



Modelamiento y Estudio de Factibilidad para Implementar un Sistema Automático de Regulación de Velocidad y Voltaje en los Grupos de Generación de 3,25 MVA de la Central Hidroeléctrica Illuchi N°2 de la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi S.A.

Escola Freire, Ángel Xavier

Departamento de Eléctrica y Electrónica

Carrera de Ingeniería en Electromecánica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Electromecánica

Ing. Freire Llerena, Washington Rodrigo

18 de marzo del 2021



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "Modelamiento y Estudio de Factibilidad para Implementar un Sistema Automático de Regulación de Velocidad y Voltaje en los Grupos de Generación de 3,25 MVA de la Central Hidroeléctrica Illuchi N°2 de la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi S.A." fue realizado por el señor Escola Freire, Ángel Xavier el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Latacunga, 18 de marzo del 2021

Ing. Freire Llerena, Washington Rodrigo

C.C.: 1801910884

Reporte de verificación urkund

Original

Document Information

Analyzed document T1_ANGEL_ESCOLA.docx (D98667568)
 Submitted 3/17/2021 5:23:00 PM
 Submitted by
 Submitter email axescola@espe.edu.ec
 Similarity 8%
 Analysis address wrfreire.espe@analysis.urkund.com



Sources included in the report

W	URL: https://docplayer.es/51362775-Universidad-de-cuenca.html Fetched: 11/11/2019 1:17:37 AM	9
SA	G_Delgado.docx Document G_Delgado.docx (D87112359)	2
SA	14156-García Vargas, Arturo_.pdf Document 14156-García Vargas, Arturo_.pdf (D56457128)	6
W	URL: http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/12858/1/An%C3%A1lisis%20de%20los%20generadores%20de%20energ%C3%ADa%20en%20la%20zona%20de%20la%20sierra%20de%20Cuenca.pdf Fetched: 11/19/2020 7:15:24 AM	1
SA	curvas capacidad.docx Document curvas capacidad.docx (D51270771)	2
W	URL: https://docplayer.es/58764367-Escuela-politecnica-nacional.html Fetched: 5/25/2020 12:35:03 PM	1
W	URL: https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2011/1/EL5204/1/material_docente/bajar?id_mater... Fetched: 7/21/2020 6:13:05 AM	8
W	URL: http://docplayer.es/94419744-Escuela-politecnica-nacional.html Fetched: 1/30/2021 12:44:35 AM	2
W	URL: https://elepcosa.com.ec/nosotros/#1513039225829-08938f4a-e75aFraile Fetched: 3/17/2021 9:29:00 PM	1
SA	9889-García Alamo, Heber Nemesio_.pdf Document 9889-García Alamo, Heber Nemesio_.pdf (D37218146)	1
SA	TÉSIS M.C.H. de Coline (APA 6ta Ed.).docx Document TÉSIS M.C.H. de Coline (APA 6ta Ed.).docx (D61969256)	1

Ing. Freire Llerena, Washington Rodrigo
 C.C.: 1801910884



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, Escola Freire, Ángel Xavier, con cédula de ciudadanía N° 0503568396, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: "Modelamiento y Estudio de Factibilidad para Implementar un Sistema Automático de Regulación de Velocidad y Voltaje en los Grupos de Generación de 3,25 MVA de la Central Hidroeléctrica Illuchi N°2 de la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi S.A." es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 18 de marzo del 2021

ESCOLA FREIRE ÁNGEL XAVIER

C.C.: 0503568396



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, Escola Freire, Ángel Xavier, con cédula de ciudadanía N° 0503568396, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: "Modelamiento y Estudio de Factibilidad para Implementar un Sistema Automático de Regulación de Velocidad y Voltaje en los Grupos de Generación de 3,25 MVA de la Central Hidroeléctrica Illuchi N°2 de la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi S.A." en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, 16 de marzo del 2021

ESCOLA FREIRE ÁNGEL XAVIER

C.C.: 0503568396

Dedicatoria

A Dios por haberme bendecido con la salud y vida para culminar la universidad.

A mis padres Zoila y Augusto con su esfuerzo y sacrificio me permitieron cumplir este gran sueño, en especial a mi madre por estar siempre a mi lado alentando y no dejar que desmaye pese a las circunstancias que hemos pasado.

A mi hermano Cristian por estar pendiente de mí, a Pauli y mi sobrina Micaelita que algún día nos superarás.

A mi papá Agustín que nos cuidas desde el cielo y nos envías tu bendición gracias por todas tus enseñanzas, vives en mi corazón.

A mis primos, Alex, Juan, José, Santiago, Leonardo, Aron y Derek que sea inspiración a continuar en la etapa universitaria.

Ángel

Agradecimiento

Agradezco a Dios y San Juan Bautista por cuidarme y llenarme de bendiciones.

Expreso mi sincero agradecimiento a mis padres Augusto y Zoila por brindarme el apoyo, consejos, haberme dado lo necesario para ser una persona de bien e inculcarme los valores del respeto y la humildad.

A la Universidad de la Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga por haberme permitido adquirir nuevos conocimientos y ser un profesional.

A la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi S.A. por la aceptación para el desarrollo del mismo, de manera especial al Ing. Santiago Mena, por compartir su tiempo y paciencia fue acertada ayuda para el desarrollo de este estudio.

Al Ing. Iván Mena por sus valiosos consejos y recomendaciones para continuar con la elaboración del presente.

Al mi tutor el Ing. Washington Freire director de este proyecto de titulación, por su guía y amistad, así como también al Ing. Vicente Quispe por ayudarme a plantear este tema.

A mi distinguida familia por el apoyo brindado de alguna u otra manera para concretar el objetivo planteado.

Finalmente agradecer a todos mis amigos que formaron parte de la etapa universitaria, en especial aquellos miembros del equipo que aportaron con el conocimiento, entusiasmo y tiempo para representar con orgullo a la carrera de Ingeniería Electromecánica con el prototipo ELECTROMACHINE en sus dos versiones a nivel nacional e internacional.

Ángel

Tabla de contenidos	
Carátula.....	1
Certificación	2
Reporte de verificación urkund.....	3
Responsabilidad de autoría.....	4
Autorización de publicación.....	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento.....	7
Tabla de contenidos	8
Índice de tablas.....	16
Índice de figuras	18
Resumen	21
Abstract.....	22
Planteamiento del problema.....	23
Problemática.....	23
<i>Planteamiento del problema</i>	<i>23</i>
<i>Antecedentes</i>	<i>24</i>
<i>Justificación e importancia.....</i>	<i>25</i>
Objetivos	25
<i>Objetivo general.....</i>	<i>25</i>
<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>25</i>

Marco teórico	27
Antecedentes Investigativos	27
Fundamentación Teórica	28
<i>Energía Hidroeléctrica</i>	<i>28</i>
<i>Central Hidroeléctrica</i>	<i>29</i>
<i>Casa de Máquinas</i>	<i>29</i>
<i>Generador Eléctrico</i>	<i>29</i>
<i>Generador Síncronico.....</i>	<i>30</i>
<i>Circuito Equivalente del Generador Síncrono</i>	<i>32</i>
<i>Turbina Hidráulica</i>	<i>36</i>
<i>Cámara de Distribución</i>	<i>37</i>
<i>Rodete.....</i>	<i>38</i>
<i>Inyector</i>	<i>39</i>
<i>Tobera</i>	<i>39</i>
<i>Aguja</i>	<i>39</i>
<i>Deflector</i>	<i>39</i>
<i>Control del Generador Síncronico dentro de un Sistema</i>	<i>40</i>
Fundamentación Conceptual.....	41
<i>Sistemas de Control en las Unidades de Generación</i>	<i>41</i>
<i>Sistema de Regulación de Velocidad.....</i>	<i>43</i>
<i>Regulación de Velocidad en Turbinas Hidráulicas</i>	<i>45</i>

<i>Sistema de excitación en Generadores</i>	46
<i>Excitatriz rotativa</i>	47
<i>Excitatriz de diodos rotativos sin escobillas (Brushless)</i>	47
<i>Matlab – Simulink</i>	48
<i>Simscape</i>	49
<i>Descripción General de la Central Illuchi N°2</i>	49
<i>Historia</i>	49
<i>Ubicación</i>	49
<i>Especificación General de las Unidades de Generación</i>	50
<i>Estándar IEEE Std 1147TM – 1901</i>	51
<i>Estándar IEEE Std 125TM – 2007</i>	51
<i>Estándar IEEE Std 1207</i>	52
<i>Estándar IEEE 421.1</i>	52
<i>Estándar Std IEEE 421.5</i>	52
<i>Modelo de sistema de excitación AC1A</i>	53
<i>Estándar IEEE Modelo Dinámico Hidroturbina</i>	53
Fundamentación Legal	53
Sistema de Variables	54
Hipótesis	55
Cuadro de operacionalización de las variables	56
Metodología	57

Modalidad de investigación	57
<i>Método Documental Bibliográfico</i>	57
<i>Método Inductivo - Deductivo</i>	57
Tipos de Investigación	57
<i>Investigación Cuantitativa</i>	57
<i>Investigación de Campo</i>	58
<i>Investigación Descriptiva</i>	58
Diseño de la Investigación.....	58
Niveles de la Investigación	58
<i>Exploratoria</i>	58
Técnicas de Recolección de Datos.....	58
<i>Observación</i>	59
<i>Variables cuantitativas</i>	59
<i>Validez y confiabilidad</i>	59
Técnicas de Análisis de Datos	59
<i>Simulación</i>	60
Técnicas de comprobación de hipótesis	60
<i>Comprobación cuantitativa</i>	60
Resultados de la investigación.....	61
Análisis de los resultados.....	61
<i>Análisis Técnico de la Central Illuchi N°2</i>	61

<i>Descripción de la Obra Civil Central Illuchi N°2</i>	61
<i>Canal de Conducción</i>	61
<i>Tanque de Presión</i>	61
<i>Tubería de presión</i>	62
<i>Casa de máquinas</i>	62
<i>Subestación de elevación</i>	62
<i>Descripción de equipos de la Central Illuchi N°2</i>	62
<i>Generador eléctrico</i>	62
<i>Turbina</i>	64
<i>Regulador de velocidad</i>	65
<i>Excitatriz</i>	67
<i>Válvula de Guardia</i>	69
<i>Transformador de servicios auxiliares</i>	69
<i>Banco de baterías</i>	70
<i>Transformador de elevación</i>	70
<i>Tableros de protección y control</i>	71
Discusión de los resultados	74
Propuesta	76
Datos Informativos	76
Antecedentes de la propuesta	76
Objetivos	77

<i>Objetivo General</i>	77
<i>Objetivos Específicos</i>	77
Justificación de la propuesta	77
Fundamentación de la propuesta	78
<i>Características de los reguladores electrónicos</i>	78
<i>Regulador Digital de Velocidad</i>	78
<i>Regulador automático de voltaje</i>	79
Diseño de la propuesta.....	79
<i>Determinación de parámetros eléctricos y mecánicos</i>	79
<i>Determinación de la Impedancia Base ZB</i>	79
<i>Determinación de la corriente base IB</i>	80
<i>Cálculo para el generador de la Central Illuchi N°2</i>	80
<i>Determinación de la constante de tiempo del agua Tw</i>	81
<i>Modelamiento de componentes de la unidad de generación</i> ...	83
<i>Turbina Hidráulica</i>	83
<i>Regulador de velocidad</i>	84
<i>Regulador de velocidad actual.</i>	87
<i>Regulador de voltaje</i>	88
<i>Regulador de voltaje DC1A</i>	92
<i>Modelamiento de la unidad de generación</i>	97
<i>Unidad de generación con una carga de 1KW</i>	98

<i>Unidad de generación con una perturbación.....</i>	<i>102</i>
<i>Unidad de generación con una falla.....</i>	<i>105</i>
Requisitos de la propuesta	108
<i>Códigos y normas establecidos para la modernización</i>	<i>108</i>
<i>Requisitos Técnicos de los Sistemas de Regulación.....</i>	<i>109</i>
<i>Regulador de Voltaje AVR.....</i>	<i>110</i>
<i>Regulador de Velocidad Digital</i>	<i>112</i>
<i>Requisitos del Sistema Integrado de Regulación de Velocidad y Voltaje.</i>	<i>115</i>
<i>Confiabilidad.....</i>	<i>116</i>
<i>Fuente de Alimentación del Gabinete de Control.....</i>	<i>116</i>
<i>Procesador (CPU).....</i>	<i>117</i>
<i>Panel de operación (HMI).....</i>	<i>117</i>
<i>Protocolos de comunicación</i>	<i>118</i>
<i>Funciones principales.....</i>	<i>118</i>
<i>Especificación del Sistema de Presión Hidráulica (HPU).....</i>	<i>119</i>
<i>Requisitos técnicos del servomotor</i>	<i>120</i>
<i>Requisitos técnicos del actuador.....</i>	<i>121</i>
<i>Especificaciones de alternativas para el reemplazo.....</i>	<i>121</i>
<i>Regulador de Velocidad.....</i>	<i>121</i>
<i>Regulador automático de voltaje.....</i>	<i>124</i>
<i>Unidad Hidráulica de Potencia.....</i>	<i>125</i>

<i>Sensor de velocidad</i>	126
<i>Control Manifolds</i>	128
<i>Presupuesto referencial</i>	129
<i>Estudio económico de la propuesta.</i>	130
Comprobación de la hipótesis	131
Conclusiones y recomendaciones	132
Conclusiones	132
Recomendaciones	133
Bibliografía	134
Anexos	139

Índice de tablas

Tabla 1	<i>Operacionalización de las Variables.....</i>	56
Tabla 2	<i>Datos de Placa del Generador Síncrono.....</i>	63
Tabla 3	<i>Características de la Turbina.....</i>	64
Tabla 4	<i>Características del Regulador de Velocidad.....</i>	67
Tabla 5	<i>Características de la Excitatriz de Diodos Rotóricos.....</i>	68
Tabla 6	<i>Características de la Válvula de Guardia.....</i>	69
Tabla 7	<i>Características del Transformador de SSAA.....</i>	69
Tabla 8	<i>Características del Transformador de Elevación.....</i>	70
Tabla 9	<i>Descripción del tablero de protección y maniobra.....</i>	71
Tabla 10	<i>Descripción del tablero de protección y maniobra.....</i>	72
Tabla 11	<i>Datos típicos para reguladores de velocidad mecánico – hidráulico..</i>	85
Tabla 12	<i>Datos típicos para reguladores de voltaje.....</i>	89
Tabla 13	<i>Parámetros para el modelo DC1A.....</i>	93
Tabla 14	<i>Parámetros determinados.....</i>	97
Tabla 15	<i>Especificaciones técnicas del AVR.....</i>	110
Tabla 16	<i>Índices de estabilidad.....</i>	111
Tabla 17	<i>Especificaciones técnicas del regulador de velocidad.....</i>	112
Tabla 18	<i>Parámetros MTBF.....</i>	116
Tabla 19	<i>Requisitos del Monitor -HMI.....</i>	117
Tabla 20	<i>Características del actuador.....</i>	121
Tabla 21	<i>Características Generales del MRT2.1 M340 Digital Governor.....</i>	122
Tabla 22	<i>Características del regulador automático de voltaje.....</i>	124
Tabla 23	<i>Características de funcionamiento de la HPU.....</i>	125
Tabla 24	<i>Especificaciones del SSG.....</i>	127
Tabla 25	<i>Costo referenciales de los equipos.....</i>	129

Tabla 26 <i>Costo de energía</i>	130
---	-----

Índice de figuras

Figura 1	<i>Diagrama en corte de una máquina síncrona grande</i>	31
Figura 2	<i>Tipos constructivos de máquinas síncronas</i>	31
Figura 3	<i>Esquema básico de la máquina síncrona trifásica</i>	32
Figura 4	<i>Generador síncrono de rotor cilíndrico</i>	33
Figura 5	<i>Circuito equivalente generador síncrono</i>	33
Figura 6	<i>Diagrama Fasorial, Generador Síncrono de polos lisos</i>	34
Figura 7	<i>Diagrama fasorial de la máquina síncrona</i>	35
Figura 8	<i>Partes de una cámara de distribución</i>	38
Figura 9	<i>Inyector de la cámara de distribución</i>	39
Figura 10	<i>Variables de entrada y salida</i>	40
Figura 11	<i>Sistema de control genérico de un generador síncrono</i>	42
Figura 12	<i>Ilustración de los reguladores automáticos</i>	43
Figura 13	<i>Esquema de canales de control de un generador</i>	44
Figura 14	<i>Diagrama de bloque sistema de generación de potencia y control</i> .	45
Figura 15	<i>Esquema General de un Regulador Automático de Voltaje</i>	46
Figura 16	<i>Sistema de excitación de diodos rotativos sin escobillas</i>	48
Figura 17	<i>Ubicación geográfica de la Central Illuchi N°2</i>	50
Figura 18	<i>Esquema General Centrales Hidroeléctricas Illuchi 1 e Illuchi 2</i>	50
Figura 19	<i>Generador de la Unidad de Generación N°1</i>	63
Figura 20	<i>Turbina Pelton</i>	64
Figura 21	<i>Regulador de velocidad</i>	66
Figura 22	<i>Fotografía de la excitatriz de la Unidad de Generación N°1</i>	68
Figura 23	<i>Tablero de protección y maniobra</i>	72
Figura 24	<i>Tablero de control</i>	74
Figura 25	<i>Esquema de una Central Hidroeléctrica</i>	81

Figura 26	Función de transferencia Hidroturbina.....	83
Figura 27	Modelo aproximado regulación de velocidad mecánico-hidráulico...	84
Figura 28	Modelo de regulador de velocidad en Simulink.....	86
Figura 29	Respuesta del modelo del regulador de velocidad.....	86
Figura 30	Regulador de velocidad actual.....	87
Figura 31	Respuesta del regulador de velocidad.....	88
Figura 32	Sistema de excitación tipo AC1A.....	89
Figura 33	Modelo del regulador de voltaje, tipo AC1A	91
Figura 34	Respuesta del modelo del regulador de voltaje.....	91
Figura 35	Diagrama del sistema DC1A.....	92
Figura 36	Modelo de Simulink para el sistema DC1A.....	93
Figura 37	Respuesta al escalón del sistema DC1A.....	94
Figura 38	Modelo de Simulink del sistema DC1A con estabilización.....	94
Figura 39	Respuesta al escalón del sistema DC1A con estabilización.....	95
Figura 40	Modelo en Simulink del sistema DC1A con PID.....	96
Figura 41	Respuesta al escalón de V_t	96
Figura 42	Unidad de generación de la central	99
Figura 43	Respuesta de las señales del generador.....	99
Figura 44	Velocidad del rotor.....	100
Figura 45	P , Q generada y V_t en los bornes del generador	101
Figura 46	Voltaje en los bornes del generador	101
Figura 47	Unidad de generación - perturbación.....	102
Figura 48	Voltaje en bornes del generador	103
Figura 49	Corrientes del estator.....	103
Figura 50	Corriente en el devanado de campo.....	104
Figura 51	Señal de P , Q y V_t	104

Figura 52 Señal de w_m , P_m , i_s , I_{fd}	105
Figura 53 Unidad de generación - falla	105
Figura 54 Señal de P , Q y V_t	106
Figura 55 Señal de P , Q y V_t	106
Figura 56 Velocidad del rotor.....	107
Figura 57 Potencia activa generada.....	107
Figura 58 MRT 2.1 M340 Digital Governor	122
Figura 59 Regulador de velocidad automático.....	123
Figura 60 LS-AES-VR-ECO.....	124
Figura 61 HPU N-series.....	125
Figura 62 Unidad de presión hidráulica.....	126
Figura 63 Speed signal generator	127
Figura 64 Colector Hidráulico	128

Resumen

En el presente proyecto de titulación se realiza un estudio de factibilidad del estado de los sistemas de regulación de velocidad y voltaje de la Central Hidroeléctrica Illuchi N°2 de la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi S.A. para una posible implementación del AVR y regulador automático de velocidad governor, sistemas automáticos con el objetivo de reducir los tiempos de respuesta de la unidad generadora, esta modernización permite incrementar la producción anual de energía. El modelamiento de los reguladores de velocidad y voltaje en el software Matlab/Simulink se ha implementado con modelos descritos por la IEEE, *Dynamic Models For Steam and Hydro Turbines in Power System Studies* y *Excitacion System Models For Power System Stability Studies* respectivamente, se analiza los tiempos de respuesta ante la activación de una función escalón unitario para simular el comportamiento de los mismos. Se propone ciertas especificaciones técnicas que recomiendan cumplir bajo las normas IEEE e IEC respecto a su montaje, características de los reguladores digitales de velocidad, cableado, servomotores; para lo cual se toma como referencia el Regulador de velocidad MRT2.1 M340 Digital Governor y el AES-VR-ECO como regulador de voltaje, una vez estudiados estos sistemas automáticos se requiere sistemas adicionales para su funcionamiento tales como tableros de control, instrumentación, repuestos y capacitación al personal a cargo, tomando en cuenta cada uno de los factores se identificó su valor aproximado en el mercado nacional, con lo cual se procede a elaborar un presupuesto como criterio de evaluación aproximado para su posible implementación.

Palabras clave:

- **AUTOMÁTICO**
- **UNIDAD DE GENERACIÓN**
- **REGULADOR DE VELOCIDAD**
- **AVR**

Abstract

In this degree project a feasibility study of the state of the speed and voltage regulation systems of the Illuchi N°2 Hydroelectric Power Plant of Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi S.A. is carried out for a possible implementation of the AVR and automatic speed governor, automatic systems with the objective of reducing the response times of the generating unit, this modernisation allows to increase the annual energy production. The modelling of the speed and voltage regulators in the Matlab/Simulink software has been implemented with models described by the IEEE, Dynamic Models For Steam and Hydro Turbines in Power System Studies and Excitation System Models For Power System Stability Studies respectively, the response times are analysed before the activation of a unitary step function to simulate their behaviour. Certain technical specifications are proposed that recommend compliance with IEEE and IEC standards with respect to their assembly, characteristics of the digital speed governors, wiring, servomotors; for which the speed regulator MRT2.1 M340 Digital Governor and the AES-VR-ECO as voltage regulator are taken as a reference, once these automatic systems have been studied, additional systems are required for their operation such as control panels, instrumentation, spare parts and training for the personnel in charge, taking into account each of the factors, their approximate value in the national market was identified, with which proceed to elaborate a budget as an approximate evaluation criterion for their possible implementation.

Key words:

- **AUTOMATIC**
- **GENERATION UNIT**
- **SPEED REGULATOR**
- **AVR**

CAPÍTULO I

1. Planteamiento del problema

1.1. Problemática

1.1.1. *Planteamiento del problema*

La Central Illuchi N°2 tienen una tecnología del año 1979 y vienen operando de manera continua desde el año 1988, es decir su tiempo de vida es de 39 años, su operación es prácticamente manual, depende de la habilidad y experiencia de sus operarios de este modo su eficiencia y capacidad de respuesta se ve limitada al no disponer de señales, indicadores y referencias para su funcionamiento.

El sistema de control y mecanismos se encuentran deteriorados, uno de los problemas radica al momento de ingresar y salir de paralelo con las unidades pese a intervenir continuamente en mantenimiento. Al menos en los últimos 15 años de producción no se registra procesos de inversión en el sistema de control de la Central Illuchi N°2, al estar en operación continua los esfuerzos eléctricos, mecánicos lineales y rotatorios en los actuadores y elementos ha sufrido un deterioro inevitable.

El control P – f de la Central actualmente cuenta con un sistema de regulación de velocidad mecánico que es altamente inestable y requiere un medio adicional de estabilización, el sistema se acciona a través de mecanismos de palanca que se acoplan entre sí, para garantizar el movimiento individual de los deflectores e inyectores, su tiempo de cierre es de 1 segundo.

Por otro lado, el control Q - v de la central está equipado de un sistema de regulación de voltaje (AVR) de tipo analógico y presenta algunas limitaciones, ya que no posee suficiente flexibilidad operacional y su tiempo de respuesta ante perturbaciones es muy lento, en comparación de los dispositivos digitales actuales.

