



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA

TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN ELECTROMECAÁNICA

MODELAMIENTO Y ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA
IMPLEMENTAR UN SISTEMA AUTOMÁTICO DE REGULACIÓN
DE VELOCIDAD Y VOLTAJE EN LOS GRUPOS DE GENERACIÓN
DE 3,25MVA DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA ILLUCHI N°2
DE LA EMPRESA ELÉCTRICA PROVINCIAL COTOPAXI S.A.

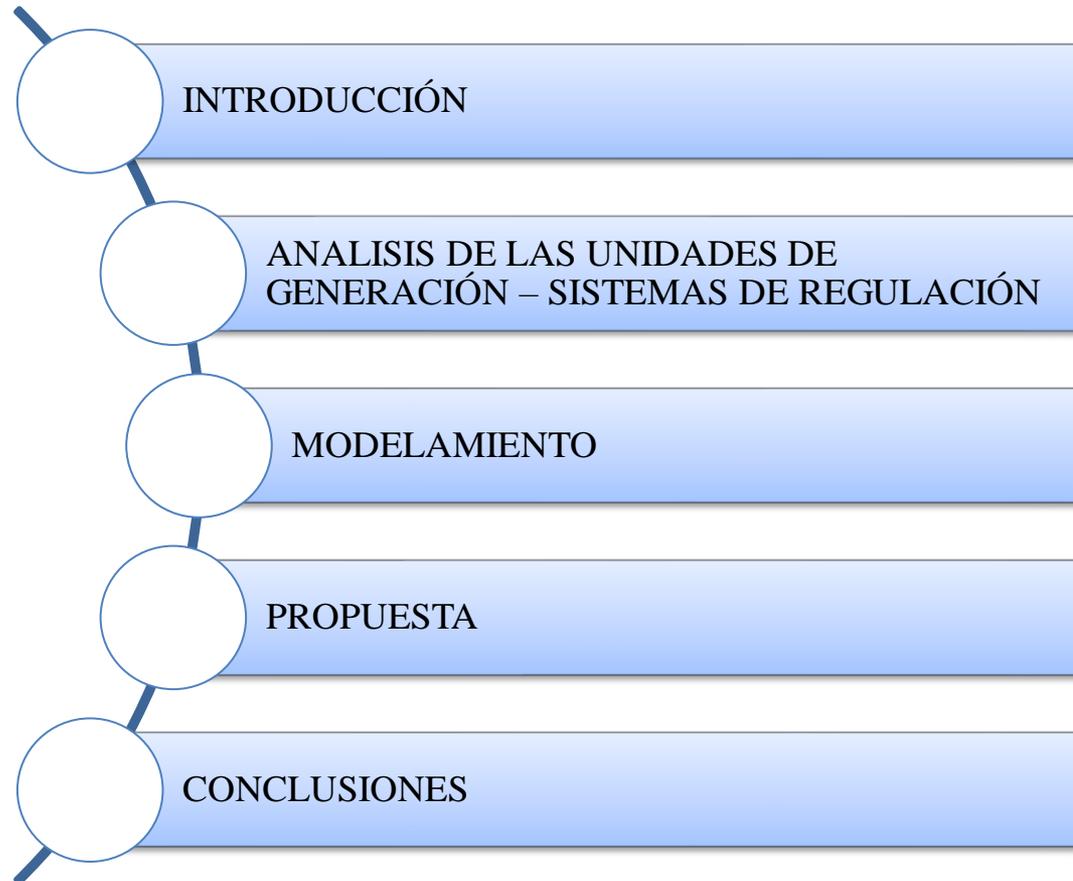
AUTOR: ESCOLA FREIRE, ÁNGEL XAVIER

DIRECTOR: ING. FREIRE LLERENA, WASHINGTON RODRIGO

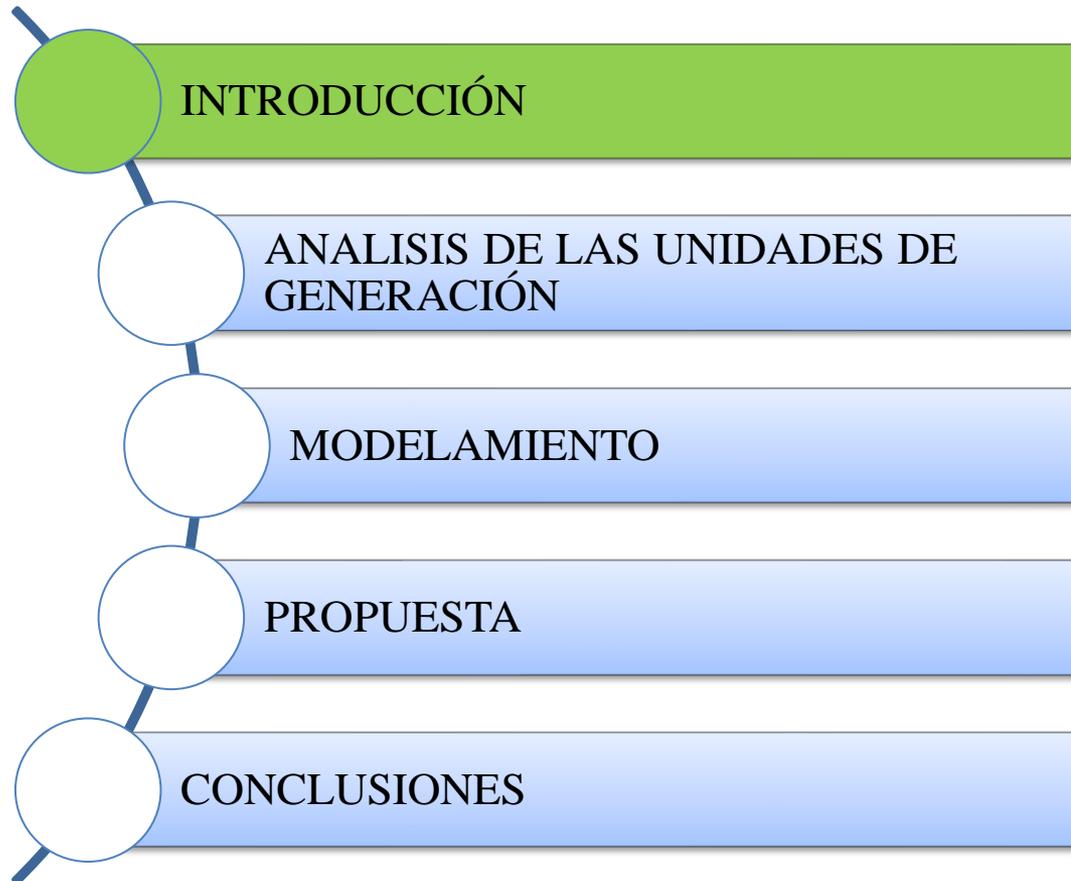
2021



Contenido



Contenido



Introducción

Los sistemas de regulación de velocidad y voltaje de las unidades de generación se encuentran en operación continua, por lo cual, se encuentran expuestos a esfuerzos mecánicos, rotatorios de actuadores que conllevan a una etapa de deterioro inevitable, es por ello que se realiza una propuesta alternativa de modernización.



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Planteamiento del Problema

La Central Illuchi N°2 se encuentra operando de manera continua desde el año 1988, la habilidad y experiencia de sus operarios a sido acertada para su operación que es prácticamente manual . Esto conlleva que su eficiencia y capacidad de respuesta se ve limitada y presentan baja calidad de regulación en contraste de reguladores modernos.



Objetivo General

- Realizar un estudio de los requerimientos de ingeniería necesarios para proponer una implementación de un nuevo sistema de regulación de velocidad y voltaje en la Central Illuchi II mediante un análisis técnico - económico.



Objetivos Específicos

- Realizar un análisis técnico de la Central Hidroeléctrica Illuchi N°2 del estado actual de los sistemas en estudio, su estado de funcionamiento.
- Definir las especificaciones técnicas a detalle de los equipos e instrumentos necesarios para la modernización del sistema de regulación y voltaje.
- Modelar mediante el software Matlab/Simulink, el funcionamiento de los sistemas de regulación de velocidad y voltaje.
- Elaborar la propuesta técnica para determinar la factibilidad económica y conveniencia de realizar una modernización de la central.



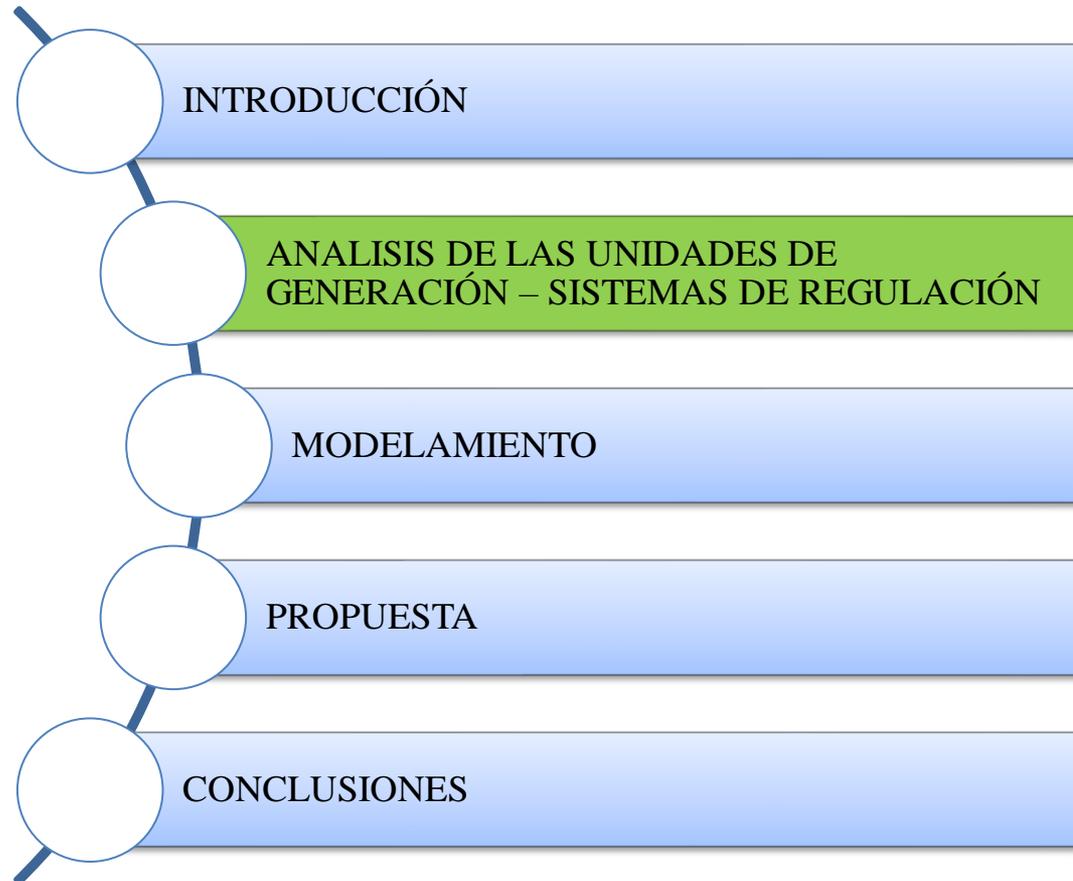
Justificación

Los elementos de la central deben funcionar en óptimas condiciones, ya que una deficiencia en su operación ocasiona bajo rendimiento de la central, esto se ve evidenciado en pérdida de energía en ciertos lapsos lo que numéricamente representa anualmente a la empresa pérdidas económicas, según datos del Departamento de Generación entre los años 2019 y 2020 las pérdidas por eficiencia de control de unidades representan el 84,97% de su total.



