



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

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE REGISTROS  
EN TIEMPO REAL DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN  
PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA  
CENTRAL HIDROELÉCTRICA**

**Luis Roberto Grajeda Micheo**

Asesorado por el Ing. Luis Alfredo Grajeda Aldana

Guatemala, Septiembre de 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE REGISTROS  
EN TIEMPO REAL DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN  
PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA CENTRAL  
HIDROELÉCTRICA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**LUIS ROBERTO GRAJEDA MICHEO**

ASESORADO POR EL ING. LUIS ALFREDO GRAJEDA ALDANA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**INGENIERO MECÁNICO-INDUSTRIAL**

GUATEMALA, SEPTIEMBRE 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
VOCAL 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**

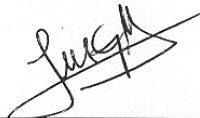
DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Jaime Humberto Batten Esquivel
EXAMINADOR	Ing. Esdras Feliciano Miranda Orozco
EXAMINADOR	Ing. Byron Gerardo Chocooj Barrientos
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

## 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:

### **IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE REGISTROS EN TIEMPO REAL DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica-Industrial, el 3 de septiembre de 2009.



---

Luis Roberto Grajeda Micheo

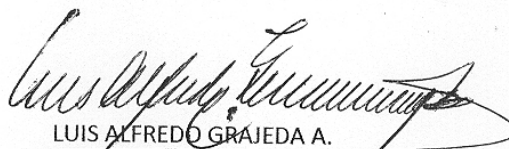
Cobán, A. V., 20 de mayo 2009

Ingeniero Francisco Gómez  
Director de Escuela Mecánica Industrial  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos  
Presente

Ingeniero Gómez:

Por este medio me permito dirigirme a usted, para hacer de su conocimiento que luego de haber leído y revisado, el contenido del trabajo de graduación titulado **"IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE REGISTROS EN TIEMPO REAL DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA"**; y desarrollado por el estudiante LUIS ROBERTO GRAJEDA MICHEO, Carné No. 2002 12163 cursante de la carrera de Ingeniería Mecánica Industrial; el mismo cuenta con mi aval y aprobación para continuar con su trámite correspondiente.

Sin otro particular, atentamente,



LUIS ALFREDO GRAJEDA A.

Ingeniero Mecánico Industrial

Col. No. 1930




UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Como Catedrático Revisor del Trabajo de Graduación titulado **IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE REGISTROS EN TIEMPO REAL DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA**, presentado por el estudiante universitario **Luis Roberto Grajeda Micheo**, apruebo el presente trabajo y recomiendo la autorización del mismo.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

  
Ing. César Augusto Akú Castillo  
Catedrático Revisor de Trabajos de Graduación  
Escuela de Ingeniería Industrial  
**INGENIERO INDUSTRIAL**  
**COLEGIADO No. 4,073**

Guatemala, agosto de 2009.

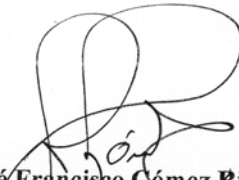
/mgp

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el Visto Bueno del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística del trabajo de graduación titulado **IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE REGISTROS EN TIEMPO REAL DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA**, presentado por el estudiante universitario **Luis Roberto Grajeda Micheo**, aprueba el presente trabajo y solicita la autorización del mismo.

  
Ing. José Francisco Gómez Rivera  
**DIRECTOR**

Escuela Mecánica Industrial



Guatemala, septiembre de 2009.

/mgp

Universidad de San Carlos  
de Guatemala

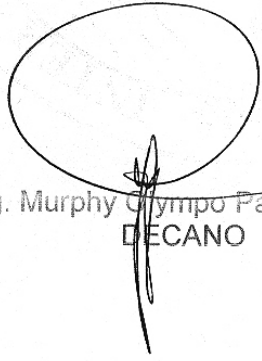


Facultad de Ingeniería  
Decanato

Ref. DTG.349.2009

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 en Ciencias y Sistemas, al trabajo de graduación titulado: **IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE REGISTROS EN TIEMPO REAL DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA**, presentado por el estudiante universitario **Luis Roberto Grajeda Micheo**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

  
Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos  
DECANO



Guatemala, septiembre de 2009

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A**

### **MIS PADRES**

Luis Alfredo Grajeda Aldana y Patricia Elizabeth Micheo de Grajeda, por brindarme su apoyo, confianza y amor incondicional en cada momento de mi vida; esta meta alcanzada es para ustedes.

### **MIS HERMANOS**

Juan Luis, Luis Alfredo y Luis Alejandro René, por estar siempre a mi lado para apoyarme y demostrarme su cariño día a día, no importando la distancia entre nosotros.

### **MIS AMIGOS**

Gracias por su amistad y apoyo moral, cuando más los necesité.

## **AGRADECIMIENTOS A**

### **MIS PADRES**

Por sus consejos dados, los cuales me han ayudado y guiado en todo momento, hasta el día de hoy.

### **MIS HERMANOS**

Porque cada uno es un ejemplo distinto a seguir, que me ha ayudado en los momentos difíciles.

## ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b>	VI
<b>RESUMEN</b>	VIII
<b>OBJETIVOS</b>	XI
<b>JUSTIFICACIÓN</b>	XIII
<b>INTRODUCCIÓN</b>	XV
<b>1. ANTECEDENTES GENERALES</b>	
1.1. Estructura de una Central Hidroeléctrica	1
1.1.1. Órganos estructurales	1
1.1.1.1. Presa	1
1.1.1.2. Desagües de fondo	2
1.1.1.3. Túnel de aducción	3
1.1.1.4. Casa de máquinas	3
1.1.1.5. Subestación	4
1.1.1.6. Líneas de transmisión	5
1.1.2. Variables de funcionamiento	6
1.1.2.1. Vibraciones	6
1.1.2.2. Temperatura	6
1.1.2.3. Entrehierro ( <i>Air-Gap</i> )	7
1.1.2.4. Descargas parciales	7
1.1.3. Equipo	7
1.1.3.1. Compuertas	7
1.1.3.2. Válvulas	8
1.1.3.3. Turbina	8
1.1.3.4. Generador	10
1.1.3.5. Transformador principal	10
1.1.3.6. Interruptores	12
1.1.4. Recurso humano	12
1.2. Descripción de un Sistema de registros de variables	15
1.2.1. Concepto del registro de variables	15
1.2.2. Estructura del Sistema del registro de variables	16

1.2.2.1.	Descripción general	16
1.2.2.2.	VARIABLES DE MONITOREO	16
<b>2.</b>	<b>DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA</b>	
2.1.	Evaluación del Sistema de registro de variables	19
2.1.1.	Determinación de variables	19
2.1.2.	Interpretación y manejo de variables	20
2.2.	Características del sistema	21
2.2.1.	Concepto	22
2.2.2.	Alcance general	22
2.2.3.	Componentes	23
2.3.	Configuración	25
2.3.1.	Menú de configuración	25
2.3.2.	Navegación	26
2.3.3.	Cambios de la configuración	27
2.3.4.	Instalación del Modo de alarma específico	29
2.4.	Evaluación del Recurso humano	31
2.4.1.	Estructura organizacional	31
2.4.2.	Definición de funciones	31
<b>3.</b>	<b>PROPUESTA DEL SISTEMA</b>	
3.1.	Introducción	35
3.2.	Descripción del equipo	35
3.2.1.	Turbinas	36
3.2.1.1.	Cojinetes	38
3.2.1.2.	Sistemas de enfriamiento	38
3.2.1.3.	Eje de turbina	39
3.2.1.4.	Acoplamiento turbina/generador	40
3.2.2.	Generadores	40
3.2.2.1.	Temperatura de cojinetes	41
3.2.2.2.	Sistema de enfriamiento	42
3.2.2.3.	Centricidad rotor-estator	43
3.2.2.4.	Eje-ménsulas generador	44
3.2.3.	Protección	45

3.2.3.1.	Protección eléctrica	45
3.2.3.2.	Protección mecánica	51
3.2.4.	Excitación	52
3.3.	Variables de monitoreo	53
3.3.1.	Vibraciones	53
3.3.2.	Descargas parciales	58
3.3.3.	Temperatura	61
3.3.4.	<i>Air-Gap</i> (Entrehierro)	65
3.4.	Manejo y procesamiento de datos	68
3.4.1.	Paneles de Control ( <i>Hardware</i> )	68
3.4.2.	Estación de Ingeniería ( <i>Software</i> )	69
<b>4.</b>	<b>IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE OPERACIÓN</b>	
4.1.	Alarmas	75
4.1.1.	Estado de medición y alarma	75
4.1.2.	Registro de alarmas	76
4.1.3.	Señalización de alarmas	76
4.2.	Operación	76
4.2.1.	Manejo de alarmas	76
4.2.2.	Clasificación de alarmas	77
4.3.	Sistema de protección	78
4.3.1.	Protección preventiva	78
4.3.1.1.	Tensión transitoria	78
4.3.1.2.	Auto excitación	78
4.3.1.3.	Regulador del voltaje automático	78
4.3.1.4.	Sobre temperatura	79
4.3.1.5.	Vibraciones	79
4.3.2.	Protección en caso de fallas	80
4.3.2.1.	Protección diferencial	80
4.3.2.2.	Corto-circuito a tierra	80
4.3.2.3.	Carga desequilibrada	80
4.3.2.4.	Sobre-voltaje	81
4.3.2.5.	Corriente del eje	81
4.3.2.6.	Retorno de energía	81

4.4. Sistemas de excitación	82
4.4.1. Excitatriz rotante DC	82
4.4.2. Excitatriz sin escobillas	82
4.4.3. Excitador estático	82
4.5. Capacitación del personal	83
4.5.1. Personal operativo	83
4.5.2. Personal de mantenimiento	84
<b>5. PRUEBAS Y DETERMINACIÓN DE PROBLEMAS</b>	
5.1. Procedimientos de verificación	85
5.1.1. Inspección del bastidor	85
5.1.2. Chequeo del monitor del sistema	85
5.1.3. <i>LEDs</i> de alarmas	85
5.1.4. Niveles de alarma	85
5.1.5. Medición de la tensión del monitor	86
5.1.6. Verificación de la tensión en el módulo de señal	86
5.1.7. Medición de la tensión en el terminal	86
5.2. Piezas de recambio recomendadas	87
5.2.1. Conjunto panel frontal	87
5.2.2. Conjunto circuito del monitor	87
5.2.3. Puentes de recambio	87
5.2.4. Fusible principal	87
5.2.5. Módulo de entrada de alimentación	87
5.2.6. Transformador	88
5.3. Especificaciones del equipo	88
5.3.1. Entradas	88
5.3.2. Adaptación de señal	88
5.3.3. Alarmas	88
5.3.4. Pantallas	88
5.3.5. Controles	89
5.3.6. Salidas	89
5.3.7. Valores nominales de los contactos del rele	89
5.4. Fallas mecánicas	90
5.4.1. Vibración del devanado del estator	90

5.4.2. Sistema de acuñamiento de la ranura del estator	91
5.4.3. Fuerzas magnéticas debido a un entrehierro no uniforme	93
5.4.4. Resonancia de la reacción de inducido	93
5.4.5. Sistema de presión del núcleo del estator	94
5.4.6. Cojinetes	94
<b>CONCLUSIONES</b>	97
<b>RECOMENDACIONES</b>	99
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	101

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES FIGURAS

1. Sección de la Presa Chixoy	2
2. Paneles de control de la Casa de Máquinas, Planta Hidroeléctrica Chixoy	4
3. Sub-estación, Planta Hidroeléctrica Chixoy	5
4. Torres para las líneas de transmisión	5
5. Turbina, Planta Hidroeléctrica Chixoy	9
6. Generadores, Planta Hidroeléctrica Chixoy	10
7. Transformador principal	11
8. Cuadro de Navegación del sistema, Planta Hidroeléctrica Chixoy	27
9. Turbina Pelton, Planta Hidroeléctrica Chixoy	37
10. Tubería del Sistema de enfriamiento de las turbinas	39
11. Parte interna del Generador de la Planta Hidroeléctrica Chixoy	41
12. Sistema de enfriamiento de los generadores	43
13. Comportamiento de las curvas de vibración contra tiempo	54
14. Conexión termopar (FEM)	63
15. Conexión termopila	64
16. Comportamiento de las curvas de vibración del estator con relación al tiempo	90
17. Acuñaamiento de la ranura del estator	92



## TABLAS

I.	Datos técnicos de la presa de la Planta Hidroeléctrica Chixoy	1
II.	Dimensiones y cotas de los desagües de fondo de la presa, Planta Hidroeléctrica Chixoy	2
III.	Medidas de construcción para el túnel de aducción	3
IV.	Datos técnicos de las compuertas de la Central Hidroeléctrica Chixoy	8

## RESUMEN

En las empresas que poseen procesos de producción en línea, es de suma importancia estar monitoreando cada una de las etapas del proceso, con el fin de detectar a tiempo cualquier anomalía en el sistema. Con el afán de mantener en óptimas condiciones de operación cada uno de los equipos de producción, las empresas se han dado a la tarea de buscar nuevos y mejores métodos que satisfagan dicha necesidad.

La implementación, así como el desarrollo de nuevos métodos y/o técnicas, para tal propósito, de igual manera son de aplicación en Centrales Hidroeléctricas, en donde el proceso de producción, lo constituye la generación de energía eléctrica. Una de las técnicas o métodos que actualmente se vienen utilizando, lo constituye el de registros de variables en tiempo real. Es de esta manera, que se obtiene el registro de todos y cada uno de los parámetros críticos que están inmersos, dentro del proceso de producción; obteniendo una respuesta más inmediata y temprana ante cualquier eventualidad que pudiese presentarse durante el proceso, manteniendo así, una producción, continua, segura y eficiente.

Existen ciertas variables que son más críticas que otras dentro de los procesos de producción, por lo cual las mismas requieren de una intervención más eficiente e inmediata al momento de requerirse una reparación. Es con la ayuda de este sistema de monitoreo en línea que se logra, incluso antes de que se presente dicha falla. Este sistema de monitoreo además de permitir actuar antes de la presencia de las fallas, identifica cuándo y dónde es preciso la intervención del personal de mantenimiento para mantener funcionando en óptimas condiciones los equipos de producción.

Debido a que este sistema de monitoreo es permanente, genera información de manera constante, permitiendo tabular y/o graficar información, logrando obtener un banco de datos accesible y comprensible para cualquier miembro del personal operativo. Esta opción, es también una ventaja al momento de querer representar o analizar el comportamiento del equipo con relación al tiempo de producción. El sistema de monitoreo en tiempo real, puede ser utilizado como una herramienta

para visualizar el desgaste de los equipos, y así poder establecer un adecuado plan de mantenimiento preventivo para los equipos de producción.



## OBJETIVOS

### GENERAL

- ✓ Implementar un sistema de registros en tiempo real de las variables de operación que optimice el funcionamiento de una Central Hidroeléctrica.

### ESPECÍFICOS

1. Permitir conocer con exactitud la operación de todos los componentes del proceso dentro de sus límites de seguridad, implementando un Sistema de Registros de las Variables de Operación
2. Establecer el comportamiento del equipo de producción ante variaciones externas.
3. Anticipar en el tiempo, la intervención en el proceso, en el momento o en un futuro, ante síntomas o cambios en el funcionamiento en el proceso de producción.
4. Establecer el punto óptimo de operación con respecto a los costos de producción y eficiencia.
5. Permitir modelar las condiciones actuales de funcionamiento para desarrollar cambios sobre los futuros funcionamientos, estableciendo un diagnóstico.
6. Establecer y determinar la compatibilidad del estado de los parámetros operativos con las especificaciones técnicas actuales y las obligaciones contractuales de operación.
7. Conocer el estado de los equipos de producción con respecto a la estabilidad y a las reservas.



## JUSTIFICACIÓN

Con el alto crecimiento y avance de la tecnología en el mercado mundial, se hace de manera imperativa buscar nuevos métodos o sistemas que eleven el nivel de confiabilidad y eficiencia de todo proceso productivo, lo que conlleva la optimización en el uso del recurso, reducción de costos de producción y costos de mantenimiento y suministros de repuestos.

Sistemas como el que se desarrollará en el presente trabajo de graduación, es uno de los que de forma directa permite alcanzar este propósito, ya que a través de conocimientos precisos de los estados externos o internos del sistema de producción en cualquier tiempo (en línea) y bajo toda situación, logra alcanzarse en términos del incremento de la producción. Es decir, optimizar el recurso con beneficios directos de índole económica para la empresa.

La participación del profesional en la rama de Ingeniería es un elemento esencial y determinante, dentro del proceso de diseño, implementación y mejoras a sistemas de registros de variables, debido a que el mismo conlleva aspectos técnicos en la rama de producción, que involucre recurso humano y equipo y requiere del conocimiento teórico y técnico necesario para tal propósito; permitiendo por parte del profesional desarrollar y aplicar sus conocimientos adquiridos en su campo.





## INTRODUCCIÓN

Actualmente se ha incrementado la demanda de diferentes sistemas de registros de variables en tiempo real, que supervisan los distintos parámetros de funcionamiento de todo proceso, que involucra por una parte el recurso humano y por la otra el equipo de producción. Estas mismas exigencias prevalecen en una Central Hidroeléctrica, en donde el proceso de producción de energía contempla una serie de variables de funcionamiento, que requieren de su registro, supervisión y manejo de información que permita conocer en tiempo real sus condiciones de operación.

Naturalmente que se prevé invertir en el Sistema de Registro de Variables para anticiparse a serios daños en el equipo de producción. Este sistema de registro de variables incluye la supervisión de indicadores de funcionamiento con base en una integración de captura de datos desde varios sub-sistemas que vienen a incrementar su funcionabilidad.

La integración de un Sistema de Registros de Variables (monitoreo), en tiempo real con un control de proceso, mejora y extiende considerablemente la operatividad del Sistema de Control de Proceso. Reflejándose de forma directa en beneficios económicos para la empresa.

Resultado del análisis de las principales causas por las que ocurren las interrupciones en el servicio de producción de energía, ha demostrado que del lado del generador es uno de los componentes decisivos. Esto obedece a que las reparaciones son largas y costosas cuando se trata de daños severos, como el caso de las máquinas eléctricas.

El Sistema de Registro de Variables (monitoreo) incluye la supervisión de todos aquellos indicadores (parámetros) de funcionamiento, a través de los cuales se desarrollan los componentes principales que manejará el Sistema de Registro de Variables, integrando datos, desde varios sub-sistemas, conceptos que se desarrollarán en el presente trabajo de graduación.

## 1. ANTECEDENTES GENERALES

### ESTRUCTURA DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA

#### Órganos Estructurales

##### Presa:

En toda estructura de una Central Hidroeléctrica, se cuenta con una Presa, la cual tiene como finalidad el almacenamiento del agua. Existen diferentes tipos y diseños de presa, los cuales dependen de las necesidades y exigencias de la central en la etapa de diseño. En el caso particular de la Central Hidroeléctrica Chixoy, se cuenta con una presa del tipo en "Escollera", con núcleo central de arcilla; ésta permite almacenar aproximadamente  $496 \times 10^6 \text{ m}^3$  de agua, debido a este volumen, es posible tener una regulación anual del embalse.

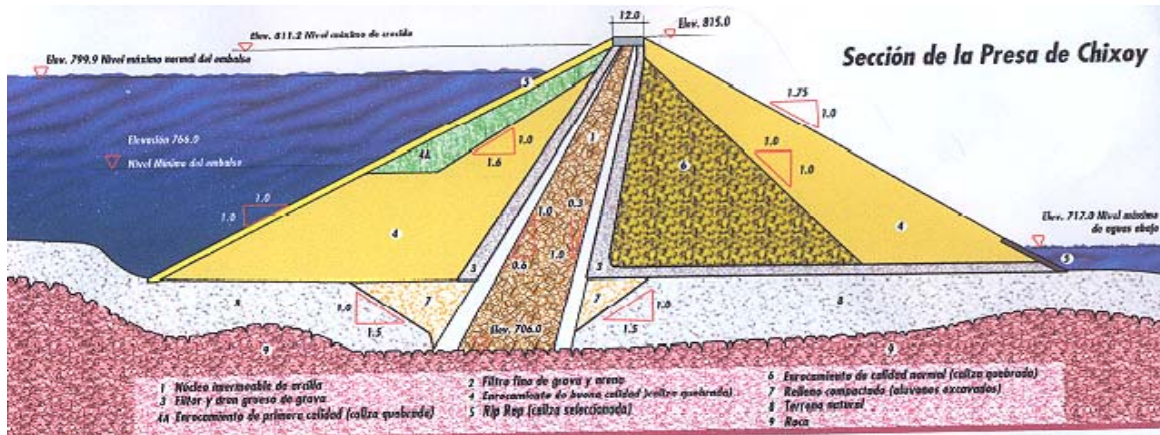
La siguiente tabla contiene datos técnicos de la presa de la Planta Hidroeléctrica Chixoy:

Tabla I. Datos técnicos de la presa de la Planta Hidroeléctrica Chixoy

ALTURA MÁXIMA	110m
COTA DE LA CORONA	815m (sobre el nivel del mar)
LONGITUD DE LA CORONA	250m
COTA DE LA CIMENTACIÓN	705m (sobre el nivel del mar)
ANCHO MÁXIMO DE LA CIMENTACIÓN	420m
NIVEL MÁXIMO NORMAL DE OPERACIÓN	803m (sobre el nivel del mar)
NIVEL MÍNIMO NORMAL DE OPERACIÓN	766m (sobre el nivel del mar)
VOLUMEN ÚTIL ENTRE COTAS 766-803	$340 \times 10^6 \text{ m}^3$
ÁREA DEL AMBALSE	$15.92 \text{ km}^2$
CAPACIDAD MÁXIMA	$471 \text{ m}^3/\text{s}$

FUENTE: TRIFOLIAR INFORMATIVO, PRESA PUEBLO VIEJO

Figura 1. Sección de la Presa Chixoy



FUENTE: TRIFOLIAR INFORMATIVO, PRESA PUEBLO VIEJO

### Desagüe de Fondo:

En el diseño y construcción de una Central Hidroeléctrica, como parte de la estructura de la presa se contempla como mínimo un desagüe de fondo; éstos vienen a representar un órgano de seguridad de la presa, ya que su diseño y funcionalidad está para poder descargar el agua del embalse al momento de presentarse niveles altos del agua almacenada. Para el caso de la Central Hidroeléctrica Chixoy, cuenta con dos desagües de fondo, cuyas estructuras y dimensiones corresponden:

Tabla II. Dimensiones y cotas de los desagües de fondo de la presa, Planta Hidroeléctrica Chixoy

ESTRUCTURAS	DESAGÜE DE FONDO I	DESAGÜE DE FONDO II
COTA EJE COMPUERTA	709.80m (sobre el nivel del mar)	719.45m (sobre el nivel del mar)
DIMENSIONES COMPUERTA	2.20 x 2.23m (ancho x altura)	50 x 3.50m (ancho x altura)
CAPACIDAD MÁXIMA (descarga)	176m <sup>3</sup> /s	471m <sup>3</sup> /s

FUENTE: TRIFOLIAR INFORMATIVO, PRESA PUEBLO VIEJO

**Túnel de Aducción:**

El túnel de aducción en una Central Hidroeléctrica, lo representa la conducción del agua desde la presa (embalse) hasta el lugar en donde esté ubicada la Casa de Máquinas. Dependiendo del diseño y capacidad de la central esta conducción puede ser a través de un canal ó bien en un túnel (entubado).

El túnel de aducción, posee las siguientes medidas de construcción:

**Tabla III. Medidas de construcción para el Túnel de Aducción**

Dimensiones de la Compuerta (ancho x altura)	4.80 m X 4.80 m
Caudal máximo de conducción	75 m <sup>3</sup> /s
Longitud del Túnel	26.5 km
Diámetro	4.93 m
Longitud Norte (tubería puente, Agua Blanca)	185 m
Longitud Sur	18.8 km

FUENTE: TRIFOLIAR INFORMATIVO, PRESA PUEBLO VIEJO

**Casa de Máquinas:**

La casa de máquinas, como se le conoce en las Centrales Hidroeléctricas, representa el lugar físico en donde se alberga todo el equipo de generación, con sus sistemas auxiliares de control, supervisión, mando y protección. La casa de máquinas en Chixoy, debido a su ubicación, exige un desvío permanente del río Quixal (el cual es un afluente del río Chixoy), por medio de un canal. Las partes por las que está compuesta la Casa de Máquinas son ocupadas por los distintos equipos que aquí se encuentran, tales como: las Turbinas, Generadores, Sala de Mando, Transformadores, Tubería de Distribución, entre otros.

