

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas Carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico

ANÁLISIS DEL SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO DEL GRUPO NÚMERO 3 DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA HIDROCAROLINA

Trabajo de grado presentado ante la Ilustre Universidad Técnica del Norte previo
a la obtención del título de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico

Autor:

Néjer Duarte David Remigio

Director:

Ing. Jhonny Barzola MSc.

Ibarra – Ecuador

Año 2022



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1003986088		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Néjer Duarte David Remigio		
DIRECCIÓN:	Ibarra, El Milagro, Calle los Guayabos y vía principal Urcuquí		
EMAIL:	drnejerd@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:		TELÉFONO MÓVIL:	0992829376

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Análisis del sistema de control automático del grupo número 3 de la central hidroeléctrica HydroCarolina
AUTOR (ES):	Néjer Duarte David Remigio
FECHA: DD/MM/AAAA	12/12/2022
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Jhonny javier Barzola MSc.

2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 12 días del mes de diciembre de 2022

EL AUTOR:

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'David Remigio Néjer Duarte', is written over a horizontal line.

David Remigio Néjer Duarte
1003986088

Certificación del director del trabajo de grado

Ing. Jhonny Barzola MSc.

Certifico que después de haber examinado el trabajo de investigación desarrollado por el señor: David Remigio Néjer Duarte, el estudiante ha cumplido con las normas establecidas en la elaboración del trabajo de grado titulado "ANÁLISIS DEL SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO DEL GRUPO NÚMERO 3 DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA HIDROCAROLINA". Previo a la obtención del título de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico, aprobando su defensa impresión y empastado.



Ing. Jhonny Barzola MSc

Director del trabajo de grado

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia, mis padres Remigio Néjer y Rosita Duarte quienes son mi inspiración y razón de vida, gracias por su apoyo y amor incondicional, a mis hermanos Christopher y Katherine, los amo con todo mi corazón y agradezco cada momento que estoy con ellos y hacen que esta vida sea hermosa y llena de felicidad, los amo infinita e incondicionalmente y sigo adelante por ustedes.

“Nunca olvides lo que es realmente importante para ti”

AGRADECIMIENTOS.

Quiero agradecer a Dios por mi vida y la vida de mi familia por todas las cosas que me han pasado y me han ayudado a crecer como persona , gracias a todas las personas que me han ayudado a la realización de este trabajo investigativo especialmente a mi familia , mi madre Rosita y mi padre Remigio quienes me dieron fortaleza y el valor de seguir adelante ,A mi hermana Katherine quien ha sido un ejemplo para mí , a mi hermano Christopher quien hace mis días llenos de felicidad ,muchas gracias a mis amigos y demás familiares que me ayudaron todo el transcurso de mi carrera universitaria, solo me queda gratitud y respeto para aquellos que me tendieron una mano amiga cuando más lo necesitaba tanto en mi vida universitaria como fuera de ella y es gracias a ellos que hoy estoy aquí.

Agradezco al Ingeniero Jhonny Javier Barzola quien fue la persona encargada de la dirección de este proyecto investigativo y facilitó la elaboración de este, gracias a su tutela, paciencia y conocimientos.

Agradecimiento especial al Ingeniero Diego Ortiz quien fue mentor y contribuyente en la realización de esta investigación facilitándome información del caso de estudio del presente proyecto investigativo, muchas gracias por toda su ayuda y paciencia, siempre estaré agradecido con usted.

“Tú puedes lograr lo que te propongas, cree en ti mismo”

Tabla de contenido

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS.	vi
Índice de Figuras	x
Índice de tablas	xii
RESUMEN	xiii
Contextualización	xiv
Planteamiento del problema	xv
Objetivos	xv
Objetivo General	xv
Objetivos Específicos	xv
Justificación	xv
Alcance	xvi
CAPÍTULO 1	1
Establecer los parámetros de funcionamiento para sistemas de control automático de minicentrales hidroeléctricas.....	1
1. Introducción	1
1.1. Partes de una central hidroeléctrica	1
1.1.1. Presa	1
1.1.2. Turbina	1
1.1.3. Turbinas de acción:	2
1.1.4. Turbinas de reacción	2
1.2. Generador	2
1.2.1. Partes de un Generador Eléctrico	3
1.2.2. Transformador	3
1.2.3. Potencia De Una Central Hidráulica	4
1.2.4. Curva de Capacidad de un generador.....	5
1.2.5. Características para sincronización de Generadores	5
1.2.6. Igualdad de voltaje	5
1.2.7. Igualdad en frecuencia	5
1.2.8. La Velocidad De Rotación De Un Generador Síncrono	6
1.2.9. Medición De Los Parámetros Del Modelo De Generador Síncrono	7

1.2.10. Características De Frecuencia-Potencia Y De Voltaje-Potencia Reactiva De Un Generador Síncrono	7
1.3. Excitatriz en los generadores	8
1.3.1. Sistema de excitación de un generador síncrono	9
1.3.2. Elementos de un sistema de control de excitación en un generador síncrono	9
1.3.3. Excitación de corriente continua	10
1.3.4. Excitación de corriente alterna	11
1.3.5. Rectificación Estacionaria	11
1.3.6. Estática	12
1.4. Operación de generadores en Paralelo	12
1.4.1. Ventajas de Operación de generadores en Paralelo	13
1.4.2. Regulador Automático De Voltaje (RAV)	14
1.4.3. Gobernador	15
1.4.4. Gobernador electrohidráulico Digital	15
CAPÍTULO 2	17
Sistematización de señales y parámetros eléctricos considerados en el sistema de control automático de la Minicentral HydroCarolina para la realización de un diagnóstico	17
2. Introducción	17
2.1. Descripción del sistema de control automático	17
2.1.1. Lugar	17
2.1.2. Diagrama de flujo	18
2.2. Datos del Generador (Unidad de generación Nro. 3)	19
2.2.1. Esquema general del sistema de control de grupo de generación de central hidroeléctrica HydroCarolina	21
2.2.2. Estructura Del Sistema & Principio de funcionamiento	22
2.2.3. Diagrama PID Sistema Gobernador	23
2.3. Excitatriz del Generador	25
2.3.1. Diagrama General del sistema	25
2.3.2. Terminales de regulación de excitación	27
2.3.3. Regulador Automático de Voltaje	28
2.4. Datos de Operación del regulador automático de voltaje	30
2.4.1. Funciones de y control	31
2.4.2. Funciones de regulación y protección	31
2.4.3. Diagnostico general del grupo de generación número 3	33

CAPÍTULO 3	33
Elaboración de un reporte técnico sobre el sistema de control automático en el grupo número 3 de la Central Hidroeléctrica HydroCarolina	33
3. Introducción	34
3.1.1. Regulador automático de voltaje	35
3.2. Información del Mantenimiento de la unidad de generación número 3	37
3.3. Análisis de excitatriz	39
3.3.1. Tablero de control grupo de generación número 3	42
3.4. Estado del sistema de control del grupo de generación	44
3.5. Conclusiones	49
3.6. Recomendaciones	50
Bibliografía	51
ANEXOS	55

Índice de Figuras

Fig. 1.1:	Elementos de un generador	3
Fig.1.2:	Velocidades respecto al número de polos de un generador sincrónico	6
Fig.1.3:	Circuito de excitatriz de un generador	8
Fig.1.4:	Esquema de control de excitación un generador síncrono	9
Fig.1.5:	Sistema de Excitación de Corriente Continua	10
Fig.1.6:	Sistema de Rectificación estacionario	11
Fig.1.7:	Sistema de Excitación estático	12
Fig.1.8:	Elementos De Un Generador Sincrónico En La Regulación Potencia Activa- Frecuencia	15
Fig.2.1:	Ubicación GPS Central hidroeléctrica “Hidrocarolina”	18
	18
Fig.2.2:	Diagrama de flujo	18
Fig.2.3:	Terminales de conexión de los devanados de la unidad de generación número 3 HidroCarolina	21
Fig.2.4:	Sistema de control PLC de grupo de generación Numero 3 Central hidroeléctrica HidroCarolina	22
Fig.2.5:	Diagrama PID Sistema Gobernador Unidad de generación número 3 central hidroeléctrica HidroCarolina	23
Fig.2.6:	Ejemplo de Diagrama PID Sistema Gobernador	24
Fig.2.7:	Diagrama general de sistema de generacion del grupo número 3 Central hidroelectrica Hidrocarolina.....	25
Fig.2.8:	Modelo de un sistema de excitación sin escobillas Autoexcitado.	26
Fig.2.9:	Terminales de regulación de excitación	27
Fig.2.10:	Conexionado del AVR al generador sin Bobinas Auxiliares.....	29
Fig.2.11:	Conexionado del AVR al generador Con Bobinas Auxiliares.....	30
Fig.3.1:	Diagrama de flujo del capítulo 3	34
Fig.3.2:	Regulador automático de voltaje Central Hidroeléctrica HidroCarolina.....	35
Fig.3.3:	Mapeo de vibraciones del grupo generador número 3.....	37
Fig.3.4:	Circuito rectificador controlado del grupo de generación número 3	39
Fig.3.5:	Diagrama Actual Avr grupo de generación numero 3 central Hidroeléctrica HidroCarolina	39
Fig.3.6:	Conexionado AVR grupo generador numero 3.....	40

Fig.3.7:	Comprobación de Conexionado interno del tablero de control del grupo de generación numero 3 Central Hidroeléctrica HidroCarolina.....	41
Fig.3.8:	tablero de control grupo de generación central hidroeléctrica HidroCarolina	42
Fig.3.9:	Estructura externa e interna de gobernador y plc grupo de generación numero 3.	43
Fig.3.10:	Conexionado interno del tablero de control del grupo de generación numero 3	44

Índice de tablas

Tabla 2.1. Requerimientos de funcionamiento del grupo de generación número 3 de central hidroeléctrica HidroCarolina.	19
Fuente: (Fuchun Industry Development Company Ltd., 2013)	19
Tabla 2.2. Terminales de conexión de los devanados de la unidad de generación número 3 HidroCarolina	20
Tabla 2.3. Características eléctricas del AVR del grupo Generador número 3 28	
Tabla 3.1. Niveles admisibles de vibración según normativa ISO.	37
Fuente : Norma ISO-10816-3	37
Tabla 3.2. Valores de análisis de vibración en puntos del generador realizados en mantenimientos anteriores.	38
Tabla 3.3. Características de fallas del grupo de generación del sistema de control automático de la central hidroeléctrica HidroCarolina	46

RESUMEN

El presente proyecto de investigación busca determinar el estado actual del sistema de control automático del grupo de generación número 3 en la Minicentral Hidroeléctrica HidroCarolina Ubicada en la Localidad de San Jerónimo Parroquia Lita, Provincia de Imbabura.

En consecuencia, el proceso de esta investigación abordara desde de los parámetros de diseño para sistemas de control automático en centrales hidroeléctricas hasta el análisis del funcionamiento actual del sistema de control de la central HidroCarolina, examinando la naturaleza del sistema de control y su funcionalidad. evaluando el estado y la operatividad de la Excitatriz y el Regulador automático de Voltaje del grupo generador mediante sus manuales de funcionamiento y comprobación de su conexionado.

Dando como resultado, un informe de las anomalías principales que ocasionaron el fallo del sistema de control automático de la central, además de mejoras que se podrían dar en el sistema de control de la central hidroeléctrica HidroCarolina a través de parámetros y ajustes de acuerdo con el estado actual del funcionamiento, aumentando la eficiencia del proceso de generación y disminuyendo los riesgos que conlleva realizar algunos de los procesos de generación.

Contextualización

Debido al fenómeno de cambio climático ha existido un proceso de concientización acerca de la importancia de un proceso de generación energética sostenible y amigable con el entorno, con el cual el papel de las energías renovables ha cobrado suma importancia para frenar los problemas medioambientales globales. Un ejemplo de este tipo de energía es la hidroeléctrica, la cual posee un alto potencial de aplicaciones a futuro. Particularmente cuando el recurso posee una baja altura neta (potencial energético), el costo relativo de comercialización de turbinas de baja potencia es considerablemente alto, por lo que se necesitan más investigaciones que tengan como fin las nuevas formas de generación de energía que disminuyan los costos de implementación e inversión de estas tecnologías.(ADASME, 2019)AA

La capacidad efectiva en generación de energía que hoy tiene Ecuador es en gran medida fruto del gran proceso de innovación de infraestructuras que se ha llevado a cabo desde el 2007, Esto ha provocado una capacidad efectiva de más de 7.000 MW que, frente a la demanda máxima nacional, que está en torno a los 3.692 MW, supone un desaprovechamiento de energía de casi el 50%. (Ministerio de Energía y Minas., 2014)

Una minicentral hidroeléctrica, es una instalación en zona alejada donde la energía del flujo de los ríos es transformada en energía eléctrica a través de distintos procesos. Con el fin de asegurar el buen funcionamiento de sus equipos y la calidad de su servicio de generación, es necesario el monitoreo constante de los estos parámetros: voltaje, corriente, frecuencia, potencia y nivel de caudal.(Malasquez Huayapa, 2018)

Las minicentrales hidroeléctricas mantienen un caudal mínimo (ecológico) preservando la vida aguas abajo de la central, además de eliminar los residuos que arrastra la corriente. Su construcción produce un mínimo impacto ambiental y una mínima perturbación del hábitat local. Las centrales Hidroeléctricas no acumulan agua, sino que utilizan el caudal del río que circula en cada momento, el agua que no se emplea es evacuada por el aliviadero siguiendo su curso natural. Cuando el caudal desciende del mínimo técnico las turbinas dejan de funcionar._(Avilés, 2016)

Planteamiento del problema

La central hidroeléctrica HydroCarolina cuenta con 900KW de potencia instalada. Según información recabada de fuentes primarias no ha existido una actualización de información del sistema. Además, conocemos que la unidad ha logrado generar de forma manual, pero en su forma automática presenta inconvenientes de sincronización y control, dando como resultado la quema o avería de equipos eléctricos en los intentos fallidos el uso del sistema automático, generando un problema de automatización y control.

Objetivos

Objetivo General

Analizar el sistema de control automático del grupo número 3 de la Central Hidroeléctrica HydroCarolina con base en sus condiciones actuales de funcionamiento.

Objetivos Específicos

-Establecer los parámetros de funcionamiento para sistemas de control automático de minicentrales hidroeléctricas.

-Sistematizar los señales y parámetros eléctricos que son considerados en el sistema de control automático de la Central Hidroeléctrica HydroCarolina para la realización de un diagnóstico.

-Elaborar un reporte técnico sobre el sistema de control automático en el grupo número 3 de la Central Hidroeléctrica HydroCarolina.

Justificación

Este proyecto está enmarcado en la línea de investigación 1 referente a producción industrial y tecnología sostenible propuesta por la Universidad Técnica del Norte ;haciendo un énfasis en mejorar los procedimientos de automatización y control de la Minicentral Hidroeléctrica HydroCarolina para ahorrar costos de mantenimiento ,operación y aumentar la seguridad de los equipos y personal de la Minicentral , así mismo vincula un campo de aplicación de conceptos de automatización y control con la realidad de un sector que cada vez toma más importancia para el desarrollo de la región como son las energías renovables tomando como caso de estudio

el mejoramiento del sistema de control automático del grupo de generación número 3 de la Central Hidroeléctrica HydroCarolina. Actualmente en el país existen megaproyectos hidroeléctricos los cuales han servido de avance productivo y energético a nivel nacional es así que hoy en día los futuros proyectos de energía hidráulica se aplicaran en pequeñas vertientes de agua dando como resultado la construcción de mini y pico centrales hidroeléctricas las cuales generan energía renovable aprovechando la fuente de energía y su impacto ambiental es reducido por lo que se justifica el interés en el desarrollo de este tipo de análisis.

Alcance

El presente proyecto se realizará en la central hidroeléctrica HydroCarolina ubicada en San Jerónimo, realizando el análisis del sistema de control automático del grupo de generación número 3 de acuerdo con las condiciones actuales que se encuentra. Además, se utilizará información de fuentes primarias de la Central Hidroeléctrica HydroCarolina para realizar un reporte técnico el cual determinará las condiciones actuales de operación.

Este reporte técnico será de utilidad para documentar de manera organizada y emplearlo para futuras correcciones o mejoras en el sistema de control automático del grupo de generación número 3 de la Minicentral hidroeléctrica HydroCarolina, así como para minicentrales eléctricas en general.

Viabilidad

Para el presente trabajo investigativo se contará con la autorización del personal encargado y disponibilidad de información de fuentes primarias de la Minicentral hidroeléctrica HydroCarolina que permitirá determinar las condiciones actuales en las que se encuentra el sistema de control automático de la Minicentral demostrando así la viabilidad del proyecto para realizar un análisis del sistema de control automático del grupo de generación número 3 de la Central Hidroeléctrica HydroCarolina.

CAPÍTULO 1

“Establecer los parámetros de funcionamiento para sistemas de control automático de minicentrales hidroeléctricas.”

1. Introducción

Para una comprensión adecuada de los sistemas de control automáticos utilizados en centrales hidroeléctricas, es necesario determinar que parámetros conforman un sistema de control automático en una central y que función desempeña cada elemento dentro del sistema. Es así como este capítulo contiene los principales parámetros de control de las centrales hidroeléctricas, haciendo un énfasis las variables para su monitoreo y control.

1.1. Partes de una central hidroeléctrica

Una central Hidroeléctrica está constituida de las siguientes partes:

1.1.1. Presa

Es una barrera fabricada de piedra, hormigón o materiales sueltos, que se construye comúnmente en desfiladeros sobre un río o arroyo. Tiene la finalidad de embalsar el agua en el cauce fluvial para elevar su nivel con el objetivo de derivarla, mediante su canalización teniendo como usos más comunes : Regadíos, laminación de avenidas, evitar inundaciones de aguas debajo de la presa o para la producción de energía mecánica; al transformar la energía potencial del almacenamiento en energía cinética y esta nuevamente en mecánica y así se accione un elemento móvil con la fuerza del agua. La energía mecánica puede aprovecharse directamente, como en los antiguos molinos, o de forma indirecta para producir energía eléctrica, como se hace en las centrales hidroeléctricas.

1.1.2. Turbina

Son máquinas a través de las cuales pasa un **fluido** en forma continua y este le entrega su energía a través de un rodete con paletas o álabes. La turbina es un motor rotativo que convierte energía cinética en energía mecánica. El elemento básico de la turbina es el rotor, que cuenta con paletas, hélices, cuchillas o cubos colocados alrededor de su circunferencia, de tal forma que el fluido en movimiento produce una fuerza tangencial que impulsa la rueda y la hace girar. Esta energía mecánica se transfiere a través de un eje para proporcionar el movimiento de una máquina, un compresor, un generador eléctrico o una hélice. Las turbinas

constan de una o dos ruedas con paletas, denominadas rotor y estator, siendo la primera la que impulsa por el fluido, arrastra el eje en el que se obtiene el movimiento de rotación. (Plana, 2009)

Las turbinas pueden clasificarse en dos subgrupos principales: hidráulicas y térmicas, para el presente caso de estudio definiremos específicamente las turbinas hidráulicas cuyo fluido de trabajo no sufre un cambio de densidad considerable a través de su paso por el rodete o por el estátor; estas son generalmente las turbinas de agua, que son las más comunes, pero pueden modelarse como turbinas hidráulicas a los molinos de viento o aerogeneradores. Dentro de este género suele hablarse de turbinas de acción y reacción. (Plana, 2009)

1.1.3. Turbinas de acción:

Son aquellas en que el fluido no sufre ningún cambio de presión a través de su paso por el rodete. La presión que el fluido tiene a la entrada en la turbina se reduce hasta la presión atmosférica en la corona directriz manteniéndose constante en todo el rodete. Su principal característica es que carecen de tubería de aspiración. La principal turbina de acción es la Turbina Pelton, cuyo flujo es tangencial. Se caracterizan por tener un número específico de revoluciones bajo. (Plana, 2009)

1.1.4. Turbinas de reacción

Son aquellas en el que el fluido sufre un cambio de presión considerable en su paso por el rodete. El fluido entra en el rodete con una presión superior a la atmosférica y a la salida de este presenta una depresión. Se caracterizan por presentar una tubería de aspiración, la cual une la salida del rodete con la zona de descarga de fluido. Estas turbinas se pueden dividir atendiendo a la configuración de los álabes. Así, existen las turbinas de álabes fijos basándose en el tipo de fluido que producen tales como: Francis: Flujo diagonal; Hélice: Flujo axial y turbinas con álabes orientables Deriaz: Flujo diagonal; Kaplan: Flujo axial. (Plana, 2009)

1.2. Generador

Los generadores son máquinas que transforman la energía mecánica en energía eléctrica; empleando un campo magnético para generar un movimiento de electrones y producir energía eléctrica, al ensamblar la bobina conductora a una corriente eléctrica continua se consigue un cambio en el flujo del campo magnético, que interactúa con los polos del imán y que provoca que la bobina gire sobre sí misma produciendo una fuerza electromotriz capaz de transformarse en energía eléctrica. Esto es debido a que, si un circuito externo se conecta a las terminales de bobina, este voltaje generará corriente a través de este circuito, que será energía que se transmitirá a la carga. Por lo tanto, la energía mecánica que hace rotar la bobina se convierte en energía eléctrica. (*¿Qué es un generador eléctrico?,sf*)

1.2.1. Partes de un Generador Eléctrico

El generador eléctrico se conforma de una serie de elementos fundamentales mediante los cuales puede operar correctamente. Sus partes son:

- a) Motor: Es la parte más importante porque constituye la base de la fuerza mecánica.
- b) Alternador: Es el encargado de la producción de la salida eléctrica y de entrada mecánica en los generadores.

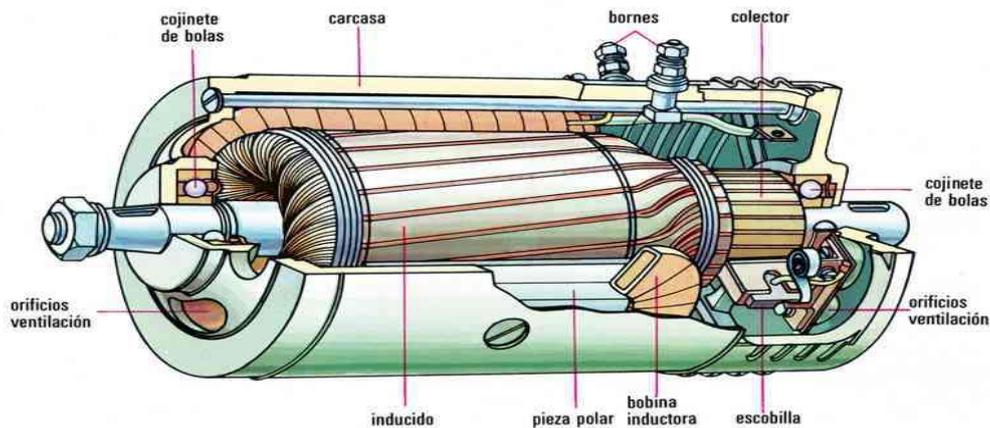


Fig. 1.1: Elementos de un generador
Fuente : (Tecnologiacr3d, 2019)

A su vez, alternador está formado por:

- c) Estator: La parte fija exterior de la máquina en la que se encuentran las bobinas inducidas que producen la corriente eléctrica. El estator se coloca sobre una carcasa metálica que le sirve de soporte.
- d) Rotor: Se trata del componente móvil que gira dentro del estator y que provoca el campo magnético inductor que genera el bobinado inducido.
- e) Regulador de voltaje: Este elemento transforma el voltaje CA (Corriente Alterna) en C.C (Corriente Continua).
- f) Sistemas de enfriamiento: Se encarga de vigilar que el generador eléctrico no se sobrecaliente empleando refrigerantes u otros componentes.
- g) Sistemas de lubricación: La lubricación garantiza la fluidez y la durabilidad de las actividades del generador eléctrico. (<https://www.masferreteria.com>, s.f.)