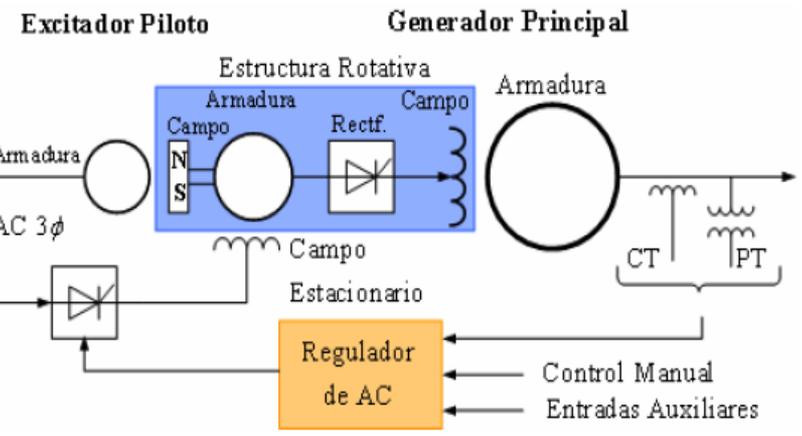
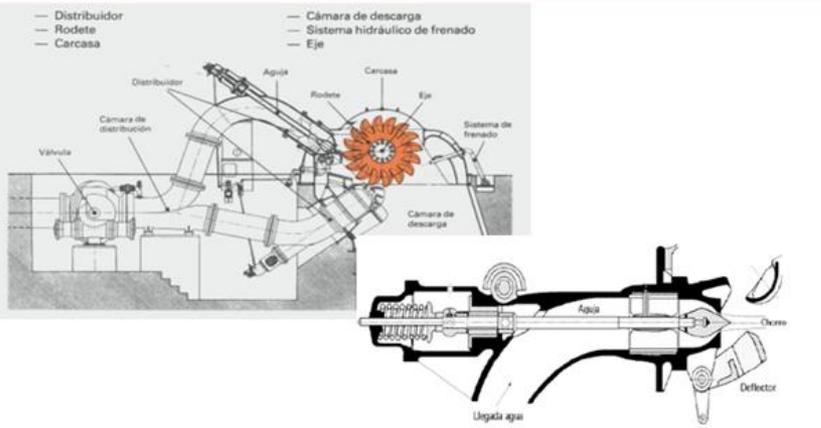
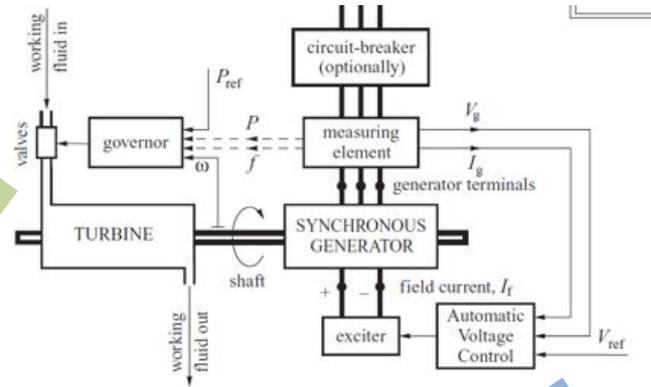
ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Contenido



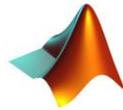
Sistemas de control en las unidades de generación

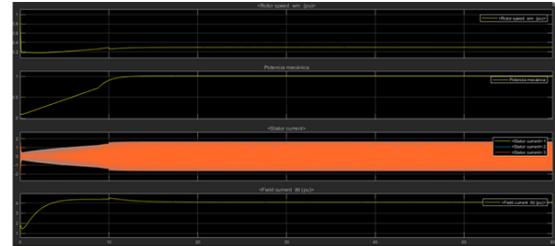
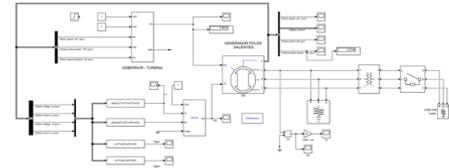
Sistemas de control de un generador síncrono .



Metodología



 **MATLAB**



ESTANDARES IEEE

- **IEEE Std 1147TM – 1901**

Enfatiza en un mejor rendimiento y confiabilidad

- **IEEE Std 125TM – 2007**

Recomendaciones con respecto al sistema governor

- **IEEE Std 1207**

Aplicaciones del sistema governor.

- **IEEE 421.1**

Componentes de uso común de sistemas de excitación

- **IEEE 421.5**

Recomienda modelos de excitación

- **IEEE Modelo Dinámico Hidroturbina**

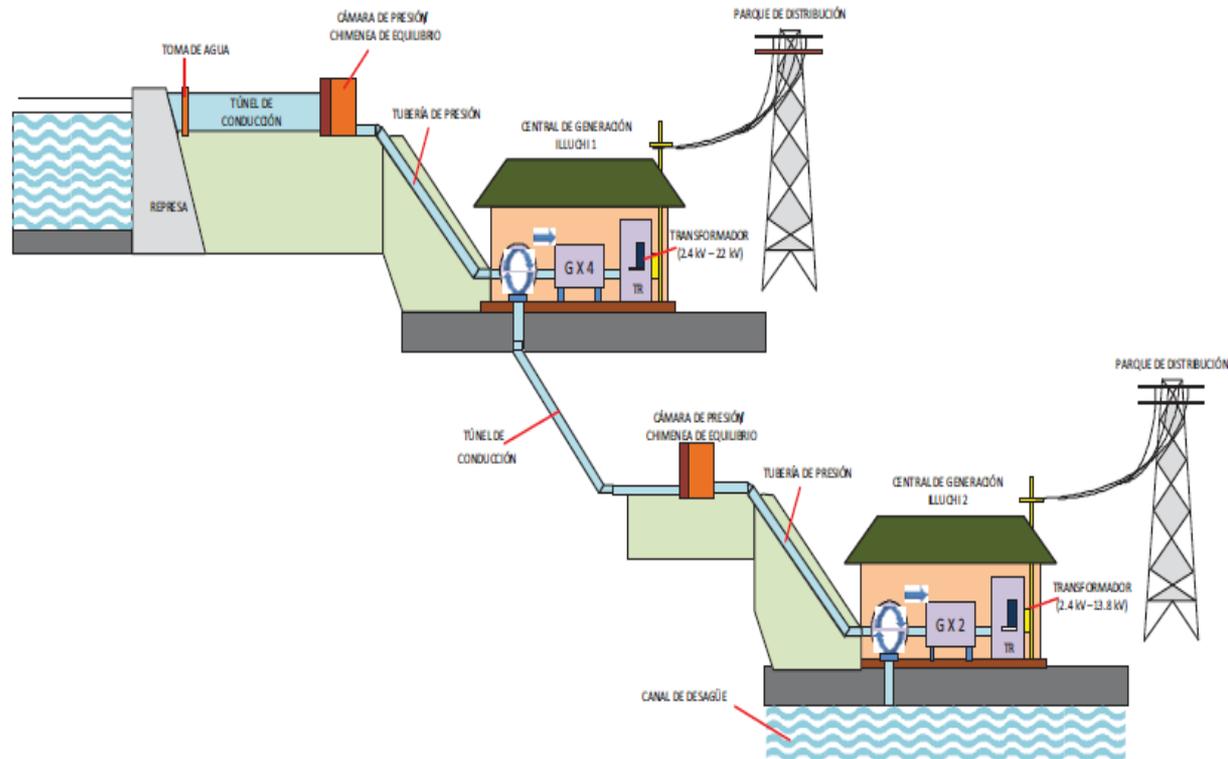
Modelos de la Hidroturbina



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Configuración de las centrales Illuchi N°1 e Illuchi N°2

La Central Illuchi N°2, es la segunda central en una configuración en cascada.



Equipos existentes de la Central Illuchi N°2.

- **Regulador de velocidad**



REGULADOR DE VELOCIDAD

Marca:	Bell Kriens - Schweiz
Tipo:	Oleo Hidráulico
Modelo:	A 100
Número de serie:	1182
Capacidad de trabajo:	1000 Nm
Tiempo de cierre mínimo:	1 sg.
Tiempo de apertura:	7 sg.
Presión del aceite:	15 kP/cm^2
Revoluciones de entrada:	1200 rpm
Calibración:	Manual

Equipos existentes de la Central Illuchi N°2.

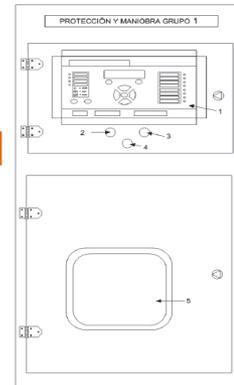
- **Excitatriz**

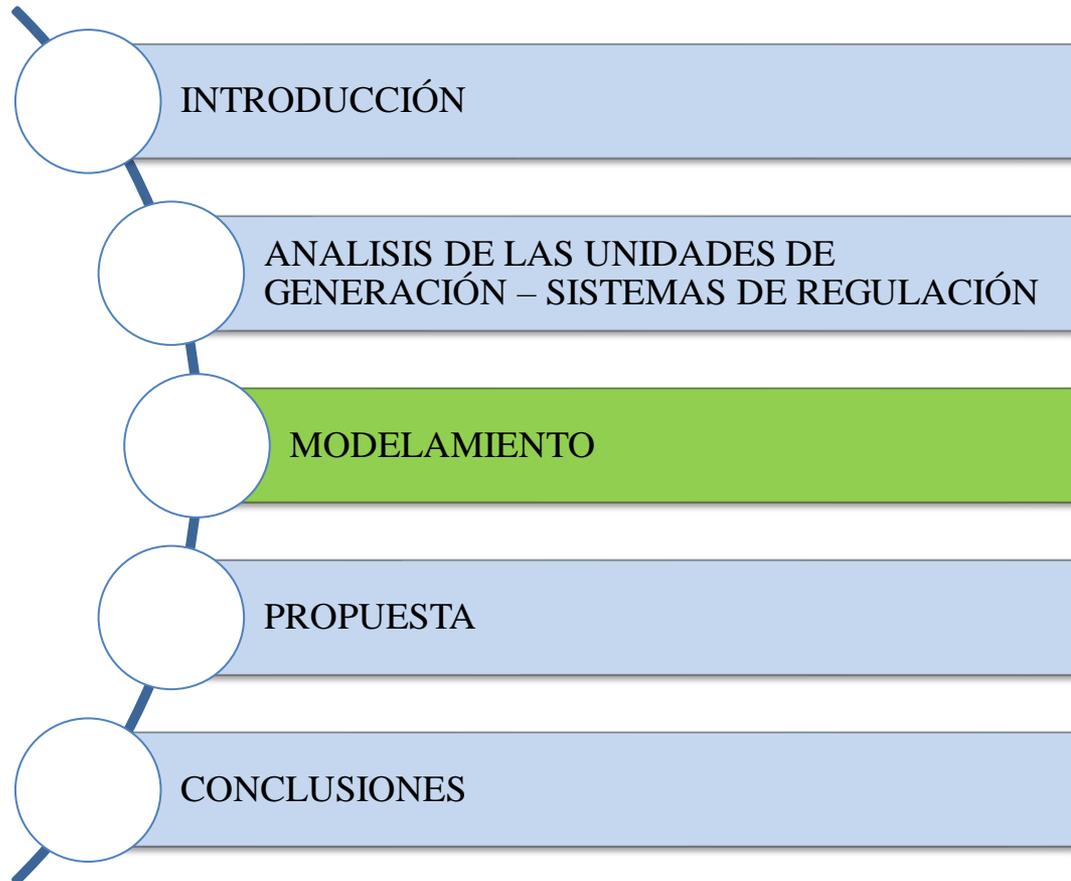


EXCITATRIZ A DIODOS ROTORICOS

Marca:	Brown Boveri
Tipo:	WFSb 5610a
Potencia:	32/45 kW
Velocidad:	720 rpm
Voltaje:	85/100 V
Corriente:	376/450 A
Voltaje de excitación	105/134 V
Corriente de excitación	11,0/14,1 A
Masa del rotor:	260 kg
Masa total:	715 kg

Análisis Técnico de la Central Illuchi N°2.





Modelamiento componentes de la unidad de generación.

- *Determinación de la Impedancia Base Z_B*

$$Z_B = \frac{(kV_B)^2}{MVA_B} \quad Z_B = \frac{(2,4kV)^2}{3,25MVA} \quad Z_B = 1,772 \Omega$$

- *Determinación de la corriente base I_B*

$$I_B = \frac{kVA_B}{\sqrt{3} * kV_B} \quad I_B = \frac{3250 kVA_B}{\sqrt{3} * 2,40kV_B} \quad I_B = 781,828 A$$

Modelamiento componentes de la unidad de generación.

