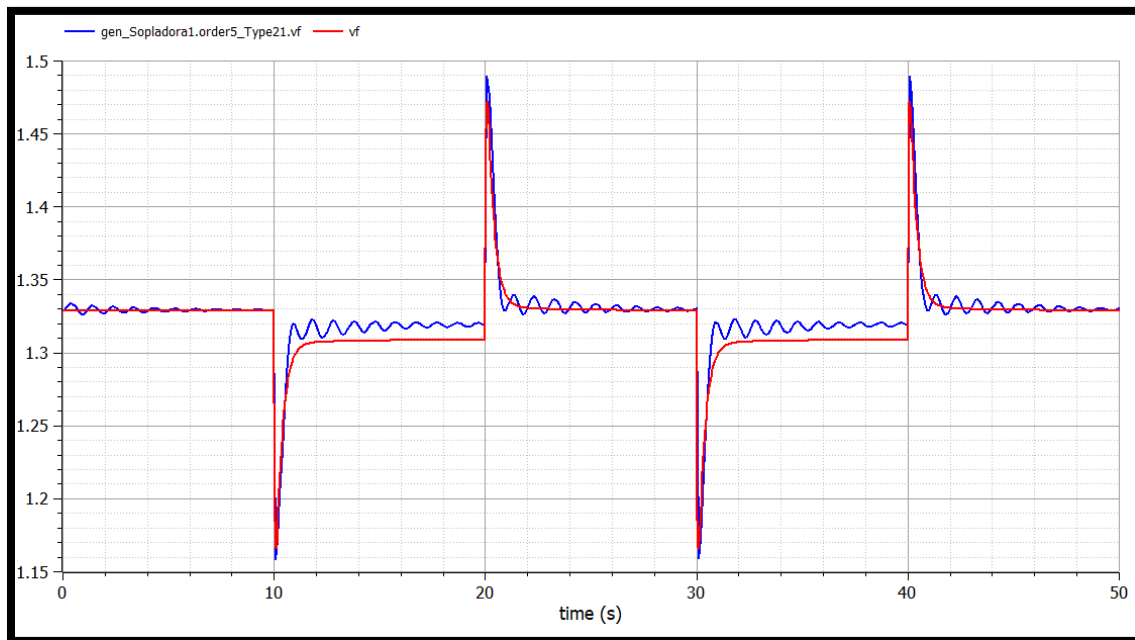


Figura 4.12 Voltaje de Campo aplicado al Sistema SNI



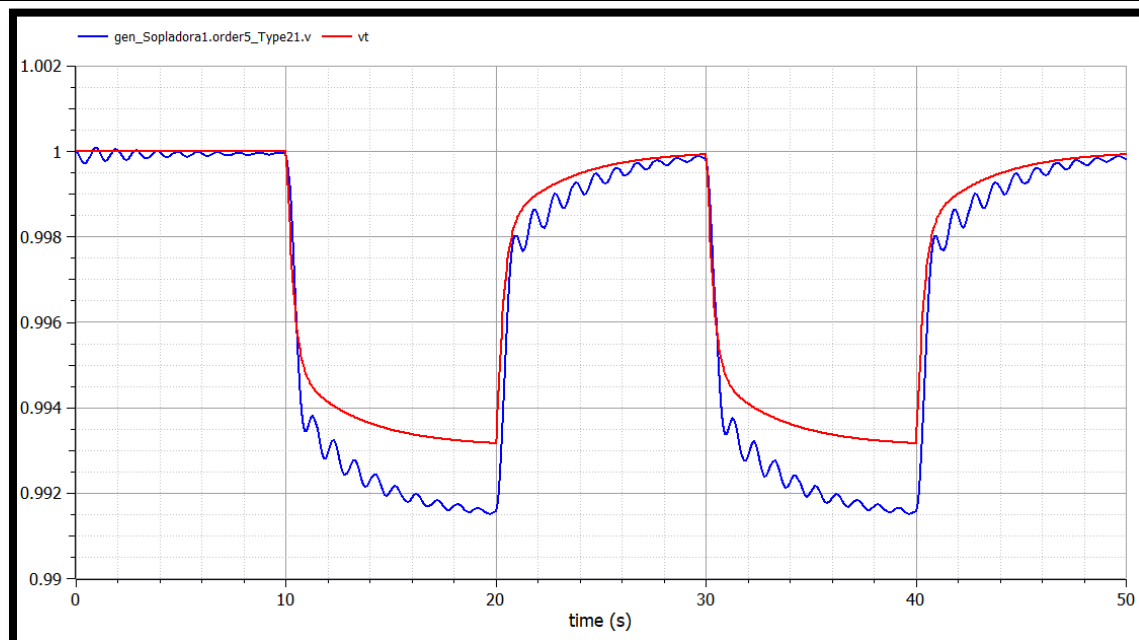


Figura 4.13 Voltaje en los terminales aplicado al Sistema SNI

**Simulaciones añadiendo el AVR y el PSS**

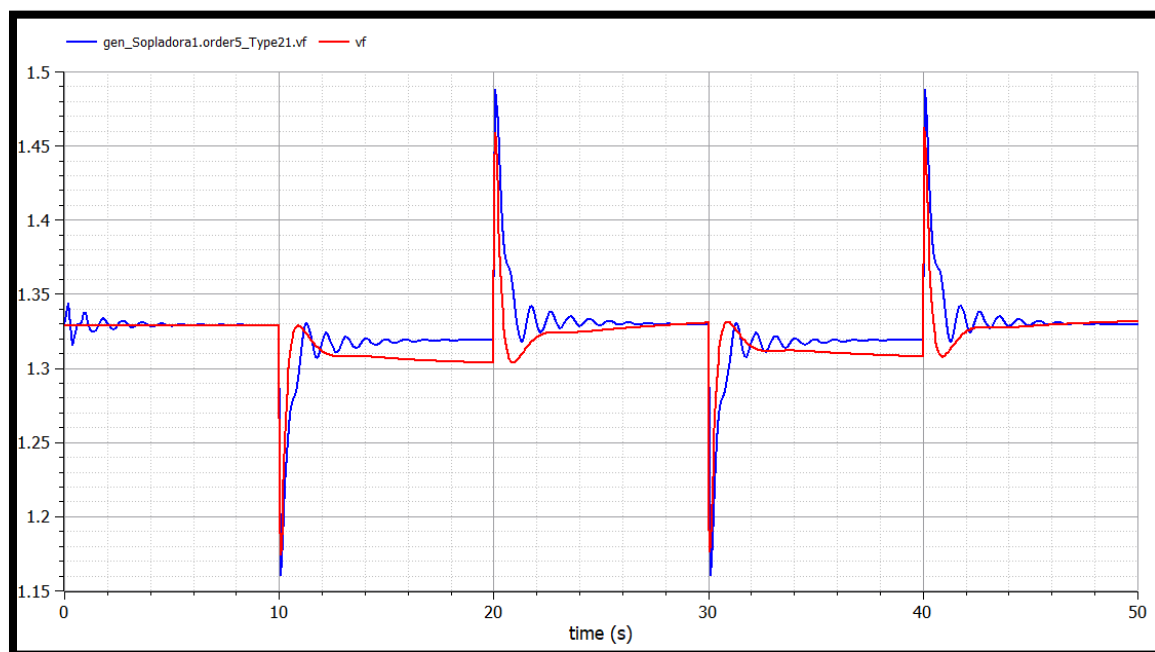


Figura 4.14 Voltaje de Campo aplicado al Sistema SNI

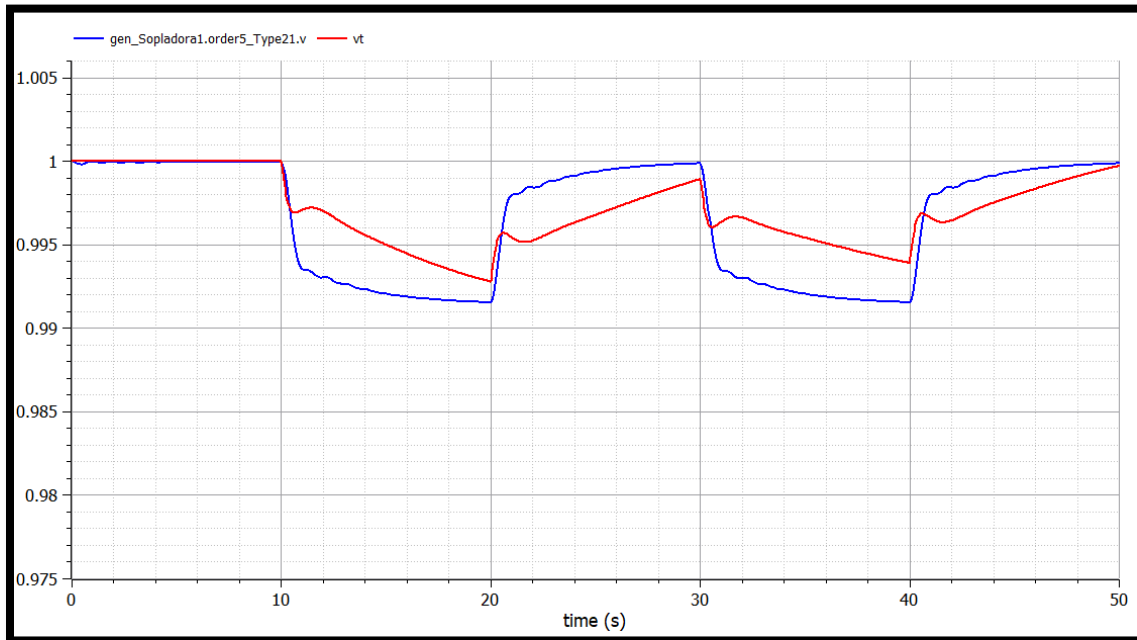
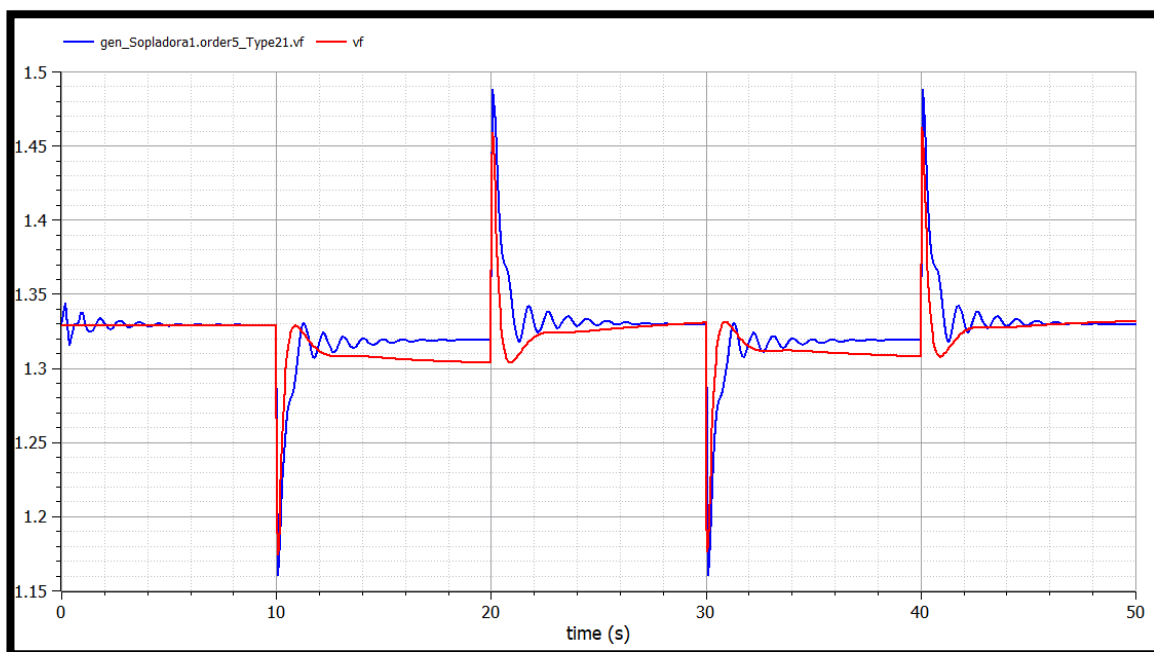


Figura 4.15 Voltaje en los terminales aplicado al Sistema SNI



La

Figura 4.14 y la Figura 4.15, muestran la acción del PSS en el sistema, como ha afectado su comportamiento, se definió anteriormente que la conexión del PSS mejora la amortiguación de las respuestas de voltaje, la cual se pierde un poco por la acción del AVR el cual en cambio llega a mejorar la sincronización. Los resultados en las gráficas muestran la cercanía en las respuestas, siendo implementado en Simulink y en el programa OpenModelica. Se realizó una prueba con un pulso diferente, el pulso 2 de -0.03 y las respuestas se observan en la

	AVR		AVR+PSS	
	vf	vt	vf	vt
Pulso 1	1.438E-03	2.169E-05	1.146E-03	2.119E-05
Pulso 2	1.295E-02	1.960E-04	1.026E-02	1.920E-04

Tabla 4.3, se muestra sus respuestas con AVR y PSS. Para el análisis de efectividad de las respuestas de OpenModelica, comparadas con las respuestas de Simulink, se realiza de nuevo el ECM, mostrados en la Tabla 4.4.

	AVR		AVR+PSS	
	vf	vt	vf	vt
Pulso 1	1.438E-03	2.169E-05	1.146E-03	2.119E-05
Pulso 2	1.295E-02	1.960E-04	1.026E-02	1.920E-04

