



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

**ESTUDIO, INSTALACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA DE
PROTECCIÓN, MEDICIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA, EN
LA PLANTA HIDROELÉCTRICA EL SALTO**

Rony Faustino Hernández López

Asesorado por el Ing. Francisco Javier Rivera Canek

Guatemala, octubre de 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO, INSTALACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DEL
SISTEMA DE PROTECCIÓN, MEDICIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE
ENERGÍA ELÉCTRICA, EN LA PLANTA HIDROELÉCTRICA EL
SALTO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

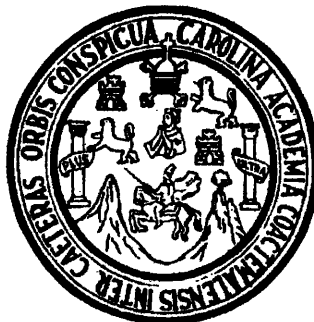
RONY FAUSTINO HERNÁNDEZ LÓPEZ

ASESORADO POR EL ING. FRANCISCO JAVIER RIVERA CANEK.

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCLA II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. José Milton De León Bran
VOCAL V	Br. Isaac Sultán Mejía
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Natanael Jonathan Requena Gómez
EXAMINADOR	Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
EXAMINADOR	Ing. Francisco Javier Rivera Canek
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**ESTUDIO, INSTALACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA
DE PROTECCIÓN, MEDICIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA
ELÉCTRICA, EN LA PLANTA HIDROELÉCTRICA EL SALTO,**

tema que me fuera aprobado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, el 7 de abril de 2008.



RONY FAUSTINO HERNÁNDEZ LÓPEZ

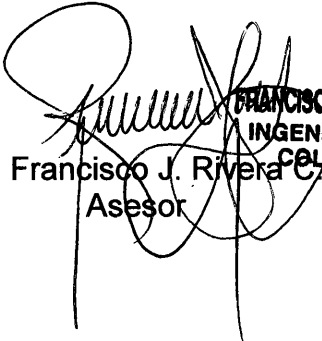
Guatemala 30 de octubre, 2008

Ing. Norma I. Sarmientos Zeceña
Directora Unidad de E.P.S.
Facultad de Ingeniería

Por este medio atentamente informo que como asesor de la práctica del ejercicio profesional supervisado (E.P.S.), del estudiante universitario de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Rony Faustino Hernández López, procedí a revisar el informe final de la práctica de E.P.S titulado **ESTUDIO, INSTALACION Y PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA DE PROTECCION, MEDICION Y DISTRIBUCION DE ENERGIA ELECTRICA EN LA PLANTA HIDROELECTRICA EL SALTO.**

Cabe mencionar que dicho trabajo terminó satisfactoriamente con la puesta en marcha de la hidroeléctrica nuevamente, en tal virtud *lo doy por aprobado*, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme muy atentamente,


Ing. Francisco J. Rivera C.
Aesor
FRANCISCO JAVIER RIVERA CANEK
INGENIERO ELECTRICISTA
COLEGIADO No. 3296



UNIDAD DE E.P.S.

Guatemala, 01 de septiembre de 2009.
REF.EPS.DOC.1284.09.09.

Inga. Norma Ileana Sarmiento Zeceña de Serrano
Directora Unidad de EPS
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimada Ingeniera Sarmiento Zeceña.

Por este medio atentamente le informo que como Supervisor de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.), del estudiante universitario **Rony Faustino Hernández López** de la Carrera de Ingeniería Eléctrica, con carné No. **9516331**, procedí a revisar el informe final, cuyo título es **“ESTUDIO, INSTALACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN, MEDICIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA PLANTA HIDROELÉCTRICA EL SALTO”**.

En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”

Ing. Natanael Jonathan Requena Gomez
Supervisor de EPS
Área de Ingeniería Eléctrica

c.c. Archivo
NJRG/ra





UNIDAD DE E.P.S.

Guatemala, 01 de septiembre de 2009.
REF.EPS.D.539.09.09.

Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
Director Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimado Ingeniero Escobedo.


Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado **"ESTUDIO, INSTALACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN , MEDICIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA PLANTA HIDROELÉCTRICA EL SALTO"** que fue desarrollado por el estudiante universitario, **Rony Faustino Hernández López**, quien fue debidamente asesorado por el Ing. Francisco Javier Rivera Canek y supervisado por el Ing. Natanael Jonathan Requena Gómez.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación del mismo por parte del Asesor y del Supervisor de EPS, en mi calidad de Directora apruebo su contenido solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"


Inga. Norma Ileana Sarmiento Zeceña de Serrano
Directora Unidad de EPS

NISZ/ra





Ref. EIME 35.2009
Guatemala, 16 de septiembre 2009.

FACULTAD DE INGENIERIA

Señor Director
Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

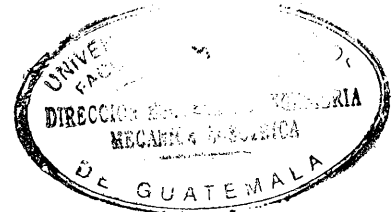
**Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
ESTUDIO INSTALACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DEL
SISTEMA DE PROTECCIÓN MEDICIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE
ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA PLANTA HIDROELÉCTRICA EL
SALTO, del estudiante Rony Faustino Hernández López, que
cumple con los requisitos establecidos para tal fin.**

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. José Guillermo Hedoya Barrios
Coordinador Área de Electrónica



JGBB/sro



REF. EIME 58. 2009.

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; Rony Faustino Hernández López titulado: ESTUDIO INSTALACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN MEDICIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA PLANTA HIDROELÉCTRICA EL SALTO, procede a la autorización del mismo.


Ing. Mario Renato Escobedo Martínez



GUATEMALA, 21 DE SEPTIEMBRE 2,009.



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: **ESTUDIO, INSTALACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN, MEDICIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA, EN LA PLANTA HIDROELÉCTRICA EL SALTO**, presentado por el estudiante universitario **Rony Faustino Hernández López**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

A handwritten signature in black ink, consisting of a large loop at the top and several vertical strokes below.

Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
DECANO

Guatemala, octubre de 2009

/gdech



AGRADECIMIENTOS A:

DIOS Por haberme bendecido con sabiduría durante toda la carrera de ingeniería.

MIS PADRES Faustino Hernández, Estela López, que con esfuerzo y dedicación lucharon para que tuviera estudios universitarios.

CISMA Jorge M. Lainfiesta, Luis Fernando Soria, Francisco J. Rivera, quienes desinteresadamente me brindaron su apoyo y la oportunidad de realizar mi trabajo de E.P.S.

**UNIVERSIDAD
DE SAN CARLOS** Por la oportunidad de obtener estudios profesionales.

ACTO QUE DEDICO A:

- DIOS** Porque reconozco que sin su ayuda no hubiera alcanzado esta meta en mi vida.
- Mi esposa** Ana Patricia, ya que ella ha sido mi ayuda idónea, en mi vida y en la culminación de mis estudios.
- Mi hijo** Rhony Alexander, porque con su inocencia me ha llenado de paz, y me ha brindado el ánimo necesario para seguir adelante.
- Mi padre** Porque con su ejemplo siempre de rectitud, me enseñó que cada día puedo ser mejor persona.
- Mis hermanos** Lesbia Maritza, Eddy José, Norma Marleny, Sonia Mirey. Esperando que se sientan orgullosos, al igual que yo por este logro en mi vida.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS	XV
INTRODUCCIÓN	XVII

1 DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS ACTUALES	1
1.1 Instalaciones	1
1.1.1 Potencia instalada	1
1.1.2 Estado actual y dimensionamiento de conductores	2
1.1.3 Revisión visual	4
1.1.4 Resistencia de aislamiento para cableado de potencia	5
1.1.5 Tuberías y canalizaciones para cableado	6
1.2 Protecciones	7
1.2.1 Revisión visual	7
1.2.2 Prueba de disparo	8
1.2.3 Corriente nominal	8
1.3 Tableros	9
1.3.1 Revisión visual	9
1.3.2 Desbalance de cargas	10
1.3.3 Toma de datos	10
1.4 Transformadores	11

1.4.1	Toma de datos nominales	11
1.4.2	Chequeo general	13
1.5	Red de Tierras	13
1.5.1.	Análisis de la red de tierras existentes	14
1.5.2	Física y técnicamente en que condiciones se encuentran	14
1.6	Iluminación	15
1.6.1	Revisión visual	15
1.6.2	Características de las lámparas y luminarias	16
1.6.3	Textura y colores de techos, pisos y paredes	17
2	CÁLCULO E INSTALACIÓN DE EQUIPO NUEVO	19
2.1	Canalizaciones de cableado	19
2.1.1	Bandeja para cables de potencia	20
2.1.2	Tubería para cables	22
2.2	Conductores	22
2.2.1	Cableado de potencia	23
2.2.2	Cableado de mando y control	25
2.3	Instalación de equipos	26
2.3.1	Interruptor-seccionador al vacío	26
2.3.2	Medidores de energía	29
2.3.3	Relevador electrónico de potencia del generador	31
2.3.4	Transformadores para medición y protección	34
2.3.5	Alarmas para monitoreo	36
2.3.6	Ménsula de sincronización	37
2.3.7	Frecuencímetro, voltímetro y amperímetro	38
2.3.8	Relevador de sincronismo	39
2.3.9	Accesorios de mando y conteo	40

3	EXCITATRIZ ESTÁTICA	43
3.1	Funcionamiento	43
3.2	Protecciones del regulador	44
3.3	Interruptor de campo	47
3.4	Instrumentos de medición	48
3.5	Transformador de excitación	49
3.6	Equipos Auxiliares	50
4	TRANSFORMADORES	51
4.1	Tipos de transformadores	51
4.2	Conexiones de transformadores	54
4.3	Pruebas de transformadores	56
5	SERVICIOS GENERALES	64
5.1	Centros de carga	64
5.2	Alimentación para bombas de lubricación	66
5.3	Sistema de Iluminación y fuerza	67
	CONCLUSIONES	71
	RECOMENDACIONES	75
	BIBLIOGRAFÍA	77
	ANEXOS	79

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Placa de datos de un transformador monofásico de distribución	12
2.	Bandeja de aluminio de 30X10 cm	19
3.	Bandeja de aluminio de 60X10 cm	20
4.	Terminación de cables de media tensión	24
5.	Interruptor de potencia	27
6.	Placa de datos del interruptor de potencia	29
7.	Medidor de energía ION 8600	30
8.	Vista frontal del relevador electrónico de potencia	32
9.	Transformadores de potencial	34
10.	Transformadores de corriente	36
11.	Módulo completo de sincronización	38
12.	Excitatriz estática	46
13.	Transformador de potencia	52
14.	Conexión de un banco trifásico	55
15.	Distribución de luminarias en cuarto de máquinas	68
16.	Diagrama unifilar de la planta hidroeléctrica El Salto	79
17.	Circuito de potencia y control de la unidad generadora 1	80
18.	Circuito de control de la unidad generadora 1	81
19.	Circuito de control y sincronismo	82

TABLAS

I. Características de cable AETNA	23
II. Características de cable PHELP DODGE	25
III. Pruebas de transformador de potencia	59
IV. Pruebas de aislamiento a transformador, alta tensión	61
V. Pruebas de aislamiento a transformador, baja tensión	62

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Valor en porcentaje
#	Número
°	Grados
/	Dividido
Δ	Conexión en delta
Ω	Resistencia eléctrica en ohms
Y	Conexión en estrella
$\sqrt{\quad}$	Raíz cuadrada

1992

1993

GLOSARIO

- Alta tensión:** Se refiere a voltajes de operación mayores a 13800 voltios.
- Ampacidad:** Capacidad de corriente. Valor máximo de la corriente que puede tolerar continuamente un dispositivo o un conductor sin que sufra daños permanentes por alteración de sus propiedades eléctricas, químicas o mecánicas.
- Baja tensión:** Se refiere a voltajes de operación menores a 1000 voltios.
- Conexión delta:** Es el tipo de conexión que se realiza con tres bobinas de transformadores y su conexión forma la figura del símbolo delta.
- Conexión estrella:** Es el tipo de conexión que se realiza con tres bobinas de transformadores y su conexión forma la figura de una Y.

Conexión a tierra: Camino de conducción eléctrica a la tierra o a algún cuerpo conductor que haga las veces de ésta (por ejemplo: chasis o armazón metálico de un equipo, etc.), que pueda servir de conductor común de retorno de varios circuitos. Puede hallarse a potencial cero con respecto a la tierra o puede estar conectado a ésta.

Conductor: Es el cable que se utiliza para transportar energía eléctrica de un lugar a otro.

Electrodo a tierra: Electrodo metálico que se entierra para la toma de conexión a tierra.

Media tensión: Se refiere a voltajes de operación entre los 1000 voltios y los 13800 voltios.

Potencia instalada: Es la capacidad máxima de generación de energía eléctrica en términos de volt-amperios producida por todos los generadores instalados en una planta, sin sobrepasar el límite de la capacidad de éstos.

Potencia inversa: Se refiere a la potencia absorbida por un generador.

Relevador electrónico: Es un dispositivo electrónico de protección que controla el estado del interruptor de potencia del generador.

Sincronoscopio: Es un dispositivo eléctrico que permite la visualización de dos señales que se pretenden sincronizar.

Termocopla: Es una resistencia que varía su valor óhmico dependiendo de la temperatura.

RESUMEN

Un estudio de las instalaciones después del accidente en la planta hidroeléctrica es lo que el lector encontrará primeramente, de lo cual se determinará que equipos pueden repararse y utilizarse nuevamente y que equipos deben de ser reemplazados.

Para el lector, además de la teoría que se puede obtener en una cátedra o a través de un libro se le agregó al siguiente trabajo recomendaciones sobre instalación de equipos, las cuales no deben de ser consideradas como normas o estándares de instalaciones sino como un apoyo para el conocimiento teórico, ya que cada instalación tiene sus diferencias con las demás.

Se presentan los equipos principales con los que cuenta una planta hidroeléctrica de energía, tanto de potencia como de control, describiendo su funcionamiento y aplicación.

OBJETIVOS

General

Poner en servio los generadores hidráulicos 1 y 2 de la planta *El Salto*, así como proveerla de equipo moderno para estar a la altura de los requerimientos de suministro de energía eléctrica en Guatemala. Realizar un estudio para acoplar el equipo nuevo con el equipo que se quede habilitado y en buen estado.

Específicos:

1. Reemplazar la excitatriz estática de uno de los generadores debido a que se dañó en el incendio.
2. Instalar tres paneles de control, uno para cada generador y el tercero como acople para la salida de energía eléctrica
3. Eliminar toda instalación eléctrica que no sea posible reparar. Dictaminar el estado actual de los dispositivos (tuberías, cables, protecciones, lámparas, equipos y accesorios).

4. Diagnosticar los problemas presentes así como la necesidad de mejoras en las instalaciones de la planta.
5. Reemplazar todo el equipo dañado o en mal estado, por equipo nuevo y moderno.
6. Habilitar nuevamente las áreas que salieron de servicio debido al incendio.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo podrá servir como material de apoyo en la toma de decisiones con respecto a equipos instalados en una planta de generación de energía eléctrica, pero en ningún momento debe de ser utilizado para reemplazar las normas o estándares establecidos en el área de la electricidad.