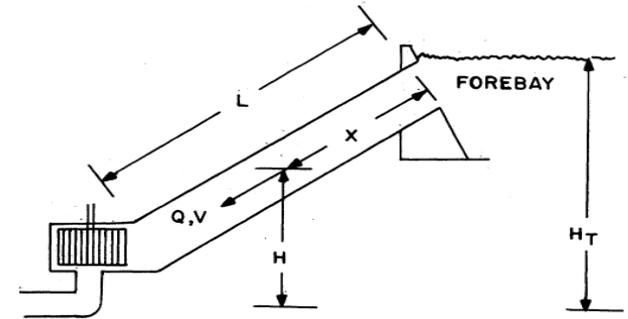
- Determinación de la constante de tiempo del agua T_w

$$T_w = \frac{L * U_r}{a_g * H_r}$$

$$U_r = \frac{\text{caudal de agua}}{\text{área de la tubería}}$$

$$U_r = \frac{0,95 \text{ m}^3 / \text{sg}}{0,267 \text{ m}^2}$$

$$U_r = 3,55 \text{ m} / \text{sg}$$



$$T_w = \frac{L * U_r}{a_g * H_r}$$

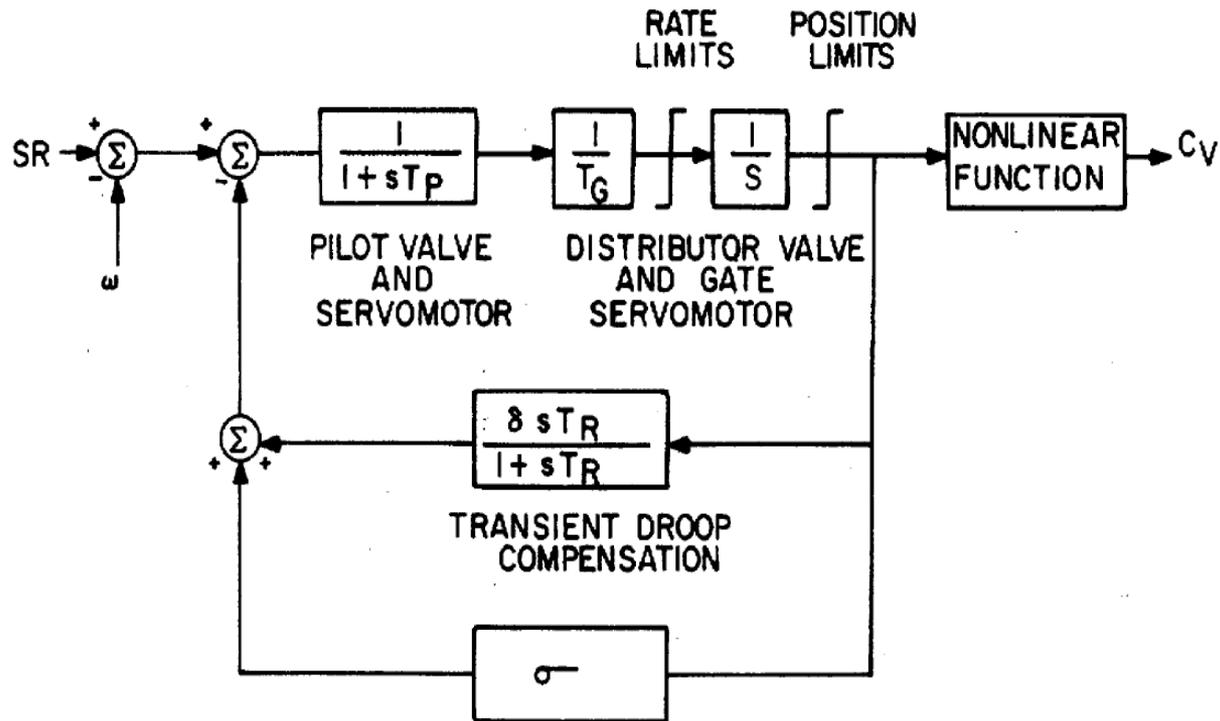
$$T_w = \frac{1800 * 3,55}{9,81 * 356}$$

$$T_w = 1,8297 \text{ sg.}$$

Modelamiento componentes de la unidad de generación.

- Modelamiento del regulador de velocidad mecánico-hidráulico

Hydraulic Turbine and Control Models for System Dynamic Studies



Modelo aproximado no lineal para sistemas de regulación de velocidad mecánico hidráulico

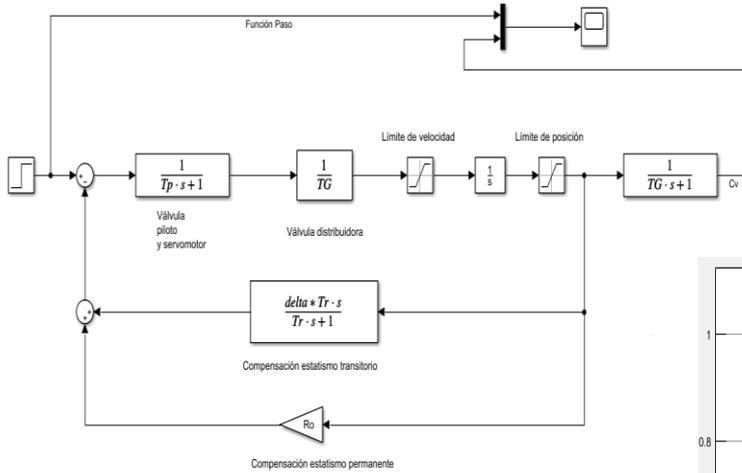
Modelamiento componentes de la unidad de generación.

Parámetros para el modelo

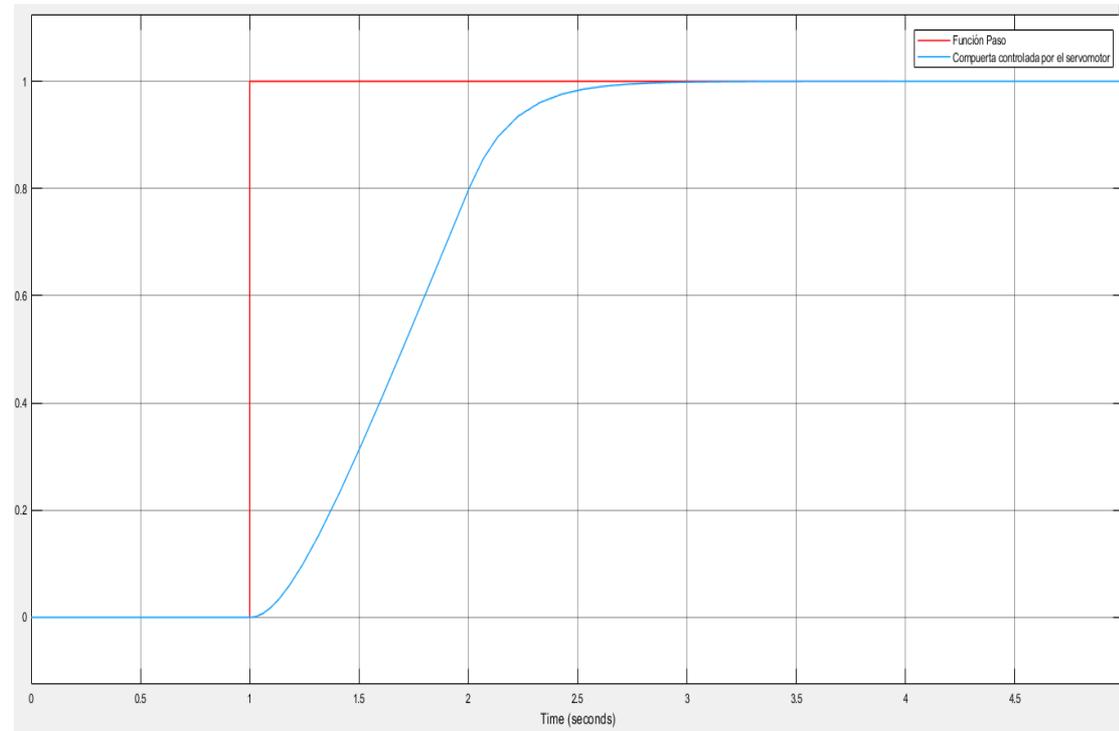
Parámetro	Símbolo	Valor Típico	Rango
Constante de tiempo de amortiguamiento [sg]	T_R	$5 * T_W$	2,5 – 25,0
Tiempo de respuesta del regulador o inverso de la ganancia de lazo abierto del governor	T_G	0,2	0,2 – 0,4
Constante de tiempo de la válvula piloto y del servomotor [sg]	T_P	0,04	0,03 – 0,05
Coefficiente de caída de velocidad transitoria	δ	$0,3$ $2,5 * T_W / 2H$	0,2 – 1,0
Caída de velocidad permanente [p.u]	R	0,05	0,03 – 0,06
Posición efectiva de válvula o compuerta controlada por el governor	C_V	----	-----
Velocidad	ω	----	----
Velocidad de referencia	SR	----	----

Modelamiento componentes de la unidad de generación.

- Implementación del modelo de regulador de velocidad en Simulink

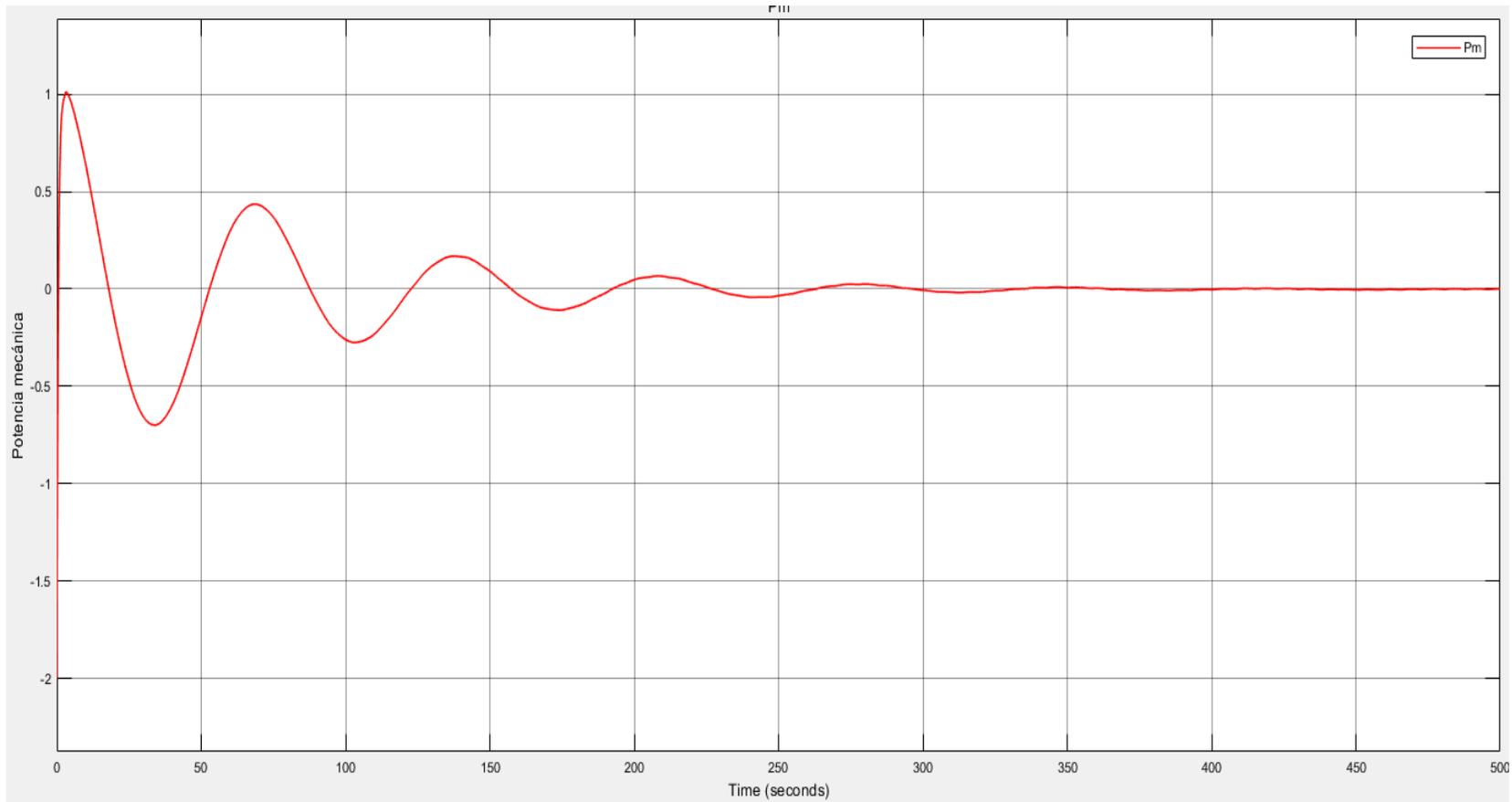


Respuesta del modelo de regulador de velocidad



Modelamiento componentes de la unidad de generación.