Tabla 4.3 Resultados del ECM, de los diferentes escenarios de Simulación

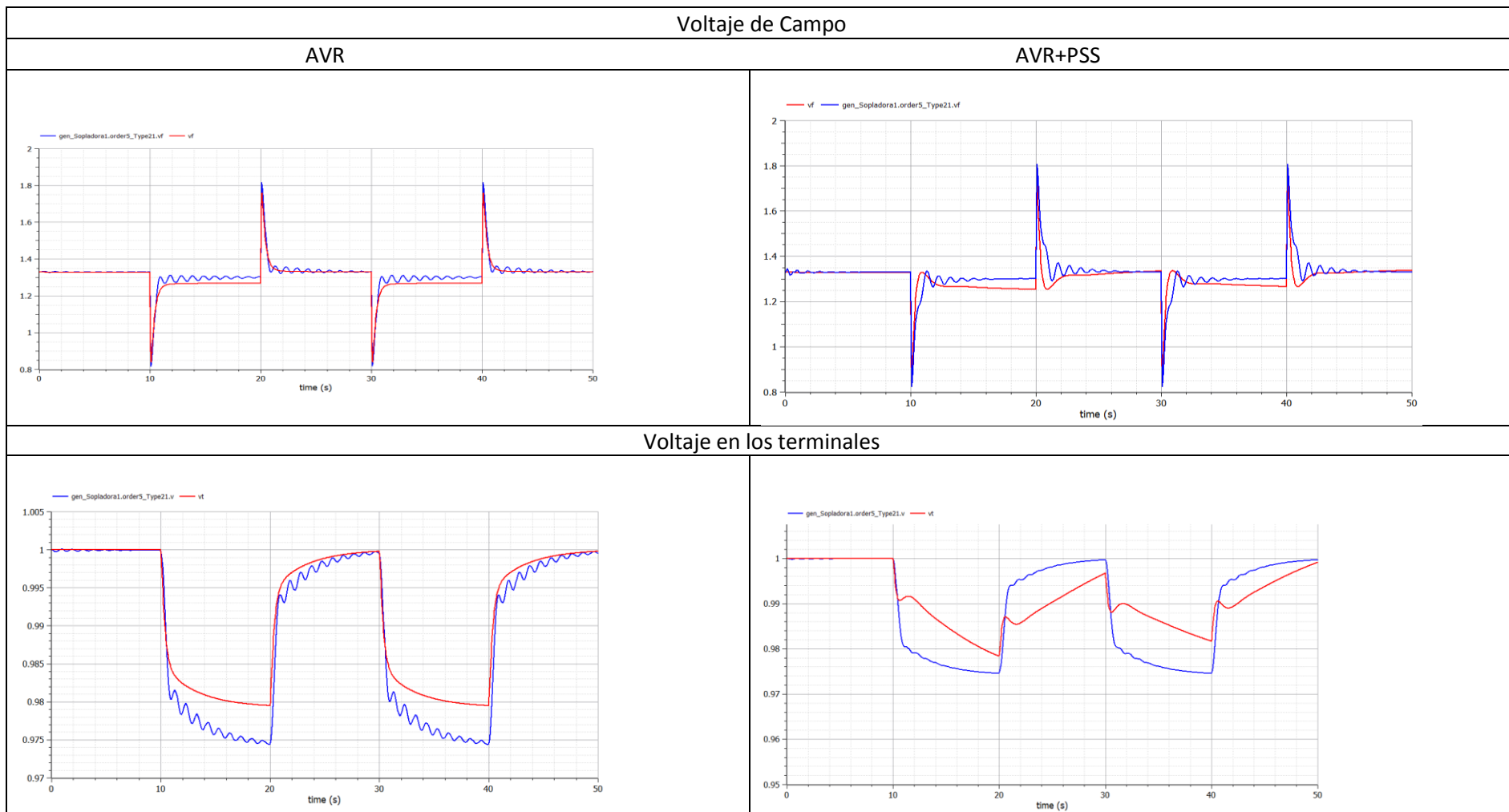


Tabla 4.4 Comparación de Validaciones entre OpenModelica y Simulink con el pulso 2

La

Tabla 4.5 Resumen de proceso de las simulaciones muestra el resumen de las características efectuadas en cada entorno de simulación, indica las diferencias en cada una de estas plataformas, como su ambiente de simulación y su método de integración que son en las cuales se diferencian, mientras que en las características del tiempo del pulso, la tolerancia y el tiempo de simulación se mantienen a valores iguales. Los puntos obtenidos fueron de acuerdo al intervalo del tamaño de pasos dados, para estas simulaciones fue de un valor de 0.04, obteniendo así una cantidad de 1250 puntos en Matlab y OpenModelica.

Proceso	Simulink	OpenModelica
Ambiente de Simulación	Matlab	OMEdit
Metodo de integración	Ode23t	DASSL
Tiempo de paso	0.04	0.04
Tolerancia	1e-6	1e-6
Tiempo de Simulacion	50s	50s

Tabla 4.5 Resumen de proceso de las simulaciones

En resumen, se pudo observar los resultados de los diferentes casos en la sección 4.1 respecto a las primeras validaciones de los controladores , notándose que para una respuesta con carga resistiva sus graficas se mostraban con menos alteraciones que el caso 2, siendo una carga resistiva inductiva. Una vez tenido validado los controladores se procedió con la sección 4.2 siendo implementado con los valores y flujos de potencia del sistema equivalente descritos en la sección 3.5.5, cuyos resultados se optimizaron en la Tabla 4.4. siendo resultados con un pulso de valor de -0.03 para mostrar las respuestas ante un valor de pulso diferente.



# **CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN**

---



## Capítulo 5. Discusión

---

5.1 Introducción.....	114
5.2 Datos de entrada del sistema.....	114
5.3 Procesos y validaciones en OpenModelica.....	115
5.4 Reconciliación con otros programas .....	117

## **5.1 Introducción**

El capítulo 4 propuso la interpretación generalizada de los resultados obtenidos en la validación de modelos de controladores vía excitación creados en la librería “Sopladora” desarrollados en la interfaz de OpenModelica. Mientras que en este capítulo se analizan particularidades presentadas en el desarrollo de la investigación. La Sección 5.1 analizará el trabajo realizado desde una óptica crítica, comparándolo con otras investigaciones realizadas en el mismo campo. En la Sección 5.2 analizaremos el origen y confiabilidad de los datos y resultados obtenidos. La Sección 5.3 compara procesos de validación, señalando limitantes vistas durante el desarrollo.

Nuestra simulación involucra alrededor de diecinueve componentes pertenecientes a la librería OpenIPSL, del package PSAT, además tres modelos desarrollados por los autores; el bloque de voltaje de referencia, el cual servirá como entrada para el AVR, el regulador de voltaje y estabilizador de sistemas de potencia. Se buscó una modelación precisa del comportamiento del regulador instalado en la central hidroeléctrica Sopladora, esto caracteriza nuestra modelación frente a las validaciones realizadas previamente en OpenModelica, (Maxime Baudette, 2018) donde se modelan, por ejemplo, gobernadores estándares, bajo descripciones “IEEET1”, “IEEEST”, “STAB2A” entre otros.

## **5.2 Datos de entrada del sistema**

Los datos ingresados fueron tomados de una simulación del sistema eléctrico equivalente a la barra de 230 kV Sopladora, realizada por el Ingeniero de Investigación y Desarrollo de CENACE, Pablo Verdugo. De aquí se obtuvo no solo la parametrización de los controladores AVR y PSS sintonizado en campo, sino también información referente a todo el sistema de potencia; impedancia y longitud de las líneas, características propias, transientes y sub-transientes de ambas máquinas (Sopladora y San Bartolo), información referente transformadores y demás. Sin este aporte, el desarrollo de nuestro trabajo hubiera sido mucho más lento, pues toda esta información

---

la maneja directamente cada central. El conjunto de datos nos fue proporcionado en el espacio de MATLAB/Simulink, el mismo que se usó como programa de referencia para la validación, esto involucró ventajas y desventajas; entre ellas destacamos la facilidad de simulación, nuestro trabajo fue proyectar exactamente el mismo modelo en la interfaz de OpenModelica y no simularlo en ambos espacios, ambos programas cuentan con un método de integración potente, la respuesta de Simulink es confiable por lo que garantiza la consistencia dinámica de OpenModelica; una desventaja considerable es que no se ha realizado una validación de los elementos de Simulink en OpenIPSL, esta librería contiene elementos de PSAT y PSSE, por lo que en la implementación se decidió usar elementos de PSAT al ser los más parecidos en comportamiento a Simulink, sin embargo no se podría argumentar que se realizó una validación “programa – to – software” porque no estamos comparando los mismos modelos, solo dos elementos fueron modelados exactamente igual, el AVR y PSS Sopladora.