1.2.2. Transformador

Se denomina transformador a un dispositivo eléctrico que permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna, manteniendo la potencia que ingresa al equipo. En el caso de un transformador ideal, es igual a la que se obtiene a la salida. Las

máquinas reales presentan un pequeño porcentaje de pérdidas, dependiendo de su diseño y tamaño, entre otros factores. El transformador es un dispositivo que convierte la energía eléctrica alterna de un cierto nivel de tensión, en energía alterna de otro nivel de tensión, basándose en el fenómeno de la inducción electromagnética. Está constituido por dos bobinas de material conductor, devanadas sobre un núcleo cerrado de material ferromagnético, pero aisladas entre sí eléctricamente. La única conexión entre las bobinas la constituye el flujo magnético común que se establece en el **núcleo**. El **núcleo**, generalmente, es fabricado bien sea de hierro o de láminas apiladas de acero eléctrico, aleación apropiada para optimizar el flujo magnético. Las bobinas o devanados se denominan primario y secundario según correspondan a la entrada o salida del sistema en cuestión, respectivamente. Este elemento eléctrico se basa en el fenómeno de la inducción electromagnética. Al aplicar una fuerza electromotriz alterna en el devanado primario, debido a la variación de la intensidad y sentido de la corriente alterna, se produce la inducción de un flujo magnético variable en el núcleo de hierro. Este flujo originará por inducción electromagnética, la aparición de una fuerza electromotriz en el devanado secundario. La tensión en el devanado secundario dependerá directamente del número de espiras que tengan los devanados y de la tensión del devanado primario.

1.2.3. Potencia De Una Central Hidráulica

La potencia de una central hidroeléctrica se mide generalmente en megavatios MW en la ecuación (1) (Xitumula,2019) define el cálculo de la potencia de una central hidroeléctrica como:

$$P_e = \rho * 9.81 * \eta_t * \eta_g * \eta_m * Q * H \quad (1)$$

donde:

Pe: Potencia en vatios

P: Densidad del fluido en kg/m³

η_t : Rendimiento de la turbina hidráulica entre 0,75 y 0,94

η_g : Rendimiento del generador eléctrico entre 0,92 y 0,97

η_m : Rendimiento mecánico del acoplamiento turbina alternador 0,95/0,99

Q: Caudal de turbina en m³ /s

H: desnivel disponible en la presa entre aguas arriba y aguas abajo, en metros m.

(Xitumula,2019) define que una central hidroeléctrica está constituida por dos principales tipos de potencia:

Potencia media: potencia calculada mediante la ecuación número 3 considerando el caudal medio disponible y el desnivel medio disponible.

Potencia instalada: potencia nominal de los grupos generadores instalados en la central.

1.2.4. Curva de Capacidad de un generador.

La curva de capacidad de un generador síncrono establece la región de operación segura de la maquina en donde los límites superiores e inferiores permiten a los operadores monitorear el estado actual de los generadores esta información es especificada en el manual de funcionamiento del generador. (J. Morales,2016).

1.2.5. Características para sincronización de Generadores

La sincronización de generadores se produce cuando se requiere acoplar uno o más generadores de corriente alterna tomando en cuenta aspectos fundamentales y básicos como su tensión generada, el desfaseamiento entre los voltajes de los generadores y sus frecuencias. (Ramirez Medina & Sanchez Barroso, 2012)

1.2.6. Igualdad de voltaje

Para poder producir una igualdad de voltaje en los generadores la tensión de la máquina entrante debe ser igual a la tensión de la línea. Al existir una variación de tensión final en la máquina entrante ya sea mayor o menor que la tensión de la línea, produce una onda instantánea de corriente en la conexión de la nueva máquina, que origina subsecuentemente una corriente que circula por el arrollamiento de la armadura de la máquina, en la cual los voltajes en bornes de cada generador deben coincidir con la barra de carga, es decir los valores de voltaje eficaz deben concordar y existir concordancia de fases.(Ramírez Medina & Sanchez Barroso, 2012)

1.2.7. Igualdad en frecuencia

Al sincronizar generadores sincrónicos la frecuencia de ambas tensiones debe ser las equivalentes, significa que en el momento de la conexión la frecuencia del generador a acoplar y las frecuencias en las barras o carga deber ser iguales. (Ramirez Medina & Sanchez Barroso, 2012)

Si las frecuencias de generadores conectados en paralelo no son iguales cuando se conectan juntos, se presentarán grandes potencias transitorias hasta que se estabilicen los generadores en una frecuencia común. Las frecuencias de las dos máquinas deben ser casi equivalentes, pero no por completo. Se debe diferir una pequeña cantidad para que los

ángulos de fase de la maquina en aproximación cambien en forma lenta con respecto a los ángulos de fase del sistema .(J.Chapman, 2012)

1.2.8. La Velocidad De Rotación De Un Generador Síncrono

Los generadores síncronos producen una frecuencia eléctrica que se sincroniza con la tasa mecánica de rotación del generador. El generador síncrono consta de un electroimán que se le suministra corriente directa, el campo magnético del rotor apuntará siempre en dirección en la que gira el rotor. Según (J. Chapman,2012) en la ecuación (2) La tasa de rotación de los campos magnéticos en la máquina está relacionada con la frecuencia eléctrica

$$f_e = \frac{n_m P}{120} \quad (2)$$

del estator.

Donde:

f_e = frecuencia eléctrica en Hz

n_m = Velocidad mecánica del campo magnético en r/min (igual a la velocidad del rotor de una máquina síncrona)

P = Número de polos

Fuente (J.Chapman, 2012)

Ya que el rotor gira a la misma velocidad del campo magnético, la velocidad fija a la que debe girar dependerá del número de polos que tenga la máquina. Los alternadores acoplados a turbinas hidráulicas se construyen para velocidades muy distintas, según la potencia, altura del salto y tipo de la turbina hasta velocidades de 1800 RPM (Revoluciones por minuto). El rotor es del tipo de polos salientes y su eje puede estar dispuesto en forma horizontal o vertical; las velocidades de menores a 750 rpm son generalmente usadas por generadores de polos salientes de eje vertical, cuyas potencias son para medianas y grandes centrales. Para velocidades superiores a 1,800 rpm (Revoluciones por minuto)., en la gran mayoría de casos, se utilizan generadores de rotor cilíndrico de eje horizontal.

FRECUENCIA	VELOCIDAD	Nº POLOS
60 Hz.	1800 r.p.m.	4
60 Hz.	1200 r.p.m.	6
60 Hz.	900 r.p.m.	8
60 Hz.	720 r.p.m.	10

Fig.1.2: Velocidades respecto al número de polos de un generador sincrónico
Fuente: (Velasco)

Como se observa en la fig1.2 podemos establecer que, cuando la turbina de accionamiento es de baja velocidad, se requerirá de generadores de un gran número de polos, por lo que estos alternadores serán de polos salientes y requerirán inducidos en el estator con un gran perímetro, en el cual pueden ser insertados sus bobinados.

1.2.9. Medición De Los Parámetros Del Modelo De Generador Síncrono

Para describir un generador síncrono existen tres cantidades que describen el comportamiento de un generador síncrono real

1. La relación entre la corriente de campo y el flujo (y, por lo tanto, entre la corriente de campo y su tensión).
2. La reactancia síncrona.
3. La resistencia del inducido.

El primer paso del proceso es la realización de la prueba de circuito abierto en el generador. En esta prueba el generador se hace girar a velocidad nominal, se desconectan las terminales de cualquier carga y se establece la corriente de campo como cero. Entonces se incrementa gradualmente por etapas la corriente de campo y se mide el voltaje en las terminales en cada etapa.

El segundo paso del proceso es la realización de una prueba de cortocircuito. Para realizar una prueba de cortocircuito se establece la corriente de campo igual a cero y se hace cortocircuito en las terminales del generador por medio de un conjunto de amperímetros. Con esta característica es posible encontrar el voltaje generado interno del generador dada cualquier corriente de campo.(J.Chapman, 2012)

1.2.10. Características De Frecuencia-Potencia Y De Voltaje-Potencia Reactiva De Un Generador Síncrono

Los generadores son accionados por un motor primario, que es la fuente de potencia mecánica del generador. A medida que la potencia que se toma de ellos se incrementa, la velocidad a la que giran disminuye, cualquiera que sea el mecanismo regulador presente en el motor primario, siempre se ajusta para suministrar una característica de caída suave con el incremento en la carga. Según (J. Champan2012) la caída de velocidad está definida en la ecuación (3) como:

$$SD = \frac{n_{sc} - n_{pc}}{n_{pc}} \times 100\% \quad (3)$$

Donde:

SD: Velocidad de la caída

n_{sc} : Velocidad del motor primario en vacío

n_{pc} : Velocidad del motor primario a plena carga.

Los motores primarios tienen una caída de velocidad de 2 a 4%, como se define en la ecuación (3) la mayoría de los mecanismos regulares contienen algún tipo de ajuste del punto fijado para permitir que varíe la velocidad de vacío de la turbina.(J.Chapman, 2012)

1.3. Excitatriz en los generadores

Se utilizan para suministrar a la máquina corriente continua de campo de c.c(corriente continua), La salida trifásica del generador excitador se rectifica a corriente directa por medio de un circuito rectificador trifásico para alimentar al campo de C.C del generador controlando la pequeña corriente de campo de C.C del generador para ajustar la corriente del campo en la maquina principal. Como se muestra en la Fig.1.3 , ya que no existe ningún contacto mecánico entre el rotor y el estator los excitadores sin escobilla no requieren muchos mantenimientos a diferencia de los anillos rozantes y las escobillas.(J.Chapman, 2012)

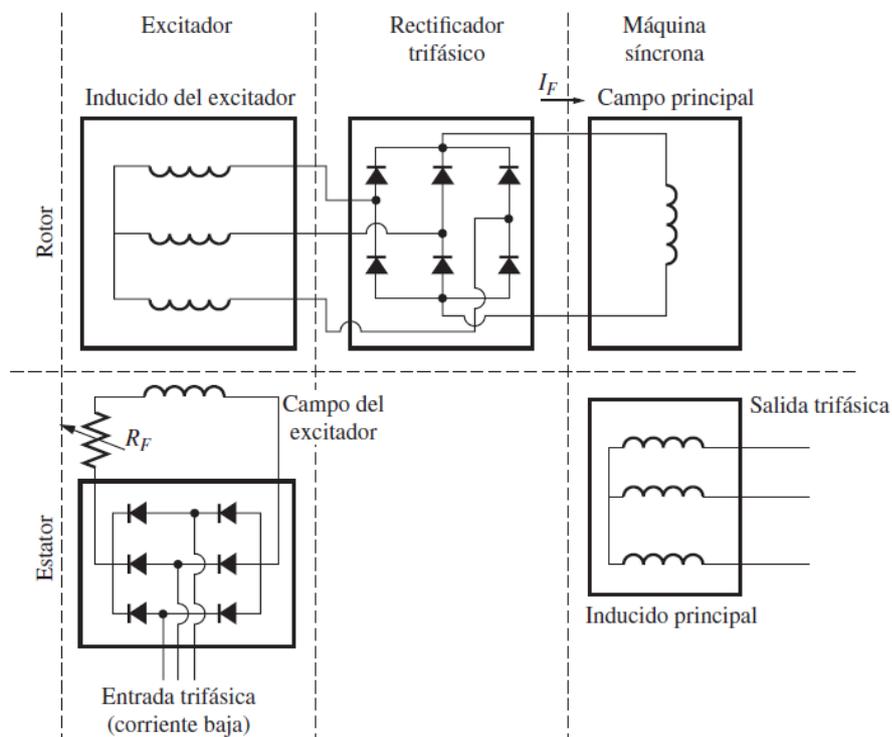


Fig.1.3: Circuito de excitatriz de un generador
Fuente (J.Chapman, 2012)

1.3.1. Sistema de excitación de un generador síncrono

(Nizama Valdés, J. C,2013) Define como un sistema de excitación a un sistema que se ajusta automáticamente a la corriente de campo del generador síncrono haciendo que su voltaje de salida sea constante de acuerdo con los valores establecidos de la consigna además de tener respuesta ante perturbaciones: transitorias y estacionarias, manteniendo una operación estable del generador. Asimismo, debe ser capaz de acoplarse al resto de sistemas de protección del generador, tales como:

- Protección ante fallas de aislamiento en el rotor debido a altos voltajes,
- Calentamiento en el rotor debido a corrientes de campo,
- Calentamiento en el estator debido a corrientes de armadura,
- Calentamiento por baja excitación de operación y debido al exceso de flujo.

1.3.2. Elementos de un sistema de control de excitación en un generador síncrono

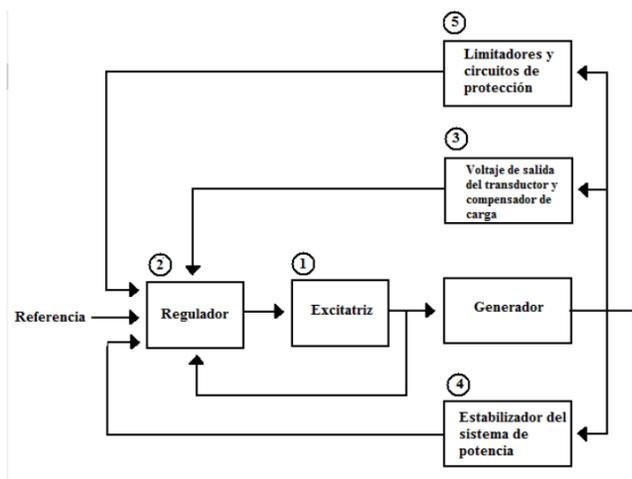


Fig.1.4: Esquema de control de excitación un generador síncrono
Fuente: (Nizama Valdés, J. C,2013)

1. Excitatriz: como se observa en la fig.1.4 mediante un bloque se suministra la energía eléctrica de alimentación de campo rotatorio del generador síncrono, constituyendo la fuente de poder del SCE (Sistema de control de excitación).

2. Regulador: se utiliza para procesar y amplificar la señal de entrada a un nivel de acuerdo con cómo se realice el control. Incluyendo regular funciones de estabilidad del SCE

3. Terminal de voltaje y compensador de carga: su función principal es el medir la tensión en bornes del generador y estimar la diferencia de tensión existente hasta el nodo de inyección a la red. Para posteriormente rectificar y filtrar estos valores a una cantidad C.C.

4. Estabilizador de potencia del sistema: Este bloque envía señales de salida adicional hacia el regulador, para amortiguar las oscilaciones del sistema.

5. Limitadores y circuitos de protección: su característica principal es configurar y controlar las funciones de protección para garantizar una operación estable dentro de los límites de capacidad de excitación en el generador. (Nizama Valdés, J. C,2013)

Debido a que los generadores síncronos tienen su salida de voltaje en media tensión es necesario hacer uso de un sistema de excitación en el campo para alcanzar el voltaje de salida. El diseño del sistema de excitación es parte fundamental del generador debido a que además de mantener el voltaje de salida estable, debe tener una respuesta rápida ante cambios repentinos de carga de tal manera que no altere la estabilidad del sistema.

Los sistemas de excitación se clasifican de acuerdo con la fuente de poder que se utiliza en la excitación de los cuales se derivan los siguientes:

- Corriente Continua (C.C)
- Corriente Alterna (A.C)
- Estática

1.3.3. Excitación de corriente continua

Se Obtiene mediante el uso de generadores de C.C que proporcionan la corriente al rotor por medio de escobillas y anillos deslizantes. Generalmente el excitador es impulsado por el mismo eje del generador. Debido el constante mantenimiento y reemplazo de escobillas y anillos, causado por el desgaste de las escobillas o al polvo del carbón, estos sistemas de excitación han sido reemplazados por sistemas de excitación sin escobillas. **Aun sí sistema el de excitación de C.C** se encuentra en servicio.

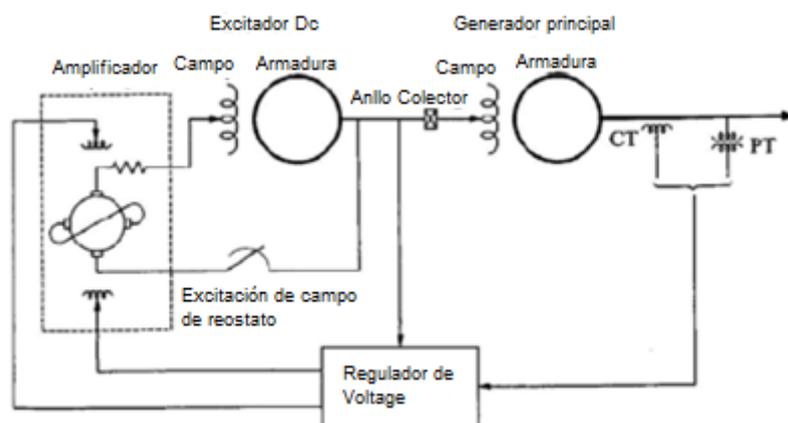


Fig.1.5: Sistema de Excitación de Corriente Continua
Fuente: (Nizama Valdés, J. C,2013)

En la Fig.1.5 se muestra un sistema de excitación de C.C, el cual cuenta con un conmutador el cual abastece de corriente continua al campo del generador principal. El excitador es controlado por un amplidina. Una amplidina, (Generador de corriente continua en que la potencia de excitación requerida es menor que en la dinamo ordinaria) la cual tiene un conjunto de escobillas separadas en 90° eléctricos, uno sobre el eje directo.

1.3.4. Excitación de corriente alterna

Se Realiza mediante el uso de alternadores los cuales proporcionan la excitación del generador de poder. Usualmente el excitador es instalado en el mismo eje que la turbina del generador. La salida del primer generador es rectificada por un grupo de rectificadores. La salida de C.C es alimentada directamente al rotor del generador síncrono. La armadura del excitador de A.C y los rectificadores giran sobre el mismo eje. En este tipo de sistemas el rectificador trifásico reemplaza al conmutador, los anillos rozantes y las escobillas.

1.3.5. Rectificación Estacionaria

En este tipo de sistemas la rectificación se realiza mediante rectificadores estacionarios, por lo cual la excitación se hace a través de anillos deslizantes.

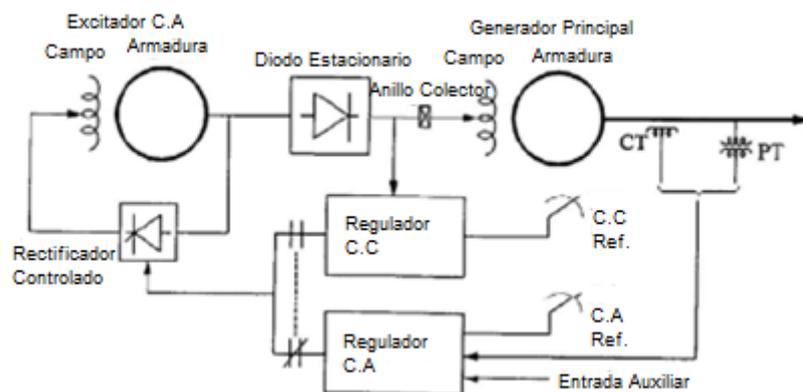


Fig.1.6: Sistema de Rectificación estacionario
Fuente: (Nizama Valdés, J. C,2013)

En la figura 1.6 se representa un excitador en modo auto excitado, por lo que su campo se obtiene a través de un rectificador con tiristores que toma la energía a la salida del alternador excitador, con lo que se logra tener un control sobre el mismo, el cual puede modificar el voltaje a su salida y por extensión al voltaje de campo del alternador de potencia o principal. Cabe mencionar que en este modo de funcionamiento no se tiene control sobre los diodos rectificadores.

Mediante el uso de rectificadores controlados, los diodos estacionarios cambian por rectificadores controlados estacionarios, de tal manera que el regulador de voltaje controla el encendido de los tiristores, adicionando un regulador independiente para el encendido de los

rectificadores del alternador excitador. Existen dos modos independientes de regulación: el primero por un regulador de A.C que mantiene el voltaje en los bornes del estator del alternador principal a un voltaje de referencia de A.C, y otro el cual con un regulador de C.C mantiene constante el voltaje en el campo del generador principal de acuerdo con una referencia determinada.

1.3.6. Estática

En estos sistemas de excitación todos los componentes son estáticos, desde los rectificadores ya sean controlados o no, como la fuente de excitación de C.C para el campo del generador. Aquí la fuente de alimentación se obtiene desde del mismo generador, a través de un transformador reductor conectado al mismo bus de fase aislada al que están conectadas las terminales del estator del generador.

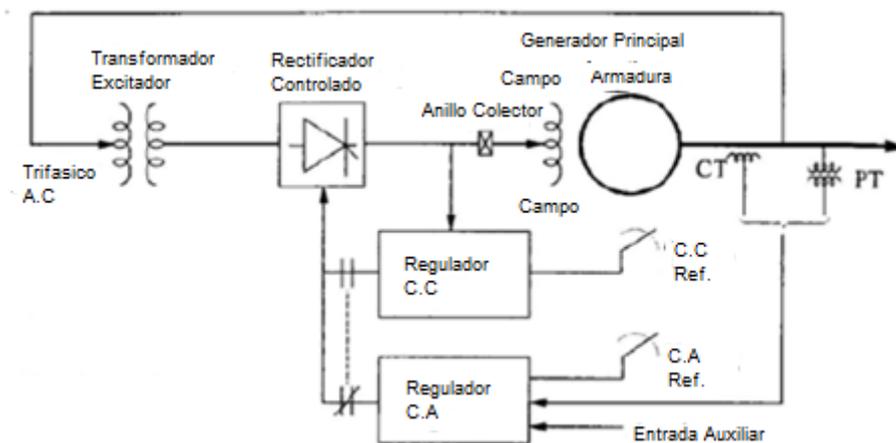


Fig.1.7: Sistema de Excitación estático
Fuente: (Nizama Valdés, J. C.,2013)

Dentro de las características de este tipo de sistemas de excitación se encuentra que debido a que el transformador está conectado al mismo bus del generador, en caso de que exista una falla externa, provocará una reducción de voltaje en el generador, por lo que el transformador también disminuirá la tensión de alimentación al campo del generador. En la figura 1.7 se ejemplifica un sistema estático de excitación.

1.4. Operación de generadores en Paralelo

La operación de dos o más generadores en paralelo tiene ventajas significativas respecto a un generador trabajando solo, especialmente su disponibilidad, se puede conectar en paralelo únicamente los generadores necesarios para suplir las necesidades de potencia debido a incrementos de carga. Antes de conectar en paralelo un generador a una barra

común es necesario sincronizarlo como se ha mencionado anteriormente, ya que cada uno de los generadores cuenta con un interruptor, éste debe cerrar únicamente cuando la barra y el generador entrante coinciden en frecuencia, voltaje y secuencia de fases; además la onda sinusoidal de la barra común y los generadores coinciden en el pico, es hasta el momento del cierre del interruptor que el generador está en paralelo. Para los generadores sincrónicos conectados en paralelo la distribución de potencia aparente depende de los **ajustes de voltaje y frecuencia** para cada uno de los generadores, el voltaje se regula con la **corriente de excitación** en el rotor determinando el monto de potencia reactiva entregada por el generador síncrono, cuando el voltaje interno del generador es igual al voltaje de la carga a conectarse, el generador no entrega potencia reactiva, si el voltaje interno es mayor al voltaje de la carga, el generador entrega potencia reactiva, y por último si el voltaje interno del generador es menor al voltaje de la barra común, el generador síncrono absorbe energía reactiva. En el caso de la potencia real, esta depende del desplazamiento angular del eje del generador. (Ramírez Medina & Sánchez Barroso, 2012).