1.1.2. Antecedentes

La Central Hidroeléctrica Illuchi N°2, perteneciente a la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi S.A. (ELEPCO S.A.) se encuentra ubicada al oriente de la ciudad de Latacunga, la central entró en operación en el año 1988 siendo su tecnología y fabricación 1979, aprovechando para la generación de energía eléctrica, es la segunda central de una configuración en cascada que inicia con la central Illuchi N°1 aguas arriba. Tiene una capacidad nominal en generación de 6500 KVA y una potencia efectiva de 5200 KW esta central se encuentra conformado por dos unidades hidrogeneradoras, cuyas turbinas funcionan con un caudal de 950 lts/seg y una caída de 300 metros. El nivel de voltaje de los generadores es de 2450 voltios y para efectos de transmisión, en la subestación de la central, se eleva el voltaje a 13800 voltios mediante un transformador de potencia de 6000 KVA de capacidad nominal.

Actualmente las unidades no cuentan con tablero electrónico de regulador de velocidad y voltaje, el sistema hidráulico con el que cuenta la central es netamente mecánico accionado por perillas y volantes de control manual. El sistema de accionamiento de apertura y cierre de inyectores y deflector está correlacionado por un sistema de palanca y de esta manera no permiten un seguimiento continuo de las variables asociadas, además presentan baja calidad de regulación en relación a la versatilidad de los reguladores modernos debido muchas veces al desgaste de partes y piezas en movimiento y la fatiga de materiales, que dificultan la óptima operación de la unidad de generación, debido a su tecnología se dificulta la obtención de repuestos para una correcta gestión de mantenimiento.

1.1.3. Justificación e importancia

El proyecto de titulación presenta la importancia técnica económica ante una propuesta alternativa de adaptar un sistema automático al grupo generador antiguo, es decir modernizar los equipos de control, medición y protección de la Central Illuchi N°2 que permita mejorar la condición de operación de las unidades de generación su optimización y ganancia con el efecto de la potencia generada con respecto a la velocidad de respuesta de la máquina.

Los elementos de la central deben funcionar en óptimas condiciones, ya que una deficiencia en su operación ocasiona bajo rendimiento de la central, desperdicio de recursos y aumenta el riesgo de salidas inesperadas o paralizaciones por mantenimiento programados o no programados.

Según datos proporcionados por el Departamento de Generación de ELEPCO S.A., entre el año 2019 y 2020 la empresa registra una pérdida económica de \$187.638,54 a causa de pérdidas por eficiencia y operación en el control de las unidades; es por ello que se pretende realizar un modelamiento y estudio para implementar un sistema automático de regulación de velocidad y voltaje.

1.2. Objetivos

1.2.1. 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 N°2 mediante un análisis técnico - económico.

1.2.2. 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.

- Modelar mediante el software Matlab/Simulink, el funcionamiento de los sistemas de regulación de velocidad y voltaje.
- Definir las especificaciones técnicas a detalle de los equipos e instrumentos necesarios para la modernización del sistema de regulación y voltaje.
- Elaborar la propuesta técnica para determinar la factibilidad económica y conveniencia de realizar una modernización de la central.

CAPÍTULO II

2. Marco teórico

2.1. Antecedentes Investigativos

El presente proyecto está orientado a 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 N°2 a través de un análisis técnico – económico.

Por la falta de precisión y estabilidad en la operación de las unidades de generación de la Central Illuchi N°2, se ha optado en buscar la manera de corregir dichas desventajas, mediante la automatización de los reguladores de velocidad y voltaje.

Héctor Sumba y Julio Matute en su trabajo de fin de grado “Análisis de las Ventajas de la Modernización de un Regulador de Velocidad por uno Electrónico en una Central Hidroeléctrica”, señala que, las ventajas de instalación de un regulador electrónico es la optimización del recurso hídrico, producción de energía y un control mejorado de la precisión y estabilidad entre otras, al continuar con el uso de un regulador antiguo se mantiene únicamente un control local y no permite tener un monitoreo de las variables que inciden en el regulador. (Sumba Yanza & Matute Domínguez, 2012)

Fabián Arias junto con Adrián Bravo en su trabajo de fin de grado “Estudio para la modernización de la Central Hidroeléctrica Saucay” menciona, que la mejor inversión económica a largo plazo en una unidad de generación es la modernización junto con la realización de mantenimientos preventivos esto permite extender la vida útil de la central, reducir pérdidas, incrementar la capacidad de generación. Además, luego de

analizar los datos técnicos, estado actual e historial de mantenimiento y fallas propone una alternativa de modernización de acuerdo a las tecnologías actuales. (Arias Calle & Bravo López, 2016)

Jorge Carrera en su trabajo de fin de carrera “Modernización del Sistema de Regulación de velocidad en la Central Hidroeléctrica Carlos Mora” elabora un estudio con el propósito de optimizar la vida útil del generador, incrementar la producción anual de energía, dando más eficiencia, mejorando el mantenimiento y operación de la unidad, describe el funcionamiento del regulador mecánico; y propone un diseño de regulador digital. Obteniendo un control mejorado en la precisión y estabilidad del sistema. (Carrera Orellana, 2011)

2.2. Fundamentación Teórica

2.2.1. *Energía Hidroeléctrica*

Según (Peláez Samaniego & Espinoza Abad, 2015) la “fuente energética hidráulica proviene en primera instancia e indirectamente de la energía solar, debido al ciclo hidrológico natural, a través del cual el agua evaporada es transportada en forma de nubes y niebla a distintos puntos del globo terrestre, luego en forma de lluvia y nieve pasan a formar los lagos, glaciares y ríos”.

Como tal la energía hidroeléctrica deriva de la energía potencial del agua de las fuentes hídricas naturales, las centrales hidroeléctricas aprovechan la diferencia de desnivel existente entre dos puntos y el caudal de agua para transformar esa energía potencial en electricidad. En primera instancia la turbina transforma la energía en energía mecánica para que esta active el generador que a su vez transforma la energía mecánica en energía eléctrica.

2.2.2. Central Hidroeléctrica

Existe una gran variedad de tipos de centrales hidroeléctricas convencionales, menciona (Cardozo F., 2019) podrían ser reducidos a dos modelos básicos, siendo cada emplazamiento particular una variante de ellos o una combinación de ambos. El primer tipo, denominado Central Hidroeléctrica (C.H.) de Pasada, también denominadas centrales de filo de agua, utiliza parte del flujo de un río y no es posible almacenar agua, y la generación de energía eléctrica debe seguir fluctuaciones del agua disponible.

El segundo sistema, o C.H. con embalse de reserva, consiste en construir, en un tramo de un río que ofrece un desnivel apreciable, una presa de determinada altura. El nivel del agua alcanzará, entonces un punto sensiblemente cercano al extremo superior de la presa. A media altura de la misma para aprovechar el volumen de embalse a cota superior, se encuentra la toma de aguas; y en la base inferior – aguas debajo de la presa -, la sala de máquinas, que aloja al grupo turbina-generator.

2.2.3. Casa de Máquinas

En la casa de máquinas de una central hidroeléctrica, se instalan los grupos eléctricos para la producción de la energía eléctrica, así como la maquinaria auxiliar necesaria para su funcionamiento, las disposiciones adoptadas para la casa de máquinas, son varias y dependen de las circunstancias y condiciones del aprovechamiento hidroeléctrico. (Cañar Ramírez, 2009)

2.2.4. Generador Eléctrico

El generador eléctrico es el encargado de convertir la energía mecánica en energía eléctrica. Mantiene por tanto una diferencia de potencial entre dos puntos denominados polos. Por la ley de Faraday, al hacer girar una espira dentro de un campo magnético, se produce una variación de flujo de dicho campo a través de la espira y por tanto se genera una corriente eléctrica. (Llamba Farinango, 2014)

Las centrales constan de un sistema de “turbina-generador” cuyo funcionamiento básico es, en todas ellas, muy parecido, variando de unas a otras la forma en que acciona la turbina, o sea, dicho de otro modo, en que fuente de energía primaria se utiliza, para convertir la energía contenida en ella en energía eléctrica.

a. Generador Sincrónico

La máquina sincrónica tanto generador como motor, opera a velocidad sincrónica que se encuentra relacionada estrictamente con la frecuencia de la red de corriente alterna de acuerdo con la Ec. (1)

$$n_s = \frac{60 f}{p} \quad \text{Ec. (1)}$$

Dónde:

n_s : Velocidad sincrónica dada [r.p.m.]

f : Frecuencia [Hz]

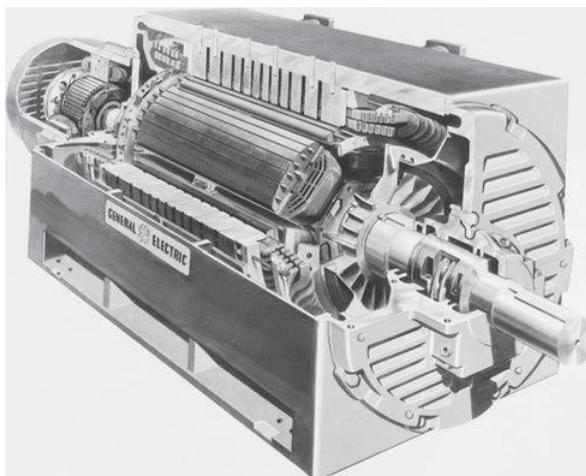
p : Número de pares de polos de la máquina.

Las máquinas síncronas son motores y generadores cuya corriente de campo magnético la suministra una fuente de potencia C.A. externa. (Chapman, 2012)

Se encuentran constituidas por dos devanados independientes, un devanado inductor o de excitación alimentado por corriente continua ubicado en el rotor que da lugar a los polos de la máquina; y un devanado inducido distribuido formando un arrollamiento trifásico recorrido por corriente alterna.

Figura 1

Diagrama en corte de una máquina síncrona grande

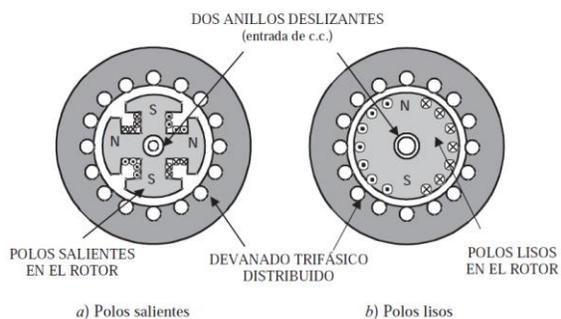


Nota: Ilustración tomada de (Fraile Mora, 2008)

La estructura del rotor se fabrica en dos versiones distintas, ya sea en forma de polos salientes o en forma de polos lisos o rotor cilíndrico, la alimentación del devanado inductor se realiza por medio de dos anillos colocados en la parte móvil de la máquina por los que se introduce una corriente continua exterior.

Figura 2

Tipos constructivos de máquinas síncronas



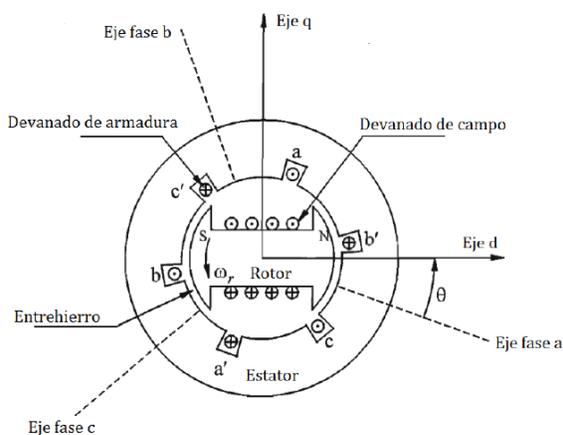
Nota: En la Ilustración se identifica las estructura del rotor de un generador síncrono, tomado de (Fraile Mora, 2008)

Describe (Orbe Játiva, 2014) que “para mantener dicho sincronismo implica que en los sistemas de potencia se tenga que monitorear los ángulos (relativos a una máquina de referencia) de los rotores de las máquinas que oscilan luego de una perturbación “(si el sistema es estable, las máquinas interconectadas permanecen “en sincronismo”).

La disposición de los devanados de la máquina síncrona se muestra en la Figura 3.

Figura 3

Esquema básico de la máquina síncrona trifásica.



Nota: Ilustración Tomada de (Kundur, 1994), se puede apreciar la descomposición del eje directo y de cuadratura.

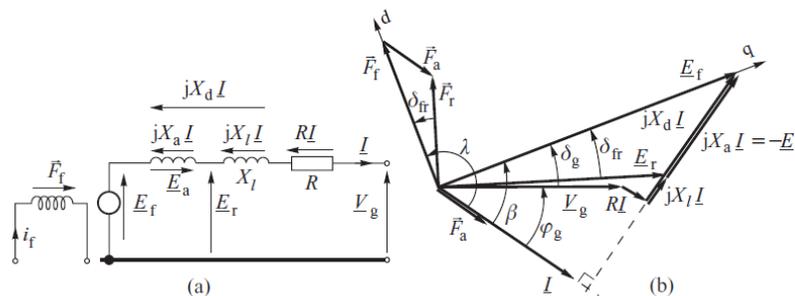
b. Circuito Equivalente del Generador Síncrono

El generador se comporta como una fuente real de voltaje $E \angle \delta$ y una impedancia interna $Z = R + jX_S$; en donde R corresponde a la resistencia de las bobinas del estator y X_S la llamada reactancia síncrona o más precisamente la síncrona de eje directo X_d , la cual incluye la reactancia de las bobinas del estator, la reactancia de dispersión y la reacción del inducido (flujo magnético que se encierra a alrededor del rotor), menciona

(Orbe Játiva, 2014) en la Figura 4 se muestra el circuito monofásico equivalente del generador sincrónico de rotor cilíndrico.

Figura 4

Generador sincrónico de rotor cilíndrico

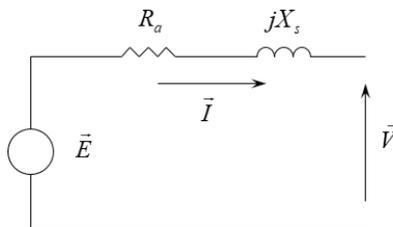


Nota: En la figura se muestra (a) Diagrama de circuito equivalente, (b) Diagrama fasorial de funcionamiento con factor de potencia en retardo, tomado de (Machowski, Bialek, & Bumby, 2008)

El voltaje en los bornes del generador de rotor cilíndrico está dado por la ecuación (2).

Figura 5

Circuito equivalente generador síncrono



Nota: Circuito equivalente del generador síncrono de polos lisos (rotor cilíndrico), tomado de (Gómez Palacio, 2009)

$$\vec{E} = \vec{V} + (R_a + jX_s)\vec{I} \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde:

\vec{E} : Voltaje inducido por el flujo de la corriente de campo.

\vec{V} : Voltaje en los bornes del generador.

R_a : Resistencia de armadura.

X_s : Reactancia síncrona

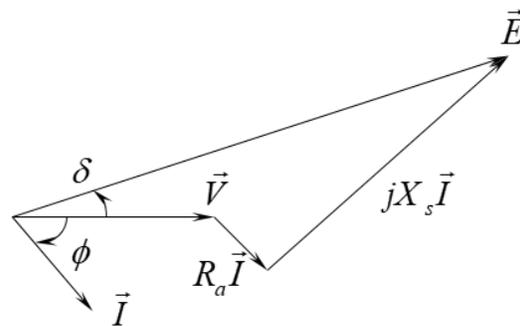
\vec{I} : Corriente

El diagrama fasorial para el generador de rotor cilíndrico resulta ser el de la

Figura 6.

Figura 6

Diagrama Fasorial, Generador Síncrono de polos lisos



Nota: Representación del diagrama fasorial, tomado de (Gómez Palacio, 2009)

La referencia es el voltaje de terminales:

$$\vec{V} = V \angle 0^\circ \quad \text{Ec. (3)}$$

El voltaje interno está dado por:

$$\vec{E} = E \angle \delta \quad \text{Ec. (4)}$$

La impedancia de la máquina:

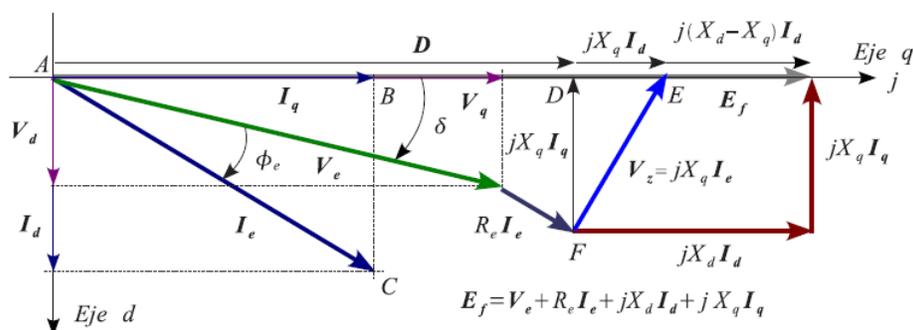
$$\vec{Z} = R_a + jX_s = Z \angle \alpha \quad \text{Ec. (5)}$$

Debido al movimiento del rotor y estator a la velocidad sincrónica, resulta conveniente referir las ecuaciones que definen el comportamiento de la máquina a un sistema de coordenadas referidas al rotor. De acuerdo con estos lineamientos se definen los ejes magnéticos directo y de cuadratura. El eje directo (d), magnéticamente centrado en el centro del polo norte; El eje de cuadratura (q), desfasado 90° eléctricos delante del eje directo. (López Rosales, 2017)

En los generadores de polos salientes existe la particularidad de que la reluctancia del circuito magnético depende de la posición del rotor, por lo que se modelan dos reactancias sobre el eje directo {d} y cuadratura{q}, obteniéndose de éste modo dos corrientes ortogonales I_d e I_q . El diagrama fasorial queda establecido como se muestra en la Figura 7.

Figura 7

Diagrama fasorial de la máquina sincrónica



Nota: En la figura se observa el diagrama fasorial de la maquina síncrona de polos salientes en la convención generador, tomado de (Aller, 2006)

Para este generador, el voltaje en sus bornes es el dado por la Ec. (6).

$$E_f = V_e + R_a I_a + jX_d I_d + jX_q I_q \quad \text{Ec. (6)}$$

Al considerar despreciable la resistencia del estator se pueden obtener las potencias activa y reactiva suministradas por el generador.

Para el generador de polos salientes la potencia activa y reactiva toman la siguiente forma:

$$P = \frac{E \cdot V}{X_d} \sin \delta + \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin(2\delta) \quad \text{Ec. (7)}$$

$$Q = \frac{E \cdot V}{X_d} \cos \delta + \frac{V^2}{2} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \right) \cos(2\delta) - \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{X_d} + \frac{1}{X_q} \right) \quad \text{Ec. (8)}$$

2.2.5. Turbina Hidráulica

Según, (Kundur, 1994) se destaca dos tipos básicos de turbinas: turbinas de impulso y turbinas de reacción.

Las turbinas de impulso (también conocido como rueda Pelton) se utiliza para grandes alturas 300 metros o más. El corredor está a presión atmosférica, y toda la caída de presión tiene lugar en boquillas estacionarias que convierten la energía potencial en energía cinética. Los chorros de agua de alta velocidad inciden en cubos en forma de cuchara en el corredor, que desvían el agua axialmente a través de unos 160 °. El cambio en el momento proporciona el par para conducir al corredor, siendo la energía suministrada completamente cinética. (Kundur, 1994)

En la turbina de reacción la presión dentro de la turbina es superior a la atmosférica; la energía es suministrada por el agua en forma cinética y potencial (carga de presión). El agua primero pasa de una carcasa en espiral a través de paletas de guía radiales estacionarias y compuertas alrededor de toda su periferia. Las puertas controlan el flujo de agua. Hay dos subcategorías de turbinas de reacción: Francis y hélice.

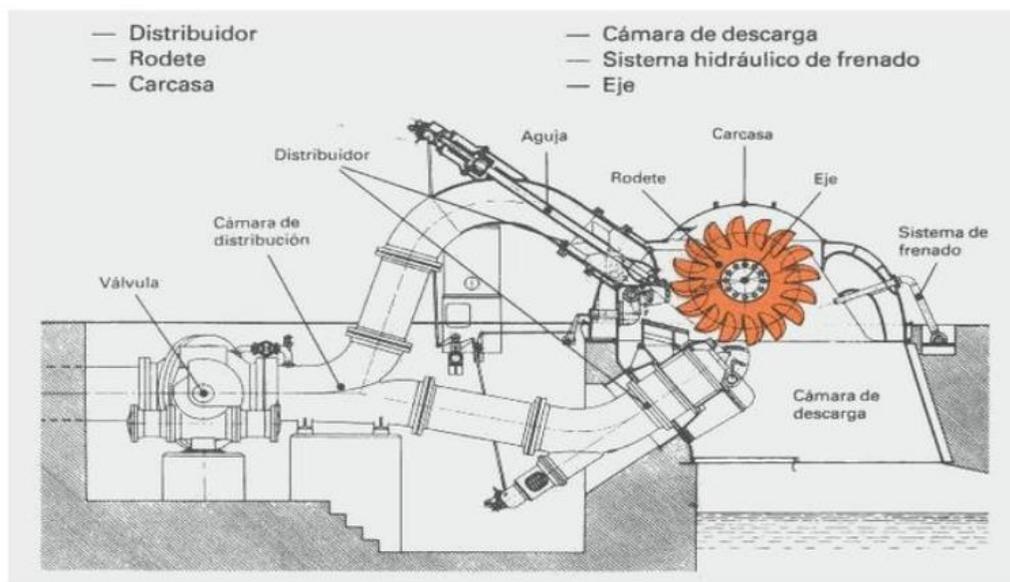
El rendimiento de una turbina hidráulica está influenciado por las características de la columna de agua que alimenta la turbina; Estos incluyen los efectos de la inercia del agua, la compresibilidad del agua y la elasticidad de la pared de la tubería en la compuerta. El efecto de la inercia del agua es hacer que los cambios en el flujo de la turbina se retrasen con respecto a los cambios en la apertura de la puerta de la turbina. El efecto de la elasticidad es causar ondas de presión y flujo en la tubería. Este fenómeno se conoce comúnmente como "golpe de ariete". (Kundur, 1994)

2.2.6. Cámara de Distribución

También conocida como cámara de inyectores tiene como misión fundamental conducir el agua hasta el inyector además sirve de soporte a los demás mecanismos que integran el distribuidor como se puede observar en la Figura 8.

Figura 8

Partes de una cámara de distribución



Nota: La ilustración muestra una vista en sección de una cámara de distribución tomado de (Llamba Farinango, 2014)

a. Rodete

El Rodete de una turbina Pelton es una rueda con álabes en forma de cucharas o cangilones, con un diseño característico, situados en su perímetro exterior, como se puede observar en la Figura 8 sobre estas cucharas se incide el chorro del inyector, de tal forma que el choque del chorro se produce en dirección tangencial al rodete, para maximizar la potencia de propulsión en la sección de entrada y la sección de salida presentan una mella en la parte externa, son simétricas en dirección axial, y presentan una cresta central afilada, se fabrican de acero inoxidable. Las dimensiones de las cucharas, y su mayor número dependen del diámetro del chorro que incide sobre ellas cuanto menor sea ese diámetro, más pequeñas serán las cucharas y mayor número de ellas se situarán.

b. Inyector

Es el elemento mecánico destinado a dirigir y regular el chorro de agua y se puede observar en la Figura 9, la cual está compuesto por:

c. Tobera

Constituye una boquilla, con orificio de sección circular de un diámetro entre 5 y 30 cm, instalada al final de la cámara de distribución. Dirige el chorro de agua, tangencialmente hacia la periferia del rotor, de tal modo que la prolongación de la tobera forma un ángulo de 90° con los radios de rotor.

d. Aguja

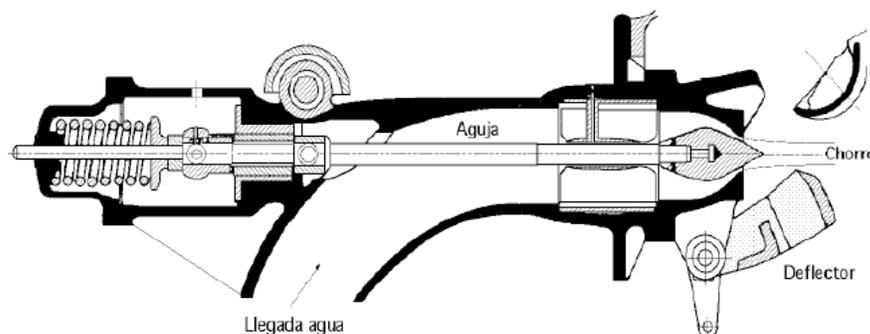
Constituye un vástago situado concéntricamente en el interior del cuerpo de la tobera con movimiento de desplazamiento longitudinal en dos sentidos.

e. Deflector

Es un dispositivo mecánico que, a modo de pala o pantalla, puede ser intercalado con mayor o menor incidencia en la trayectoria del chorro de agua, entre la tobera y el rodete, presentando la parte cóncava hacia el orificio de tobera. (Llamba Farinango, 2014)

Figura 9

Inyector de la cámara de distribución



Nota: La figura muestra las partes que conforman un inyector tomado de (Llamba Farinango, 2014)

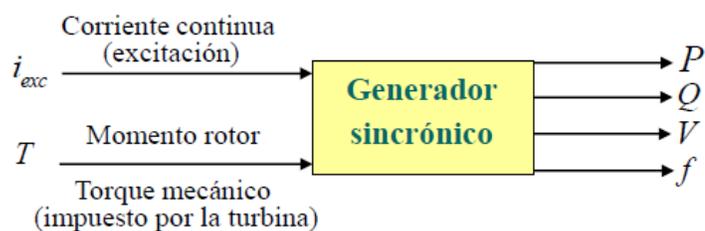
2.2.7. Control del Generador Sincrónico dentro de un Sistema

Parte principal de un sistema eléctrico es el generador síncrono, puede estar uno o varios trabajando en paralelo conectados mediante una barra de generación común en el caso de estar en una misma central, o separados por alguna impedancia (líneas, transformadores) en el caso de pertenecer a centrales diferentes.

