

MODELAMIENTO DE UN GENERADOR HIDRÁULICO EN MATLAB

HUMBERTO OYOLA CHADID

LUIS ALBERTO GARCÍA MIRANDA

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL DE PROCESOS
INDUSTRIALES
CARTAGENA DE INDIAS
2014**

MODELAMIENTO DE UN GENERADOR HIDRÁULICO EN MATLAB

HUMBERTO OYOLA CHADID

LUIS GARCÍA MIRANDA

**Trabajo Integrador para optar el título de Especialista en Automatización y
Control de Procesos Industriales**

Docentes

INGENIERO JORGE ELIECER DUQUE

INGENIERO JOSÉ LUIS VILLA

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL DE PROCESOS
INDUSTRIALES
CARTAGENA DE INDIAS**

2014

Nota de aceptación

Firma de presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Cartagena, 22 de Septiembre de 2014

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE ILUSTRACIONES	6
INTRODUCCIÓN.....	8
DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	9
1.2 CENTRALES HIDRÁULICAS	9
1.3 CASA DE MAQUINAS	10
1.4 TURBINAS HIDRÁULICAS	10
1.5 GENERADORES	11
1.6 GENERADORES HIDRÁULICOS	11
1.7 TUBERÍA DE CARGA	12
1.8 JUNTA DESSER.....	12
1.9 CARACOL	12
1.10 EL DISTRIBUIDOR	12
1.11 ANTI DISTRIBUIDOR	12
1.11.1 El rodete	12
1.11.2 El difusor.....	13
1.12 NORMAS Y REGULACIÓN	14
1.13 ACUERDO 640.....	14
2 DEFINICIÓN DE VARIABLES	16
2.1 TENSIÓN DE CAMPO (UF):	16
2.2 POTENCIA MECÁNICA (PM):	16
2.3 VELOCIDAD ANGULAR (We).....	17
2.4 CORRIENTE DE CAMPO (If):.....	17
2.5 TENSIÓN DEL GENERADOR (UG):.....	18
2.6 POTENCIA ELÉCTRICA (PG):	18
2.7 POTENCIA ACTIVA DEL GENERADOR (PG)	18
2.8 POTENCIA REACTIVA DEL GENERADOR (QG).....	18
3 MODELO MATEMÁTICO DE UN GENERADOR HIDRÁULICO.....	19
3.2 DEFINICIONES	19
3.2.1 <i>Generador en vacío.</i>	21
3.2.2 <i>Generador con carga.</i>	21
3.3 MODELO DE LA MAQUINA SÍNCRONA EN MATLAB	21
<i>Modelo de la maquina síncrona (Synchronous Machine)</i>	22
3.3.1 <i>Parámetros (Parameters)</i>	23
3.3.2 <i>Opciones avanzadas (Advanced Tab)</i>	24
3.3.3 <i>Parámetros de flujo de carga (Load Flow Tab)</i>	26
3.3.4 <i>Definición de parámetros</i>	26
3.3.5 <i>Entradas y salidas del bloque</i>	28
3.4 REGULADOR DE TENSIÓN	29
3.4.1 <i>Regulador Automático de Tensión (AVR)</i>	30
3.4.2 <i>Limitador de sobreexcitación</i>	32
3.4.3 <i>Limitador de sobre inducción (V/Hz)</i>	35
3.4.4 <i>Limitador de subexcitacion</i>	37

3.4.5	<i>Limitador Sobrecorriente Del Generador</i>	41
3.4.6	<i>Sistema Estabilizador De Potencia (Pss)</i>	43
LA ILUSTRACIÓN 44 Y 45 MUESTRA EL TIPO DE VARIABLES DE ENTRADA DEL		
SUBSISTEMA PSS		45
3.5	REGULADOR DE VELOCIDAD	45
3.5.1	<i>Control de Actuadores 1</i>	47
3.5.2	<i>Control de Actuadores 2</i>	48
3.5.3	<i>Actuadores</i>	49
3.5.4	<i>Conducto</i>	51
CONCLUSIONES		53
BIBLIOGRAFÍAS		54

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Central hidroeléctrica	9
Ilustración 2. Casa de máquinas- generadores	10
Ilustración 3. Corte transversal de un generador hidráulico.....	11
Ilustración 4. Clasificación de las turbinas; acción/reacción.....	13
Ilustración 5. Clasificación de las turbinas de acuerdo a la dirección de entra de agua.....	14
Ilustración 6. Tensión de campo.....	16
Ilustración 7. Velocidad angular.....	17
Ilustración 8. Corriente de campo.....	17
Ilustración 9. Diagrama de bloques-modelo generador hidráulico.....	19
Ilustración 10 Programación en Simlunk del Modelamiento de un generador hidráulico con sus diferentes subsistemas	20
Ilustración 11. Print screan-simulink.....	22
Ilustración 12. Bloque del generador- tomado de Matlab	22
Ilustración 13. Definición de parámetros-maquina síncrona.....	23
Ilustración 14. Selección para determinar la tensión nominal de campo visto desde el estator.	24
Ilustración 15. Curva típica de la tensión nominal de campo vista desde el estator.	25
Ilustración 16. Ajuste de la curva original- modelo en saturación.	25
Ilustración 17. Definición de parámetros de carga.....	27
Ilustración 18. Vector medida señales de salida del bloque generador.....	28
Ilustración 19. Diagrama de Bloques Regulador de Tensión con Limitadores y PSS	29
Ilustración 20 Representación de Regulador de Tensión en Simulink del Modelo.....	30
Ilustración 21 Subsistema Regulador Automático de Tensión AVR	30
Ilustración 22 Configuración Interna del Subsistema del Regulador Automático de Tensión AVR.....	31
Ilustración 23 Variables de entrada al subsistema AVR	31
Ilustración 24 Subsistema - Limitador de Sobreexcitación del Modelo.....	32
Ilustración 25. Coordinación del OEL de tiempo inverso y capacidad térmica del campo ..	32
Ilustración 26 Configuración interna del Subsistema del Limitador de Sobreexcitación	33
Ilustración 27 Variables de Entrada Subsistema Limitador de Sobreexcitación.....	34
Ilustración 28 Subsistema Limitador de sobreinducción del Modelo	35
Ilustración 29. Curva típica de límite para la operación de V/Hz para un generador	35
Ilustración 30. Curva típica de límite para la operación de V/Hz para un transformador de potencia.....	36
Ilustración 31 Configuración Interna del subsistema Limitador de Sobreinducción	36
Ilustración 32 Variables de entrada al limitador de sobreinducción del modelo.....	37
Ilustración 33 Subsistema Limitador de Subexcitación	37
Ilustración 34. Curva de Capacidad de un Generador	38
Ilustración 35. Modo de actuación del limitador.....	39

Ilustración 36.Coordinación entre UEL, relé de pérdida de excitación y límite de estabilidad	39
Ilustración 37 Configuración Interna de Subsistema Limitador de Subexcitación	39
Ilustración 38 Variables de Entrada de Subsistema Limitador de Subexcitación	40
Ilustración 39 Subsistema Limitado de Corriente del Generador.....	41
Ilustración 40 Configuración Interna del Subsistema Limitador de Corriente del Generador	41
Ilustración 41 Variables Internas Limitador de Sobrecorriente del Generador.....	42
Ilustración 42 Subsistema PSS	43
Ilustración 43 Configuración Interna del Subsistema PSS	43
Ilustración 44 Variables de Entrada Subsistema PSS (parte 1).....	44
Ilustración 45 Variables de entrada del subsistema PSS (parte 2)	45
Ilustración 46 Diagrama de Bloques Regulador de velocidad	46
Ilustración 47 Representación de Regulador de Velocidad en Simulink para el Modelo	46
Ilustración 48 Subsistema Control de Actuadores 1.....	47
Ilustración 49 Configuración Interna del Subsistema Control de Actuadores 1	47
Ilustración 50 Variables de entrada Subsistema Control de Actuadores 1	48
Ilustración 51 Subsistema control de Actuadores 2.....	48
Ilustración 52 Configuración Interna Subsistema de Control de Actuadores 2	49
Ilustración 53 Subsistemas Actuadores	49
Ilustración 54 Configuración Interna del Subsistema Actuadores	50
Ilustración 55 Variables Internas Subsistema Actuadores	50
Ilustración 56 Subsistema Conducto	51
Ilustración 57 Configuración Interna del Subsistema Conducto	51
Ilustración 58 Variables de entrada subsistema Conducto	52

INTRODUCCIÓN

La central hidroeléctrica Urra I, localizada al sur de Tierralta en el departamento de Córdoba cuya capacidad es de 340 MW distribuida en 4 unidades generadoras de 85 MW pertenecientes al sistema interconectado nacional, requiere localizar e identificar fallas ante posibles eventos energéticos y reportarlos ante la empresa que opera y administra el mercado eléctrico colombiano. Para ello se hace necesario diseñar un modelo matemático de uno de sus generadores que refleje fielmente su comportamiento ante cualquier condición.

Conociendo las propiedades de MATLAB y apoyados en su herramienta de software matemático simulink, se completa un modelo de interacción en el dominio del tiempo para un generador síncrono, obteniendo curvas de operación, y variaciones ante perturbaciones.

El objetivo general de este proyecto se basa diseñar el modelo matemático de una unidad generadora de la central hidroeléctrica Urra I, el cual permita reproducir de manera digital el funcionamiento del generador síncrono y así validar contra información real su comportamiento utilizando la herramienta de simulación Matlab®, y entre los objetivos específicos se busca analizar el comportamiento de un generador síncrono, reproducir su comportamiento bajo las propiedades del software Matlab

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

1.2 Centrales hidráulicas

Una central hidroeléctrica es una instalación que permite aprovechar las masas de agua en movimiento que circulan por los ríos para transformarlas en energía eléctrica, utilizando turbinas acopladas a los alternadores [1]. Como se esquematiza en la ilustración 1.

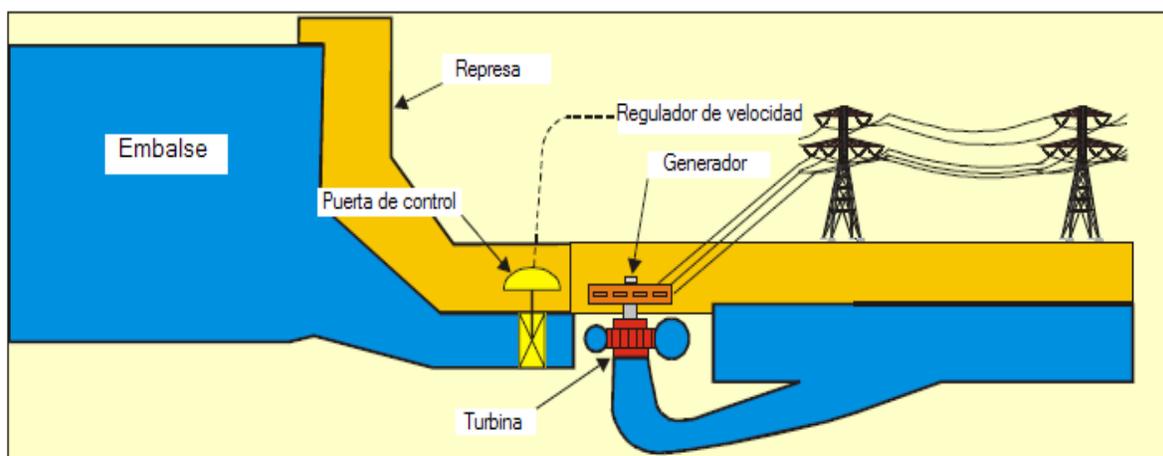


Ilustración 1. Central hidroeléctrica

La central hidroeléctrica Urra está localizada sobre el río Sinú, a 30 km al sur del municipio de Tierralta en el departamento de Córdoba, ubicado al noroccidente de Colombia, la principal fuente de abastecimiento de agua la constituye el río Sinú y sus afluentes que nacen en el parque Nacional Natural Paramillo, cubierto en su mayor parte por un bosque húmedo tropical con niveles de precipitación del orden de los 3000 mm/año factor que contribuye a mantener un caudal de 350 m³/seg.

Para la producción de energía, la central hidroeléctrica Urra se encuentra dividida en 5 estaciones cada una encargada de una parte fundamental del proceso de generación de energía dichas estructuras son:

Estructura de tomas.

Casa de máquinas.

Subestaciones de 110KV y 230KV.

Túnel de desvió.

Sala de control.

1.3 Casa de maquinas



Ilustración 2. Casa de máquinas- generadores

En casa de máquinas se encuentran los cuatro generadores y los diferentes mecanismos eléctricos que hacen posible el correcto funcionamiento de los generadores y así producir adecuadamente la potencia requerida por el sistema eléctrico nacional. Las cuatro turbinas son del tipo Francis con capacidad de generar 82 MW cada una para así obtener los 320 MW de generación neta total de la central. Una foto de la casa maquina se muestra en la ilustración 2.

1.4 Turbinas hidráulicas

Este tipo de máquina hidráulicas es capaz de convertir energía hidráulica en energía mecánica; pueden ser motrices (turbinas), o generatrices (bombas), modificando la energía total de la vena fluida que las atraviesa. [2]

En una máquina hidráulica, el agua intercambia energía con un dispositivo mecánico de revolución que gira alrededor de su eje de simetría; éste mecanismo lleva una o varias ruedas, (rodets o rotores), provistas de álabes, de forma que entre ellos existen unos espacios libres o canales, por los que circula el agua.

Una primera clasificación de las turbomáquinas hidráulicas, (de fluido incompresible) se puede hacer con arreglo a la función que desempeñan, en la forma siguiente:

- a) Turbomáquinas motrices.
- b) Turbomáquinas generatrices.
- c) Turbomáquinas reversibles.
- d) Grupos de transmisión o acoplamiento.

Una turbomáquina elemental o monocelular tiene, básicamente, una serie de álabes fijos, (distribuidor), y otra de álabes móviles, (rueda, rodete, rotor). La asociación de un órgano fijo y una rueda móvil constituye una célula; una turbomáquina monocelular se compone de tres órganos diferentes que el fluido va atravesando sucesivamente, el distribuidor, el rodete y el difusor.

1.5 Generadores

Un generador eléctrico es todo dispositivo capaz de mantener una diferencia de potencial eléctrica entre dos de sus puntos llamados polos, terminales o bornes transformando la energía mecánica en eléctrica. Esta transformación se consigue por la acción de un campo magnético sobre los conductores eléctricos dispuestos sobre una armadura (denominada también estator). Si se produce mecánicamente un movimiento relativo entre los conductores y el campo, y se genera una fuerza electromotriz (F.E.M.), todo esto basado en la ley de Faraday. [3]

1.6 Generadores hidráulicos

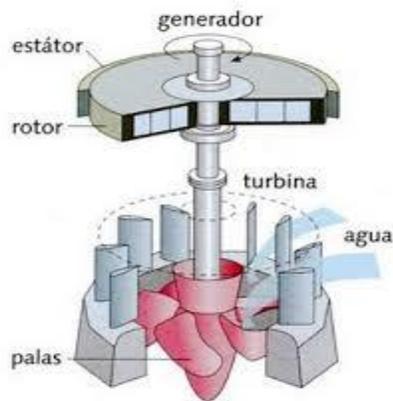


Ilustración 3.Corte transversal de un generador hidráulico.

Un generador hidráulico opera cambiando la energía mecánica del agua que cae o del agua estacionaria en energía eléctrica. La energía mecánica se compone de energía cinética, o en movimiento, y energía potencial, o en reposo [4]. En la ilustración 3 se esquematiza un corte transversal de un generador hidráulico.

1.7 Tubería de carga

Es la encargada de trasportar el agua desde la estructura de toma hasta la casa demáquina.

1.8 Junta desser

Empalma el blindaje de los túneles de carga y con el caracol de las turbinas de cada unidad.