Figura 2. Paneles de control de la Casa de Máquinas, Planta Hidroeléctrica Chixoy



FUENTE: PLANTA HIDROELÉCTRICA CHIXOY

### **Subestación:**

La subestación consiste en el lugar donde figuran los equipos principales que conforma el diseño; son todos aquellos que hacen posible el esquema de salida de la energía producida por la central hacia la línea de transmisión. Es aquí en donde se instalan los equipos de protección de líneas (Transformadores de Potencia, PTS y Transformadores de Corriente, CTS). En el caso particular de la Central Hidroeléctrica Chixoy, se cuenta con una subestación de 230kV, la cual se encuentra al aire libre en un sistema de doble barra, cinco campos de entrada, dos campos de línea y un campo de acoplamiento. Además está previsto un campo de reserva, no equipado, para una futura tercera línea.

Para cada una de las cinco unidades está provisto un campo de entrada que contiene el equipo de 230kV, de cada unidad, el cual consiste en un seccionador, un juego de transformadores de corriente, el disyuntor de potencia y dos seccionadores para poder conectar la unidad a una de las dos barras de 230kV. Cables aéreos conectan estos campos de entrada con los transformadores principales y sus pararrayos de las unidades.

Los campos de las líneas consisten en pararrayos, transformadores capacitivos de tensión, la bobina de la trampa de onda, transformadores de corriente, seccionadores, el disyuntor de potencia.

El campo del acoplamiento entre las dos barras, consiste en seccionadores, transformadores de corriente y el disyuntor. Los equipos más importantes de esta subestación son los ocho disyuntores de potencia que deben ser capaces de interrumpir la corriente alta de cualquier cortocircuito en los circuitos de 230kV.

**Figura 3. Subestación, Planta Hidroeléctrica Chixoy**

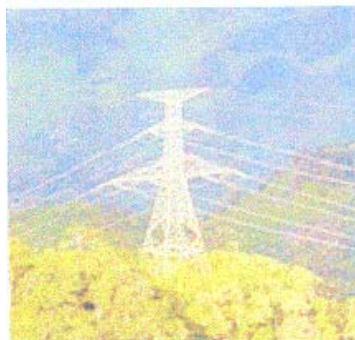


**FUENTE: PLANTA HIDROELÉCTRICA CHIXOY**

#### **Líneas de Transmisión:**

Estas líneas constituyen, para una Central Hidroeléctrica, el medio por el cual se hace transportar la energía eléctrica producida hasta un punto de distribución. En Chixoy, el transporte de la energía, que aquí se produce, se hace a través de dos circuitos, identificados como LINEA 1, y LINEA 2, las cuales tienen una longitud (Quixal-Guatemala) de 123km y un voltaje de transmisión de 230kV, a través de 110 torres.

**Figura 4. Torre para las líneas de transmisión**



**FUENTE: TRIFOLIAR INFORMATIVO, PRESA PUEBLO VIEJO**

### **Variables de Funcionamiento**

Estas variables son los parámetros esenciales para el óptimo funcionamiento de los generadores, los cuales son la parte primordial en toda planta de generación. Su importancia radica, principalmente, en el tiempo y costo de reparación de cada uno de estos equipos, ya que al encontrarse éstos en paro, no hay manera de seguir generando la energía eléctrica. Se ha logrado establecer las variables más importantes para mantener en funcionamiento a dichos generadores con la menor interrupción de servicio posible, estas variables son: vibraciones, temperatura, entrehierro y las descargas parciales.

#### **Vibraciones:**

En la práctica, la oscilación y la vibración ocurren cuando una masa es sujeta a fuerzas bajo las condiciones flexibles. Los elementos de la masa y de resorte son componentes necesarios de un sistema que es capaz de vibrar y oscilar. La vibración puede ser libre (es decir natural) o forzada. Durante el movimiento, las fuerzas de resorte y las fuerzas de masa inerte actúan, y en cada instante se encuentran en un estado de equilibrio. En la práctica, también se presenta un tercer elemento en la forma de fuerzas de fricción, que actúan en posición de la dirección del movimiento y que deben ser incluidos en las condiciones de equilibrio. El efecto de fricción es llamado “amortiguación”. Por lo anterior es que se hace de suma importancia un monitoreo o análisis de las vibraciones, ya que también es capaz de indicarnos el estado de las partes giratorias, de igual manera el estado de los soportes y la base del generador.

#### **Temperatura:**

La temperatura está relacionada con el calor, debido a que el calor fluye únicamente en una dirección (de una temperatura mayor hacia una temperatura menor). Se sabe que la presión, el volumen, la resistencia eléctrica, etc., están todos relacionados con la temperatura a través de su estructura molecular fundamental, y estos cambios pueden ser utilizados para medir la temperatura misma.

Los métodos eléctricos de la medición de la temperatura son muy convenientes porque suministran una señal que es fácilmente detectada, amplificada o utilizada por los propósitos de control. Además, con una adecuada calibración y compensación, son bastante precisos.

**Entrehierro (*Air-Gap*):**

Es llamado Entrehierro, al espacio que permanece constante entre la parte giratoria y estacionaria del Generador. La importancia de la exactitud y uniformidad de este espacio, recae en la centricidad del eje para con el resto de componentes del generador.

**Descargas Parciales:**

Las descargas parciales están conectadas con el suceso de diferentes efectos físicos y químicos, los que permiten su reconocimiento haciendo uso de diferentes métodos eléctricos y no eléctricos, es decir, de manera acústica o la determinación de los productos en descomposición. Sólo las descargas parciales de corriente causadas por las descargas parciales en las conexiones del objeto de prueba, así como los parámetros de las características de las mismas, son medidas.

Para la captura de los valores de la descarga parcial en un bobinado del estator se diferencian básicamente dos métodos, que son la medición con la máquina en paro (Diagnóstico) y la medición con la máquina en operación (Monitoreo).

**Equipo**

**Compuertas:**

Las compuertas en una Central Hidroeléctrica forman parte del equipo diseñado tanto para regulación del nivel del embalse, como para la toma (aducción) en el túnel principal para el paso del agua hasta la Casa de Máquinas. En Chixoy, debido a su capacidad y diseño, se cuenta con tres compuertas, cuyas características y dimensiones son:



Tabla IV. Datos técnicos de las compuertas de la Central Hidroeléctrica Chixoy

Cota del Umbral	798.90m (sobre el nivel del mar)
Ancho de las Compuertas	12m
Capacidad Máxima	4,739m <sup>3</sup> /s
Dimensiones de las Compuertas (ancho x altura)	12 x 4.5 m

FUENTE: TRIFOLIAR INFORAMTIVO, PRESA PUEBLO VIEJO

### **Válvulas:**

Cada turbina en el lado aguas arriba del caracol está provista de una válvula esférica como elemento de seguridad y para realizar trabajos de mantenimiento en el equipo aguas abajo.

Las válvulas esféricas están diseñadas para cerrar bajo caudal máximo (17m<sup>3</sup>/s) sin esfuerzo inadecuado u oscilaciones ni vibraciones. Las válvulas, en condiciones normales, se pueden abrir solamente cuando hay aproximadamente equilibrio de presiones entre aguas arriba y aguas abajo. Cada válvula está formada esencialmente de las siguientes partes:

- Carcasa de la válvula
- Elemento obturador
- Juntas de servicio y de revisión
- Muñones con cojinetes deslizantes
- Equipo de engrase
- Servomotor

### **Turbina:**

La hidroeléctrica Chixoy, utiliza turbinas de eje vertical, tipo Pelton, las cuales tienen seis chorros normales y un chorro para el freno hidráulico de emergencia. Cada chorro normal de agua está controlado por una tobera. Cada tobera cuenta con un servomotor interno de aguja accionado por aceite a presión. En caso de pérdida de

presión de aceite, las agujas de la tobera cierran automáticamente a causa de la presión del agua en el caracol.

El chorro de agua para el freno hidráulico está controlado por una válvula de aguja, cuya apertura se hace también con aceite a presión. Este chorro de freno golpea al rodete en dirección contraria a la rotación normal de la turbina.

Cada turbina tiene un cojinete de guía auto lubricado y de circulación forzada de aceite a través del enfriador.

El eje de la turbina está provisto de un sello radial de superficie inmóvil, y formado por dos anillos de teflón de ocho piezas. El sello tiene por función evitar el contacto de agua y aire con la carcasa inmóvil de la turbina respecto al eje giratorio. De esta manera, en caso de crecida del nivel del agua en el canal de desfogue y por lo tanto, en el pozo de la turbina, el nivel del agua en el pozo puede ser bajado por medio de aire a presión para que de esta manera garantizar el espacio libre mínimo del rodete para su operación. En el caso que la máquina esté parada, el sello evita que el agua entre en la Casa de Máquinas.

La turbina está provista con todos los dispositivos de supervisión y seguridad para los circuitos de aceite y agua.

**Figura 5. Turbina, Planta Hidroeléctrica Chixoy**



**FUENTE: TRIFOLIAR INFORMATIVO, PRESA PUEBLO VIEJO**

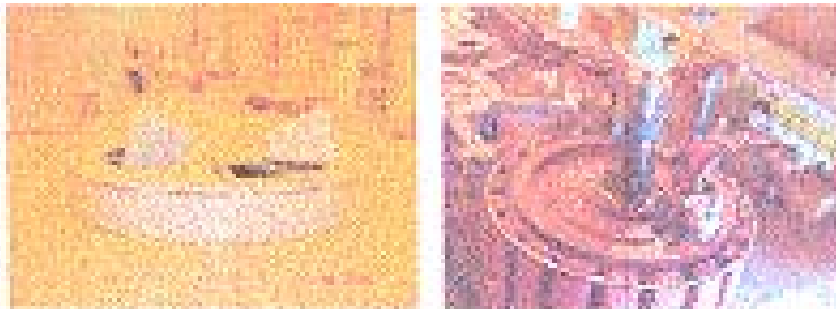
**Generador:**

Los generadores son sincrónicos, de eje vertical, enfriados por aire en circuito cerrado, y poseen excitación estática. La capacidad nominal de cada generador es de 55.3MVA, 13.8kV, 60Hz, con un factor de potencia de 0.85 a 60°C de aumento de temperatura, 360 rpm y puede suministrar sobrecarga continua sin exceder el aumento de temperatura de 80°C.

El núcleo del estator está fabricado con laminaciones de acero-silicón delgados de alto grado. Cada laminación está impregnada con barniz aislante en ambos lados. Las bobinas del estator con resina sintética, conectados en estrella y cubiertas por aislante. El rotor está diseñado para soportar los esfuerzos máximos producidos por la velocidad de embalamiento. Los veinte polos están fabricados con láminas finas de aproximadamente 1.6mm; el eje del generador es de acero forjado tratado. Además, el generador posee un cojinete combinado de guía/empuje, instalado arriba del mismo, cuya finalidad es la de transmitir los esfuerzos al estator.

Para el enfriamiento del generador hay enfriadores de aire simétricamente instalados alrededor del estator para mantener la temperatura promedio del aire enfriado menor a los 40°C.

Figura 6. Generadores, Planta Hidroeléctrica Chixoy



FUENTE: TRIFOLIAR INFORMATIVO, PRESA PUEBLO VIEJO

**Transformador Principal:**

El transformador principal es trifásico, el cual es el encargado de elevar la tensión de generación de 13.8KV a la tensión de transmisión de 230KV. Cada una de las

unidades instaladas en la planta posee su propio transformador, existiendo uno de reserva para los casos de emergencia.

La potencia nominal es de 40.6/54.1/67.62 MVA, aumento de temperatura de 65°C. Los devanados de baja tensión están conectados en delta. El ducto colector de barras, conecta los devanados de baja tensión con el generador.

Los transformadores principales tienen en el lado de Alta Tensión, selectores de tensión con cinco posiciones, manteniendo la tensión al lado de Baja Tensión, a una carga de 13.8kV.

El sistema de enfriamiento del transformador, es mediante doce ventiladores. El control está diseñado para operar de forma manual y automática. En la forma manual, los ventiladores se pueden arrancar desde el tablero de control local. Mientras que en la forma automática, los ventiladores, arrancarán cuando la temperatura del aceite alcance los 65°C y se pararán al bajar la temperatura del aceite a 55°C.

**Figura 7. Transformador principal**



**FUENTE: PLANTA HIDROELÉCTRICA CHIXOY**

**Interruptores:**

Cada unidad está conectada mediante seccionadores y un disyuntor de potencia a las dos barras de la subestación y está provisto de transformadores de corriente y de un seccionador de puesta a tierra.

**Recurso Humano**

Esta clase de recurso, constituye una parte integral de toda Central Hidroeléctrica, como apoyo directo en la ejecución de todas y cada una de las actividades que allí se desarrollan. Como en toda empresa, el Recurso Humano representa un papel importante en el logro y desarrollo de sus funciones, de igual forma lo es para una Central Hidroeléctrica cuya función esencial y primordial es la de generar (producir) energía eléctrica.

La participación del recurso humano, abarca diferentes sectores de trabajo, los cuales pueden ser enmarcados en dos grandes áreas:

- Área Operativa y
- Área Administrativa;

Ambas poseen una injerencia tanto directa como indirecta en alcanzar el objetivo final, que para este caso en particular, es la generación de energía eléctrica.

Cabe realizar una separación y ampliación de cada una de estas áreas, para que de esta manera lograr tener una visión más clara y completa, en cuanto a su estructura y/o participación en el proceso productivo de la Central Hidroeléctrica.

Con respecto al Área Operativa, la cual como su nombre lo indica, es la que lleva la ejecución de las tareas y/o actividades vinculadas con el mantener y hacer operar los equipos y sistemas auxiliares necesarios para la producción de energía eléctrica. Es esta área, por su naturaleza específica dentro de una Central Hidroeléctrica, la responsable directa de la generación de energía, y su estructura operacional abarca diferentes campos, siendo éstos:

**Supervisión operativa:** encargada de la dirección, control, supervisión y coordinación, de todas y cada una de las tareas que se desarrollan como parte de la operación de la Central. Como parte de su función primordial figura la de mantener de forma continua

y confiable la operación de la Planta, además de ser el enlace directo entre la Jefatura de la Central en la coordinación y cumplimiento de las Normas operativas del Mercado Mayorista.

**Operación:** tiene a su cargo la operación directa de los equipos generadores de la Central, entendiéndose con esto, aquella sección que lleva el control y el manejo directo de todos los paneles de control, arranque-paro y supervisión de las unidades generadoras así como también sus sistemas auxiliares.

**Supervisión de mantenimiento:** tiene a su cargo, el mantener en óptimas condiciones la funcionabilidad de las unidades generadoras. Dentro de las funciones principales de la supervisión de mantenimiento, figura el llevar el registro, control, programación, coordinación y supervisión con el personal bajo su cargo, de todas las tareas que conforman los Programas de Mantenimiento en general.

**Mantenimiento:** encargada de la ejecución directa de los trabajos relacionados con el mantenimiento a los distintos equipos y sistemas que la Central posee.

En cuanto al Área Administrativa, como parte de la estructura funcional de una Central Hidroeléctrica, se encuentra conformada por diferentes secciones, que de forma indirecta y en apoyo a la operación, permiten llevar a cabo las distintas actividades, encaminadas a la producción de la energía eléctrica. Esta área, en términos generales representa actividades de servicios, abarcando con todos los insumos necesarios para la actividad de producción de energía, así como la contratación de los servicios necesarios para tal propósito. El área administrativa puede estar representada por las secciones siguientes:

**Suministros:** sección que tiene como finalidad la administración de los trámites involucrados en las actividades de proveer los insumos en general, necesarios para la Central.

**Personal:** sección que se encarga del registro, control, trámite y evaluación del Recurso Humano (personal) de la Central.

**Servicios generales:** sección en donde se desarrollan aquellas actividades relacionadas con bodega (almacenamiento), gasolinera, instalaciones de mantenimiento, edificios (oficinas), flotilla de vehículos (mantenimiento).

**Financiera (presupuesto):** sección responsable del control, registro, planificación, ejecución y evaluación en cuanto al manejo del Presupuesto de Gastos asignados a la Central, en donde se manejan rubros, tales como de funcionamiento, inversión y equipo, entre otros.

## **DESCRIPCIÓN DE UN SISTEMA DE REGISTROS DE VARIABLES**

### **Concepto del Registro de Variables**

En todo proceso productivo se tiene una serie de variables (datos) que de manera directa y continua, se encuentran indicando el estado de desarrollo del proceso. El número y característica de cada variable, está en función del proceso productivo, es decir que el proceso es sí determina el número y tipo de variables que se presentan.

Siendo estas variables, las que en cada instante están reflejando (indicando) el estado de desarrollo del proceso productivo, su registro en tiempo real es de suma importancia, éste se puede obtener mediante un sistema conocido como Monitoreo en Tiempo Real, ya que a través del mismo es posible mantener controlado, de manera continua el proceso, sin necesidad de interrupciones por fallas, al mismo tiempo que permite anticiparse en el tiempo a prever paros o bien imperfecciones en el producto final.

Debido a la importancia de esta aplicación en sí, es lo que ha hecho que día a día se preste mayor atención al manejo de Registro de Variables a través del Monitoreo. Actualmente son varias las empresas que invierten tiempo y recursos en este campo; la misma competencia y exigencia en los niveles de calidad en el mercado hacen imperativo la implementación de este sistema de registro.

Para el caso que nos ocupa en el desarrollo de este tema, específicamente de una Central Hidroeléctrica; este concepto de Registro de Variables, se desarrolla pero de forma manual, o a través de anotaciones (registros) en formatos prediseñados para tal propósito, pero continúa siendo un proceso lento e incompleto, ya que las variables a considerar se anotan de forma periódica (intervalos de cada hora o en intervalos de cada 4-6 horas), lo que es incapaz de reflejar un indicativo en tiempo real del comportamiento del proceso.

Es así que para el tema de producción de Energía Eléctrica, las variables que interesan ser tomadas en consideración son todas aquellas que indican si la operación de las



unidades generadoras, se encuentran dentro de los valores y/o parámetros de funcionamiento establecidos por el fabricante del equipo. Estas son variables que de forma directa al momento de no encontrarse dentro del rango de diseño, están poniendo en riesgo, y ante una eventual falla al equipo, haciendo que opere la protección del mismo, interrumpiendo la generación de la Central.

Es por ello que para las Centrales Hidroeléctricas, en donde se tienen circuitos comandados por presiones, flujos, temperaturas, corrientes, voltajes, vibraciones; como indicativos de la funcionabilidad (operación) de las unidades generadoras, las variables que interesan, como parte integral del Registro de Variables, vienen siendo las enunciadas antes; toda vez que cada una de ellas está indicando si el equipo, se encuentra operando bajo condiciones normales, conforme especificaciones del fabricante del equipo.

### **Estructura del Sistema del Registro de Variables**

#### **Descripción General:**

Como quedó citado en el punto anterior, el Registro de Variables, lo conforman la agrupación de todos aquellos parámetros (valores) que de forma directa, están indicando en tiempo real el estado de desarrollo del proceso. Para el caso que nos ocupa, como lo es una Central Hidroeléctrica, es a través de estas variables, que nos permiten y garantizan que las unidades generadoras se encuentran operando en condiciones normales. Este registro puede ser tan amplio y extenso como variables interesen ser conocidas en el monitoreo.

Para una Central Hidroeléctrica, interesan aquellas que de manera directa, reflejan el estado de funcionamiento de las unidades principales de generación, como lo son Turbina y Generador. De esta manera, es que se deben tener variables a registrar para Turbina, como también para el Generador.

Basados en el principio que tanto la turbina como el generador, trabajan con circuitos de enfriamiento en donde se pone en juego Cojinetes y Devanados del Generador (Estator-Rotor); en este punto, las variables que interesan son las de temperatura, presión y flujo (caudal). De igual forma interesa el registrar la variable de vibración y por la parte del Generador la variable de Descargas Parciales y el Entrehierro (separación Estator-Rotor).

La manera en que se captan y registran todas estas variables, es decir cómo se manejan dentro del Sistema de Monitoreo se verá de manera más detallada en los capítulos siguientes.

**Variables de Monitoreo:**

Siguiendo con la determinación de variables, que de manera continua y directa indican el estado de desarrollo de un proceso; para el caso que nos ocupa en este tema, quedan definidas como variables de monitoreo para una Central Hidroeléctrica, las siguientes:

Por el lado de la Turbina

- Temperatura del aceite y del cojinete
- Vibraciones en el eje de la Turbina-Generador

Por el lado del Generador

- Temperaturas del aceite y cojinete, así como la de los Devanados (Estator-Rotor)
- Descargas Parciales en el Estator
- Entrehierro (Air-Gap), espacio existente entre el Estator-Rotor, para de esta manera lograr registrar la excentricidad del equipo.



## 2. DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA

### EVALUACIÓN DEL SISTEMA DEL REGISTRO DE VARIABLES

#### **Determinación de Variables**

Para la implementación de un sistema de Monitoreo en Tiempo Real, el conocer las variables a registrar representa la herramienta básica para estructurar el esquema funcional de dicho sistema. En todo proceso productivo intervienen más de una variable que determina en el tiempo el estado del proceso; dependiendo de la naturaleza y características de cada proceso, así será el número y tipo de variables a considerarse. Es de tomar en consideración que entre más variables se puedan registrar, mayor y mejor serán los resultados obtenidos del estado del proceso productivo a través del Sistema de Monitoreo. De esta manera, para determinar el alcance del número y tipo de variables, debe manejarse bajo el criterio de considerar todas aquellas variables, cuyo valor de medición es un indicativo directo del estado del proceso productivo, como ejemplo, la temperatura, el tiempo, la dureza, el ancho, el espesor, entre otras, las cuales representan el estado del proceso productivo.

En el caso particular de Generación de Energía eléctrica, por medio de Centrales Hidroeléctricas, la determinación de las variables se obtiene siguiendo el criterio indicado con anterioridad, para cualquier proceso productivo, así como el de considerar aquellos indicativos (variables) representativos y que en todo momento se encuentran mostrando las diferentes condiciones operativas del equipo involucrado en el proceso de Generación de Energía eléctrica; estas variables se encuentran fijadas conforme la estructura y configuración del sistema de monitoreo diseñado. Siguiendo este diseño, las variables a considerar, para el caso de la Generación de Energía eléctrica, quedan definidas de la siguiente manera:

- Temperatura de los Devanados del Estator del Generador
- Temperatura del aceite y cojinetes del Generador y Turbina
- Vibraciones
- Descargas Parciales del Generador (Estator)
- Separación entre Estator-Rotor (Air-Gap)

Con estas variables definidas, se llega a conocer en tiempo real, a través del Sistema de Monitoreo, el estado de producción de energía, bajo los parámetros y estándares requeridos en la Generación de Energía eléctrica. Sin embargo, estas variables definidas son básicamente las primordiales, aunque no se deben de interpretar como las únicas; ya que dentro de la Generación de Energía, existen otras variables tales como: corriente y voltaje, las cuales también pueden ser incorporadas a la estructura del esquema del Monitoreo para de esta manera poder ampliar el registro, y de igual forma, ampliar la información registrada; lo anterior, es debido a que éstas se encuentran asociadas al comportamiento de las variables definidas, es decir, a la temperatura de los Devanados y las Descargas Parciales.

### **Interpretación y Manejo de Variables**

Teniendo ya definidas todas y cada una de las variables a considerarse dentro de la estructura del Sistema de Monitoreo, se entra al tema de la interpretación y manejo de las mismas.

Es de vital importancia el tener bien definidas y cuantificadas todas las variables a monitorear, pues como se indico antes, el criterio para su determinación siempre debe, basarse en la consideración de todos los indicativos que definen el proceso; con lo cual se garantiza que el proceso como tal, está siendo bien controlado (monitoreado).

El campo de la interpretación, como el del manejo, queda sujeto al número y característica de cada variable definida; a manera de que cada una sea tomada en cuenta para la determinación en tiempo real, de la calidad y continuidad del proceso productivo. Con esto se quiere decir que la interpretación de las variables, no es más que convertir todos los registros del monitoreo en información, la cual permite representarse de diferentes formas, tales como, tabulaciones, gráficos, ordenado en intervalos de tiempo para conocer tendencias en cuanto al comportamiento de estas variables, las que vienen a mostrar el estado del proceso.

Dicho de otra manera, la interpretación consiste en darle utilidad y manejo a la información para conocer en tiempo real como se viene comportando nuestro proceso productivo. Para el caso de las Centrales Hidroeléctricas, el manejo de la información recabada en el Sistema de Monitoreo, se debe interpretar como observar, comparar y cuantificar el comportamiento de las variables definidas.

Como ejemplo, al hablar de la temperatura, esta información debe manejarse en un criterio técnico (ascenso y/o descenso de la temperatura), para interpretar cada variación que se presente, y tomar las acciones pertinentes en caso se requiera de alguna corrección, ya que estos indicativos son un reflejo directo de una condición normal o bien anormal del proceso.