Una vez conectado al sistema, los parámetros característicos de la operación de cada generador serán la magnitud de la tensión en bornes $|V|$, la frecuencia f y la potencia compleja $S = P + jQ$ que entrega. Estas cuatro variables de salida son controladas por sólo dos variables de entrada o control, el torque mecánico en el eje T y la corriente de excitación i_{exc} , según se muestra en la Figura 10. (Brokering & Palma, 2018)

Figura 10

Variables de entrada y salida



Nota: El gráfico muestra las principales variables que se controla a un generador síncrono tomado de (Brokering & Palma, 2018)

El grado de interacción se reduce en la medida en que crece el tamaño del sistema. En el límite, cuando un sistema es muy grande en relación con la máquina en estudio, se habla de barra infinita poderosa o, en forma abreviada, de barra infinita.

Según, (Brokering & Palma, 2018) al ser un sistema tan grande, poseerá un momento de inercia también muy grande (infinito en el límite), por lo que la frecuencia podrá considerarse fija, ya que no se modificará al variar el torque de una máquina comparativamente pequeña. Además, la reactancia propia del sistema será pequeña (cero al límite) y, por lo tanto, la tensión $|V| = E_{\infty}$ será constante y no variará aunque se modifique la excitación de la máquina.

En estas condiciones, las variables de salida de cada máquina se reducen a sólo dos, P y Q . Si se supone constante la corriente de excitación (y por ende, la $fem E$), cualquier variación del torque motor T producirá una variación del ángulo de potencia θ ($T = k \sin(\theta)$). Como consecuencia, la potencia activa P , que depende de $\sin(\theta)$, variará bastante, mientras que la potencia reactiva Q casi no cambiará.

2.3. Fundamentación Conceptual

2.3.1. Sistemas de Control en las Unidades de Generación

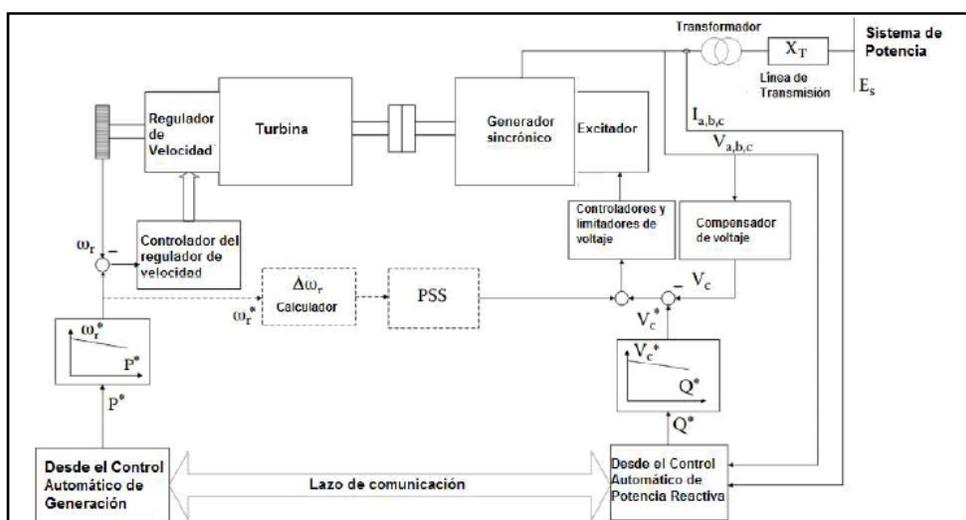
Un sistema eléctrico de potencia está expuesto a perturbaciones de diferente naturaleza, que afectan directamente, en mayor o menor grado a su estabilidad. Según (Delgado Montenegro, 1997) “para mantener la estabilidad es necesario controlar los flujos de potencia activa y reactiva, la magnitud de voltaje, la frecuencia y los ángulos de los rotores de las máquinas”. La potencia eléctrica que un generador entrega al sistema está relacionado a su potencia mecánica, controlada por el regulador de velocidad. El regulador es un sistema de control que a partir de las variaciones de velocidad envía señales que controlan la apertura o cierre de válvulas provocando variaciones de

potencia mecánica de la turbina que compensen las variaciones de potencia eléctrica. Cuando se producen cambios bruscos de carga o cualquier tipo de perturbación, la frecuencia del sistema tiende a alejarse de su valor especificado. El valor de desviación constituye la señal de entrada de los sistemas reguladores de velocidad.

En la Figura 11 se muestra la estructura de un sistema de control.

Figura 11

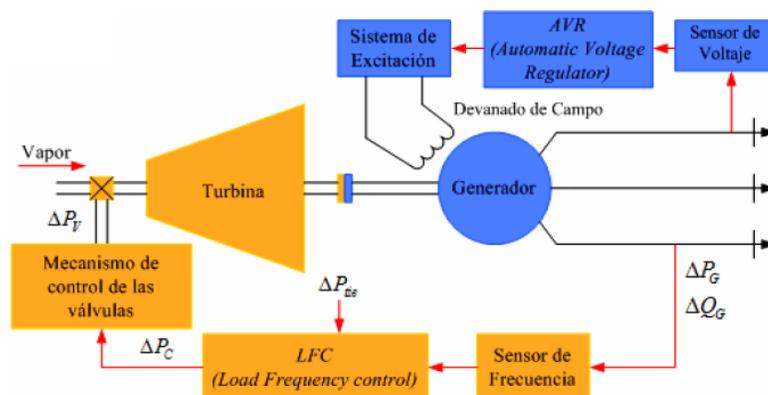
Sistema de control genérico de un generador síncrono



Nota: Diagrama de bloques del funcionamiento de los reguladores tomado de (Patiño Paucar, 2019)

Figura 12

Ilustración de los reguladores automáticos



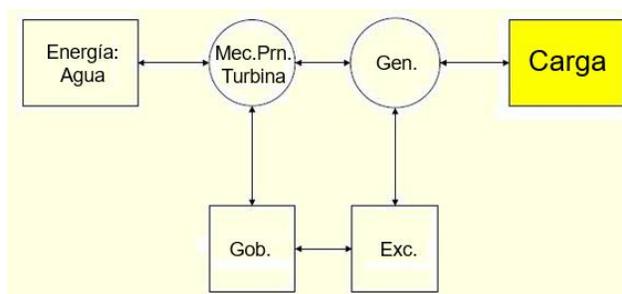
Nota: En la ilustración se puede apreciar la intervención del regulador de velocidad (LFC) y el regulador automático de tensión (AVR) tomado de, (Vanfretti Fumagalli, 2005)

2.3.2. Sistema de Regulación de Velocidad

La respuesta de los generadores a los cambios de carga (o de velocidad) está determinada básicamente por el regulador de velocidad. Esquemáticamente, un regulador de velocidad estará compuesto por un sensor o sistema de medida (tacómetro, acelerómetro), que detecta las variaciones de velocidad y aceleración; un servomecanismo, capaz de transformar la señal del sistema de medida en la formidable acción de variar la admisión de la turbina; y los órganos de regulación (válvulas, álabes, deflectores, etcétera), que efectivamente realizan ese trabajo. A ellos debe agregarse normalmente un dispositivo de amortiguación, que aminore las oscilaciones del esquema. (Brokering & Palma, 2018)

Figura 13

Esquema de canales de control de un generador



Nota: En la ilustración se observa en un diagrama de bloques los controles de un generador, tomado de (Lopez de Leon, 2019)

Cuando un generador alimenta una carga, la frecuencia es controlada mediante el sistema regulador de velocidad de acuerdo a su característica de regulación. En un sistema en que varias unidades de generación están operando y se produce una variación de carga, ésta es repartida entre todos los generadores, de acuerdo a las características de cada regulador, donde aquellos generadores cuyos reguladores tienen una característica con menor pendiente son los que toman más carga; cuando se produce un incremento de carga, el sistema adquiere una frecuencia final menor que la que tenía antes de producirse el cambio. (Delgado Montenegro, 1997)

Un sistema eléctrico de potencia es más eficiente cuando sus centrales trabajan muy cerca de su capacidad nominal por más tiempo y no cuando lo hacen solamente por cortos períodos o durante las horas pico. Las desviaciones de la frecuencia serán pequeñas cuanto más eficiente o rápido sea el suministro o retiro de potencia generada según se demande un incremento o decremento de carga. Por tanto, el incremento o decremento en la frecuencia debido a las variaciones de carga son asumidas por el regulador de velocidad suministrando menor o mayor potencia mecánica, esto se determina como la acción primaria del regulador, mientras que la acción secundaria del

regulador restablece la frecuencia inicial del sistema. El control del regulador de velocidad responde automáticamente a señales de operación, y mantiene el equilibrio generación – carga.

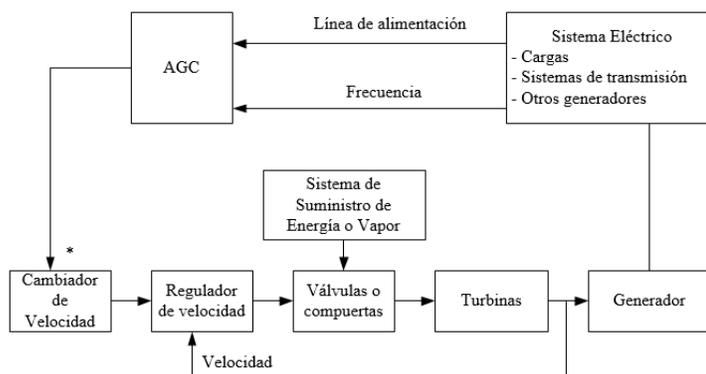
2.3.3. Regulación de Velocidad en Turbinas Hidráulicas

El control de velocidad se enfoca en la realimentación del error de velocidad para generar una acción de control que actúa sobre la posición de la compuerta, de esta manera se logra un control efectivo de la velocidad y/o carga. (Patiño Paucar, 2019)

Para lograr mantener una operación confiable y paralela de múltiples unidades o máquinas, los reguladores de velocidad están conformados por una característica de estatismo de estado estacionario (estatismo permanente). Típicamente, los de estatismo de estado estacionario se ajustan alrededor de 5%. Una desviación de velocidad del 5% provoca un cambio de 100% en la posición de la compuerta o en la potencia de salida y esto a su vez corresponde a una ganancia igual a 20. (Patiño Paucar, 2019)

Figura 14

Diagrama de bloque sistema de generación de potencia y control.



* AGC aplicado solo a las unidades seleccionadas

Nota: En la Figura se puede apreciar de las diferentes fuentes de energía que emplean turbinas en su funcionamiento y los principales sistemas para realizar el control de velocidad y frecuencia, tomado de (Kundur, 1994)

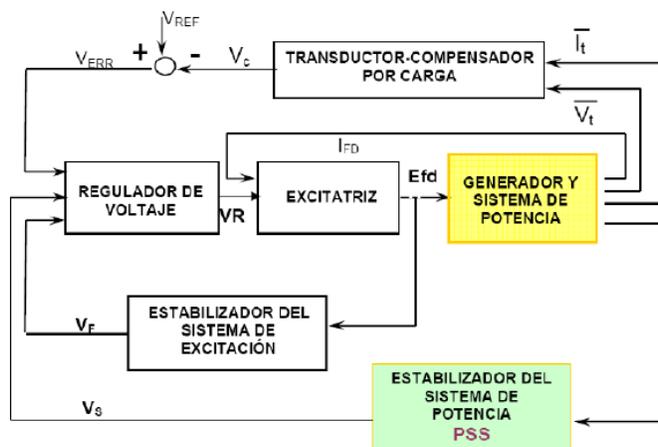
2.3.4. Sistema de excitación en Generadores

Describe (Catari Ramos & Miranda Ordoñez, 2009), “encargado de contribuir al control efectivo del voltaje y a mejorar la estabilidad del sistema”, posee la capacidad de corregir en un tiempo ante una perturbación, y de esta manera mejorar la estabilidad transitoria del sistema ajustando el voltaje de campo del generador. Existen diferentes tipos de sistemas de excitación, los cuales pueden ser clasificados dentro de las siguientes categorías:

- Sistema de excitación de corriente continua.
- Sistemas de excitación de corriente alterna con rectificadores giratorios (sin escobillas, “brushless”).
- Sistemas de excitación con rectificadores estáticos.

Figura 15

Esquema General de un Regulador Automático de Voltaje



Nota: En el diagrama de bloques se muestra las señales que interviene en el regulador automático de voltaje, tomado de (Arias Reyes, 2020)

Los sistemas de excitación en su mayoría están conformados por un generador de corriente continua accionado mecánicamente por la turbina y que se encuentra acoplado al eje del generador, también existen los modernos cuyo principio de funcionamiento se basa en rectificadores de estado sólido.

2.3.5. Excitatriz rotativa

Su funcionamiento se basa en la rotación de un generador auxiliar accionado por el eje de acoplamiento entre la turbina y el generador de esta manera aprovechando la fuente de energía primaria. (Arias Calle & Bravo López, 2016)

El sistema de excitación de corriente alterna utilizan alternadores para la alimentación de corriente al devanado de campo, la salida de los alternadores es convertida en corriente continua mediante la utilización de diodos rectificadores que pueden ser estacionarios o rotativos.

a. Excitatriz de diodos rotativos sin escobillas (*Brushless*)

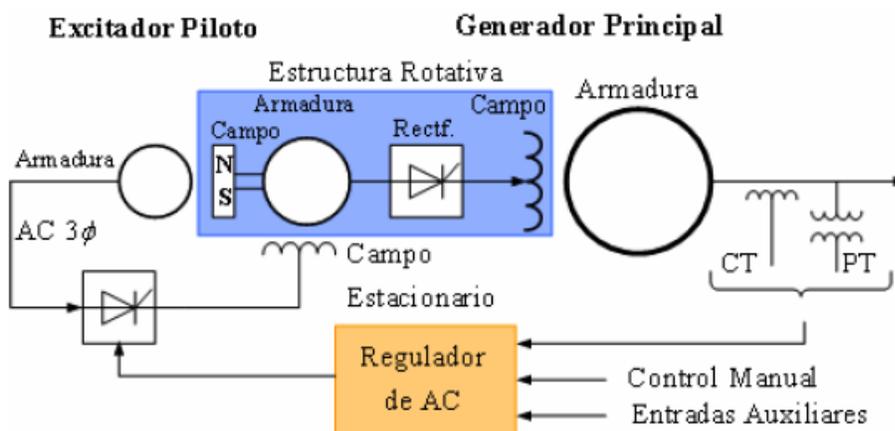
Sistema de excitación que elimina el uso de anillos rozantes y escobillas, la corriente continua que alimenta al devanado de campo llega directamente al generador, para este modelo la armadura del excitador y los diodos rectificadores, giran conjuntamente con el rotor del generador.

En la Figura 16 muestra un esquema general del sistema de excitación de diodos rotativos sin escobillas. Su funcionamiento depende de un excitador piloto, el cual tiene un rotor de imanes permanentes, el mismo rota con la armadura de la excitatriz de corriente alterna y los rectificadores para proveer de corriente al devanado estacionario de excitador de corriente alterna, por ende, la salida del rectificadora del excitador piloto

energiza el campo estacionario del excitador de corriente alterna, su acoplamiento entre las componentes estacionarias y rotativas es electromagnético. (Vanfretti Fumagalli, 2005)

Figura 16

Sistema de excitación de diodos rotativos sin escobillas



Nota: Ilustración del sistema de excitación de diodos rotativos, tomado de (Arias Calle & Bravo López, 2016)

Los problemas de tensión se corrigen localmente, ya que las medidas a llevar a cabo tienen alcance fundamentalmente local, este tipo de control es automático y tienen un tiempo de actuación del orden de segundos (lento) mediante la conexión o desconexión de reactores/capacitores shunt.

2.3.6. Matlab – Simulink

MATLAB (Matrix Laboratory) es una herramienta sofisticada computacional para aplicaciones numéricas, simbólicas y gráficas y contiene una gran cantidad de funciones predefinidas para aplicaciones en ciencias e ingeniería entre una de ellas Simulink.

Simulink es una herramienta de diseño visual en el entorno computacional de Matlab, que facilita los sistemas basados en bloques, provee un entorno de diseño gráfico para la simulación de sistemas continuos discretos e híbridos. (Bowen, 2020)

a. Simscape

Los bloques de Simulink representan operaciones matemáticas básicas, la tecnología Simscape le permite crear una representación de red del sistema bajo diseño, basado en el enfoque de red física. De acuerdo con este enfoque, cada sistema es representado como compuesto por elementos funcionales que interactúan entre sí mediante el intercambio de energía a través de sus puertos. (MathWorks, 2020)

2.3.7. Descripción General de la Central Illuchi N°2

b. Historia

La Central Illuchi N°1, entra en operación en el año 1979, cuya capacidad es de 1.400 kW obra que contempla aprovechar los caudales de agua de las Lagunas Piscacocha y Salayambo y las captaciones de las acequias Retamales, Ashpacocha y Dragones bajo la dirección de Sistema Eléctrico Latacunga. El 1 de febrero de 1984 fue constituida la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi S.A. siendo sus accionistas INECEL y los ilustres Municipios de Latacunga, Salcedo, Pujilí y Saquisilí.

En el mes de marzo de 1987 se inicia la construcción de la ampliación de las Centrales Hidráulicas de Illuchi N°2, esta ampliación tiene 5.200 kW. Conformado en dos grupos a la fecha que inicio su funcionamiento, en el mes de diciembre de 1987. (Bedoya Berrazueta, 2004)

c. Ubicación

La Central Hidráulica Illuchi N°2 está ubicada en la provincia de Cotopaxi, Parroquia Juan Montalvo, barrio Saragosín a unos 9 Km en la ciudad de Latacunga, las

coordenadas geográficas de la casa de máquina son Este: 772916,60 Norte: 9896516,69 a una altitud de 3000msnm aproximadamente.

Figura 17

Ubicación geográfica de la Central Illuchi N°2



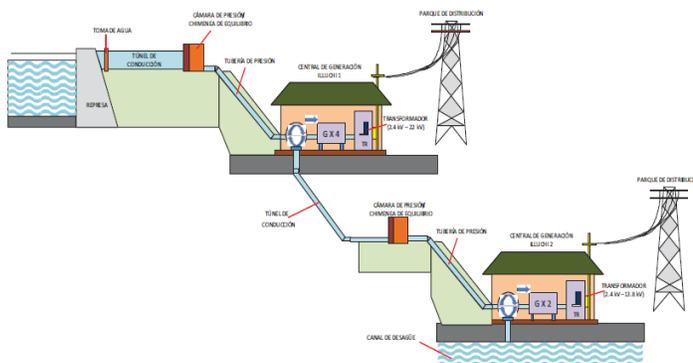
Nota: Ilustración de la ubicación de la central Illuchi N°2, mediante la aplicación Maps.

d. Especificación General de las Unidades de Generación

La Central Hidroeléctrica Illuchi N°2, cuenta con 2 generadores Brown Boveri de origen suizo, cuyas características son idénticas. Esta central utiliza el agua turbinada que sale de la Central Hidroeléctrica Illuchi N°1 para producir energía eléctrica; esto con el fin de aprovechar la energía potencial del agua. (Calero Freire, 2007)

Figura 18

Esquema General Centrales Hidroeléctricas Illuchi 1 e Illuchi 2



Nota: Ilustración de la distribución de las centrales Illuchi N°1 e Illuchi N°2 tomado de (Llamba Farinango, 2014)

2.3.8. Estándar IEEE Std 1147TM – 1901

El estándar IEEE Std 1147-1901, Guide for the Rehabilitation of Hydroelectric Power Plants, describe que los propietarios de las centrales hidroeléctricas tienen cuatro opciones a considerar después de evaluar el desempeño y operación de plantas y unidades individuales en la planta. Entre ellas la rehabilitación que enfatiza en un mejor rendimiento, mayor confiabilidad, menor mantenimiento y mejores operaciones. (IEEE, Guide for the Rehabilitation of Hydroelectric Power Plants, 1991)

Condiciones generales de rehabilitación:

- 1) Disminución de la disponibilidad de la unidad
- 2) Potencial para mejorar el rendimiento.
- 3) Cambios en las condiciones de operación de la planta o unidad.
- 4) Oportunidad para la automatización de plantas
- 5) Capacidad de salida reducidas
- 6) Falla de equipo principal
- 7) Incapacidad para resistir los efectos de las fuerzas sísmicas durante los terremotos.

Para el caso de estudio de la presente investigación, se fundamenta en el literal cuarto, ante una posible Oportunidad para la automatización de plantas.

2.3.9. Estándar IEEE Std 125TM – 2007

El estándar IEEE Recommended Practice for Preparation of Equipment Specifications for Speed-Governing of Hydraulic Turbines Intended to Drive Electric Generators, proporciona recomendaciones de características en los rendimientos y

especificaciones de turbinas, sistema gobernador para el control en centrales hidroeléctricas, esta norma debe utilizarse en conjunto con los IEEE Std 1207, respecto a la operación del gobernador, el sistema de control del gobernador debe suministrarse como un sistema completo, incluyendo sensores de velocidad, gabinete de control, válvula de control hidráulico del gobernador, sistema de suministro de presión hidráulica y todas las piezas y accesorios necesarios para controlar la velocidad de la unidad. (IEEE, Recommended Practice for Preparation of Equipment Specifications for Speed-Governing of Hydraulic Turbines Intended to Drive Electric Generators, 2007)

2.3.10. Estándar IEEE Std 1207

Describe el estándar IEEE Guide for the Application of Turbine Governing Systems for Hydroelectric Generating Units, detalles sobre la aplicación del sistema gobierno en turbinas para generación hidroeléctrica, menciona conceptos de la caída de velocidad permanente y regulación de velocidad entre otros. El sistema de suministro de presión hidráulica encargado de controlar las bombas de presión. (IEEE, IEEE Guide for the Application of Turbine Governing Systems for Hydroelectric Generating Units, 2011)

2.3.11. Estándar IEEE 421.1

El estándar IEEE Standard Definitions for Excitation Systems for Synchronous Machines, menciona los componentes de uso común en sistemas de excitación aplicados a máquinas síncronas, diagramas que ayude a entender la configuración de los AVR en sus diferentes configuraciones además de incluye terminología relacionada a los sistemas de control de excitación. (IEEE, Standard Definitions for Excitation Systems for Synchronous Machines, 2007)

2.3.12. Estándar Std IEEE 421.5

En el estándar IEEE Recommendes Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, muestra los modelos de excitación adecuados para su

uso en estudios de estabilidad, se clasifican según la fuente de energía de excitación DC, AC y de tipo estático ST, en total son 12 modelos estandarizados en diagrama de bloques para representar la gran variedad de sistemas de excitación. Para el caso en estudio se detalla el modelo AC1A, los modelos de orden reducido son válidos para desviaciones de frecuencia de $\pm 5\%$ de la frecuencia nominal y frecuencia de oscilación hasta 3Hz. Los datos típicos para cada una de las constantes se encuentran en sección anexos. (IEEE, Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, 2005)

a. Modelo de sistema de excitación AC1A

El modelo de excitador tipo AC1A, representa un sistema de excitación de alternador controlado en campo con rectificadores no controlados y es aplicable a sistemas de excitación sin escobillas. (Kundur, 1994)

2.3.13. Estándar IEEE Modelo Dinámico Hidroturbina

El estándar IEEE Hydraulic Turbine and Control Models for System Dynamic Studies, describe los modelos básicos para turbinas y sistemas reguladores de velocidad para estudios de estabilidad de sistemas eléctricos, anexa parámetros típicos para estudiar su comportamiento. (IEEE, Hydraulic Turbine and Turbine Control Models for Systems Dynamic Studies, 1992)

2.4. Fundamentación Legal

El artículo 15 de la Constitución de la República del Ecuador señala que corresponde al Estado promover, en el sector público y privado, el uso de tecnologías ambientales limpias y de energías alternativas no contaminantes y de bajo impacto, así como que la soberanía energética no se alcanzará en detrimento de la soberanía alimentaria, ni afectará el derecho al agua; (Constituyente, 2008)

El numeral 2 del artículo 9 del Código Orgánico del Ambiente, reconoce como principio ambiental de obligatoria incorporación de mejores prácticas ambientales en todas las decisiones y manifestaciones de la administración pública, que incluye promover la implementación de mejores prácticas en la producción y el consumo sostenible de bienes y servicios, con el fin de evitar o reducir la contaminación y optimizar el uso del recurso natural. (Ministerio del Ambiente, 2017)

El Reglamento a la Ley de Régimen del Sector Eléctrico art. 45.- obligaciones de los concesionarios. - Las compañías concesionarias de la actividad de generación, y de los servicios públicos de transmisión y distribución y comercialización estarán obligadas: b) Conservar y mantener sus obras e instalaciones en condiciones adecuadas para su operación segura y eficiente de acuerdo con la ley, reglamentos y contratos de concesión. (CELEC, 2011)

Dentro de las Políticas Institucionales de la Empresa manifiestan “Modernizar y tecnificar mermando el impacto ambiental” que se refiere a generar una mejor imagen a través de los resultados, los cuales permitan crecer como institución, mantenimiento de prácticas orientadas al servicio. Minimizar el impacto ambiental modernizando los equipos tecnológicos para entregar una energía limpia a través de la implementación de sistemas eficaces, oportunos y óptimos que mejoren la generación, transmisión, distribución y comercialización de la misma. (ELEPCOSA, 2019)

Por lo tanto, la ejecución del proyecto se encuentra bajo cumplimiento de las políticas institucionales de la empresa.