En la primera parte de este trabajo, se realizará un análisis de cómo quedaron las instalaciones después que se produjera un incendio, se estudiarán los conductores de potencia, los interruptores de potencia, las excitatrices de los generadores, el sistema de control, las canalizaciones del cableado, la red de tierras del cuarto de máquinas, los transformadores y el sistema de iluminación, dando un dictamen para reemplazar el equipo o poderlo utilizar nuevamente.

En la segunda parte, se procederá a la instalación del equipo nuevo describiendo el razonamiento para la selección del equipo y los detalles de su instalación, que normalmente son propios en cada instalación, pero no se deben de tomar como normas sino como material de apoyo en instalaciones similares.

La tercera parte describe el funcionamiento de la excitatriz estática, así mismo, se hace mención de los diferentes equipos de protección y su funcionamiento. Como equipo de potencia de la excitatriz se verá su transformador y se describirá su funcionamiento y con que protecciones cuenta, terminando esta parte con los equipos auxiliares de la excitatriz estática.

La cuarta parte describe los diferentes tipos de transformadores que podemos encontrar en la planta, tanto para el área de potencia como para el área de control, las diferentes conexiones que existen entre estos transformadores como su razonamiento teórico y se finalizará con el estudio de pruebas de transformadores.

En la quinta y última parte de este trabajo, se verá la manera en que quedaron distribuidas las cargas de las instalaciones auxiliares de los generadores y de cómo se seleccionó el cableado de alimentación de las bombas de lubricación. Se describe también cómo quedó distribuido el sistema de iluminación del cuarto de máquinas, así como la disposición de los servicios auxiliares generales para la planta.

Para una mejor comprensión del funcionamiento de la planta o de equipos, se tiene un glosario donde podrá el lector encontrar algunos de los diagramas finales que describe el funcionamiento eléctrico de los equipos.

1 DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS ACTUALES

1.1 Instalaciones

1.1.1 Potencia instalada

La capacidad máxima de generación de energía eléctrica en términos de volt-amperios producida por todos los generadores instalados en una planta, sin sobrepasar el límite de la capacidad de estos, es a lo que llamamos potencia instalada para una planta en específico.

En el caso de la hidroeléctrica *El Salto*, la capacidad instalada la forman dos generadores, uno de 3.750MVA con un voltaje de salida de 2.4kV a 60 hertz y con 600 revoluciones por minuto marca General Electric, y el otro de 3.125MVA con un voltaje de salida de 2.4kV a 60 hertz y con 600 revoluciones por minuto marca Siemens. La capacidad instalada es entonces de 6.875MVA. La potencia máxima que ha llegado a generar la hidroeléctrica es de 5MVA, y esto se ha dado en el tiempo de invierno, cuando se dispone de la mayor cantidad de agua en la represa.

1.1.2 Estado actual y dimensionamiento de conductores

Los conductores que se encuentran actualmente instalados son para media tensión con capacidad de aislamiento de 5kV, y cuentan con un revestimiento especial de plomo, el cual da principalmente protección contra incendios y ruido. El calibre del cable es de 750kCMIL con capacidad para 535 amperios, según Procable en su sección de conductores eléctricos monopolares a una temperatura de 90 grados Celsius, y tiene instalado dos conductores por fase.

La potencia máxima a la cual se operaban cualquiera de los dos generadores era de 2.5MVA, y la potencia del generador de mayor capacidad es de 3.750MVA, con un voltaje de 2.4kV y procediendo a calcular la corriente para ésta potencia tenemos:

$$i = \frac{P}{\sqrt{3} \times V \times FP}$$

$$i = \frac{3750000}{\sqrt{3} \times 2400 \times 0.9}$$

$$i = 1002.34 \text{ Amp}$$

Esta es la corriente máxima de operación a plena carga del generador, y cuyo valor no excede el valor de ampacidad del calibre de los dos conductores que se encuentran instalados por fase, por lo cual podemos decir que el calibre del conductor utilizado es el indicado para esta aplicación. Ahora bien, la información en la placa de datos de éste generador nos dice:

- Potencia 3750kVA
- Voltaje 2400
- Amperaje 902
- Factor de potencia 0.8

Podemos observar entonces, que el factor de potencia de la placa de datos es menor al utilizado en el cálculo, pero aún así el valor de la corriente es menor en la placa al valor obtenido en el cálculo. Así que, podemos concluir que el generador es todavía bastante eficiente, produciendo pocas pérdidas internas, en base a la información sobre la corriente de los generadores vemos que los conductores que se utilizaron sí cubrían la potencia máxima de generación en forma individual.

Aunque la cantidad de corriente calculada es de un valor muy próximo a la capacidad de los dos conductores por fase, recordemos que los generadores no producen más de 5MVA y esto se debe a dos razones: una es la capacidad del transformador de salida hacia las líneas que es de 2.5MVA, y la segunda es porque la cantidad de agua contenida en la represa que alimenta con agua las turbinas no es la suficiente como para generar más de 2.5MVA de energía eléctrica, esto indica que el conductor seleccionado es el adecuado. También se podría pensar en realizar una revisión de la sección del conductor debido a la caída de tensión que se podría provocar en el cable, pero este no es el caso ya que la distancia de los conductores no excede ni los cien metros, y sabemos que la caída de tensión en los cables de media tensión es muy pequeña de por sí, y más si no son longitudes grandes las que se van a utilizar.

Los conductores de media tensión fueron seriamente dañados por el incendio, produciéndole daños visibles a los mismos, que van desde el derretimiento del recubrimiento de plomo hasta el derretimiento del forro de aislamiento exterior, también se produjeron cortocircuitos en los cables ocasionados por ruptura de aislamientos y daño en el conductor en sí. A pesar de las observaciones bastante obvias de los daños a los conductores de media tensión se les realizó pruebas de aislamiento con un Magger, las cuales resultaron negativas ya que indicaban que los conductores se encontraban a tierra o con un aislamiento de unos pocos ohms, razón por lo cual se procede a reemplazar en su totalidad todos los conductores de media tensión que van desde el generador hasta el transformador elevador en la subestación.

1.1.3 Revisión visual

El gabinete de control para los dos generadores, fue severamente dañado por el incendio, provocándole derretimiento y destrucción total de los equipos de control, como lo son los relés de protección, cincronoscopio, contactores de control. Este gabinete se va a reemplazar en su totalidad, los transformadores de potencial y corriente fueron destruidos completamente por lo que se reemplazaran.

El gabinete donde se encontraban las barras de acople de los dos generadores con el transformador de salida, sufrió daños internos por el fuego quemando todo el cableado de control, derritiéndole su aislamiento por lo que se debe de reemplazar, así mismo, el equipo de control fue derretido por lo que debe de desecharse.

La planta hidroeléctrica contaba con dos seccionadores para acople de cada uno de los generadores a una barra común de salida hacia el transformador elevador de voltaje, estos dos seccionadores fueron alcanzados por el fuego el cual los destruyó, dañando por completo el sistema de control de cada uno así como los seccionadores en sí. Las barras de acople común de cobre fueron sometidas a altas temperaturas que les ocasionaron deformaciones y se destruyo por completo sus aislamientos así como sus soportes de fijación, debiendo ser reemplazadas.

La excitatriz estática sufrió una explosión por corto circuito que destruyó el equipo eléctrico y electrónico de control, también sufrió daños por fuego como el derretimiento del cableado y destrucción de carbones, dejando a este equipo sin reparación.

Los tableros de servicios para la planta no fueron alcanzados por el fuego, pero el cableado de dichos servicios si, ya que hay flipones que se encuentran en su posición de disparo.

1.1.4 Resistencia de aislamiento para cableado de potencia

Todo aislamiento de cables viene diseñado para tolerar una cantidad de voltaje específica, sin que se produzca un arco eléctrico entre el conductor y cualquier elemento externo de él. Los cables que se están analizando deben de soportar una tensión mayor a 2400 voltios que es el voltaje de operación de los generadores instalados.

El aislante de los conductores actuales están diseñados para soportar 5000 voltios, pero el daño recibido por el fuego es demasiado, pudiéndose ver en algunos tramos el conductor principal por derretimiento de las diferentes capas de aislamiento. Se realizaron pruebas con un magger, a un voltaje de prueba de 1000 voltios, donde los resultados dan una resistencia de cero ohms con respecto al blindaje del cable, esto nos indica que existe un corto circuito entre el conductor principal y el blindaje o shield del cable. Podemos concluir entonces que el cable ya no se puede seguir utilizando como un conductor de energía en las instalaciones de la planta.

1.1.5 Tuberías y canalizaciones para cableado

La tubería utilizada para el cableado de media tensión, aunque fue alcanzada por el fuego, no sufrió daños considerables como para ser remplazadas por nueva tubería. Dentro de las instalaciones del cuarto de máquinas los tramos de tubería son pequeños por lo que se realizará una limpieza a dicha tubería, y se eliminará el cableado existente por completo para darles cabida a los nuevos conductores de media tensión.

La charola eléctrica metálica tipo escalera, se ve bastante deteriorada no solo por el incendio sino por la corrosión de óxidos que la han deteriorado en el transcurso del tiempo, las charolas de metal tienen la desventaja de producir calentamientos a los conductores instalados en ellas debido a la inducción magnética producida por la corriente que circula en los cables, debido a estas razones se procederá a reemplazar la charola eléctrica existente.

1.2 Protecciones

Los dos generadores contaban con las siguientes protecciones:

- sobre voltaje
- bajo voltaje
- potencia inversa
- corriente de neutros
- máxima intensidad
- baja frecuencia

Todas estas protecciones fueron destruidas por el incendio por lo que no se puede proceder a probarlas.

1.2.1 Revisión visual

Las instalaciones de la planta contaban con dos paneles de control, uno para cada generador, en los cuales se encontraba todo el sistema de control y los instrumentos de medición y sincronización. Ambos paneles fueron destruidos por el fuego, a tal grado que no les quedó equipo alguno que se pueda reparar o reutilizar, la pérdida de estos equipos fue completa por lo que se reemplazaran por nuevos paneles.

1.2.2 Prueba de disparo

Los interruptores de media tensión cuentan con un mecanismo de control que permite realizar pruebas de funcionamiento de disparo o apertura del interruptor, el equipo actual de la hidroeléctrica se encuentra destruido de tal manera que no se puede realizar este tipo de prueba, el funcionamiento del equipo es nulo completamente, así que se procederá a reemplazarlo en su totalidad.

1.2.3 Corriente nominal

La cantidad de corriente que circula por un equipo durante su operación normal es a lo que se le llama corriente nominal. El equipo actual de los generadores y los generadores, ya no se pueden poner en marcha debido a los daños ocasionados en el incendio por lo que no se puede medir su corriente nominal. Según se ha mencionado anteriormente, los generadores trabajaban a una capacidad de 2.5MVA, entonces su corriente nominal podemos encontrarla por medio de la fórmula de potencia:

$$i = \frac{P}{\sqrt{3} \times V \times FP}$$

$$i = \frac{2500000}{\sqrt{3} \times 2400 \times 0.8} = 751.76 \text{ Amp}$$

que es el valor de corriente nominal para cada generador.

1.3 Tableros

Estas son estructuras metálicas que albergan las protecciones en general de potencia o de control, los equipos eléctricos y electrónicos para el control de la maquinaria o algún proceso y de los cuales salen los conductores para alimentar o controlar algún equipo.

1.3.1 Revisión visual

Como ya se mencionó anteriormente, los tableros de control y los interruptores fueron destruidos por el incendio y los cortocircuitos que se produjeron. La planta cuenta con un tablero principal de servicios y otros dos que se han agregado con el tiempo debido a la falta de espacio físico dentro del tablero principal. Dichos tableros no sufrieron daños por fuego, pero éstos van a ser reacondicionados con sus circuitos para dejar en uso solamente uno, e instalar dos nuevos. También se procederá a una revisión de los cableados con los que cuenta, ya que algunos breakers se encuentran en su posición de disparo por cortocircuito o sobre corriente.

1.3.2 Desbalance de cargas

Un sistema trifásico desbalanceado puede provocar que se disparen algunas protecciones del sistema, y si este desbalance es demasiado y el conductor neutro es de muy poca ampacidad, entonces puede producirse un sobrecalentamiento en dicho conductor, o hasta el deterioro del mismo por sobrepasar su capacidad de conducción. Para el caso de la planta se hará una identificación de la distribución de los circuitos ya instalados para hacer un estudio de la corriente en cada fase en las barras del tablero, y determinar si se requiere algún movimiento de cargas para mejorar el consumo de corriente en cada una de las fases.

1.3.3 Toma de datos

En funcionamiento quedará un tablero marca General Electric, trifásico con barras de 150 amperios y 24 polos. Éste tablero quedará disponible para circuitos únicamente de iluminación y tomacorrientes para uso del cuarto de máquinas. Los servicios auxiliares de los generadores serán trasladados a tableros nuevos.

1.4 Transformadores

Los transformadores que podemos encontrar en la hidroeléctrica son:

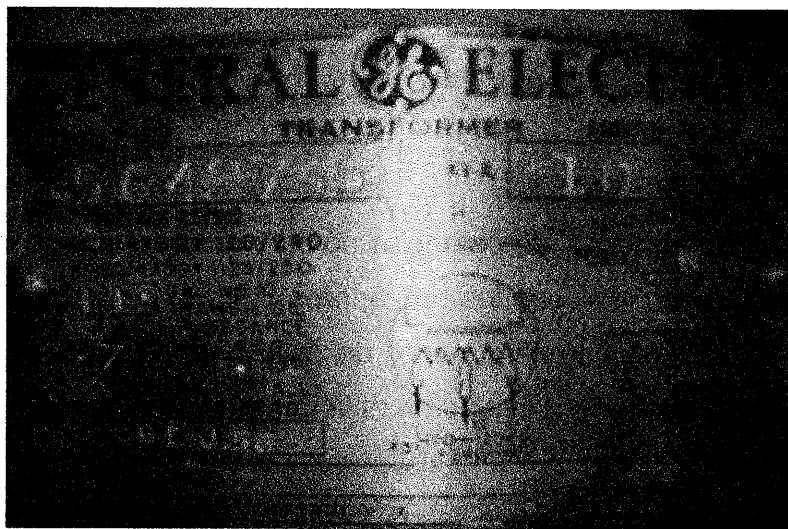
- Transformadores de potencia
- Transformadores convencionales de distribución con secundarios de baja tensión
- Transformadores de medición
- Transformadores de protección.

1.4.1 Toma de datos nominales

El transformador principal de potencias no cuenta con placa de datos, pero según información recopilada con los operadores de la planta y una inspección visual tenemos, que es un transformador de 5MVA de potencia, trifásico, de gran volumen de aceite, con un voltaje en el lado de baja tensión de 2.4kV y en el lado de alta tensión de 69kV. Tiene sistema de enfriamiento de aceite natural y radiadores en tres de sus cuatro lados frontales, sus bushing de conexión tanto del lado de alta como el de baja tensión se encuentran sobre el transformador.

Para el área de servicios auxiliares de los generadores se instalarán tres transformadores monofásicos para formar un banco de transformadores trifásicos, este banco trifásico tendrá una capacidad de 30kVA. Su conexión es delta en el lado de alta tensión y delta en el lado de baja tensión, y son transformadores con sus embobinados sumergidos en aceite, y con voltajes de conexión de 2400/4160Y – 120/240 voltios, su placa de datos se muestra a continuación.

Figura 1. Placa de datos de un transformador monofásico de distribución.