### **5.3 Procesos y validaciones en OpenModelica**

La validación se realiza de manera cualitativa y cuantitativa, a través de los gráficos podemos interpretar que las señales de resultado son muy cercanas, sin embargo, no es hasta que obtenemos el error cuadrático medio que podemos deducir en base a un estimado numérico el error. El número de valores que sean considerados en la discretización afectará directamente el error total, considerando que, a mayor cantidad de puntos seleccionados, existirá una mejor aproximación, en los estudios realizados por Murad, et al., (2015) se propone una discretización en el rango de 15000 – 25000 datos, en un tiempo de simulación de 25 segundos, en este trabajo el tiempo de simulación es en promedio 40 segundos, aún así se ha utilizado una discretización en el rango 1500 a 2000 puntos porque al intentar introducir un mayor número de puntos, se produce un “crash report” como el programa le llama cuando colapsa, la limitante es el procesador de la computadora.

Durante la simulación, componentes como generadores y cargas deben ser inicializados con datos de flujos de potencia mientras que otros elementos referenciales como barras o barra infinita, se inicializan con valores de potencia activa, reactiva, voltajes y ángulos.

---

Todo esto es necesario porque OpenModelica no cuenta con la capacidad de calcular flujos de potencia bajo ningún método, aunque pudiera verse como una desventaja, realmente esto nos desacopla a usar un método de cálculo en específico, permitiendo el intercambio entre diferentes espacios de simulación, pero también lo hace dependiente a un programa como Simulink que realiza el cálculo para la inicialización. Otra limitante que encontramos durante la creación del sistema fue que el transformador es simulado como una impedancia en serie sin pérdidas en el entrehierro, esto no nos permitió configurar el tipo de conexión y mucho menos la secuencia fasorial de voltajes, causando así que el flujo de potencia real se vea afectado, fue necesario modificar la conexión en Simulink de los transformadores a estrella aterrizado en ambos devanados para poder comparar los dos sistemas.

OpenModelica no fue creado para darle específicamente un uso eléctrico y mucho menos en sistemas de potencia, lo sobresaliente del programa es que, al poseer un lenguaje de programación, con la versatilidad dual entre orientado a objetos o codificación tipo script `c++` y declaración de ecuaciones matemáticas, se adapta a las preferencias del usuario, además se pueden desarrollar librerías de modelos bastante específicos. Nuestro principal interés como ya se describió en la sección 5.1 es crear modelos exactos de controladores AVR y PSS para obtener el comportamiento dinámico específico de cada máquina, considerando que el modelado de los controladores son netamente matemáticos y gracias al sistema de integración implícita `dassl` que implementa `modelica`, en nuestro caso, la resolución de un diagrama de bloques con funciones de transferencia tipo continuas en el dominio de Laplace será bastante preciso al compararlo con el método de integración utilizado en el solver de Matlab/Simulink el `ode23t`, bastante potente para resolver este tipo de análisis matemático además vale mencionar que evitamos utilizar el `ode45` (Dormand-Prince) que viene dado por default en el modelado de Simulink porque al realizar mayor pasos para una integración más exacta, produce muchas variaciones en la señal de salida y provoca una señal bastante oscilatoria. En este trabajo se desarrolló la librería denominada “Sopladora”, con elementos particulares ya que el diseño que aquí se presenta es el diagrama de control y programación del controlador AVR y PSS de la central hidroeléctrica Sopladora, aunque no se consiguió

---

un seguimiento exacto de respuesta, existen algunos factores a considerarse, entre ellos que la modelación de máquina creada en Simulink toma más información en el modelado del generador abarcando datos que Modelica no utiliza como el número de polos, el tipo de rotor e información inicial de corrientes, ángulos y voltaje de campo, además de pequeños detalles en el resto de componentes usados para simular el resto de la red que ya han sido mencionados previamente y que también producen una pequeña variación en la respuesta de nuestros modelos.

#### **5.4 Reconciliación con otros programas**

Nuestro trabajo usa Modelica que se transforma en una novedad al dar la libertad de código abierto en cada uno de sus modelos preestablecidos, programación orientada a objetos basada en ecuaciones matemáticas y demás características mencionadas en el desarrollo de este trabajo, no reemplazará a ninguno de los programas comerciales, ya que cada uno tiene una implementación justificada y desarrollada, sin embargo, pueden ser complementados por una librería más amplia y precisa desarrollada en el espacio de Modelica de acuerdo a las necesidades de investigación. Matlab es uno de los programas más reconocidos a nivel de ingeniería, principalmente por su capacidad de análisis numérico, en el ámbito de sistemas de potencia su herramienta Simulink, específicamente el bloque “powergui”, tiene la capacidad de realizar cálculos de tipo fasoriales, continuos y discretos. Mientras tanto, OpenModelica a pesar de su versatilidad, depende de una inicialización dada por un programa que calcule el flujo de potencia. Esto significa que no estamos comparando dos programas de igual implementación; por un lado Matlab/Simulink, Power Factory/DigSilent o PSSE, por nombrar unos cuantos, son programas con una trayectoria y reconocimiento amplio en el campo de sistemas de potencia.

## **CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES**

---

## Capítulo 6. Conclusiones

---

6.1 Introducción.....	120
6.2 Recomendaciones para futuras investigaciones .....	122

## 6.1 Introducción

En esta sección se da a conocer las conclusiones que el presente trabajo ha dado como resultado, se define qué objetivos han sido cumplidos y se da respuesta a las preguntas. En esta sección se da a establecer las conclusiones que el presente trabajo ha dado como resultado, se define qué objetivos han sido cumplidos y se da respuesta a las preguntas de investigación efectuadas en el Capítulo 1.

Las conclusiones son las siguientes:

- Se dio a conocer los antecedentes, mediante la introducción al tema a tratar en este documento, así como la descripción y justificación del problema, se logró enfatizar la importancia del porque investigar sobre el programa OpenModelica. Esta conclusión cumple el objetivo 1.
- Se obtuvo una retroalimentación de los conceptos básicos, partiendo de cómo está conformado un sistema de potencia, las partes principales de una hidroeléctrica, incluyendo las características de la Central Hidroeléctrica Sopladora de la cual se trata este documento, los diferentes tipos de estabilidad, las unidades de generación en donde entran los controladores de Potencia tales como el AVR y PSS, el programa OpenModelica el cual se redactó acerca de su funcionabilidad y por último acerca del error cuadrático medio (ECM), método el cual ayuda a estimar el error entre los dos resultados obtenidos y así constatar su efectividad, cumpliendo así el objetivo 2.
- Se dio mediante cálculos, las condiciones iniciales que ayudan a la interpretación del sistema, explicando paso a paso la metodología y el proceso para las adecuadas simulaciones, para llegar a la validación de los controladores y su interpretación con el SNI. Se cumple el objetivo 3.
- Se realizó un análisis de resultados, mediante la comparación de los controladores de voltaje, primero se analizó el enfoque aplicando solo el AVR, una vez analizado su resultado, se agregó el PSS, mostrando una comparación con el anterior resultado, para comprobar la efectividad del



programa OpenModelica con los resultados de Simulink los cuales fueron considerados como los resultados teóricos, se utilizó el error cuadrático medio, cumpliendo el objetivo 4.

- Se ejecutó un análisis de los resultados mediante de la discusión de los datos de entrada, procesos que se efectuaron, y los datos de salida que ayudaron a realizar las validaciones correspondientes, logrando cumplir el objetivo 5.