### **CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA**

La interacción del personal con el sistema, también conocido como interface Hombre-Máquina, es desde el punto de vista del personal, el componente más importante del sistema. Es decir, que un sistema de captura de datos, como lo es este monitoreo, no es de utilidad si los datos no pueden ser interpretados de manera correcta. Los operadores de los equipos y/o máquinas, quisieran tener una información simple, clara y confiable sobre la condición de la máquina.

Con la implementación de un Sistema de Monitoreo en tiempo real, es posible lograr una detección temprana de fallas, análisis rápido de las interferencias, funcionamiento del equipo cerca de los límites del diseño en situaciones de emergencia, y también es posible lograr aumentar de manera considerable la eficiencia de la Planta.

Otra de las ventajas con la que cuenta este sistema, es la de facilitar la tarea del personal de supervisar las variables al mismo tiempo, proporcionando un monitoreo rápido y de información clara.

Los expertos, harán uso de este sistema para la reparación, análisis y diagnóstico por medio de la evaluación de los datos históricos de la medición e incidentes. De igual

manera, el personal de mantenimiento puede hacer uso del sistema como una entrada para la planificación de las actividades de mantenimiento y reparación.

### **Concepto**

El Sistema de Registros en tiempo real de las Variables de Operación para la Optimización del Funcionamiento de una Central Hidroeléctrica, consiste en el monitoreo de variables como: vibración, temperatura, entrehierro y descargas parciales. Generalmente, estos módulos son sistemas independientes, monitoreados mediante un sistema de cómputo individual.

Los sistemas de cada uno de los módulos están a cargo de la configuración del sistema, la medición, el registro de datos y la transferencia de éstos hacia las computadoras principales del sistema. Dicha transferencia es realizada con una red de área local (LAN).

Esta modalidad que actualmente ha venido tomando cada vez más auge y evolucionando en todo este campo; hace posible conocer cómo es que se viene comportando y/o desarrollando todo proceso en el tiempo, al permitir estar observando y registrando aquellas variables que muestran en sí el desarrollo del propio proceso productivo.

El monitoreo es un sistema lo suficientemente amplio y moldeable, que permite poder realizar ajustes y/o cambios en términos de las variables que se manejan, a manera de considerar inclusión de cambios al proceso; como producto de mejoras y/o ampliaciones en el mismo. Por otra parte representa una herramienta de valiosa utilidad, para lograr predecir cualquier anomalía o variación dentro del proceso final. La exactitud en sus resultados y su mejor utilización, está en función de la gama (amplitud) de variables que se consideren como parte integral de la estructura del programa configurado (software).

### **Alcance General**

El alcance en sí de todo el Sistema de Monitoreo, está sujeto a la proyección que se haga, en cuanto a definir la amplitud de variables a monitorear (registrar); es decir que estos sistemas en determinado momento, pueden ser al final difíciles de cuantificarles

su alcance; pero por diferentes que las variables sean entre ellas, lo que debe de prevalecer y manejarse de forma clara, es que en todo este tipo de sistemas su principio fundamental, y a partir del cual se define su estructura del software configurado, es el de tener la mayor información posible que conlleva el proceso, que permita en el tiempo, conocer, registrar e interpretar el desenvolvimiento del proceso objeto de monitoreo; lo que es logrado a través de la determinación de variables de estado del proceso.

En términos generales puede decirse, que el alcance que tiene o deba tener un Sistema de Monitoreo, está en función de la cuantificación de variables a registrar, es de aquí que se parte para establecer la magnitud del alcance que desarrollará el Sistema de Monitoreo. Dicho de otra manera, independientemente que al sistema lo conformen pocas o muchas variables, el alcance del mismo deberá siempre permitir conocer cómo y cuándo el proceso sujeto a monitoreo se está desarrollando.

### **Componentes**

El llamado Procesador Principal, del Sistema de Monitoreo en tiempo real, es la interacción del usuario con cada una de las fases, para el operador del sistema mismo. Este procesador principal está constituido por tres componentes básicos:

- Estación de Ingeniería
- Manejo de Información
- Registro de Información

Con un solo procesador principal, es posible monitorear hasta cuatro unidades generadoras. Este procesador principal, es instalado en una computadora especial con un sistema operativo particular. Una red de área local (LAN) es utilizada para conectar el procesador principal del sistema con los sub-módulos.

Gracias a la flexibilidad de cada uno de estos módulos, es posible hacer correr diferentes aplicaciones en una computadora en particular. Ya que tanto para la vibración como para la medición del entrehierro se utilizan el mismo tipo de tableros de

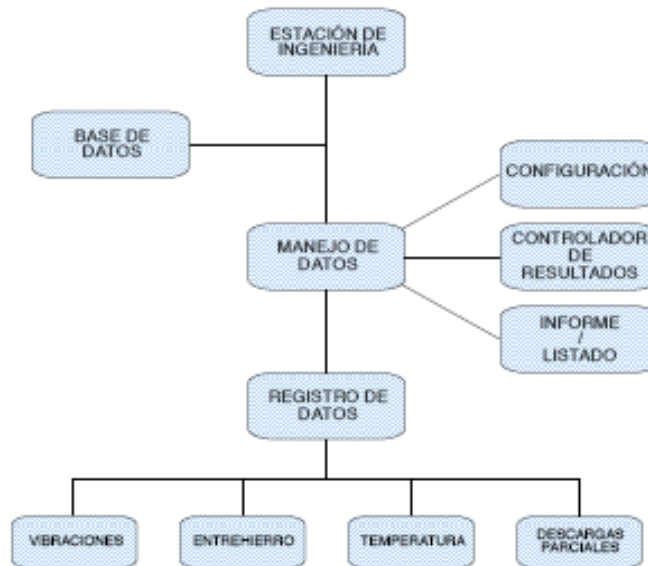


captura de datos, tan solo es cuestión de configuración para que la vibración o la aplicación del entrehierro estén en un mismo tablero. Tanto la aplicación de la vibración y del entrehierro pueden funcionar en el mismo sistema de cómputo.

Los subsistemas se encargan de la captura de datos, mientras que el procesador principal del sistema es el responsable de la presentación y evaluación de los datos actuales y almacenados. Además, el procesador principal es también responsable del almacenamiento de los datos en la base de datos y la configuración misma del sistema.

El núcleo del procesador principal del sistema es la aplicación de Manejo de Información. Esta aplicación, es la conexión a los otros procesadores decodificadores, como lo son el Registro de Información, la Estación de Ingeniería, el menú configuración y el controlador de alarma. La aplicación de Manejo de Información recoge los datos del Registro de Información (decodificador), y los envía a la Estación de Ingeniería con el propósito de una presentación de datos, que el usuario los requiera. Por otro lado, el sub-módulo de manejo de información almacena los datos del decodificador de acuerdo con los tipos de almacenamiento configurados previamente.

Todas las funciones de muestra para una central de producción específica, se encuentran localizadas en la Estación de Ingeniería. Básicamente, esta estación consiste en un alcance general de la central donde el estatus (estado normal, de advertencia o alarma) de todas las unidades generadoras monitoreadas son presentadas.



## CONFIGURACIÓN

### Menú de Configuración

Este menú de configuración, no es más que una ventana auxiliar para el personal de la Planta, en donde éstos pueden ser capaces de realizar cualquier cambio que se requiera para el monitoreo de las variables. Este sistema de monitoreo, posee un software bastante amigable, es decir, que el mismo programa de cómputo es el que guía al personal paso a paso durante la operación del mismo. De esta manera, al momento de querer ingresar a la opción “Menú de Configuración”, basta con pulsar el botón correspondiente en la pantalla del computador; cabe mencionar que todos estos accesos y cambios requeridos en el programa únicamente pueden ser realizados desde la Estación de Ingeniería; por motivos de seguridad para las Centrales.

La ventana de configuración de la Estación de Ingeniería, permite agregar, cambiar e incluso borrar información de la misma configuración. Como ya se sabe, toda la información que se ingresa a la configuración puede ser alterada en cualquier momento. Dichos cambios comenzarían a funcionar la siguiente vez en que se le da

inicio al sistema. Para poder realizar cada cambio y/o guardar los mismos, basta con realizar dichas modificaciones y presionar los botones correspondientes que aparecen en la pantalla del sistema.

Antes de realizar cualquier cambio dentro de la configuración del sistema, el usuario debe estar claro en lo siguiente:

- ¿Cuáles son los módulos que serán configurados?
- ¿Cuántos tableros de captura de datos son instalados?
- Con respecto a los sensores, ¿Cuántos, de qué tipo son, ubicación; por módulo?
- ¿Qué tipo de valores deben ser configurados en cada sensor?

Para cada unidad generadora, sensor y valor característico se debe de ingresar un número único de identificación. Por lo general estos números son definidos en la lista de señal y bajo ninguna circunstancia deben ser mezclados ya que éstos son las llaves dentro de la base de configuración de datos.

### **Navegación**

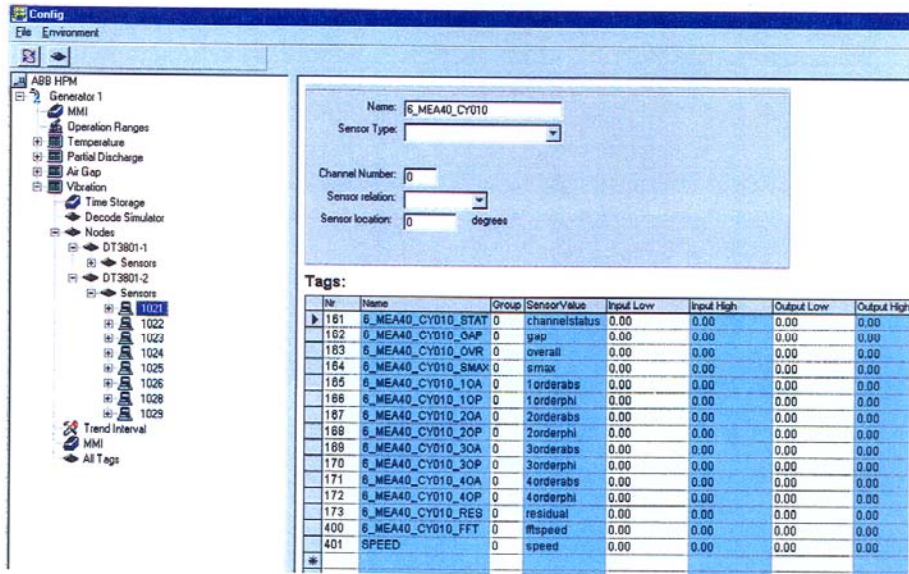
El menú de configuración esta creado para que sea similar a una ventana de exploración estándar. De esta manera se obtiene una despliegue de información compartida en la pantalla, en donde de un lado de ella es posible observar los distintos módulos (al igual que las opciones para cada uno de éstos) y del otro lado se puede leer, alterar o incluso borrar la información de cada uno de ellos.

Por ejemplo, para llegar al campo de la información para un sensor específico, se debe pulsar sobre el nombre del módulo, luego pulsar el nombre del nodo, el nombre del sensor y se mostrará la fijación de la configuración en el otro lado de la ventana.

Como ya quedó claro con lo anterior, el desplazamiento dentro de este sistema es bastante sencillo y rápido, debido a lo amigable del software, basta con acceder a la opción requerida y seguir los pasos que se le indican para llevar a cabo determinada acción. Es posible que se dé el caso en el que algunos resultados de la configuración

no sean descargados en la pantalla de manera gráfica, en dicho caso, se explica verbalmente dónde y cómo ingresar la información requerida.

Figura 8. Cuadro de navegación del sistema, Planta Hidroeléctrica Chixoy



FUENTE: PLANTA HIDROELÈCTRICA CHIXOY

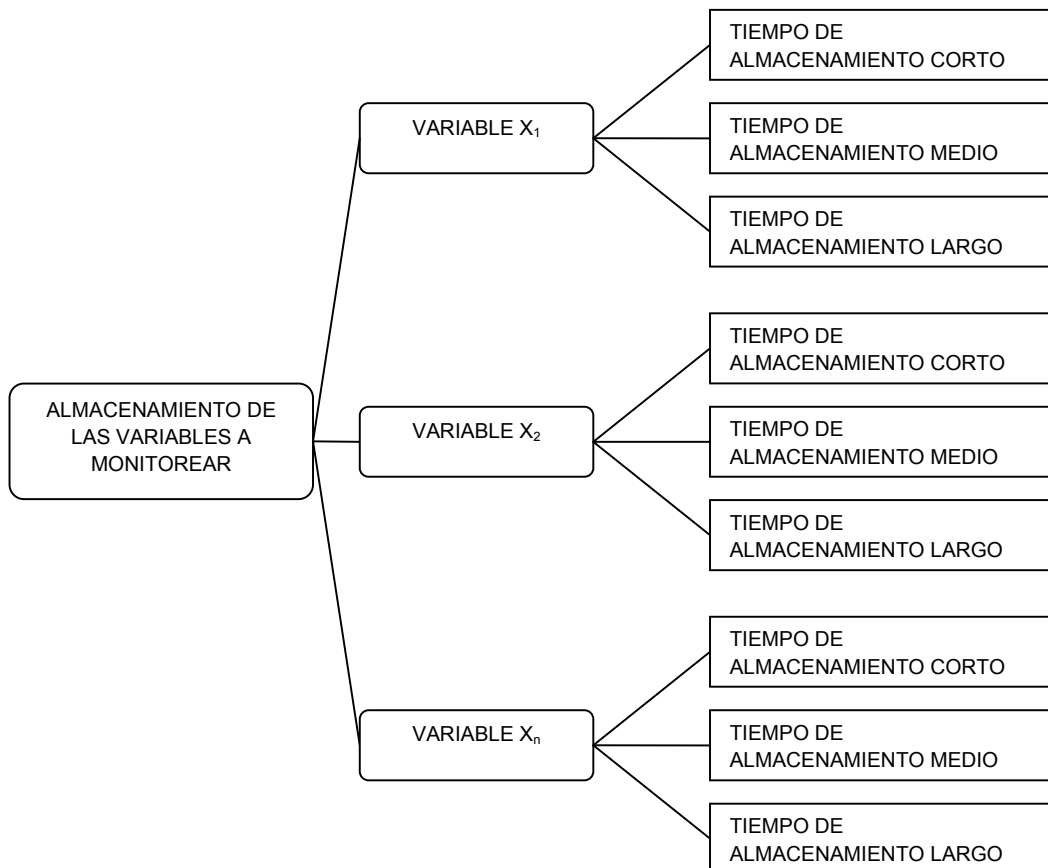
### Cambios de la Configuración

Ya se hizo mención de la opción de realizar cambios a la configuración inicial del sistema, los cuales pueden ser realizados en cualquier momento. Partiendo de esto, para llevar a cabo las variaciones necesarias en la configuración del sistema, es necesario realizarlos desde el menú de configuración, en donde es posible seleccionar la ventana de la opción en donde se desea realizar el cambio. Una vez seleccionada la ventana, se debe de seleccionar el ítem del menú “Configuración”, y desde aquí se podrá cambiar o ingresar cualquier información. Esta información, es almacenada en el registro de la base de datos de la configuración.

Para cada subsistema, un conjunto de funciones de análisis o aplicaciones pueden ser sugeridas desde la Estación de Ingeniería. Para agregar una nueva función, basta con abrir un nodo del subsistema y seleccionar el nodo “Estación de Ingeniería”, para poder ingresar o cambiar la información de la función “Estación de Ingeniería”. Luego se agrega un número único de identificación, un nombre (descripción) y la función. Cada subsistema posee un grupo de nombres predeterminados que se pueden utilizar.

Para cada subsistema (por generador), es posible almacenar los valores registrados en tiempo de almacenamiento corto, medio o largo, de igual forma el almacenamiento de configuración para los tipos de datos especiales, tales como los datos de vibración, los patrones de Descarga Parcial y los datos de perfil del polo de entrehierro.

Cada tipo de tiempo de almacenamiento tiene un conjunto de extensiones e intervalos de almacenamiento fijados, los que se encuentran disponibles para la selección utilizando la lista predefinida dentro del sistema:



Una vez ya configurado el tiempo de almacenamiento, éstos serán creados, es decir, las tablas serán creadas automáticamente.

Para tipos de datos especiales, existen tipos de almacenamiento especiales. Para estos almacenamientos especiales, las tablas de datos no son creadas de manera automática, por lo cual deben ser instaladas o creadas de forma independiente.

De igual manera es posible agregar nuevos valores característicos, únicamente se debe ingresar al menú de configuración y seleccionar el sensor en la carpeta de nodos respectiva, luego se procede a ingresar la información de los valores característicos a la lista correspondiente. Cada valor característico posee un valor de identificación único por Generador.

Es importante mencionar que no todos los valores de los sensores deben de estar configurados. En algunos casos, no es necesario que éstos posean dicha configuración. Es por ello que los cambios deben ser realizados desde la Estación de Ingeniería, únicamente cuando éstos sean considerados por los supervisores de producción; de lo contrario no se debe alterar las calibraciones pre-configuradas.

### **Instalación del Modo de Alarma Específico**

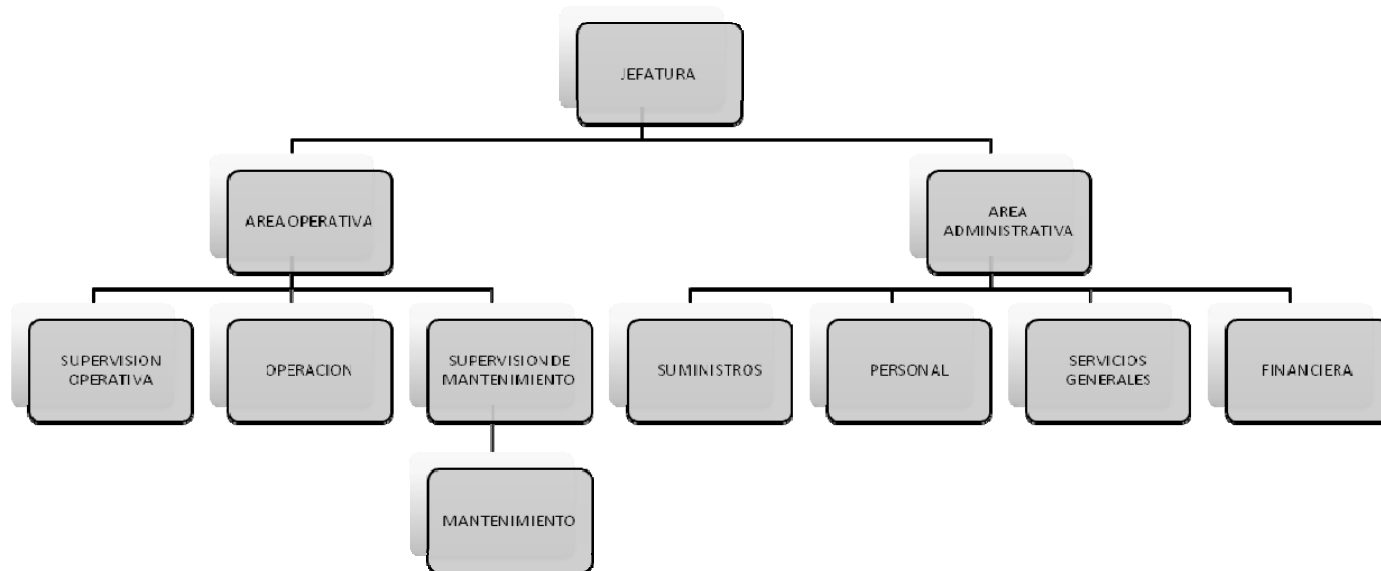
El Sistema de Monitoreo de las variables en tiempo real, posee un modo de alarma específico para aquellas variables que se consideren de mayor importancia al momento de ser monitoreadas. Es obvio que este aspecto depende del proceso productivo al cual se le instalará dicho sistema; para el caso de las Centrales Hidroeléctricas, estas variables vienen siendo aquellas que podrían causar el mayor daño a la Central (tanto económico, como en el equipo). Siendo éstas las alarmas de Temperatura, los valores del proceso de Descarga Parcial, las alarmas de Vibración y las del Entrehierro; todas estas son configuradas dentro del sistema de monitoreo en tiempo real, al igual que lo son configuradas en la configuración del subsistema.

Es decir, que para poder establecer los límites de alarma, la Estación de Ingeniería en su formato original del sistema, es capaz de desplegar el nodo de árbol en donde se

encuentran todos los valores característicos, y de esta manera poder ingresar la información de cada uno de los valores característicos para los niveles de alarma de las variables requeridas. Es posible colocar advertencias para terminales muy bajos y niveles de alerta, de igual manera advertencias para terminales muy altos y niveles de alerta, correspondientes. Para lograr desactivar el verificador de alarma en un valor característico en particular, basta con ingresar un valor cero (0) en cada uno de los campos de advertencia de dicho valor característico.

## EVALUACION DEL RECURSO HUMANO

### Estructura Organizacional



FUENTE: PLANTA HIDROELÉCTRICA CHIXOY



## **Definición de Funciones**

### **Jefatura:**

La jefatura de la Central Hidroeléctrica, tiene a su cargo las funciones de dirección, coordinación, supervisión y planificación de todas y cada una de las actividades relacionadas con el funcionamiento de la planta.

### **Área Operativa:**

**Supervisión operativa:** Ésta es la encargada de dirigir, controlar, supervisar y coordinar, las tareas que se desarrollan como parte de la operación de la Central.

**Operación:** Es en esta sección en donde se operan de manera directa los equipos Generadores de la Central, tales como el control de arranque-paro y la supervisión de todos las unidades generadoras.

**Supervisión de mantenimiento:** Es la encargada de registrar, controlar, programar, coordinar y supervisar todas las tareas que conforman los Programas de Mantenimiento de la planta en general.

**Mantenimiento:** Departamento encargado de la ejecución directa de todos los trabajos de mantenimiento que se realizan en la Central.

### **Área Administrativa:**

**Suministros:** Las funciones de este departamento, comprenden la administración, dirección y supervisión de las tareas con la adquisición de bienes y/o servicios dentro de la Central.

**Personal:** Área que tiene a su cargo, el registro, control, trámite y evaluación del recurso humano de la planta.

**Servicios generales:** Este departamento tiene como funciones actividades tales como, ejecutar, coordinar y supervisar todas las tareas relacionadas con los servicios administrativos.

**Financiera:** Parte de la estructura organizacional de la Central que tiene a su cargo el control, registro, planificación, ejecución del Presupuesto de Gastos.



### 3. PROPUESTA DEL SISTEMA

#### INTRODUCCIÓN

El análisis de las causas por las que ocurren las ininterrupciones del servicio en las Plantas de Energía Eléctrica ha demostrado que el Generador es uno de los componentes decisivos en toda Planta Generadora de Energía Eléctrica. Esto se debe principalmente a que las reparaciones son largas y costosas cuando se trata de daños serios como en el caso de la máquina eléctrica. Al observar de cerca el generador y sus componentes, el análisis detallado de las fallas del generador, ha demostrado que son tres los parámetros esenciales en la supervisión de la condición de la máquina eléctrica giratoria:

- El análisis de las **descargas parciales** indica la condición de los sistemas de bobinado del estator y principalmente el núcleo con el sistema de fijación.
- El análisis de **vibración** indica la condición de las partes giratorias así como los soportes y la base del generador.
- El análisis de la **temperatura** indica la condición del núcleo del estator y del bobinado, el sistema de enfriamiento, la lubricación y los sistemas de cojinetes.

Además de los parámetros descritos con anterioridad, tres parámetros adicionales han sido considerados como esenciales:

- La información del proceso que describe las **condiciones actuales de operación**, es decir, la carga activa, la corriente de excitación, la carga hidrostática, la producción, el funcionamiento del motor.
- Adicionalmente, si el generador funciona con frecuencia cerca de los límites del diseño eléctrico, se podrá utilizar un módulo generador especial para que vigile las **cantidades electromagnéticas**.
- Los datos del **entrehierro** describen la distancia mecánica entre la parte giratoria y la parte fija de la máquina eléctrica. La necesidad de obtener los datos del entrehierro depende del diseño del estator y del rotor.

#### DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

Difícilmente existe otro tipo de equipo de máquina eléctrica cuyo diseño y dimensiones se encuentren influenciados por tantos factores como la máquina sincrónica accionada por una turbina hidráulica. Los turbo generadores utilizados

en las Centrales de energía de vapor, gas y ciclo combinado presentan valores estándares para la velocidad y sobre-velocidad así como una estructura uniforme, que permite una estandarización considerable del diseño. En el campo de los Generadores hidroeléctricos existe una gran diferencia en las características determinantes básicas para dos Centrales de energía, aún con la misma clase de poder, los mismos generadores pueden ser utilizados sólo en casos muy especiales.