Fuente: Fotografía por Rony Hernández, "El Salto"

1.4.2 Chequeo general

El transformador de potencia se encontraba en funcionamiento en el momento del accidente, y en forma superficial no presenta daño alguno, tampoco presenta fuga de aceite, sus aisladores tampoco presentan daño ni ruptura y los conductores en el lado de baja como el de alta tensión no presentan ningún daño como derretimiento del conductor o pequeños cortocircuitos. Se desenergizó y desconectó por completo el transformador y se realizaron pruebas de aislamiento para chequear que internamente se encontrara en buen estado. La información de estas pruebas será presentada mas adelante en el texto así que nos limitaremos en decir que dichas pruebas resultaron satisfactorias, por lo que se procedió a reconectar y hacer pruebas de funcionamiento, y de esta manera reestablecer los servicios básicos de la planta.

1.5 Red de tierras

La red de tierras es un elemento de protección tanto del equipo como del personal humano. Una buena red de tierras debe proporcionar un circuito de baja impedancia para la circulación de las corrientes a tierra, debe permitir la interrupción de las corrientes a tierra por medio de relevadores, debe de evitar que se produzcan diferencias de potencial entre distintos puntos para no poner en peligro al elemento humano y dar mayor confiabilidad y continuidad al servicio eléctrico.

1.5.1 Análisis de la red de tierras existentes

Un sistema de tierra sirve para limitar el voltaje a tierra de un equipo o para facilitar la operación de los dispositivos de protección contra sobrecargas, y así como para protección del personal a descargas eléctricas. A esta red de tierras se debe de conectar los neutros de los aparatos, los pararrayos, los cables de guarda, las estructuras metálicas y en general todas aquellas partes metálicas que deben de estar a potencial de tierra.

El sistema con que cuenta la hidroeléctrica es un sistema de tierra radial. Este sistema consiste en varios electrodos a los cuales se conectan las derivaciones de cada aparato. El espacio físico de la planta es pequeño por lo que las distancias de los conductores de tierra son también pequeñas lo que hace que el sistema radial sea la opción del sistema actual de la planta.

1.5.2 Física y técnicamente en qué condiciones se encuentra la red de tierras

El sistema de la red de tierras de la planta está formado por un conductor de cobre sin forro alguno calibre 500MCM, éste conductor sirve para colocar a un potencial de cero voltios las estructuras metálicas de los generadores, los paneles de los seccionadores, la charola de conducción de cables de media tensión y su tubería. Este cable de tierra no sufrió daños por el incendio por lo que se mantendrá el cableado existente para todos los equipos ya mencionados y los nuevos por instalar.

Para obtener una resistencia baja en la red de tierras, originalmente se instaló un electrodo de cobre directamente en el río que pasa a la par de la sala de máquinas, esto proporciona una superficie húmeda al electrodo y reduce la resistencia óhmica en la red. El valor de resistencia que se pudo medir manteniendo desenergizada la hidroeléctrica fue de 1.1Ω que es un valor aceptado, recordando que el valor requerido para una red de tierras es como máximo de 5Ω .

1.6 Iluminación

La iluminación es un elemento indispensable para la actividad humana, y se requiere una cantidad de iluminación para realizar determinada actividad, y aunque se podría pensar que entre mayor iluminación es mejor, esto no es siempre válido, pues la excesiva iluminación puede dificultar algunas tareas, por lo que se debe disponer de la cantidad de iluminación adecuada de acuerdo a la tarea a realizar en dicha área.

1.6.1 Revisión visual

El cuarto de máquinas tiene una forma rectangular de 10 metros de ancho por 30 metros de largo por 7 metros la parte más alta y cuenta con 10 luminarias de mercurio y tres de tipo industrial fluorescentes. Esta planta generadora de energía eléctrica no es una instalación donde se realicen trabajos minuciosos, el equipo es de tamaño grande por lo que podemos aclarar que no es requerida gran iluminación en el área.

Para el área de los túneles de cableado que cuentan con una altura de 2 metros por 1.5 metros de ancho y unos 7 metros de largo (dos corredores iguales), se cuenta con iluminación suficiente. Tiene instaladas 4 lámparas tipo industrial a lo largo de los dos corredores, esta es una área donde el trabajo a realizar es con equipos grandes, no requiriendo de actividades o trabajos minuciosos. Estas son las áreas que constituyen el cuarto de máquinas.

1.6.2 Características de las lámparas y luminarias

Las lámparas con que cuenta las instalaciones actuales de la planta son 3 de 2x90w tipo industrial fluorescentes y 10 luminarias tipo campana de 175w de vapor de mercurio para montaje en techo en todo lo largo del cuarto de máquinas. Las luminarias tipo campana están ubicadas formando dos filas de ellas a lo largo de la planta con una separación de 5 metros entre ellas y 3 metros de separación de las paredes laterales a una altura de 6 metros. Con esta distribución de las luminarias cada lámpara debe de iluminar un área de 7m x 6m a nivel de piso, ésta es una superficie pequeña para el tipo de luminaria y condiciones de distribución, por lo que se obtiene una cantidad de iluminación un poco alta.

Estas luminarias disponen de un balastro multivoltaje pero con un voltaje de operación de 220 voltios, su reflector de color blanco tiene la forma de una campana achatada sin difusor, donde el bulbo queda expuesto sin protección alguna. Su capacidad para reflejar la luz es del 85% y de proporcionar luz directa es del 15%, por lo que se puede concentrar una mayor cantidad de luz en un área determinada.

Las lámparas de 2x90w se encuentran instaladas a lo largo del cuarto de máquinas y solo son utilizadas durante el día como refuerzo a la luz natural que ingresa a la instalación, en días nublados, con esto se evita encender las lámparas de vapor de mercurio y reducir el consumo de energía, así como también obtener solo la iluminación necesaria dentro del cuarto de máquinas. Su reflector es parabólico de color blanco con balastro electromagnético y alimentación en 120 voltios, el tipo de tubo que utiliza es T12.

El área de túneles cuenta con 4 luminarias fluorescentes de 2X40 w instaladas, dos por cada túnel. Estas lámparas son tipo industrial con reflector parabólico de color blanco, sus balastos son electromagnéticos con voltaje de operación de 120 voltios y los tubos que utiliza son T12. La capacidad de reflejar la luz por medio de su reflector es del 60% y de proporcionar luz directa del 40% por lo que no se puede direccionar hacia espacios pequeños la luz que es emitida.

1.6.3 Textura y colores de techos, pisos y paredes

El techo del cuarto de máquinas es de lámina acanalada de color blanco, este es un color que favorece la reflexión de la luz del techo hacia abajo, las paredes son de color hueso, lo cual ayuda a la reflexión de la iluminación y no opaca el ambiente dentro del cuarto, estas paredes cuentan también con ventanas de vidrio transparente permitiendo el ingreso de luz natural durante el día.

El piso es una terminación de concreto alisado de color corinto y esto si oscurece el ambiente, pero esto es nivelado con la cantidad de luminarias instaladas en el cuarto de máquinas, y tomando en cuenta que esta área se puede considerar como de tareas de visión ordinaria y operación de máquinas automáticas, y que no requieren de una visión fija y permanente.

2 CÁLCULO E INSTALACIÓN DE EQUIPO NUEVO

2.1 Canalizaciones de cableado

Dentro de cualquier tipo de construcción se debe de considerar un espacio físico para la ubicación final de los cables que transportaran la energía de un lugar a otro, este espacio físico puede ser por medio de tuberías o canaletas para cableados. Una consideración muy importante que no se debe de pasar por alto es, que ni las tuberías ni las canaletas deben de ser ocupadas en el 100% de su área por la totalidad de los cables, ya que esto provocará que existan mayores pérdidas por calor y por inducción electromagnética.

Figura 2. Bandeja de aluminio de 30x10 cm.

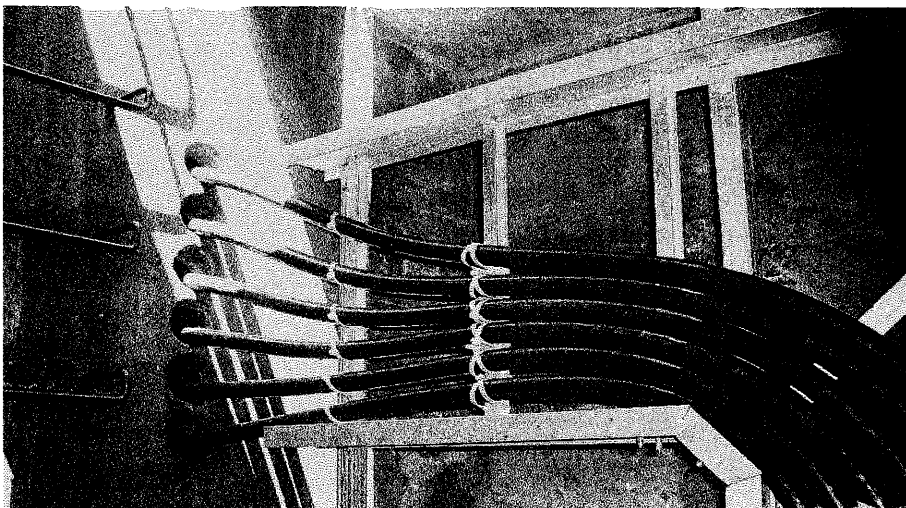


Fuente: Fotografía por Rony Hernández, "El Salto"

2.1.1 Bandeja para cables de potencia

Antiguamente solo se disponía de canaletas o bandejas metálicas con alto contenido ferroso, esto provoca un camino fácil para la inducción magnética producida por la corriente circulante de los cables, aumentando las pérdidas en el cable por éste mismo efecto. Si el material con el que se fabrican las canaletas es de materiales no ferrosos, esto produce que el flujo magnético ya no tenga un camino donde desplazarse con facilidad, dispersándose en el medio donde se produce. Las canaletas seleccionadas para ser utilizadas en las instalaciones eléctricas de la hidroeléctrica para los cables de potencia son de tipo escalera de aluminio de alta resistencia, que no contribuirán a las pérdidas en los conductores por flujos magnéticos. Se utilizarán canaletas de dos diferentes medidas, una de 60x10 centímetros y la otra de 30x10 centímetros.

Figura 3. Bandeja de aluminio de 60x10 cm. de área transversal.



Fuente: Fotografía por Rony Hernández, "El Salto"

Obsérvese el detalle del final de la bandeja (fig. 3), en esta condición no se puede utilizar una bandeja de menor tamaño ya que dificulta el cableado y lo expone a daños.

Dentro de la canaleta de 30x10 centímetro se instalarán 6 conductores de 400mm² de conductor y con un diámetro exterior total de 47.6mm, esto nos da un área total de los conductores de 10677mm². Si la comparamos con el área total de la canaleta que es de 30000mm², solo se utilizará el 35.6% del área disponible. En la canaleta de 60x10 centímetro se instalarán 6 conductores que dan un área total de 10677mm² que comparado con el área disponible de la canaleta solo se utilizará el 17.8%. Esto nos garantiza que el cable no tendrá pérdidas adicionales debidas a efectos por calentamientos o por inducción de flujos magnéticos.

Un aspecto que se debe de tomar muy en cuenta para la selección de canaletas, es que para este caso, los cables que se van a instalar son poco flexibles y poco manejables en espacios pequeños, razón por la cual aunque se esté ocupando poca área disponible, no es recomendable utilizar mas del 75% de dicha área, y preveer espacio disponible para futuras instalaciones o remodelaciones.

2.1.2 Tubería para cables

Las tuberías existentes son galvanizadas y empotradas en concreto, después de una revisión y limpieza no se les encontró daños como para ser reemplazadas, su diámetro es de 3 pulgadas.

Según el NEC, en una tubería de 3 pulgadas de diámetro se puede instalar hasta tres conductores 750MCM para bajos voltajes. Instalar un solo conductor de media tensión en una tubería de 3 pulgadas es lo indicado debido al aumento del diámetro exterior, por el aislante para dicho voltaje, por lo que podemos concluir que no es necesario reemplazar las tuberías ya existentes.

Se utilizará tubería galvanizada de $\frac{3}{4}$ " en campo, para la instalación de conductores de 3x12AWG y 3x10AWG, un conductor por tubería. El conductor de mayor calibre no llega a cubrir el 90% del área disponible de la tubería, por lo que la instalación es adecuada, con la limitante que en el futuro ya no se podrá instalar más cables en dichas tuberías.

2.2 Conductores

Es el medio por el cual se transporta la energía eléctrica de un lugar a otro de una forma muy eficiente. Los conductores a utilizar son de cobre para baja tensión y de cobre para media tensión.

2.2.1 Cableado de potencia

De acuerdo a la capacidad de 2.5MVA de los generadores y como hemos visto anteriormente, necesitamos un conductor que tenga la capacidad de transportar 752 amperios por fase.

El cable a utilizar en este proyecto será un conductor para media tensión de 5000/8000 voltios con aislamiento EPR y Shield al 100%, las características del cable según el fabricante *Aetna Insulated Wire*, se muestran en la tabla I.

Tabla I. Características de cable.

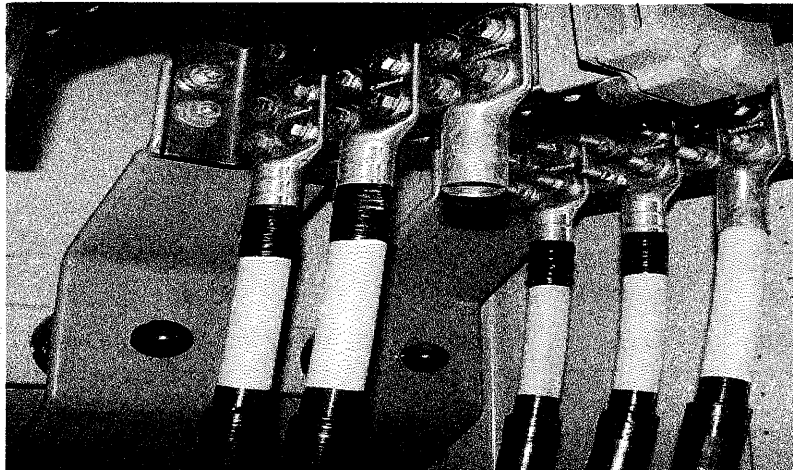
Size	# of strands	Nominal O.D.	Insulation	Jacket	Over Insulation	Overall	Ampacity
kCMIL		inches	Mils	Mils	inches	inches	40°C amb
750	61	0.91	115	80	1.19	1.51	665

Fuente: Especificaciones de conductores, www.aetnawire.com, pág. 49.

Un solo conductor de 750KCMIL no es suficiente para conducir la totalidad del amperaje producido a 2.5MVA, razón por la cual se instalarán dos conductores por fase, dejando capacidad para cubrir la totalidad de generación de energía de cada uno de los generadores.

Como se mencionó anteriormente el caudal de la presa no tiene la capacidad para mantener en operación a los dos generadores al máximo de su capacidad al mismo tiempo, razón por la cual se instalarán 3 conductores por fase desde la barra común hasta el transformador elevador en la subestación como se aprecia en la figura 4.

Figura 4. Terminación de los cables de media tensión.



Fuente: Fotografía por Rony Hernández, "El Salto"

Otro conductor de potencia utilizado es el que alimenta el transformador de excitación de 75kVA, este es un conductor para 15kV con aislamiento XLPE y Shield al 100%, las características del cable según el fabricante *Phelps Dodge*, se muestra en la tabla II.

Tabla II. Características del cable.

Size	Conductor Diameter	Insulation Diameter	Total OD	Total Weigth	Free air 40C Temp
AWG	mm	mm	mm	kg/km	Amp
2	6.9	17.3	25.7	880	195

Fuente: Conductores de media tensión, www.phelpsdodge.com, pág. 1.