1.9 Caracol

Es una tubería de diámetro decreciente con un desarrollo de 351⁰28' y se forman las placas formadas entre sí y con el anti distribuidor, el caracol rodea el distribuidor e inicia a continuación de la junta dresser de la tubería de carga. Está diseñado para proporcionar un flujo de agua al distribuidor a partir del conducto a presión.

1.10 El distribuidor

Es el encargado de dirigir el agua desde donde entra de la maquina hacia el rodete, distribuyéndola alrededor del mismo (turbinas de admisión total), o a una parte, (turbinas de admisión parcial).Es decir, permite regular el agua que entra en la turbina, desde cerrar el paso totalmente, caudal cero, hasta lograr el caudal máximo.

1.11 Anti distribuidor

El anti distribuidor está diseñado para recibir y transmitir a la obra civil las cargas de peso de la unidad generadora y de las cargas debidas a la presión del agua en el cargador, el distribuidor y el rodete, el anti distribuidores un anillo soldado por dos partes curvadas y con 18 alabes fijos, las placas curvadas son enfrentadas una de la otra con diferente altura de tal forma que se asegura su mayor fortaleza para su unión con el caracol garantizando la continuidad del perfil hidráulico.

1.11.1 El rodete

El rodete convierte la energía de flujo del agua en energía mecánica la cual provoca el giro del rotor en el generador, el rodete asegura el eje de la turbina por medio de 20 pernos de acero que trasmiten el torque y soportan los refuerzos axiales.

Para reducir las pérdidas de volumen de agua entre los espacios entre el rodete y la tapa de la turbina y el rodete y el anillo de fondo, se colocan sellos tipo laberinto, el cual tiene sellado para mejorar el llenado.

Es el elemento esencial de la turbina, estando provisto de álabes en los que tiene lugar el intercambio de energía entre el agua y la máquina.

Atendiendo a que la presión varíe o no en el rodete, las turbinas se clasifican en:

- a) Turbinas de acción o impulsión.
- b) Turbinas de reacción o sobrepresión.



Ilustración 4. Clasificación de las turbinas; acción/reacción

En las turbinas de acción el agua sale del distribuidor a la presión atmosférica, y llega al rodete con la misma presión; en estas turbinas toda la energía potencial del salto se transmite al rodete en forma de energía cinética, mientras que en las turbinas de reacción el agua sale del distribuidor con una cierta presión que va disminuyendo a medida que el agua atraviesa los álabes del rodete; en estas turbinas el agua circula a presión en el distribuidor y en el rodete y, por lo tanto la energía potencial del salto se transforma, una parte, en energía cinética, y la otra, en energía de presión. En la ilustración 4 se esquematizan las turbinas de acción y reacción.

1.11.2 El difusor

Es un conducto por el que desagua el agua, generalmente presenta ensanchamiento progresivo, recto u acotado, que sale del rodete y lo conduce hasta el canal de fuga permitiendo recuperar parte de la energía cinética.

Ahora de acuerdo a la dirección de entrada del agua las turbinas se pueden clasificar en:

- a) Axiales
- b) Radiales {centrípetas y centrífugas}
- c) Mixtas
- d) Tangenciales

En las axiales, (Kaplan, hélice, Bulbo), el agua entra paralelamente al eje, tal como se muestra en la, en las radiales, el agua entra perpendicularmente al eje, siendo centrífugas cuando el agua vaya de dentro hacia afuera, y centrípetas, cuando el agua vaya de afuera hacia adentro, (Francis). En las mixtas se tiene una combinación de las anteriores, mientras

en las tangenciales, el agua entra lateral o tangencialmente (Pelton) contra las palas, cangilones o cucharas de la rueda. [5]

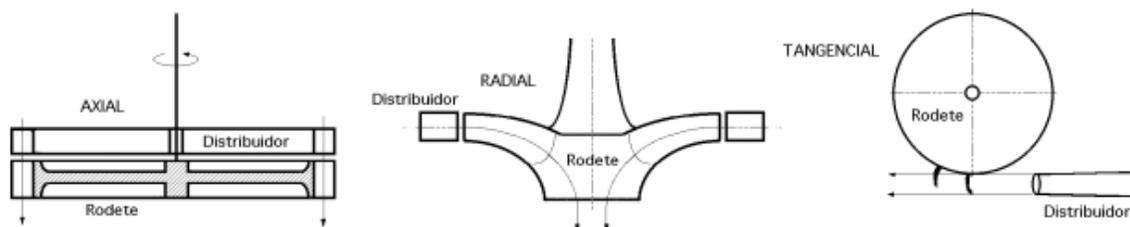


Ilustración 5. Clasificación de las turbinas de acuerdo a la dirección de entrada de agua.

La central hidroeléctrica Urra usa turbinas de reacción tipo Francis (turbomáquina motora a reacción y de flujo mixto). Este tipo de turbinas son turbinas hidráulicas diseñadas para un amplio rango de saltos y caudales, capaces de operar en rangos de desnivel que van de los dos metros hasta varios cientos de metros. La ilustración 5 esquematiza la clasificación de las turbinas de acuerdo a la dirección entrante del agua.

1.12 Normas y regulación

El EICNO Consejo Nacional de Operación del sector eléctrico, creado por la Ley 143 de 1994 en su artículo 36, tiene como función principal acordar los aspectos técnicos para garantizar que la operación del sistema interconectado nacional sea segura, confiable y económica y ser el ejecutor del Reglamento de Operación. [7]

1.13 Acuerdo 640

El Consejo Nacional de Operación en uso de sus facultades legales, en especial las conferidas en el Artículo 36 de la Ley 143 de 1994, el Anexo general de la Resolución CREG 025 de 1995, su Reglamento Interno y según lo aprobado en la reunión 391 del 4 de julio de 2013, bajo el acuerdo 640 del 8 de julio de 2013 por el cual se establecen controles de velocidad/potencia y estabilizadores de sistemas de potencia de las unidades de generación del sistema interconectado y define las pautas para las pruebas y reajustes de los controles de generación guiados por el código de conexión.

Este artículo considera en el numeral 3 del Anexo CO2 del Código de operación que los agentes generadores deben reportar al CND los modelos que represente sistema de

Excitación, Estabilizador de Potencia, Gobernador de Velocidad y Turbina.

Aquí también se resalta la importancia en que los generadores deben proveer control de tensión y potencia reactiva, así como también señala que en el acuerdo 552 de 2011 los requerimientos para los modelos, pruebas y ajustes de los controles de excitación, velocidad/potencia y estabilizadores de sistemas de potencia de las unidades de generación del SIN, permitiéndonos trabajar en un modelo matemático que sirva de control y estudio a la hidroeléctrica Urra

También se establecen unos plazos en que los agentes generadores deben suministrar al CND un informe con los parámetros validados de los generadores y los modelos validados de los controles asociados a cada una de las unidades de generación

A demás se especifica la obtención de los parámetros del modelo del generador que mejor representen la dinámica del mismo, considerando un modelo de máquina sincrónica tipo 6.

2 DEFINICIÓN DE VARIABLES

Dentro del moldeamiento de un generador hidráulico se tienen en cuenta tres sistemas principales como son:

- Máquinas Síncrona
- Regulador de velocidad incluida tubería de carga
- Regulador de tensión.

Antes de definir los sistemas dentro del modelamiento es necesario definir sus variables y cómo interactúan.

2.1 Tensión de campo (U_f):

Determina la corriente del campo y, en consecuencia, el flujo de campo, es el nivel de tensión que se le inyecta al rotor desde el regulador de tensión para variar la corriente de campo, la ilustración 6 muestra el diagrama eléctrico de la tensión de campo U_f .

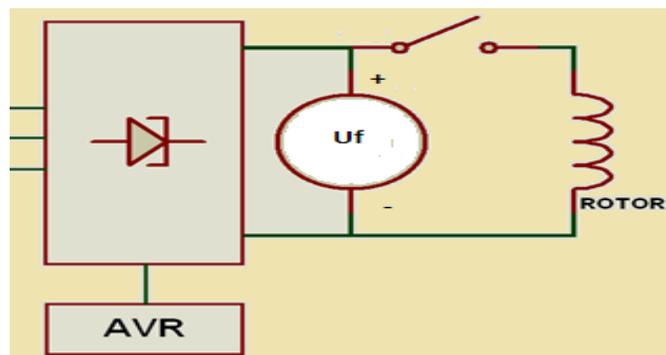


Ilustración 6. Tensión de campo.

2.2 Potencia mecánica (P_m):

Para el caso del generador que es un elemento rotativo sobre un eje constante y donde el momento de inercia permanece constante, la potencia mecánica puede relacionarse con el par generador y la velocidad angular siendo la potencia la variación de la energía cinética de rotación por unidad de tiempo y provendría de la cantidad de agua ingresada desde la tubería hacia la turbina Francis viéndose afectada por múltiples factores como, nivel del embalse, porcentaje de apertura del distribuidor y diámetro de la tubería de carga el cual es constante.

2.3 Velocidad Angular (ω)

La velocidad angular puede ser considerada como una magnitud vectorial, con dirección a lo largo del eje de rotación y sentido dirigido por la regla de la mano derecha. [6]

En la ilustración 7 esquematiza la velocidad angular ω .

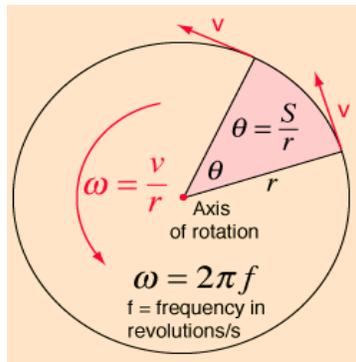


Ilustración 7. Velocidad angular.

2.4 Corriente de campo (I_f):

Es la variación del flujo producido por los cambios de la tensión de campo en el rotor. En la ilustración 8 representa la corriente de campo I_f .

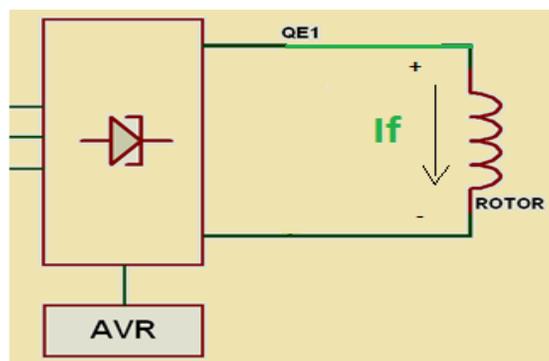


Ilustración 8. Corriente de campo.

2.5 Tensión del generador (U_g):

Es la tensión alterna en los terminales de salida del generador donde su frecuencia depende de la frecuencia de giro del rotor y del número de polos del generador, su valor depende directamente de la corriente de campo.

2.6 Potencia eléctrica (P_g):

La potencia eléctrica es la relación de paso de energía de un flujo por unidad de tiempo; es decir, la cantidad de energía entregada o absorbida por un elemento en un tiempo determinado.

2.7 Potencia activa del generador (P_g)

Es la capacidad de una instalación eléctrica para transformar la energía eléctrica en trabajo útil en un generador hidráulico, se representa por P_g y se mide en vatios (W) la potencia reactiva depende exclusivamente del regulador de velocidad

2.8 Potencia reactiva del generador (Q_g)

Vale aclarar que la potencia reactiva no es una potencia (energía) realmente consumida en la instalación, ya que no produce trabajo útil debido a que su valor medio es nulo, se representa por Q y se mide en voltio amperios reactivos (Var) En unos sistemas interconectados la variación de la potencia reactiva se ve reflejada en variaciones de tensión de interconexión y viceversa, y es controlada por el regulador de tensión.

3 MODELO MATEMÁTICO DE UN GENERADOR HIDRÁULICO

3.2 Definiciones

En el capítulo anterior definimos las diferentes variables eléctricas y mecánicas que interactúan dentro de un generador hidráulico. En este capítulo se hará referencia de cada uno de los tres sistemas que interactúan. Se divide en tres grandes sistemas:

- Máquina Síncrona
- Regulador de Tensión
- Regulador de Velocidad

En la ilustración 9 muestra la interacción de estos tres de sistemas al igual que las variables de entrada y salida a cada bloque.

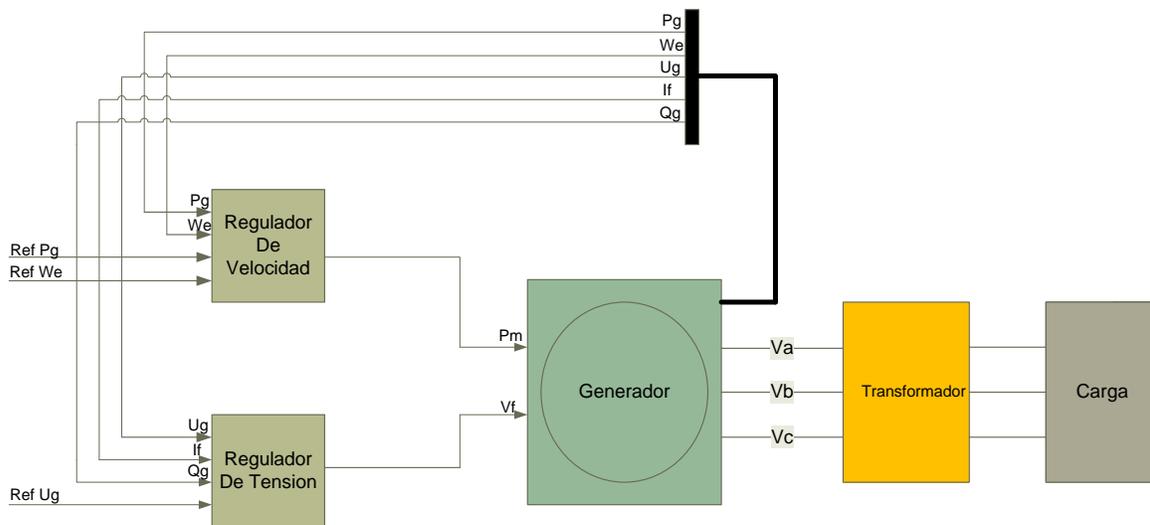


Ilustración 9. Diagrama de bloques-modelo generador hidráulico.

Se puede observar que existen tres variables de entrada al sistema como son:

- Setpoint de Potencia Activa del generador (Ref Pg)
- Setpoint de velocidad eléctrica (Ref We)
- Setpoint de tensión de generador (Ref Ug)

La programación del diagrama mostrado en la ilustración 9 para el modelamiento del generador hidráulico en Simulink se muestra en la ilustración 10.

