



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**GUÍA PARA EL MONTAJE DEL EQUIPO ELECTROMECAÁNICO DE UN
PROYECTO HIDROELÉCTRICO, CON CAPACIDAD DE 8,2 MW**

Jorge Elías Maldonado Cornejo

Asesorado por el Ing. José Porfirio Meléndez Marroquín

Guatemala, octubre de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**GUÍA PARA EL MONTAJE DEL EQUIPO ELECTROMECAÁNICO DE UN
PROYECTO HIDROELÉCTRICO, CON CAPACIDAD DE 8,2 MW**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

JORGE ELÍAS MALDONADO CORNEJO

ASESORADO POR EL ING. JOSÉ PORFIRIO MELÉNDEZ MARROQUÍN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez
EXAMINADOR	Ing. Jorge Gilberto González Padilla
EXAMINADOR	Ing. Luis Manuel Pérez Archila
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

GUÍA PARA EL MONTAJE DEL EQUIPO ELECTROMECAÁNICO DE UN PROYECTO HIDROELÉCTRICO, CON CAPACIDAD DE 8,2 MW

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 1 de marzo de 2017.

Jorge Elías Maldonado Cornejo

Guatemala 24 de abril de 2017

Ingeniero:
Gustavo Orozco.
Coordinador del Área de Potencia.
Facultad de Ingeniería.
Universidad de San Carlos de Guatemala.

Señor Coordinador:

Por este medio hago de su conocimiento que he revisado el trabajo de graduación de titulado "GUÍA PARA EL MONTAJE DEL EQUIPO ELECTROMECAÁNICO DE UN PROYECTO HIDROELÉCTRICO, CON CAPACIDAD DE 8.2 MW", desarrollado por el estudiante Jorge Elías Maldonado Cornejo; con base a la revisión y corrección de dicho trabajo, considero que ha alcanzado todos los objetivos propuestos por lo que do mi aprobación sobre el mismo.

Atentamente


José Porfirio Meléndez Marroquín.
Ingeniero Electricista
Colegiado No.4616



Ref. EIME 41. 2017
Guatemala, 26 de JUNIO 2017.

FACULTAD DE INGENIERIA

Señor Director
Ing. Francisco Javier González López
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
**GUÍA PARA EL MONTAJE DEL EQUIPO
ELECTROMECAÁNICO DE UN PROYECTO
HIDROELÉCTRICO, CON CAPACIDAD DE 8.2 MW.** del
estudiante **Jorge Elías Maldonado Cornejo**, que cumple con
los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez
Coordinador de Potencia



sro



REF. EIME 41 . 2017.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; JORGE ELÍAS MALDONADO CORNEJO titulado: GUÍA PARA EL MONTAJE DEL EQUIPO ELECTROMECAÁNICO DE UN PROYECTO HIDROELÉCTRICO, CON CAPACIDAD DE 8.2 MW. , procede a la autorización del mismo.


Ing. Otto Fernando Andrino González

GUATEMALA, 4 DE SEPTIEMBRE 2,017.



Universidad de San Carlos
de Guatemala

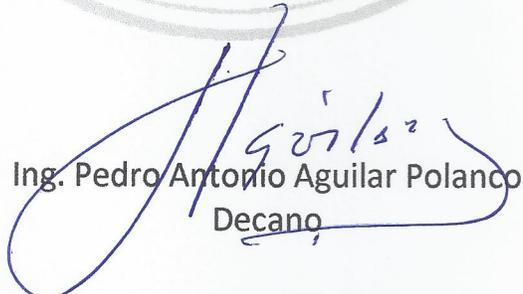


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 476.2017

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **GUÍA PARA EL MONTAJE DEL EQUIPO ELECTROMECAÁNICO DE UN PROYECTO HIDROELÉCTRICO, CON CAPACIDAD DE 8,2 MW,** presentado por el estudiante universitario: **Jorge Elías Maldonado Cornejo,** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, octubre de 2017

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser una importante influencia en mi carrera, entre otras cosas.
- Mis padres** Sebastián Maldonado y Tomasa Cornejo. Su amor será siempre mi inspiración.
- Mis hermanos** Fredy, Maynor, Werner, Migdalia, Aracely y Edilzar Maldonado Cornejo, por ser una importante influencia en mi carrera.
- Mis amigos** Por ser parte importante en mi carrera.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala Por ser una importante influencia en mi carrera.

Facultad de Ingeniería Por mi formación profesional.

Mis amigos de la facultad Por ser una importante influencia en mi carrera, con mucho aprecio.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1. CONCEPTOS BASICOS.....	1
1.1. Centrales hidroeléctricas	1
1.1.1. Turbinas tipo Pelton.....	2
1.1.2. Generadores síncronos	4
1.1.3. Válvula de mariposa	8
1.1.4. <i>Switchgear</i>	9
1.1.5. Paneles de protección, control y medición	9
1.1.6. Subestación eléctrica.....	9
1.1.7. Subestación barra simple	10
1.1.8. Transformador de potencia.....	11
1.1.9. Transformadores de medición	14
1.1.9.1. Transformador de corriente CT´S.....	15
1.1.9.2. Transformador de potencial PT´S.....	15
1.1.10. Interruptor de potencia.....	16
1.1.11. Seccionadores	17
1.1.12. Pararrayos	18
1.1.13. Paneles de protección, control y medición	19

2.	INFORMACIÓN GENERAL DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA.....	21
2.1.	Presa.....	21
2.1.1.	Tubería	22
2.1.2.	Tubería de baja presión	23
2.1.3.	Tubería de alta presión	23
2.1.4.	Altura sobre el nivel del mar	23
2.1.5.	Presa	24
2.1.6.	Casa de máquinas	24
2.1.7.	Caudal del río	24
2.1.8.	Caudal de diseño	24
2.1.9.	Caudal ecológico.....	25
2.1.10.	Cálculo de energía potencial.....	25
2.1.11.	Capacidad de producción.....	26
2.1.12.	Niveles de voltaje	26
3.	MONTAJE DE LOS EQUIPOS ELECTROMECAÑICOS	27
3.1.1.	Turbinas	27
3.1.2.	Hoja de datos	28
3.1.3.	Puntos de anclaje.....	29
3.1.4.	Ejecución.....	30
3.1.5.	Generadores	32
3.1.6.	Hoja técnica.....	32
3.1.7.	Ejecución y fijación.....	33
3.1.8.	Sistema hidráulico	38
3.1.9.	Sistema de enfriamiento.....	39
3.1.10.	Válvula de mariposa	40
3.1.11.	<i>Switchgear</i>	42
3.1.12.	Hoja de datos	44
3.1.13.	Elementos	45

3.1.14.	Instalación.....	45
3.1.15.	Diagrama unifilar.....	46
3.1.16.	Panel de protección, control y medición	46
3.1.17.	Protección de generadores síncronos	49
3.1.17.1.	Relevador basler B1-11g	49
3.1.17.2.	Protección contra sobretensiones.....	50
3.1.17.3.	Protección de pérdida de sincronismo.....	50
3.1.17.4.	Vibración.....	51
3.1.17.5.	Temperatura	53
4.	SUBESTACIÓN.....	55
4.1.1.	Subestación elevadora	55
4.1.2.	Nivel de voltaje	56
4.1.3.	Diagrama unifilar.....	56
4.1.4.	Diseño de subestación	58
4.1.5.	Distancia de fase a tierra	60
4.1.6.	Altura del primer y segundo nivel de barras.....	63
4.1.7.	Equipos del segundo nivel.....	65
4.1.8.	Blindaje.....	66
4.1.9.	Distancias de seguridad	67
4.1.9.1.	Personal	68
4.1.9.2.	Vehículo.....	69
4.1.10.	Transformador de potencia 4,160/69 kV.....	70
4.1.11.	Tipo de conexión	72
4.1.12.	Montaje.....	73
4.1.13.	Hoja de datos.....	75
4.1.14.	Montaje.....	76
4.1.15.	Equipos de medición y seguridad	77

4.1.15.1.	Seccionadores.....	77
4.1.16.	Pararrayos.....	78
4.1.17.	Transformadores de potencial.....	79
4.1.18.	Paneles de protección, control y medición de subestación	80
4.1.18.1.	Protecciones.....	80
4.1.19.	Protecciones de transformador	81
4.1.19.1.	Relevador SEL 587	83
4.1.20.	Línea de transmisión	84
4.1.20.1.	Relevador SEL 311L	84
4.1.21.	Protección de barra	86
4.1.21.1.	Relevador SEL 351A.....	86
4.1.22.	Diseño de red de tierras	87
4.1.23.	Tipo de red	88
4.1.24.	Tensión de contacto teórico	90
4.1.25.	Tensión de paso teórico	91
CONCLUSIONES.....		95
RECOMENDACIONES		97
BIBLIOGRAFÍA.....		99

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Alabes de la turbina Pelton	3
2.	Partes importantes de un generador	6
3.	Elementos de un generador síncrono	7
4.	Presa.....	22
5.	Chimenea de equilibrio.....	23
6.	Turbina Pelton de cuatro inyectores de eje vertical.....	28
7.	Placa del equipo.....	29
8.	Carcasa de turbina	29
9.	Turbina Pelton	30
10.	Fundición de turbina.....	31
11.	Placa característica del generador	33
12.	Posiciones del generador.....	33
13.	Movimientos del generador	35
14.	Montaje del generador	36
15.	Alineación de alavés e inyectores	37
16.	Vista de los dos generadores.....	37
17.	Sistema de control de la turbina.....	38
18.	Sistema de enfriamiento.....	40
19.	Válvula mariposa.....	41
20.	Casa de máquinas	42
21.	<i>Switchgear</i>	43
22.	Placa del <i>switchgear</i>	44
23.	Ensamble de <i>switchgear</i>	45
24.	Diagrama unifilar barra 4 160 voltios.....	46

25.	Panel de control de generadores	47
26.	Vibración de generadores	52
27.	Medidor de vibraciones	53
28.	Temperatura del generador	54
29.	Diagrama unifilar	57
30.	Perfil de subestación elevadora	58
31.	Perfil de subestación.....	64
32.	Transformador de potencia	71
33.	Placa del transformador	72
34.	Vista lateral del transformador	73
35.	Placa del Interruptor 69 kV	75
36.	Interruptor 69 kV	76
37.	Seccionador con puesta a tierra	77
38.	Pararrayos	78
39.	Transformador de potencial	79
40.	Conexión de CT´S	82
41.	Relevador SEL 587	83
42.	Relevador SEL 311L.....	85
43.	Relevador SEL 351 ^a	86
44.	Red de tierras	89

TABLAS

I.	Características de las turbinas.....	28
II.	Generador síncrono.....	32
III.	Coordinación de aislamiento.....	60
IV.	Hoja de datos.....	71
V.	Hoja de datos del interruptor.....	75
VI.	Hoja de datos.....	80

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Q	Caudal
I	Corriente
ϵ	Fuerza electromotriz
Φ	Flujo magnético
P	Potencia activa
g	Valor de la gravedad
V	Voltaje

GLOSARIO

Alabes	Son las paletas curvas de una turbomáquina o máquina de fluido roto dinámica.
Devanado	Conjunto de espiras destinadas a producir el campo magnético, al ser recorridos por una corriente eléctrica.
Estator	Es la parte fija de una máquina rotativa.
Generador	Es una máquina eléctrica que transforma la energía mecánica a eléctrica.
Presa	Es un muro construido en el cauce de algún río para formar una laguna artificial para evitar que el río siga su cauce natural.
Rotor	Es la parte giratoria de una máquina eléctrica como generadores o motores.
Turbina	Turbomáquina rotativa que convierte la energía potencia de la masa de agua a energía mecánica rotativa.
Voltaje	Es una magnitud física que cuantifica la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos.

RESUMEN

En la generación de energía eléctrica a través de fuentes renovables, como los sistemas hídricos, se aprovecha la caída natural del agua al encausar ríos hacia lagunas artificiales para almacenar las aguas. El agua almacenada se regula y transporta desde la laguna hasta la fuente de aprovechamiento con tuberías colocadas de forma estratégica para buscar mejores caídas y aprovechar mejor la energía potencial del agua.

La energía potencial obtenida por la caída es aprovechada con las turbinas que convierten la energía potencial en energía mecánica, cinética; cuando el agua encausada en las tuberías sale a gran velocidad por los inyectores la cual colisiona en los alabes de la turbina incrustada en el eje del generador que provocan que gire. Debido a este movimiento giratorio, en el estator, donde están las terminales eléctricas, se manifiesta un voltaje y una corriente. Tanto el voltaje como la corriente son transformados a valores estándares para su respectivo transporte y comercialización a través de subestaciones y líneas de transmisión regulados por el sistema nacional interconectado SIN.

El presente trabajo es una guía para el montaje de centrales hidroeléctricas con presas de regulación diaria a través de dos turbinas Pelton de eje vertical y un caída de agua de 327,6 metros para lograr una producción de 8,2 MW de energía eléctrica por hora a su máxima potencia.

OBJETIVOS

General

Describir la planificación y los procedimientos del montaje de los equipos de una central hidroeléctrica, como turbinas, generadores, transformadores, interruptores, seccionadores, transformadores de medición, equipos de protección, control y medición.

Específicos

1. Describir las partes importantes para el montaje de una turbina Pelton.
2. Describir las partes importantes para el montaje de un generador síncrono.
3. Describir las partes importantes para el montaje de una subestación elevadora 4,160/69 kV.
4. Describir las partes importantes para el montaje de las protecciones, control y medición de los equipos electromecánicos.

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo de graduación se describe el montaje del equipo electromecánico de un proyecto hidroeléctrico con una capacidad instalada de 8,2 MW.

El principio de aprovechamiento de la energía hidráulica es transformar la energía potencial del agua que está a cierta altura, conducirla hasta una tubería de presión para transformarla en energía cinética. Esta se transforma en energía mecánica al pasar por una turbina; posteriormente, la energía mecánica se transforma en energía eléctrica por medio de un generador síncrono a un voltaje de salida de 4,160 kV; luego, se eleva a un voltaje de 69 kV por medio de un transformador de potencia para que la energía generada sea inyectada al sistema nacional interconectado SNI.

Este tipo de planta se denomina central de filo de agua con presa de volumen útil para una regulación diaria que aprovechan las descargas naturales del río.

La planta hidroeléctrica está conformada por una presa de regulación diaria, tubería que posee una longitud de 2,8 kilómetros, dos turbinas tipo Pelton, dos generadores síncronos de eje vertical, una barra de 4,160 kV transformador de potencia 4,160/69 kV interruptor 69 kV, seccionadores, transformadores de medición, apartarrayos, equipos de protección, control y medición.

1. CONCEPTOS BASICOS

1.1. Centrales hidroeléctricas

Conjunto de equipos mecánicos y electromecánicos que unidos pueden aprovechar la energía potencial del agua para generar electricidad. Este tipo de proyecto embalsa un volumen de agua considerable mediante la construcción de una o más presas en forma de lagunas artificiales. Para lograr esta laguna se requiere la construcción de grandes muros de concreto con piedras u hormigón apoyados por montañas para evitar que el río siga su cauce natural.

La diferencia entre altitudes ayuda a que la masa del agua genere energía potencial gravitatoria que aprovecha la caída natural del agua conducida por una tubería hasta llegar a la turbina.