Aquellas conclusiones cumplieron los objetivos detallados en la Capitulo 1. Ahora como parte de las conclusiones se contesta las preguntas de investigación.

### **1. ¿Los programas actuales de simulación son suficientes?**

Los programas actuales de simulación han brindado un gran soporte al estudio e investigación de los Sistemas de Potencia, sin embargo siempre es útil la participación de una nueva alternativa, para el análisis de resultados, así la confiabilidad de una respuesta aumenta.

### **2. ¿Cómo implementar OpenModelica y obtener resultados satisfactorios?**

Mediante la guía de usuario, se puede seguir paso a paso como crear un evento básico, el cual ayuda para comenzar a implementar diferentes sistemas de control, en anexos se encuentra un manual básico de OpenModelica para comenzar a crear un modelo. Los resultados dependen también del método de integración, explicados en la sección 2.5.1, para el caso de simulación de este trabajo se utilizó el método DASSL el cual permite elegir los pasos de mediciones, una manera de obtener resultados satisfactorios es considerar una correcta inicialización de variables, así no provocara daños en la compilación.

### **3. ¿Se puede implementar sistemas de control exactos en diferentes programas?**

El diseño de un modelo de control, si bien puede tener la misma idea de funcionalidad, y se ingresa las mismas variables de estado, sus elementos utilizados tales como el transformador, o un barra, no posee su misma configuración en los diferentes programas de modelamiento, como en este caso un transformador en Simulink está diseñado de una manera más compleja, en

donde se agrega más valores de entrada, en cambio en el escenario de OpenModelica sus valores de configuración son más limitadas, es por eso que al obtener una respuesta de un sistema, variaran sus parámetros y no será exactamente igual

#### **4. ¿Qué ventaja tiene OpenModelica frente a otros Simuladores?**

OpenModelica posee una gran ventaja al ser un programa libre, siendo de acceso para cualquier persona que desee simular sistemas de control, los modelos pueden ser simplificados lo cual ayuda a ser usados en diferentes modelos a la vez. Sus modelos pueden ser exportados a otras plataformas y ser simulado en tiempo real.

### **6.2 Recomendaciones para futuras investigaciones**

- En esta sección se dan las recomendaciones analizadas para futuros trabajos a realizarse, luego de unos cortos meses con la utilización del programa
- Una continuación de este trabajo sería la de simular el resto de controladores vía excitación en las máquinas planificadas a intervenir en este proyecto de sintonización de PSSs dirigido por CENACE para poder combinar estos bloques en el espacio de trabajo de RT-LAB utilizando el módulo ePHASORSim, desarrollar todo el SNI incluyendo las máquinas con sus respectivos controladores permitirá verificar un funcionamiento óptimo no solo de manera local sino también considerando la interacción del control ejercido en las otras máquinas, tomando acciones correctivas de ser necesario para que el amortiguamiento de todo el sistema este dentro de los límites ideales.
- Para realizar una comparación efectiva dentro de la plataforma de Modelica es muy útil una importación de datos limitadas, es decir definir un número de integración desde Simulink, para evitar colapsos del programa OpenModelica.
- No olvidar abrir todas las bibliotecas utilizadas en los modelos, para así poder llamar a todos los elementos anteriormente usados.
- OpenModelica no corre flujo de Potencia, por tal motivo es de gran importancia ingresar valores correctos, obtenido previamente de un diferente programa tal como Matlab o DigSilent.

- El bloque de feedback produce un atraso en la respuesta al momento de ejecución, por lo que se recomienda utilizar el bloque sumador con una de las constantes de entrada negativa.
- Al no considerar parámetros de secuencia cero, descartamos el análisis transiente y sub-transiente de fallas en el sistema mediante la librería OpenIPSL, sin embargo, se podría ampliar OpenIPSL o en su defecto crear una nueva con modelos que si incluyan esta la parametrización de secuencia cero ya que el programa OpenModelica posee la capacidad numérica de implementación.
- Diseñar en general componentes de sistemas de potencia como modelos de transformadores, líneas, inductancias mutuas, barras infinitas, etc. más exactos para que se aproximen más al comportamiento real.

Luego de haber deleitado con los seis capítulos que hemos mostrados, esperamos haber convencido al lector acerca de nuestro tema, impulsándolo a introducirse a nuevas plataformas de simulación, y a constatar y comparar diferentes resultados para tener siempre un apoyo de una respuesta, que sirva de útil respaldo.

De igual manera los temas relacionados a los Sistemas de potencia siempre estarán en constante desarrollo en el Ecuador y en el mundo, es lo que le da poder a una nación y a la evolución, esperamos que nuestro trabajo sirva para el avance del campo del modelado de sistemas de potencia en el Ecuador.



# **APÉNDICES**

---

## Apéndices

---

A.	Creación de un proyecto.....	127
B.	Utilización de librerías.....	128
C.	Ventana de trabajo.....	129
D.	Modelación de sistemas .....	130
E.	Creación de modelos .....	134
F.	Compilación y Simulación de modelos .....	134

## Manual de manejo de OpenModelica

Como se dijo en la sección 2.5, OpenModelica es un entorno de simulación, muy usado para sistemas de control y simulación de diferentes modelos.

En este capítulo se dará un básico instructivo de cómo se llegó a obtener los sistemas controladores AVR y PSS, partiendo de las acciones más básicas.

### A. Creación de un proyecto

Para la creación de un proyecto, se va a la barra de herramientas file, y luego se hace clic a la primera opción llamada “New Modelica Class” y aparecerá la ventana que se muestra en la Figura A. 1, en la cual aparecerá un cuadro para darle un nombre al nuevo proyecto y elegir el tipo de clase que se requiere, que puede ser un nuevo modelo, clase, conector, bloque, función, paquete, tipo u operador.

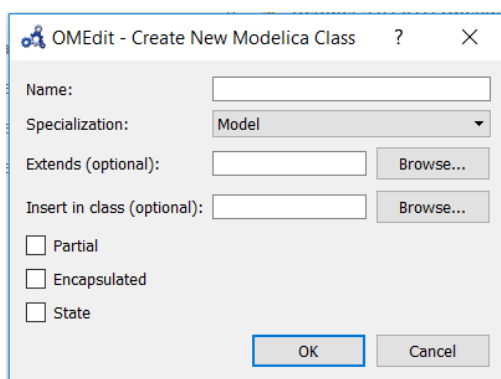


Figura A. 1 Ventana para crear un nuevo modelo en OpenModelica

Para este proyecto lo más utilizado ha sido originar un paquete, el que contenga dentro de sí todos los modelos generados, como se muestra a continuación en la Figura A. 2. Se hace un paquete llamado Sopladora en el interiormente se hallan más paquetes como Grupos y Ejemplos, en donde se realizan los diferentes modelos a implementar.

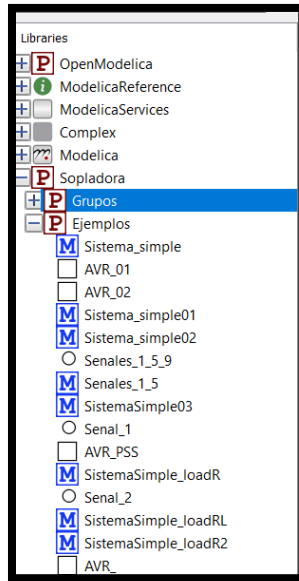


Figura A. 2 Diferentes librerías, paquetes y modelos creados

## B. Utilización de librerías

OpenModelica consta de una librería interna llamada “Modelica”, de la que se obtiene una variedad de elementos para el diseño de diferentes escenarios.