2.5. Sistema de Variables

Variable Independiente: Desarrollo del estudio de los sistemas de regulación y voltaje de la Central Hidroeléctrica Illuchi N°2.

Variable Dependiente: Propuesta de automatización de los sistemas de regulación de velocidad y voltaje, bajo un análisis técnico – económico.

2.6. Hipótesis

Mediante el estudio de los sistemas de regulación de velocidad y voltaje actuales de la Central Hidroeléctrica Illuchi N°2, se determinará la factibilidad de automatizar los sistemas con la obtención de datos en tiempo real, la cual podrá ser visualizado y analizado.

2.7. Cuadro de operacionalización de las variables

Tabla 1

Operacionalización de las Variables.

Variables	Definición Conceptual	Definición Operacional		Instrumento
		Dimensiones	Indicadores	
<p>Variable Independiente: Desarrollo del estudio de los sistemas de regulación de velocidad y voltaje de la Central Hidroeléctrica Illuchi N°2</p>	<p>El desarrollo del estudio de los sistemas de regulación de velocidad y voltaje de la Central Hidroeléctrica Illuchi N°2, permite conocer las especificaciones técnicas a detalle de los equipos e instrumentos necesarios para la modernización.</p>	<p>Modelamiento de los sistemas de regulación de velocidad y voltaje</p>	<p>Parámetros eléctricos de los reguladores</p>	<p>Tabla de datos</p>
<p>Variable Dependiente: Propuesta de automatización de los sistemas de regulación de velocidad y voltaje, de los sistemas de regulación de velocidad y voltaje, bajo un análisis técnico – económico.</p>	<p>La propuesta de automatización de los sistemas de regulación de velocidad y voltaje, permitirá estimar un presupuesto de inversión que debe realizar la empresa.</p>	<p>Factibilidad económica</p>	<p>Análisis financiero.</p>	<p>Tabla de datos. Presupuesto de inversión.</p>

CAPÍTULO III

3. Metodología

3.1. Modalidad de investigación

El presente trabajo de titulación fundamenta su desarrollo en un estudio de factibilidad para proponer un nuevo sistema de regulación de velocidad y voltaje en la Central Hidroeléctrica Illuchi 2 de la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi, mediante un modelamiento en el software Matlab – Simulink que permitirá mejorar el control potencia-frecuencia, y el control de flujo de potencia reactiva.

3.1.1. *Método Documental Bibliográfico*

El proyecto inicialmente se plantea con la mayor cantidad de recolección de fundamentos teóricos y conceptuales, se emplea material bibliográfico como textos del área de interés, obtenidos de repositorios institucionales oficiales, folletos y manuales facilitados por ELEPCO S.A. para la adecuada selección de componentes que se tomara en cuenta para la posible modernización.

3.1.2. *Método Inductivo - Deductivo*

Método utilizado al diseñar el modelo mediante el software Matlab - Simulink, de los sistemas de regulación de velocidad y voltaje, que permita la comprobación de la hipótesis, y obtener los datos de su comportamiento.

3.2. Tipos de Investigación

3.2.1. *Investigación Cuantitativa*

El método cuantitativo permite utilizar variables medibles, es decir su valor se puede expresar en magnitud y unidades correspondientes, para la investigación los valores de voltaje, tiempos de actuación de los reguladores, potencias, valores de corriente, entre otros. Este tipo de investigación permite el modelamiento e

interpretación de la información para determinar el comportamiento de los reguladores y de esta manera verificar la hipótesis.

3.2.2. Investigación de Campo

Para la recolección de datos se toma en el sitio de las unidades de generación, esto permitirá tener evidencia de la realidad y poseer un respaldo de la información levantada en sitio.

3.2.3. Investigación Descriptiva

Busca especificar las propiedades de objetos o instrumentos, para la investigación permite describir las especificaciones técnicas de los equipos e instrumentos que se necesita para la modernización del sistema de regulación y voltaje.

3.3. Diseño de la Investigación

Por medio del estudio de factibilidad que contempla los requerimientos de ingeniería necesarios, modelamiento de los sistemas de regulación de las unidades de generación que permita conocer ciertos parámetros técnicos de los equipos a modernizar se determina la factibilidad mediante el análisis técnico - económico.

3.4. Niveles de la Investigación

3.4.1. Exploratoria

Nivel de investigación más sencillo, en el cual permite establecer prioridades; en la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi S.A. en la Central Hidroeléctrica Illuchi N°2, se necesita elaborar una propuesta para la modernización de los sistemas de regulación.

3.5. Técnicas de Recolección de Datos

Para la recolección de datos, se obtiene información a partir de diversas fuentes, documentos que contienen datos actualizados. Existen dos tipos de fuentes como son

las primarias y secundarias en donde se hallan publicaciones de libros, revistas e informes técnicos.

3.5.1. Observación

Técnica que permite un registro sistemático, válido y confiable de comportamientos y situaciones observables; admite tomar los valores adecuados para el modelamiento, conocer cómo funcionan los sistemas de regulación existentes.

3.5.2. Variables cuantitativas

Consta de la selección de información técnica correspondiente a los sistemas en estudio, para el desarrollo de la investigación se utiliza las características eléctricas de los generadores, turbina y reguladores.

3.5.3. Validez y confiabilidad

Para la validez de los resultados, los datos se obtienen para realizar el modelamiento y estudios previos, informes de gestión y de la situación actual de las unidades de generación de la Central Illuchi N°2, los mismos que son proporcionados por el Departamento de Generación de la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi S.A.

3.6. Técnicas de Análisis de Datos

El análisis de los datos se ejecutará de manera que se ingresen en el modelamiento para conocer su comportamiento con respecto a su rendimiento y mejora del factor de disponibilidad; entendiendo disponibilidad como la potencia efectiva disponible durante un periodo de tiempo determinado y de esta manera obtener gráficas mediante herramientas del software que ayuda a formular las conclusiones.

3.6.1. Simulación

Con la simulación se logra entender las condiciones de operación de los reguladores de velocidad y voltaje para su posterior análisis y determinar la factibilidad de modernizar dichos reguladores de la unidad generadora.

3.7. Técnicas de comprobación de hipótesis

3.7.1. Comprobación cuantitativa

El estudio de los sistemas de regulación por medio un análisis técnico y modelamiento permite conocer los nuevos parámetros de control que adoptará la central y a su vez determinará su factibilidad de la modernización, además de realizar un análisis económico de los costos de inversión por parte de ELEPCO S.A.

CAPÍTULO IV

4. Resultados de la investigación

4.1. Análisis de los resultados

4.1.1. *Análisis Técnico de la Central Illuchi N°2.*

La Central Hidroeléctrica Illuchi N°2, se considera como una central de paso en cascada y de presión baja, debido al caudal que recibe es relativamente bajo en comparación a otras centrales del país.

Actualmente la energía media anual aportada por la central Illuchi N°2 es 26.037 MWh y representa el 42,6% del total energía de las centrales de generación de ELEPCO S.A.

El factor de planta promedio de la central de los últimos años ha sido el 0,61% de funcionamiento.

4.1.2. *Descripción de la Obra Civil Central Illuchi N°2*

Las construcciones que conforman la central se detallan a continuación:

a. Canal de Conducción

El agua turbina que sale de la Central Illuchi N°1, es transportada a través del canal de conducción con el fin de aprovechar la energía potencial del agua, mismo que ayuda a limitar el paso de impurezas, sólidos suspendidos como ramas, hojas y piedras en una longitud aproximada de un kilómetro. Se puede observar que no existe ningún tipo de fuga en el canal.

b. Tanque de Presión

El tanque de presión construido en hormigón en el cual se realiza la limpieza de maleza, los residuos en su mayoría son hierbas de páramo.

c. Tubería de presión

Las tuberías de presión encargadas de conducir el recurso hídrico desde el tanque de presión hacia las turbinas, transformando así la energía potencial del agua en energía cinética y finalmente a través del generador de energía eléctrica.

Poseen una longitud total de 1723m, 508.8 a 558 mm de diámetro exterior, espesor variable de 5 a 12 mm aproximadamente, para una caída bruta de 356m, las tuberías de presión están construidas dentro de un canal al cual sostiene una estructura de hormigón armado para asegurar la estabilidad del mismo.

d. Casa de máquinas

La casa de máquinas es la obra civil más grande en su interior en donde se alberga las unidades de generación, los elementos de control de velocidad y demás equipos eléctricos, en los que los principales equipos son de gran magnitud y peso, es por ello que cuenta con un puente grúa con un teque de 15 Tn de capacidad necesario para realizar los mantenimientos.

e. Subestación de elevación

En los exteriores de la central se ubica una pequeña subestación que ocupa un área de 100 m² encargada de elevar el voltaje a la salida de los generadores de 2400V a 13800V, con una configuración de barra simple de la cual sale un circuito primario hacia la subestación El Calvario en la ciudad de Latacunga.

4.1.3. Descripción de equipos de la Central Illuchi N°2

a. Generador eléctrico

La central hidroeléctrica Illuchi N°2, cuenta con dos generadores, encargados de transformar la energía mecánica proporcionados por las turbinas en energía eléctrica, su velocidad es directamente proporcional a la frecuencia de la red e inversamente

proporcional al número de polos. En la Figura 19 se muestra el generador de la unidad N°1.

Los generadores de 10 polos, tienen una capacidad de 2600 kW cada uno. En la Tabla 2, se muestra los datos de placa del generador de polos salientes.

Figura 19

Generador de la Unidad de Generación N°1.



Nota: Fotografía en sitio de la unidad de generación N°1, Central Illuchi N°2.

Tabla 2

Datos de Placa del Generador Síncrono

GENERADOR SÍNCRONO	
Marca:	Brown Boveri
Tipo:	WA 111-63-10
Potencia:	3250 kVA
Velocidad:	720/1274 rpm
Voltaje:	Stat.: 2400 V \pm 5%
	Rot.: 80 V
Corriente:	Stat.: 781,8 A
	Rot.: 345 A

GENERADOR SÍNCRONO	
Factor de Potencia:	0,8
Frecuencia:	60 Hz

Nota: Datos de placa del fabricante Brown Boveri de la Unidad de generación N°1, Central Illuchi N°2.

b. Turbina

La turbina tiene como objetivo el transformar la energía potencial del agua en energía mecánica (rotacional) dentro de la misma; las turbinas instaladas en la central Illuchi N°2 es de tipo Pelton de 2 chorros, instalado con su eje en posición horizontal, los valores característicos de operación se muestran en la Tabla 3.

Figura 20

Turbina Pelton



Nota: Fotografía en sitio de la turbina Pelton de la Central Illuchi N°2.

Tabla 3

Características de la Turbina

TURBINA	
Marca:	Bell – Kriens Suiza
Año de fabricación:	1979

TURBINA	
Tipo:	Pelton eje horizontal, un inyector + deflector
Caída:	327 m
Caudal:	0,95 m ³ /s
Potencia:	2675 kW
Velocidad:	720 rpm
Velocidad Embalamiento.:	1320 rpm

Nota: Datos de placa de la turbina de la unidad 2, fabricante Bell – Kriens Suiza.

c. Regulador de velocidad

Sistema de control creado para mantener la velocidad de la turbina constante y de esa forma mantener el nivel de potencia a la salida del generador, el regulador recibe un valor de velocidad referencial y se realiza la comparación con la velocidad instantánea del eje de la máquina, según sea la diferencia existente entre las velocidades, el regulador actúa ya sea incrementando el flujo de recurso hídrico para aumentar la velocidad o al contrario reduciendo el flujo para disminuir la velocidad. (IEEE, IEEE Guide for the Application of Turbine Governing Systems for Hydroelectric Generating Units, 2011)

En la Figura 21 se muestra el regulador de velocidad de la unidad de generación N°1.

Figura 21

Regulador de velocidad.



Nota: Fotografía tomada en sitio del regulador de velocidad de Unidad de generación N°1, Central Illuchi N°2.

El regulador de velocidad que posee la central es del tipo volante de masas giratorias o regulador centrífugo se encuentra accionado por una correa que une el eje principal del generador con el regulador, el sensor de velocidad envía las ordenes al elemento de control o mando que posee las características de estatismo de la máquina y es el encargado de transmitir la fuerza a la válvula piloto.

La fuerza que emite el elemento de control se la transporta a través de la válvula piloto que tiene un principio de pistón de doble efecto para la amplificación de la fuerza. Por último, el servomotor se encarga directamente de la apertura o cierre de las agujas para el flujo de agua que se inyecta a las turbinas.

Tabla 4*Características del 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
Carrera del servomotor	120 mm
Volumen embolada	1,74 lts
Tiempo de cierre mínimo:	1 sg.
Tiempo de apertura:	7 sg.
Ángulo de giro de los ejes del regulador:	50 grados
Presión del aceite:	15 kP/cm^2
Revoluciones de entrada:	1200 rpm
Potencia Necesaria (sin bomba adicional):	1.5 KW
Llenado de aceite (viscosidad 4.5 – 6.5E):	75 lts
Aceite con caja adicional:	150 lts
Peso neto:	785 kg
Peso neto con caja adicional:	1100 kg
Calibración:	Manual

Nota: Datos de placa del fabricante Bell Kriens -Schweiz. de la Unidad de generación N°1, Central Illuchi N°2.

d. Excitatriz

Los datos de placa de la excitatriz de diodos rotóricos se muestra en la Tabla 5, involucra una tecnología que elimina el uso de anillos rozantes y escobillas, en este caso el inductor se encuentra en el estator y el inducido en el rotor del alternador, a la

salida del inducido se acoplan los diodos que rectifican la corriente que luego van a los polos del generador. (Kundur, 1994)

En la Figura 22 se muestra la excitatriz del generador N°1 de la Central Illuchi N°2.

Figura 22

Fotografía de la excitatriz de la Unidad de Generación N°1.



Nota: Unidad de generación N°1, Central Illuchi N°2.

Tabla 5

Características de la Excitatriz de Diodos Rotóricos

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

EXCITATRIZ A DIODOS ROTORICOS

Masa total: 715 kg

Nota: Datos de placa del fabricante Brown Boveri de la Unidad de generación N°1, Central Illuchi N°2.

e. Válvula de Guardia

Tabla 6

Características de la Válvula de Guardia

VÁLVULA DE GUARDIA

Marca:	Bell
Diámetro interior:	400 mm
Accionamiento:	Manual

Nota: Datos de placa del fabricante Bell de la Unidad de generación N°1, Central Illuchi N°2.

f. Transformador de servicios auxiliares

Necesario para suministrar energía a los sistemas de iluminación, tableros de control, equipos de protección, cargadores del banco de baterías, puente grúa y demás equipos de la central y sus características se muestran en la

Tabla 7

Características del Transformador de SSAA.

TRANSFORMADOR DE SSAA

Marca:	Brown Boveri
Año de fabricación:	1979
Potencia:	100 kVA
Frecuencia:	60 Hz

TRANSFORMADOR DE SSAA

Grupo de conexión:	Dy5
Relación de transformación:	203-133 / 2400V (Posición 5)
Impedancia de corto Circuito	3,64%

Nota: Datos de placa del fabricante Brown Boveri de la Unidad de generación N°1, Central Illuchi N°2.

g. Banco de baterías

Para el arranque del generador, después de una parada emergente o parada obligatoria se necesita de energía eléctrica la cual suministra el banco de baterías permitiendo así el disparo de los relés de arranque. Existe un banco de 60 celdas y 200Ah de gel lo que implica que no se requiere mantenimiento, además, posee un cargador rectificador de 50Ah y su ubicación se encuentra en la sala de servicios auxiliares.

h. Transformador de elevación

El transformador se encarga de elevar la tensión de generación, hasta una tensión de transmisión de 2400 V a 13800 V en régimen de corriente alterna

Tabla 8

Características del Transformador de Elevación

TRANSFORMADOR DE ELEVACIÓN

Marca:	Brown Boveri
Año de fabricación:	1979
Potencia:	6500 kVA
Frecuencia:	60 Hz
Grupo de conexión:	Yd5
Relación de	2400 / 13800 V TAP (Posición 3)

TRANSFORMADOR DE ELEVACIÓN	
transformación:	
Impedancia de corto Circuito	8,43%

Nota: Datos de placa del fabricante Brown Boveri.

i. Tableros de protección y control

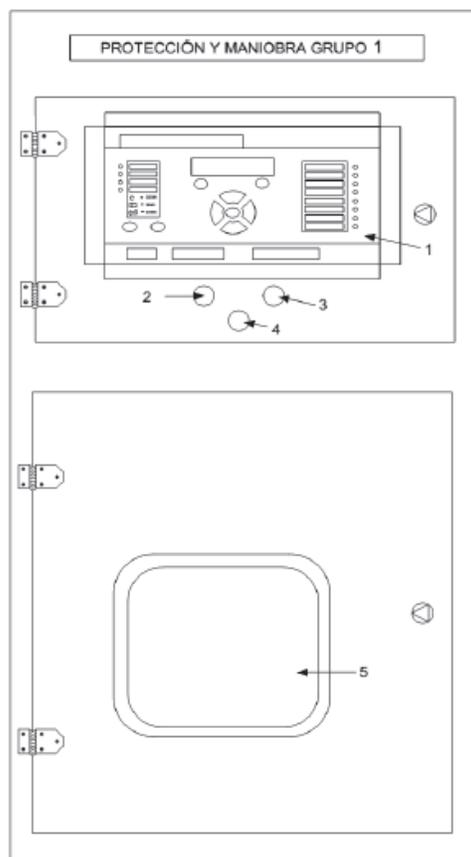
Los tableros de protección, maniobra y control existentes en la central se hallan en la casa de máquinas, y son alimentados desde el transformador de servicios auxiliares.

Tabla 9

Descripción del tablero de protección y maniobra

Número	Descripción
1	Relé MiCOM P343
2	Luz indicadora DISYUNTOR CERRADO
3	Luz indicadora DISYUNTOR ABIERTO
4	Pulsador
5	Interruptor VD4 17.12.16

Nota: En la tabla se observa la identificación de la numeración del tablero de protección

Figura 23*Tablero de protección y maniobra*

Nota: Ilustración del tablero de protección, tomado de (Calvopiña Valle & Maita Sánchez, 2016)

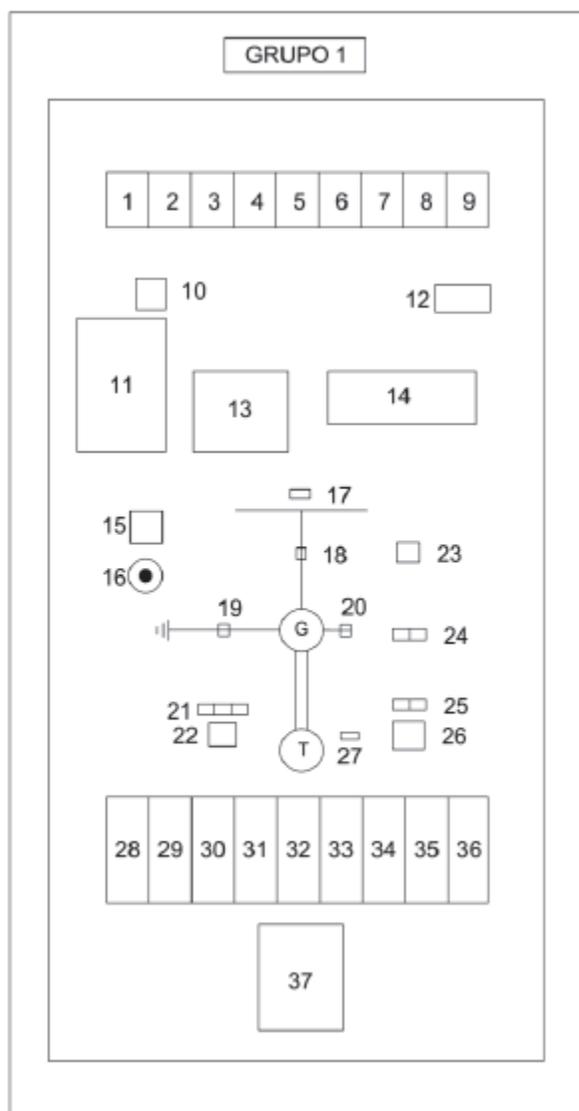
Cada tablero está conformado por elementos que se describen a continuación:

Tabla 10*Descripción del tablero de protección y maniobra*

Número	Descripción	Número	Descripción
1	Voltímetro	21	Pulsadores de arranque
2	Amperímetro 1	22	Limitador de abertura
3	Amperímetro 2	23	Sincronizar Abrir/Auto/Prueba

Número	Descripción	Número	Descripción
4	Amperímetro 3	24	Voltaje + / Voltaje -
5	Vatímetro	25	Marcha en vacío / Plena carga
6	Cosfímetro	26	Variador velocidad de carga
7	Frecuencímetro	27	Turbina lista para el arranque
8	Amperímetro 4	28	F7P Diferencial
9	Temperatura Unidad 1 – 2	29	Switch de Válvula de emergencia / Interrupción de campo
10	Cambiador de fases (medición)	30	F9 Prot. Frecuencia
11	Medidor de energía	31	F10 Prot. Sobrecorriente
12	Mebstelle Metrawatt	32	F11 Prot. Sobrecorriente
13	VA r Unitrol	33	P 12 Prot. Sobrecarga
14	Bornera de pulsadores de verificación	34	P 29 Min voltaje
15	Voltaje + / Voltaje – manual/ automático	35	P 30 Prot. De tierra estator
16	Pulsador cierre de emergencia	36	P 33 Max. Voltaje
17	Listo para sincronizar	37	Medidor de energía
18	52L –G1		
19	Posición de contactor a la tierra del neutro		
20	Conmutador de mando de excitación		

Nota: En la tabla se indica la descripción de los controles del tablero de protección y maniobra

Figura 24*Tablero de control*

Nota: Ilustración del tablero de protección.