Respuesta del modelo de regulador de velocidad actual



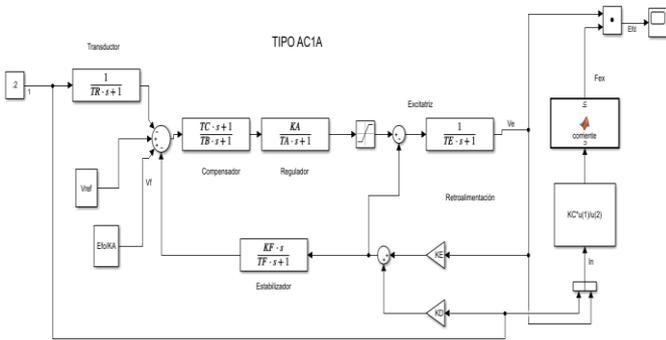
Modelamiento componentes de la unidad de generación.

Parámetros para el modelo ACIA

Parámetro	Símbolo	Valor Típico
Ganancia del amplificador	K_A	400.0
Cte. de tiempo del amplificador	T_A	0,02 s
Ganancia del estabilizador	K_F	0,03 s
Cte. del excitador relacionado con el campo auto excitado	K_E	1,0 s
Cte. de tiempo del estabilizador	T_F	1,0 s
Cte. de tiempo del circuito de campo	T_E	0,8 s
Cte. de tiempo del regulador	T_B	0 s
Cte. de tiempo del regulador	T_C	0 s
Voltaje del compensador de carga	V_C	-----
Voltaje del estabilizador de potencia	V_S	----
Voltaje del estabilizador del sistema de excitación	V_F	----
Voltaje de referencia del regulador	V_{REF}	----
Voltaje del regulador máximo y mínimo	$V_{RMAX,RMIN}$	-----

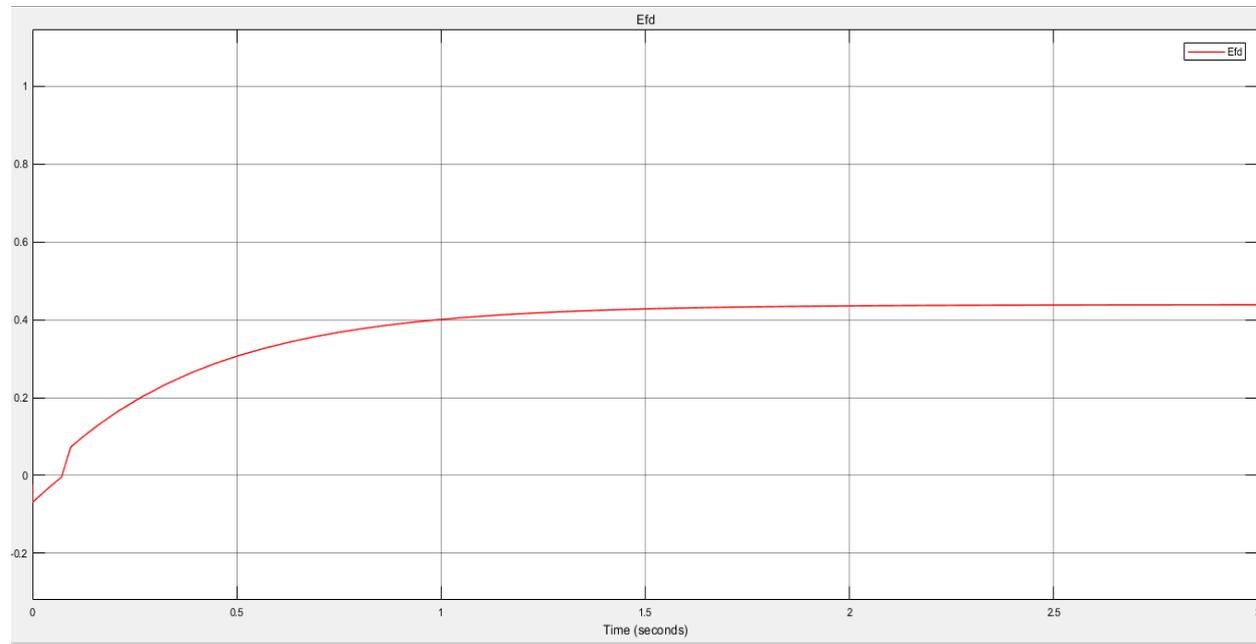
Modelamiento componentes de la unidad de generación.

- Implementación del modelo de regulador de voltaje en Simulink



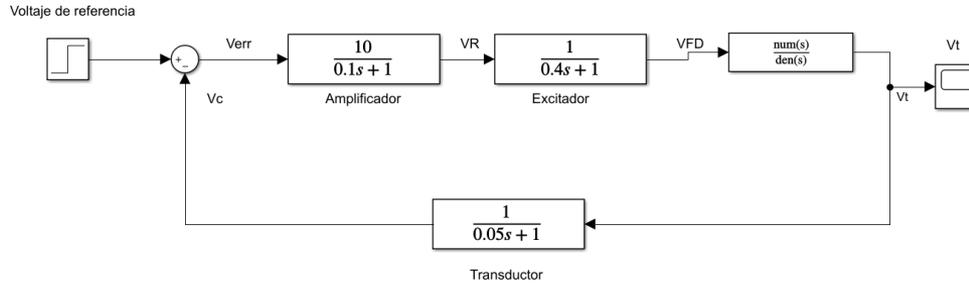
Voltaje de campo

Respuesta del modelo de regulador de voltaje

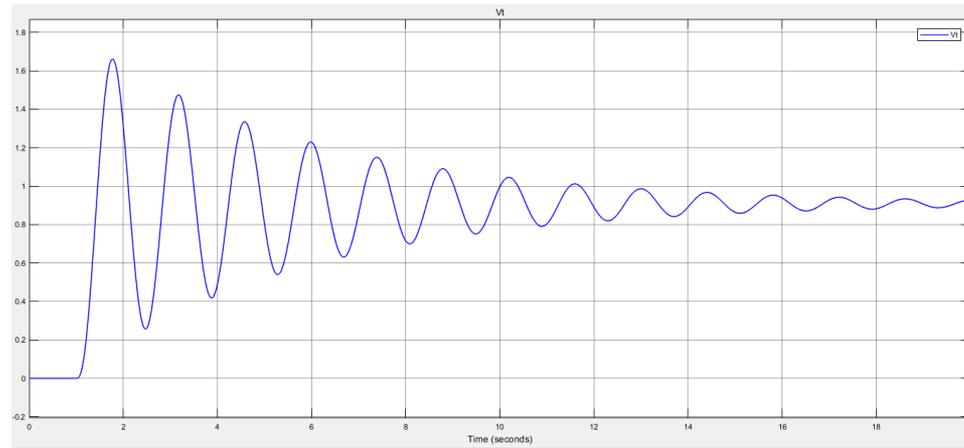


Modelamiento componentes de la unidad de generación.

- Implementación del modelo de regulador de voltaje en DC1A



Voltaje de campo

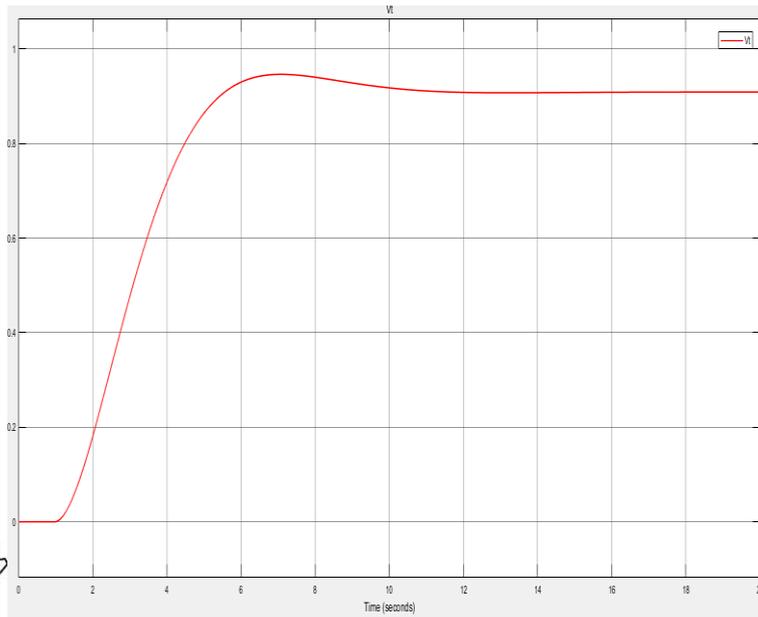
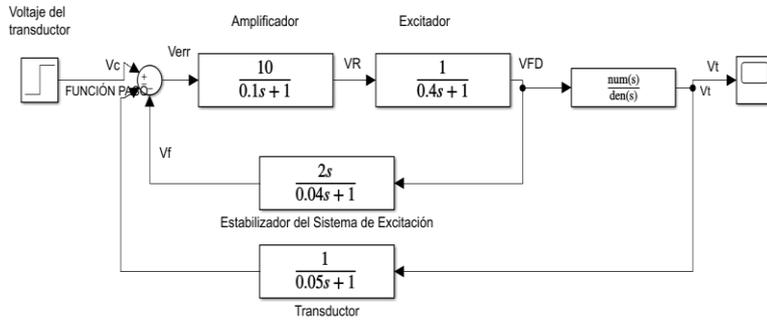


Modelamiento componentes de la unidad de generación.

- Implementación del modelo de regulador de voltaje con tipo

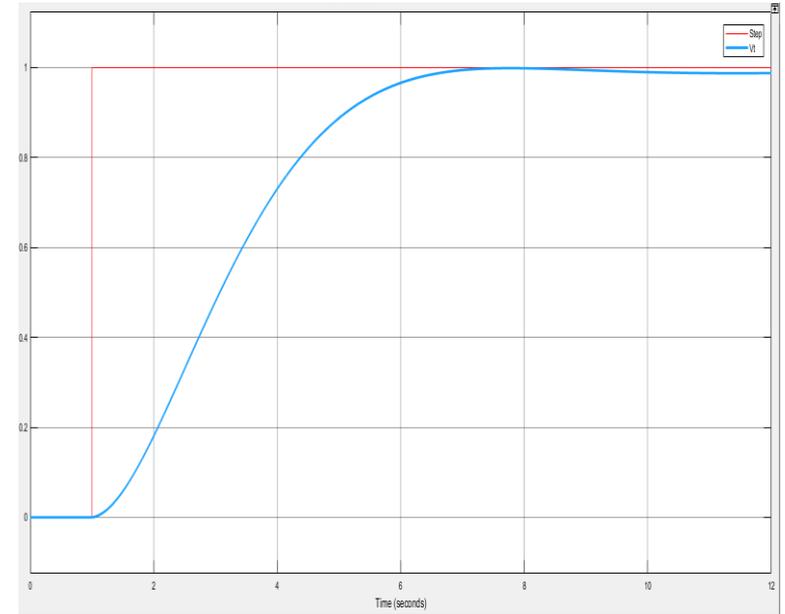
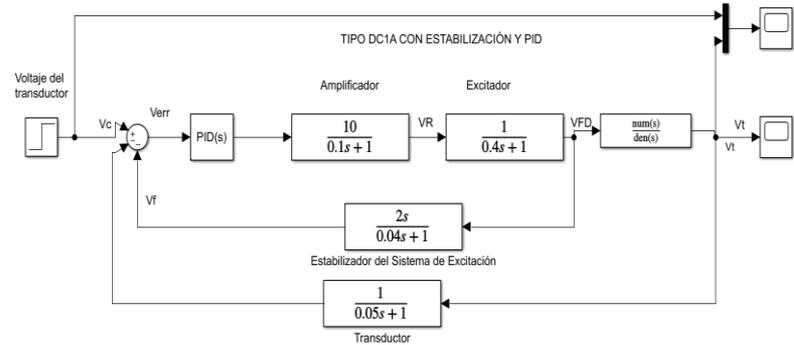
DCIA con estabilizador