Este conductor está sobre dimensionado para los 18 amperios que consume el transformador en el primario, pero fue seleccionado por ser el de menor calibre fabricado para conductores de media tensión y por su disponibilidad en el mercado.

2.2.2 Cableado de mando y control

Llamaremos cables de control, en forma general, al conjunto de cables que alimentarán los circuitos de medición, control y protección en baja tensión. Las características principales de los conductores de control son: conductores Powerflex para instalaciones en charolas y aislamiento para 600 voltios capaz de soportar agua, aceite y altas temperaturas. En las instalaciones de mando y control las corrientes no son mayores a los 10 amperios por lo que se utilizará conductores de calibre 12AWG para la mayoría de instrumentos y 10AWG para los transformadores de corriente que tienen una relación de 1200 a 5.

Un procedimiento que no debe de olvidarse en la instalación de cables de control es, que deben de ser instalados por separado de los cables de media tensión, ya que la inducción producida por estos cables puede provocar ruido en los cables de control, haciendo accionar de manera errónea protecciones o dar lecturas incorrectas. Un efecto más perjudicial podría darse si el cableado de control se instala muy cerca de barras conductoras de media o alta tensión, ya que éstas no cuentan con los blindajes que traen los conductores de media o alta tensión, las barras pueden inducir voltajes no deseados, los cuales podrían dañar equipos o provocar un funcionamiento incorrecto de los mismos.

En el caso de la planta, se instalaran en campo los conductores de control dentro de tuberías galvanizadas de $\frac{3}{4}$ ", y por rutas independientes de las rutas de charola donde se instalaran los conductores de media tensión.

2.3 Instalación de equipos

2.3.1 Interruptor-seccionador al vacío

Este es un dispositivo eléctrico que permite realizar cierres y cortes de energía eléctrica bajo carga en condiciones normales, y en condiciones de cortocircuito. El voltaje de 2400 permite utilizar este tipo de interruptor, así como su tamaño compacto y el poco mantenimiento que requiere.

Este tipo de interruptor está construido con una cámara de material aislante donde se produce el arco eléctrico en la apertura o cierre del mismo, con dos extremos metálicos donde se encuentran los contactos, uno fijo y uno móvil, esto en un conjunto de tres unidades para formar un interruptor trifásico. Cuenta también con un par de mordazas para cada fase, unidas al interruptor, las cuales se unen a barras fijas, es por medio de estas mordazas que se puede acoplar y desacoplar el interruptor del gabinete para realizar mantenimientos. El mecanismo de funcionamiento proporciona el movimiento directo en cada una de las fases para mover el contacto inferior de los interruptores al vacío, desde una posición abierta a una posición cerrada por medio de un resorte y entonces de nuevo a la posición abierta por medio del mando.

Figura 5. Interruptor de potencia,



Fuente: Fotografía por Rony Hernández, “El Salto”

Como se puede observar en la figura 5 que es una vista posterior del Interruptor de potencia, se pueden apreciar las mordazas que engrapan con las barras.

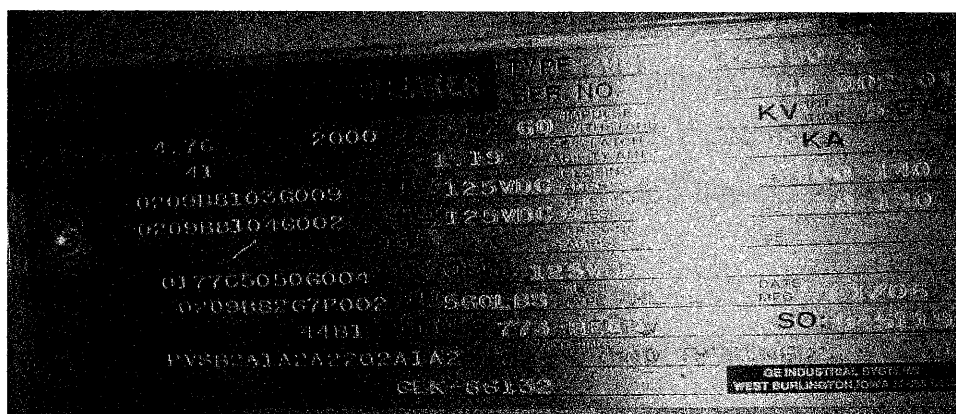
Este tipo de mecanismo almacena energía en el resorte y utiliza un motor con engranajes para cargarlo. Durante una operación de cierre, la energía almacenada en el resorte de cierre se utiliza para cerrar los contactos del interruptor al vacío, a la vez que se carga el resorte de apertura, la energía después guardada en el resorte de apertura abrirá los contactos durante una operación que así lo requiera. Las operaciones de cierre y apertura son controladas eléctricamente por el dispositivo de distribución *metalclad*. El resorte de cierre puede ser cargado manualmente, comprimiendo lentamente el resorte hasta cargarlo de energía suficiente para realizar el cierre de los contactos, este mecanismo de funcionamiento está disponible para cuando se quiera realizar un cierre y no exista corriente de control.

Se instalarán 3 interruptores con los que se controlará el ingreso y salida de los generadores a la red nacional. Dos de estos interruptores tienen una capacidad máxima de interrupción de 1200 amperios, designados uno para cada generador, y el tercero con una capacidad máxima de interrupción de 2000 amperios, es para acoplar o desacoplar uno o ambos generadores al transformador elevador de la subestación.

Los tres gabinetes vienen diseñados para ser acoplados entre ellos y deben de ser anclados al piso, para evitar deslizamientos o desajustes en los acoples.

Cada uno de los interruptores está formado por dos secciones extraíbles para mantenimiento, las cuales son el interruptor trifásico en sí y la otra que son los transformadores de potencial para medición. A continuación se muestra la placa del interruptor de potencia.

Figura 6. Placa de datos del interruptor de potencia.



Fuente: Fotografía por Rony Hernández, “El Salto”

2.3.2 Medidores de energía

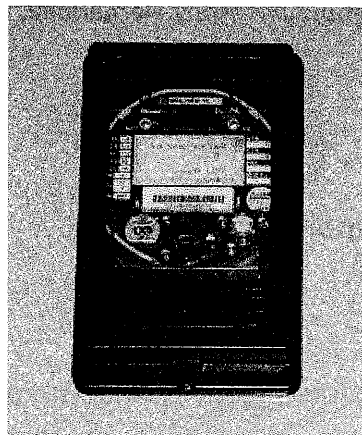
Cada uno de los generadores dispondrá de un dispositivo electrónico, que desplegará en una pantalla digital la energía producida por el generador. Esto lo hace tomando una muestra de corriente, a través de un transformador de corriente antes de llegar a su interruptor al vacío de cada generador, y tomando 120 voltios de un transformador de potencial conectado también antes de su interruptor al vacío.

Con los 120 voltios y la muestra de corriente el medidor de energía, el ION 8600 caja de conmutación, le proporcionará al operador de la planta una lectura de la energía en kilowatt-hora producida por cada generador.

Las funciones con que este medidor de energía quedará habilitado son:

- Visualización del voltaje de fase a fase
- Visualización de la corriente por fase
- Visualización de la potencia real, la potencia reactiva y la potencia aparente
- Visualización del factor de potencia
- Visualización de kilowatt-hora

Figura 7. Medidor de energía ION 8600



Fuente: Fotografía por Rony Hernández, “El Salto”

El medidor cuenta con las opciones de lectura de transitorios, de componentes simétricas, armónicas y comunicación de Ethernet para comunicación con servidores pero no quedaran habilitas.

2.3.3 Relevador electrónico de potencia del generador

La compañía General Electric dispone de una enorme cantidad de equipo especializado, entre todos estos equipos se encuentra el relevador electrónico de potencia *multilin SR-489*, el cual dispone de una pantalla digital por medio de la cual despliega la información de sus funciones. Físicamente dispone de puntos de conexión para sus entradas y salidas de información o para contactos auxiliares secos, también dispone de puertos de comunicación para enviar o recibir información desde una computadora.

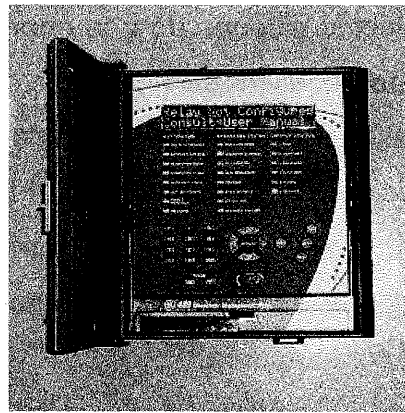
Desde un transformador de potencial conectado en las barras del generador con relación de 2400:120 V, le llega al SR-489 la muestra del voltaje generado, y desde transformadores de corriente ubicados en las barras del estator del generador con relación 1200:5 A, le llega al SR-489 la muestra de corriente entregada.

Con ambas muestras de corriente y voltaje, el relevador electrónico las procesa para desplegar:

- La corriente entregada por el generador por fase
- El voltaje generado entre fases

- La potencia en MW
- La potencia en MVA
- La frecuencia de la señal que se está generando
- La corriente de neutro

Figura 8. Vista frontal del relevador electrónico de potencia



Fuente: Fotografía por Rony Hernández, “El Salto”

El relevador dispone de indicadores luminosos por medio de led que le proporcionan al operador la siguiente información:

- Interruptor de generador abierto
- Interruptor de generador cerrado
- Secuencia negativa
- Corriente de tierra
- Pérdida de campo del rotor
- Disparo del interruptor
- Accionamiento de 3 contactos auxiliares
- Relevador en servicio

Todas estas son señales luminosas de presencia o ausencia de las mismas, pero se puede acceder a más información de cada una de las señales por medio de los botones de acceso, y desplegar dicha información en su display.

El interruptor de potencia del generador puede ser disparado por el SR-489 a través del relé 86 master *lockout*, debido a las siguientes condiciones:

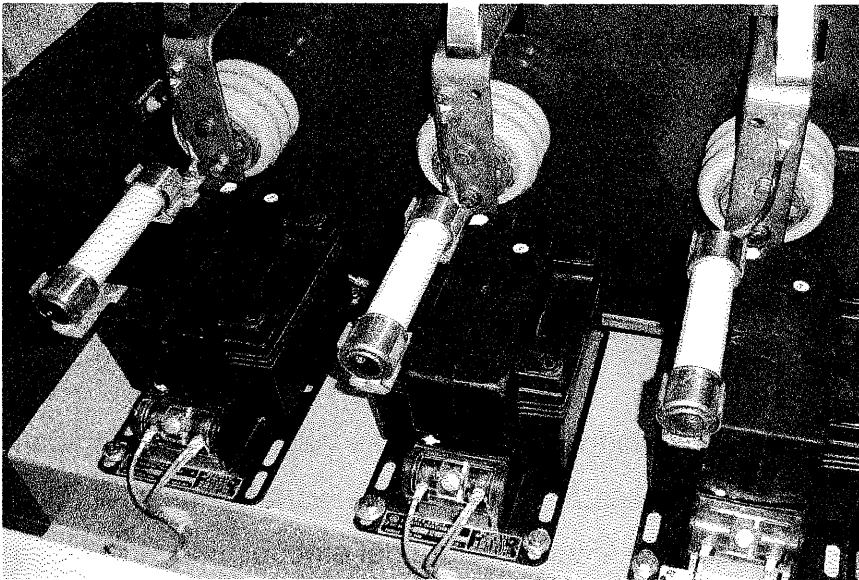
- Sobre voltaje en el generador
- Bajo voltaje en el generador
- Sobre corriente en el generador
- Potencia inversa
- Diferencial de voltaje en las bobinas del generador
- Desbalance de carga
- Sobre frecuencia
- Baja frecuencia
- Pérdida de campo

Los generadores instalados son máquinas viejas de aproximadamente 70 años, por lo que no se habilitará la totalidad de las funciones del relevador, tal es el caso de la medición de la temperatura del embobinado del generador, que en la actualidad es una medición tomada muy en cuenta para protección de equipos nuevos.

2.3.4 Transformadores para medición y protección

La función principal de los transformadores de medición o protección es reducir a valores no peligrosos y normalizados la tensión y la corriente de una instalación de media o alta tensión, evitando la conexión directa de los instrumentos y los circuitos de media o alta tensión, y así proporcionar una manipulación segura para un operador.

Figura 9. Transformadores de potencial desmontables ubicados en el panel del interruptor principal



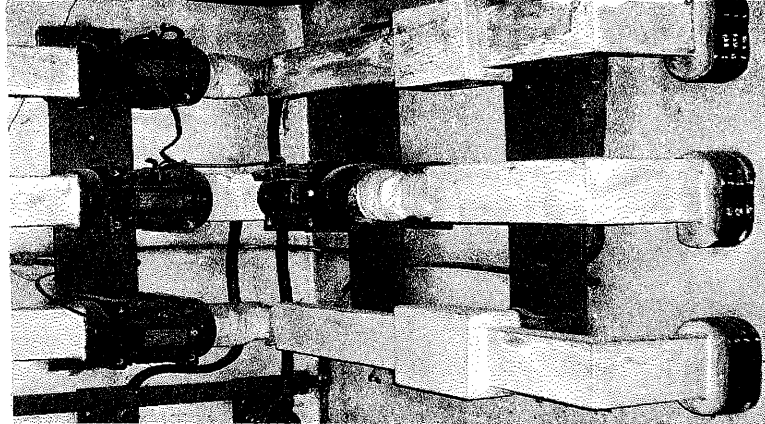
Fuente: Fotografía por Rony Hernández, "El Salto"

Los transformadores utilizados para medición y protección son transformadores de potencial y transformadores de corriente. Los de potencial utilizados son de la relación 2400:120 voltios, ya que 2400 voltios es el generado, y el tipo de conexión que tienen es de estrella-estrella.

Los transformadores de corriente tienen una relación de 1200:5 amperios para los generadores y de 2000:5 amperios para la salida de la barra común de los generadores, y en su conexión tiene un lado del secundario a tierra, esto es con el fin de proteger los instrumentos de protección o medición contra las altas tensiones en caso de falla en el aislamiento, también debe de tomarse en cuenta que los CT deben de permanecer con el secundario cerrado, ya sea por los instrumentos o por un simple puente, ya que de lo contrario se calienta el núcleo excesivamente y aparecen entre sus bornes sobretensiones peligrosas tanto para el personal como para el equipo. Estos transformadores fueron seleccionados de acuerdo al voltaje de generación y a la corriente máxima de los generadores individualmente y la corriente máxima de las dos unidades.

Los transformadores de potencial o corriente pueden ser usados para medición o protección, esto lo determina dependiendo a que instrumentos estén conectados. Para los CT se debe de tomar en cuenta las marcas de polaridad o flujo de corriente para obtener una lectura correcta, el no observar estas marcas puede ocasionar el accionamiento de protecciones y disparo de equipo, dando indicaciones erróneas de fallas.

Figura 10. Transformadores de corriente instalados en las barras del generador



Fuente: Fotografía por Rony Hernández, “El Salto”

2.3.5 Alarmas para monitoreo

Alarmas adicionales o independientes no se requirió instalar, las alarmas disponibles para el monitoreo del funcionamiento de los generadores son las que traen de fábrica los multilin y estas son:

- Interruptor de generador abierto
- Interruptor de generador cerrado
- Pérdida de campo del rotor
- Disparo del interruptor
- Accionamiento de 3 contactos auxiliares independientes para alarmas
- Relevador en servicio
- Secuencia negativa
- Corriente de tierra
- Diferencial de voltaje

Estos son los indicadores con los que va a disponer el operador para realizar las diferentes maniobras o procedimientos en los generadores.