1.4.1. Ventajas de Operación de generadores en Paralelo

(Ramírez Medina & Sanchez Barroso, 2012) Algunas ventajas, desde el punto de vista económico y **estratégico** son: Varios generadores pueden suministrar **más carga** que una sola máquina; Al tener muchos generadores se **incrementa la confiabilidad** del sistema puesto que la falla de cualquiera de ellos no causa la pérdida total de la potencia generada. Tener varios generadores operando en paralelo es posible retirar uno o varios de ellos para **realizar reparaciones** o mantenimiento preventivo. o Varios generadores que funcionen en paralelo pueden ponerse en servicio o quitarse según la **fluctuación de la demanda**. o Si se utiliza un solo generador y éste no se encuentra operando cerca de plena carga, será relativamente ineficiente. Sin embargo, al emplear varias máquinas pequeñas es posible operar solo una fracción de ellas. Las que operan lo hacen a cargas cerca de la plena carga y, por lo tanto, con **más eficiencia**. La sincronización de un generador síncrono significa conectar el generador a una línea existente que tiene una tensión final V , evitando corrientes transitorias de conexión. Para evitar una corriente transitoria deben satisfacerse las siguientes condiciones:

- La tensión final de la máquina entrante debe ser igual a la tensión V de la línea.
- Ambas tensiones deben estar en fase.
- La frecuencia de ambas tensiones debe ser la misma.

La automatización de unidades en generación de centrales hidroeléctricas no es diferente de un proceso industrial pues los equipos controladores instalados reciben la información necesaria y en tiempo real del estado de las variables y parámetros eléctricos mediante los

dispositivos de campo para proceder a realizar tareas que permitan optimizar el desempeño del proceso de operación de las unidades de generación.

La operación Eficaz de un generador sincrónico se obtiene **cuando** la frecuencia del sistema y el voltaje permanecen respectivamente constantes o varían de manera finita y controlada cuando existen fluctuaciones de diferente índole en el Sistema Eléctrico de Potencia. (Riascos Barraqueta D. 2020).

El control de un generador sincrónico se obtiene mediante un control de potencia activa (velocidad/frecuencia) y potencia reactiva (voltaje).

El control de potencia activa(velocidad/frecuencia) de las unidades de generación se realiza a través del control de velocidad de la turbina por medio del regulador de velocidad o gobernador.

El control de la potencia reactiva (o voltaje) se realiza a través de control con lazo cerrado del voltaje del devanado de campo por medio del AVR. Aunque, en principio, débilmente acoplados, el gobernador y AVR interactúan entre sí. El principal medio de desacoplamiento utilizado hasta ahora es el llamado PSS(Estabilizador de sistemas de potencia). La entrada de PSS se basa en la desviación de potencia activa (o velocidad). Su salida ingresa al sistema de control AVR con el propósito de aumentar la componente de torque de amortiguación. (Boldea, I, 2006).

1.4.2. Regulador Automático De Voltaje (RAV)

El regulador automático de voltaje *RAV* o por sus siglas en ingles *AVR* (Average voltage regulator) es un elemento de electrónica de potencia que se encarga de mantener el voltaje constante en los terminales del generador igual al voltaje de referencia, independientemente de la demanda de potencia activa y reactiva. Este dispositivo actúa sobre la excitatriz, regulando la corriente de excitación inyectada al campo del generador. Esta regulación puede ser de forma manual, midiendo el voltaje en los terminales y ajustando la corriente del rotor mediante un mecanismo manual (autotransformador regulable). Sin embargo, en la mayoría de las aplicaciones de los generadores sincrónicos esto no es posible, y es necesario dotar un sistema automático de regulación de voltaje, el cual es capaz de comparar las señales y actuar eficazmente sobre el sistema de excitación. (RominaFloresEstrella,2019)

Los AVR digitales actualmente ofrecen las siguientes funciones:

- Arranque suave con Limitadores *LME* (limitador mínimo de excitación y *LME* (limitador máximo de excitación).
- Limitador de corriente máxima del estator Limitador de flujo máximo V/Hz(voltaje sobre frecuencia).

- Control del factor de potencia y potencia reactiva.
- Protección de sobrevoltaje y bajo voltaje.
- Estabilización del sistema de potencia.
- Sincronización.
- Control PID (Control proporcional Ideal) con parámetros ajustables.

Fuente: (Sigrist,2016)

1.4.3. Gobernador

El Gobernador o *Governor* (por sus siglas en inglés) es un equipo que ,mediante el cálculo del error entre la consigna y la medición tanto para la potencia eléctrica como para la frecuencia, establece las acciones de control para la potencia mecánica entregada al eje de la máquina. Se trabaja junto con una turbina (bien sea de agua, vapor o gas), donde el flujo de ingreso del recurso primario se regula con una válvula de admisión. Como entrada se incluye: la frecuencia mecánica, asociada a la velocidad de giro del eje, y la referencia de potencia, según los requerimientos para la central Hidroeléctrica. (JavierMaldonadoAndrade,2020)

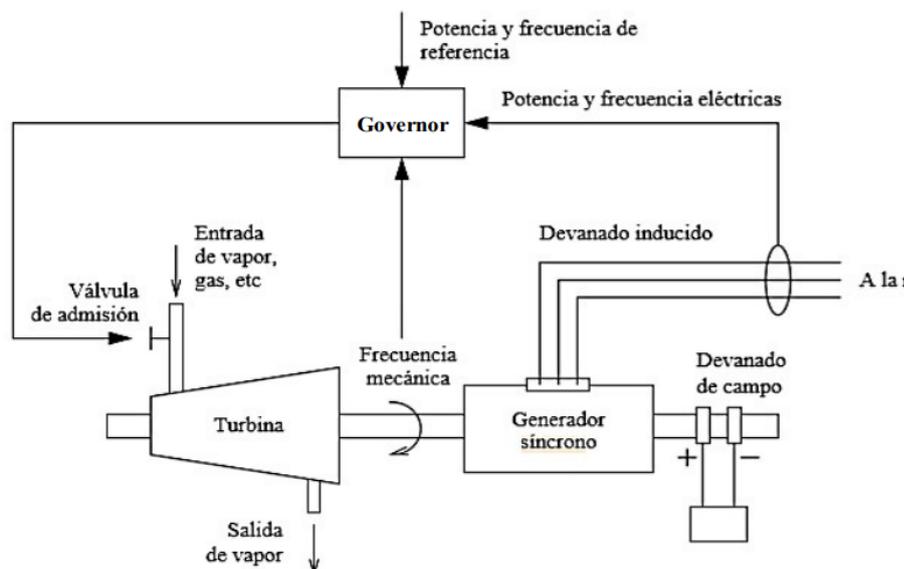


Fig.1.8: Elementos De Un Generador Síncrono En La Regulación Potencia Activa-Frecuencia
Fuente: P. Ledesma, "Regulación de frecuencia y potencia"

1.4.4. Gobernador electrohidráulico Digital

Es un controlador digital apoyado en microprocesadores y ordenadores que son usualmente controladores tipo PID. Los controladores digitales utilizados para el sistema de control de una turbina son muy flexibles ya que pueden utilizarse para funciones que no están directamente relacionadas con la función de control de velocidad de la turbina. El sistema de control del gobernador digitales capaz de llevar a cabo las siguientes funciones de control,

además del control de velocidad durante la marcha en vacío, operando en una red aislada; operación interconectada.

- Controlarla potencia de salida dependiendo de la variación en la frecuencia de la red interconectada.
- Control conjunto de la potencia activa de varias unidades de **generación en una central eléctrica**.
 - Control de potencia activa según los niveles de agua en el embalse.
 - Arranque / parada automática por comando único.
 - Respuesta rápida a condiciones transitorias.
 - Control desde un lugar remoto de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA por sus siglas en inglés).
 - Secuencia de control.
 - Optimización de carga.
 - Optimización de doble turbina regulada.

Para el control de una turbina hidráulica se puede establecer los siguientes modos principales de control

- Control de velocidad
- Control de potencia.
- Control de nivel de agua.
- Control de apertura.
- Control de caudal.

CAPÍTULO 2

“Sistematización de señales y parámetros eléctricos considerados en el sistema de control automático de la Minicentral HidroCarolina para la realización de un diagnóstico”

2. Introducción

En este capítulo se realizó el análisis de la estructura del sistema de control automático del grupo de generación número 3, haciendo un énfasis en su regulador automático de voltaje y como se correlaciona con partes del sistema de control automático, para obtener como resultado sus partes actualmente operativas, basándose en lo anteriormente dicho se obtuvo los parámetros de funcionamiento.

2.1. Descripción del sistema de control automático

Mediante el sistema de control automático es posible realizar operaciones de arranque y parada de una o más unidades generadoras **de la central, además de** controlar el sincronismo, tensión y su potencia, un sistema de control automático puede detectar cualquier anomalía en el sistema proveniente de fallos en equipos en tiempo real, debido a esto es de suma importancia conocer el estado actual del sistema de control de la unidad de generación número 3 de la Minicentral HidroCarolina.

2.1.1. Lugar

La minicentral hidroeléctrica “HidroCarolina” está ubicada en la provincia de Imbabura, **Cantón Ibarra**, Parroquia rural de Lita con una Latitud de 3100 **MSNM** (Metros sobre el nivel del mar) vía a San Lorenzo.

En esta investigación se **tomó** como caso de estudio la unidad de generación número 3 de la central hidroeléctrica HidroCarolina la **cual está conformada** por una turbina Francis

que funciona a un caudal de 1.64m³/s además de un voltaje de 440Voltios, produciendo una potencia de 470W.



Fig.2.1: Ubicación GPS Central hidroeléctrica "Hidrocarolina"

Fuente: Google Maps

El Área total se distribuye en: una sala destinada a alojar a los equipos electromecánicos ya mencionados, otra para la subestación, un área de depósito de herramientas y un cuarto y baño para operadores.

2.1.2. Diagrama de flujo

En el siguiente diagrama de flujo se especifica el tipo metodología para adquirir información de los parámetros y señales que son considerados en el sistema de control automático del grupo de **generación número 3** de la central hidroeléctrica HidroCarolina cumpliendo con la línea de investigación Nro. 1 propuesta por la Universidad Técnica del Norte referente a producción industrial y tecnología sostenible.

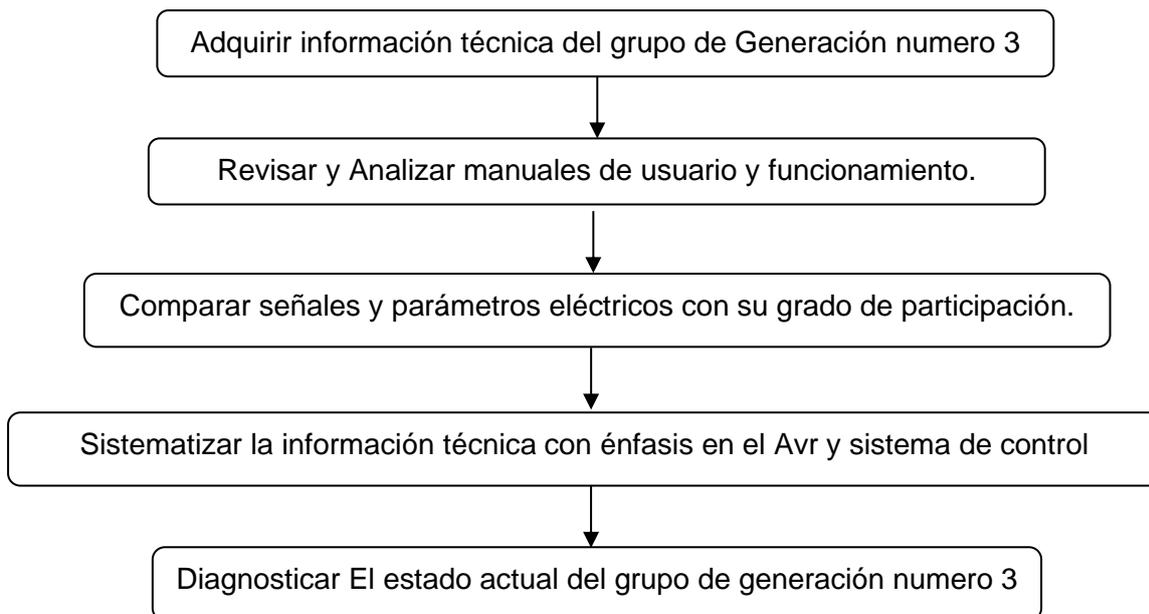


Fig.2.2: Diagrama de flujo
Fuente : Autor,2022

2.2. Datos del Generador (Unidad de generación Nro. 3)

El generador adopta una constitución sin escobillas, consta de tres componentes principales para su caso de estudio: generador, excitador de C.A y rectificadores de silicio giratorios. El marco del generador principal está hecho de placas de acero por soldadura. Los devanados del estator de bajo voltaje se insertan en el núcleo del estator (Ranuras). El nivel de aislamiento de los devanados es *clase E-6*, los medidores de temperatura (Pt 100) están equipados en el devanado del estator para supervisar su temperatura. El generador está en conexión estrella – delta. Hay seis terminales para tres fases y suministrar la alimentación.

Potencia Nominal	470 (kW)
Voltaje Nominal	440 (V)
Corriente Nominal	770.9(A)
Frecuencia Nominal	60 (Hz)
Factor de Potencia Nominal	0.8 (Inductivo)
Velocidad Nominal	900(r/min)
Velocidad de Rotación Máxima	1800(rpm/min)
Nivel de Aislamiento	F/F
Voltaje de excitación nominal del generador	40(V)
Corriente de excitación nominal del generador	160(A)
Voltaje de excitación nominal de la Excitatriz	65(V)
Corriente de excitación nominal de la Excitatriz	4(A)

Tabla 2.1. Requerimientos de funcionamiento del grupo de generación número 3 de central hidroeléctrica HidroCarolina.

Fuente: (Fuchun Industry Development Company Ltd., 2013)

El generador está incorporado de **rodamientos con soporte final**, para prevenir daños en el cojinete causados por la corriente del eje. El rodamiento en un extremo está acolchado con materiales aislantes, los devanados de los polos del rotor están hechos de barras planas de cobre, además, los Pt 100 se utilizan para medir la **temperatura del rodamiento**. El aislamiento se moldea mediante prensa de calor; el nivel de aislamiento es clase F.

El excitador de C.A. y el generador principal comparten un eje común. Cuando el rotor excitador gira bajo el efecto de los campos magnéticos establecidos por el excitador del estator, los devanados de la armadura del rotor inducen un potencial de C.A trifásica que luego se rectifica mediante un circuito rectificador de puente que consiste en seis elementos de silicio. La corriente rectificada de campo de C.C se suministra a los devanados de poste del generador principal, entonces los devanados del estator del generador inducirán un potencial de inducción trifásico bajo el campo rotatorio causado por la rotación del rotor. Por lo tanto, el voltaje del generador de salida se puede regular controlando la corriente de excitación del estator de diezterios.

Nro.	Nombre del devanado	Nombre del terminal	Marca del terminal
1	Bobinado del estator	1ra Fase (Inicio)	U1
		2da Fase (Inicio)	V1
		3ra Fase (Inicio)	W1
		1ra Fase (Fin)	U2
		2da Fase (Fin)	V2
		3ra Fase (Fin)	W2
2	Bobinado de Excitatriz	Positivo	F1
		Negativo	F2
3	Calentador	Inicio	HE1
		Final	HE2
4	Terminal del estator (medición de la temperatura)		1,1',---6,6'
5	terminal del rodamiento (medición de la temperatura)		7,'7,---8, 8'

Tabla 2.2. Terminales de conexión de los devanados de la unidad de generación numero 3 HidroCarolina

Fuente: (Fuchun Industry Development Company Ltd., 2013)

2.2.1. Esquema general del sistema de control de grupo de generación de central hidroeléctrica HidroCarolina

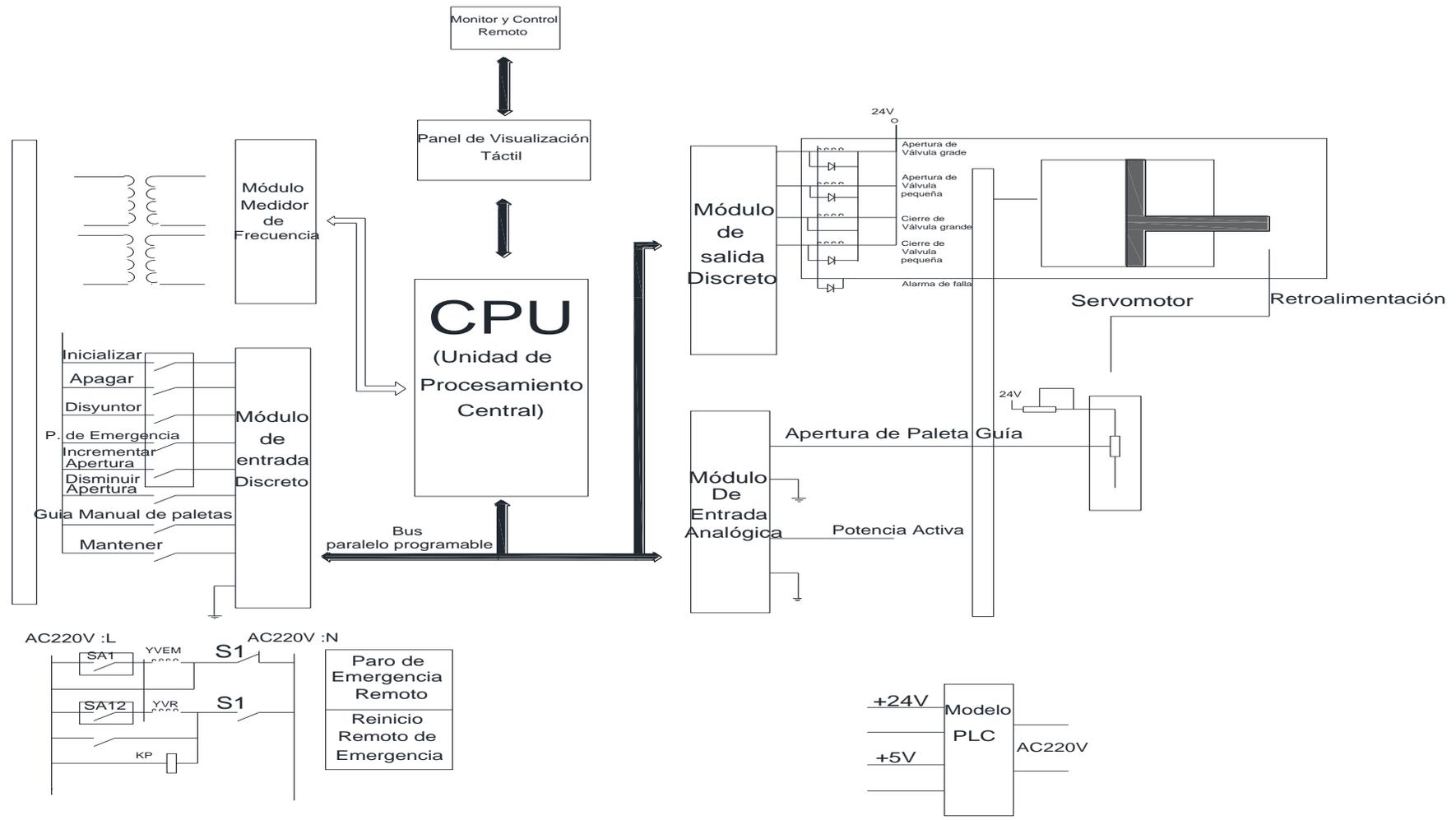


Fig.2.3: Terminales de conexión de los devanados de la unidad de generación numero 3 HidroCarolina
Fuente: (Fuchun Industry Development Company Ltd., 2013)

El sistema de control gobernador funciona mediante un controlador de motor de alta precisión, el cual acciona la barra de bolas en el convertidor electrohidráulico que también posiciona su reinicio automáticamente. La distribución de la válvula guía y su movimiento principal se realiza mediante la salida de aceite hidráulico el cual impulsa proporcionalmente servomotores para controlar la velocidad y la carga de la turbina, el principal parámetro con el que funciona este sistema es la frecuencia ya que la apertura y cierre de las válvulas y paletas guía se las efectúa mediante una medición y comparativa de los valores de operación, en caso de ocurrir alguna falla el Governor activara sus protecciones y enviara una señal de indicación de fallo al tablero de control .

2.2.2. Estructura Del Sistema & Principio de funcionamiento

El sistema de control de PLC (Controlador lógico programable) y Gobernador funciona como un sistema PID y opera la abertura de la paleta guía para **ajustar la velocidad** y el control de carga en la turbina de la unidad generadora. El servo mecanismo electrohidráulico tiene un sistema de 2 etapas para el aumento de **la presión hidráulica**, la primera etapa es la válvula piloto y el servomotor auxiliar, en la segunda etapa es la válvula principal de distribución y servomotor principal.

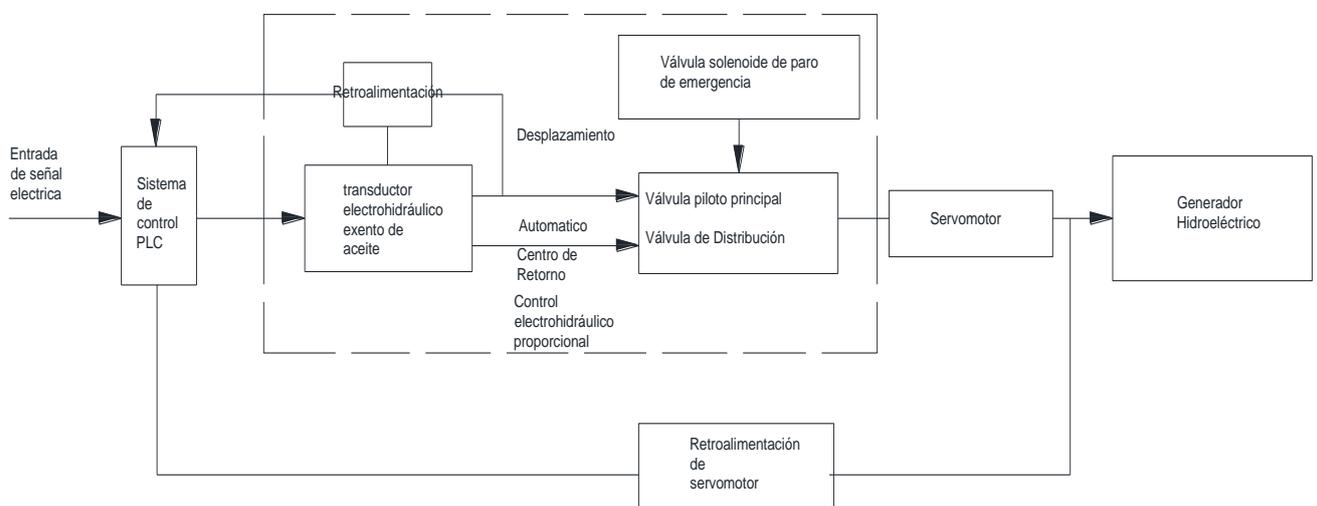


Fig.2.4: Sistema de control PLC de grupo de generación Numero 3 Central hidroeléctrica HydroCarolina
Fuente: (Fuchun Industry Development Company Ltd., 2013)

Como se observa en la fig. 2.4 ,después de comparar y ampliar la señal de retroalimentación de la posición y salida del servomotor ,las señales de salida del sistema de control *PLC* hacen que el motor funcione como un actuador lineal mecánico y dispositivo de

posición milimétrico puntilla el cual se endereza automáticamente para producir desplazamiento en proporción a la señal de salida permitiendo que la válvula piloto se mueva el mismo desplazamiento por la dirección directa de la conexión con la válvula piloto .Por lo tanto, la válvula de distribución principal forma el desplazamiento uniforme a través del servomotor auxiliar , haciendo que el motor se desacople hasta que las señales del servomotor principal sea igual a la salida de la señal digital.