La causa de esta diversidad entre los factores determinantes se halla en la misma naturaleza de la hidroenergía. Dos de estas particularidades son especialmente decisivas:

La hidroenergía es locamente limitada. Por lo tanto se decide el sitio del edificio de la Central de Energía. Por lo cual las Plantas Hidroeléctricas usualmente son construidas muy lejos de los consumidores. Por lo que se hace necesario transportar la energía a través de grandes distancias. Este hecho crea demandas adicionales tanto para las capacidades de carga del generador como para la estabilidad.

### **Turbinas**

Se utilizan diferentes tipos de turbinas, dependiendo del caudal y del salto. En general, podemos decir que, para caídas altas tendremos altas velocidades de turbina y para caídas bajas, tendremos velocidades bajas por parte de la turbina.

**Turbinas Pelton:** La turbina Pelton está compuesta por un disco de rueda que lleva paletas en su circunferencia. Uno o varios chorros de agua golpean estas paletas. Debido a esto, estas turbinas también son conocidas como turbinas de chorro libre. Después que el agua deja las paletas, prácticamente no hay energía cinética y gotea en agua abajo.

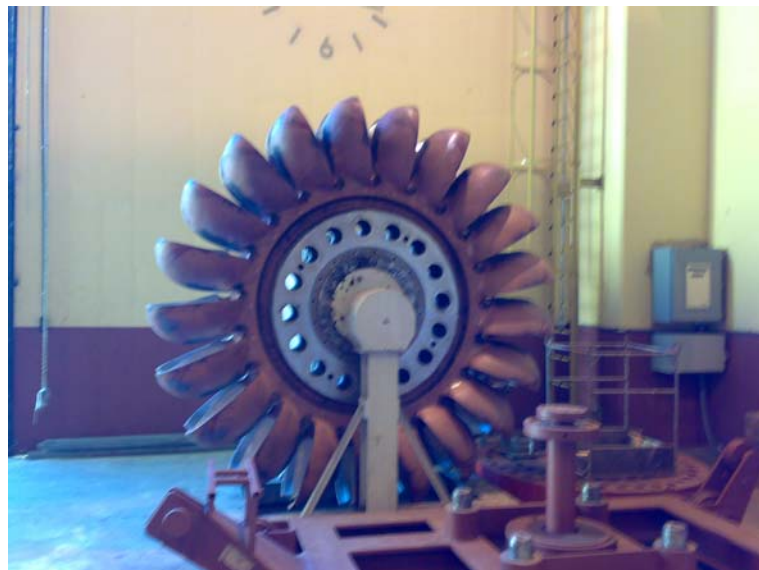
La aguja de los inyectores se utiliza como un dispositivo regulador y de apagado. El área apropiada para el uso de estas turbinas (Pelton) comprende las Centrales con las caídas más altas (hasta 1900m). Al mismo tiempo debido a su simplicidad, también son utilizadas para las caídas más bajas y caudales bajos.

La velocidad sincrónica típica para las turbinas Pelton en una red de 50 Hz está entre los 1000 y 428.6 rpm. La velocidad de disparo para este tipo de turbina es normalmente 1.8 a 1.9 veces la velocidad nominal.

Existen otros tipos de turbinas que pueden ser utilizadas, estas son:

- **Turbinas Kaplan:** Tienen solamente ruedas de rodamiento de flujo axial. Este tipo de turbina posee un buen funcionamiento aún en cargas parciales; por lo tanto puede ser fácilmente adaptada a un régimen de agua cambiante.
- **Turbinas Francis:** La turbina Francis es adecuada para las Centrales con caídas medias
- **Turbinas de Bombeo:** Las turbinas de Bombeo son utilizadas en las Centrales donde el bombeo y la generación se realizan con la misma máquina hidráulica.

Figura 9. Turbina Pelton, Planta Hidroeléctrica Chixoy



FUENTE: PLANTA HIDROELÉCTRICA CHIXOY

**Cojinetes:**

El cojinete guía de la turbina es autolubricante, de circulación forzada a través de un refrigerador de aceite y construido de dos mitades de acero revestido con metal blanco ante fricción sostenido por el soporte del cojinete y asegurada por tornillos.

Debido a la rotación se forma en la pared un anillo giratorio de aceite en el cual se introducen las alas de represión. El aceite capturado, sube por los tubos hasta el refrigerador de aceite; este aceite se introduce en el cojinete entre el eje y el revestimiento inferior del eje. Mediante una derivación del aceite de retorno del cojinete, se llena un depósito en el revestimiento inferior del eje, cuyo aceite fluye para el prelubricado del cojinete a través de la válvula, al momento de iniciar la turbina.

El recorrido del aceite, está controlado mediante el medidor del flujo. Una interrupción del flujo, origina el cierre rápido de la turbina; el flujo puede ser regulado mediante una válvula. Además del medidor de flujo, las temperaturas del aceite pueden ser medidas con la ayuda de los termómetros de entrada y salida.

La presencia de agua dentro del flujo del aceite del cojinete, puede ser detectada con un detector de agua. El medidor de nivel de aceite, da alarma en caso de que entre agua por debajo y suba demasiado alto. De igual manera este medidor de nivel, da alarma en caso de que el nivel esté demasiado bajo.

El nivel del aceite del cojinete puede ser controlado con una varilla, estando la turbina en reposo. Para asegurar la compensación de la presión entre el entorno y el interior del cojinete sin causar ningún daño al cojinete, debido al polvo, se instalan los filtros.

**Sistema de Enfriamiento:**

Las turbinas tipo Pelton están diseñadas con un sistema de enfriamiento a base de agua. Este sistema tiene como función principal y esencial, mantener las partes rotativas de la turbina en operación continua bajo temperaturas estables, dentro de los rangos fijados por el fabricante del equipo. Su abastecimiento contempla también el enfriamiento del aceite como lubricante. Su configuración obedece a un esquema que trabaja a base de un equipo de bombeo, el cual toma el agua del desfogue (agua ya turbinada), la cual es transportada a través de una tubería

pasando por intercambiadores de calor, para luego retornar al desfogue, en circuito cerrado. Este sistema está provisto de válvulas de cierre (en caso de reparaciones y/o mantenimiento), así como de instrumentos de control y supervisión, tales como termómetros, manómetros, medidores de caudal, entre otros.

**Figura 10. Tubería del sistema de enfriamiento de las turbinas**



**FUENTE: PLANTA HIDROELÉCTRICA CHIXOY**

### **Eje de Turbina:**

Es importante mencionar que el eje de la turbina no necesita de mantenimiento en servicio, es decir, que se le brinda éste hasta que la máquina se desmonte. Las vibraciones excesivas que se transmiten al cojinete guía y al revestimiento del eje provocan desequilibrio en la parte rotante de la máquina. Por lo anterior es de suma importancia, localizar y eliminar el origen de este defecto lo más rápido posible.

La instalación y desmontaje del eje de la turbina se realiza desde abajo respectivamente hacia arriba; antes de colocarse el eje debe colgarse verticalmente y asegura la rotación del mismo mediante pasadores.

El eje completo que cuelga libremente del cojinete de empuje debe ser medido, para llevar un control de marcha concéntrica. Después de cada serie de medidas se gira el eje 90°, con la finalidad de medir el eje en cuatro planos separados. En el caso de que el eje se deslice con el cojinete de empuje, este deslizamiento debe ser tomado en cuenta.



### **Acoplamiento Turbina/Generador:**

El acoplamiento del rodete al eje de la turbina y de éste con la brida del generador es efectuado mediante pernos de acoplamiento pretensados en ambos casos. La transmisión de fuerza tiene lugar mediante fricción. Para medir y controlar la elongación, se coloca en cada uno de los pernos una varilla indicadora.

Los pernos de acoplamiento se alargan, debido a la fuerza de pretensado ejercida por el dispositivo hidráulico. El valor del alargamiento es determinado por medio de mediciones de comparación efectuadas antes y después del pretensado.

La longitud de los pernos de acoplamiento debe ser medida cuando:

- Al final del régimen de prueba
- Antes de cada desmontaje del acoplamiento, o a más tardar luego de cada 30,000 horas de servicio.

### **Generadores**

Junto a los requisitos dados por las turbinas y los varios factores adicionales influyentes en la red, determinan el diseño de los generadores hidroeléctricos. Normalmente esta información se da en la especificación del generador pero algunas veces son también el resultado de un proceso de optimización, como por ejemplo:

- Límites de tamaño para el diseño y transporte de componentes grandes y pesados, ensamblaje
- Montaje del generador (vertical/horizontal), arreglo de cojinete
- Requisitos especiales para las fuentes exteriores
- Capacidades de elaboración en un trabajo específico
- Sistemas de enfriamiento; aumento de la temperatura máxima para el agua de enfriamiento
- Habilidad para resistir terremotos

**Unidades de baja velocidad:** Un circuito de aire de enfriamiento cerrado normalmente enfría estas máquinas. La parte central y la llanta del rotor actúan como un ventilador radial. Por lo tanto estas máquinas son ventiladas por el rotor. El aire que sale del centro del rotor enfría los bobinados de los polos. El

enfriamiento del estator se realiza indirectamente por el aire de enfriamiento a través de los ductos radiales en el estator o directamente por el agua enfriante en el bobinado del estator. Normalmente el enfriamiento con agua es utilizado para unidades voluminosas y de bajas velocidades.

**Unidades de alta velocidad:** Estas unidades son utilizadas por Centrales de gran altura de salto en regiones montañosas y las turbinas Francis o Pelton funcionan allí. Un circuito cerrado de aire de enfriamiento normalmente enfría las máquinas de gran velocidad. El rotor está provisto con ventiladores axiales, por lo tanto, éstas son ventiladas axialmente. En las unidades de turbina de bombeo con dos direcciones de rotación, los ventiladores eléctricos son utilizados para hacer ventilar el aire de enfriamiento a través de la máquina independientemente de la dirección de la rotación.

**Figura 11. Parte interna del generador de la Planta Hidroeléctrica Chixoy**



**FUENTE: PLANTA HIDROELÉCTRICA CHIXOY**

### **Temperatura de Cojinetes:**

La combinación de cojinete guía superior y de empuje con su serpentín de enfriamiento, son instalados en el recipiente de aceite el cual está en la parte central de la ménsula superior. El cojinete de empuje cuando posee un ajuste propio, es capaz de incrementar o disminuir la carga del cojinete en la zapata

individual por ajuste manual, logrando de esta manera mantener la presión actualizada.

Arrancando a la temperatura normal de operación, el cojinete es capaz de operar a velocidad normal y con carga sin necesidad de utilizar agua de enfriamiento, al menos por los primeros quince minutos de operación. El generador está provisto de un contenedor para el sistema de lubricación, el que consta de un sistema que elimina cualquier fuga o escape del vapor del aceite del cojinete y del mismo sistema lubricante. Además de lo anterior, el cojinete posee dos detectores de temperatura, de resistencia.

Un serpentín de enfriamiento es provisto en el recipiente de aceite para lograr bajar la temperatura en el aceite lubricante. Este serpentín, esta fabricado de cobre y posee la capacidad suficiente para mantener el aceite a la temperatura adecuada, aproximadamente a unos 25° C.

#### **Sistema de Enfriamiento:**

El sistema de enfriamiento de los generadores, está compuesto de seis enfriadores de aire, los cuales se encuentran simétricamente espaciados alrededor del estator del generador para lograr mantener la temperatura del aire que entra, debajo de los 40° C; para que el generador opere constantemente bajo una condición, carga o voltaje específico, el agua de enfriamiento debe estar a 25° C. Es posible remover cualquier enfriador, sin necesidad de parar el generador o disminuir la potencia de salida.

Los enfriadores de aire, son panales tipo radiadores hechos de placas tubulares. La tubería de los enfriadores de aire son de cobre y las placas tubulares son de bronce marino. La cámara de circulación es fabricada de acero, y es suministrado con los enfriadores.

Una válvula es provista en cada entrada y salida de cada enfriador, de tal manera que fácilmente pueda aislarse cada enfriador para el respectivo enfriamiento, sin tener que interferir con los demás enfriadores. El agua de enfriamiento para la superficie del enfriador de aire es alimentada desde la parte inferior de los mismos.

El ventilador de aire con válvula se encuentra en la parte superior de cada enfriador; este sistema está diseñado de tal manera que evita que se generen sedimentos en la tubería.

**Figura 12. Sistema de enfriamiento de los generadores**



**FUENTE: PLANTA HIDROELÉCTRICA CHIXOY**

### **Centricidad Rotor-Estator:**

La centricidad de un Generador eléctrico o bien de un Generador/motor, al momento del montaje de estos equipos, es de suma importancia. Esta centricidad está dada por la separación (distancia) que existe entre la parte rotacional (Rotor) y la parte estacionaria (Estator); misma distancia que es trabajada en milímetros.

Básicamente, debe corresponder el centro del rotor con el centro del estator, para que de esta manera no sólo se esté asegurando la centricidad, sino que también se logran evitar las vibraciones y los incrementos de temperatura de las partes con cojinetes. Por lo tanto, es de vital importancia hacer coincidir exactamente los centros de la unidad (parte estacionaria y rotacional), así como también el alineamiento del centro de la turbina con el generador. El procedimiento de instalación de las partes estacionarias debe hacerse de manera continua y con todos los requerimientos correctos.

En la actualidad existen diferentes procedimientos de centrado a base de equipo diseñado para tal propósito, siendo uno de los más utilizados el procedimiento que hace uso de una cuerda de piano o alambre fino con una plomada en la parte inferior desde la ménsula superior al centro exacto del eje de la turbina. Debe medirse la distancia radial desde el alambre o cuerda de piano a la cara interior del núcleo del estator de manera precisa para obtener de esta manera el centro del eje. Anteriormente debe haberse instalado la turbina, alineado el centro de las dos partes tomando como base el centro del eje de la turbina, para lo cual se debe chequear que el eje de la turbina fue correctamente instalado con respecto al centro del cuerpo del equipo, a su correcta nivel y elevación. Para un adecuado centrado es necesario medir y apuntar las elevaciones y centro de la ménsula superior y de la parte estacionaria (estator). Dependiendo del diseño y dimensiones del propio generador se tienen diferentes tolerancias en el centrado.

Por ejemplo, para un generador de 55 MVA, las tolerancias para la ménsula superior son del orden:

- Elevación      entre  $\pm 1.0$  mm
- Nivel            entre 0.05 mm/m
- Centro          entre  $\pm 0.05$  mm

Mientras que para el marco del estator las tolerancias son:

- Nivel            entre 0.1 mm/m
- Centro          entre 0.4 mm

### **Eje-Ménsulas Estator:**

La ménsula superior está construida con placas de acero soldadas y soporta el peso completo de los elementos rotacionales del generador, tales como, rodete de la turbina, eje y el desbalance hidráulico del rodete de la turbina. En su parte central, está colocado el recipiente de aceite para el cojinete guía y el cojinete de empuje superior. La cubierta del recipiente de aceite previene la existencia de cualquier fuga de vapor proveniente del aceite.

Entre la cubierta y el eje, es colocado un sello de aire. El aire presurizado que proviene de las cubiertas (las cuales poseen forma de campana), del generador chocan contra el sello, obteniendo de esta manera expulsar al exterior los vapores

del aceite. El recipiente en donde es depositado el aceite, esta diseñado de tal manera que no permite un batido en el aceite.

### **Protección**

En lo que respecta a la protección, la gama de variables a registrar para hacer uso de su señal en un aviso de alarma y disparo, está en función del diseño propiamente de la Central, así como también de su capacidad instalada. Una protección en sí como su nombre lo indica está considerada para proteger (aislar) al equipo de la presencia de una posible perturbación (falla), es decir, apartar al equipo de la falla. Para lograr prolongar el funcionamiento tanto de la Planta como el del equipo, es necesario contar con dos tipos de protecciones, mecánica y eléctrica.

#### **Protección Eléctrica:**

Este tipo de protección es realizado mediante relés de seguridad, los cuales son instalados para ser accionados (disparados), al momento de ocurrir una falla determinada.

**Relés instantáneos de voltaje CA:** Son relés de operación instantánea, aquellos que poseen un pulsador como elemento principal. El pulsador se levanta cuando el voltaje aplicado a la bobina aumenta por encima de un valor fijado; si el valor del voltaje disminuye por debajo de un valor específico, el pulsador cae (baja).

Este tipo de relé permite obtener diferentes configuraciones ya que el elemento posee dos contactos independientes. Existen diferentes tipos de estos relés, uno para cada aplicación de rango de voltajes variables; éstos permiten ajustes de tiempo de operación y reposición en términos del valor de ajuste al 100%.

- 0 a 200% < 35 ms
- 100% a 0 < 20 ms
- 100% a 50% < 25 ms
- 200% a 0 < 40ms

**Relés de pérdida de campo:** Este tipo de relé, está diseñado para detectar la pérdida del campo de excitación o la disminución anormal de la excitación de campo de una máquina síncrona.

Estos relés, tienen como principio de operación, la pérdida de excitación de campo o la disminución anormal de la misma en una máquina de sincronismo, el cual se puede considerar como un fenómeno en el que el voltaje de inducción interno de un generador, disminuye en comparación con el voltaje indefinido de la barra colectora cuando un circuito equivalente de una máquina síncrona se encuentra en las condiciones ideales de operación. Además, tiene el cometido de detectar las mencionadas condiciones anormales, calculando la disminución del voltaje interno inducido por medio de los datos de potencia de entrada (voltaje terminal del generador, corriente de armadura, impedancia interna del generador y la impedancia vista desde el terminal del generador hacia la barra colectora infinita).

**Relés de falla a tierra del campo:** La ocurrencia simultánea de falla de tierra en dos puntos del circuito de campo de una máquina síncrona provista de excitador, puede resultar en una corriente grande de corto circuito, presentando la posibilidad de un daño mayor en el equipo. Este relé, detecta fallas de tierra de un punto en circuitos de campo, de forma que se escuche una alarma u otras señales de aviso.

Existen tres métodos de suministro de fuerza para detectar falla de tierra de un punto en el circuito de campo en la máquina:

- Utilizando un suministro auxiliar CA para activar un relé detector de falla de tierra de CA
- Haciendo uso de suministros auxiliares CD para activar un relé detector de falla de tierra CD
- Usando un excitador de voltaje.

El elemento primario de este relé es el elemento de bobina móvil CD, de gran sensibilidad. Este elemento es altamente sensitivo para las corrientes pequeñas. Como es de tipo de bobina móvil se repone automáticamente cuando una potencia de entrada se hace menor que el valor predeterminado. La corriente mínima de operación se puede fijar en cualquier valor dentro del rango de  $\pm 0.125$  a  $0.75$  mA.

Cuando la bobina móvil, se utiliza en un voltaje determinado de 220V, por ejemplo, con fijación de 0.25 mA, ésta puede detectar una falla con una resistencia de tierra de 200kΩ o más.

Cuando no hay falla a tierra en el circuito de campo, no pasa corriente por el elemento de bobina móvil, y la parte móvil del elemento se mantiene estacionaria en la posición central. En el caso contrario, cuando ocurre una falla a tierra en el circuito, el circuito de puente pierde el balance haciendo que la corriente pase por la bobina móvil.

**Relés de Sobretensión:** Este relé, es un relé de protección de falla de tierra, que opera con voltajes bajos para cerrar los contactos y queda disponible para la operación de un alto voltaje continuo.

Existen dos tipos disponibles de estos relés:

- El relé de 120V, el cual está dirigido principalmente para la protección de tierra de los devanados del rotor de la máquina y para protección de tierra de los sistemas en alcances bajos.
- El relé de 208V, que es para la protección de tierra de los sistemas.

El relé de sobretensión, consiste en un elemento de voltaje, un interruptor indicador de contacto, un condensador y un transformador de fijación.

El elemento de voltaje es un relé de disco de inducción con un elemento compuesto de un núcleo laminado y un disco espiral. Cuando la corriente excede el valor fijado y la torsión del disco sobrepasa la contra-torsión del resorte de la bobina, el disco gira para cerrar los contactos. El tiempo que se requiere para cerrar los contactos es controlado, mediante la fuerza de un magneto permanente.

El interruptor indicador de contacto es un relé pequeño de tipo plaqueta de corriente directa. Al momento que una corriente arriba del valor fijado, fluya a través de la bobina, la armadura es retraída al polo magnético, haciendo un contacto y causando la caída del indicador.

El tiempo de operación para el relé se puede cambiar fácilmente desde rápido hasta relativamente lento, con solo girar la perilla graduada que posee.



**Relés de sobre-tensión de voltaje controlado:** Estos relés son utilizados cuando se necesita protección contra fallas en corrientes por debajo de la máxima carga normal. Una aplicación típica es la protección de mantenimiento de un generador sincrónico. Los cuatro tipos básicos de relés tienen curvas características diferentes, así como también diferentes tiempos de operación. Es posible incorporar un elemento de disparo de indicación instantánea.

Estos relés consisten en un elemento de exceso de corriente de inducción, un cilindro del tipo de voltaje insuficiente, un interruptor indicador de contacto y un elemento de disparo de indicación instantánea (opcional).

El elemento de exceso de corriente del relé es del tipo de inducción y comprende un núcleo y un disco espiral. Mientras que el interruptor de indicación de contactos es un relé magnético del tipo de claqueta. La unidad de disparo de indicación instantánea es un relé instantáneo de exceso de corriente, con un indicador adjunto. Por último, el elemento de voltaje es esencialmente un motor de inducción con cuatro polo, con un rotor cilíndrico.

**Relés diferenciales:** Esta clase de relés, también responden bajo el nombre de Relés de Diferencia de Alcances, éstos están diseñados para una protección rápida de generadores y condensadores rotativos, para evitar cortocircuitos de entre-fases o cortos circuitos de espirales. En general provee la mejor protección contra cortocircuitos y no se encontrará otro mejor para la aplicación en generadores o condensadores rotativos, ya que, además, previene el mal funcionamiento de ellos durante las irregularidades provenientes de una mala sincronización u otros fenómenos transitorios. Es posible construir relés semejantes para condiciones de operación específicas.

En condiciones normales y sin falla, los flujos magnéticos de la bobina de contención, tienden a prevenir el movimiento del balancín. En este relé, el balancín normalmente empuja hacia arriba el contacto móvil que se mantiene en contacto con él mediante un resorte de espiral. Este espiral mantiene el contacto móvil y al balancín en próximo contacto hasta que una corriente de falla haga que el balancín cierre el contacto fijo.

El relé diferencial tiende a operar sólo en la magnitud de la corriente diferencial. Esta es una de las características de todos los relés de este tipo.

Por consiguiente, el valor mínimo de operación decide la operación del relé cuando una corriente de carga suficiente pasa a través de él. De esta manera al tener una corriente diferencial de valor semejante al valor mínimo de operación, la cual fluye de manera constante, no se puede esperar una aplicación con eficiencia de estos relés. La velocidad de operación de los relés, es tal que permite detectar una falla interna en aproximadamente 6ms.

En general, para máquinas de rotación que poseen un transformador ordinario, las derivaciones de un 10% son efectivas; mientras que con las máquinas de rotación sin transformador se recomiendan derivaciones de 20%.

**Relés de sobre-corriente de Secuencia de fase negativa:** Este relé de inducción está diseñado específicamente para protección de sobre-corriente de secuencia de fase negativa de máquinas sincrónicas. Al momento de ocurrir cualquier fallo de balance en un sistema, una corriente de fallo que incluye un componente fase negativa, circulará por las máquinas sincrónicas conectadas con él. Esta sobre-corriente de fase negativa creará en la máquina un campo que girará en dirección contraria, incluyendo una gran corriente parásita en la superficie del rotor, que aumentará considerablemente la temperatura. Esta corriente de fase negativa en la máquina ocasionará un grave daño al rotor.

Con el fin de evitar este tipo de daño, este relé, posee características de sobre-corriente de secuencia de fase negativa contra operación de tiempo, para que de este modo se logre equilibrar la sobre-corriente negativa permisible del generador, con un margen relativamente constante.

**Relés para protección de transformadores:** Los relés de razón diferencial instantánea de transformadores de fuerza y otros circuitos, están equipados con tres circuitos que pueden aplicar a los transformadores de dos o tres bobinados. Estos relés pueden soportar corrientes de entrada de hasta 200A en el circuito secundario del transformador de corriente. Este relé está diseñado de tal manera que cuando la corriente magnetizadora, se facilita la contención por medio de un filtro sintonizado con el segundo armónico; pero cuando fluye una corriente de fallo

ordinaria, se puede obtener una operación rápida aplicada al elemento del polo, una corriente de operación derivada de la corriente diferencial que excluye el fuerte segundo armónico.

Los tiempos de operación para estos relés, son de 500% del valor de derivación, 65ms menos.

**Relés de sobrecarga:** Este relé térmico de sobrecarga es un relé de sobrecarga de operación térmica designado para la protección de motores o generadores contra un exceso de carga, pero su uso se puede extender a transformadores, porque tienen las mismas características de elevación de temperatura de situación de sobrecarga, que los motores y generadores.