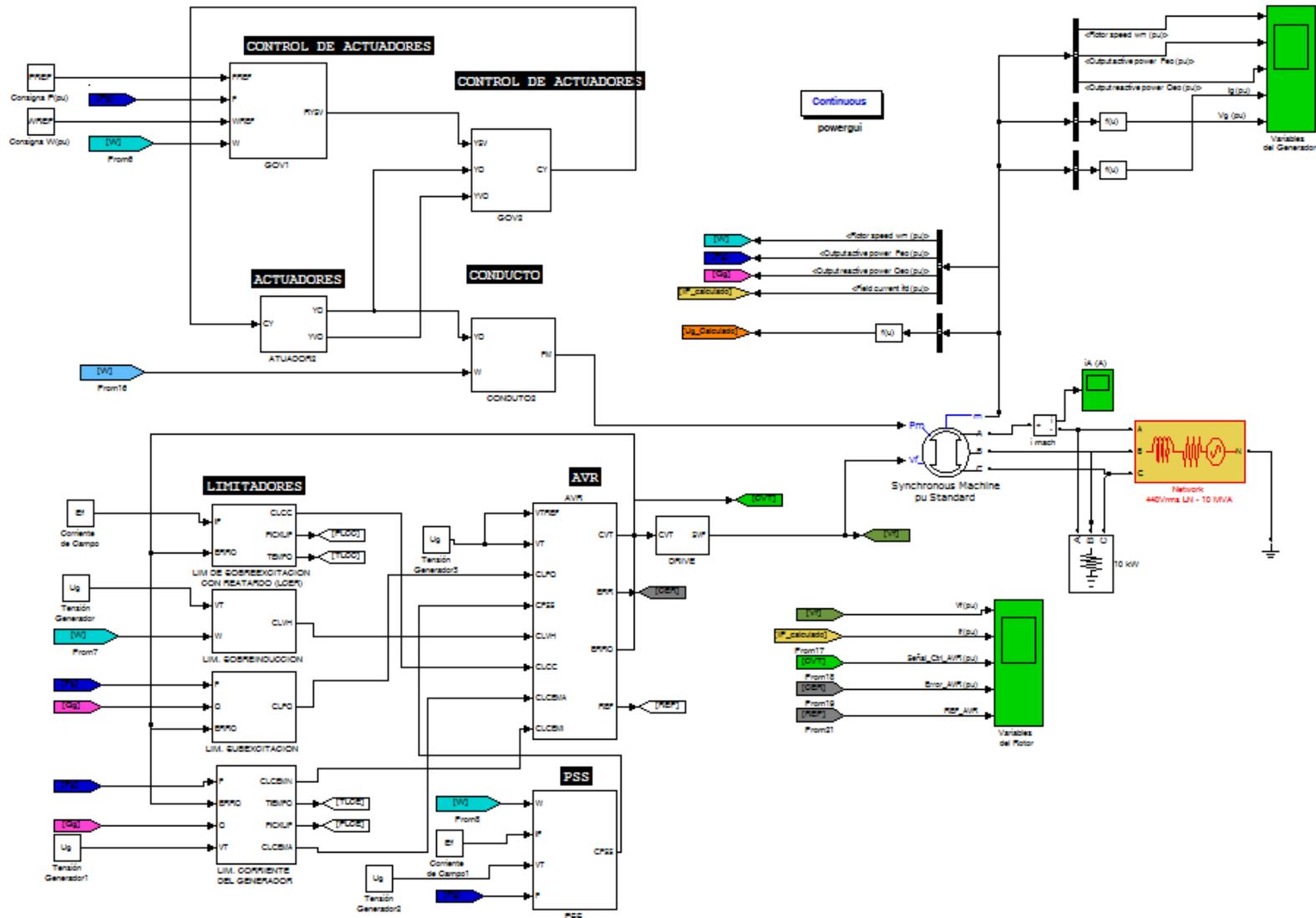


Ilustración 10 Programación en Simlunk del Modelamiento de un generador hidráulico con sus diferentes subsistemas

La operación de un generador hidráulico tiene dos formas: Unidad en Vacío y Unidad en Carga

3.2.1 Generador en vacío.

Se determina que un generador se encuentra en vacío cuando la unidad no se encuentra sincronizada al sistemas interconectado nacional (SIN) donde el valor de Ref Pg es cero, el Valor de Ref We es igual al nominal de cada generador y Ref Ug es igual al nominal.

3.2.2 Generador con carga.

La unidad se encuentra sincronizada al SIN donde Ref Pg es dada por el operador de la Central, Ref We es la frecuencia del SIN y Ref Ug es la tensión de la barra del SIN referida al generador.

Durante cualquiera de los modos de operación, el generador envía las medidas de las variables a controlar, para el caso del regulador de velocidad envía la potencia activa y la velocidad, y para el regulador de tensión la tensión de generador para su control principal. En un modelo básico de un generador hidráulico con las variables dadas sería suficiente para su modelamiento. Pero en el caso nuestro donde el modelo es más completo hay que incluir al modelo los limitadores del regulador de tensión por lo que es necesario que este sistema supervise la medida de la corriente de campo (I_f) y de la potencia reactiva (Q_g).

Los valores entregados por el generador mostrado en la ilustración son dados después de la transformada Park explicada en el capítulo anterior

3.3 Modelo de la maquina síncrona en Matlab

Para el modelo de nuestro generador nos apoyamos en la librería **Simscape\SimPowerSystems\Machine** seleccionando el bloque **Synchronous machine pu standard** de simulink, debido a que allí se hallan incorporados cada uno de los parámetros en los que trabaja nuestro generador mencionados anteriormente. Este bloque representa el modelo de la maquina síncrona estándar en valores de pu. La ilustración 11 es un print screen de la librería de simulink para el modelo de la maquina síncrona.

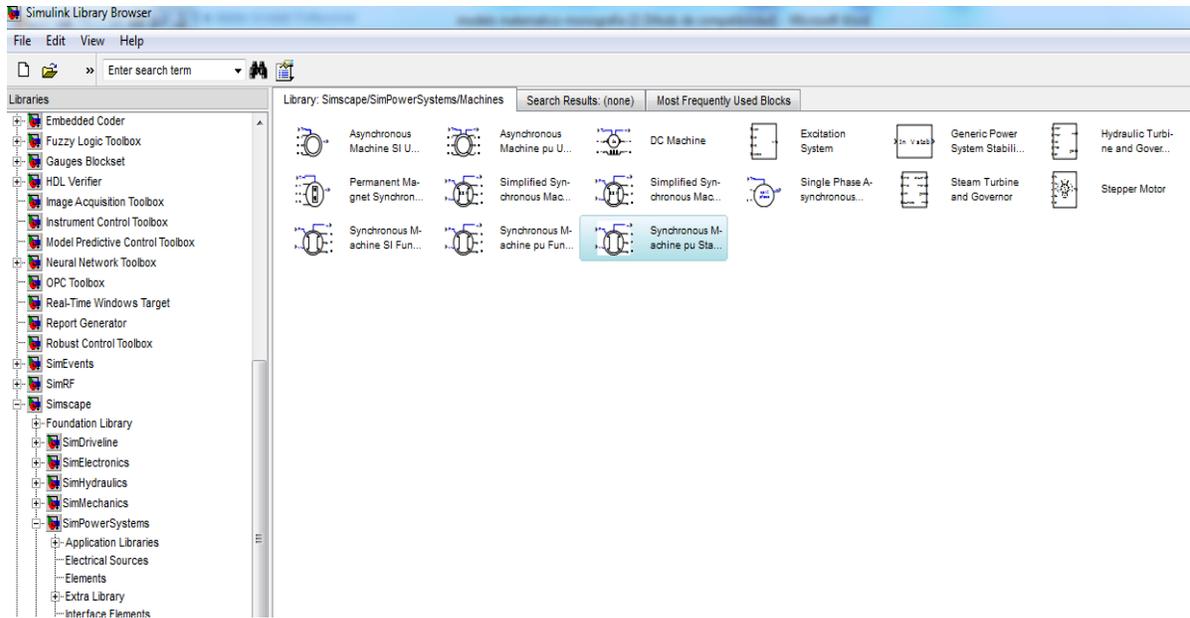


Ilustración 11. Print screen-simulink

Modelo de la maquina síncrona (Synchronous Machine)

Este bloque representa el modelo de la maquina síncrona de polos salientes,

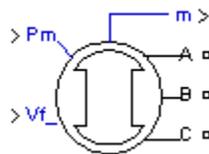


Ilustración 12. Bloque del generador- tomado de Matlab

La ilustración 12 esquematiza el bloque de la máquina síncrona el cual opera en los modos de generador y motor. El modo de funcionamiento es dictado por el signo de la potencia mecánica (positivo para el modo de generador, negativo para el modo de motor).

La parte eléctrica de la máquina está representada por un modelo de espacio de estado de sexto orden y la parte mecánica es la misma que en el bloque de la máquina síncrona simplificada.

3.3.1 Parámetros (Parameters)

Se elige de la biblioteca *powerlib* la opción en la que trabaje los parámetros en valores de pu, ya que esta librería permite trabajar de tres formas el tipo de modelo de la máquina síncrona. Al seleccionar un modelo preestablecido, los parámetros eléctricos y mecánicos en la ficha Parámetros del cuadro de diálogo se convierten en no modificables (no disponibles). Definidos nuestros parámetros para el generador, seleccionamos la opción aplicar y queda configurado de esta forma para el bloque.

Definidos así:

- Potencia nominal, tensión de línea, y la frecuencia
- Eleje de reactancias síncrona X_d , reactancia transitoria X_d' , y reactancia subtransitoria X_d''
- Reactancia síncrona X_q , reactancia transitoria X_q' (sólo si es redond rotor), y reactancia subtransitoria X_q'' , y finalmente la fugareactancia X_l (todas en pu). constantes de tiempo d-eje; constante de tiempo de eje q(s).

Se Especifican las constantes de tiempo para cada eje: ya sea en circuito abierto o cortocircuito, la resistencia del estator R_s en (pu), Coeficiente de inercia, factor de fricción.

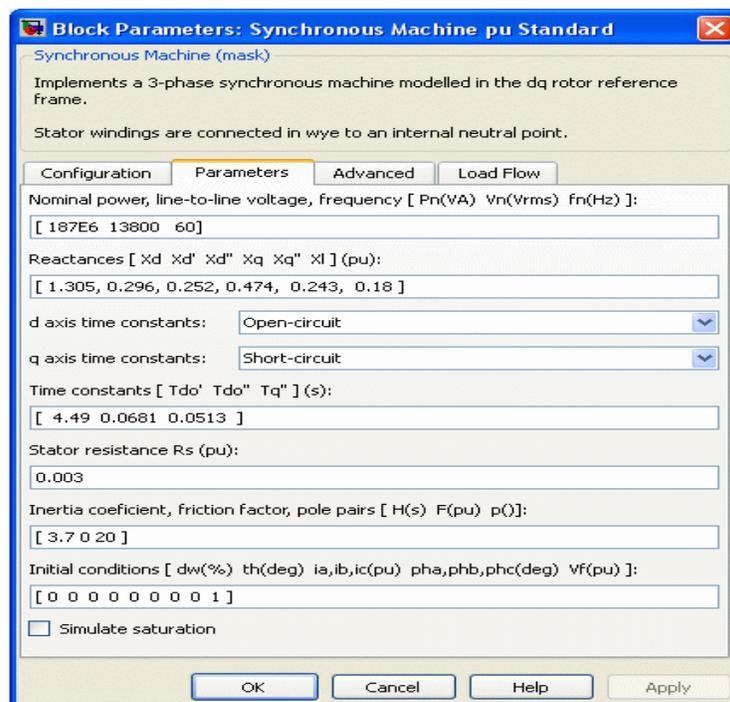


Ilustración 13. Definición de parámetros-maquina síncrona.

Cabe mencionar que el bloque proporciona un conjunto de parámetros eléctricos y mecánicos predeterminados para diferentes clasificaciones de máquinas síncronas de potencia (kVA), la tensión de fase a fase (V), la frecuencia (Hz), y la velocidad nominal (rpm). La ilustración 13 se hallan los parámetros de la máquina síncrona.

3.3.2 Opciones avanzadas (Advanced Tab)

Otra de las propiedades importantes de este bloque, es que podemos determinar los parámetros de la tensión nominal de campo vista desde el estator, definiendo valores esta arroja la curva típica sin saturación.

Los parámetros de flujo de carga se utilizan para definir parámetros de bloque para su uso con la herramienta de flujo de carga del bloque de PowerGUI.

Estos parámetros de flujo de carga se utilizan sólo para la inicialización del modelo. No tienen ningún impacto en el modelo de bloques y en el rendimiento de la simulación.

La configuración de la ficha Flujo de carga depende de la opción seleccionada para el parámetro de tipo de generador. La ilustración 14 muestra el tipo de selección a emplear para determinar la tensión nominal de campo visto desde el estator.

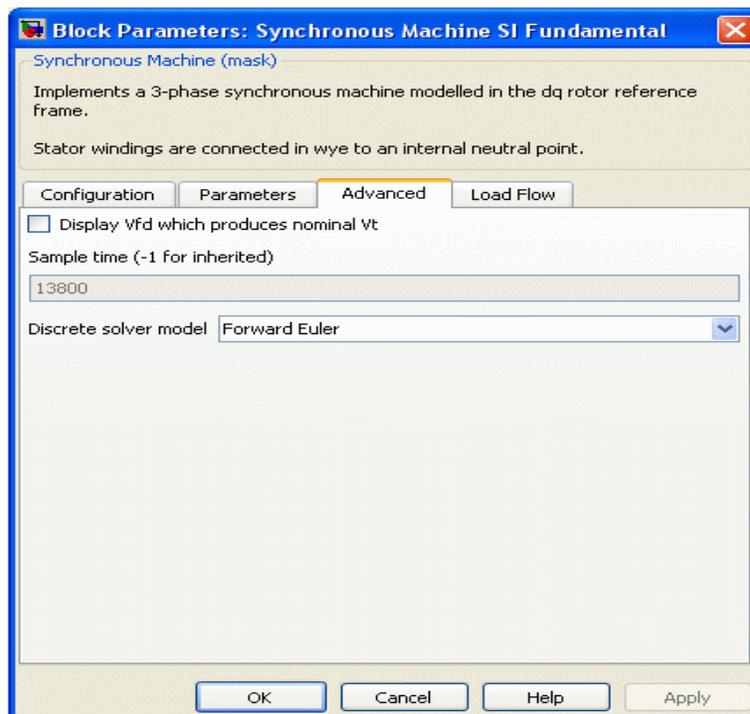


Ilustración 14. Selección para determinar la tensión nominal de campo visto desde el estator.

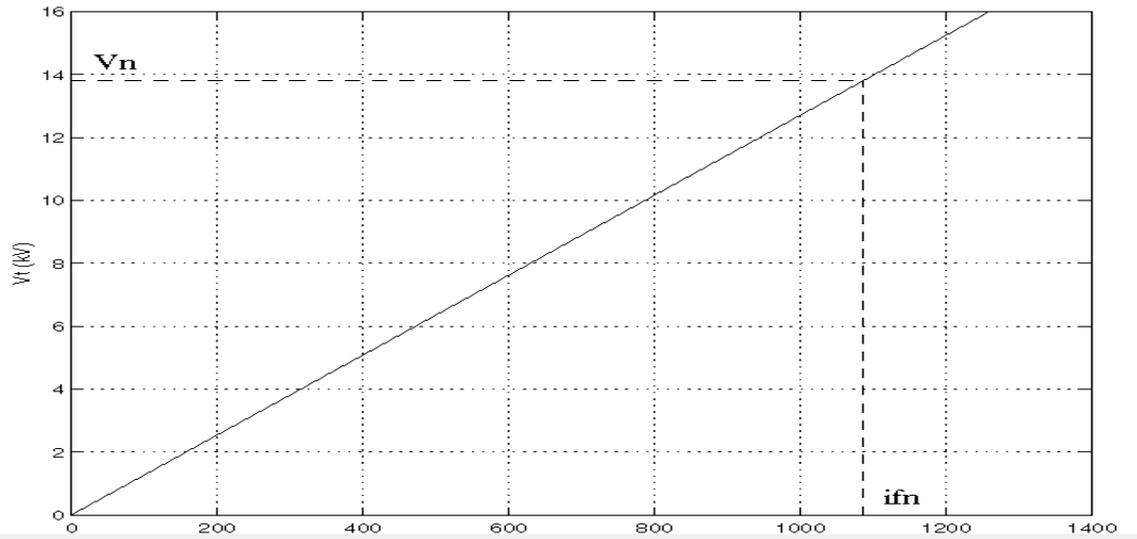


Ilustración 15. Curva típica de la tensión nominal de campo vista desde el estator.

La ilustración 15 esquematiza la curva típica de la tensión de campo vista desde el estator.

Ahora la saturación se modela mediante la instalación de un polinomio a la curva correspondiente a la matriz de puntos que se introducen. Cuantos más puntos que usted introduzca, mejor es el ajuste a la curva original.