TIPO DC1A CON ESTABILIZACIÓN



- Implementación del modelo de regulador de voltaje con tipo DCIA con estabilizador y PID

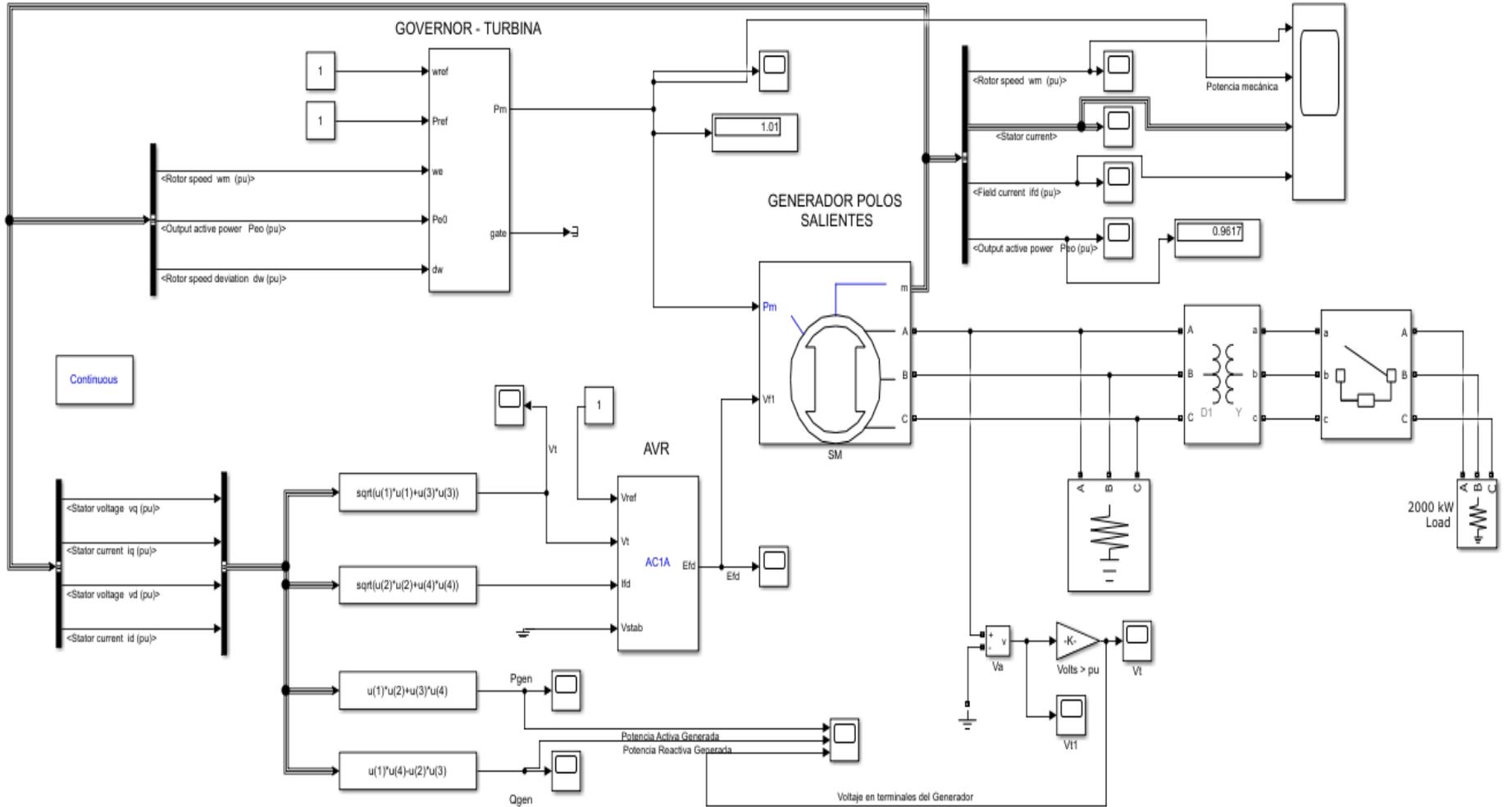
TIPO DC1A CON ESTABILIZACIÓN Y PID



Voltaje de campo

Modelamiento de la unidad de generación.

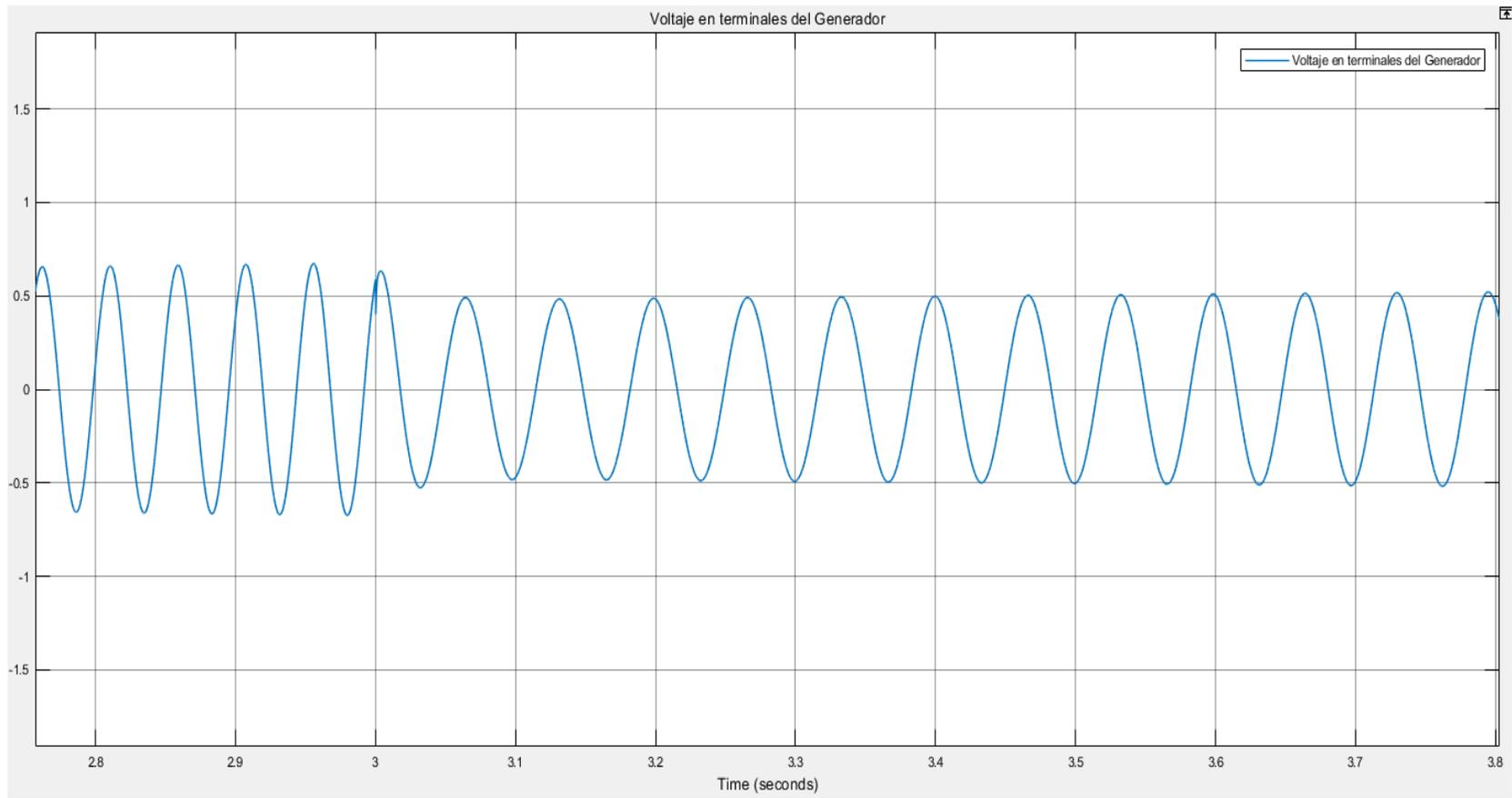
- Modelamiento de la unidad de generación con perturbación



Modelamiento de la unidad de generación.

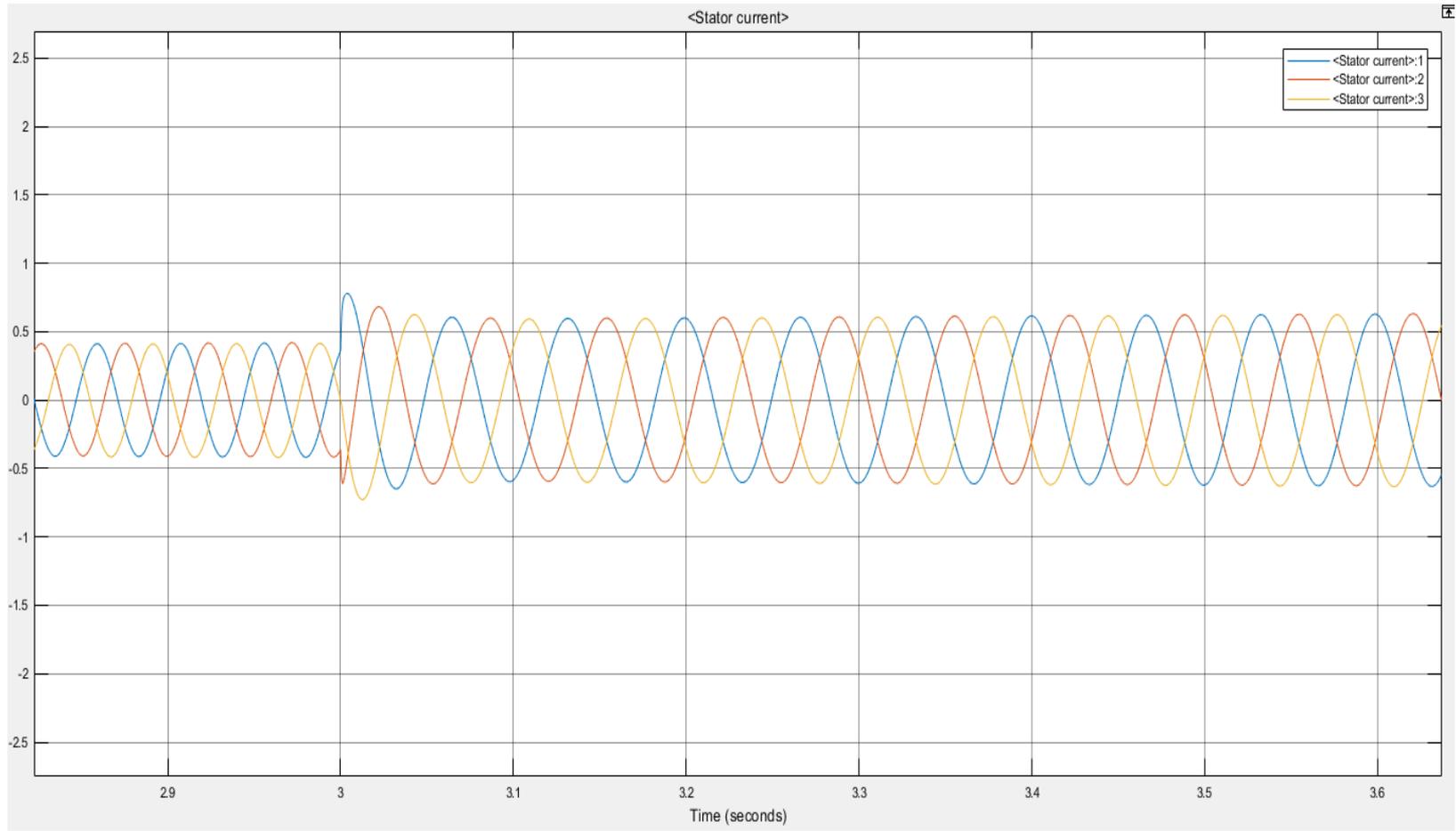
Respuesta del modelo, Voltaje en bornes del generador

Se incrementa una carga de 2MW, a partir de los 3sg de transcurrido la simulación