4.2. Discusión de los resultados

La central Illuchi N°2 cuenta con una obra civil en un estado muy bueno, garantizando la generación de energía eléctrica y el bienestar de los trabajadores que operan la central, desde el canal de conducción se puede apreciar que no existe fugas hasta desembocar en el tanque de presión que se encuentra en buen estado,

continuando el trayecto del recurso hídrico, ingresa a las tuberías de presión de 1723 m de longitud hasta llegar a la casa de máquinas que al observar se encuentra en estado aceptable.

Respecto a los equipos existentes, al presentar un respaldo de los datos de placa, el estado de los equipos de la Central Illuchi N°2, se puede evidenciar que con el paso del tiempo han sufrido deterioro no significativo por lo cual la mayoría de equipos aún se encuentran operando, y al considerar el tema de estudio de los reguladores de velocidad y voltaje de las unidades se encuentran cumpliendo su función a los rangos establecidos, sin embargo, los tiempos de respuesta pueden mejorar en función a las nuevas tecnologías existentes que ayudan a mejorar el rendimiento de la máquina.

CAPÍTULO V

5. Propuesta

5.1. Datos Informativos

- **Institución:** Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi S.A.
- **Objeto de estudio:** Reguladores de velocidad y voltaje de las Unidades de Generación Central Hidroeléctrica Illuchi N°2.
- **Ubicación:** Provincia de Cotopaxi, Parroquia Juan Montalvo, barrio Saragosín a unos 9 Km en la ciudad de Latacunga.
- **Beneficiario:** Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi S.A.

5.2. Antecedentes de la propuesta

La Central Hidroeléctrica Illuchi N°2, posee una tecnología del año 1979 y entro en operación desde hace unos 30 años aproximadamente; es la segunda central de una configuración en cascada que inicia con la central Illuchi N°1 aguas arriba. Tiene una capacidad nominal en generación de 6500 KVA y una potencia efectiva de 5200 KW esta central se encuentra conformado por dos unidades hidrogeneradoras, cuyas turbinas funcionan con un caudal de 950 lts/seg y una caída de 300 metros. El nivel de voltaje de los generadores es de 2450 voltios y para efectos de transmisión, en la subestación de la central, se eleva el voltaje a 13800 voltios mediante un transformador de potencia de 6000 KVA de capacidad nominal.

Respecto a los sistemas de control y mecanismos, estos se encuentran deteriorados y no cuentan con un tablero electrónico de regulador de velocidad y voltaje, el sistema hidráulico con el que cuenta la central es netamente mecánico accionado por perillas y volantes de control manual. El sistema de accionamiento de apertura y cierre de inyectores y deflector está correlacionado por un sistema de palanca y de esta manera no permiten un seguimiento continuo de las variables

asociadas, además presentan baja calidad de regulación en relación a la versatilidad de los reguladores modernos debido muchas veces al desgaste de partes y piezas en movimiento y la fatiga de materiales, que dificultan la óptima operación de la unidad de generación, debido a su antigua tecnología se dificulta la obtención de repuestos para una correcta gestión de mantenimiento.

5.3. Objetivos

5.2.1. 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.

5.2.2. 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.

5.3. Justificación de la propuesta

Actualmente la Central IlluchiN°2 posee los equipos con una tecnología de 1979 y a partir de 1988 que entro en operación viene operando de manera continua, la misma que es prácticamente manual por lo cual depende la habilidad y experiencia de sus operarios, a través de una propuesta alternativa se pretende adaptar un sistema automático al grupo generador antiguo, es decir modernizar los equipos de control, medición y protección de la Central Illuchi N°2 que permita mejorar mediante un proceso

de optimización en donde se obtiene una ganancia de la potencia generada con respecto a la velocidad de respuesta de la máquina.

5.4. Fundamentación de la propuesta

La modernización de una central permite mantenerle en operación con el mayor aprovechamiento del recurso hídrico, así como el mejoramiento en las operaciones en el sistema turbina – generador que será reflejado en la eficiencia de la unidad, a continuación, se describen algunas ventajas de la modernización:

- Eliminar pérdidas de paros forzados
- Reducir los costos de mantenimiento.
- Aumentar la eficiencia de la unidad
- Mitigar los riesgos de daño de la unidad
- Implementar capacidad de control remoto.
- Reducción de tiempo de no generación.

5.4.1. Características de los reguladores electrónicos.

Los reguladores electrónicos permiten incorporar algoritmos de control sofisticados (PID) acorde con las normas IEEE, IEC entre otras.

a. Regulador Digital de Velocidad

La implementación de los reguladores de velocidad automáticos permite tener mayor exactitud en la retroalimentación y a su vez no se ve interrumpida por las restricciones de flujo de agua, estos reguladores son considerados de última tecnología y se encuentra equipado por un regulador de velocidad electrónico y la unidad hidráulica de potencia (HPU), el conjunto de estos componentes permite:

- Control de velocidad y potencia de la máquina.
- Control de flujo o caudal.

- Control remoto de la unidad.

b. Regulador automático de voltaje

El AVR o regulador automático de voltaje actúa sobre la tensión aplicada al campo del generador, con el objetivo de mantener la tensión en bornes del generador en un nivel determinado y controlar la potencia reactiva en función de la demanda fluctuante causada por cambios de carga aleatorios que ocurren en los sistemas de potencia.

Los AVR digitales son utilizados por su amplio rango de funciones a diferencia de los dispositivos analógicos en los cuales permite utilizar sistemas de comunicación, control remoto entre otras.

5.5. Diseño de la propuesta

A continuación, se describe el proceso a seguir para la posible implementación de un sistema automático que ayudara a optimizar la operación de la unidad generadora.

5.5.1. Determinación de parámetros eléctricos y mecánicos

a. Determinación de la Impedancia Base Z_B

Con los datos de placa del grupo de generación de la Central Hidroeléctrica Illuchi N°2 mostrados en la Tabla 2 y la ecuación Ec. (9) se calcula la impedancia base.

$$Z_B = \frac{(kV_B)^2}{MVA_B} \quad \text{Ec. (9)}$$

De los datos de placa del generador se tiene:

$$V_B = 2400 \text{ V}$$

$$S_B = 3250 \text{ kVA}$$

$$Z_B = \frac{(2,4 \text{ kV})^2}{3,25 \text{ MVA}}$$

$$Z_B = 1,772 \Omega$$

b. Determinación de la corriente base I_B

$$I_B = \frac{kVA_B}{\sqrt{3} * kV_B} \quad \text{Ec. (10)}$$

$$I_B = \frac{3250 \text{ kVA}_B}{\sqrt{3} * 2,40 \text{ kV}_B}$$

$$I_B = 781,828 \text{ A}$$

c. Cálculo para el generador de la Central Illuchi N°2

Para facilitar el tratamiento de la información de los parámetros de los generadores de la Central Illuchi N°2, se realiza los cálculos en valores en p.u. y se expresan los resultados obtenidos en valores reales.

$$P_{nom} = \frac{2600}{3250} = 0,8 \text{ p.u.}$$

$$Q_{nom} = \frac{1950}{3250} = 0,6 \text{ p.u.}$$

$$V_t = \frac{2400}{2400} = 1 \text{ p.u.}$$

Generador 1:

$$X_{d1} = 1,51 \text{ p.u.}$$

$$X_{d1} = 1,51 * 1,772 = 2,67572 \Omega$$

$$X_{q1} = 1,057 \text{ p.u.}$$

$$X_{q1} = 1,057 * 1,772 = 1,873004 \Omega$$

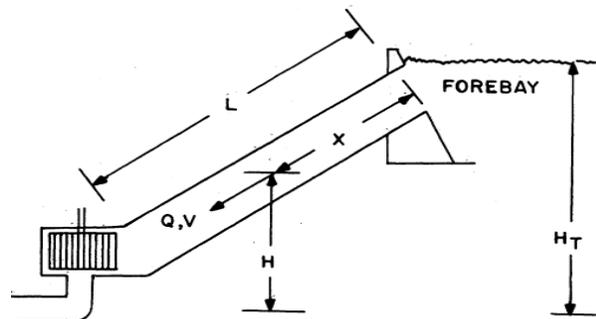
Valores tomado de, (Calvopiña Valle & Maita Sánchez, 2016)

d. Determinación de la constante de tiempo del agua T_w

Según la (IEEE, Hydraulic Turbine and Turbine Control Models for Systems Dynamic Studies, 1992), la constante está asociada con el tiempo de aceleración del agua en la tubería de conducción entre la entrada o acceso a la turbina y la compuerta del reservorio como se muestra en la Figura 25, entre la turbina y el tanque de presión.. La Ec. (11) permite calcular la constante de tiempo del agua

Figura 25

Esquema de una Central Hidroeléctrica



Nota: Tomado de (IEEE, Hydraulic Turbine and Turbine Control Models for Systems Dynamic Studies, 1992)

$$T_w = \frac{L * U_r}{a_g * H_r} \quad \text{Ec. (11)}$$

De donde:

L =Longitud de la tubería, m

U_r = Velocidad del agua, m/sg

H_r = caída, m

a_g = aceleración de la gravedad

Se halla la velocidad del agua, mediante la Ec. (12)

$$U_r = \frac{\text{caudal de agua}}{\text{área de la tubería}} \quad \text{Ec. (12)}$$

Con los datos mencionados anteriormente, se procede hallar el área de la tubería.

$$A_i = \frac{(D_{int})^2 * \pi}{4}$$

$$A_i = \frac{(0,5380m)^2 * \pi}{4}$$

$$A_i = 0,267 \text{ m}^2$$

Entonces,

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

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

Por lo cual la constante de aceleración del agua es

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

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

5.5.2. Modelamiento de componentes de la unidad de generación

a. Turbina Hidráulica

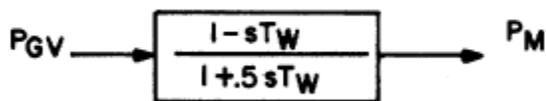
Para la implementación de la turbina hidráulica en estudios de estabilidad se basa en las siguientes asunciones:

- La resistencia hidráulica es despreciable
- El tubo del canal de carga es inelástico y el agua es incompresible.
- La velocidad del agua varía directamente con la apertura de las compuertas y con la raíz cuadrada de la altura del agua.
- La salida de potencia es proporcional al producto de la presión y volumen del flujo. (Correa Masache, 2007)

Al revisar la norma IEEE (IEEE, Dynamic Models for Steam and Hydro Turbines in Power System Studies, 1973) encontramos una aproximación lineal del modelo de una Hidroturbina.

Figura 26

Función de transferencia Hidroturbina.



Nota: Modelo simplificado de una hidroturbina

En donde:

P_{GV} , Potencia en la compuerta o salida de la válvula

T_w , es la constante de tiempo del agua.

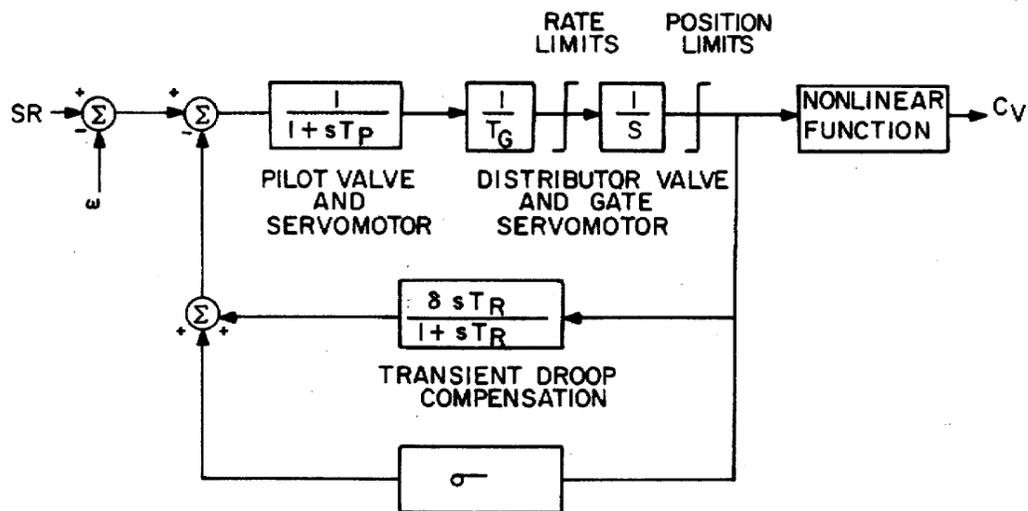
P_M , Potencia mecánica

b. Regulador de velocidad

En el estándar (IEEE, Hydraulic Turbine and Turbine Control Models for Systems Dynamic Studies, 1992) nos muestran un modelo aproximado no lineal para el sistema de regulación de velocidad, que se muestra en la Figura 27.

Figura 27

Modelo aproximado regulación de velocidad mecánico-hidráulico



Nota: Modelo aproximado no lineal para sistemas de regulación de velocidad mecánico hidráulico a ser implementado en Matlab/Simulink, tomado de (IEEE, Hydraulic Turbine and Turbine Control Models for Systems Dynamic Studies, 1992).

Los parámetros típicos para este modelo se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11

Datos típicos para reguladores de velocidad mecánico – hidráulico.

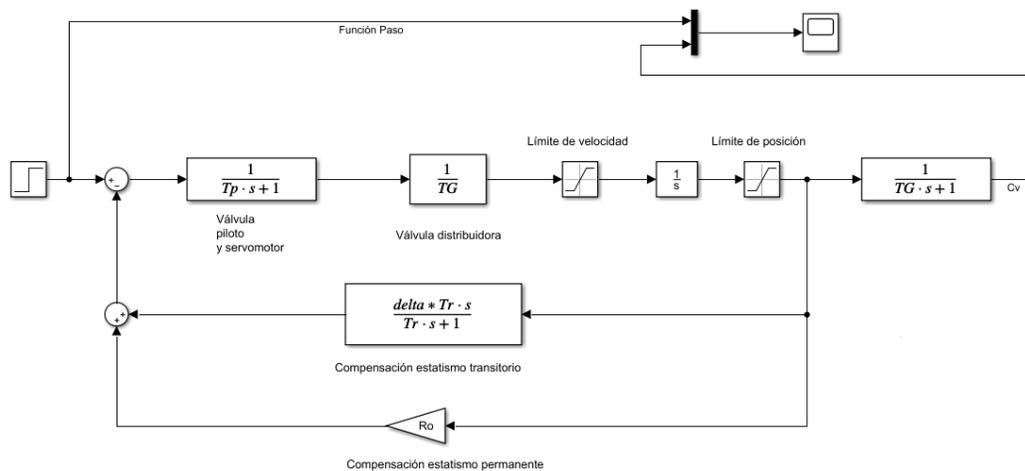
Parámetro	Símbolo	Valor Típico	Rango
Constante de tiempo de amortiguamiento [sg]	T_R	$5 * T_W$	2,5 – 25,0
Tiempo de respuesta del regulador o inverso de la ganancia de lazo abierto del governor	T_G	0,2	0,2 – 0,4
Constante de tiempo de la válvula piloto y del servomotor [sg]	T_P	0,04	0,03 – 0,05
Coeficiente 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	S_R	----	----

Nota: Valores típicos para los reguladores de velocidad, tomado de (IEEE, Dynamic Models for Steam and Hydro Turbines in Power System Studies, 1973)

En la Figura 28 se implementa el modelo del regulador de velocidad, en Simulink con los valores típicos y calculados de la Central Illuchi N°2.

Figura 28

Modelo de regulador de velocidad en Simulink

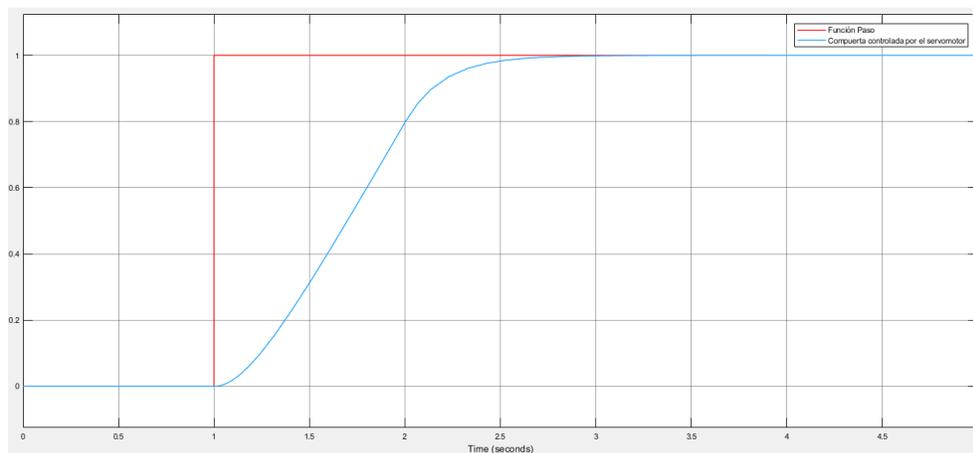


Nota: Diagrama de bloques del modelo para un regulador de velocidad

En la Figura 29 se muestra el comportamiento del sistema de regulación de velocidad.

Figura 29

Respuesta del modelo del regulador de velocidad.



Nota: Pantalla del Scope con la señal escalón y respuesta del regulador de velocidad.

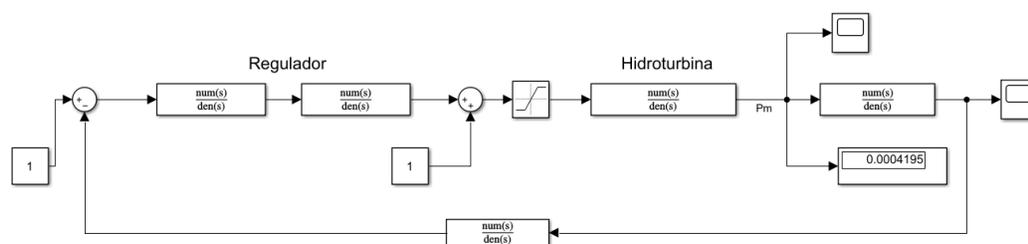
En la Figura 29 se puede observar una representación de la posición de la compuerta ante la perturbación de una señal escalón que se utiliza para activar la simulación, mediante la señal de color azul, la respuesta generada por el sistema del regulador de velocidad se observa que tarda aproximadamente 3,5 sg.

c. *Regulador de velocidad actual.*

Actualmente la unidad para ingresar al sistema tarda de 4'35" a 14'20" como se mencionó esto debido a inestabilidad del control, para interpretar este tiempo se procede a modelar el regulador actual, como se muestra en la Figura 30, el modelo se tomó como referencia de (Delgado Montenegro, 1997).

Figura 30

Regulador de velocidad actual

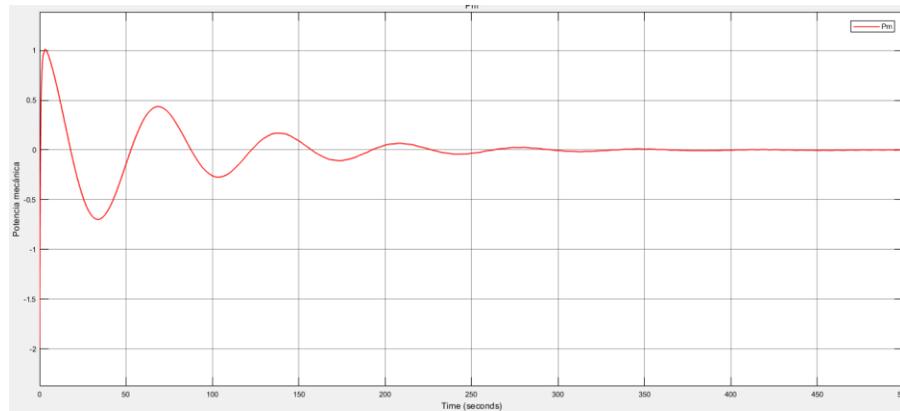


Nota: Diagrama de bloques del modelo para el regulador de velocidad actual.

Al activar el sistema mediante un escalón unitario, se puede evidenciar el tiempo prolongado de respuesta.

Figura 31

Respuesta del regulador de velocidad



Nota: Respuesta del modelo para el regulador de velocidad actual.

En la Figura 31 se puede evidenciar la estabilización del giro de la turbina tarda alrededor de 300 sg.

d. Regulador de voltaje

En el estándar (IEEE, Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, 2005), en sus modelos se destaca, la señal de entrada principal de cada uno de los sistemas de excitación es V_c del voltaje del transductor. En el punto se suma, la señal V_c es sustraída del voltaje de referencia V_{ref} y la salida V_s del PSS, si este último es usado se añade para producir la actuación de la señal con los controles de excitación. En condiciones de estado estable, $V_s = 0$ y V_{ref} toma un valor único a la condición de carga de la máquina síncrona, tal que la señal error resulte en el voltaje de campo requerido E_{fd} .

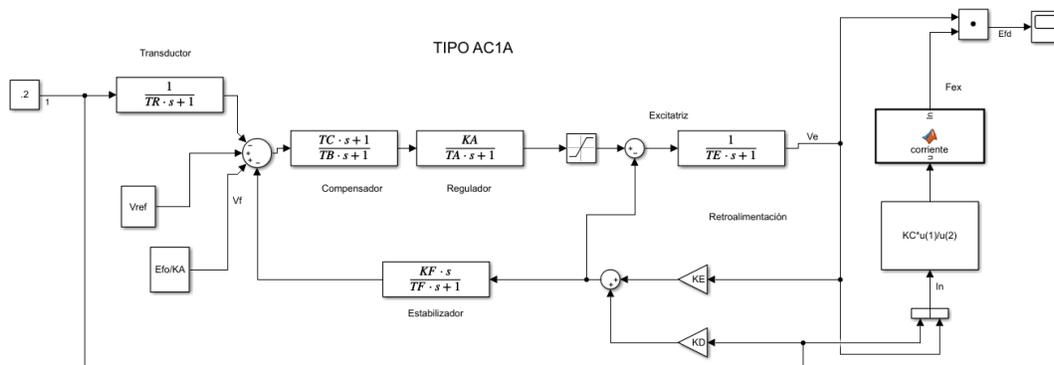
Parámetro	Símbolo	Valor Típico
Voltaje del estabilizador de potencia	V_S	----
Voltaje del estabilizador del sistema de excitación	V_F	----
Voltaje de referencia del regulador	V_{REF}	----
Voltaje del regulador máximo y mínimo	$V_{RMAX,RMIN}$	-----

Nota: Valores típicos para los reguladores de velocidad, tomado del anexo de (IEEE, Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, 2005)

Luego de obtener los parámetros para las constantes se procede a implementar el modelo tipo AC1A, a la entrada se activa la simulación mediante una constante este es uno de los modelos más complejos a implementar, este modelo representa un alternador de campo controlado como sistema de excitación con rectificadores no controlados y para el caso de estudio es aplicable para sistemas de excitación sin escobillas.

Figura 33

Modelo del regulador de voltaje, tipo AC1A

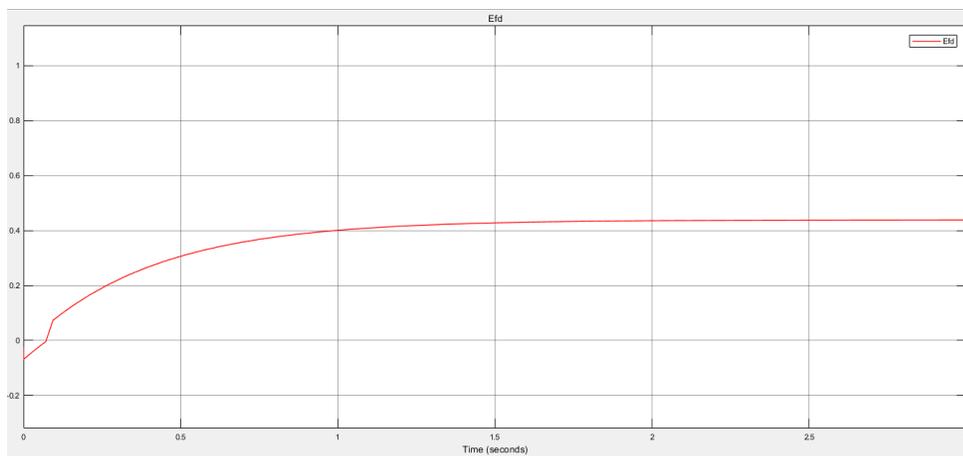


Nota: Diagrama de bloques para el modelo tipo AC1A.

En la Figura 34 se muestra la respuesta del modelo del regulador de voltaje, su acción de control es una señal de voltaje que se emite directamente al devanado de campo del generador, la estabilización se encuentra alrededor de los 2,5sg.