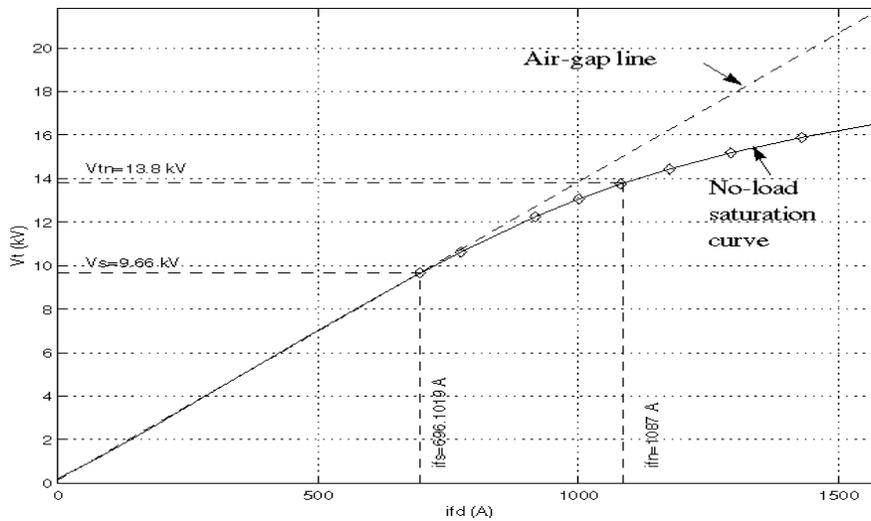


Ilustración 16. Ajuste de la curva original- modelo en saturación.

La ilustración 16 representa la gráfica para el ajuste de la curva original Vs el modelo en saturación.

3.3.3 Parámetros de flujo de carga (Load Flow Tab)

Aquí los parámetros de flujo de carga se utilizan para definir parámetros de bloque para su uso con la herramienta de flujo de carga del bloque de PowerGUI. Estos parámetros de flujo de carga se utilizan sólo para la inicialización del modelo.

Ellos no tienen ningún impacto en el modelo de bloques y en el rendimiento de la simulación y la configuración de la ficha Flujo de carga depende de la opción seleccionada para el parámetro de tipo de generador

Reconociendo el tipo de generador definido así:

- P se especifica por el parámetro P generación de potencia activa del bloque.
- V se especifica por el bus de oscilación o autobús
- PV parámetro de tensión de la carga de bloques de flujo de bus conectado a los terminales de la máquina.

De esta forma podremos controlar la potencia reactiva mínima y máxima generada por el bloque mediante el Q_{min} potencia reactiva mínima y los parámetros máximos de potencia reactiva Q_{max} .

3.3.4 Definición de parámetros

3.3.4.1 Generación de potencia activa (active power generation P):

Aquí podemos seleccionar PQ e implementar un generador de controlar su potencia activa y reactiva. P generación de potencia activa y Q generación de capacidad reactiva del bloque.

3.3.4.2 Generación de potencia reactiva (active power generation Q):

Se define la potencia reactiva que se quiere generar, en vars.

3.3.4.3 Potencia reactiva mínima (Minimum reactive power Q_{min}):

Este parámetro está disponible solo si se especifica el tipo de generador como PV. Indica la potencia reactiva mínima que puede ser generada por la máquina mientras se mantiene la tensión del terminal en su valor de referencia. Esta tensión de referencia se especifica por el bus de oscilación o autobús PV parámetro de tensión de la carga de bloque de flujo de bus conectado a los terminales de la máquina.

3.3.4.4 Máxima potencia reactiva (Maximum reactive power Q_{max}):

Indica la potencia reactiva máxima que puede ser generada por la máquina mientras se mantiene la tensión del terminal en su valor de referencia. Esta tensión de referencia se especifica por el bus de oscilación o autobús PV parámetro de tensión de la carga de bloque de flujo de bus conectado a los terminales de la máquina. Este parámetro solo está disponible al especificar el tipo de generador como PV. La ilustración 17 se visualiza la definición de parámetros de carga para la máquina síncrona.

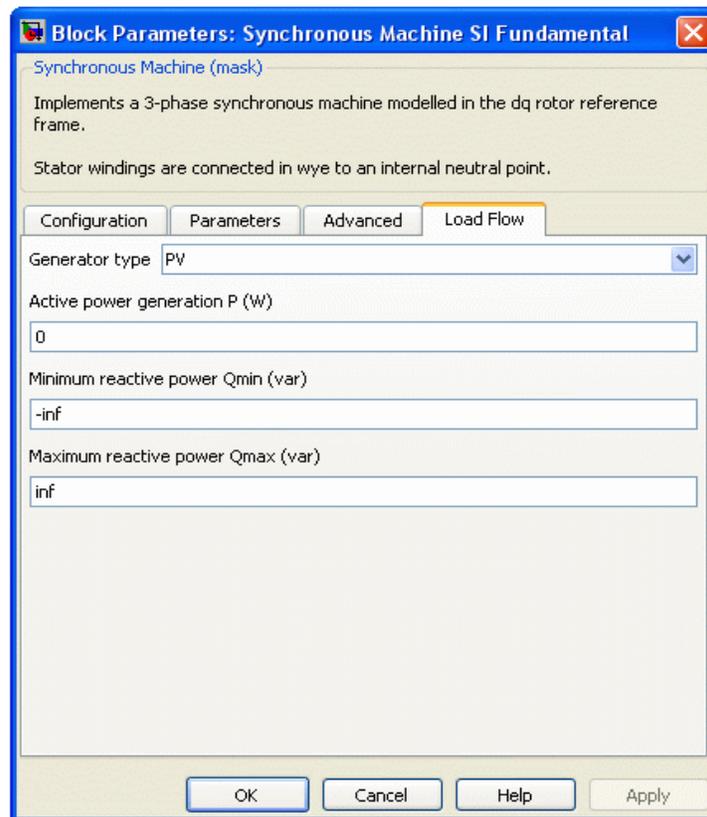


Ilustración 17. Definición de parámetros de carga.

3.3.5 Entradas y salidas del bloque

Las unidades de las entradas y salidas varían según el cual el cuadro de diálogo se utiliza para introducirlos parámetros de los bloques. Si se utilizan los parámetros fundamentales en unidades del SI, las entradas y salidas están en unidades del SI (excepto para d_{w} en el vector de las variables internas, que siempre está en la PU, y el ángulo Θ , que siempre está en rad). De lo contrario, las entradas y salidas definidas en pu.

La primera entrada es la potencia mecánica en el eje de la máquina se puede definir en vatios, pero para nuestro caso se definirá en valores de pu, aquí también se especifica la velocidad de la máquina en radianes.

La segunda entrada del bloque es la tensión de campo la cual será suministrada por el regulador de voltaje, la tensión de campo V_f debe introducirse en voltios de CC.

La salida del bloque (m) contiene un vector de 22 señales. Si se desea se puede multiplexar estas señales utilizando el bloque selector de autobús proporcionado en la biblioteca Simulink. La ilustración 18 define el vector medida de salida del bloque del generador.

Signal	Definition	Units	Signal	Definition	Units
1	Stator current is_a	A or pu	12	Stator voltage vq	V or pu
2	Stator current is_b	A or pu	13	Stator voltage vd	V or pu
3	Stator current is_c	A or pu	14	Rotor angle deviation d_theta	rad
4	Stator current is_q	A or pu	15	Rotor speed ω_m	rad/s.
5	Stator current is_d	A or pu	16	Electrical power P_e	VA or pu
6	Field current ifd	A or pu	17	Rotor speed deviation $d\omega$	rad/s
7	Damper winding current ikq1	A or pu	18	Rotor mechanical angle theta	rad
8	Damper winding current ikq2	A or pu	19	Electromagnetic torque T_e	N.m or pu
9	Damper winding current ikd	A or pu	20	Load angle delta	N.m or pu
10	Mutual flux ϕ_{mq}	V.s or pu	21	Output active power P_{eo}	rad
11	Mutual flux ϕ_{md}	V.s or pu	22	Output reactive power Q_{eo}	rad

Ilustración 18. Vector medida señales de salida del bloque generador.

3.4 Regulador de tensión

El regulador de tensión del modelo de este proyecto es tomado del instalado actualmente en la Central Hidroeléctrica de URRRA I donde su fabricante es la empresa ELECTROXILA de referencia CTC-300-1900-1900-2.5 y los modelos matemáticos descritos a continuación son tomados del manual de este equipo. Dentro del modelo tiene la función de entregar la tensión de campo al generador en dc.

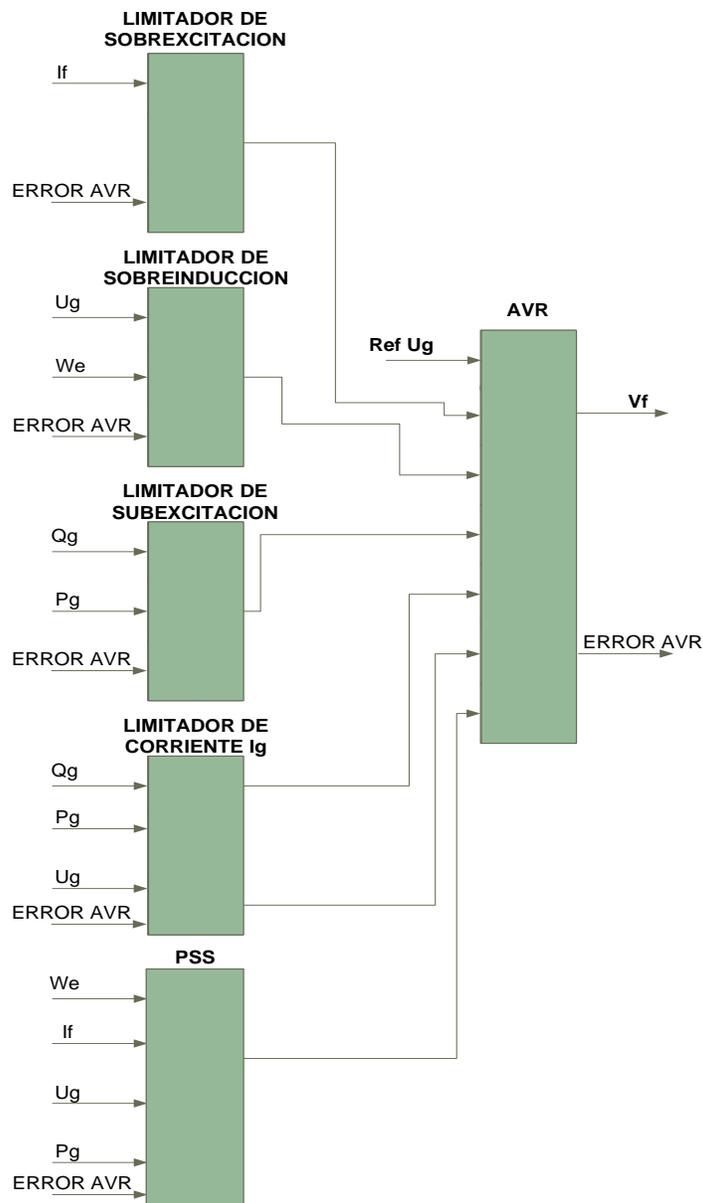


Ilustración 19.Diagrama de Bloques Regulador de Tensión con Limitadores y PSS

En la ilustración 19 se muestra internamente los diferentes elementos que interactúan dentro del modelo matemático del regulador de tensión completo el cual se tomara como base para nuestro software de modelamiento.

Este diagrama de bloques es representado en Simulink de Matlab donde interactúan cada uno de los subsistemas dentro del regulador de tensión es el que a continuación se muestra en la ilustración 20

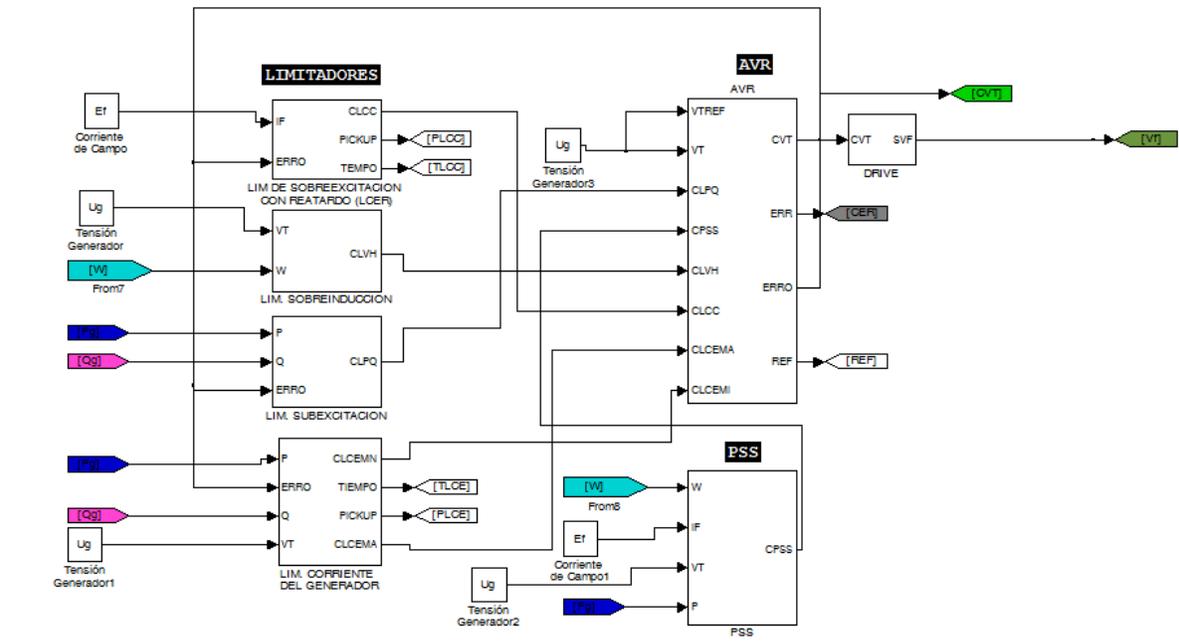


Ilustración 20 Representación de Regulador de Tensión en Simulink del Modelo

A continuación se describe cada uno de estos elementos al igual que su programación en Simulink de Matlab.

3.4.1 Regulador Automático de Tensión (AVR)

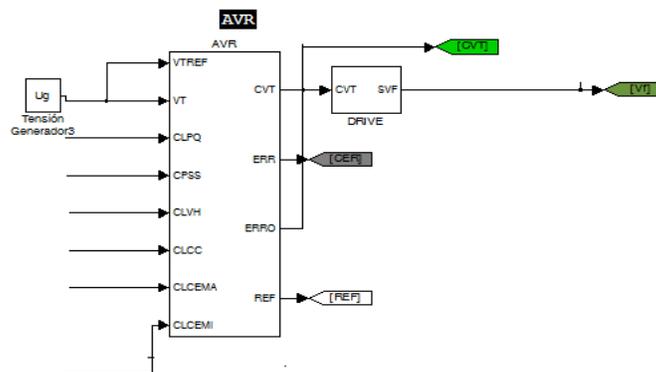


Ilustración 21 Subsistema Regulador Automático de Tensión AVR

La ilustración 21 representa el regulador automático de tensión AVR el cual es el elemento principal de todo regulador de tensión. Es el encargado de rectificar la señal sinusoidal trifásica de entrada. Dicha rectificación es dada por la salida de pulsos de accionamiento del banco de tiristores donde el AVR calcula dicho ángulo de acuerdo a un setpoint de tensión del generador dado por el operador. La salida del AVR es la tensión de campo enviada al rotor de la máquina y es inducida en el entre hierro al generador.

En nuestro modelo matemático el subsistema de sobreexcitación se muestra en la Ilustración 22.