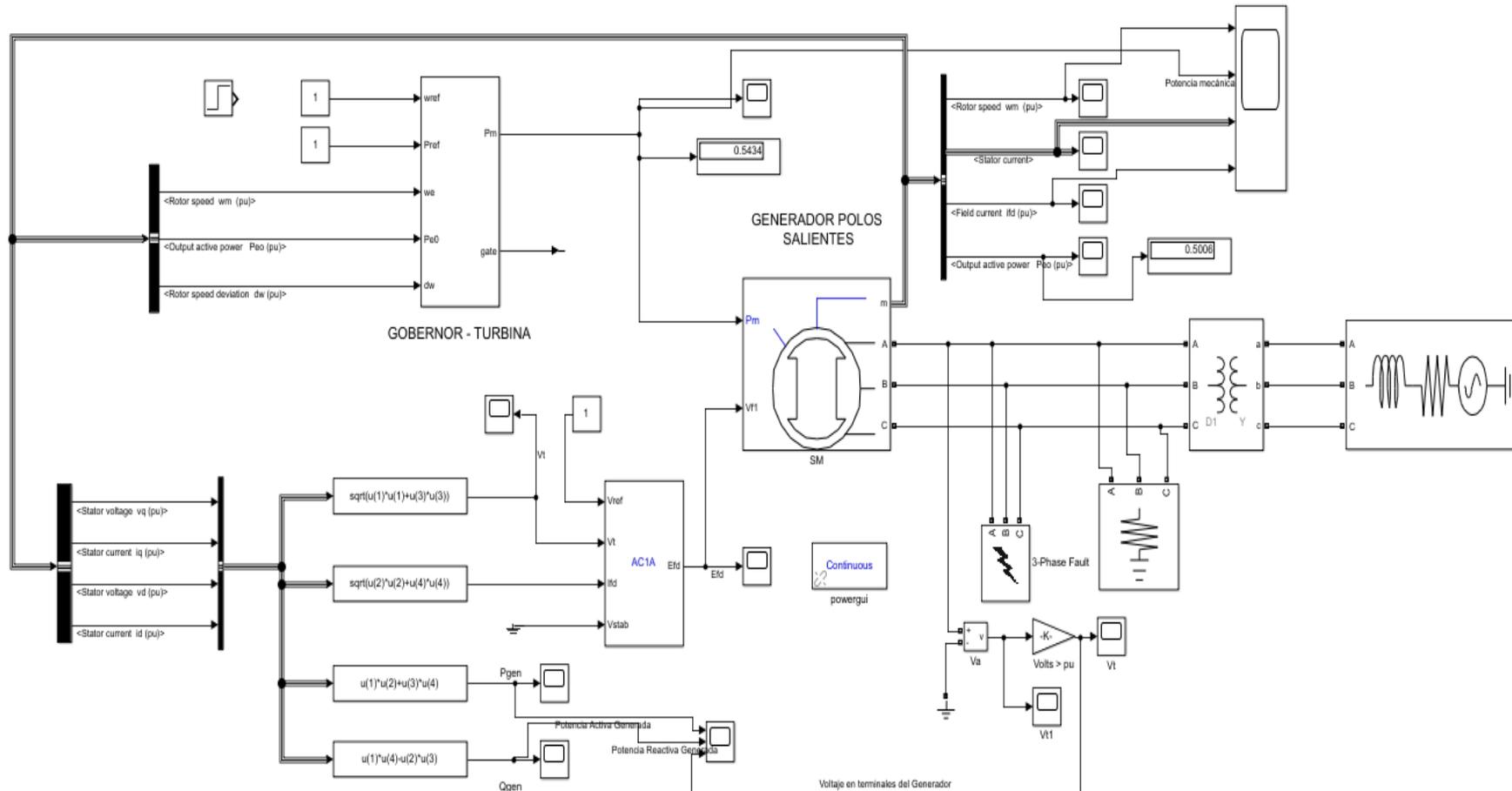
Modelamiento de la unidad de generación.

Respuesta del modelo. Corrientes del estator



Modelamiento de la unidad de generación.

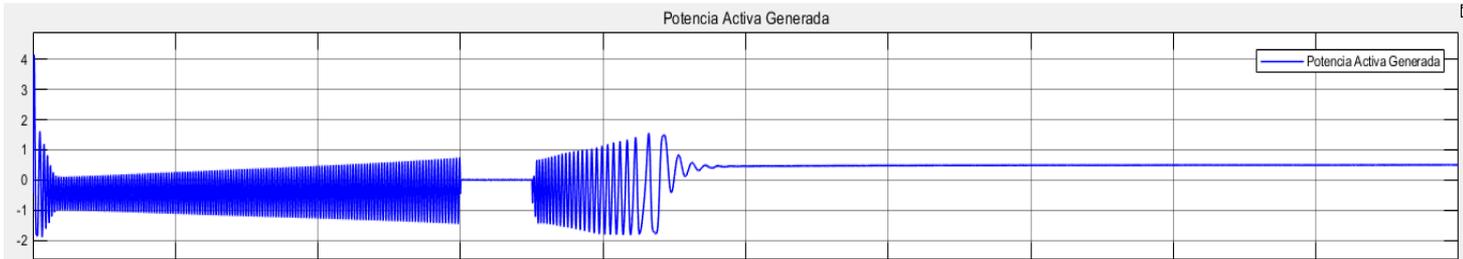
- Modelamiento de la unidad de generación con una falla



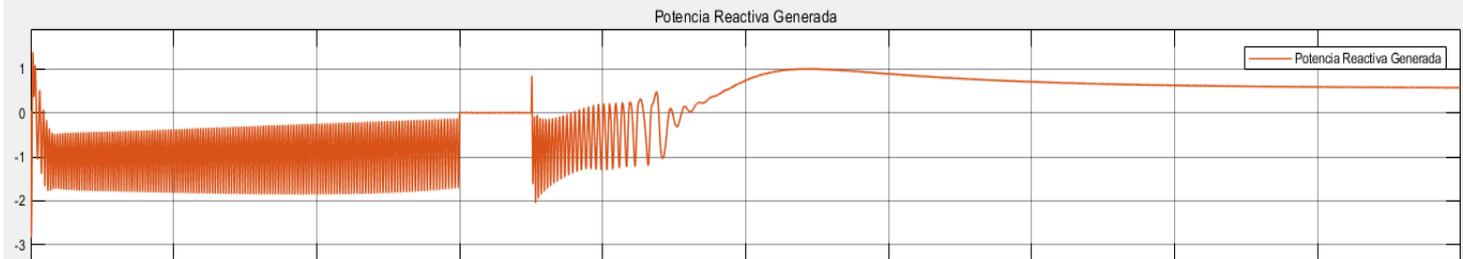
Modelamiento de la unidad de generación.

Respuesta de la unidad de generación, trifásica en $t=3s$ hasta $t=3.5s$ durante una simulación de 10sg