2.2.3. Diagrama PID Sistema Gobernador

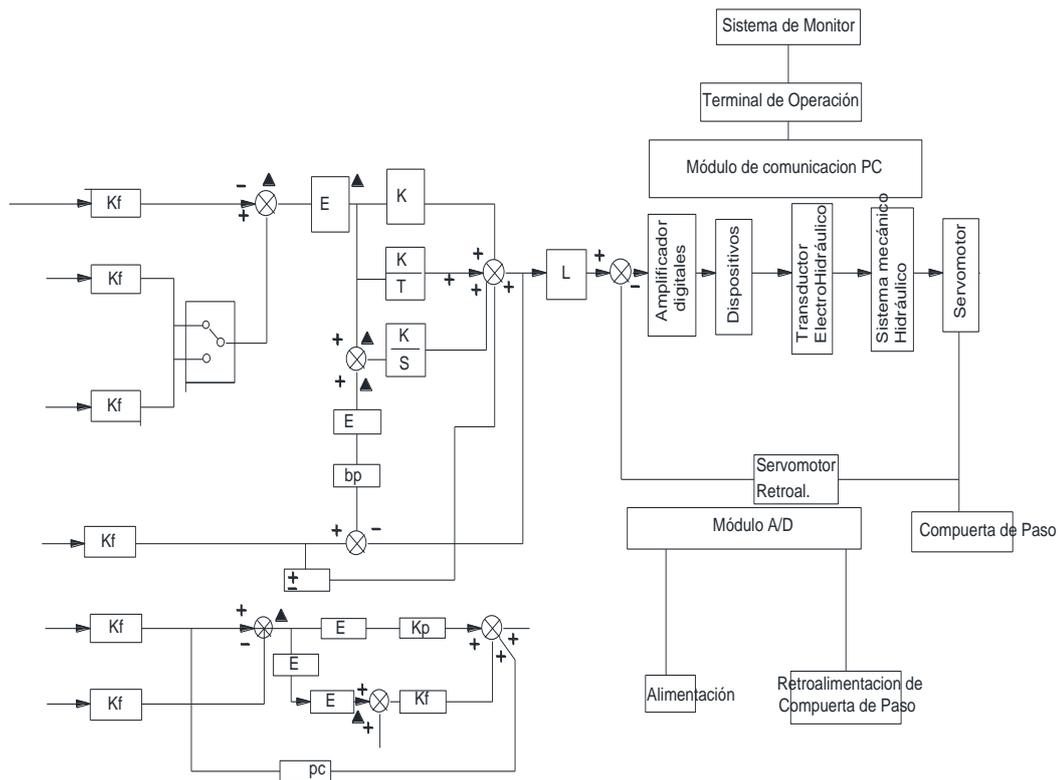


Fig.2.5: Diagrama PID Sistema Gobernador Unidad de generación numero 3 central hidroeléctrica HydroCarolina
Fuente: (Fuchun Industry Development Company Ltd., 2013)

El módulo de salida del interruptor controlará las señales de apertura o cierre de ancho impulso además del sistema hidráulico mecánico/digital para hacer que la paleta guía actúe de acuerdo con la regulación establecida y active las señales de alarma cuando se produce una falla. El modelo de salida de subestación de control es para producir el sistema hidráulico mecánico en sentido horario y antihorario, en función de la anchura correspondiente de ancho de pulso ya sea señal apertura o cierre por valor de control calculado, como se aprecia en la figura 2.5 se utiliza el modelo de salida para controlar la válvula proporcional sobre el valor calculado para hacer que la paleta guía actúe a acuerdo a la regulación del gobernador y envíe señales cuando ocurre una falla ya que el módulo nos permite medir la frecuencia , la unidad de envío y frecuencia neta al PLC para su actualización y detección de fallas.

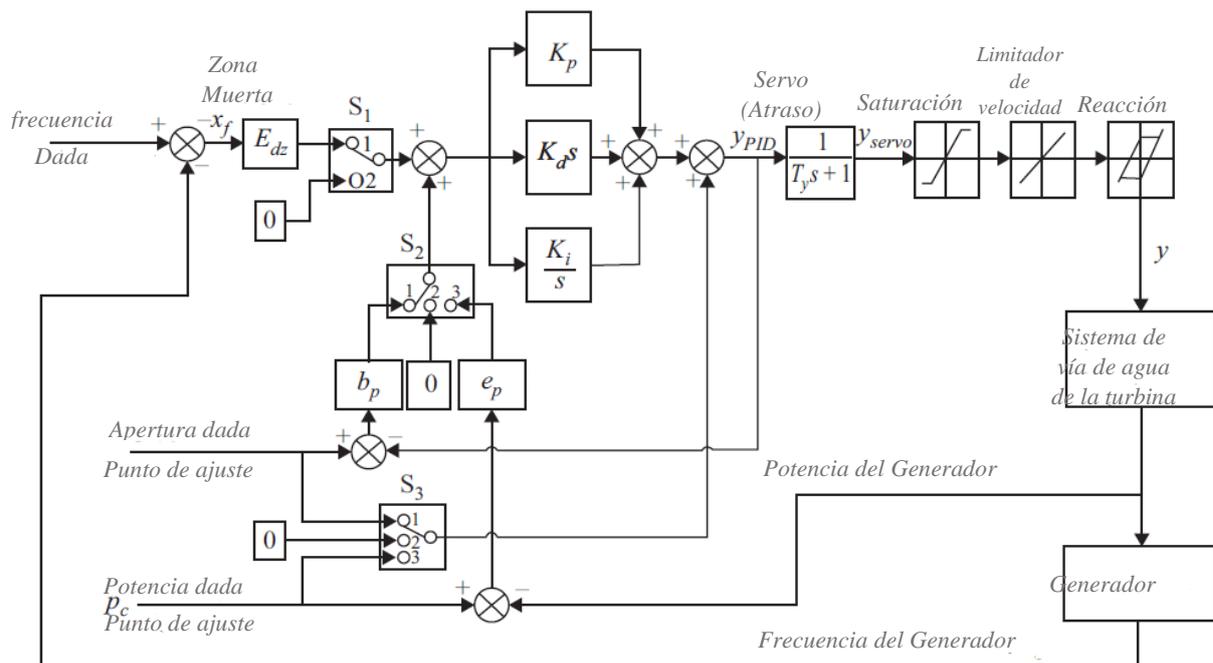


Fig.2.6: Ejemplo de Diagrama PID Sistema Gobernador
Fuente: (Kishor & Kishor , 2017)

Como se aprecia en la figura 2.6 ,un modelo del sistema Gobernador contiene tres modos de control principales, control de frecuencia, control de apertura y control de potencia. Estos tres modos se basan en diferentes entradas al sistema de control, es decir, su desviación de frecuencia, desviación de apertura y desviación de potencia, respectivamente. Se realiza una comparación de salidas en la unidad de Comunicación del módulo para controlar la acción de válvula para hacer que la paleta guía actúe de acuerdo con el requisito de las normas de regulación y alarma cuando ocurre una falla.

2.3. Excitatriz del Generador

2.3.1. Diagrama General del sistema

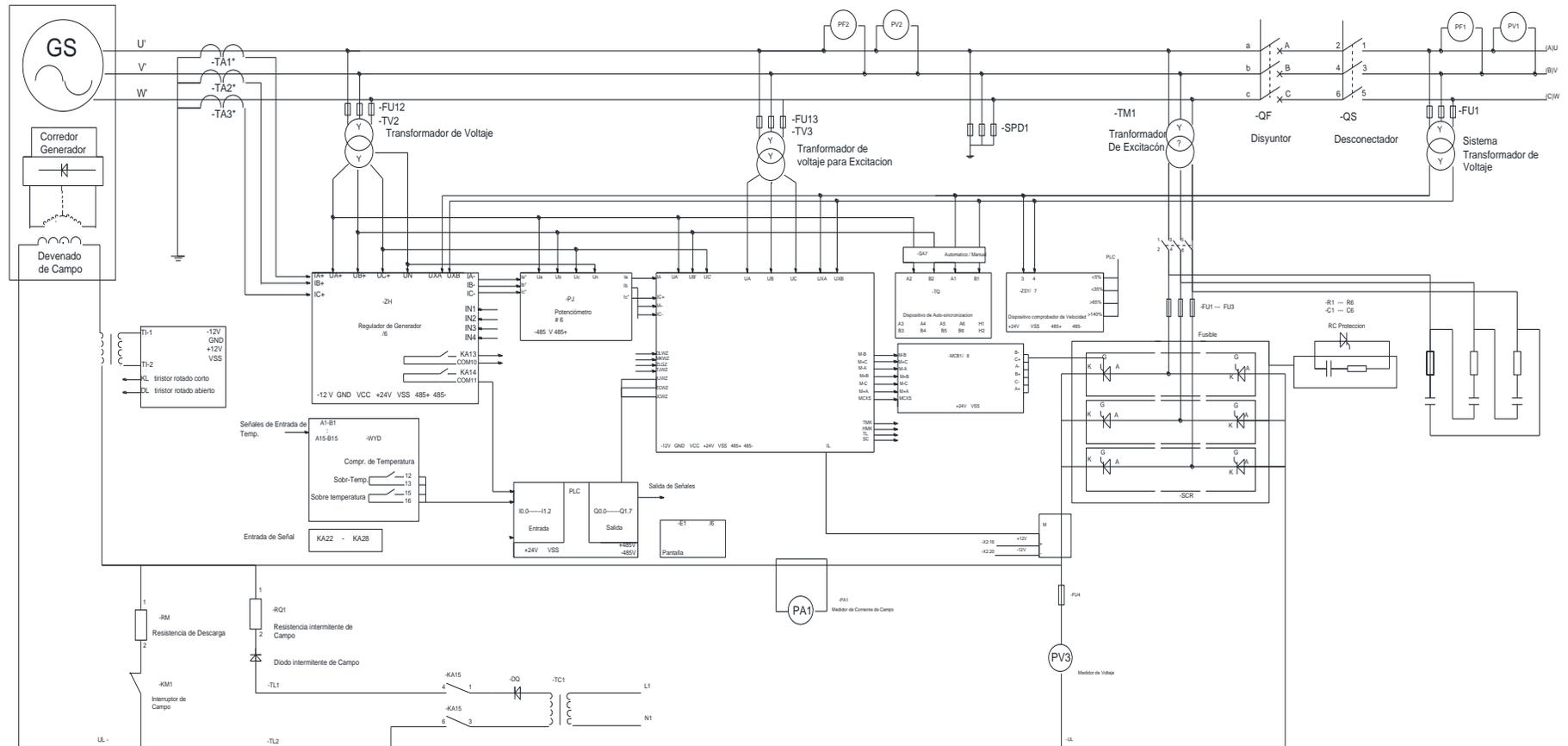


Fig.2.7: Diagrama general de sistema de generacion del grupo numero 3 Central hidroelectrica Hidrocarolina
Fuente: (Fuchun Industry Development Company Ltd., 2013)

El sistema de control automático de la unidad de generación número 3 de la central hidroeléctrica HidroCarolina está distribuido como se ilustra en la figura 2.7 cuando la excitación del rotor gira bajo los efectos magnéticos del estator los devanados del rotor inducen un potencial de C.A que se rectifica mediante un circuito de puentes rectificadores (6 diodos de silicio) ,la corriente de campo rectificada se suministra al devanado del generador principal así se inducirá un potencial de inducción trifásico a los devanados del estator del generador por lo cual mediante el control de la corriente de excitación del estator podemos controlar el voltaje de salida .

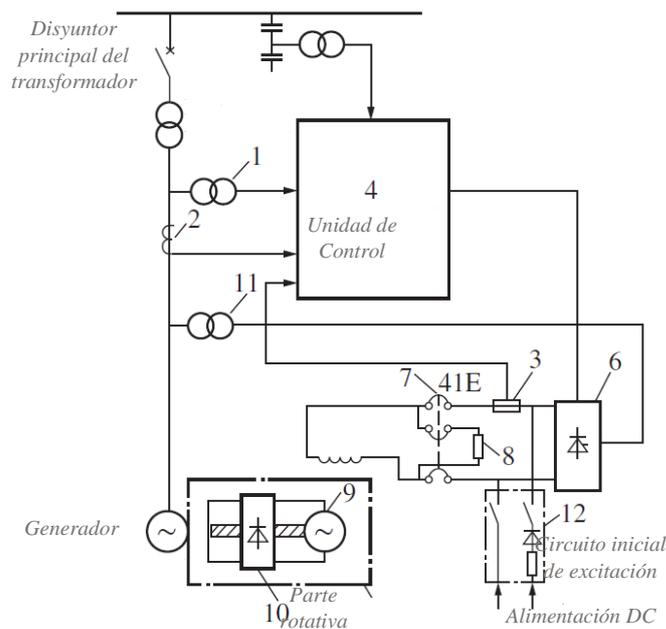


Fig.2.8: Modelo de un sistema de excitación sin escobillas Autoexcitado.

Fuente : (Kishor & Kishor , 2017)

En el sistema de excitación sin escobillas que se muestra en la Figura 2.8, En donde: 1. Transformador de tensión; 2. Transformador de corriente; 3. Derivación; 4. Unidad de control; 6. Circuito rectificador; 7. Interruptor de campo magnético; 8. Resistencia de desexcitación; 9. excitador de corriente alterna; 10. Rectificador giratorio. 11. Transformador de excitación; 12. Circuito de excitación inicial, el rectificador SCR (Rectificador controlado de silicio) es alimentado por el transformador de excitación (11) del lado del generador síncrono, lo que lo convierte en un sistema auto excitado. Mientras tanto, antes que el sistema auto excitado se active y se establezca el voltaje del generador, la fuente de alimentación de C.C interna habilitará la excitación inicial.

2.3.2. Terminales de regulación de excitación

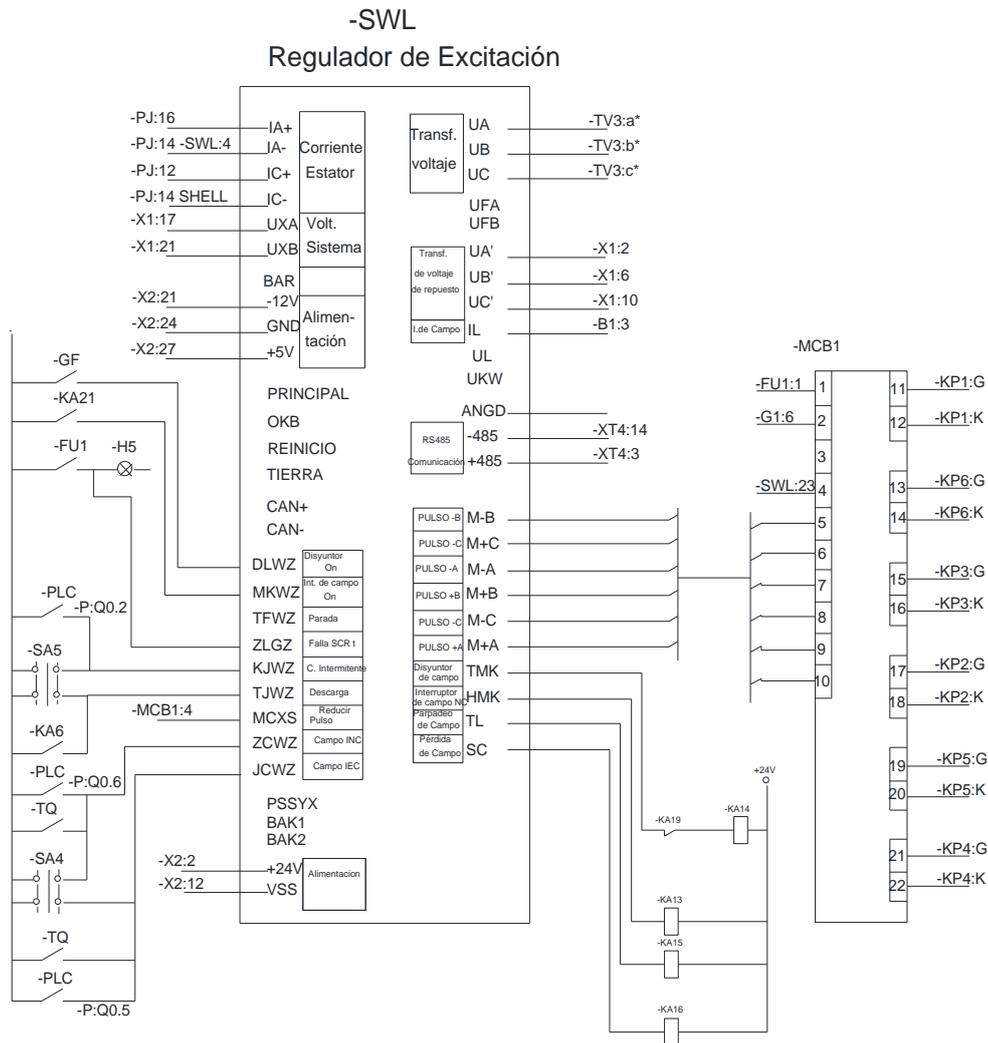


Fig.2.9: Terminales de regulación de excitación
Fuente: (Fuchun Industry Development Company Ltd., 2013)

En el sistema de excitación sin escobillas, debido a los requisitos de control, el diseño del excitador principal de C.A es sobre la base de las siguientes consideraciones:

El sistema de excitación sin escobillas el regulador de excitación automático funciona en el rectificador SCR conectado al circuito de excitación del excitador principal de C.A, la señal de control de excitación no funcionará en el lado de bobinado de campo del generador hasta que pase por el elemento de inercia del excitador C.A con una constante de tiempo de bobinado de rotor alto. Al reducir la constante de tiempo de espera para el excitador de C.A mejorara la respuesta de voltaje del sistema de excitación. La frecuencia se puede aumentar aumentando el número de polos del excitador de C.A.

2.3.3. Regulador Automático de Voltaje

Gracias a información de fuentes primarias se sabe el regulador automático que está actualmente funcionando y es descrito en la tabla 2.3 no es el sistema de regulación con el que el grupo generador fue instalado ya que fue remplazado por el AVR GRT7TH4 que cumple con las funciones que necesita el grupo generador.

Como se ha mencionado en el capítulo 1 el funcionamiento del AVR se presenta mediante una variación de la tensión del generador en función de la variación de la frecuencia. En nuestro caso de estudio cuando la reducción de la rotación en la excitación disminuye, reduciendo la tensión de salida del generador. La caída de tensión es en media 7,5 voltios por Hercios. el ajuste de la V/F (Voltaje sobre frecuencia) realizado en el límite de la frecuencia nominal AVR.

Su circuito de control y regulación utiliza semiconductores y circuitos integrados ,no poseen componentes mecánicos para encender el campo y su sistema es totalmente estático. Posee un ajuste de tensión interno por trimpot (Un potenciómetro de resistencia ajustable que ajusta niveles de voltaje y corriente) y externo por potenciómetro, posibilitando un rango de ajuste de la tensión como se muestra en la tabla 2.3.

características	Modelo			
	GRT7TH4	GRT7TH4 P	GRT7TH4 E	GRT7TH4 PE
Corriente nominal de operación	5A	7A	5A	7A
Corriente Pico (máx.10s)	7A	10A	7A	10A
Entrada analógica $\pm 9V_{C.C}$	NO		SI	
Operación Paralela. Ajuste	SI			
Certificación CSA	SI			
Regeneración	160 hasta 300vca o 320 hasta 600vca			
Alimentación de potencia	170 hasta 280 VCA (monofásica o bifásica)			
relación de gaño del rectificador	0.45			
Tensión de Salida	76.5 hasta 126 C.C			
Resistencia de Campo	6 hasta 50 ohmios			
Regulación estática	0.50%			
Respuesta dinámica Ajustable	8 a 500ms			
Frecuencia de Operación	50 a 60 Hz			
protección de Sub-frecuencia (V/F)	Ajustable			
Ajuste interno de tensión	$\pm 15\%$			
Ajuste Externo de tensión	$\pm 15\%$			
Temperatura de Operación	desde -20° hasta 60°			
Supresión de EMI	Filtro EMI			
Peso aproximado	480g			

Tabla 2.3. Características eléctricas del AVR del grupo Generador número 3

Fuente: (Electrónicos , Equipamientos Grameyer Ltda, 2009)

Su sistema de control PID es ajustado a través de trimpots que regulan la ganancia proporcional y ganancia integral, que permite operación con las otras 2 unidades generadoras a las cuales está conectado el grupo generador número 3 de la central hidroeléctrica HydroCarolina,

El funcionamiento es basado en la comparación del valor eficaz de la tensión de regeneración con la referencia de tensión, ajustada a la suma del trimpot P1 con el trimpot externo. El error es procesado por la malla de regeneración cuyo valor determina el ángulo de disparo del tiristor que puede cambiar de 0 hasta 180°, esta forma se controla la tensión de salida del generador.

La generación empieza a través de la tensión residual del generador. Después que la tensión tenga un 10% de la tensión de valor nominal, el regulador controlara tensión del generador haciendo que la tensión ascienda a través de la rampa inicial en aproximadamente 3 segundos, hasta conseguir la tensión nominal. A partir de ese momento, el circuito de control PID mantendrá la tensión de salida del generador constante de acuerdo con el valor ajustado.