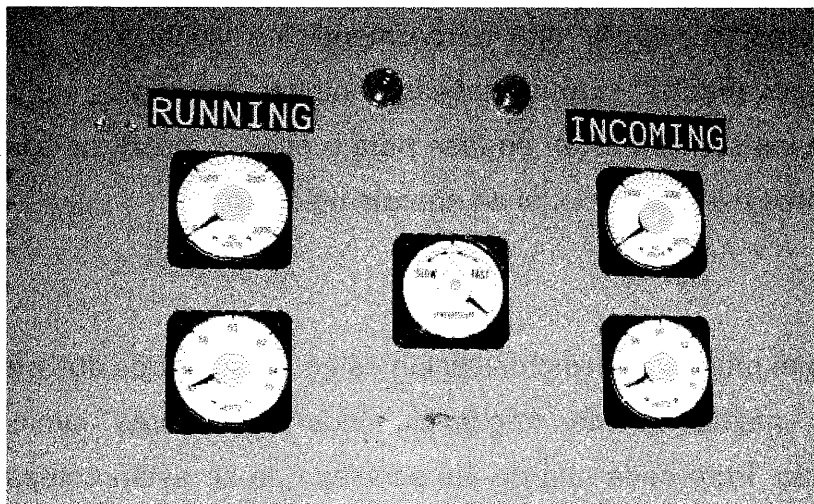
2.3.6 Ménsula de sincronización

Este elemento permite una retroalimentación visual a un operador con respecto a las variables que se desean controlar, las cuales son: frecuencia, voltaje y que las señales estén en fase para proceder a realizar la conexión de los generadores a la red nacional de energía eléctrica.

En todo el proceso de sincronización están involucrados dos medidores de voltaje, dos medidores de frecuencia, dos indicadores luminosos y el sincronoscopio. Para cada una de las señales que se están comparando, hay un medidor de voltaje y frecuencia con los que se tiene una comparación visual e inmediata de estos dos valores de cada señal. Los dos indicadores luminosos, uno por cada señal, se iluminarán en forma intermitente e independiente de acuerdo a su respectiva señal, estos dos indicadores darán una señal luminosa intermitente al unísono cuando las dos señales a medir estén en fase. El sincronoscopio nos da la indicación de qué tan en atraso o en adelanto se encuentra la señal del generador con respecto a la señal de la red de distribución de energía, donde el punto intermedio es el indicado para el acople de señales.

Una vez que los voltajes se hayan igualado justo con sus frecuencias, solo se deben de colocar en fase las señales y se puede proceder a realizar la conexión del generador a la red.

Figura 11. **Módulo completo de sincronización**



Fuente: Fotografía por Rony Hernández, “El Salto”

2.3.7 Frecuencímetro, voltímetro y amperímetro

Como se mencionó anteriormente, se dispondrá de dos medidores de frecuencia y dos medidores de voltaje, de éstos medidores los que están rotulados con running en la figura 11, mantendrán una lectura constante, y dicha lectura es tomada de la barra común, mientras que los otros dos medidores rotulados como incoming, darán lectura únicamente cuando se necesite ingresar uno de los generadores a la red de energía nacional.

Los multilin SR-489 de los generadores y el multilin 750, proporcionan adicionalmente el valor de voltaje y corriente por fase, desplegándolo en un display en forma electrónica, el medidor de energía ION 8600 también proporcionará una lectura visual de la corriente por fase y el voltaje de fase a fase. Estos dos elementos de medición proporcionarán las lecturas para estos parámetros.

2.3.8 Relevador de sincronismo

El *Basler 700V* es el equipo utilizado para realizar la sincronización en forma electrónica y cerrar un contacto de su relevador para dar autorización de cierre, para que el operador ingrese el generador a la red de energía. Este equipo opera independientemente del sincronoscopio.

El relevador de sincronismo hace una comparación del voltaje de la barra principal a través de un transformador de potencial, y el voltaje de uno de los generadores también a través de un transformador de potencial. De estas dos señales son comparados los parámetros de voltaje, frecuencia y ángulo de fase, cuando estos tres parámetros son iguales entonces el relevador manda a cerrar un contacto auxiliar de control, para que el operador pueda darle cierre al interruptor de potencial, si así lo cree conveniente.

Los medidores de voltaje y frecuencia del sincronoscopio le permiten al operador visualizar en forma directa el proceso de sincronización, después del cual el operador maniobrará una manija para cerrar el interruptor del generador.

El *Basler 700V* servirá como bloqueo o permiso para que pueda ser cerrado el interruptor del generador, y que no ocurra un error por parte del operador, ya que esto podría provocar daños serios al equipo o la destrucción total del mismo.

El cierre del interruptor principal de potencia del generador siempre se va a dar con la última instrucción por parte del operador, al girar la manija de cierre manual. Los generadores no pueden ser ingresados a la red de energía eléctrica de forma automática.

2.3.9 Accesorios de mando y conteo

Entre los accesorios de mando encontraremos manijas de una, dos y tres posiciones para realizar diferentes maniobras en el panel del interruptor del generador. La manija de *Lockout Relay*, sirve para resetear el interruptor y volver a colocarlo en posición de listo para su siguiente cierre.

Para el control del interruptor se cuenta con una manija llamada *Breaker Control*, con la cual se puede cerrar el interruptor del generador o bien dispararlo.

Antes de realizar el cierre del interruptor de uno generadores para acoplarlo a la red de energía se debe de realizar una regulación del voltaje del generador en cuestión, esta operación la realizará el operador con una manija con la cual aumentará (posición *raise*) el voltaje si fuera necesario o disminuirá (posición *lower*) el voltaje si se necesita disminuirlo. Con estas dos posiciones se le estará dando la instrucción al controlador de la excitatriz para que él aumente o disminuya la corriente de campo y así se pueda regular el voltaje en el generador.

El gobernador del generador es controlado desde una manija en el panel del interruptor de potencia. Como se mencionó anteriormente, la señal de tensión generada y la de la red deben de tener la misma frecuencia por lo que con esta manija se puede aumentar (posición *raise*) o disminuir (posición *lower*) la frecuencia del generador antes del cierre del interruptor de potencia.

Una característica de este equipo es que él no puede sincronizar a los dos generadores al mismo tiempo, razón por la cual en cada gabinete de cada generador existe una base para montar una única manija. Esta manija es desmontable para garantizar que en ningún momento un operador pueda realizar la sincronización de los dos generadores al mismo tiempo, con dos posiciones (*on-off*) ésta manija solo se puede extraer en la posición de apagado, por lo que se debe de desactivar la sincronización de un generador para luego trasladarse al otro equipo y realizar su sincronización.

En la estructura de la parte del frente del interruptor principal de cada generador se encuentra instalado un contador mecánico, el cual proporciona un registro de las aperturas que se han realizado al interruptor sin importar si son por fallas o aperturas programadas por el I.N.D.E.

3 EXCITATRIZ ESTÁTICA

3.1 Funcionamiento

Una excitatriz estática no genera ninguna señal de voltaje, ni mantiene flujos magnéticos remanentes para la formación inicial de un electroimán como la excitatriz dinámica, la excitatriz estática necesita de un voltaje de alimentación para su funcionamiento.

La excitatriz estática toma su alimentación de las barras del generador en 2400 voltios, este voltaje es reducido a 200 voltios a través de un transformador de 75kVA que llamaremos transformador de excitación. El voltaje del lado de baja tensión es distribuido a dos partes, una es el puente rectificador de corriente alterna atravesando por un supresor de picos de voltaje y un estabilizador de voltaje para protección del mismo rectificador. Este rectificador recibe 200 voltios en corriente alterna y proporciona 125 voltios en corriente continua los cuales son entregados al embobinado del rotor del generador.

La otra parte a la que es distribuido el voltaje del secundario del transformador de excitación es a otro transformador que reduce los 200 voltios de corriente alterna a 120 voltios, que son ingresados a un generador de pulsos. Internamente este generador crea una rampa ascendente y descendente de pulsos que son amplificados y entregados a los SCR del rectificador de señal, con los cuales se controla el flujo de corriente suministrada al rotor del generador, que es la que produce el campo magnético y éste a su vez es el que induce el voltaje en el estator.

3.2 Protecciones del regulador

El rectificador de señal alterna tiene instalado como protección termocoplas, que monitorean su temperatura enviando esta señal a un PLC que se encarga de desenergizarlo, y proporcionando una alarma de disparo por calentamiento del rectificador.

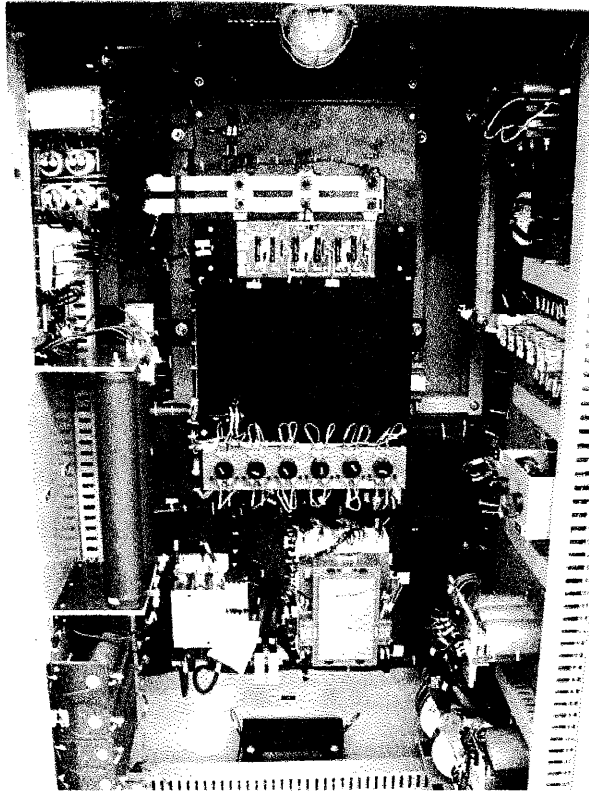
Otro dispositivo de protección es un supresor de picos de voltajes conectado a las líneas que alimentan el equipo de la excitatriz estática, acá se obtiene protección para todo el equipo en sí. A la entrada del rectificador se encuentra un regulador de voltaje (modulo *clipper*), que proporciona un voltaje estable al rectificador.

Un interruptor con bobinas de sobrecorriente de precisión está instalado a la entrada del rectificador, éste permite desenergizarlo si la corriente excede de 190 amperios, y reportará su respectiva falla por sobrecorriente.

El regulador recibe una muestra del voltaje generado y se mantiene monitoreándola para garantizar que no exista una variación de mas-menos un hertz en la frecuencia y que no exista un incremento de un 10% en el valor del voltaje generado. Si los valores de frecuencia y voltaje exceden estos límites el regulador procederá a estabilizarlos a los valores establecidos, 2400V y 60Hz, pero si el problema persiste procederá a eliminar la excitación y por ende sacar del sistema de energía al generador.

También dispone el regulador de limitadores de voltaje y corriente de excitación. El valor nominal del voltaje de excitación, que es de 125 voltios DC es ingresado al programa de la excitatriz y constantemente monitoreado a la salida del regulador, y enviado como señal de retroalimentación al limitador de voltaje, el cual mandará a disparar la excitación si el valor programado es excedido. El valor nominal de la corriente de excitación también es ingresado al programa, y constantemente monitoreado a la salida del regulador para ser enviado como señal de retroalimentación al limitador de corriente, y éste mandará a disparar la excitación si el valor programado es excedido.

Figura 12. Excitatriz estática



Fuente: Fotografía por Rony Hernández, “El Salto”

Un incremento del 10% tanto en el valor programado del voltaje de excitación como el valor programado de la corriente de excitación, que tenga una duración de 45 segundos o más provocará que la excitatriz sea disparada y no exista excitación alguna. En la figura 12 se muestra la fotografía de la excitatriz estática instalada en la planta, mostrando su componente principal el rectificador de señal

Debido a que el regulador no cuenta con disipadores de calor grandes, trae incorporados dos ventiladores que serán accionados por termocoplas que monitorean la temperatura del regulador, estos ventiladores le inyectan aire directamente a la estructura del regulador para disminuir su temperatura. El voltaje de alimentación de los ventiladores es de 220Vac con fusibles de protección de 1 amperio.

3.3 Interruptor de campo

Este es el interruptor principal que permite energizar o desenergizar la alimentación principal de la excitatriz y es nombrado como 41. Este es controlado por todo el proceso de programación y puede recibir una señal de disparo por una o varias de las protecciones mencionadas anteriormente del regulador. La corriente que es capaz de soportar los contactos de este interruptor es de 275 amperios.

Su función principal es cortar la corriente de campo del rotor del generador debido a una condición anómala al funcionamiento normal de la excitatriz, principalmente que exceda el valor de corriente nominal de campo, o por un disparo del interruptor de potencia del generador. También puede cortar la corriente de campo cuando así lo requiera un operador.

3.4 Instrumentos de medición

La excitatriz estática no dispone de instrumentos de medición externos, sino que en su lugar toma una muestra de voltaje a través de un transformador de potencial y una muestra de corriente a través de un transformador de corriente, ambas muestras extraídas del generador, son ingresadas a transductores de voltaje, frecuencia, corriente y potencia electrónicos los cuales se encargan de la medición necesaria para el correcto funcionamiento de la excitatriz.

Los medidores con que cuenta la excitatriz son desplegados en una interfase hombre-máquina en forma electrónica, en donde se puede observar:

- El voltaje generado
- El voltaje de excitación
- La corriente generada
- La corriente de excitación
- La potencia real y reactiva del generador
- La frecuencia del voltaje del generador

Toda esta información puede ser observada por el operador en la pantalla digital de la interfase en un ambiente Windows de fácil acceso.

3.5 Transformador de excitación

Este transformador es tipo seco con voltaje en el primario de 2400 voltios y en el lado del secundario de 200 voltios de señal alterna. Toma su voltaje de alimentación de las barras del generador y alimenta a la excitatriz con 200 voltios. Dispone de un contactor en el lado del primario que puede ser disparado por un medidor de temperatura, que monitorea constantemente la temperatura de los embobinados del transformador, también cuenta con un extractor de calor que ventila los bobinados y mantiene la temperatura por debajo de los 45 grados centígrados.

La información de placa del transformador es la siguiente:

- Voltaje en el lado de alta tensión, 2400Vac
- Voltaje en el lado de baja tensión, 200Vac
- Su potencia es de 75kVA
- Corriente máxima nominal en el lado de alta tensión, 18 amperios
- Corriente máxima nominal en el lado de baja tensión, 217 amperios
- Su conexión en estrella aterrizada en el lado de alta tensión y delta en el lado de baja tensión
- Es un transformador trifásico
- Su frecuencia de operación es de 60 hertz

3.6 Equipos auxiliares

El panel de control internamente cuenta con iluminación, para una mejor visualización de equipos por parte del operador en el momento de un trabajo interno. El panel dispone de dos lámparas de bombillos fluorescentes de 20 watts, las cuales son accionadas por microswitch, instalados uno en cada puerta. Estos últimos cierran el circuito en el momento en que se abre alguna de ellas, tienen como protección un miniautomático de 10 amperios.