Generalmente el límite de operación continua de un aparato de fuerza, bajo condiciones normales de ambiente, está garantizado por su capacidad nominal, y es natural que el deterioro de los materiales de aislamiento se acelere con el uso cuando se opera, aunque sea por un breve período de tiempo, en una condición de carga que excede el valor nominal. En caso de motores, existe una sobrecarga inevitable cuando una gran cantidad de corriente fluye en el momento del arranque. Naturalmente, los motores están hechos para soportar esta posible sobrecarga, pero si los arranques y paros son muy frecuentes, y repetidos en un espacio de tiempo corto, no es de extrañarse que se produzca una situación de sobrecarga. De este ser el caso, se desarrolla una secuencia de esta manera: sobrecarga→ elevación de temperatura→ deterioro de los materiales de aislamiento; lo anterior se genera en proporción a los valores de la magnitud de la sobrecarga y del lapso de tiempo continuo. Debido a ello que se hace necesario encontrar medios adecuados para detectar la condición de sobrecarga y reducirla por medio de un mecanismo de alarma o de disparo temporal.

Este relé está diseñado de tal manera, que la corriente del apartado protegido se conduce al recalentador por medio de un transformador, y el calor generado actúa sobre un resorte bimetálico que causa la operación de este relé. Además, el mismo límite de tiempo no es indicado para la protección de este tipo de sobrecarga. Es decir, para obtener una protección de sobrecarga en casos de una corriente de este alcance, es necesario tener un relé de tal fijación que el valor de operación pueda ser variado sucesivamente para que el límite de tiempo de operación esté de

acuerdo con el alcance. Otro aspecto importante de estos relés es que son capaces de operar tanto con corrientes directas como con corrientes continuas.

Las características más sobresalientes de estos relés son:

- El relé de sobrecarga térmico está elaborado para la protección de los motores contra una sobrecarga
- Es posible aplicarlo para el uso en la protección de sobrecarga en los generadores que tengan las mismas características de tiempo permisibles de sobrecarga que los motores, así como también para la protección de sobrecarga de casi todos los transformadores
- Como este relé está diseñado para una amplia capacidad de calor y para operar cuando el calentamiento del aparato adquiere determinado límite, el tiempo de operación se puede reducir por medio de la condición de carga antes de ocurrir una sobrecarga
- También cuenta con la capacidad de una reposición automática por medio de un contacto trasero y puede ser utilizado para los siguientes propósitos:
  - o alarma de sobrecarga,
  - o para bloquear el arranque de motores hasta que éstos se enfríen luego de haber sufrido algún recalentamiento
  - o causan el arranque de aparatos de refrigeración, como los ventiladores.

#### **Protección Mecánica:**

Básicamente la protección mecánica de los equipos, está diseñada y basada sobre variables de funcionamiento que se encuentran relacionados con:

- Temperatura de aceite
- Presión de aceite
- Posición anormal de Válvulas
- Niveles de aceite
- Nivel de agua en cámara de turbina
- Temperatura de agua en sistema de enfriamiento
- Temperatura de cojinetes
- Flujos de agua en sistemas de enfriamiento
- Temperatura de Transformadores (Devando-aceite)

El esquema de protección mecánica principia desde el punto de origen donde se registran (monitorean) cualesquiera de las variables antes citadas, haciendo llevar este registro (o variable) a través de una señal, ya sea ésta digital o bien análoga, en cuyo caso se hace necesaria la instalación de un transductor de señal en miliamperio (mA) o bien en mili-voltios (mV) a un dispositivo eléctrico llamado Relevador (Relé) para que el mismo al recibir la señal, abra o cierre un contacto según sea la configuración de la protección, con lo cual queda abierto el circuito correspondiente en la secuencia lógica de operación del(los) equipo(s), provocando de esta manera el paro (disparo) instantáneo de la unidad.

### **Excitación**

El sistema de excitación para cada uno de los generadores, si bien éstos son del tipo estático, con los siguientes valores nominales:

- Capacidad Nominal	194kw
- Voltaje Nominal	200V
- Corriente Nominal	970A
- Voltaje Máximo	+250V -200V

Dicho sistema está constituido por los siguientes componentes principales:

**Transformador de excitación:** La energía para el sistema de excitación del generador en operación está derivada de las terminales del mismo generador, por medio del transformador de excitación, el cual es del tipo seco (350kVA; 12800-220V), trifásico con una frecuencia de 60Hz. El transformador está conectado al ducto de barras del generador.

**Excitación inicial:** La excitación inicial es suministrada por medio de una batería de 110V de la Planta, o bien por un transformador auxiliar de 7.5kVA, proveniente de un banco de rectificación. La selección entre batería y transformador se hace por medio de un conmutador, el cual está instalado en el tablero de excitación del panel.

Al momento que el generador alcanza 95% de la velocidad, se cierra el interruptor de excitación y posteriormente el contador de la excitación inicial. Cuando el voltaje de las terminales del generador llega al 30% de su valor nominal, el sistema de

excitación propia comienza a funcionar, produciendo un voltaje de salida. Con el aumento de voltaje del generador, la corriente de excitación es transferida de manera automática, de batería a pura excitación. El banco de batería del generador, se desconecta automáticamente al momento que el mismo logre el 70% del voltaje nominal.

**Tablero de excitación:** Todo el equipo del sistema de excitación, incluyendo los relés auxiliares de arranque, paro, módulo de excitación, etc., están instalados en el tablero de excitación. Este tablero está compuesto por paneles individuales, para el control y operación de cada una de los componentes que conforman el sistema de excitación. Uno de los paneles del tablero está equipado con un anunciador de fallas, mismo que debe ser repuesto antes del arranque de la unidad.

Además de los componentes antes mencionados, el sistema de excitación cuenta con dos limitadores, uno para la Excitación Mínima y el otro para la Excitación Máxima, respectivamente. El limitador de excitación mínima impide la baja excitación del generador. Mientras que el limitador de excitación máxima evita que el regulador de tensión aumente la corriente de excitación fuera de su valor nominal y de esta manera proteger las bobinas del campo del generador de cualquier sobrecalentamiento.

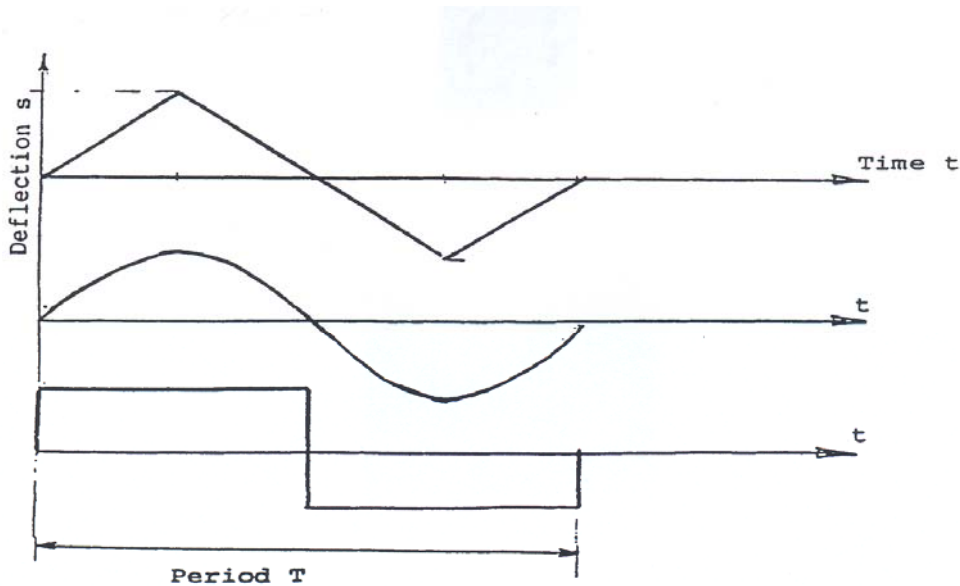
## **VARIABLES DE MONITOREO**

### **Vibraciones**

La vibración es un movimiento oscilatorio; las variables, que definen el estado, ocurren regularmente; con mayor frecuencia si el movimiento se repite. Se dice que la vibración es una función de tiempo. Se analizará particularmente la vibración “periódica” donde, después de un lapso de tiempo, las variables se repiten exactamente o, en términos prácticos, están sujetas a una relación fija.

Los procesos de oscilación son ilustrados por medio de las curvas de deflexión comparadas con el tiempo (curvas  $s, t$ ) como se muestra:

Figura 13. Comportamiento de las curvas de vibración contra tiempo



FUENTE: MANUALES DE MANTENIMIENTO PLANTA HIDROELÉCTRICA CHIXOY

En la práctica, la oscilación y la vibración ocurren cuando una masa es sujeta de fuerzas bajo las condiciones flexibles. Los elementos de la masa y de resorte son componentes necesarios de un sistema que es capaz de vibrar y oscilar. La vibración puede ser libre (es decir natural) o forzada. Un sistema de masa de resorte se vuelve en vibración libre si la masa una vez desplazada del resto, es dejada que vibre por si misma; la vibración forzada toma lugar si el sistema se encuentra moviéndose continuamente por una fuerza externa. Durante el movimiento, las fuerzas de resorte y las fuerzas de masa inerte actúan, y en cada instante se encuentran en un estado de equilibrio. En la práctica, también se presenta un tercer elemento en la forma de fuerzas de fricción, que actúan en posición de la dirección del movimiento y que deben ser incluidos en las condiciones de equilibrio. El efecto de fricción es llamado "amortiguación". Si un efecto es tan pequeño que no puede ser retirado del armazón manualmente, tenemos un sistema no amortiguado, de lo contrario es amortiguado.

Como se dijo anteriormente, en los casos reales siempre están presentes fuerzas que tienen un efecto amortiguante. Las fuerzas amortiguantes realizan un trabajo y reducen el contenido de la energía cinética en el sistema.

La vibración indeseable, que ocurre en las máquinas eléctricas puede tener diferentes causas, que incluyen:

- la vibración de la resonancia de las partes estacionarias y móviles,
- las vibraciones desbalanceadas,
- la vibración auto excitada,
- vibración debida a la torsión y debida a la flexión.

La vibración auto-excitada es el fenómeno en el que al principio una influencia externa excita el sistema de rotación (tal como el rotor), y después continúa vibrando por si solos. Ahora se discutirán las causas de la vibración de manera individual, comenzando por el más importante.

#### **Vibración Forzada:**

**Desbalance excesivo:** Para que se pueda decir si la vibración dada es debida a un Desbalance, y si puede ser corregida por el re-balance del sistema, se requiere de ciertas informaciones. Además de un Desbalance genuino en la línea del eje (es decir, la distribución fallida del peso) también existe otro fenómeno de Desbalance en los equipos de turbina y los generadores de las Hidroeléctricas. Puede ser independiente de los varios parámetros de la máquina y cuyo efecto es más grande que el desbalance residual que queda después de que la máquina ha sido balanceada en la fábrica.

**Velocidades críticas muy cercanas a la velocidad de operación:** Las velocidades críticas del conjunto de turbinas dependen de la flexibilidad dinámica de los cojinetes. Estos valores pueden diferir grandemente de las flexibilidades estáticas, porque las partes estacionarias también representan los sistemas que son capaces de vibrar. Generalmente lo mismo es válido para la maquinaria hidroeléctrica.

Sólo en los recientes años, este factor ha sido tomado en cuenta en la predicción de las velocidades críticas. Inclusive hoy en día, los datos de velocidad críticos dados por las máquinas que rotan han estado basados sólo en las flexibilidades



estáticas. Debido a esto, es que las velocidades críticas de las líneas del eje generalmente se encuentran cerca de las velocidades de operación. Generalmente, la amplitud de la vibración aumenta con el cuadro de la velocidad, y los efectos de la resonancia causan un incremento. Por otro lado, la vibración del eje siempre se mantiene más alta que la vibración del cojinete. Si se observa no sólo la amplitud pero también la fase de la vibración del eje, usualmente se encuentra que existe un eje limpio en la fase en un cojinete al menos cuando el cojinete atraviesa la velocidad crítica.

La resonancia de las partes estacionarias como los pedestales del cojinete, las bases, los haces electrónicos, alojamientos sobresalientes, etc., frecuentemente son causados por la vibración. En las Plantas, una línea del eje puede ser balanceada sólo a un nivel mínimo de vibración en el eje. En muchos casos, el desbalance residual es suficiente para excitar la mencionada resonancia.

Este tipo de problema se puede presentar de las siguientes maneras:

- el cojinete afectado tiene una vibración fuerte en una dirección solamente (en algunos casos, como en los conjuntos de las turbinas, este movimiento es vertical)
- la vibración del eje en este punto es prácticamente la misma que la del pedestal del cojinete

Se ha demostrado que las partes estacionarias sujetas a la resonancia algunas veces han sido tratadas por años, por una sucesión de esfuerzos debidos al re-balanceo, y el problema no fue solucionado hasta que la estructura estacionaria fue separada.

**Fallas en los acoplamientos y en el alineamiento:** Estas fallas pueden ser tratadas de la misma manera que la alineación vertical de la máquina ya que los efectos en la mejora de la vibración son muy similares, tales como:

- Distribución desigual de la carga: Debido a la distribución desigual, la vibración de la frecuencia rotacional es excitada en el eje, proporcionar al par. El re-balanceo no es de ayuda, porque la vibración depende del par.
- Excentricidad: También es conocida como la prueba radial; esta falla causa la vibración en la frecuencia rotacional, aunque la deflexión del eje depende

del par y la velocidad (no provee un aumento de la resonancia). La vibración puede ser demostrada mediante el balance, pero las fuerzas del cojinete, generalmente no pueden ser compensadas para toda la velocidad.

- Balance del eje: Es una falla en la alineación que puede ocurrir cuando la máquina comienza a funcionar o después de un período muy largo de operación. Al igual que en la distribución desigual de la carga, el balance no es la solución, ya que la frecuencia de la vibración no es igual a la frecuencia de rotación.
- Desalineación angular de los ejes: La vibración con frecuencia rotacional no ocurre en este caso, si y solo si, las secciones de ambos ejes tienen distinta rigidez, en cambio habrá una vibración de doble frecuencia; en la que su intensidad depende de la cantidad del desalineamiento angular, por lo cual el balance no será útil.

**Vibración debida a las fuerzas magnéticas:** Estas vibraciones tienen lugar al momento de ocurrir las fuerzas magnéticas. Como con la turbina, existen fuerzas tangenciales que actúan en la superficie del cuerpo del rotor. También se tiene un desbalance residual, fijado en relación con el rotor que puede ser balanceado. El desbalance magnético manifiesta por medio de un incremento repentino en el nivel de la vibración, mientras la excitación es activada.

**Vibración excitada por flecha:** La vibración generalmente ocurre sólo en los generadores de dos polos. Este tipo de vibración puede ser diferenciado de la vibración magnéticamente excitada de frecuencia doble por el hecho de que se encuentra independiente de la excitación.

#### **Vibración Auto-Excitada:**

Estas vibraciones pueden ser reconocidas por el hecho de que su frecuencia generalmente corresponde a la frecuencia natural amortiguada más débil del sistema. Esta es siempre la primera preocupación ya que los ejes rotan sobre la velocidad crítica. La energía es removida del eje de rotación y transferida al sistema de vibración, a una frecuencia natural. Si las fuerzas de amortiguación no son suficientes para soportar dicho proceso, sucede una vibración de incremento

estable, a una frecuencia natural del sistema. Este incremento no se detiene hasta que el rotor comienza a rozar con la caja.

Generalmente, la vibración auto-excitada puede ser corregida por las siguientes medidas:

- Aumentando la amortiguación externa
- Aumentando las velocidades críticas del rotor
- Aumentando la diferencia entre la rigidez vertical y horizontal de los cojinetes del rotor.

**Vibración por la película de aceite del cojinete:** En este caso, se está tratando con la vibración hidrodinámica excitada, que ocurre principalmente en los generadores de turbinas con lubricación a base de movimiento centrífugo. La causa reside en las características elásticas y de amortiguación de las películas lubricantes. La corrección se obtiene realizando cambios en los cojinetes: primeramente las cargas específicas del cojinete, seguido por las separaciones del cojinete, el tipo de cojinete y la viscosidad del aceite.

Este tipo de vibración puede ser reducido por los siguientes medios:

- Reduciendo la amortiguación interior (por ejemplo: ajuste muy forzado por contracción)
- Incremento de la amortiguación exterior en los cojinetes.

### **Descargas Parciales**

Durante el tiempo de operación de la máquina hidroeléctrica, las mediciones se repiten periódicamente. Sólo aquí es posible, estudiar el proceso de envejecimiento bajo las condiciones definidas y encontrar las bases de evaluación para la interpretación del resultado. De este modo, un gran número de datos de medición son recolectados, para luego ser comparado y analizados. Uno de los métodos utilizados para el análisis de dicha información es la medición de las descargas parciales.

Se pueden utilizar diferentes métodos de medición en la investigación del diagnóstico del bobinado del estator del generador. La medición de Descarga

Parcial como uno de éstos, hace posible detectar también los daños, causados por la abrasión mecánica, o las erosiones mecánico-eléctricas del aislamiento, dentro del núcleo de acero del estator. Además, cabe mencionar que este método es especialmente utilizado para el monitoreo continuo de operación. Las Descargas Parciales, pueden ocurrir, por ejemplo entre la superficie de la barra de aislamiento y la pared de la ranura (descarga de la ranura). Estos efectos podrían ser peligrosos debido a la gran densidad de poder.

Las Descargas Parciales están conectadas con el suceso de diferentes efectos físicos y químicos, los que permiten su reconocimiento haciendo uso de diferentes métodos eléctricos y no eléctricos, es decir, de manera acústica o la determinación de los productos en descomposición. Sólo las descargas parciales de corriente causadas por las descargas parciales en las conexiones del objeto de prueba, así como los parámetros de las características de las mismas, son medidas.

#### **Técnicas de medición de la Descarga Parcial:**

Para la captura de los valores de la Descarga Parcial en un bobinado del estator se diferencian básicamente dos métodos, que son la medición con la máquina en paro (Diagnóstico) y la medición con la máquina en operación (Monitoreo).

**Medición con la máquina en paro:** La máquina no está conectada a la red eléctrica. Para la medición de la descarga parcial cada fase es gradualmente ajustada por medio de un incremento de voltaje aplicado externamente al voltaje nominal de la máquina. La medición consiste en un principio de los siguientes componentes:

- Descargas Parciales en el transformador de alto voltaje libre como fuente de alto voltaje
- Las Descargas Parciales como capacitores de acoplamiento libre
- Descargas Parciales, unidad de medición, consiste en la medición de la impedancia (cuatro polos), cables de conexión y actual.

Dependiendo de las propiedades de medición de la impedancia y de los dispositivos de medición, se miden los diferentes valores de las características de las Descargas Parciales.

La medición en paro tiene la ventaja de que puede ser realizada en corto tiempo, anulando también cualquier dificultad que pudiese ocasionar trabajar con el equipo en marcha.

**Medición de la máquina en operación:** La medición de las Descargas Parciales con la máquina en operación, es realizada, dependiendo de los requisitos, en intervalos de tiempo cortos o mayormente largos. La recopilación de las señales de las Descargas Parciales se realiza de dos maneras, ya sea a través de un transformador de alta frecuencia especialmente colocado en el lado de bajo voltaje (punto neutral) del bobinado del estator o de otro lado, a través de los capacitores de acoplamiento en el lado de alto voltaje. La conexión al dispositivo actual de medición se realiza por medio de conductores galvánicos u ópticamente aislados.

En la que respecta al lado de alto voltaje, solamente se requieren las porciones de señales de alta frecuencia. Además de las señales actuales de descarga parcial así como todos los malfuncionamientos acoplados desde afuera y a través de la red son medidos juntos.

En el punto neutral, las señales útiles y las señales de falla de todas las fases son medidas simultáneamente. La recaudación sin embargo es realizada en frecuencias considerablemente bajas. Así, se miden las porciones de frecuencia obvias en el rango de aproximadamente 10 kHz, hasta 10 MHz. Los arreglos especiales y la combinación de los diferentes acopladores permiten, a pesar de la detección de las descargas en límites definidos, también su localización.

La medición de las Descargas Parciales en la máquina en operación tiene la ventaja, de que la distribución del voltaje a través del bobinado es real y las descargas de corriente dependiente, es decir, en caso de una fijación no perfecta del bobinado del núcleo de estator y por lo tanto aumentando las vibraciones de la varilla, pueden ser mejor detectadas.

#### **Captura y Procesamiento de datos:**

Las Descargas Parciales aumentan con el sistema de bobinado y sólo en frecuencia accidental directamente en el mismo lugar, donde los acopladores son ensamblados. Por lo tanto, las señales cambian en forma y también en amplitud. Es posible un mayor procesamiento a través de sólo un sistema de respuesta. Una

calibración por medio de un calibrador es por lo tanto válido para el lugar, en donde toma lugar la inyección de la carga.

**Procesamiento de datos para el Sistema de Monitoreo de Descarga Parcial:** El procesamiento y la evaluación de la señal, especialmente la diferencia de los parámetros de medición útiles y los disturbios de ambiente, ocurren en el sistema de monitoreo de Descarga Parcial. Dicho sistema consiste en el hardware principalmente de componentes de un diseño modular (tipo de máquina, sistema de datos disponibles). Antes de que las mediciones ocurran, las pruebas automáticas y las de funcionamiento serán activadas por el propio sistema. Después de la calibración del sistema, ocurre la actual captura de datos.

### **Temperatura**

Para la mayoría de la gente, la temperatura es un concepto intuitivo que nos dice si un cuerpo se encuentra “caliente” o “frío”. En la segunda ley de la termodinámica, la temperatura está relacionada con el calor, ya que se sabe que el calor fluye únicamente de una temperatura alta a una baja, en ausencia de otros efectos. No se discutirán los distintos aspectos teóricos del concepto de temperatura, solamente se hace énfasis de la importancia que tiene en cada rama de la ingeniería experimental, así como también la familiarización de los métodos empleados en la medición de la temperatura.

Se sabe que la presión, el volumen, la resistencia eléctrica, etc., están todos relacionados con la temperatura a través de su estructura molecular fundamental, y estos cambios pueden ser utilizados para medir la temperatura misma.

Los métodos eléctricos de la medición de la temperatura son muy convenientes porque suministran una señal que es fácilmente detectada, amplificada o utilizada por los propósitos de control. Además, con una adecuada calibración y compensación, son bastante precisos.

**Termómetro electro-resistente:** Un método casi exacto de la medición de la temperatura es el termómetro de resistencia eléctrica. Este termómetro consiste de un elemento resistente, que es expuesto a la temperatura que se quiere medir. La lectura de la temperatura es indicada a través de una medición del cambio en la resistencia de dicho elemento. Varios tipos de materiales pueden ser utilizados

como elementos resistentes cuyas características son diversas. Por ejemplo, el termómetro con resistencia de Platino es utilizado para la Escala Internacional de Temperatura entre el punto de oxígeno y el punto antimonio.

Se utilizan varios métodos para la construcción de los termómetros de resistencia, dependiendo de la aplicación para la cual son requeridos. En todos los casos, se debe tomar mucho cuidado para asegurar que el alambre de la resistencia se encuentre libre de esfuerzos mecánicos y que esté instalado de tal modo que la humedad no tenga contacto con el alambre e influenciar la medición.

La medición de la resistencia también puede ser realizada con algún tipo de circuito puente. Para las medidas en régimen permanente, una condición nula bastará, mientras que las mediciones transientes usualmente requerirán el uso de un puente de deflexión. Una de las fuentes primarias de error en el termómetro de resistencia eléctrica es el efecto de la resistencia de los acumuladores que están conectados con el elemento del circuito puente.

### **Efectos Termoeléctricos:**

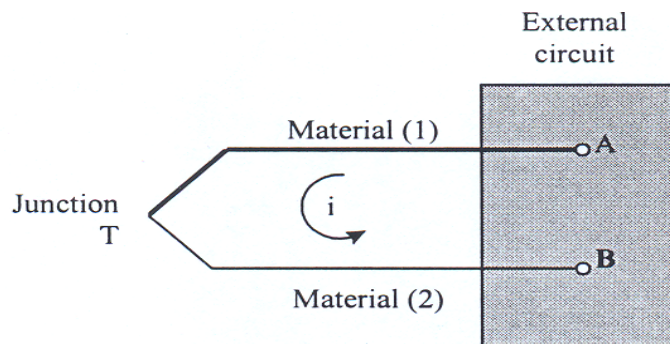
Como ya se mencionó con anterioridad, el método eléctrico, que es el más común para la medición de la temperatura, utiliza el termopar. Cuando dos metales diferentes son unidos para formar una FEM (fuerza electro-magnética), existirá entre los dos puntos extremos una función de la temperatura de enlace; este fenómeno es conocido como el efecto Seebeck. Si los dos materiales son conectados a un circuito externo de tal modo que la corriente es dibujada, la FEM puede ser alterada ligeramente debido a un fenómeno llamado Peltier. Además, si un cambio de temperatura existiese a través de uno o ambos materiales, la FEM sufriría otro tipo de alteración, debido a un fenómeno conocido como el fenómeno Thomson.