La turbina reduce la tubería a un diámetro muy pequeño, por medio de inyectores o toberas que dirigen el chorro de agua tangencial a los alabes de la turbina, que está rígidamente instalada en el extremo inferior del rotor del generador que gira a una velocidad constante. El rotor está instalado en forma concéntrica dentro del estator que está construida por bobinas que se encuentran estáticas acopladas a la carcasa, con un espacio muy pequeño entre las bobinas del rotor y el estator que se llama entre hierro. Este efecto convierte la energía potencial del agua a energía mecánica al rotar el eje del generador. Al rotar un campo magnético en una bobina produce energía eléctrica en los extremos de las bobinas debido a los principios de la ley de

Faraday: “cualquier cambio de entorno magnético que se encuentra en una bobina de cable origina un voltaje”¹.

Al tener la energía en los extremos de las bobinas del estator, se conduce con cables de potencia hasta un transformador de potencia. El transformador de potencia regula los niveles de voltaje para que sea transportado por una red del mismo voltaje hasta los centros de consumo.

1.1.1. Turbinas tipo Pelton

Equipo hidráulico también llamado turbomáquina de impulso de flujo tangencial, la turbomáquina es diseñada para aprovechar grandes caídas de agua y de bajo caudal; tiene las siguientes características:

- Una mayor tolerancia a suciedades como arena y otras partículas.
- Mejora el tiempo de mantenimiento debido a la facilidad de acceso a sus piezas.
- No posee sellos de presión de eje.
- Fáciles de fabricar.

La turbina Pelton está formada con un rodete que alrededor posee alabes o cucharones. Una serie de inyectores o toberas que inyectan el agua de forma tangencial que incide en los chorros con una alta presión directamente en los alabes. Al chocar el agua con los alabes convierte la energía potencial a energía cinética debido al movimiento angular que le genera al rotor.

¹ *Ley de Faraday. Introducción electromagnética.* <https://espaciociencia.com/ley-de-faraday-induccion-electromagnetica/>. Consulta: 7 de febrero de 2016.

Figura 1. **Alabes de la turbina Pelton**



Fuente: elaboración propia.

Los rodetes pueden ser contruidos desde 17 a 26 alabes, debido a su composición muy simple pueden trabajar de forma vertical y horizontal.

Características de las turbinas del eje vertical:

- En forma vertical facilita el acceso a sus conexiones.
- Para aumentar la potencia se colocan más chorros sin aumentar el caudal.
- Se acortan las distancias al eje del rotor.
- Se puede disminuir el diámetro del rotor al aumentar la velocidad de giro.

Características de las turbinas del eje horizontal:

- En la forma horizontal permiten aumentar el número de inyectores de cuatro a seis que ganan potencia al aumentar el caudal.

El rodete que se muestra en la figura 1 está construido de acero con alabes alrededor del mismo en forma de cucharón doble; es un rodete de 20 alabes.

1.1.2. Generadores síncronos

Máquina eléctrica rotativa o convertidor electromecánico de energía (convierte la energía mecánica en energía eléctrica) gracias a su construcción con una pieza giratoria denominada rotor y una pieza estática llamada estator o de campo.

Ambas piezas están construidas con chapas de lámina de acero al cilicio y por bobinas de cable de cobre enrollados sobre las chapas. Debido al principio de generación de electricidad, al mover cualquier flujo magnético sobre una bobina, esta producirá un voltaje en sus extremos descrita mejor mas adelante en la ecuación 1 como la ley de Faraday.

Es llamado también generador síncrono porque al tomar referencia de las frecuencias, la eléctrica y la angular son parecidas: es decir, la frecuencia eléctrica trabaja en sincronía con la frecuencia angular de la máquina.

Esta máquina, para generar, debe cumplir dos aspectos muy importantes: primero, generar o poseer un campo magnético; segundo, girar dicho campo

magnético para lograr la generación de energía eléctrica en sus bornes ubicados en el estator.

Para cumplir con el primer requisito, el campo magnético o flujo magnético se produce en el rotor. Al pasar voltaje y corriente directa en el embobinado genera un flujo magnético estable alrededor del rotor.

El segundo requisito se cumple al girar el rotor, este movimiento lo puede realizar por la influencia de un flujo hidráulico; al chocar el agua a grandes velocidades en los alabes de la turbina, esta realizará giros sobre su eje.

El principio del funcionamiento de cualquier máquina síncrona se basa en la ley de Faraday que establece que “la fuerza electromotriz inducida en un circuito es igual a menos la derivada del flujo magnético respecto del tiempo”² y se define en la ecuación.

Ecuación de la ley de Faraday:

$$\varepsilon = - \frac{d\varphi}{dt} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

- ε , es la fuerza magneto motriz
- φ , es el flujo magnético

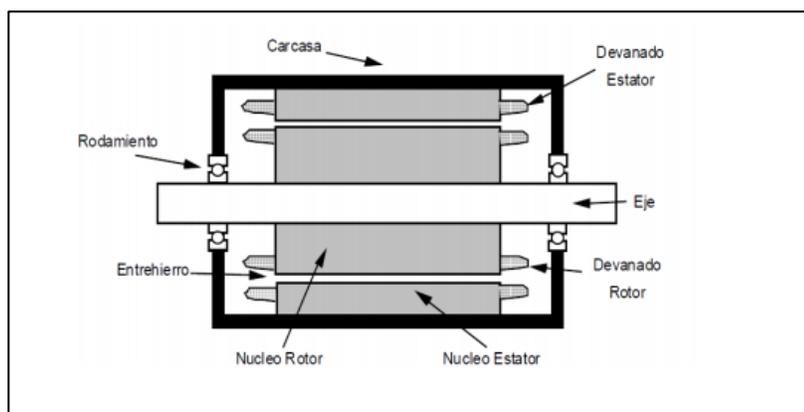
² *Ley de Faraday. Introducción electromagnética.* <https://espaciociencia.com/ley-de-faraday-induccion-electromagnetica/>. Consulta: 7 de febrero de 2016.

Al operar como generador, la máquina síncrona, según la ecuación anterior, se debe variar el flujo magnético en el tiempo; la energía mecánica que realizará ese trabajo es la suministrada a la máquina por medio de la aplicación de una fuerza tangencial al eje del rotor; la fuerza mecánica puede ser proporcionada por una turbina hidráulica.

En la figura 2 se describen las partes más importantes del generador:

- Rodamiento
- Carcasa
- Devanado del estator
- Eje
- Núcleo del rotor
- Núcleo del estator
- Devanado del rotor
- Entrehierro

Figura 2. Partes importantes de un generador

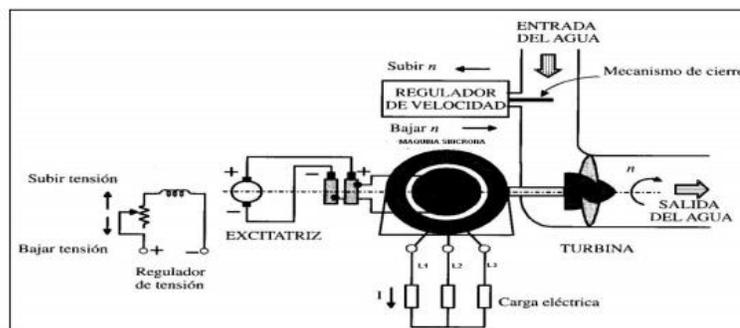


Fuente: ALLER, José. *Máquinas eléctricas rotativas*. p. 104.

Cuando el generador síncrono está sometido a carga, en este caso a consumo de energía por un agente externo, las tensiones salientes varían de magnitud para lograr un nivel de voltaje estándar; se logra al variar los campos de excitación para los cuales se deben usar equipos especiales para que garanticen su óptima operación.

Este efecto se causa cuando se suministra corriente a una carga externa; dicha corriente que circula por las bobinas del estator genera un campo magnético giratorio al circular por los devanados del estator. Este campo generado produce una fuerza de oposición al giro de la máquina, debido a esto es necesario contrarrestar la fuerza. Para reducir dicha fuerza se puede lograr aumentando la fuerza del campo por medio de la fuerza mecánica exterior, la cual puede ser por medio de una turbina hidráulica o de vapor.

Figura 3. Elementos de un generador síncrono



Fuente: FRAILE MORA, Jesús. *Máquinas eléctricas*. p. 420.

Para conectar un generador síncrono a una red, para comercializar la energía que genera, debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Es necesario que el generador síncrono gire a velocidad de sincronismo; en cualquier caso la frecuencia de la red, para Guatemala es de 60 Hertz.
- Poseer el mismo nivel de voltaje.
- Mismo factor de potencia.
- Misma secuencia de fases.

Las capacidades contractivas de un generador síncronos dependen de la aplicación.

- Centrales hidroeléctricas
- Tipo de eje
- Tipo de rotor (polos salientes o lisos)
- Numero de polos

1.1.3. Válvula de mariposa

Equipo mecánico cuya función es interrumpir o regular el flujo del agua en la tubería para aumentar o disminuir el paso del agua con una placa llamada mariposa que gira hasta un máximo de 90 grados respecto a su posición natural de cerrado o abierto. También, es utilizado en conductos de vapor y aire.

Debido a que la apertura no es directamente proporcional al área del paso del agua, no se puede usar para la regulación de caudales; su empleo es recomendable para la apertura total o cierre total del caudal.

1.1.4. Switchgear

Equipo eléctrico que permite el control de algún otro equipo, lo cual permite realizar maniobras de energización o desenergización como generadores, motores, transformadores, entre otros.

En su estado más simple es un interruptor que realiza las maniobras de apertura y cierre de circuitos eléctricos.

1.1.5. Paneles de protección, control y medición

Conjunto de equipos eléctricos conectados entre sí para para la recopilación de datos provenientes de equipos gobernados. Los datos adquiridos son analizados en estos paneles para saber el estado de los equipos gobernados. Al tener parámetros de guía, estos equipos deciden la actuación de los equipos gobernados.

En una central hidroeléctrica recopila información de todos los equipos desde sensores, medidores de la altura del agua, compuertas, válvulas de mariposas, turbinas, medidores de caudal, generadores, interruptores, entre otros.

1.1.6. Subestación eléctrica

Conjunto de dispositivos eléctricos que forman parte de un sistema eléctrico de potencia, una de sus características principales es la regularización o estandarización de la tensión para un sistema interconectado.

Las subestaciones se pueden clasificar o subdividir de acuerdo con el tipo de función que pueda desarrollar, los cuales se pueden dividir en tres grupos.

- Subestación elevadora de tensión
- Subestación de maniobra o seccionamiento de circuito
- Subestaciones mixtas (mezcla de las dos anteriores)

Dependiendo del nivel de voltaje las subestaciones se pueden catalogar en:

- Subestaciones de extra alta tensión, arriba de 230 KV
- Subestaciones de alta tensión, entre 115 kV y 230 kV
- Subestaciones de media tensión, entre 23 kV y 115 kV
- Subestaciones de distribución secundaria, debajo de 23 kV

La capacidad de una subestación se fija según la demanda actual de la zona en KVA, más el incremento en el crecimiento por exploración, durante los siguientes diez años previniendo el espacio necesario para futuras ampliaciones.

1.1.7. Subestación barra simple

La configuración más sencilla. En condiciones normales de operación, todas las líneas y bancos de transformadores están conectados al único juego de barras.

En esta configuración, al momento de una falla al operar la protección diferencial de barra, esta desconecta todos los interruptores y queda la subestación desenergizada. Al agregar un juego de seccionadores entre la

barra y los interruptores, mejora la seguridad del personal al momento de realizar un mantenimiento.

1.1.8. Transformador de potencia

El transformador de potencia es denominado como una máquina eléctrica para elevar o disminuir la tensión de corriente alterna, su funcionamiento se basa en la inducción magnética. Para condiciones ideales, la potencia de entrada es igual a la potencia de salida.

Está construido por medio de un núcleo de chapas de acero al silicio y por dos bobinas de cable conductor enrollados sobre el núcleo, existen transformadores con más de dos devanados.

Los transformadores ideales deberán de entregar la misma potencia que reciben por lo tanto:

$$P = V_p \times I_p \cos \phi = V_s \times I_s \cos \phi \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

- V_p , I_p , voltaje y corrientes del lado primario
- V_s , I_s , voltajes y corrientes del lado secundario

Al momento de igualar la potencia del lado del primario y secundario, el coseno del ángulo son iguales, despejando voltajes y corrientes.

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p} \quad (\text{Ec. 3})$$

Lo que quiere decir que por el devanado de alta tensión circula una corriente muy pequeña y en lado de baja tensión circulan corrientes muy grandes.

El término de relación de transformación 'a' describe la relación que existe entre los devanados de alta tensión y baja tensión.

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} = a \quad (\text{Ec. 4})$$

- N_p, N_s = número de vueltas de los devanado primario y secundario

Los transformadores de potencia según su uso o aplicación se pueden conectar de la siguiente forma.

- Estrella- estrella
 - Utilizado para la alimentación de cargas trifásicas balanceadas relativamente pequeñas.
 - Aislamiento mínimo.
 - Circuito muy económico para baja carga y alto voltaje.
 - Neutro inquieto o flotante. El neutro no está sólidamente aterrizado.
- Estrella – estrella – con terciario en delta
 - Incremento en el costo de fabricación.
 - Elimina los voltajes de terceros armónicos debido a que el delta proporciona un camino cerrado para la tercera armónica de la corriente.

- Delta –delta
 - Utilizada en baja y media tensión
 - Circuito económico para alta carga y bajo voltaje
 - Se necesitan grandes cantidades de aislamiento y de cobre
 - Se necesita un punto de referencia externa (punto de tierra)

- Delta - estrella
 - Utilizado en transformadores elevadores de tensión.
 - Al aterrizar el neutro del secundario se aíslan las corrientes de tierra de secuencia cero.
 - Elimina los voltajes de tercera armónica porque la corriente magnetizante de la tercera armónica se queda circulando dentro de la delta del primario.

- Estrella – delta
 - Utilizado en transformadores reductores de tensión.
 - No se puede conectar a tierra el secundario.
 - Elimina los voltajes de tercera armónica porque la corriente magnetizante de la tercera armónica se queda circulando dentro de la delta del secundario.

- Doble T
 - Comportamiento similar a la estrella -estrella.
 - Tiene ambos neutros.

- Los voltajes y las corrientes de tercer armónico pueden ocasionar problemas.
- Zig-zag
 - Se utiliza en transformadores de tierra conectados a bancos de conexión delta para tener de una forma artificial una corriente de tierra que energice las protecciones de tierra.
- Los transformadores se pueden conectar en forma paralela para aumentar la potencia de un sistema. Para lo cual deben cumplir con los siguientes requisitos.
 - Poseer el mismo nivel de voltaje
 - La misma polaridad
 - La misma secuencia horaria
 - Misma conexión en su interior
 - Misma frecuencia

1.1.9. Transformadores de medición

Son instrumentos electromecánicos que transforman corrientes y voltajes de grandes cantidades a pequeñas para que la manipulación no sea tan peligrosa, debido a que utilizan bajas escalas de magnitudes de voltaje y corriente.

Generalmente los se pueden encontrar en las salidas y entradas de los transformadores de potencia, en la salida de generadores y en la entrada de los motores o en algún punto en que se desea tomar alguna medición o referencia.