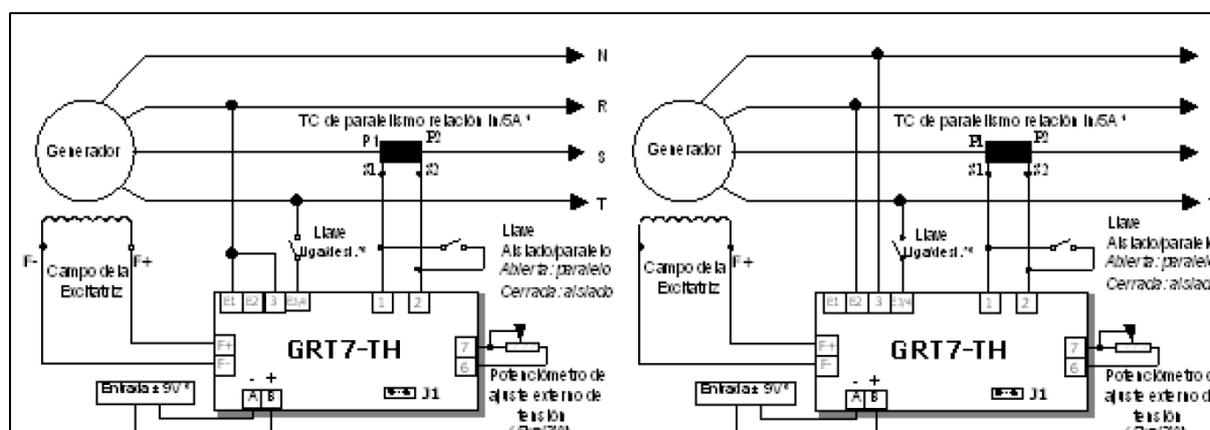


Fig.2.10: Conexión del AVR al generador sin Bobinas Auxiliares

Fuente: (Electrónicos, Equipamientos Grameyer Ltda, 2009)

Mediante La señal de tensión de salida del generador se hace la composición con la señal de corriente del generador tal y como se aprecia en las figuras 2.10 y 2.11 respectivamente. Lo que resulta de esta interacción introduce un error en la regeneración de la señal real de tensión, provocando un aumento o una disminución en la tensión del generador, haciendo que el reactivo entre los generadores se quede dentro de los valores de regulación. El ajuste de esta compensación es hecho a través del trimpot P2. la tensión de regeneración sufre una

influencia causada por la corriente de la fase S que es agregada con la tensión de las fases R y T.

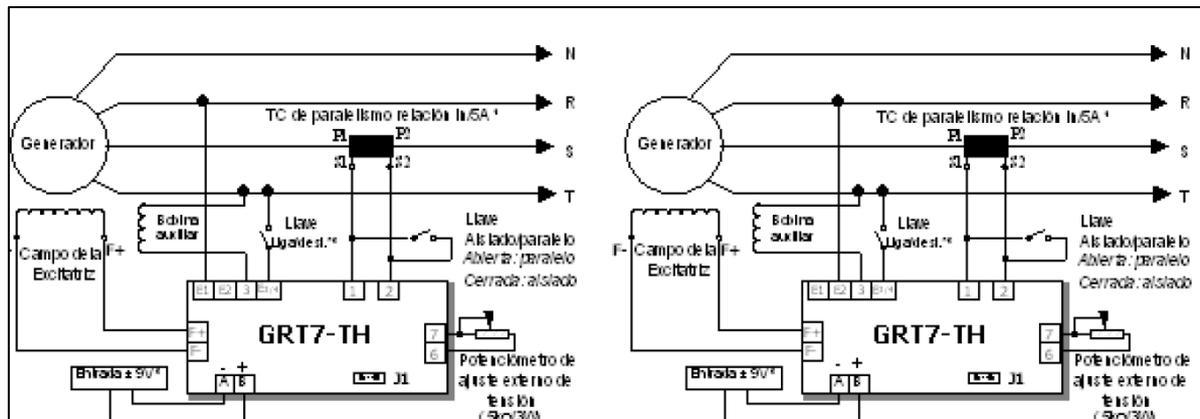


Fig.2.11: Conexión del AVR al generador Con Bobinas Auxiliares

Fuente: (Electrónicos, Equipamientos Grameyer Ltda, 2009)

Esta influencia es pequeña en módulo y grande en fase, lo que ayuda a tener una buena compensación para cargas reactivas una pequeña influencia para las cargas activas. El transformador de corriente para compensación de reactivos se configura en la fase S del generador, y la señal de regeneración en las fases R y T.

2.4. Datos de Operación del regulador automático de voltaje

La configuración para garantizar una compensación es la siguiente:

- Accionar el generador sencillo (aislado de la red), aplicando una carga resistiva con cerca de 20% de la capacidad del generador.
- Después de esto configura el trimpot completamente en el sentido horario, en esta operación debe ocurrir una baja de tensión en el generador.

Si Al volver el trimpot nuevamente a la posición antihoraria la tensión aumenta, significa una correcta configuración de polaridad del TC (transformador de corriente), caso contrario, el TC deberá ser invertido.

Cuando se conecta algunos generadores en paralelo este procedimiento es necesario en cada generador, para garantizarse que todos los TC's están polarizados de la misma manera.

P1: Ajuste de Tensión

P2: Ajuste de banda de compensación de reactivos

P3: Ajuste de Estabilidad

P4: Ajuste de Estabilidad

P5: Ajuste de Sub-frecuencia

P1 = Girando en sentido horario aumenta la tensión

P2 = Girando en sentido horario aumenta la banda de compensación de reactivos

P3 = Girando en sentido horario la respuesta se torna más lenta

P4 = Girando en sentido horario la respuesta se torna más lenta

P5 = Girando en sentido horario aumenta la banda de U/F y antihorario disminuye

2.4.1. Funciones de y control

Ya que el control de excitación actúa en el lado de bobinado de campo de la C.A del excitador, la regulación de la excitación del generador solo se puede habilitar a través del elemento de inercia del excitador de C.A con una constante de tiempo alta. Para mejorar la velocidad de regulación de la excitación, la constante de tiempo debe ser compensada para. Mientras tanto, las medidas de compensación varían dependiendo de las señales de perturbación.

2.4.2. Funciones de regulación y protección

La medición y regulación de la unidad de frecuencia y la frecuencia neta se mide mediante la integración de hardware y software. La frecuencia es medida por residuales, el voltaje y los dientes de engranaje también se pueden seleccionar de acuerdo con los requisitos del usuario. Sin carga, hay dos tipos de modos de control: **configuración de frecuencia y seguimiento de frecuencia de red**. En cuanto a este último modo, la frecuencia unitaria se ajusta automáticamente a la frecuencia del sistema para obtener una sincronización rápida; en el modo de ajuste de frecuencia, la frecuencia de la unidad será controlado bajo una frecuencia dada.

- Controlador de nueve puntos de regulación tipo PID.
- Asegurar que las unidades funcionen de manera estable en todas las condiciones de operación: sin carga, operación aislada.
- Con el control de bucle abierto en la regulación de la configuración de potencia, la potencia de salida de la unidad aumenta o disminuye rápida y precisamente.
- Diagnóstico, visualización y alarma en tiempo real, y todas las averías registradas
- Reglas de modo de circuito cerrado que hacen que la turbina de agua surja con la velocidad rotacional establecida a velocidad de rotación de la tasa de ganancia.
- Con la interfaz de comunicación serie, esto se comunica con la computadora principal y se realiza operación automática de la planta.
- Se puede realizar el control de bucle cerrado de potencia, y las señales de ajuste de potencia tanto digital como analógicas en base a la conexión con el monitoreo del sistema.

- Tres modos de trabajo: modo manual mecánico, modo automático y eléctrico; modo manual que se puede cambiar sin ninguna interrupción. bajo el modo manual mecánico, la paleta de guía de seguimiento gobernador se abre automáticamente; en modo automático, el control puede ser realizado por el gobernador.
- Diferentes monitoreos y pruebas de procesos: monitoreo de procesos de inicio, prueba de características estáticas, perturbación de frecuencia sin carga, oscilación de frecuencia sin carga, prueba de rechazo de carga.
- Funciones de seguridad: los operadores pueden acceder a diferentes operaciones de interfaz por únicas contraseñas.
- Control proporcional opcional o modo de control digital: control proporcional o válvula digital El modo de control se puede seleccionar a través del terminal en modo automático o eléctricamente manual.

Según el esquemático y manual de funcionamiento del grupo de generación número 3 de la central hidroeléctrica HidroCarolina existen protecciones tales como :

- **Protecciones de bajo voltaje:** cuando los valores de voltaje estén por debajo de los establecidos se dispara el disyuntor además de apagar el sistema
- **Protecciones de alto voltaje:** debido a la lenta acción del sistema de regulación de velocidad por consiguiente esta unidad no contiene protecciones contra sobrevoltaje
- **Protección de sobre y baja frecuencia:** Cuando la frecuencia desciende a 45HZ dispara el disyuntor, disminuye la salida de las unidades de turbina y se apagará el sistema, Cuando la frecuencia es inferior a 40HZ, el tiristor se apagará para salvaguardar los equipos más sensibles del sistema de igual manera , cuando la frecuencia exceda los 55hz se activara el disyuntor y apagará el sistema , cabe mencionar que estas configuraciones con preestablecidas de fabrica por lo que al momento de funcionar el sistema opera con la frecuencia de 58-59hz $\pm 0.05\%$
- **Protección contra perdida de excitación:** Bajo los criterios de medición de terminales, de bajo voltaje del rotor, lado alto voltaje que no cumplan con los valores de consigna se disparará el disyuntor automáticamente y se apagará el sistema.
- **Protección de sobre corriente:** Cuando la corriente del generador excede la sobre corriente dispara el disyuntor además de apagar el sistema.
- **Protección contra fugas de sobrevelocidad:** cuando la frecuencia supere los 70hz dispara el disyuntor principal
- **Protección contra disparos rápidos de corriente :** Cuando la corriente del generador excede la corriente de protección contra cortocircuitos dispara el disyuntor

además de apagar el sistema. En caso de existir un diferencial de corriente mayor que el permitido habrá un disparo del disyuntor.

2.4.3. Diagnostico general del grupo de generación numero 3

Al terminar de establecer los parámetros de control del grupo de generación número 3 de la central Hidro Carolina se ha concluido que uno de los características más importantes de analizar es su regulador automático de voltaje ya que su constitución ha sido transformada de acuerdo a las prestaciones que tiene actualmente el grupo de generación , causa de ello se ha optado por utilizar el AVR de tensión analógico GRT7-TH4 descrito en la fig. 2.10 ,el cual es también utilizado en los demás grupos de generación y facilitando al personal de la central HidroCarolina su funcionamiento y manipulación.

Cabe destacar que algunos de sus equipos del tablero principal (temperatura, sistema de control de excitación) y Governor(protecciones, sensor de apertura y cierre, alarmas de PLC), además de terminales de conexión hacia el sistema de control deshabilitados, dando como única forma de control automático su sincronizador automático, y para ello se analizara de una manera más profunda en el capítulo 3 en el informe técnico.

CAPÍTULO 3

“Elaboración de un reporte técnico sobre el sistema de control automático en el grupo número 3 de la Central Hidroeléctrica HydroCarolina”

3. Introducción

En este capítulo se describen los resultados de analizar los parámetros de funcionamiento del sistema de control automático del grupo de generación número 3, al no existir una normativa especificada en cómo deben estar constituidos los sistemas de control automáticos en centrales hidroeléctricas se ha optado por hacer una comparativa de las condiciones originales de funcionamiento con las condiciones que se encuentra actualmente.

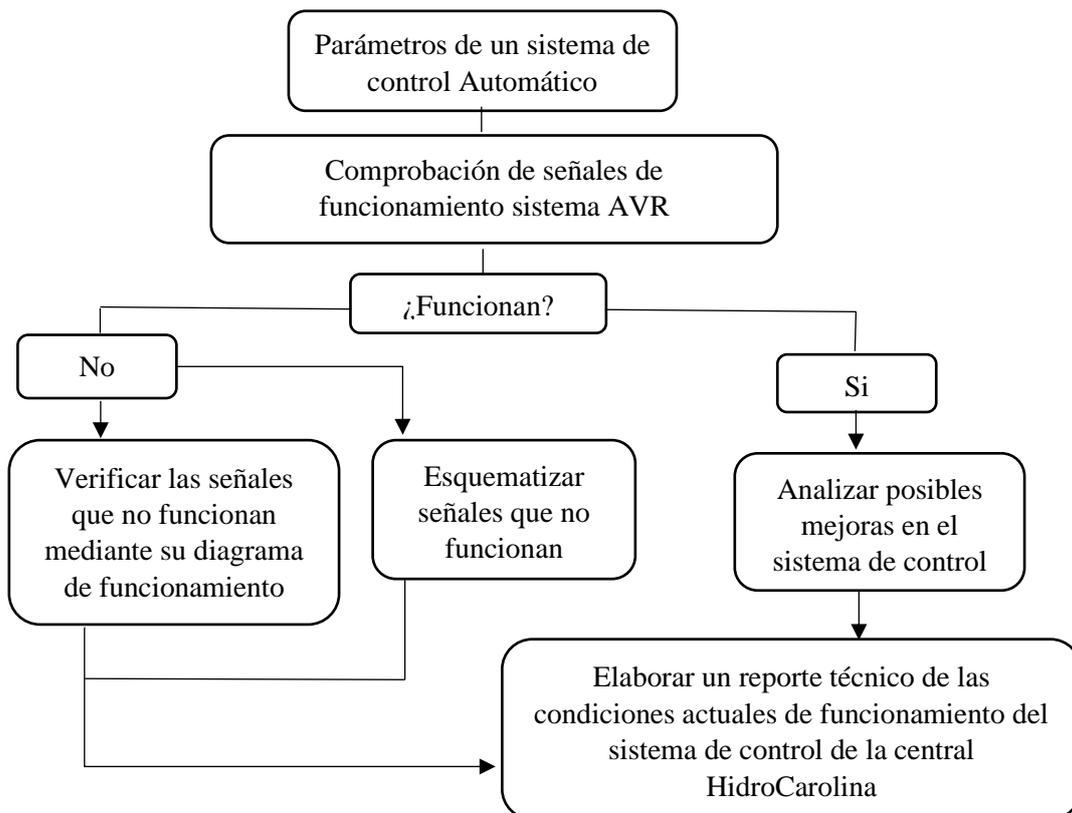


Fig.3.1: Diagrama de flujo del capítulo 3

Se ha tomado como referencias límites de operación de voltaje, temperatura, frecuencia, además de hacer una comparativa con algunos sistemas de control automático que presenten condiciones de operación similares centrándose específicamente en el regulador automático de voltaje y su sistema de excitación.

3.1.1. Regulador automático de voltaje

Según la norma (IEEE Std 1547.2.2008) se recomienda que la regulación este establecida en un rango entre el $\pm 10\%$ del valor nominal de operación, para este caso de estudio, el regulador automático de voltaje tiene un valor de operación entre el $\pm 15\%$, el primer devanado lateral del transformador de voltaje es conectado a una resistencia fija, y mediante una diferencia de potencial, se produce una caída de voltaje; la resistencia está conectada a la fase de C.A, y la caída de voltaje de la corriente reactiva en la resistencia está en la misma dirección que el voltaje.



Fig.3.2: Regulador automático de voltaje Central Hidroeléctrica HidroCarolina
Fuente: Central Hidroeléctrica

En la figura 3.2 se evidencia el conexionado del AVR del grupo de generación número 3 de la central hidroeléctrica HidroCarolina en el que se evidencia lo siguiente:

- Los terminales S1 y S2 funcionan como conexión de TC's para las fases S y T.
- El terminal E1 está conectado a la fase R funcionando como una retroalimentación.

- Los terminales E3/4 están conectados a la fase T la cual sirve como referencia para el regulador automático de voltaje.
- Los terminales +F y -F vienen del conexionado de la excitatriz para alimentar el campo del generador .
- 6 y 7 es un potenciómetro de paso fino utilizado para el ajuste de tensión.

Para el ajuste de voltaje positivo, la corriente reactiva aumenta y el voltaje de la resistencia y el voltaje del generador están en la misma dirección, aumentando el voltaje del terminal. De esta manera regulamos la corriente de excitación, reduciendo el voltaje del terminal del generador. En el cableado de ajuste negativo, el voltaje del terminal del generador aumenta debido al aumento de la corriente reactiva.

Cuando el AVR se cambia en negativo la caída de voltaje de reactancia se puede compensar adecuadamente mejorando la estabilidad del sistema, y el sistema de energía debe regular el ajuste de voltaje de cada generador en el sistema. Puede realizarse un ajuste adicional para compensar la correspondiente caída de tensión de reactancia del transformador.

La unidad generadora tiene una relación menor de compensación de corriente reactiva, con el fin de aumentar la precisión de la regulación de voltaje del lado de alto voltaje del generador y mejorar la estabilidad de voltaje.

Ajustar un voltaje negativo compensa la caída de voltaje de reactancia del transformador elevador, y reduce de manera equivalente la reactancia de contacto entre la unidad generadora y sistema de alimentación, aumentando proporcionalmente la amortiguación del sistema y ayuda a suprimir oscilaciones de baja frecuencia del sistema.

La configuración se determina sobre la base de las características de respuesta a frecuencia.

(1) Características de respuesta de frecuencia: Al evaluar la estabilidad del sistema de excitación mediante la función de transferencia de bucle abierto del sistema de control de excitación incluyendo el generador, el rendimiento dinámico del sistema de excitación, es en base a su ganancia de respuesta de frecuencia de bucle abierto por lo cual al aumentar el valor el rendimiento dinámico del sistema de control también aumentara.

(2) Ganancia transitoria: Esta variación de voltaje de excitación difiere de la ganancia normal en estado estacionario ya es que causada por cambios en el voltaje del generador mediante una rápida excitación del tiristor y es proporcional a la respuesta de voltaje del sistema de excitación.

3.2. Información del Mantenimiento de la unidad de generación numero 3

Actualmente se han realizado mantenimientos correctivos mecánicos y eléctricos de forma general al grupo de generación número 3 de la central hidroeléctrica HidroCarolina tales como pruebas de índice de polarización, análisis de vibración y temperatura, además de pruebas de funcionamiento en vacío y en carga.



Fig.3.3: Mapeo de vibraciones del grupo generador numero 3

Fuente: (Catota, 2017)

Según la norma ISO 10816-3 para todo tipo de equipos rotativos se tiene los siguientes niveles admisibles de vibración para que tenga un funcionamiento en condiciones óptimas:

Advertencia	4.00[mm/s]
Alarma	7.00[mm/s]
Advertencia	>65°C
Alarma	>75°C

Tabla 3.1. Niveles admisibles de vibración según normativa ISO.

Fuente : Norma ISO-10816-3

Al comparar y medir de la señal y su procesamiento permite identificar las frecuencias características de falla y con esto determinar la severidad de éstas, la densidad insuficiente de las conexiones a tope del núcleo compuesto; un esquema fallido de bobinado del estator distorsión del rotor o circuito en espiral en los devanados de los polos del rotor.

Puntos		Vibración rms mm/s Después del Mantenimiento	Temperatura en puntos de control
TLRA	1V	0.12	38°C
	1H	0.22	
TLGA	2V	0.49	36°C
	2H	0.55	
G.L. A	3V	0.4	56°C
	3H	0.21	
G.L.EX.N. A	4V	0.39	48°C
	4H	0.3	

Tabla 3.2. Valores de análisis de vibración en puntos del generador realizados en mantenimientos anteriores.

Fuente: (Catota, 2017)

Nomenclatura de los puntos de medición:

- TLRA: Turbina Lado Rodete Acoplado.
- TLGA: Turbina Lado Generador Acoplado
- GLA: Generador lado Acoplado (Lado del eje de la turbina).
- GLEXCTNA: Generador lado Excitatriz no acoplado.
- H, V: Se refiere a las direcciones radiales horizontal y vertical respectivamente.

En la figura 3.3 se evidencia las mediciones realizadas en un informe de un mantenimiento realizado en la unidad de generación número 3 en 2017 ,determinando el estado de cojinetes y su medición de la temperatura en los puntos de control, de esta manera comparamos los valores que se han obtenido del análisis de vibraciones con los establecidos según la norma ISO 10816-3 determinando que el generador se encontraba estable y se había descartado fallas en ese momento del sistema de generación.

3.3. Análisis de excitatriz

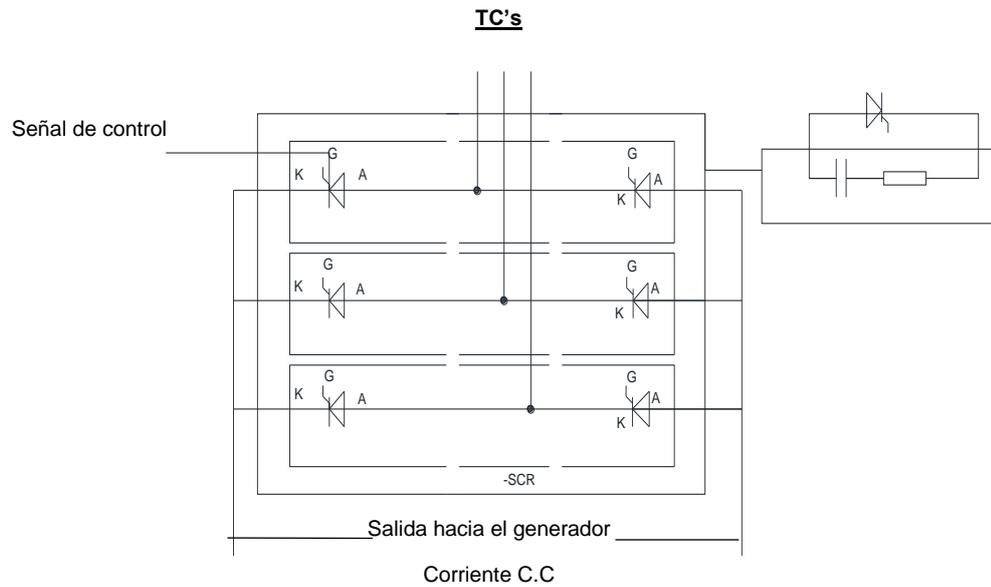


Fig.3.4: Circuito rectificador controlado del grupo de generación numero 3
Fuente: Central Hidroeléctrica HidroCarolina

Como se observa en la figura 3.4 el voltaje de salida del generador se puede regular controlando la corriente de excitación del estator mediante un puente rectificador de diodos de silicio. Para tener una mayor compatibilidad del regulador automático de voltaje con el campo de la excitatriz se ha realizado una conexión directa de una resistencia conectada en serie para aumentar la tensión entre el campo y la resistencia y así obtener un mayor voltaje de excitación.

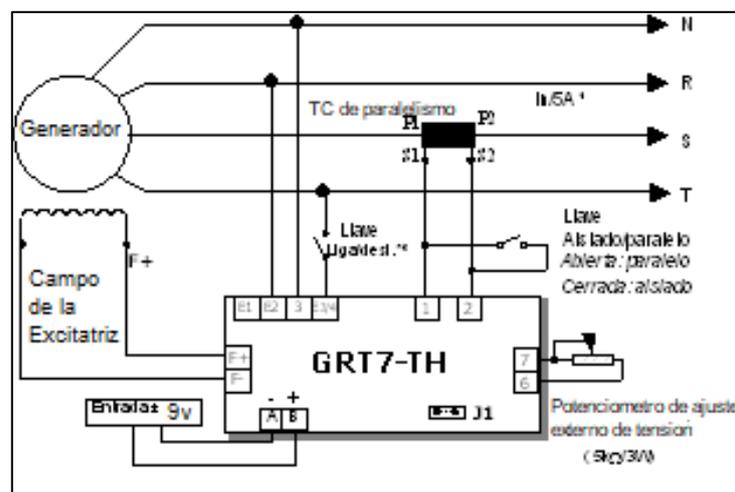


Fig.3.5: Diagrama Actual Avr grupo de generación numero 3 central Hidroeléctrica HidroCarolina
Fuente: (Electrónicos , Equipamientos Grameyer Ltda, 2009)

Como se muestra en la figura 3.5 la configuración actual del AVR del grupo de generación número 3 de la central hidroeléctrica HidroCarolina está distribuida utilizando como referencia los parámetros de conexión para un grupo generador de hasta 480VCA sin una bobina auxiliar los cuales se ha mencionado y especificado anteriormente (capítulo 2).