Para evitar que el equipo se deteriore por humedad provocada por el ambiente, el panel dispone de dos resistencias para calefacción, las cuales tienen como protección un bimetálico para sobre temperatura. Las resistencias son de 400 watts cada una, con un miniautomático de 10 amperios de capacidad de interrupción.

En el momento de estar operando la excitatriz, los equipos dentro del panel generan calor que debe ser extraído para evitar sobrecalentamiento. Para evitar esta situación el panel tiene instalados dos ventiladores, los cuales ingresan aire fresco del ambiente a través de unos filtros atrapa polvo, y de esa manera regular la temperatura interna del panel, su voltaje de alimentación es de 120Vac con un interruptor de capacidad de 6 amperios.

4 TRANSFORMADORES

4.1 Tipos de transformadores

En la planta generadora *El Salto* podemos encontrar transformadores de potencia y transformadores de medición. Se tiene un transformador de potencia de gran volumen de aceite trifásico, con ventilación natural y radiadores en tres de sus laterales de la cuba, que le sirven para eliminar el calor del aceite del transformador y por ende de los devanados del mismo. Este transformador cuentan con un espacio en la cuba que no tiene aceite dieléctrico, este espacio es llenado con nitrógeno el cual es un gas inerte y no permite la combustión, y ayuda para que cuando el aceite se caliente y se expanda no dañe la estructura de la cuba, y simplemente comprima el nitrógeno.

En la figura 13 se puede apreciar al lado derecho el transformador de potencia de 5MVA y al lado izquierdo los interruptores de línea.

Figura 13. Transformador de potencia de 5MVA.



Fuente: Fotografía por Rony Hernández, "El Salto"

El transformador cuenta con indicadores de nivel de aceite y de temperatura, y con una boquilla para la obtención de muestras de aceite cuando se requieren hacer pruebas. Sus conexiones son externas, tanto el lado de baja como el de alta tensión tiene sus *bushing* en la parte superior de la cuba. Este transformador es para intemperie, por lo que es completamente hermético.

Un transformador de potencia es un elemento esencial en la distribución de energía eléctrica, ya que las pérdidas en las líneas de transmisión (I^2R) son proporcionales al cuadrado de la corriente en la línea, mientras que el transformador al elevar el voltaje reduce proporcionalmente la corriente, esto se puede ver por la siguiente relación:

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{V_s}{V_p}$$

donde:

I_p, V_p = es la corriente y voltaje del primario

I_s, V_s = es la corriente y voltaje del secundario

El otro tipo de transformador que encontramos en la hidroeléctrica es el de medición, transformadores de potencial y de corriente monofásicos. Los transformadores de potencial reducen el voltaje a medir a un potencial que no sea peligroso de manipular por el equipo y por el operador, con un desplazamiento de la señal despreciable. Los transformadores de corriente reducen la corriente a valores más manejables por el equipo de control, permitiendo de esa manera obtener información de la fase en medición pero con el elemento humano fuera del alcance de los peligrosos altos voltajes.

4.2 Conexiones de transformadores

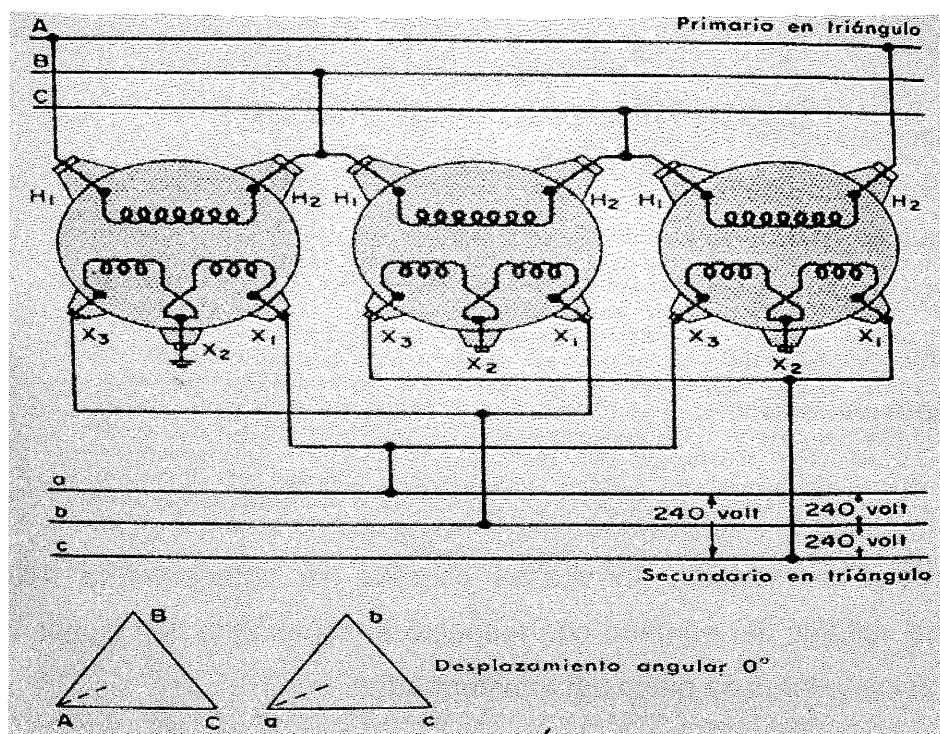
Las conexiones más comúnmente utilizadas son estrella-estrella, estrella-delta, delta-estrella y delta-delta. La conexión del transformador de potencia de la hidroeléctrica es delta-estrella, $69000Y-2400\Delta$ voltios.

Los transformadores de potencial tienen una conexión de estrella-estrella, donde ambos centros de las estrellas se encuentran aterrizados. Esta conexión es muy importante ya que no debe existir ningún desplazamiento de fases entre la señal del primario y la señal del secundario para que exista una buena sincronización, cuando los transformadores se usan para el proceso de sincronización de señales.

Se instalaron tres transformadores de distribución monofásicos de 10kVA para formar un banco de transformadores trifásico de 30kVA. Su placa de datos nos dice: $2400/4160Y - 120/240$, podemos interpretar entonces que la bobina de cada transformador monofásico dispone de un aislamiento capaz de soportar en sus dos extremos un voltaje 2400 voltios, pero si se conecta en estrella se puede obtener en los dos extremos de dos bobinas 4160 voltios como voltaje de línea a línea, en nuestro caso el voltaje entre línea y línea es de 2400 voltios por lo que la conexión del lado de alta tensión es en delta. En el lado de bajo voltaje se cuenta con una bobina partida en dos secciones iguales, si estas dos secciones se conectan en serie se obtendrá 240 voltios entre los extremos de la bobina, que es la conexión que se utilizará para formar el banco trifásico, de donde no se dispondrá de 120V monofásicos.

Los transformadores de corriente se conectan, su primario en serie con la línea de media tensión, circulando por él la corriente de dicha línea. El secundario se conecta un extremo como señal hacia el equipo y el otro extremo de la bobina a tierra, esto con el fin de proteger a los otros equipos o al personal de alguna descarga por ruptura del aislamiento.

Figura 14. Conexión de un banco trifásico con tres transformadores monofásicos



Fuente: Manual de transformadores de distribución, General Electric, pág. 26.

4.3 Pruebas de transformadores

Prueba de relación de vueltas o TTR: La relación de vueltas de transformación se define como la relación de vueltas de voltajes del primario con respecto al secundario, o la relación de corrientes del secundario con respecto al primario y viene dada por la ecuación:

$$RT = \frac{N_p}{N_s} = \frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p}$$

donde:

N_p = Número de vueltas del primario

N_s = Número de vueltas del secundario

V_p = Voltaje primario

V_s = Voltaje secundario

I_s = Corriente secundaria

I_p = Corriente primaria

La prueba de relación de vueltas consiste en determinar la relación numérica de voltajes del primario con respecto al secundario, los cuales debe coincidir con los valores de placa del transformador.

La polaridad es importante porque permite determinar el diagrama fasorial del transformador, ya sea como una comprobación del dato de placa o porque se perdió la placa del mismo.

Para realizar esta prueba se ha generalizado el uso del TTR (*Transformer Turner Ratio*). El principio de operación de este aparato es que cuando dos transformadores que nominalmente tienen la misma relación de transformación y polaridad, excitados en paralelo con la más pequeña diferencia en la relación de alguno de ellos, se produce una corriente circulante entre ambos relativamente grande.

El TTR es un instrumento práctico y preciso para analizar la condición de los transformadores en los siguientes casos:

- Medición de relación de transformadores nuevos, reparados o reconstruidos.
- Identificación y verificación de terminales, derivaciones y sus conexiones internas.
- Determinación y comprobación de polaridad y continuidad.
- Pruebas de rutina y detección de fallas incipientes.
- Valioso auxiliar en la determinación de las condiciones del transformador después de la operación de las protecciones primarias.
- Detección de espiras en corto circuito.

Esta prueba se debe realizar en todos los pasos posibles del cambiador de taps del transformador. Si la relación práctica difiere de la relación teórica en un valor mayor a 0.5% se deberá realizar mediciones de resistencia y temperatura a los devanados afectados y compararlos con los datos del fabricante del transformador o el protocolo de pruebas.

Si el porcentaje de error es mayor de 0.5% entonces existe un corto circuito en los devanados del transformador. El porcentaje de error se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\%Dif = \frac{\text{relación Teórica} - \text{relación Medida}}{\text{relación Teórica}} \times 100$$

Como regla general, se dice que el porcentaje de diferencia no debe ser mayor al 0.5%.

- Si la relación medida es mayor al dato de placa del transformador, el corto circuito se localiza en las bobinas de baja tensión, si por el contrario, es menor al dato de placa, el corto circuito se localiza en las bobinas de alta tensión.
- Si al realizar la prueba de TTR no se levanta la corriente de excitación significa que se tiene un devanado abierto.
- Si por el contrario la corriente de excitación es muy elevada y el voltaje de excitación no se levanta significa que se tiene un corto circuito severo en uno de los dos devanados.

A continuación presentaremos las pruebas de relación de vueltas del transformador de potencia realizadas para el tap de 69000 voltios.

Tabla III. Pruebas del transformador de potencia

49.7835	X1 - X0	X2 - X0	X3 - X0
H1 - H2	49.7715	49.7714	49.7712
H1 - H3	49.7712	49.7715	49.7711
H2 - H3	49.7712	49.7714	49.7714

Fuente: Rony Hernández

El valor teórico de la relación de vueltas del transformador es de 49.7839, con estos datos podemos calcular el porcentaje de diferencia de error con el valor más bajo obtenido en las mediciones y obtenemos:

$$\% Dif = \frac{49.7839 - 49.7711}{49.7839} \times 100 = 0.0257$$

Con este valor podemos concluir que la relación de vueltas del transformador se encuentra bien ya que el valor obtenido es menor al 0.5 como valor satisfactorio.

Métodos de pruebas de aislamiento con Megger: Básicamente existen tres métodos, los cuales son el método de tiempo corto o lectura única, el método de tiempo resistencia o absorción dieléctrica y el método de voltajes múltiples.

- Método de tiempo corto o lectura única: consiste en someter el equipo bajo prueba a una lectura rápida normalmente de un minuto y registrar la lectura final. Este método es bueno como una rutina rápida.

Generalmente, el valor de la resistencia aumenta con el tiempo y no se tiene definido en que momento se debe detener la prueba; sin embargo, esto tiene importancia para aquellos que estén interesados en el valor exacto en el momento de efectuar la prueba. Actualmente, es más importante la tendencia de las lecturas realizadas en forma periódica que el valor preciso.

Esta prueba se realiza durante sesenta segundos, con el fin de hacer comparaciones bajo una misma base con los datos de pruebas anteriores actuales y futuras.

Es recomendable que la prueba de aislamiento se realice en todo momento con un mismo aparato para poder hacer comparaciones.

- Método de tiempo-resistencia o absorción dieléctrica: este método consiste en realizar una prueba durante diez minutos tomando lecturas a intervalos de un minuto.

Su aplicación se basa en las características de absorción del aislamiento y proporcionan una buena referencia para evaluar el estado de los aislamientos en aquellos equipos con características de absorción notable, como las máquinas rotatorias y los transformadores de potencia, sobre todo cuando no existe historial de pruebas anteriores.

Al transformador de potencia de 5MVA se le realizaron las siguientes pruebas de aislamiento a 1000V en el lado de baja y 5kV en el lado de alta.

Tabla IV. Pruebas de aislamiento a transformador de potencia en el lado de alta tensión

	1min	2min	3min	4min	5min
H1 a tierra	200MΩ	650MΩ	850MΩ	1050MΩ	1225MΩ
H2 a tierra	170MΩ	575MΩ	830MΩ	1050MΩ	1180MΩ
H3 a tierra	290MΩ	635MΩ	905MΩ	1140MΩ	1305MΩ

	6min	7min	8min	9min	10min
H1 a tierra	1370MΩ	1450MΩ	1475MΩ	1475MΩ	1478MΩ
H2 a tierra	1290MΩ	1355MΩ	1395MΩ	1402MΩ	1405MΩ
H3 a tierra	1395MΩ	1460MΩ	1495MΩ	1525MΩ	1530MΩ

Fuente: Rony Hernández

Los datos anteriores nos muestran que el aislamiento del conductor que forman los embobinados del lado de alta del transformador se encuentran bien, no existe ningún cortocircuito de las espiras a tierra.

Tabla V. Pruebas de aislamiento a transformador de potencia en el lado de baja tensión

	1min	2min	3min	4min	5min
X1 a tierra	330MΩ	470MΩ	505MΩ	580MΩ	605 MΩ
X2 a tierra	340MΩ	470MΩ	525MΩ	600MΩ	615MΩ
X3 a tierra	335MΩ	465MΩ	520MΩ	595MΩ	618MΩ

	6min	7min	8min	9min	10min
X1 a tierra	610MΩ	612MΩ	612MΩ	613MΩ	612MΩ
X2 a tierra	618MΩ	618MΩ	620MΩ	620MΩ	620MΩ
X3 a tierra	622MΩ	622MΩ	622MΩ	622MΩ	622MΩ

Fuente: Rony Hernández

Los datos anteriores nos muestran que el aislamiento del conductor que forman los embobinados del lado de baja del transformador se encuentran bien, no existe ningún cortocircuito de las espiras a tierra.

Debido a que el transformador solo tiene expuesta una de las dos puntas de cada embobinado y sus conexiones son internas no se le realizó pruebas entre fases.

- Método de voltajes múltiples: este método tiene mayor relevancia en máquinas rotatorias que en transformadores. Se basa en el hecho que mientras se aumenta el voltaje se aumentan también los esfuerzos eléctricos sobre el aislamiento, al aproximarse o superar las condiciones de operación. La influencia de los puntos débiles del aislamiento se notarán cuando ocurra una baja pronunciada en el valor de la resistencia de aislamiento.

De los tres métodos el más recomendable es de tiempo resistencia o absorción dieléctrica ya que éste proporciona información cualitativa y cuantitativa del estado del aislamiento.

Para que el análisis comparativo sea efectivo todas las pruebas se deberán realizar al mismo potencial, las lecturas se corregirán a la misma base de temperatura, (normalmente 20° C) y en lo posible bajo las mismas condiciones y aparato.

5 SERVICIOS GENERALES

5.1 Centros de carga

Los centros de carga son tableros de armazón de metal que se utilizan para suministro de energía en determinados circuitos eléctricos, con un *breaker* de protección para cada circuito. A estos centros de carga se le pueden conectar solo circuitos trifásicos, circuitos monofásicos o una combinación de ambos, y esto dependerá de la cantidad de barras de las que disponga el centro de carga y el voltaje de las barras.