El objetivo principal de diseñar este tipo de transformadores es reducir los peligros de las altas tensiones en los tableros de control o mandos.

Estos transformadores se dividen en dos tipos: CT'S y PT'S.

1.1.9.1. Transformador de corriente CT'S

Dispositivo de medición de corriente donde la corriente del secundario esta regularizada o proporcionada con la corriente del primario aunque ligeramente desfasada. El devanado primario se conecta en serie con el circuito a medir y el secundario se conecta en serie con las bobinas de corriente de los aparatos de medición.

Un transformador de corriente puede tener varios devanados en el lado del secundario y funcionan de manera independiente; se pueden usar para diferentes mediciones, por ejemplo: el devanado secundario número uno es el que sirve para las protecciones de transformador; el segundo devanado secundario sirve para la medición comercial. Por lo general, el lado secundario trabaja en corrientes de hasta 5 amperios.

1.1.9.2. Transformador de potencial PT'S

Dispositivo para medir voltajes; dentro de las condiciones normales, el voltaje primario es prácticamente proporcional al secundario aunque ligeramente desfasado.

Los devanados primarios se conectan en paralelo al circuito a medir y los devanados secundarios se conectan en paralelo a las bobinas de carga.

Los voltajes del primario y el secundario deben ser regulados por normas internacionales. La tensión primaria debe estar normalizada por el sistema nacional interconectado. La tensión del lado secundario, por lo general, según las normas ANSI son de 120 voltios para aparatos de hasta 25 kV y de 115 voltios para aquellos valores mayores a 34,5 kV.

Para escoger la potencia de transformador se suman todas las cargas de los equipos de medición más las pérdidas de potencia por caída de voltaje que se produce en los cables desde el transformador hasta los paneles.

1.1.10. Interruptor de potencia

Equipo electromecánico que sirve para conectar y desconectar un circuito o un elemento eléctrico como líneas de transmisión, transformadores, capacitores, reactores de una fuente de alimentación de voltaje.

Cuando un interruptor abre un circuito eléctrico en condiciones de carga, es inevitable la existencia de un arco eléctrico. La generación del arco eléctrico se debe a la ionización del medio entre los contactos; hace que el aire se vuelva conductor, lo que facilita la circulación de la corriente. Para extinguir el arco eléctrico se puede aumentar la resistencia que ofrece el medio de circulación, para la cual la resistencia se puede aumentar enfriando el arco.

- Los interruptores se pueden clasificar en:
 - Interruptores de gran volumen de aceite
 - Interruptores de pequeño volumen
 - Interruptores neumáticos
 - Interruptores en vacío

- Interruptores en Hexafloruro de azufre (SF₆)
- Para la selección de interruptores es bueno considerar las siguientes características:
 - Tensión nominal
 - Corriente nominal
 - Tensión máxima
 - Corriente de cortocircuito inicial
 - Corriente de cortocircuito
 - Tensión de restablecimiento
 - Resistencia de contacto
 - Cámara de extinción del arco

1.1.11. Seccionadores

Equipo electromecánico que permite dividir uno o más circuitos separados de manera mecánica por medio de dos brazos. Un seccionador, a diferencia de un interruptor, no posee supresor de arco eléctrico; por lo tanto, no puede operar bajo carga. De abrirse bajo carga tendería a sufrir serios daños en su estructura.

- Se clasifican en:
 - Seccionadores de puesta a tierra: utilizados en lugares donde se realizan trabajos de mantenimiento y suelen ser obligatorios para seguridad del personal.

- Seccionadores portafusibles: utilizados en baja tensión, el seccionador tiene incorporado un fusible.
- Los seccionadores con puesta a tierra pueden ser construidos en las siguientes configuraciones:
 - Horizontal invertida
 - Vertical
 - Pantógrafo

1.1.12. Pararrayos

Son equipos eléctricos que sirven como protecciones, cuando ocurren sobretensiones ocasionadas por descargas atmosféricas o por maniobra. Formados por una serie de elementos resistivos no lineales y explosores que limitan la amplitud de las sobretensiones.

- Un pararrayo debe comportarse de la forma siguiente:
 - Como un aislador mientras la tensión aplicada no exceda cierto valor predeterminado.
 - Como un conductor al alcanzar la tensión máxima de diseño.
 - Conducir a tierra la onda de corriente producida por la onda de sobretensión.
- Las sobretensiones que tienen que funcionar son las siguientes:

- Sobretensiones de impulso de rayo
- Sobretensiones de impulso de maniobra
- Sobretensiones de baja frecuencia
- Se pueden agrupar en las siguientes categorías:
 - Cuernos de arco
 - Pararrayos autoevaluadores
 - Pararrayos de óxido metálicos

1.1.13. Paneles de protección, control y medición

Los paneles de protección, control y medición de un sistema eléctrico utilizados en subestaciones y centrales hidroeléctricas, se definen como la operación de un conjunto de diferentes aparatos para la vigilancia permanente y maniobra de operación. Otra de sus funciones es la eliminación o la disminución de daños que pueden recibir los equipos al momento de una falla. La mayoría de equipos de medición están conectados generalmente a los secundarios transformadores de instrumento, corriente, potencial, como sensores de posición de compuertas de boca toma apertura/cierre y sensores de temperatura.

- Las magnitudes que pueden medir son:
 - Corriente
 - Tensión
 - Frecuencia
 - Factor de potencia
 - Potencia activa

- Potencia reactiva
- Calidad de energía
- Temperatura
- Resistencia

El conjunto de sistemas de control pueden operar de forma manual y de forma automática. De igual forma se pueden operar de forma local o remota.

2. INFORMACIÓN GENERAL DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA

La central hidroeléctrica cuenta con una capacidad de producción de energía de hasta 8 megavatios por hora, por medio de dos generadores síncronos y dos turbinas Pelton de eje vertical. La central posee una caída de agua de 327,6 metros.

2.1. Presa

Este tipo de planta se denomina central con presa de regulación diaria, significa que almacena el agua en una laguna artificial durante una gran parte del día para regularlo por medio de las turbinas en horas de mayor demanda de energía eléctrica. Posee una capacidad de almacenar 96 000 metros cúbicos, para una regulación diaria, aprovechando las descargas naturales del río. Está construido por un muro de hormigón como se puede observar en la figura 4 la cual corta el cauce natural del río.

Figura 4. **Presa**



Fuente: elaboración propia.

2.1.1. Tubería

Conducto metálico utilizado para transportar el agua del punto de embalse hasta la válvula de mariposa localizada antes de las turbinas Pelton con una longitud de 2 300 metros. Se fabricó de acero al carbón con base en la norma ASTM 572; las piezas se cortaron a medida conforme a la topografía del terreno. Cuenta con una chimenea de equilibrio que para liberar golpes de ariete como se ve en la figura 5.

Figura 5. **Chimenea de equilibrio**



Fuente: elaboración propia.

2.1.2. Tubería de baja presión

Tubería metálica con una longitud de 1 800 metros de tubo de 1,2 metros de diámetro y una chapa de espesor de 8,5 milímetros.

2.1.3. Tubería de alta presión

Tubería metálica con una longitud de 1 000 metros de tubo de 0,80 metros de diámetro y una chapa de espesor de 22 milímetros.

2.1.4. Altura sobre el nivel del mar

La central aprovecha la energía potencial gravitatoria que posee la masa del agua. Debido a la topografía del terreno, se produce un desnivel conocido como salto geodésico entre la presa y la casa de máquinas, lugar donde es aprovechable la energía potencial.

2.1.5. Presa

Está situada a 772 metros sobre el nivel del mar. La parte más alta es donde se provocó una laguna artificial o lugar donde se almacena el agua para su posterior uso.

2.1.6. Casa de máquinas

Está situada a 444,4 metros sobre el nivel del mar. La parte más baja es del lugar en donde es aprovechada la fuerza del agua para convertirla en energía eléctrica.

2.1.7. Caudal del río

El río es el encargado de abastecer de agua la planta, con un caudal que varía desde 0,55 m³/s para la época de verano y hasta los 4 m³/s para un invierno muy lluvioso. La planta puede utilizar un máximo de 3 m³/s trabajando al 100 % su máxima potencia. Cuando el caudal es de 1 m³/s la central produce 2,7 MW.

2.1.8. Caudal de diseño

La planta está diseñada con un caudal de 0,55 metros cúbicos por segundo, el mínimo en tiempo de verano, según registros obtenidos a lo largo de 10 años.

2.1.9. Caudal ecológico

La planta está diseñada con un caudal ecológico de 0,055 metros cúbicos por segundo. Es llamado caudal ecológico a un porcentaje del caudal de diseño del río, debe circular todo el tiempo por el cauce natural del río para mantener la flora y fauna del lugar.

2.1.10. Cálculo de energía potencial

La potencia de una central hidroeléctrica se mide en megavatios (MW) y se calcula mediante la fórmula siguiente.

$$P = g * H * Q * \gamma \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

- P = potencia en megavatios (MW)
- g = aceleración de gravedad 9,81 m/s²
- H = desnivel del agua entre presa y casa de máquinas aguas abajo
- Q = caudal en metros cúbicos por segundo
- γ = eficiencia de los equipos electromecánicos. (turbina, generador)

Cálculo de la potencia de la planta:

- Datos de la planta
 - g = 9,81 m/s²
 - H = 327,6 m
 - Q = 3 m³/s

- $\gamma = 0,85$

$$P = 9,81 * 327,6 * 3 * 0,85$$

$$P = 8,2 \text{ MW}$$

La planta puede producir un total de 8,2 MW de capacidad.

2.1.11. Capacidad de producción

La planta está conformada de dos turbinas Pelton de eje vertical y dos generadores síncronos respectivamente, cada uno con capacidad de 4,2 MW. Para lograr una mayor eficiencia de los caudales de entrada del río, haciendo un total de 8,4 MW a una máxima potencia.

2.1.12. Niveles de voltaje

La planta trabaja en voltajes de 120/240 V, 480 V, 4,160 kV, y 69 kV. Para los servicios auxiliares se utilizan 120/240/480 voltios. La salida de los generadores es de 4,160kV. La salida del transformador de potencia es de 69 kV, nivel de voltaje del sistema nacional interconectado SNI.

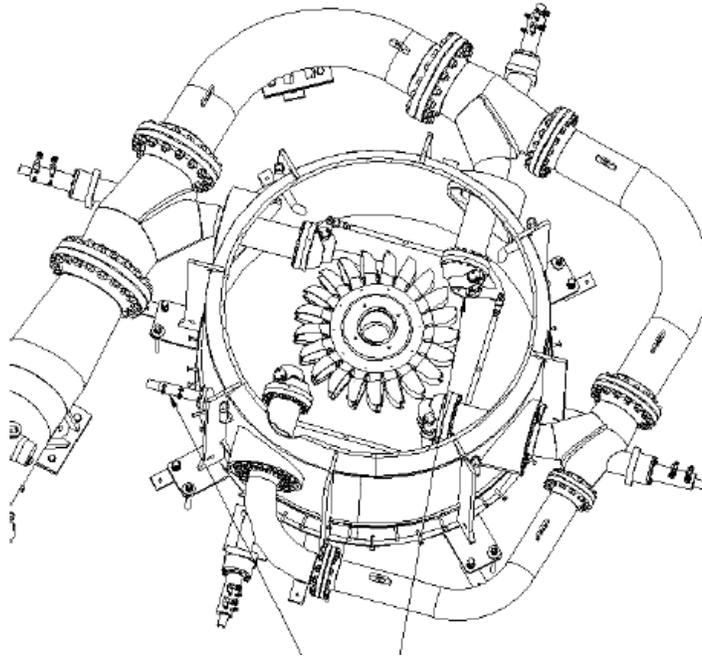
3. MONTAJE DE LOS EQUIPOS ELECTROMECA'NICOS

3.1.1. Turbinas

La central está constituida por dos turbinas tipo Pelton de eje vertical, fabricadas por la empresa GlobalHidro de Austria, los que transforman la energía cinética del agua a energía mecánica. Cada turbina está constituida por:

- Cuatro inyectores, los cuales permiten una salida $0,375\text{m}^3/\text{s}$ por cada inyector, para una salida máxima de $1,5\text{m}^3/\text{s}$.
- Deflector, posiciona a los inyectores tangencialmente alrededor del rotor.
- Cámara de descarga o lugar donde cae el agua hacia el desfogue.
- Alabes o cucharones, es similar a dos cucharones unidos con una arista más afilada, es simétrica para que incida el chorro de agua y produzca el mejor torque.
- Carcasa, envoltura metálica que cubre todas las partes que evita que el agua salpique a otras áreas.

Figura 6. **Turbina Pelton de cuatro inyectores de eje vertical**



Fuente: Global hydro energy GmbH. *Manual de operación de la turbina Global Hidro*. p. 49.

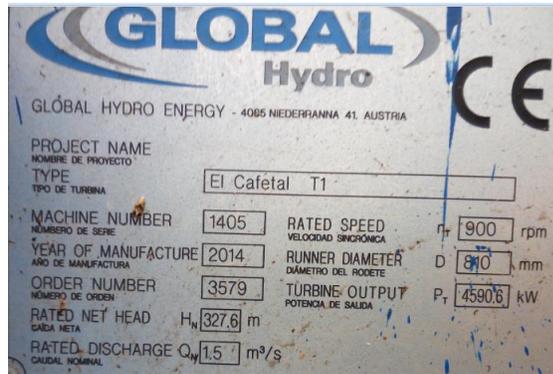
3.1.2. Hoja de datos

Tabla I. **Características de las turbinas**

Altura H_{η}	327,6 m
Potencia nominal P_T	4590,6 kW
Revoluciones por minuto N_T	900 min^{-1}
Diámetro interior DN	700 mm
Caudal Q_{η}	1,5 m^3/s
Diámetro exterior	810 mm
Presión nominal P_c	40 bar

Fuente: elaboración propia.

Figura 7. **Placa del equipo**

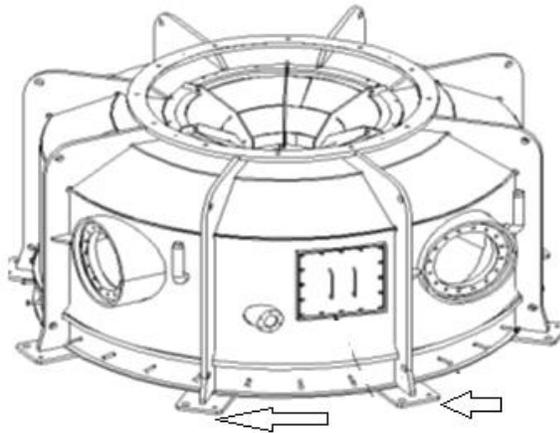


Fuente: elaboración propia.

3.1.3. **Puntos de anclaje**

La turbina posee 16 puntos de fijación o anclaje en cada aleta de la carcasa como se muestra en la figura 8 señalados por flechas en la parte inferior.

Figura 8. **Carcasa de turbina**



Fuente: Global hydro energy GmbH. *Manual de operación de turbina Pelton Global Hidro*. p. 23.

Debido a que posee cuatro inyectores y tiene eje vertical, la tubería que suministra agua a los inyectores en su interior almacena grandes presiones alrededor de 30 a 40 bares. Para esto se necesita que la tubería esté soldada bajo estándares internacionales para evitar daños.