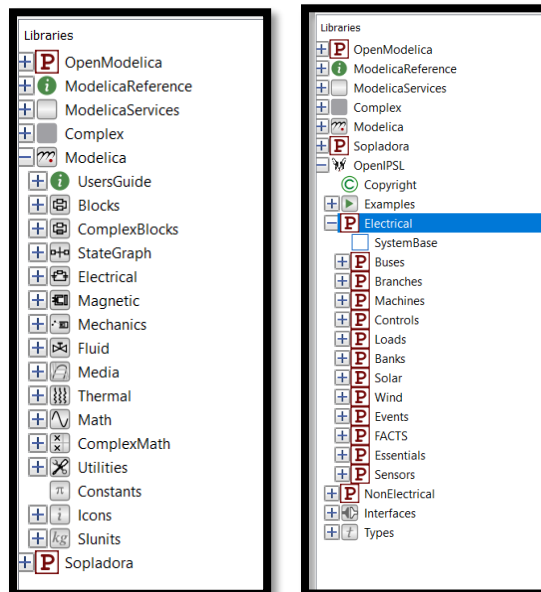




Figura B. 1 Librerías más utilizadas

La otra librería llamada Librería IPSL, la cual fue nombrada en la sección 2.5.1, es muy aplicable para los diseños que se implementaron.

Para la selección de un elemento, se hace clic sobre él y se lo arrastra a la ventana de trabajo. La dirección del elemento y sus parámetros se hallan dando doble clic en cada uno de los propios elementos, por ejemplo en el caso de un generador se muestra la Figura B. 2 Ventana de los parámetros de un generador

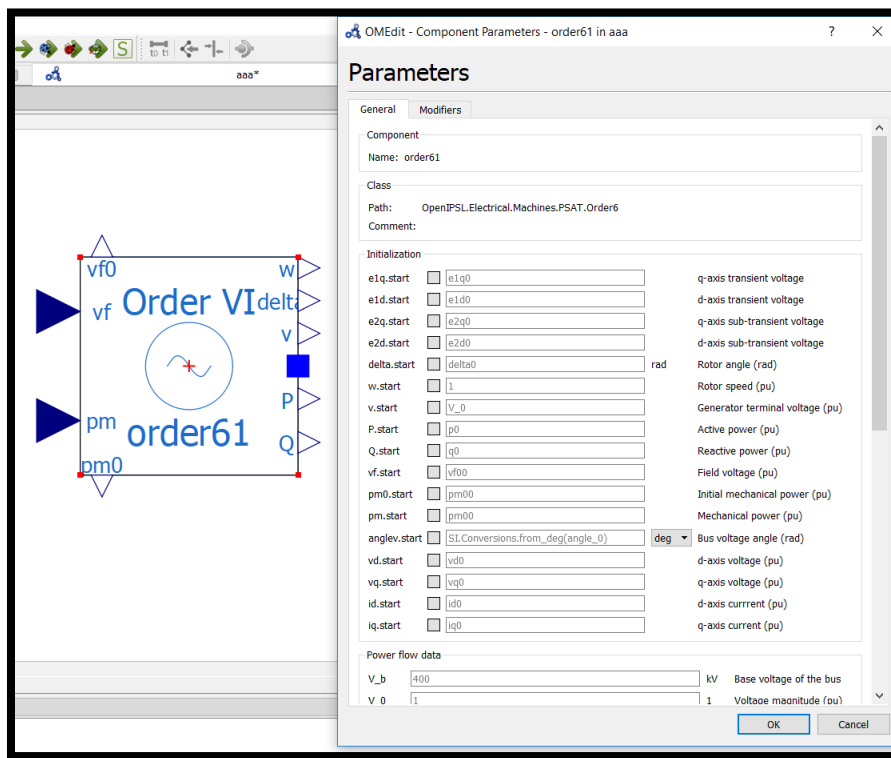
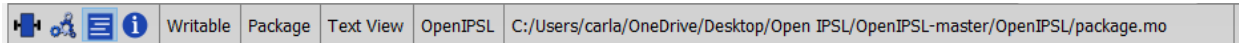


Figura B. 2 Ventana de los parámetros de un generador


Como se observa en la figura su dirección OpenIPSL.Electrical.Machines.PSAT.Order6, muestra el origen del elemento y así lograr conocer la ubicación del paquete de donde se escogió el elemento.


### C. Ventana de trabajo


Cada modelo y elementos tiene varias vistas en la ventana de trabajo,




**Figura C. 1 Barra ubicada en la ventana de trabajo**

 **Vista del icono:** Se observa el icono dado por el usuario a un paquete o librería creada.

 **Vista del Diagrama:** Muestra la ventana de diseño del modelo creado.

 **Vista del texto:** Aquí se originan todas las anotaciones de los elementos colocados en la Vista del diagrama, se muestra la dirección de cada elemento en las librerías, también es el lugar donde se originan las ecuaciones de inicialización de algún componente creado.

 **Vista de la documentación:** Se muestra los datos del archivo creado por ejemplo la dirección comenzado por el nombre del proyecto.

#### **D. Modelación de sistemas**

Para la implementación de este proyecto, se llevó a cabo la modelación de diferentes elementos como generadores, pulsaciones y carga. Estos elementos se obtienen de librerías ya diseñadas que forman parte del programa o externas como el caso de OpenIPSL.

#### **Establecer valores bases a trabajar**

Para estimar los valores base de un sistema se utiliza la librería Open IPSL, se selecciona el paquete Electrical, y se escoge SystemBase, una vez en la ventana de trabajo se estima sus parámetros, potencia base en MVA y la frecuencia a utilizar en Hz.

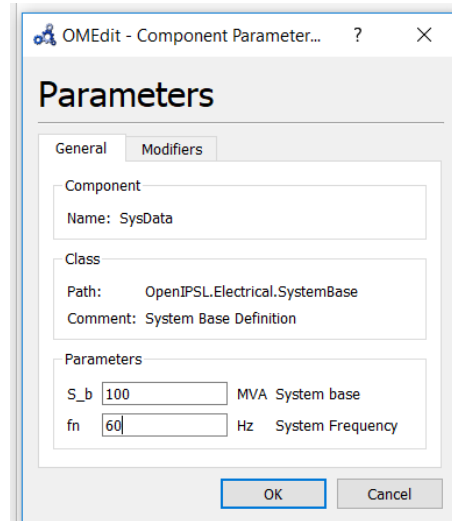


Figura D. 1 Parámetros de valores base del sistema

## Modelación de generador

En este trabajo se utilizó un generador de tipo VI, de la librería OpenIPSL de la carpeta PSAT. Siendo su dirección OpenIPSL.Electrical.Machines.PSAT.Order5, en la librería se hayan más opciones de generadores, todo depende de la necesidades a modelar del usuario. Se procede a parametrizar el generador como se muestra en la Figura D. 2.