Gracias a información de fuentes primarias se sabe que el actual AVR del grupo de generación 3 es un elemento acoplado a las características actuales de funcionamiento, esto debido a varios mantenimientos correctivos realizados en el pasado a la unidad generadora ocasionando que elementos de medición y control que formaban el sistema de generación de la unidad produzcan fallos intempestivos y continuos por lo que es importante resaltar que el AVR no se encuentra en las mismas condiciones iniciales del fabricación.

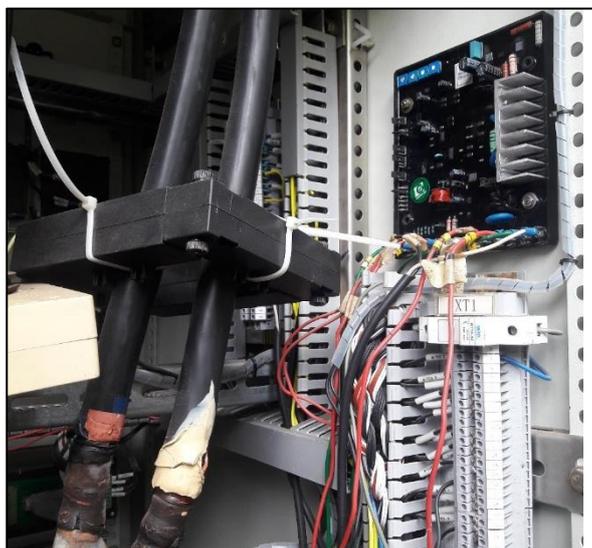


Fig.3.6: Conexión AVR grupo generador número 3
Fuente: Central Hidroeléctrica HidroCarolina

El potenciómetro P1 correspondiente al ajuste de tensión, está configurado limitado a una tensión mínima para evitar el disparo del generador en caso de conexión incorrecta este potenciómetro se utiliza para realizar ajustes de estabilidad transitoria, dando una respuesta dinámica del generador. El potenciómetro correspondiente al ajuste de la protección V/F P5 está configurado en sus valores de fabrica donde todos los equipos son probados y configurados antes de la salida.

En caso de haber problemas del generador partir con el V/F actuado, este puede ser configurado durante el funcionamiento. Realizando una regulación del P3 y del P4 responsables por la estabilidad, aplicando y reduciendo carga seguidamente hasta encontrar el punto donde la tensión se estabilice, al tener el mismo tipo de AVR en los grupos de generación, existe la opción de realizar un conexionado en paralelo.

Como se observa en la figura 3.7 después de hacer una revisión del esquema de conexión del sistema de control junto a su conexionado se evidencia lo siguiente:

- Algunos aparatos de medición se encuentran deshabilitados.
- Sensores están apagados y/o quemados.
- No hay un etiquetado correctamente estructurado .

Todo esto ha ocasionado que no se tenga un monitoreo ni control de algunos de los parámetros de funcionamiento del grupo de generación.



Fig.3.7: Comprobación de Conexionado interno del tablero de control del grupo de generación numero 3 Central Hidroeléctrica HydroCarolina
Fuente: Central Hidroeléctrica HydroCarolina

Como se aprecia en la figura 3.7 se realizó una comprobación de los sensores del medidor de temperatura del tablero de control del grupo número 3 de la central HydroCarolina comparando el conexionado del manual de usuario (ANEXO J) además de comprobar si se encuentran funcionales, midiendo su resistencia, a lo que evidencio lo siguiente:

- El conexionado está distribuido de acuerdo con el manual de usuario.
- Los sensores Pt-100: 7 y 16 presentan una resistencia menor a 100 ohmios.
- El etiquetado del conexionado esta desorganizado.

Una vez analizado el conexionado del medidor de temperatura del tablero de control del grupo de generación número 3 se evidencia que algunos sensores de temperatura se encuentran en mal estado, provocando que el medidor de temperatura no pueda monitorear la señal correctamente.

Los tableros de la unidad generadora están basados en gabinetes que contienen en su interior elementos encargados de realizar la adquisición , monitoreo y control de las señales de voltaje, frecuencia, temperatura, velocidad, potencia, corriente.

Cómo se observa en la figura 3.7 la variedad de mantenimientos que se han realizado en el tablero de control de la unidad generadora ha ocasionado que algunas de las señales de medición (temperatura, potencia, frecuencia, apertura y cierre de alavés) están desactivadas, dando como resultado que los módulos del sincronizador automático de frecuencia, medidor de temperatura, medidor multifunción no encienden. Según fuentes primarias de información estos equipos previamente indicaban error en sus mediciones y posteriormente dejaron de funcionar. Cabe resaltar que en modo manual la unidad funciona normalmente.

3.3.1. Tablero de control grupo de generación numero 3



Fig.3.8: tablero de control grupo de generación central hidroeléctrica HidroCarolina
Fuente: Central hidroeléctrica Hidro Carolina

Como se puede apreciar en la fig.3.7 y 3.8 algunos de los equipos de medición y control del sistema de generación se encuentran deshabilitados. Se sabe que se ha optado por desconectar algunas de las variables de monitoreo y control. Esto debido a que su equipo no se encuentra funcional y no se ha podido hacer un mantenimiento correctivo por la dificultad de importar el equipo, esta unidad generadora está constituida por equipos de medición

analógicos de voltaje , corriente y frecuencia ocasionando que solo se pueda hacer su accionamiento y control manualmente.

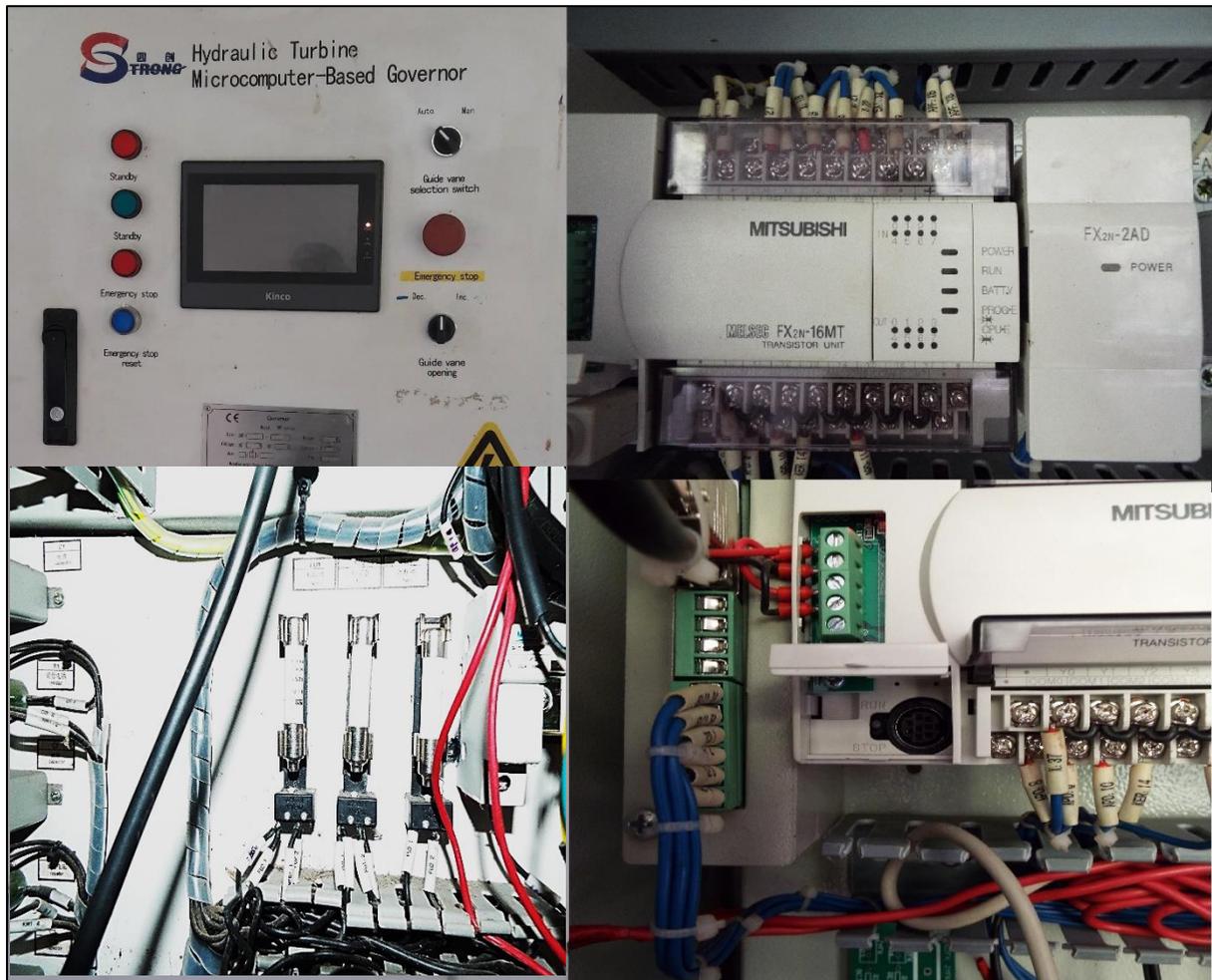


Fig.3.9: Estructura externa e interna de gobernador y plc grupo de generación numero 3
Fuente: central hidroeléctrica

Luego de analizar la estructura del tablero de control del sistema Governor y PLC. se ha observado que el PLC está actualmente configurado para monitorear e indicar fallas en los parámetros de funcionamiento del grupo generador. Además de estar deshabilitado como se muestra en la figura 3.9 ya que sus terminales de comunicación han sufrido daños ocasionados por un corto circuito y no se ha podido hacer el mantenimiento correctivo debido a una discontinuidad del modelo PLC.

En cuanto al sistema GOVERNOR, su monitoreo mediante el tablero principal del grupo de generación no está funcionando, luego de realizar la comprobación del conexionado y equipos se determinó lo siguiente :

- Recibe señal para su monitoreo.
- Su etiquetado esta desorganizado.

- Se necesita revisar los dispositivos de comunicación RS-485 ya que puede existir un problema de comunicación entre los nodos.
- El equipo esta quemado o desconfigurado.

La pantalla HMI(*Interfaz-Humano-Máquina*) del sistema Governor esta inhabilitada, esto se debería a un cortocircuito producido en conexionado de comunicación del equipo. actuadores de la retroalimentación de los álabes están en mal estado, O un mal contacto entre ellos lo que ocasiona que no se visualice ni se controle los parámetros de funcionamiento de forma automática haciendo que el sistema Governor funcione de forma manual, además que su etiquetado no está distribuido conforme esta descrito en el manual de usuario de la figura 2.9, Capitulo 2.

3.4. Estado del sistema de control del grupo de generación

Se realizó un análisis de los tableros del sistema de control del grupo de generación número 3 de la central HidroCarolina para verificar su estado actual, revisando si existió alguna manipulación del conexionado, manchas de cortocircuito, y que el conexionado este funcional o haya sufrido algún daño .Los resultados del análisis se fundamentaron en la estructura actual del sistema de control automático del grupo de generación número 3 de la central hidroeléctrica HidroCarolina y cuáles son las fallas que se encuentran en el mismo.

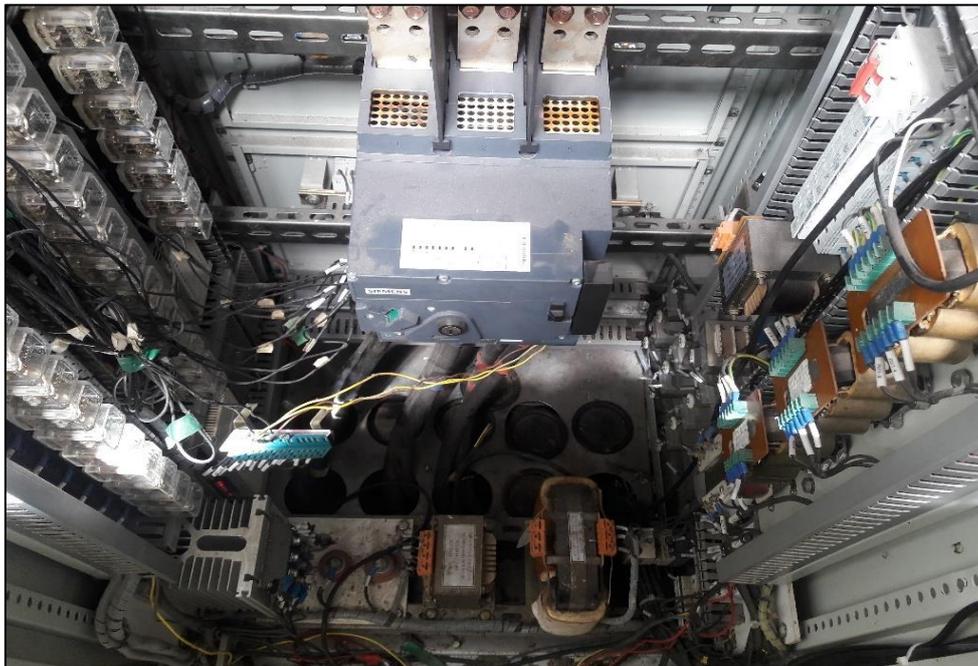


Fig.3.10: Conexionado interno del tablero de control del grupo de generación numero
Fuente: Central hidroeléctrica

Como se observa en la figura 3.10 el conexionado interno del tablero de control del grupo de generación número 3 de la central hidro Carolina se encuentra en su mayoría desorganizado, además se constató mediante una comparativa del manual de usuario y excitatriz del grupo generador (véase en el **ANEXO E**) en conjunto con una inspección del estado actual, que algunos terminales de conexión y sensores de medición que se conectan al tablero de control se encuentran inhabilitados y en mal estado.

Sistema	Características de fallas al entrar a modo Automático	Causas
GOVERNOR	<ul style="list-style-type: none"> - Se produce una reducción de frecuencia durante el inicio de la apertura de los álabes lo cual produce un cierre automático de los álabes, los mismos que no censan la carga establecida por el gobernador. - Paros intempestivos del sistema GOVERNOR. 	<ul style="list-style-type: none"> - Fallos en la comunicación de medición de frecuencia debido a falso contacto con otros terminales de medición lo que ha provocado cortocircuitos en algunos terminales de conexión - Sistema de alimentación insuficiente.
PLC	<ul style="list-style-type: none"> - Indicador de Fallo en la comunicación en el PLC. 	<ul style="list-style-type: none"> - Fallos del módulo plc debido a problemas en la RAM (<i>Memoria de acceso aleatorio</i>), - Problemas del sistema lógico del plc. - Terminal de comunicación del plc en mal estado.
Excitatriz y AVR	<ul style="list-style-type: none"> - Al entrar en modo automático no produce una tensión de salida ni tensión entre fases produciendo que el generador entre en operación asincrónica. 	<ul style="list-style-type: none"> - Fallo en el inducido de excitación. - Puente de diodos en mal estado. - Índice de polarización fuera de los límites del fabricante. - Niveles de aislamiento fuera de los límites del fabricante.

Tabla 3.3. Características de fallas del grupo de generación del sistema de control automático de la central hidroeléctrica HidroCarolina

Fuente : Autor,2022

Se ha evidenciado que, tras varios intentos de activar el modo automático de la unidad generadora, la corriente del estator del sistema de excitación aumenta, provocando sobrecalentamiento, reduciendo la cantidad de potencia reactiva suministrada por el sistema, y según fuentes de información primarias, en algunos casos la unidad generadora ha empezado a consumir potencia reactiva del sistema, estos fallos de la unidad generadora provocan problemas en la sincronización con las unidades de generación 1 y 2, además de problemas mecánicos tales como deslizamientos en el rotor, sobrecalentamiento, esto provoca un grave impacto en la continuidad de producción en la unidad generadora, reduciendo la vida útil del propio generador.

Una vez entendido el estado actual en el que se encuentra el sistema de control del grupo número 3 de la central hidroeléctrica HidroCarolina se evidencia la necesidad de realizar un programa de mantenimiento para la recuperación del grupo de generación, que permita recuperar la operatividad total del sistema de generación y su operación continua en óptimas condiciones.

Una de las opciones más adecuadas para este caso de estudio es el programa de mantenimiento asistido por computador, el cual está incluido por procesos de mantenimiento tanto predictivo como preventivo, permitirá monitorear las condiciones actuales y variaciones de los parámetros eléctricos y mecánicos de la unidad generadora además de tener un historial de las fallas y mantenimientos realizados, especificando la fecha y los materiales que se usaron y de esta manera planificar un mantenimiento eficaz. Este programa de mantenimiento es una base con la que se debe trabajar en los sistemas de generación en minicentrales hidroeléctricas, este mantenimiento se lo debería realizar mensual, trimestral o semestral, dependiendo del estado actual de la unidad generadora, para nuestro caso de estudio se necesita realizar un programa de mantenimiento asistido por computador trimestralmente.

Por otra parte, se sugiere que el operador realice el proceso de sincronización de la unidad tal y como se describe en el manual de usuario

PASOS PARA SINCRONIZAR LA UNIDAD DE GENERACION NUMERO 3 DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA HIDROCAROLINA

- Abrir llave de paso de agua
- Abrir válvula bypass (cuando tome las primeras RPM la turbina cierre la válvula

- Abrir válvula principal al 60% (cuando la turbina se sincronice y se establezca la carga abrir en su totalidad)
- Poner en posición "TRIP" todos los tacos térmicos del tablero de control principal.
- Girar la perilla "GUIDE VANE OPENING" a la posición (INC.+) para incrementar las revoluciones o a la posición DEC.- cuando la turbina esté en 700 R.P.M continúe el siguiente paso.
- Poner en posición AUTO-Sync Control Mode. O MANUAL-Sync. Control Mode.
- Poner en posición TRIP control excitación.(en este caso el control se lo realizara mediante el AVR GRT7TH4 a través de un potenciómetro de paso fino).
- Poner en posición CLOSE Control Breaker .
- Subir lentamente las RPM del Gobernador hasta llegar a las 900. R.P.M. y en ese momento entrara en sincronismo.

Además de lo anteriormente mencionado el operador deberá realizar un inventario técnico de los equipos y piezas que se usen además de ordenes de trabajo que incluyan una ficha técnica para hacer seguimiento de la cantidad de potencia que genera la unidad y realizar un análisis técnico-financiero de la unidad de generación numero 3 de la central hidroeléctrica HydroCarolina.

3.5. Conclusiones

- La estructura del sistema de control automático del grupo de generación número 3 de la central hidroeléctrica HidroCarolina ha sufrido diversos cambios debido a diversos tipos de mantenimientos realizados, por lo que sus condiciones de operación actuales son diferentes a las condiciones de operación de fabrica originales, resaltando que la unidad generadora puede operar mediante su modo manual.
- Al realizar el análisis del sistema de control automático del grupo de generación número 3 de la central hidroeléctrica HidroCarolina se evidenció que, su sistema de control automático se encuentra deshabilitado pues presenta diversos problemas en su sistema de excitación, GOVERNOR y control mediante PLC, al momento de iniciar la generación. Además, se comprobó que gran parte del conexionado en los tableros de control del grupo generador se encuentra sin su etiquetado y en mal estado demostrando una necesidad de organizar y determinar cuáles variables y conexionado pueden ser desconectados para rediseñar el sistema de control automático del grupo generador o restaurar su configuración original, mejorando la capacidad de control remoto y mejorar la vida útil de la unidad.
- Para la recuperación del sistema de control automático de la unidad de generación número 3 de la central hidroeléctrica HidroCarolina se puede determinar cuáles terminales de conexión, equipos y variables del sistema de control están activas o desconectadas, configurando un sistema de control de acuerdo con las condiciones originales de funcionamiento de la unidad generadora además de hacer un inventario específico de cada parte desconectada o inhabilitada para poder realizar un mantenimiento correctivo del equipo , sensor o terminal de conexión.
- Luego de los análisis y pruebas operativas realizadas se puede concluir que los objetivos y el alcance de este proyecto de titulación se cumplieron en la medida de las exigencias de control y operación de la Central.

3.6. Recomendaciones

- A partir del análisis del sistema de control automático del grupo número 3 de la central hidroeléctrica HidroCarolina se recomienda que se realice un etiquetado además de una reorganización del conexionado del sistema de control del grupo generador de acuerdo con las condiciones originales de funcionamiento.
- La utilización del presente trabajo investigativo puede servir con el objetivo de ofrecer una visión general sobre cómo está establecida la estructura y el control de los sistemas y subsistemas de control y monitoreo de la unidad de generación número 3 de la central hidroeléctrica HidroCarolina
- Se recomienda Realizar programas de mantenimiento preventivo a la unidad generadora de acuerdo con los procedimientos que se describen en el manual de usuario para su operación y mantenimiento obteniendo un desempeño adecuado de sus componentes evitando paros indefinidos de la unidad generadora mejorando su productividad y alargando su vida útil.
- Instalar sistemas de protección para el proceso de control de la unidad de generación, implementando fusibles o elementos de alarma funcionales con niveles de acceso en los procesos del controlador de automatización programable.

Bibliografía

Catota, J. (2017). Informe tecnico de grupo de generacion numero 3 . Quito.

Electrónicos , Equipamientos Grameyer Ltda. (2009). www.grameyer.com.br. Obtenido de www.grameyer.com.br.

Fuchun Industry Development Company Ltd. (2013). Instruction Manual for Installation , Operation & Maintenance.

<https://www.masferreteria.com>. (s.f.). Obtenido de <https://www.masferreteria.com>.

Kishor, N., & Kishor , N. (2017). Modeling and Dynamic Behaviour of Hydropower Plants. London, United Kingdom .

Plana, C. M. (2009). Turbomáquinas hidráulicas: turbinas hidráulicas, bombas, ventiladores (Vol. 2) (Vol. 2). Universidad Pontificia Comillas.

Velasco, J. H. (s.f.). Diseño Del Sistema Eléctrico Y De Control De Una Minicentral Hidroelectrica De 100KW. ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, Quito.

Plana, C. M. (2009). “Turbomáquinas hidráulicas: turbinas hidráulicas, bombas, ventiladores “(Vol. 2). Universidad Pontificia Comillas.

Ramírez Medina, H. J., & Sánchez Barroso, R. G. (2012). Estudio e Implementación del Sistema de Sincronización de Tres Generadores Eléctricos con la Red Pública de CNEL para una Fábrica de Harina de Pescado en Chanduy, Provincia de Santa Elena. <https://doi.org/10.1037//0033-2909.126.1.78>

Morales, J. L. (2016). “Desarrollo de metodología para la estimación de la eficiencia de un generador.” TECNOLOGICO DE COSTA RICA.

ADASME, J. R. (2019). Análisis De Sensibilidad Geométrica , Condiciones Óptimas De Instalación Y Estudio Comparativo De Tecnologías De Generación (Issue January) [UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO]. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14701.84966>

Benito, A. B. (2018). Máquinas Eléctricas.

Avilés, J. C. P. (2016). Rehabilitación Y Sistema De Control De La Minicentral Hidráulica De La Purísima Concepción [UNIVERSIDAD DE JAÉN].

http://tauja.ujaen.es/bitstream/10953.1/3501/1/TFG_Juan_Carlos_Pretel_Aviles.pdf

J.Champan, S. (2012). Maquinas Electricas Chapman 5ta edicion.