3.1.4. Ejecución

Se instaló la tubería de distribución de agua alrededor de la turbina; se soldó las partes de la tubería y se ajustó la carcasa por medio de tornillos y uniones.

Luego de inspeccionar las soldaduras con rayos X, que cumplían los estándares de calidad de soldaduras en todas las uniones del distribuidor de agua, se procedió a trasladarlo y montarlo en su punto final con eslingas que lo sujetaron al puente grúa.

Figura 9. Turbina Pelton



Fuente: elaboración propia.

Posterior al traslado y colocación en su respectivo lugar, se niveló el eje con respecto a la vertical con tornillos ajustables con el suelo para, posteriormente asegurarlo con mezclas de concreto armado, como se ve en la figura 10.

Se refuerza, debido a que en el interior de la tubería de distribución de agua se acumulan grandes presiones (alrededor de los 30 bares) para evitar algún movimiento innecesario de la turbina.

Según recomendaciones del fabricante, durante la fundición del concreto, es necesario que la tubería esté a las presiones nominales más el 30 % de seguridad, en este caso esta presión nominal es de 30 bares; el 30 % 9 bares haciendo un total de 39 bares la cual debe permanecer durante toda la etapa de fraguado del concreto hasta que obtenga su máxima resistencia.

Figura 10. **Fundición de turbina**



Fuente: elaboración propia.

3.1.5. Generadores

La central consta de dos generadores síncronos de eje vertical, fabricados por la empresa *Marelli Generators*, encargados de transformar la energía mecánica generada por las turbinas a energía eléctrica. Con un voltaje de salida de 4 160 V y una potencia que puede variar desde los 0,5 MW a 4,2 MW según sea requerido. Con un mínimo de 0,8 de factor de potencia en adelanto o atraso.

3.1.6. Hoja técnica

En la tabla II se describen las características de los generadores síncronos de *Marelli Generators* utilizados en el proyecto.

Tabla II. **Generador síncrono**

Características	
Potencia máxima	4 860 kVA
Voltaje	4 160 V
Frecuencia	60Hz
Factor de potencia	0,8 en atraso
Altura máxima	1 000 msnm
Número de polos	8 polos
Velocidad nominal	900 rpm
Voltaje de excitación	40 voltios
Corriente de excitación	5,6 amperios

Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Placa característica del generador**

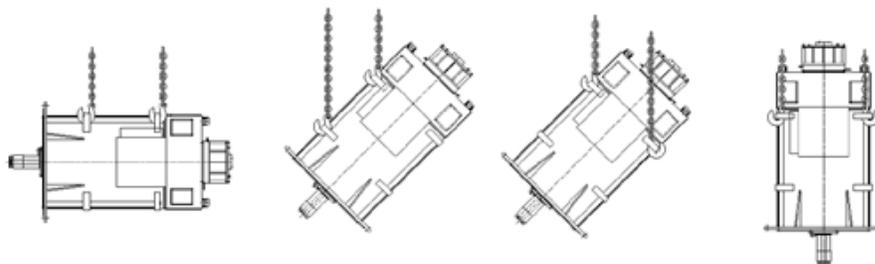


Fuente: elaboración propia.

3.1.7. Ejecución y fijación

Cada generador se transportó de forma horizontal desde la fábrica hasta la planta. En la planta, se cambió a posición vertical para colocarlo en la turbina como se muestra en la figura 12.

Figura 12. **Posiciones del generador**



Fuente: Global hydro energy GmbH. *Manual de transporte de generadores*. p. 12.

- Para realizar estos movimientos se necesita:
 - Un puente grúa de 25 toneladas
 - Cadenas o eslingas que soporten dicho peso
 - 4 polipastos de 25 toneladas
 - Argollas para 25 toneladas
 - Madera

Se colocan los anillos, cadenas y polipastos en la parte alta y baja del generador en su estado horizontal sujetado al puente grúa y se procede con las siguientes maniobras:

- Primer paso: es izado el generador por medio de la grúa puente, a una altura de un metro sobre el nivel del suelo.
- Segundo paso: se reducen las cadenas de uno de los polipastos tratando que la parte inferior o donde están los álabes quede como se ve en la figura 12 a 60 grados con respecto a la vertical.
- Tercer paso: se procede a descender el generador para organizar los polipastos y luego se sube el generador. Se reducen las cadenas de los polipastos, la parte superior, así la parte inferior baja al suelo; se procede, entonces a subir más el generador y así sucesivamente hasta lograr los 30 grados necesarios.
- Cuarto paso: al llegar a los 30 grados con la vertical es necesario bajar el generador para cambiar la posición de tres de los cuatro polipastos, dejando descansar la parte inferior sobre trozos de madera como se ve en la figura 13.

Figura 13. **Movimientos del generador**



Fuente: elaboración propia.

- Quinto paso: nuevamente se iza el generador a 0,5 metros del suelo y por medio de los polipastos se lleva de 30 grados a 15 grados con respecto a la vertical.
- Sexto paso: en esta posición se traslada el generador a donde se encuentra la turbina, se procede a bajar el generador, poco a poco, para no dañar la carcasa de la turbina ni los alabes del rotor.

Figura 14. **Montaje del generador**



Fuente: elaboración propia.

- Séptimo paso: tras introducir el eje con los álabes sin dañarlos en la turbina, se hace una pequeña tarima de madera alrededor de la boca de la turbina, para no introducir el rodete al 100 %, se debe girar sobre su eje.
- Octavo paso: se gira el generador sobre la vertical evitando daños en los componentes y que estos queden en su lugar, como mangueras, sistemas de enfriamiento, bornes de salida, entre otros.
- Noveno paso: se baja de nuevo el generador hasta quedar bien alineado sobre el eje de la vertical y sobre la turbina. Se asegura con sus respectivos tornillos, ambas carcasas.

- Décimo paso: en la parte de abajo se inspecciona que todo esté alineado, los alabes, los inyectores y deflector, como se ver en la figura 15.

Figura 15. **Alineación de alavés e inyectores**



Fuente: elaboración propia.

Siguiendo los pasos para la instalación del generador número uno, se procedió de igual forma para el generador número dos.

Figura 16. **Vista de los dos generadores**



Fuente: elaboración propia.

3.1.8. Sistema hidráulico

Para el manejo y control adecuado de los equipos, del generador y la turbina, inyectores y deflector, es necesario utilizar sistemas o bloques de equipos de control; la dinámica de fluidos es una gran herramienta que ayuda a resolver gran parte de los eventos siguientes.

- En las turbinas es necesario mover el deflector y la regulación del flujo del agua en los inyectores.
- Válvula de mariposa, apertura y cierre de la misma.

Figura 17. Sistema de control de la turbina



Fuente: elaboración propia.

- La central está conformado por:
 - Un motor de corriente directa y uno de corriente alterna
 - Electroválvulas
 - Depósito de aceite
 - Tubería

La función de los motores es mantener la presión en la tubería al momento de realizar algún movimiento. Para este caso en particular la presión que debe permanecer en la tubería es de un bar.

Las electroválvulas permiten el paso de los flujos de aceite en las tuberías para gobernar al deflector e inyectores.

3.1.9. Sistema de enfriamiento

Debido a la velocidad de rodamiento, de 900 revoluciones por minuto. El rotor y su sistema de cojinetes que sirven para la estabilidad tiende a calentarse debido a las fricciones de los cojinetes con la carcasa. Los cojinetes y el rotor deben permanecer a temperaturas normales.

Este sistema funciona de la siguiente manera: cada cojinete está sumergido en aceite refrigerante, dentro del recipiente se encuentra sumergida una tubería en forma de serpentín, conectado a una tubería al exterior.

Figura 18. **Sistema de enfriamiento**



Fuente: elaboración propia.

Por medio de la tubería mostrada en la figura 18, de color gris con mangueras rojas, se hace circular agua fría que a su vez llega hasta la tubería en forma de serpentín sumergido en el aceite, al pasar el agua por el serpentín enfría el aceite que enfriará los cojinetes, permitiendo la estabilidad de la temperatura.

3.1.10. Válvula de mariposa

Equipo mecánico que permite bloquear el paso del flujo del agua antes que llegue a la turbina, por medio de una placa metálica llamada mariposa. Este equipo debe regular la apertura como su cierre para que no sea muy rápido, para evitar un golpe de ariete en la tubería ni muy despacio al momento de una falla.

Figura 19. **Válvula mariposa**



Fuente: elaboración propia.

La válvula de mariposa está compuesta por un pistón hidráulico de color rojo como se muestra en la figura 19. En la parte superior de la válvula mariposa se encuentra el *by-pass* formado por una tubería de tres pulgadas de diámetro y dos llaves de paso de agua. La primera es de actuación manual y la segunda posee un motor eléctrico para maniobras de forma remota.

- **Funcionalidad**

La función principal de la válvula de mariposa es controlar el flujo de agua que llega a la turbina para evitar golpes de ariete en la tubería de alta presión. Su función es de la siguiente manera:

Al momento que se necesita que trabaje, es necesario verificar que todos los inyectores estén cerrados al 100 %. Se abre el *by-pass* de la válvula que hará que se llene la tubería de todo el distribuidor de agua de las turbinas e igualará las presiones de antes y después de la válvula para lograr que tenga las mismas presiones, se cierra el *by-pass*. La válvula mariposa empieza a abrirse, el tiempo para que se abra por completo es de un minuto y diez segundos, al momento de un paro se cierran primero los inyectores al 100 %; luego, se cierra la válvula, en un tiempo de 60 segundos.

Figura 20. **Casa de máquinas**



Fuente: elaboración propia.

3.1.11. **Switchgear**

Equipo donde se realizan maniobras por medio de interruptores en voltaje de 4 160 voltios. Para este proyecto se usan cuatro de estos equipos, el objetivo es formar una barra de 4 160 voltios. De esta barra se toman

referencias de voltajes, corrientes, frecuencias para sincronizar los equipos a la red de sistema nacional interconectado SIN.

- El primer bloque pertenece al generador núm. 1.
- El segundo bloque pertenece al generador núm. 2.
- El tercer bloque pertenece al transformador de potencia.
- El cuarto bloque es de los servicios auxiliares que sirven para alimentar la planta.

Figura 21. **Switchgear**



Fuente: elaboración propia.

Cada bloque cuenta con características distintas como se verá a continuación en la figura 22.

3.1.12. Hoja de datos

Figura 22. Placa del *switchgear*

SGC DW-2	SGC DW-2	SGC DW-2	SGC DW-2
Range / Type: DW-2			
Serialnumber: 65147 Year of construction: 2015	Serialnumber: 65146 Year of construction: 2015	Serialnumber: 65148 Year of construction: 2015	Serialnumber: 65143 Year of construction: 2015
Earthing switch: JN15-12/31.5-210	Earthing switch: JN15-12/31.5-210	Earthing switch: JN15-12/31.5-150	Earthing switch: JN15-12/31.5-210
U ₁ (U ₂): 12 (75) kV U ₂ : 28 kV	U ₁ (U ₂): 12 (75) kV U ₂ : 28 kV	U ₁ (U ₂): 12 (75) kV U ₂ : 28 kV	U ₁ (U ₂): 12 (75) kV U ₂ : 28 kV
I ₁ : 1250 A f: 60 Hz t ₁ : 1 s	I ₁ : 1250 A f: 60 Hz t ₁ : 1 s	I ₁ : 630 A f: 60 Hz t ₁ : 1 s	I ₁ : 1600 A f: 60 Hz t ₁ : 1 s
I ₂ : 25 kA I ₂ : 63 kA U ₂ : 48 VDC	I ₂ : 25 kA I ₂ : 63 kA U ₂ : 48 VDC	I ₂ : 25 kA I ₂ : 63 kA U ₂ : 48 VDC	I ₂ : 25 kA I ₂ : 63 kA U ₂ : 48 VDC
VDS range: 5-11 kV-HR			
Service continuity: LSC2B	Service continuity: LSC2B	Service continuity: LSC2B	Service continuity: LSC2B
Partition class: PM	Partition class: PM	Partition class: PM	Partition class: PM
IAC: AFLR-31.5MA-1s	IAC: AFLR-31.5MA-1s	IAC: AFLR-31.5MA-1s	IAC: AFLR-31.5MA-1s
IEC: 62271-200 / 62271-1 / 62271-100 62271-102 / 61243-5	IEC: 62271-200 / 62271-1 / 62271-100 62271-102 / 61243-5	IEC: 62271-200 / 62271-1 / 62271-100 62271-102 / 61243-5	IEC: 62271-200 / 62271-1 / 62271-100 62271-102 / 61243-5
GEN1 SG1	GEN2 SG2	AUXILIAR	TRAFO

Fuente: elaboración propia.

Los interruptores tanto del generador número uno como el generador número dos, GEN1 SG1 y GEN2 SG2 poseen las mismas características con una capacidad de interrupción de 1 250 amperios.

El interruptor para los servicios auxiliares tiene una capacidad de interrupción de 630 amperios.

El interruptor de salida al transformador de potencia tiene una capacidad de interrupción de 1 600 amperios.

Los equipos antes mencionados son para trabajar a una frecuencia de 60Hz y a voltajes de 4 160 voltios.

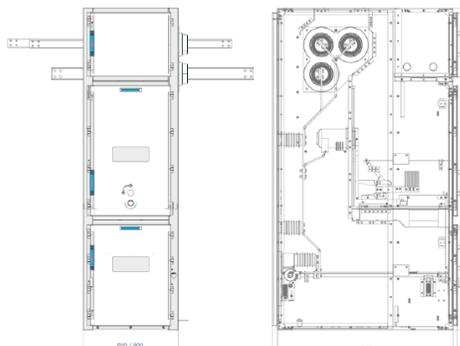
3.1.13. Elementos

- Cada bloque cuenta con:
 - Interruptor
 - Transformadores de corriente
 - Transformadores de potencial
 - Pararrayos
 - Seccionadores de puesta a tierra
 - Mímico o panel para abrir o cerrar el interruptor de forma manual
 - Pantalla de posicionamiento abierto/cerrado

3.1.14. Instalación

Estos paneles están contruidos en bloques cuadrados para lo cual no es necesario armarlos, solo con el hecho de unir las cuatro piezas queda armado por completo, como se muestra en la figura 23; luego, se introducen los cables de potencia, cables de control y aterriza la carcasa.

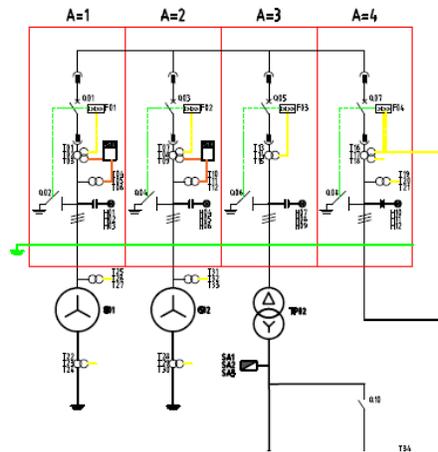
Figura 23. **Ensamble de *SwitchGear***



Fuente: elaboración propia.

3.1.15. Diagrama unifilar

Figura 24. Diagrama unifilar barra 4 160 voltios



Fuente: elaboración propia.