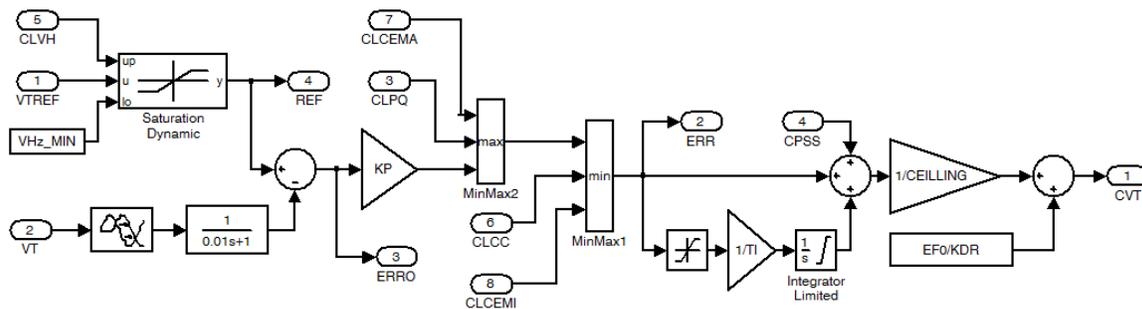


Ilustración 22 Configuración Interna del Subsistema del Regulador Automático de Tensión AVR

Las variables entradas de este subsistema son:

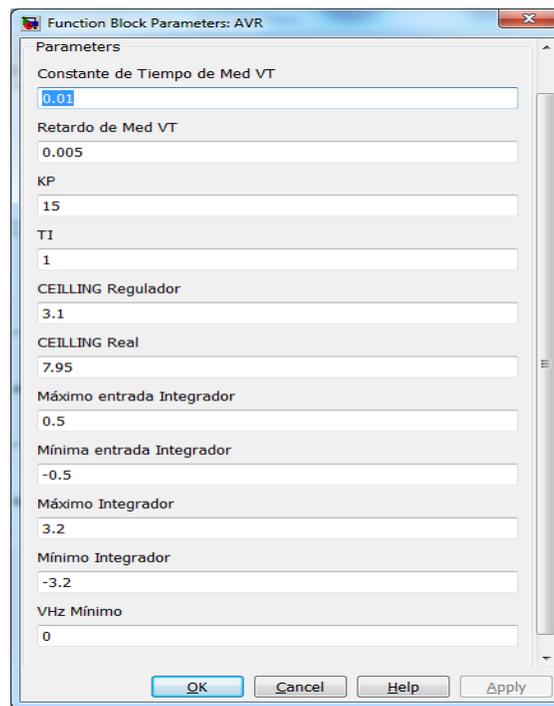


Ilustración 23 Variables de entrada al subsistema AVR

La ilustración 23 señala las variables de entrada al subsistema AVR

3.4.2 Limitador de sobreexcitación

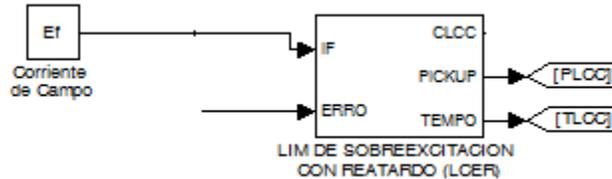


Ilustración 24 Subsistema - Limitador de Sobreexcitación del Modelo

El Limitador de Sobreexcitación, esquematizado en la ilustración 24, también conocido como OEL (Overexcitation Limiter) tiene como propósito proteger al generador del sobrecalentamiento debido a una prolongada sobre corriente de campo.

La función de limitación de sobreexcitación detecta condiciones de altas corrientes de campo y después de un retardo de tiempo, actúa a través del regulador de AC para bajar la excitación a un valor predefinido (típicamente del 100% al 110% de la corriente de campo). Si no se obtiene un resultado exitoso, se dispara el regulador de AC y se transfiere el control al regulador de DC y se reposiciona el setpoint a un valor correspondiente al de corriente nominal. Si esta operación no reduce la excitación a un valor seguro, el limitador iniciará un disparo del interruptor de campo y disparo de la unidad.

Se utilizan dos tipos de retardo de tiempo: tiempo definido y tiempo inverso. Los limitadores de tiempo definido operan cuando la corriente de campo excede el valor de ajuste por un tiempo definido ajustado, independientemente del grado de sobreexcitación. Los limitadores de tiempo inverso operan con el retraso de tiempo coincidiendo con la capacidad térmica del campo. En la ilustración 25 se muestra la coordinación del OEL con el límite térmico del campo.

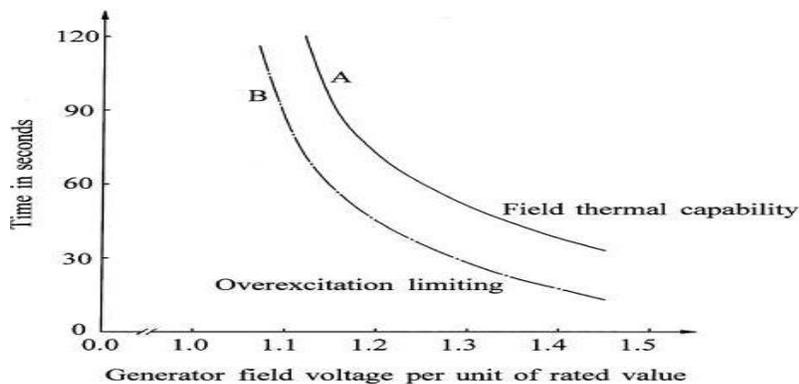


Ilustración 25. Coordinación del OEL de tiempo inverso y capacidad térmica del campo

En nuestro modelo matemático el subsistema de sobreexcitación se muestra en la Ilustración 26

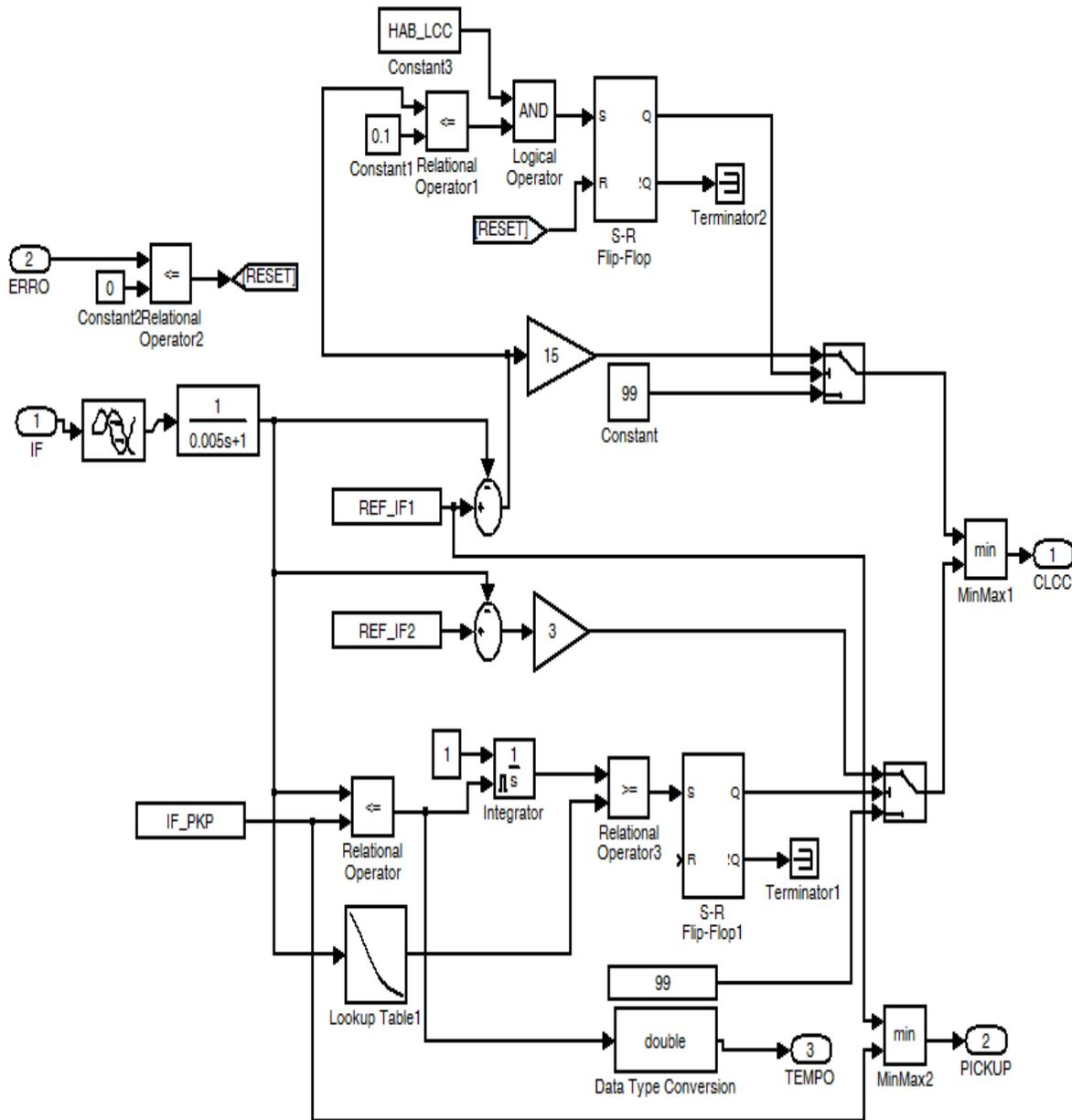


Ilustración 26 Configuración interna del Subsistema del Limitador de Sobreexcitación

Donde tenemos las siguientes variables de entrada, la ilustración 27 señala las variables de entrada subsistema en el limitador de sobreexcitación.

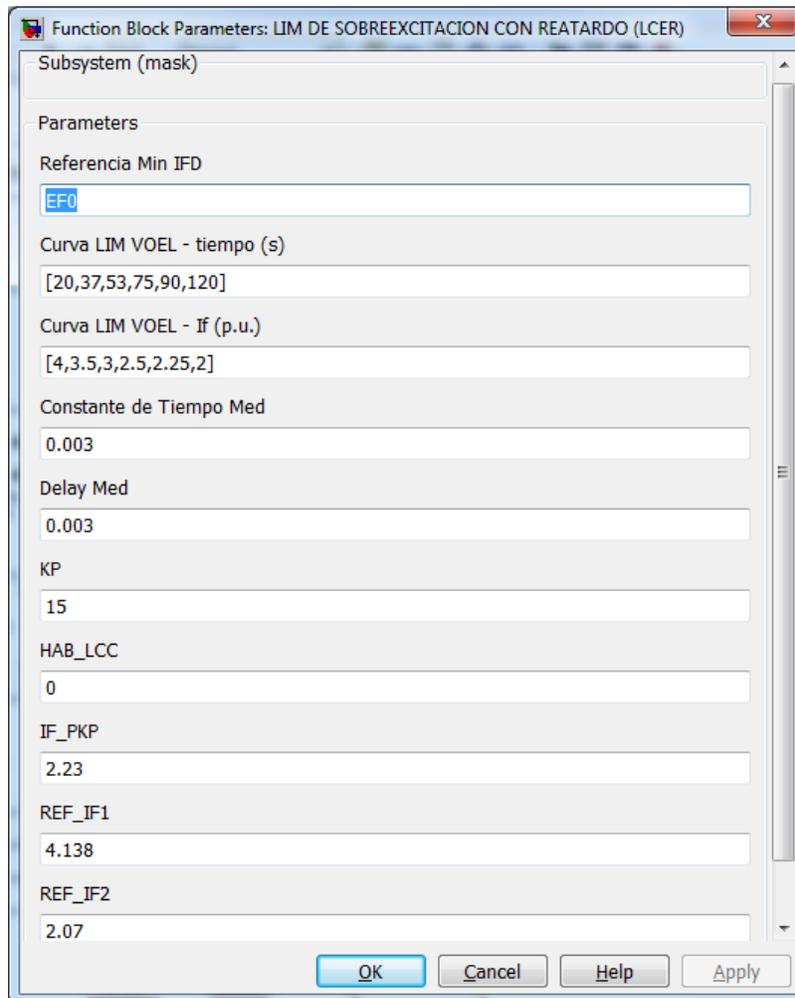


Ilustración 27 Variables de Entrada Subsistema Limitador de Sobreexcitación

Donde sus variables principales son:

Ref Min IFD: Es la corriente de campo inicial para la prueba que se vaya a realizar

Curva Limitador VOEL - tiempo(s): Son los valores en segundos del tiempo de la curva de tiempo inverso que define este limitador.

Curva Limitador VOEL - If (p.u.): Son los valores en p.u. de la corriente de campo de la curva de tiempo inverso que define este limitador.

HAB_LCC: Si el Valor es cero habilita el limitador, si es 1 se habilita.

3.4.3 Limitador de sobre inducción (V/Hz)

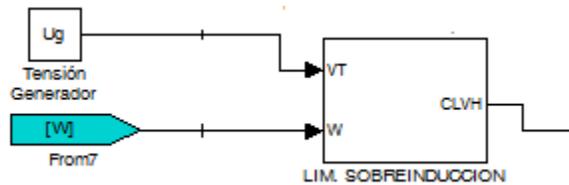


Ilustración 28 Subsistema Limitador de sobre inducción del Modelo

Este limitador se encarga de evitar el daño producido debido a un nivel excedido de V/Hz, es causado principalmente por el sobrecalentamiento de las componentes físicas del generador, el cual depende de la duración de evento, la ilustración 28 esquematiza el subsistema limitador de sobre inducción del modelo.

Las curvas típicas para un generador y un transformador de potencia, sin embargo los fabricantes generalmente proporcionan curvas para sus equipos, que muestran los límites permisibles en términos de porcentaje de V/Hz normales contra tiempo. La ilustración 29 muestra la curva típica de límite para la operación V/Hz para un generador y la ilustración 30 muestra la curva típica de límite para la operación V/Hz para un transformador de potencia.