Para los servicios auxiliares de los generadores se instalarán dos centros de carga tipo industrial nuevos de igual capacidad, los datos técnicos de los tableros son:

- Las barras tienen una capacidad de 225 amperios
- Dispone de tres barras
- El voltaje máximo de aplicación a las barras es de 600 voltios
- Su número de polos es de 36

Las cargas instaladas en los dos centros de carga son:

- Bomba de agua unidad 1 de 10hp con una corriente de 32 amperios a un voltaje de 240 voltios trifásicos
- Bomba de agua unidad 2 de 15hp con una corriente de 40 amperios a un voltaje de 240 voltios trifásicos
- Bomba de aceite unidad 1 de 7½hp con una corriente de 25 amperios a un voltaje de 240 voltios trifásicos
- Bomba de aceite unidad 2 de 10hp con una corriente de 30 amperios a un voltaje de 240 voltios trifásicos
- AVR unidad 1 con un consumo de 7 amperios a 240 voltios trifásicos
- AVR unidad 2 con un consumo de 7 amperios a 240 voltios trifásicos
- Bomba de lubricación generador 1 de 5hp con una corriente de 15 amperios a un voltaje de 240 voltios trifásicos
- Bomba de lubricación generador 2 de 5hp con una corriente de 15 amperios a un voltaje de 240 voltios trifásicos
- Cargador de baterías de 9.5kW a 240 voltios trifásicos
- Motor de apertura y cierre de mariposa unidad 1 de 3hp con una corriente de 9.5 amperios a un voltaje de 240 voltios trifásicos
- Motor de apertura y cierre de mariposa unidad 2 de 3hp con una corriente de 9.5 amperios a un voltaje de 240 voltios trifásicos
- Motor gobernador unidad 1 de 1hp con una corriente de 4.5 amperios a un voltaje de 240 voltios trifásicos
- Motor gobernador unidad 2 de 1hp con una corriente de 5 amperios a un voltaje de 240 voltios trifásicos

Si sumamos la carga total de una sola unidad de generación tenemos:

$$32+25+7+15+40+9.5+4.5 = 133 \text{ amperios}$$

Estos son valores de placa, por lo tanto es el consumo máximo de corriente de cada equipo en condiciones normales de operación. Este valor de amperaje no supera el valor de corriente máxima de las barras de los centros de carga, quedándoles capacidad disponible a cada uno en corriente como en espacio físico para futuras instalaciones o remodelaciones.

Debido a que la carga que se va a instalar en estos centros de carga es trifásica, no se producirá un desbalance de cargas y los tableros solo dispondrán de un conductor de tierra y no de neutros.

5.2 Alimentación para bombas de lubricación

Para proporcionar una buena alimentación a las bombas de lubricación se debe de observar y basarse en la información grabada en la placa de datos de cada una de las bombas la cual se presenta a continuación:

- Bomba de lubricación generador 1 de 5hp con una corriente de 15 amperios a un voltaje de 240 voltios trifásicos, con un factor de potencia de 0.8

- Bomba de lubricación generador 2 de 5hp con una corriente de 15 amperios a un voltaje de 240 voltios trifásicos, con un factor de potencia de 0.8

A esta información se le debe de agregar la longitud del cable a utilizar para alimentar las bombas las cuales es de 15 metros para la bomba 1 y 9 metros para la bomba 2, más 3 metros del arrancador hacia cada motor. Debido a esta longitud tan corta podemos despreciar la caída de tensión en los conductores.

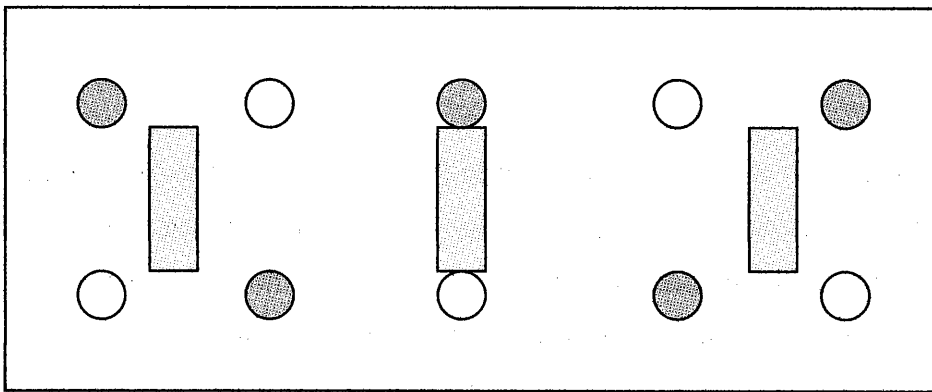
La selección del calibre del conductor la realizaremos por medio de la corriente de placa del motor, que es de 15 amperios trifásica. De tablas de capacidad de corriente para conductores seleccionamos el conductor calibre 12AWG, que soporta una corriente de 25 amperios con aislamiento que soporta temperaturas altas y soporta ser sumergido en agua sin producirse ningún cortocircuito o daños al conductor.

5.3 Sistema de iluminación y fuerza

La distribución de las luminarias dentro del cuarto de máquinas se muestra en la figura 15. Para las luminarias de alta intensidad de descarga de mercurio se propuso distribuir las en dos circuitos en forma de zigzag, esto con la intención de poder iluminar la mayor parte del cuarto de máquinas si en un momento dado existiera un cortocircuito o alguna otra falla en uno de los circuitos, y así disponer del otro para seguir operando o realizando actividades.

También se cuenta con tres luminarias fluorescentes de 2x90 watts que corresponden a otro circuito de iluminación completamente independiente, estas pueden ser usadas como respaldo si los dos circuitos de las luminarias de mercurio quedaran deshabilitados, aunque su uso principal es para aumentar la cantidad de iluminación dentro del cuarto de máquinas durante el día si éstos son nublados.

Figura 15. Distribución de luminarias



Fuente: Rony Hernández

En la figura 15 encontramos la distribución de luminarias dentro del cuarto de máquinas, donde los círculos representan las luminarias de mercurio tipo campana y los rectángulos representan las luminarias fluorescentes de 2x90 watts

Para los túneles que son dos corredores angostos de 7 metros de largo, tiene instaladas 4 luminarias de 2x40 watts, dos en cada corredor, conectadas todas en un solo circuito lo cual es suficiente pues el consumo en amperios por lámpara es de menos de medio amperio.

Entre los circuitos de fuerza se tiene uno que alimenta dos tomacorrientes dobles que se utilizan para cargadores de baterías, radios de comunicación y equipo de radio.

A lo largo de cada lado del cuarto de máquinas se encuentran dos circuitos de tomacorrientes con tres tomacorrientes cada uno, estos están disponibles para la conexión de equipos pequeños con alimentación en 120 voltios, tales como barrenos o pulidoras, las cuales pueden ser usadas para mantenimiento o reparaciones menores.

CONCLUSIONES

1. Los generadores con que cuenta la hidroeléctrica *El Salto* no recibieron mayor daño, por lo que se decide hacerle sus respectivas pruebas y mantenimiento para ponerlos en funcionamiento nuevamente. De las excitatrices dinámicas de los generadores una se dañó severamente pero la otra no, ambas eran máquinas muy antiguas y ya presentaban problemas en la regulación de la excitación, por lo que se decide reemplazarlas a las dos por excitatrices estáticas nuevas, fabricadas con equipo electrónico para obtener una generación de energía eléctrica más estable.
2. Los interruptores que se instalaron son de contactos encerrados en una cámara al vacío, su selección se hizo debido al voltaje de 2400 que van a manejar y una vez en funcionamiento estos interruptores no se requiere de ellos continuas maniobras de apertura y cierre. El mecanismo de apertura y cierre de los contactos de potencia es accionado por medio de almacenar energía en la compresión de resortes, que al momento de liberar dicha energía se obtiene una apertura o cierre de los contactos en una fracción de segundo. El vacío en el cual se encuentran los contactos extingue rápidamente el arco eléctrico producido en una apertura o cierre de los mismos.

3. En una planta de generación de energía eléctrica se requiere de un mínimo de equipo para operar y controlar la generación que es lo que solicitó el I.N.D.E, éste equipo es un medidor de energía, un equipo para sincronización, un relevador electrónico que monitoreará los parámetros principales de generación de energía para permitir el cierre o apertura del interruptor de potencia y un grupo de manijas para realizar operaciones del interruptor y generador en forma manual.
4. Con el medidor de energía dispondrán de la lectura de la energía producida en tiempo real y tener un historial de la cantidad de energía producida por cualquiera de los generadores.
5. Con el módulo de sincronización se monitorea que la señal de voltaje de la red eléctrica a la cual se unirá el generador y la señal de voltaje generada, tengan la misma frecuencia, la misma amplitud de voltaje y que se encuentre en fase ambas señales. Todo esto lo puede apreciar en medidores el operador para que después que se cumplan las condiciones mencionadas proceda a realizar el cierre del interruptor en forma manual y el generador quede conectado a la red de energía eléctrica.

6. El ingreso de los generadores a la red de energía eléctrica no se realiza en forma automática, por lo que se requiere siempre de un operador para ingresar algún generador. Esta operación se realiza por medio de manija, las cuales solo permiten la sincronización de un generador a la vez, y también permiten desacoplar de la red de energía cualquier generador si el operador así lo requiere.

7. El relevador electrónico de potencia para los generadores es un Multilin 489 que protegerá a los generadores de sobre y bajo voltaje en el generador, de sobre corriente en el generador, potencia inversa, diferencial de voltaje, desbalance de carga, sobre y baja frecuencia y por pérdida de campo en la excitatriz. Este relevador dispone de más protecciones pero debido a que las instalaciones son muy antiguas y no se dispone del equipo en campo necesario para habilitarlas se quedarán para futuras mejoras en la planta.

8. Los conductores de potencia para media tensión fueron seleccionados para soportar un voltaje nominal de 5000 voltios con aislamiento EPR y el shield con el que cuenta es del 100%. Se instalaron dos conductores 750 kCMIL por fase con capacidad de 665 cada uno para cubrir la totalidad de la potencia descrita por la placa de los generadores.

9. La canalización fue reemplazada por una de aluminio reforzado que no permite la conducción de campos magnéticos en ella, evitando las pérdidas por inducción en el cableado, esto mejora la calidad de las instalaciones.

10. Al transformador de potencia no se le encontraron daños superficiales por lo que se procedió a realizarle pruebas de relación de vueltas de transformación y pruebas de aislamiento al conductor que forma las bobinas. Por medio de estas pruebas podemos concluir que el transformador no sufrió daños internos y puede ponerse nuevamente en servicio.

11. El sistema eléctrico se instaló con tres interruptores al vacío de potencia, uno para cada generador y el tercero está instalado después de una barra común con capacidad para 2000 amperios. Para ingresar un generador a la red de energía eléctrica éste tercer interruptor debe de estar cerrado y la barra común energizada ya que la sincronización de cualquiera de los generadores se realiza tomando una muestra de la señal que se encuentra en la barra común y una muestra del generador a operar.

RECOMENDACIONES

1. Se debe cambiar la tubería instalada que va desde el transformador de potencia hacia el cuarto de máquinas, debido a que actualmente en un tubo se encuentra instalado un solo conductor de media tensión. Esto provoca que los campos magnéticos aumenten el calentamiento del conductor y provoquen mayores pérdidas, este efecto se reduce si se instalan las tres fases juntas.
2. El dispositivo de protección del generador que se instaló es el multilin, que es un aparato moderno y muy confiable, por lo cual vale la pena hacer una inversión para adquirir los sensores de protección del generador e instalárselos y así obtener el mayor rendimiento del equipo, debido que actualmente se quedaron funciones de protección sin uso.
3. Aumentar la capacidad de retención de agua de la presa debe de ser a futuro una opción, ya que de esa manera se aprovecha la capacidad total de la hidroeléctrica *el salto*, puesto que la producción de energía por éste medio es más barata que producirla con bunker o carbón, esto incluso ayudará a mantener costos relativamente bajos.

4. Ya que se realizó una mejora en las instalaciones y equipos de la planta y específicamente en el cuarto de máquinas, no se debe de olvidar la subestación de la planta. Se le debe de brindar mayor maniobrabilidad, para poder recibir energía, si así lo requiere, de cualquiera de las dos línea de transmisión que llegan a la misma, o entregar energía a cualquiera de dichas línea de transmisión, o incluso a ambas líneas.

5. La hidroeléctrica actualmente se encuentra operando con bastante equipo mecánico bastante viejo, se debe de implementar un estudio y chequeo constante de ese equipo, para reemplazándolo paulatinamente y no esperar a que simplemente colapse, ya que esto provocaría que la planta quede fuera de funcionamiento por largos períodos de tiempo, haciéndola poco rentable.

BIBLIOGRAFÍA

1. Bratu Serbán, Neagu. **Instalaciones Eléctricas.**
México. Ediciones Alfa Omega. 1992.
2. General Electric. **Manual de Transformadores de Distribución.**
3. Fink, Donal. **Manual de Ingeniería Eléctrica.**
Editorial McGraw-Hill.
4. Harper, Enrique Gilberto. **Manual de instalaciones eléctricas residenciales e industriales.**
México, Editorial Limusa.
5. Méndez Celis, Luis Alfonso. **Guía para el Diseño de Instalaciones Eléctricas.** Guatemala.1992.
6. Díaz Pablo. **Soluciones Prácticas para la Puesta a Tierra de Sistemas Eléctricos de Distribución.**
México D.F., Editorial McGraw Hill.
7. The power Engineering Education Committee. **Tutorial de Protección de Generadores Sincrónicos.**
8. The Power Engineering Education Committee. **Tutorial de Protección de Generadores Sincrónicos.**

QUESTION 1

1.1.1. The following table shows the number of people who visited the museum in each month.

Month	Number of people
January	120
February	150
March	180
April	200
May	220
June	250
July	280
August	300
September	280
October	250
November	220
December	180

1.1.2. The following table shows the number of people who visited the museum in each month.

Month	Number of people
January	120
February	150
March	180
April	200
May	220
June	250
July	280
August	300
September	280
October	250
November	220
December	180