Figura 34

Respuesta del modelo del regulador de voltaje.



Nota: Pantalla del Scope con la señal de respuesta del regulador de velocidad AC1A, el eje x, se encuentra en escala de segundos.

e. Regulador de voltaje DC1A

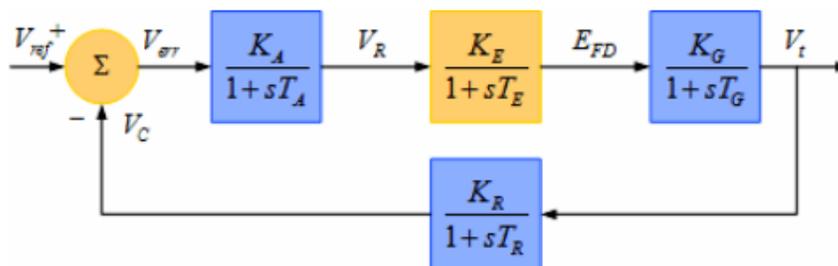
Para una mejor explicación del funcionamiento del regulador se procede al modelamiento del conjunto regulador de voltaje, con el tipo DC1A, encontrando una función de transferencia que relaciona al voltaje en terminales al voltaje de campo, puede ser representada por medio de una ganancia K_G y una constante de tiempo T_G , está dada por:

$$\frac{V_t(s)}{E_{FD}(s)} = \frac{K_G}{1 + sT_G} \quad \text{Ec. (13)}$$

El modelo del sistema de excitación DC1A sin el lazo de estabilización que integra el modelo linealizado de la máquina síncrona descrito por la Ec. (13). Se muestra en la Figura 35, la constante K_R representa el tiempo de procesamiento y filtrado de la señal V_t .

Figura 35

Diagrama del sistema DC1A



Nota: Modelo a ser implementado en Matlab/Simulink, tomado de (Vanfretti Fumagalli, 2005)

Los parámetros para este modelo se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13

Parámetros para el modelo DC1A

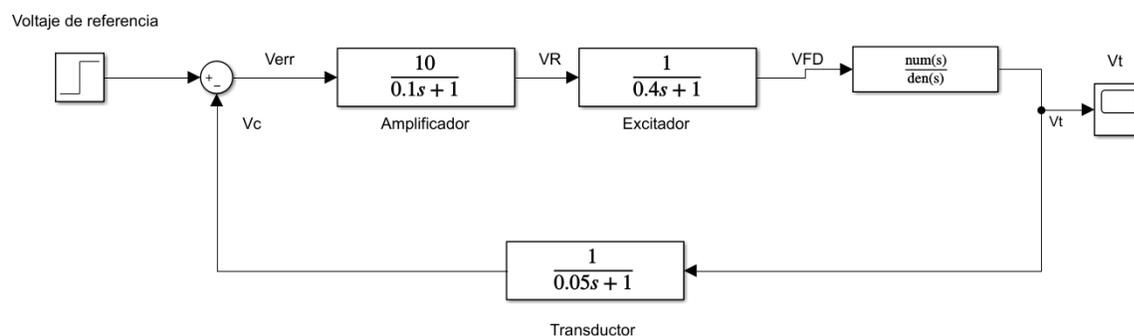
	Ganancia	Constante de Tiempo
Amplificador	$K_A = 1$	$T_A = 1$
Excitador	$K_E = 1$	$T_E = 0.4$
Transductor	$K_R = 1$	$T_R = 1$
Generador	$K_G = 1$	$T_G = 0.05$

Nota: Valores para el modelo tipo DC1A, tomado de la Tabla 12, y (IEEE, Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, 2005)

Se implementa el modelo de la Figura 35, en Simulink con los valores antes mencionados.

Figura 36

Modelo de Simulink para el sistema DC1A

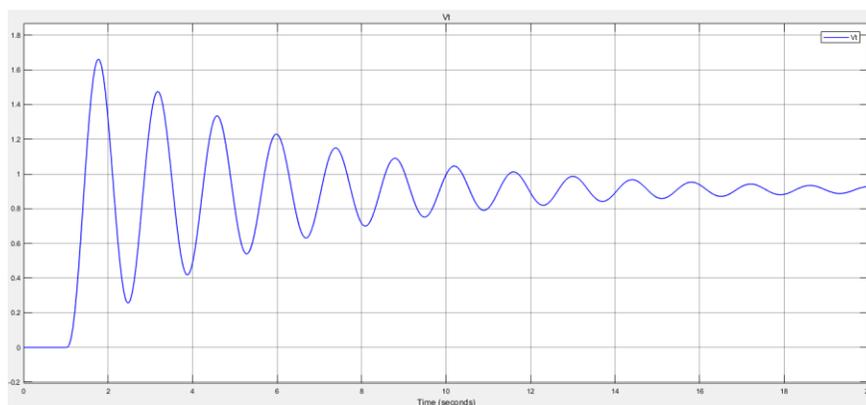


Nota: Diagrama de bloques para el modelo DC1A, se muestra el amplificador, excitador y transductor.

La respuesta del modelo DC1A sin estabilizador de potencia se muestra en la Figura 37 activado por la señal escalón.

Figura 37

Respuesta al escalón del sistema DC1A



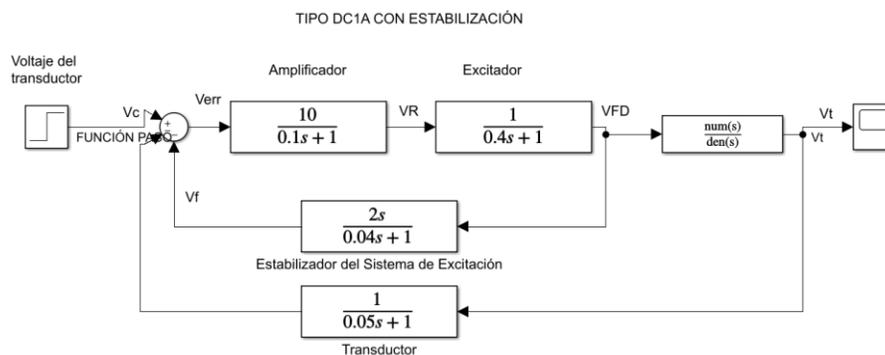
Nota: Pantalla del Scope con la señal de respuesta del regulador de velocidad DC1A, el eje x, representa el tiempo en escala de segundos.

En la Figura 37 se puede apreciar la respuesta del sistema es altamente oscilatoria, con un sobrepaso muy alto y un tiempo de establecimiento superior a los 15 sg.

Por lo cual se procede con la implementación del lazo de estabilización que se muestra en la Figura 38 con las constantes son $K_F = 2$ y $T_F = 0.04$.

Figura 38

Modelo de Simulink del sistema DC1A con estabilización

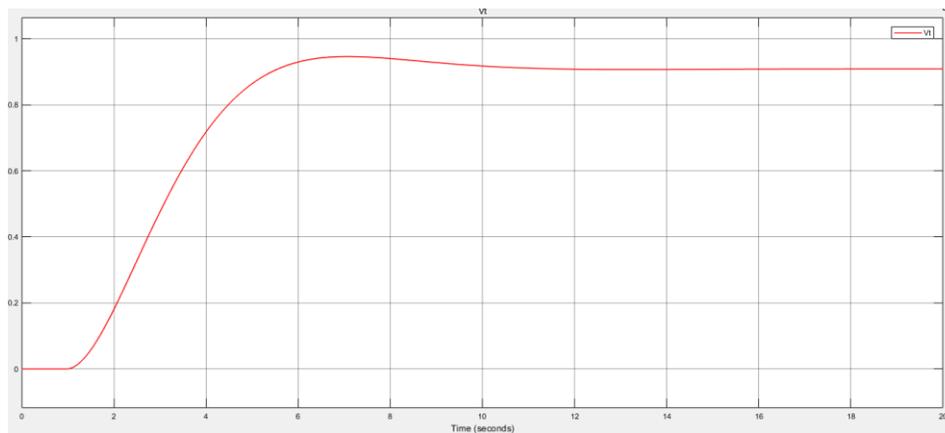


Nota: Diagrama de bloques del modelo DC1A junto con el estabilizador.

La Figura 39 muestra la respuesta al escalón del sistema de control de excitación con la implementación del lazo de estabilización como nos muestra la Figura 12, se observa que la respuesta transitoria tiene un sobrepaso y el tiempo de establecimiento de aproximadamente de 10 segundos.

Figura 39

Respuesta al escalón del sistema DC1A con estabilización



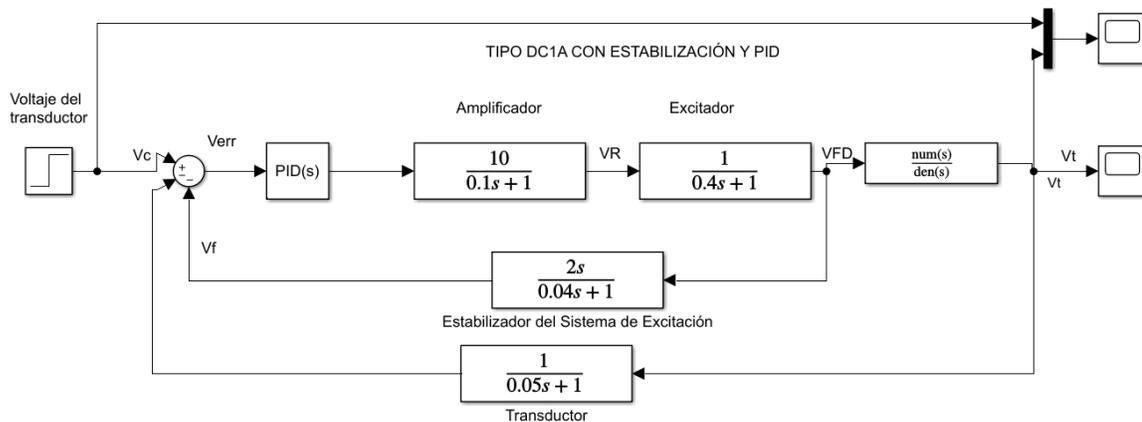
Nota: Pantalla del Scope con la señal de respuesta del regulador de velocidad DC1A con estabilización, el eje x, representa el tiempo en escala de segundos.

Para optimizar el tiempo de estabilización para este sistema se presenta la alternativa de reemplazar el AVR por otro que permita controlar mediante un controlador PID, es por esto que se procede a modelar para conocer su comportamiento.

El control PID es utilizado para mejorar la respuesta dinámica como para reducir o eliminar el error de estado estable del sistema, en la Figura 40 se muestra el modelo de Simulink para la implementación del control PID en el sistema DC1A , para constantes utilizadas en el controlador son $K_P = 1$, $K_I = 0,25$ y $K_D = 0$.

Figura 40

Modelo en Simulink del sistema DC1A con PID

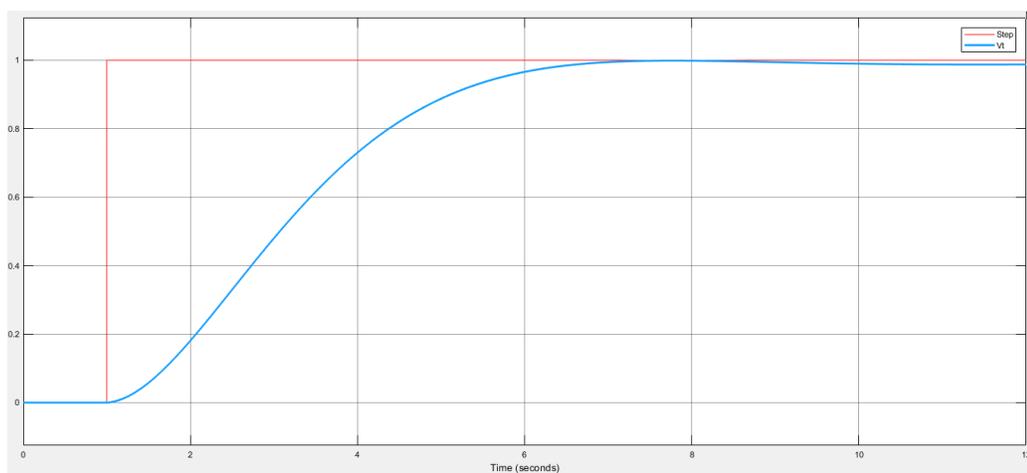


Nota: Diagrama de bloques para el modelo DC1A con la implementación de un control PID, el voltaje del transductor se simula mediante la señal escalón.

La implementación del control PID nos permite eliminar el error en estado estable, como se puede apreciar en la Figura 41.

Figura 41

Respuesta al escalón de V_t



Nota: Pantalla del Scope con la señal de respuesta del regulador de velocidad DC1A con PID, el eje x, representa el tiempo en escala de segundos.

5.5.3. Modelamiento de la unidad de generación

Después de haber detallado el funcionamiento de cada uno de los reguladores se procede a implementar en conjunto los reguladores de velocidad y voltaje, turbina, generador sincrónico, transformador y una carga y/o falla en Simulink, mediante componentes de la librería Simscape, para ello se muestra en la Tabla 14 los valores de reactancias y constantes de tiempo que se utilizaron para el modelamiento.

Tabla 14

Parámetros determinados

Magnitud	Símbolo	Unidad	Valor
Reactancia sincrónica de eje directo	X_d	<i>p. u.</i>	1,051
Reactancia sincrónica de eje de cuadratura	X_q	<i>p. u.</i>	1,057
Reactancia transitoria de eje directo	X'_d	<i>p. u.</i>	0,300
Reactancia transitoria de eje en cuadratura	X'_q	<i>p. u.</i>	0,900
Reactancia subtransitoria de eje directo	X''_d	<i>p. u.</i>	0,250
Reactancia subtransitoria de eje en cuadratura	X''_q	<i>p. u.</i>	0,320
Reactancia de dispersión	X_l	<i>p. u.</i>	0,130
Reactancia de secuencia negativa	X_2	<i>p. u.</i>	0,280
Reactancia de secuencia cero	X_0	<i>p. u.</i>	0,100
Resistencia de armadura	R_a	<i>p. u.</i>	0,00417
Cte. de tiempo transitoria de eje directo de cortocircuito	τ'_d	<i>s</i>	----
Cte. de tiempo transitoria de eje en cuadratura de cortocircuito	τ'_q	<i>s</i>	---
Cte. de tiempo subtransitoria de eje directo de cortocircuito	τ''_d	<i>s</i>	----
Cte. de tiempo subtransitoria de eje en cuadratura de cortocircuito	τ''_q	<i>s</i>	0,100

Magnitud	Símbolo	Unidad	Valor
Cte. de tiempo transitoria de eje directo de circuito abierto	τ'_{do}	s	8,480
Cte. de tiempo transitoria de eje en cuadratura de circuito abierto	τ'_{qo}	s	0,00
Cte. de tiempo subtransitoria de eje directo de circuito abierto	τ''_{do}	s	0.110
Cte. de tiempo subtransitoria de eje en cuadratura de circuito abierto	τ''_{qo}	s	0,400

Nota: En la tabla se muestra valores para implementar en Matlab-Simulink, de los cálculos realizados y referenciados de (Catari Ramos & Miranda Ordoñez, 2009)

Con los datos de la Tabla 14 se realiza la simulación dinámica de la unidad de generación.

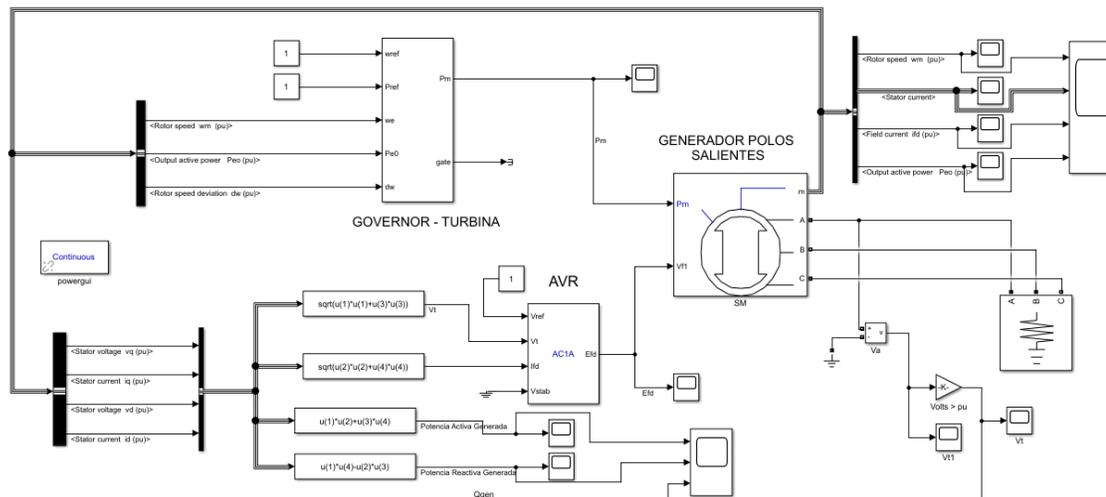
a. Unidad de generación con una carga de 1KW

La unidad de generación que se muestra en la Figura 42 corresponde el modelamiento para una carga 1kW, con los nuevos reguladores que utilizaran controladores PID se demuestra la variación de velocidad en el rotor. Se realiza la simulación durante 5 sg, para conocer el comportamiento de cada una de las señales.

El tiempo de simulación disminuye debido al tiempo de respuesta de los controladores en governor – turbina de Simscape nos permite ingresar los valores de las constantes de PID, así como la potencia mecánica inicial, los límites de apertura máximo y mínimo, ganancias del servomotor entre otros.

Figura 42

Unidad de generación de la central

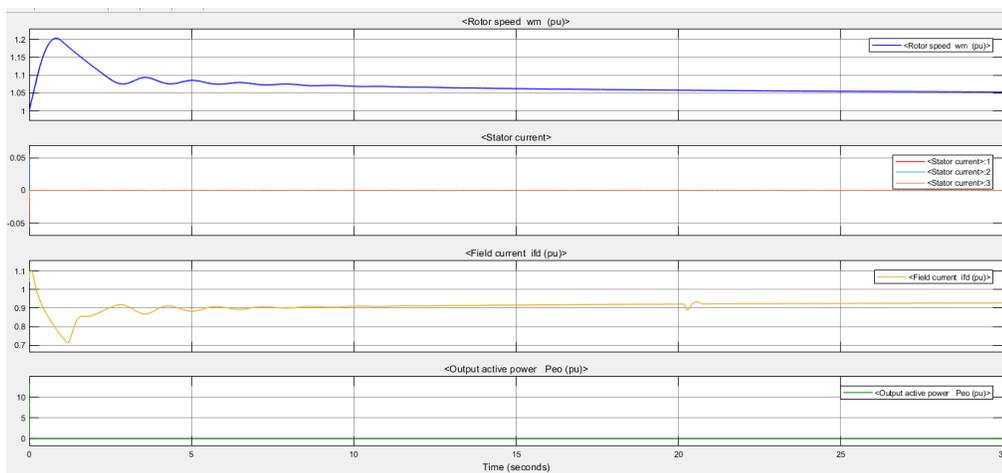


Nota: Modelo del generador y sus nuevos sistemas de regulación de velocidad y voltaje de la Central Illuchi N°2, conectado a una carga.

El comportamiento de la velocidad del rotor, potencia eléctrica, corriente del estator y corriente en el devanado de campo del generador se muestra en la Figura 43.

Figura 43

Respuesta de las señales del generador.



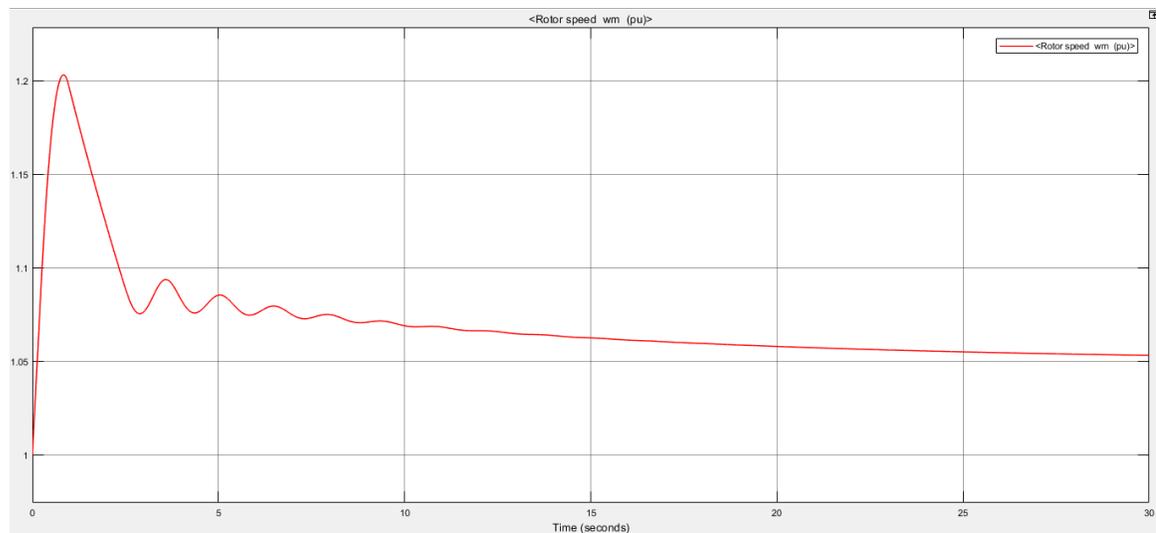
Nota: Pantalla del Scope que muestra las señales del generador, en el eje x representa el tiempo en escala de segundos.

En la Figura 43 muestra el conjunto de señales que se han tomado mediante el puerto *m*, propio del bloque Machine Synchronous, con el fin de visualizar su estabilización al encontrarse conectado una carga de 1Kw.

En la Figura 44 se muestra el comportamiento de la velocidad del rotor, su estabilización tarda alrededor de 25 sg como se muestra en la gráfica.

Figura 44

Velocidad del rotor

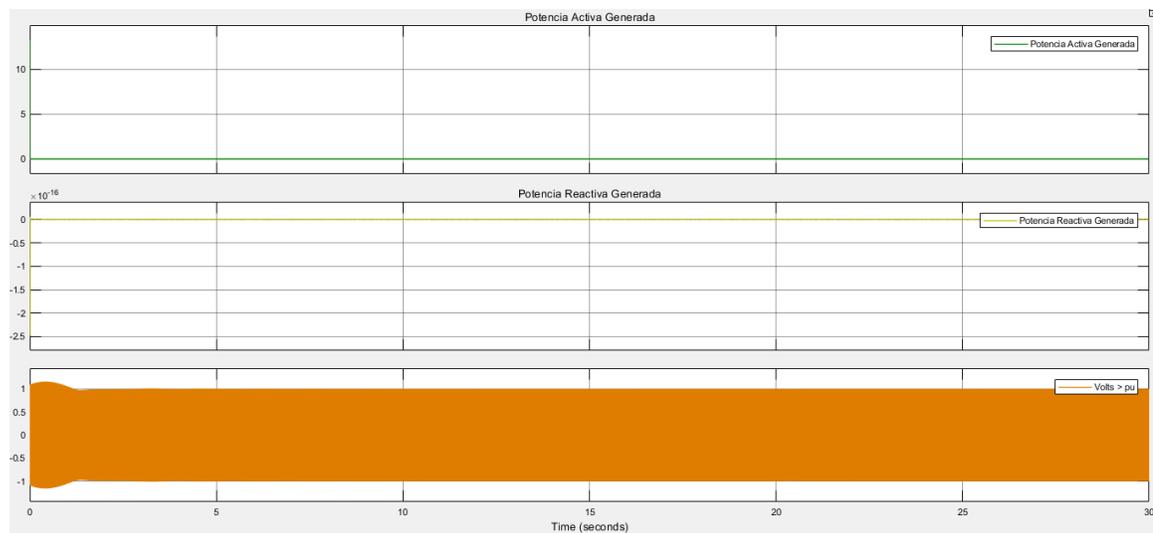


Nota: Pantalla del Scope que muestra la de velocidad del rotor.

El voltaje de terminales del generador junto con la potencia activa y reactiva generada, se muestra en la Figura 45.