Malasquez Huayapa, D. G. de J. (2018). Implementación de un sistema de monitoreo eléctrico y fluvial basado en tecnología GSM para una mini central hidroeléctrica

[PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE PERÚ]. In Pontificia Universidad Católica del Perú. <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/12936>

Ramirez Medina, H. J., & Sanchez Barroso, R. G. (2012). Estudio e Implementación del Sistema de Sincronización de Tres Generadores Eléctricos con la Red Pública de CNEL para una Fábrica de Harina de Pescado en Chanduy, Provincia de Santa Elena. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.126.1.78>

Ramírez, Hugo. Sánchez, R. (2012). Diseño y Construcción de un Tablero de transferencia y Sincronización de Generadores de Emergencia de PLC y Pantalla Táctil. 85.

Wildi, T. (2007). Maquinas eléctricas y Sistemas de Potencia. https://www.academia.edu/10506357/Maquinas_Electricas_y_Sistemas_de_Potencia

Pinetta, -Ing Rodrigo.. SISTEMAS DE AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL PARA PEQUEÑAS Y MEDIANAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS.

David, J., & Zapata, G. (2015). Determinación de los parámetros que afectan el ajuste y la coordinación de la protección de pérdida de sincronismo en generadores Determining parameters affecting the adjustment and coordination of out of step protection in synchronous machines.

Electromecánica, C., Un Regulador De Velocidad Para Un Generador Caterpillar En La Cantera San Joaquín, D. DE, Empresa Mapeagre, D. LA, Sandoval Israel Aníbal Vivanco Torres Walter Stalin, N., & Cruz Panchi Luis Rolando MsC Latacunga-Ecuador, I. (2019). UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADA PROPUESTA TECNOLÓGICA.

Gabino, M. T. (2017). Análisis estadístico de pruebas en el Generador de la Unidad N° 5 para la determinación de tendencias y estimación de vida residual en la Central Paute-Molino. UNIVERSIDAD CATOLICA DE CUENCA.

Tonato, P. J. (2020). "MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO HIDROELÉCTRICA PAUTE SOPLADORA." UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA.

Maldonado, D. J. (2020). DISEÑO DE UN ESQUEMA DE CONTROL DISTRIBUIDO PARA EL CONTROL DE FRECUENCIA Y POTENCIA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS.

Xitumula, A. P. (2019). ANÁLISIS DE FALLAS Y MANTENIMIENTO MECÁNICO DE UNA TURBINA TIPO FRANCIS DE EJE VERTICAL DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA.
[http://www.repositorio.usac.edu.gt/13678/1/Andrea Priscil](http://www.repositorio.usac.edu.gt/13678/1/Andrea%20Priscil)

Romina Flores Estrella, Y., & Eloy Gutiérrez Terán, C. (2019). ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA.

Sigrist, L. (2016). Diseño y ensayo de un regulador de tensión automático para máquinas síncronas.

JORGE HERNANDO MERA VELASCO. (n.d.). DISEÑO DEL SISTEMA ELECTRICO Y DE CONTROL DE UNA MINICENTRAL HIDROELECTRICA DE 100KW. Retrieved September 23, 2020, from <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/5794/1/T1595.pdf>

David Felipe, R. B. (2020). MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DE VELOCIDAD DE UNIDADES DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA COCA CODO SINCLAIR.
<https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21117>

Catota, J. (2017). Informe tecnico de grupo de generacion numero 3 . Quito.

Electrónicos , Equipamientos Grameyer Ltda. (2009). www.grameyer.com.br. Obtenido de www.grameyer.com.br.

Fuchun Industry Development Company Ltd. (2013). Instruction Manual for Installation , Operation & Maintenance.

Kishor, N., & Kishor , N. (2017). Modeling and Dynamic Behaviour of Hydropower Plants. London, United Kingdom .

¿Qué es un generador eléctrico? (n.d.). Retrieved January 22, 2020, from <https://www.ceupe.com/blog/que-es-un-generador-electrico.html>

Generadores de corriente: qué son, cómo funcionan y para qué sirven. (n.d.). Retrieved August 1, 2022, from <https://www.masferreteria.com/blog/generadores-de-corriente/>

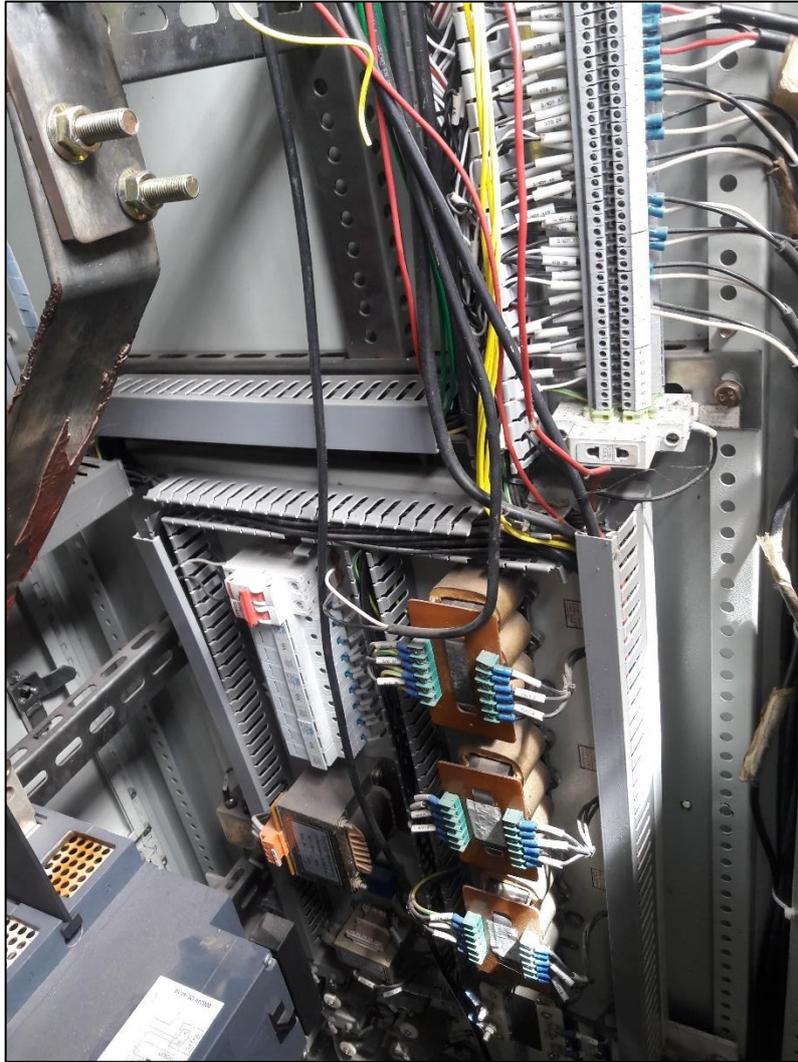
Partes de un generador eléctrico. (n.d.). Retrieved January 22, 2020, from https://www.partesdel.com/generador_electrico.html

Ministerio de Energía y Minas. (2014). Generación de energía eléctrica. Mem, 45.

Ecuador - Estadística del Sector Eléctrico Ecuatoriano 2013 - variable - V623. (n.d.). Retrieved August 10, 2020, from https://anda.inec.gob.ec/anda/index.php/catalog/535/datafile/F31/V623?fbclid=IwAR3U1_uj_yn2cB8MXx1OJaMNvAB6ZgOGZKNm_NXkoin7fjfQaDdBZ0329qg

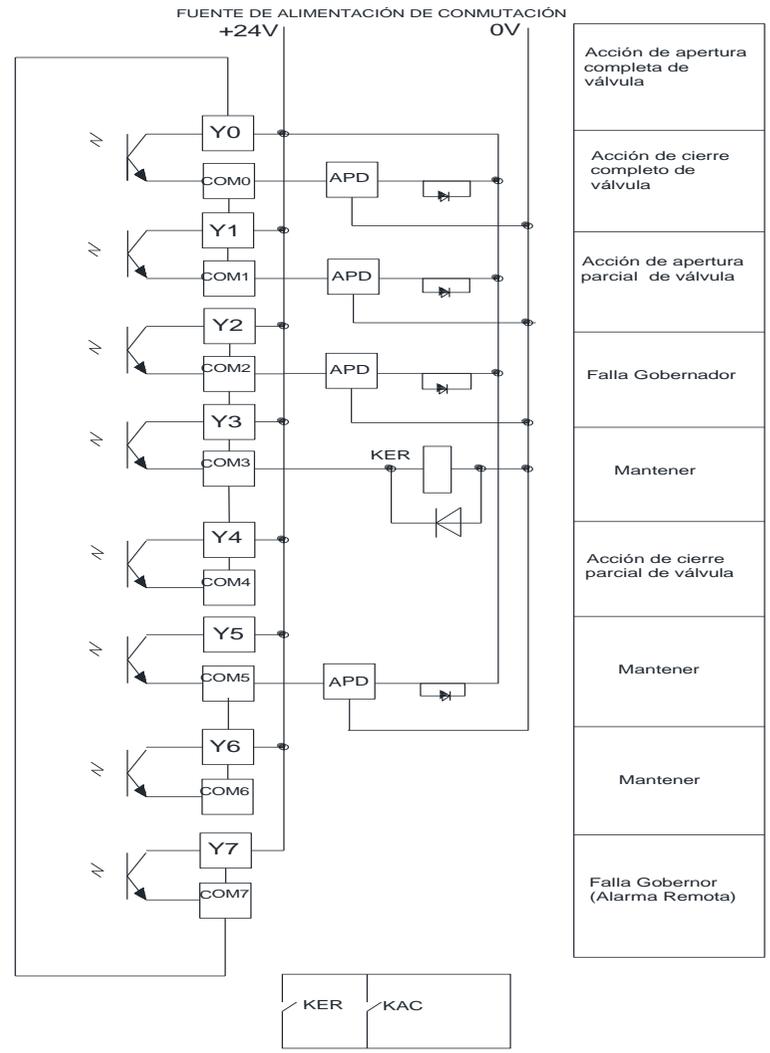
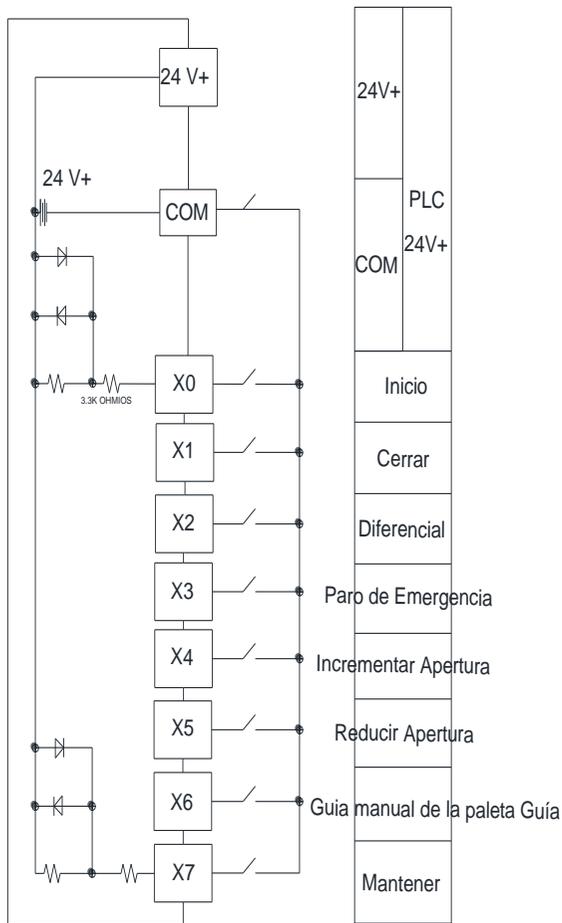
Descubre el funcionamiento de una central hidroeléctrica. (n.d.). Retrieved August 10, 2020, from https://www.fundacionendesa.org/es/centrales-renovables/a201908-central-hidroelectrica?fbclid=IwAR3RiSBCErPhnpXECqzc1d8AFCDXxem2tMXJNCGLhBTdj_N_9RP_ztSCMnM

SISTEMAS DE AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL PARA PEQUEÑAS Y MEDIANAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS. Retrieved August 10, 2020, from [http://www.expoenergiahn.com/expoenergiahn.com/descargas/conferencias/Selección y entendimiento de Sistemas de Control y SCADA para Centrales Hidroeléctricas.pdf?fbclid=IwAR3RiSBCErPhnpXECqzc1d8AFCDXxem2tMXJNCGLhBTdj_N_9RP_ztSCMnM](http://www.expoenergiahn.com/expoenergiahn.com/descargas/conferencias/Selección_y_entendimiento_de_Sistemas_de_Control_y_SCADA_para_Centrales_Hidroeléctricas.pdf?fbclid=IwAR3RiSBCErPhnpXECqzc1d8AFCDXxem2tMXJNCGLhBTdj_N_9RP_ztSCMnM)

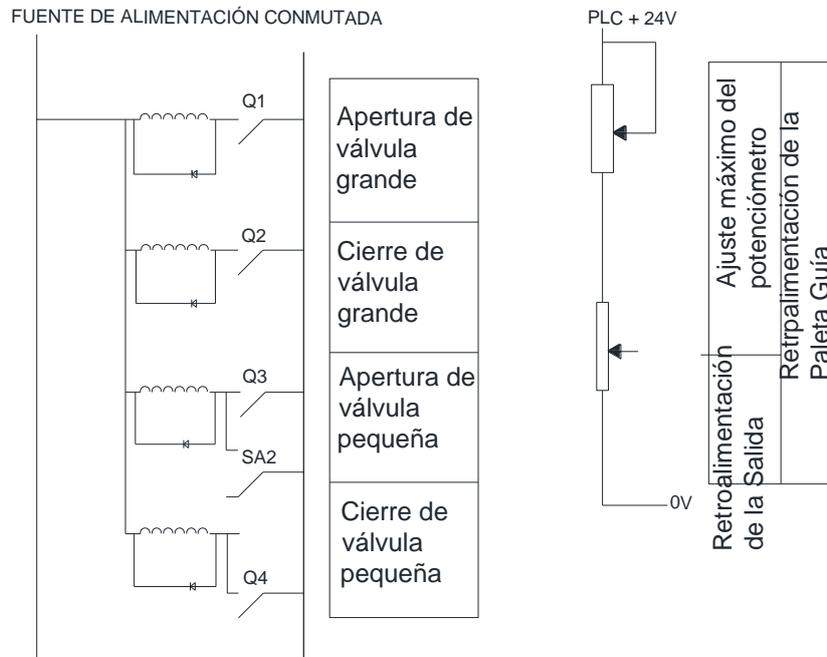
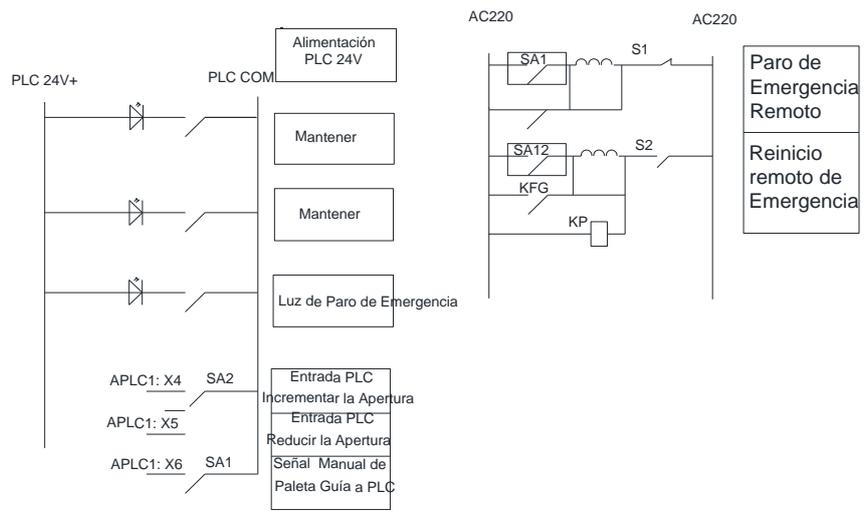


Anexo C. Conexión de transformadores de medición grupo de generación número 3

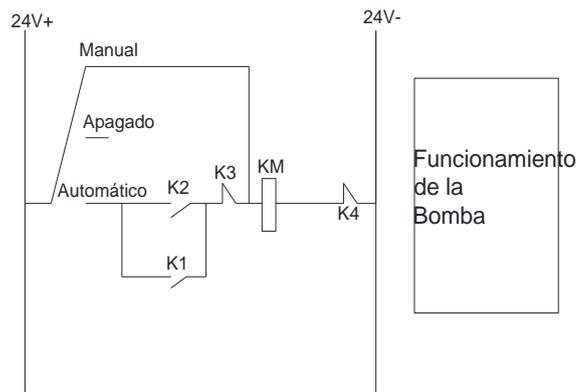
Como se aprecia en el Anexo B el cableado que se distribuyen en los transformadores de medición del grupo de generación se encuentran desordenados y en muchos casos, sin su etiquetado, esto se debería a que se realizó una limpieza incorrecta del cableado interno del tablero de control del grupo generador.



Anexo D. Entradas y salidas digitales del sistema de control del grupo generador.



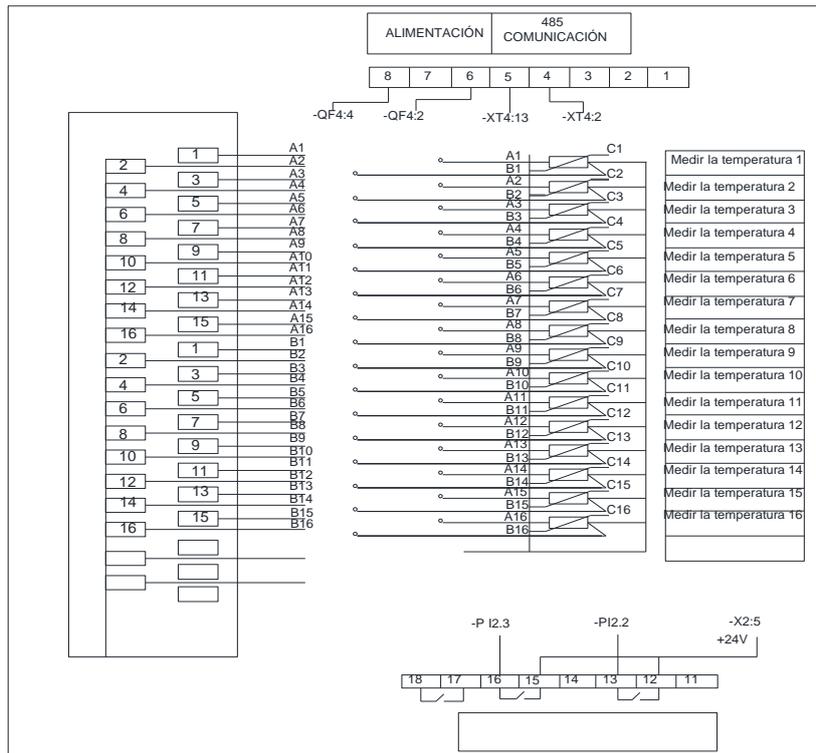
Anexo E. Principio de funcionamiento del control de apertura y cierre de válvulas del sistema Gobernador.



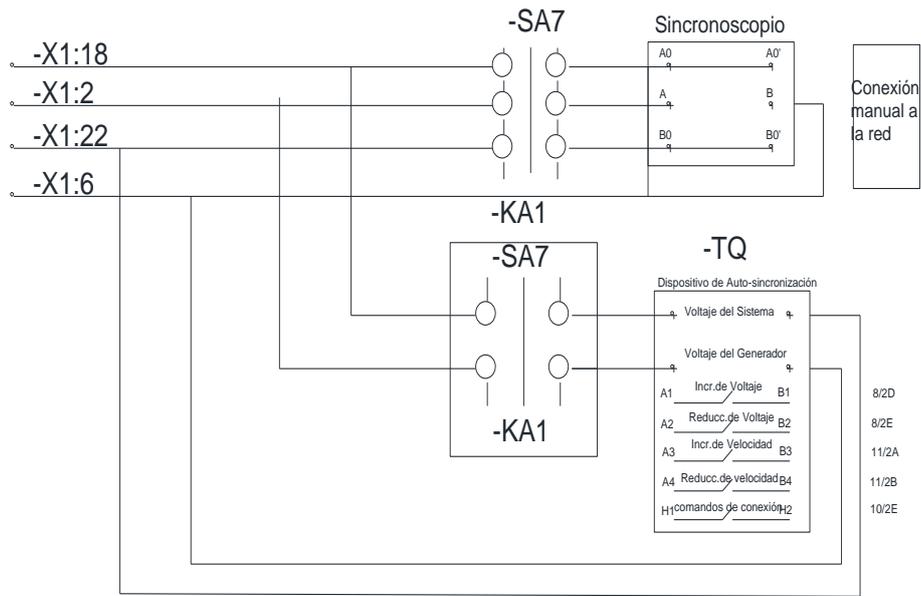
— / —	K2	X:15	Arranque a presión normal
— \ —	K3	X:16	Cierre de presión normal
— / —	K4	X:17	Alarma de sobrepresión
— / —	KM	X:18	Funcionamiento de la bomba
— \ —	KMO	X:19	Mal funcionamiento de la fuente de Alimentación
— / —	SAH	X:23	Posicion automática de la bomba

Anexo G. Diagrama de control del funcionamiento de la bomba del Sistema Gobernador

-WDY dispositivo comprobador de Temp.



Anexo I. Circuito del sincronizador automático de frecuencia.



Anexo J. Circuito sincronizador automático de frecuencia.

ARTÍCULO CIENTÍFICO

Análisis del sistema de control automático del grupo número 3 de la central hidroeléctrica HidroCarolina.

Analysis of the automatic control system of group number 3 of the HidroCarolina hydropower plant.

David R. Néjer Duarte

¹ Universidad Técnica del Norte Av. 17 de Julio 5-21, Ibarra, 100105, Imbabura, Ecuador;
drnejerd@utn.edu.ec

Resumen: El presente proyecto de investigación busca determinar el estado actual del sistema de control automático del grupo de generación número 3 en la Minicentral Hidroeléctrica HidroCarolina Ubicada en la Localidad de San Jerónimo Parroquia Lita, Provincia de Imbabura. En consecuencia, el proceso de esta investigación abordara desde de los parámetros de diseño para sistemas de control automático en centrales hidroeléctricas hasta el análisis del funcionamiento actual del sistema de control de la central HidroCarolina, examinando la naturaleza del sistema de control y su funcionalidad. evaluando el estado y la operatividad de la Excitatriz y el Regulador automático de Voltaje del grupo generador mediante sus manuales de funcionamiento y comprobación de su conexionado. Dando como resultado, un informe de las anomalías principales que ocasionaron el fallo del sistema de control automático de la central, además de mejoras que se podrían dar en el sistema de control de la central hidroeléctrica HidroCarolina a través de parámetros y ajustes de acuerdo con el estado actual del funcionamiento, aumentando la eficiencia del proceso de generación y disminuyendo los riesgos que conlleva realizar algunos de los procesos de generación.

Palabras Clave: Minicentral Hidroeléctrica , análisis, sistema de control automático, regulador Automático de voltaje, excitatriz, Governor, reporte.

Abstract. This research project seeks to determine the status of the automatic control system of generation group number 3 in the HidroCarolina Mini-Hydroelectric Power Plant Located in the Locality of San Jerónimo Parroquia Lita, Province of Imbabura. Consequently, the process of this research will address from the design parameters for automatic control systems in hydroelectric power plants to the analysis of the current operation of the control system of the HidroCarolina plant, examining the nature of the control system and its functionality. evaluating the status and operability of the Exciter and the Automatic Voltage Regulator of the generator set through its operation manuals and checking its connection. As a result, a report of the main anomalies that caused the failure of the automatic control system of the plant, in addition to improvements that could occur in the control system of the HidroCarolina hydroelectric plant through parameters and adjustments according to the current state of operation, increasing the efficiency of the generation process and reducing the risks involved in carrying out some of the generation processes

Keywords: Mini-hydroelectric power plant, analysis, automatic control system, automatic voltage regulator, exciter, governor, report.