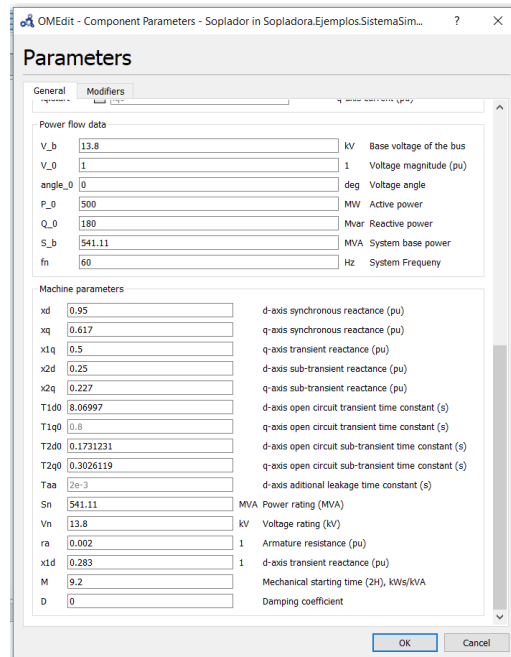


Figura D. 2 Parámetros de un generador

Se colocan los datos para el flujo de potencia, V\_b voltaje base de la barra en [kV], V\_0 voltaje en pu, angle\_0 Ángulo del voltaje, P\_0 Potencia activa en [MW], Q\_0 potencia reactiva en [Mvar], S\_b la potencia base del sistema en [MVA] y la frecuencia del sistema en [HZ]. Sucesivamente se colocan los parámetros de la maquina síncrona que son las reactancias, transientes y subtransientes en valores por unidad, los tiempos de acción de los periodos transientes y subtransientes en segundos, y finalmente los valores internos del generador, su potencia, voltaje, resistencia de armadura en p.u., su reactancia en p.u., tiempo de arranque mecánico y coeficiente de amortiguación.

## Modelación de Barras

Ya que en nuestro sistema de validación de Controladores, el generador se conecta a una barra, se genera también los parámetros específicos para aquel elemento.

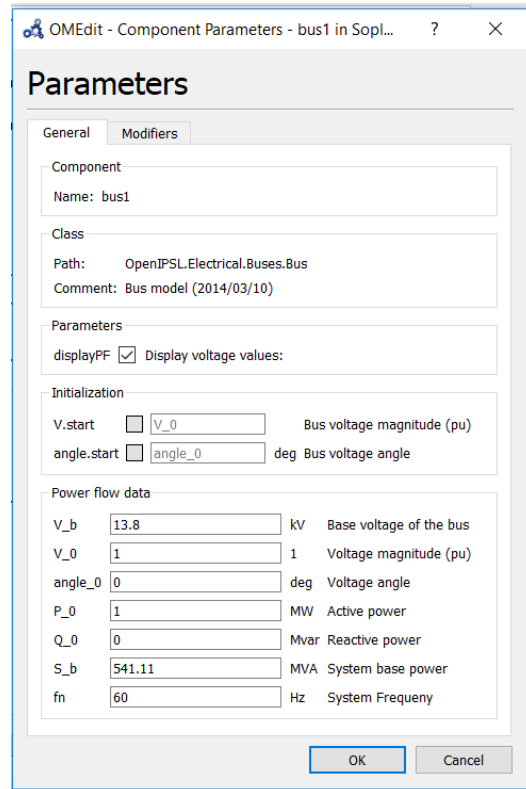


Figura D. 3 Parámetros de las Barras

Entre sus parámetros se encuentran, Component donde va el nombre del elemento, Class es la ubicación en las librerías y algún comentario del diseño, los valores de inicialización y los datos del flujo de potencia.

### Modelación de Cargas

Continuando con el diseño de los controladores, la barra anterior estimada se conecta a una carga, para modelar aquella carga se utiliza la misma librería OpenIPSL, el package Electrical, Loads y se escoge el package PSAT, ahí se hallan diferentes tipos de carga las cuales varían sus características de diseño.

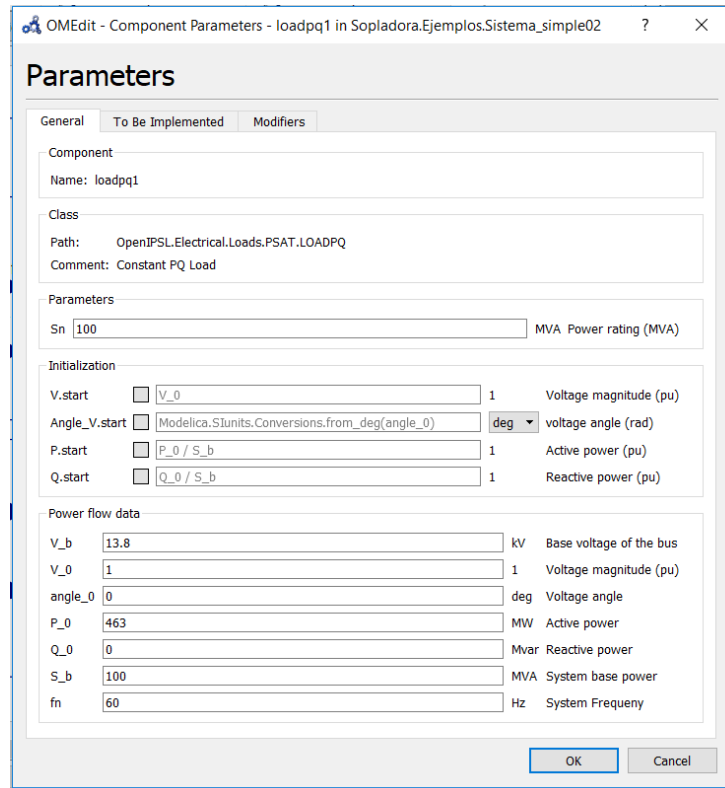


Figura D. 4 Parámetros de las cargas


Se observa en la Figura D. 4, se ven características similares a las modelaciones anteriores.

### E. Creación de modelos

En la validación de los controladores de este presente trabajo, no se utilizan de librerías, sino que son creados con diferentes parámetros, para aquella creación se van conectando diferentes componentes, como es el caso del AVR, se crea el diagrama de bloques del modelo con funciones de transferencia con interfaces de entradas y salidas para su futura conexión, estos valores se ubican en la vista de texto al igual que sus ecuaciones de inicialización las cuales se muestran más detalladamente en la sección. Una vez creado un modelo se pueden conectar a los sistemas anteriores.

### F. Compilación y Simulación de modelos

Al concluir con el modelo de un sistema, se da clic en “check model” lo que muestra el estado del modelo, su número de ecuaciones y variables originados los cuales tienen

que ser de la misma cantidad. Luego se da clic en  Simulation Setup para colocar el tiempo de simulación y el valor de datos que se quieren recoger.