Figura 45

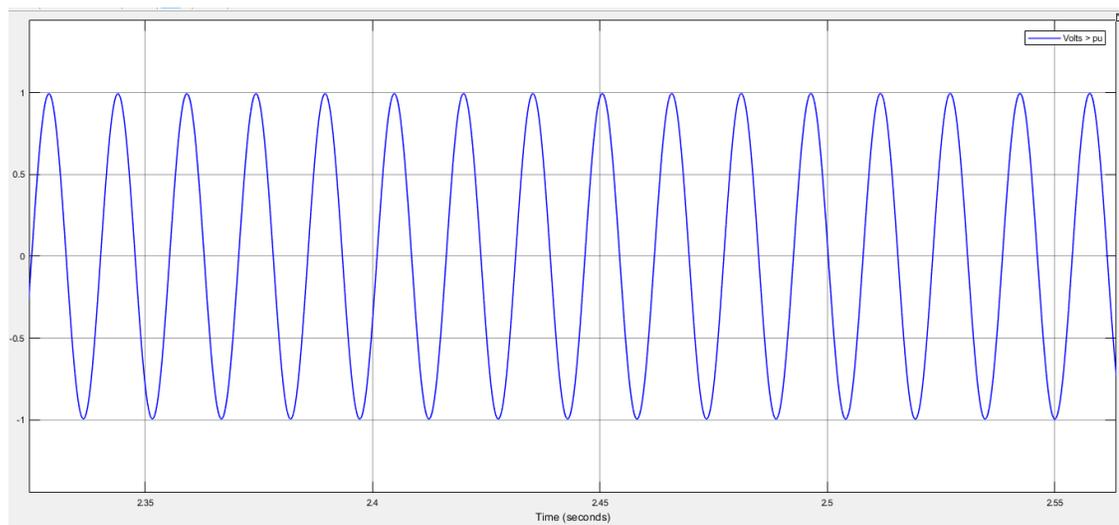
P, Q generada y V_t en los bornes del generador



Nota: Pantalla del Scope que muestra la señal de P, Q, y V_t del generador.

Figura 46

Voltaje en los bornes del generador



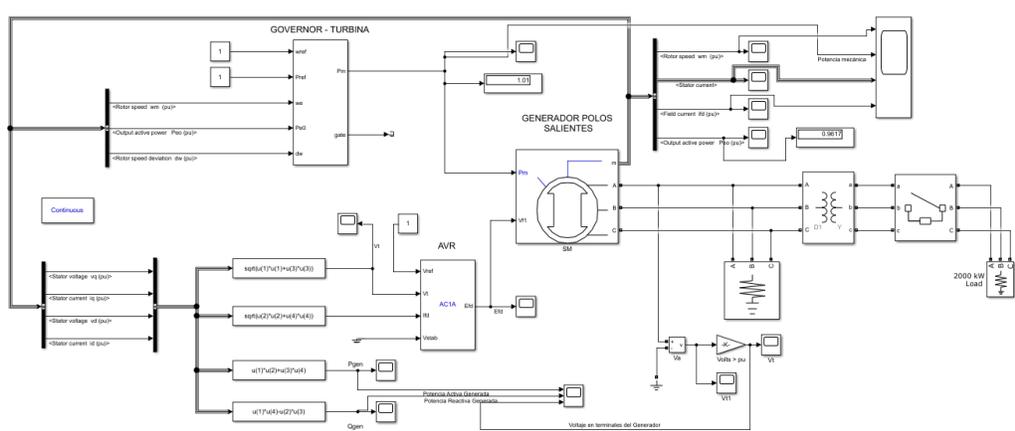
Nota: Pantalla del Scope que muestra la señal sinusoidal de una línea propia del voltaje en bornes del generador, tiempo en escala sg.

b. Unidad de generación con una perturbación.

El incremento de carga se modela mediante la conexión de una carga de 2MW, a partir de los 3sg de transcurrido la simulación durante 10 sg, el modelo implemetado se muestra en la Figura 47.

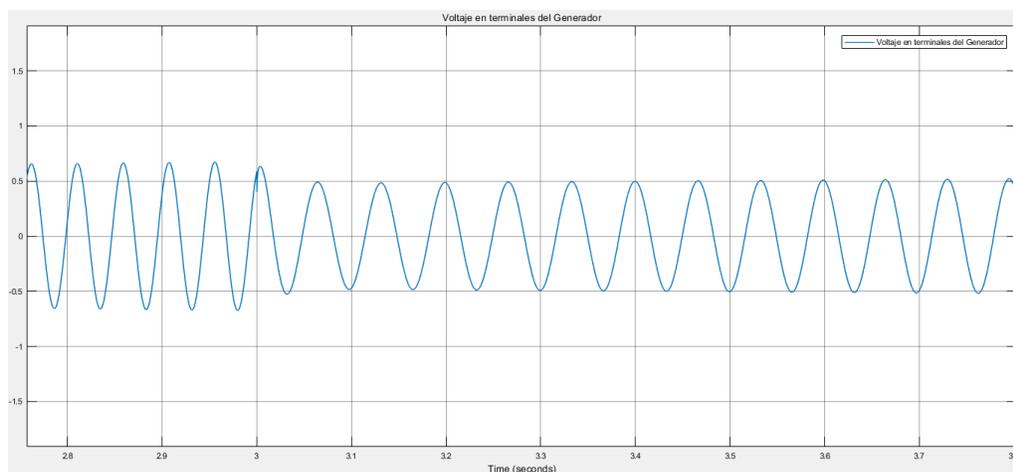
Figura 47

Unidad de generación - perturbación



Nota: Modelo que permite la conexión de una carga.

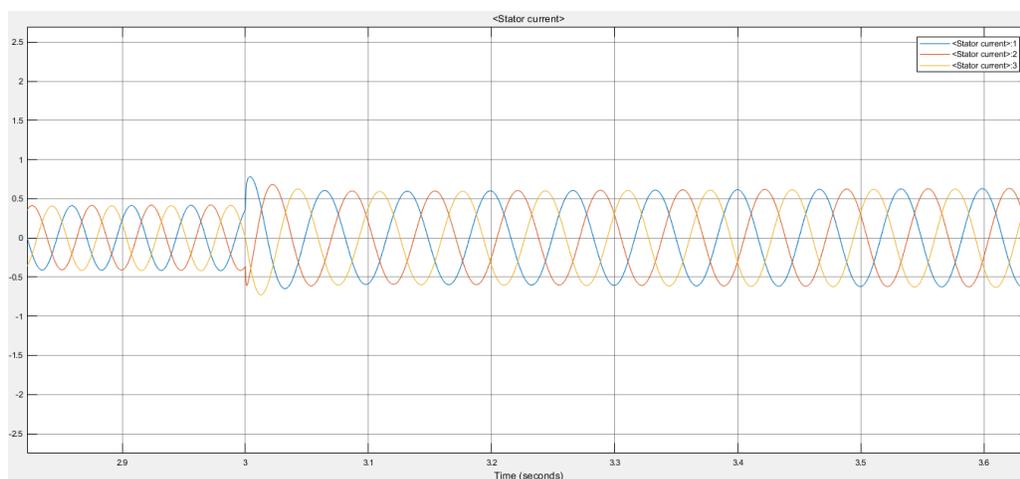
Este modelamiento determina el comportamiento de los reguladores de velocidad y voltaje ante una perturbación con el incremento de una carga a la unidad de generación.

Figura 48*Voltaje en bornes del generador*

Nota: Pantalla del Scope que muestra la señal de V_t , tiempo en escala sg.

En la Figura 48 se puede apreciar que en el $t=3s$ el voltaje disminuye, actúa el regulador de voltaje y lo vuelve a estabilizar en $t=3.6s$.

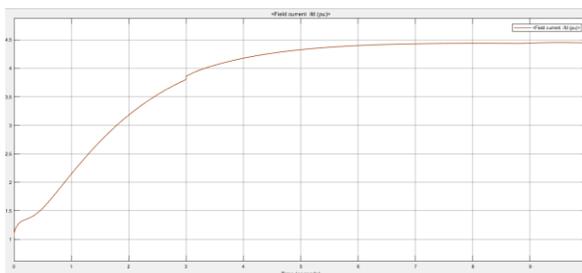
Respecto a las corrientes en el estator se presenta un pequeño desbalance, como se aprecia en la Figura 49.

Figura 49*Corrientes del estator*

Nota: Pantalla Scope que muestra la señal de corrientes del estator tiempo en escala sg.

Figura 50

Corriente en el devanado de campo

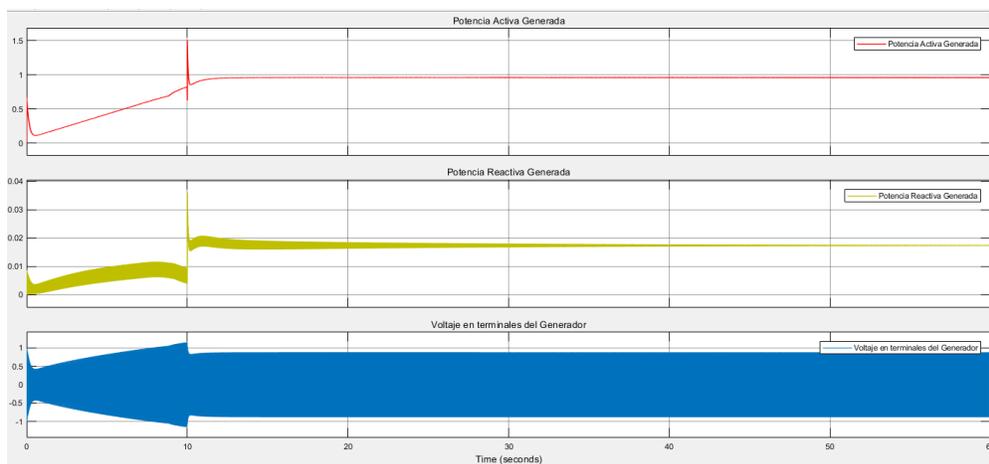


Nota: Pantalla Scope que muestra la señal de corrientes de campo, tiempo en escala sg.

Para visualizar el comportamiento durante un mayor tiempo se procede a simular conectando la misma carga en $t=10s$ durante una simulación de 60sg.

Figura 51

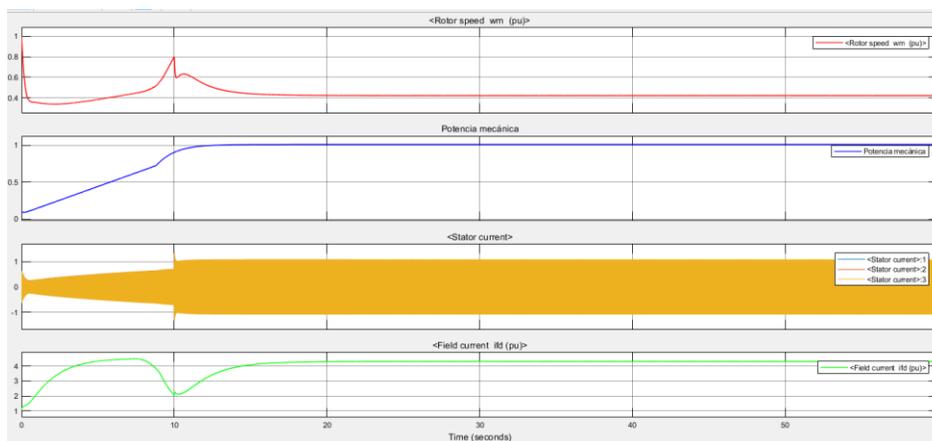
Señal de P,Q y Vt



Nota: Pantalla Scope que muestra la señal de Potencia Activa, Potencia Reactiva y Voltajes en bornes del generador respectivamente, tiempo en escala sg.

Figura 52

Señal de w_m , P_m , i_s , I_{fd}



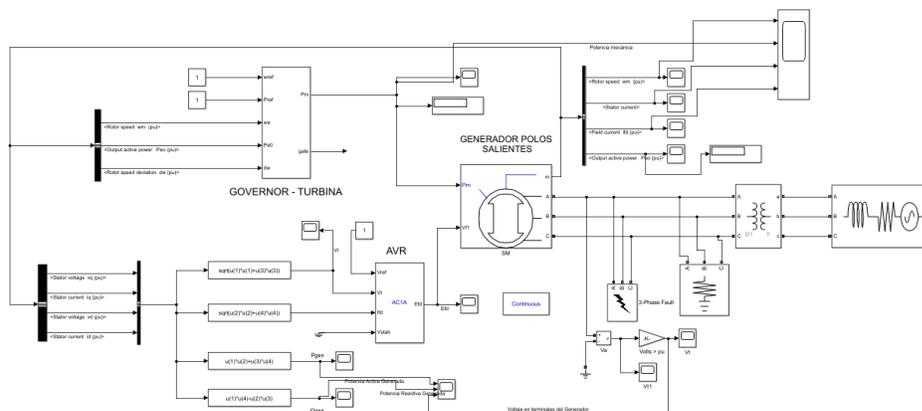
Nota: Pantalla Scope que muestra la señal de velocidad del rotor, Potencia mecánica, corrientes del estator y corriente de campo respectivamente, tiempo en escala sg.

c. Unidad de generación con una falla.

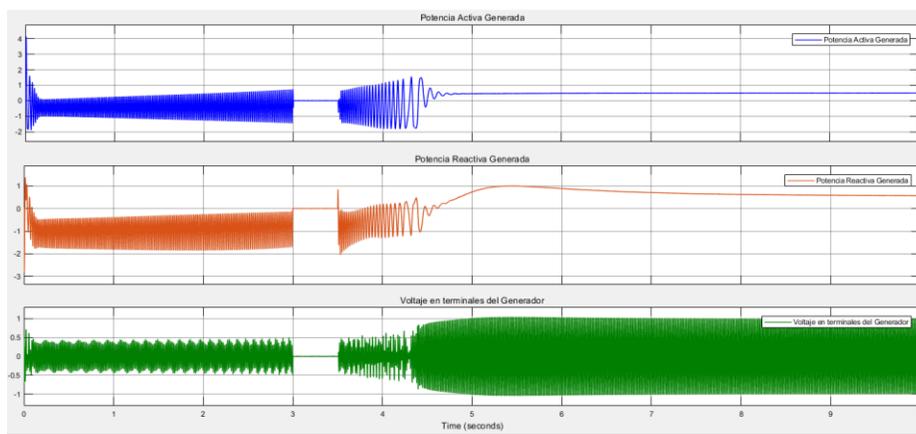
A manera de modelar una falla trifásica en $t=3s$ hasta $t=3.5s$ durante una simulación de 10sg, se puede observar el comportamiento dinámico de la máquina síncrona.

Figura 53

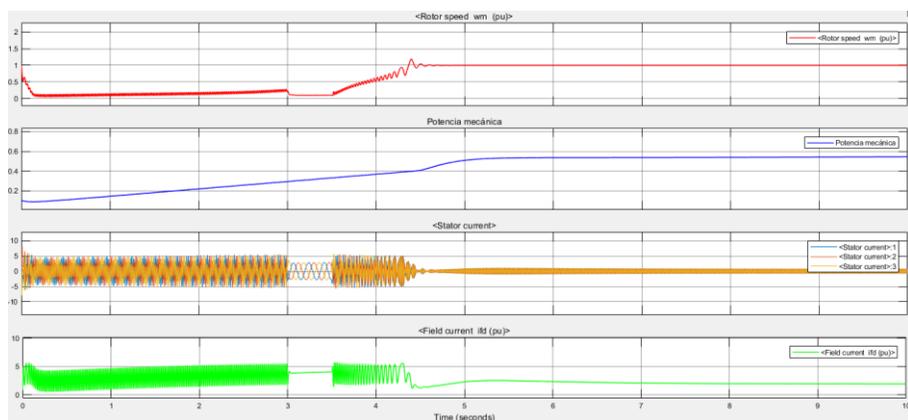
Unidad de generación - falla



Nota: Modelo que permite provocar una falla trifásica.

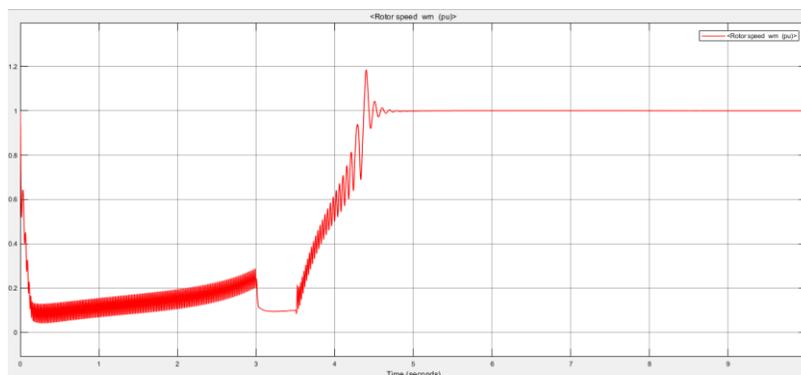
Figura 54Señal de P , Q y V_t 

Nota: Pantalla Scope que muestra la señal de Potencia Activa, Potencia Reactiva y Voltajes en bornes del generador respectivamente, tiempo en escala sg.

Figura 55Señal de P , Q y V_t 

Nota: Pantalla del Scope que muestra las señales del generador, en el eje x representa el tiempo en escala de segundos.

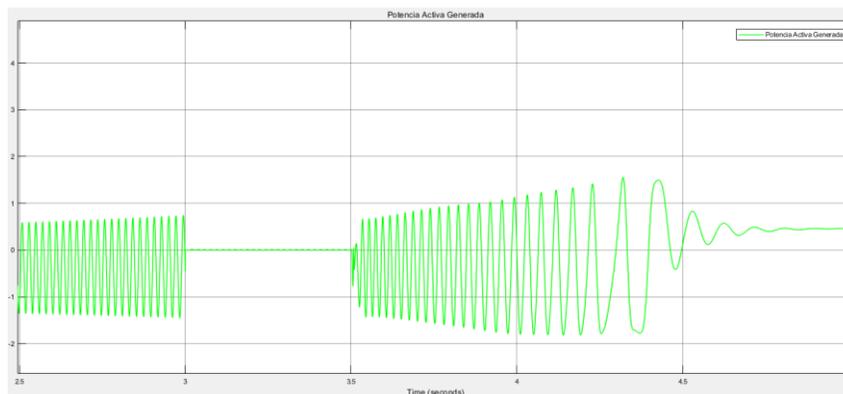
La falla trifásica es simulada al fijar los voltajes de fase en los terminales del generador a cero, lo que impide a la máquina transmitir potencia al sistema.

Figura 56*Velocidad del rotor*

Nota: Pantalla Scope que muestra la señal de velocidad del rotor.

Después de la falla la velocidad tiende a equilibrarse con el valor de consigna, por lo que la máquina desacelera rápidamente y tiende a oscilar hasta volver a su velocidad nominal.

Después de reconectarse el generador, y estar acelerado tiende a entregar mayor potencia al sistema, como se muestra en la Figura 57, esta fluctuación permanecerá hasta que iguale al valor de consigna.

Figura 57*Potencia activa generada*

Nota: Pantalla Scope que muestra la señal de potencia activa generada durante la falla.

5.6. Requisitos de la propuesta

Los principales criterios de que se toma en cuenta para la implementación de estos sistemas son: la disponibilidad, confiabilidad, mantenibilidad, seguridad, fiabilidad, versatilidad, compatibilidad, modularidad y en la utilización de estándares abiertos de comunicación que garanticen una operación segura de la central de generación, todo el equipamiento accesorios y tecnología a implementar debe ser de última generación con equipamiento actual que a su fecha de construcción, fabricación no excedan el año de fabricado y que además no requiera actualizaciones a corto y mediano plazo.

Además, entre las principales actividades serán: retiro del equipo obsoleto, suministro de los nuevos equipos con tecnología digital para los reguladores de velocidad y voltaje que pueden ser o no compactos, es decir dos en uno dependiendo del diseño propuesto, suministro de las unidades de potencia hidráulica HPU válvulas proporcionales para el control de las agujas y deflectores de cada unidad turbina– generador, servos para la aguja y deflector incluyen los sensores de posición lineal LVDT o MLDT, switch de sobre velocidad y el montaje de nuevos equipos, pruebas de funcionamiento y puesta en operación de los sistemas de regulación de velocidad.

5.6.1. Códigos y normas establecidos para la modernización

El regulador de velocidad del sistema integrado de regulación, la Unidad de Presión Hidráulica (HPU), sus componentes deberán ser compatibles con el tipo de turbina de la central. Estos equipos deberán ser revisados conforme a y cumplir con los requisitos de desempeño establecido por la última versión de las normas:

IEEE-125, Recommended practice for preparation of equipment specifications for speed-governing of hydro turbines intended to drive electric generators

IEEE-1207, Guide for the application of turbine governing systems for hydroelectric generating units

El regulador de voltaje del sistema, su sección, potencia y sus componentes asociados deberán ser compatibles con el tipo de generador de la central. Estos equipos deberán ser concebidos conforme a y cumplir con los requisitos de desempeño establecido por la última versión de las normas:

IEEE - 421.1, Standard definitions for excitation systems for synchronous machines

IEEE-421.5, Recommended practice for excitation system models for power system stability studies

5.6.2. Requisitos Técnicos de los Sistemas de Regulación.

El controlador del sistema integrado de regulación deberá ser obligatoriamente modular de tal forma que una simple falla en una entrada o salida no obligue a reemplazar todo el módulo y/o controlador. El sistema deberá tener módulos independientes de procesador, fuente de alimentación del rack del controlador, de entradas, de salidas, etc.

Los módulos de entradas y salidas, tanto digitales como analógicas, deben tener indicaciones luminosas que permitan la visualización del estado de cada entrada y salida.

a. Regulador de Voltaje AVR

Tabla 15

Especificaciones técnicas del AVR

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 de alimentación:	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.

Nota: Especificaciones necesarias del AVR para la modernización

Características principales del Sistema de Regulación de Voltaje:

Para la función de Regulación de Tensión, control y monitoreo de su sección de potencia y monitoreo del transformador de potencia (TPE), el sistema integrado de regulación deberá contar por lo menos con 32 entradas digitales, 32 salidas digitales, 8 entradas analógicas, 8 salidas analógicas, 1 salida analógica de alta velocidad para el control de la tarjeta de disparo del puente de tiristores, 6 entradas analógicas para detección de voltajes y corrientes provenientes de los TPs y TCs del generador, 1 entrada analógica para detección del voltaje proveniente del TP de la barra, 1 entrada para la sincronización horaria IRIG-B.

El sistema integrado de regulación deberá ser capaz de una detección de tensión menor o igual al 0.20% de la tensión de salida CC de la escala completa nominal, con una precisión igual o menor a $\pm 0.05\%$ de la regulación de voltaje.

Índices de Estabilidad: En condiciones de vacío la respuesta dinámica de la función de regulación de voltaje del sistema integrado de regulación deberá tener los valores de la Tabla 16.

Tabla 16

Índices de estabilidad

Parámetro	Símbolo	Valor
Tiempo de respuesta	T_r	<250ms
Tiempo de establecimiento	T_{ss}	<1 seg
Sobretiro	Sp	<15%
Factor de amortiguamiento	ζ	$0.5 < \zeta < 1$

Nota: Índices de estabilidad en condición de vacío.

Funciones de limitación configurables: Adicionalmente al control de voltaje, el sistema integrado de regulación debe de contar como mínimo con funciones de limitación que garanticen la operación dentro de los límites máximos y mínimos del generador.

b. Regulador de Velocidad Digital

El regulador electrónico-digital debe ser construido en base a un sistema de controlador digital desarrollado, o a su vez en base a PLC de plataforma abierta, moderno y modular y debe permitir los protocolos de comunicación requeridos para sistema de control supervisorio SCADA.

El regulador deberá tener dos canales de detección de velocidad de señales de pulsos por medio de un transductor y alimentando esta señal de pulsos a un respectivo contador de alta velocidad. El uso de transductores de frecuencia-a-corriente conectados a entradas análogas se recomienda solamente si el tiempo de conversión de pulso-a-corriente es menor de 10ms.

Tabla 17

Especificaciones técnicas del regulador de velocidad

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.
Entradas digitales:	<ul style="list-style-type: none"> • 32 • 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.
Entradas analógicas:	<ul style="list-style-type: none"> • 8 • De tipo diferenciales, capaces de aceptar señales de 0-20mA ó 4-20 mA • Resolución mínima 16 bits.
Salidas analógicas:	<ul style="list-style-type: none"> • 8 • Capaces de proveer 0 -20 mA ó 4 – 20mA • Resolución mínima de 15 bits + signo
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
HMI	<ul style="list-style-type: none"> • Visualizar el proceso de control • 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.