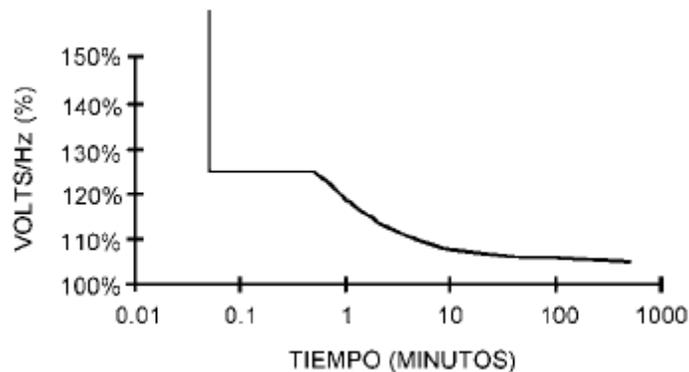


Ilustración 29. Curva típica de límite para la operación de V/Hz para un generador

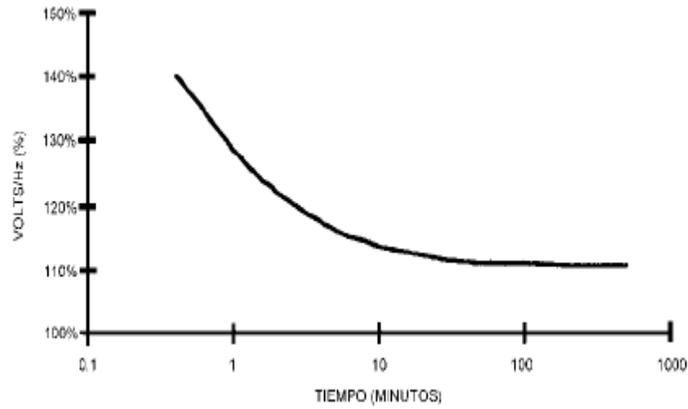


Ilustración 30. Curva típica de límite para la operación de V/Hz para un transformador de potencia

De la ilustración 31 mostramos la programación interna del subsistema

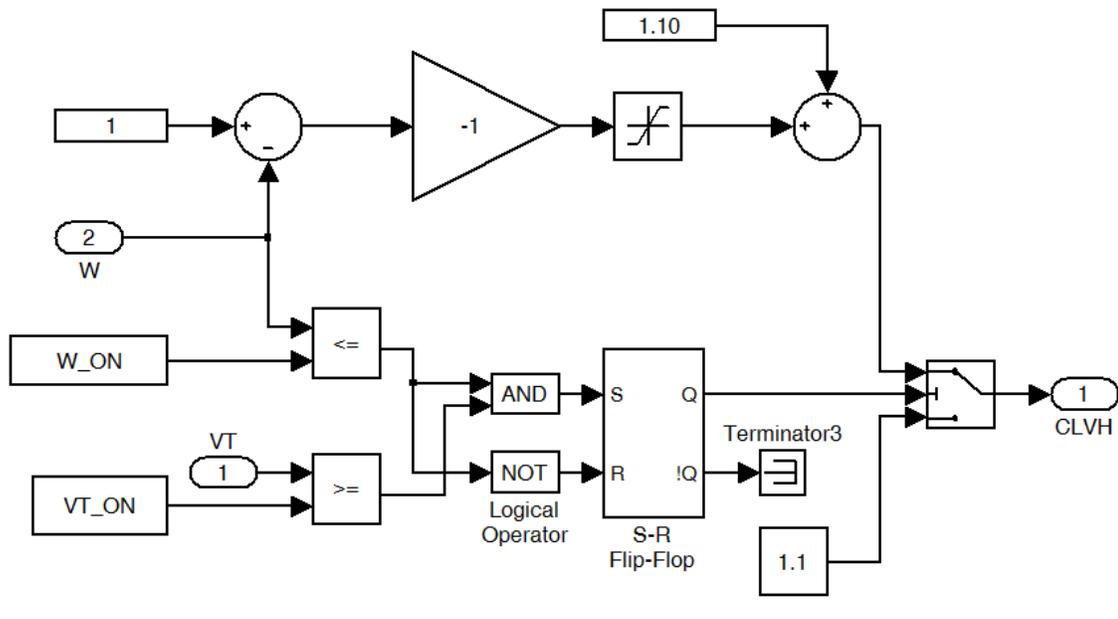


Ilustración 31 Configuración Interna del subsistema Limitador de Sobre inducción

En la ilustración 32 se definen las variables de entrada al limitador de sobre inducción del modelo

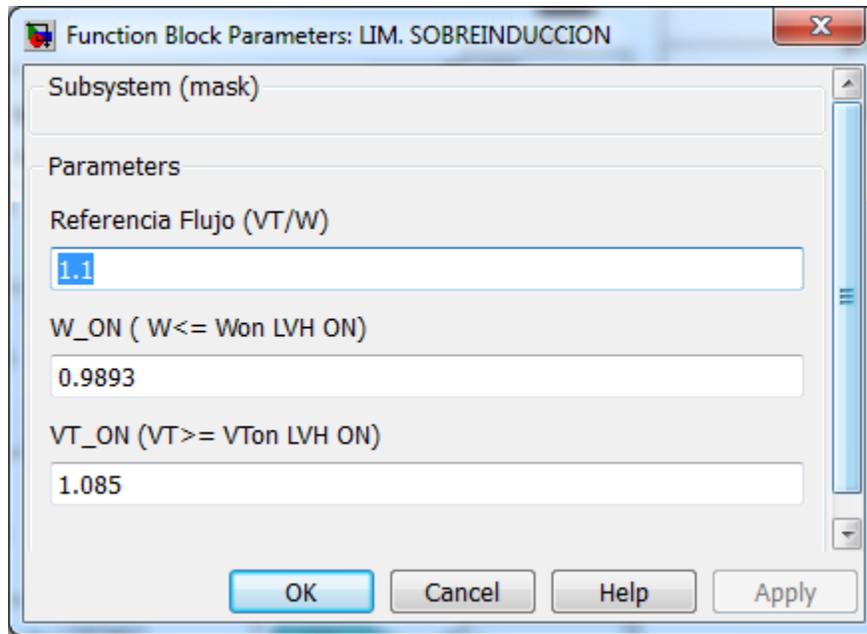


Ilustración 32 Variables de entrada al limitador de sobre inducción del modelo

Dónde:

Referencia Flujo (VT/W): Es el valor de la relación de tensión sobre velocidad donde se activa el limitador

W_ON: Es el valor en p.u de la velocidad donde se activa el limitador.

VT_ON: Es el valor en p.u de la tensión del generador donde se activa el limitador.

3.4.4 Limitador de subexcitación



Ilustración 33 Subsistema Limitador de Subexcitación

El Limitador de Subexcitación, también conocido como UEL (Underexcitation Limiter) tiene como finalidad prevenir la reducción de la excitación del generador a niveles donde la estabilidad de estado estable o el límite térmico del hierro del estator sean excedidos. La ilustración 33 esquematiza el subsistema limitador de subexcitación.

Estos límites se muestran en la curva de capacidad del generador en la siguiente ilustración.

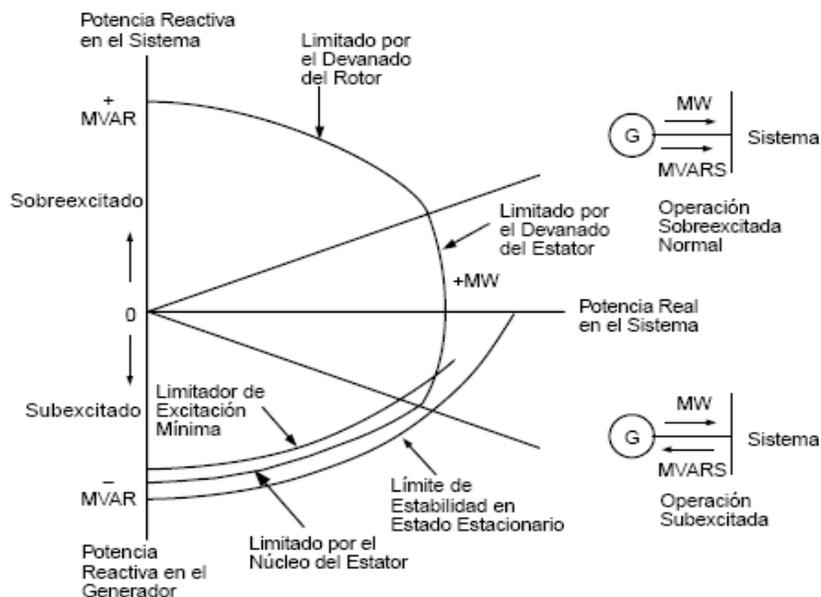


Ilustración 34. Curva de Capacidad de un Generador

La señal de control del UEL es derivada de una combinación de voltaje y corriente o potencia activa y reactiva del generador. Los límites son determinados por la señal excediendo un nivel de referencia, en la ilustración 34 se observa la curva de capacidad de un generador

Existe una amplia variedad de implementaciones del limitador. Algunas aplicaciones actúan en el error de la señal de voltaje del regulador de voltaje; cuando el límite fijado es alcanzado, un elemento no lineal, como un diodo, empieza a conducir y la señal de salida del limitador es combinada con otras señales controlando el sistema de excitación.

La forma más ampliamente usada de la aplicación del UEL consiste en alimentar con la señal de salida del limitador un circuito de tipo compuerta de alto valor, el cual da control a la señal de entrada de mayor valor, ya sea la del regulador de voltaje o la señal del UEL; cuando el límite establecido del limitador es alcanzado se le da total control al sistema de excitación hasta que la señal del UEL esté por debajo del valor límite, la ilustración 35 muestra el modo de actuación del limitador.

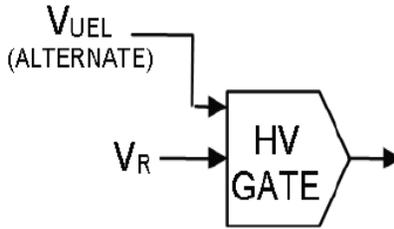


Ilustración 35. Modo de actuación del limitador.

El ajuste del limitador debe estar basado en la necesidad de protección, es decir en la inestabilidad del sistema o el calentamiento del núcleo del estator. Adicionalmente la actuación del limitador debe estar coordinada con la protección de pérdida de excitación.

En la ilustración 36 se muestra la forma como se coordina el limitador, la protección de pérdida de excitación y el límite de estado estable.

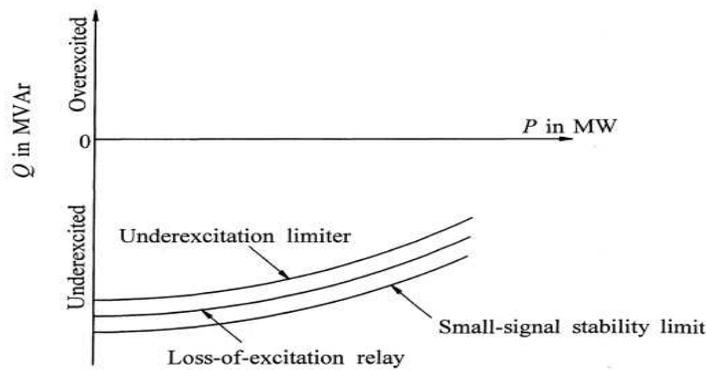


Ilustración 36. Coordinación entre UEL, relé de pérdida de excitación y límite de estabilidad

De la ilustración 37 mostramos la programación interna del subsistema

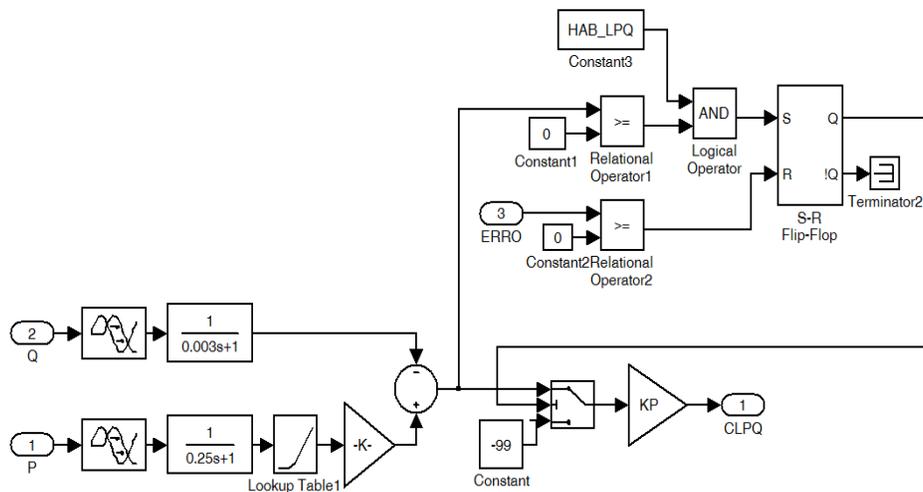


Ilustración 37 Configuración Interna de Subsistema Limitador de Subexcitación

El cual tiene las siguientes de variables de entrada, la cual se puede visualizar en la ilustración 38.

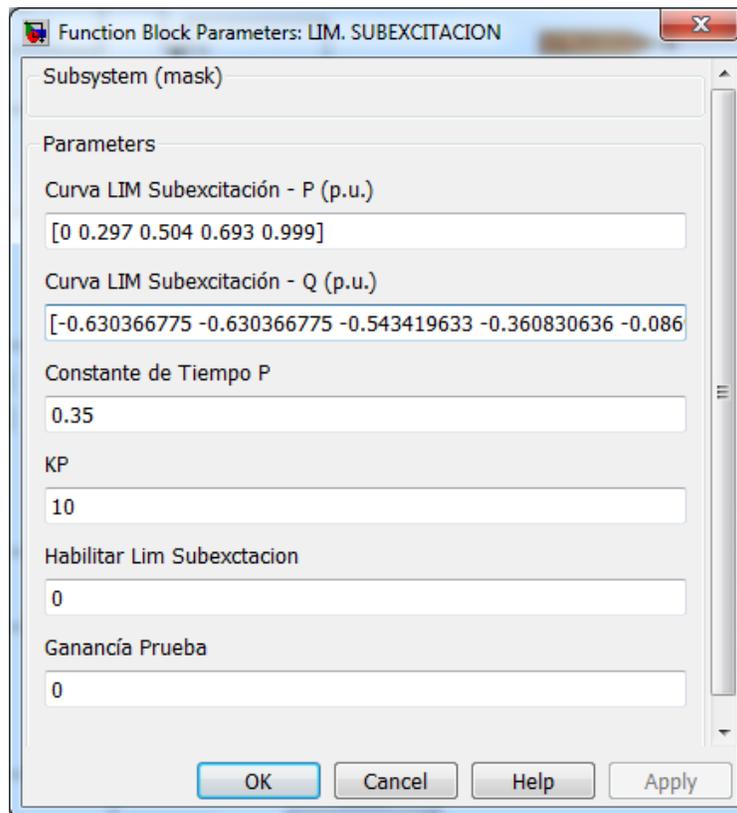


Ilustración 38 Variables de Entrada de Subsistema Limitador de Subexcitación

Donde

Curva LIMsubexcitación – P (p.u.): Son los puntos de potencia activa en p.u. de la curva que rige al limitador

Curva LIMsubexcitación – Q (p.u.): Son los puntos de potencia reactiva en p.u. de la curva que rige al limitador

Habilitar Lim Subexcitación: Si el Valor es 0 se deshabilita el limitador y si es 1 se habilita.