Debido a lo anterior expuesto, existen tres FEM presentes en un circuito termomagnético:

- El FEM Seebeck, causado por el enlace de los distintos metales;
- El FEM Peltier, que se da por el circuito de corriente que fluye; y
- El FEM Thomson, el cual resulta de los cambios de temperatura en los materiales.

El más importante de éstos es el FEM Seebeck, ya que depende de la temperatura de enlace. Si el FEM generado en el enlace de dos materiales diferentes es medido cuidadosamente como la función de temperatura, este mismo enlace puede utilizarse para la medición de la temperatura. El problema principal surge cuando los dos materiales son conectados a un dispositivo de medición, generando de esta manera otra FEM adicional.

Figura 14. Conexión Termopar (FEM)



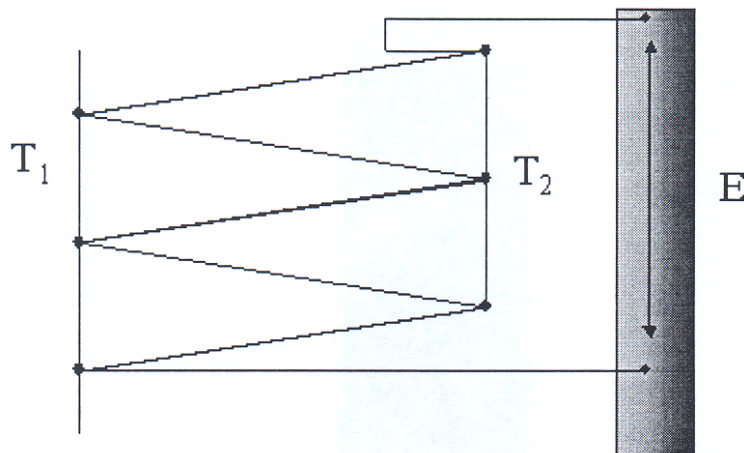
FUENTE: MANUALES DE MANTENIMIENTO PLANTA HIDROELÉCTRICA CHIXOY

Se observa que los circuitos termopares deben incluir por lo menos dos enlaces. Si la temperatura de un enlace es conocida, la temperatura del otro enlace puede ser calculada fácilmente, utilizando las propiedades termoeléctricas de los materiales. El sistema completo, consiste en los alambres guía del termopar y el voltímetro, el cual puede ser calibrado directamente para la determinación de la temperatura.

Para proveer un circuito mucho más sensible, los termopares son conectados ocasionalmente en serie. Tal disposición es llamada Termopila. La disposición de la termopila es útil para elegir una FEM sustancial para la medición de una pequeña diferencia de temperatura entre los dos enlaces. De este modo, un instrumento relativamente barato puede ser utilizado para la medición del voltaje. Cuando una termopila es instalada, es importante asegurarse que los enlaces se encuentren eléctricamente aislados. Los termopares típicos, miden la diferencia de la temperatura entre un cierto punto desconocido designado como la temperatura de referencia.



Figura 15. Conexión Termopila



FUENTE: MANUALES DE MANTENIMIENTO PLANTA HIDROELÈCTRICA CHIXOY

Así como es posible una conexión en serie, los termopares pueden ser conectados en paralelo, con la finalidad de poder obtener una temperatura promedio de un número de puntos, en donde cada uno de los enlaces pueden encontrarse en diferentes temperaturas. Puede haber un pequeño error en esta lectura, porque existe un pequeño flujo de corriente en los alambres de plomo. Así, la resistencia de los alambres de plomo influenciaría en la lectura.

#### Sistemas alternos de medición:

**Termómetro de cristal de cuarzo:** Un nuevo y mejor método para la medición de la temperatura está basado en la sensibilidad de la frecuencia resonante del cuarzo cristal para el cambio de temperatura. Cuando el ángulo propio del corte es utilizado con el cristal, existe una correspondencia lineal entre la frecuencia de resonancia y la temperatura. Ya que el proceso de medición termina en la medición de la frecuencia, el dispositivo no es particularmente sensible al ruido de aceleración en los cables de conexión. Los modelos comerciales utilizan contadores electrónicos y una indicación digital para la medición de la frecuencia.

**Termografía del cristal líquido:** El cristal líquido colestérico, formado del éster del colesterol, muestra una interesante respuesta a la temperatura. Sobre un rango de temperatura reproducible, el cristal líquido exhibirá todos los colores del espectro visible. El fenómeno es reversible y repetible. Para prevenir la deterioración de los cristales, pueden ser cubiertos con alcohol polivinil, produciendo cristales líquidos

encapsulados, los cuales se encuentran disponibles ya sea como mezcla basada en agua.

**Termistores:** Éste es un dispositivo semiconductor que tiene un coeficiente de temperatura negativo de resistencia, en contraste con el coeficiente positivo mostrado por casi todos los metales. Una característica de este termistor, es que puede ser utilizado para compensar la temperatura de los circuitos eléctricos. Esto es posible debido a las características de la temperatura negativas que exhibe, con lo cual también puede contrarrestar el incremento de la resistencia de un circuito con el incremento de la temperatura.

### **Entrehierro**

Al hablar de la necesidad de monitorear el Entrehierro, se está hablando de la medición y captura del espacio existente entre la parte estacionaria y la giratoria durante la paralización y la operación de la máquina eléctrica especialmente un generador o un generador/motor.

Los criterios para la medición del entrehierro:

- Tipo de Generador Hidroeléctrico de baja velocidad
- Estator grande sin diseño del elemento oblicuo
- Entrehierro más pequeño que un 3% del diámetro interior
- Otras características especiales del diseño (como el tipo de turbina con el que se cuenta)

La medición del entrehierro, puede realizarse mediante dos principios diferentes, medición relativa del entrehierro; y la medición absoluta del mismo.

### **Medición Relativa del Entrehierro:**

**Rotor basado en el sistema de medición:** El sistema incluye dos sensores de capacitación con los condicionadores de señal necesarios y la transmisión de señal telemétrica. Los sensores se colocan en el llamado puente de exploración, el cual a su vez incluye un sistema de medición de la superficie del estator, un sistema de medición para la Descarga Parcial y un sistema de medición para la vibración del rotor. El suministro de poder necesario es provisto por el sistema de excitación del generador, por lo que se hace necesario un convertidor de poder en el rotor. La

señal es transmitida por un juego de anillos rozantes ópticos basados en los transmisores y receptores de luz infrarroja.

Los datos del entrehierro, son obtenidos en dos planos; este sistema envía resultados exactos si la pared del estator está deformada por un punto de sobrecalentamiento en los dientes del estator o en la capa superior de los bobinados. Por supuesto que el sistema considera menor las fallas con respecto a los ajustes no simétricos de la pestaña del rotor y las deformaciones dinámicas del rotor.

### **Sistemas de Medición basados en el ESTATOR**

Los sistemas basados en el estator tienden a ser los métodos más comunes para la medición del entrehierro, ya que son fáciles de instalar y no son sensitivos con respecto a la suciedad dentro de la máquina.

**Sistema Vibrosyst-M:** Este sistema fue el primer sistema de monitoreo del entrehierro basado en el estator. Éste está basado en las pruebas capacitivas que tienen que estar unidos en los dientes del estator. El número de sensores que serán instalados depende del diámetro del estator, de la altura de la pila de planos de núcleos magnéticos y el número de planos de medición requeridos. Al final únicamente se es necesaria la instalación de tres sensores para proveer una completa funcionalidad.

La señal de sensor no evaluada está condicionada y digitalizada en las unidades de captura de datos de dos canales localizados en las cabinas montadas en la pared cerca del generador. El sistema no puede descubrir las ondas de vibración con varios nudos. Así, como el descubrimiento de las deformaciones del estator sólo pueden ser detectadas de manera indirecta. Los datos son válidos únicamente para los puntos en donde es colocado el sensor.

### **Mediciones Absolutas del Entrehierro:**

Este tipo de mediciones, se realiza con la ayuda de los sensores ópticos, los cuales son cintas de rastreo reflexivo, localizado en el estator y el rotor. La distancia entre el sensor y la cinta es calculada desde el ángulo (tiempo) entre los dos reflectores por cinta, cuando la cinta atraviesa el sensor. Los reflectores son colocados a una

distancia definida uno del otro y son probados por un haz infrarrojo emitido por el respectivo sensor. Los resultados de la medición son dados por el número de cintas aplicadas y su tolerancia de fabricación. Las condiciones para las señales, requieren un procesador de rotor montado propulsado por la corriente de excitación. Las señales procesadas son transmitidas desde el rotor por el uso de anillos colectores instalados en el eje generador.

Se recomienda limpiar los sensores y la cinta de vez en cuando, debido a que este sistema suele ser afectado por cualquier tipo de suciedad.

### **Sistemas de Monitoreo para el Entrehierro:**

**Sensor Vibro-métrico:** Esta clase de sensor es fabricado en distintos rangos. Este sensor está basado en el principio del campo eléctrico; el sistema de medición del entrehierro, básicamente es un aproximador que consiste principalmente en una prueba y un acondicionador de señal, los cuales se conectan a través de cables coaxiales. Así, la señal modulada en la salida del receptor es proporcional a la distancia entre el Estator y el Rotor del Generador Eléctrico.

**Parte análoga del sistema:** Ésta consiste de un sensor, acondicionador, procesador de señal y la correspondiente verificación de línea (OK), la alarma y los relés de disparo. El procesador de señal, procesa la misma como un procesamiento de vibración para proveer una señal afirmativa, cuando la instalación eléctrica esta conectada de manera adecuada. Además, prepara las señales necesarias para el ingreso del detector de nivel correspondiente, mostrando los resultados en una gráfica de barra, logrando de esta manera la determinación de dos niveles diferentes.

Esta sección análoga puede funcionar independientemente de la parte digital. Un circuito análogo simple sin un procesamiento previo, puede ser utilizado cuando el sistema es conectado a los sensores del entrehierro. El procesamiento de la señal es dada en el sistema de captura de datos, que provee las funciones como un chequeo OK y alarma.

**Parte digital del sistema:** Este tipo de captura de datos, está basada en tableros diseñados para la representación de los datos; estos tableros funcionan de igual manera al sistema de captura de vibración. El software de la captura de datos

revisa si cada muestra pertenece a un polo o a un entrehierro. El valor más pequeño medido a través de la superficie del polo es considerado como un entrehierro mínimo de este polo específico.

La captura de datos puede proveer un conjunto completo de muestras para las funciones de ampliación y para un análisis detallado.

### **Alarmas Evaluadas en Tiempo Real:**

El cálculo de tiempo real produce un entrehierro mínimo por polo para cada sensor y para cada polo durante una revolución de la máquina, además de lo anterior, también se controla el entrehierro mínimo para cada sensor y número de polo (ubicación del sensor). El nivel de advertencia de las alarmas, se define según:

- Es liberada si el entrehierro mínimo de un polo en la circunferencia es menor que el límite de advertencia.
- También es accionada una alarma, si el entrehierro mínimo de un polo en la circunferencia es menor que el límite de la alarma en sí.

### **Alarmas en el Monitoreo del Entrehierro:**

Se considera la supervisión continua, tanto del entrehierro mínimo como los cambios en los mencionados niveles de advertencia y alerta. Este tipo de alarma, también es conocida como “repentina alarma de intervalo”. La alarma será liberada si el entrehierro mínimo cambia su ubicación, es decir, que será reconocida en un polo diferente que el anterior.

## **MANEJO Y PROCESAMIENTO DE DATOS**

### **Paneles de Control**

Los paneles de control vienen siendo la parte del sistema conocida como el Hardware, el cual está representado por los equipos (físicos) que estarán enlazados al equipo de computo PC. Este hardware esta conformado por:

- ✓ Accesorios: Siendo éstos todos aquellos componentes internos a la PC, como la Unidad de Fuente, el Disco Duro, Tarjeta Madre, entre otros.

- ✓ Dispositivos: Estos están constituidos por todos aquellos componentes externos a la PC, como lo son el Monitor, Teclado y la Impresora, entre otros.

Tanto el diseño como el tipo y características de los dispositivos y accesorios del propio Hardware, varían en función del Software, razón por la que el hardware debe de acomodarse al software, para de esta manera lograr su correcta funcionabilidad.

### **Estación de Ingeniería**

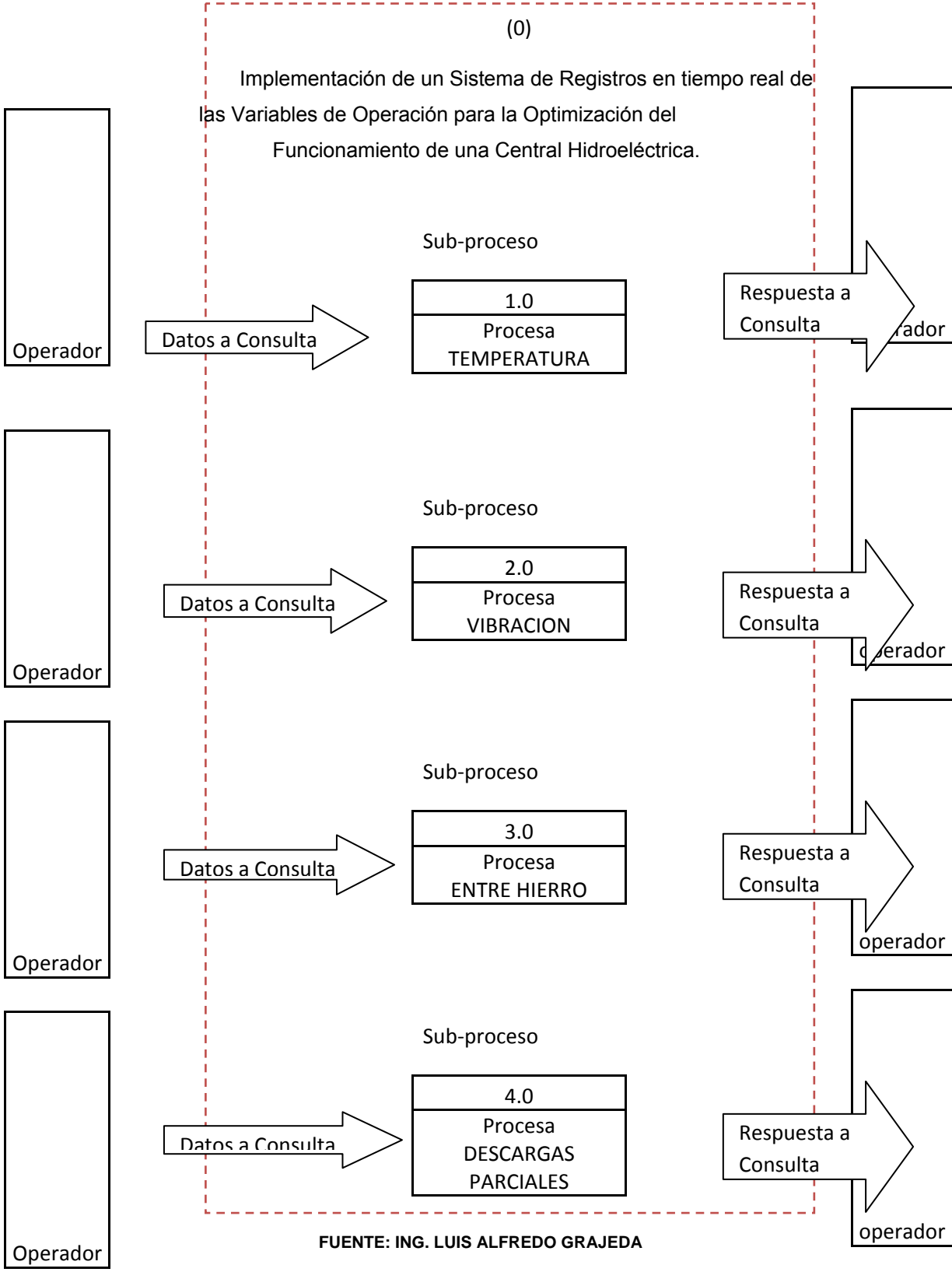
En la Implementación de un Sistema de Registros en tiempo real de las Variables de Operación para la Optimización del Funcionamiento de una Central Hidroeléctrica, es necesario e imprescindible la creación de un programa de computo (software), mediante el cual se maneje y se obtenga toda la información que pudiese generar dicho sistema de monitoreo. Dicho programa de computo, va a diferir en cuanto a su extensión y complejidad, de manera directa con el sistema que se va a desarrollar para el monitoreo de un proceso de producción; lo anterior es debido a que la base para el desarrollo de estos sistemas, se encuentra en función del número de variables involucradas en cada proceso productivo, siendo éstas al mismo tiempo, las que alimentan al software en su creación.

Es así que para la generación del software, el programador debe contar con la información completa de todas y cada una de las variables que se deseen monitorear en el proceso, así como también debe de tener conocimiento de lo que se desea obtener de dicho monitoreo, para de esta manera poder crear el software adecuado para el proceso. Es decir, que el software viene siendo el resultado de la práctica de un análisis al sistema propuesto, dicho análisis puede ser realizado con el apoyo de herramientas como el Diagrama de Flujo de Datos, cuya representación esquemática es presentada a continuación.

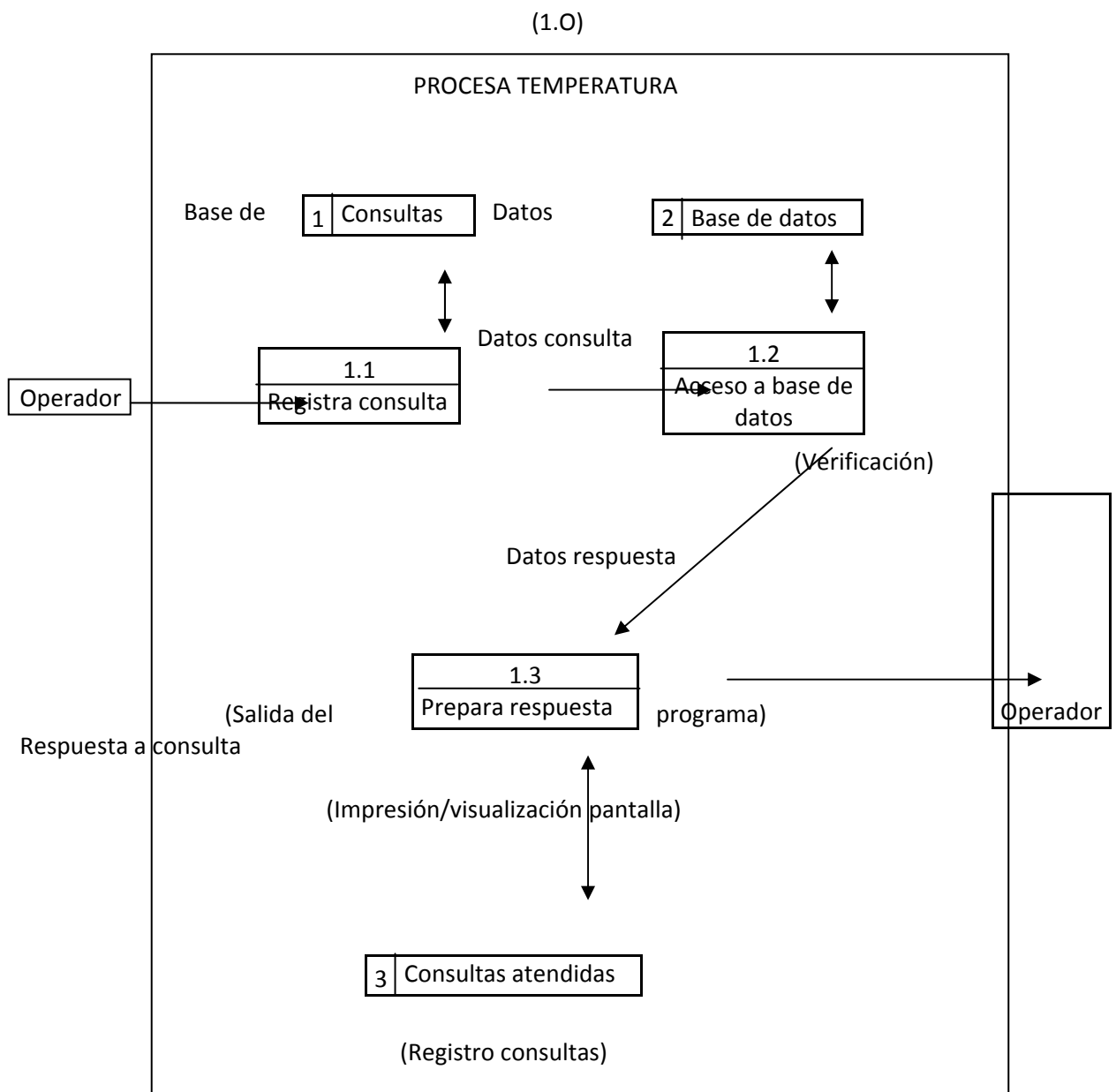
Para el caso que nos ocupa, como lo es el relacionado con un sistema de monitoreo para Centrales Hidroeléctricas, el diagrama de flujo de datos con las variables definidas:

- Temperatura
- Vibraciones
- Entrehierro
- Descargas Parciales; sería como a continuación se presenta:

DIAGRAMA DE FLUJO DE DATOS



Cada uno de los sub-procesos que aparecen en el diagrama de flujo de datos anterior, es posible apreciar claramente que éstos no son más que las variables que se desean monitorear durante el proceso de producción, las cuales fueron definidas con anterioridad. En estos sub-procesos, se desarrollan una serie de pasos (etapas) como parte complementaria al análisis del sistema. Para el caso del monitoreo en una Central Hidroeléctrica, la representación esquemática para cada uno de los sub-procesos sería la siguiente:



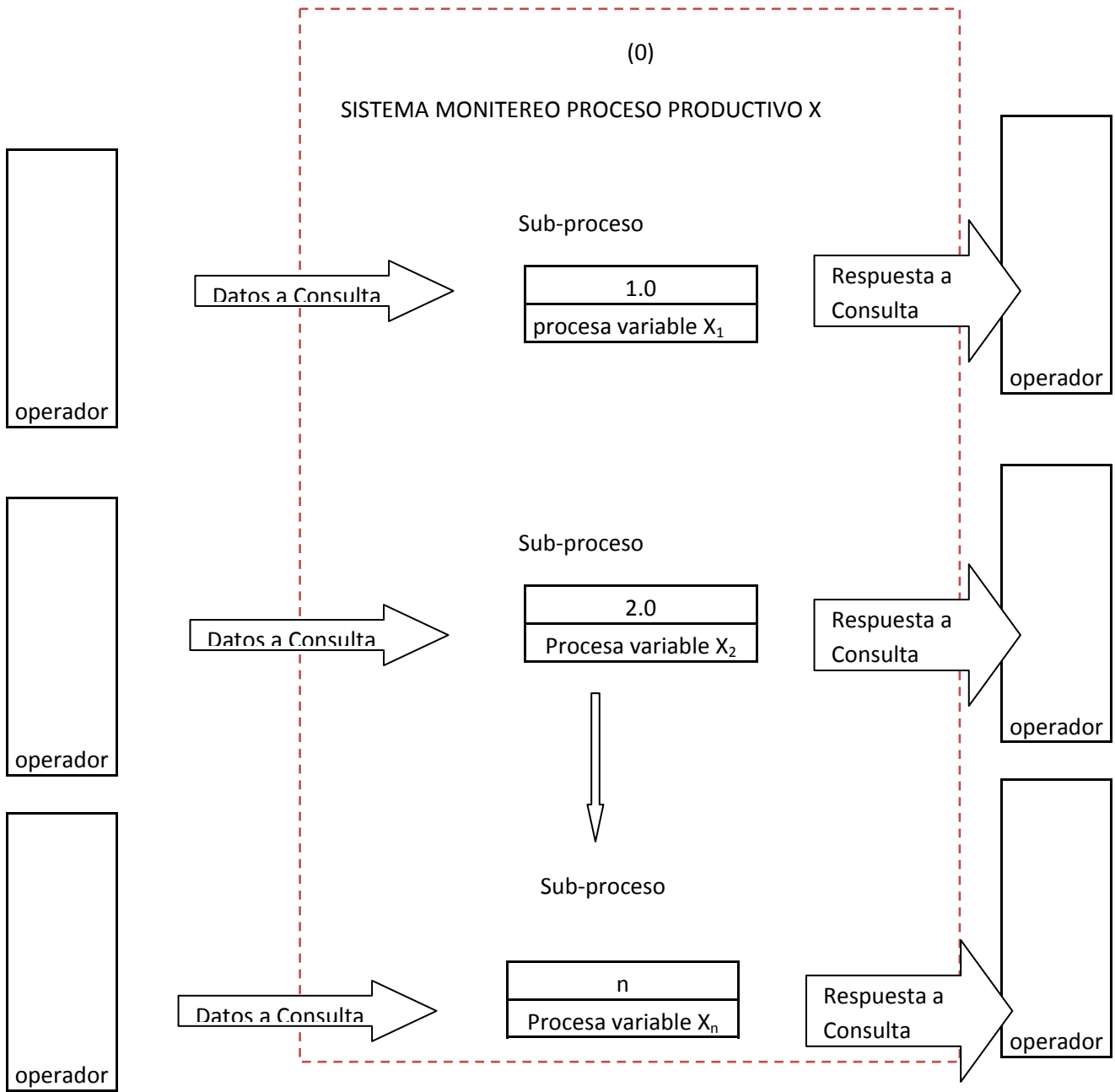
FUENTE: ING. LUIS ALFREDO GRAJEDA



Ambos diagramas, uno complemento del otro, representan la información base para la persona que estará a cargo de la formulación del Software (programa de computo).