Los bloques están definidos como A=1 y A=2 para los generadores uno y dos, respectivamente, A=3 para los servicios auxiliares, A=4 salida hacia el transformador de potencia o entrada a la subestación de elevación de voltaje.

3.1.16. Panel de protección, control y medición

Se entiende por el sistema de protección control y medición de un generador al conjunto de instalaciones eléctricas de baja tensión, interconectadas entre sí, que son necesarias para efectuar maniobras en forma manual o automática.

Figura 25. **Panel de control de generadores**



Fuente: elaboración propia.

A cada panel llegan todas las señales provenientes de los demás equipos tales como:

- La posición abierto/cerrado, automático/ manual del *by-pass* de la válvula de mariposa.
- Válvula de mariposa abierto/ cerrado, automático/manual.
- Presión en la tubería de alta presión antes y después de la válvula mariposa.

- Posición del deflector.
- Posición de los inyectores, abierto/cerrado.
- Presión del sistema de enfriamiento.
- Velocidad de giro del rotor.
- Campo magnético del gobernador.
- Temperatura del generador.
- Voltaje.
- Corriente de excitación.
- Corriente de generación.
- Factor de potencia.
- Vibraciones.
- Voltaje y corriente de red.

Todas las señales son importantes para saber el estado del generador para operarlo a distancia a través del sistema SCADA.

3.1.17. Protección de generadores síncronos

Debido a que el generador es uno de los equipos importantes, es necesario protegerlo contra sobrecorrientes, sobrevoltajes de baja y alta frecuencia, vibraciones o alguna falla eléctrica.

3.1.17.1. Relevador basler B1-11g

Relevador de protección de generadores con las siguientes características de protección:

- Protección de bajo voltaje
- Protección de distancia
- Sobreexcitación
- Sincronoscopio
- Direccional de potencia
- Protección de campo del gobernador
- Inversión de fases
- Secuencia de fases
- Protección térmica
- Alta y baja frecuencia
- Sobrecorriente
- Protección de alto voltaje
- Protección de tierra
- Direccional de corriente
- Medición de medio ángulo de desfase
- Protección de sobre velocidad
- Enclavamiento

- Protección diferencial

Por medio de este relevador se protege al generador y se garantiza la continuidad del servicio.

3.1.17.2. Protección contra sobretensiones

Una de las protecciones importantes para los generadores es la de sobretensiones; debido a la pérdida de carga o desperfectos en el regulador de tensión se producen sobre tensiones.

Toda sobretensión es asociada con una sobrevelocidad la cual será controlada por un regulador automático de tensión. No obstante, en la central el flujo de agua no puede ser interrumpido o deflactado tan rápidamente debido a los problemas de un golpe de ariete en la tubería de alta presión y puede originar sobretensiones.

3.1.17.3. Protección de pérdida de sincronismo

Por varias razones ocurren fallas y disturbios que pueden causar una condición de pérdida de sincronismo entre dos partes de un sistema de potencia o entre dos sistemas interconectados; si tales eventos ocurren, los generadores síncronos deben ser disparados tan pronto sea posible para prevenir daños al generador.

La pérdida de sincronismo causa altas corrientes y esfuerzos en los devanados del generador como altos niveles de pares de transitorios en los puntos más altos. Si la frecuencia de deslizamiento de la unidad con respecto al

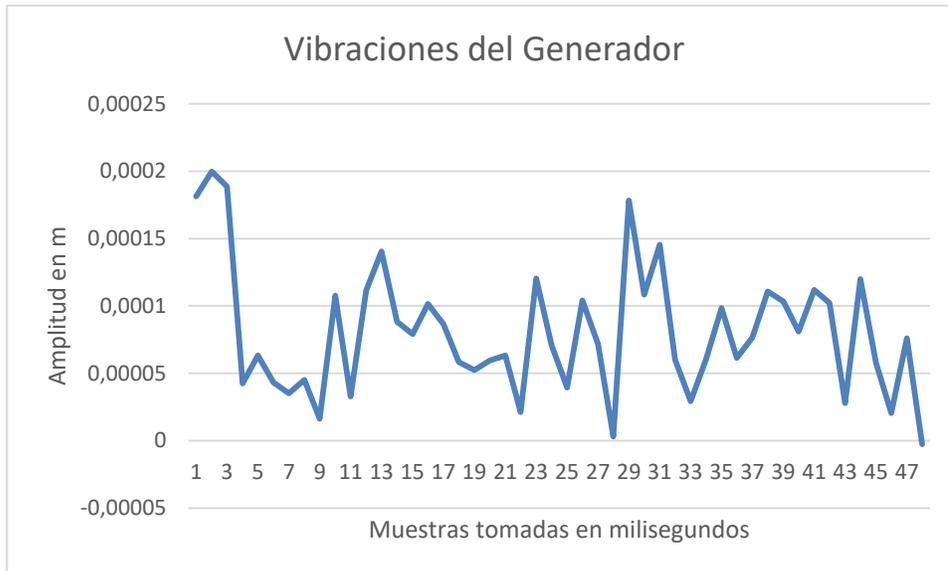
sistema de potencia se aproxima a una frecuencia torsional natural, los pares pueden ser lo suficiente grandes para romper la flecha.

Por esta razón, se debe disparar la unidad, puesto que los niveles de par de flechas se forman con cada ciclo subsecuente de deslizamiento. Esta formación es el resultado del continuo incremento de la frecuencia de deslizamiento, la cual pasa por la primera frecuencia torsional natural del sistema de flecha.

3.1.17.4. Vibración

Los problemas ocurridos cuando se trabaja a frecuencias anormales o distintas a las de 60 Hertz, pueden ocasionar reducción de la capacidad del generador; la turbina en los generadores puede entrar en resonancia mecánica en varias etapas de los alabes de la turbina que ocasionan vibraciones no deseables y no tolerables por los generadores, los cuales se deterioran.

Figura 26. **Vibración de generadores**



Fuente: elaboración propia.

Es muy importante llevar un registro de las vibraciones de los generadores, para evitar daños y revisarlos continuamente. En la figura 25 se muestran las vibraciones ocurridas en un lapso de 10 milisegundos y su máxima amplitud en metros, su máxima amplitud es de 0,2 milímetros.

Figura 27. **Medidor de vibraciones**



Fuente: elaboración propia.

3.1.17.5. **Temperatura**

Las principales causas del sobrecalentamiento del estator de los generadores son:

- Desperfecto en el sistema de enfriamiento
- Sobrecarga
- Vibraciones fuera de lo normal
- Cortocircuito de varias láminas del núcleo del estator

Para protección contra sobrecalentamiento, se usan detectores de temperatura embebidos en varios puntos del enrollamiento que transmiten periódicamente la temperatura. Al sobrepasar los límites deseados le enviará una notificación a la pantalla del operador, en caso que no hubiese respuesta, mandará una señal de apertura al interruptor general del generador síncrono.

La temperatura se toma en cada una de las fases, cojinetes superiores e inferiores, aceite refrigerante como se ve en la figura 28.

Figura 28. **Temperatura del generador**



Fuente: elaboración propia.

4. SUBESTACIÓN

Para que la energía eléctrica sea transportada desde el punto de generación hasta el punto de consumo es necesario que pase por varias subestaciones que regulan el nivel de voltaje. Para este estudio se analiza una subestación de elevación de tensión 4 160 voltios a 69 000 voltios.

4.1.1. Subestación elevadora

Para transportar la energía eléctrica producida por los generadores, es necesario cambiar el nivel de voltaje para transportarlo e inyectarlo al sistema nacional interconectado, SNI. Los voltajes que trabaja el sistema nacional interconectados, SNI son: 69 kV, 138 kV, 230 kV, y 400 kV. Como se vio en el apartado núm. 3.2, los generadores tienen una salida de 4 160 voltios en su borneras; posteriormente, pasan a sistema de protección de los generadores conocidos como *Switch Gear*. Este nivel de voltaje es necesario cambiarlo para su transporte y normalización, para ello se necesita una subestación de elevación de tensión, la cual cambia el voltaje de 4 160 voltios a 69 000 voltios.

La subestación tiene una configuración de barra simple donde se conectan los siguientes equipos:

- Transformador de potencia
- Interruptor general
- CT'S
- Pararrayos
- Seccionadores de puesta a tierra

4.1.2. Nivel de voltaje

Los voltajes principales de la subestación son los 4 160 voltios provenientes de los generadores y transformados a un voltaje de salida de 69 000 voltios, voltaje establecido por el sistema nacional interconectado, SIN, como se puede observar en la figura 29.

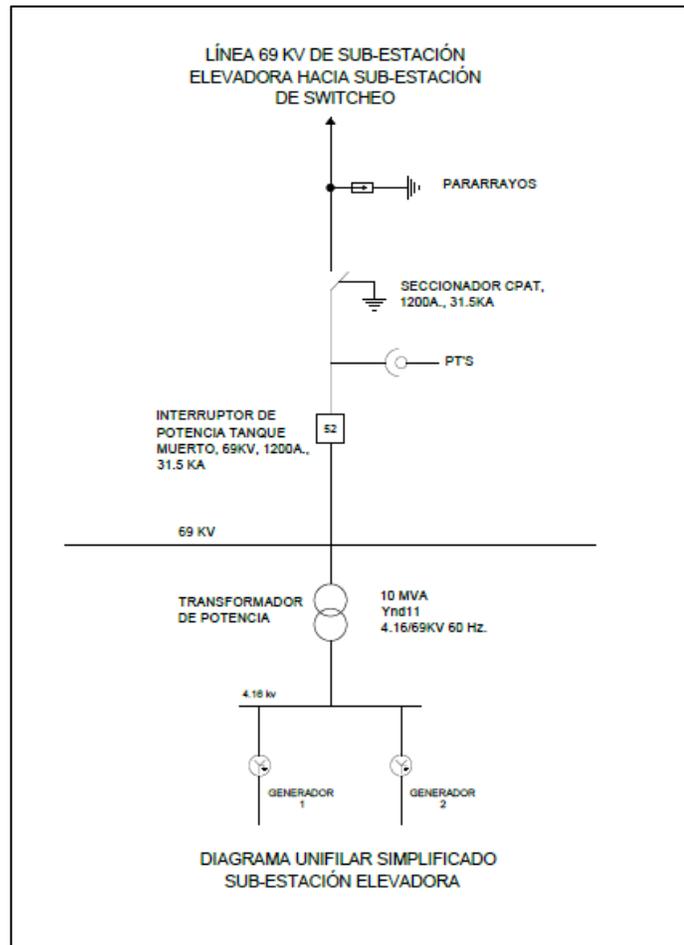
El voltaje de servicios auxiliares es de 120/208/240 voltios de corriente alterna, usados en alumbrado, mandos etc.

Para los mandos de interruptores y seccionadores se necesitan 125 voltios de corriente directa, los cuales son suministrados por un banco de baterías.

4.1.3. Diagrama unifilar

En la figura 29, se muestra el diagrama unifilar de la subestación elevadora. En la parte inferior se encuentran los generadores con un voltaje de salida de 4 160 voltios y una barra del mismo voltaje, luego están conectados el transformador de potencia, interruptor general, Ct's, seccionadores de puesta a tierra y pararrayos.

Figura 29. Diagrama unifilar



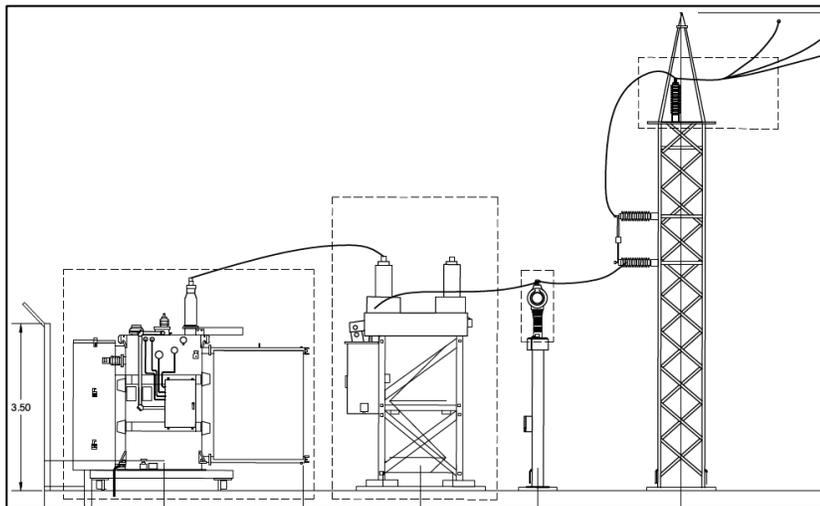
Fuente: elaboración propia.

Los siguientes elementos conforman la subestación elevadora:

- El transformador de potencia de 10/14 MVA, su principal trabajo es la transformación del nivel de voltaje de entrada 4 160 voltios a 69 000 voltios de salida.
- Un interruptor de potencia de 69 kV.

- Transformadores de medida como transformadores de corriente y transformadores de potencial.
- Seccionadores con puestas a tierra.
- Apartarrayos.

Figura 30. Perfil de subestación elevadora



Fuente: elaboración propia.

4.1.4. Diseño de subestación

Coordinación de aislamiento se le denomina al ordenamiento de los niveles de aislamiento de diferentes equipos, de tal manera que al presentarse una onda de sobrevoltaje se descargue a través de los elementos adecuados.

Para el diseño de una subestación es necesario conocer varios datos de campo y técnicos para cumplir con las normas mínimas de seguridad.

- Ubicación
- Altura sobre el nivel del mar
- Resistividad de terreno
- Dimensiones del terreno utilizable
- Estado del terreno
- Niveles de voltaje
- Potencia máxima

La subestación de elevación tiene definido ciertos parámetros que a continuación se mencionan.

Un terreno plano con 8 metros de ancho y 24 metros de largo, a una altura de 400 metros sobre el nivel del mar, en un terreno estable.

Los niveles de voltaje son de 4 160 voltios de entrada y 69 000 voltios de salida, con una potencia máxima de 14 megavatios.

Una vez determinado el nivel de voltaje nominal de operación, se fijan los niveles de aislamiento de forma indirecta. Las normas correspondientes y los niveles de sobretensiones existentes en el sistema se conocen con el nombre de nivel básico de impulso (NBI) y sus unidades son kilovoltios (kV). Las sobretensiones que existen son de dos tipos:

- Sobretensiones externas: causadas por descargas electroatmosférico (rayos).
- Sobretensiones internas: causadas por maniobras en interruptores.

El libro *Diseño de subestaciones eléctricas* de José Raúl Martínez se refiere a la coordinación de aislamiento como la “correlación entre los esfuerzos dieléctricos aplicados y los esfuerzos dieléctricos resistentes”³.

4.1.5. Distancia de fase a tierra

Una subestación debe tener un buen cálculo de la coordinación de aislamiento y definir las distancias mínimas entre elementos como partes vivas y tierras. Para ello se necesitan saber las tensiones máximas según la tabla III.

Tabla III. **Coordinación de aislamiento**

Tensión máxima para el equipo kV	Nivel básico al impulso	
	Aislamiento pleno kV cresta	Aislamiento reducido kV de cresta
69	450	380
123	550	450
170	750	550
230	1 050	900

Fuente: RUIZ ROJAS, Diana Carolina. *Coordinación de aislamiento*. p. 9.