3.4.5 Limitador Sobrecorriente Del Generador

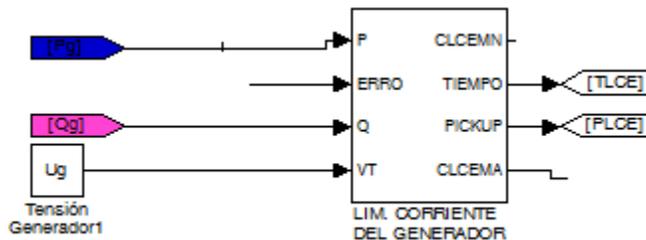


Ilustración 39Subsistema Limitado de Corriente del Generador

De la ilustración 40 mostramos la programación interna del subsistema

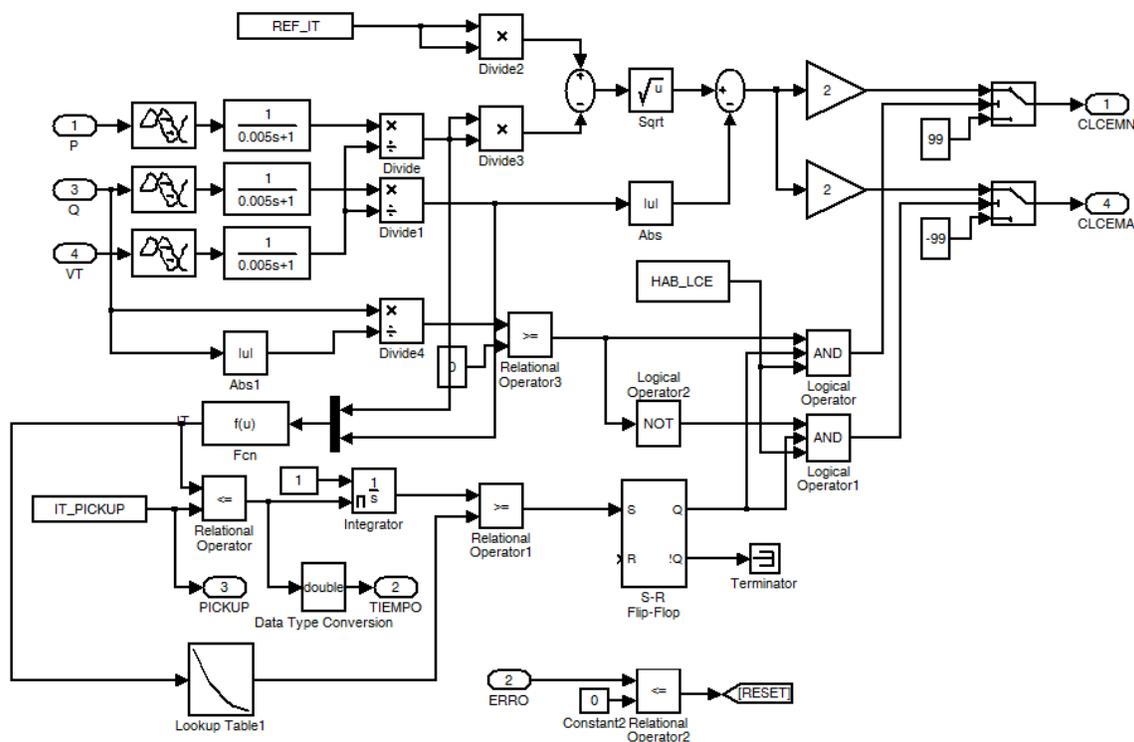


Ilustración 40Configuración Interna del Subsistema Limitador de Corriente del Generador

El cual tiene las siguientes variables de entrada

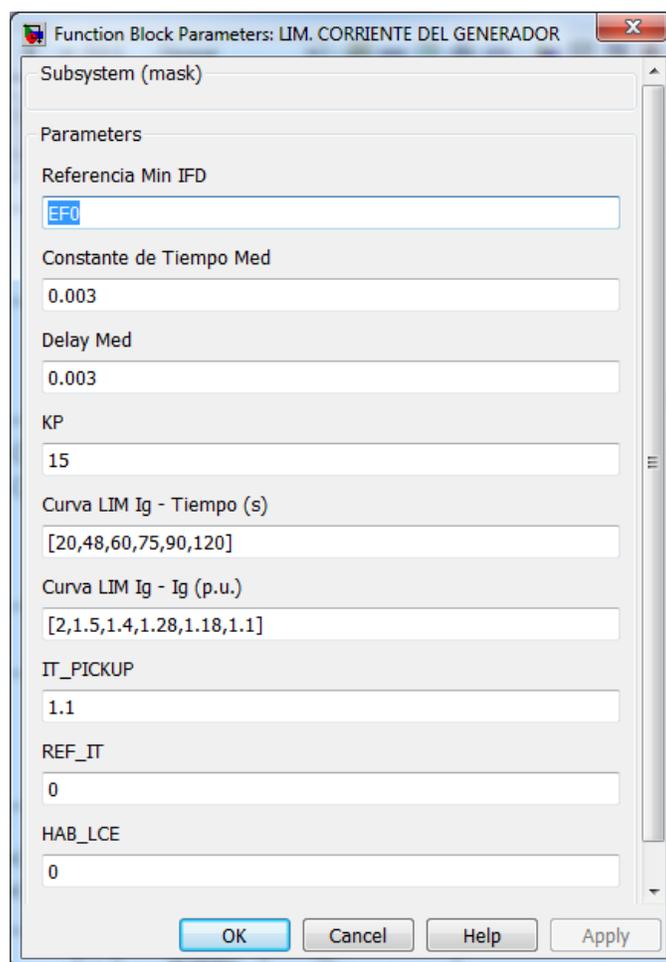


Ilustración 41 Variables Internas Limitador de Sobre corriente del Generador

En la ilustración 41 se visualizan las variables internas del limitador de sobre excitación en el genrador.

Donde

EF0: Es la corriente de campo inicial para la simulación

Curva LIM_{Ig} – Tiempo (s): Son los valores del tiempo en segundos que rige la curva del limitador

Curva LIM_{Ig} – Ig (p.u.): Son los valores de la corriente del generador en p.u. que rige la curva del limitador

HAB_LCE: Si el valor es 0 deshabilita el limitador, si es 1 habilita.

3.4.6 Sistema Estabilizador De Potencia (Pss)

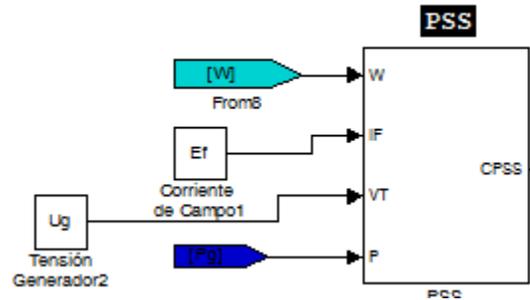


Ilustración 42Subsistema PSS

En la ilustración 42 esquematiza la programación interna del subsistema

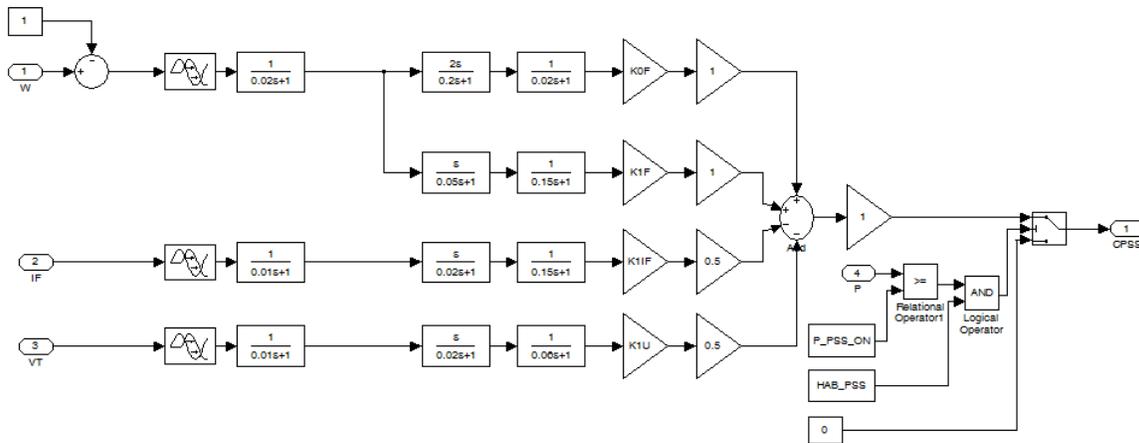


Ilustración 43Configuración Interna del Subsistema PSS

La ilustración 43 representa la configuración interna del subsistema PSS

El cual tiene las siguientes variables de entrada

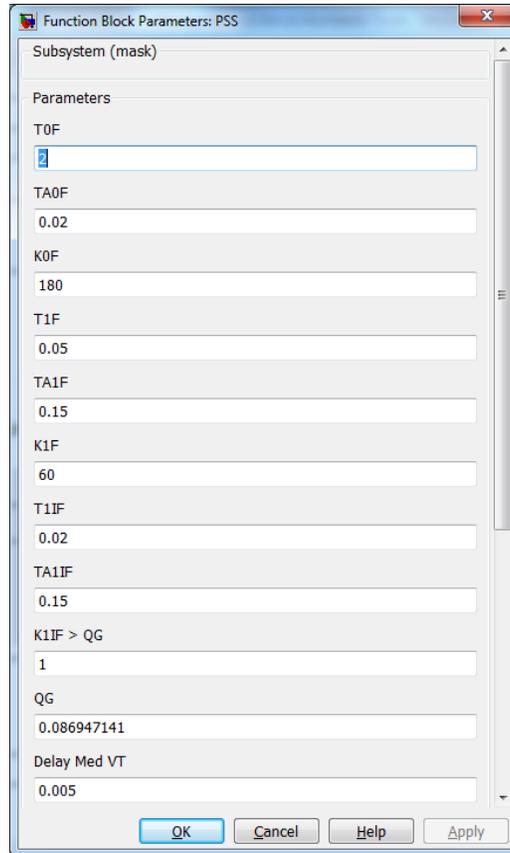


Ilustración 44 Variables de Entrada Subsistema PSS (parte 1)

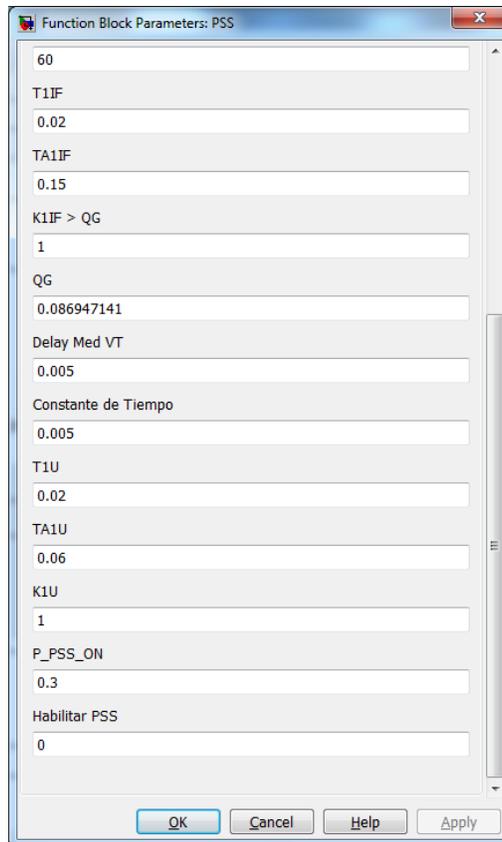


Ilustración 45 Variables de entrada del subsistema PSS (parte 2)

la ilustración 44 y 45 muestra el tipo de variables de entrada del subsistema PSS

Los valores de entrada de este subsistema son constantes que dependiendo del ajuste del PSS se configuran.

3.5 REGULADOR DE VELOCIDAD

Para este modelo se toma el regulador de velocidad instalado en la Central Hidroeléctrica de URRRA cuyo fabricante es la empresa REIVAX

En el siguiente diagrama de bloques se muestra la interacción de variables y subsistemas dentro del regulador de velocidad.

La ilustración 46 esquematiza el diagrama de bloques para el regulador de verlocidad.

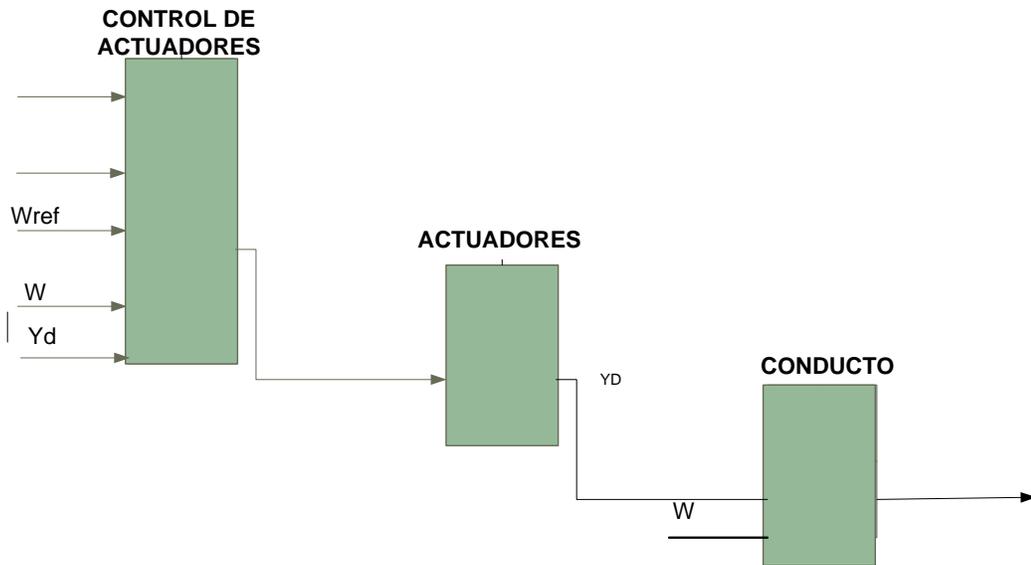


Ilustración 46 Diagrama de Bloques Regulador de velocidad

La representación del diagrama anterior en Simulink se muestra en la ilustración 47

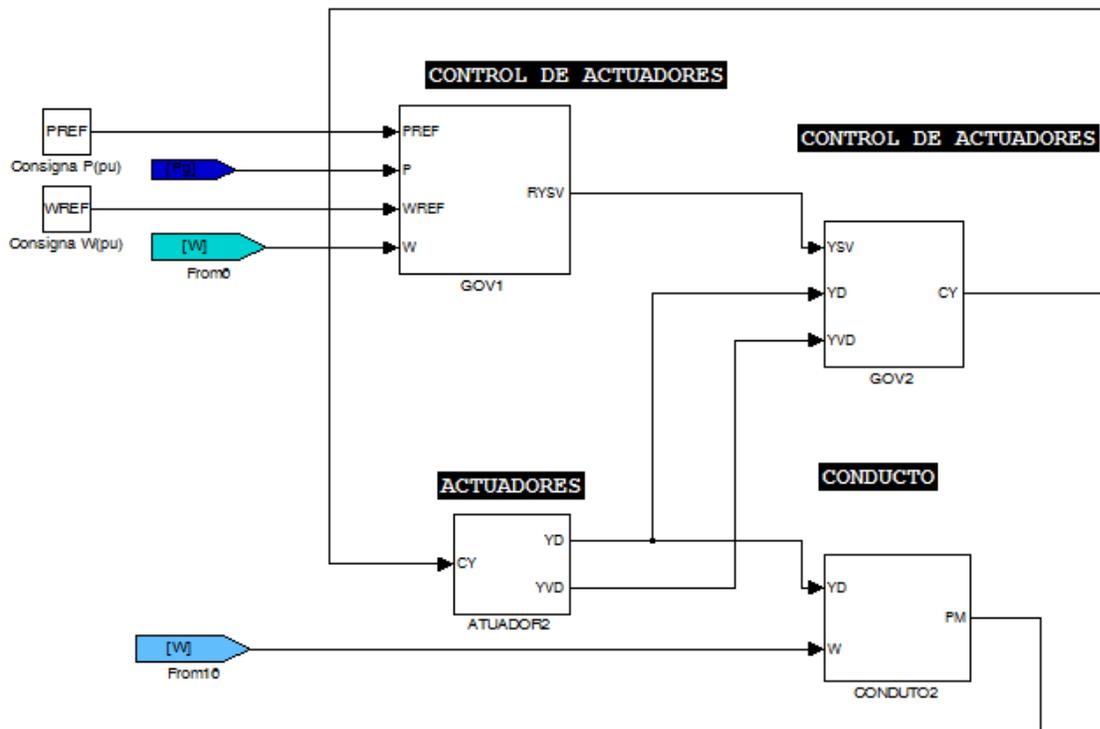


Ilustración 47 Representación de Regulador de Velocidad en Simulink para el Modelo

Los subsistemas que conforman el regulador de velocidad son:

3.5.1 Control de Actuadores 1

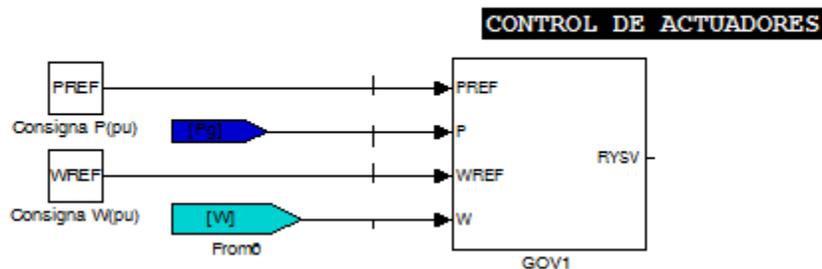


Ilustración 48 Subsistema Control de Actuadores 1

En este bloque se encuentra el control principal del regulador de velocidad donde se tienen los dos modos de operación, generador con carga y generador sin carga. El control es hecho por un controlador PI y tiene un ajuste de salida dependiendo el nivel del embalse. Este bloque se ve representado en la ilustración 48

La configuración interna de este subsistema se muestra en la e Ilustración 49.