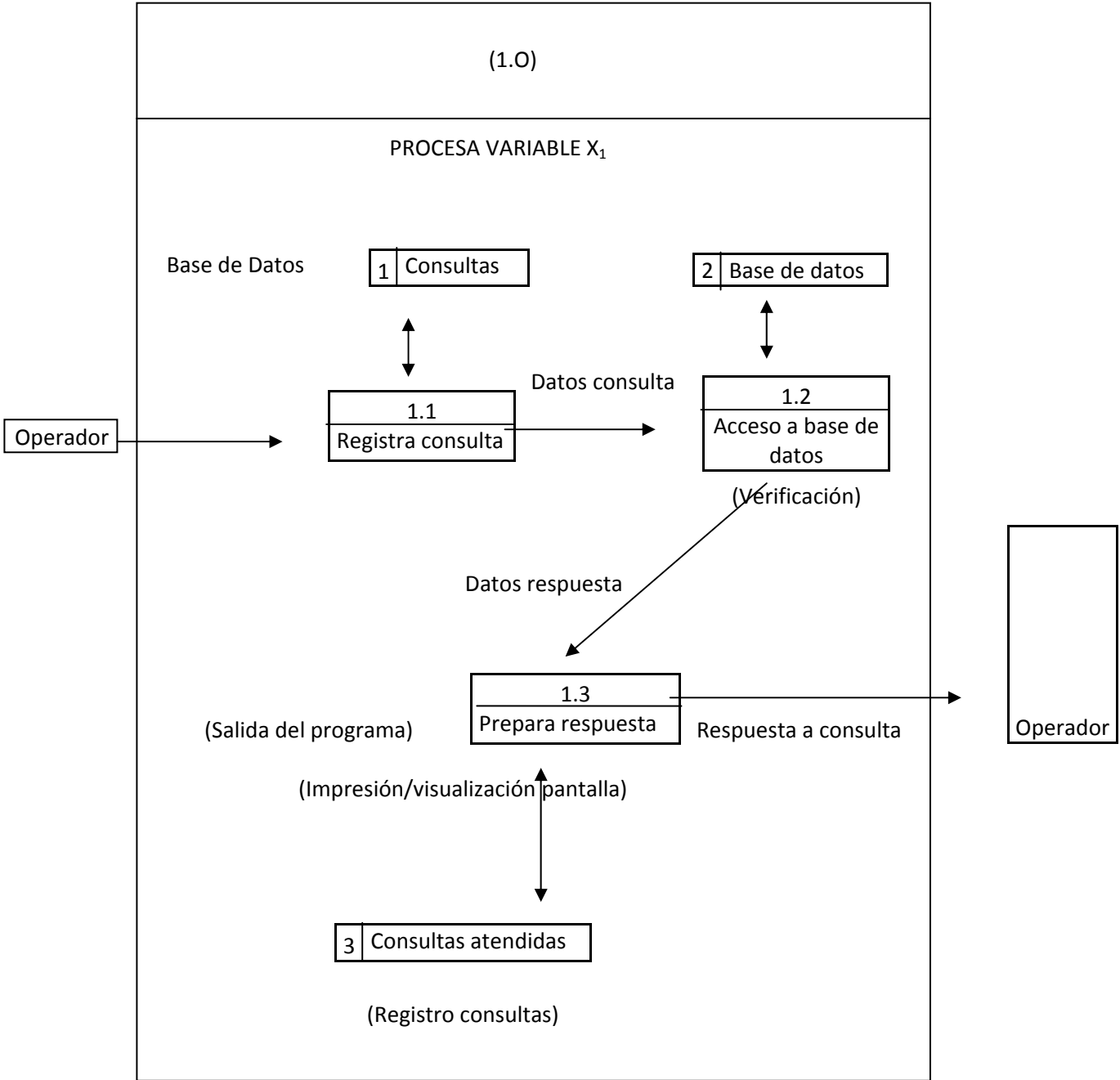
De la misma manera, estos diagramas son funcionales y aplicables para cualquier proceso productivo, en donde también se deberá de realizar un análisis al sistema propuesto, haciendo uso del Diagrama de Flujo de Datos, información que servirá de base para la generación del software en particular de dicho proceso. La representación esquemática para un sistema de monitoreo en un proceso de producción en general, sería de la siguiente manera:

DIAGRAMA DE FLUJO DE DATOS



FUENTE: ING. LUIS ALFREDO GRAJEDA

De igual forma, la esquematización para un sub-proceso individual, en un proceso productivo en general, quedaría representada de la siguiente manera:



FUENTE: ING. LUIS ALFREDO GRAJEDA

## 4. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE OPERACIÓN

Para la implementación de un sistema de operación; se requiere definir y reconocer todos aquellos indicativos que muestren el comportamiento del proceso.

Dentro de estos indicativos figuran aquellos que en determinado momento pueden representar cualquier situación normal o bien anormal que pudiesen ocurrir en el proceso, estos indicativos son también conocidos como Alarmas, las cuales están referidas a diferentes variables, con diferentes niveles de aviso.

La interpretación y análisis en cuanto al estado de medición y manejo de estos indicativos o alarmas, como parte esencial y fundamental para la implementación del propio sistema de operación, será lo que se desarrollará en el presente capítulo.

### ALARMAS

#### Estado de Medición y Alarmas

Las alarmas representan indicativos (avisos) de cualquier situación anormal que se pudiese presentar en un proceso productivo. Esta misma situación es contemplada en una Central Hidroeléctrica, en donde cada equipo que interviene en el proceso de producción de energía eléctrica, contempla una serie de alarmas referidas con base a diferentes variables de funcionamiento.

Se conoce como parte de la medición de las alarmas dos niveles, el primero que es un **Nivel de Alerta** (Aviso/Precaución) y el segundo nivel que es el **Nivel de Peligro**; su actuación se presenta en ese mismo orden, es decir, en primera instancia da un Aviso (alerta) y de persistir la anomalía, llega al nivel de Peligro, este último nivel, dentro de una Central Hidroeléctrica, se conoce con el nombre técnico de “Disparo de Unidad”, el cual significa un paro inmediato de la unidad y su salida de línea correspondiente.

El estado de medición de una alarma, viene representado por el valor numérico de una variable de funcionamiento; por ejemplo:

- Temperatura alta en el cojinete de la turbina, en cuyo caso la alarma viene medida en grados centígrados (°C), referida a un número pre-fijado (54°C).

Estos valores son prefijados y ajustados directamente en el instrumento de medición de donde se origina la señal de alarma.

### **Registro de Alarmas**

El registro de Alarmas constituye la acumulación de las diferentes alarmas contempladas dentro del proceso productivo y a que a la vez permiten tener considerados todos los niveles de aviso y peligro necesarios conforme especificaciones del fabricante del equipo.

Existen diferentes tipos y modelos de Registro de Alarmas; desde los más simples como los que son por medio de anotaciones en Formas y/o Formatos prediseñados, hasta los más tecnificados, como en el caso de Paneles de Alarmas; la diferencia entre uno y otro está en que este último su configuración obedece a una integración de señales desde el punto de origen hasta el panel de alarmas.

### **Señalización de Alarmas**

Una Señalización de las Alarmas debe ser de tal forma que su alcance e interpretación permita un inmediato y fácil manejo. Actualmente, en las Centrales Hidroeléctricas, el sistema de señalización de alarmas, es a base de una integración de señales eléctricas, las cuales están tomadas desde el punto de origen de medición por medio de instrumentos de medición (como los de variables de temperatura, flujo, corrientes, presión, voltajes, etc.), convertidas estas variables, sin son análogas a digitales a través de transductores, haciendo llegar señales en milivoltios (mV) ó miliamperios (mA) a un tablero configurado con relés de aviso, los cuales trasladan estas señales en indicaciones luminosas con las leyendas correspondientes; figurando los diferentes Niveles de Alarma de cada equipo que se encuentre bajo monitoreo.

## **OPERACIÓN**

### **Manejo de Alarmas**

En el capítulo anterior se da una definición simplificada de los conceptos de alarma, su medición y la manera de registro de las mismas, así como también la señalización de las alarmas, son el propósito de hacer más fácil el entendimiento e interpretación al momento de tratar el tema del manejo y clasificación de alarmas.

El tema específico que se desarrolla en este trabajo, orientado a la Implementación de un Sistema de Registros en tiempo real de las Variables de Operación para la Optimización del Funcionamiento de una Central Hidroeléctrica, como parte de su estructura funcional requiere del uso de las diferentes alarmas que se tienen involucradas en el funcionamiento de las unidades generadoras instaladas en la Central Hidroeléctrica Chixoy, ya que dicho sistema de monitoreo en tiempo real (en línea) necesita como parte de la información procesar y conocer el estado de medición a través de las variables pre-definidas para tal propósito. En sí el diseño para la Implementación de un Sistema de Registros en tiempo real de las Variables de Operación para la Optimización del Funcionamiento de una Central Hidroeléctrica, hace uso de estas variables de alarmas para poderles contemplar dentro del monitoreo. Dicho de otra manera las señales de cada alarma pre-definida, que se toman directamente de cada unidad generadora se ingresan a la estación de Monitoreo, en donde quedan registradas, procesadas y representadas en el módulo correspondiente, a través de LEDS (indicadores luminosos).

Prácticamente con la información o señales de estado de alarmas incorporadas a la estructura básica del sistema del monitoreo, el manejo de éstas se simplifica de tal modo, que de forma continua y en tiempo real, es posible acceder a la información completa al momento de presentarse una perturbación o falla en el proceso de producción.

Esta viabilidad y simplicidad de la información procesada y mostrada por el monitoreo es de gran utilidad y su manejo será significativo en la medida que se interprete y se utilice como información base para preveer fallas o variaciones anormales en la Generación de Energía Eléctrica.

### **Clasificación de Alarmas**

Una vez determinados los valores en que se encuentran los ajustes de cada una de las alarmas, tanto para la Turbina como para el Generador, se deberán separar por Niveles de Alarma, en:

- Alerta
- Peligro;

Normalmente la indicación (LED), en el panel de control, maneja un color Rojo para la representación del Nivel de Peligro. Siguiendo este mismo esquema de

clasificación, se incorporan a la estructura del Sistema de Monitoreo dentro del Software, quedando de esta manera indicados en el módulo correspondiente, los diferentes niveles de alarmas.

## **SISTEMA DE PROTECCIÓN**

### **Protección Preventiva**

#### **Tensión Transitoria:**

Este tipo de protección es llamado también “Protección de Sobre Voltaje”, ya que es utilizada para poder prevenir voltajes excesivos sobre el bobinado del Estator; para lo cual se colocan descargadores de alta frecuencia de conexión en las fases de la máquina. Para tener una máxima protección en la máquina, las autoválvulas tienen que ser colocadas tan cerca como sea posible a los terminales del Generador.

En la actualidad, se suelen utilizar resortes eléctricos de metal óxido no linear como autoválvulas, éstas son formadas para que se tenga un voltaje constante y admisible, el cual es ligeramente mayor que el voltaje entre las fases y la tierra, que aparecen en operación normal. Al momento de alcanzar el voltaje determinado, la válvula se convierte en una resistencia de baja tensión y, a su vez, el voltaje en los terminales del Generador se limita.

#### **Auto Excitación:**

Este fenómeno ocurre únicamente en los Generadores que trabajan con redes de cables extendidos. En estos casos, la máquina es capaz de continuar con la excitación aún cuando la corriente de la excitación es cero (nula). La protección para este caso, es un relé con una capacidad de resistencia mínima y un relé de alto voltaje que se coloca a un nivel bajo de voltaje.

#### **Regulador de Voltaje Automático:**

Esta protección es necesaria, cuando la corriente de excitación llega a su valor tope, y/o al momento de incrementarse el voltaje en los bordes de la máquina; al ocurrir cualquiera de estos fenómenos, el regulador de voltaje automático (RVA), se cambia a la operación manual y de esta manera la corriente de excitación se mantiene constante.

Para los Generadores Hidroeléctricos, se utiliza un relé de alto voltaje para proveer una eficiente protección. En caso de un rechazo de carga con plena excitación, un aumento de velocidad y un AVR trabajando de manera correcta, el relé trabaja lentamente, mientras que con los sobrevoltajes el relé actúa de manera inmediata.

### **Sobre Temperatura:**

Los materiales de aislamiento pierden sus propiedades y se deterioran a excesivas temperaturas. Además, el tiempo de vida de los materiales de aislamiento es menor si la temperatura admisible se excede de manera constante. Las propiedades químicas y técnicas de estos materiales han sido mejoradas continuamente, lo que hace posible utilizar las máquinas a temperaturas más altas con mejor rendimiento.

El aumento de la temperatura en un punto dado en operación normal de la máquina, debe ser de manera constante. De presentarse aumentos inesperados de temperatura, las causas pueden ser:

- El flujo del volumen del refrigerante; causado por aire en la máquina, agua en los conductores vacíos o agua en los refrigeradores agua-aire
- Aumento de pérdidas en la máquina debido a sobrecarga u operaciones anormales.

Los detectores del aumento de la temperatura, permiten el control permanente de las temperaturas de las máquinas y la protección de sobrecarga actúa tan pronto como la temperatura en el bobinado alcanza el límite de la misma. Por lo anterior, es posible hacer uso de la máquina con sobrecarga durante cortos períodos de tiempo, previendo el daño de la máquina debido a temperaturas excesivas.

Para las protecciones de temperatura, también se instala una protección de re-arranque, debido a que la máquina necesita tiempo para enfriarse luego de la acción de protección térmica.

### **Vibraciones:**

Las vibraciones son controladas de manera constante durante la operación de la máquina. Tan pronto como los niveles de vibración fijados son alcanzados, esta protección crea una alarma o hará que la máquina se detenga para prevenir daños serios en ella. Las vibraciones excesivas durante la operación pueden deberse a



los daños en la turbina o pequeños daños mecánicos en las partes giratorias en general.

### **Protección en Caso de Fallas**

#### **Protección Diferencial:**

Esta protección es utilizada por las máquinas sincronizadas las cuales trabajan en paralelo en la misma red; ésta es utilizada como una protección de fallas en Estator contra tierra.

Las corrientes de entrada y salida, son comparadas entre sí en cada una de las fases. En una operación no interrumpida de la máquina, estas corrientes son iguales tanto en la fase como en la amplitud. La corriente diferencial es prácticamente cero; el relé de protección actúa tan pronto como el valor máximo de esta corriente diferencial es excedido.

Debido a que las corrientes son comparadas por fase, los cortos circuitos entre fases no pueden ser detectados con este sistema.

#### **Corto-circuito a Tierra:**

Este sistema de protección es también llamado “pérdida de tierra”, el cual actúa con una conexión con gran resistencia a tierra, en donde un cambio de corriente de tierra puede ser detectado. Las fallas a tierra generan una interrupción inmediata de la máquina, evitando de esta manera cualquier daño severo en la misma. Esta conexión, también limita el paso de la corriente, en caso que el aislamiento generase un corto circuito a tierra.

Si un defecto eléctrico ocurre en el aislamiento de la varilla o de la bobina, una tensión puede ser detectada a través del resistor a tierra. Este voltaje es detectado con el relé de protección.

La protección de falla del rotor a tierra es muy importante para detectar las fallas a tiempo, previniendo de esta manera, que la máquina sufra una deformación mecánica debido a las fuerzas de rotación.

#### **Carga Desequilibrada:**

Normalmente la máquina esta diseñada para una carga no balanceada de aproximadamente un 8%. Esta carga no balanceada está girando contra la rotación

del rotor, llegando a alcanzar corrientes de 100 hasta 120 Hz., en el Devanado del amortiguador del rotor. Para prevenir que el rotor se sobrecaliente, se debe prever de una protección para dicha carga no balanceada.

#### **Sobre-voltaje:**

Mientras que un Generador está conectado a la red de producción, ésta determina el voltaje del Generador. Si el Generador está trabajando de manera aislada o si es separado de la red, el voltaje aumentará de manera exagerada. Normalmente este fenómeno es prevenido o detectado por el “Regulador de Voltaje Automático” (del cual se hizo mención en el apartado 4.3.1.3, de este capítulo). La protección tiene que garantizar que en caso de que sucediese esto, no se generarán voltajes peligrosos para el bobinado del estator.

#### **Corriente del Eje:**

Es posible que se induzca un voltaje en el generador tan pronto como el flujo magnético alrededor del eje no sea uniforme (esta uniformidad, puede deberse a una división en el estator). Las corrientes pueden poseer ciclos armónicos, las cuales se encuentran en circulación a través de la superficie de los cojinetes del eje, estas corrientes, a su vez, pueden generar destrucción en la misma superficie. Debido a lo anterior, es que uno de los cojinetes de la máquina se encuentra aislado, y así de esta manera se evitan las corrientes en el cojinete.

Un transformador de corriente montado en el eje, monitorea la calidad del aislamiento y genera una alarma tan pronto como una corriente llegase a circular en el eje.

#### **Retorno de Energía:**

Este sistema de protección está destinado a la protección de la Turbina en sí. Para poder evitar que la Turbina sufra de algún calentamiento excesivo, se hace uso de un dispositivo de protección de potencia de retorno. Esta protección tiene como finalidad la detección de situaciones de peligro, cuando la máquina está trabajando como motor en una velocidad sincronizada. Dependiendo en el estado del sistema de excitación, la máquina podrá trabajar en el modo sincrónico o no sincrónico.

Además de los sistemas de protección ya analizados, también se puede hacer uso de otros sistemas alternos, tales como:

- **Corto-circuito y Sobrecorriente:** esta protección debe ser ajustada para poder desligar únicamente los componentes en el sistema afectados por el corto-circuito.
- **Baja Frecuencia:** normalmente es utilizada para los Generadores que trabajan en sistemas aislados. En los que trabajan en las redes normales, la frecuencia es controlada y mantenida entre los límites establecidos.

## **SISTEMAS DE EXCITACIÓN**

Para lograr o crear un flujo magnético, es necesario que una corriente directa sea aplicada al Devanado del Rotor de la máquina. Los sistemas de excitación modernos aseguran la energía de excitación necesaria y se encuentra disponible, junto con el equipo de control asociado, para de esta manera poder cumplir con la demanda de varias respuestas dinámicas.

Actualmente se cuenta principalmente con varias soluciones diferentes para llevar la corriente de excitación requerida hacia el Devanado del Rotor.

### **Excitatriz Rotante DC:**

Este sistema está basado en el Generador de corriente directa (DC), unido directamente al eje de la máquina. Hoy en día, solamente es utilizado en las Centrales de energía ya existentes. El sistema tiene considerables desventajas debido al uso del colector de la máquina DC y el anillo colector del generador.

### **Excitatriz sin Escobillas:**

También es llamado "Brushless"; en este sistema, la salida a.c., del rotor excitador alimenta los diodos montados en el propio eje que lleva directamente corriente rectificadas hacia el propio campo, no se requiere anillos colectores. El control de esta corriente de excitación es ejecutado mediante el control de la corriente del estator del excitatriz sin escobillas.

### **Excitador Estático:**

Este excitador, es directamente para tratar con la excitación estática; en la que los transistores controlados son alimentados desde los terminales del generador a través de un transformador, la corriente rectificadas de excitación controlada es transmitida a través de las escobillas y los anillos colectores en el rotor de la

máquina sincronizada. Las escobillas de carbón tienen que ser reemplazados de manera regular.

## **CAPACITACIÓN DE PERSONAL**

Para el adiestramiento en el manejo e interpretación de toda la información que se obtiene a través de estos sistemas de Monitoreo de Variables en tiempo real, se debe tener como principio los conocimientos básicos en cuanto manejo de equipo computo; así como paquetes de computación, para poder acceder al programa (software) diseñado. Este adiestramiento debe estar orientado a aquel personal que tendría bajo su control y manejo el proceso de producción. Es decir que básicamente el adiestramiento no debe ir más lejos que a instruir y mostrar el manejo del software conforme los pasos a seguir que permitan acceder a la información, para posteriormente entrar al análisis. Estos mismos pasos se encuentran detallados en el capítulo II; en donde se indica la secuencia de etapas del programa para poder disponer de la información; de todos y cada una de las variables que forman parte del monitoreo en el proceso de producción.

Por tratarse de un manejo de información que se encuentra directamente vinculada con el proceso de producción; para el caso específico que nos ocupa, como lo es una Central Hidroeléctrica, el personal que debe involucrarse para tal propósito, es el de supervisión, operación y mantenimiento.

Se debe indicar, en resumen de lo anterior, que los diferentes usuarios del sistema pueden tener diferentes estudios y experiencias en computación; pero no es necesario que éstos sean expertos en la computación.

### **Personal Operativo**

En lo que respecta al adiestramiento para el uso de este sistema de monitoreo en tiempo real en el área operativa, sigue siendo sobre la base de poseer los conocimientos básicos en cuanto al manejo de los paquetes básicos de computo, a manera de poder acceder a la información.

Debiendo conocer previamente todos y cada uno de los pasos del programa y su secuencia operativa, de tal manera que el operador pueda seguir y conocer en tiempo real, con base a la información que está recibiendo, el estado de desarrollo

del proceso productivo. Tal es el caso de las Centrales Hidroeléctricas, en donde la información que se recibe es, por ejemplo, del estado de las variables que se relacionan con la producción de energía eléctrica; las cuales fueron descritas en el capítulo III.

### **Personal de Mantenimiento**

Al igual que en el área operativa, el adiestramiento debe ser enfocado al mismo principio de poseer los conocimientos básicos, en cuanto al manejo del equipo de computo, previamente conocido todos los pasos del programa y su secuencia operativa, descrita con anterioridad. El uso e interpretación de toda la información recabada, para esta área específica, se debe aprovechar para diagnosticar, planificar y elaborar programas de mantenimiento.

Con la implementación de este tipo de sistema de monitoreo en tiempo real de variables, por ser a base de un software, permite establecer diferentes niveles operativos para cada una de las variables a monitorear; conforme responsabilidades de cada personal involucrado en el proceso. Es decir, que la viabilidad del mismo programa (software), permite en determinado instante cambiar (variar) una variable dentro del proceso a requerimiento de determinada exigencia de producción.

## **5. PRUEBAS Y DETERMINACIÓN DE PROBLEMAS**

### **PROCEDIMIENTOS DE VERIFICACIÓN**

Para llevar a cabo cualquiera de los procedimientos siguientes, es recomendable que la máquina este funcionando la mayor parte del procedimiento. De lo contrario, se debe simular el funcionamiento de ésta con entradas del generador de funciones, o bien con el kit de pruebas.

#### **Inspección del Bastidor**

El bastidor, se debe de revisar con el fin de verificar si existiese algún daño físico en él. De existir daños, se debe informar de los mismos al proveedor; de no existir ningún daño visible, seguir con el procedimiento de verificación.

#### **Chequeo del Monitor del Sistema**

Este chequeo se realiza mediante una verificación visual de los LEDs del monitor, para establecer si se encuentra encendido o no. Es importante recordar que se está trabajando con alta tensión, la cual puede producir descargas, quemaduras o incluso la muerte; bajo ninguna circunstancia se debe de tener contacto con los cables o terminales eléctricas del equipo.

Si se encuentra apagado, esa puede ser la causa del problema, de lo contrario es necesario continuar con la verificación.

#### **LED's de Alarma**

El procedimiento para verificar estos LEDs, es bastante sencillo, únicamente debe de oprimirse el botón de RESET (al mismo tiempo observar los LEDs de alarma), y los LEDs de enganche deben apagarse, indicando que sus entradas no exceden actualmente el nivel permitido. Se tiene que observar los LEDs de alarma en conjunto con el de OK, los cuales se deben encender de acuerdo a los niveles de ajuste de las entradas actuales.