Se establece la tensión crítica de flameo como lo indica el libro *Diseño de subestaciones eléctricas* de José Martínez como “tensión crítica de flameo a la tensión obtenida de forma experimental”⁴.

La tensión crítica de flameo se presenta a una probabilidad de flameo de 50 %. Haciendo una relación entre la tensión crítica de flameo (TCF) y el nivel

³ MARTÍNEZ, José Raúl. *Diseño de subestaciones eléctricas*. p. 45.

⁴ *Ibíd.*

básico al impulso (NBI) se reduce a una probabilidad de 10 %, en la cual se expresa de la forma siguiente en la ecuación 6.

$$TCF = NBI/(1,0 - 1,3\delta) \quad (\text{Ec. 6})$$

Para alturas menores a los 1 000 metros sobre el nivel del mar, donde:

- δ es la desviación permitida respecto a la tensión crítica de flameo.
- δ 3 % para voltajes menores a 300 kV en los que predomina la descarga electro atmosférico (rayo).
- δ 6 % para voltajes mayores de 300 kV en las que predomina el impulso por maniobra (interruptores).

Para descargas atmosféricas menores 300 kV la tensión crítica de flameo queda de la siguiente forma.

Sustituyendo el valor de 0,03 que es el valor de δ .

$$TCF = NBI/(1,0 - 1,3 * 0,03)$$

$$TCF = NBI/(0,961)$$

En este caso se usa el valor del nivel básico al impulso de 450 kV de la tabla III.

$$TCF = 450/(0,961)$$

$$TCF = 468,26$$

Para alturas de hasta 1 000 metros sobre el nivel del mar, tenemos una nueva tensión crítica de flameo según nuestra fuente, llamada TCFd = tensión crítica de flameo de diseño como se presenta en la ecuación 7.

$$\text{TCFd} = \text{TCFnormal} * K/\delta \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde:

- TCF normal es el valor de tensión crítica de flameo, en condiciones normales cuando la presión y la humedad, son $K=1$ y $\delta =1$.
 - K = factor de humedad atmosférica.
 - δ = factor de densidad de aire de acuerdo a la altura y temperatura.

Para este caso $k=1$ y $\delta =0,86$ para alturas hasta 100 metros sobre el nivel del mar.

$$\text{TCFd} = \text{TCFnormal} * K/\delta \quad (\text{Ec. 8})$$

$$\text{TCFd} = 468,26 * 1/0,893$$

$$\text{TCFd} = 524,36 \text{ kV}$$

La relación entre la tensión crítica de flameo y la distancia dieléctrica se da en la ecuación 9.

$$\text{TCFdiseño} = k * d \quad (\text{Ec. 9})$$

Siendo:

- $k =$ gradiente de tensión, equivalente a 550 kV/m

Al despejar d en la ecuación 9 queda de la siguiente forma:

$$d = TCF_{\text{diseño}}/k$$

Al sustituir los valores de TCF_d y $K=550$ queda:

$$d = NBI * K / (k * \delta), 961$$

$$d = NBI * K / (550 * \delta * 0,961)$$

$$d = 450 * 1 / (550 * 0,893 * 0,961)$$

$$d = 450 / (472)$$

$$d = 0,9533$$

La distancia $d = 0,9533$ metros, es la distancia de fase a tierra.

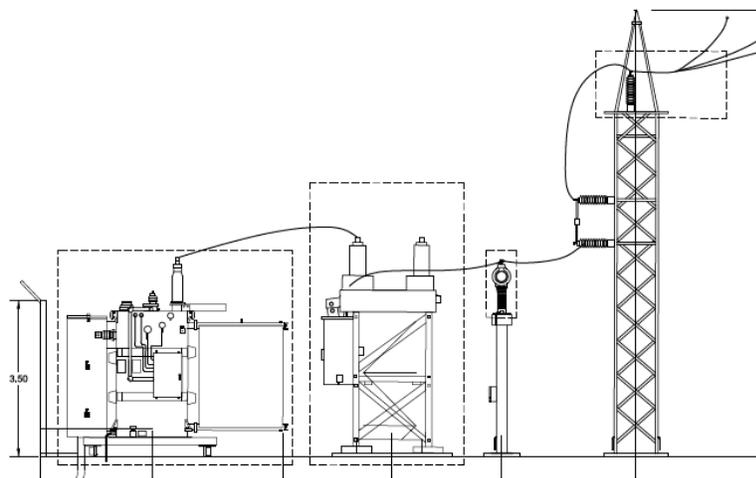
Distancia de fase a tierra $D_{ft} = 0,9533$ metros, significa que todo elemento necesita un mínimo de 0,95 metros desde la parte viva a cualquier punto de tierra.

4.1.6. Altura del primer y segundo nivel de barras

La altura del primer nivel de barras es la altura mínima de las partes vivas y los niveles de seguridad de la subestación, para el paso de personal al realizar alguna inspección o mantenimiento. Los equipos ubicados en el primer nivel son:

- Transformador de potencia 10/14 MVA
- Interruptor de potencia 69 kV
- Transformador de potencial (PT'S)
- Seccionadores de tierra

Figura 31. **Perfil de subestación**



Fuente: elaboración propia.

Para determinar las alturas, se parte de las siguientes dos premisas.

- La altura mínima de las partes vivas sobre el nivel del suelo, en ningún caso debe ser inferior a tres metros.
- La altura mínima de la base de los aisladores que soportan partes vivas no debe ser menor a 2,30 metros, altura de una persona promedio con el brazo levantado.

En general, para cualquier equipo, la altura mínima de sus partes vivas se calcula con la siguiente expresión.

$$h = 2,30 + 0,0105 * kV \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde:

- kV, es el valor de la tensión máxima del equipo
- 2,30 metros, altura promedio de una persona con los brazos levantados

Sustituyendo valores en la ecuación 10.

$$h = 2,30 + 0,0105 * 123$$

$$h = 2,30 + 1,29$$

$$h = 3,6 \text{ m}$$

- Altura del primer nivel de 3,6 metros sobre el nivel del suelo

Para el segundo nivel es necesario considerar la posibilidad de que una persona pase por debajo de las barras sin que esta reciba la sensación del campo eléctrico.

4.1.7. Equipos del segundo nivel

En este nivel, el único equipo instalado son los pararrayos. Se determina por la siguiente ecuación.

$$H = 5,00 + 0,0125kV \quad (\text{Ec. 11})$$

Donde:

- kV, tensión máxima de diseño
- H, altura de segundo nivel
- 5 metros, altura mínima para el paso vehicular

Sustituyendo valores en la ecuación 11 se tiene.

$$H = 5,00 + 0,0125 * 123$$

$$H = 5,00 + 1,533$$

$$H = 6,53 \text{ m}$$

Altura mínima del segundo nivel es de 6,53 metros.

Resumen:

- Primer nivel 3,6 metros
- Segundo nivel 6,53 metros

4.1.8. Blindaje

Es un circuito de potencial cero o referencia a tierra que actúa como blindaje para proteger los equipos o partes vivas de la subestación contra descargas atmosféricas (rayos) directas. En este proyecto se usan cables de guarda con bayonetas de cobre que actúan como contraparte del sistema de tierra. La ecuación 12 determina la altura donde irán instalados los cables de guarda y las bayonetas.

$$\gamma = \frac{(2h + 1\sqrt{3})}{3} + \frac{\sqrt{((h^2 + 4) * h * \sqrt{3})}}{3} \quad (\text{Ec. 12})$$

Siendo:

- γ , altura del blindaje
- h , altura de la parte viva más alejada
- l , distancia del último equipo

Para el caso exclusivo de esta subestación, h es la altura de los *bushing* del transformador de potencia, que se encuentra a 4 metros del nivel de suelo. l es la distancia del centro del transformador a centro de la estructura, siendo un total de 10 metros.

Sustituyendo valores en la ecuación 12.

$$\gamma = \frac{(2 * 5 + 10 * \sqrt{3})}{3} + \frac{\sqrt{((5^2 + 4 * 10 * 5 * \sqrt{3}))}}{3}$$
$$\gamma = 9,1 + 6,42$$
$$\gamma = 15,52 \text{ m}$$

La altura necesaria para que la subestación se encuentre protegida es de 15,52 metros según se muestra en los cálculos.

4.1.9. Distancias de seguridad

Estos son los espacios libres entre equipos que permiten la circulación del equipo de mantenimiento, personas y vehículos sin poner en riesgo sus vidas.

4.1.9.1. Personal

Es la distancia mínima a la que una persona puede estar de la parte viva de la subestación sin sufrir riesgo alguno.

La distancia horizontal dada por la ecuación 13 donde:

$$D_h = D_{ft} + 0,9 \quad (\text{Ec. 13})$$

- D_h , distancia horizontal a los equipos
- D_{ft} , distancia de fase a tierra calculado en el apartado 4.2.1 este 0,95 m
- 0,90, es el tamaño promedio de un brazo extendido

Sustituyendo valores en 14

$$D_h = 0,952 + 0,9$$
$$D_h = 1,852 \text{ m}$$

La distancia de seguridad horizontal hacia alguna parte viva es de 1,852 metros.

Distancia vertical

Esta dada por la ecuación 14:

$$D_v = D_{ft} + 2,30 \quad (\text{Ec. 14})$$

- D_v , distancia vertical
- D_{ft} , distancia de fase a tierra
- 2,30 metros, es la altura de un apersona con los brazos extendidos

Sustituyendo valores en ecuación 14.

$$D_v = 0,952 + 2,30$$

$$D_v = 3,252 \text{ m}$$

La distancia vertical para una persona de mantenimiento es de 3,252 metros sobre el nivel de suelo.

4.1.9.2. Vehículo

La distancia mínima de maquinaria pesada como grúas o camiones que pueden realizar todos los trabajos de mantenimiento se considera con los desplazamientos de camiones con pluma entre quipos.

En este caso particular, los camiones o este tipo de maquinaria solo poseen ingreso por uno de los costados como se ve en la figura 32.

$$D_{hv} = (D_{ft} + 0,7) * 2 + \text{ancho máximo de vehículo con pluma} \quad (\text{Ec. 15})$$

Donde:

- D_{hv} , distancia horizontal de vehículos
- D_{ft} , la distancia de fase a tierra

Sustituyendo valores en ecuación 15.

$$D_{hv} = (0,952 + 0,7) * 2 + 5$$

$$D_{hv} = 8,3 \text{ m}$$

La distancia para el uso de camiones con pluma debe ser 8,3 metros para seguridad de la misma.

4.1.10. Transformador de potencia 4,160/69 kV

El transformador es de marca TrafoEletto, construido en Italia con número de serie A 6932, su función principal es cambiar los niveles de voltaje, de 4 160 voltios a 69 000 voltios, con una potencia de 10/14 MVA.

Posee un sistema de enfriamiento clase ONAN-ONAF, lo cual significa que los bobinados se encuentran sumergidos en aceite mineral que puede ser enfriado de dos formas: por aire natural o por medio de ventiladores como aire forzado, instalados sobre los radiadores ubicados en las partes laterales del transformador como se ve en la figura 32.

Posee un tanque conservador como se ve en la figura 32, colocado sobre el tanque principal, cuya función es absorber la expansión del aceite debido a los cambios de temperatura provocados por los cambios de carga.

En caso de un cambio de temperatura, el nivel de aceite se eleva comprimiendo el gas contenido en la parte superior del tanque. La tubería que une los dos tanques debe permitir el flujo adecuado de aceite, entre esta tubería se instala un relevador de gas (Bucholz), el cual sirve para detectar las fallas internas en el transformador, por la formación de gases en el interior del tanque debido al deterioro del aceite. El transformador posee una válvula de sobrepresión ubicado en la parte superior del tanque, esta válvula funciona si en algún momento se excede la presión dentro del tanque, entonces lo libera.

Figura 32. Transformador de potencia



Fuente: elaboración propia.

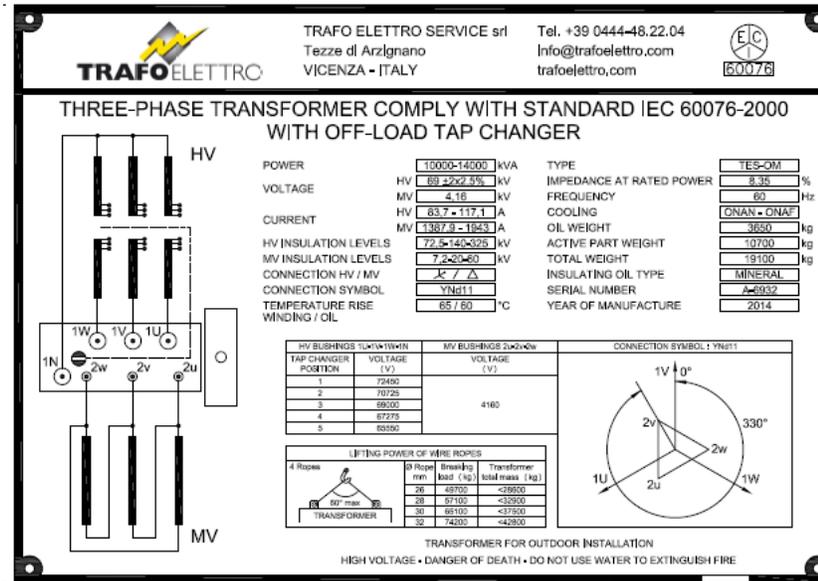
Una de las características del transformador es la regulación de la tensión de salida a través de sus cinco cambiadores de *taps*, sin modificar el voltaje de entrada.

Tabla IV. Hoja de datos

Núm.	Descripción	
1	Voltajes	4 160/6 9000 voltios
2	Potencia	10/14 MVA
3	Corriente del lado de alta	83,7-117,1 amperios
4	Corriente del lado de baja	1387,9-1943 amperios
5	Frecuencia	60 Hz
6	Conexión de alta	Estrella aterrizado
7	Conexión de baja	Delta
8	Tap o reguladores de voltaje (uso sin carga)	72 450, 70 725, 69 000 67 275 y 65 505 voltios
9	Impedancia	8,35 %
10	Año de construcción	2014

Fuente: elaboración propia.

Figura 33. Placa del transformador



Fuente: elaboración propia.

4.1.11. Tipo de conexión

El transformador trae una conexión YND11, lo cual significa que posee una conexión interna, en la entrada del lado de baja tensión conectado en forma de delta y la salida del lado de alto voltaje está conectado en forma de estrella, desfasado 330 grados el segundo con respecto al primero. La conexión del transformador tiene las siguientes características:

- Al aterrizar el neutro del lado de alta, se aíslan las corrientes de tierra de secuencia cero.
- Se eliminan los voltajes de terceros armónicos porque las corrientes magnetizantes de secuencia cero quedan circulando en el lado de delta.