Nota: Especificaciones necesarias del regulador de velocidad para la modernización

Características principales del Sistema de Regulación de Velocidad:

Control: En condición fuera de red, el sistema integrado de regulación deberá controlar la turbina con estabilidad a cualquier velocidad entre el 85% y 110 % de la velocidad nominal. En condición de conexión en red, los reguladores deberán controlar cualquier carga entre 0 y la carga correspondiente a la máxima apertura de las agujas de las turbinas.

Índices de Estabilidad: El sistema integrado de regulación deberá ser capaz de controlar con estabilidad la velocidad dentro de un 0.3% cuando opere en vacío o con carga y con un estatismo del 5%; y controlar con estabilidad la potencia dentro de un 0.4% cuando esté operando con un estatismo de 5%.

Estabilidad durante el rechazo de carga: El sistema integrado de regulación deberá cumplir con los requisitos de la Norma IEEE-125 en el sentido que, en un rechazo de carga, desde cualquier carga, inclusive de la carga máxima, hasta llegar a la carga nula, la velocidad deberá retornar al valor consignado o fijado de una forma rápida y amortiguada.

Tiempo Muerto: El tiempo transcurrido desde el cambio inicial de velocidad de la unidad hasta el primer movimiento de los servomotores, no debe ser mayor a 0.2 segundos.

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

Estatismo Transitorio. El sistema integrado de regulación deberá tener una función de estabilidad transitoria que permita la aplicación de un valor de estatismo adicional durante un periodo determinado. Esta función retarda la respuesta de la función de regulación de velocidad limitando el movimiento de los actuadores (servomotores) durante la condición de un transitorio adicionando estatismo.

5.6.3. Requisitos del Sistema Integrado de Regulación

de Velocidad y Voltaje.

El sistema integrado de Regulación de Velocidad y Sistema de Voltaje –AVR por unidad consta de los siguientes componentes:

- Sistema electromecánico de detección de velocidad (rueda dentada con dos pickups) y un sistema redundante de velocidad por voltaje por unidad.
- Una unidad de presión hidráulica (HPU) por unidad para operar el nuevo sistema de regulación, para ello es necesario que el sistema este dimensionado de acuerdo a lo establecido en la norma IEEE-125-2007, debe incluir las válvulas de control proporcional para los servomotores, válvulas de seguridad y el acumulador de vejiga nitrógeno/aceite, que incluya el aceite para el funcionamiento de acuerdo a la necesidad que garantice un óptimo funcionamiento en los niveles adecuados del equipo.
- Servomotor para el accionamiento de los dos deflectores de la turbina, incluye el suministro de sensores de posición magneto resistivos (LVDT o MLDT).

- Servomotor para el accionamiento de los dos inyectores de la turbina por cada unidad, incluye el suministro de sensores de posición magneto resistivos (LVDT o MLDT).

a. Confiabilidad

El controlador modular del sistema integrado de regulación debe ser extremadamente confiable, el MTBF mínimo debe cumplir con la siguiente Tabla 18.

Tabla 18

Parámetros MTBF

	MTBF
CPU	87600 h (10 años)
Módulos IO	87600 h (10 años)
Fuente del CPU	87600 h (10 años)

Nota: Parámetros necesarios para el sistema integrado

b. Fuente de Alimentación del Gabinete de Control

La alimentación del gabinete de control del sistema integrado de regulación deberá ser con alimentación redundante, con dos (2) fuentes de alimentación de entrada universal, es decir que acepten voltaje de entrada de 110 VCA a 240VCA y/o 100VCC a 250VCC. Estas fuentes deberán tener una eficiencia mayor al 85%

Ninguna de las fuentes de alimentación debe ser sujeta, en ningún momento, a cargas de más del 80% de su capacidad nominal durante operación normal.

c. Procesador (CPU)

El procesador del sistema integrado de regulación para el conjunto turbina-generador deberá ser del tipo digital, industrial, programable, controlado por microprocesador de 64bits, 32 bits con CPU Intel®, y con un reloj interno de al menos 1 GHz, proceso apto para sistemas de regulación de voltaje.

El procesador deberá poseer rutinas de auto diagnóstico que permitan que toda falla permanente o temporal pueda ser identificada.

El procesador deberá tener una memoria RAM interna de 2 GB DDR3 y poseer una tarjeta de memoria no volátil, extraíble (ej. tarjeta tipo SD, CFast, Compact Flash, etc.) con un mínimo de 4 Gb de memoria.

d. Panel de operación (HMI)

Necesario para visualizar los niveles de acceso, valores de ajustes del regulador de velocidad o del proceso, además, realizar comandos de operación de la unidad o para pruebas en vacío y con carga.

Los monitores requieren de las siguientes características:

Tabla 19

Requisitos del Monitor -HMI

Requisitos del monitor	
Rango de alimentación:	24VDC nominal
Pantalla industrial:	LCD a color
Tamaño:	≥ 16 pulgadas (Touchscreen)
Protección:	IP65 o su equivalente en NEMA
Protección de vibración:	IEC60068-2-64
Certificaciones:	CE, UL

Requisitos del monitor

Puerto de comunicación:	Ethernet, Modbus TCP/IP o RS232/RS485
-------------------------	---------------------------------------

Nota: Parámetros necesarios para el monitor -HMI

e. Protocolos de comunicación

De manera estándar, el sistema integrado de regulación debe comunicarse con sistemas externos por medio del protocolo: Modbus TCP / IP, servidor, capa física Ethernet.

Además de Modbus TCP/IP, el sistema integrado de regulación debe tener la opción de comunicarse de forma nativa por medio de los siguientes protocolos:

- Modbus RTU, capa física serial RS-232 o RS-485
- Ethernet / IP, servidor, capa física Ethernet
- DNP3.0, server, capa física Ethernet
- IEC 60870-5-101 o 104, servidor, capa física Ethernet
- IEC 61850, servidor, capa física Ethernet

f. Funciones principales

Siguiendo las recomendaciones de la norma IEEE 1207-2004 sección 6.3.7, se aceptará que la medición de velocidad se realice ya sea a través de un sensor magnético y rueda dentada o por medio de la señal del transformador de potencial. Cualquiera de estas dos formas de detección, deben garantizar una forma segura de la regulación de la velocidad en todas las condiciones de operación, incluyendo arranque, generador no excitado, unidad en red, rechazo de carga, paro normal y de emergencia.

- El sistema integrado de regulación operará en forma local a través de la interfaz local de operación (HMI), y en forma remota, recibiendo órdenes por medio de

entradas digitales o por comunicaciones para actuar sobre el regulador de velocidad y el limitador de apertura.

- Detención con paro normal y detención con paro de emergencia.
- Regulación automática de la frecuencia tanto antes como después de la sincronización.
- Debe tener la capacidad de seleccionar una Operación Manual o Automática.
- PID Seleccionable: Para la función de regulación de velocidad, el sistema integrado de regulación, debe tener 6 juegos de parámetros PID que pueden ser auto seleccionados en base a diferentes condiciones de operación de la unidad (ej. en vacío, contra la red, sincronización, inestabilidad debido a transitorios hidráulicos, etc.), el cambio de parámetros entre los distintos modos debe ser sin disturbios por la transición del juego de parámetros.

5.6.4. Especificación del Sistema de Presión Hidráulica (HPU)

La unidad de presión hidráulica y sus componentes asociados deberán estar dimensionados de acuerdo a la norma IEEE-125, los requisitos tanto de fuerza como de flujo del sistema actual, y la operación adecuada y segura de la unidad a modernizar.

- El control y monitoreo de la unidad de presión hidráulica lo deberá hacer directamente el sistema integrado de regulación.
- El arranque de los motores deberá ser directo, con guarda motor, relé térmico, etc. Los arrancadores deberán montarse en un tablero en la unidad de presión hidráulica.
- La válvula limitadora de presión deberá abrirse a una presión del 15% por encima de la presión normal de operación.
- El tanque sumidero deberá tener un indicador visual del nivel del aceite, dos interruptores de nivel del aceite, un transductor de nivel y uno de temperatura

- El HPU del sistema debe garantizar al menos tres (3) operaciones una vez que ha perdido alimentación eléctrica en el sistema de bombeo de aceite.
- La señal generada por el sistema de regulación de velocidad digital para controlar la posición de los inyectores debe ser recibida por una servo-válvula proporcional del tipo direccional, de cuatro vías y tres posiciones, con centro cerrado y con resorte para el cierre en caso que se pierda la señal eléctrica, la señal de control debe ser de 4-20 mA.
- Todas las tuberías del sistema de regulación de velocidad, en sus diferentes diámetros, serán suministradas en acero inoxidable.

5.6.5. Requisitos técnicos del servomotor

- El servomotor(es) de actuación de la turbina y sus componentes asociados deberán estar dimensionados de acuerdo a la norma IEEE-125, los requisitos tanto de fuerza como de flujo del sistema actual, y la operación adecuada y segura de la unidad a modernizar.
- Se deberá eliminar todo el varillaje de posicionamiento del servomotor(es) existente(s) sustituyéndolo por una transmisión de posición digital tipo MLDT.
- El control del servomotor(es) deberá ser de tipo proporcional por medio de una válvula distribuidora específicamente diseñada para sistemas de regulación de velocidad de turbinas hidroeléctricas.
- Para cada servomotor se debe proveer válvulas de control de flujo para fijar de una forma mecánica y segura la máxima velocidad de actuación de los servomotores, del mismo modo, para cada servomotor debe haber un transductor de posición lineal de tipo magneto resistivo LVDT o MLDT con salida de 4-20 mA, no se aceptará sensores de tipo potenciómetro.

5.6.6. *Requisitos técnicos del actuador*

Se requiere la adquisición de un actuador eléctrico por cada unidad para el control de la apertura y cierre de la válvula principal, estos actuadores deben contar con las siguientes características:

Tabla 20

Características del actuador

Características del actuador	
Comando:	Manual/Remoto.
Voltaje de operación:	220 V
Aplicación:	Punto mínimo, cierre, máximo y punto de apertura
Protección mínima:	IP65.
Comunicación:	Modbus RS 485

Nota: Características del actuador para la válvula principal

5.6.7. *Especificaciones de alternativas para el reemplazo*

a. Regulador de Velocidad

MRT2.1 M340 Digital Governor

El sistema de digital L&S –MRT2.1, sistema basado en PLC de alto rendimiento diseñado para el control de múltiples turbinas, entre ellas la Pelton de hasta dos agujas. Este sistema se integra fácilmente con la automatización de la unidad. Su control está basado en un PID estándar y PID de doble derivación para mejorar la estabilidad transitoria, además presenta otros controles auxiliares como control de potencia, control de flujo y control de sincronización automática.

Se puede configurar directamente a través del HMI local, acondicionamiento de señales, calibración y configuración de parámetros, en la Tabla 21 se muestra las características generales desempeño.

Figura 58

MRT 2.1 M340 Digital Governor



Nota: Gabinete del governor, tomado de (Lopez de Leon, 2019)

Tabla 21

Características Generales del 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	$< 0.1\% \text{ @ } 5\% \text{ droop}$
Índice de estabilidad de potencia	$< 0.4\% \text{ @ } 5\% \text{ droop}$

Nota: En la tabla se muestra rango de valores a los opera el Governor Digital tomado de, (Electric, 2014)

Tomando como referencia la modernización empleada en otra central, el posible resultado del montaje sería el que se muestra en la Figura 59

Figura 59

Regulador de velocidad automático



Nota: Regulador de velocidad modernizado en la Central Hidroeléctrica Alao

b. Regulador automático de voltaje

AES: Advance Excitation System

El sistema de control de excitación digital LS-AES-VR-ECO Automatic Voltage Regulator, es de alto rendimiento para generadores y motores síncronos, mediante catálogos se obtuvo la siguiente información.

Figura 60

LS-AES-VR-ECO



Nota: Gabinete de control automático voltaje, tomado (Lopez de Leon, 2019).

Tabla 22

Características del regulador automático de voltaje

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

Características Generales de LS-AES-VR-ECO	
Salidas digitales	16
Entradas analógicas +/-10VC	4
Salidas analógicas +/- 10VDC	1
Salidas analógicas 4-20mA	8

Nota: En la tabla se muestra el valor de entradas analógicas del Regulador Automático de Voltaje, tomado de (Electric, 2014)

c. Unidad Hidráulica de Potencia

HPU N-Series

La unidad de presión hidráulica estándar (HPU) de L&S serie N es un conjunto modular, diseñadas para reemplazo o nuevas instalaciones que cumple el estándar IEEE125-2007, en la Tabla 23 se muestra disposiciones típicas.

Figura 61

HPU N-series



Nota: Unidad de presión hidráulica, tomado (Lopez de Leon, 2019).

Tabla 23

Características de funcionamiento de la HPU

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

Nota: En la tabla se muestra el valor de funcionamiento del HPU, tomado de (Electric, 2014)

La implementación de la unidad de presión hidráulica al término de su montaje y funcionamiento se observa en la Figura 62.

Figura 62

Unidad de presión hidráulica



Nota: HPU de la Central Hidroeléctrica Alao.

d. Sensor de velocidad

Speed Signal Generator

El generador de señales de velocidad (SSG) mide la velocidad de rotación de la turbina usando rueda dentada picks-ups. Diseñado para montarse en el extremo del eje del generador, posee las siguientes ventajas:

- Mide la velocidad de la turbina, protección contra sobre velocidad.
- Ofrece alta precisión en una amplia gama de velocidades.
- Cancela los efectos del descentramiento del eje.

Figura 63

Speed signal generator



Nota: En la ilustración muestra el sensor de velocidad, para una turbina tomado de (L&S, 2018)

Tabla 24

Especificaciones del SSG

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)

Nota: En la tabla se muestra valores de funcionamiento del SSG, tomado de (L&S, 2018)

e. Control Manifolds

Los colectores de control piloto eléctricos apto para actualizar reguladores mecánicos o eléctricos a controladores digitales, su diseño es adaptable a casi todas las válvulas de dos etapas y funciona con sistemas de baja y alta presión.

Figura 64

Colector Hidráulico



Nota: En la ilustración muestra un colector hidráulico, tomado de (L&S, 2018)

Este tipo de colector permite modernizar los reguladores mecánicos o eléctricos, su respuesta de frecuencia es 5 veces más rápida de los sistemas antiguos, su presión máxima 3000 psi(207bar), válvula solenoide de cierre de 24 o 125 VCC.

5.6.8. 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.

Tabla 25

Costo referenciales de los equipos

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

5.6.9. Estudio económico de la propuesta.

Una vez presentado los requerimientos necesarios y por ende el costo referencial de los equipos e instrumentación, se toma en cuenta la tabla del Anexo A para evidenciar las pérdidas anuales causadas por fallas de control, pérdida de señal, diferencia entre grupos y en mayor medida perdidas por eficiencia de control en las unidades. Es por ello, que la modernización planteada cubrirá estas pérdidas realizando una inversión del costo referencia mencionado anteriormente.

En el caso de implementarse la propuesta de modernización, el valor estimado de pérdida anual pasaría de ser un pasivo a un activo dentro del balance económico de la empresa, por consiguiente, este activo se destinará a saldar la inversión realizada que es de aproximadamente \$ 1.030.522,09, además, al modernizar estos sistemas se espera un incremento del 5% anual en la producción de energía, en la actualidad son, 26.036,50 MW/h al año de la producción anual.

Tabla 26

Costo de energía

	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

Nota: En la tabla se muestra las cifras a recaudar al implementar la modernización.

Siendo así, la deuda se cancelará con los recursos generados de la producción optima de energía sin registrar pérdidas y con un aumento de la misma en comparación

con la actualidad, es por ello, que 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.

Finalmente, una vez analizada económicamente la propuesta se pone a consideración de la empresa una guía referencial de activos y pasivos para su posterior ejecución, en caso que la entidad cuente con una partida presupuestaria destinada a la modernización el tiempo para recuperar la inversión será menor.

5.7. Comprobación de la hipótesis

Mediante la implementación de los modelos de la IEEE y las normas establecidas para su ejecución, se observa el comportamiento actual de la posición del inyector mediante el servomotor instalado, además, se presenta el tiempo de respuesta del AVR analógico en estabilizar el voltaje de campo hacia el generador. Con estos resultados se compara con los rangos establecidos de los sistemas automáticos, con respecto a la posición que el valor máximo de acuerdo a la bibliografía se espera un tiempo de ejecución $\leq 10 \text{ ms}$, para encontrar una relación se toma un valor a priori de 0,77 ms teniendo así una mejora del 249,23% de eficiencia en el proceso con respecto al actual.

CAPÍTULO VI

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1. 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 IEEE, uno de los parámetros para la ejecución de este modelo es la determinación de la constante del agua.
- 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.
- 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.

6.2. 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.

- En el caso de graficar respuestas con mayor precisión se recomienda configurar el factor de refinamiento a un valor de 100, obteniéndose así mayor cantidad de datos para el procesamiento.
- 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.

Bibliografía

Brokering, W., & Palma, R. (2018). *Atrapando el sol en los sistemas eléctricos de potencia*. Santiago de Chile.

Aller, J. M. (2006). *La Máquina Sincrónica*. Sartenejas: Universidad Simón Bolívar.

Arias Calle, F. S., & Bravo López, A. S. (2016). *Estudio para la Modernización de la Central Hidroeléctrica Saucay*. Cuenca: Universidad de Cuenca.

Arias Reyes, P. D. (2020). *Reguladores de tensión para generadores sincrónicos de plantas de generación*. Quito: R&S Consulting.

Bedoya Berrazueta, M. (2004). *Reingeniería de los procesos de adquisición de bienes y materiales de la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi S.A.* Latacunga: ESPE.

Bowen, L. (2020). *Introducción a Simulink*. Guayaquil. Recuperado el 10 de Noviembre de 2020

Calero Freire, F. (2007). *Estudio Técnico - Económico de la Implementación del Centro de Control de las Centrales Hidroeléctricas Illuchi 1 e Illuchi 2 de ELEPCO S.A.* Quito: EPN. Recuperado el 05 de Marzo de 2020

- Calvopiña Valle, J. C., & Maita Sánchez, S. J. (2016). *Adquisición de datos e implementación de una interfaz gráfica para la evaluación del estado de operación de la Central Illuchi 2 a través de registros de perturbación en estándar COMTRADE*. Quito: EPN.
- Cañar Ramírez, A. H. (2009). *Diseño e Implementación de un Sistema SCADA para la Central Hidroeléctrica La Península*. Sangolquí: ESPE.
- Cardozo F., C. M. (20 de Diciembre de 2019). *OLADE*. Recuperado el 28 de Noviembre de 2020, de http://www.olade.org/sites/default/files/Parte_I.pdf
- Carrera Orellana, J. A. (2011). *Modernización del Sistema de Regulación de Velocidad en la Central Hidroeléctrica Carlos Mora*. Cuenca.
- Catari Ramos, H., & Miranda Ordoñez, R. (2009). *Matlab para el análisis de sistemas eléctricos de potencia*. La Paz.
- CELEC. (2011). Recuperado el 16 de Enero de 2021, de https://www.celec.gob.ec/transelectric/images/Normativa/LEY_REGIMEN_SECTOR_ELECTRICO.pdf
- Chapman, S. (2012). *Máquinas Eléctricas, Quinta Edición*. México, D.F.: The McGraw-Hill.
- Constituyente, A. (2008). Recuperado el 15 de Diciembre de 2020, de <https://www.wipo.int/edocs/lexdocs/laws/es/ec/ec030es.pdf>
- Correa Masache, D. H. (2007). *Modelación y Simulación del Grupo 1 de la Central Hidroeléctrica Illuchi 1 de ELEPCO S.A*. Quito: EPN.

- Delgado Montenegro, I. (1997). *Estudio de los sistemas de regulación de velocidad y turbinas hidroeléctricas y su influencia en la estabilidad transitoria de sistemas eléctricos de potencia*. Quito: EPN.
- Electric, L. (2014). MRT 2.1 Speed Governor System.
- ELEPCOSA. (2019). Recuperado el 15 de Octubre de 2020, de <https://elepcosa.com.ec/nosotros/#1513039225829-08938f4a-e75a>
- Fraile Mora, J. (2008). *Maquinas Eléctricas, Sexta Edición*. Madrid: McGraw-Hill.
- Gómez Palacio, D. (23 de Julio de 2009). Recuperado el 19 de Septiembre de 2020, de http://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=modelo%2Bgenerador%20sincrono&source=web&cd=9&ved=0CFwQFjAI&url=http%3A%2F%2Fwww.maciasweb.com%2Fuia%2Fsistpot%2FGensinc.ppt&ei=XxMiT5PBJoGvgwf68vjqCA&usg=AFQjCNF0_xUzNTJIsjiHvKA-rs18J6dvsQ&cad=rja
- IEEE. (1973). *Dynamic Models for Steam and Hydro Turbines in Power System Studies*.
- IEEE. (27 de Junio de 1991). *Guide for the Rehabilitation of Hydroelectric Power Plants*. Recuperado el 07 de Noviembre de 2019, de <https://ieeexplore.ieee.org/document/159448>
- IEEE. (Noviembre de 1992). *Hydraulic Turbine and Turbine Control Models for Systems Dynamic Studies*. Recuperado el 13 de Enero de 2021, de <https://ieeexplore.ieee.org/document/141700>
- IEEE. (12 de Diciembre de 2005). *Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies*. New York. Recuperado el 21 de Enero de 2021, de <https://ieeexplore.ieee.org/document/7553421>

- IEEE. (2007). *Recommended Practice for Preparation of Equipment Specifications for Speed-Governing of Hydraulic Turbines Intended to Drive Electric Generators*. New York. Recuperado el 28 de Junio de 2020, de <https://ieeexplore.ieee.org/document/4383553/references#references>
- IEEE. (2007). *Standard Definitions for Excitation Systems for Synchronous Machines*. New York. Recuperado el 25 de Julio de 2020, de <https://ieeexplore.ieee.org/document/4274782>
- IEEE. (20 de Junio de 2011). *IEEE Guide for the Application of Turbine Governing Systems for Hydroelectric Generating Units*. (I. P. Society, Ed.) New York, USA: IEEE Std 1207 -2004. Recuperado el 05 de Julio de 2020, de <https://ieeexplore.ieee.org/document/5936081>
- Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill.
- L&S. (2018). *L&S Electric*. Recuperado el 02 de Febrero de 2021, de www.lselectric.com
- Llamba Farinango, W. S. (2014). *Elaboración del Plan de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) de la Central Hidráulica Illuchi N°2*. Latacunga: ESPEL.
- Lopez de Leon, M. (2019). *L&S ELECTRIC, INC*. Recuperado el 16 de Octubre de 2019
- López Rosales, J. W. (2017). *Diseño e Implementación de un Módulo Didáctico de Software para Simulación de Generadores Síncronicos*. Quito: EPN.
- Machowski, J., Bialek, J., & Bumby, J. (2008). *Power System Dynamics: Stability and Control*. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.
- MathWorks. (2020). *MathWorks*. Recuperado el 30 de Agosto de 2020, de https://ww2.mathworks.cn/help/pdf_doc/phymod/simscape/simscape_ug.pdf

- Ministerio del Ambiente. (2017). Recuperado el 18 de Diciembre de 2020, de https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/01/CODIGO_ORGANICO_AMBIENTE.pdf
- Orbe Játiva, D. G. (2014). *Conceptualización de Generadores y Transformadores de Unidad para un Modelo a Escala Reducida del Sistema Nacional Interconectado*. Quito: EPN.
- Patiño Paucar, R. F. (2019). *Análisis de la Implementación de un Código de Red para Sistemas de Control (AVR, GOV Y PSS) de Unidades de Generación Convencional del Sistema Nacional Interconectado*. Quito: EPN.
- Peláez Samaniego, M. R., & Espinoza Abad, J. L. (2015). *Energías Renovables en el Ecuador Situación Actual, Tendencias y Perspectivas*. Cuenca: Gráficas Hernández.
- Sumba Yanza, H. V., & Matute Domínguez, J. F. (2012). *Análisis de las Ventajas de la Modernización de un Regulador de Velocidad Mecánico por uno Electrónico en una Central Hidroeléctrica*. Cuenca.
- Vanfretti Fumagalli, L. (2005). *Modelación y simulación de la máquina síncrona y su operación en sistemas de potencia*. Guatemala: Universidad San Carlos de Guatemala. Recuperado el 05 de Enero de 2021, de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0556_EA.pdf

Anexos