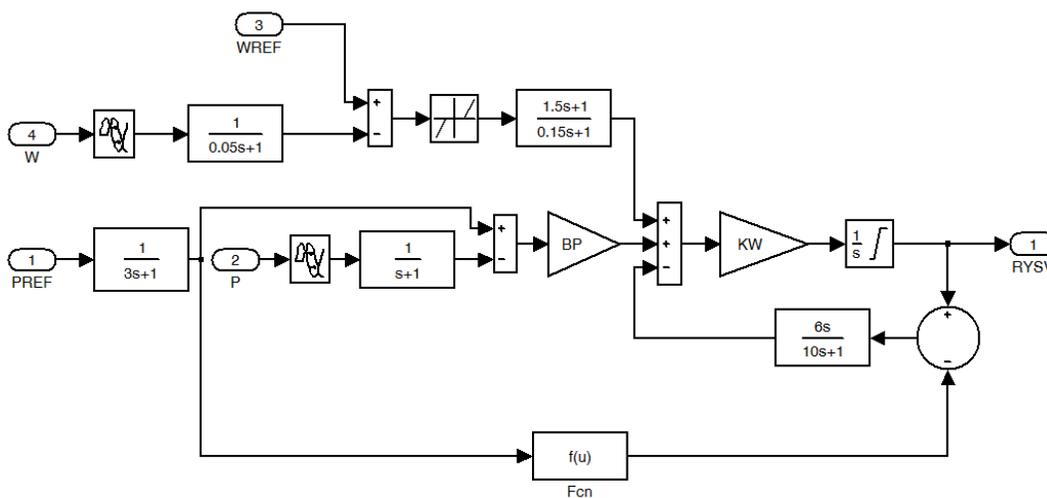


Ilustración 49 Configuración Interna del Subsistema Control de Actuadores 1

Las variables de entrada son:

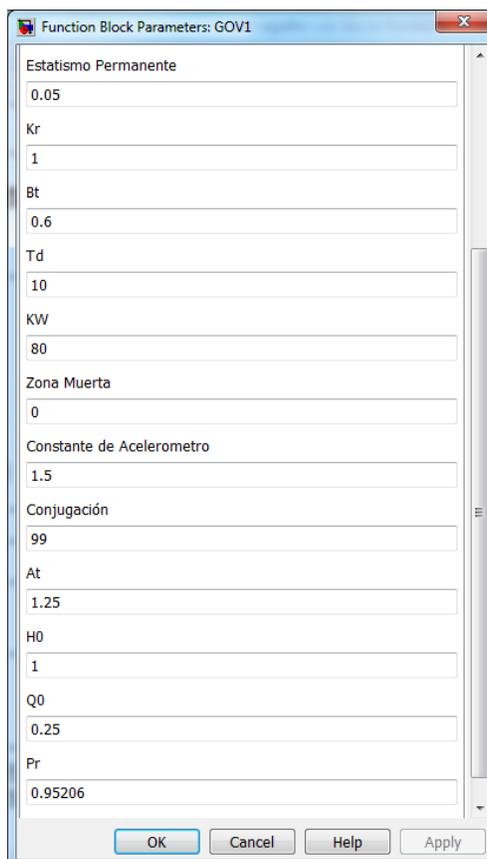


Ilustración 50 Variables de entrada Subsistema Control de Actuadores 1

La ilustración 50 identifica las variables de entrada subsistema en control de actuadores 1

3.5.2 Control de Actuadores 2

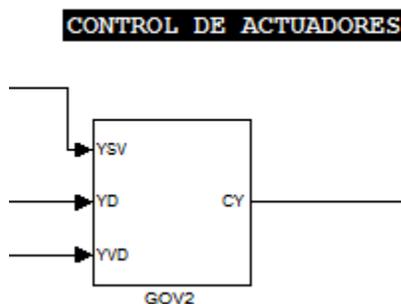


Ilustración 51 Subsistema control de Actuadores 2

En este bloque se recibe la señal de control proveniente del control de actuadores 1 y es comparada con la señal de posición del distribuidor y de la válvula distribuidora. La

señal de salida es enviada a la válvula proporcional. La ilustración 51 esquematiza el subsistema de actuadores 2

La configuración de este subsistema se muestra a continuación.

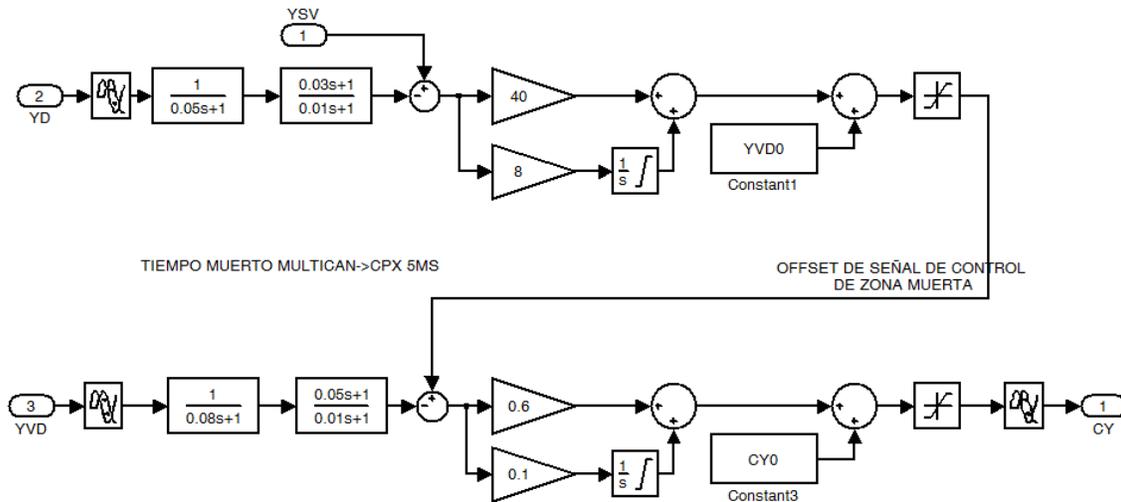


Ilustración 52 Configuración Interna Subsistema de Control de Actuadores 2

La ilustración 52 deja ver la configuración interna del subsistema de control de actuadores 2

Dónde:

CY0: Es la posición inicial del distribuidor

YVD0: Es la posición inicial de la válvula distribuidora

3.5.3 Actuadores



Ilustración 53 Subsistemas Actuadores

Este bloque representado en la ilustración 53 recibe la señal enviada a la válvula proporcional y se traduce en movimiento de la válvula distribuidora principal y del distribuidor.

A continuación se muestra la configuración interna del subsistema

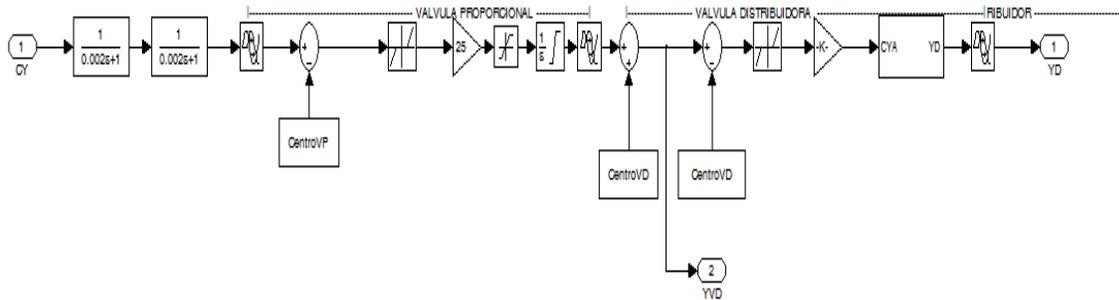


Ilustración 54 Configuración Interna del Subsistema Actuadores

En la ilustración 54 se esquematiza la configuración interna del subsistema de actuadores

Y sus variables de entrada al subsistema visualizadas en la ilustración 55.

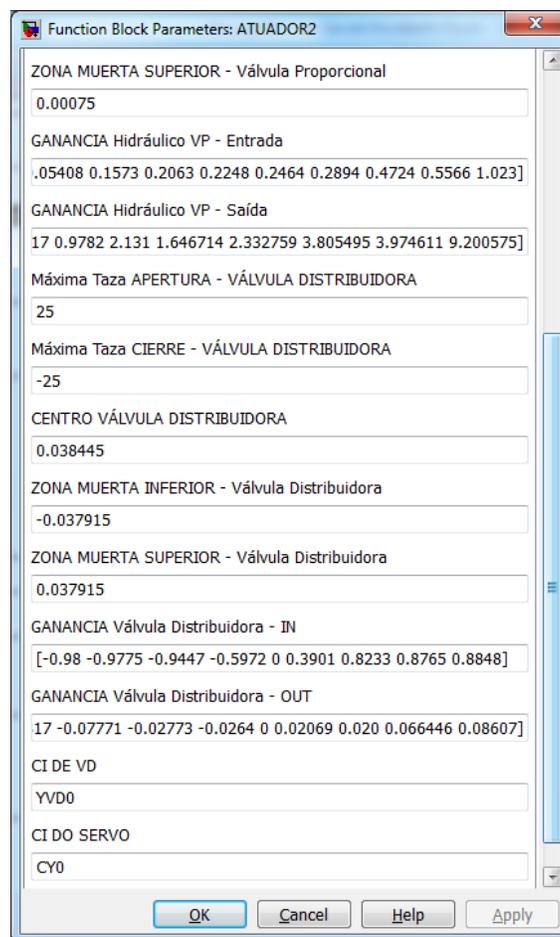


Ilustración 55 Variables Internas Subsistema Actuadores

3.5.4 Conducto

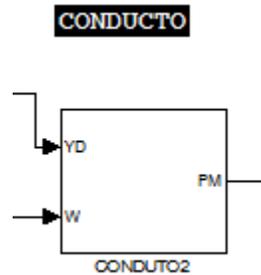


Ilustración 56 Subsistema Conducto

La apertura del distribuidor y las características del conducto que envía el agua a la turbina es traducida en potencia mecánica. La ilustración 56 esquematiza el subsistema conducto

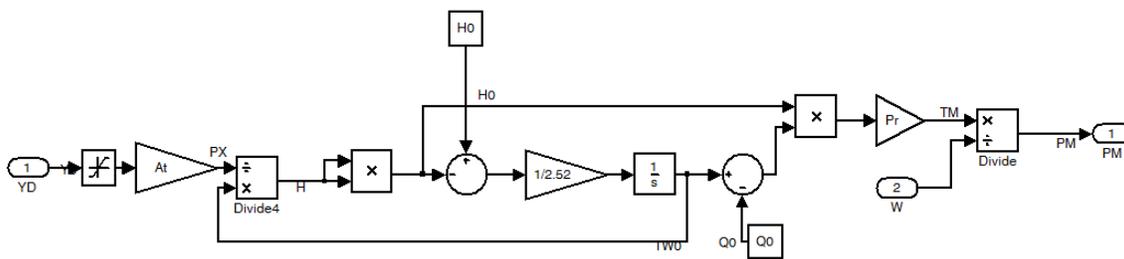


Ilustración 57 Configuración Interna del Subsistema Conducto

En la ilustración 57 la configuración interna del subsistema y en la ilustración 58 la definición de variables de entrada respectivamente.

Las variables de entrada al subsistema Conducto

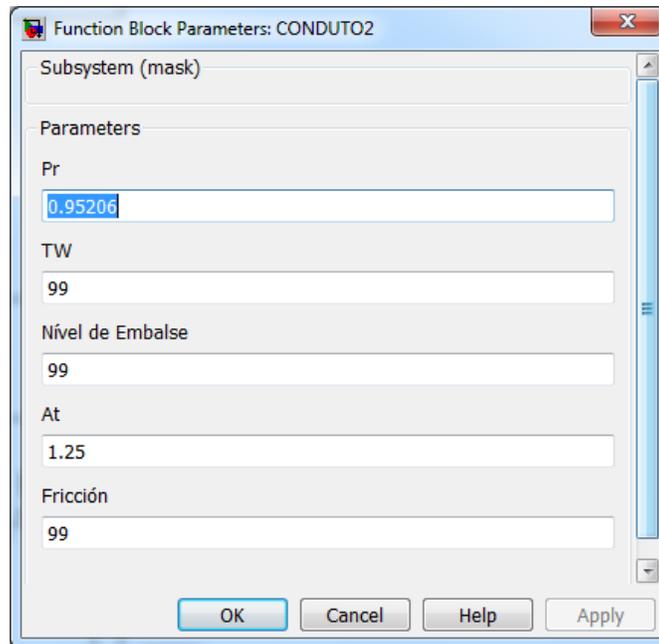


Ilustración 58 Variables de entrada subsistema Conducto

CONCLUSIONES

- Tener un modelo del sistema que opera en una industria, en este caso la generación de energía hidráulica, ayuda sustancialmente a comprender el comportamiento del proceso bajo diferentes circunstancias, ya sea por razones del mismo proceso o por condiciones externas, ayudando a minimizar costos y tiempo de solución de fallas.
- El diseño de un sistema de control típicamente requiere un delicado balance entre limitaciones fundamentales y soluciones de compromiso. Para poder lograr este balance, es necesario tener una comprensión total del proceso, esta comprensión usualmente se captura en un modelo matemático, el cual permite predecir el impacto de distintos diseños posibles sin comprometer al sistema real.
- Para la realización de esta simulación fue necesario entender cada uno de los sistemas y subsistemas que interactúan en el proceso de generación hidráulica y entender su importancia dentro de dicho proceso. Y como un cálculo matemático conocido como la “la transformada PARK” hizo posible que se pudiera modelar el comportamiento de un generador y si esta no se hubiese realizado.
- El Consejo Nacional de Operación del sector eléctrico, acuerda los aspectos técnicos que garantizan que la operación del sistema interconectado nacional sea segura, la cual se ve reflejada en la presentación de modelos para generadores, ampliamente calificados que dejen ver un control de tensión y potencia reactiva así como un control de frecuencia.
- La herramienta matemática Matlab y apoyados en la librería Simscape\SimPowerSystems\Machine de simulink nos dejó un importante bloque (Synchronous machine pu standard) el cual esquematiza el comportamiento de la máquina síncrona que visualiza parámetros de potencia nominal, tensión de línea, y la respectiva frecuencia ayudándonos de esta manera a armar una pieza importante del modelo final.

BIBLIOGRAFÍAS

- [1] Microprocessor-Based Voltage Regulator AVR-2M, Operation Manual 421417.011, ELECTROXILA, Moscow 2007
- [2] Sistema Regulador de Velocidad, Descriptivo Técnico F11051-02-02-01-01-Rev 007, REIVAX, Florianópolis 2013
- [3] Sistema Regulador de Velocidad, Funciones de Transferencia F11051-02-02-04-04 Rev 003, REIVAX, Florianópolis 2013
- [4] Unidad 1, Reporte de Ensayos y Modelos, REIVAX, Florianópolis 2014
- [5] http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/produccion-de-electricidad/xi.-las-centrales-hidroelectricas.
- [6] http://www.ing.una.py/pdf_material_apoyo/turbinas-hidraulicas.pdf.
- [7] http://es.wikipedia.org/wiki/Generador_el%C3%A9ctrico.
- [8] http://www.ehowenespanol.com/tipos-generadores-energia-hidroelectrica-lista_317214/
- [9] http://www.ing.una.py/pdf_material_apoyo/turbinas-hidraulicas.pdf.
- [10] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/rotq.html>.
- [11] <http://www.cno.org.co/webApp/pressflow/content/acuerdo-640>