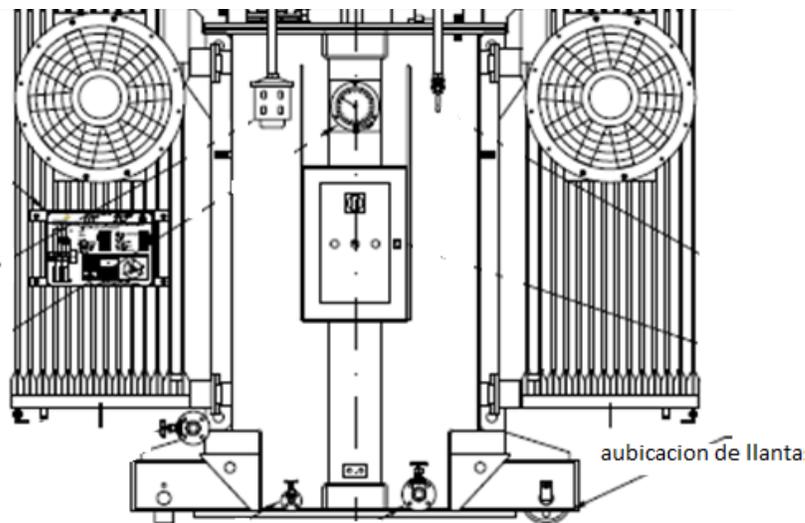
4.1.12. Montaje

El transporte que se encargó del trasiego desde el puerto hasta el proyecto, lo ubico a dos metros de su posición final. Solo se necesitó colocarle las llantas y ponerlo en su carril respectivo. Las llantas son de acero y se colocan en la parte inferior del transformador como se observa en la figura 34.

Luego de ubicarlo en el lugar definitivo, por medio de dos gatos hidráulicos se levanta un extremo a una altura de 5 centímetros; con esta maniobra se pueden quitar dos de las cuatro llantas; luego, se baja para retirar los gatos hidráulicos; en seguida, se realiza la misma maniobra en el otro extremo.

Instalado en el punto final se fijan las platinas por medio de pernos, roldanas y tuercas.

Figura 34. Vista lateral del transformador



Fuente: Global hydro energy GmbH. *Manual de instalación del transformador*. p. 4.

Al terminar se deja el eje a cero grados con respecto a la vertical y con la horizontal.

Para la conexión eléctrica del lado de 69 000 voltios del transformador se utilizan cables ASCR 477 y terminales de compresión de aleación de aluminio en los extremos de los cables; luego, las terminales se sujetan por medio de tornillos a los *bushinig* del transformador

Para la conexión eléctrica del lado de 4 160 voltios se utilizan los cables provenientes de la salida de los generadores, se le colocan terminales en los extremos de los cables y se sujetan a los *bushinig* del transformador.

Para las protecciones se usan cables de control, salientes del transformador hacia los relevadores.

- Interruptor de potencia 69 kV

Este dispositivo eléctrico permite realizar maniobras de cierre y apertura para la continuidad de la subestación, de igual forma es la protección directa del transformador de potencia y los generadores, por fallas provenientes del sistema nacional interconectado, SNI. La configuración y actuación determina la confiabilidad de la subestación y de la planta. El interruptor de potencia es marca Alstom tipo DT1 72.5FK número de serie 143045-010-A, 2013 año de fabricación, tiempo nominal de operación tres ciclos al momento de una falla, está construido con un tanque muerto tripolar. Para la disipación del arco está sumergido en SF6, hexafloruro de azufre como medio de dispersión de chispa.

4.1.13. Hoja de datos

Tabla V. Hoja de datos del interruptor

Descripción	
Marca	Alstom
Número de serie	143045-010-A
Modelo	DT1 72,5FK
Valor máximo de voltaje	72,5 kV
Frecuencia	60 Hz
Corriente máxima	1 250 amperios
Tiempo de interrupción	3 ciclos
Duración del cortocircuito	3 segundos
Impulso de rayo	350 kV
Presión SF6	4,6 bar
Tensión de control	125 VDC

Fuente: elaboración propia.

Figura 35. Placa del Interruptor 69 kV

ALSTOM		Tipo: DT1-72.5FK	Pedido/No. de contrato: NW031P02
		Serie: 143045-010-A	Referencia de ALSTOM: 143045
		Fecha de fabricación: 3 / 2013	Manual de operación No.: DT09FK-IM-S
			Lista de partes No.: 143045-010
			Diagrama de control: E143045010
Voltaje Nominal Máximo	72.5 kV	Tiempo nominal de interrupción	3.0 Ciclos
Factor nominal	1.0(K)	Desconexión de corrientes capacitivas	
Frecuencia	60 Hz	-Factor nominal de sobrevoltaje transitorio	1.5
Secuencia nominal de operación	O-0.3S-CO-1S-CO	-Corriente de carga de línea en vacío	100 A
Corriente nominal	1250 A	-Corriente de banco de capacitores aislado en paralelo	630 A
Corriente nominal de corto circuito	40 kA	-Corriente de banco de capacitores en presencia de otro banco energizado en paralelo	630 A
-Falla en terminales	40 kA	-Corriente transitoria de energización valor pico	25 kA
-Falla de línea corta al 90% con capacitancia a tierra de 0nF (distancia < 100m)	40 kA	-Frecuencia de la corriente de energización	3360 Hz
Corriente de interrupción en oposición de fases	10 kA	Duración nominal de corto circuito	3s
		-Corriente nominal de cierre	108 kA
		-Corriente nominal de corta duración	108 kA
		Impulso de rayo	350 kV
		Temperatura	-30° C to +40° C
		Presión (a 20° C) del gas SF6	Presión relativa
		-Presión nominal	4.6 bar
		-Presión de alarma baja	3.6 bar
		-Presión de bloqueo	3.3 bar
		Peso total de SF6	13 kg
		Peso total del interruptor	1334 kg
		Tipo de mecanismo	FK3-1131
			Résorte
		Tensión de control	
		-de Cierre	125VDC, 3.5A
		-de Diaparo (cada uno)	125VDC, 3.5A
		-Motor	125VDC, 1.5kW
		-Calentamiento del gabinete	120VCA, 190W
ALSTOM Grid, HIGH VOLTAGE SWITCHGEAR ONE POWER LANE - CHARLEROI, PA 15022 MADE IN THE USA			

Fuente: elaboración propia.

4.1.14. Montaje

Para realizar el montaje se construyó la base de concreto armado donde se instala el interruptor de potencia como se puede ver en la figura 36. Al tener la base hecha se procede a armar el soporte fabricado de metal.

Figura 36. Interruptor 69 kV



Fuente: elaboración propia.

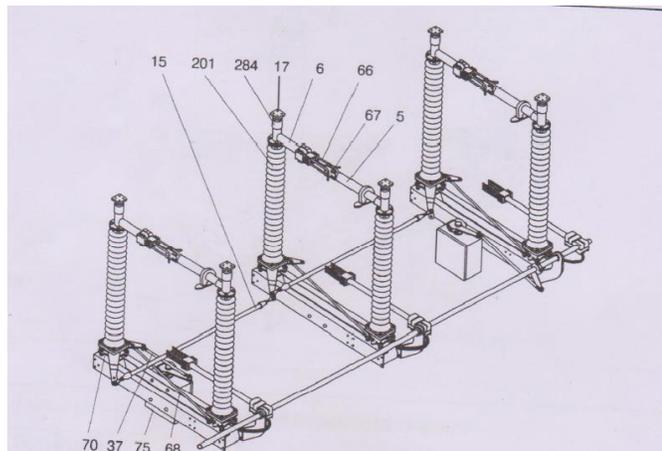
Para izar el interruptor, se necesitó de una grúa; luego, se procedió a sujetarlo por medio de tornillos, roldanas y tuercas de acero inoxidable; de igual forma como se realizó con los demás equipos, se alineó con la vertical y la horizontal.

4.1.15. Equipos de medición y seguridad

4.1.15.1. Seccionadores

Equipo electromecánico que permite seccionar o dividir en dos áreas la subestación y la línea de transmisión. Conformado por una base metálica de lámina galvanizada que posee un conector de puesta a tierra, con una columna de aisladores fijados con el nivel básico al impulso, encima de estos la cuchillas de eje horizontal y apertura horizontal de marca ABB.

Figura 37. **Seccionador con puesta a tierra**



Fuente: Global hydro energy GmbH. *Manual de instalación del transformador*. p. 4.

El seccionador es el único equipo de la subestación que viene de fábrica por partes, para armarlo se realizó lo siguiente:

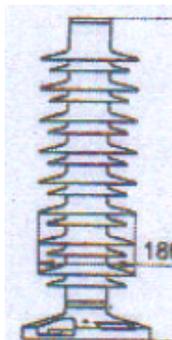
- La columna de aisladores se fijan a la base de metal.
- La base con los aisladores se fijan en la torre por medio de tornillos.

- Se realiza una inspección para que estén alineadas las tres bases.
- Se coloca el brazo que une a las bases junto a ello se coloca el seccionador de puesta a tierra.
- En la parte superior de la columna de aisladores se colocan las cuchillas.
- Los seccionadores debidamente armados, se ajustan los brazos y los tiempos de apertura y cierre de las cuchillas para evitar daños a los mismos.

4.1.16. Pararrayos

Equipo eléctrico formado por una serie de dispositivos resistivos no lineales y explosores que limitan la amplitud de las sobretensiones originadas por descargas de rayos atmosféricos, operaciones de interruptores o desbalance del sistema. Equipo fabricado por ABB, modelo Pelín R para un sistema de voltaje de operación de 24 kV a 172 kV.

Figura 38. Pararrayos



Fuente: Global hydro energy GmbH. *Manual de instalación de pararrayos ABBA*. p. 10.

Los pararrayos son los únicos que van instalados en el segundo nivel de la torre, como se puede ver en la figura 39; para izarlo fue necesario usar una grúa, se sujetó a la grúa por medio de eslingas y cadenas. En la torre se aseguró por medio de tornillos de acero inoxidable.

4.1.17. Transformadores de potencial

Para protecciones y mediciones de ingreso o salida de alta tensión, el transformador de tensión de aislamiento de aceite y papel es el transformador inductivo más conveniente. Transformador de potencial fabricado por la empresa ABB, con una salida en el secundario de 115 voltios.

Figura 39. Transformador de potencial



Fuente: elaboración propia.

Para izar los equipos fue necesario usar una grúa, se sujetaron a la grúa por medio de eslingas y cadenas. La base de metal se aseguró por medio de tornillos de acero inoxidable.

Tabla VI. **Hoja de datos**

Marca	ABBA
Modelo	EN
Diseño	Exterior
Aislamiento	Aceité -papel - cuarzo
Factor de tensión	Hasta 1,9/8 horas
Aisladores	Porcelana
Distancia de fuga	25 mm/kV
Altitud máxima	1 000 m.s.n.m

Fuente: elaboración propia.

4.1.18. Paneles de protección, control y medición de subestación

4.1.18.1. Protecciones

Los sistemas de protección se basan en diferentes diagramas esquemáticos, con un conjunto de relevadores que protegen diferentes zonas. El sistema de protecciones debe tener las siguientes características:

- Sensibilidad
- Selectividad
- Velocidad
- Confiabilidad
- Discriminación

El sistema funciona de modo que al ocurrir una falla debe operar la protección más cercana, la cual provocará que la falla no se trasmita a otros lugares; esto debe ocurrir a una velocidad en términos de los milisegundos para evitar que la falla provoque daños irreparables en los equipos. Al mismo tiempo, debe distinguir entre corrientes de cortocircuitos, sobrecargas y corrientes de excitación de transformadores. Los relevadores deben cumplir con los estándares de buen respaldo de fábrica y de buenas garantías de uso.

Las protecciones para esta subestación abarcan protección del transformador, línea de transmisión para zonas 1 y 2 y protección de barra 69 kV, se describen en los siguientes incisos.

4.1.19. Protecciones de transformador

El transformador de potencia es uno de los equipos más importantes de la subestación, utiliza la protección diferencial de corriente. Este consiste en que la corriente que entra al transformador es igual a la que a la salida, lo cual será el estado normal de la protección. Cuando la corriente de entrada varié con la de salida este entrará en zona de actuación.

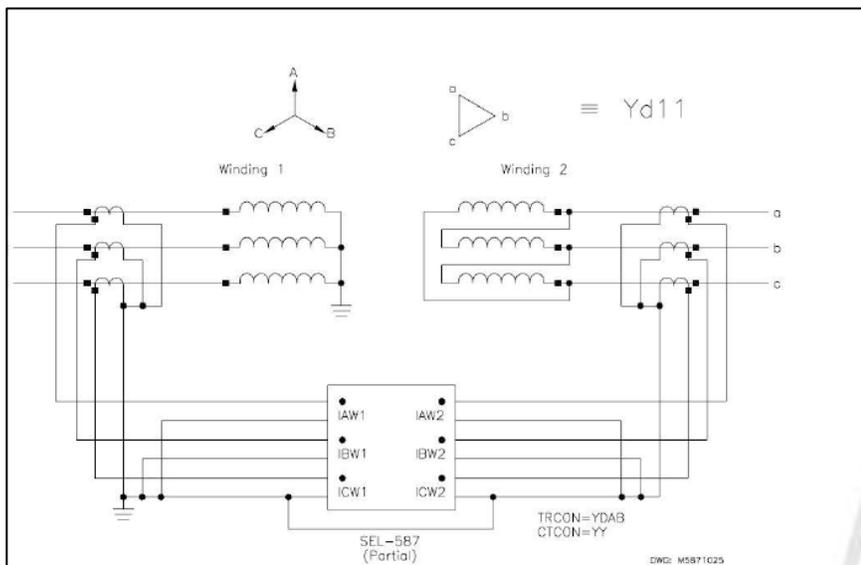
El relevador compensa automáticamente las conexiones para derivar las cantidades de operación diferencial apropiadas, según la conexión interna de los devanados del transformador de potencia.

El disparo de esta protección ocurre cuando la cantidad de operación es mayor que el nivel de picop y que la falla presente un mayor valor en la curva.

Esto debido a que las conexiones internas del transformador está en YnD11 esto significa que el segundo devanado está retrasado 330 grados eléctricos

respecto al primero devanado; por lo tanto, la corriente estaría desfasado 330 grados de entrada con respecto a la corriente de salida. Esto provoca que no se cumpla con lo establecido por la teoría del diferencial de corriente, donde dice que las corrientes de entrada y de salida deben ser iguales en amplitud y ángulo, debido a que son unidades vectoriales. Para evitar este problema, se puede compensar conectando los transformadores de corriente de la forma como se ve en la figura 40.

Figura 40. **Conexión de CT'S**



Fuente: elaboración propia.

Debido a que la conexión interna del transformador del lado del alta tensión está en estrella y la de baja tensión está en delta, los transformadores de corriente se conectan de forma inversas a las conexiones internas del transformador de potencia en de potencia; es decir, en el lado de alta tensión se conectan los transformadores de corriente en delta y las de baja tensión en estrella. Esto resolverá el problema es que las corrientes estén desfasadas.

4.1.19.1. Relevador SEL 587

Para la protección diferencial de corriente del transformador, se eligió el relevador SEL 587 debido a que cumple con todos los principios de protección, tomando en cuenta las siguientes características.

Es un relé diferencial de corriente y sobrecorriente que proporciona protección, control, y medición de transformadores y alimentadores. Incluye cuatro entradas de corriente trifásica con protección independiente de diferencial restringida y no restringida, características programables de diferencial de pendiente unitaria o dual, monitor de interruptor de circuito, monitor de voltajes de batería y ecuaciones de control.

Figura 41. Relevador SEL 587



Fuente: Global hydro energy GmbH. *Manual de instalación SEL 587*. p. 4.