Introducción

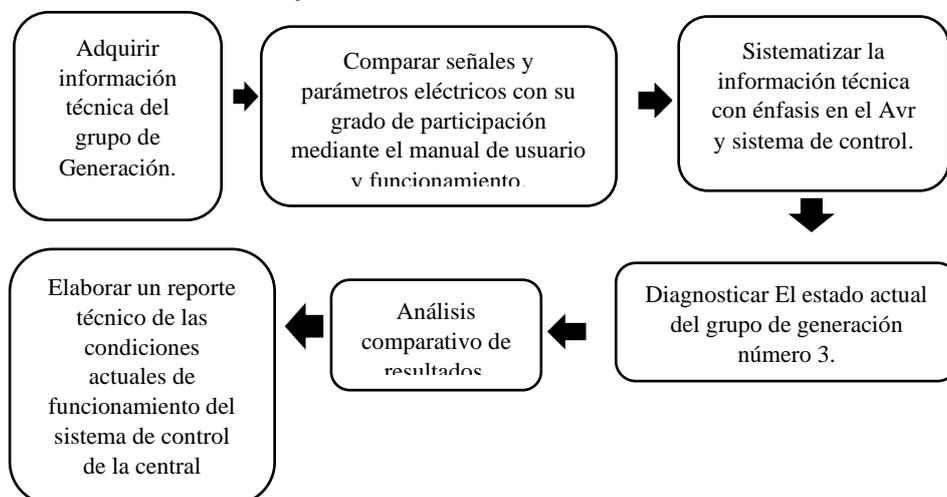
Debido al fenómeno de cambio climático ha existido un proceso de concientización acerca de la importancia de un proceso de generación energética sostenible y amigable con el entorno, con el cual el papel de las energías renovables ha cobrado suma importancia para frenar los problemas medioambientales globales. Un ejemplo de este tipo de energía es la hidroeléctrica, la cual posee un alto potencial de aplicaciones a futuro. Particularmente cuando el recurso posee una baja altura neta (potencial energético), el costo relativo de comercialización de turbinas de baja potencia es considerablemente alto, por lo que se necesitan más investigaciones que tengan como fin las nuevas formas de generación de energía que disminuyan los costos de implementación e inversión de estas tecnologías. (ADASME, 2019)AA

La capacidad efectiva en generación de energía que hoy tiene Ecuador es en gran medida fruto del gran proceso de innovación de infraestructuras que se ha llevado a cabo desde el 2007, Esto ha provocado una capacidad efectiva de más de 7.000 MW que, frente a la demanda máxima nacional, que está en torno a los 3.692 MW, supone un desaprovechamiento de energía de casi el 50%. (Ministerio de Energía y Minas., 2014)

Una minicentral hidroeléctrica, es una instalación en zona alejada donde la energía del flujo de los ríos es transformada en energía eléctrica a través de distintos procesos. Con el fin de asegurar el buen funcionamiento de sus equipos y la calidad de su servicio de generación, es necesario el monitoreo constante de los estos parámetros: voltaje, corriente, frecuencia, potencia y nivel de caudal. (Malasquez Huayapa, 2018)

Las minicentrales hidroeléctricas mantienen un caudal mínimo (ecológico) preservando la vida aguas abajo de la central, además de eliminar los residuos que arrastra la corriente. Su construcción produce un mínimo impacto ambiental y una mínima perturbación del hábitat local. Las centrales Hidroeléctricas no acumulan agua, sino que utilizan el caudal del río que circula en cada momento, el agua que no se emplea es evacuada por el aliviadero siguiendo su curso natural. Cuando el caudal desciende del mínimo técnico las turbinas dejan de funcionar. (Avilés, 2016)

Materiales y métodos



La central hidroeléctrica HidroCarolina ubicada en la localidad de San Jerónimo cuenta con 3 unidades de generación y produce como máximo una potencia de 900KW siendo la unidad de generación número 3 la más importante de la central, ya que genera alrededor de 470KW, produciendo más del 50% de la potencia de la central, debido a ello, es de suma importancia que esta unidad tenga un desempeño continuo y óptimo.

Para analizar el sistema de control automático de la central hidroeléctrica HidroCarolina primero se debe entender la estructura de un sistema de control en una central hidroeléctrica, cuáles son sus partes y los parámetros eléctricos que lo conforman y como se correlacionan entre ellos. Una vez establecido los parámetros eléctricos que se tienen que analizar en un sistema de control se procederá a realizar el análisis del grupo de generación número 3 de la central hidroeléctrica HidroCarolina, debido a que no existen regulaciones sobre cómo deben estar estructurados los sistemas de control en centrales hidroeléctricas se tomará como referencia los límites de operación voltaje, frecuencia, temperatura.

Para la realización del análisis del sistema de control de la unidad de generación se hará una comparativa de cómo está estructurado actualmente el sistema de control y como está descrito en el manual de usuario y funcionamiento, este análisis se lo realizará comprobando el conexionado de las partes que conforman el sistema de control de la unidad además de recabar información de fuentes primarias de la central.

Después de analizar el estado actual del grupo de generación número 3 de la central hidroeléctrica HidroCarolina se procederá a diagnosticar el estado en el que se encuentra, haciendo un énfasis en los elementos que se encuentren averiados o inhabilitados de esta manera, se determinará los equipos y conexionados que no se encuentren funcionales, y sus posibles fallas.

Finalmente se obtendrán los resultados para los cuales se realizará un reporte que determinará el estado actual del sistema de control del grupo de generación número 3 de la central hidroeléctrica HidroCarolina.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Comprobación del conexionado del sistema de control del grupo de generación número 3 de la central hidroeléctrica HidroCarolina

En la figura 1 y figura 2 se observa la comparación del sistema de excitación de la unidad generadora demostrando que, tanto el conexionado como la configuración del sistema de excitación de la unidad ha sido cambiados.

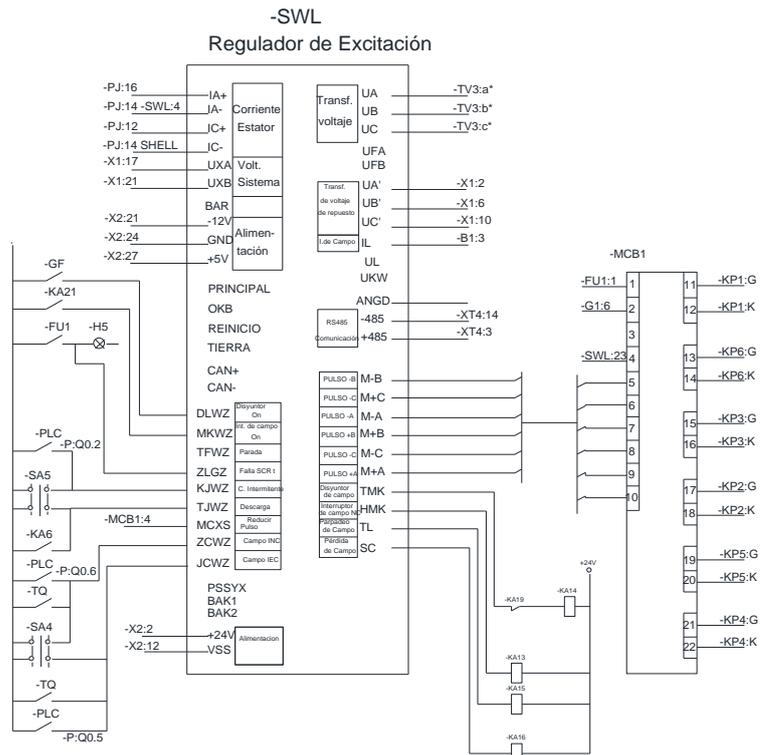


Figura 1. Diagrama de sistema de excitación de la unidad de generación número

Según la norma (IEEE Std 1547.2.2008) se recomienda que la regulación este establecida en un rango entre el $\pm 10\%$ del valor nominal de operación, para este caso de estudio, el regulador automático de voltaje que se ha utilizado tiene un valor de operación entre el $\pm 15\%$, el primer devanado lateral del transformador de voltaje es conectado a una resistencia fija, y mediante una diferencia de potencial, se produce una caída de voltaje; la resistencia está conectada a la fase de C.A, y la caída de voltaje de la corriente reactiva en la resistencia está en la misma dirección que el voltaje.

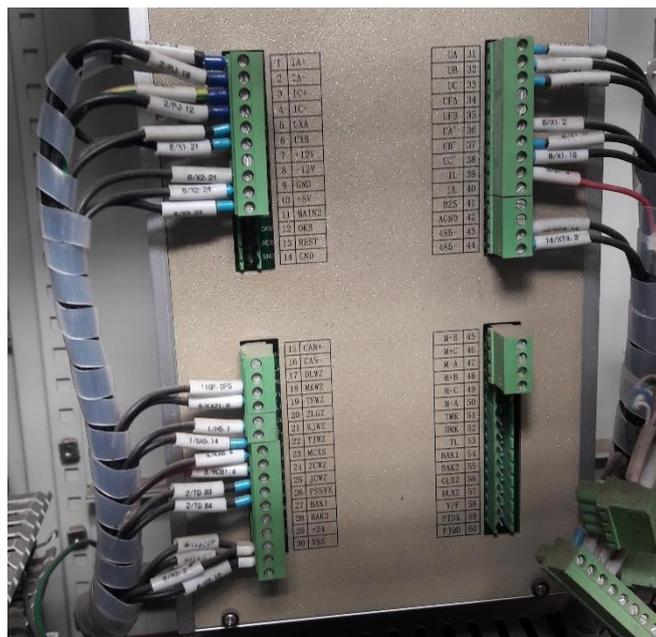


Figura 2. Conexión actual del sistema de excitación de la unidad de generación número 3

Gracias a información de fuentes primarias se sabe que el actual AVR del grupo de generación 3 es un elemento acoplado a las características actuales de funcionamiento, esto debido a varios mantenimientos correctivos realizados en el pasado a la unidad generadora ocasionando que elementos de medición y control que formaban el sistema de generación de la unidad produzcan fallos intempestivos y continuos por lo que es importante resaltar que el AVR no se encuentra en las mismas condiciones iniciales del fabricación

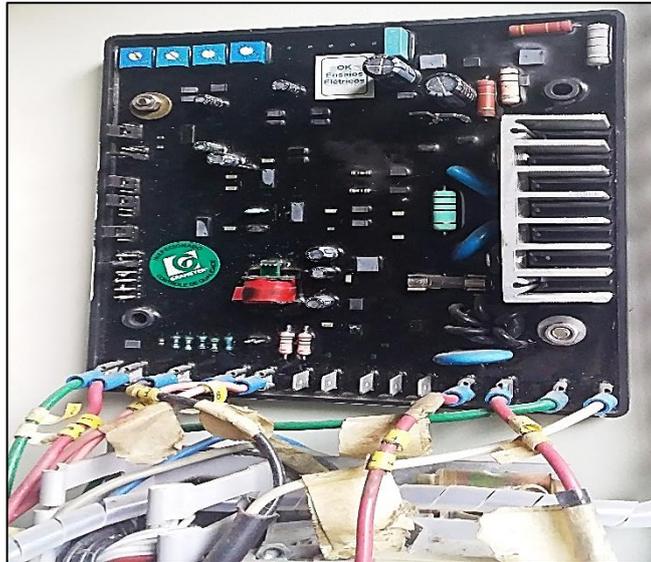


Figura 3. Conexión AVR regulador automático de Voltaje

Como se aprecia en la figura 3 el AVR instalado actualmente en el grupo de generación número 3 es el GRT7TH4 el cual presenta la siguiente configuración:

- Los terminales S1 y S2 funcionan como conexión de TC's para las fases S y T.
- El terminal E1 está conectado a la fase R funcionando como una retroalimentación.
- Los terminales E3/4 están conectados a la fase T la cual sirve como referencia para el regulador automático de voltaje.
- Los terminales +F y -F vienen del conexionado de la excitatriz para alimentar el campo del generador .
- 6 y 7 es un potenciómetro de paso fino utilizado para el ajuste de tensión

Como se observa, la configuración del sistema de excitación no está estructurada de acuerdo a como se describe en el manual de usuario y funcionamiento. Además de esto se evidencio que algunos sensores y aparatos se encuentran dañados e inhabilitados.

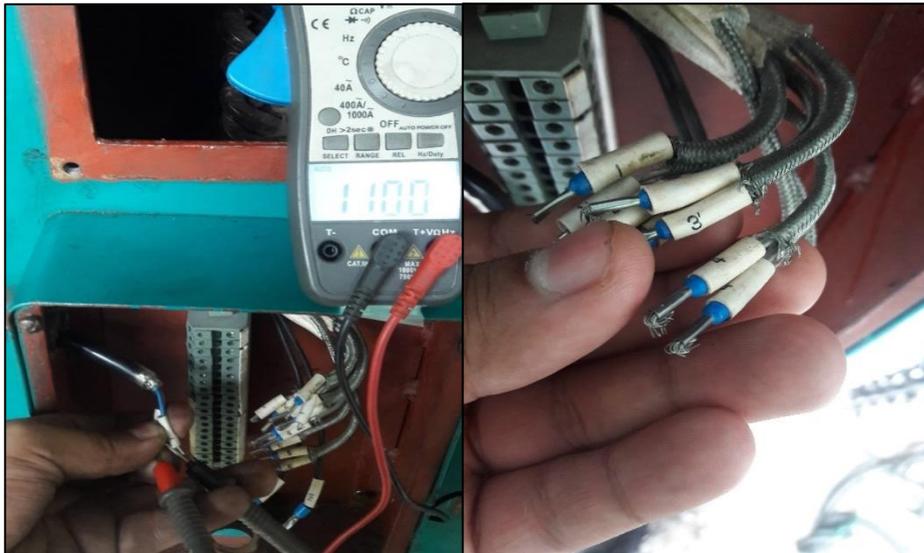


Figura 4 Comprobación del conexionado del sistema de control del generador

Como se observa en la figura 4 después de hacer una revisión del esquema de conexión del sistema de control junto a su conexionado se evidencia lo siguiente:

- Algunos aparatos de medición se encuentran deshabilitados.
- Sensores están apagados y/o quemados.
- No hay un etiquetado correctamente estructurado

Todo esto ha ocasionado que no se tenga un monitoreo ni control de algunos de los parámetros de funcionamiento del grupo de generación



Figura 5 Tablero de control grupo de generación central hidroeléctrica HidroCarolina.

Como se puede apreciar en la figura 5 algunos de los equipos de medición y control del sistema de generación se encuentran deshabilitados. Se sabe que se ha optado por desconectar algunas de las variables de monitoreo y control. Esto debido a que su equipo no se encuentra funcional y no se ha podido hacer un mantenimiento correctivo por la dificultad de importar el equipo, esta unidad generadora está constituida por equipos de medición analógicos de voltaje, corriente y frecuencia ocasionando que solo se pueda hacer su accionamiento y control manualmente.

Sistema	Características de fallas al entrar a modo Automático	Causas
GOVERNOR	<ul style="list-style-type: none"> - Se produce una reducción de frecuencia durante el inicio de la apertura de los álabes lo cual produce un cierre automático de los álabes, los mismos que no censan la carga establecida por el gobernador. - Paros intempestivos del sistema GOVERNOR. 	<ul style="list-style-type: none"> - Fallos en la comunicación de medición de frecuencia debido a falso contacto con otros terminales de medición lo que ha provocado cortocircuitos en algunos terminales de conexión - Sistema de alimentación insuficiente.
PLC	<ul style="list-style-type: none"> -Indicador de Fallo en la comunicación en el PLC. 	<ul style="list-style-type: none"> - Fallos del módulo plc debido a problemas en la RAM (<i>Memoria de acceso aleatorio</i>), - Problemas del sistema lógico del plc. - Terminal de comunicación del plc en mal estado.
Excitatriz y AVR	<ul style="list-style-type: none"> -Al entrar en modo automático no produce una tensión de salida ni tensión entre fases produciendo que el generador entre en operación asincrónica. - 	<ul style="list-style-type: none"> - Fallo en el inducido de excitación. - Puente de diodos en mal estado. - Índice de polarización fuera de los límites del fabricante. - Niveles de aislamiento fuera de los límites del fabricante.

Tabla 1. Principales anomalías del sistema de control del grupo de generación numero 3 de la central hidroeléctrica Hidrocarolina.

Los resultados del análisis se fundamentaron en la estructura actual del sistema de control automático del grupo de generación número 3 de la central hidroeléctrica HidroCarolina y cuáles son las fallas que se encuentran.

CONCLUSIONES.

La estructura del sistema de control automático del grupo de generación número 3 de la central hidroeléctrica HidroCarolina ha sufrido diversos cambios debido a diversos tipos de mantenimientos realizados, por lo que sus condiciones de operación actuales son diferentes a las condiciones de operación de fabrica originales, resaltando que la unidad generadora puede operar mediante su modo manual.

Al realizar el análisis del sistema de control automático del grupo de generación número 3 de la central hidroeléctrica HidroCarolina se evidenció que, su sistema de control automático se encuentra deshabilitado pues presenta diversos problemas en su sistema de excitación, GOVERNOR y control mediante PLC, al momento de iniciar la generación. Además, se comprobó que gran parte del conexionado en los tableros de control del grupo generador se encuentra sin su etiquetado y en mal estado demostrando una necesidad de organizar y determinar cuáles variables y conexionado pueden ser desconectados para rediseñar el sistema de control automático del grupo generador o restaurar su configuración original, mejorando la capacidad de control remoto y mejorar la vida útil de la unidad.

Para la recuperación del sistema de control automático de la unidad de generación número 3 de la central hidroeléctrica HidroCarolina se puede determinar cuáles terminales de conexión, equipos y variables del sistema de control están activas o desconectadas, configurando un sistema de control de acuerdo con las condiciones originales de funcionamiento de la unidad generadora además de hacer un inventario específico de cada parte desconectada o inhabilitada para poder realizar un mantenimiento correctivo del equipo , sensor o terminal de conexión.

Luego de los análisis y pruebas operativas realizadas se puede concluir que los objetivos y el alcance de este proyecto de titulación se cumplieron en la medida de las exigencias de control y operación de la Central.

REFERENCIAS

1. Plana, C. M. (2009). “Turbomáquinas hidráulicas: turbinas hidráulicas, bombas, ventiladores “(Vol. 2). Universidad Pontificia Comillas.

2. Ramírez Medina, H. J., & Sánchez Barroso, R. G. (2012). Estudio e Implementación del Sistema de Sincronización de Tres Generadores Eléctricos con la Red Pública de CNEL para una Fábrica de Harina de Pescado en Chanduy, Provincia de Santa Elena. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.126.1.78>
3. Morales, J. L. (2016). "Desarrollo de metodología para la estimación de la eficiencia de un generador." TECNOLOGICO DE COSTA RICA.
4. ADASME, J. R. (2019). Análisis De Sensibilidad Geométrica , Condiciones Óptimas De Instalación Y Estudio Comparativo De Tecnologías De Generación (Issue January)
5. [UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO]. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14701.84966>
6. Benito, A. B. (2018). Máquinas Eléctricas.
7. Avilés, J. C. P. (2016). Rehabilitación Y Sistema De Control De La Minicentral Hidráulica De La Purísima Concepción [UNIVERSIDAD DE JAÉN].
8. http://tauja.ujaen.es/bitstream/10953.1/3501/1/TFG_Juan_Carlos_Pretel_Aviles.pdf
9. J.Champan, S. (2012). Maquinas Electricas Chapman 5ta edicion.
10. Malasquez Huayapa, D. G. de J. (2018). Implementación de un sistema de monitoreo eléctrico y fluvial basado en tecnología GSM para una minicentral hidroeléctrica
11. [PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE PERÚ]. In Pontificia Universidad Católica del Perú. <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/12936>
12. Ramírez Medina, H. J., & Sanchez Barroso, R. G. (2012). Estudio e Implementación del Sistema de Sincronización de Tres Generadores Eléctricos con la Red Pública de CNEL para una Fábrica de Harina de Pescado en Chanduy, Provincia de Santa Elena. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.126.1.78>
13. Wildi, T. (2007). Maquinas eléctricas y Sistemas de Potencia. https://www.academia.edu/10506357/Maquinas_Electricas_y_Sistemas_de_Potencia
14. Pinetta, -Ing Rodrigo.. SISTEMAS DE AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL PARA PEQUEÑAS Y MEDIANAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS.
15. David, J., & Zapata, G. (2015). Determinación de los parámetros que afectan el ajuste y la coordinación de la protección de pérdida de sincronismo en generadores Determining parameters affecting the adjustment and coordination of out of step protection in synchronous machines.
16. Electromecánica, C., Un Regulador De Velocidad Para Un Generador Caterpillar En La Cantera San Joaquín, D. DE, Empresa Mapeagre, D. LA, Sandoval Israel Anibal Vivanco Torres Walter Stalin, N., & Cruz Panchi Luis Rolando MsC Latacunga-Ecuador, I. (2019). UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADA PROPUESTA TECNOLÓGICA.
17. Gabino, M. T. (2017). Análisis estadístico de pruebas en el Generador de la Unidad N° 5 para la determinación de tendencias y estimación de vida residual en la Central Paute-Molino. UNIVERSIDAD CATOLICA DE CUENCA.

18. Tonato, P. J. (2020). "MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO HIDROELÉCTRICA PAUTE SOPLADORA." UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA.
19. Maldonado, D. J. (2020). DISEÑO DE UN ESQUEMA DE CONTROL DISTRIBUIDO PARA EL CONTROL DE FRECUENCIA Y POTENCIA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS.
20. Xitumula, A. P. (2019). ANÁLISIS DE FALLAS Y MANTENIMIENTO MECÁNICO DE UNA TURBINA TIPO FRANCIS DE EJE VERTICAL DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA. [http://www.repositorio.usac.edu.gt/13678/1/Andrea Priscil](http://www.repositorio.usac.edu.gt/13678/1/AndreaPriscil)
21. Romina Flores Estrella, Y., & Eloy Gutiérrez Terán, C. (2019). ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA.
22. Sigrist, L. (2016). Diseño y ensayo de un regulador de tensión automático para máquinas síncronas.
23. JORGE HERNANDO MERA VELASCO. (n.d.). DISEÑO DEL SISTEMA ELECTRICO Y DE CONTROL DE UNA MINICENTRAL HIDROELECTRICA DE 100KW. Retrieved September 23, 2020, from <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/5794/1/T1595.pdf>
24. David Felipe, R. B. (2020). MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DE VELOCIDAD DE UNIDADES DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA COCA CODO SINCLAIR. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21117>
25. Catota, J. (2017). Informe tecnico de grupo de generacion numero 3 . Quito.
26. Electrónicos , Equipamientos Grameyer Ltda. (2009). www.grameyer.com.br. Obtenido de www.grameyer.com.br.
27. Fuchun Industry Development Company Ltd. (2013). Instruction Manual for Installation , Operation & Maintenance.
28. Kishor, N., & Kishor , N. (2017). Moldeling and Dynamic Behaviour of Hydropower Plants. London, United Kingdom .