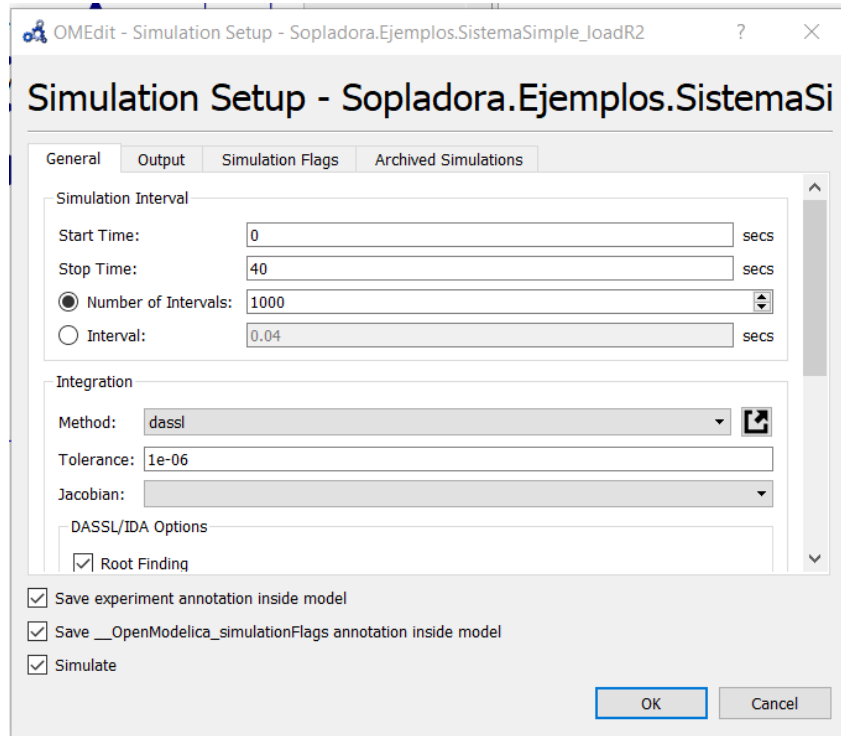


Figura F. 1 Ventana para ejecutar simulación

Luego al dar OK, el sistema se simulara automáticamente, lo que se espera ver es que se compile al 100% sin ningún inconveniente, eso demuestra una correcta inicialización.

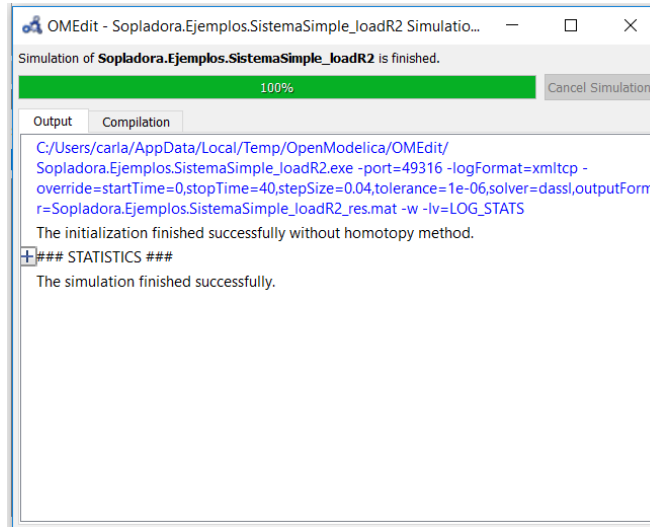


Figura F. 2 Ventana de compilación

Luego de una compilación exitosa se podrán observar las curvas resultantes. OpenModelica tiene la opción de importar datos en formato .csv muy útil para la validación del sistema con datos teóricos. De igual manera también se puede exportar los datos finales simulados, en el mismo formato .csv, demostrado en el Capítulo de resultados.



## Referencias

- Alcantar, L., 2014. *Apuntes de Sistemas Eléctricos de Potencia*, s.l.: ..
- Anon., s.f. s.l.:s.n.
- Armendáriz, F., Panchi, D. & Arcos, H., 2018. Sintonización de los Estabilizadores de Sistemas de Potencia del Sistema Nacional Interconectado Ecuatoriano – Aplicación y Comparación de Métodos Heurísticos en Ambiente Multimáquina.
- Celec, 2018. *CELEC*. [En línea]  
Available at: [www.celec.gob.ec](http://www.celec.gob.ec)  
[Último acceso: Julio 2018].
- Chapman, S. J., s.f. *Maquinas Eléctricas*. 3ra ed. s.l.:s.n.
- Eléctrica, S. d. P., 2017. *innovaperu.jimdo.com*. [En línea]  
[Último acceso: Julio 2018].
- ESHA, E. s. h. a., 2006. *Guía para el desarrollo de una pequeña central hidroeléctrica*. s.l.:s.n.
- Favorita, 2018. *Hidroeléctrica San Bartolo*. [En línea]  
Available at: <http://www.jugueton.com.ec/portal/web/favorita/hidroelectrica-san-bartolo>
- Gómez, A., Martínez, J. L. & Rosendo, J. A., 2003. *Sistemas Eléctricos de Potencia, Problemas y ejercicios resueltos.*, Madrid: Prentice Hall.
- Harvey, A., 1983. The formulation of Structural Time Series Models in discrete and continuous time.
- IEEE Power & Energy Society, 2007. *IEEE Tutorial Course Power System Stabilization Via Excitation Control*. Tampa, Florida: s.n.
- Kundur, P., 1994. *Power System Stability and Control*. s.l.:s.n.
- L. Vanfretti, T. B. M. B., 2004. Power System Model Identification Exploiting the Modelica Language and FMI Technologies. *IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*.
- Machowski, J., Bialek, J. W. & Bumbi, J. R., 2012. *Power System Dynamics Stability and Control*. 2da ed. s.l.:Wiley Publishing.

Maxime Baudette, M. C. T. R. J. L. T. B. L. V., 2018. Open-Instance Power System Library — Update 1.5 to “iTesla Power Systems Library (iPSL): A Modelica library for phasor time-domain simulations”. *SoftwareX*, 7(ISSN 2352-7110), pp. 34-36.

M, J. F., 2003. *Maquinas Eléctricas*. 5ta ed. s.l.:s.n.

Murad, M. A. A., Gómez, F. J. & Vanfretti, L., 2015. Equation-Based Modeling of FACTS using Modelica. *Eindhoven PowerTech* , pp. 1-6.

Murad, M. A. A., Gómez, F. J. & Vanfretti, L., 2015. Equation-based modeling of three-winding and regulating transformers using Modelica. *IEEE Eindhoven PowerTech*, pp. 1-6.

OM, 2017. *OpenModelica User's Guide*. s.l.:s.n.

OpenModelica, 2018. *modelica*. [En línea]

Available at: [https://doc.modelica.org/help/Modelica\\_Blocks\\_Continuous.html](https://doc.modelica.org/help/Modelica_Blocks_Continuous.html)

RT TECHNOLOGIES, 2018. *opal.rt*. [En línea]

Available at: [www.opal-rt.com/systems-ephasorsim/](http://www.opal-rt.com/systems-ephasorsim/)

[Último acceso: SEPTIEMBRE 2018].

Saadat, H., 2010. *Power System Analysis*. 3ra ed. s.l.:Psa Publishing.

Sghirla, C. R., 2007. *Análisis de fenómenos dinámicos en sistemas eléctricos de potencia*, s.l.: s.n.

Unfilar, D., 2018. *Cenace*. [En línea]

Available at: [www.cenace.otg.ec](http://www.cenace.otg.ec)

Vargas, P. V. W., 2018. Metodología para la identificación de parámetros del regulador automático de voltaje (AVR) de la Central Sopladora.

Verdugo, P. & Cepeda, J., 2017. SINTONIZACIÓN EN CAMPO DE LOS ESTABILIZADORES DE SISTEMAS DE POTENCIA DE LA CENTRAL COCA CODO SINCLAIR. *V CONGRESO CIER DE LA ENERGÍA*.

Verdugo, P. X. & Cepeda, J. C., s.f. Testbed for PSS Tuning Using Synchrophasor Measurements and a Real-Time Digital Simulator. *IEEE PES*.

web, P., 2012. *tutorvista*. [En línea]

Available at: [math.tutorvista.com](http://math.tutorvista.com)

Zhang, M. et al., 2015. *Modelica Implementation and Software-to-Software Validation of Power System Component Models Commonly used by Nordic TSOs for Dynamic Simulations*. Stockholm, Linköping Electronic Conference Proceedings.