Los elementos de sobrecorriente son controlados por torsión, incluso un elemento instantáneo, uno de tiempo definido y uno de tiempo inverso para cada fase, secuencia negativa y corrientes residuales de tierra proporcionan protección minuciosa de sobrecorriente en cada entrada de devanado, la corriente cambia la suma de las corrientes de los CT'S para aplicaciones de sobrecorriente de anillo-barra.

Grabación y supervisión a través de fallas. El servicio a través de las fallas se graba y se acumula para utilizarse en ecuaciones de control o supervisión manual.

4.1.20. Línea de transmisión

La transmisión de la energía generada por la planta se realiza por medio de la línea de 69 000 voltios, voltaje regulado por el sistema nacional interconectado, SNI. Con una longitud de 13,8 kilómetros hasta la siguiente subestación de maniobras llamado El Cafetal del sistema nacional interconectado. Construido con cable de ACSR 477 y postes de 18 metros.

La protección de distancia es la que se utiliza para proteger de fallas entre fases y fases a tierra. Los relevadores de distancia son preferibles a los de sobrecorriente porque no les afectan los cambios en la magnitud de la corriente, su selectividad se basa más en impedancia que en la corriente. Para este caso se usan las curvas tipo mho y cuadrilaterales que son más sensible a resistencia de arco, además, cambia dirección y distancia. El tipo de impedancia conviene para fallas entre fases y fases a tierra.

4.1.20.1. Relevador SEL 311L

Se instaló un relevador diferencial de corriente de línea SEL 311L con respaldo integral de distancia de cuatro zonas para una protección de línea de alta velocidad.

Es aplicable para protección de diferencial de línea con operación de subciclo con respaldo de protección de distancia de cuatro zonas y sobrecorriente direccional. Con el uso del canal principal y de respaldo para

mayor confiabilidad. Se usa SEL 311L, los elementos de medición proporcionan coordinación con cargas máximas. Sus características principales son:

- Protección segura de diferencial de línea: los elementos diferenciales sensibles proporcionan un tiempo de funcionamiento de subciclo. La restricción para fallas externas da una proporción de vector fácil de configurar de corrientes remotas y locales.
- Medición de sincrofasores: convierte la estimación del estado del sistema en media del estado del sistema con medición de área amplia de ángulos y magnitudes de voltaje y fases de corriente. mejora la estabilidad del sistema con medidas de ángulos de cargas.
 - Protección completa de línea
 - Disparo de un solo polo
 - Servidor de red integrado
 - Comunicaciones

Figura 42. **Relevador SEL 311L**



Fuente: Global hydro energy GmbH. *Manual de instalación del relevador SEL 311L*. p. 3.

4.1.21. Protección de barra

Para la protección de barras en la subestación se instala un relevador para las barras de 69 000 voltios y 4 160 voltios; la función es proteger los equipos de la subestación y la línea de transmisión contra sobrevoltajes y sobrecorrientes dentro y fuera de la central.

La protección es de tipo diferencial, de tal manera que mientras la energía que entra en la barra es igual a la que sale, la protección no opera. En caso de cortocircuito dentro de la zona de barra, la energía que entra al área de falla es mayor a la que sale, por lo tanto, opera la protección, desconectando todos los interruptores que alimentan la barra.

4.1.21.1. Relevador SEL 351A

El sistema de protecciones SEL 351A cuenta con Ethernet y sincrofasores IEEE C37.118 integrados; es la solución para las protecciones de sobrecorriente.

Figura 43. Relevador SEL 351^a



Fuente: Global hydro energy GmbH. *Manual de instalación del relevador SEL 351A*. p. 4.

Con las siguientes características:

- Protocolo de comunicación
- Servidor de red integrado
- Protocolo simple de tiempo de red
- Ethernet robusto de subestación
- Sincrofasores con IEEE C37.118 integrados
- Botones *safe lock* de disparo / cierre
- Innovadora polarización de elemento direccional
- Protocolo de Modbus DNP3 y ASCII
- Protección confiable de sobre corriente
- Seguridad mejorada
- Protección de baja / sobre corriente
- Control de cierre
- Medición supervisada de calidad de energía
- Configuración de voltajes de entrada

4.1.22. Diseño de red de tierras

En la subestación una de las protecciones más importantes contra sobretensiones es tener una buena red de tierras y adecuada en la cual se conectan los neutros de los equipos, cables de guarda, estructuras metálicas y todos los equipos que poseen partes metálicas para estar al potencial de tierra.

La necesidad de contar con un buen sistema de red de tierras es por las siguientes razones.

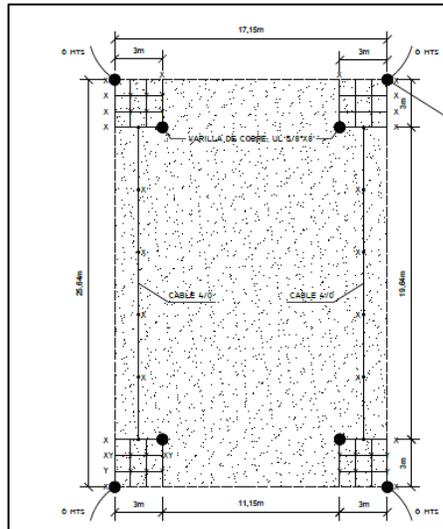
- Limitar las sobretensiones debido a descargas electroatmosféricas.

- Disipación de corrientes de falla de tierra debido a cortocircuitos o fallas monofásicas.
- Evitar diferenciales de potencial al momento de alguna falla dentro de la subestación.
- Facilitar, mediante sistemas de relevadores o microcomputadoras, la eliminación de las fallas a tierra en los sistemas eléctricos.

4.1.23. Tipo de red

Divido a que la configuración del terreno se encuentra en forma rectangular, es conveniente trabajar en malla, al tener 25,00 metros de largo y 17,00 metros de ancho como se observa en la figura. 44. El diseño se basó en la norma IEEE Std 80-200. Se consideró esta norma porque tiene todas las características adecuadas para el cálculo de tierras en subestaciones y se aplica directamente en este proyecto.

Figura 44. Red de tierras



Fuente: elaboración propia.

Elementos que conforman la red de tierras:

- Conductores
- Electrodo

Para el diseño de la red de tierras, se procede a efectuar la medición del área que abarcará la malla según las medidas de la figura 44 es de 25,00 X 17,00 metros; partiendo de este punto, el área de la cuadrícula debe ser de 425 m², con resistividad promedio del suelo de 144,37 Ω m. Todas las uniones cable-cable y cable-electrodo se efectuaron con soldadura exotérmica.

Se utiliza conductor de cobre número 4/0 AWG con un diámetro de 0,0134 m, para realizar la malla.

Se considera que en toda la subestación se colocará roca triturada con una resistividad de $\rho_s = 3\,000 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$, con una altura de $h = 0,10$ metro. El suelo natural tiene una resistividad de $\rho = 145,3 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$. El tiempo máximo para la disipación de una falla es de $t_c = 0,5$ s. Con los datos anteriores calcularon los voltajes de paso y de contacto para una persona promedio de 70 kilogramos.

4.1.24. Tensión de contacto teórico

Es un diferencial de tensión entre la máxima tensión que la malla de tierra de una instalación puede alcanzar, relativa a un punto de tierra distante que se supone que está al potencial de tierra. Significa que es la tensión en la superficie del suelo en el punto donde una persona se para y al mismo tiempo sus manos entran en contacto con una estructura conectada a tierra. Está dada por la ecuación 16.

$$E_{Contacto} = \frac{(1\,000 + 1,5C_s \cdot \rho_s) \cdot 0,157}{\sqrt{t_c}} \quad (\text{Ec. 16})$$

Donde C_s esta dado por:

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h + 0,099} \quad (\text{Ec. 17})$$

Al sustituir las ecuaciones, queda de la siguiente forma:

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \left(1 - \frac{145,3}{3\,000}\right)}{2 * 0,1 + 0,099}$$

$$C_s = 0,7050$$

Sustituyendo el valor de $C_s = 0,7050$ en la ecuación 16.

$$E_{Contacto} = \frac{(1\ 000 + 1,5 * 0,7050 * 3\ 000) * 0,157}{\sqrt{0,5}}$$

$$E_{Contacto} = 927 \text{ voltios}$$

4.1.25. Tensión de paso teórico

Es el diferencial de tensión en la superficie, que experimenta una persona con los pies separados a una distancia de un metro sin entrar en contacto con algún elemento de la subestación. Se representa en la ecuación 18.

$$E_{paso-tolerable} = \frac{(1\ 000 + 6C_s * \rho_s) * 0,157}{\sqrt{t_c}} \quad (\text{Ec. 18})$$

Sustituyendo valores en la ecuación 18 el valor de $C_s = 0,7050$

$$E_{paso-tolerable} = \frac{(1\ 000 + 6 * 0,7050 * 3\ 000) * 0,157}{\sqrt{0,5}}$$

$$E_{paso-tolerable} = 3\ 038 \text{ voltios}$$

Tensiones experimentales de paso y contacto.

Donde:

- n , es el área de la malla
- J , el ancho de la malla
- F , el largo de la malla
- D , separación de la cuadrícula
- H , profundidad de la malla
- L , longitud de las varillas incrustadas en la tierra

De los datos obtenidos en campo se tiene que:

- n , 425m
- J , 17m
- F , 25m
- D , 3m
- H , 0.6
- L , 2,44m

Para calcular la tensión de malla E_{malla} está dado por la ecuación 19.

$$E_{malla\ experimental} = \frac{\rho * I_G * K_m * K_i}{L + (1,55 + 1,22 * (\frac{L}{\sqrt{J^2 + F^2}}))} \quad (\text{Ec. 19})$$

Donde K_m está dado por la ecuación 20.

$$K_m = \frac{1}{2 * \pi} * \left(\ln \left(\frac{D^2}{16 * h * d} + \frac{(D + 2 * h)^2}{8 * D * d} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left(\frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right) \quad (\text{Ec. 20})$$

$K_{ii} = 1,0$ Para este caso se empleará varillas.

$$\begin{aligned} K_h &= 1 + h \\ K_h &= 1,26 \end{aligned} \quad (\text{Ec. 21})$$

Sustituyendo valores en la ecuación 20.

$$\begin{aligned} K_m &= \frac{1}{2 * \pi} * \left(\ln \left(\frac{2^2}{16 * 1 * 0,0103} + \frac{(2 + 2 * 1)^2}{8 * 2 * 0,0103} - \frac{1}{40,0103} \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{8}{\pi(2 * 2,201 - 1)} \right) \right) \end{aligned}$$

$$K_m = 0,12$$

K_i , está dado por la ecuación 22.

$$K_i = 0,644 + 0,148n \quad (\text{Ec. 22})$$

$$K_i = 2,32$$

Se substituyen los valores en la ecuación 22 para determinar la tensión de malla.

$$E_{\text{malla experimental}} = \frac{145,3 * 1\,300 * 0,12 * 2,32}{884} = 59,49$$

Para calcular la tensión de paso se da la ecuación 23.

$$E_{\text{paso experimental}} = \frac{\rho * I_G * K_s * K_i}{L} \quad (\text{Ec. 23})$$

$$K_m = \frac{1}{\pi} * \left(\frac{1}{2 * h} + \frac{1}{D + h} + \frac{1}{D} (1 - 0,05^2) \right)$$

$$K_m = \frac{1}{\pi} * \left(\frac{1}{2 * 0,6} + \frac{1}{3 + 0,60} + \frac{1}{3} (1 - 0,05^{2*2*2*2}) \right) = 0,4140$$

Sustituimos valores en la ecuación 23.

$$E_{\text{paso}} = \frac{145,3 * 1\,300 * 0,88839 * 4,096}{884} = 777,98$$

Comprando los niveles máximos de tensiones de contacto y paso que un ser humano soporta con un peso de 75 kilogramos, obtenidos de forma teórica

y comparada con los valores obtenidos de forma experimental. Los valores experimentales deben de ser mejores a los teóricos

Tensiones teóricas:

- $E_{\text{contacto}} = 927$ voltios
- $E_{\text{paso-tolerable}} = 3\ 080$ voltios

Tensiones experimentales:

- $E_{\text{malla}} = 59,495$ voltios
- $E_{\text{paso}} = 777,8$ voltios

Por tanto la red de tierras cumple con los requerimientos especificados de la norma IEEE Std 80 2000.

CONCLUSIONES

1. Es importante poseer personal altamente calificado para ejecutar las actividades de montaje, siguiendo las instrucciones de supervisores e ingenieros en planta, que basados en su experiencia puedan dar la interpretación correcta a instrucciones y planos de armado de la máquina que estén diseñados por el fabricante, para garantizar el óptimo funcionamiento de la unidad generadora.
2. La planificación y ejecución del montaje se realizó de acuerdo a un calendario pre-establecido por las empresas fabricantes de los equipos y la empresa que ejecutó el montaje de los mismos, logrando resultados satisfactorios y en el tiempo establecido.
3. Previo a la realización de las conexiones eléctricas y el montaje de los equipos se verificó que cumplieran con los requerimientos técnicos de operación, confirmando que estos contaban con las especificaciones adecuadas para cumplir con el diseño y aplicación requerida.
4. Para mantener la máquina en óptimas condiciones y mantener una producción de energía eléctrica constante, deben realizarse los mantenimientos que el fabricante indica.
5. Las partes fijas de la máquina, que sirven de soporte y anclaje deben estar alineadas y niveladas correctamente, para evitar vibraciones y el mal funcionamiento de las unidades generadoras.

6. Para el funcionamiento de la planta, el personal técnico y de operación, tiene que ser capacitado previamente y continuamente, para aprender a operar la unidad generadora y evitar posibles fallas por mala operación

RECOMENDACIONES

1. Es importante mantener el sistema de lubricación y enfriamiento en condiciones óptimas de operación para evitar problemas severos a los cojinetes de la máquina.
2. En el sistema de control de la máquina mantener un monitor de temperaturas en las partes críticas de funcionamiento.
3. Es preferible operar cada unidad en modo automático, en todas las secuencias de operación, para evitar posibles errores de los operadores.
4. Es necesaria la formulación de manuales de operación para prevenir errores de los operadores.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALLER, José Manuel. *Máquinas eléctricas rotativas*. Venezuela: Universidad Simón Bolívar, 2014. 471 p.
2. FITZGERAL, A. E; KINGSLEY, Charles Jr.; KUSKO, Alexander. *Teoría y análisis de las máquinas eléctricas*. 2a ed. España: Hispano-Europea S.A., 1980. 589 p.
3. FRAILE MORA, Jesús. *Maquinas eléctricas*. 5a ed. España: McGraw-Hill, 2014. 420 p.
4. FRANZINI, Joseph B.; FINNEMORE, E. John. *Mecánica de fluidos con aplicaciones en ingeniería*. 9a ed. España: McGraw-Hill, 1999. 503 p.
5. Global Hydro Energy GmbH. *Manual de instalación de turbinas Pelton*. Austria: Visionary power, 2014. 87 p.
6. HARPER, Enrique. *Diseño de subestaciones eléctricas*. 2a ed. México: McGraw-Hill, 1992. 505 p.
7. MARTÍN, José Raúl. *Diseño de subestaciones eléctricas*. 2a ed. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 2000. 570 p.

8. Marreli Generators. *Manual de instalación de generadores*. Austria: Visionary power, 2014. 18 p.