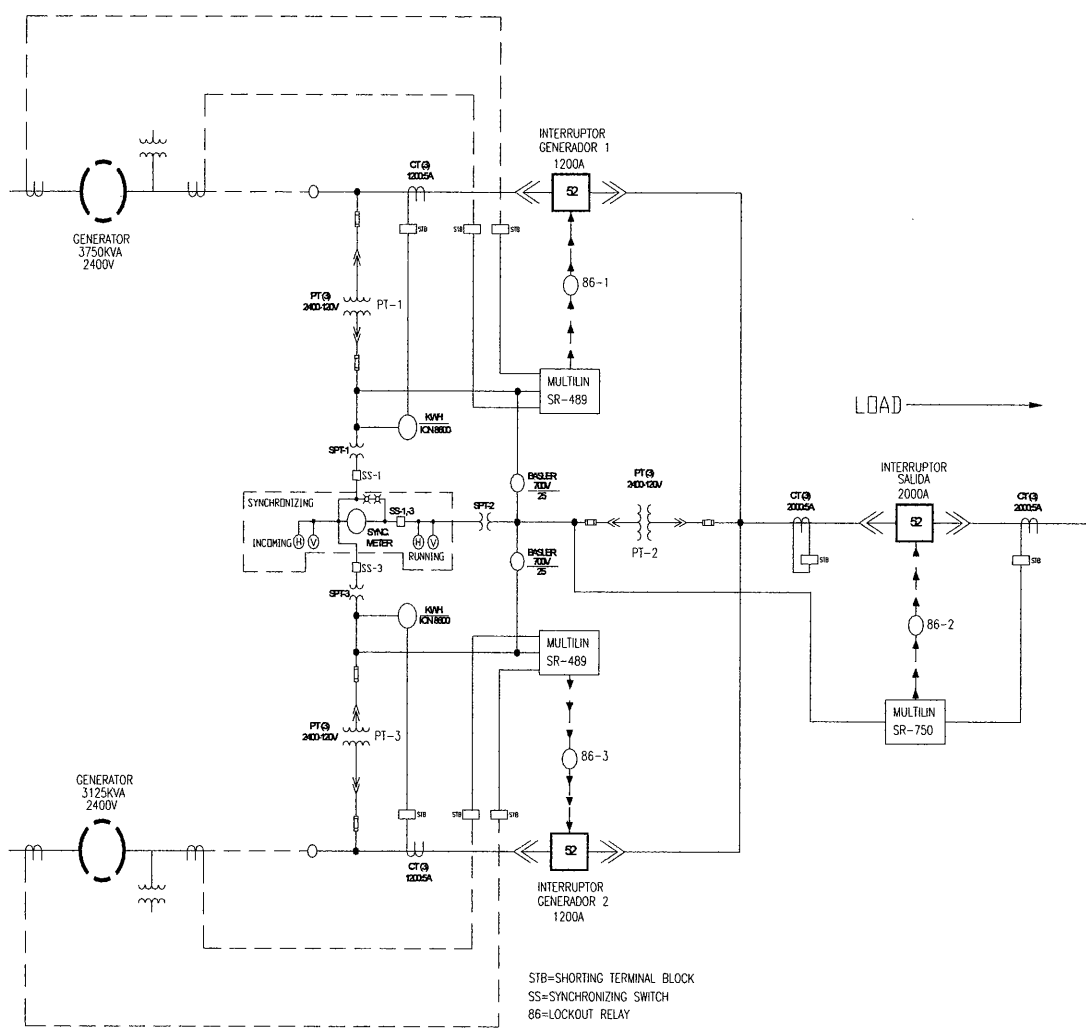
1.1.3. The following table shows the number of people who visited the museum in each month.

Month	Number of people
January	120
February	150
March	180
April	200
May	220
June	250
July	280
August	300
September	280
October	250
November	220
December	180

1.1.4. The following table shows the number of people who visited the museum in each month.

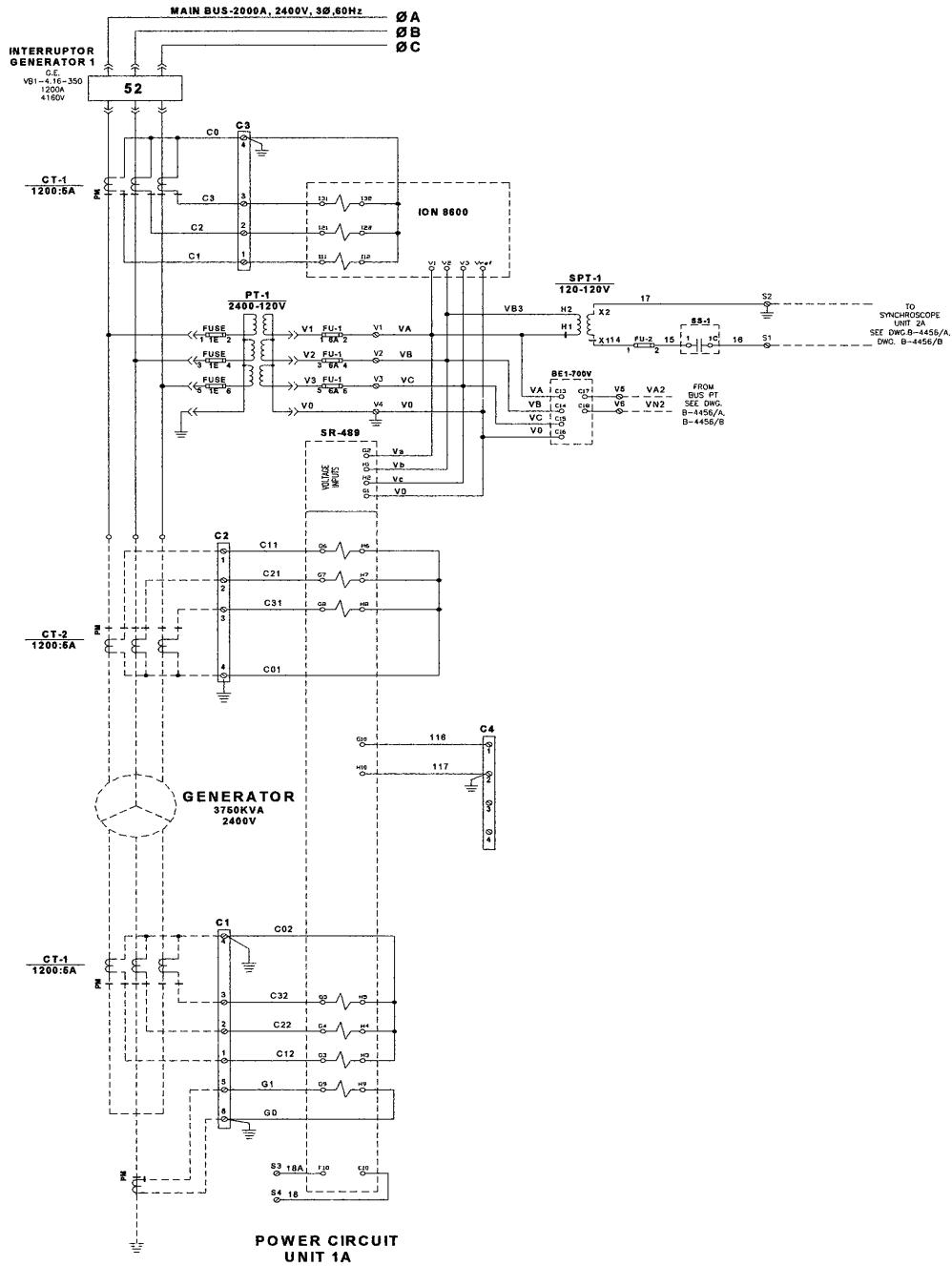
ANEXOS

Figura 16. Diagrama unifilar de la plata hidroeléctrica *El Salto*.



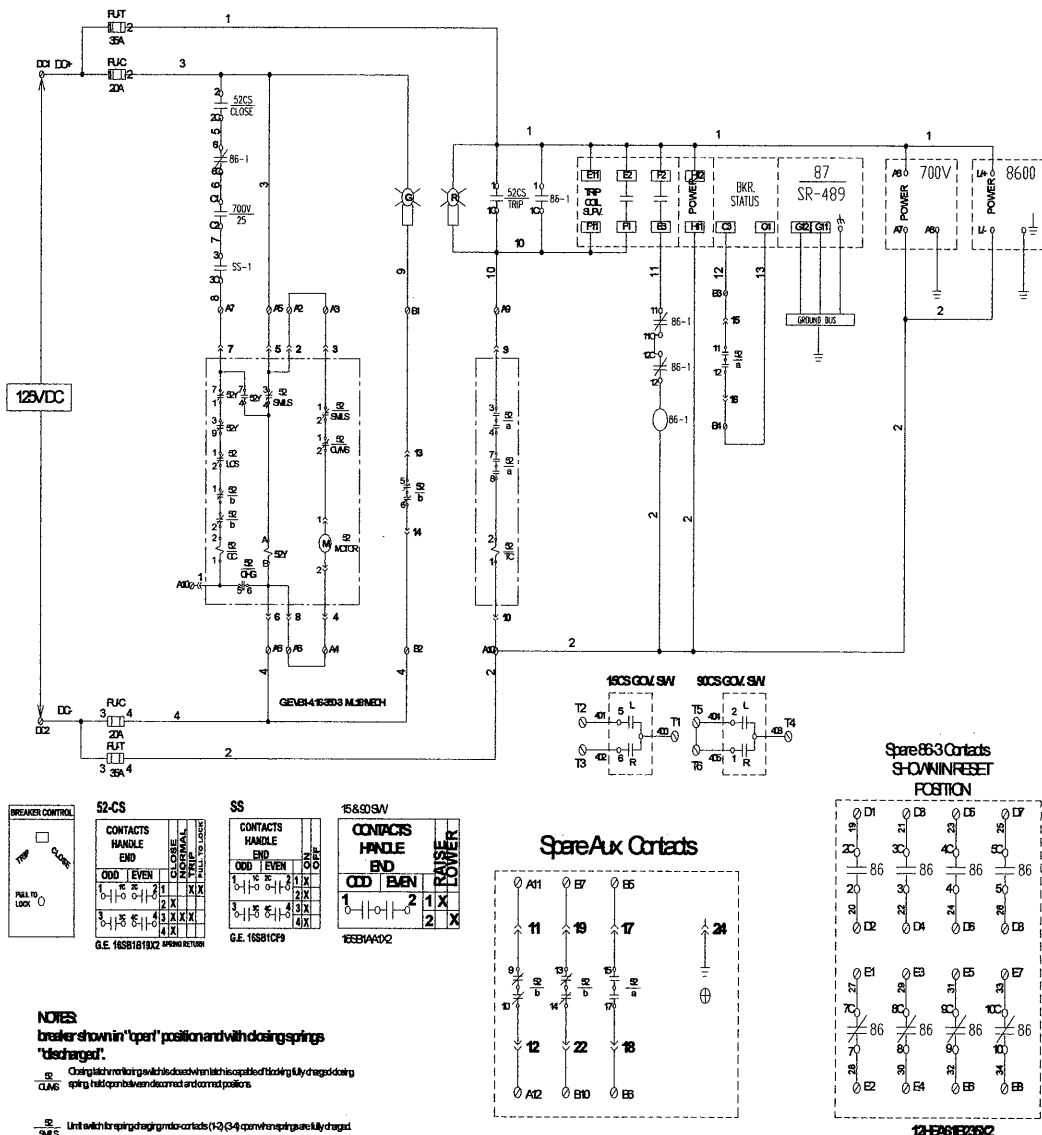
Fuente: **CISMA S.A.**, "Proyecto El Salto".

Figura 17. Circuito de potencia y control de la unidad generadora 1.



Fuente: CISMA S.A, "Proyecto El Salto".

Figura 18. Circuito de control de la unidad generadora 1.



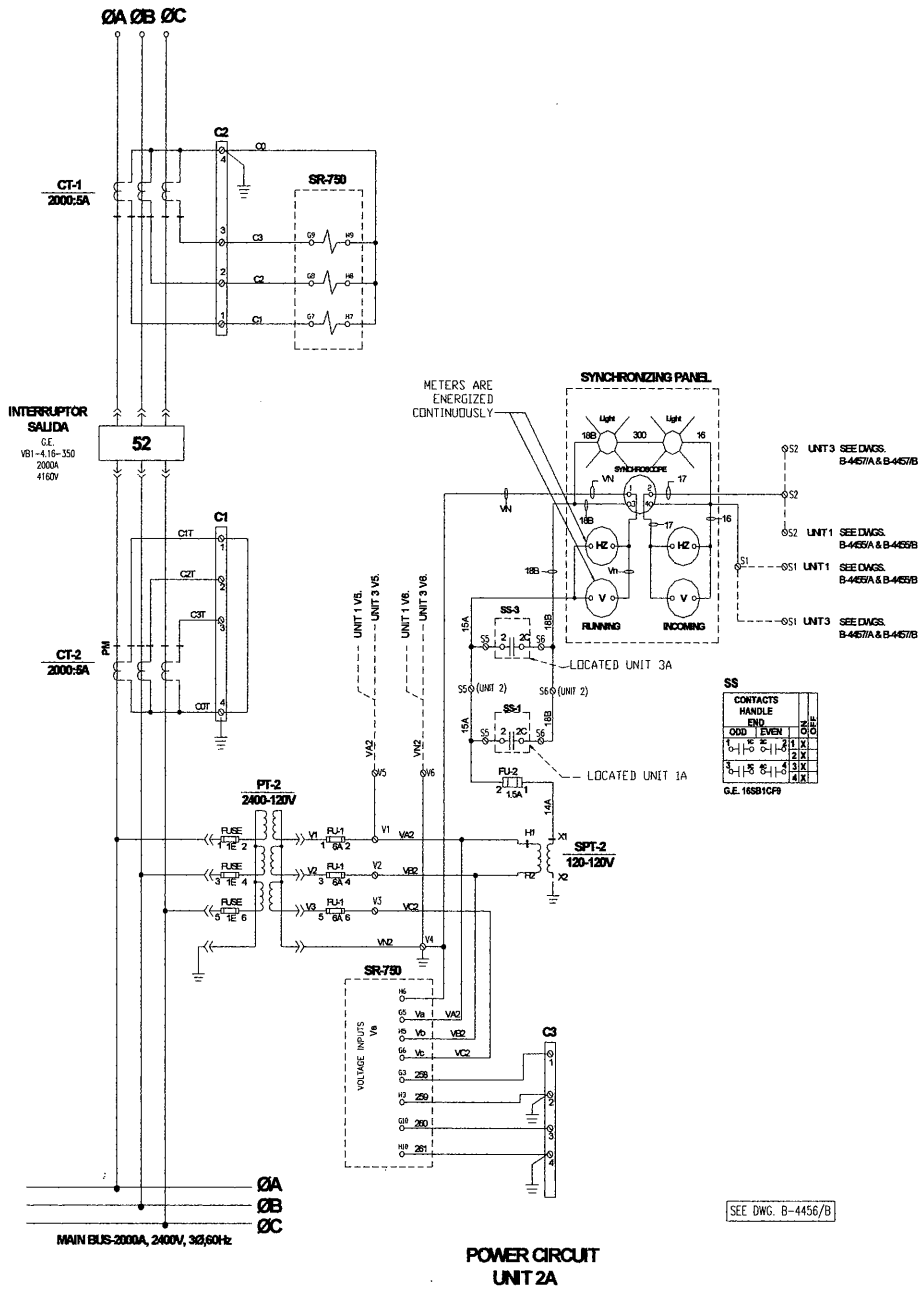
BREAKER CONTROL		52-CS		SS		16.8309V	
TRIP	CLOSE	CONTACTS	HANDLE	CONTACTS	HANDLE	CONTACTS	HANDLE
PULL TO LOCK		NO	NC	NO	NC	NO	NC
		1	2	1	2	1	2
		3	4	3	4	3	4

- NOTES**
- breaker shown in "open" position and with coiling springs "decharged".
 - Coiling spring not engaged when switch is closed. Do not pull up charged coiling spring until spring is decharged and contact position.
 - Unit switch for spring charging contacts (1-2, 3-4) can be spring-actuated.
 - Contacts decharged when spring is fully charged.
 - Spring release of contact is not released until spring is decharged.
 - At 6 pumps by power for charging on a substation command.
 - Tip latch holding switch decharged when latch is reset.
 - Grounding bus for inspection box only.

UNIT 1A/B-22-1/2 BREAKER CONTROL CIRCUITS GENERATOR 1

12-EP-612352

Figura 19. Circuito de control y sincronismo entre la barra común y las unidades generadoras 1 y 2.



Fuente: CISMA S.A, "Proyecto El Salto".