#### **Niveles de Alarma**

En este punto se debe de comprobar los niveles de ajuste de alarma en todos y cada uno de los monitores (para lo cual se tiene que consultar con el manual del monitor correspondiente). Observe los LEDs OK del monitor y el indicador del panel frontal del monitor mientras se pulsa el interruptor correspondiente a intermitente de cada monitor; se recomienda auxiliarse del manual del monitor

correspondiente donde se hallan los límites para los niveles de los interruptores del OK e intermitente, respectivamente.

### **Medición de la Tensión del Monitor**

Esta verificación consta de medir la tensión en el conector del cable coaxial del panel frontal en el monitor correspondiente. Esta lectura en el indicador del intervalo del panel frontal del monitor debe coincidir con la lectura del voltímetro (trabajando el voltímetro en tensión continua). De no coincidir las lecturas se deberá avocarse al manual del monitor correspondiente y la sección calibración de canal.

### **Verificación de la Tensión en el Módulo de Señal**

El rango de tensión aceptable depende de la tensión del transductor para el cual está configurada la alimentación eléctrica. Si la alimentación está configurada para -24V, el rango aceptable es de -23.28 a -24.4V; si la alimentación está configurada para -18V, el rango es de -17.5 a -18.4V, aproximadamente. Estas mediciones se realizan con la terminal PWR desactivada. Al tener valores distintos de alimentación, se debe abocar a las especificaciones del fabricante para determinar los rangos permisibles de tensión.

Si las mediciones de la tensión se encuentran dentro del rango de tolerancia, se vuelve a conectar la terminal PWR. De estar las mediciones fuera de los rangos, significa que el problema está en el módulo de señal, para lo cual se deberá sustituir el monitor y volver a medir. Si la tensión continúa fuera del rango de tolerancia, se deberá sustituir el módulo de señal.

### **Medición de la Tensión en el Terminal**

Esta medición se debe realizar en el terminal  $-V_t$  del módulo de interface. Para lo cual se desconecta el cable del terminal, y se mide la tensión del cable. Si el voltaje se encuentra fuera de la tolerancia, se debe probar y reparar el terminal  $-V_t$ . En el caso contrario, es necesario reemplazar la fuente del terminal  $V_t$ .

En el caso de estar dentro de la tolerancia, se debe desconectar el cable del terminal de salida del módulo de interface y medir la tensión. Si esta medición está incorrecta, se debe abocar al manual del transductor correspondiente para verificar:

la tensión correcta, sonda y el cable prolongador. De estar la medición correcta, se vuelve a conectar el cable al terminal de salida.

### **PIEZAS DE RECAMBIO RECOMENDADAS**

Para realizar cualquier pedido de recambio, es necesario que se especifique el número del catálogo completo al cual pertenecen dichas piezas, para que de esta manera se obtengan las piezas precisas. De igual manera al momento de hacer el pedido, se debe indicar las modificaciones que se le han realizado al monitor (si es que el monitor ha sido modificado).

#### **Conjunto Panel Frontal**

Es recomendable, al momento de solicitar este panel frontal, indicar el modelo del mismo, así como también hacer uso del catálogo del equipo original, para que de esta manera se evite confusión con los repuestos.

#### **Conjunto Circuito del Monitor**

Al igual que el conjunto del panel frontal, para este conjunto también se recomienda indicar todas las especificaciones de éste; además, si el monitor ha sido modificado, se debe indicar el número de modificaciones en la orden de pedido.

#### **Puentes de Recambio**

Los puentes de recambio, son fusibles que controlan la variación de energía en cada uno de los módulos que se monitorea. Para realizar el cambio de éstos, únicamente se debe indicar la localización exacta del fusible, así como su amperaje.

#### **Fusible Principal**

Como su nombre lo indica, éste es el encargado de velar por la protección de cada uno de los módulos monitoreados, ante cualquier variación de la carga eléctrica, para de esta manera evitar daños en los equipos de medición. Al momento de ser necesario su reemplazo, se deberá proceder a realizar un pedido bajo catálogo.

#### **Módulo de Entrada de Alimentación**

Éste es el conjunto de piezas encargadas en hacer llegar la energía necesaria para hacer trabajar el sistema de monitoreo. Debe ser reemplazado únicamente bajo



pedido del catálogo original, para evitar funcionamiento erróneos en el sistema e incluso quemar el mismo debido a una sobrecarga.

### **Transformador**

Esta pieza del sistema, tiene como objetivo transformar la energía de un voltaje, ya sea mayor o menor, al voltaje adecuado para el funcionamiento del equipo. Es decir, que éste le envía la energía al módulo de entrada de alimentación para su adecuada distribución.

## **ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO**

### **Entradas**

Se cuenta con dos tipos de entradas en el equipo:

- **Entradas de señal:** entrada de proximidad de dos canales, con una impedancia de aproximadamente 10 Kilo-ohmios
- **Factores de escala de señal:** Transductores de 11 y 14mm, también de 5 y 8mm; y transductor RAM

### **Adaptación de Señal**

El rango del monitor se utiliza como un indicador de fondo de escala seleccionado según la tabla de opciones con la que cuenta.

Su precisión es de aproximadamente  $\pm 0.33\%$  de error de fondo de escala mínima (a  $25^{\circ}$  C); y  $\pm 1\%$  de error de fondo de escala máxima ( $25^{\circ}$  C).

### **Alarmas**

- **Punto de ajuste:** los niveles de alarma de Alerta-Peligro, son ajustables en una escala de 0-100% de la escala completa; mientras que los niveles de alarma de Disparo, en una escala de 0-200%, y de 0-300%, de la escala completa.
- **Retardo de alarmas:** los tiempos de retardo para las alarmas, son totalmente programables por el usuario, según las opciones y necesidades.

### **Pantallas**

Las pantallas del equipo están divididas en dos partes:

- **Indicador:** la resolución del gráfico de barras es 1.6% de la escala completa; escala doble marcadas por el rango de escala del monitor. La

escala puede estar definida por el intervalo de sonda, o bien por unidades de ingeniería, como milímetros o micras.

- **LEDs:** los LEDs verdes, indican las condiciones en las que no existe riesgo alguno, mientras que los rojos, las condiciones de peligro y/o alerta.

### Controles

Los controles pueden ser externos, internos o bien localizados en el panel frontal:

- **Panel frontal:** el panel frontal, cuenta con tres interruptores los cuales son los encargados de leer los niveles de ajuste de las alertas y peligro, también para leer los intervalos de sonda.
- **Internos:** estos interruptores, se localizan en la placa de circuitos, se utilizan para el ajuste de los puntos de configuración.
- **Externos:** estos no son más que los controles remotos, tales como Restaurar (Reset), Desactivar, Multiplicador de disparo y el ajuste de configuración.

### Salidas

Las salidas del equipo se pueden obtener de tres diferentes maneras:

- **Registradores:** éstos representan la salida proporcional al rango del monitor de escala completa y protegida contra cortocircuitos continuos a tierra; poseen una impedancia de salida de 100 ohmios.
- **Alimentación del transductor:** el rango de esta alimentación, se selecciona en la fuente de alimentación del monitor del sistema. La salida está protegida contra cortocircuitos.
- **Alarmas y OK:** no son más que los reles de alerta, peligro y sistema OK.

### Valores Nominales de los Contactos del Relé

Se trabaja con dos tipos de relé, los dobles y los cuádruples:

- **Reles dobles:** poseen un rango nominal de 5A @ 120 Vac 50/60 Hz  
5A @ 28Vdc.
- **Reles cuádruples:** con un rango nominal de 0.6A @ 120 Vac 50/60 Hz  
2A @ 30 Vcd.

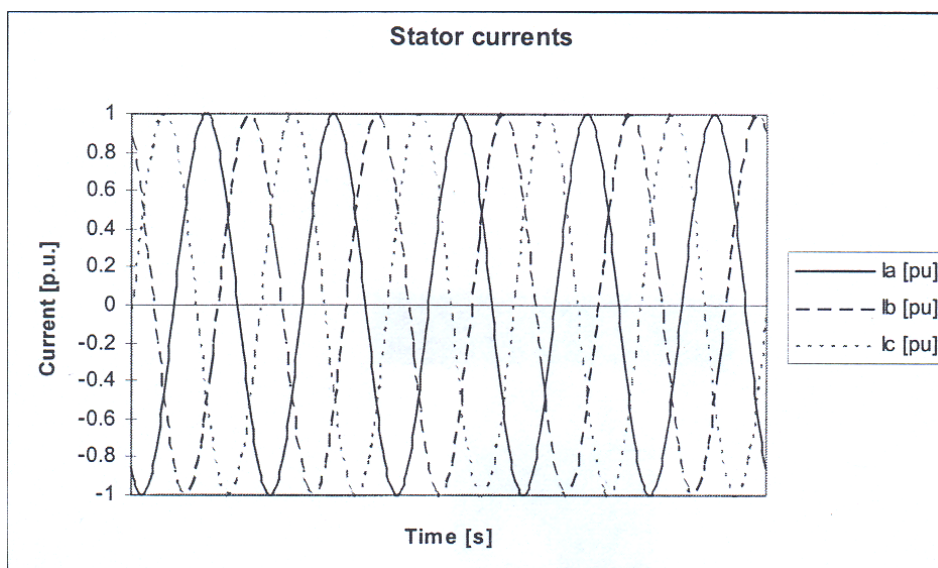
## FALLAS MECÁNICAS

### Vibraciones del Devanado del Estator

Las cabezas del devanado del estator están sujetas a fuerzas debido a las corrientes que circulan en las diferentes bobinas. Estas fuerzas deben de tomarse en consideración no solamente, en el caso de disturbios como lo pueden ser cortocircuitos y las sincronizaciones fuera de fase, sino que también al momento de la operación normal de la máquina. Efectivamente, debido a las fuerzas alternantes que tienen lugar con la máquina en operación normal, la vibración del bobinado se encuentra de manera constante activa.

Las corrientes en las diferentes fases de la máquina, en operación normal, pueden ser representadas de la siguiente manera:

Figura 16. Comportamiento de las vibraciones del estator con relación al tiempo



FUENTE: MANUALES DE MANTENIMIENTO PLANTA HIDROELÉCTRICA CHIXOY

La fuerza correspondiente en una sección de la cabeza del bobinado se da debido al hecho de que la fuerza depende de la interacción de tres corrientes de 50Hz., en donde la fuerza resultante está empujando con el doble de esta frecuencia (es decir, 100Hz).

Durante el diseño de los soportes y fijación de las cabezas del bobinado, es importante considerar las frecuencias resultantes propias de las cabezas. Estas frecuencias tienen que estar en un rango de 100-120Hz, aproximadamente, para de

esta manera poder evitar la excitación de las resonancias de vibración. Generalmente, un bobinado posee una frecuencia de resonancia superior a los 140Hz. Para que éste sea capaz de realizar grandes frecuencias de resonancia, se utilizan bloques de soporte en contacto directo con las barras del estator.

Los siguientes son algunos de los posibles problemas mecánicos que se pueden presentar en un bobinado final:

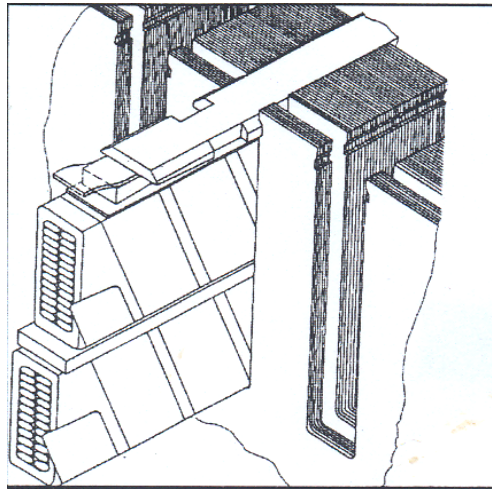
- Puede darse el caso en el que el bobinado final se encuentre en constante vibración, esto debido a las fuerzas de excitación. Si llegase a existir una posibilidad para un movimiento relativo entre el sistema de aislamiento y la fijación, es decir, cuando la fijación se llegara a aflojar, dañando consigo el aislamiento y al mismo tiempo puede ocurrir averías por cortocircuito.
- Cuando el bobinado final no se encuentra fijo de manera apropiada, éste puede colapsar durante una falla como un cortocircuito o una sincronización fuera de fase.

### **Sistema de Acuñaamiento de la Ranura del Estator**

Como se mencionó en el apartado anterior, el núcleo en la ranura es sujetado a una fuerza alternativa que actúa al doble de la frecuencia de la red. Lo anterior lleva a un deterioro del aislamiento del núcleo, para poder evitar este daño y las vibraciones excesivas, es necesario colocar un perfecto acuñaamiento de la ranura. Este acuñaamiento de la ranura debe cumplir con los siguientes requisitos, para que de esta manera se logre contrarrestar los fenómenos antes mencionados (vibración excesiva y daños en el aislamiento):

- El acuñaamiento radial de las varillas para ser capaz de tomar las fuerzas descritas anteriormente, tiene que estar bajo todas las condiciones operantes.
- La fijación lateral de las varillas en la ranura, debe garantizar un contacto permanente de la varilla con la pared de la ranura para poder prevenir un efecto corona en la parte de la ranura. Al igual que la fijación anterior, ésta también debe de trabajar bajo todas las condiciones de operación de servicio y temperaturas posibles. Preferentemente se hace uso de un sistema Semi-Elástico.

Figura 17. Acuñaamiento de la ranura del Estator



FUENTE: MANUALES DE MANTENIMIENTO PLANTA HIDROELÉCTRICA CHIXOY

La ranura es cerrada con una cuña de doble inclinación y las varillas son fijadas firmemente en la ranura con un componente semi-elástico. Con este sistema se asegura un buen acuñaamiento en la dirección radial y tangencial bajo todas las condiciones de servicio.

Un acuñaamiento incorrecto o flojo y un sistema inadecuado de llenado entre la varilla y la ranura, da lugar a la destrucción del aislamiento de la propia varilla, esta destrucción es causada por los siguientes efectos:

- La vibración conduce a un movimiento relativo entre el aislamiento y el núcleo. De este modo el aislamiento es destruido mecánicamente.
- El aislamiento también puede ser destruido eléctricamente, debido a las descargas excesivas de corona. Esto sucede debido al mal contacto eléctrico entre el aislamiento y el núcleo, lo cual genera una descarga externa en la parte de la ranura.
- En cualquiera de los casos anteriores, la destrucción del aislamiento, puede causar serios daños en la máquina si el problema se pasa desapercibido. Si este fuera el caso, es casi seguro que ocurra un cortocircuito y exponer a la máquina a fuertes esfuerzos por las corrientes del cortocircuito y las fuerzas mecánicas.

A continuación, se enlistan algunas de las operaciones que pueden ser aplicadas para evitar una máquina fuera de línea debido a un mal acuñaamiento de la ranura:

- El monitoreo de las Descargas Parciales puede ayudar a detectar descargas a tiempo. Mejoras del acuíñamiento lateral de las varillas si es necesario, utilizando un método de empaquetadura circular.
- Revisión periódica del acuíñamiento de la ranura, para determinar si es necesario un re-acuíñamiento. Éste hasta cierto punto sencillo si se cuenta con las cuñas dobles afiladas.

### **Fuerzas Magnéticas debido a un Entrehierro no uniforme**

Al momento de poner en operación a la máquina con un entrehierro no uniforme, se genera una fuerza en la dirección del entrehierro mínimo. En una máquina perfectamente circular, la fuerza creada por el polo opuesto compensa las fuerzas de tracción en cada polo hacia el estator. Tan pronto como el entrehierro en los dos polos opuestos ya no es igual, se genera una fuerza resultante en dirección del entrehierro mínimo; esta fuerza tiende a reducir aún más este entrehierro.

Los siguientes son posibles causas que llevan a un entrehierro no uniforme:

- El Rotor no se encuentra correctamente centrado en el Estator. Debido a esto se genera una fuerza magnética estática en dirección del entrehierro.
- Los polos no están montados de manera uniforme en el rotor. Gracias a esto el entrehierro en los diferentes polos no es igual, por consiguiente, una fuerza resultante es creada. Esta fuerza se encuentra rotando con el Rotor y apuntando en dirección del entrehierro.
- De igual manera, puede darse el caso en el que el Estator ya no es circular debido a la deformación (óvalo), tal y como puede darse el caso con los sistemas del elemento deslizante. Esto puede ser evitado, al utilizarse elementos oblicuos. La fuerza estática resultante apunta a la dirección del entrehierro más pequeño.

Las siguientes afirmaciones, son resultado del análisis de las situaciones anteriores:

- La fuerza es dirigida al entrehierro mínimo y es directamente proporcional a la excentricidad.
- La fuerza magnética máxima, aparece durante el comienzo de la excitación de la máquina.

### **Resonancia de la Reacción de Inducido**

Esta falla es también llamada Fuerzas Magnéticas debido al Bobinado del Estator. Cuando una corriente está circulando en el Bobinado del Estator, comienza a

aparecer la llamada reacción de inducido con la densidad del flujo del polo, creando de esta manera la fuerza de tracción. En la máquina, estas fuerzas son compensadas desde un polo a otro y no son consideradas las fuerzas adicionales. Las fuerzas que aparecen debido a este fenómeno pueden llevar a incitar vibraciones del núcleo del estator de 100 a 120Hz. Este problema no aparece como una consecuencia de la edad de la máquina o perturbación de la misma, sino está considerada como “dentro de la máquina” desde el principio. Durante el proceso de diseño, el diseño correcto del Bobinado encajado en la estructura del Estator, debe de ser considerado y calculado cuidadosamente.

Si el problema aparece en una máquina existente debido al mal diseño del Bobinado y del Estator, se puede solucionar este problema recurriendo a una modificación del Bobinado del Estator o una modificación mecánica al montaje del Estator, para poder cambiar las frecuencias propias de la estructura.

### **Sistema de Presión del Núcleo del Estator**

El núcleo del estator se encuentra permanentemente excitado cuando los niveles de vibración oscilan en 100 o 120Hz. Si la presión en el núcleo no es suficiente, las láminas del estator se mueven una en contra de la otra y pueden ocurrir daños en el aislamiento de las mismas. Debido a estos daños en la capa aislante, un sobrecalentamiento puede llegar a destruir el núcleo del estator. Por lo tanto es necesario contar con un sistema de presión confiable y permanente en el núcleo del Estator. Generalmente los núcleos del Estator son presionados en rangos de 1.0 hasta 1.5Mpa.

### **Cojinetes**

Los daños que se pueden presentar en los cojinetes son tan diversos como numerosos, a continuación se listan algunos de los más comunes:

- Daños en el revestimiento del cojinete debido a partículas suspendidas, contaminación del aceite por residuos de fabricación o la puesta en marcha, poco mantenimiento o bien debido a un mal funcionamiento en el sistema de filtrado.
- Puede ocurrir desgaste a través de una lubricación parcial en las zonas del cojinete donde las presiones más altas son creadas.
- Sobrecalentamiento de la superficie del cojinete del cojinete, puede ocasionar grietas intercrystalinas.

- La erosión es consecuencia de las vibraciones de frecuencia alta. Mientras que la cavitación se debe a la implosión repetida de las cavidades de vapor que se encuentran cerca de la superficie.
- Las estrías en la superficie del cojinete son debidas a la contaminación del aceite por grandes y pesadas partículas introducidas durante la filtración.
- Puede darse el fenómeno de un desplazamiento del metal blanco (metal antifricción), debido a la mala alineación del adaptador o una sobrecarga de éste.
- Las fisuras a causa de la fatiga ocurren cuando el límite de fatiga del material del cojinete a una temperatura de operación es excedida.
- Puede ocurrir un desgaste por fricción, tan pronto se produce una mala lubricación con un incremento progresivo de temperatura y por consiguiente se genera un contacto de metal con metal en el cojinete.
- El cojinete también puede ceder por fatiga debido a las excesivas fluctuaciones de presión en la película de aceite lubricante.

Puede darse el caso de la aparición de una grieta térmica en la superficie debido a una pronunciada lubricación mezclada. La generación de calor aumenta rápidamente y se da la mayor expansión relativa del metal blanco, con la expansión del acero, resultando en una alta compresión del metal del cojinete, así, en refrigeración, grandes fuerzas de tensión ocurren, dando como resultado la fisura del metal blanco.





## CONCLUSIONES

1. Con la implementación de un sistema de monitoreo en tiempo real, es posible lograr identificar cualquier posible falla en los equipos de producción, incluso antes de alcanzar los límites de alarma.
2. Estos sistemas de monitoreo, permiten introducir cambios en la configuración inicial, con la finalidad de adaptar el proceso productivo a las exigencias del entorno.
3. El manejo y la interpretación de toda la información obtenida a través de la implementación de un sistema de monitoreo en tiempo real de las variables de funcionamiento, son una herramienta de importante utilidad para la toma de decisiones a corto, mediano y largo plazo.
4. La utilización de un sistema de registros de variables en tiempo real, hace posible, minimizar los recursos a utilizar durante el proceso de producción, y de igual manera logra optimizarlos, con el beneficio directo de una reducción de costos.
5. Los programas de Mantenimiento para todo equipo de producción, se ven beneficiados a través de la utilización de la información generada por estos sistemas de monitoreo en línea, ya que permite desarrollar o implementar programas de mantenimiento con mayor alcance, detalle y exactitud.
6. Se deberá tener de manera clara y precisa la determinación y definición de todas y cada una de las variables involucradas en el proceso productivo, para llegar a alcanzar un monitoreo eficiente.
7. Así como en el caso de las Centrales Hidroeléctricas, los sistemas de monitoreo en tiempo real son adaptables a todo proceso productivo, siempre y cuando se tengan de manera clara y definida las variables a monitorear.



## RECOMENDACIONES

1. En la implementación de un sistema de registros de variables en tiempo real, debe prevalecer un criterio claro y definido en cuanto al alcance y determinación de las variables.
2. La configuración del sistema operativo (*software*), deberá estar vinculado con todas y cada una de las variables que se desean monitorear durante el proceso de producción.
3. Para la determinación de las variables a monitorear, es imprescindible poseer conocimiento completo del proceso de producción a considerarse dentro del sistema a implementar.
4. El manejo de la información registrada mediante este sistema debe estar a cargo de personal que posea conocimientos básicos de equipo y programas de cómputo.
5. Se debe mantener de forma continua y completa el registro y análisis de toda la información que genera un Sistema de Registros de Variables en Tiempo Real; que con esta información se facilita y se alcanza un nivel mayor de exactitud en cuanto a los programas de Mantenimiento.
6. En materia de políticas de reducción y optimización de recursos en un proceso productivo, es fundamental disponer de una información de lo más completa posible; por lo que es a través de un Sistema de Registros de Variables en Tiempo Real que se logra de manera directa y constante. Con indicativos que permitan visualizar el grado de utilización de los recursos.

7. Decisiones que deban tomarse, ya sea a corto, mediano y largo plazo, dentro de un proceso productivo; su grado de facilidad y exactitud están en función directa de la información que se tenga al alcance del propio desarrollo del proceso, para lo cual se requiere tener registros en tiempo real, para que de esta manera se pueda anticipar a efectuar cambios, mejorar o bien ampliaciones al proceso en sí.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Giuseppe Galasso, Martin Märke. "New developments in Diagnosis and Monitoring techniques for Hydro Generators", Centrales Hidroeléctricas hacia la Próxima Centuria. Barcelona, Junio 1995.
2. Martin Märke. "Hydro Power Monitoring (HPM), The HPM Concept – Recent Developments in "On line" Monitoring for Large Hydro Machinery Applications", Diseño, Prueba y Monitoreo de Centrales Hidroeléctricas II. Lausanne. Julio 1996.
3. ABB Power Generation Ltd., "Function description of the Vibration Module of the HPM System", Birr, Suiza, Abril 1998.
4. ABB Power Generation Ltd., "Function description of the Air Gap Module of the HPM System", Birr. Suiza, Abril 1998.
5. Biechl, Georg; Oettli, Thomas; Reichert, Konrad; "Electromagnetic Monitoring of Synchronous Machines"; Conferencia Internacional en Máquinas Eléctricas, Vigo, España, Septiembre 1997.
6. Märke, Martin. "Hydro Power Monitoring". Lausanne, Suiza, Julio 1996.
7. Large synchronous machines ABB Infotema. Norway. Grandes Máquinas sincronizadas, ABB Infotema, Marzo, 1993. ABB Kraft AS, ENE, Drammen, Noruega.
8. Micadur Insulation System – Document OG 01-0030 E; ABB Industrie AG, Dept. IME, Birr.
9. ISO 7146: Cojinetes planos, estándares internacionales 1993.

10. The Evolution of the Synchronous Machine; Prof. Gerhard Neidhöfer;  
Published with ABB, Zürich, Suiza. Review 1/1992.

11. Ing. Luis Alfredo Grajeda. Entrevista.

12. Manuales de Mantenimiento; Planta Hidroeléctrica Chixoy.