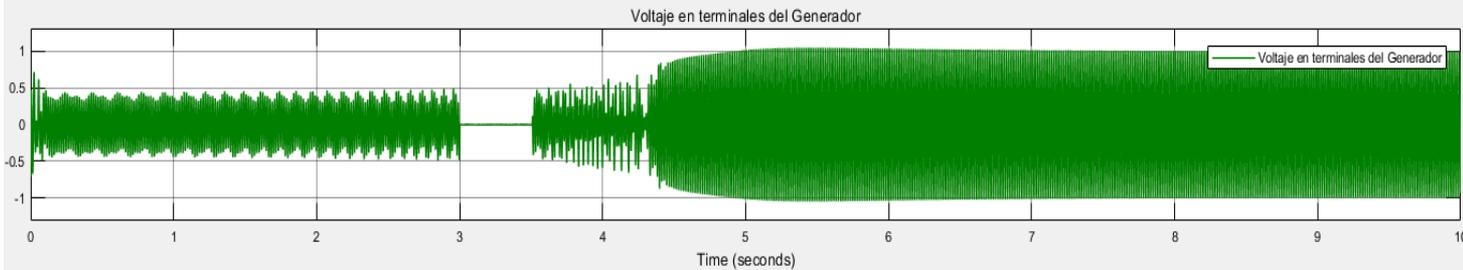
Potencia activa generada



Potencia reactiva generada

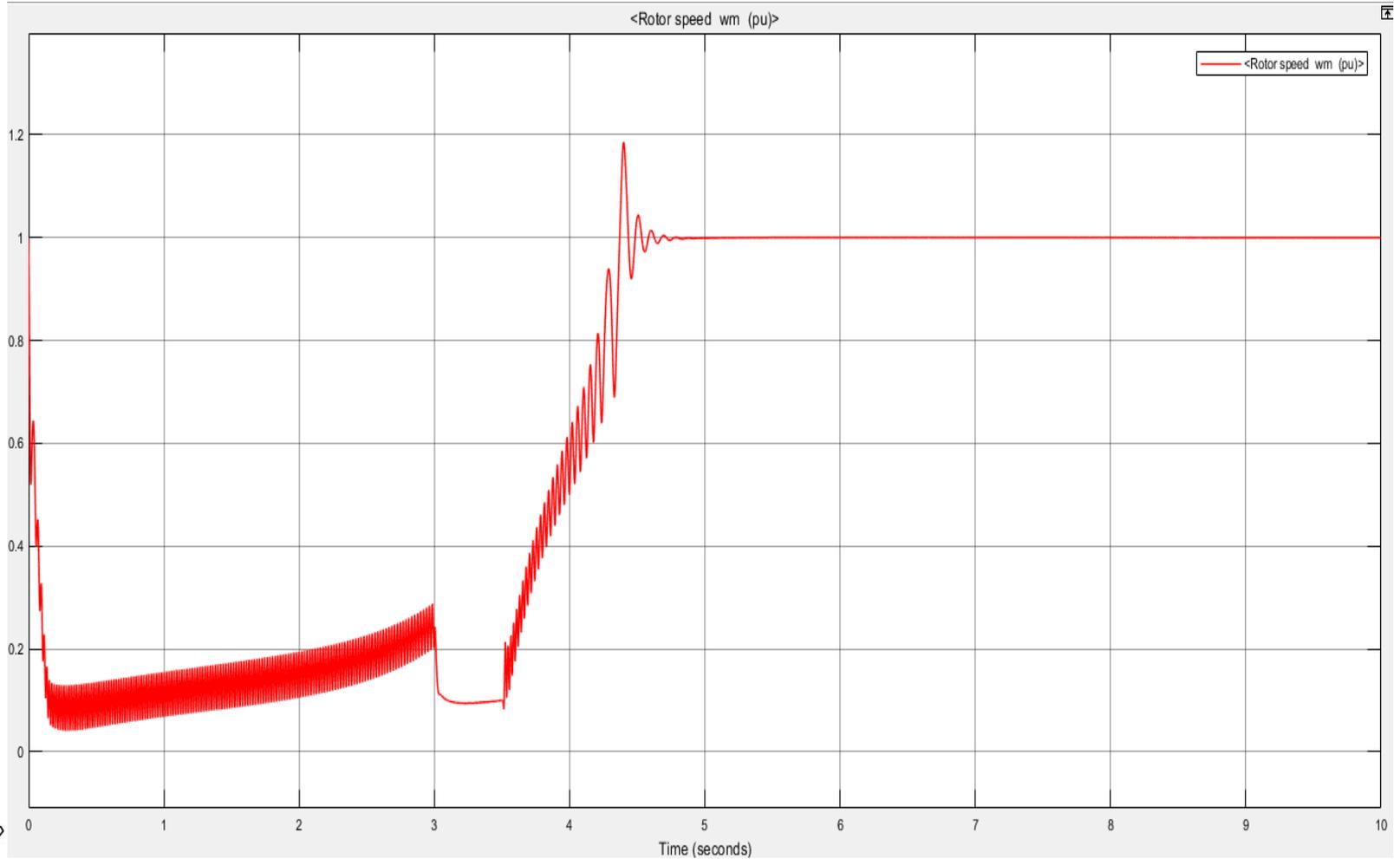


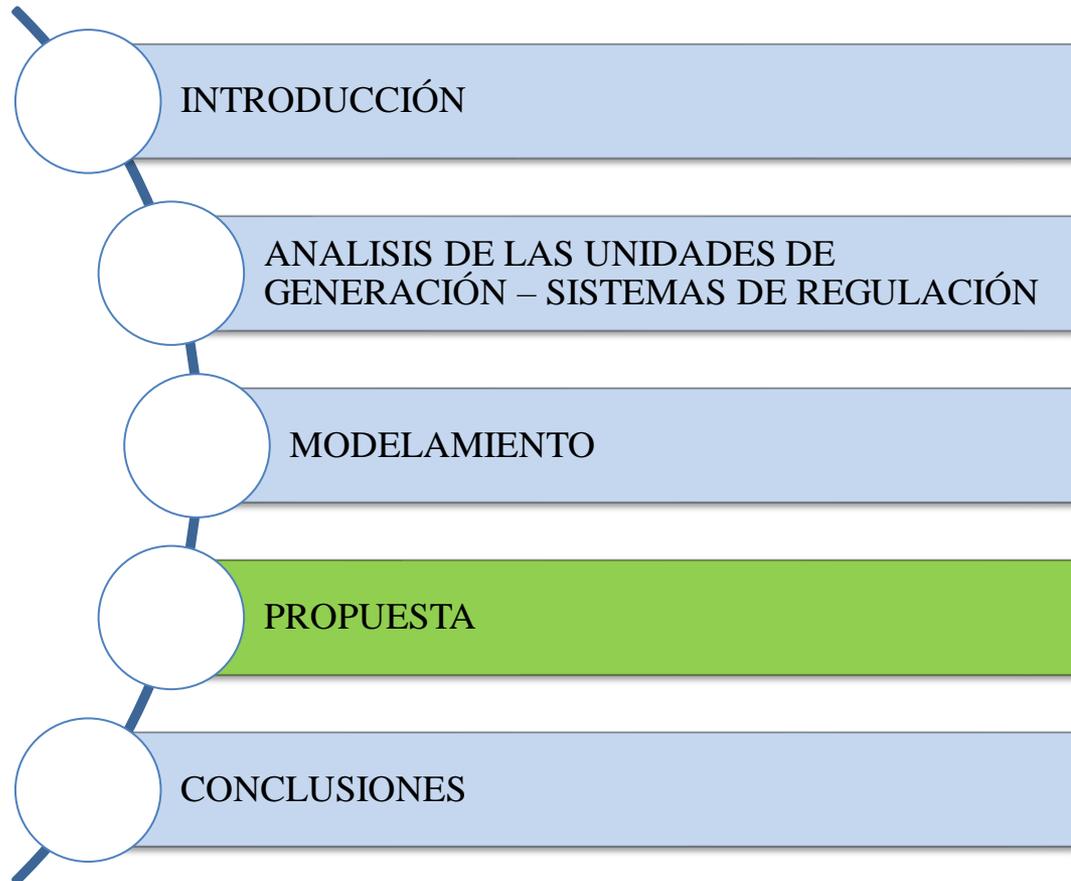
Voltaje en los bornes del generador



Modelamiento de la unidad de generación.

Respuesta del modelo. Velocidad del rotor





Propuesta

Objetivo General

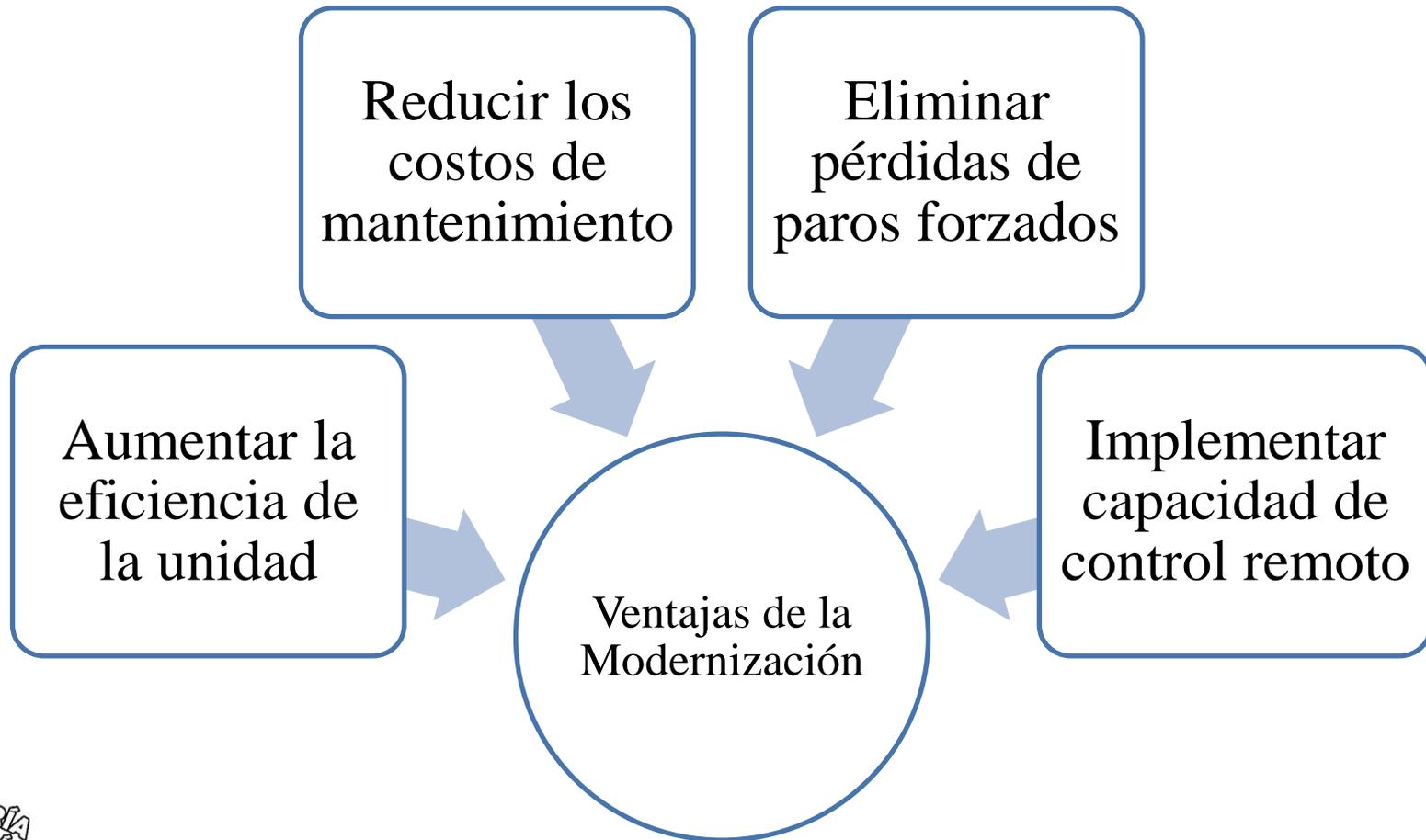
Determinar los parámetros necesarios de los reguladores de velocidad y voltaje para la implementación de un sistema automático en Central Illuchi N°2 de la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi S.A

Objetivos Específicos

- Modelar mediante el software Matlab/Simulink los tiempos de respuesta de los sistemas de regulación.
- Definir las especificaciones técnicas de los equipos a implementarse.
- Elaborar un presupuesto referencial para la implementación del sistema automático.



Ventajas de la Propuesta



Actividades de la Propuesta



Retiro de equipo obsoleto



Suministro de nuevos equipos, para los reguladores de velocidad y voltaje



Suministro de Unidades de Potencia Hidráulica (HPU)



Montaje de nuevos equipos, pruebas de funcionamiento y puesta en operación

Requisitos técnicos de los Sistemas de Regulación

Regulador de Voltaje AVR

Regulación de voltaje:	+/- 0.25% entre vacío y plena carga
Control automático de voltaje:	70% al 110% del valor nominal de voltaje en los bornes del generador
Ajuste de estatismo:	-30% a + 30% a factor nominal y carga nominal.
Fuente de poder dual:	120/130 VDC
Fuente de respaldo en AC :	110 VAC
Protocolo de comunicación:	<ul style="list-style-type: none">• RS232 comunicación a PC• Modbus RS-485 u otra aplicación SCADA
Modo de operación adicional:	<ul style="list-style-type: none">• Modo VAR/FP
Especificaciones generales:	<ul style="list-style-type: none">• Nivelación de voltaje (voltaje matching)• Limitador de baja excitación• Limitador de sobre excitación
Funciones de protección:	<ul style="list-style-type: none">• Sobrevoltaje del generador• Mínimo voltaje del generador• Sobrevoltaje de campo• Sobrecorriente de campo• Relé vigilante por falla de la fuente de poder• Transferencia a modo FCR manual por pérdida de censado• Perdida de excitación.

Requisitos técnicos de los Sistemas de Regulación

Regulador de Velocidad Digital

Características mínimas del CPU del PLC	<ul style="list-style-type: none">• Mínimo de 10 SLOT'S o puertos de comunicación• Manejo de al menos 800 canales de entradas y salida digitales• 200 canales de entradas y salidas analógicas• Interfaces seriales RS232/RS485, con protocolos Modbus y DNP, mínimo. 32
Entradas digitales:	<ul style="list-style-type: none">• Aislamiento de 2500V,• Cada canal deberá aceptar voltaje de 24VDC, 48VDC, 125VDC, 120 VAC o 230VAC
Salidas digitales:	<ul style="list-style-type: none">• 32• Aislamiento de 2500V• Por medio de relés contactos secos NA, NC de capacidad 5A a 125 VDC o mayor.• 8
Entradas analógicas:	<ul style="list-style-type: none">• De tipo diferenciales, capaces de aceptar señales de 0-20mA ó 4-20 mA• Resolución mínima 16 bits.• 8
Salidas analógicas:	<ul style="list-style-type: none">• Capaces de proveer 0 -20 mA ó 4 – 20mA• Resolución mínima de 15 bits + signo

Continúa



Requisitos técnicos de los Sistemas de Regulación

Regulador de Velocidad Digital

Medición de velocidad:	2 entradas (una proveniente de pickup de velocidad y la otra de un transductor de TP)
Fuente de alimentación:	<ul style="list-style-type: none">• 2 fuentes de alimentación de entrada universal• 110 VAC a 240 VAC• 100VDC A 250 VDC• Visualizar el proceso de control
HMI	<ul style="list-style-type: none">• Variables de operación• Alarmas y disparos
Software de programación de PLC	Sistema operativo de Microsoft Windows 10 Profesional
Puertos de comunicación	<ul style="list-style-type: none">• 1 puerto RS232 o RS485 a través del protocolo Modbus -esclavo• 1 puerto ETHERNET comunicación a través del protocolo Modbus TCP, UDP y otros.

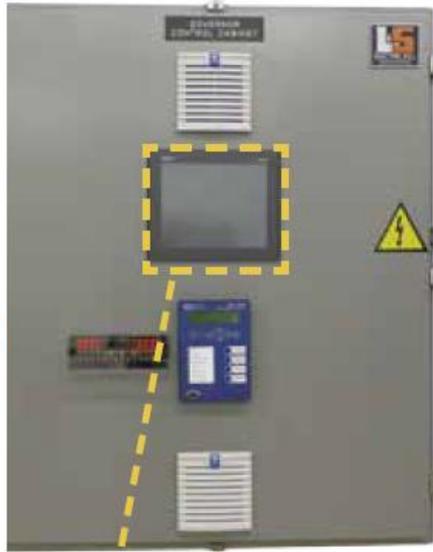
Características principales del Sistema de Regulación de Velocidad

Los valores de las ganancias PID y el estatismo para cada modo de control deberán ser ajustables dentro de los siguientes rangos mínimos:

- Estatismo 0 – 10%
- Ganancia Proporcional 0 – 20
- Ganancia Integral 0 – 9.9999 1/s
- Ganancia Derivativa 0 – 9.9999 seg

Análisis de elementos principales de la propuesta

MRT2.1 M340 Digital Governor



Características Generales de Desempeño

Tiempo de ejecución de los lazos de control críticos	$< 10 \text{ ms}$
Rango de caída permanente	$0 - 10 \%$
Rango de ganancia proporcional	$0 - 20$
Rango de ganancia integral	$0 - 9.999 \text{ 1/s}$
Rango de ganancia derivativa	$0 - 0.999 \text{ s}$
Banda muerta de velocidad	$< 0.02\%$
Tiempo muerto	$< 0.2 \text{ s}$
Índice de estabilidad de velocidad	$< 0.1\% @ 5\% \text{ droop}$
Índice de estabilidad de potencia	$< 0.4\% @ 5\% \text{ droop}$

Análisis de elementos principales de la propuesta

AES: Advance Excitation System



Características Generales de LS-AES-VR-ECO

Corriente nominal	50A
Voltaje	480 VAC
Temperatura	40C
Control	<i>full wave, 6 SCR</i>
Controlador CPU	1 GHz
Entradas digitales	16
Salidas digitales	16
Entradas analógicas +/-10VC	4
Salidas analógicas +/- 10VDC	1
Salidas analógicas 4-20mA	8

Análisis de elementos principales de la propuesta

HPU N-Series



Modelos típicos de HPU

Tamaño de depósito	35,70, o 130 galones
Módulos de bomba	2,3,5,7.5 o 10HP
Voltajes del motor	208 /230 /460 VAC @60 Hz
Control	full wave, 6 SCR
Rango de funcionamiento de presión	Nominal = 0 – 2200 PSIG Máxima = 3000 PSIG

Análisis de elementos principales de la propuesta

Speed Signal Generator



Especificaciones SSG

Señal de salida:	60 ciclos por revolución, onda cuadrada, 24V CC
Caja de conexiones:	NEMA 12
Peso:	57 libras,(sin brida de montaje)

Presupuesto referencial

De modo general, se obtuvo un costo referencial para la automatización de la central, los precios fueron tomados de implementaciones similares en otras centrales.



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Presupuesto referencial

Item	Cant	Descripción	V. Unitario	Valor Total
1	2	Regulador de velocidad digital incluye HPU y adaptaciones mecánicas para la implementación del Sistema	315.974,25	\$631.948,50
2	2	Regulador automático de voltaje - AVR	27.821,25	\$55.642,50
3	2	Sistema de Control Basado en PLCs (Software, Hardware y Tablero)	48.626,68	\$97.253,36
4	1	Sistema de Control para Tanque de Carga - Incluye control e Instrumentación	75.486,40	\$75.486,40
5	1	Software de Programación de PLCs y HMI Sistema SCADA (software y hardware)	2.910,16	\$2.910,16
6	1	Sistema SCADA (Software y Hardware)	26.740,00	\$26.740,00
7	2	Instrumentación de la Unidad de Generación	37.522,81	\$75.045,62
8	1	Tablero de Distribución y Servicios de Estación	19.105,55	\$19.105,55
9	1	Montaje y puesta en servicio (Incluye integración, pruebas, configuración, entrenamiento, operación asistida, documentación)	46.390,00	\$46.390,00
			TOTAL sin IVA	\$1.030.522,09

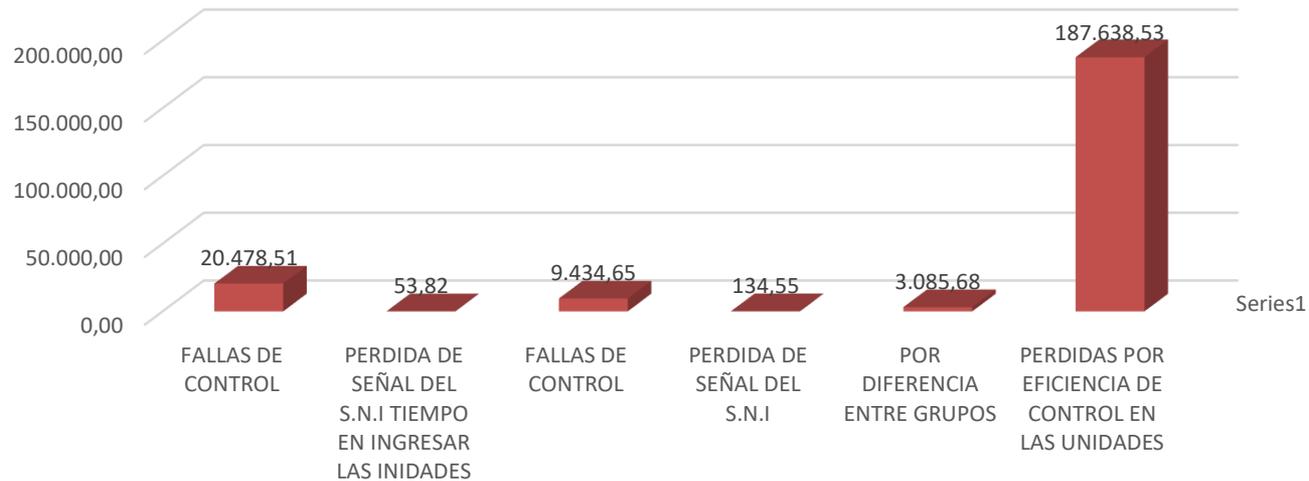


ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Análisis económico

PERDIDA ASUMIDA (USD)

2019-2020



TOTAL PERDIDA ASUMIDA (USD) 220.825,73

PERDIDA ANUAL ESTIMADA (USD) 110.412,87



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Análisis económico

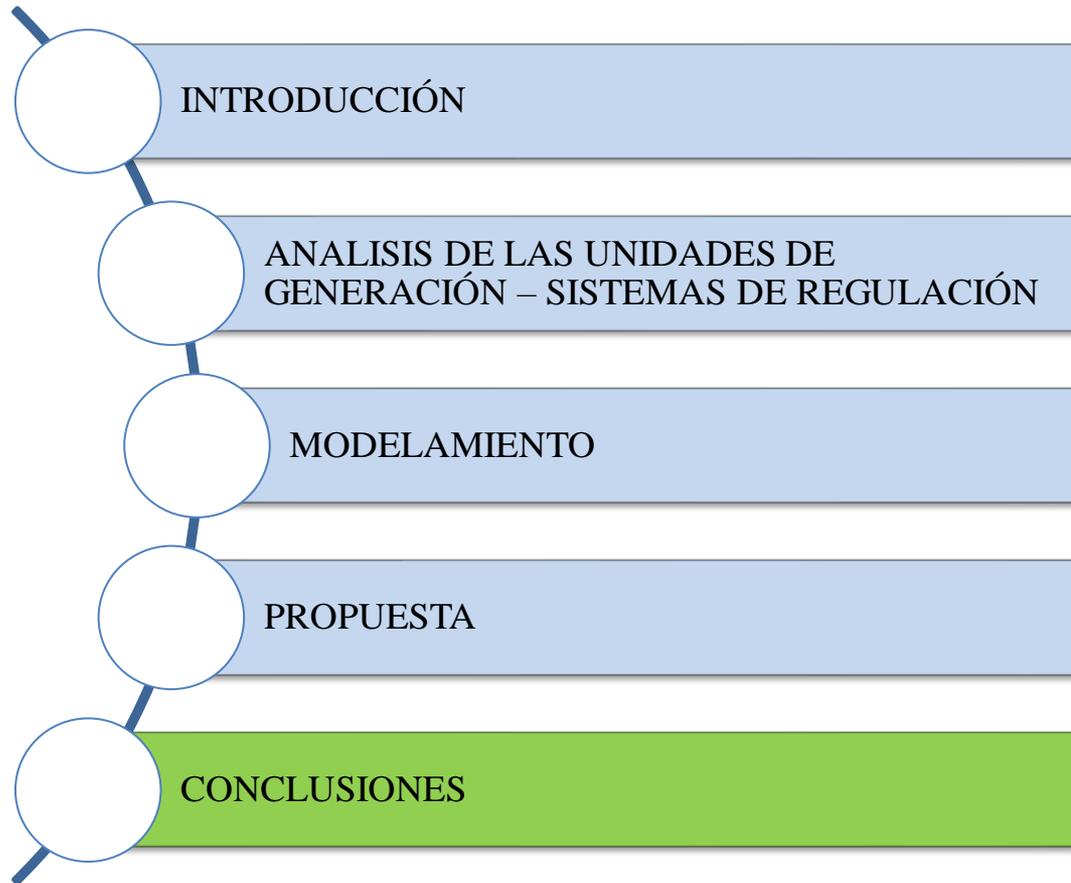
	Recaudación anual	
	<i>kW/h</i>	USD
Energía no generada anual	3'692.738	\$110.412,86
Incremento de energía (5% producción anual)	1'301.800	\$38.923,22
TOTAL RECAUDO ANUAL		\$149.336,08

Producción anual: 26.036,50 MW/h

El tiempo estimado para cubrir la inversión es de 6 años y 11 meses con cuotas de \$149.336,08 anuales, considerando un costo de 0,0299 kW/h según el Informe Técnico Económico de Análisis y Determinación del Costo del Servicio Público de Energía Eléctrica 2020.



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



Conclusiones

- Se realizó un estudio técnico de un sistemas de regulación y voltaje para cada unidad de la Central Illuchi N°2 encontrándose en estado operativo pese a sobrepasar los 30 años de haber ingresado en operación, la regulación de velocidad de las turbinas responde al control manual y experiencia de los operadores respecto al control de voltaje la unidad se encuentra controlada por una excitatriz de diodos rotativos sin escobillas que ayuda a mantener el voltaje de generación dentro de los valores establecidos por los operadores por ello la optimización más adecuada es el mejoramiento de unidades con la automatización
- Mediante el modelamiento de los sistemas se conoció el funcionamiento ante una pequeña perturbación simulada por la función escalón unitario como modelo de ingreso del caudal hacia el inyector de la turbina, al modelo no lineal de un mecanismo de control de velocidad para turbinas hidráulicas de la IIEEE, uno de los parámetros para la ejecución de este modelo es la determinación de la constante del agua.



Conclusiones

- El modelo del regulador de voltaje que se implementó en Simulink, se encuentra en la norma IEEE Std 421.5 -2005 del tipo de corriente alterna AC1A para simular el funcionamiento de la excitatriz encargada de enviar el voltaje necesario al devanado de campo del generador, la señal de respuesta que se apreció en la gráfica se puede evidenciar la pronta estabilización que ejecuta el regulador de voltaje, más aún al modelar con la implementación del control PID en donde se aprecia un control más óptimo.
- Se definió ciertas características principales de los equipos para cumplir la modernización de los sistemas de regulación y voltaje como es el caso del MRT2.1 Speed Governor System y el LS-ECO teniendo así una velocidad de respuesta menor o igual a los 10ms y 6 SCR para el control de onda completa respectivamente, cumpliendo así los estándares de la IEEE -125 y IEEE-421.1 para su implementación y optima operación.



Conclusiones

- La modernización ayudará al monitoreo de señales que permitan evitar paros forzosos, daños en la unidad y por ende la capacidad del control remoto, de esta manera prolongar la vida útil de las unidades de generación, además, el indicador de disponibilidad de las unidades de generación de la Central Illuchi N°2 incrementaría, por ende, la confiabilidad de las unidades será mayor en comparación con datos actuales.
- La implementación económicamente hablando es factible, sin embargo, existe un porcentaje de riesgo al no conocer con detalle el flujo de caja y los posibles egresos no pronosticados lo que puede causar una variante en la cuota anual para cubrir la inversión



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Recomendaciones

- Conocer a detalle los activos y pasivos que componen toda la empresa, de esta manera ayudará a evaluar otras alternativas de acuerdo a las posibilidades de la empresa.
- Se recomienda revisar las actualizaciones de los estándares de la IEEE para aplicar nuevas soluciones factibles dentro del área de conocimiento en la que se encuentra inmerso.
- Al momento de seleccionar además de los parámetros ya expuestos por recomendación de ELEPCO S.A. los sistemas automáticos deben adaptarse al protocolo IEC60870-5-104 para su mejor adaptación al SCADA existente

*Por su atención,
muchas gracias.*

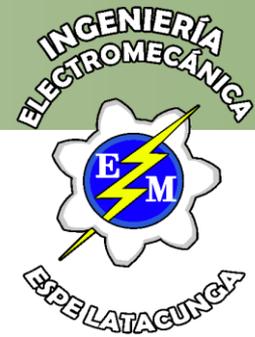


ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA

TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN ELECTROMECAÁNICA

MODELAMIENTO Y ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA
IMPLEMENTAR UN SISTEMA AUTOMÁTICO DE REGULACIÓN
DE VELOCIDAD Y VOLTAJE EN LOS GRUPOS DE GENERACIÓN
DE 3,25MVA DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA ILLUCHI N°2
DE LA EMPRESA ELÉCTRICA PROVINCIAL COTOPAXI S.A.

AUTOR: ESCOLA FREIRE, ÁNGEL XAVIER

ING. FREIRE LLERENA, WASHINGTON RODRIGO

2021

